



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
—ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837—

ΤΜΗΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟ ΛΟΓΙΣΜΟ

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΧΕΛΙΩΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2026

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΧΕΛΙΩΤΗΣ
Καθηγητής, Τμήμα Μαθηματικών
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Εισαγωγή στον στοχαστικό λογισμό



Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά
Συγγράμματα και Βοηθήματα
www.kallipos.gr

Εισαγωγή στον στοχαστικό λογισμό

Συγγραφή

Δημήτρης Χελιώτης

Κριτικός αναγνώστης

Μιχάλης Λουλάκης

Συντελεστές έκδοσης

Γλωσσική Επιμέλεια: Θεόφιλος Τραμπούλης



Το παρόν έργο αδειοδοτείται υπό τους όρους της άδειας Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 3.0. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής επισκεφτείτε τον ιστότοπο

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/gr/>

ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 15780 Ζωγράφου

www.kallipos.gr

ISBN:978-960-603-297-4

Περιεχόμενα

Πρόλογος	vii
Σύμβολα	ix
I Δέσμευση και martingales	1
1 Εισαγωγικά	3
1.1 Η σ-άλγεβρα ως πληροφορία	3
1.2 Σ-άλγεβρα παραγόμενη από διαμέριση	3
1.3 Μετρήσιμες συναρτήσεις	4
1.4 Σ-άλγεβρα παραγόμενη από συναρτήσεις	5
1.5 Οι χώροι L^p	6
1.6 Ειδικές συναρτήσεις στο \mathbb{R}	7
1.6.1 Κυρτές συναρτήσεις	7
1.6.2 Δεξιά συνεχείς συναρτήσεις	8
1.7 Ορολογία	8
2 Δεσμευμένη μέση τιμή	9
2.1 Ορισμός	9
2.2 Σημασία τής δεσμευμένης μέσης τιμής	12
2.3 Βασικές ιδιότητες	13
2.4 Η δεσμευμένη μέση τιμή ως προβολή	17
3 Martingales	21
3.1 Ορισμός και παραδείγματα	21
3.2 Βασικές ιδιότητες	24
3.3 Παιχνίδια και το διακριτό στοχαστικό ολοκλήρωμα	25
3.4 Χρόνοι διακοπής	26
3.5 Το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής	28
3.6 Εφαρμογές στον συμμετρικό απλό τυχαίο περίπατο στο \mathbb{Z}	29
3.7 Ανισότητα Doob	33
4 Ανεξίτητες σε συνεχή χρόνο	37
4.1 Ανεξίτητες	37
4.2 Ισοδυναμία ανεξίτητων	38
4.3 Martingales και χρόνοι διακοπής	40
4.4 Ιδιότητες Markov*	43
II Κίνηση Brown	47
5 Κατασκευή τής κίνησης Brown και απλές ιδιότητες	49
5.1 Ορισμός, ύπαρξη, και μοναδικότητα	49

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

5.2	Απλές ιδιότητες	51
5.3	Πλήρωση τού χώρου, επαυξημένη διήθηση, χρόνοι εισόδου	54
5.3.1	Ιδιότητα μετατόπισης για τη νέα διήθηση	55
5.3.2	Χρόνος πρώτης εισόδου	55
5.3.3	Μετρησιμότητα τής κίνησης Brown στον χώρο γινόμενο	56
5.4	Συμπεριφορά στο άπειρο*	56
5.5	Επισκέψεις στο 0	57
5.6	Πολυδιάστατη κίνηση Brown	59
5.7	Ο χώρος $C_S([0, \infty))$	60
5.8	Η κίνηση Brown ως φυσιολογικό αντικείμενο	60
6	Η ισχυρή ιδιότητα Markov και συνέπειες*	64
6.1	Η ισχυρή ιδιότητα Markov	64
6.2	Η αρχή τής ανάκλασης	65
6.3	Άλλες εφαρμογές	67
7	Martingales και κίνηση Brown	69
7.1	Martingales σχετικά με την κίνηση Brown	69
7.2	Έξοδος από διάστημα και από ημιευθεία	70
8	Αναλυτικές ιδιότητες	74
8.1	Βαθμός συνέχειας*	74
8.2	Μη διαφορισιμότητα*	76
8.3	Κύμανση και τετραγωνική κύμανση	77
III	Το ολοκλήρωμα Itô	81
9	Κατασκευή τού ολοκληρώματος	83
9.1	Η κίνηση Brown ως ολοκληρωτής. Μια θεμελιώδης δυσκολία	83
9.2	Ολοκλήρωση απλών μετρήσιμων ανελίξεων	84
9.3	Επέκταση σε μετρήσιμες ανελίξεις	86
9.4	Υπολογισμοί κάποιων ολοκληρωμάτων	88
9.5	Το ολοκλήρωμα και δέσμευση	89
9.6	Μετρησιμότητα ολοκληρωμάτων Lebesgue	91
10	Το ολοκλήρωμα ως ανέλιξη	94
10.1	Συνεχής εκδοχή	94
10.2	Τοπικότητα τού ολοκληρώματος*	95
11	Επεκτάσεις τού ολοκληρώματος	98
11.1	Περισσότεροι ολοκληρωτέοι	98
11.2	Περισσότεροι ολοκληρωτές	99
11.3	Ο ορισμός τής επέκτασης*	100
12	Ο τύπος τού Itô	103
12.1	Τύπος Itô. Η απλούστερη μορφή	103
12.2	Τύπος Itô. Μια μικρή γενίκευση	104
12.3	Τύπος Itô στις πολλές διαστάσεις	105
12.4	Τύπος Itô για ανελίξεις Itô	106
12.5	Ο τύπος Itô σε γενικά χωρία	110

IV Εφαρμογές	113
13 Εφαρμογές στην κίνηση Brown	115
13.1 Αρμονικές συναρτήσεις και το πρόβλημα εξόδου	115
13.2 Έξοδος από δακτύλιο και επαναληπτικότητα	116
14 Στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις	121
14.1 Γενικά	121
14.2 Χρήση στη μοντελοποίηση	122
14.3 Παραδείγματα	122
14.4 Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης	124
15 Επίλυση ειδικών μορφών ΣΔΕ	127
15.1 Συντελεστές γραμμικοί ως προς X	127
15.2 Συντελεστής διάχυσης γραμμικός ως προς X	128
15.3 Λύση τής μορφής $f(t, B_t)$	129
16 Χαρτοφυλάκια και arbitrage	132
16.1 Αγορές μετοχών	132
16.2 Το επιτόκιο τής τράπεζας	132
16.3 Ανοιχτή πώληση	133
16.4 Αυτοχρηματοδοτούμενα χαρτοφυλάκια	133
16.5 Arbitrage	134
16.6 Παράγωγα προϊόντα και αναπαράγοντα χαρτοφυλάκια	135
17 Ευρωπαϊκά παράγωγα	137
17.1 Ευρωπαϊκά δικαιώματα	137
17.2 Σχέση μεταξύ τιμών δικαιωμάτων αγοράς και πώλησης	139
17.3 Άλλα είδη δικαιωμάτων	140
18 Η εξίσωση Black-Scholes	142
18.1 Μια απλή αγορά	142
18.2 Παραγωγή τής εξίσωσης	142
18.3 Η εξίσωση θερμότητας	144
18.4 Λύση τής εξίσωσης Black-Scholes	146
18.5 Ειδική περίπτωση. Ευρωπαϊκό δικαίωμα αγοράς	147
Παραρτήματα	151
A' Πιθανότητες	151
A'.1 Γκαουσιανές τυχαίες μεταβλητές	151
A'.2 Σύγκλιση κατά κατανομή	155
B' Ανάλυση	157
B'.1 Χώροι Hilbert	157
B'.2 Το ολοκλήρωμα Riemann-Stieltjes	158
B'.3 Συναρτήσεις σε χώρους γινόμενο	159
Γ' Τεχνικά αποτελέσματα I	162
Δ' Τεχνικά αποτελέσματα II	173
Υποδείξεις για επιλεγμένες ασκήσεις	178

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Βιβλιογραφία	185
Ευρετήριο ελληνικών όρων	187
Ευρετήριο ξενόγλωσσων όρων	188
Μετάφραση ορολογίας	189

Πρόλογος

Οι στοχαστικές ανελίξεις συνεχούς χρόνου μοντελοποιούν μεγέθη των οποίων η τιμή μεταβάλλεται τυχαία ή απρόβλεπτα. Τυπικά παραδείγματα είναι η τιμή μιας μετοχής ή το πλήθος των ατόμων ενός συγκεκριμένου ζωικού είδους σε ένα οικοσύστημα. Πέρα από τις εφαρμογές που έχουν σε διάφορους τομείς όπως η Φυσική, η Βιολογία, και τα Οικονομικά, οι στοχαστικές ανελίξεις έχουν από μόνες τους μαθηματικό ενδιαφέρον. Μπορούν να ειπωθούν ως τυχαίες συναρτήσεις και για τη μελέτη των ιδιοτήτων τους θα θέλαμε να χρησιμοποιήσουμε τα εργαλεία του απειροστικού λογισμού. Όμως οι πιο σημαντικές ανελίξεις σε συνεχή χρόνο, με χαρακτηριστικό εκπρόσωπο την κίνηση Brown, είναι μη διαφορίσιμες συναρτήσεις. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε από τη δεκαετία του 1940 και έπειτα ο Στοχαστικός Λογισμός, που σκοπό έχει να παρακάμψει αυτό το πρόβλημα. Δημιουργός και πρωτεργάτης του ήταν ο Kiyosi Itô (1915-2008). Αυτές οι σημειώσεις είναι μια εισαγωγή σε αυτόν τον λογισμό.

Οι σημειώσεις απευθύνονται σε προπτυχιακούς φοιτητές που έχουν ασχοληθεί με τις στοιχειώδεις πιθανότητες και έχουν κάποια τριβή με τις μετροθεωρητικές πιθανότητες (ή τη θεωρία μέτρου) και την πραγματική ανάλυση. Από τις μετροθεωρητικές πιθανότητες θεωρούνται δεδομένα η σχετική με μετρήσιμες συναρτήσεις ορολογία, οι τρόποι σύγκλισης ακολουθιών μετρήσιμων συναρτήσεων, τα οριακά θεώρημα (μονότονης και κυριαρχημένης σύγκλισης), και οι βασικές ιδιότητες της ανεξαρτησίας σ-αλγεβρών και τυχαίων μεταβλητών. Από την πραγματική ανάλυση θεωρούνται δεδομένα τα εντελώς βασικά στοιχεία της θεωρίας των πλήρων μετρικών χώρων.

Τα θέματα που μελετούμε είναι τα martingales σε διακριτό χρόνο, η κίνηση Brown, το στοχαστικό ολοκλήρωμα (ολοκλήρωμα Itô), και ο τύπος του Itô.

Η έκθεση του υλικού γίνεται σε τέσσερα μέρη.

I. Εισάγεται η έννοια της δεσμευμένης μέσης τιμής και έπειτα του martingale. Από την θεωρία των martingales, καλύπτουμε μόνο το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής και όχι το θεώρημα σύγκλισης, επειδή χρειαζόμαστε το πρώτο ως υπολογιστικό εργαλείο, ενώ δεν χρειαζόμαστε εφαρμογές του δεύτερου.

II. Στο δεύτερο μέρος ασχολούμαστε με την κίνηση Brown. Γίνεται λεπτομερειακά μια κατασκευή της και βλέπουμε βασικές ιδιότητες της, κυρίως αναλυτικές. Για τη συνέχεια των σημειώσεων αρκούν οι Παράγραφοι 5.1, 5.2, 5.6, 8.3. Τα υπόλοιπα αποτελέσματα στόχο έχουν την τριβή με την κίνηση Brown, αλλά και να δείξουν τι πλούσιες και εξωτικές ιδιότητες έχει.

III. Αυτό το μέρος είναι το βασικότερο των σημειώσεων. Συνδυάζουμε πράγματα που είδαμε σε προηγούμενα κεφάλαια (κίνηση Brown, martingales, μετροθεωρητικά αποτελέσματα) για να κατασκευάσουμε το ολοκλήρωμα Itô. Βλέπουμε βασικές ιδιότητές του (συνεχής εκδοχή, martingale) και αποδεικνύουμε διάφορες μορφές του τύπου του Itô.

IV. Στο τελευταίο μέρος βλέπουμε τρεις εφαρμογές του τύπου του Itô. Στην πρώτη, χρησιμοποιούμε τον τύπο για να εξετάσουμε την κίνηση Brown σε διάφορες διαστάσεις ως προς την επαληθευτικότητα. Στη δεύτερη, λύνουμε με χρήση του τύπου κάποιες στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις. Πολλές από αυτές τις εξισώσεις εμφανίζονται φυσιολογικά σε περιοχές όπως η φυσική και τα χρηματοοικονομικά. Η τρίτη εφαρμογή είναι η απόδειξη της μερικής διαφορικής εξίσωσης Black-Scholes για τιμολόγηση παραγώγων Ευρωπαϊκού τύπου.

Αποδείξεις τεχνικών αποτελεσμάτων έχουν συγκεντρωθεί σε δύο παραρτήματα. Στο «Τεχνικά αποτελέσματα I» περιέχονται αποδείξεις που είναι ωφέλιμο να διαβάσει κανείς αφού έχει αποκτήσει ευχέρεια με την υπόλοιπη ύλη των σημειώσεων. Στο «Τεχνικά αποτελέσματα II» περιέχονται αποδείξεις που είναι πιο τεχνικές από αυτές του προηγούμενου παραρτήματος και δεν είναι απα-

ραίτητο να τις διαβάσει κανείς. Αρκεί να καταλαβαίνει τι λένε οι εκφωνήσεις των θεωρημάτων που τους αντιστοιχούν. Κάποιες παράγραφοι έχουν σημειωθεί με «*». Είναι κάπως περισσότερο απαιτητικές και δεν χρησιμοποιούνται στο υπόλοιπο των σημειώσεων.

Ο στοχαστικός λογισμός είναι ένα αντικείμενο που δεν το μαθαίνει κανείς μονομιάς αλλά σε διαδοχικά περάσματα αυξανόμενης κάλυψης και γενικότητας. Αυτές οι σημειώσεις στοχεύουν να είναι το πρώτο πέρασμα και να ετοιμάσουν τον αναγνώστη για τη μελέτη πιο περιεκτικών παρουσιάσεων τού αντικειμένου [Steele (2001), Durrett (1996), Karatzas and Shreve (1991), Revuz and Yor (1999)]. Έτσι, θέματα που μαθαίνει κανείς σε ένα πρώτο μεταπτυχιακό μάθημα σχετικό με martingales, κίνηση Brown, και στοχαστικό λογισμό παραλείπονται. Τέτοια θέματα είναι η ομοιότητα ολοκληρωσιμότητα, το θεώρημα σύγκλισης των martingales, ο νόμος 0-1 του Blumenthal, η αλλαγή χρόνου, το θεώρημα Girsanov, το θεώρημα αναπαράστασης των martingales, οι γεννήτορες διαχύσεων, και η θεωρία ολοκλήρωσης ως προς συνεχή ή ασυνεχή semimartingales [Protter (2005)].

Ευχαριστώ τον συνάδελφο Αντώνη Τσολομούτη για τη βοήθεια σε θέματα Latex και τη διαμόρφωση τής εμφάνισης τού κειμένου, δύο ανώνυμους αξιολογητές που στο πλαίσιο τού προγράμματος «Κάλλιπος» έκαναν χρήσιμες παρατηρήσεις σε προηγούμενη έκδοση των σημειώσεων, και τον συνάδελφο Μιχάλη Λουλάκη που μελέτησε προσεκτικά τις σημειώσεις και έκανε πολλές διορθώσεις και προτάσεις για προσθήκες/αλλαγές, οι οποίες συνέβαλαν στη σημαντική βελτίωση των σημειώσεων.

Δημήτρης Χελιώτης
30 Μαρτίου 2026

Σύμβολα

\mathbb{N} : το σύνολο των μη αρνητικών ακεραίων $\{0, 1, 2, \dots\}$

\mathbb{N}^+ : το σύνολο των θετικών ακεραίων $\{1, 2, \dots\}$

Για $n \in \mathbb{N}^+$,

$$[n] := \{1, 2, \dots, n\}.$$

Για ακολουθία συνόλων $(A_n)_{n \geq 1}$,

$$\limsup_n A_n := \bigcap_{n=1}^{\infty} \bigcup_{k=n}^{\infty} A_k,$$

$$\liminf_n A_n := \bigcup_{n=1}^{\infty} \bigcap_{k=n}^{\infty} A_k.$$

Για A, B σύνολα, $A \subset B$: το A είναι υποσύνολο του B (όχι απαραίτητα γνήσιο).

Για A, B σύνολα, $A \setminus B := \{x \in A : x \notin B\}$.

Για X σύνολο,

$$\mathcal{P}(X) := \{A : A \subset X\},$$

το δυναμοσύνολο του X .

Για X τοπολογικό χώρο,

$\mathcal{B}(X)$: η σ -άλγεβρα των Borel υποσυνόλων του X .

Για $x, y \in \mathbb{R}$,

$$x \wedge y := \min\{x, y\},$$

$$x \vee y := \max\{x, y\}.$$

Για $x \in \mathbb{R}$,

$$x^+ = x \vee 0 = \begin{cases} x & \text{αν } x > 0, \\ 0 & \text{αν } x \leq 0, \end{cases} \quad x^- = (-x) \vee 0 = \begin{cases} -x & \text{αν } x < 0, \\ 0 & \text{αν } x \geq 0. \end{cases}$$

Για X, Y τυχαίες μεταβλητές,

$$X \stackrel{d}{=} Y$$

σημαίνει ότι οι X, Y έχουν την ίδια κατανομή.

Για $(a_n)_{n \geq 1}, (b_n)_{n \geq 1}$ ακολουθίες πραγματικών αριθμών,

$$a_n \sim b_n$$

σημαίνει ότι $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n/b_n = 1$.

Μέρος I

Δέσμευση και martingales

1

Εισαγωγικά

1.1 Η σ-άλγεβρα ως πληροφορία

Στη θεωρία μέτρου, όταν δουλεύει κανείς σε έναν χώρο X , συνήθως έχει διαλέξει μια αρκετά μεγάλη σ-άλγεβρα στον X έτσι ώστε όλα τα σύνολα που εμφανίζονται να ανήκουν σε αυτήν. Ο ρόλος της είναι να αποτρέψει προβλήματα/παράδοξα.

Αντίθετα, στις πιθανότητες η σ-άλγεβρα έχει διαισθητικό νόημα. Χρησιμοποιείται για να κωδικοποιήσει «πληροφορία» και συχνά, όταν δουλεύουμε σε έναν χώρο, θεωρούμε πολλές σ-άλγεβρες. Ένας χώρος πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ μοντελοποιεί ένα πείραμα. Για κάθε πραγματοποίηση $\omega \in \Omega$ του πειράματος, η πληροφορία που θεωρούμε ότι μας δίνει η σ-άλγεβρα \mathcal{F} είναι σε ποια στοιχεία της ανήκει το ω και σε ποια όχι. Περισσότερα για αυτή την οπτική θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Παράδειγμα 1.1. Για τη ρίψη ενός ζαριού, ο φυσιολογικός δειγματικός χώρος είναι ο $\Omega := \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ και συνήθως θεωρούμε ως σ-άλγεβρα για το πείραμα την $\mathcal{F} := \mathcal{P}(\Omega)$. Η \mathcal{F} δίνει όλη την πληροφορία για το αποτέλεσμα μιας πραγματοποίησης αφού περιέχει τα μονοσύνολα $\{1\}, \dots, \{6\}$. Η πληροφορία που παρέχει η σ-άλγεβρα

$$\mathcal{F}_1 := \{\emptyset, \Omega, \{1, 3, 5\}, \{2, 4, 6\}\}$$

είναι μόνο αν η ένδειξη τού ζαριού είναι άρτιος ή περιττός. Δεν μπορεί να διακρίνει τα αποτελέσματα 1 και 3. Έτσι περιέχει λιγότερη πληροφορία από την \mathcal{F} .

1.2 Σ-άλγεβρα παραγόμενη από διαμέριση

Οι σ-άλγεβρες που παράγονται από διαμέριση εμφανίζονται σε πολλά πιθανοτικά μοντέλα και βοηθούν στην κατανόηση εννοιών που ορίζονται γενικά για όλες τις σ-άλγεβρες (π.χ., μετρησιμότητα, δέσμευση κτλ).

Υπενθυμίζουμε τον ορισμό τής σ-άλγεβρας παραγόμενης από μια οικογένεια συνόλων.

Ορισμός 1.2. Έστω X σύνολο και $\mathcal{C} \subset \mathcal{P}(X)$. Ορίζουμε

$$\mathcal{J} := \{\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X) : \mathcal{A} \supset \mathcal{C} \text{ και } \eta \mathcal{A} \text{ είναι } \sigma\text{-άλγεβρα}\},$$

δηλαδή το σύνολο των σ-άλγεβρών στο X που καθεμία τους περιέχει την οικογένεια \mathcal{C} . Η σ-άλγεβρα που παράγεται από τη \mathcal{C} ορίζεται ως η τομή όλων των σ-άλγεβρών στο X που περιέχουν τη \mathcal{C} και συμβολίζεται με $\sigma(\mathcal{C})$, δηλαδή

$$\sigma(\mathcal{C}) = \bigcap_{\mathcal{A} \in \mathcal{J}} \mathcal{A}.$$

Η $\sigma(\mathcal{C})$ περιέχει ακριβώς όλα τα $B \subset X$ με την ιδιότητα $B \in \mathcal{A}$ για κάθε σ-άλγεβρα \mathcal{A} στο X με $\mathcal{A} \supset \mathcal{C}$.

Αποδεικνύεται εύκολα ότι η $\sigma(\mathcal{C})$ είναι πράγματι σ-άλγεβρα που περιέχει την οικογένεια \mathcal{C} , και από την κατασκευή της είναι η μικρότερη με την ιδιότητα αυτή. Δηλαδή περιέχεται σε οποιαδήποτε σ-άλγεβρα περιέχει την \mathcal{C} . Προφανώς, αν η \mathcal{C} είναι σ-άλγεβρα, τότε $\sigma(\mathcal{C}) = \mathcal{C}$.

1.3 Μετρήσιμες συναρτήσεις

Μπορούμε να έχουμε στο μυαλό μας ότι η $\sigma(\mathcal{C})$ προκύπτει με την εξής αναδρομική διαδικασία. Ξεκινάμε με τη \mathcal{C} και, αν αυτή δεν είναι σ -άλγεβρα, π.χ., γιατί το συμπλήρωμα ενός στοιχείου της ή κάποια αριθμήσιμη ένωση στοιχείων της δεν είναι στοιχείο της, προσθέτουμε σε αυτή το σύνολο που ανακαλύψαμε ότι της λείπει. Αυτό πρέπει να το κάνουμε πολλές φορές με τη νέα οικογένεια που προκύπτει μετά την προσθήκη κάθε συνόλου. Κάποια στιγμή φτάνουμε σε μια οικογένεια που είναι σ -άλγεβρα και τότε σταματάμε, βρήκαμε τη $\sigma(\mathcal{C})$.

Παράδειγμα 1.3 (Σ -άλγεβρα παραγόμενη από αριθμήσιμη διαμέριση). Έστω X σύνολο και $\mathcal{C} := \{A_i : i \in I\}$ αριθμήσιμη διαμέριση τού X (δηλαδή τα A_i είναι μη κενά σύνολα, ξένα ανά δύο, με ένωση το X), με $I = \{1, 2, \dots, k\}$ για κάποιο $k \in \mathbb{N}^+$ ή $I = \mathbb{N}$. Για τη σ -άλγεβρα που παράγει η \mathcal{C} , έχουμε την εξής απλή περιγραφή,

$$\sigma(\mathcal{C}) = \left\{ \cup_{i \in J} A_i : J \subset I \right\}. \quad (1.1)$$

Δηλαδή ένα σύνολο τής $\sigma(\mathcal{C})$ είναι ένωση κάποιων στοιχείων τής διαμέρισης \mathcal{C} .

Ας ονομάσουμε \mathcal{A} το σύνολο στο δεξί μέλος τής παραπάνω σχέσης. Τότε έχουμε τα εξής:

- Η οικογένεια \mathcal{A} περιέχει τη \mathcal{C} . Πράγματι, οποιοδήποτε σύνολο τής \mathcal{C} είναι της μορφής A_{i_0} για κάποιο $i_0 \in I$. Η επιλογή $J = \{i_0\} \subset I$ στην περιγραφή στοιχείων τής \mathcal{A} δίνει $\cup_{i \in J} A_i = A_{i_0} \in \mathcal{A}$.
- Οποιαδήποτε σ -άλγεβρα \mathcal{A}_1 περιέχει τη \mathcal{C} πρέπει να περιέχει την \mathcal{A} . Γιατί οποιαδήποτε ένωση $\cup_{i \in J} A_i$ είναι αριθμήσιμη αφού το I είναι αριθμήσιμο. Και εφόσον η \mathcal{A}_1 είναι σ -άλγεβρα και περιέχει τα A_i με $i \in J$, θα περιέχει και την ένωσή τους.
- Η \mathcal{A} είναι σ -άλγεβρα. Πράγματι, η επιλογή $J = \emptyset$ δίνει $\cup_{i \in J} A_i = \emptyset$. Επίσης, αν πάρουμε A της μορφής $A = \cup_{i \in J} A_i$ για κάποιο $J \subset I$, τότε $X \setminus A = \cup_{i \in I \setminus J} A_i$ που είναι στοιχείο τής \mathcal{A} . Τέλος, αν έχουμε ακολουθία $(B_n)_{n \geq 1}$ στοιχείων τής \mathcal{A} με $B_n = \cup_{i \in J_n} A_i$, όπου $J_n \subset I$ για κάθε $n \geq 1$, τότε για $J := \cup_{n=1}^{\infty} J_n$ έχουμε $\cup_{n=1}^{\infty} B_n = \cup_{i \in J} A_i$ που πάλι είναι στοιχείο τής \mathcal{A} .

Συνδυάζοντας αυτές τις τρεις παρατηρήσεις παίρνουμε την (1.1).

1.3 Μετρήσιμες συναρτήσεις

Ορισμός 1.4. Έστω $(E, \mathcal{E}), (G, \mathcal{G})$ δυο μετρήσιμοι χώροι και $f : E \rightarrow G$ μια συνάρτηση. Η f λέγεται \mathcal{E}/\mathcal{G} -μετρήσιμη αν για κάθε $A \in \mathcal{G}$ ισχύει ότι $f^{-1}(A) \in \mathcal{E}$.

Όταν η \mathcal{G} υπονοείται, λέμε απλώς ότι η f είναι \mathcal{E} -μετρήσιμη. Όταν και οι δύο σ -άλγεβρες, \mathcal{E}, \mathcal{G} , υπονοούνται, λέμε απλώς ότι η f είναι μετρήσιμη.

Παράδειγμα 1.5 (Μετρήσιμες συναρτήσεις στην $\{\emptyset, X\}$). Έστω $\mathcal{A} = \{\emptyset, X\}$ η τετριμμένη σ -άλγεβρα στο X .

Ισχυρισμός: Μια συνάρτηση $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ είναι \mathcal{A} -μετρήσιμη αν και μόνο αν είναι σταθερή.

Πράγματι, αν η $f(x) = c$ για κάθε $x \in X$ όπου $c \in \mathbb{R}$ σταθερά, τότε για κάθε $A \subset \mathbb{R}$ σύνολο Borel έχουμε

$$f^{-1}(A) = \begin{cases} X & \text{αν } c \in A, \\ \emptyset & \text{αν } c \in \mathbb{R} \setminus A. \end{cases}$$

Επειδή λοιπόν $f^{-1}(A) \in \mathcal{A}$ για κάθε $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$, έχουμε ότι η f είναι \mathcal{A} -μετρήσιμη.

Έστω τώρα $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ που είναι \mathcal{A} -μετρήσιμη. Αν δεν είναι σταθερή, τότε παίρνει δύο διαφορετικές τιμές, έστω a, b με $a < b$. Υπάρχουν $x_1, x_2 \in X$ με $f(x_1) = a, f(x_2) = b$. Λόγω μετρησιμότητας πρέπει το σύνολο $\Delta := f^{-1}((-\infty, a])$ να ανήκει στην \mathcal{A} . Όμως $\Delta \neq \emptyset$ αφού περιέχει το x_1 , και $\Delta \neq X$ αφού δεν περιέχει το x_2 , επομένως $\Delta \notin \mathcal{A}$, άτοπο. Άρα η f πρέπει να είναι σταθερή.

Γενίκευση τού προηγούμενου παραδείγματος είναι το εξής.

Παράδειγμα 1.6 (Μετρήσιμες συναρτήσεις σε σ-άλγεβρα παραγόμενη από αριθμήσιμη διαμέριση). Τι μορφή έχουν οι πραγματικές συναρτήσεις που είναι μετρήσιμες ως προς τη σ-άλγεβρα $\sigma(\mathcal{C})$ πιο πάνω;

Ισχυρισμός: Μια $\sigma(\mathcal{C})$ -μετρήσιμη συνάρτηση $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ πρέπει να είναι σταθερή σε κάθε σύνολο τής διαμέρισης.

Πράγματι, έστω f μετρήσιμη και $i_0 \in I$. Ας υποθέσουμε ότι η f παίρνει δύο διαφορετικές τιμές $a < b$ στο A_{i_0} . Θα έπρεπε λοιπόν το σύνολο $A_{i_0} \cap \{f < b\}$ να ανήκει στη $\sigma(\mathcal{C})$. Όμως αυτό το σύνολο είναι μη κενό και γνήσιο υποσύνολο τού A_{i_0} . Τέτοιο σύνολο δεν υπάρχει στη $\sigma(\mathcal{C})$ (δες την περιγραφή τής $\sigma(\mathcal{C})$ στη (1.1)).

Επίσης, είναι εύκολο να δείξει κανείς ότι μια συνάρτηση που είναι σταθερή σε κάθε σύνολο τής διαμέρισης είναι μετρήσιμη. Άρα, αυτές είναι ακριβώς όλες οι μετρήσιμες συναρτήσεις στον $(X, \sigma(\mathcal{C}))$

Παρατήρηση 1.7. Αν $f_n : E \rightarrow \mathbb{R}, n \in \mathbb{N}$, είναι ακολουθία $\mathcal{E}/\mathcal{B}(\mathbb{R})$ -μετρήσιμων συναρτήσεων, τότε το σύνολο $A := \{x \in E : \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \text{ υπάρχει στο } \mathbb{R}\}$ είναι στοιχείο τής \mathcal{E} , και η συνάρτηση

$$f(x) := \begin{cases} \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) & \text{αν } x \in A, \\ 0 & \text{αν } x \in \mathbb{R} \setminus A, \end{cases}$$

είναι $\mathcal{E}/\mathcal{B}(\mathbb{R})$ -μετρήσιμη. Ο ισχυρισμός για το A έπεται από την

$$A = \bigcap_{r=1}^{\infty} \bigcup_{k=1}^{\infty} \bigcap_{m,n \geq k} \{f_m(x) - f_n(x) < 1/r\}.$$

1.4 Σ-άλγεβρα παραγόμενη από συναρτήσεις

Ορισμός 1.8. Έστω Ω σύνολο. Για μια συνάρτηση $f : \Omega \rightarrow [-\infty, \infty]$, ονομάζουμε **σ-άλγεβρα παραγόμενη από την f** το σύνολο

$$\sigma(f) := \{f^{-1}(A) : A \in \mathcal{B}([-\infty, \infty])\}.$$

Αυτή είναι η ελάχιστη σ-άλγεβρα \mathcal{A} στο Ω η οποία κάνει την f μετρήσιμη στον (Ω, \mathcal{A}) [Άσκηση]. Βέβαια αν στο Ω έχει ήδη οριστεί μία σ-άλγεβρα \mathcal{F} ώστε η f να είναι μετρήσιμη στον (Ω, \mathcal{F}) , τότε θα έχουμε $\sigma(f) \subset \mathcal{F}$.

Σε περίπτωση που έχουμε πολλές συναρτήσεις $\{f_i : i \in I\}$ ορισμένες στο σύνολο Ω και θέλουμε να βρούμε μία σ-άλγεβρα \mathcal{A} ώστε να είναι όλες μετρήσιμες στον (Ω, \mathcal{A}) , τότε πρέπει και αρκεί $\sigma(f_i) \subset \mathcal{A}$ για κάθε $i \in I$. Δηλαδή η \mathcal{A} να περιέχει την ένωση $\bigcup_{i \in I} \sigma(f_i)$. Από όλες τις \mathcal{A} που ικανοποιούν αυτή την ιδιότητα διαλέγουμε τη μικρότερη.

Ορισμός 1.9. Έστω Ω σύνολο. Αν η $\{f_i : i \in I\}$ είναι μια οικογένεια συναρτήσεων στο Ω με τιμές στο $[-\infty, \infty]$, ονομάζουμε **σ-άλγεβρα παραγόμενη από τις συναρτήσεις $\{f_i : i \in I\}$** το σύνολο

$$\sigma(\{f_i : i \in I\}) := \sigma\left(\bigcup_{i \in I} \sigma(f_i)\right). \quad (1.2)$$

Αυτή είναι η ελάχιστη σ-άλγεβρα που κάνει όλες τις $f_i : i \in I$ μετρήσιμες.

Παράδειγμα 1.10 (Ακολουθία ρίψεων νομίσματος). Παίρνουμε $\Omega = \{-1, 1\}^{\mathbb{N}^+}$. Μπορούμε να δούμε αυτό το σύνολο ως τον δειγματικό χώρο για μια ακολουθία ρίψεων ενός νομίσματος. Το -1 παριστά το αποτέλεσμα «Κορώνα» και το 1 το αποτέλεσμα «Γράμματα». Για $n \in \mathbb{N}^+$, ορίζουμε

1.5 Οι χώροι L^p

τη συνάρτηση $X_n : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ με $X_n(\omega) = \omega_n$, όπου $\omega = (\omega_n)_{n \geq 1} \in \Omega$. Δηλαδή η X_n είναι η προβολή στη n -οστή συντεταγμένη. Η X_n παίρνει μόνο δύο τιμές. Οπότε η $\sigma(X_n)$ είναι ακριβώς το σύνολο $\{\emptyset, \Omega, A_{n,-1}, A_{n,1}\}$, με

$$A_{n,-1} := X_n^{-1}(\{-1\}) = \{\omega \in \Omega : \omega_n = -1\} = \{-1, 1\}^{n-1} \times \{-1\} \times \{-1, 1\}^{\mathbb{N}^+ \setminus [n]},$$

$$A_{n,1} := X_n^{-1}(\{1\}) = \{\omega \in \Omega : \omega_n = 1\} = \{-1, 1\}^{n-1} \times \{1\} \times \{-1, 1\}^{\mathbb{N}^+ \setminus [n]},$$

όπου $[n] := \{1, 2, \dots, n\}$.

Θα περιγράψουμε τώρα τη σ -άλγεβρα $\mathcal{F}_n := \sigma(\{X_1, X_2, \dots, X_n\})$. Για δεδομένη ακολουθία $s = (s_1, s_2, \dots, s_n) \in \{-1, 1\}^n$, θεωρούμε το σύνολο

$$A_s := \{(s_1, s_2, \dots, s_n, x_{n+1}, x_{n+2}, \dots) : x_i \in \{-1, 1\} \text{ για κάθε } i \geq n+1\}$$

$$= X_1^{-1}(\{s_1\}) \cap X_2^{-1}(\{s_2\}) \cap \dots \cap X_n^{-1}(\{s_n\}).$$

Δηλαδή το A_s περιέχει όλες τις άπειρες ακολουθίες από -1 και 1 που το αρχικό τους τμήμα είναι το s και μετά είναι ελεύθερες να έχουν ό,τι θέλουν. Για μια ακολουθία που ανήκει στο A_s , η συμπεριφορά της ως τον χρόνο n είναι γνωστή.

Ισχυρισμός: Η \mathcal{F}_n είναι η σ -άλγεβρα που παράγεται από τη διαμέριση $\mathcal{C} := \{A_s : s \in \{-1, 1\}^n\}$ του Ω .

Από τον ορισμό της η \mathcal{F}_n πρέπει να περιέχει τα $X_i^{-1}(\{s_i\})$ για $i = 1, 2, \dots, n$. Άρα, ως σ -άλγεβρα, περιέχει και το A_s , που είναι πεπερασμένη τομή των $X_i^{-1}(\{s_i\})$. Επομένως $\sigma(\mathcal{C}) \subset \mathcal{F}_n$. Από την άλλη, κάθε X_i με $1 \leq i \leq n$ είναι μετρήσιμη ως προς τη $\sigma(\mathcal{C})$. Για παράδειγμα,

$$X_i^{-1}(\{1\}) = \cup_{s \in \{-1, 1\}^n : s_i = 1} A_s$$

είναι πεπερασμένη ένωση στοιχείων της $\sigma(\mathcal{C})$, άρα στοιχείο της. Από την ελαχιστότητα της \mathcal{F}_n έπεται ότι $\mathcal{F}_n \subset \sigma(\mathcal{C})$ και ο ισχυρισμός αποδείχθηκε.

1.5 Οι χώροι L^p

Για $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ τυχαία μεταβλητή στον χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και $p \in [1, \infty)$, ορίζουμε

$$\|X\|_p = \{\mathbf{E}(|X|^p)\}^{1/p}$$

και

$$\mathcal{L}^p(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P}) := \{X \text{ τυχαία μεταβλητή στο } \Omega : \|X\|_p < \infty\}.$$

Όταν είναι σαφές ποιος είναι ο χώρος Ω και ποια η σ -άλγεβρα \mathcal{F} , γράφουμε $\mathcal{L}^p(\mathbf{P})$ αντί $\mathcal{L}^p(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$.

Αποδεικνύεται ότι η συνάρτηση $X \mapsto \|X\|_p$ ικανοποιεί τις ιδιότητες

$$\|\lambda X\|_p = |\lambda| \|X\|_p,$$

$$\|X + Y\|_p \leq \|X\|_p + \|Y\|_p,$$

για $X, Y \in \mathcal{L}^p(\mathbf{P})$ και $\lambda \in \mathbb{R}$. Έπεται ότι το σύνολο $\mathcal{L}^p(\mathbf{P})$ είναι διανυσματικός χώρος. Η συνάρτηση $\|\cdot\|_p$ θα ήταν νόρμα αν επιπλέον ικανοποιούσε την $\|X\|_p = 0 \Rightarrow X \equiv 0$. Όμως δεν την ικανοποιεί γιατί ενδέχεται μια τυχαία μεταβλητή X να μην είναι η μηδενική, αλλά να ισούται με 0 με πιθανότητα 1 , δηλαδή $\mathbf{P}(X = 0) = 1$, και επομένως να έχει $\|X\|_p = 0$. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι να ορίσουμε στον $\mathcal{L}^p(\mathbf{P})$ μια σχέση ισοδυναμίας: $X \sim Y$ αν $\mathbf{P}(X = Y) = 1$, δηλαδή δύο τυχαίες μεταβλητές τις ταυτίζουμε αν είναι ίσες με πιθανότητα 1 . Συμβολίζουμε το σύνολο των κλάσεων ισοδυναμίας με $L^p(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ ή $L^p(\mathbf{P})$.

1.6 Ειδικές συναρτήσεις στο \mathbb{R}

Σχεδόν όποια συνάρτηση έχουμε ορίσει σε τυχαίες μεταβλητές μπορούμε να ορίσουμε και για τα στοιχεία της $L^p(\mathbf{P})$. Πώς; Μέσω ενός αντιπροσώπου. Ας το δούμε για τη συνάρτηση $\|\cdot\|_p$. Έστω $H \in L^p(\mathbf{P})$ μία κλάση και X ένα στοιχείο της κλάσης (λέμε αυτό το στοιχείο **εκδοχή** της H). Ορίζουμε $\|H\|_p = \|X\|_p$. Ο ορισμός δεν εξαρτάται από την επιλογή του αντιπροσώπου X γιατί αν Y είναι άλλος αντιπρόσωπος, τότε $\mathbf{E}(|X|^p) = \mathbf{E}(|Y|^p)$ (αφού οι X, Y είναι σχεδόν παντού ίσες), οπότε $\|X\|_p = \|Y\|_p$. Από την άλλη, για μια $H \in L^p([0, 1], \mathcal{B}([0, 1]), \lambda)$ δεν έχει νόημα να μιλάμε για την τιμή $H(1)$ γιατί αν πάρουμε δύο αντιπροσώπους f, g από την κλάση H , δεν ισχύει απαραίτητα $f(1) = g(1)$.

Για μετροθεωρητικά θέματα, θεωρούμε δύο τυχαίες μεταβλητές που είναι ίσες με πιθανότητα 1 ταυτόσημα αντικείμενα. Με τον ίδιο τρόπο, βλέπουμε τον χώρο $L^p(\mathbf{P})$ ως χώρο τυχαίων μεταβλητών και όχι ως χώρο κλάσεων ισοδυναμίας. Τώρα η συνάρτηση $\|\cdot\|_p$ ορισμένη στον $L^p(\mathbf{P})$ είναι νόρμα γιατί για μία $X \in L^p(\mathbf{P})$ η $\|X\|_p = 0$ συνεπάγεται $\mathbf{P}(X = 0) = 1$, άρα η κλάση της X είναι η κλάση της μηδενικής συνάρτησης. Αυτή η κλάση είναι το 0 του διανυσματικού χώρου $L^p(\mathbf{P})$.

Πρόταση 1.11. (Ανισότητα Hölder) Έστω X, Y τυχαίες μεταβλητές, $p \in (1, \infty)$, και $q \in (1, \infty)$ τέτοιο ώστε $p^{-1} + q^{-1} = 1$. Τότε

$$\mathbf{E} |XY| \leq \|X\|_p \|Y\|_q.$$

Ειδική περίπτωση της ανισότητας Hölder ($p = q = 2$) είναι η ανισότητα Cauchy-Schwarz:

$$\mathbf{E} |XY| \leq \{\mathbf{E}(X^2)\}^{1/2} \{\mathbf{E}(Y^2)\}^{1/2}.$$

Πρόταση 1.12. Για κάθε τυχαία μεταβλητή X και $1 \leq r < s$, ισχύει

$$\|X\|_r \leq \|X\|_s.$$

Απόδειξη. Είναι συνέπεια της ανισότητας Hölder, όπου τη θέση της X έχει η $|X|^r$, την θέση της Y έχει η σταθερή συνάρτηση 1, $p = s/r$, και $q = s/(s - r)$. Δηλαδή,

$$\mathbf{E} |X|^r = \mathbf{E}(|X|^r 1) \leq \mathbf{E}(|X|^s)^{r/s} (\mathbf{E}(1^q))^{1/q} = \mathbf{E}(|X|^s)^{r/s}$$

και το συμπέρασμα έπεται. ■

Κατά συνέπεια $L^s(\mathbf{P}) \subset L^r(\mathbf{P})$. Ο τελευταίος εγκλεισμός όμως έπεται και πιο εύκολα από την παρατήρηση ότι $|X|^r \leq |X|^s + 1$ (το 1 καλύπτει την περίπτωση που $|X(\omega)| < 1$).

Η νόρμα $\|\cdot\|_p$ ορίζει μία μετρική d_p στον χώρο $L^p(\mathbf{P})$. Ισχύει το εξής σημαντικό αποτέλεσμα [Κουμουλλής και Νεγρεπόντης (1991), Θεώρημα 11.17].

Θεώρημα 1.13. Ο μετρικός χώρος $(L^p(\mathbf{P}), d_p)$ είναι πλήρης.

Όταν είναι σαφές ποιο είναι το μέτρο \mathbf{P} , τότε γράφουμε L^p αντί $L^p(\mathbf{P})$.

1.6 Ειδικές συναρτήσεις στο \mathbb{R}

1.6.1 Κυρτές συναρτήσεις

Έστω $I \subset \mathbb{R}$ διάστημα και $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ κυρτή συνάρτηση. Κατά τα γνωστά, η f είναι συνεχής στο εσωτερικό του I , επομένως για κάθε $A \subset \mathbb{R}$ σύνολο Borel, το $f^{-1}(A)$ ισούται με $(f|_I)^{-1}(A) \cup B$ όπου $B \subset \{a \in I : \text{το } a \text{ είναι άκρο του } I\}$. Άρα το $f^{-1}(A)$ είναι σύνολο Borel.

1.6.2 Δεξιά συνεχείς συναρτήσεις

Έστω $a, b \in \mathbb{R}, a < b$ και $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ συνάρτηση δεξιά συνεχής. Θα δείξουμε ότι είναι Borel-μετρήσιμη. Για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ ορίζουμε τη συνάρτηση $f_n : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ ως εξής:

$$f_n(x) = \begin{cases} f\left(a + \frac{k}{n}(b-a)\right) & \text{αν } x - a \in \left[\frac{k-1}{n}(b-a), \frac{k}{n}(b-a)\right) \text{ για κάποιο } k = 1, 2, \dots, n, \\ f(b) & \text{αν } x = b. \end{cases}$$

Η f_n ως κλιμακωτή συνάρτηση είναι Borel-μετρήσιμη. Η δεξιά συνέχεια της f συνεπάγεται ότι $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ για κάθε $x \in [a, b]$. Έπεται ότι η f είναι Borel-μετρήσιμη.

Το ίδιο αποτέλεσμα ισχύει και αν η f ορίζεται σε διάστημα άλλη μορφής.

1.7 Ορολογία

Έστω $(\mathcal{S}, \mathcal{A}, \mu)$ ένας χώρος μέτρου. Ένα $A \subset \mathcal{S}$ ονομάζεται μ -μηδενικό αν υπάρχει $N \in \mathcal{A}$ με $A \subset N$ και $\mu(N) = 0$. Ένα μ -μηδενικό σύνολο δεν είναι απαραίτητα στοιχείο της \mathcal{A} . Μια ιδιότητα $\Psi(x)$ που αφορά τα σημεία¹ του \mathcal{S} λέμε ότι ισχύει **σχεδόν παντού** ή **σχεδόν για όλα τα** $x \in \mathcal{S}$ αν το σύνολο $\{x \in \mathcal{S} : \eta \Psi(x) \text{ δεν ισχύει}\}$ είναι μ -μηδενικό. Αν το μ είμαι μέτρο πιθανότητας, τότε στη θέση του «σχεδόν παντού» χρησιμοποιούμε το «**σχεδόν βέβαια**» ή το «**με πιθανότητα ένα**».

Ασκήσεις

1.1 Έστω f όπως στον Ορισμό 1.8. Να δειχθεί ότι

(α) Η f είναι $\sigma(f)$ -μετρήσιμη.

(β) Αν η f είναι \mathcal{F} -μετρήσιμη, όπου \mathcal{F} είναι σ -άλγεβρα στο Ω , τότε $\sigma(f) \subset \mathcal{F}$.

Άρα η $\sigma(f)$ είναι η ελάχιστη σ -άλγεβρα στο Ω που κάνει την f μετρήσιμη.

1.2 Έστω (Ω, \mathcal{F}) μετρήσιμος χώρος, $n \in \mathbb{N}^+$, και $X_1, X_2, \dots, X_n : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ μετρήσιμες συναρτήσεις. Θέτουμε $S_k := X_1 + X_2 + \dots + X_k$ για κάθε $k = 1, 2, \dots, n$. Να δειχθεί ότι

$$\sigma(X_1, X_2, \dots, X_n) = \sigma(S_1, S_2, \dots, S_n).$$

1.3 Έστω $f, g : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ συναρτήσεις στο σύνολο Ω . Να δειχθεί ότι $\sigma(f) \subset \sigma(f, g)$.

1.4 Έστω \mathcal{F} το σύνολο των συναρτήσεων $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ που είναι άρτιες. Να προσδιοριστεί η σ -άλγεβρα στο \mathbb{R} που παράγει η οικογένεια \mathcal{F} (Ορισμός 1.9).

1.5* Έστω $X : \Omega \rightarrow [-\infty, \infty]$ συνάρτηση. Να δειχθεί ότι μια $Y : \Omega \rightarrow [-\infty, \infty]$ είναι $\sigma(X)$ -μετρήσιμη αν και μόνο αν υπάρχει μια $h : [-\infty, \infty] \rightarrow [-\infty, \infty]$ Borel-μετρήσιμη ώστε $Y = h(X)$.

¹Μια τέτοια $\Psi(x)$ μπορεί να είναι η « $\eta f : \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}$ είναι συνεχής στο x », όπου επιπλέον υποθέτουμε ότι το \mathcal{S} είναι μετρικός χώρος για να έχει νόημα η συνέχεια.

2

Δεσμευμένη μέση τιμή

2.1 Ορισμός

Παντού σε αυτό το κεφάλαιο, αν δεν αναφέρεται κάτι διαφορετικό, δουλεύουμε σε έναν χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και η $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$ είναι μια σ -άλγεβρα.

Ορισμός 2.1. Για $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ τυχαία μεταβλητή στον $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ με $\mathbf{E}|X| < \infty$, **δεσμευμένη μέση τιμή** τής X ως προς τη σ -άλγεβρα \mathcal{G} ονομάζουμε οποιανδήποτε τυχαία μεταβλητή $Y : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ έχει τις εξής ιδιότητες:

(i) Η Y είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη.

(ii) Ισχύει

$$\int_A X d\mathbf{P} = \int_A Y d\mathbf{P} \quad (2.1)$$

για κάθε $A \in \mathcal{G}$.

Η απαίτηση (ii) εμπεριέχει και την απαίτηση η Y να είναι τέτοια ώστε το ολοκλήρωμα στο δεξί μέλος τής (2.1) να ορίζεται.

Γενικά, αν μια τυχαία μεταβλητή είναι μετρήσιμη ως προς μια μικρή σ -άλγεβρα, τότε συμπεραίνουμε ότι είναι απλό αντικείμενο. Για παράδειγμα, αν είναι μετρήσιμη ως προς μια σ -άλγεβρα που παράγεται από διαμέριση με n στοιχεία, τότε μπορεί να παίρνει το πολύ n διαφορετικές τιμές (Παράδειγμα 1.6).

Ο ορισμός λοιπόν μας λέει ότι αν θέλουμε να υπολογίζουμε ολοκληρώματα τής X σε σύνολα τής υποάλγεβρας \mathcal{G} , δεν είναι ανάγκη να χρησιμοποιούμε τη X , η οποία μπορεί να είναι αρκετά περίπλοκη συνάρτηση. Υπάρχει η Y που είναι απλούστερο αντικείμενο από τη X και μπορεί να κάνει την ίδια δουλειά.

Για την πρακτική σημασία τής δεσμευμένης μέσης τιμής θα αναφερθούμε στην επόμενη παράγραφο. Ξεκινάμε με το θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας και κάποια παραδείγματα.

Πρόταση 2.2. (Υπαρξη και μοναδικότητα)

(i) Μία δεσμευμένη μέση τιμή Y τής X ως προς την \mathcal{G} υπάρχει.

(ii) Για οποιαδήποτε δεσμευμένη τιμή Y της X ως προς την \mathcal{G} ισχύει $\mathbf{E}|Y| \leq \mathbf{E}|X| < \infty$.

(iii) Αν Y, Y' είναι δύο δεσμευμένες μέσες τιμές τής X ως προς την \mathcal{G} , τότε $\mathbf{P}(Y = Y') = 1$.

Απόδειξη. (i) Ας υποθέσουμε πρώτα ότι $X \geq 0$. Η συνάρτηση $\nu : \mathcal{G} \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$\nu(A) = \int_A X d\mathbf{P}$$

2.1 Ορισμός

για κάθε $A \in \mathcal{G}$ είναι ένα μέτρο και επιπλέον $\mathbf{P}(A) = 0 \Rightarrow \nu(A) = 0$ (Άσκηση). Το Θεώρημα Radon-Nikodym [Κουμουλλής και Νεγρεπόντης (1991), Θεώρημα 10.15] δίνει ότι υπάρχει $Y \geq 0, Y \in \mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{G}, \mathbf{P})$ ώστε $\nu(A) = \int_A Y d\mathbf{P}$.

Τώρα για τη γενική περίπτωση, θέτουμε $X_1 := X^+, X_2 := X^-$. Από την προηγούμενη παράγραφο έχουμε ότι υπάρχουν $Y_1, Y_2 \geq 0$ που να αντιστοιχούν στις X_1, X_2 και έχουν $\mathbf{E} Y_1, \mathbf{E} Y_2 < \infty$. Εύκολα βλέπουμε ότι η $Y := Y_1 - Y_2$ είναι μια δεσμευμένη τιμή για τη X .

(ii) Έστω $A_1 := \{Y > 0\}, A_2 := \Omega \setminus A_1 = \{Y \leq 0\}$, που είναι και τα δύο στοιχεία της \mathcal{G} αφού η Y είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη. Τότε

$$\mathbf{E} |Y| = \int_{A_1} Y d\mathbf{P} - \int_{A_2} Y d\mathbf{P} = \int_{A_1} X d\mathbf{P} - \int_{A_2} X d\mathbf{P} \leq \int_{A_1} |X| d\mathbf{P} + \int_{A_2} |X| d\mathbf{P} = \mathbf{E} |X|.$$

Η δεύτερη ισότητα προκύπτει με εφαρμογή τού (ii) του Ορισμού 2.1 για τα σύνολα A_1, A_2 .

(iii) Έστω ότι $\mathbf{P}(Y - Y' > 0) > 0$. Τότε το σύνολο $A := [Y - Y' > 0]$ είναι στοιχείο της \mathcal{G} (αφού η $Y - Y'$ είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη) και

$$\int_A (Y - Y') d\mathbf{P} = \int_A X d\mathbf{P} - \int_A X d\mathbf{P} = 0.$$

Δηλαδή η μη αρνητική συνάρτηση $(Y - Y')\mathbf{1}_A$ έχει μηδενικό ολοκλήρωμα. Πρέπει $\mathbf{P}((Y - Y')\mathbf{1}_A > 0) = 0$. Όμως $\mathbf{P}((Y - Y')\mathbf{1}_A > 0) = \mathbf{P}(A) > 0$ από υπόθεση. Άτοπο. Άρα $\mathbf{P}(Y - Y' > 0) = 0$. Λόγω συμμετρίας, $\mathbf{P}(Y' - Y > 0) = 0$, και το συμπέρασμα έπεται. ■

Συμβολίζουμε οποιαδήποτε δεσμευμένη μέση τιμή της X ως προς τη \mathcal{G} με $\mathbf{E}(X | \mathcal{G})$. Το (iii) της προηγούμενης πρότασης επιτρέπει να θεωρούμε ότι η $\mathbf{E}(X | \mathcal{G})$ είναι ουσιαστικά μοναδική.

Παράδειγμα 2.3. Στην περίπτωση που $\mathcal{G} = \{\emptyset, \Omega\}$, ισχύει

$$\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) = \mathbf{E} X,$$

δηλαδή είναι σταθερά. Αυτό γιατί οι μόνες \mathcal{G} -μετρήσιμες συναρτήσεις είναι οι σταθερές και αν υποθέσουμε ότι $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) = c$ και εφαρμόσουμε την (2.1) για $A = \Omega \in \mathcal{G}$, παίρνουμε $\mathbf{E} X = \int_{\Omega} c d\mathbf{P} = c$.

Παράδειγμα 2.4. Το προηγούμενο παράδειγμα γενικεύεται ως εξής. Αν η X είναι ανεξάρτητη από την \mathcal{G} , τότε

$$\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) = \mathbf{E} X.$$

Πράγματι, η σταθερή συνάρτηση $\mathbf{E} X$ είναι προφανώς \mathcal{G} -μετρήσιμη και για $A \in \mathcal{G}$ έχουμε

$$\int_A X d\mathbf{P} = \mathbf{E}(\mathbf{1}_A X) = \mathbf{E}(\mathbf{1}_A) \mathbf{E} X = \mathbf{P}(A) \mathbf{E} X = \int_A \mathbf{E} X d\mathbf{P}.$$

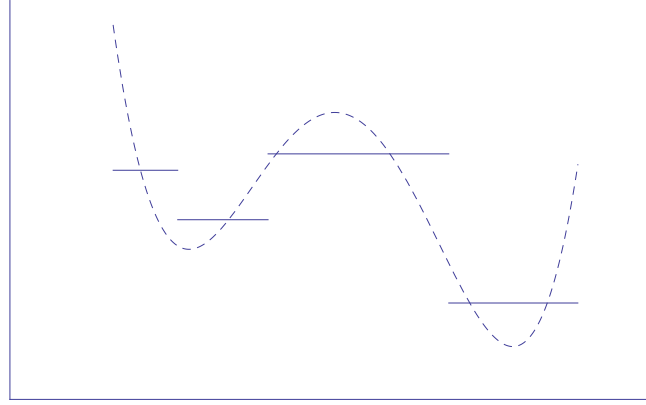
Παράδειγμα 2.5. Στην περίπτωση που $\mathcal{G} = \mathcal{F}$, ισχύει

$$\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) = X.$$

Αυτό γιατί η X είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη και προφανώς ικανοποιεί το (ii) του Ορισμού 2.1.

Παράδειγμα 2.6. Θα δούμε τώρα την περίπτωση που η \mathcal{G} παράγεται από μια αριθμήσιμη διαμέριση, έστω $\mathcal{C} = \{A_i : i \in I\} \subset \mathcal{F}$, του δειγματικού χώρου Ω (Παράδειγμα 1.3). Δηλαδή $\mathcal{G} = \sigma(\mathcal{C})$. Βέβαια, επειδή πρέπει $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$, θα έχουμε ότι $A_i \in \mathcal{F}$ για κάθε $i \in I$.

2.1 Ορισμός



Σχήμα 2.1: Συνάρτηση (διακεκομμένες γραμμές) και η δεσμευμένη μέση τιμή της (ευθύγραμμα τμήματα) ως προς μία σ-άλγεβρα. Η σ-άλγεβρα παράγεται από τη διαμέριση $\{[4, 6.5), [6.5, 10), [10, 17), [17, 22]\}$ του πεδίου ορισμού $[4, 22]$.

Η δεσμευμένη μέση τιμή, έστω Y , είναι $\sigma(\mathcal{C})$ -μετρήσιμη. Άρα με βάση το Παράδειγμα 1.6, είναι σταθερή σε κάθε σύνολο της διαμέρισης. Δηλαδή υπάρχουν σταθερές $\{c_i : i \in I\}$ ώστε $Y(\omega) = c_i$ για κάθε $\omega \in A_i$ και $i \in I$. Θα βρούμε αυτές τις σταθερές. Εφαρμόζουμε την (2.1) για $A = A_i \in \sigma(\mathcal{C})$ και παίρνουμε

$$\int_{A_i} X d\mathbf{P} = c_i \mathbf{P}(A_i). \quad (2.2)$$

Αν $\mathbf{P}(A_i) \neq 0$, έχουμε αμέσως $c_i = \mathbf{E}(X; A_i) / \mathbf{P}(A_i)$, ενώ αν $\mathbf{P}(A_i) = 0$, οποιαδήποτε σταθερά ικανοποιεί την (2.2) αφού και το αριστερό μέλος ισούται με 0 (ολοκλήρωμα σε σύνολο μέτρου 0). Άρα

$$\mathbf{E}(X | \mathcal{G})(\omega) = \begin{cases} \frac{\mathbf{E}(X; A_i)}{\mathbf{P}(A_i)} & \text{αν } \omega \in A_i \text{ και } \mathbf{P}(A_i) > 0, \\ 0 & \text{αν } \omega \in A_i \text{ και } \mathbf{P}(A_i) = 0, \end{cases} \quad (2.3)$$

και έτσι η $\mathbf{E}(X | \mathcal{G})$ καθορίστηκε πλήρως σε όλο το Ω (το δεύτερο σκέλος τού ορισμού είναι ασήμαντο αφού αφορά το σύνολο $\cup_{i: \mathbf{P}(A_i)=0} A_i$, το οποίο έχει μέτρο 0 ως αριθμήσιμη ένωση συνόλων με μέτρο μηδέν).

Στις στοιχειώδεις πιθανότητες, το πηλίκο στην (2.3) συμβολίζεται με $\mathbf{E}(X | A_i)$ και λέγεται δεσμευμένη μέση τιμή της X δεδομένου ότι συνέβη το A_i . Είναι επίσης η μέση τιμή της X ως προς την κανονικοποίηση τού περιορισμού της \mathbf{P} στο A_i (Άσκηση 2.1). Είναι η «μέση τιμή της X στο σύνολο A_i » με την ίδια έννοια που η μέση τιμή μιας συνεχούς συνάρτησης $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ σε ένα διάστημα $[a, b]$ είναι ο αριθμός

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(t) dt.$$

Στο Σχήμα 2.1 έχουμε (με διακεκομμένες γραμμές) το γράφημα μιας συνάρτησης X με πεδίο ορισμού το $\Omega := [4, 22]$. Ο χώρος πιθανότητας είναι ο $([4, 22], \mathcal{B}([4, 22]), \lambda/18)$, όπου λ είναι το μέτρο Lebesgue στο $[4, 22]$. Οι οριζόντιες γραμμές είναι το γράφημα της δεσμευμένης μέσης τιμής της X ως προς τη σ-άλγεβρα που παράγεται από τη διαμέριση $\{[4, 6.5), [6.5, 10), [10, 17), [17, 22]\}$. Ο προσδιορισμός της δεσμευμένης μέσης τιμής έγινε ως εξής. Έστω $\mu = \lambda/18$. Η δεσμευμένη μέση τιμή στο πρώτο διάστημα $[4, 6.5) = [a, b)$ ισούται με

$$\frac{\int_a^b X(t) d\mu(t)}{\mu([a, b))} = \frac{\int_a^b X(t) dt}{b-a}.$$

Αυτή είναι η «μέση τιμή τής X στο $[a, b]$ ». Όμοια υπολογίζεται η δεσμευμένη μέση τιμή και στα υπόλοιπα διαστήματα.

2.2 Σημασία τής δεσμευμένης μέσης τιμής

Σε αυτή την παράγραφο θέλουμε να στηρίξουμε τη δήλωση ότι

«Η δεσμευμένη μέση τιμή $\mathbf{E}(X|\mathcal{G})(\omega)$ δίνει την καλύτερη εκτίμηση για το $X(\omega)$ δεδομένης της πληροφορίας που δίνει η σ -άλγεβρα \mathcal{G} για το ω .»

Οι έννοιες «εκτίμηση» και «πληροφορία» είναι ασαφείς και ελάχιστα θα τις διασαφηνίσουμε παρακάτω. Η πιο πάνω φράση απλώς προσφέρει έναν τρόπο να σκεφτόμαστε για τη δεσμευμένη μέση τιμή. Δεν πρόκειται να τη χρησιμοποιήσουμε στην ανάπτυξη τής θεωρίας.

Υπενθυμίζουμε ότι, για μια σ -άλγεβρα $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$, ως πληροφορία που κρατάει η \mathcal{G} θεωρούμε την εξής γνώση. Όταν γίνεται το πείραμα το οποίο μοντελοποιεί ο χώρος πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και προκύπτει ένα αποτέλεσμα $\omega \in \Omega$ (το οποίο εμείς δεν ξέρουμε), η πληροφορία τής \mathcal{G} είναι το σε ποια στοιχεία τής ανήκει και σε ποια δεν ανήκει το ω . Δηλαδή η πληροφορία ενδεχομένως να μην μας πει ποιο ακριβώς είναι το ω , αλλά θα το περιορίσει. Εμείς βεβαίως ξέρουμε τα πάντα για την τριάδα $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και τη συνάρτηση X και μπορούμε να κάνουμε υπολογισμούς πιθανοτήτων και μέσων τιμών.

Θα δούμε τώρα αυτό το σκεπτικό εφαρμοσμένο σε προηγούμενα παραδείγματα για τα οποία έχουμε υπολογίσει τη δεσμευμένη μέση τιμή.

Στο Παράδειγμα 2.3, η σ -άλγεβρα $\{\emptyset, \Omega\}$ δεν μας δίνει καμία πληροφορία. Το ότι $\omega \in \Omega$ το ξέρουμε. Έτσι, αφού γίνει το πείραμα, η καλύτερη εκτίμηση που κάνουμε για την τιμή $X(\omega)$ που έχει πάρει η X είναι η $\mathbf{E}X$.

Στο Παράδειγμα 2.6. Όταν η \mathcal{G} παράγεται από μια αριθμήσιμη διαμέριση $\{A_i : i \in I\}$, για ένα δεδομένο $\omega \in \Omega$, η πληροφορία τής \mathcal{G} μάς λέει σε ποιο στοιχείο A_i της διαμέρισης ανήκει το ω και δεν μπορεί να πει κάτι πιο κατατοπιστικό γιατί το A_i δεν περιέχει γνησίως μικρότερο και μη κενό υποσύνολο που να είναι στοιχείο τής διαμέρισης. Ξέροντας λοιπόν ότι $\omega \in A_i$ και συνδυάζοντάς το με το σκεπτικό τού προηγούμενου παραδείγματος, είναι εντελώς φυσιολογικό να πάρουμε ως καλύτερη εκτίμησή μας για το $X(\omega)$ τη μέση τιμή τής X ως προς την κανονικοποίηση τού περιορισμού τού \mathbf{P} στο A_i (το μέτρο στον υπόλοιπο χώρο δεν μας ενδιαφέρει). Δηλαδή τον αριθμό στη (2.3).

Στο Παράδειγμα 2.5. Αφού η X είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη, όλα τα σύνολα $\{X = r\}$, όπου $r \in \mathbb{R}$, ανήκουν στην \mathcal{G} , και για δεδομένο $\omega \in \Omega$, ξέρουμε σε ποια αυτό ανήκει και σε ποια όχι. Άρα ξέρουμε ποιο είναι το $X(\omega)$ ακριβώς. Γι' αυτό και $\mathbf{E}(X|\mathcal{G}) = X$.

Αυτή η διαίσθηση όμως δεν λειτουργεί πάντα, όπως δείχνει το επόμενο παράδειγμα.

Παράδειγμα 2.7. Στον χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ με $\Omega := (0, 1)$, $\mathcal{F} := \mathcal{B}((0, 1))$, $\mathbf{P} := \lambda_1$ το μέτρο Lebesgue στο $(0, 1)$, θεωρούμε τη σ -άλγεβρα

$$\mathcal{G} := \{A \subset (0, 1) : A \text{ αριθμήσιμο ή } (0, 1) \setminus A \text{ αριθμήσιμο}\},$$

που είναι υποσύνολο τής \mathcal{F} (γιατί;). Θεωρούμε και την τυχαία μεταβλητή X με $X(\omega) = \omega$ για κάθε $\omega \in \Omega$ [είναι αυτή που λέμε τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφη στο $(0, 1)$]. Γίνεται λοιπόν το πείραμα και προκύπτει ένα ω . Η \mathcal{G} περιέχει όλα τα μονοσύνολα τού Ω και άρα η πληροφορία που κρατάει πρέπει να μας δώσει ποιο είναι το ω ακριβώς και άρα και την ακριβή τιμή τού $X(\omega)$. Από την άλλη, επειδή κάθε σύνολο τής \mathcal{G} έχει \mathbf{P} μέτρο 0 ή 1, έχουμε ότι η X είναι ανεξάρτητη από την \mathcal{G} και επομένως, από το Παράδειγμα 2.4 πιο πάνω, $\mathbf{E}(X|\mathcal{G})(\omega) = \mathbf{E}X = \int_0^1 x d\lambda_1(x) = 1/2$ για κάθε $\omega \in \Omega$.

2.3 Βασικές ιδιότητες

Θα δούμε σε αυτή την παράγραφο κάποιες χρήσιμες ιδιότητες τής δεσμευμένης μέσης τιμής. Οι ισχυρισμοί, ισότητες/ανισότητες, πιο κάτω ισχύουν με πιθανότητα 1. Παραλείπουμε αυτή τη διασαφήνιση για απλότητα στη διατύπωση.

Πρόταση 2.8. Έστω $X \in L^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$ σ -άλγεβρα στο Ω . Ισχύουν τα εξής.

(i) $\mathbf{E}(\mathbf{E}(X | \mathcal{G})) = \mathbf{E} X$.

(ii) Αν η X είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη, τότε $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) = X$.

Απόδειξη. (i) Προκύπτει θέτοντας $A = \Omega$ στην (2.1).

(ii) Η X ικανοποιεί τις δύο απαιτήσεις τού ορισμού τής δεσμευμένης μέσης τιμής. ■

Πρόταση 2.9. Έστω $X, Y \in L^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$, $a, b \in \mathbb{R}$. Ισχύουν τα εξής.

(i) $\mathbf{E}(aX + bY | \mathcal{G}) = a \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) + b \mathbf{E}(Y | \mathcal{G})$.

(ii) Αν $X \geq 0$, τότε $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) \geq 0$.

(iii) Αν $X \leq Y$, τότε $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) \leq \mathbf{E}(Y | \mathcal{G})$.

Απόδειξη. (i) Η $a \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) + b \mathbf{E}(Y | \mathcal{G})$ είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη, και για $A \in \mathcal{G}$ έχουμε

$$\begin{aligned} \int_A \{a \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) + b \mathbf{E}(Y | \mathcal{G})\} d\mathbf{P} &= a \int_A \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) d\mathbf{P} + b \int_A \mathbf{E}(Y | \mathcal{G}) d\mathbf{P} \\ &= a \int_A X d\mathbf{P} + b \int_A Y d\mathbf{P} = \int_A (aX + bY) d\mathbf{P}. \end{aligned}$$

Στη δεύτερη ισότητα χρησιμοποιήσαμε την ιδιότητα ορισμού των $\mathbf{E}(X | \mathcal{G})$, $\mathbf{E}(Y | \mathcal{G})$ και το ότι $A \in \mathcal{G}$. Άρα η $a \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) + b \mathbf{E}(Y | \mathcal{G})$ είναι μια δεσμευμένη μέση τιμή τής $aX + bY$ ως προς την \mathcal{G} .

(ii) Έπεται από την απόδειξη τής Πρότασης 2.2(i) ότι υπάρχει μια δεσμευμένη μέση τιμή που είναι μη αρνητική. Όμως η δεσμευμένη μέση τιμή είναι μοναδική [Πρόταση 2.2(iii)] και το συμπέρασμα έπεται.

(iii) Θέτουμε $W := Y - X$, εφαρμόζουμε το προηγούμενο μέρος τής πρότασης, και μετά χρησιμοποιούμε τη γραμμικότητα τής δεσμευμένης μέσης τιμής (πρώτο μέρος τής πρότασης). ■

Πρόταση 2.10. Έστω $X \in L^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και $\mathcal{G}_1 \subset \mathcal{G}_2 \subset \mathcal{F}$ σ -άλγεβρες στο Ω . Τότε:

(i) $\mathbf{E}(\mathbf{E}(X | \mathcal{G}_1) | \mathcal{G}_2) = \mathbf{E}(X | \mathcal{G}_1)$.

(ii) $\mathbf{E}(\mathbf{E}(X | \mathcal{G}_2) | \mathcal{G}_1) = \mathbf{E}(X | \mathcal{G}_1)$.

Απόδειξη. (i) Η τυχαία μεταβλητή $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}_1)$ είναι \mathcal{G}_2 -μετρήσιμη αφού είναι \mathcal{G}_1 -μετρήσιμη και $\mathcal{G}_1 \subset \mathcal{G}_2$. Το συμπέρασμα έπεται από την Πρόταση 2.8(ii).

(ii) Η $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}_1)$ είναι \mathcal{G}_1 -μετρήσιμη, και για $A \in \mathcal{G}_1$ έχουμε

$$\int_A \mathbf{E}(X | \mathcal{G}_1) d\mathbf{P} = \int_A X d\mathbf{P} = \int_A \mathbf{E}(X | \mathcal{G}_2) d\mathbf{P}.$$

Στην τελευταία ισότητα χρησιμοποιούμε τον ορισμό τής $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}_2)$ και το ότι το A είναι στοιχείο τής \mathcal{G}_2 επίσης. Το συμπέρασμα έπεται. ■

Πρόταση 2.11 (Τα γνωστά βγαίνουν έξω). Έστω $X \in L^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και $Y : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ συνάρτηση \mathcal{G} -μετρήσιμη ώστε $\mathbf{E}|XY| < \infty$. Τότε

$$\mathbf{E}(XY | \mathcal{G}) = Y\mathbf{E}(X | \mathcal{G}). \quad (2.4)$$

Απόδειξη. Το δεξί μέλος τής ισότητας είναι μια \mathcal{G} -μετρήσιμη συνάρτηση, άρα μένει να δείξουμε ότι ικανοποιεί τη δεύτερη συνθήκη τού Ορισμού 2.1. Θα πάμε με τη συνήθη τακτική.

1. Αν η $Y = \mathbf{1}_B$ με $B \in \mathcal{G}$, τότε για κάθε $A \in \mathcal{G}$ έχουμε

$$\int_A Y\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) d\mathbf{P} = \int_{A \cap B} \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) d\mathbf{P} = \int_{A \cap B} X d\mathbf{P} = \int_A \mathbf{1}_B X d\mathbf{P} = \int_A XY d\mathbf{P},$$

και το συμπέρασμα έπεται.

2. Η προηγούμενη ειδική περίπτωση και η γραμμικότητα τής δεσμευμένης μέσης τιμής δίνουν την (2.4) όταν η Y είναι απλή και \mathcal{G} -μετρήσιμη.

3. Αν οι $X, Y \geq 0$, τότε παίρνουμε αύξουσα ακολουθία $(Y_n)_{n \geq 1}$ μη αρνητικών απλών και \mathcal{G} -μετρήσιμων συναρτήσεων που συγκλίνει σημειακά στην Y . Με βάση τα προηγούμενα, για $A \in \mathcal{G}$ έχουμε

$$\int_A Y_n \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) d\mathbf{P} = \int_A XY_n d\mathbf{P}.$$

Εφαρμόζουμε το θεώρημα μονότονης σύγκλισης στην τελευταία, και παίρνουμε

$$\int_A Y \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) d\mathbf{P} = \int_A XY d\mathbf{P}.$$

Έτσι, πάλι ισχύει η (2.4).

4. Για τη γενική περίπτωση. Εφαρμόζουμε τη (2.4) για τα ζευγάρια $\{X^-, Y^-\}, \{X^-, Y^+\}, \{X^+, Y^-\}, \{X^+, Y^+\}$ για τα οποία ξέρουμε ότι ισχύει, και κάνουμε τις απαραίτητες πράξεις με τις ισότητες που θα προκύψουν. Χρησιμοποιούμε βέβαια το γεγονός ότι

$$\mathbf{E}(X^- Y^-) + \mathbf{E}(X^- Y^+) + \mathbf{E}(X^+ Y^-) + \mathbf{E}(X^+ Y^+) = \mathbf{E}|XY| < \infty.$$

■

Πρόταση 2.12. Έστω $X \in L^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και \mathcal{H}, \mathcal{G} σ -άλγεβρες στον Ω ώστε η \mathcal{H} να είναι ανεξάρτητη από τη $\sigma(\mathcal{G}, X)$. Τότε

$$\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) = \mathbf{E}(X | \sigma(\mathcal{G}, \mathcal{H})). \quad (2.5)$$

Απόδειξη. Αρκεί να δειχθεί για X που παίρνει τιμές στο $[0, \infty]$. Το αριστερο μέλος τής ισότητας, ας το ονομάσουμε Y , είναι μια $\sigma(\mathcal{G}, \mathcal{H})$ -μετρήσιμη συνάρτηση. Μένει να δείξουμε ότι

$$\mathbf{E}(X\mathbf{1}_A) = \mathbf{E}(Y\mathbf{1}_A)$$

για κάθε $A \in \sigma(\mathcal{G}, \mathcal{H})$. Το αριστερό μέλος τής τελευταίας ισότητας, θεωρούμενο ως συνάρτηση τού A είναι μέτρο, έστω μ , στον μετρήσιμο χώρο $(\Omega, \sigma(\mathcal{G}, \mathcal{H}))$, το ίδιο και το δεξί μέλος, ας το ονομάσουμε ν . Αυτά τα δύο είναι πεπερασμένα μέτρα με $\mu(\Omega) = \nu(\Omega) = \mathbf{E}(X) < \infty$ και συμφωνούν στην οικογένεια $\mathcal{C} := \{G \cap H : G \in \mathcal{G}, H \in \mathcal{H}\}$ γιατί για κάθε σύνολο $G \cap H$ στην \mathcal{C} έχουμε

$$\begin{aligned} \mu(H \cap G) &= \mathbf{E}(X\mathbf{1}_G\mathbf{1}_H) = \mathbf{E}(X\mathbf{1}_G)\mathbf{E}(\mathbf{1}_H), \\ \nu(H \cap G) &= \mathbf{E}(Y\mathbf{1}_G\mathbf{1}_H) = \mathbf{E}(Y\mathbf{1}_G)\mathbf{E}(\mathbf{1}_H) = \mathbf{E}(X\mathbf{1}_G)\mathbf{E}(\mathbf{1}_H). \end{aligned}$$

Επειδή η \mathcal{C} είναι κλειστή στις πεπερασμένες τομές και $\sigma(\mathcal{C}) = \sigma(\mathcal{G}, \mathcal{H})$, έπεται από γνωστό θεώρημα [π.χ., Πρόταση 2.8 στο Κουμουλλής και Νεγρεπόντης (1991)], ότι τα μέτρα μ, ν ταυτίζονται στο $\sigma(\mathcal{G}, \mathcal{H})$, και το ζητούμενο δείχτηκε. ■

Η πιο κάτω πρόταση είναι χρήσιμη σε υπολογισμούς.

Πρόταση 2.13. Έστω $\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2$ διαχωρίσιμοι μετρικοί χώροι, $X : \Omega \rightarrow \mathcal{S}_1, Y : \Omega \rightarrow \mathcal{S}_2$ τυχαίες μεταβλητές, $h : \mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2 \rightarrow \mathbb{R}$ Borel μετρήσιμη ώστε $\mathbf{E} |h(X, Y)| < \infty$, και $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$ σ -άλγεβρα ώστε η X να είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη ενώ η Y να είναι ανεξάρτητη τής \mathcal{G} . Θέτουμε $\phi(x) := \mathbf{E}(h(x, Y))$ αν η μέση τιμή είναι καλά ορισμένη και $\phi(x) = 0$ διαφορετικά. Τότε με πιθανότητα 1, η $\phi(X)$ προσδιορίζεται από τον πρώτο κλάδο τής ϕ και

$$\mathbf{E}(h(X, Y) | \mathcal{G}) = \phi(X). \quad (2.6)$$

Δηλαδή, για να υπολογίσουμε την τιμή τής δεσμευμένης μέσης τιμής τής $h(X, Y)$ σε ένα $\omega \in \Omega$, παγώνουμε τη X στην τιμή $x = X(\omega)$ και υπολογίζουμε τη μέση τιμή τής ποσότητας $h(x, Y)$, στην οποία η τυχαιότητα οφείλεται μόνο στο Y . Εναλλακτικές γραφές τού παραπάνω τύπου είναι οι εξής:

$$\mathbf{E}(h(X, Y) | \mathcal{G}) = \mathbf{E}\{h(x, Y)\}_{|x=X}, \quad (2.7)$$

$$\mathbf{E}(h(X, Y) | \mathcal{G})(\omega) = \int h(X(\omega), Y(\omega')) d\mathbf{P}(\omega'). \quad (2.8)$$

Στον χώρο $\mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2$ θεωρούμε τη σ -άλγεβρα $\mathcal{B}(\mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2)$ των Borel συνόλων, η οποία (επειδή οι $\mathcal{S}_1, \mathcal{S}_2$ είναι διαχωρίσιμοι) συμπίπτει με την $\mathcal{B}(\mathcal{S}_1) \otimes \mathcal{B}(\mathcal{S}_2)$ (δες Κουμουλλής και Νεγρεπόντης (1991), Παράδειγμα 9.2).

Απόδειξη. Έστω μ, ν οι κατανομές των X, Y αντίστοιχα. Η τ.μ. (X, Y) έχει κατανομή $\rho := \mu \times \nu$ (μέτρο γινόμενο) επειδή οι X, Y είναι ανεξάρτητες, και γνωρίζουμε ότι $h \in \mathcal{L}^1(\mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2, \mathcal{B}(\mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2), \mu \times \nu)$. Τότε, από τη θεωρία ολοκλήρωσης σε χώρο γινόμενο [δες Πρόταση Β' 11 στο Παράρτημα Β'], ισχύει

$$\phi(x) = \int h(x, y) d\nu(y)$$

για μ -σχεδόν όλα τα $x \in \mathcal{X}$ και η ϕ είναι Borel μετρήσιμη. Άρα η $\phi(X)$ είναι $\sigma(X)$ μετρήσιμη. Έπειτα θα ελέγξουμε την ισχύ τής δεύτερης συνθήκης τού Ορισμού 2.1. Δηλαδή ότι για κάθε $A \in \mathcal{G}$ ισχύει

$$\mathbf{E}(h(X, Y)\mathbf{1}_A) = \mathbf{E}(\phi(X)\mathbf{1}_A) \quad (2.9)$$

Θα δείξουμε κάτι γενικότερο, ότι για κάθε $Z : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ φραγμένη και \mathcal{G} -μετρήσιμη ισχύει ότι

$$\mathbf{E}(h(X, Y)Z) = \mathbf{E}(\phi(X)Z). \quad (2.10)$$

Θέτοντας $Z = \mathbf{1}_A$ σε αυτήν, παίρνουμε το ζητούμενο. Έστω λοιπόν μία τέτοια Z . Συμβολίζουμε με $\tilde{\mu}, \tilde{\nu}$ τις κατανομές των $(X, Z), Y$ αντίστοιχα. Τότε, από την υπόθεση ανεξαρτησίας, θα έχουμε ότι η κατανομή τής (X, Z, Y) είναι το μέτρο γινόμενο $\tilde{\mu} \otimes \tilde{\nu}$ και έτσι

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(h(X, Y)Z) &= \int \int h(x, y)z d\tilde{\mu}(x, z) d\tilde{\nu}(y) = \int z \int h(x, y) d\tilde{\nu}(y) d\tilde{\mu}(x, z) \\ &= \int z\phi(x) d\tilde{\mu}(x, z) = \mathbf{E}(\phi(X)Z). \quad \blacksquare \end{aligned}$$

Συμβολισμός: Αν Z, W είναι τυχαίες μεταβλητές, τότε για τη δεσμευμένη μέση τιμή $\mathbf{E}(Z | \sigma(W))$ χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό $\mathbf{E}(Z | W)$.

Παράδειγμα 2.14. Μια πρώτη εφαρμογή τής πιο πάνω πρότασης είναι η ακόλουθη. Έστω X, Y ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές, με καθεμία να έχει την ομοιόμορφη κατανομή στο $(0, 1)$. Η μέση τιμή $\mathbf{E}(X^Y)$ υπολογίζεται ως εξής.

$$\mathbf{E}(X^Y) = \mathbf{E}\{\mathbf{E}(X^Y | Y)\} = \mathbf{E}\{\phi(Y)\}$$

2.3 Βασικές ιδιότητες

με $\phi(y) = \mathbf{E}(X^y)$. Για $y \in (0, 1)$ έχουμε $\mathbf{E}(X^y) = \int_0^1 x^y dx = 1/(y+1)$. Άρα η ζητούμενη μέση τιμή ισούται με $\mathbf{E}(1/(Y+1)) = \int_0^1 (1+y)^{-1} dy = \log 2$.

Παράδειγμα 2.15 (Τυχαίο άθροισμα τυχαίων μεταβλητών). Έστω $N, (X_n)_{n \in \mathbb{N}^+}$ τυχαίες μεταβλητές στον $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ με τη N να παίρνει τιμές στο \mathbb{N} και τις X_n να παίρνουν τιμές στο \mathbb{R} . Ορίζουμε τις τυχαίες μεταβλητές $S_0(\omega) = 0, S_n(\omega) := X_1(\omega) + X_2(\omega) + \dots + X_n(\omega)$ για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ και την S_N με $S_N(\omega) = S_{N(\omega)}(\omega)$. Υποθέτουμε ότι οι $(X_n)_{n \in \mathbb{N}^+}$ είναι ανεξάρτητες από τη N και ισόνομες, $\mathbf{E}N < \infty, \mathbf{E}|X_1| < \infty$. Θα δείξουμε ότι

$$\mathbf{E}(S_N|N) = N\mathbf{E}(X_1).$$

Εφαρμόζουμε την προηγούμενη πρόταση με $\mathcal{S}_1 := \mathbb{N}, \mathcal{S}_2 := \mathbb{R}^{\mathbb{N}^+}, h(n, (x_i)_{i \geq 1}) = x_1 + \dots + x_n$ αν $n \geq 1, h(0, (x_i)_{i \geq 1}) = 0, X := N, Y = (X_i)_{i \geq 1}, \mathcal{G} := \sigma(N)$.

Αφήνουμε το θέμα μετρησιμότητας της h για το τέλος. Δείχνουμε ότι $\mathbf{E}|h(N, Y)| < \infty$.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}|h(N, Y)| &= \mathbf{E}\left(\sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{1}_{N=n}|h(N, Y)|\right) = \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{E}(\mathbf{1}_{N=n}|S_n|) = \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{E}(\mathbf{1}_{N=n})\mathbf{E}(|S_n|) \\ &\leq \sum_{n=0}^{\infty} n\mathbf{P}(N=n)\mathbf{E}|X_1| = (\mathbf{E}N)\mathbf{E}|X_1| < \infty. \end{aligned}$$

Έπειτα, για $n \in \mathbb{N}^+$ έχουμε $\phi(n) := \mathbf{E}(h(n, Y)) = \mathbf{E}(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = n\mathbf{E}(X_1)$. Η ίδια σχέση ισχύει και για $n = 0$. Έτσι, η (2.6) δίνει το ζητούμενο.

Κάποιες λεπτομέρειες. Θεωρούμε τον $\mathcal{S}_2 = \mathbb{R}^{\mathbb{N}^+}$ ως μετρικό χώρο με μετρική την $d(x, y) := \sum_{n=1}^{\infty} 2^{-n} \frac{|x_n - y_n|}{1 + |x_n - y_n|}$, όπου $x = (x_n)_{n \geq 1}, y = (y_n)_{n \geq 1}$. Με αυτή τη μετρική είναι διαχωρίσιμος μετρικός χώρος. Έπειτα, η h είναι Borel-μετρήσιμη γιατί για οποιοδήποτε $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$ έχουμε

$$\{(n, x) : h(n, x) \in A\} = A_0 \cup \bigcup_{n=1}^{\infty} \{n\} \times \{x \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}^+} : x_1 + x_2 + \dots + x_n \in A\}$$

Το σύνολο A_0 ισούται με $\{0\} \times \mathcal{S}_2$ αν $0 \in A$ ενώ ισούται με \emptyset αν $0 \notin A$. Αφήνεται στον αναγνώστη να δικαιολογήσει ότι η ένωση στην τελευταία έκφραση είναι σύνολο Borel του $\mathcal{S}_1 \times \mathcal{S}_2$.

Πρόταση 2.16 (Ανισότητα Jensen). Έστω $X \in \mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και f κυρτή συνάρτηση σε ένα διάστημα $I \subset \mathbb{R}$ με $\mathbf{P}(X \in I) = 1$ και $\mathbf{E}|f(X)| < \infty$. Τότε

$$f(\mathbf{E}(X|\mathcal{G})) \leq \mathbf{E}(f(X)|\mathcal{G}).$$

Η ανισότητα Jensen έχει την εξής χρήσιμη συνέπεια.

Πόρισμα 2.17. Για $p \geq 1$ και $X \in \mathcal{L}^p(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ ισχύει

$$\|\mathbf{E}(X|\mathcal{G})\|_p \leq \|X\|_p.$$

Την περίπτωση $p = 1$ την έχουμε ήδη δει στην Πρόταση 2.2(ii).

Απόδειξη. Το ότι η X είναι στοιχείο του \mathcal{L}^p δίνει ότι είναι στοιχείο και του \mathcal{L}^1 . Έτσι, εφαρμόζοντας την ανισότητα Jensen για την κυρτή συνάρτηση $f(x) = |x|^p$, έχουμε ότι

$$|\mathbf{E}(X|\mathcal{G})|^p \leq \mathbf{E}(|X|^p|\mathcal{G})$$

με πιθανότητα 1. Παίρνουμε μέση τιμή στα δύο μέλη, και με χρήση της Πρότασης 2.8(i) παίρνουμε

$$\mathbf{E}\{|\mathbf{E}(X|\mathcal{G})|^p\} \leq \mathbf{E}(|X|^p),$$

που είναι το ζητούμενο. ■

2.4 Η δεσμευμένη μέση τιμή ως προβολή

Για τη δεσμευμένη μέση τιμή υπάρχουν οριακά θεωρήματα αντίστοιχα αυτών για τη μέση τιμή. Κάνουμε λεπτομερειακά την απόδειξη για το θεώρημα μονότονης σύγκλισης ενώ για τα άλλα δίνουμε την ιδέα της απόδειξης. Είναι ακριβώς η ίδια όπως και στις εκδοχές των θεωρημάτων χωρίς δέσμευση.

Θεώρημα 2.18 (Θεώρημα μονότονης σύγκλισης). *Αν οι $(X_n)_{n \in \mathbb{N}^+}$ είναι στοιχεία του $\mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ με $0 \leq X_n \leq X_{n+1}$ για κάθε $n \geq 1$ και $\mathbf{E}(\lim_{n \rightarrow \infty} X_n) < \infty$, τότε*

$$\mathbf{E}(\lim_{n \rightarrow \infty} X_n | \mathcal{G}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}(X_n | \mathcal{G}).$$

Απόδειξη. Το όριο στο δεξί μέλος υπάρχει, γιατί η ακολουθία $\{\mathbf{E}(X_n | \mathcal{G})\}_{n \in \mathbb{N}^+}$ είναι αύξουσα (Πρόταση 2.9(iii)), και το όριο είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη τυχαία μεταβλητή. Έπειτα, για οποιοδήποτε $A \in \mathcal{G}$ έχουμε

$$\int_A \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}(X_n | \mathcal{G}) d\mathbf{P} = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_A \mathbf{E}(X_n | \mathcal{G}) d\mathbf{P} = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_A X_n d\mathbf{P} = \int_A \lim_{n \rightarrow \infty} X_n d\mathbf{P}.$$

Στην πρώτη και τρίτη ισότητα χρησιμοποιήσαμε το συνηθισμένο θεώρημα μονότονης σύγκλισης ενώ στη δεύτερη τον ορισμό της δεσμευμένης μέσης τιμής. Άρα η τυχαία μεταβλητή $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}(X_n | \mathcal{G})$ ικανοποιεί και τη δεύτερη απαίτηση του ορισμού της δεσμευμένης μέσης τιμής, και το θεώρημα αποδείχθηκε. ■

Θεώρημα 2.19 (Λήμμα Fatou). *Αν οι $(X_n)_{n \in \mathbb{N}^+}$ είναι μη αρνητικές, στοιχεία του $L^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$, και $\mathbf{E}(\liminf_{n \rightarrow \infty} X_n) < \infty$, τότε*

$$\mathbf{E}(\liminf_{n \rightarrow \infty} X_n | \mathcal{G}) \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}(X_n | \mathcal{G}).$$

Απόδειξη. Εφαρμόζουμε το προηγούμενο θεώρημα στην αύξουσα ακολουθία μη αρνητικών τυχαίων μεταβλητών $Y_n := \inf_{k \geq n} X_k, n \in \mathbb{N}^+$. Το όριό της είναι το $\liminf_{n \rightarrow \infty} X_n$. ■

Θεώρημα 2.20 (Θεώρημα κυριαρχημένης σύγκλισης). *Αν οι $\{X_n : n \geq 1\}$ είναι τυχαίες μεταβλητές στον $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$, συγκλίνουν με πιθανότητα 1 σε μια τυχαία μεταβλητή X , και υπάρχει $Y \in L^1(\mathbf{P})$ με $|X_n| \leq Y$ για κάθε $n \geq 1$, τότε $X \in L^1(\mathbf{P})$ και*

$$\mathbf{E}(\lim_{n \rightarrow \infty} X_n | \mathcal{G}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}(X_n | \mathcal{G}).$$

Απόδειξη. Εφαρμόζουμε το προηγούμενο θεώρημα στις ακολουθίες $Z_n := Y - X_n, n \in \mathbb{N}^+$ και $W_n := Y + X_n, n \in \mathbb{N}^+$. ■

2.4 Η δεσμευμένη μέση τιμή ως προβολή

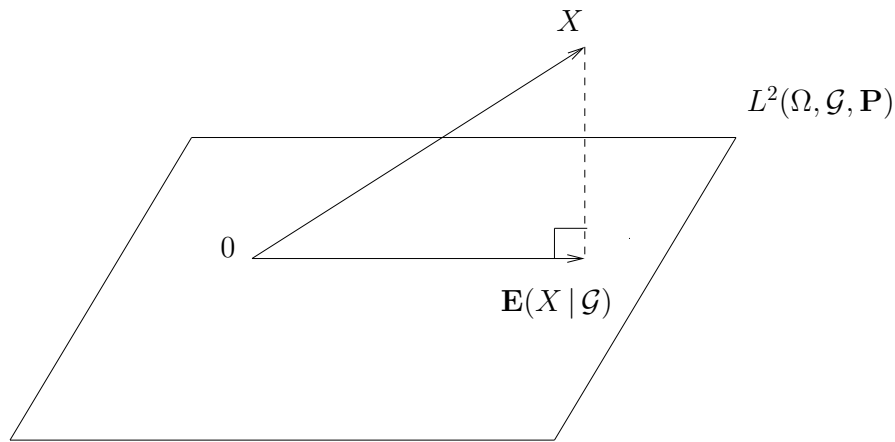
Το σύνολο $H := L^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ εφοδιασμένο με το εσωτερικό γινόμενο $(X, Y) \mapsto \mathbf{E}(XY) = \int XY d\mathbf{P}$ είναι χώρος Hilbert (δες Παράρτημα Β'). Ο $H_0 := L^2(\Omega, \mathcal{G}, \mathbf{P})$ είναι υπόχωρος του H και μάλιστα κλειστός. Έχουμε ορίσει τη δεσμευμένη μέση τιμή ως προς την \mathcal{G} για τα στοιχεία του $L^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P}) \supset H$. Όμως για τα στοιχεία του H η δεσμευμένη μέση τιμή έχει την εξής γεωμετρική ερμηνεία.

Πρόταση 2.21. *Η απεικόνιση $T : H \rightarrow H_0$ με $T(X) = \mathbf{E}(X | \mathcal{G})$ είναι η ορθογώνια προβολή στον υπόχωρο H_0 .*

Απόδειξη. Κατ' αρχάς, η T παίρνει πράγματι τιμές στον H_0 γιατί από το Πρόσμημα 2.17 (για $p = 2$), αν $X \in H$, τότε $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) \in H_0$.

Κάθε $X \in H$ γράφεται ως $X = \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) + \{X - \mathbf{E}(X | \mathcal{G})\}$ με $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) \in H_0$. Μένει να δείξουμε ότι $X - \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) \in H_0^\perp$, δηλαδή $\mathbf{E}(Y\{X - \mathbf{E}(X | \mathcal{G})\}) = 0$ για κάθε $Y \in H_0$. Αυτό αφήνεται ως άσκηση (Άσκηση 2.9). ■

2.4 Η δεσμευμένη μέση τιμή ως προβολή



Σχήμα 2.2: Η δεσμευμένη μέση τιμή ως προβολή. Ο περιβάλλον χώρος είναι ο $L^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$, και ο υπόχωρος $L^2(\Omega, \mathcal{G}, \mathbf{P})$ παριστάνεται από ένα επίπεδο.

Ασκήσεις

Στις ασκήσεις πιο κάτω υποθέτουμε ότι δουλεύουμε σε έναν χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και ότι η \mathcal{G} είναι σ-άλγεβρα στο Ω και υποσύνολο τής \mathcal{F} .

2.1 Έστω $(\Omega, \mathcal{F}, \mu)$ χώρος μέτρου και $A_0 \in \mathcal{F}$ με $\mu(A_0) > 0$.

(α) Ναδειχθεί ότι η συνάρτηση $\nu : \mathcal{F} \rightarrow [0, \infty]$ με

$$\nu(A) = \mu(A \cap A_0)$$

είναι μέτρο στον (Ω, \mathcal{F}) . Αυτό το μέτρο ονομάζεται περιορισμός τού μ στο A_0 . Κανονικοποιώντας το (δηλαδή διαιρώντας το με τη συνολική του μάζα), παίρνουμε το μέτρο πιθανότητας

$$\hat{\nu}(A) = \frac{\nu(A)}{\nu(\Omega)} = \frac{\mu(A \cap A_0)}{\mu(A_0)}.$$

(β) Ναδειχθεί ότι για κάθε $X : \Omega \rightarrow [-\infty, \infty]$ μετρήσιμη με $\int |X| d\mu < \infty$ ή με $X \geq 0$ ισχύει ότι

$$\int X d\hat{\nu} = \frac{1}{\mu(A_0)} \int_{A_0} X d\mu.$$

2.2 Έστω (X, Y) διδιάστατη τυχαία μεταβλητή με πυκνότητα $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, \infty)$ και $h : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ Borel μετρήσιμη ώστε $\mathbf{E}|h(X)| < \infty$. Η Y έχει πυκνότητα $f_Y(y) := \int_{\mathbb{R}} f(x, y) dx$ για κάθε $y \in \mathbb{R}$. Για κάθε $x, y \in \mathbb{R}$ θέτουμε

$$f_{X|Y}(x|y) := \begin{cases} \frac{f(x,y)}{f_Y(y)} & \text{αν } f_Y(y) \neq 0, \\ 0 & \text{αν } f_Y(y) = 0. \end{cases}$$

Τέλος θέτουμε $\phi(y) := \int_{\mathbb{R}} h(x)f_{X|Y}(x|y) dx$ για κάθε $y \in \mathbb{R}$. Ναδειχθεί ότι

$$\mathbf{E}(h(X) | Y) = \phi(Y).$$

Επομένως, η « $X | \{Y = y\}$ » έχει πυκνότητα $f_{X|Y}(x|y)$, που στις στοιχειώδεις πιθανότητες είναι ορισμός.

2.3 Έστω $X \in \mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ με $X(\omega) > 0$ για κάθε $\omega \in \Omega$. Ναδειχθεί ότι:

(α) $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) > 0$ με πιθανότητα 1.

(β) $\mathbf{E}\left(\frac{X}{\mathbf{E}(X|\mathcal{G})}\right) = 1$.

2.4 Η δεσμευμένη μέση τιμή ως προβολή

2.4 Έστω $X \in \mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ με $X(\omega) \neq 0$ για κάθε $\omega \in \Omega$. Ισχύει απαραίτητα $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) \neq 0$ με πιθανότητα 1;

2.5 Έστω $X \in \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και $\mathcal{F}_1 \subset \mathcal{F}_2 \subset \mathcal{F}$ σ-άλγεβρες στο Ω . Να δειχθεί ότι

$$\mathbf{E}(\mathbf{E}(X | \mathcal{F}_1)^2) \leq \mathbf{E}(\mathbf{E}(X | \mathcal{F}_2)^2).$$

Ποια είναι η γεωμετρική ερμηνεία τής ανισότητας;

2.6 Έστω $X \in \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$. Να δειχθεί ότι

$$\mathbf{E}(X \mathbf{E}(X | \mathcal{G})) \leq \mathbf{E}(X^2).$$

2.7 Αν οι $X, Y \in \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ ικανοποιούν $\mathbf{E}(Y | \mathcal{G}) = X$ (για όλα τα ω , όχι απλώς με πιθανότητα 1) και $\mathbf{E}(Y^2) = \mathbf{E}(X^2)$, τότε $X = Y$ με πιθανότητα 1.

2.8 Έστω $n \in \mathbb{N}^+$ και X_1, X_2, \dots, X_n ανεξάρτητες και ισόνομες τυχαίες μεταβλητές με $\mathbf{E}|X_1| < \infty$. Θέτουμε $S_n := X_1 + \dots + X_n$. Να δειχθεί ότι:

(α)* $\mathbf{E}(X_i | S_n) = \mathbf{E}(X_1 | S_n)$ για κάθε $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. Ισότητα με πιθανότητα 1, όχι απλώς ισότητα κατά κατανομή.

(β) $\mathbf{E}(X_1 | S_n) = S_n/n$.

2.9 Για $X \in \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και $Y \in \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{G}, \mathbf{P})$, να δειχθεί ότι

(α)

$$\mathbf{E}(YX) = \mathbf{E}(Y \mathbf{E}(X | \mathcal{G})),$$

δηλαδή $X - \mathbf{E}(X | \mathcal{G}) \perp Y$.

(β)

$$\mathbf{E}((X - \mathbf{E}(X | \mathcal{G}))^2) \leq \mathbf{E}((X - Y)^2),$$

και η ισότητα ισχύει αν και μόνο αν $Y = \mathbf{E}(X | \mathcal{G})$, δηλαδή ισούνται με πιθανότητα 1. Με άλλα λόγια, η $\mathbf{E}(X | \mathcal{G})$ είναι το (ουσιαστικά μοναδικό) εγγύτερο στο X σημείο του υποχώρου $\mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{G}, \mathbf{P})$.

2.10 Για $X, Y \in \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$, να δειχθεί ότι

$$\mathbf{E}(\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) Y) = \mathbf{E}(X \mathbf{E}(Y | \mathcal{G})).$$

2.11 Για $X \in \mathcal{L}^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$, ονομάζουμε την τυχαία μεταβλητή

$$\text{Var}(X | \mathcal{G}) := \mathbf{E}\{(X - \mathbf{E}(X | \mathcal{G}))^2 | \mathcal{G}\}$$

δεσμευμένη διασπορά τής X ως προς τη σ-άλγεβρα \mathcal{G} . Να δειχθεί ότι

(α) $\text{Var}(X | \mathcal{G}) = \mathbf{E}(X^2 | \mathcal{G}) - \{\mathbf{E}(X | \mathcal{G})\}^2$.

(β) $\text{Var}(X) = \mathbf{E}(\text{Var}(X | \mathcal{G})) + \text{Var}(\mathbf{E}(X | \mathcal{G}))$.

Στην τελευταία ισότητα, η Var στην πρώτη και στην τρίτη ποσότητα είναι η συνηθισμένη διασπορά τυχαίας μεταβλητής.

2.12 Έστω X_1, X_2, \dots, X_n ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές με μέση τιμή 0 και διασπορά 1. Θέτουμε

$$\mathcal{F}_0 := \{\emptyset, \Omega\},$$

$$\mathcal{F}_k := \sigma(X_1, X_2, \dots, X_k)$$

για $1 \leq k \leq n$. Έστω και τυχαίες μεταβλητές $a_1, a_2, \dots, a_n: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ ώστε η a_k να είναι \mathcal{F}_{k-1} -μετρήσιμη και φραγμένη για $1 \leq k \leq n$. Να δειχθεί ότι

$$\mathbf{E}\left\{\left(\sum_{k=1}^n a_k X_k\right)^2\right\} = \sum_{k=1}^n \mathbf{E}(a_k^2).$$

2.4 Η δεσμευμένη μέση τιμή ως προβολή

2.13 Έστω X, Y ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές ώστε $\mathbf{E}|X|, \mathbf{E}|Y| < \infty$ και $\mathbf{E}(X) = 0$. Να δειχθεί ότι $\mathbf{E}|X + Y| \geq \mathbf{E}|Y|$.

2.14 (Αλλαγή μέτρου και δεσμευμένη μέση τιμή) Έστω \mathbf{P} μέτρο στον (Ω, \mathcal{F}) και $f : \Omega \rightarrow [0, \infty]$ τυχαία μεταβλητή με $\mathbf{E}_{\mathbf{P}}(f) = 1$. Να δειχθεί ότι:

(α) Η συνάρτηση $\mathbf{Q} : \mathcal{F} \rightarrow [0, \infty]$ με $\mathbf{Q}(A) := \int_A f d\mathbf{P} = \int f \mathbf{1}_A d\mathbf{P}$ για κάθε $A \in \mathcal{F}$ είναι μέτρο πιθανότητας. [Γράφουμε $d\mathbf{Q} = f d\mathbf{P}$.]

(β) Για κάθε $X \geq 0$ τυχαία μεταβλητή ισχύει

$$\mathbf{E}_{\mathbf{Q}}(X) = \mathbf{E}_{\mathbf{P}}(Xf).$$

Και για $X : \Omega \rightarrow [-\infty, \infty]$ τυχαία μεταβλητή, $\mathbf{E}_{\mathbf{Q}}(|X|) < \infty \Leftrightarrow \mathbf{E}_{\mathbf{P}}(|X|f) < \infty$.

(γ) Για $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$ σ-άλγεβρα στο Ω και $X \in \mathcal{L}^1(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{Q})$,

$$\mathbf{E}_{\mathbf{Q}}(X | \mathcal{G}) = \frac{\mathbf{E}_{\mathbf{P}}(Xf | \mathcal{G})}{\mathbf{E}_{\mathbf{P}}(f | \mathcal{G})}.$$

2.15 Έστω $(A_n)_{n \geq 1}$ αριθμήσιμη διαμέριση τού δειγματικού χώρου Ω με $\mathbf{P}(A_n) > 0$ για κάθε $n \geq 1$. Το θεώρημα ολικής πιθανότητας λέει ότι για κάθε $B \in \mathcal{F}$ ισχύει

$$\mathbf{P}(B) = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{P}(A_n) \mathbf{P}(B | A_n).$$

Θεωρώντας κατάλληλη τυχαία μεταβλητή X και σ-άλγεβρα \mathcal{G} , δείξτε ότι αυτή η ισότητα είναι συνέπεια τής σχέσης $\mathbf{E}(X) = \mathbf{E}(\mathbf{E}(X | \mathcal{G}))$.

3

Martingales

3.1 Ορισμός και παραδείγματα

Έστω χώρος πιθανότητας (Ω, \mathcal{F}, P) . **Διήθηση** σε αυτόν τον χώρο λέμε μια αύξουσα ακολουθία $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ σ-αλγεβρών στο Ω η καθεμία από τις οποίες είναι υποσύνολο της \mathcal{F} . Δηλαδή, έχουμε $\mathcal{F}_n \subset \mathcal{F}_{n+1} \subset \mathcal{F}$ για κάθε $n \geq 0$. Μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών $(X_n)_{n \geq 0}$ στον Ω λέγεται **προσαρμοσμένη** στη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ αν για κάθε $n \geq 0$ η X_n είναι \mathcal{F}_n -μετρήσιμη.

Συμβαση: Σε αυτό το κεφάλαιο, οι δείκτες των διαφόρων οικογενειών που εμφανίζονται είναι φυσικοί αριθμοί. Έτσι, όταν γράφουμε $n \geq 1, n \geq 0$, εννοούμε $n \in \mathbb{N}^+$ και $n \in \mathbb{N}$ αντίστοιχα.

Ορισμός 3.1. Αν η ακολουθία τυχαίων μεταβλητών $X = (X_n)_{n \geq 0}$ ικανοποιεί τις ιδιότητες

- (i) Η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι προσαρμοσμένη στην $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$,
- (ii) $\mathbf{E} |X_n| < \infty$ για κάθε $n \geq 0$,
- (iii) $\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n) = X_n$ για κάθε $n \geq 0$,

τότε λέγεται **martingale** ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ και το μέτρο \mathbf{P} . Αν αντί της (iii) ισχύει η $\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n) \geq X_n$, τότε η ακολουθία λέγεται **submartingale**, ενώ αν ισχύει η $\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n) \leq X_n$, τότε η ακολουθία λέγεται **supermartingale** (ως προς τα $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ και \mathbf{P}).

Η ισότητα ή ανισότητα στο (iii) εννοείται ότι ισχύει με πιθανότητα 1. Αντίστοιχη παρατήρηση κάναμε και στην αρχή της Παραγράφου 2.3. Όταν είναι σαφές ποια είναι τα $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ και \mathbf{P} , δεν τα αναφέρουμε όταν χαρακτηρίζουμε μια ακολουθία ως martingale, submartingale, ή supermartingale ως προς αυτά.

Αν η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι submartingale, τότε η $(-X_n)_{n \geq 0}$ είναι supermartingale. Και η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale αν και μόνο αν είναι ταυτόχρονα submartingale και supermartingale.

Επίσης, παίρνοντας μέσες τιμές στα μέλη της (iii), έχουμε ότι η ακολουθία $(\mathbf{E}(X_n))_{n \geq 0}$ είναι σταθερή, αύξουσα, ή φθίνουσα όταν αντίστοιχα η X είναι martingale, submartingale, supermartingale.

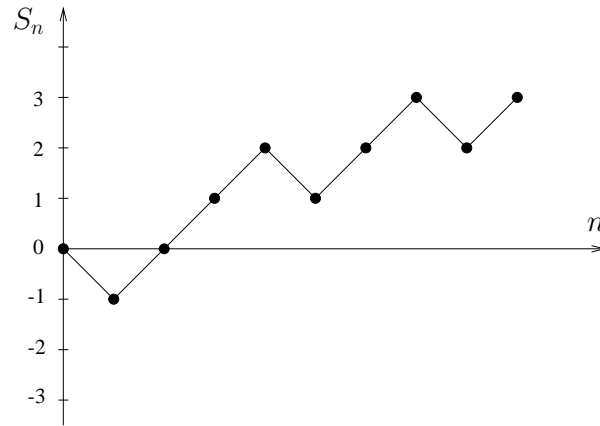
Φανταζόμαστε έναν παίχτη που συμμετέχει σε ένα παιχνίδι που γίνεται σε βήματα και X_n δηλώνει την περιουσία του μετά το βήμα n . Η $\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n)$ δίνει την καλύτερη εκτίμηση που έχουμε για την περιουσία του μετά από ένα βήμα με δεδομένη όλη την πληροφορία κατά τον χρόνο n . Επομένως, όταν η X είναι submartingale (supermartingale), το παιχνίδι είναι υπέρ (αντίστοιχα, κατά) τού παίχτη, ενώ όταν η X είναι martingale, το παιχνίδι είναι δίκαιο.

Ο συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος στο \mathbb{Z} . Έστω $(X_i)_{i \geq 1}$ ακολουθία ανεξάρτητων ισόνομων τυχαίων μεταβλητών με $\mathbf{P}(X_1 = 1) = \mathbf{P}(X_1 = -1) = 1/2$. Θέτουμε

$$S_0 := 0, \\ S_n := X_1 + \dots + X_n \text{ για κάθε } n \geq 1.$$

Η ανέλιξη $S = (S_n)_{n \geq 0}$ λέγεται συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος στο \mathbb{Z} . Φανταζόμαστε ότι το S_n είναι η θέση στο \mathbb{Z} ενός περιπατητή τη χρονική στιγμή n . Κάθε χρονική στιγμή n ο περιπατητής

3.1 Ορισμός και παραδείγματα



Σχήμα 3.1: Το γράφημα μιας πραγματοποίησης των πρώτων 9 βημάτων τού συμμετρικού απλού τυχαίου περιπάτου στο \mathbb{Z} .

επιλέγει τυχαία μια κατεύθυνση, δεξιά ή αριστερά, κάνει ένα βήμα προς αυτή την κατεύθυνση και τοποθετείται στη θέση S_{n+1} τη χρονική στιγμή $n + 1$. Το «απλός» αναφέρεται στο ότι κάθε βήμα είναι μεγέθους 1 (ενώ θα μπορούσε να είναι περισσότερο) ενώ το «συμμετρικός» στο ότι το βήμα στα δεξιά έχει την ίδια πιθανότητα με το βήμα στα αριστερά.

Θα δούμε αμέσως δύο martingales που προκύπτουν από τον απλό τυχαίο περίπατο τα οποία μάλιστα βοηθούν στη μελέτη του. Η διήθηση που θα θεωρούμε είναι η εξής:

$$\begin{aligned}\mathcal{F}_0 &:= \{\emptyset, \Omega\}, \\ \mathcal{F}_n &:= \sigma(X_1, X_2, \dots, X_n) \text{ για } n \geq 1.\end{aligned}$$

Για κάθε $n \in \mathbb{N}$ θέτουμε $M_n := S_n^2 - n$.

Παράδειγμα 3.2. Οι ανελίξεις

- (a) $(S_n)_{n \geq 0}$,
- (b) $(M_n)_{n \geq 0}$

είναι martingales ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

Πράγματι, από τον ορισμό τής $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ προκύπτει ότι οι S, M είναι προσαρμοσμένες. Η (ii) του ορισμού τού martingale ικανοποιείται αφού $|S_n| \leq n, |M_n| \leq n^2 + n$ στον Ω για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

Σχετικά με την ιδιότητα (iii) του ορισμού, για την ανελίξη τού (a) υπολογίζουμε

$$\mathbf{E}(S_{n+1} | \mathcal{F}_n) = \mathbf{E}(S_n + X_{n+1} | \mathcal{F}_n) = S_n + \mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n) = S_n + \mathbf{E}(X_{n+1}) = S_n.$$

Στη δεύτερη ισότητα, χρησιμοποιήσαμε τη γραμμικότητα τής δεσμευμένης τιμής και το γεγονός ότι η S_n είναι \mathcal{F}_n μετρήσιμη. Στην τρίτη ισότητα, το ότι η X_{n+1} είναι ανεξάρτητη από την \mathcal{F}_n και την Πρόταση 2.8(iii).

Για την ανελίξη τού (b), επειδή $S_{n+1} = S_n + X_{n+1}$, έχουμε

$$S_{n+1}^2 - S_n^2 = 2X_{n+1}S_n + X_{n+1}^2 = 2X_{n+1}S_n + 1$$

και άρα $M_{n+1} - M_n = 2X_{n+1}S_n$. Παίρνοντας μέση τιμή ως προς τη σ-άλγεβρα \mathcal{F}_n έχουμε

$$\mathbf{E}(M_{n+1} | \mathcal{F}_n) - M_n = \mathbf{E}(2X_{n+1}S_n | \mathcal{F}_n) = 2S_n \mathbf{E}(X_{n+1}) = 0.$$

Στη δεύτερη ισότητα χρησιμοποιήσαμε την Πρόταση 2.11 και το Παράδειγμα 2.4.

3.1 Ορισμός και παραδείγματα

Ας φανταστούμε έναν παίκτη A που εμφανίζεται σε ένα καζίνο και παίζει το εξής παιχνίδι. Κάθε χρονική στιγμή $1, 2, 3, \dots$ ρίχνεται ένα τίμιο νόμισμα. Αν έρθει «Κεφαλή», ο A κερδίζει μία μονάδα, ενώ αν έρθει «Γράμματα», ο A χάνει μία μονάδα. Το συνολικό κέρδος του παίκτη ακριβώς μετά το παιχνίδι n είναι S_n . Η μέση του τιμή διατηρείται σταθερή, ίση με 0 , αφού η $(S_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale.

Παράδειγμα 3.3. Έστω $(Z_i)_{i \geq 1}$ ακολουθία ανεξάρτητων ισόνομων τυχαίων μεταβλητών με $\mathbf{E}(Z_1) = 1$. Θέτουμε $\mathcal{F}_0 := \{\emptyset, \Omega\}$, $\mathcal{F}_n := \sigma(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ για κάθε $n \geq 1$, και

$$R_0 := 1, \\ R_n := Z_1 Z_2 \cdots Z_n \text{ για } n \geq 1.$$

Η $(R_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$. Πάλι το (i) του ορισμού είναι προφανές. Για το (ii), χρησιμοποιούμε την ανεξαρτησία και υπολογίζουμε

$$\mathbf{E}|Z_1 Z_2 \cdots Z_n| = \mathbf{E}|Z_1| \mathbf{E}|Z_2| \cdots \mathbf{E}|Z_n| = (\mathbf{E}|Z_1|)^n < \infty.$$

Για το (iii), έχουμε

$$\mathbf{E}(R_{n+1} | \mathcal{F}_n) = \mathbf{E}(R_n Z_{n+1} | \mathcal{F}_n) = R_n \mathbf{E}(Z_{n+1} | \mathcal{F}_n) = R_n \mathbf{E}(Z_{n+1}) = R_n.$$

Στη δεύτερη ισότητα χρησιμοποιήσαμε την Πρόταση 2.11.

Παράδειγμα 3.4 (Martingale τού Doob). Έστω χώρος πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$, μια διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ σε αυτόν, και $X \in \mathcal{L}^1(\mathbf{P})$. Ορίζουμε

$$X_n := \mathbf{E}(X | \mathcal{F}_n)$$

για κάθε $n \geq 0$. Τότε η $X = (X_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$. Ότι η X είναι προσαρμοσμένη προκύπτει από τον ορισμό της δεσμευμένης μέσης τιμής. Έπειτα $\mathbf{E}|X_n| = \mathbf{E}(|\mathbf{E}(X | \mathcal{F}_n)|) \leq \mathbf{E}|X| < \infty$ από το (ii) της Πρότασης 2.2. Τέλος, για $n \geq 0$,

$$\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n) = \mathbf{E}(\mathbf{E}(X | \mathcal{F}_{n+1}) | \mathcal{F}_n) = \mathbf{E}(X | \mathcal{F}_n) = X_n.$$

Στη δεύτερη ισότητα, χρησιμοποιήσαμε το ότι $\mathcal{F}_n \subset \mathcal{F}_{n+1}$ και την Πρόταση 2.10(ii).

Στο επόμενο παράδειγμα, για την απόδειξη ότι μια ακολουθία είναι martingale θα χρειαστεί να κάνουμε έναν πραγματικό υπολογισμό μιας δεσμευμένης μέσης τιμής (ενώ στα προηγούμενα παραδείγματα πάντα μια απλή ιδιότητα μας γλύτωνε από τον κόπο).

Παράδειγμα 3.5 (Η κάλπη τού Ρόλυα). Μια κάλπη περιέχει a άσπρες και μ μαύρες μπάλες. Επιλέγουμε στην τύχη μία από τις μπάλες που περιέχει η κάλπη, την επιστρέφουμε στην κάλπη, και προσθέτουμε ακόμα ℓ του ίδιου χρώματος με αυτήν. Επαναλαμβάνουμε αυτή τη διαδικασία επ' άπειρον. Για $n \in \mathbb{N}$, έστω A_n και B_n ο αριθμός των άσπρων και μαύρων μπαλών αντίστοιχα μετά τη n -οστή επανάληψη του πειράματος και $X_n := A_n / (A_n + B_n)$ το ποσοστό των άσπρων μπαλών στην κάλπη εκείνη τη στιγμή ($A_0 = a, B_0 = \mu$). Θέτουμε $\mathcal{F}_n := \sigma(\{A_i, B_i : i = 0, 1, 2, \dots, n\})$.

ΙΣΧΥΡΙΣΜΟΣ: Η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

Οι ιδιότητες (i), (ii) του ορισμού τού martingale ικανοποιούνται. Σχετικά με την (iii), για τον υπολογισμό τής δεσμευμένης μέσης τιμής, θα χρησιμοποιήσουμε το Παράδειγμα 2.6. Η \mathcal{F}_n παράγεται από διαμέριση κάθε μέλος τής οποίας είναι της μορφής

$$C(j_1, k_1, j_2, k_2, \dots, j_n, k_n) := \{A_r = j_r, B_r = k_r \text{ για κάθε } r = 1, 2, \dots, n\}$$

3.2 Βασικές ιδιότητες

όπου j_r, k_r θετικοί ακέραιοι. Αυτό συγκεκριμενοποιεί τα αποτελέσματα των n πρώτων πειραμάτων και για να έχει θετική πιθανότητα πρέπει οι j_r, k_r να ικανοποιούν κάποιες προφανείς σχέσεις. Έστω λοιπόν C ένα σύνολο αυτής της μορφής με θετική πιθανότητα, και για ευκολία γράφουμε j, k αντί j_n, k_n . Για $\omega \in C$ υπολογίζουμε

$$\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n)(\omega) = \frac{\mathbf{E}(X_{n+1}; C)}{\mathbf{P}(C)} \quad (3.1)$$

$$= \frac{j + \ell}{j + k + \ell} \frac{\mathbf{P}(\{A_{n+1} = j + \ell\} \cap C)}{\mathbf{P}(C)} + \frac{j}{j + k + \ell} \frac{\mathbf{P}(\{A_{n+1} = j\} \cap C)}{\mathbf{P}(C)} \quad (3.2)$$

$$= \frac{j + \ell}{j + k + \ell} \mathbf{P}(A_{n+1} = j + \ell | C) + \frac{j}{j + k + \ell} \mathbf{P}(A_{n+1} = j | C) \quad (3.3)$$

$$= \frac{j + \ell}{j + k + \ell} \frac{j}{j + k} + \frac{j}{j + k + \ell} \frac{k}{j + k} = \frac{j}{j + k} = X_n, \quad (3.4)$$

και ο ισχυρισμός αποδείχθηκε.

Δώσαμε μια σχολαστική απόδειξη τού ισχυρισμού. Ο τρόπος που την ανακαλύπτουμε, και συνήθως την γράφουμε, είναι ως εξής. Στην $\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n)$ μας δίνεται όλη η ιστορία τής διαδικασίας ως τη n -οστή επανάληψη τού πειράματος. Είναι στη διάθεσή μας λοιπόν οι αριθμοί $j := A_n, k := B_n$. Οι ενδεχόμενες τιμές τού X_{n+1} είναι $(j + \ell)/(j + k + \ell)$ και $j/(j + k + \ell)$ και, δεδομένου του παρελθόντος, έχουν πιθανότητα $\mathbf{P}(A_{n+1} = j + \ell | A_n = j, B_n = k)$, $\mathbf{P}(A_{n+1} = j | A_n = j, B_n = k)$ αντίστοιχα. Εδώ η δεσμευμένη πιθανότητα είναι η συνηθισμένη από τις στοιχειώδεις πιθανότητες. Και έπειτα γράφουμε την τελευταία γραμμή τού παραπάνω υπολογισμού.

Ένα εύλογο ερώτημα είναι τι κάνει η X_n καθώς το $n \rightarrow \infty$. Συγκλίνει σε κάποιον σταθερό αριθμό; Π.χ., το $1/2$, που θα σήμαινε ότι τελικά επέρχεται μια ισορροπία στον αριθμό των μπαλών στην κάλπη. Αυτό που ισχύει είναι ότι η X_n πράγματι συγκλίνει σε έναν αριθμό στο $(0, 1)$, αλλά αυτός είναι τυχαίος. Κάθε πραγματοποίηση της άπειρης διαδικασίας δίνει και διαφορετικό αριθμό. Μπορεί να αποδειχθεί το εξής: Με πιθανότητα 1, η ακολουθία $(X_n)_{n \geq 1}$ συγκλίνει σε μια τυχαία μεταβλητή X η οποία έχει κατανομή Βήτα με παραμέτρους $\alpha/\ell, \mu/\ell$. Στην ειδική περίπτωση που $\alpha = \mu = \ell = 1$, η οριακή τυχαία μεταβλητή έχει κατανομή την ομοιόμορφη στο $(0, 1)$. Για λεπτομέρειες, δες την Παράγραφο 5.3.2 στο Durrett (2010).

3.2 Βασικές ιδιότητες

Πρόταση 3.6. Έστω $X = (X_n)_{n \geq 0}$ μια ανέλιξη και $m, n \in \mathbb{N}$ με $n > m$.

(i) Αν η X είναι *supermartingale* ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$, τότε

$$\mathbf{E}(X_n | \mathcal{F}_m) \leq X_m.$$

(ii) Αν η X είναι *submartingale* ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$, τότε

$$\mathbf{E}(X_n | \mathcal{F}_m) \geq X_m.$$

(iii) Αν η X είναι *martingale* ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$, τότε

$$\mathbf{E}(X_n | \mathcal{F}_m) = X_m.$$

Απόδειξη. Αρκεί να δείξουμε το (i). Παίρνουμε σταθερό $m \in \mathbb{N}$ και εφαρμόζουμε επαγωγή στο n . Για $n = m + 1$ η ζητούμενη ισχύει από τον ορισμό τού *supermartingale*. Έστω ότι ισχύει για κάποιο $n > m$. Τότε

$$\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_m) = \mathbf{E}(\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n) | \mathcal{F}_m) \leq \mathbf{E}(X_n | \mathcal{F}_m) \leq X_m.$$

3.3 Παιχνίδια και το διακριτό στοχαστικό ολοκλήρωμα

Η πρώτη ισότητα έπεται από την Πρόταση 2.10, η πρώτη ανισότητα από το ότι η X είναι supermartingale, και η δεύτερη είναι η επαγωγική υπόθεση. ■

Πρόταση 3.7. Έστω $(X_n)_{n \geq 0}$ ακολουθία τυχαίων μεταβλητών στον Ω με τιμές στο \mathbb{R} και $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ συνάρτηση ορισμένη σε ένα διάστημα $I \subset \mathbb{R}$ ώστε $\mathbf{P}(X_n \in I) = 1$ και $\mathbf{E}|f(X_n)| < \infty$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

(i) Αν η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ και η f είναι κυρτή, τότε η $(f(X_n))_{n \geq 0}$ είναι submartingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

(ii) Αν η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι submartingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ και η f είναι κυρτή και αύξουσα, τότε η $(f(X_n))_{n \geq 0}$ είναι submartingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

Απόδειξη. (i) Μένει να ελέγξουμε την ιδιότητα (iii) του Ορισμού 3.1 για submartingales.

$$\mathbf{E}(f(X_{n+1}) | \mathcal{F}_n) \geq f(\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n)) = f(X_n)$$

Χρησιμοποιήσαμε την ανισότητα Jensen (Πρόταση 2.16) και στην τελευταία ισότητα το ότι η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale.

(ii) Έχουμε

$$\mathbf{E}(f(X_{n+1}) | \mathcal{F}_n) \geq f(\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n)) \geq f(X_n).$$

Χρησιμοποιήσαμε την ανισότητα Jensen και στην τελευταία ανισότητα το γεγονός ότι η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι submartingale και η f είναι αύξουσα. ■

Παράδειγμα 3.8. Η προηγούμενη πρόταση συνεπάγεται ότι αν η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ και $\mathbf{E}(X_n^2) < \infty$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$, τότε η $(X_n^2)_{n \geq 0}$ είναι submartingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

3.3 Παιχνίδια και το διακριτό στοχαστικό ολοκλήρωμα

Έστω μια διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ και μια προσαρμοσμένη σε αυτήν ανέλιξη $X = (X_n)_{n \geq 0}$.

Ορισμός 3.9. Μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών $(A_n)_{n \geq 1}$ λέγεται **προβλέψιμη** αν για κάθε $n \geq 1$, η A_n είναι \mathcal{F}_{n-1} μετρήσιμη.

Σε αυτή την παράγραφο, ερμηνεύουμε την ανέλιξη X ως εξής. Υποθέτουμε ότι ένα παιχνίδι παίζεται σε πολλά στάδια, τις χρονικές στιγμές 1, 2, 3, κ.ο.κ. Αν ποντάρει κανείς μία μονάδα για το στάδιο τής χρονικής στιγμής n , τότε το κέρδος του είναι $X_n - X_{n-1}$. Για παράδειγμα, X_n μπορεί να είναι η τιμή μιας μετοχής τη χρονική στιγμή n . Αμέσως μετά τη χρονική στιγμή $n - 1$, έχοντας παρατηρήσει ότι η μετοχή έχει τιμή X_{n-1} , αγοράζουμε μία μετοχή. Τη χρονική στιγμή n αυτή η μετοχή έχει αξία X_n . Αν την πουλήσουμε, το κέρδος ή η ζημιά μας είναι $X_n - X_{n-1}$. Θεωρούμε ότι το επιτόκιο τής τράπεζας είναι 0%.

Στο πλαίσιο ενός παιχνιδιού, μια προβλέψιμη ακολουθία τη λέμε στρατηγική πονταρίσματος. Συνήθως, $\mathcal{F}_0 = \{\emptyset, \Omega\}$, και $\mathcal{F}_n := \sigma(X_1, X_2, \dots, X_n)$ για $n \geq 1$. Για το αποτέλεσμα τού σταδίου n , ο παίκτης ποντάρει A_n μονάδες. Η προβλεψιμότητα είναι ο μαθηματικός τρόπος να πει κανείς ότι η ποσότητα A_n μπορεί να εξαρτάται μόνο από την πληροφορία που είναι διαθέσιμη πριν πραγματοποιηθεί το στάδιο n του παιχνιδιού, δηλαδή την \mathcal{F}_{n-1} .

Για δύο ακολουθίες $(X_n)_{n \geq 0}$, $(A_n)_{n \geq 1}$ όπως πιο πάνω, ορίζουμε την ανέλιξη $A \bullet X$ ως εξής.

$$(A \bullet X)_0 := 0,$$

$$(A \bullet X)_n := \sum_{k=1}^n A_k (X_k - X_{k-1}) \text{ για κάθε } n \geq 1.$$

3.4 Χρόνοι διακοπής

Ο αριθμός $(A \cdot X)_n$ είναι το συνολικό κέρδος ενός παίκτη μετά το στάδιο n του παιχνιδιού αν ακολουθεί τη στρατηγική $(A_n)_{n \geq 1}$. Η ανέλιξη $A \cdot X$ λέγεται το **διακριτό στοχαστικό ολοκλήρωμα** της A ως προς X .

Πρόταση 3.10. Έστω $(A_n)_{n \geq 1}$ μια προβλέψιμη ακολουθία.

- (i) Αν η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι (sub)supermartingale και κάθε A_n είναι μη αρνητική φραγμένη τυχαία μεταβλητή, τότε η $A \cdot X$ είναι (sub)supermartingale.
- (ii) Αν η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale και κάθε A_n είναι φραγμένη τυχαία μεταβλητή, τότε η $A \cdot X$ είναι martingale.

Απόδειξη. Η (i) του Ορισμού (3.1) προκύπτει από τις υποθέσεις για τις $(X_n)_{n \geq 1}, (A_n)_{n \geq 1}$, ενώ η (ii) προκύπτει από το ότι, για κάθε $n \geq 1$, η A_n είναι φραγμένη τυχαία μεταβλητή. Έπειτα, για κάθε $n \geq 0$, έχουμε

$$\begin{aligned} \mathbf{E}\{(A \cdot X)_{n+1} | \mathcal{F}_n\} - (A \cdot X)_n &= \mathbf{E}\{(A \cdot X)_{n+1} - (A \cdot X)_n | \mathcal{F}_n\} = \mathbf{E}\{A_{n+1}(X_{n+1} - X_n) | \mathcal{F}_n\} \\ &= A_{n+1} \{\mathbf{E}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n) - X_n\}. \end{aligned}$$

Με τις υποθέσεις τού (i), επειδή $A_n \geq 0$, η τελευταία ποσότητα είναι μη θετική αν η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι supermartingale και μη αρνητική αν η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι submartingale. Με τις υποθέσεις τού (ii), η τελευταία ποσότητα ισούται με 0. ■

Η διαισθητική ερμηνεία τού μέρους (ii) της προηγούμενης πρότασης είναι ότι σε ένα δίκαιο παιχνίδι (το martingale X) δεν μπορούμε να δημιουργήσουμε πλεονέκτημα (να κερδίσουμε κατά μέσο όρο) αν η στρατηγική πονταρίσματος που χρησιμοποιούμε είναι προβλέψιμη. Στο μέρος (i), στην περίπτωση που η X είναι supermartingale, το παιχνίδι είναι εναντίον μας. Αν η στρατηγική έχει πάντα βάρη $A_n \geq 0$ και είναι προβλέψιμη, δεν μπορούμε να φέρουμε το παιχνίδι υπέρ μας. Ο περιορισμός $A_n \geq 0$ είναι λογικός. Το να επιτρέπεται $A_n < 0$ σημαίνει ότι μπορούμε να πάρουμε την αντίθετη πλευρά στο παιχνίδι από ότι προσφέρεται στους παίχτες, και άρα να έχουμε ένα παιχνίδι υπέρ μας.

3.4 Χρόνοι διακοπής

Ορισμός 3.11. Μια συνάρτηση $T : \Omega \rightarrow \mathbb{N} \cup \{\infty\}$ λέγεται **χρόνος διακοπής** ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ αν για κάθε $n \in \mathbb{N}$ ισχύει

$$\{T \leq n\} \in \mathcal{F}_n.$$

Δηλαδή το αν ισχύει $T \leq n$ μπορεί να καθοριστεί με βάση τις πληροφορίες που έχουμε ως τον χρόνο n . Τα επόμενα παραδείγματα το κάνουν αυτό πιο κατανοητό.

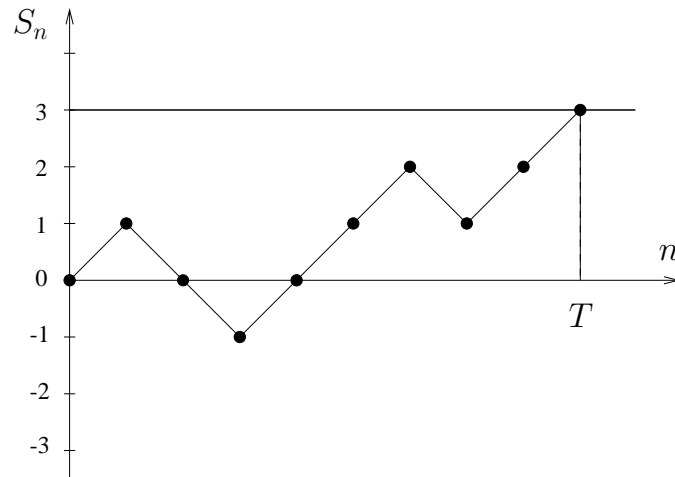
Παράδειγμα 3.12 (Χρόνος διακοπής). Έστω $(S_n)_{n \geq 0}$ ο συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος στο \mathbb{Z} και $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ η διήθηση όπως πριν το Παράδειγμα 3.2. Η τυχαία μεταβλητή

$$T := \inf\{k \geq 0 : S_k = 3\}$$

παίρνει τιμές στο $\mathbb{N} \cup \{\infty\}$ ($\inf \emptyset = \infty$). Είναι ο πρώτος χρόνος που ο περίπατος χτυπάει/επισκέπτεται το 3. Για $n \in \mathbb{N}$, $\{T \leq n\} = \cup_{j=0}^n \{S_j = 3\}$ και $\{S_j = 3\} \in \mathcal{F}_j \subset \mathcal{F}_n$ για κάθε $j \leq n$ αφού η S_j είναι \mathcal{F}_j μετρήσιμη. Άρα ο T είναι πράγματι χρόνος διακοπής.

Πρακτικά, αν μας δώσει κάποιος την πληροφορία τού \mathcal{F}_n , δηλαδή τι τιμές πήρανε οι τυχαίες μεταβλητές X_1, X_2, \dots, X_n , μπορούμε να αποφανθούμε αν ισχύει $T \leq n$.

3.4 Χρόνοι διακοπής



Σχήμα 3.2: Ο χρόνος διακοπής T του Παραδείγματος 3.12. Στη συγκεκριμένη πραγματοποίηση έχουμε $T = 9$.

Γενικά οι χρόνοι πρώτης εισόδου σε ένα σύνολο για την $(S_n)_{n \geq 0}$ είναι χρόνοι διακοπής ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ του Παραδείγματος 3.2. Τώρα θα δούμε ένα παράδειγμα χρόνου που δεν είναι χρόνος διακοπής.

Παράδειγμα 3.13 (Χρόνος που δεν είναι χρόνος διακοπής). Δουλεύουμε πάλι με τον συμμετρικό απλό τυχαίο περίπατο στο \mathbb{Z} . Έστω

$$\hat{T} := \sup\{k \leq 7 : S_k = 0\}.$$

Αυτό είναι το τελευταίο μηδενικό της S πριν το χρόνο 7. Το σύνολο τού οποίου το \sup είναι το \hat{T} είναι μη κενό αφού περιέχει το 0. Θα χρησιμοποιήσουμε για τον χρόνο διακοπής τον ισοδύναμο χαρακτηρισμό από την Άσκηση 3.6.

Για $n \geq 0$ αναρωτιόμαστε αν $\{\hat{T} = n\} \in \mathcal{F}_n$. Το ερώτημα έχει ενδιαφέρον μόνο για $n \leq 7$, αλλιώς το σύνολο $\{\hat{T} = n\}$ είναι το κενό. Ας πάρουμε λοιπόν $n = 2$. Έχοντας την πληροφορία για το τι συνέβη ως τον χρόνο 2, μπορούμε να πούμε αν συνέβη το γεγονός $\hat{T} = 2$; Όχι, γιατί ακόμα και να ισχύει $S_2 = 0$, δεν ξέρουμε αν αργότερα η S ξαναχτυπήσει το 0. Είναι δυνατόν, για παράδειγμα, να ισχύει $S_6 = 0$, οπότε $\hat{T} = 6$ (η $S_7 = 0$ δεν είναι δυνατόν να συμβεί ποτέ), ή να ισχύει $S_6 \neq 0$, οπότε $\hat{T} = 2$ ή $\hat{T} = 4$.

Πάμε τώρα να το δούμε και τυπικά. Αν $\{\hat{T} = 2\} \in \mathcal{F}_2$, τότε επειδή και το σύνολο $A := \{X_1 = 1, X_2 = -1\} \in \mathcal{F}_2$, θα ισχύει $B := \{\hat{T} = 2\} \cap A \in \mathcal{F}_2$. Τότε $\emptyset \neq B \subsetneq A$ γιατί

$$\{X_1 = 1, X_2 = -1, X_3 = 1, X_4 = -1\} \subset A \setminus B$$

και

$$\{X_1 = 1, X_2 = -1, X_3 = 1, X_4 = 1, X_5 = 1\} \subset B.$$

Όμως από την περιγραφή της σ -άλγεβρας \mathcal{F}_2 (Παράδειγμα 1.10) προκύπτει ότι το μόνο στοιχείο της που είναι γνήσιο υποσύνολο τού A είναι το \emptyset .

3.5 Το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής

Για χρόνο διακοπής T και μια προσαρμοσμένη στοχαστική ανέλιξη $X = (X_n)_{n \geq 0}$, ορίζουμε τη σταματημένη ανέλιξη X^T ως $X_n^T = X_{n \wedge T}$. Δηλαδή για $n \in \mathbb{N}$ η $X_n^T : \Omega \rightarrow [-\infty, \infty]$ έχει τιμές

$$X_n^T(\omega) = X_{n \wedge T(\omega)}(\omega) = \begin{cases} X_i(\omega) & \text{αν } T(\omega) = i < n, \\ X_n(\omega) & \text{αν } T(\omega) \geq n. \end{cases}$$

Για κάθε $\omega \in \Omega$, θέτοντας $r := T(\omega)$, η X^T ακολουθεί τη X στις τιμές X_0, X_1, \dots, X_r και έπειτα σταθεροποιείται στην τιμή X_r . Αν $T(\omega) = \infty$, τότε για αυτή την τιμή τού ω η X^T έχει το ίδιο μονοπάτι με τη X . Το ότι η X^T είναι επίσης προσαρμοσμένη αφήνεται ως άσκηση (Άσκηση 3.9). Στην ειδική περίπτωση που η X είναι submartingale ή supermartingale αυτό προκύπτει και από την απόδειξη τής επόμενης πρότασης.

Πρόταση 3.14. Έστω T χρόνος διακοπής.

(i) Αν η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι (sub)supermartingale, τότε η X^T είναι (sub)supermartingale.

(ii) Αν η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale, τότε η X^T είναι martingale.

Απόδειξη. Θεωρούμε την ανέλιξη $(A_n)_{n \geq 1}$ που ορίζεται ως $A_n := \mathbf{1}_{n \leq T}$ για κάθε $n \geq 1$. Δηλαδή

$$A_n(\omega) = \begin{cases} 1 & \text{αν } n \leq T(\omega), \\ 0 & \text{αν } n > T(\omega). \end{cases}$$

Με την ερμηνεία τής στρατηγικής που δώσαμε στην A , η συγκεκριμένη επιλογή σημαίνει ότι σε κάθε στάδιο τού παιχνιδιού μέχρι και το στάδιο T ποντάρουμε μία μονάδα. Έπειτα σταματάμε. Η A είναι προβλέψιμη γιατί, για κάθε $n \geq 1$, η A_n είναι η δείκτρια συνάρτηση τού συνόλου

$$\{T \geq n\} = \Omega \setminus \{T \leq n-1\} \in \mathcal{F}_{n-1}.$$

Έπειτα

$$(A \cdot X)_n = \sum_{k=1}^{n \wedge T} (X_k - X_{k-1}) = X_{n \wedge T} - X_0,$$

και το συμπέρασμα έπεται από την Πρόταση 3.10 και το ότι η X_0 είναι \mathcal{F}_0 μετρήσιμη. ■

Έπεται λοιπόν ότι για χρόνο διακοπής T , supermartingale X , και $n \in \mathbb{N}$, ισχύει

$$\mathbf{E}(X_{n \wedge T}) \leq \mathbf{E}(X_0), \tag{3.5}$$

ενώ για X martingale ισχύει

$$\mathbf{E}(X_{n \wedge T}) = \mathbf{E}(X_0). \tag{3.6}$$

Σε πολλές περιπτώσεις ισχύει $P(T < \infty) = 1$ και τότε $\lim_{n \rightarrow \infty} X_{n \wedge T} = X_T$ με πιθανότητα 1. Για X martingale, θα θέλαμε να ισχυριστούμε ότι $\mathbf{E}(X_T) = \mathbf{E}(X_0)$ και θα το πετυχαίναμε αν μπορούσαμε στην εκφραση $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}(X_{n \wedge T}) = \mathbf{E}(X_0)$ να βάζαμε το όριο μέσα στη μέση τιμή.

Ας δούμε ένα παράδειγμα που αυτό δεν μπορεί να γίνει. Θεωρούμε $(S_n)_{n \geq 0}$ τον συμμετρικό απλό τυχαίο περίπατο στο \mathbb{Z} και $T := \inf\{k \geq 1 : S_k = 1\}$. Ο T είναι χρόνος διακοπής και θα δείξουμε στο Παράδειγμα 3.18 πιο κάτω ότι $P(T < \infty) = 1$. Άρα $S_T = 1$ και επομένως $\mathbf{E}(S_T) = 1 \neq 0 = \mathbf{E}(S_0)$.

Θεώρημα 3.15 (Θεώρημα επιλεκτικής διακοπής). Έστω $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ martingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ και T χρόνος διακοπής ως προς την ίδια διήθηση και φραγμένος. Τότε

$$\mathbf{E}(X_T) = \mathbf{E}(X_0). \quad (3.7)$$

Αν η $(X)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι submartingale (supermartingale) τότε η ισότητα αντικαθίσταται από την \geq (\leq).

Απόδειξη. Έστω ότι για κάθε $\omega \in \Omega$ ισχύει ότι $T(\omega) \leq n_0$ για κάποιο $n_0 \in \mathbb{N}$. Επομένως $n_0 \wedge T = T$, και το θεώρημα προκύπτει από τις (3.5), (3.6). ■

Η απαίτηση ο T να είναι φραγμένος δεν είναι τόσο περιοριστική. Για οποιονδήποτε χρόνο διακοπής T με τιμές στο $\mathbb{N} \cup \{\infty\}$ μπορούμε να πάρουμε φραγμένους χρόνους διακοπής που τον προσεγγίζουν, τους $T \wedge k$ (με το $k \in \mathbb{N}$ σταθερό). Για αυτούς το θεώρημα εφαρμόζεται άμεσα, και έπειτα προσπαθούμε να πάρουμε $k \rightarrow \infty$ χρησιμοποιώντας κάποιο θεώρημα σύγκλισης (μονότονης, φραγμένης, κυριαρχημένης σύγκλισης).

Στην περίπτωση που μας ενδιαφέρει η σχέση (3.7) για ένα martingale και έναν φραγμένο χρόνο διακοπής (και όχι η περίπτωση submartingale ή supermartingale), υπάρχει άμεσο επιχείρημα που δεν χρησιμοποιεί την έννοια τού διακριτού στοχαστικού ολοκληρώματος.

Πρόταση 3.16. Έστω $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ martingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ και T χρόνος διακοπής ως προς την ίδια διήθηση και με $T \leq n_0 \in \mathbb{N}$ (δηλαδή φραγμένος). Τότε

$$\mathbf{E}(X_T) = \mathbf{E}(X_{n_0}). \quad (3.8)$$

Αν η $(X)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι submartingale (supermartingale) τότε η ισότητα αντικαθίσταται από την \leq (\geq).

Επομένως, στην περίπτωση που η ακολουθία είναι martingale έχουμε $\mathbf{E}(X_T) = \mathbf{E}(X_{n_0}) = \mathbf{E}(X_0)$.

Απόδειξη. Αποδεικνύουμε την περίπτωση που η ακολουθία είναι submartingale.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(X_T) &= \sum_{k=0}^{n_0} \mathbf{E}(X_T \mathbf{1}_{T=k}) = \sum_{k=0}^{n_0} \mathbf{E}(X_k \mathbf{1}_{T=k}) \leq \sum_{k=0}^{n_0} \mathbf{E}(\mathbf{E}(X_{n_0} | \mathcal{F}_k) \mathbf{1}_{T=k}) = \sum_{k=0}^{n_0} \mathbf{E}\{\mathbf{E}(X_{n_0} \mathbf{1}_{T=k} | \mathcal{F}_k)\} \\ &= \mathbf{E}\{\mathbf{E}(X_{n_0} | \mathcal{F}_k)\} = \mathbf{E}(X_{n_0}). \end{aligned}$$

Η ανισότητα είναι συνέπεια τού ότι η $(X)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι submartingale. Η τρίτη ισότητα ισχύει γιατί $\{T = k\} \in \mathcal{F}_k$ οπότε η δείκτρια αυτού του συνόλου είναι \mathcal{F}_k -μετρήσιμη. ■

3.6 Εφαρμογές στον συμμετρικό απλό τυχαίο περίπατο στο \mathbb{Z}

Σε αυτή την παράγραφο δουλεύουμε στο πλαίσιο τού Παραδείγματος 3.2. Η τιμή S_n είναι το συνολικό κέρδος τού παίχτη A ακριβώς μετά το παιχνίδι n (δες ακριβώς μετά το Παράδειγμα 3.2). Για κάθε ακέραιο r , θέτουμε

$$T_r := \inf\{k \geq 0 : S_k = r\},$$

που είναι η στιγμή κατά την οποία το κέρδος τού παίχτη γίνεται r για πρώτη φορά.

Έστω ότι ο παίχτης έχει συνολικό κεφάλαιο $-a$ ($a < 0$) ενώ το καζίνο $b > 0$, με $a, b \in \mathbb{Z}$. Αν συμβεί $T_b < T_a$, τότε ο παίχτης καταφέρνει να οδηγήσει το καζίνο σε χρεωκοπία, ενώ αν συμβεί $T_a < T_b$, τότε χρεωκοπεί ο παίχτης. Το παιχνίδι τελειώνει τη χρονική στιγμή $T_b \wedge T_a$, όταν κάποιος από τους δύο χρεωκοπεί. Το επόμενο παράδειγμα δίνει τη μέση διάρκεια του παιχνιδιού και την πιθανότητα να κερδίσει ο παίχτης.

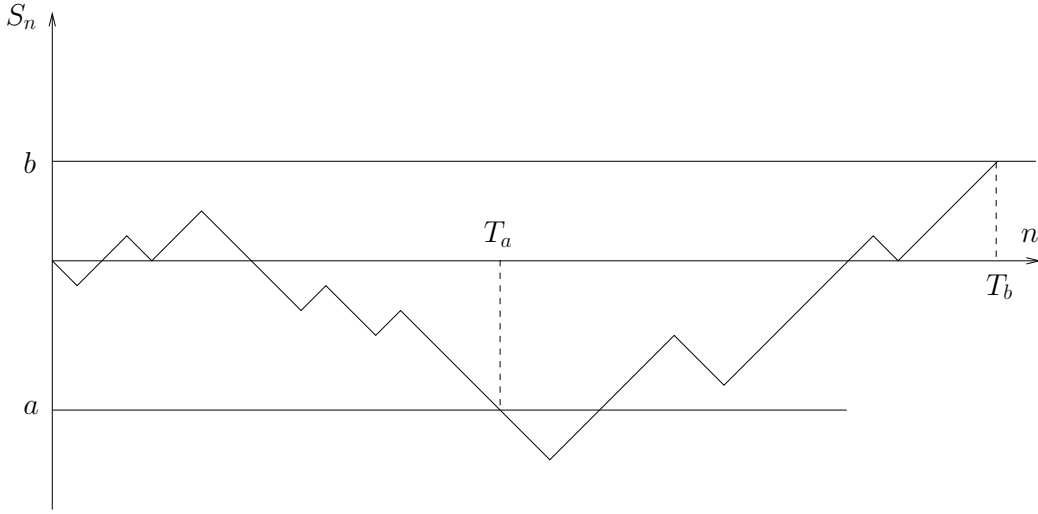
Παράδειγμα 3.17 (Έξοδος από διάστημα). Θεωρούμε ακεραίους a, b με $a < 0 < b$ και θέτουμε $T = T_a \wedge T_b$. Θα δείξουμε ότι

$$(i) \mathbf{E}(T) < \infty, \quad (3.9)$$

$$(ii) \mathbf{P}(T_b < T_a) = \frac{|a|}{b + |a|}, \quad (3.10)$$

$$(iii) \mathbf{E}(T) = |a|b. \quad (3.11)$$

Η δεύτερη σχέση είναι η πιθανότητα ο συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος να βγεί από το διάστημα (a, b) στο σημείο b και $T := T_a \wedge T_b$ είναι ο χρόνος εξόδου.



Σχήμα 3.3: Χρόνος ως την πρώτη έξοδο από το διάστημα (a, b) . Στη συγκεκριμένη πραγματοποίηση, $T = T_a$ αφού $T_a < T_b$.

(i) Χρησιμοποιώντας το Παράδειγμα 3.2 και την Πρόταση 3.14, έχουμε ότι η $(Z_n)_{n \geq 0}$ με $Z_n := S_{n \wedge T}^2 - (n \wedge T)$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ είναι martingale. Η $\mathbf{E}(Z_n) = \mathbf{E}(Z_0) = 0$ δίνει

$$\mathbf{E}(S_{n \wedge T}^2) = \mathbf{E}(n \wedge T) \quad (3.12)$$

για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Το δεξί μέλος της τελευταίας ισότητας, για $n \rightarrow \infty$, συγκλίνει στο $\mathbf{E}(T)$ (θεώρημα μονότονης σύγκλισης). Το αριστερό μέλος είναι φραγμένο από το $\max\{a^2, b^2\}$ λόγω του ορισμού τού T . Έπεται ότι $\mathbf{E}(T) < \infty$.

(ii) Η $(W_n)_{n \geq 0}$ με $W_n := S_{n \wedge T}$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ είναι ένα φραγμένο martingale. Αυτό λόγω της Πρότασης 3.14 και του ότι μόλις η ακολουθία S πάρει μια από τις τιμές a ή b (δηλαδή για κάποιο n , $S_n = a$ ή $S_n = b$), η W σταθεροποιείται στην τιμή αυτή για όλους τους μεγαλύτερους χρόνους, άρα δεν μπορεί να πάρει τιμές έξω από το διάστημα $[a, b]$. Έτσι η $\mathbf{E}(W_n) = \mathbf{E}(W_0) = 0$ δίνει $\mathbf{E}(S_{n \wedge T}) = 0$, και το θεώρημα φραγμένης σύγκλισης δίνει $\mathbf{E}(S_T) = 0$ (αφού $T < \infty$ με πιθανότητα 1). Προφανώς $\{T < \infty\} = \{T_a < T_b\} \cup \{T_b < T_a\}$, και $S_T = a$ στο $\{T_a < T_b\}$, ενώ $S_T = b$ στο $\{T_b < T_a\}$. Άρα

$$\begin{aligned} 0 &= \mathbf{E}(S_T) = \mathbf{E}(S_T \mathbf{1}_{T_a < T_b}) + \mathbf{E}(S_T \mathbf{1}_{T_b < T_a}) = a \mathbf{P}(T_a < T_b) + b \mathbf{P}(T_b < T_a) \\ &= a \{1 - \mathbf{P}(T_b < T_a)\} + b \mathbf{P}(T_b < T_a) = a + (b - a) \mathbf{P}(T_b < T_a), \end{aligned}$$

και έτσι προκύπτει ο ισχυρισμός (ii).

(iii) Συνεχίζουμε από την (3.12). Επειδή έχουμε $\mathbf{P}(T < \infty) = 1$, εφαρμόζοντας το θεώρημα φραγμένης σύγκλισης στο αριστερό μέλος της (3.12) και το θεώρημα μονότονης σύγκλισης στο δεξί, παίρνουμε

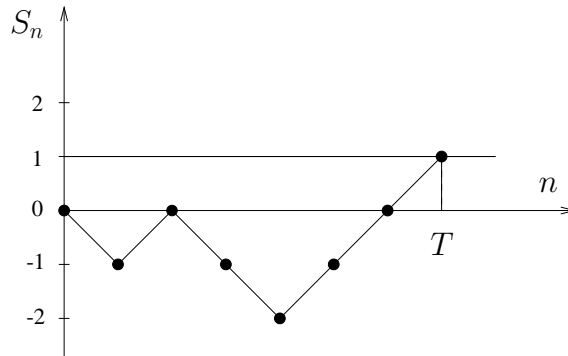
$$\mathbf{E}(T) = \mathbf{E}(S_T^2) = a^2 \mathbf{P}(T_a < T_b) + b^2 \mathbf{P}(T_a < T_b) = a^2 \frac{b}{b+|a|} + b^2 \frac{|a|}{b+|a|} = |a|b.$$

Χρησιμοποιήσαμε το (ii) στη δεύτερη ισότητα.

Παράδειγμα 3.18 (Χρόνος μέχρι κέρδος 1). Υπενθυμίζουμε ότι έχουμε ορίσει

$$T_1 := \inf\{n \geq 0 : S_n = 1\}.$$

Θα δείξουμε ότι:



Σχήμα 3.4: Χρόνος μέχρι κέρδος 1.

(i) $\mathbf{E}(T_1) = \infty$.

(ii) $\mathbf{P}(T_1 < \infty) = 1$.

(iii) Για κάθε $k \geq 1$ ακέραιο ισχύει

$$\mathbf{P}(T_1 = 2k - 1) = (-1)^{k+1} \binom{1/2}{k} = \frac{1}{(2k-1)2^{2k}} \binom{2k}{k},$$

$$\mathbf{P}(T_1 = 2k) = 0.$$

Η (iii) καθορίζει πλήρως την κατανομή της τυχαίας μεταβλητής T_1 .

(i) Για κάθε $k \in \mathbb{N}^+$ έχουμε $\mathbf{P}(T \geq k) \geq \mathbf{P}(T_{-k} < T_1) = 1/(k+1)$ λόγω της (3.10). Επομένως $\mathbf{E}(T_1) = \sum_{k=1}^{\infty} \mathbf{P}(T \geq k) = \infty$.

(ii) Επειδή $\lim_{k \rightarrow \infty} T_{-k} = \infty$ για κάθε ω (αφού $T_{-k} \geq k$), έχουμε την εξής ισότητα ενδεχομένων

$$\{T_1 < \infty\} = \cup_{k=1}^{\infty} \{T_1 < T_{-k}\}.$$

Η ακολουθία ενδεχομένων $(\{T_1 < T_{-k}\})_{k \geq 1}$ είναι αύξουσα ως προς k . Άρα, πάλι χρησιμοποιώντας την (3.10), έχουμε

$$\mathbf{P}(T_1 < \infty) = \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{P}(T_1 < T_{-k}) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k}{k+1} = 1.$$

(iii) Έστω $a > 0$ σταθερό. Για $n \in \mathbb{N}$, θέτουμε

$$Z_n := \frac{e^{aX_n}}{\cosh a}.$$

3.6 Εφαρμογές στον συμμετρικό απλό τυχαίο περίπατο στο \mathbb{Z}

Επειδή οι $(Z_n)_{n \geq 0}$ είναι ανεξάρτητες και ισόνομες με $E(Z_1) = 1$, έπεται ότι η $(R_n)_{n \geq 0}$ που ορίζεται όπως στο Παράδειγμα 3.3 είναι martingale. Ισχύει βέβαια $R_n = e^{aS_n}/(\cosh a)^n$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Για $n \in \mathbb{N}$ δεδομένο, εφαρμόζουμε το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής για τον φραγμένο χρόνο διακοπής $n \wedge T_1$. Παίρνουμε

$$\mathbf{E}\left(\frac{e^{aS_{n \wedge T_1}}}{(\cosh a)^{n \wedge T_1}}\right) = \mathbf{E}(e^{aS_0}) = 1.$$

Η συνάρτηση στη μέση τιμή είναι φραγμένη από το e^a γιατί $a > 0$, $S_{n \wedge T_1} \leq 1$, από τον ορισμό του T_1 , και $\cosh a > 1$. Στο $\{T_1 < \infty\}$ έχουμε $S_{T_1} = 1$ και

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{e^{aS_{n \wedge T_1}}}{(\cosh a)^{n \wedge T_1}} = \frac{e^a}{(\cosh a)^{T_1}}.$$

[Στο $\{T_1 = \infty\}$ το όριο ισούται με 0 αφού $(\cosh a)^{n \wedge T_1} = (\cosh a)^n$, $\cosh a > 1$ και $S_{n \wedge T_1} \leq 1$, αλλά δεν μας απασχολεί αφού αφορά ενδεχόμενο με πιθανότητα 0.] Άρα το θεώρημα φραγμένης σύγκλισης δίνει $\mathbf{E}(e^a(\cosh a)^{-T_1}) = 1$ και άρα

$$\mathbf{E}((\cosh a)^{-T_1}) = e^{-a}$$

για κάθε $a > 0$. Αυτή η ισότητα ουσιαστικά δίνει την πιθανογεννήτρια της T_1 και άρα πλήρη περιγραφή της κατανομής της T_1 . Συγκεκριμένα, θέτοντας $t = 1/\cosh a = 2/(e^a + e^{-a}) \in (0, 1)$, παίρνουμε $e^a = (1 + \sqrt{1 - t^2})/t$ και

$$\mathbf{E}(t^{T_1}) = \frac{t}{1 + \sqrt{1 - t^2}} = \frac{1 - \sqrt{1 - t^2}}{t} = \sum_{k=1}^{\infty} \binom{1/2}{k} (-1)^{k+1} t^{2k-1}$$

με χρήση του διωνυμικού αναπτύγματος. Καθώς το a διατρέχει το $(0, \infty)$, το t διατρέχει το $(0, 1)$. Άρα η τελευταία σχέση ισχύει για κάθε $t \in (0, 1)$. Όμως η T_1 είναι τυχαία μεταβλητή με τιμές ακέραιες θετικές, οπότε $\mathbf{E}(t^{T_1}) = \sum_{j=1}^{\infty} \mathbf{P}(T_1 = j)t^j$. Έπεται ότι

$$\mathbf{P}(T_1 = 2k - 1) = (-1)^{k+1} \binom{1/2}{k} = \frac{1}{(2k - 1)2^{2k}} \binom{2k}{k}$$

και $\mathbf{P}(T_1 = 2k) = 0$ για κάθε $k \in \mathbb{N}^+$.

Παρατήρηση 3.19 (Ασυμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος στο \mathbb{Z}). Έστω $(X_i)_{i \geq 1}$ ακολουθία ανεξάρτητων ισόνομων τυχαίων μεταβλητών με

$$\mathbf{P}(X_1 = 1) = p, \mathbf{P}(X_1 = -1) = 1 - p =: q,$$

όπου $p \in (0, 1)$. Ως συνήθως, θεωρούμε την ακολουθία τυχαίων μεταβλητών $(S_n)_{n \geq 0}$, με $S_0 := 0, S_n := X_1 + \dots + X_n$ για $n \in \mathbb{N}^+$. Ορίζουμε για $r \in \mathbb{Z}$ την τυχαία μεταβλητή $T_r := \inf\{k \geq 0 : S_k = r\}$. Θα δείξουμε ότι για $a < 0 < b$ ακεραίους ισχύει $\mathbf{P}(T_a \wedge T_b < \infty) = 1$. Δηλαδή, ο ασυμμετρικός τυχαίος περίπατος βγαίνει με πιθανότητα 1 από το διάστημα (a, b) . Έστω $\ell := |a| + b$ το μήκος του διαστήματος. Για $n \in \mathbb{N}^+$ θέτουμε

$$A_n := \{X_k = 1 \text{ για } k = n\ell + 1, n\ell + 2, \dots, n\ell + \ell\}.$$

Τι συμβαίνει κατά τους χρόνους k τους οποίους περιορίζει το A_n ; Ο τυχαίος περίπατος ξεκινάει από μια τιμή (τη $S_{n\ell}$) και αυξάνεται για ℓ διαδοχικά βήματα. Αν συμβεί ένα από τα A_n , τότε σίγουρα ο περίπατος βγαίνει από το διάστημα (a, b) .

3.7 Ανισότητα Doob

Τα $\{A_n : n \geq 1\}$ είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και το καθένα έχει πιθανότητα $s := p^\ell > 0$. Ισχυριζόμαστε ότι η ένωσή τους έχει πιθανότητα 1, δηλαδή με πιθανότητα 1 κάποιο από τα A_n συμβαίνει [Το δεύτερο λήμμα Borel-Cantelli δίνει ότι, με πιθανότητα 1, άπειρα από τα A_n συμβαίνουν, αλλά θέλουμε να το κάνουμε εντελώς στοιχειωδώς]. Εξετάζουμε την πιθανότητα τού συμπληρώματος τής ένωσης. Δηλαδή υπολογίζουμε

$$\mathbf{P}(\cap_{n=1}^{\infty} A_n^c) \leq \mathbf{P}(\cap_{n=1}^N A_n^c) = (1-s)^N \rightarrow 0$$

για $N \rightarrow \infty$. Η ισότητα είναι συνέπεια τής ανεξαρτησίας. Άρα $\mathbf{P}(\cup_{n=1}^{\infty} A_n) = 1$. Επειδή, όπως σχολιάσαμε πιο πάνω, $\{T_a \wedge T_b = \infty\} \cap (\cup_{n=1}^{\infty} A_n) = \emptyset$, έπεται ότι $\mathbf{P}(T_a \wedge T_b = \infty) = 0$.

Περισσότερα για τον ασυμμετρικό απλό τυχαίο περίπατο θα δούμε στις Ασκήσεις 3.4, 3.10.

3.7 Ανισότητα Doob

Θα χρειαστούμε αργότερα την εξής ισχυροποίηση τής ανισότητας Markov.

Θεώρημα 3.20 (Ανισότητα Doob). Έστω $X = (X_n)_{n \geq 0}$ submartingale και $n \in \mathbb{N}$. Τότε για κάθε $\lambda > 0$ έχουμε

$$\mathbf{P}(\sup_{0 \leq k \leq n} X_k \geq \lambda) \leq \frac{1}{\lambda} \mathbf{E}(X_n^+).$$

Απόδειξη. Για $k \in \mathbb{N}$ με $0 \leq k \leq n$, έστω $A_k := \{X_k \geq \lambda > X_i \text{ για κάθε } i < k\} \in \mathcal{F}_k$. Θέτουμε $M := \sup_{0 \leq k \leq n} X_k$. Τότε $\{M \geq \lambda\} = \cup_{k=0}^n A_k$ και τα σύνολα τής ένωσης είναι ξένα ανά δύο. Έπειτα, από την Πρόταση 3.7 έχουμε ότι η $(X_n^+)_{n \geq 0}$ είναι submartingale (η $f(x) = x^+$ είναι αύξουσα και κυρτή), άρα

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(X_n^+) &\geq \sum_{k=0}^n \mathbf{E}(X_n^+ \mathbf{1}_{A_k}) = \sum_{k=0}^n \mathbf{E}(\mathbf{E}(X_n^+ \mathbf{1}_{A_k} | \mathcal{F}_k)) = \sum_{k=0}^n \mathbf{E}(\mathbf{E}(X_n^+ | \mathcal{F}_k) \mathbf{1}_{A_k}) \\ &\geq \sum_{k=0}^n \mathbf{E}(X_k^+ \mathbf{1}_{A_k}) \geq \sum_{k=0}^n \lambda \mathbf{P}(A_k) = \lambda \mathbf{P}(M \geq \lambda). \end{aligned}$$

Στην πρώτη ανισότητα χρησιμοποιήσαμε το ότι η $X_n^+ \geq 0$ και το ότι τα $\{A_k : 0 \leq k \leq n\}$ είναι ξένα ανά δύο. Στη δεύτερη ισότητα, το ότι $A_k \in \mathcal{F}_k$. Τέλος, στη δεύτερη ανισότητα, το ότι η $(X_n^+)_{n \geq 0}$ είναι submartingale. ■

Ασκήσεις

3.1 Έστω ότι η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{G}_n)_{n \geq 0}$. Ορίζουμε $\mathcal{F}_n := \sigma(X_0, \dots, X_n)$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$. Τότε $\mathcal{F}_n \subset \mathcal{G}_n$, και η $(X_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

3.2 Έστω $(X_n)_{n \geq 0}$ supermartingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

(α) Να δειχθεί ότι για $A \in \mathcal{F}_m$ και $n > m$ ισχύει

$$\int_A X_n d\mathbf{P} \leq \int_A X_m d\mathbf{P}.$$

(β) Υποθέτοντας ότι $X_n \geq 0$ για όλα τα n , να δειχθεί ότι για σταθερά $m \geq 0$, $i \geq 1$ έχουμε ότι

$$\text{σχεδόν παντού στο } \{X_m = 0\} \text{ ισχύει } X_{m+i} = 0,$$

δηλαδή $\mathbf{P}(\{X_m = 0\} \setminus \{X_{m+i} = 0\}) = 0$.

3.7 Ανισότητα Doob

(γ) Με την υπόθεση τού (β), να δειχθεί ότι για σταθερό $m \geq 0$ έχουμε ότι

$$\text{σχεδόν παντού στο } \{X_m = 0\} \text{ ισχύει } X_{m+i} = 0 \text{ για κάθε } i \geq 1.$$

3.3 Με $(S_n)_{n \geq 0}$ και $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ όπως στο Παράδειγμα 3.2, να δειχθεί ότι η $(Z_n)_{n \geq 0}$ με $Z_n := S_n^3 - 3nS_n$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ είναι martingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

3.4 Έστω $(S_n)_{n \geq 0}$ ο απλός ασυμμετρικός τυχαίος περίπατος όπως ορίστηκε στην Παρατήρηση 3.19 και ορίζουμε τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ ως $\mathcal{F}_0 := \{\emptyset, \Omega\}$, $\mathcal{F}_n := \sigma(X_1, X_2, \dots, X_n)$ για $n \geq 1$. Να δειχθεί ότι οι ακολουθίες $(W_n)_{n \geq 0}$, $(M_n)_{n \geq 0}$ με

$$W_n := S_n - (p - q)n, M_n := (q/p)^{S_n}$$

είναι martingales ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

3.5 Έστω $(S_n)_{n \geq 0}$ ο συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος στο \mathbb{Z} .

(α) Να υπολογιστεί η πιθανότητα $\mathbf{P}(S_n = k)$ για τις διάφορες τιμές των $n \in \mathbb{N}$, $k \in \mathbb{Z}$.

(β) Να δειχθεί ότι

$$\mathbf{P}(S_{2n} = 0) \sim \frac{1}{\sqrt{\pi n}}$$

καθώς $n \rightarrow \infty$.

(γ) Έστω $N = |\{n \geq 1 : S_{2n} = 0\}|$. Να δειχθεί ότι $\mathbf{E}(N) = \infty$.

3.6 Να δειχθεί ότι η συνθήκη τού Ορισμού 3.11 είναι ισοδύναμη με την

$$\{T = n\} \in \mathcal{F}_n \text{ για κάθε } n \in \mathbb{N}.$$

3.7 Αν $k \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$, να δειχθεί ότι η σταθερή τυχαία μεταβλητή $T = k$ είναι χρόνος διακοπής.

3.8 Αν οι τυχαίες μεταβλητές S, T είναι χρόνοι διακοπής ως προς μια διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 1}$, να δειχθεί ότι χρόνοι διακοπής ως προς την ίδια διήθηση είναι επίσης και οι τυχαίες μεταβλητές

$$S \wedge T, S \vee T, S + T.$$

3.9 Αν η ανέλιξη $X = (X_n)_{n \geq 0}$ είναι προσαρμοσμένη στη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ και T είναι χρόνος διακοπής ως προς την ίδια διήθηση, να δειχθεί ότι για κάθε $n \in \mathbb{N}$ η συνάρτηση X_n^T είναι \mathcal{F}_n -μετρήσιμη. Ιδιαίτερος, η X_n^T είναι τυχαία μεταβλητή.

3.10 (Το πρόβλημα εξόδου για τον ασυμμετρικό απλό τυχαίο περίπατο) Συνεχίζουμε στο πλαίσιο τής Άσκησης 3.4. Υποθέτουμε ότι $p > q$ (και άρα $p > 1/2$). Για κάθε ακέραιο r , θέτουμε $T_r := \inf\{k \geq 0 : S_k = r\}$, και έστω $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ η συνάρτηση με $\phi(x) = (q/p)^x$ για κάθε $x \in \mathbb{R}$. Να δειχθούν τα εξής.

(α) Για ακεραίους a, b με $a < 0 < b$,

$$\mathbf{P}(T_a < T_b) = \frac{\phi(b) - \phi(0)}{\phi(b) - \phi(a)}.$$

[Ξέρουμε ήδη από την Παρατήρηση 3.19 ότι $\mathbf{P}(T_a \wedge T_b < \infty) = 1$.]

(β) Για κάθε $a < 0$ ακέραιο, $\mathbf{P}(T_a < \infty) = 1/\phi(a) < 1$.

(γ) Για κάθε $b > 0$ ακέραιο, $\mathbf{P}(T_b < \infty) = 1$.

(δ) Για κάθε $b > 0$ ακέραιο, $\mathbf{E}(T_b) = b/(p - q)$.

(ε) Με πιθανότητα 1 ισχύει $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \infty$.

(ζ) Η τυχαία μεταβλητή $R := -\inf\{S_k : k \in \mathbb{N}\}$ ακολουθεί τη γεωμετρική κατανομή (τιμές $0, 1, 2, \dots$) με παράμετρο $a := 1 - (q/p)$ (η R μετράει πλήθος αποτυχιών ως την πρώτη επιτυχία σε μια ακολουθία δοκιμών που καθεμία έχει πιθανότητα επιτυχίας a).

3.11 Θεωρούμε την ειδική περίπτωση τού Παραδείγματος 3.3 κατά την οποία η Z_1 παίρνει τις τιμές 0 και 2 με πιθανότητα $1/2$ την καθεμία. Θεωρούμε τις $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$, $(R_n)_{n \geq 0}$ όπως εκεί και τον χρόνο διακοπής $N := \min\{n \geq 1 :$

3.7 Ανισότητα Doob

$R_n = 0$. Τι κατανομή έχει ο N ; Μπορούμε να εφαρμόσουμε το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής για το martingale R και τον χρόνο N ;

3.12 Έστω $(S_n)_{n \geq 0}$ ο συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος στο \mathbb{Z} και $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$ η διήθηση όπως πριν το Παράδειγμα 3.2. Θέτουμε $J_0 = 0$ και

$$J_n := \sum_{k=0}^{n-1} \mathbf{1}_{S_k=0} \quad \text{για κάθε } n \geq 1.$$

Δηλαδή η J_n μετράει τον αριθμό των επισκέψεων τού περιπάτου στο 0 ως τον χρόνο $n - 1$ (ξεκινώντας από τον χρόνο 0). Θέτουμε επίσης $M_n = |S_n| - J_n$ για κάθε $n \geq 0$.

(α) Να δειχθεί ότι η $(M_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

(β) Έστω a θετικός ακέραιος και $T_a := \min\{k \geq 0 : |S_k| = a\}$. Να δειχθεί ότι $\mathbf{E}(J_{T_a}) = a$.

3.13 Οι καλεσμένοι σε ένα πάρτυ έχουν πλήθος K και έχουν αφήσει στην είσοδο το σακάκι τους. Κάποια στιγμή αποφασίζουν όλοι να φύγουν και ο οικοδεσπότης τούς μοιράζει τυχαία τα σακάκια. Όσοι πάρουν το δικό τους αποχωρούν, ενώ για τους υπόλοιπους, ο οικοδεσπότης επαναλαμβάνει τη διαδικασία όσες φορές χρειαστεί ώπου να βρει ο καθένας το σακάκι του. Έστω A_n το πλήθος των καλεσμένων που δεν έχουν βρει το σακάκι τους μετά τη n μοιρασιά τού οικοδεσπότη ($A_0 = K$) και T ο αριθμός των φορών που ο οικοδεσπότης κάνει τυχαία μοιρασιά ώπου όλοι να βρουν το σακάκι τους. Να δειχθεί ότι:

(α) Η $(A_{n \wedge T} + n \wedge T)_{n \geq 0}$ είναι martingale.

(β) $\mathbf{P}(T > n) \leq a^n$ για κάθε $n \geq 1$ όπου $a = 1 - (K!)^{-1} \in (0, 1)$.

(γ) Να δειχθεί ότι $\mathbf{E}(T) = K$.

3.14 (Αλλαγή μέτρου και martingales) Έστω $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ χώρος πιθανότητας, $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 1}$ διήθηση σε αυτόν, f, \mathbf{Q} όπως στην Άσκηση 2.14, και $(X_n)_{n \geq 1}$ ακολουθία τυχαίων μεταβλητών με τιμές στο \mathbb{R} . Ορίζουμε $f_n := \mathbf{E}(f | \mathcal{F}_n)$ για κάθε $n \geq 1$. Να δειχθεί ότι τα εξής δύο είναι ισοδύναμα.

(α) Η $(X_n)_{n \geq 1}$ είναι martingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 1}$ και το μέτρο \mathbf{Q} .

(β) Η $(X_n f_n)_{n \geq 1}$ είναι martingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 1}$ και το μέτρο \mathbf{P} .

[Υπόδειξη: Χρησιμοποιούμε την Άσκηση 2.14 και τις Προτάσεις 2.10, 2.11]

3.15 Έστω $f, g : \mathbb{R} \rightarrow [0, \infty)$ πυκνότητες (δηλαδή μη αρνητικές Borel μετρήσιμες συναρτήσεις με $\int_{\mathbb{R}} f(x) dx = \int_{\mathbb{R}} g(x) dx = 1$) και $(X_i)_{i \geq 1}$ ακολουθία ανεξάρτητων και ισόνομων τυχαίων μεταβλητών καθεμία με πυκνότητα g . Θέτουμε $\mathcal{F}_0 := \{\emptyset, \Omega\}$ και $\mathcal{F}_n := \sigma(X_1, X_2, \dots, X_n)$ για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ και

$$M_0 := 1, \\ M_n := \frac{f(X_1)f(X_2) \cdots f(X_n)}{g(X_1)g(X_2) \cdots g(X_n)} \quad \text{για κάθε } n \in \mathbb{N}^+.$$

(α) Να δειχθεί ότι με πιθανότητα 1 ισχύει $g(X_n) > 0$ για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$.

(β) Να δειχθεί ότι η $(M_n)_{n \geq 0}$ είναι martingale ως προς την $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 0}$.

3.16 Έστω $(X_n)_{n \geq 1}$ submartingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_n)_{n \geq 1}$ ώστε οι X_n να παίρνουν τιμές στο $[0, A]$, όπου $A \in (0, \infty)$. Να δειχθεί ότι $\mathbf{E}(X_1 X_2 \cdots X_n) \geq \mathbf{E}(X_1^n)$ για κάθε $n \geq 1$.

3.17 Έστω $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ακολουθία τυχαίων μεταβλητών και T τυχαία μεταβλητή με τιμές στο $\mathbb{N} \cup \{\infty\}$. Ισχύει ότι

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}(X_{n \wedge T}) = \mathbf{E}(X_T) \quad (3.13)$$

αν μία από τις παρακάτω προϋποθέσεις ικανοποιείται:

(i) Η T είναι φραγμένη τυχαία μεταβλητή και $\mathbf{E}|X_n| < \infty$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

(ii) $\mathbf{P}(T < \infty) = 1$ και υπάρχει $M < \infty$ ώστε $|X_n(\omega)| \leq M$ για κάθε $n \in \mathbb{N}$ και $\omega \in \Omega$.

(iii) $\mathbf{E}(T) < \infty, \mathbf{E}|X_0| < \infty$ και υπάρχει $M < \infty$ ώστε $|X_n(\omega) - X_{n-1}(\omega)| \leq M$ για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ και $\omega \in \Omega$.

3.7 Ανισότητα Doob

Αν επιπλέον στον χώρο πιθανότητας υπάρχει μια διήθηση, η $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι martingale ως προς αυτήν τη διήθηση, και ο T είναι χρόνος διακοπής ως προς αυτήν, τότε ισχύει

$$\mathbf{E}(X_T) = \mathbf{E}(X_0). \quad (3.14)$$

Αν η $(X_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι submartingale (supermartingale) η ισότητα αντικαθίσταται από \geq (\leq).

3.18 Χρησιμοποιώντας την περίπτωση (iii) της προηγούμενης άσκησης για το martingale $(S_n)_{n \in \mathbb{N}}$, δώστε μια εναλλακτική απόδειξη τού μέρους (i) του Παραδείγματος 3.18.

3.19 (Εναλλακτική απόδειξη τής Πρότασης 3.16) Έστω $(X_k)_{k \in \mathbb{N}}$ submartingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_k)_{k \in \mathbb{N}}$ και T χρόνος διακοπής ως προς αυτή τη διήθηση ο οποίος είναι φραγμένος από το $n \in \mathbb{N}$. Να δειχθεί ότι $\mathbf{E}(X_T) \leq \mathbf{E}(X_n)$. Αν η $(X_k)_{k \in \mathbb{N}}$ είναι supermartingale (martingale) η \leq αντικαθίσταται από \geq ($=$).

[Υπόδειξη: Εφαρμόστε την Πρόταση 3.10 για την ακολουθία $A_k := \mathbf{1}_{T \leq k-1}$, $k \in \mathbb{N}^+$.]

3.20 (Μεγιστική ανισότητα Kolmogorov) Έστω $n \in \mathbb{N}^+$ και $(\xi_i)_{1 \leq i \leq n}$ ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές με $\mathbf{E}(\xi_i) = 0$, $\mathbf{E}(\xi_i^2) < \infty$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, n$. Θέτουμε $S_i := \xi_1 + \dots + \xi_i$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, n$. Να δειχθεί ότι για κάθε $\lambda > 0$ ισχύει

$$\mathbf{P}(\max_{1 \leq i \leq n} |S_i| \geq \lambda) \leq \frac{1}{\lambda^2} \mathbf{E}(S_n^2) = \frac{1}{\lambda^2} \sum_{i=1}^n \mathbf{E}(\xi_i^2).$$

4

Ανελίξεις σε συνεχή χρόνο

Σε αυτό το κεφάλαιο είναι συγκεντρωμένοι ορισμοί και αποτελέσματα από τη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων συνεχούς χρόνου. Με εξαίρεση την Παράγραφο 4.1, η οποία είναι εντελώς βασική, οι υπόλοιπες μπορούν να διαβαστούν τη στιγμή που θα γίνει αναφορά σε αυτές στα παρακάτω κεφάλαια, οπότε και θα έχουν ενδιαφέρον. Το υπεραριθμίσιο του συνεχούς χρόνου διευκολύνει την εμφάνιση μη μετρήσιμων συνόλων. Θυμηθείτε λοιπόν την ορολογία από την Παράγραφο 1.7.

4.1 Ανελίξεις

Έστω (S, \mathcal{A}) ένας μετρήσιμος χώρος. Δηλαδή το S είναι ένα σύνολο και \mathcal{A} είναι μια σ -άλγεβρα στο S .

Στοχαστική ανέλιξη με τιμές στον S λέμε μια οικογένεια τυχαίων μεταβλητών $\{X_t : t \in I\}$ που ορίζονται σε κοινό χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και παίρνουν τιμές στον S . Το I είναι ένα αυθαίρετο σύνολο δεικτών, αλλά συνήθως είναι το \mathbb{N} ή το $[0, \infty)$ και τότε ερμηνεύουμε το t ως χρόνο και το X_t ως την τιμή ενός μεγέθους (π.χ. η περιουσία μιας εταιρίας) τη χρονική στιγμή t . Για σταθερό $\omega \in \Omega$, η συνάρτηση $t \mapsto X_t(\omega)$ ονομάζεται **μονοπάτι** (ή και τροχιά) τής ανέλιξης.

Ως συνήθως, όταν ο S είναι μετρικός χώρος, παίρνουμε $\mathcal{A} = \mathcal{B}(S)$, τη σ -άλγεβρα των συνόλων Borel στον S . Σε αυτές τις σημειώσεις θα ασχοληθούμε με ανελίξεις που παίρνουν τιμές σε κάποιο χώρο τής μορφής \mathbb{R}^d .

Παράδειγμα 4.1. Παίρνουμε

$$I := [0, \infty),$$

$$\Omega := \{-1, 1\}^I,$$

$$\mu := \text{το ομοιόμορφο μέτρο στο } \{-1, 1\},$$

$$\mathbf{P} := \otimes_{t \in I} \mu \text{ το μέτρο γινόμενο και}$$

$$X_t : \Omega \rightarrow \{-1, 1\} \text{ η προβολή στην } t \text{ συντεταγμένη για κάθε } t \in I.$$

Οι $(X_t)_{t \in I}$ είναι ανεξάρτητες, ισόνομες, και καθμία παίρνει την τιμή -1 με πιθανότητα $1/2$ και την τιμή 1 με πιθανότητα $1/2$. Πρακτικά, κάθε χρονική στιγμή $t \geq 0$ ρίχνουμε ένα αμερόληπτο νόμισμα και, αν έρθει Γράμματα, θέτουμε $X_t = -1$, ενώ αν έρθει Κεφαλή, θέτουμε $X_t = 1$. Με πιθανότητα 1 , το μονοπάτι τής ανέλιξης είναι μια συνάρτηση που ταλαντώνεται συνεχώς (καθώς το t μεταβάλλεται) ανάμεσα στις τιμές -1 και 1 .

Μια ανέλιξη μπορεί να ειπωθεί ως απεικόνιση

$$X : I \times \Omega \rightarrow S \tag{4.1}$$

με $X(t, \omega) = X_t(\omega)$ ή και ως απεικόνιση

$$\hat{X} : \Omega \rightarrow S^I \tag{4.2}$$

4.2 Ισοδυναμία ανελίξεων

με $\hat{X}(\omega)$ να είναι η συνάρτηση με τιμές $\hat{X}(\omega)(t) = X(t, \omega)$. Ο \mathcal{S}^I εφοδιάζεται με τη σ -άλγεβρα γινόμενου.

Υπενθυμίζουμε ότι η σ -άλγεβρα γινόμενο είναι αυτή που παράγεται από τα μετρήσιμα ορθογώνια, και μετρήσιμο ορθογώνιο λέμε κάθε σύνολο τής μορφής $A := \prod_{i \in I} A_i$ με $A_i \in \mathcal{A}$ για κάθε $i \in I$ και με $I_0 := \{i \in I : A_i \neq \mathcal{S}\}$ πεπερασμένο. Ως προς αυτή τη σ -άλγεβρα, η \hat{X} είναι τυχαία μεταβλητή. Αυτό γιατί η αντίστροφη εικόνα ενός μετρήσιμου ορθογωνίου όπως πιο πάνω είναι

$$(\hat{X})^{-1}(A) = \cap_{i \in I_0} X_i^{-1}(A_i) \in \mathcal{F}.$$

Το τελευταίο σύνολο είναι τομή πεπερασμένου πλήθους συνόλων με καθένα από αυτά να είναι στοιχείο τής \mathcal{F} γιατί κάθε X_i είναι τυχαία μεταβλητή. Επειδή τα μετρήσιμα ορθογώνια παράγουν τη σ -άλγεβρα στον \mathcal{S}^I , η μετρησιμότητα τής \hat{X} έπεται.

Ορισμός 4.2. Έστω $(\mathcal{S}, \mathcal{A})$ όπως πιο πάνω και $I \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$. Μια ανέλιξη $(X_t)_{t \in I}$ με τιμές στον \mathcal{S} λέγεται **μετρήσιμη** αν η απεικόνιση τής (4.1) είναι $\mathcal{B}(I) \otimes \mathcal{F}/\mathcal{A}$ -μετρήσιμη.

Η μετρησιμότητα (και ακόμη περισσότερο η συνέχεια) εισάγει μια εξάρτηση/δέσιμο μεταξύ των τιμών $(X_t(\omega))_{t \in I}$ ενώ ο ορισμός τής ανελίξης επιτρέπει να συμπεριφέρονται ανεξάρτητα (με την καθημερινή έννοια τού όρου) μεταξύ τους.

Παράδειγμα 4.3. Η ανέλιξη τού Παραδείγματος 4.1 δεν είναι μετρήσιμη. Για την απόδειξη, θα χρησιμοποιήσουμε την περιγραφή τής σ -άλγεβρας γινόμενο στον Ω , που δίνεται στην Άσκηση 4.1. Ας υποθέσουμε ότι η ανέλιξη είναι μετρήσιμη. Τότε για κάθε $\omega \in \Omega$ και $t \in [0, \infty)$ η ποσότητα

$$R_t(\omega) := \int_0^t X_s(\omega) ds$$

είναι καλά ορισμένη (δηλαδή η $[0, t] \ni s \mapsto X_s(\omega)$ είναι μετρήσιμη και ολοκληρώσιμη συνάρτηση) και είναι μετρήσιμη ως συνάρτηση τού ω (Πρόταση Β'.11 στο Παράρτημα Β'). Ασχολούμαστε με την $Z := R_1$, η οποία παίρνει τιμές στο $[-1, 1]$. Τουλάχιστον ένα από τα $\{Z < 0\}, \{Z \geq 0\}$ είναι μη κενό. Ας υποθέσουμε ότι είναι το πρώτο. Τότε υπάρχει μη κενό αριθμήσιμο $J \subset [0, 1]$ και $A \in \otimes_{i \in J} \{-1, 1\}$ μη κενό ώστε $\{Z < 0\} = \pi_J^{-1}(A)$. Όμως υπάρχουν σημεία τού $\pi_J^{-1}(A)$ που έχουν $Z(\omega) = 1$, άτοπο. Συνοπτικά, κάθε μετρήσιμη συνάρτηση με πραγματικές τιμές ορισμένη στον Ω καθορίζεται από αριθμήσιμο πλήθος συντεταγμένων (συνέπεια τής Άσκησης 4.1) και η R_1 είναι μια που προφανώς δεν καθορίζεται από οποιοδήποτε αριθμήσιμο πλήθος συντεταγμένων.

Ορισμός 4.4. Κατανομή τής ανελίξης X λέμε την κατανομή τής τυχαίας μεταβλητής \hat{X} , δηλαδή το μέτρο πιθανότητας $\mathbf{P}^{\hat{X}}(A) := \mathbf{P}(\hat{X} \in A)$ για κάθε $A \subset \mathcal{S}^I$ στοιχείο τής σ -άλγεβρας γινόμενου.

Οι διάφορες προβολές τής κατανομής τής X σε πεπερασμένες το πλήθος συντεταγμένες τού \mathcal{S}^I λέγονται κατανομές πεπερασμένης διάστασης τής X .

Ορισμός 4.5. Κατανομές πεπερασμένης διάστασης μιας ανελίξης X λέμε τις κατανομές των διανυσμάτων $(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n})$ όπου n θετικός ακέραιος και $t_1, t_2, \dots, t_n \in I$ διαφορετικοί δείκτες.

Στο πιο πάνω παράδειγμα, για οποιοδήποτε $n \geq 1$ και $t_1, t_2, \dots, t_n \geq 0$ διαφορετικούς δείκτες, η κατανομή τού $(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n})$ είναι το μέτρο γινόμενο $\mu \otimes \mu \otimes \dots \otimes \mu$ (n φορές) όπου μ είναι το ομοιόμορφο μέτρο στο $\{-1, 1\}$.

4.2 Ισοδυναμία ανελίξεων

Σε αυτή την παράγραφο θα δούμε τρεις έννοιες ισοδυναμίας ανελίξεων.

Ορισμός 4.6. Έστω I σύνολο και $X = (X_t)_{t \in I}, Y = (Y_t)_{t \in I}$ δύο στοχαστικές ανελίξεις που ορίζονται σε κοινό χώρο πιθανότητας και με τιμές σε έναν μετρήσιμο χώρο $(\mathcal{S}, \mathcal{A})$.

- (i) Η X λέγεται **τροποποίηση** τής Y αν για κάθε $t \in I$ σχεδόν βέβαια ισχύει ότι $X_t = Y_t$.
- (ii) Οι X, Y λέγονται **μη διακρίσιμες** αν σχεδόν βέβαια ισχύει ότι « $X_t = Y_t$ για κάθε $t \in I$ ».

Η δεύτερη σχέση ισοδυναμίας ανελίξεων είναι πιο ισχυρή από την πρώτη αφού για δεδομένο $t \in I$, ισχύει $\{X_s = Y_s \text{ για κάθε } s \in I\} \subset \{X_t = Y_t\}$.

Στο (i) θα θέλαμε να δώσουμε ως ορισμό το $\mathbf{P}(X_t = Y_t) = 1$, αλλά δεν ξέρουμε αν το $\{X_t = Y_t\}$ είναι στοιχείο τής \mathcal{F} . Οπότε χρησιμοποιούμε τον όρο «σχεδόν βέβαια», που μεταφράζεται στο ότι το $\{X_t = Y_t\}$ περιέχει ένα στοιχείο $A \in \mathcal{F}$ με $\mathbf{P}(A) = 1$. Στην πράξη, οι ανελίξεις που θα μας απασχολήσουν θα παίρνουν τιμές σε χώρους της μορφής \mathbb{R}^d , οπότε το σύνολο $\{X_t = Y_t\} = \{X_t - Y_t = 0\}$, και το τελευταίο σύνολο είναι στοιχείο τής \mathcal{F} γιατί η $X_t - Y_t$ είναι τυχαία μεταβλητή. Μια γενικότερη περίπτωση αντιμετωπίζεται στην Άσκηση 4.14.

Στο (ii) θα θέλαμε να δώσουμε ως ορισμό το $\mathbf{P}(X_t = Y_t \text{ για κάθε } t \in I) = 1$, αλλά έχουμε το ίδιο πρόβλημα όπως στο (i) και έτσι χρησιμοποιούμε το «σχεδόν βέβαια». Εδώ η κατάσταση είναι πιο δύσκολη γιατί ακόμα και στις περιπτώσεις που στο (i) δεν υπάρχει πρόβλημα, δηλαδή όλα τα $C_t := \{X_t = Y_t\}$ είναι στοιχεία τής \mathcal{F} , το σύνολο που μας ενδιαφέρει είναι η τομή $\bigcap_{t \in I} C_t$, η οποία ενδέχεται να μην είναι στοιχείο τής \mathcal{F} (σε περιπτώσεις που το I είναι υπεραριθμίσιο).

Παράδειγμα 4.7. Θεωρούμε την ανελίξη X με $X_t = 0$ για κάθε $t \geq 0$, $\omega \in \Omega$ και μια συνεχή τυχαία μεταβλητή T με τιμές στο $[0, \infty)$. Θέτουμε

$$Y_t := \begin{cases} 0 & \text{αν } t \in [0, \infty) \setminus \{T\}, \\ 1 & \text{αν } t = T. \end{cases}$$

Τότε για κάθε $t \geq 0$, $P(X_t \neq Y_t) = P(T = t) = 0$, αφού η T είναι συνεχής τυχαία μεταβλητή, άρα $P(X_t = Y_t) = 1$. Όμως $P(X_t = Y_t \text{ για κάθε } t \geq 0) = 0$. Κάθε μονοπάτι τής X είναι συνεχής συνάρτηση (σταθερή μάλιστα), ενώ κάθε μονοπάτι τής Y έχει μια ασυνέχεια στο σημείο T που επιλέγεται τυχαία. Επομένως οι X, Y είναι τροποποίηση η μιά της άλλης, αλλά δεν είναι μη διακρίσιμες.

Για τη σχέση μεταξύ των δύο πιο πάνω εννοιών διατυπώνουμε ως πρόταση μια απλή παρατήρηση. Θα τη χρησιμοποιήσουμε στην απόδειξη τού Θεωρήματος 12.1 (Τύπος Itô).

Πρόταση 4.8. Αν $I \subset \mathbb{R}$ διάστημα, \mathcal{S} μετρικός χώρος και οι $X, Y : I \times \Omega \rightarrow \mathcal{S}$ είναι τροποποίηση η μια της άλλης οι οποίες με πιθανότητα 1 έχουν συνεχή μονοπάτια, τότε οι X, Y είναι μη διακρίσιμες.

Απόδειξη. Από την υπόθεση, υπάρχουν $\Omega_1, \Omega_2 \subset \Omega$ με πιθανότητα 1 ώστε για κάθε $\omega \in \Omega_1$ η $t \mapsto X_t(\omega)$ είναι συνεχής και για κάθε $\omega \in \Omega_2$ η $t \mapsto Y_t(\omega)$ είναι συνεχής. Επίσης, για κάθε $t \in I$ υπάρχει $A_t \in \mathcal{F}$ με πιθανότητα 1 ώστε $A_t \subset \{\omega \in \Omega : X_t(\omega) = Y_t(\omega)\}$. Τότε το σύνολο $\Omega_1 \cap \Omega_2 \cap (\bigcap_{t \in I \cap \mathbb{Q}} A_t)$ έχει πιθανότητα 1 και σε αυτό ισχύει $X_t(\omega) = Y_t(\omega)$ για κάθε $t \in I$ λόγω συνέχειας. Το ζητούμενο αποδείχθηκε. ■

Παρατηρούμε ότι το συμπέρασμα τής πρότασης έπεται επίσης αν η υπόθεση συνεχών μονοπατιών αντικατασταθεί με την υπόθεση ότι με πιθανότητα 1 οι X, Y έχουν μονοπάτια που σε κάθε σημείο t ή είναι και οι δύο συνεχείς από δεξιά τού t ή είναι και οι δύο συνεχείς από αριστερά τού t .

Τώρα για ανελίξεις με τιμές σε έναν μετρήσιμο χώρο \mathcal{S} , με ίδιο σύνολο δεικτών I , αλλά ορισμένες σε ενδεχομένως διαφορετικό χώρο πιθανότητας, δηλαδή

$$\begin{aligned} X &: I \times \Omega \rightarrow \mathcal{S}, \\ Y &: I \times \tilde{\Omega} \rightarrow \mathcal{S}, \end{aligned}$$

έχουμε τις εξής έννοιες ισοδυναμίας.

Ορισμός 4.9. Έστω $X = (X_t)_{t \in I}$, $Y = (Y_t)_{t \in I}$ δύο στοχαστικές ανελίξεις με τιμές στον ίδιο μετρήσιμο χώρο \mathcal{S} .

- (i) Λέμε ότι οι X, Y έχουν τις **ίδιες κατανομές πεπερασμένης διάστασης** αν, για κάθε $n \geq 1$ και $t_1, t_2, \dots, t_n \in I$ διαφορετικούς δείκτες, τα διανύσματα $(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n})$, $(Y_{t_1}, Y_{t_2}, \dots, Y_{t_n})$ έχουν την ίδια κατανομή.
- (ii) Λέμε ότι οι X, Y έχουν την **ίδια κατανομή** αν $\mathbf{P}^X = \mathbf{P}^Y$.

Η ισότητα κατανομής για στοχαστικές ανελίξεις βλέπει τις ανελίξεις ως τυχαίες μεταβλητές στον \mathcal{S}^I [δες σχέση (4.2)] και είναι η συνηθισμένη ισότητα κατανομών τυχαίων μεταβλητών. Δύο ανελίξεις με ίδια κατανομή έχουν τις ίδιες κατανομές πεπερασμένης διάστασης (Άσκηση 4.2), αλλά ισχύει και το αντίστροφο.

Πρόταση 4.10. Έστω $X = (X_t)_{t \in I}$, $Y = (Y_t)_{t \in I}$ δύο στοχαστικές ανελίξεις με τιμές στον ίδιο μετρήσιμο χώρο $(\mathcal{S}, \mathcal{A})$. Αν οι X, Y έχουν τις ίδιες κατανομές πεπερασμένης διάστασης, τότε έχουν την ίδια κατανομή.

Απόδειξη. Η ισότητα κατανομών πεπερασμένης διάστασης σημαίνει ότι τα μέτρα $\mathbf{P}^X, \mathbf{P}^Y$ συμφωνούν πάνω στο σύνολο των μετρήσιμων ορθογωνίων (δηλαδή $\mathbf{P}^X(A) = \mathbf{P}^Y(A)$ για κάθε μετρήσιμο ορθογώνιο A), αλλά αυτό το σύνολο είναι κλειστό ως προς πεπερασμένες τομές και η σ -άλγεβρα που παράγει είναι η \mathcal{S}^I . Έπεται από γνωστό θεώρημα [π.χ., Πρόταση 2.8 στο Κουμουλλής και Νεγρεπόντης (1991)] ότι $\mathbf{P}^X = \mathbf{P}^Y$. ■

4.3 Martingales και χρόνοι διακοπής

Ορισμός 4.11. (i) **Διήθηση** στον χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ λέμε μια αύξουσα οικογένεια $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ σ -άλγεβρων στο Ω , καθεμία υποσύνολο τής \mathcal{F} . Δηλαδή, έχουμε $\mathcal{F}_s \subset \mathcal{F}_t \subset \mathcal{F}$ για κάθε $0 \leq s < t$.

(ii) Μια στοχαστική ανελίξη $(X_t)_{t \geq 0}$ λέγεται **προσαρμοσμένη** στη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ αν για κάθε $t \geq 0$ η X_t είναι \mathcal{F}_t -μετρήσιμη.

Τώρα, αν $X = (X_t)_{t \geq 0}$ είναι μια στοχαστική ανελίξη, τότε η ελάχιστη διήθηση ως προς την οποία η X είναι προσαρμοσμένη είναι αυτή που ορίζεται ως

$$\mathcal{F}_t := \sigma(\{X_s : 0 \leq s \leq t\}) \text{ για κάθε } t \geq 0,$$

δηλαδή η διήθηση που παράγεται από τη X .

Ανάλογα ορίζεται η έννοια τής διήθησης με γενικό σύνολο δεικτών I αρκεί σε αυτό να έχουμε μια διάταξη. Και αντίστοιχα για μια ανελίξη $(X_t)_{t \in I}$ ορίζεται η διήθηση που αυτή παράγει. Ακριβώς πριν το Παράδειγμα 3.2 είδαμε χρήση αυτών των εννοιών (εκεί είχαμε $I = \mathbb{N}$).

Οι ανελίξεις που θα θεωρήσουμε ως το τέλος αυτής της παραγράφου παίρνουν τιμές στο \mathbb{R} .

Ορισμός 4.12. Αν η στοχαστική ανελίξη $(X_t)_{t \geq 0}$ ικανοποιεί τις ιδιότητες:

- (i) Η $(X_t)_{t \geq 0}$ είναι προσαρμοσμένη στην $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$,
- (ii) $\mathbf{E} |X_t| < \infty$ για κάθε $t \geq 0$,
- (iii) $\mathbf{E}(X_t | \mathcal{F}_s) = X_s$ για κάθε $0 \leq s < t$,

τότε λέγεται **martingale** ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$. Αν αντί της (iii) ισχύει η $E(X_t | \mathcal{F}_s) \geq X_s$, τότε η ανέλιξη λέγεται **submartingale**, ενώ αν ισχύει η $E(X_t | \mathcal{F}_s) \leq X_s$, τότε η ανέλιξη λέγεται **supermartingale**.

Προφανώς, αν $(X_t)_{t \geq 0}$ είναι martingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ και $(t_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι μια αύξουσα ακολουθία στο $[0, \infty)$, τότε η ανέλιξη $(X_{t_n})_{n \in \mathbb{N}}$ είναι martingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_{t_n})_{n \in \mathbb{N}}$. Χρησιμοποιούμε αυτή την παρατήρηση για να μεταφέρουμε στο πλαίσιο των ανελιξέων σε συνεχή χρόνο αποτελέσματα που έχουν δειχθεί σε διακριτό χρόνο (δες την απόδειξη του Θεωρήματος 4.15 πιο κάτω).

Σε αυτές τις σημειώσεις θα χρησιμοποιήσουμε martingales σε συνεχή χρόνο για να υπολογίσουμε ποσότητες που αφορούν την κίνηση Brown, όπως στην Παράγραφο 3.6 χρησιμοποιήσαμε martingales σε διακριτό χρόνο για τη μελέτη του συμμετρικού απλού τυχαίου περιπάτου στο \mathbb{Z} . Για αυτά τα martingales θα διατυπώσουμε δύο θεωρήματα, τα 4.14, 4.15 παρακάτω. Σε μια πρώτη ανάγνωση, δεν βλάπτει να παραλείψει κανείς τις αποδείξεις τους.

Ανάλογα με την περίπτωση που έχουμε διήθηση σε διακριτό χρόνο ($I = \mathbb{N}$), ορίζεται και τώρα, με $I = [0, \infty)$, η έννοια του χρόνου διακοπής.

Ορισμός 4.13. Μια συνάρτηση $T : \Omega \rightarrow [0, \infty]$ λέγεται **χρόνος διακοπής** ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ αν για κάθε $t \geq 0$ ισχύει

$$\{T \leq t\} \in \mathcal{F}_t. \quad (4.3)$$

Ισχύει το ανάλογο του Θεωρήματος 3.15.

Θεώρημα 4.14 (Θεώρημα επιλεκτικής διακοπής). Έστω $X = (X_t)_{t \geq 0}$ martingale με δεξιά συνεχή μονοπάτια και T φραγμένος χρόνος διακοπής. Τότε

$$\mathbf{E}(X_T) = \mathbf{E}(X_0).$$

Η απόδειξή του δίνεται στο Παράρτημα Γ'. Η ιδέα σε αδρές γραμμές είναι ως εξής. Βρίσκουμε μια ακολουθία χρόνων διακοπής $(T_n)_{n \geq 1}$ που είναι φθίνουσα ως προς n , $\lim_{n \rightarrow \infty} T_n = T$, και κάθε T_n παίρνει τιμές σε ένα πεπερασμένο σύνολο (Άσκηση 4.6). Το Θεώρημα 3.15 δίνει ότι $\mathbf{E}(X_{T_n}) = \mathbf{E}(X_0)$, η δεξιά συνέχεια των μονοπατιών δίνει ότι $\lim_{n \rightarrow \infty} X_{T_n} = X_T$, και το επιθυμητό είναι να περάσει το όριο μέσα από τη μέση τιμή στην ισότητα $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}(X_{T_n}) = \mathbf{E}(X_0)$. Αυτό είναι αρκετά τεχνικό και γι' αυτό το παρουσιάζουμε σε παράρτημα.

Χρήσιμη στην κατασκευή του στοχαστικού ολοκληρώματος είναι η ακόλουθη ανισότητα.

Θεώρημα 4.15 (Ανισότητα Doob για submartingales). Έστω $X = (X_t)_{t \geq 0}$ συνεχές submartingale (δηλαδή με συνεχή μονοπάτια) και $t > 0$. Τότε για κάθε $\lambda > 0$, έχουμε

$$\mathbf{P}\left(\sup_{s \in [0, t]} X_s \geq \lambda\right) \leq \frac{1}{\lambda} \mathbf{E}(X_t^+).$$

Απόδειξη. Για $n \geq 1$, έστω $I_n := (\{k/2^n : k \in \mathbb{N}\} \cap [0, t]) \cup \{t\}$. Το Θεώρημα 3.20 δίνει ότι για $r > 0$ ισχύει

$$\mathbf{P}(\sup_{s \in I_n} X_s > r) \leq \mathbf{P}(\sup_{s \in I_n} X_s \geq r) \leq \frac{1}{r} \mathbf{E}(X_t^+).$$

Η ακολουθία $A_n := \{\sup_{s \in I_n} X_s > r\}$, $n \geq 1$ είναι αύξουσα (γιατί και η $(I_n)_{n \geq 1}$ είναι) και η ένωσή της είναι το σύνολο $\{\sup_{s \in [0, t]} X_s > r\}$. Στον τελευταίο ισχυρισμό χρησιμοποιούμε το ότι η X έχει συνεχή μονοπάτια και το ότι η ένωση των I_n είναι ένα πυκνό υποσύνολο του $[0, t]$. Άρα

$$\mathbf{P}\left(\sup_{s \in [0, t]} X_s > r\right) \leq \frac{1}{r} \mathbf{E}(X_t^+). \quad (4.4)$$

Παίρνουμε τώρα μια γνησίως αύξουσα ακολουθία $(r_n)_{n \geq 1}$ θετικών αριθμών που συγκλίνει στο λ . Τότε η ακολουθία $A_n := \{\sup_{s \in [0, t]} X_s > r_n\}$ είναι φθίνουσα με τομή το σύνολο $\{\sup_{s \in [0, t]} X_s \geq \lambda\}$. Εφαρμόζουμε την (4.4) για $r = r_n$, παίρνουμε $n \rightarrow \infty$, και έπειτα επικαλούμαστε το ότι $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}(A_n) = \mathbf{P}(\cap_{n \geq 1} A_n)$. Προκύπτει έτσι το ζητούμενο. ■

Μια ιδιότητα ασθενέστερη από αυτήν του martingale αλλά επίσης χρήσιμη είναι αυτή του local martingale. Ο ορισμός της είναι ο εξής.

Ορισμός 4.16. Η ανέλιξη $(X_t)_{t \geq 0}$ λέγεται **local martingale** ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ αν υπάρχει αύξουσα ακολουθία $(\tau_n)_{n \geq 1}$ χρόνων διακοπής ώστε:

(i) $\mathbf{P}(\lim_{n \rightarrow \infty} \tau_n = \infty) = 1$.

(ii) Για κάθε $n \geq 1$ η σταματημένη ανέλιξη $(X_{t \wedge \tau_n})_{t \geq 0}$ είναι martingale ως προς την $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$.

Επειδή $X_t = \lim_{n \rightarrow \infty} X_{t \wedge \tau_n}$, η X είναι προσαρμοσμένη στην $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$. Κάθε martingale είναι local martingale όπως θα δούμε τώρα, το αντίστροφο όμως δεν ισχύει (δες Παράδειγμα 13.7).

Παρατήρηση 4.17. Θα δείξουμε ότι κάθε martingale X είναι local martingale. Για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ θέτουμε $\tau_n := n$ (σταθερός χρόνος διακοπής). Μένει να δείξουμε ότι για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ η ανέλιξη $(X_{t \wedge n})_{t \geq 0}$ είναι martingale. Είναι προσαρμοσμένη γιατί, αν $t < n$, τότε η $X_{t \wedge n} = X_t$ είναι \mathcal{F}_t -μετρήσιμη, ενώ, αν $t \geq n$, έχουμε $X_{t \wedge n} = X_n$ η οποία είναι \mathcal{F}_n -μετρήσιμη, άρα και \mathcal{F}_t -μετρήσιμη αφού $\mathcal{F}_n \subset \mathcal{F}_t$. Επίσης, $\mathbf{E}|X_{t \wedge n}| < \infty$ προφανώς, αφού για τον αριθμό $s := t \wedge n$ ξέρουμε ότι $\mathbf{E}|X_s| < \infty$. Μένει να δείξουμε ότι για κάθε $0 \leq s < t$ ισχύει

$$\mathbf{E}(X_{t \wedge n} | \mathcal{F}_s) = X_{s \wedge n}.$$

Για αυτό διακρίνει κανείς τις περιπτώσεις $s < t \leq n$, $s < n \leq t$, $n \leq s < t$. Ας δούμε την τελευταία. Θέλουμε $\mathbf{E}(X_n | \mathcal{F}_s) = X_n$, το οποίο ισχύει αφού η X_n είναι \mathcal{F}_s -μετρήσιμη (ως \mathcal{F}_n -μετρήσιμη). Οι άλλες δύο περιπτώσεις είναι εξίσου απλές.

Υπό κάποιες προϋποθέσεις, ένα local martingale είναι martingale. Μια τέτοια περίπτωση είναι η ακόλουθη.

Πρόταση 4.18. Έστω ότι το local martingale $(X_t)_{t \geq 0}$ είναι ομοιόμορφα φραγμένο από μια ολοκληρωσιμη συνάρτηση, δηλαδή υπάρχει τυχαία μεταβλητή $Y : \Omega \rightarrow [0, \infty)$ με $\mathbf{E}(Y) < \infty$ ώστε $|X_t(\omega)| \leq Y(\omega)$ για κάθε $t \geq 0$ και $\omega \in \Omega$. Τότε η $(X_t)_{t \geq 0}$ είναι martingale.

Απόδειξη. Ξέρουμε ότι η $(X_t)_{t \geq 0}$ είναι προσαρμοσμένη. Έστω $(\tau_n)_{n \geq 1}$ μια ακολουθία χρόνων διακοπής όπως στον Ορισμό 4.16. Τότε, $\mathbf{E}|X_t| \leq \mathbf{E}Y < \infty$ και για $0 \leq s < t$ έχουμε

$$\mathbf{E}(X_{t \wedge \tau_n} | \mathcal{F}_s) = X_{s \wedge \tau_n}$$

για κάθε $n \geq 1$. Για $n \rightarrow \infty$, το δεξί μέλος τής τελευταίας ισότητας τείνει στο X_s , ενώ στο αριστερό εφαρμόζουμε το θεώρημα κυριαρχημένης σύγκλισης για τη δεσμευμένη μέση τιμή (Θεώρημα 2.20). Κυριαρχούσα συνάρτηση είναι η Y . ■

Παραδείγματα martingales σε συνεχή χρόνο καθώς και εφαρμογές τού θεωρήματος επιλεκτικής διακοπής (Θεώρημα 4.14) θα δούμε αφότου κατασκευάσουμε την κίνηση Brown στο επόμενο κεφάλαιο.

4.4 Ιδιότητες Markov*

Μια ειδική κατηγορία ανελίξεων είναι οι ανελίξεις Markov. Έτσι λέμε αυτές που έχουν την ιδιότητα Markov, την οποία θα ορίσουμε τώρα.

Έστω (Ω, \mathcal{F}, P) χώρος πιθανότητας, $I \subset \mathbb{R}$ σύνολο δεικτών, $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$ μια διήθηση, $(\mathcal{S}, \mathcal{A})$ ένας μετρήσιμος χώρος, και $X = (X_t)_{t \in I}$ μια ανελίξη με τιμές στον \mathcal{S} και προσαρμοσμένη στην $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$. Συνήθως, η $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$ είναι αυτή που παράγεται από τη X . Δηλαδή $\mathcal{F}_t := \sigma(\{X_s : s \in I, s \leq t\})$.

Για $C \in \mathcal{F}$ και $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$ σ-άλγεβρα, θα συμβολίζουμε με $\mathbf{P}(C | \mathcal{G})$ τη δεσμευμένη μέση τιμή $\mathbf{E}(\mathbf{1}_C | \mathcal{G})$.

Ορισμός 4.19. Λέμε ότι η X έχει την **ιδιότητα Markov** ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$ αν για κάθε $s, t \in I$ με $s \leq t$ και $A \in \mathcal{A}$ ισχύει

$$\mathbf{P}(X_t \in A | \mathcal{F}_s) = \mathbf{P}(X_t \in A | X_s)$$

με πιθανότητα 1.

Δηλαδή, αν τοποθετήσουμε τον εαυτό μας στη χρονική στιγμή s , η κατανομή τής τιμής τής X σε έναν δεδομένο μελλοντικό χρόνο t , δεδομένου ολόκληρου του παρελθόντος (από τη στιγμή s και πριν), είναι η ίδια αν δεδομένη είναι απλώς η τιμή X_s της X κατά τον παρόντα χρόνο s . Μάλιστα είναι συνέπεια τού ορισμού ότι η κατανομή ολόκληρης της ανελίξης $(X_t)_{t \geq s}$ δεδομένης της \mathcal{F}_s παραμένει η ίδια αν αντί της \mathcal{F}_s είναι δεδομένη η X_s .

Παράδειγμα 4.20. (α) Ο συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος $(S_n)_{n \geq 0}$ στο \mathbb{Z} (δες Παράγραφο 3.1 για τον συμβολισμό) έχει την ιδιότητα Markov ως προς τη διήθηση που παράγει ο ίδιος γιατί για $n \geq k$ και $A \subset \mathbb{Z}$ έχουμε

$$\mathbf{P}(S_n \in A | \mathcal{F}_k) = \phi(S_k) = \mathbf{P}(S_n \in A | S_k)$$

με $\phi(r) = \mathbf{P}(r + \sum_{k < j \leq n} X_j \in A)$ για κάθε $r \in \mathbb{Z}$. Οι ισότητες είναι διαισθητικά προφανείς και προκύπτουν με χρήση τής Πρότασης 2.13. Συγκεκριμένα, σε εκείνη την πρόταση, παίρνουμε $\mathcal{S}_1 = \mathcal{S}_2 = \mathbb{Z}$, $X = S_k$, $Y = S_n - S_k$, $h(x, y) = \mathbf{1}_{x+y \in A}$.

(β) Η ανελίξη $(M_n)_{n \geq 0}$ με $M_n = \max_{0 \leq k \leq n} S_k$, όπου $(S_n)_{n \geq 0}$ είναι ο συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος στο \mathbb{Z} , δεν έχει την ιδιότητα Markov ως προς τη διήθηση που αυτή παράγει. Η απόδειξη αυτού του ισχυρισμού αφήνεται ως άσκηση.

Χρόνο διακοπής ως προς την $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$ λέμε οποιαδήποτε τυχαία μεταβλητή $T : \Omega \rightarrow [0, \infty]$ ικανοποιεί την (4.3) για κάθε $t \in I$.

Πολλές φορές, μια ανελίξη Markov $(X_t)_{t \in I}$ ικανοποιεί την ιδιότητα τού Ορισμού 4.19 πιο πάνω όχι απλώς για κάθε σταθερό χρόνο s αλλά και για κάθε πεπερασμένο χρόνο διακοπής T . Δηλαδή, η κατανομή τού μονοπατιού $(X_t)_{t \geq T}$ της X μετά τον χρόνο T επηρεάζεται από την «πληροφορία τού παρελθόντος» μόνο μέσω της τιμής $X(T)$. Πρώτα ορίζουμε τι σημαίνει «πληροφορία» μέχρι τον τυχαίο χρόνο T . Αυτή είναι η σ-άλγεβρα

$$\mathcal{F}_T := \{A \in \mathcal{F} : A \cap \{T \leq t\} \in \mathcal{F}_t \text{ για κάθε } t \in I\}. \quad (4.5)$$

Διαισθητικά, αυτή η σ-άλγεβρα περιέχει τα γεγονότα για τα οποία μπορούμε τη χρονική στιγμή T να αποφανθούμε αν έχουν συμβεί ως τότε. Και οι τυχαίες μεταβλητές που είναι μετρήσιμες ως προς αυτή τη σ-άλγεβρα είναι εκείνες των οποίων η τιμή μπορεί να καθοριστεί από την πληροφορία ως και τον χρόνο T .

Επειδή η X είναι προσαρμοσμένη στη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$, η πληροφορία ως και τον χρόνο T περιέχει την τιμή τού T και τις τιμές που έχει πάρει η X στο διάστημα $[0, T]$. Το κάνουμε πιο σαφές αυτό στο επόμενο παράδειγμα.

Παράδειγμα 4.21. (α) Η T είναι \mathcal{F}_T -μετρήσιμη. Αρκεί να δείξουμε ότι για οποιοδήποτε $r \geq 0$ το γεγονός $A := \{T \leq r\}$ είναι στοιχείο τής \mathcal{F}_T . Πράγματι, για κάθε $t \in I$ θέτουμε $s := \sup(I \cap [0, r \wedge t])$ και ας υποθέσουμε ότι $s \in I$. Τότε

$$A \cap \{T \leq t\} = \{T \leq r \wedge t\} = \{T \leq s\} \in \mathcal{F}_s \subset \mathcal{F}_t$$

αφού ο T είναι χρόνος διακοπής. Η περίπτωση που $s \notin I$ αφήνεται ως άσκηση.

(β) Ας υποθέσουμε ότι $I = [0, \infty)$ και ότι η X παίρνει τιμές σε έναν μετρικό χώρο και έχει συνεχή μονοπάτια. Τότε η τυχαία μεταβλητή X_T είναι \mathcal{F}_T μετρήσιμη. Αυτό είναι κάτι εντελώς αναμενόμενο από την περιγραφή που δώσαμε για την \mathcal{F}_T αλλά δεν είναι άμεσο, οπότε αφήνουμε την απόδειξή του για τις ασκήσεις (Άσκηση 4.11).

Δίνουμε τώρα τον ορισμό τής ισχυρής ιδιότητας Markov. Θεωρούμε σημείο $\delta \notin S$ και ορίζουμε $X_t = \delta$ για κάθε $t \in \mathbb{R} \setminus I$.

Ορισμός 4.22. Λέμε ότι η X έχει την **ισχυρή ιδιότητα Markov** ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$ αν για κάθε χρόνο διακοπής T που παίρνει τιμές στο I , $t > 0$ και $A \in \mathcal{A}$ ισχύει

$$\mathbf{P}(X_{T+t} \in A | \mathcal{F}_T) = \mathbf{P}(X_{T+t} \in A | X_T).$$

Για την ισχυρή ιδιότητα Markov ισχύει ανάλογη παρατήρηση με αυτήν που ακολουθεί τον Ορισμό 4.19.

Για περισσότερα σχετικά με τις ανεξίξεις που έχουν την ιδιότητα Markov ή την ισχυρή ιδιότητα Markov και τη σχέση των δύο ιδιοτήτων μπορεί να δει κανείς στα Κεφάλαια 19, 20 του Bass (2011) ή στο Κεφάλαιο III των Revuz and Yor (1999).

Ασκήσεις

4.1 Έστω I σύνολο, $(\Omega_i, \mathcal{F}_i)$, $i \in I$ μετρήσιμοι χώροι, $\Omega := \prod_{i \in I} \Omega_i$, και $\mathcal{F} := \otimes_{i \in I} \mathcal{F}_i$ η σ-άλγεβρα γινόμενο των \mathcal{F}_i , $i \in I$ (μας ενδιαφέρει η περίπτωση που το I είναι υπεραριθμησιμο). Για κάθε $J \subset I$, συμβολίζουμε με π_J την απεικόνιση $\pi_J : \Omega \rightarrow \prod_{i \in J} \Omega_i$ με $\pi_J((x_i)_{i \in I}) = (x_i)_{i \in J}$, δηλαδή την προβολή στις συντεταγμένες που αντιστοιχούν στο J . Να δειχθεί ότι

$$\mathcal{F} = \{\pi_J^{-1}(A) : J \subset I \text{ αριθμήσιμο και } A \in \otimes_{i \in J} \mathcal{F}_i\}. \quad (4.6)$$

Πιο αναλυτικά, το $\pi_J^{-1}(A) = \{(x_i)_{i \in I} : (x_i)_{i \in J} \in A\}$. Κάθε σύνολο αυτής της μορφής (με το A όπως στη σχέση πιο πριν) το λέμε μετρήσιμο σ-ορθογώνιο. Κάθε τέτοιο σύνολο βάζει περιορισμούς μόνο σε αριθμήσιμο πλήθος συντεταγμένων των στοιχείων του (οι ίδιες συντεταγμένες για όλα τα στοιχεία).

4.2 Έστω $(X_t)_{t \geq 0}, (Y_t)_{t \geq 0}$ στοχαστικές ανεξίξεις με τιμές σε έναν μετρικό χώρο S . Αν έχουν την ίδια κατανομή, να δειχθεί ότι έχουν τις ίδιες κατανομές πεπερασμένης διάστασης.

4.3 Έστω $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$ μια διήθηση σε χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και $a \in [0, \infty)$. Να δειχθεί ότι η σταθερή τυχαία μεταβλητή $T = a$ είναι χρόνος διακοπής ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$.

4.4 Αν οι τυχαίες μεταβλητές T, S είναι χρόνοι διακοπής ως προς μία διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$ και $a > 1$, να δειχθεί ότι χρόνοι διακοπής ως προς την $(\mathcal{F}_t)_{t \in I}$ είναι επίσης και οι τυχαίοι χρόνοι

$$S \wedge T, S \vee T, S + T, aS.$$

4.5 Αν ο T είναι χρόνος διακοπής ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \in [0, \infty)}$, τότε για κάθε $t > 0$ ισχύει $\{T < t\} \in \mathcal{F}_t$.

4.6 Έστω T χρόνος διακοπής ως προς μια διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \in [0, \infty)}$. Για κάθε $n \in \mathbb{N}$ ορίζουμε τον τυχαίο χρόνο $T_n := (\lfloor 2^n T \rfloor + 1)/2^n$, δηλαδή θέτουμε $T_n = k/2^n$ ($k \in \mathbb{N}^+$) ακριβώς όταν $T \in [(k-1)/2^n, k/2^n)$, ενώ $T_n = \infty$ όταν $T = \infty$. Να δειχθεί ότι:

(α) Κάθε T_n είναι χρόνος διακοπής ως προς την $(\mathcal{F}_t)_{t \in [0, \infty)}$.

4.4 Ιδιότητες Markov*

(β) Η $(T_n)_{n \geq 0}$ είναι φθίνουσα και $\lim_{n \rightarrow \infty} T_n = T$.

4.7 Έστω $X = (X_t)_{t \geq 0}$ συνεχές μη αρνητικό submartingale, $p \geq 1$, και $t > 0$. Τότε για κάθε $\lambda > 0$, έχουμε

$$\mathbf{P}\left(\sup_{0 \leq s \leq t} X_s \geq \lambda\right) \leq \frac{1}{\lambda^p} \mathbf{E}(X_t^p).$$

4.8 Έστω $X = (X_t)_{t \geq 0}$ μη αρνητικό local martingale. Να δειχθεί ότι είναι supermartingale.

4.9 Έστω $X = (X_t)_{t \geq 0}$ θετικό συνεχές martingale με $X_0 = x_0 \in (0, \infty)$ δεδομένη σταθερά και $\lim_{t \rightarrow \infty} X_t = 0$ με πιθανότητα 1. Θέτουμε $X^* := \sup_{t \geq 0} X_t$. Να δειχθεί ότι για κάθε $x > x_0$ ισχύει

$$\mathbf{P}(X^* \geq x) = \frac{x_0}{x}.$$

[Υπόδειξη.: Έστω $T := \inf\{t \geq 0 : X_t = x\}$. Εφαρμόζουμε το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής για το martingale X και τον χρόνο $T \wedge r$ με $r \in (0, \infty)$ αυθαίρετο.]

4.10 Να δειχθεί ότι πράγματι η \mathcal{F}_T της σχέσης (4.5) είναι σ -άλγεβρα. Ο T είναι χρόνος διακοπής.

4.11 Έστω $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ διήθηση σε έναν χώρο πιθανότητας και $X = (X_t)_{t \geq 0}$ ανέλιξη με τιμές σε έναν μετρικό χώρο και προσαρμοσμένη στην $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$. Για T χρόνο διακοπής με τιμές στο $[0, \infty)$ θεωρούμε την ακολουθία των τυχαίων χρόνων $\tilde{T}_n = \lfloor 2^n T \rfloor / 2^n$, $n \in \mathbb{N}$ (δεν είναι απαραίτητα χρόνοι διακοπής). Να δειχθεί ότι:

(α) Η $X_{\tilde{T}_n}$ είναι \mathcal{F}_T -μετρήσιμη για κάθε $n \in \mathbb{N}$.

(β) Αν η X έχει συνεχή μονοπάτια, τότε η X_T είναι \mathcal{F}_T -μετρήσιμη.

4.12 (Μετρήσιμη ως συνέπεια τού προσαρμοσμένη) Έστω $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ διήθηση σε έναν χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και $X : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ ανέλιξη προσαρμοσμένη στην $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$.

(α) Υποθέτουμε για αυτό το μέρος ότι η X έχει μονοπάτια που είναι αριστερά συνεχή. Για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ θεωρούμε την ανέλιξη $X^{(n)}$ με $X^{(n)}(t, \omega) = X(\lfloor nt \rfloor / n, \omega)$ για κάθε $(t, \omega) \in [0, \infty) \times \Omega$. Έστω $t > 0$ δεδομένο.

(i) Να δειχθεί ότι η απεικόνιση $X^{(n)}|_{[0, t] \times \Omega}$ είναι $\mathcal{B}([0, t]) \otimes \mathcal{F}_t$ -μετρήσιμη.

(ii) Να δειχθεί ότι η $X|_{[0, t] \times \Omega}$ είναι $\mathcal{B}([0, t]) \otimes \mathcal{F}_t$ -μετρήσιμη.

(β) Υποθέτουμε για αυτό το μέρος ότι η X έχει μονοπάτια που είναι δεξιά συνεχή. Για $t > 0$ δεδομένο και κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ θεωρούμε την ανέλιξη $(Y^{(n)})_{s \in [0, t]}$ με

$$Y^{(n)}(s, \omega) = X\left(\frac{(\lfloor ns \rfloor + 1) \wedge (nt)}{n}, \omega\right)$$

για κάθε $(s, \omega) \in [0, t] \times \Omega$. Με λόγια, σε κάθε διάστημα τής μορφής $[(k-1)/n, k/n) \subset [0, t]$ με $k \in \mathbb{N}^+$ η $Y^{(n)}$ έχει την τιμή $X(k/n, \omega)$, ενώ στο διάστημα αυτής της μορφής που περιέχει το t η $Y^{(n)}$ έχει την τιμή $X(t, \omega)$.

(i) Να δειχθεί ότι η $Y^{(n)}$ είναι $\mathcal{B}([0, t]) \otimes \mathcal{F}_t$ -μετρήσιμη.

(ii) Να δειχθεί ότι η $X|_{[0, t] \times \Omega}$ είναι $\mathcal{B}([0, t]) \otimes \mathcal{F}_t$ -μετρήσιμη.

(γ) Κάτω από τις υποθέσεις τού (α) ή του (β), να δειχθεί ότι η X είναι $\mathcal{B}([0, \infty)) \otimes \mathcal{F}$ -μετρήσιμη.

Αν μια ανέλιξη X έχει την ιδιότητα (ii) των (α), (β) πιο πάνω για κάθε $t \geq 0$ τότε λέγεται **προοδευτικά μετρήσιμη**.

4.13 (Fubini για δεσμευμένη μέση τιμή και ολοκλήρωμα Lebesgue) Έστω $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ χώρος πιθανότητας, $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$ σ -άλγεβρα στο Ω , $0 \leq a < b$, και $X : [a, b] \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ μετρήσιμη ανέλιξη (δηλαδή $\mathcal{B}([a, b]) \otimes \mathcal{F}/\mathcal{B}(\mathbb{R})$ -μετρήσιμη) με $\mathbf{E}|X(t, \omega)| < \infty$ για κάθε $t \in [a, b]$.

(α) Να δειχθεί ότι μπορεί να επιλεγεί για κάθε $t \in [0, \infty)$ μια εκδοχή $h(t, \omega)$ τής $\mathbf{E}\{X(t, \cdot) | \mathcal{G}\}(\omega)$ ώστε η $h : [a, b] \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ να είναι $\mathcal{B}([a, b]) \otimes \mathcal{G}/\mathcal{B}(\mathbb{R})$ -μετρήσιμη.

(β) Αν επιπλέον ισχύει ότι $\int_a^b \mathbf{E}|X(t, \omega)| dt < \infty$, να δειχθεί ότι

$$\mathbf{E}\left(\int_a^b X(t, \cdot) dt \middle| \mathcal{G}\right)(\omega) = \int_a^b \mathbf{E}\{X(t, \cdot) | \mathcal{G}\}(\omega) dt. \quad (4.7)$$

Για την ακρίβεια, ο ολοκληρωτέος τού δεξιού μέλους είναι η $h(t, \omega)$, αλλά θεωρούμε πιο ευκολομημόνευτη την πιο πάνω γραφή, που λέει απλώς ότι η δεσμευμένη μέση τιμή μπαίνει μέσα στο ολοκλήρωμα.

4.14 Έστω (Ω, \mathcal{F}) μετρήσιμος χώρος, \mathcal{S} διαχωρίσιμος μετρικός χώρος, και \mathcal{A} σ -άλγεβρα στο \mathcal{S} που περιέχει τα Borel υποσύνολα τού \mathcal{S} . Αν οι $X, Y : \Omega \rightarrow \mathcal{S}$ είναι \mathcal{F}/\mathcal{A} μετρήσιμες, τότε το σύνολο $\{X = Y\}$ είναι στοιχείο τής \mathcal{F} .

4.4 Ιδιότητες Markov*

Μέρος II

Κίνηση Brown

5

Κατασκευή τής κίνησης Brown και απλές ιδιότητες

5.1 Ορισμός, ύπαρξη, και μοναδικότητα

Ορισμός 5.1. Μια στοχαστική ανάλιξη $\{B(t) : t \geq 0\}$ ορισμένη σε έναν χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και με τιμές στο \mathbb{R} λέγεται (μονοδιάστατη) **κίνηση Brown** αν ισχύουν τα εξής:

- (i) Η ανάλιξη έχει ανεξάρτητες προσαυξήσεις. Δηλαδή για κάθε $n \geq 1$ και $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n$, οι τυχαίες μεταβλητές

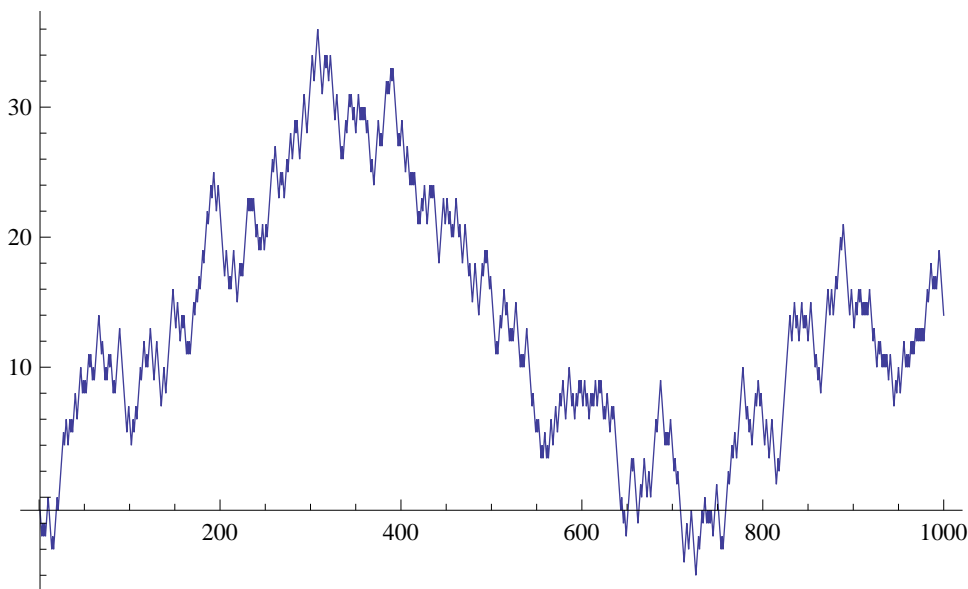
$$B(t_1), B(t_2) - B(t_1), B(t_3) - B(t_2), \dots, B(t_n) - B(t_{n-1})$$

είναι ανεξάρτητες.

- (ii) Για κάθε $0 \leq s < t$,

$$B(t) - B(s) \sim N(0, t - s).$$

- (iii) Με πιθανότητα 1, η συνάρτηση $t \mapsto B(t)(\omega)$ είναι συνεχής.



Σχήμα 5.1: Το γράφημα μιας πραγματοποίησης τής κίνησης Brown.

Μια κίνηση Brown για την οποία με πιθανότητα 1 ισχύει $B(0) = x$ λέγεται κίνηση Brown που ξεκινάει από το x , ενώ όταν $x = 0$ μια τέτοια ανάλιξη λέγεται **τυπική κίνηση Brown**.

Στην απαίτηση (i) του ορισμού, η $B(t_1)$ δεν είναι προσαύξηση τής B εκτός αν η B είναι τυπική κίνηση Brown, οπότε $B(t_1) = B(t_1) - B(0)$. Έτσι η (i), στη γενική περίπτωση, είναι κάτι παραπάνω από «ανεξάρτητες προσαυξήσεις».

Παρατήρηση 5.2 (Σημείο εκκίνησης τής B). Ο πιο πάνω ορισμός δεν θέτει κανένα περιορισμό στην αρχική τιμή $B(0)$ της κίνησης. Έτσι, είναι δυνατόν η κίνηση να ξεκινάει από ένα συγκεκριμένο $x \in \mathbb{R}$ ή, γενικότερα, να ξεκινάει τυχαία επιλέγοντας το αρχικό της σημείο με βάση ένα μέτρο πιθανότητας μ στο \mathbb{R} (δηλαδή η $B(0)$ να είναι τυχαία μεταβλητή με κατανομή μ). Όλες αυτές οι κινήσεις Brown παράγονται από την τυπική κίνηση Brown ως εξής. Έστω W τυπική κίνηση Brown και X τυχαία μεταβλητή (στον ίδιο χώρο πιθανότητας) ανεξάρτητη τής W και με κατανομή μ . Τότε η ανέλιξη B με

$$B(t) := X + W(t)$$

για κάθε $t \geq 0$ είναι κίνηση Brown με αρχική κατανομή μ . Ιδιαίτέρως, όταν το μ δίνει όλη του τη μάζα σε ένα σημείο $x \in \mathbb{R}$, τότε έχουμε $B(t) = x + W(t)$, δηλαδή την κίνηση Brown που ξεκινάει από το x .

Αν σε μια πιθανότητα ή σε μια μέση τιμή εμφανίζεται μια κίνηση Brown B με αρχική κατανομή μ και θέλουμε να το κάνουμε ξεκάθαρο, το δηλώνουμε γράφοντας $\mathbf{P}_\mu, \mathbf{E}_\mu$ αντίστοιχα. Ειδικά για την κίνηση Brown που ξεκινάει από το $x \in \mathbb{R}$, χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό $\mathbf{P}_x, \mathbf{E}_x$. Αν το αρχικό σημείο είναι αδιάφορο ή ξεκάθαρο από τα συμφραζόμενα, θα γράφουμε απλώς \mathbf{P}, \mathbf{E} .

Παράδειγμα 5.3. Έστω $x \in \mathbb{R}$ και B κίνηση Brown με $B(0) = x$. Τότε $\text{Cov}(B(s), B(t)) = s \wedge t$ για κάθε $s, t \geq 0$.

Πράγματι, έστω ότι $0 \leq s < t$. Τότε

$$\begin{aligned} \text{Cov}(B(s), B(t)) &= \text{Cov}(B(s), B(t) - B(s) + B(s)) \\ &= \text{Cov}(B(s), B(t) - B(s)) + \text{Cov}(B(s), B(s)) \\ &= 0 + \text{Var}(B(s)) = s. \end{aligned}$$

Στη δεύτερη ισότητα χρησιμοποιούμε τη διγραμμικότητα τής συνδιακύμανσης. Στην τρίτη ισότητα το ότι οι $B(s), B(t) - B(s)$ είναι ανεξάρτητες και το ότι $B(s) \sim N(x, s)$ (αφού $B(s) - B(0) \sim N(0, s)$).

Παρατήρηση 5.4 (Κατανομές πεπερασμένης διάστασης). Αν ξέρουμε την κατανομή τής $B(0)$, όλες οι κατανομές πεπερασμένης διάστασης τής B υπολογίζονται (Ορισμός 4.5). Ας υποθέσουμε ότι η B ξεκινάει από το x , δηλαδή $B(0) = x$ (για κάθε $\omega \in \Omega$). Για $0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n$, θα προσδιορίσουμε την κατανομή τού διανύσματος

$$Z := (B(t_1), B(t_2), \dots, B(t_n)).$$

Έστω $X_i := B(t_i) - B(t_{i-1}), \sigma_i := \sqrt{t_i - t_{i-1}}, Y_i := X_i / \sigma_i$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, n$. Οι Y_1, Y_2, \dots, Y_n είναι ανεξάρτητες τυπικές κανονικές (έπεται από τον ορισμό τής κίνησης Brown) και με τη βοήθειά τους μπορούμε να γράψουμε

$$\begin{pmatrix} B(t_1) \\ B(t_2) \\ \vdots \\ B(t_n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x + X_1 \\ x + X_1 + X_2 \\ \vdots \\ x + X_1 + X_2 + \dots + X_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ x \\ \vdots \\ x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \sigma_1 & \sigma_2 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_3 & \dots & \sigma_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix}.$$

Αυτή η σχέση δείχνει ότι η κατανομή τού διανύσματος Z προσδιορίζεται μοναδικά και επιλέον ότι το διάνυσμα είναι Γκαουσιανό (Ορισμός Α'.3 στο Παράρτημα Α'). Η κατανομή ενός Γκαουσιανού διανύσματος καθορίζεται πλήρως από τις μέσες τιμές των συνιστωσών του και τον πίνακα συνδιακύμανσης του (δες Πρόταση Α'.5 στο Παράρτημα Α'). Για το διάνυσμα $(B(t_1), B(t_2), \dots, B(t_n))$, αυτά τα χαρακτηριστικά υπολογίζονται συναρτήσει των t_1, t_2, \dots, t_n . Συγκεκριμένα, $\mathbf{E}(B(t)) = x$ για κάθε $t \geq 0$ αφού η $B(t) - B(0) \sim N(0, t)$, ενώ, για τις συνδιακυμάνσεις, έχουμε από το Παράδειγμα 5.3 ότι $\text{Cov}(B(t_i), B(t_j)) = t_i \wedge t_j$ για κάθε $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

5.2 Απλές ιδιότητες

Την κίνηση Brown ως φυσικό φαινόμενο κατέγραψε πρώτος ο Robert Brown το 1828 παρατηρώντας την κίνηση κόκων γύρης μέσα σε νερό. Έπειτα, το 1900, ο Louis Bachelier τη χρησιμοποίησε ως μοντέλο για τις τιμές μετοχών. Ο Albert Einstein το 1905 απέδειξε ότι μια κίνηση με κάποια «φυσιολογικά» επιθυμητά χαρακτηριστικά θα ικανοποιεί την ιδιότητα (ii) του ορισμού πιο πάνω και υπέδειξε εφαρμογές στον μικρόκοσμο (π.χ., προσδιορισμός τού αριθμού τού Avogadro). Παρ' όλα αυτά, η απόδειξη ότι η κίνηση Brown υπάρχει, δηλαδή ότι υπάρχει ανέλιξη που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις τού Ορισμού 5.1, έγινε το 1923 από τον Nobert Wiener. Ακολούθησαν και άλλες αποδείξεις ύπαρξης.

Θεώρημα 5.5. *Μια τυπική κίνηση Brown υπάρχει.*

Στο Παράρτημα Γ' δίνεται μια απόδειξη που οφείλεται στον Paul Lévy και δημοσιεύθηκε το 1939.

Μοναδικότητα. Υπάρχουν άραγε πολλές στοχαστικές ανελίξεις που να ικανοποιούν τις ιδιότητες τού Ορισμού 5.1 πιο πάνω μαζί με τη $B(0) = 0$; Δηλαδή να είναι τυπικές κινήσεις Brown; Ναι, υπάρχουν. Για παράδειγμα, αν B είναι μια τέτοια, τότε το ίδιο είναι και η $-B$. Μοναδική όμως είναι η κατανομή τής τυπικής κίνησης Brown στον χώρο $C([0, \infty))$ των συνεχών συναρτήσεων στο $[0, \infty)$. Ας θυμηθούμε (Παράγραφος 4.1) ότι η τυπική κίνηση Brown μπορεί να θεωρηθεί τυχαία μεταβλητή που με πιθανότητα 1 παίρνει τιμές στον $C([0, \infty))$. Δηλαδή

$$\omega \mapsto f^\omega,$$

όπου $f^\omega : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ είναι η συνάρτηση με τιμές $f^\omega(t) = B(t)$. Ως συνήθως, για μια τυχαία μεταβλητή παραλείπουμε το δειγματικό σημείο ω και γράφουμε $B(t)$ αντί $B(t)(\omega)$. Η κατανομή μιας τυπικής κίνησης Brown είναι ένα μέτρο πιθανότητας στον $C([0, \infty))$. Για τη σ-άλγεβρα με την οποία εφοδιάζουμε τον $C([0, \infty))$, δες την Παράγραφο 5.7.

Οι ιδιότητες ορισμού τής τυπικής κίνησης Brown είναι αρκετές ώστε να καθορίζουν μόνο μία κατανομή. Έτσι έχουμε το εξής αποτέλεσμα μοναδικότητας.

Θεώρημα 5.6. *Έστω δύο τυπικές κινήσεις Brown B, B^* . Τότε οι B, B^* έχουν την ίδια κατανομή.*

Απόδειξη. Με βάση την Παρατήρηση 5.4, οι B, B^* έχουν τις ίδιες κατανομές πεπερασμένης διάστασης. Το συμπέρασμα έπεται από την Πρόταση 4.10. ■

5.2 Απλές ιδιότητες

Κάθε κίνηση Brown ορίζει στον χώρο πιθανότητας στον οποίο ορίζεται μια φυσιολογική διήθηση, την $(\mathcal{F}_t^0)_{t \geq 0}$ με

$$\mathcal{F}_t^0 := \sigma(\{B(s) : s \in [0, t]\}) \tag{5.1}$$

για κάθε $t \in [0, \infty)$.

Πρόταση 5.7 (Μετατόπιση). *Έστω B κίνηση Brown και $t_0 \geq 0$. Ορίζουμε την ανέλιξη X ως*

$$X(t) := B(t_0 + t) - B(t_0) \text{ για κάθε } t \in [0, \infty).$$

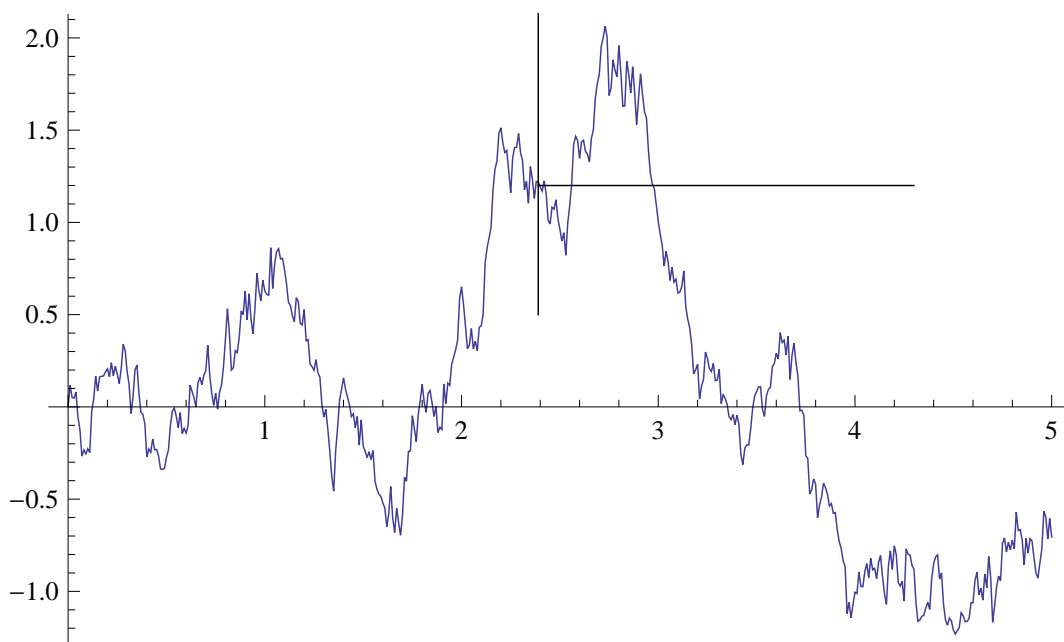
Τότε:

- (i) *Η X είναι τυπική κίνηση Brown.*
- (ii) *Η X είναι ανεξάρτητη από την $\mathcal{F}_{t_0}^0$.*

Απόδειξη. (i) Ελέγχουμε τις ιδιότητες τού ορισμού. Για $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n$,

$$\begin{aligned} & (X(t_1), X(t_2) - X(t_1), X(t_3) - X(t_2), \dots, X(t_n) - X(t_{n-1})) \\ &= (B(t_0 + t_1) - B(t_0), B(t_0 + t_2) - B(t_0 + t_1), B(t_0 + t_3) - B(t_0 + t_2), \dots, B(t_0 + t_n) - B(t_0 + t_{n-1})). \end{aligned}$$

5.2 Απλές ιδιότητες



Σχήμα 5.2: Η Πρόταση 5.7 λέει ότι τοποθετώντας νέους άξονες στο $(t_0, B(t_0))$, η ανέλιξη δεξιά τού νέου συστήματος αξόνων είναι τυπική κίνηση Brown και ανεξάρτητη από το παρελθόν.

Οι συντεταγμένες τού τελευταίου διανύσματος είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές επειδή η B είναι κίνηση Brown.

Για $0 \leq s < t$, έχουμε $X(t) - X(s) = B(t_0 + t) - B(t_0 + s) \sim N(0, t - s)$ επειδή η B είναι κίνηση Brown και $(t_0 + t) - (t_0 + s) = t - s$.

Τέλος, με πιθανότητα 1, η συνάρτηση $t \mapsto X(t)$ είναι συνεχής αφού η B είναι συνεχής με πιθανότητα 1. Το $B(t_0)$ είναι απλώς ένας αριθμός που εξαρτάται από το ω αλλά όχι από το t .

(ii) Η απόδειξη είναι τεχνική και δίνεται στο Παράρτημα Γ'. ■

Η προηγούμενη πρόταση λέει ότι για δεδομένο $t_0 > 0$, η κίνηση Brown ξαναγεννιέται τη χρονική στιγμή t_0 με την έννοια ότι αυτό που ακολουθεί επηρεάζεται από το παρελθόν $\{B(s) : s \in [0, t_0]\}$ μόνο από την τιμή $B(t_0)$. Το υπόλοιπο τμήμα τής κίνησης, δηλαδή το $B(t_0 + t) - B(t_0) : t \geq 0$, είναι κάτι εντελώς καινούργιο, δεν εξαρτάται από το παρελθόν. Εναλλακτικά, αν παρατηρούμε το γράφημα $\{(t, B(t)) : t \geq 0\}$ τής κίνησης Brown και τοποθετήσουμε την αρχή των αξόνων στο $(t_0, B(t_0))$, η κίνηση που θα δούμε δεξιά από το $(0, 0)$ του νέου συστήματος συντεταγμένων είναι πάλι κίνηση Brown και μάλιστα ανεξάρτητη από το παρελθόν. Συνέπεια αυτής της ιδιότητας είναι ότι η B είναι ανέλιξη Markov ως προς τη διήθηση που παράγει.

Πρόταση 5.8. Έστω B τυπική κίνηση Brown. Ορίζουμε την ανέλιξη X ως

$$X(t) := -B(t) \text{ για κάθε } t \in [0, \infty).$$

Τότε η X είναι τυπική κίνηση Brown.

Απόδειξη. Όμοια όπως στο (i) της Πρότασης 5.7. ■

Γενίκευση τής προηγούμενης πρότασης είναι η επόμενη.

Πρόταση 5.9 (Αλλαγή κλίμακας). Έστω B τυπική κίνηση Brown και $c \neq 0$. Ορίζουμε την ανέλιξη X ως

$$X(t) := \frac{1}{c}B(c^2t) \text{ για κάθε } t \in [0, \infty).$$

Τότε η X είναι τυπική κίνηση Brown.

Απόδειξη. Όμοια όπως στο (i) της Πρότασης 5.7. ■

Η επόμενη ιδιότητα τής κίνησης Brown συσχετίζει τη συμπεριφορά της στο 0 με αυτήν στο ∞ .

Πρόταση 5.10 (Αντιστροφή χρόνου). Έστω B τυπική κίνηση Brown. Ορίζουμε την ανέλιξη X ως

$$X(t) := \begin{cases} tB(1/t) & \text{αν } t > 0, \\ 0 & \text{αν } t = 0. \end{cases} \quad (5.2)$$

Η X είναι τυπική κίνηση Brown.

Απόδειξη. Θα δείξουμε ότι οι X, B έχουν τις ίδιες κατανομές πεπερασμένης διάστασης. Αυτό δίνει τα (i), (ii) του ορισμού τής κίνησης Brown. Έπειτα, θα δείξουμε το (iii).

ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΗΣ ΔΙΑΣΤΑΣΗΣ: Έστω $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n$. Η τυχαία μεταβλητή $(X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n))$ είναι Γκαουσιανή ως γραμμικός μετασχηματισμός τής $(B(1/t_1), B(1/t_2), \dots, B(1/t_n))$. Η μέση τιμή κάθε συνιστώσας της είναι μηδέν, ενώ ο πίνακας συνδιακύμανσής της είναι

$$C_{i,j} := \text{Cov}(X(t_i), X(t_j)) = t_i t_j \{(1/t_i) \wedge (1/t_j)\} = t_i \wedge t_j.$$

Από τις ιδιότητες των Γκαουσιανών διανυσμάτων (Παράρτημα Α' 1) έπεται ότι η $(X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n))$ έχει την ίδια κατανομή με τη $(B(t_1), B(t_2), \dots, B(t_n))$. Προφανώς το ίδιο συμπέρασμα ισχύει αν είχαμε $t_1 = 0$ αφού $X(0) = B(0) = 0$.

ΣΥΝΕΧΕΙΑ: Με πιθανότητα 1, η X είναι συνεχής στο $(0, \infty)$ και μένει να αποδείξουμε ότι επίσης με πιθανότητα 1 είναι συνεχής στο 0. Έστω $\Omega_0 \in \mathcal{F}$ με $\mathbf{P}(\Omega_0) = 1$ ώστε για κάθε $\omega \in \Omega_0$, η $[0, \infty) \ni t \mapsto B(t)(\omega)$ να είναι συνεχής. Έστω $(q_i)_{i \in \mathbb{N}}$ μια αρίθμηση των ρητών τού $(0, 1)$. Με βάση τον ορισμό τού ορίου και αξιοποιώντας τη συνέχεια τής X στο $(0, \infty)$, έχουμε

$$\Omega_0 \cap \{\lim_{t \rightarrow 0} X(t) = 0\} = \Omega_0 \cap \left\{ \lim_{t \rightarrow 0, t \in \mathbb{Q}} X(t) = 0 \right\} = \Omega_0 \cap \left\{ \bigcap_{n=1}^{\infty} \bigcup_{k=1}^{\infty} \bigcap_{\ell=1}^{\infty} \bigcap_{\substack{1 \leq i \leq \ell \\ q_i < 1/k}} \{|X(q_i)| < 1/n\} \right\}. \quad (5.3)$$

Από τις εκφράσεις για πιθανότητα ένωσης αύξουσας ακολουθίας και τομής φθίνουσας ακολουθίας, έχουμε

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(\Omega_0 \cap \{\lim_{t \rightarrow 0} X(t) = 0\}) &= \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{k \rightarrow \infty} \lim_{\ell \rightarrow \infty} \mathbf{P}(\bigcap_{\substack{1 \leq i \leq \ell \\ q_i < 1/k}} \{|X(q_i)| < 1/n\}) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{k \rightarrow \infty} \lim_{\ell \rightarrow \infty} \mathbf{P}(\bigcap_{\substack{1 \leq i \leq \ell \\ q_i < 1/k}} \{|B(q_i)| < 1/n\}) = \mathbf{P}(\Omega_0 \cap \{\lim_{t \rightarrow 0} B(t) = 0\}) = 1 \end{aligned}$$

Στη δεύτερη ισότητα χρησιμοποιήσαμε το ότι οι B, X έχουν τις ίδιες κατανομές πεπερασμένης διάστασης. Η απόδειξη ολοκληρώθηκε. ■

Μια συνέπεια τής προηγούμενης πρότασης είναι ότι με πιθανότητα 1 η X είναι συνεχής στο 0, και άρα με πιθανότητα 1 ισχύει

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{B(t)}{t} = 0, \quad (5.4)$$

που είναι ο νόμος μεγάλων αριθμών για την κίνηση Brown. Στην Άσκηση 7.8 θα το δούμε ως συνέπεια τού κλασικού νόμου των μεγάλων αριθμών.

Παρατήρηση 5.11 (Υπολογισμοί με την κίνηση Brown). Σε υπολογισμούς με την κίνηση Brown χρησιμοποιούμε:

(α) Την ιδιότητα των ανεξάρτητων προσαυξήσεων και τη συνέπειά της ότι για $0 \leq s < t$

$$\eta B(t) - B(s) \text{ είναι ανεξάρτητη από την } \sigma\text{-άλγεβρα } \mathcal{F}_s^0. \quad (5.5)$$

Αυτό γιατί με βάση την Πρόταση 5.7 η ανέλιξη Y με $Y(r) = B(s+r) - B(s)$ για κάθε $r \geq 0$ είναι ανεξάρτητη τής \mathcal{F}_s^0 και $B(t) - B(s) = Y(t-s)$.

(β) Στην περίπτωση τής τυπικής κίνησης Brown το ότι για κάθε $t > 0$ ισχύει

$$B(t) \stackrel{d}{=} \sqrt{t}B(1). \quad (5.6)$$

Αυτό είναι σωστό γιατί και τα δύο μέλη έχουν κατανομή $N(0, t)$. Προσοχή όμως. Οι ανελιξίσεις $(B(t))_{t \geq 0}$ και $(X(t))_{t \geq 0}$ με $X(t) = \sqrt{t}B(1)$ είναι διαφορετικές. Κάθε μονοπάτι τής X είναι απλώς ένα (τυχαίο) πολλαπλάσιο τής συνάρτησης \sqrt{t} , ενώ αυτό δεν ισχύει για τα μονοπάτια τής B . Αυτό που ισχύει είναι ότι οι B, X έχουν τις ίδιες κατανομές διάστασης 1 (δες Ορισμό 4.5), δηλαδή αυτό που λέει η (5.6), αλλά έχουν διαφορετικές κατανομές [οι οποίες είναι μέτρα στον $C([0, \infty))$]. Διαφορετικές είναι ακόμα και οι κατανομές τους διάστασης 2 (Άσκηση).

Για παραδειγμα, στον υπολογισμό

$$\mathbf{E} \left(\int_0^1 e^{B(s)} ds \right) = \int_0^1 \mathbf{E}(e^{B(s)}) ds = \int_0^1 \mathbf{E}(e^{\sqrt{s}B(1)}) ds = \int_0^1 e^{s/2} ds, \quad (5.7)$$

εφαρμόζουμε την (5.6) χωριστά για κάθε s . Δεν μπορούμε να ισχυριστούμε ότι $\int_0^1 e^{B(s)} ds \stackrel{d}{=} \int_0^1 e^{\sqrt{s}B(1)} ds$.

Στο δεξί μέλος τής (5.6) φυσικά αντί της $B(1)$ μπορούμε να βάλουμε μια $Z \sim N(0, 1)$ ή να γράψουμε $W(1)$ όπου W είναι μια άλλη τυπική κίνηση Brown.

Όμοια όπως στην (5.6), ισχύει $B(t) - B(s) \stackrel{d}{=} \sqrt{|t-s|}B(1)$ για κάθε $s, t \geq 0$. Έτσι αναγόμεστε σε υπολογισμούς που αφορούν την κατανομή $N(0, 1)$.

5.3 Πλήρωση τού χώρου, επαυξημένη διήθηση, χρόνοι εισόδου

Έστω B μια κίνηση Brown στον χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$. Πέρα από τη διήθηση $(\mathcal{F}_t^0)_{t \geq 0}$ που παράγει η B , δηλαδή με $\mathcal{F}_t^0 := \sigma(\{B(s) : s \in [0, t]\})$, θα ορίσουμε μια νέα διήθηση.

Πρώτα θεωρούμε την πλήρωση τού χώρου $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$. Δηλαδή ορίζουμε

$$\mathcal{N} := \{N \subset \Omega : \text{υπάρχει } A \in \mathcal{F} \text{ με } \mathbf{P}(A) = 0\},$$

το σύνολο των \mathbf{P} -μηδενοσυνόλων, και $\bar{\mathcal{F}} := \sigma(\mathcal{F} \cup \mathcal{N})$. Ισχύει ότι $\bar{\mathcal{F}} = \{A \cup N : A \in \mathcal{F}, N \in \mathcal{N}\}$ και ορίζοντας την $\bar{\mathbf{P}}$ στην $\bar{\mathcal{F}}$ ως $\bar{\mathbf{P}}(A \cup N) = \mathbf{P}(A)$, η $\bar{\mathbf{P}}$ είναι καλά ορισμένη και μέτρο πιθανότητας στον $(\Omega, \bar{\mathcal{F}})$ [δες Θεώρημα A.2.3 στο Παράρτημα A1 του Durrett (2010)]. Ο χώρος $(\Omega, \bar{\mathcal{F}}, \bar{\mathbf{P}})$ λέγεται πλήρωση τού $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$.

Η νέα διήθηση που ορίζουμε είναι η

$$\mathcal{F}_t := \sigma(\mathcal{F}_t^0 \cup \mathcal{N}) \quad (5.8)$$

για κάθε $t \geq 0$ και λέγεται **επαυξημένη διήθηση**. Έχει το χαρακτηριστικό ότι η \mathcal{F}_0 (άρα και όλες οι άλλες \mathcal{F}_t) περιέχει όλα τα \mathbf{P} -μηδενοσύνολα. Στο εξής θα συμβολίζουμε το $\bar{\mathbf{P}}$ επίσης με \mathbf{P} .

Ορολογία: Μια διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ σε έναν χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ λέγεται **πλήρης** αν $\mathcal{N} \subset \mathcal{F}_0$, με \mathcal{N} όπως ορίστηκε πιο πάνω.

5.3.1 Ιδιότητα μετατόπισης για τη νέα διήθηση

Η αλλαγή στη διήθηση στον χώρο πιθανότητας δεν διαταράσσει την ισχύ τής Πρότασης 5.7(ii), η οποία εξακολουθεί να ισχύει με τη σ -άλγεβρα \mathcal{F}_{t_0} στη θέση τής $\mathcal{F}_{t_0}^0$.

Πρόταση 5.12. Έστω B κίνηση Brown και $t_0 \geq 0$. Θέτουμε $X(t) := B(t_0 + t) - B(t_0)$ για κάθε $t \geq 0$. Τότε η X είναι τυπική κίνηση Brown ανεξάρτητη από την \mathcal{F}_{t_0} .

Απόδειξη. Έστω $\mathcal{G} := \sigma(\{X(s) : s \geq 0\})$ η σ -άλγεβρα που παράγει η X . Θεωρούμε $A \in \mathcal{F}_{t_0}, B \in \mathcal{G}$. Υπάρχουν $\hat{A} \in \mathcal{F}_{t_0}^0, N \in \mathcal{N}$ ώστε $A = \hat{A} \cup N$. Τότε

$$\mathbf{P}(A \cap B) = \mathbf{P}((\hat{A} \cap B) \cup (N \cap B)) = \mathbf{P}(\hat{A} \cap B) = \mathbf{P}(\hat{A}) \mathbf{P}(B) = \mathbf{P}(A) \mathbf{P}(B)$$

αφού $\mathbf{P}(N) = 0$ και τα \hat{A}, B είναι ανεξάρτητα λόγω της Πρότασης 5.7(ii) (υπενθυμίζουμε ότι το \mathbf{P} συμβολίζει πλέον την πλήρωση τού αρχικού μέτρου πιθανότητας). ■

5.3.2 Χρόνος πρώτης εισόδου

Ως προς την επαυξημένη διήθηση, κάποιοι χρόνοι, σημαντικοί για τις εφαρμογές, θα προκύψουν ότι είναι χρόνοι διακοπής.

Πρόταση 5.13. Έστω B μια κίνηση Brown και $C \subset \mathbb{R}, C \neq \emptyset$. Θέτουμε

$$T_C := \inf\{s \geq 0 : B(s) \in C\}.$$

Αν το C είναι κλειστό, τότε ο T_C είναι χρόνος διακοπής για τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$.

Απόδειξη. Έστω Ω_0 ένα σύνολο με πιθανότητα 1 ώστε για κάθε $\omega \in \Omega$ η $t \mapsto B(t)(\omega)$ να είναι συνεχής. Για κάθε $\varepsilon > 0$ θέτουμε $C^{(\varepsilon)} = \{x \in \mathbb{R} : \text{υπάρχει } y \in C \text{ με } |x - y| < \varepsilon\}$ και για κάθε $t \geq 0$ θέτουμε

$$A_t := \bigcap_{n=1}^{\infty} \left\{ \bigcup_{q \in \mathbb{Q} \cap [0, t]} \{B(q) \in C^{(1/n)}\} \right\}.$$

Παρατηρούμε ότι

$$\Omega_0 \cap \{T_C \leq t\} = \Omega_0 \cap A_t.$$

Χρησιμοποιούμε για την αποδειξη αυτής της ισότητας το ότι το C είναι κλειστό και η B συνεχής για $\omega \in \Omega_0$. Άρα

$$\{T_C \leq t\} = \left\{ (\{T_C \leq t\} \cap (\Omega \setminus \Omega_0)) \right\} \cup (\Omega_0 \cap A_t).$$

Τα σύνολα στο δεξί μέλος είναι στοιχεία τής \mathcal{F}_t , και το ζητούμενο δείχθηκε. ■

Παρατήρηση 5.14. Η ιδιότητα αλλαγής κλίμακας είναι πολύ χρήσιμη σε υπολογισμούς. Και τώρα, έχοντας στη διάθεσή μας την προηγούμενη πρόταση, μπορούμε να δούμε ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα. Για $a \neq 0$, αν ορίζουμε $T_a^B := \inf\{t \geq 0 : B(t) = a\}$ τον χρόνο που απαιτείται ώστε η τυπική κίνηση Brown B να πάρει την τιμή a . Τότε ισχύει

$$T_a^B \stackrel{d}{=} a^2 T_1^B. \tag{5.9}$$

Πρακτικά, επειδή η B σε χρόνο t απομακρύνεται από το 0 κατά απόσταση τής τάξης \sqrt{t} , για να φτάσει στο a χρειάζεται χρόνο τάξης a^2 .

Προσοχή, στην (5.9) δεν ισχυριζόμαστε ισότητα. Ας υποθέσουμε ότι $a = 10$. Για μια δεδομένη πραγματοποίηση τής B (δεδομένο ω), γνωρίζοντας τον T_1^B , δεν έχουμε ιδέα πόσο θα είναι ο T_{10}^B , εξαρτάται από τη συμπεριφορά τού μονοπατιού μετά τον χρόνο T_1^B .

Για την απόδειξη τής (5.9): Επειδή για την κίνηση Brown $X^a := B(a^2 \cdot)/a$ έχουμε $B(t) = a \Leftrightarrow X^a(t/a^2) = 1$, έπεται ότι $T_a^B = a^2 T_1^{X^a} \stackrel{d}{=} a^2 T_1^B$.

5.4 Συμπεριφορά στο άπειρο*

Λεπτομέρειες: Για μια σχολαστική απόδειξη, κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις.

(α) Για κάθε $a \in \mathbb{R}$, απεικόνιση $h_a : C[0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$ με $h_a(f) := \inf\{t \geq 0 : f(t) = a\}$ είναι μετρήσιμη. Υποθέτοντας ότι $a > 0$, αυτό έπεται από το ότι για κάθε $t \geq 0$ ισχύει

$$\{f \in C[0, \infty) : h_a(f) \leq t\} = \bigcap_{n=1}^{\infty} \left\{ \bigcup_{q \in \mathbb{Q} \cap [0, t]} \{f : f(q) \geq a - n^{-1}\} \right\}.$$

(β) Υπάρχει $A \in \mathcal{F}$ με πιθανότητα 0 ώστε για κάθε $\omega \in \Omega \setminus A$ η $t \mapsto B(t)(\omega)$ να είναι συνεχής. Θέτουμε τότε

$$\tilde{B}(t)(\omega) = \begin{cases} B(t)(\omega) & \text{αν } \omega \in \Omega \setminus A \text{ και } t \in [0, \infty), \\ 0 & \text{αν } \omega \in A \text{ και } t \in [0, \infty). \end{cases} \quad (5.10)$$

Αντίστοιχα ορίζουμε την \tilde{X}^a ως $\tilde{B}(a^2 \cdot)/a$. Επειδή οι B, \tilde{B} είναι τυχαίες μεταβλητές (ορισμένες στον Ω και με τιμές στον $\mathbb{R}^{[0, \infty)}$) σχεδόν παντού ίσες, έχουμε $T_a^B = T_a^{\tilde{B}}$ σχεδόν παντού. Η $T_a^{\tilde{B}}$ είναι τυχαία μεταβλητή γιατί ισούται με $h_a(\tilde{B})$, δηλαδή είναι σύνθεση μετρήσιμων συναρτήσεων. Επειδή η σ -άλγεβρα \mathcal{F} περιέχει τα \mathbf{P} -μηδενοσύνολα και $T_a^B = T_a^{\tilde{B}}$ σχεδόν παντού, έπεται ότι και η T_a^B είναι τυχαία μεταβλητή και έχει την ίδια κατανομή με την $T_a^{\tilde{B}}$. Έτσι

$$T_a^B \stackrel{d}{=} T_a^{\tilde{B}} = a^2 T_1^{\tilde{X}^a} = a^2 h_1(\tilde{X}^a) \stackrel{d}{=} a^2 h_1(\tilde{B}) = a^2 T_1^{\tilde{B}} \stackrel{d}{=} a^2 T_1^B.$$

Στην τέταρτη ισότητα χρησιμοποιήσαμε το ότι $\tilde{X}^a \stackrel{d}{=} \tilde{B}$ και την εξής ιδιότητα.

(γ) Αν $(\mathcal{S}_1, \mathcal{A}_1), (\mathcal{S}_2, \mathcal{A}_2)$, είναι μετρήσιμοι χώροι, οι X, Y είναι τυχαίες μεταβλητές με τιμές στον \mathcal{S}_1 , οι X, Y έχουν την ίδια κατανομή, και $h : \mathcal{S}_1 \rightarrow \mathcal{S}_2$ είναι μια $\mathcal{A}_1/\mathcal{A}_2$ -μετρήσιμη συνάρτηση, τότε οι $h(X), h(Y)$ έχουν την ίδια κατανομή.

5.3.3 Μετρησιμότητα τής κίνησης Brown στον χώρο γινόμενο

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε στον χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ μια κίνηση Brown τέτοια ώστε η $t \mapsto B(t)(\omega)$ να είναι συνεχής για κάθε $\omega \in \Omega$. Τότε εφαρμόζεται η Άσκηση 4.12 και δίνει ότι ως συνάρτηση δύο μεταβλητών η $(s, \omega) \mapsto B(s)(\omega)$ είναι $\mathcal{B}([0, \infty)) \otimes \mathcal{F}$ -μετρήσιμη. Αυτό είναι χρήσιμο αν θέλουμε να εφαρμόσουμε το θεώρημα Fubini ή κάποιο άλλο από τα συμπεράσματα τού Παραρτήματος Β' 3.

Αν η κίνηση Brown που διαθέτουμε είναι συνεχής με πιθανότητα 1, τότε η \tilde{B} που ορίζεται στην (5.10) είναι κίνηση Brown και σε αυτήν εφαρμόζεται η συζήτηση τής προηγούμενης παραγράφου. Για παράδειγμα, ο ακριβής τρόπος ώστε να γίνει ο υπολογισμός (5.7) είναι να γράψουμε

$$\mathbf{E} \left(\int_0^1 e^{B(s)} ds \right) = \mathbf{E} \left(\int_0^1 e^{\tilde{B}(s)} ds \right) = \int_0^1 \mathbf{E}(e^{\tilde{B}(s)}) ds = \dots \quad (5.11)$$

Για την πρώτη ισότητα, παρατηρούμε ότι οι $\int_0^1 e^{B(s)} ds, \int_0^1 e^{\tilde{B}(s)} ds$ είναι τυχαίες μεταβλητές ως όριο αθροισμάτων Riemann (τα οποία είναι τυχαίες μεταβλητές) και ισούνται στο $\Omega \setminus A$.

5.4 Συμπεριφορά στο άπειρο*

Η κίνηση Brown παίρνει θετικές και αρνητικές τιμές για οσοδήποτε μεγάλους χρόνους. Μάλιστα ισχύει ότι $\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} B_t = \infty, \underline{\lim}_{t \rightarrow \infty} B_t = -\infty$. Εμείς θα αποδείξουμε κάτι ισχυρότερο.

Πρόταση 5.15. Για την τυπική κίνηση Brown B , με πιθανότητα 1 ισχύει

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} \frac{B(t)}{\sqrt{t}} = \infty, \quad \underline{\lim}_{t \rightarrow \infty} \frac{B(t)}{\sqrt{t}} = -\infty. \quad (5.12)$$

Απόδειξη. Θα δείξουμε ότι με πιθανότητα 1 ισχύει

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{B(n)}{\sqrt{n}} = \infty.$$

5.5 Επισκέψεις στο 0

Θέτουμε $X_k := B(k) - B(k-1)$ για κάθε $k \in \mathbb{N}^+$. Οι τυχαίες μεταβλητές $(X_k)_{k \geq 1}$ είναι ανεξάρτητες και ισόνομες. Για $C > 0$ σταθερό και κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ θέτουμε $A_n(C) := \{B(n) \geq C\sqrt{n}\}$. Τότε

$$A(C) := \left\{ \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{B(n)}{\sqrt{n}} \geq C \right\} \supset \limsup_{n \geq 1} A_n(C)$$

και

$$\mathbf{P}(\limsup_{n \geq 1} A_n(C)) \geq \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}(A_n(C)) = \mathbf{P}(B(1) \geq C) > 0.$$

Η πρώτη ανισότητα είναι γνωστή ιδιότητα των μέτρων πιθανότητας και η ισότητα έπεται από την ιδιότητα αλλαγής κλίμακας τής κίνησης Brown. Άρα το σύνολο $A(C)$ έχει θετική πιθανότητα. Από την άλλη, ανήκει στην τελική σ-άλγεβρα των $(X_k)_{k \geq 1}$. Από τον νόμο 0-1 του Kolmogorov, έπεται ότι το $A(C)$ έχει πιθανότητα 1. Άρα και το

$$\left\{ \overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \frac{B(n)}{\sqrt{n}} = \infty \right\} = \bigcap_{k=1}^{\infty} A(k)$$

έχει πιθανότητα 1.

Για το δεύτερο όριο, παρατηρούμε ότι η $-B$ είναι επίσης τυπική κίνηση Brown, άρα από το πρώτο όριο έχουμε με πιθανότητα 1 ότι $\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} (-B(t))/\sqrt{t} = \infty$ που σημαίνει ότι $\underline{\lim}_{t \rightarrow \infty} (B(t))/\sqrt{t} = -\infty$. Σε ένα σύνολο με πιθανότητα 1 τα δύο όρια έχουν τις τιμές ∞ και $-\infty$ αντίστοιχα. ■

Καλύτερη εικόνα για τη συμπεριφορά τής κίνησης Brown στο άπειρο δίνει ο νόμος τού επαναλαμβανόμενου λογαρίθμου [Θεώρημα 8.8.1 στο Durrett (2010)], που λέει ότι

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} \frac{B(t)}{\sqrt{2t \log \log t}} = 1, \quad \underline{\lim}_{t \rightarrow \infty} \frac{B(t)}{\sqrt{2t \log \log t}} = -1. \quad (5.13)$$

Μάλιστα, τα σημεία συσσώρευσης τού δικτύου

$$\left(\frac{B(t)}{\sqrt{2t \log \log t}} \right)_{t > 0}$$

(για $t \rightarrow \infty$) είναι ολόκληρο το διάστημα $[-1, 1]$.

5.5 Επισκέψεις στο 0

Όπως θα φανεί στο Κεφάλαιο 8, η κίνηση Brown έχει αρκετά ακανόνιστο γράφημα. Για παράδειγμα, το μήκος τού περιορισμού τού γραφήματος σε οποιοδήποτε διάστημα είναι άπειρο ενώ η ίδια η κίνηση, ως συνάρτηση τού χρόνου, δεν είναι διαφορίσιμη πουθενά. Σε αυτή την παράγραφο θα δούμε ότι μόλις ξεκινάει από το μηδέν, αμέσως παίρνει και θετικές και αρνητικές τιμές. Δηλαδή δεν είναι δυνατόν να υπάρχει διάστημα $(0, \varepsilon)$ όπου η κίνηση να διατηρεί πρόσημο.

Θεωρούμε τους χρόνους

$$T^- := \inf\{t > 0 : B(t) < 0\},$$

$$T^+ := \inf\{t > 0 : B(t) > 0\}.$$

Πρόταση 5.16. Έστω B τυπική κίνηση Brown. Τότε με πιθανότητα 1, ισχύει

$$T^- = T^+ = 0.$$

Απόδειξη. Ορίζουμε την ανέλιξη X όπως στην (5.2) και στην τυπική κίνηση Brown X εφαρμόζουμε την Πρόταση 5.15. Παίρνουμε έτσι ότι με πιθανότητα 1, η X παίρνει για αυθαίρετα μεγάλες τιμές του χρόνου t και θετικές και αρνητικές τιμές. Αυτό λέει ότι με πιθανότητα 1 η B παίρνει και θετικές και αρνητικές τιμές για αυθαίρετα μικρές τιμές του χρόνου. ■

Έπεται από την προηγούμενη πρόταση και τη συνέχεια τής κίνησης Brown ότι με πιθανότητα 1,

$$\inf\{t > 0 : B(t) = 0\} = 0.$$

Επομένως, υπάρχει ακολουθία μηδενικών τής B που τείνουν στο 0.

Θα αποδείξουμε τώρα ότι το σύνολο

$$Z := \{t \in [0, \infty) : B(t) = 0\}$$

έχει Lebesgue μέτρο 0. Με πιθανότητα 1, η B είναι συνεχής, επομένως το Z είναι σύνολο Borel ως κλειστό και το μέτρο Lebesgue του, $\lambda(Z)$, ορίζεται. Για λόγους μετρησιμότητας, θα αξιοποιήσουμε την κίνηση Brown \tilde{B} της (5.10). Ορίζουμε $\tilde{Z} := \{t \in [0, \infty) : \tilde{B}(t) = 0\}$. Με πιθανότητα 1, ισχύει $\lambda(Z) = \lambda(\tilde{Z})$.

Το μέτρο του \tilde{Z} γράφεται

$$\lambda(\tilde{Z}) = \int_0^\infty \mathbf{1}_{\tilde{B}(s)=0} ds.$$

Η συνάρτηση $(s, \omega) \mapsto \mathbf{1}_{\tilde{B}(s)=0}$ είναι μετρήσιμη, επομένως και η $\lambda(\tilde{Z})$ είναι μετρήσιμη (Πρόταση Β'.10).

Πρόταση 5.17. *Με πιθανότητα 1 ισχύει $\lambda(Z) = 0$.*

Απόδειξη. Αρκεί να δειχθεί για το \tilde{Z} . Χρησιμοποιώντας το θεώρημα Tonelli, υπολογίζουμε

$$\mathbf{E}\{\lambda(\tilde{Z})\} = \mathbf{E}\left(\int_0^\infty \mathbf{1}_{\tilde{B}(s)=0} ds\right) = \int_0^\infty \mathbf{E}(\mathbf{1}_{\tilde{B}(s)=0}) ds = \int_0^\infty \mathbf{P}(\tilde{B}(s) = 0) ds = 0,$$

αφού η $\tilde{B}(s)$ είναι συνεχής τυχαία μεταβλητή [έχει κατανομή $N(0, s)$]. Το συμπέρασμα έπεται. ■

Η τελευταία πρόταση λέει ότι κατά μια έννοια το σύνολο Z είναι μικρό. Από την άλλη, θα δείξουμε στην Πρόταση 6.6 ότι είναι ένα τέλειο σύνολο (είναι κλειστό και κάθε σημείο του είναι σημείο συσσώρευσης του), επομένως υπεραριθμήσιμο. Επίσης μπορεί να δειχθεί ότι έχει διάσταση Hausdorff 1/2.

Παρατήρηση 5.18 (Ιδιότητες με πιθανότητα 1 για ανέλιξεις). Είναι βολικό, όταν μια ιδιότητα A ισχύει με πιθανότητα 1 να γράφουμε «με πιθανότητα 1 ισχύει το A » αντί να γράφουμε « $\mathbf{P}(A) = 1$ » (ας υποθέσουμε για αυτή τη συζήτηση ότι το A είναι μετρήσιμο σύνολο). Αυτό κάναμε για παράδειγμα στη διατύπωση των προτάσεων αυτής και της προηγούμενης παραγράφου. Όταν όμως γράφουμε κάτι τέτοιο για το μονοπάτι μιας ανέλιξης, χρειάζεται να προσέχουμε πού γράφουμε το «με πιθανότητα 1». Για παράδειγμα, οι φράσεις

- Με πιθανότητα 1, για κάθε $t \geq 0$ η B δεν είναι διαφορίσιμη στο t .
- Για κάθε $t \geq 0$, με πιθανότητα 1 η B δεν είναι διαφορίσιμη στο t .

σημαίνουν κάτι διαφορετικό. Και, αν τις γράφαμε τυπικά, αυτό θα ήταν σαφές, γιατί γράφονται

- $\mathbf{P}(\text{για κάθε } t \geq 0 \text{ η } B \text{ δεν είναι διαφορίσιμη στο } t) = 1$.

- Για κάθε $t \geq 0$, $\mathbf{P}(\eta B \text{ δεν είναι διαφορίσιμη στο } t) = 1$.

Η πρώτη συνεπάγεται τη δεύτερη, και θα δούμε ότι η πρώτη είναι αληθής (Θεώρημα 8.4). Φυσιο-λογικά, η απόδειξη της είναι πιο δύσκολη από αυτήν της δεύτερης (Άσκηση 5.10).

Ας δούμε όμως δύο άλλες, αντίστοιχες φράσεις.

- Με πιθανότητα 1, για κάθε $t \geq 0$ η B δεν έχει τοπικό μέγιστο στο t .
- Για κάθε $t \geq 0$, με πιθανότητα 1 η B δεν έχει τοπικό μέγιστο στο t .

Η δεύτερη είναι σωστή (Άσκηση 5.9) ενώ η πρώτη είναι λάθος. Γιατί κάθε μονοπάτι (πραγματοποίηση) της B είναι μια συνεχής και μη μονότονη συνάρτηση (Άσκηση 8.1), άρα θα έχει σημεία τοπικού μεγίστου.

Η τυπική περιγραφή τού φαινομένου αυτού είναι ως εξής. Έστω A_t ένα γεγονός που αφορά την συμπεριφορά της κίνησης Brown στο σημείο $t \geq 0$. Τότε

$$\mathbf{P}(\cap_{t \geq 0} A_t) = 1 \text{ συνεπάγεται ότι για κάθε } r \geq 0 \text{ ισχύει } \mathbf{P}(A_r) = 1. \quad (5.14)$$

Αυτό ισχύει γιατί για οποιοδήποτε $r \geq 0$ έχουμε $\cap_{t \geq 0} A_t \subset A_r$, το αντίστροφο όμως της (5.14) δεν προκύπτει τυπικά γιατί η $\cap_{t \geq 0} A_t$ είναι *υπεραριθμησίμη* τομή συνόλων με πιθανότητα 1, και η ίδια δεν είναι απαραίτητο να έχει πιθανότητα 1.

5.6 Πολυδιάστατη κίνηση Brown

Ορισμός 5.19. (α) Έστω $d \geq 1$ φυσικός αριθμός. Ονομάζουμε *d -διάστατη τυπική κίνηση Brown* κάθε ανέλιξη της μορφής

$$B(t) = \begin{pmatrix} B^{(1)}(t) \\ B^{(2)}(t) \\ \vdots \\ B^{(d)}(t) \end{pmatrix}, \quad t \in [0, \infty),$$

όπου οι $B^{(1)}, B^{(2)}, \dots, B^{(d)}$ είναι ανεξάρτητες μονοδιάστατες τυπικές κινήσεις Brown.

(β) Έστω $d \geq 1$ φυσικός αριθμός. Ονομάζουμε *d -διάστατη κίνηση Brown* οποιαδήποτε ανέλιξη $(B(t))_{t \geq 0}$ μπορεί να γραφεί ως

$$B(t) = X + W(t)$$

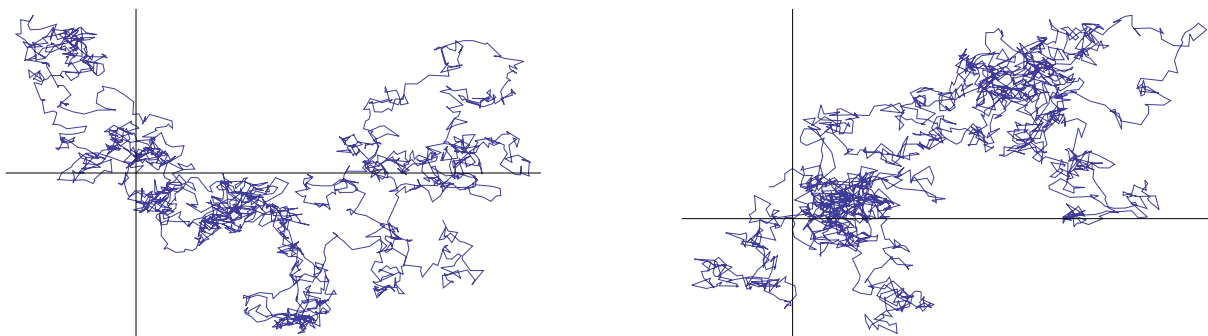
όπου X είναι μια τυχαία μεταβλητή με τιμές στον \mathbb{R}^d , W είναι μια d -διάστατη τυπική κίνηση Brown, και οι X, W είναι ανεξάρτητες.

Στην περίπτωση (α), για κάθε $t \geq 0$, οι συντεταγμένες τού διανύσματος $B(t)$ είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές. Στην περίπτωση (β) αυτό δεν ισχύει απαραίτητα γιατί ενδέχεται να υπάρχει κάποια εξάρτηση λόγω της X . Αν οι συντεταγμένες της X είναι ανεξάρτητες (π.χ., αν η X είναι σταθερή), τότε και μόνο τότε οι συντεταγμένες της W θα είναι ανεξάρτητες κινήσεις Brown.

Η d -διάστατη κίνηση Brown περιγράφει την κίνηση ενός σωματιδίου στον \mathbb{R}^d . Σε κάθε συντεταγμένη η κίνηση τού σωματιδίου είναι μια μονοδιάστατη κίνηση Brown, και υπο προϋποθέσεις που αναφέραμε, οι κινήσεις Brown που αντιστοιχούν στις d συντεταγμένες είναι ανεξάρτητες. Η κίνηση που απασχόλησε τους Brown και Einstein ήταν η τριδιάστατη κίνηση Brown.

Για την πολυδιάστατη κίνηση Brown ισχύουν τα ανάλογα των Προτάσεων 5.6 και 5.7. Για την Πρόταση 5.7 η διήθηση που θεωρούμε είναι η $\mathcal{F}_t^0 := \sigma(\{B(s) : s \in [0, t]\})$ για κάθε $t \in [0, \infty)$.

5.7 Ο χώρος $C_S([0, \infty))$



Σχήμα 5.3: Δύο πραγματοποιήσεις της τυπικής διδιάστατης κίνησης Brown για το χρονικό διάστημα $[0, 1]$. Ζωγραφίζουμε την εικόνα της B στο διάστημα $[0, 1]$ και όχι το γράφημα της.

5.7 Ο χώρος $C_S([0, \infty))$

Έστω \mathcal{S} μετρικός χώρος. Με $C_S([0, \infty))$ συμβολίζουμε το σύνολο των συνεχών συναρτήσεων $f : [0, \infty) \rightarrow \mathcal{S}$. Όταν $\mathcal{S} = \mathbb{R}$, γράφουμε απλώς $C[0, \infty)$.

Μετρική στον $C_S([0, \infty))$. Μια δημοφιλής μετρική στον $Y := C_S([0, \infty))$ είναι η ρ που ορίζεται από τη σχέση

$$\rho(f, g) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n} (\{ \sup_{t \in [0, n]} d(f(t), g(t)) \} \wedge 1) \quad (5.15)$$

για κάθε $f, g \in Y$. Με d συμβολίζουμε τη μετρική στον \mathcal{S} . Μια ακολουθία συναρτήσεων $(f_n)_{n \geq 1}$ συγκλίνει ως προς τη μετρική ρ σε μια συνάρτηση f αν και μόνο αν συγκλίνει ομοιόμορφα στην f σε κάθε συμπαγές υποσύνολο του $[0, \infty)$.

Σ-άλγεβρα στον $C_S([0, \infty))$. Δύο σ-άλγεβρες που μπορεί να θεωρήσει κανείς στον Y είναι οι εξής: (α) $\mathcal{A}_1 := \{A \cap Y : A \in \otimes_{t \in [0, \infty)} \mathcal{B}(\mathcal{S})\}$. Δηλαδή θεωρούμε τον Y ως υποσύνολο τού χώρου γινόμενο $\mathcal{S}^{[0, \infty)}$, ο οποίος είναι εφοδιασμένος με τη σ-άλγεβρα γινόμενο (αυτήν που παράγεται από τα μετρήσιμα ορθογώνια) και αυτή η σ-άλγεβρα ορίζει φυσιολογικά τη σ-άλγεβρα \mathcal{A}_1 στον Y .

(β) $\mathcal{A}_2 := \mathcal{B}(Y)$. Η Borel σ-άλγεβρα στον Y . Εδώ θεωρούμε τον Y ως μετρικό χώρο με μετρική τη ρ που ορίσαμε πιο πάνω και η \mathcal{A}_2 παράγεται από τα ανοιχτά σύνολα ως προς τη ρ .

Ισχύει το εξής αποτέλεσμα, το οποίο αποδεικνύουμε στο Παράρτημα Δ'.

Πρόταση 5.20. *Αν ο \mathcal{S} είναι διαχωρίσιμος, τότε $\mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_2$.*

Το να θεωρούμε τον $C_S([0, \infty))$ με τη σ-άλγεβρα των Borel υποσυνόλων του, την \mathcal{A}_2 , είναι βολικό για τη θεωρία της σύγκλισης κατά κατανομή, στην οποία θα αναφερθούμε στην επόμενη παράγραφο.

5.8 Η κίνηση Brown ως φυσιολογικό αντικείμενο

Η κίνηση Brown είναι το συνεχές ανάλογο τού συμμετρικού απλού τυχαίου περιπάτου στο \mathbb{Z} (Παράγραφος 3.1). Οι δύο αυτές ανεξίτητες συνδέονται με πολλούς τρόπους και εδώ θα περιγράψουμε έναν από αυτούς, ίσως τον πιο απλό.

Έστω $(S_n)_{n \geq 0}$ ο συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος στο \mathbb{Z} . Αν τον θεωρήσουμε ως τυχαία συνάρτηση, το γράφημά της είναι το διακριτό σύνολο σημείων $\{(k, S_k) : k \in \mathbb{N}\}$. Ενώνοντας διαδοχικά

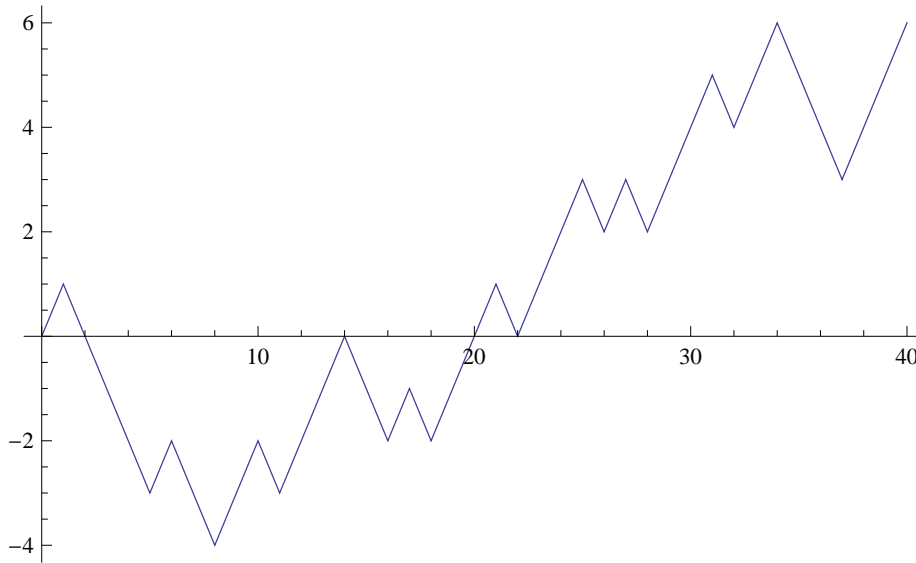
σημεία με ευθύγραμμα τμήματα, φτιάχνουμε μια συνεχή συνάρτηση $S : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$. Δηλαδή,

$$S(x) := \begin{cases} S_x & \text{αν } x \in \mathbb{N}, \\ \text{γραμμική επέκταση} & \text{σε κάθε διάστημα } [k, k+1] \text{ με } k \in \mathbb{N}. \end{cases} \quad (5.16)$$

Τυπικά, η S ισούται με

$$S(x) = \{1 - (x - [x])\}S_{[x]} + (x - [x])S_{[x]+1} = S_{[x]} + (x - [x])(S_{[x]+1} - S_{[x]})$$

για κάθε $x \in [0, \infty)$.



Σχήμα 5.4: Το γράφημα της συνάρτησης S στο διάστημα $[0, 40]$ για μια πραγματοποίηση τού τυχαίου περιπάτου.

Για $n \in \mathbb{N}^+$ θεωρούμε τη συνάρτηση $S_n^* : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$S_n^*(t) = \frac{S(nt)}{\sqrt{n}} \quad (5.17)$$

για κάθε $t \in [0, \infty)$. Με άλλα λόγια, το γράφημα της S_n^* προκύπτει αν πάρουμε το γράφημα της S και συρρικνώσουμε τον μεν οριζόντιο άξονα κατά $1/n$ τον δε κάθετο κατά $1/\sqrt{n}$.

Αυτό που ισχύει είναι ότι:

Για μεγάλο n , η ανέλιξη S_n^* προσεγγίζει την κίνηση Brown.

Δηλαδή, αν θέλει να δει κανείς μια πραγματοποίηση της κίνησης Brown, αρκεί να πάρει μεγάλο n και να κάνει μια πραγματοποίηση της S_n^* . Αυτή η ασαφής πρόταση είναι μια απλουστευμένη διατύπωση ενός θεωρήματος το οποίο θα διατυπώσουμε τώρα.

Θεωρούμε έναν χώρο πιθανότητας $(\tilde{\Omega}, \tilde{\mathcal{F}}, \tilde{\mathbf{P}})$ στον οποίο συμβολίζουμε τη μέση τιμή με $\tilde{\mathbf{E}}$ και στον οποίο είναι ορισμένη μια τυπική κίνηση Brown B .

Έπειτα θεωρούμε $(X_n)_{n \geq 1}$ ακολουθία ανεξάρτητων ισόνομων τυχαίων μεταβλητών με $\mathbf{E}(X_1) = 0$, $\text{Var}(X_1) = 1$. Θέτουμε $S_0 = 0$, $S_n := X_1 + \dots + X_n$ για κάθε $n \geq 1$ και ορίζουμε τις συναρτήσεις S και S_n^* όπως στις (5.16), (5.17).

Από τη συζήτηση πριν τον Ορισμό 4.2 προκύπτει ότι καθεμία από τις S_n^* όπως και η B είναι τυχαίες μεταβλητές με τιμές στον $C[0, \infty)$. Θέλουμε να μιλήσουμε για σύγκλιση κατά κατανομή

σε αυτόν τον χώρο. Η θεωρία τής σύγκλισης κατά κατανομή σε έναν χώρο ζητάει αυτός να έχει μια τοπολογία, εμείς για απλότητα ζητάμε να είναι μετρικός (δες Παράρτημα Α΄.2), και σε αυτόν τον χώρο θεωρεί ως σ -άλγεβρα τα Borel υποσύνολά του. Στον $C[0, \infty)$ θεωρούμε μετρική τη ρ της Παραγράφου 5.7.

Θεώρημα 5.21 (Donsker). Η ακολουθία $(S_n^*)_{n \geq 1}$ συγκλίνει κατά κατανομή στη B .

Αν θυμηθούμε τον ορισμό τής σύγκλισης κατά κατανομή, αυτό σημαίνει ότι για κάθε συνάρτηση $f : C[0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχή και φραγμένη ισχύει ότι

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}f(S_n^*) = \tilde{\mathbf{E}}f(B).$$

Την απόδειξη τού θεωρήματος μπορεί να βρεί κανείς σε βιβλία που μελετούν την κίνηση Brown, για παράδειγμα, στο Karatzas and Shreve (1991), Θεώρημα 4.20 του Κεφαλαίου 2.

Το θεώρημα συνεχούς απεικόνισης (Θεώρημα Α΄.9) συνεπάγεται ότι αν έχουμε $G : C[0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με $\mathbf{P}(B \in \{\text{σημεία ασυνέχειας τής } G\}) = 0$, τότε

$$G(S_n^*) \Rightarrow G(B). \quad (5.18)$$

Παράδειγμα 5.22. (α) Η $G_1 : C[0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με $G_1(f) = f(1)$ είναι συνεχής (άσκηση), άρα $G_1(S_n^*) = S_n/\sqrt{n} \Rightarrow B(1)$, το οποίο είναι το κεντρικό οριακό θεώρημα.

(β) Η $G_2 : C[0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με $G_2(f) = \max_{t \in [0,1]} f(t)$ είναι συνεχής (άσκηση), έτσι παίρνουμε ότι

$$\frac{1}{\sqrt{n}} \max_{1 \leq k \leq n} S_k \Rightarrow \max_{t \in [0,1]} B(t)$$

για $n \rightarrow \infty$. Στο επόμενο κεφάλαιο (Πόρισμα 6.4) υπολογίζουμε την κατανομή τής οριακής τυχαίας μεταβλητής (είναι η ίδια με αυτήν της $|B(1)|$) έτσι έχουμε μια προσέγγιση για την κατανομή τής $\max_{1 \leq k \leq n} S_k$, η οποία κατανομή γενικά δεν μπορεί να υπολογιστεί μέσω κάποιου εύχρηστου τύπου.

Ασκήσεις

Στις ασκήσεις πιο κάτω, B είναι μια τυπική κίνηση Brown.

5.1 Θεωρούμε τη συνάρτηση $f : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με $f(t) = \mathbf{P}(B(t) > t)$ για κάθε $t > 0$.

(α) Να δειχθεί ότι η f είναι φθίνουσα.

(β) Ποια είναι η παράγωγός της;

5.2 Για $s, t \geq 0$ να δειχθεί ότι $\text{Cov}(B^2(t), B^2(s)) = \text{Var}(B^2(s \wedge t)) = 2(s \wedge t)^2$.

5.3 Έστω $n \in \mathbb{N}^+$, χρόνοι $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n$, και σταθερές $a_1, a_2, \dots, a_n \in \mathbb{R}$. Να δειχθεί ότι η τυχαία μεταβλητή

$$a_1 B(t_1) + \dots + a_n B(t_n)$$

ακολουθεί την κανονική κατανομή. Ποια είναι η μέση τιμή και διασπορά της;

5.4* Έστω $0 \leq r < s < t$. Να δειχθεί ότι η $B(s) - B(r) \mid (B(r), B(t))$ ακολουθεί την κατανομή $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ με

$$\mu := \frac{s-r}{t-r}(y-x), \quad \sigma^2 = \frac{s-r}{t-r}(t-s),$$

και $x = B(r), y = B(t)$.

Αυτή η ιδιότητα μάς επιτρέπει να προσομοιώνουμε ακριβώς οποιοδήποτε πεπερασμένο πλήθος σημείων στο μονοπάτι τής κίνησης Brown. Για παράδειγμα, θέτουμε $B(0) = 0$ και ξέρουμε ότι η $B(1) \sim \mathcal{N}(0, 1)$, άρα προσομοιώνουμε την τιμή τής ακριβώς. Έπειτα προσομοιώνουμε τη $B(1/2)$ με χρήση τής άσκησης και μπορούμε να συνεχίσουμε προσομοιώνοντας τις τιμές $B(1/4), B(3/4)$.

5.8 Η κίνηση Brown ως φυσιολογικό αντικείμενο

5.5 Έστω $t > 0$. Να δειχθεί ότι η $X = \int_0^t B(s) ds$ ακολουθεί την κατανομή $N(0, t^3/3)$.

5.6 Για $t > 0$ να υπολογιστεί η μέση τιμή και η διασπορά της τυχαίας μεταβλητής $Y = \int_0^t B^2(s) ds$.

5.7 Έστω $a > 0$. Να δειχθεί ότι η ανέλιξη X με $X(t) := B(a-t) - B(a)$ για κάθε $t \in [0, a]$ είναι κίνηση Brown στο $[0, a]$.

5.8 Έστω $Z := \{s > 0 : B(s) = 0\}$ το σύνολο των μηδενικών της B . Να δειχθεί ότι για κάθε $a > 0$ ισχύει $Z \stackrel{d}{=} a^2 Z$ και άρα η $\mathbf{E}\{\lambda(Z)\} \in \{0, \infty\}$, όπου $\lambda(Z)$ είναι το μέτρο Lebesgue του συνόλου Z .

5.9 Έστω $t_0 \geq 0$. Να δειχθεί ότι με πιθανότητα 1 η κίνηση Brown δεν έχει τοπικό ακρότατο (μέγιστο ή ελάχιστο) στο t_0 .

5.10* Έστω $t_0 \geq 0$. Να δειχθεί ότι με πιθανότητα 1 η κίνηση Brown δεν είναι διαφορίσιμη στο t_0 .

5.11 Έστω $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχής και φραγμένη συνάρτηση. Να δειχθεί ότι η συνάρτηση $F : C[0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με $F(f) = g(f(1))$ είναι συνεχής και φραγμένη.

5.12 Έστω $(S_n)_{n \geq 0}$ ο συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος. Να δειχθεί ότι η ακολουθία $(I_n)_{n \geq 1}$ με

$$I_n := \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n S_k^2$$

συγκλίνει κατά κατανομή στην τυχαία μεταβλητή $\int_0^1 B(t)^2 dt$.

5.13 Έστω $\{B(t)\}_{t \geq 0}, \{W(t)\}_{t \geq 0}$ δυο ανεξάρτητες τυπικές κινήσεις Brown και $\varrho \in [-1, 1]$. Θέτουμε

$$X_t := \varrho B(t) + \sqrt{1 - \varrho^2} W(t)$$

για κάθε $t \in [0, \infty)$. Να δειχθεί ότι η X είναι τυπική κίνηση Brown.

6

Η ισχυρή ιδιότητα Markov και συνέπειες*

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε ότι η κίνηση Brown σε κάθε διάσταση έχει την ισχυρή ιδιότητα Markov. Δηλαδή, για κάθε χρόνο διακοπής T , το μονοπάτι της κίνησης μετά τον χρόνο T επηρεάζεται από το παρελθόν $\{B(s) : s \in [0, T]\}$ μόνο μέσω της τιμής $B(T)$. Η ιδιότητα αυτή φανερώνει πολλά ποιοτικά χαρακτηριστικά του μονοπατιού της κίνησης αλλά και διευκολύνει τον υπολογισμό ποσοτήτων σχετικών με αυτήν.

6.1 Η ισχυρή ιδιότητα Markov

Έστω $d \in \mathbb{N}^+$ και B μια d -διάστατη κίνηση Brown σε χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$. Εντελώς ανάλογα όπως στην Παράγραφο 5.3, ορίζουμε την πλήρωση του χώρου και την επαυξημένη διήθηση και δείχνουμε ότι ισχύουν τα ανάλογα των Προτάσεων 5.7, 5.12. Θα έχουμε λοιπόν ότι, για κάθε σταθερό χρόνο $t_0 \geq 0$, η ανέλιξη $(B(t_0 + t) - B(t_0))_{t \geq 0}$ είναι τυπική κίνηση Brown ανεξάρτητη από την \mathcal{F}_{t_0} , την οποία κατανοούμε ως την «πληροφορία» μέχρι τον χρόνο t_0 . Σε αυτή την παράγραφο θα δούμε ότι το ίδιο ισχύει αν, αντί του σταθερού χρόνου t_0 , έχουμε οποιονδήποτε χρόνο διακοπής T που παίρνει πεπερασμένες τιμές. Έστω λοιπόν T χρόνος διακοπής ως προς την επαυξημένη διήθηση. Υπενθυμίζουμε (δες Παράγραφο 4.4) ότι η σ -άλγεβρα που κωδικοποιεί τη διαθέσιμη πληροφορία ως τον τυχαίο χρόνο T είναι η

$$\mathcal{F}_T := \{A \in \mathcal{F} : A \cap \{T \leq t\} \in \mathcal{F}_t \text{ για κάθε } t \geq 0\}. \quad (6.1)$$

Το κύριο αποτέλεσμα αυτού του κεφαλαίου είναι το ακόλουθο θεώρημα, του οποίου η απόδειξη δίνεται στο Παράρτημα Γ'.

Θεώρημα 6.1. Έστω B μια d -διάστατη κίνηση Brown και T χρόνος διακοπής ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ που με πιθανότητα 1 παίρνει πεπερασμένες τιμές. Τότε η ανέλιξη $(B(T + t) - B(T))_{t \geq 0}$ είναι τυπική κίνηση Brown ανεξάρτητη από τη σ -άλγεβρα \mathcal{F}_T .

Συνέπεια του θεωρήματος αυτού είναι η ισχυρή ιδιότητα Markov, η οποία λέει ότι η κατανομή της $\{B(t) : t \geq T\}$ με δεδομένο το παρελθόν \mathcal{F}_T είναι η ίδια με την κατανομή της αν δεδομένη είναι μόνο η τιμή $B(T)$. Αυτό γιατί

$$B(t) = B(T) + B(t) - B(T),$$

και άρα η $\{B(t) : t \geq T\}$ καθορίζεται από την τιμή $B(T)$ και την ανέλιξη $\{B(t) - B(T) : t \geq T\}$, που είναι ανεξάρτητη από το παρελθόν \mathcal{F}_T .

Στο υπόλοιπο αυτού του κεφαλαίου, B θα συμβολίζει μια μονοδιάστατη κίνηση Brown, και όταν αναφερόμαστε σε χρόνο διακοπής θα εννοούμε ως προς την επαυξημένη διήθηση.

Χρόνοι για τους οποίους μπορούμε να εφαρμόσουμε το προηγούμενο θεώρημα είναι οι εξής:

$$T_1 := \inf\{t \geq 0 : B(t) = 2\}, \quad (6.2)$$

$$T_2 := \inf\{t \geq 0 : B(t) \in \{-2, 3\}\}, \quad (6.3)$$

$$T_3 := \inf\{t \geq 1 : B(t) = \max_{s \in [0,1]} B(s)\}. \quad (6.4)$$

6.2 Αρχή τής ανάκλασης

Για τους T_1, T_2 αυτό δικαιολογείται από την Πρόταση 5.13, η περίπτωση τού T_3 αφήνεται ως άσκηση.

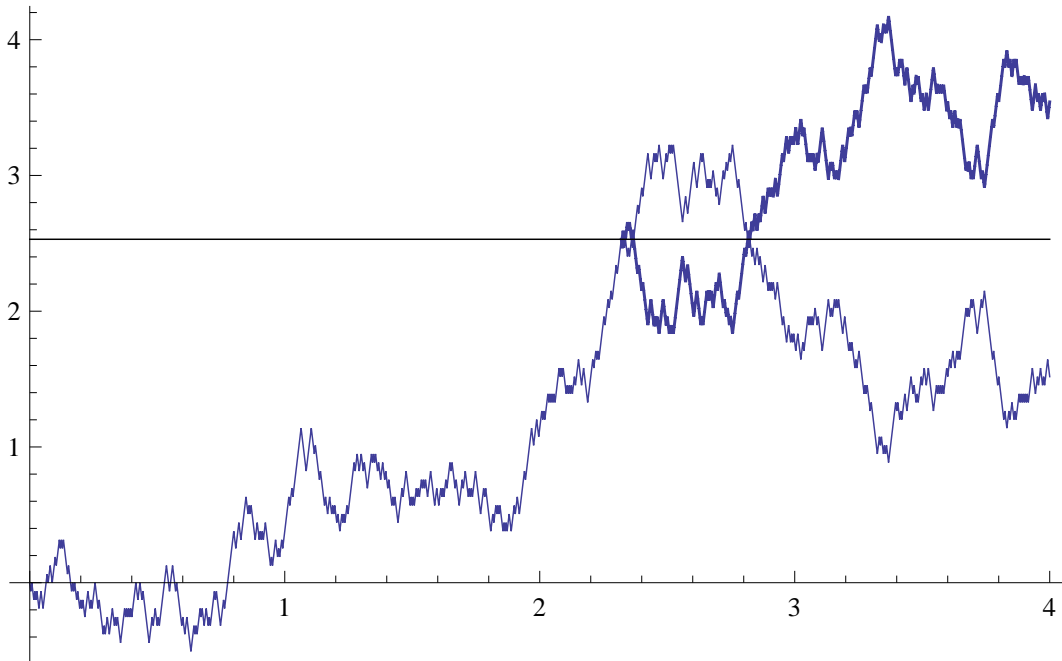
Παράδειγμα 6.2. Έστω ότι $B(0) = 0$. Θα δείξουμε ότι ο χρόνος

$$T := \max\{t \in [0, 1] : B(t) = 0\}$$

δεν είναι χρόνος διακοπής, το οποίο διαισθητικά είναι προφανές. Κατ' αρχάς παρατηρούμε ότι με πιθανότητα 1 ισχύει $B(1) \neq 0$, και επειδή $B(0) = 0$, έπεται ότι $T \in [0, 1)$ με πιθανότητα 1. Από τον ορισμό τού T έχουμε ότι η ανελίξη $\{B(T+t) - B(T) : t \geq 0\}$ μένει διαφορετική από το 0 στο διάστημα $(0, 1 - T)$, άρα εξαιτίας τής Πρότασης 5.16 δεν μπορεί να είναι τυπική κίνηση Brown. Το πιο πάνω θεώρημα συνεπάγεται ότι ο T δεν είναι χρόνος διακοπής.

6.2 Η αρχή τής ανάκλασης

Από τις πολλές εφαρμογές τής ισχυρής ιδιότητας Markov απομονώνουμε σε αυτή την παράγραφο την αρχή τής ανάκλασης. Σύμφωνα με αυτήν, αν από έναν χρόνο διακοπής T και μετά αντικαταστήσουμε το μονοπάτι τής κίνησης Brown με την ανάκλαση του ως προς την ευθεία $y = B(T)$, το μονοπάτι που προκύπτει είναι και αυτό κίνηση Brown.



Σχήμα 6.1: Τα γραφήματα των B και \hat{B} τής Πρότασης 6.3 στην περίπτωση που $T = T_a$. Με παχύτερη γραμμή απεικονίζεται το γράφημα τής \hat{B} μετά τον χρόνο που ξεκινάει η ανάκλαση. Στο συγκεκριμένο σχήμα $a = 2.53$ και $T_a \approx 2.32$

Πρόταση 6.3 (Αρχή τής ανάκλασης). Έστω B τυπική μονοδιάστατη κίνηση Brown και T χρόνος διακοπής ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$, πεπερασμένος με πιθανότητα 1. Τότε η ανελίξη $(\hat{B}(t) : t \geq 0)$ με

$$\hat{B}(t) = \begin{cases} B(t) & \text{αν } t \leq T, \\ B(T) - (B(t) - B(T)) & \text{αν } t > T \end{cases}$$

είναι τυπική κίνηση Brown.

Στο Σχήμα 6.1 φαίνεται πώς προκύπτει η \hat{B} από τη B .

6.2 Αρχή τής ανάκλασης

Απόδειξη. Έστω $B^{(1)}$ ο περιορισμός τής B στο $[0, T]$, και $B^{(2)} : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με $B^{(2)}(t) = B(T + t) - B(T)$ για κάθε $t \geq 0$. Οι δύο συναρτήσεις εξαρτώνται επίσης από το $\omega \in \Omega$ αλλά το παραλείπουμε, τις βλέπουμε ως τυχαίες συναρτήσεις. Το Θεώρημα 6.1 δίνει ότι η $B^{(2)}$ είναι ανεξάρτητη από τα $B^{(1)}, T$ και είναι μια τυπική κίνηση Brown. Άρα $B^{(2)} \stackrel{d}{=} -B^{(2)}$ και συνδυάζοντας αυτό με την ανεξαρτησία έχουμε

$$(B^{(1)}, B^{(2)}) \stackrel{d}{=} (B^{(1)}, -B^{(2)}). \quad (6.5)$$

Το συμπέρασμα έπεται γιατί η B είναι το αποτέλεσμα τής συγκόλλησης των γραφημάτων των $B^{(1)}, B^{(2)}$, ενώ η \hat{B} είναι το αποτέλεσμα τής συγκόλλησης των γραφημάτων των $B^{(1)}, -B^{(2)}$.

Γράφουμε πιο λεπτομερειακά το τελευταίο επιχείρημα. Έστω $C^< = \cup_{t>0} C([0, t])$ και $G : C^< \times C[0, \infty) \rightarrow C[0, \infty)$ η απεικόνιση η τιμή $G(f, g)$ της οποίας είναι η συνάρτηση που προκύπτει με «συγκόλληση» τής g μετά την f . Δηλαδή, αν $f : [0, t] \rightarrow \mathbb{R}$ και $g : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$, η $G(f, g)$ έχει τιμές

$$G(f, g)(s) = \begin{cases} f(s) & \text{αν } s \in [0, t], \\ f(t) + g(s - t) - g(0) & \text{αν } s \in [t, \infty). \end{cases}$$

Η G είναι μετρήσιμη (παραλείπουμε τον ορισμό τής κατάλληλης σ -άλγεβρας στο πεδίο ορισμού τής G και την απόδειξη τής μετρησιμότητας), $B = G(B^{(1)}, B^{(2)})$, και $\hat{B} = G(B^{(1)}, -B^{(2)})$ αφού για $t > T$ έχουμε

$$G(B^{(1)}, -B^{(2)})(t) = B^{(1)}(T) + (-B^{(2)}(s - T) + B^{(2)}(0)) = 2B(T) - B(t).$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις αυτές με την (6.5) έχουμε το αποτέλεσμα. ■

Μας ενδιαφέρει η κατανομή τής τυχαίας μεταβλητής

$$M(t) := \sup\{B(s) : s \in [0, t]\}$$

όπου $t \geq 0$. Η M λέγεται το τρέχον μέγιστο τής κίνησης Brown.

Πόρισμα 6.4. Έστω B τυπική κίνηση Brown. Για κάθε $t, a > 0$ ισχύει

$$\mathbf{P}(M(t) \geq a) = 2 \mathbf{P}(B(t) \geq a) = \mathbf{P}(|B(t)| \geq a). \quad (6.6)$$

άρα

$$M(t) \stackrel{d}{=} |B(t)|.$$

Απόδειξη. Εφαρμόζουμε την αρχή τής ανάκλασης για τον χρόνο διακοπής $T_a := \inf\{s \geq 0 : B(t) = a\}$ (αφού το $\{a\}$ είναι κλειστό), ο οποίος με πιθανότητα 1 είναι πεπερασμένος (Πρόταση 5.15).

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(M(t) \geq a) &= \mathbf{P}(M(t) \geq a, B(t) > a) + \mathbf{P}(M(t) \geq a, B(t) < a) \\ &= \mathbf{P}(B(t) > a) + \mathbf{P}(\hat{B}(t) > a) = 2 \mathbf{P}(B(t) > a). \end{aligned}$$

Στη δεύτερη ισότητα χρησιμοποιήσαμε πρώτα ότι $\{B(t) > a\} \subset \{M(t) \geq a\}$ και έπειτα ότι το γεγονός $\{M(t) \geq a, B(t) < a\}$ συμβαίνει ακριβώς όταν συμβαίνει το $\hat{B}(t) > a$ [η $\hat{B}(t) > a$ συνεπάγεται ότι $T_a < t$, οπότε $M(t) \geq a$ και $\hat{B}(t) = 2B(T_a) - B(t) = 2a - B(t)$, άρα $B(t) < a$]. Η τρίτη ισότητα είναι συνέπεια τής αρχής τής ανάκλασης. ■

Η (6.6) προσδιορίζει την κατανομή τής $M(t)$ αφού το δεξί μέλος είναι κάτι γνωστό. Γράφεται και ως $2 \mathbf{P}(B(1) > a/\sqrt{t}) = 2\{1 - \Phi(a/\sqrt{t})\}$, όπου Φ είναι η συνάρτηση κατανομής τής $N(0, 1)$. Παραγωγίζοντας ως προς a , παίρνουμε την πυκνότητα τής $M(t)$.

Παρατηρούμε επίσης ότι οι $M(t), |B(t)|$ έχουν την ίδια κατανομή (για t σταθερό) όμως ως ανεξίτητες οι $(M(t))_{t \geq 0}, (|B(t)|)_{t \geq 0}$ δεν έχουν την ίδια κατανομή, είναι πολύ διαφορετικές. Η M έχει μονοπάτια που είναι αύξουσες συναρτήσεις σε αντίθεση με την $|B|$, της οποίας τα μονοπάτια ταλαντώνονται.

6.3 Άλλες εφαρμογές

Η αρχή τής ανάκλασης μπορεί να γενικεύσει το προηγούμενο πόρισμα δίνοντας την από κοινού κατανομή των $M(t), B(t)$, οι οποίες είναι εξαρτημένες τυχαίες μεταβλητές και ικανοποιούν την ανισότητα $B(t) \leq M(t)$.

Πόρισμα 6.5. Για κάθε $a, t > 0$ και $x \in (-\infty, a]$ ισχύει

$$\mathbf{P}(M(t) \geq a, B(t) \leq x) = \mathbf{P}(B(t) \geq 2a - x) = 1 - \Phi((2a - x)/\sqrt{t}). \quad (6.7)$$

Απόδειξη. Εφαρμόζουμε την αρχή τής ανάκλασης πάλι για τον χρόνο διακοπής $T_a := \inf\{s \geq 0 : B(s) = a\}$. Υπολογίζουμε

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(M(t) \geq a, B(t) \leq x) &= \mathbf{P}(T_a \leq t, \hat{B}(t) \geq 2a - x) \\ &= \mathbf{P}(\hat{B}(t) \geq 2a - x) = \mathbf{P}(B(t) \geq 2a - x). \end{aligned}$$

Η δεύτερη ισότητα ισχύει γιατί $2a - x \geq a$ από την υπόθεση $x \leq a$ και η $\hat{B}(t) \geq a$ δίνει $T_a \leq t$. Η τρίτη ισότητα προκύπτει από την αρχή τής ανάκλασης. ■

Όταν $x > a > 0$, βλέπουμε ότι

$$\mathbf{P}(M(t) \geq a, B(t) \leq x) = \mathbf{P}(B(t) \leq x) - \mathbf{P}(M(t) < a),$$

και συνδυάζοντας αυτή την ισότητα με την (6.7) βρίσκουμε ότι το ζευγάρι $(B(t), M(t))$ έχει από κοινού πυκνότητα

$$f_{B(t), M(t)}(x, a) = \frac{2(2a - x)}{\sqrt{2\pi t^3}} e^{-\frac{(2x-a)^2}{2t}} \mathbf{1}_{a \geq 0 \vee x}$$

στο \mathbb{R}^2 .

6.3 Άλλες εφαρμογές

Έστω Ω ο δειγματικός χώρος στον οποίο ορίζεται μια μονοδιάστατη κίνηση Brown B . Στις δύο παρακάτω προτάσεις, για σαφήνεια, σημειώνουμε την εξάρτηση από το $\omega \in \Omega$ αντικειμένων που είναι συναρτήσεις ορισμένες στο Ω . Για παράδειγμα, γράφουμε $B^\omega(t)$ για την τιμή τής $B(t)$ στο ω .

Πρόταση 6.6. Με πιθανότητα 1, το σύνολο $Z(\omega) := \{t \in [0, \infty) : B^\omega(t) = 0\}$ δεν έχει μεμονωμένα σημεία.

Απόδειξη. Για κάθε $q \in [0, \infty) \cap \mathbb{Q}$ θέτουμε $\tau_q(\omega) := \inf\{s \geq q : B^\omega(s) = 0\}$. Ο τ_q είναι χρόνος διακοπής και είναι πεπερασμένος με πιθανότητα 1 (συνέπεια τής Πρότασης 5.15). Επειδή $B^\omega(\tau_q) = 0$ (αφού η B^ω είναι συνεχής), η ισχυρή ιδιότητα Markov δίνει ότι η $(B(\tau_q + t))_{t \geq 0}$ είναι τυπική κίνηση Brown και άρα από την Πρόταση 5.16 ο χρόνος $\tau_q(\omega)$ προσεγγίζεται από δεξιά από σημεία τού $Z(\omega)$. Άρα υπάρχει ένα $\Omega_q \subset \Omega$ με πιθανότητα 1 ώστε για κάθε $\omega \in \Omega_q$ να ισχύει ότι $\tau_q(\omega) < \infty$ και $\inf\{s > \tau_q(\omega) : B^\omega(s) = 0\} = \tau_q(\omega)$. Το $A := \bigcap_{q \in \mathbb{Q} \cap [0, \infty)} \Omega_q$ έχει πιθανότητα 1, και ισχυρίζομαστε ότι για $\omega \in A$ ισχύει ότι το $Z(\omega)$ δεν έχει μεμονωμένα σημεία. Πράγματι, έστω $\omega \in A$ και $s \in Z(\omega)$. Αν το $s > 0$ είναι σημείο συσσώρευσης σημείων τού $Z(\omega)$ από αριστερά, δεν έχουμε τίποτα επιπλέον να δείξουμε για αυτό. Αν δεν είναι, τότε υπάρχει ρητός $q \in (0, s)$ με $(q, s) \cap Z(\omega) = \emptyset$. Τότε $s = \tau_q(\omega)$ και, από την κατασκευή τού A , το $\tau_q(\omega)$ είναι σημείο συσσώρευσης σημείων τού $Z(\omega)$. Τέλος, αν $s = 0 \in Z(\omega)$, τότε $s = \tau_0(\omega)$, και άρα είναι και αυτό σημείο συσσώρευσης τού $Z(\omega)$. ■

Άρα με πιθανότητα 1, το $Z(\omega)$ είναι κλειστό (αφού η B είναι συνεχής) χωρίς μεμονωμένα σημεία, δηλαδή τέλει. Έπεται, επειδή επιπλέον είναι μη κενό, ότι είναι υπεραριθμήσιμο.

Πρόταση 6.7. Για κάθε $t_0 > 0$, η πιθανότητα $\eta B|_{[t_0, \infty)}$ να έχει τοπικό μέγιστο με τιμή $M(t_0)$ είναι 0.

Δηλαδή η τιμή $M(t_0)$ δεν εμφανίζεται ξανά ως τοπικό μέγιστο.

Απόδειξη. Το t_0 δεν είναι τοπικό ακρότατο τής B (Άσκηση 5.9). Για $q \in (t_0, \infty)$ θέτουμε $\tau_q(\omega) := \inf\{s > q : B^\omega(s) = M^\omega(t_0)\}$. Η ισχυρή ιδιότητα Markov και η Πρόταση 5.16 δίνουν ότι σε ένα σύνολο $\Omega_q \subset \Omega$ που έχει πιθανότητα 1, το τ_q δεν είναι σημείο τοπικού μεγίστου για τη B . Το $A = \bigcap_{q \in (t_0, \infty)} \Omega_q$ έχει πιθανότητα 1 και για $\omega \in A$ η $B^\omega|_{[t_0, \infty)}$ δεν έχει τοπικό μέγιστο με τιμή $M^\omega(t_0)$. Αφήνεται στον αναγνώστη η απόδειξη τού τελευταίου ισχυρισμού. ■

Εφαρμογές τής ισχυρής ιδιότητας Markov στην πολυδιάστατη κίνηση Brown θα δούμε στην Παράγραφο 13.2.

Άσκησης

6.1 Να δειχθεί ότι ο χρόνος T_3 της (6.4) είναι χρόνος διακοπής ως προς την επαυξημένη διήθηση.

6.2 Έστω B μονοδιάστατη κίνηση Brown. Να δειχθεί ότι ο χρόνος

$$T := \inf\{t \in [0, 1] : B(t) = \max_{s \in [0, 1]} B(s)\}$$

με πιθανότητα 1 είναι < 1 και έπειτα ότι δεν είναι χρόνος διακοπής.

6.3 Έστω B μονοδιάστατη τυπική κίνηση Brown. Για κάθε $a \in \mathbb{R}$ θέτουμε $T_a := \inf\{s \geq 0 : B(s) = a\}$. Δείξτε ότι για κάθε $a, b > 0$ ισχύει

$$T_a + T_b \stackrel{d}{=} T_{a+b}.$$

6.4 Έστω B μονοδιάστατη τυπική κίνηση Brown. Για κάθε $a \in \mathbb{R}$ θέτουμε $T_a := \inf\{s \geq 0 : B(s) = a\}$. Δείξτε ότι για κάθε $a > 0$ ισχύει

$$T_a \stackrel{d}{=} \frac{a^2}{Z^2}$$

με $Z \sim N(0, 1)$.

Martingales και κίνηση Brown

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε κάποια martingales που προκύπτουν από την κίνηση Brown και θα τα χρησιμοποιήσουμε για να κάνουμε υπολογισμούς ανάλογους με αυτούς των Παραδειγμάτων 3.17, 3.18. Πιο συγκεκριμένα, θα βρούμε την πιθανότητα η τυπική κίνηση Brown να βγει από το αριστερό άκρο ενός διαστήματος που περιέχει το 0, τον μέσο χρόνο ωστόσο να βγει από το διάστημα, και την ροπογεννήτρια τού χρόνου ωστόσο να περάσει από έναν δεδομένο πραγματικό αριθμό.

7.1 Martingales σχετικά με την κίνηση Brown

Όταν αναφερόμαστε σε martingales σχετικά με την κίνηση Brown, θα εννοούμε martingales ως προς την επαυξημένη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ όπως ορίστηκε στη σχέση 5.8.

Θεώρημα 7.1. Έστω B τυπική κίνηση Brown. Οι ακόλουθες ανελίξεις είναι martingales.

(i) $\{B(t) : t \geq 0\}$

(ii) $\{B(t)^2 - t : t \geq 0\}$

(iii) $\{e^{\lambda B(t) - \frac{\lambda^2}{2}t} : t \geq 0\}$, με $\lambda \in \mathbb{R}$ δεδομένο.

Απόδειξη. (i) Είναι προφανές ότι είναι προσαρμοσμένη. Έπειτα, για $t > 0$, η $B(t)$ έχει την κατανομή $N(0, t)$ της οποίας η απόλυτη τιμή έχει πεπερασμένο ολοκλήρωμα. Τέλος, για $0 \leq s < t$,

$$\mathbf{E}(B(t) | \mathcal{F}_s) = \mathbf{E}(B(t) - B(s) | \mathcal{F}_s) + \mathbf{E}(B(s) | \mathcal{F}_s) = \mathbf{E}(B(t) - B(s)) + B(s) = B(s).$$

Η δεύτερη ισότητα έπεται από την Πρόταση 5.12, ενώ η τελευταία από το ότι η $B(t) - B(s)$ έχει μέση τιμή 0 και η $B(s)$ είναι \mathcal{F}_s -μετρήσιμη.

(ii) Ελέγχουμε μόνο την τρίτη απαίτηση τού ορισμού τού martingale. Για $0 \leq s < t$, έχουμε

$$B(t)^2 - t = \{B(t) - B(s) + B(s)\}^2 - t = \{B(t) - B(s)\}^2 + B(s)^2 + 2\{B(t) - B(s)\}B(s) - t,$$

και άρα παίρνοντας δεσμευμένη μέση τιμή υπολογίζουμε

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(B(t)^2 - t | \mathcal{F}_s) &= \mathbf{E}(\{B(t) - B(s)\}^2) + B(s)^2 + 2B(s) \mathbf{E}(B(t) - B(s) | \mathcal{F}_s) - t \\ &= t - s + B(s)^2 + 0 - t = B(s)^2 - s. \end{aligned}$$

Χρησιμοποιήσαμε το ότι η $B(t) - B(s)$ είναι ανεξάρτητη τής \mathcal{F}_s , έχει μέση τιμή 0 και διασπορά $t - s$. Επίσης ότι η $B(s)$ είναι \mathcal{F}_s -μετρήσιμη.

(iii) Όμοια, όπως στο προηγούμενο, παρατηρούμε ότι για $0 \leq s < t$ ισχύει

$$e^{\lambda B(t) - \frac{\lambda^2}{2}t} = e^{\lambda\{B(t) - B(s)\}} e^{\lambda B(s) - \frac{\lambda^2}{2}t}.$$

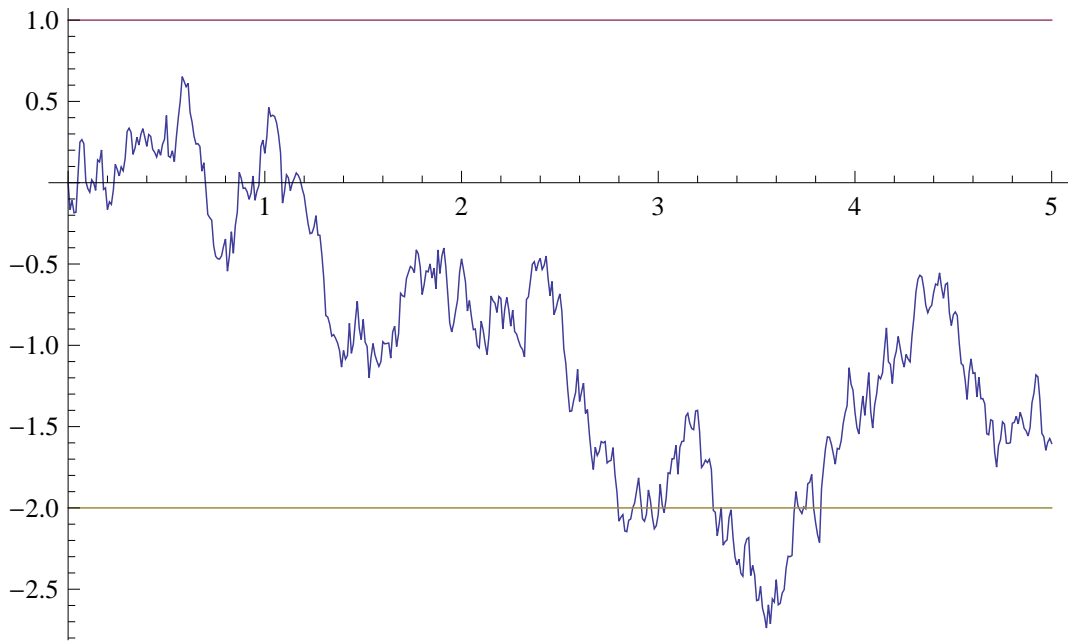
Η $e^{\lambda B(s)}$ είναι \mathcal{F}_s -μετρήσιμη, ενώ η $B(t) - B(s)$ είναι ανεξάρτητη τής \mathcal{F}_s και ακολουθεί την κατανομή $N(0, t - s)$. Άρα

$$\mathbf{E} \left(e^{\lambda B(t) - \frac{\lambda^2}{2}t} \mid \mathcal{F}_s \right) = \mathbf{E} \left(e^{\lambda \{B(t) - B(s)\}} \right) e^{\lambda B(s) - \frac{\lambda^2}{2}t} = e^{\frac{\lambda^2}{2}(t-s) + \lambda B(s) - \frac{\lambda^2}{2}t} = e^{\lambda B(s) - \frac{\lambda^2}{2}s}.$$

■

7.2 Έξοδος από διάστημα και από ημιευθεία

Το πρώτο αποτέλεσμα που θα αποδείξουμε αφορά την έξοδο τής κίνησης από ένα διάστημα γύρω από το μηδέν. Με τι πιθανότητα βγαίνει η κίνηση από το αριστερό (ή το δεξί) άκρο τού διαστήματος και πόση είναι η μέση τιμή τού χρόνου ώσπου να βγεί από κάποιο άκρο;



Σχήμα 7.1: Εδώ έχουμε $[a, b] = [-2, 1]$. Σε αυτή την πραγματοποίηση έτυχε η κίνηση Brown να βγεί από το $[-2, 1]$ στο -2.

Πρόταση 7.2. Για $a < 0 < b$ ισχύει

(i) $\mathbf{P}(T_a < T_b) = b/(|a| + b)$.

(ii) $\mathbf{E}(T_a \wedge T_b) = |a|b$.

Απόδειξη. Οι χρόνοι $T_a, T_b, T := T_a \wedge T_b$ είναι χρόνοι διακοπής όπως έχει δειχθεί στην Παράγραφο 5.3.2 και στην Άσκηση 4.4. Με πιθανότητα 1 είναι πεπερασμένοι (Πρόταση 5.15).

(i) Έστω $r > 0$ δεδομένο. Εφαρμόζουμε το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής (Θεώρημα 4.14) για το martingale $B(t)$ και τον φραγμένο χρόνο διακοπής $T \wedge r$. Παίρνουμε $\mathbf{E}(B(T \wedge r)) = 0$. Τώρα, με πιθανότητα 1 έχουμε $\lim_{r \rightarrow \infty} T \wedge r = T < \infty$ και άρα $\lim_{r \rightarrow \infty} B(T \wedge r) = B(T)$ [εδώ είναι κρίσιμο να ξέρουμε ότι $T < \infty$ ώστε να υπάρχει το τελευταίο όριο, και βέβαια τότε έχει νόημα το σύμβολο $B(T)$]. Επίσης, για κάθε $r > 0$ έχουμε $B(T \wedge r) \leq |a| \vee b$. Άρα το θεώρημα φραγμένης σύγκλισης δίνει

$$0 = \mathbf{E}(B(T)) = \mathbf{E}\{B(T)\mathbf{1}_{T_a < T_b} + B(T)\mathbf{1}_{T_a > T_b}\} = \mathbf{E}\{a\mathbf{1}_{T_a < T_b} + b\mathbf{1}_{T_a > T_b}\} = a\mathbf{P}(T_a < T_b) + b\mathbf{P}(T_a > T_b).$$

Η τελευταία σχέση, μαζί με την $\mathbf{P}(T_a < T_b) + \mathbf{P}(T_a > T_b) = 1$, δίνει το ζητούμενο.

(ii) Για $r > 0$ δεδομένο, εφαρμόζουμε το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής (Θεώρημα 4.14) για το martingale $M_t := B(t)^2 - t$ και τον φραγμένο χρόνο διακοπής $T \wedge r$. Η $\mathbf{E}(M_{T \wedge r}) = \mathbf{E}(M_0) = 0$ δίνει

$$\mathbf{E}(B^2(T \wedge r)) = \mathbf{E}(T \wedge r). \quad (7.1)$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα μονότονης σύγκλισης στο δεξιό μέλος και το φραγμένης στο αριστερό (η ποσότητα μέσα στη μέση τιμή φράσσεται από το $a^2 \vee b^2$) παίρνουμε

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(T) &= \mathbf{E}(B^2(T)) = \mathbf{E}\{B(T)^2 \mathbf{1}_{T_a < T_b} + B(T)^2 \mathbf{1}_{T_a > T_b}\} = a^2 \mathbf{P}(T_a < T_b) + b^2 \mathbf{P}(T_a > T_b) \\ &= a^2 \frac{b}{|a| + b} + b^2 \frac{|a|}{|a| + b} = |a|b. \end{aligned}$$

Στην προτελευταία ισότητα χρησιμοποιήσαμε το πρώτο μέρος της πρότασης. ■

Η επίκληση της Πρότασης 5.15 διευκόλυνε την απόδειξη αλλά θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε την $\mathbf{P}(T < \infty) = 1$ παρατηρώντας ότι η (7.1) δίνει $\mathbf{E}(T) = \lim_{r \rightarrow \infty} \mathbf{E}(T \wedge r) \leq a^2 \vee b^2$.

Πρόταση 7.3. Για κάθε $a \in \mathbb{R}$ ισχύει $\mathbf{P}(T_a < \infty) = 1$ και, επιπλέον, για κάθε $\lambda > 0$ ισχύει

$$\mathbf{E}(e^{-\lambda T_a}) = e^{-|a|\sqrt{2\lambda}}. \quad (7.2)$$

Απόδειξη. Ας υποθέσουμε ότι $a > 0$, η περίπτωση που $a < 0$ έπεται ανάλογα. Η $\mathbf{P}(T_a < \infty) = 1$ είναι συνέπεια της Πρότασης 5.15 αλλά δίνουμε και την εξής εναλλακτική απόδειξη. Για οποιοδήποτε $c < 0$, το πρώτο μέρος της προηγούμενης πρότασης δίνει ότι

$$\mathbf{P}(T_a < \infty) \geq \mathbf{P}(T_a < T_c) = \frac{|c|}{a + |c|}.$$

Το όριο της τελευταίας ποσότητας για $c \rightarrow -\infty$ είναι 1 και έτσι προκύπτει ο ισχυρισμός μας.

Τώρα για δεδομένα $r, \ell > 0$ εφαρμόζουμε το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής (Θεώρημα 4.14) για το martingale $e^{\ell B(t) - \frac{\ell^2}{2}t}$ και τον φραγμένο χρόνο διακοπής $T_a \wedge r$. Παίρνουμε

$$\mathbf{E} \left\{ e^{\ell B(T_a \wedge r) - \frac{\ell^2}{2}(T_a \wedge r)} \right\} = 1.$$

Η ποσότητα στη μέση τιμή είναι φραγμένη από το $e^{\ell a}$ (αφού παγώνουμε την κίνηση Brown μόλις φτάσει στην τιμή a , και όλες οι προηγούμενες τιμές της είναι μικρότερες από a αφού ξεκινάει από το 0) και το όριό της για $r \rightarrow \infty$ ισούται με

$$e^{\ell a - \frac{\ell^2}{2}T_a}.$$

Αυτό γιατί με πιθανότητα 1 ισχύει $T_a < \infty$ και άρα $B(T_a) = a$. Έτσι το θεώρημα φραγμένης σύγκλισης δίνει

$$\mathbf{E}(e^{-\frac{\ell^2}{2}T_a}) = e^{-\ell a}.$$

Θέτοντας $\ell = \sqrt{2\lambda}$ παίρνουμε το ζητούμενο. ■

Μπορούμε επίσης να δείξουμε ότι η τυχαία μεταβλητή T_a είναι απόλυτα συνεχής με πυκνότητα και να υπολογίσουμε την πυκνότητά της. Ας υποθέσουμε ότι $a > 0$. Χρησιμοποιώντας το Πόρισμα 6.4 και τον συμβολισμό του, υπολογίζουμε για $t \geq 0$

$$\mathbf{P}(T_a \leq t) = \mathbf{P}(M_t \geq a) = 2 \mathbf{P}(B(t) \geq a) = 2 \mathbf{P}(B(1) \geq a/\sqrt{t}).$$

7.2 Έξοδος από διάστημα και από ημιευθεία

Επομένως η T_a έχει συνάρτηση κατανομής που είναι συνεχής στο \mathbb{R} και παραγωγίσιμη με συνεχή παράγωγο (συμβολίζουμε με ϕ την πυκνότητα τής κατανομής $N(0, 1)$)

$$f(t) = 2\phi\left(\frac{a}{\sqrt{t}}\right) \frac{a}{2t^{3/2}} \mathbf{1}_{t>0} = \frac{a}{\sqrt{2\pi t^3}} e^{-a^2/2t} \mathbf{1}_{t>0}.$$

Κατά τα γνωστά, αυτή η παράγωγος είναι πυκνότητα για την T_a .

Εναλλακτικά, μπορούμε να βρούμε την f αντιστρέφοντας τον μετασχηματισμό Laplace στην (7.2).

Ασκήσεις

7.1 Έστω $(B(t))_{t \geq 0}$ τυπική κίνηση Brown. Να δειχθεί ότι η ανέλιξη $X_t := tB(t) - \int_0^t B(r) dr, t \geq 0$ είναι martingale ως προς την επαυξημένη διήθηση που παράγει η B .

7.2 Έστω B τυπική κίνηση Brown, $\mu > 0$, και $x \in \mathbb{R}$. Θεωρούμε την ανέλιξη X με

$$X_t := x + B(t) + \mu t$$

για κάθε $t \geq 0$. Η X ονομάζεται κίνηση Brown με τάση μ που ξεκινάει από το x . Για $r \in \mathbb{R}$, ορίζουμε $T_r := \inf\{s \geq 0 : X_s = r\}$ και $\phi(r) := e^{-2\mu r}$. Να δειχθεί ότι:

(α) Η ανέλιξη $M_t := \phi(X_t)$ είναι martingale.

(β) Για κάθε $a < x < b$ ισχύει $\mathbf{P}(T_a \wedge T_b < \infty) = 1$.

(γ) Για κάθε $a < x < b$ ισχύει

$$\mathbf{P}(T_a < T_b) = \frac{\phi(b) - \phi(x)}{\phi(b) - \phi(a)}.$$

(δ) Για $x = 0$ και $a < 0$ ισχύει $\mathbf{P}(T_a < \infty) = e^{2\mu a}$. Δηλαδή, όταν προσθέσουμε μια θετική τάση στην κίνηση Brown, εκείνη ενδέχεται να παραμείνει για πάντα δεξιά τού αριθμού $a < 0$, σε αντίθεση με την τυπική κίνηση Brown.

(ε) Έστω $x = 0$ και $R := \inf\{X_t : t \geq 0\} \in [-\infty, 0]$. Να δειχθεί ότι η $-R$ ακολουθεί την εκθετική κατανομή με παράμετρο 2μ . Παρατηρήστε ότι $R > -\infty$ με πιθανότητα 1.

7.3 Σε αυτή την άσκηση θα δούμε μια εναλλακτική απόδειξη τού μέρους (ε) της προηγούμενης άσκησης, δηλαδή ότι η $-R$ είναι εκθετική τυχαία μεταβλητή με παράμετρο 2μ .

Βρείτε κατάλληλο $\lambda \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ ώστε η $M_t := e^{\lambda X_t}$ να είναι martingale με $\lim_{t \rightarrow \infty} M_t = 0$ και χρησιμοποιήστε την Άσκηση 4.9.

7.4 (Τα πολυώνυμα Hermite και martingales) Έστω $x, \varrho \in \mathbb{R}$ σταθερές. Η συνάρτηση $\lambda \mapsto e^{\lambda x - \frac{1}{2}\lambda^2 \varrho}$, ως αναλυτική στο \mathbb{C} , αναπτύσσεται σε δυναμοσειρά με κέντρο το 0, έστω

$$e^{\lambda x - \frac{1}{2}\lambda^2 \varrho} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} H_k(x; \varrho) \lambda^k. \quad (7.3)$$

(α) Να δειχθεί ότι ο συντελεστής $H_k(x; \varrho)$ είναι μονικό πολυώνυμο τού x με βαθμό k και να προσδιοριστούν τα H_0, H_1, H_2, H_3 . Τα H_k ονομάζονται πολυώνυμα Hermite.

(β) Να δειχθεί ότι για κάθε $k \geq 0$ η ανέλιξη $(H_k(B(t); t))_{t \geq 0}$ είναι martingale.

7.5 Έστω $B = (B^{(1)}, B^{(2)})$ διδιάστατη τυπική κίνηση Brown και $a \neq 0$. Θέτουμε $T_a := \inf\{s \geq 0 : B^{(1)}(s) = a\}$. Να δειχθεί ότι η τυχαία μεταβλητή $B^{(2)}(T_a)$ έχει την κατανομή Cauchy με παράμετρο κλίμακας a . Δηλαδή έχει πυκνότητα $f(x) = \pi^{-1}|a|/(x^2 + a^2)$ και χαρακτηριστική συνάρτηση $\phi(t) = e^{-|a||t|}$.

7.6* (Νόμος τόξου ημιτόνου) (α) Έστω $r > 0$ και $d_r := \inf\{s \geq r : B(s) = 0\}$. Να δειχθεί ότι $d_r \stackrel{d}{=} r + T_{B(r)}^W$, όπου B, W είναι δυό ανεξάρτητες τυπικές κινήσεις Brown και $T_a^W = \inf\{s \geq 0 : W(s) = a\}$. Έπειτα να δειχθεί ότι $T_{B(r)}^W \stackrel{d}{=} r(B(T_1^W))^2 \stackrel{d}{=} rC^2$ όπου η C ακολουθεί την κατανομή Cauchy με παράμετρο κλίμακας 1.

7.2 Έξοδος από διάστημα και από ημιευθεία

(β) Έστω $X := \sup\{t \in [0, 1] : B(t) = 0\}$. Να δειχθεί ότι η X έχει πυκνότητα $(\pi\sqrt{x(1-x)})^{-1}\mathbf{1}_{x \in (0,1)}$.
[Υπόδειξη: $\{X < r\} = \{d_r > 1\}$.]

7.7 Χρησιμοποιώντας το ότι η ανέλιξη $(e^{rB_t})_{t \geq 0}$ είναι συνεχές submartingale για κάθε $r > 0$ και την ανισότητα Doob, δείξτε ότι για κάθε $a, t > 0$ ισχύει

$$\mathbf{P}(\sup_{s \in [0,t]} |B(s)| \geq a) \leq 2e^{-a^2/2t}.$$

[Χωρίς χρήση τού Πορίσματος 6.4.]

7.8 Περιγράψτε μια εναλλακτική απόδειξη τής σχέσης $\mathbf{P}(\lim_{t \rightarrow \infty} B(t)/t = 0) = 1$ συνδυάζοντας τις εξής δύο παρατηρήσεις.

(α) Ισχύει $\lim_{n \rightarrow \infty} B(n)/n = 0$ με πιθανότητα 1. [Υπόδειξη: Ισχυρός νόμος των μεγάλων αριθμών.]

(β) Με πιθανότητα 1 ισχύει $\sup_{s \in [n, n+1]} |B(s) - B(n)| \leq 2 \log n$ για όλα τα μεγάλα n . [Δηλαδή τα ω για τα οποία υπάρχει $n(\omega)$ ώστε η ανισότητα να ισχύει για κάθε $n \geq n(\omega)$ έχουν πιθανότητα 1.]

8

Αναλυτικές ιδιότητες

8.1 Βαθμός συνέχειας*

Ξέρουμε ότι η κίνηση Brown είναι συνεχής και θα δείξουμε στην επόμενη παράγραφο ότι είναι πουθενά διαφορίσιμη. Πόσο ομαλή είναι λοιπόν; Μια ασθενέστερη μορφή ομαλότητας από την διαφορισιμότητα είναι η a -Hölder συνέχεια για κάποιο $a \leq 1$.

Στόχος αυτής της παραγράφου είναι να δείξουμε ότι η κίνηση Brown είναι τοπικά a -Hölder συνεχής για κάθε $a \in (0, 1/2)$ και όχι για $a = 1/2$. Δείχνουμε πρώτα κάποια πιο ακριβή αποτελέσματα που έχουν ενδιαφέρον από μόνα τους.

Θεώρημα 8.1. Έστω B τυπική κίνηση Brown. Υπάρχει μια σταθερά $C > 0$ έτσι ώστε με πιθανότητα 1, υπάρχει $h_0 := h_0(\omega) \in (0, 1)$ ώστε για κάθε $h \in (0, h_0]$ και για όλα τα $t \in [0, 1 - h]$ να ισχύει

$$|B(t+h) - B(t)| \leq C \sqrt{h \log \frac{1}{h}}. \quad (8.1)$$

Απόδειξη. Χρησιμοποιούμε την κατασκευή της κίνησης Brown που έγινε στην απόδειξη του Θεωρήματος 5.5 στο Παράρτημα Γ'. Για $t, t+h \in [0, 1]$, η (Γ'.5) δίνει

$$|B(t+h) - B(t)| \leq \sum_{k=0}^{\infty} |F_k(t+h) - F_k(t)| \text{ για κάθε } t \in [0, 1-h]. \quad (8.2)$$

Από τη σχέση (Γ'.4), υπάρχει ένας τυχαίος φυσικός k_0 ώστε για $k > k_0$ να έχουμε

$$\|F_k\|_{\infty} < C_1 \sqrt{k} 2^{-k/2}, \quad (8.3)$$

με C_1 μια απόλυτη σταθερά (μπορούμε να επιλέξουμε $C_1 = 2$). Αυτό συνεπάγεται και ένα φράγμα για την $\|F'_k\|_{\infty}$. Γιατί η F_k είναι γραμμική μεταξύ σημείων που έχουν απόσταση 2^{-k} και άρα

$$\|F'_k\|_{\infty} \leq 2\|F_k\|_{\infty}/2^{-k} \leq 2C_1 \sqrt{k} 2^{k/2} \text{ για κάθε } k > k_0. \quad (8.4)$$

Τώρα κάθε προσθετός στην (8.2) φράσσεται ως εξής

$$|F_k(t+h) - F_k(t)| = \left| \int_t^{t+h} F'_k(s) ds \right| \leq \|F'_k\|_{\infty} h,$$

γιατί η F_k είναι συνεχής παντού και διαφορίσιμη εκτός σε πεπερασμένα το πλήθος σημεία. Δηλαδή η F_k είναι Lipschitz με σταθερά το πολύ $\|F'_k\|_{\infty}$. Έπειτα παρατηρούμε ότι το φράγμα που δίνει η (8.4) για τη σταθερά Lipschitz της F_k μεγαλώνει καθώς το k μεγαλώνει. Άρα δίνει χρήσιμο φράγμα για τη διαφορά $|F_k(t+h) - F_k(t)|$ μέχρι ένα k . Για τα μεγαλύτερα k η διαφορά $|F_k(t+h) - F_k(t)|$ θα είναι μικρή όχι επειδή το h είναι μικρό και η $\|F'_k\|_{\infty}$ ελεγχόμενου μεγέθους, αλλά επειδή καθεμία

8.1 Βαθμός συνέχειας*

από τις ποσότητες $F_k(t+h), F_k(t)$ είναι πολύ μικρή, όπως λέει η (8.3). Με βάση αυτό το σκεπτικό, σταθεροποιούμε $n > k_0$ και φράσσουμε το δεξί μέλος της (8.2) ως εξής:

$$\begin{aligned}
 \sum_{k=0}^{\infty} |F_k(t+h) - F_k(t)| &\leq h \sum_{k=0}^{k_0} \|F'_k\|_{\infty} + h \sum_{k=k_0}^{n-1} \|F'_k\|_{\infty} + \sum_{k=n}^{\infty} 2\|F_k\|_{\infty} \\
 &\leq h \sum_{k=0}^{k_0} \|F'_k\|_{\infty} + 2C_1 h \sum_{k=k_0}^{n-1} \sqrt{k} 2^{k/2} + 2C_1 \sum_{k=n}^{\infty} \sqrt{k} 2^{-k/2} \\
 &\leq h \sum_{k=0}^{k_0} \|F'_k\|_{\infty} + 2C_1 h \sqrt{n} 2^{n/2} 4 + 2C_1 \sqrt{n} 2^{-n/2} 2 \\
 &= h \sum_{k=0}^{k_0} \|F'_k\|_{\infty} + 8C_1 h \sqrt{n} 2^{n/2} + 4C_1 \sqrt{n} 2^{-n/2}. \tag{8.5}
 \end{aligned}$$

Υπάρχει (τυχαίο) $h(k_0) > 0$ ώστε $h \sum_{k=0}^{k_0} \|F'_k\|_{\infty} < \sqrt{h \log(1/h)}$ για $h \in [0, h(k_0))$. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι $h(k_0) < 1/2^{k_0}$. Τώρα, για $h \in (0, h(k_0))$ υπάρχει μοναδικό $n > k_0$ ώστε $2^{-n-1} < h < 2^{-n}$. Τότε $n < (1/\log 2) \log(1/h)$, $2^n < 1/h$, $2^{-n} < 2h$. Επικαλούμαστε το πιο πάνω φράγμα για αυτό το n . Και το φράγμα που παίρνουμε είναι

$$|B(t+h) - B(t)| \leq \sqrt{h \log \frac{1}{h}} \left(1 + \frac{8C_1}{\sqrt{\log 2}} + \frac{4\sqrt{2}C_1}{\sqrt{\log 2}} \right) = C \sqrt{h \log \frac{1}{h}},$$

με τη C επίσης απόλυτη σταθερά (π.χ., η επιλογή $C = 20$ δουλεύει). Έτσι προκύπτει το ζητούμενο. ■

Σχόλιο. Στην προηγούμενη απόδειξη, για δεδομένο h , πώς βρήκαμε το n για το οποίο εφαρμόσαμε την (8.5); Αγνοώντας τις σταθερές, εξισώσαμε τους δύο τελευταίους όρους. Δηλαδή θέσαμε $h\sqrt{n} 2^{n/2} = \sqrt{n} 2^{-n/2}$. Και αυτό γιατί, καθώς το n αυξάνει, ο τελευταίος όρος μειώνεται αλλά ο πρώτος αυξάνεται. Ο πρώτος είναι μικρός λόγω της παρουσίας τού h . Βρίσκουμε λοιπόν το n στο οποίο οι όροι είναι της ίδιας τάξης. Είναι ανώφελο να κάνουμε τον τελευταίο όρο πολύ μικρό αν ο άλλος αυξάνεται.

Ισχύει το εξής αποτέλεσμα, το οποίο δεν θα αποδείξουμε. Με πιθανότητα 1 ισχύει

$$\lim_{h \rightarrow 0^+} \sup_{t \in [0, 1-h]} \frac{|B(t+h) - B(t)|}{\sqrt{2h \log \frac{1}{h}}} = 1.$$

Άρα το φράγμα που δίνει το δεξί μέλος της (8.1) δεν μπορεί να βελτιωθεί ουσιαστικά, δηλαδή να αντικατασταθεί με συνάρτηση που τείνει στο 0 καθώς $h \rightarrow 0^+$ πιο σύντομα από την $\sqrt{h \log(1/h)}$.

Ορισμός 8.2. Έστω $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ συνάρτηση με πεδίο ορισμού $A \subset \mathbb{R}$. Για $\alpha \in [0, \infty)$ και $x_0 \in A$, η f λέγεται τοπικά α -Hölder συνεχής στο x_0 αν υπάρχουν $\delta > 0$ και $C \in \mathbb{R}$ ώστε

$$|f(x) - f(x_0)| \leq C|x - x_0|^\alpha$$

για όλα τα $x \in A$ με $|x - x_0| < \delta$.

Το φράγμα $\sqrt{h \log(1/h)}$ του πιο πάνω θεωρήματος δίνει εύκολα την α -Hölder συνέχεια για $\alpha < 1/2$. Το αποδεικνύουμε τυπικά.

Πόρισμα 8.3. Έστω $\alpha \in [0, 1/2)$. Με πιθανότητα 1, η κίνηση Brown είναι τοπικά α -Hölder συνεχής.

8.2 Μη διαφορισιμότητα*

Απόδειξη. Εφαρμόζουμε το Θεώρημα 8.1 για καθεμία από τις τυπικές κινήσεις Brown $B^{(k)}(t) = B(k+t) - B(k), t \geq 0$. Υπάρχουν τυχαία $h_k = h_k(\omega) \in (0, 1), k \in \mathbb{N}$, ώστε

$$|B(t+h) - B(t)| \leq C\sqrt{h \log \frac{1}{h}}$$

για κάθε $t \in [k, k+1)$, και $h \in (0, h_k \wedge ((k+1) - t))$.

Έστω $\alpha \in (0, 1/2)$. Θέτουμε $C_\alpha := \sup_{h \in (0,1)} h^{1/2-\alpha} \sqrt{\log(1/h)} \in (0, \infty)$. Το τελευταίο sup είναι πεπερασμένο γιατί $\lim_{h \rightarrow 0^+} h^{1/2-\alpha} \sqrt{\log(1/h)} = 0$ αφού $\alpha < 1/2$.

Για $t \in (k, k+1)$ με $k \in \mathbb{N}$, έχουμε ότι $|B(t+h) - B(t)| \leq |h|^\alpha C C_\alpha$ για κάθε h με $|h| < h_k \wedge (t-k) \wedge ((k+1) - t) =: \delta_t$. Ο αριθμός δ_t είναι θετικός. Άρα η B είναι α -Hölder συνεχής στο t . Η περίπτωση που ο $t \in \mathbb{N}$ αφήνεται στον αναγνώστη. ■

8.2 Μη διαφορισιμότητα*

Έστω συνάρτηση $f : A \rightarrow \mathbb{R}$, με $A \subset \mathbb{R}, x_0 \in A$ και $C \in (0, \infty)$. Λέμε ότι η f είναι **Lipschitz στο x_0 με σταθερά C** αν υπάρχει $\delta > 0$ ώστε για κάθε $x \in A \cap (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$ να ισχύει $|f(x) - f(x_0)| \leq C|x - x_0|$. Προφανώς αν μια συνάρτηση είναι παραγωγίσιμη (με πεπερασμένη παράγωγο) σε ένα σημείο x_0 εσωτερικό του πεδίου ορισμού της, τότε είναι Lipschitz στο x_0 με σταθερά $|f'(x_0)| + 1$.

Θεώρημα 8.4. *Με πιθανότητα 1, η κίνηση Brown δεν είναι διαφορίσιμη σε κανένα σημείο του $[0, \infty)$.*

Απόδειξη. Για $n \geq 1$ και $C \in (0, \infty)$ θέτουμε

$$A_n(C) := \{\omega : \text{υπάρχει } s \in [0, 1] \text{ ώστε } |B(t) - B(s)| \leq C|t - s| \text{ για } t \in [s - (3/n), s + (3/n)] \cap [0, 1]\}.$$

Τότε η $A_n(C)$ είναι αύξουσα ακολουθία συνόλων με ένωση το σύνολο

$$A(C) := \{\omega : \eta B \text{ είναι Lipschitz με σταθερά } C \text{ σε κάποιο } s \in [0, 1]\}.$$

Επομένως $\mathbf{P}(A(C)) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}(A_n(C))$. Θα δείξουμε ότι αυτό το όριο ισούται με 0.

Για $k \in \{1, 2, \dots, n-2\}$, θέτουμε

$$X_{n,k} = \max \left\{ \left| B\left(\frac{k+j}{n}\right) - B\left(\frac{k+j-1}{n}\right) \right| : j = 0, 1, 2 \right\}$$

και τέλος $B_n(C) := \cup_{k=1}^{n-2} \{X_{n,k} \leq 5C/n\}$.

Ισχυρισμός: $A_n(C) \subset B_n(C)$.

Για $\omega \in A_n(C)$, έστω s το σημείο που δίνεται στον ορισμό του $A_n(C)$. Το s θα βρίσκεται μέσα σε ένα διάστημα μήκους $3/n$ της μορφής $[(k-1)/n, (k+2)/n]$ για κάποιο $k \in \{1, \dots, n-2\}$. Ας υποθέσουμε ότι το s βρίσκεται στο δεξιό τρίτο του διαστήματος, δηλαδή στο $[(k+1)/n, (k+2)/n]$. Τότε

$$\begin{aligned} \left| B\left(\frac{k}{n}\right) - B\left(\frac{k-1}{n}\right) \right| &\leq \left| B\left(\frac{k}{n}\right) - B(s) \right| + \left| B(s) - B\left(\frac{k-1}{n}\right) \right| \\ &\leq C \left| \frac{k}{n} - s \right| + C \left| s - \frac{k-1}{n} \right| \leq C \frac{2}{n} + C \frac{3}{n} = C \frac{5}{n}. \end{aligned}$$

Όμοια δείχνουμε ότι $|B((k+1)/n) - B(k/n)| \leq 3C/n, |B((k+2)/n) - B((k+1)/n)| \leq 2C/n$, οπότε $X_{n,k} \leq 5C/n$. Αν βέβαια το s δεν ανήκει στα διαστήματα $[0, 1/n], [(n-1)/n, 1]$, τότε επιλέγουμε ένα k ώστε το s να ανήκει στο $[k/n, (k+1)/n]$ και τότε θα παίρναμε φράγμα $X_{n,k} \leq 3C/n$.

Οι τυχαίες μεταβλητές $\{X_{n,k} : k = 1, 2, \dots, n-2\}$ έχουν την ίδια κατανομή. Άρα

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(A_n(C)) &\leq \mathbf{P}(B_n(C)) \leq (n-2) \mathbf{P}(X_{n,1} \leq 5C/n) \\ &= n \mathbf{P}\left(\left|B\left(\frac{1}{n}\right) - B(0)\right| \leq \frac{5C}{n}, \left|B\left(\frac{2}{n}\right) - B\left(\frac{1}{n}\right)\right| \leq \frac{5C}{n}, \left|B\left(\frac{3}{n}\right) - B\left(\frac{2}{n}\right)\right| \leq \frac{5C}{n}\right) \\ &= n \mathbf{P}\left(\left|B\left(\frac{1}{n}\right)\right| \leq \frac{5C}{n}\right)^3 = n \left(\mathbf{P}\left(|B(1)| \leq 5C/\sqrt{n}\right)\right)^3 \leq n \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{5C}{\sqrt{n}}\right)^3 = \frac{C'}{\sqrt{n}}. \end{aligned}$$

Άρα προκύπτει ότι¹ $\mathbf{P}(A(C)) = 0$. Τέλος, επειδή

$$\{\omega : \eta B \text{ είναι Lipschitz σε κάποιο } s \in [0, 1]\} = \cup_{r=1}^{\infty} A(r),$$

το σύνολο στο αριστερό μέλος έχει πιθανότητα 0. Το αποτέλεσμα για το $[0, \infty)$ προκύπτει με προφανή τρόπο από το αποτέλεσμα στο $[0, 1]$. ■

8.3 Κύμανση και τετραγωνική κύμανση

Έστω $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ και $p > 0$. Για κάθε διαμέριση $\Delta := \{a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b\}$ του $[a, b]$, ορίζουμε την p -κύμανση τής f ως προς τη Δ ως

$$V_p(f, \Delta) := \sum_{k=1}^n |f(t_k) - f(t_{k-1})|^p,$$

και την κύμανση τής f ως

$$V_1(f, [a, b]) := \sup\{V_1(f, \Delta) : \Delta \text{ διαμέριση τού } [a, b]\}.$$

Στην ανάλυση ορίζεται επίσης η τετραγωνική κύμανση $V_2(f, [a, b])$ της f στο $[a, b]$ ως το supremum τής $V_2(f, \Delta)$ πάνω σε όλες τις διαμερίσεις Δ του $[a, b]$. Στη θεωρία των στοχαστικών ανελίξεων ο όρος τετραγωνική κύμανση αναφέρεται σε άλλο αντικείμενο το οποίο θα δούμε αμέσως.

Για κάθε διαμέριση $\Delta := \{a = t_0 < t_1 < \dots < t_k = b\}$ ενός διαστήματος $[a, b]$, ορίζουμε τη λεπτότητά της ως

$$\|\Delta\| = \max\{|t_i - t_{i-1}| : i = 1, 2, \dots, k\}.$$

Ορισμός 8.5. Έστω $(X_t)_{t \geq 0}$ στοχαστική ανελίξη και $[a, b] \subset [0, \infty)$. Αν υπάρχει τυχαία μεταβλητή Y ώστε για κάθε ακολουθία διαμερίσεων $(\Delta_n)_{n \geq 1}$ του $[a, b]$ με $\|\Delta_n\| \rightarrow 0$ η ακολουθία των τυχαίων μεταβλητών

$$(V_2(X, \Delta_n))_{n \geq 1}$$

να συγκλίνει κατά πιθανότητα στην Y , τότε ονομάζουμε την Y **τετραγωνική κύμανση** τής X στο $[a, b]$ και τη συμβολίζουμε με $\langle X, X \rangle_{[a, b]}$.

Διατυπώνουμε χωρίς απόδειξη το εξής αποτέλεσμα για την τετραγωνική κύμανση συνεχών martingales. Θα το χρειαστούμε μόνο για την Άσκηση 11.1. Η απόδειξή του δίνεται στο Revuz and Yor (1999) (Πρόταση 1.12 του Κεφαλαίου IV).

Πρόταση 8.6. Έστω $(X_t)_{t \geq 0}$ martingale με συνεχή μονοπάτια και $\mathbf{E}(X_t^2) < \infty$ για κάθε $t \geq 0$ το οποίο έχει τετραγωνική κύμανση $\langle X, X \rangle_{[0, t]} = 0$ για κάθε $t > 0$. Τότε με πιθανότητα 1 ισχύει $X_t = X_0$ για κάθε $t \geq 0$.

¹ Δείξαμε και κάτι παραπάνω. Δηλαδή ότι όλοι οι όροι τής ακολουθίας $(\mathbf{P}(A_n(C)))_{n \geq 1}$ ισούνται με 0 γιατί αυτή είναι μη αρνητική, αύξουσα, και τείνει στο μηδέν.

Συμβολισμός: Στο εξής, για την κίνηση Brown, αντί $B(t)$ θα γράφουμε B_t .

Θα μας απασχολήσει η τετραγωνική κύμανση τής κίνησης Brown. Ξεκινάμε με έναν υπολογισμό.

Λήμμα 8.7. Έστω $0 \leq a < b$, $\Delta := \{a = t_0 < t_1 < \dots < t_k = b\}$ διαμέριση τού $[a, b]$, και $(B_t)_{t \geq 0}$ κίνηση Brown. Ισχύει ότι

$$\mathbf{E}\{V_2(B, \Delta) - (b - a)\}^2 \leq 2(b - a)\|\Delta\|. \quad (8.6)$$

Απόδειξη. Θέτουμε $Y_i := (B_{t_i} - B_{t_{i-1}})^2 - (t_i - t_{i-1})$ για $i = 1, 2, \dots, k$. Τότε

$$\{V_2(B, \Delta) - (b - a)\}^2 = \left(\sum_{i=1}^k Y_i\right)^2 = \sum_{i=1}^k Y_i^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq k} Y_i Y_j.$$

Οι τυχαίες μεταβλητές $\{Y_i : 1 \leq i \leq k\}$ είναι ανεξάρτητες με $\mathbf{E}(Y_i) = \mathbf{E}\{(B_{t_i} - B_{t_{i-1}})^2\} - (t_i - t_{i-1}) = 0$ και

$$\mathbf{E}(Y_i^2) = \mathbf{E}\{(B_{t_i} - B_{t_{i-1}})^4\} - 2(t_i - t_{i-1})\mathbf{E}\{(B_{t_i} - B_{t_{i-1}})^2\} + (t_i - t_{i-1})^2 = (t_i - t_{i-1})^2 \mathbf{E}(Z^4) - (t_i - t_{i-1})^2$$

με $Z \sim N(0, 1)$. Όμως $\mathbf{E}(Z^4) = 3$ από το Λήμμα Α' 1, οπότε $\mathbf{E}(Y_i^2) = 2(t_i - t_{i-1})^2$. Συνδυάζοντας τα παραπάνω, βρίσκουμε

$$\mathbf{E}\{V_2(B, \Delta) - (b - a)\}^2 = 2 \sum_{i=1}^k (t_i - t_{i-1})^2 \leq 2(b - a)\|\Delta\|. \quad (8.7)$$

Η ανισότητα ισχύει γιατί $(t_i - t_{i-1})^2 \leq (t_i - t_{i-1})\|\Delta\|$ για κάθε i . ■

Θεώρημα 8.8. Για κάθε $0 \leq a < b$, η τετραγωνική κύμανση τής κίνησης Brown στο διάστημα $[a, b]$ ισούται με $b - a$. Επιπλέον:

(i) Για κάθε ακολουθία διαμερίσεων $(\Delta_n)_{n \geq 1}$ με $\|\Delta_n\| \rightarrow 0$ ισχύει

$$V_2(B, \Delta_n) \rightarrow b - a \text{ στον } L^2$$

καθώς $n \rightarrow \infty$.

(ii) Για κάθε ακολουθία διαμερίσεων $(\Delta_n)_{n \geq 1}$ με $\sum_{n=1}^{\infty} \|\Delta_n\| < \infty$ ισχύει

$$V_2(B, \Delta_n) \rightarrow b - a \text{ με πιθανότητα } 1$$

καθώς $n \rightarrow \infty$.

Απόδειξη. (i) Έπεται αμέσως από την (8.6).

(ii) Θέτουμε $U_n := V_2(B, \Delta_n) - b + a$. Από την (8.6) και την υπόθεση, $\mathbf{E}(\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2) = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{E}(U_n^2) < \infty$. Άρα με πιθανότητα 1 έχουμε $\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2 < \infty$ και επομένως $\lim_{n \rightarrow \infty} U_n = 0$. ■

Μια συνηθισμένη ακολουθία διαμερίσεων τού $[a, b]$ που ικανοποιεί την υπόθεση τού (ii) είναι αυτή που έχει

$$\Delta_n := \left\{a = t_0^{(n)} < t_1^{(n)} < \dots < t_{2^n}^{(n)} = b\right\} \text{ με } t_j^{(n)} = a + j \frac{(b-a)}{2^n}$$

για κάθε $j = 0, 1, \dots, 2^n$.

Το προηγούμενο θεώρημα δίνει εύκολα ότι, με πιθανότητα 1, η κίνηση Brown δεν είναι φραγμένης κύμανσης και θα το δούμε αμέσως. Αυτό βέβαια έπεται και από το Θεώρημα 8.4 γιατί μια συνάρτηση φραγμένης κύμανσης είναι διαφορίσιμη σχεδόν παντού. Ο τελευταίος ισχυρισμός όμως είναι ένα αρκετά δύσκολο θεώρημα (δες Κουμουλλής και Νεγρεπόντης (1991), Θεώρημα 14.8).

Πόρισμα 8.9. Με πιθανότητα 1, σε οποιοδήποτε υποδιάστημα τού $[0, \infty)$ η κίνηση Brown έχει άπειρη κύμανση.

Απόδειξη. Έστω $0 \leq a < b$ δεδομένοι πραγματικοί αριθμοί. Θεωρούμε ακολουθία διαμερίσεων $(\Delta_n)_{n \geq 1}$ του $[a, b]$ με $\sum_{n=1}^{\infty} \|\Delta_n\| < \infty$. Έστω $\Delta_n := \{0 = t_0^{(n)} < t_1^{(n)} < \dots < t_{k(n)}^{(n)} = t\}$. Υπάρχει μετρήσιμο σύνολο $\Omega_0(a, b) \subset \Omega$ με πιθανότητα 1 ώστε για κάθε ω σε αυτό το σύνολο να ισχύει $\lim_{n \rightarrow \infty} V_2(B, \Delta_n) = b - a$ και η $B(= B^\omega)$ να είναι συνεχής. Ισχύει

$$V_2(B, \Delta_n) \leq \sup_{1 \leq j \leq k(n)} |B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}}| V_1(B, \Delta_n).$$

Έστω $\omega \in \Omega_0(a, b)$. Για $n \rightarrow \infty$, το αριστερό μέλος τής σχέσης συγκλίνει στο $b - a$ και το

$$\sup_{1 \leq j \leq k(n)} |B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}}| \rightarrow 0$$

αφού η συγκεκριμένη πραγματοποίηση τής B είναι ομοιόμορφα συνεχής στο $[a, b]$ ως συνεχής. Έπεται ότι $V_1(B, \Delta_n) \rightarrow \infty$. Άρα στο $\Omega_0(a, b)$ ισχύει

$$V_1(B, [a, b]) \geq \lim_{n \rightarrow \infty} V_1(B, \Delta_n) = \infty.$$

Τώρα το σύνολο $\Omega_0 := \bigcap_{\substack{0 \leq a < b \\ a, b \in \mathbb{Q}}} \Omega_0(a, b)$ έχει πιθανότητα 1, και για $\omega \in \Omega_0$ και $0 \leq a < b$ βρίσκουμε ρητούς p, q με $a < p < q < b$, και άρα $V_1(B, [a, b]) \geq V_1(B, [p, q]) = \infty$. ■

Πρόταση 8.10. Έστω $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχής, $t > 0$, και για κάθε $n \geq 1$, $\Delta_n := \{0 = t_0^{(n)} < t_1^{(n)} < \dots < t_{k(n)}^{(n)} = t\}$ διαμέριση τού $[0, t]$ ώστε $\|\Delta_n\| \rightarrow 0$. Τότε

$$\sum_{j=1}^{k(n)} f(B_{t_{j-1}^{(n)}}) (B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}})^2 \rightarrow \int_0^t f(B_s) ds \quad (8.8)$$

κατά πιθανότητα καθώς $n \rightarrow \infty$.

Η απόδειξη δίνεται στο Παράρτημα Γ'.

Παρατήρηση 8.11. Εξαιτίας τής (8.8), έχουμε για τα διαφορικά τη σχέση

$$(dB_s)^2 = ds. \quad (8.9)$$

Αυτό γιατί αν ακολουθούσαμε τις συμβάσεις συμβολισμού τής ολοκλήρωσης Stieljes, θα έπρεπε να συμβολίζουμε το όριο τού αριστερού μέλους τής (8.8) με $\int_0^t f(B_s) (dB_s)^2$.

Κατανοούμε διαισθητικά την (8.9) σαν να λέει ότι το τετράγωνο τής μεταβολής τής κίνησης Brown σε ένα διάστημα απειροστού μήκους ds ισούται με το μήκος τού διαστήματος. Στην καρδιά αυτή της σχέσης βρίσκεται το ότι για $s, \Delta s > 0$, η $(B_{s+\Delta s} - B_s)^2$ έχει μέση τιμή Δs .

Ασκήσεις

8.1 Να δειχθεί ότι, με πιθανότητα 1, για οποιοδήποτε υποδιάστημα I του $[0, \infty)$ με θετικό μήκος, η κίνηση Brown δεν είναι μονότονη στο I .

8.3 Κύμανση και τετραγωνική κύμανση

8.2 Έστω $(\Delta_n)_{n \geq 1}$ ακολουθία διαμερίσεων του $[0, t]$, με $\Delta_n := \{0 = t_0^{(n)} < t_1^{(n)} < \dots < t_{k(n)}^{(n)} = t\}$ για κάθε $n \geq 1$, ώστε $\|\Delta_n\| \rightarrow 0$. Τότε για κάθε $\varepsilon > 0$ να δειχθεί ότι

$$\sum_{j=1}^{k(n)} |B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}}|^{2+\varepsilon} \rightarrow 0 \quad (8.10)$$

στον $L^2(\mathbf{P})$ καθώς $n \rightarrow \infty$.

8.3 Η άσκηση αυτή αναφέρεται στην απόδειξη της Πρότασης 8.10 στο Παράρτημα Γ'. Με τις υποθέσεις της Πρότασης 8.10, αν έχουμε επιπλέον ότι υπάρχει σταθερά $C \in \mathbb{R}$ ώστε $\mathbf{E}(f(B_s)^2) \leq C$ για κάθε $s \in [0, t]$, να δειχθεί ότι η μέση τιμή του τετραγώνου της (Γ'.12) φράσσεται από

$$2C \sum_{j=1}^{k(n)} (t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)})^2.$$

Άρα σε αυτή την περίπτωση, η σύγκλιση στην (8.8) ισχύει στον $L^2(\mathbf{P})$.

8.4 (Άπειρη κύμανση) Έστω $(\Delta_n)_{n \geq 1}$ ακολουθία διαμερίσεων του $[0, t]$, με $\Delta_n := \{0 = t_0^{(n)} < t_1^{(n)} < \dots < t_{k(n)}^{(n)} = t\}$ για κάθε $n \geq 1$. Θέτουμε $A := \mathbf{E}(|B_1|) = \sqrt{2/\pi}$, και για κάθε $n \geq 1$,

$$L_n := \sum_{j=1}^{k(n)} |B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}}|.$$

(α) Να δειχθεί ότι $\mathbf{E}(L_n) \geq At/\|\Delta_n\|^{1/2}$.

(β) Να δειχθεί ότι $\text{Var}(L_n) = (1 - A^2)t$.

(γ) Με χρήση της ανισότητας Chebyshev, να βρεθεί άνω φράγμα για την πιθανότητα

$$\mathbf{P}\left(L_n < \frac{1}{2} \mathbf{E}(L_n)\right).$$

(δ) Να δειχθεί ότι αν $\lim_{n \rightarrow \infty} \|\Delta_n\| = 0$, τότε $L_n \rightarrow \infty$ κατά πιθανότητα. Δηλαδή ότι για κάθε $M \in \mathbb{R}$ ισχύει ότι $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}(L_n \leq M) = 0$.

(ε) Αν $\sum_{n=1}^{\infty} \|\Delta_n\| < \infty$, να δειχθεί ότι με πιθανότητα 1, $L_n \rightarrow \infty$ καθώς $n \rightarrow \infty$.

8.5 Έστω ανεξίτητες $(X_t)_{t \geq 0}, (Y_t)_{t \geq 0}$ οι οποίες με πιθανότητα 1 έχουν συνεχή μονοπάτια και σε κάθε πεπερασμένο διάστημα η X έχει φραγμένη κύμανση, ενώ η Y έχει τετραγωνική κύμανση (πεπερασμένη ή άπειρη). Να δειχθεί ότι η $X + Y$ έχει τετραγωνική κύμανση

$$\langle X + Y, X + Y \rangle_{[0,t]} = \langle Y, Y \rangle_{[0,t]}$$

για κάθε $t > 0$.

8.6 Έστω $u : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ μετρήσιμη συνάρτηση ώστε με πιθανότητα 1 να ισχύει

$$\int_0^t |u(s, \omega)| ds < \infty$$

για κάθε $t > 0$. Θεωρούμε την ανέλιξη X με

$$X_t := \int_0^t u(s, \omega) ds$$

για κάθε $(t, \omega) \in [0, \infty) \times \Omega$. Να δειχθεί ότι με πιθανότητα 1 η X έχει πεπερασμένη κύμανση σε κάθε πεπερασμένο διάστημα.

Μέρος ΙΙΙ

Το ολοκλήρωμα Ιτô

Κατασκευή τού ολοκληρώματος

Σε αυτό το κεφάλαιο δουλεύουμε σε έναν χώρο πιθανότητας (Ω, \mathcal{F}, P) στον οποίο είναι ορισμένη μια μονοδιάστατη κίνηση Brown $B = (B_t)_{t \geq 0}$, όχι απαραίτητα τυπική. Αυτή η κίνηση ορίζει την επαυξημένη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ μέσω της σχέσης (5.8). Επίσης, θα βλέπουμε μια ανέλιξη $(X_t)_{t \in I}$ στον Ω ως συνάρτηση $X : I \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$. Το I είναι αυθαίρετο σύνολο δεικτών. Στόχος μας είναι να ορίσουμε το ολοκλήρωμα

$$\int_0^\infty X(s, \omega) dB_s$$

για μια ευρεία κλάση ανελιξεων X .

Η πρώτη παράγραφος τού κεφαλαίου δεν χρησιμοποιείται κάπου, αλλά εξηγεί πώς οδηγείται κανείς στο στοχαστικό ολοκλήρωμα, καθώς και τη βασική δυσκολία που υπάρχει για τον ορισμό του. Έτσι γίνεται περισσότερο κατανοητή η πορεία που θα ακολουθήσουμε για τον ορισμό στις επόμενες παραγράφους.

9.1 Η κίνηση Brown ως ολοκληρωτής. Μια θεμελιώδης δυσκολία

Ας υποθέσουμε ότι η κίνηση Brown $(B_t)_{t \geq 0}$ μοντελοποιεί την εξέλιξη τής αξίας μιας εταιρείας στον χρόνο ($B_t < 0$ σημαίνει ότι η εταιρεία έχει χρέη τον χρόνο t). Ένας επενδυτής που τον χρόνο s κρατάει ποσοστό $f(s)$ της εταιρείας, σε ένα μικρό χρονικό διάστημα $[s, s+ds]$ θα κερδίσει $f(s)\{B_{s+ds} - B_s\}$. Έστω $t > 0$ δεδομένο. Υποθέτουμε ότι συναλλαγές γίνονται πολύ συχνά, σχεδόν σε συνεχή χρόνο, και ότι ο επενδυτής αλλάζει το ποσοστό συμμετοχής του στην εταιρεία τις χρονικές στιγμές $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = t$. Το κέρδος που του αποφέρει η μεταβολή τής αξίας τής εταιρείας είναι

$$\sum_{i=0}^{n-1} f(t_i)(B_{t_{i+1}} - B_{t_i}).$$

Αν η διαμέριση $\Delta := \{0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = t\}$ τού $[0, t]$ έχει μικρό πάχος, αυτό το άθροισμα μοιάζει να προσεγγίζει το ολοκλήρωμα Riemann-Stieltjes¹

$$\int_0^t f(s) dB_s. \quad (9.1)$$

Σε αυτό το ολοκλήρωμα οδηγείται κανείς από το πιο πάνω σενάριο αλλά και από άλλες εφαρμογές.

Μια φυσιολογική απαίτηση είναι το ολοκλήρωμα να υπάρχει για κάθε συνεχή $f : [0, t] \rightarrow \mathbb{R}$ (όπως συμβαίνει με άλλα συνηθισμένα είδη ολοκληρωμάτων). Αυτό όμως δεν μπορεί να γίνει με χρήση τής θεωρίας τού ολοκληρώματος Riemann-Stieltjes γιατί αν για σταθερό $\omega \in \Omega$ το ολοκλήρωμα υπάρχει με την έννοια τού Ορισμού Β'.5 (Παράρτημα Β') για κάθε $f \in C([0, t])$, τότε η $(B_s(\omega))_{s \in [0, t]}$ πρέπει να είναι φραγμένης κύμανσης [Θεώρημα 12.1 στο Κεφάλαιο 2 του Hildebrandt

¹Μερικά στοιχεία για το ολοκλήρωμα Riemann-Stieltjes δίνονται στο Παράρτημα Β'.

(1963)]. Όμως με πιθανότητα 1 το μονοπάτι τής κίνησης Brown έχει άπειρη κύμανση σε οποιοδήποτε διάστημα (Πόρισμα 8.9 του Κεφαλαίου 8).

Τι εναλλακτική έχουμε; Η διαδικασία ορισμού τού ολοκληρώματος (9.1) θα ήταν (με χρήση τής Παρατήρησης Β'.6 επειδή η B είναι συνεχής), για δεδομένο $\omega \in \Omega$, να πάρουμε μια οποιαδήποτε ακολουθία $(\Delta_n)_{n \geq 1}$ διαμερίσεων τού $[0, t]$, έστω $\Delta_n := \{0 = t_0^{(n)} < t_1^{(n)} < \dots < t_{k(n)}^{(n)} = t\}$, με $\|\Delta_n\| \rightarrow 0$, να κάνουμε μια επιλογή ενδιάμεσων σημείων $\Xi_n := \{\xi_j^{(n)} : j = 1, 2, \dots, k_n\}$ με $\xi_j^{(n)} \in [t_{j-1}^{(n)}, t_j^{(n)}]$, να ορίσουμε τα αθροίσματα Riemann-Stieltjes

$$S(f, B, \Delta_n, \Xi_n) = \sum_{j=1}^{k_n} f(\xi_j^{(n)})(B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}}), \quad (9.2)$$

και να πάρουμε το όριο $\lim_{n \rightarrow \infty} S(f, B, \Delta_n, \Xi_n)$ ελπίζοντας ότι αυτό υπάρχει. Επειδή, όπως εξηγήσαμε πιο πάνω, αυτή η διαδικασία αποτυχαίνει να πραγματοποιηθεί σημειακά (δηλαδή για κάθε δεδομένο $\omega \in \Omega$) για κάθε $f \in C([0, t])$, θα αρκεστούμε να ζητήσουμε τη σύγκλιση τής ακολουθίας (9.2) στον $L^2(\mathbf{P})$ ή κατά πιθανότητα. Και αυτό το όριο θα είναι το στοχαστικό ολοκλήρωμα.

9.2 Ολοκλήρωση απλών μετρήσιμων ανελίξεων

Υπενθυμίζουμε ότι μια ανέλιξη $X : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ λέγεται **μετρήσιμη** αν είναι $\mathcal{B}([0, \infty)) \otimes \mathcal{F}/\mathcal{B}(\mathbb{R})$ -μετρήσιμη (Ορισμός 4.2).

Όπως είπαμε και πιο πάνω, θεωρούμε στον χώρο πιθανότητας την επαυξημένη διήθηση που παράγει η κίνηση Brown [σχέση (5.8)].

Ορισμός 9.1. Ονομάζουμε \mathcal{H}^2 το σύνολο όλων των μετρήσιμων και προσαρμοσμένων ανελίξεων X που ικανοποιούν

$$\|X\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}^2 := \mathbf{E} \left(\int_0^\infty X(s, \omega)^2 ds \right) < \infty. \quad (9.3)$$

Η $\|\cdot\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}$ είναι η L^2 νόρμα στον χώρο $L^2([0, \infty) \times \Omega, \mathcal{B}([0, \infty)) \otimes \mathcal{F}, \lambda \times \mathbf{P})$, όπου λ είναι το μέτρο Lebesgue (θυμηθείτε τη συζήτηση για τους χώρους L^p, \mathcal{L}^p στην Παράγραφο 1.5). Πιο κάτω θα χρησιμοποιήσουμε και την L^2 νόρμα στον χώρο $L^2(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ και, κατά ανάλογο τρόπο, θα τη συμβολίζουμε με $\|\cdot\|_{L^2(\mathbf{P})}$

Ορισμός 9.2. Ονομάζουμε \mathcal{H}_0^2 το σύνολο των ανελίξεων τής μορφής

$$X(t, \omega) = \sum_{i=1}^k A_i(\omega) \mathbf{1}_{(t_i, t_{i+1}]}(t) \quad (9.4)$$

με $k \in \mathbb{N}^+, 0 \leq t_1 < \dots < t_{k+1}$, την A_i να είναι \mathcal{F}_{t_i} -μετρήσιμη, και $\mathbf{E}(A_i^2) < \infty$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, k$.

Ισχύει $\mathcal{H}_0^2 \subset \mathcal{H}^2$ γιατί μία X όπως στην (9.4) ικανοποιεί την (9.3), είναι προσαρμοσμένη, και τέλος είναι μετρήσιμη γιατί για κάθε $C \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$ ισχύει

$$X^{-1}(C) = \cup_{i=1}^k \{(t_i, t_{i+1}] \times A_i^{-1}(C)\} \in \mathcal{B}([0, \infty)) \otimes \mathcal{F}.$$

Ορισμός 9.3. Για $X \in \mathcal{H}_0^2$ όπως στην (9.4), ορίζουμε το ολοκλήρωμα τής X ως προς την κίνηση Brown ως

$$I(X) := \sum_{i=1}^k A_i(\omega)(B_{t_{i+1}} - B_{t_i}). \quad (9.5)$$

Είναι εύκολο να δείξει κανείς ότι ο ορισμός δεν εξαρτάται από τον τρόπο που γράφουμε τη X , δηλαδή αν πάρουμε άλλη γραφή με άλλα διαιρετικά σημεία t_i και αντίστοιχες συναρτήσεις A_i . Το $I(X)$ είναι μια τυχαία μεταβλητή στον Ω και συνήθως το γράφουμε ως

$$\int_0^\infty X(s, \omega) dB_s.$$

Όπως κάνουμε γενικά με τις τυχαίες μεταβλητές, έτσι και εδώ, για την τιμή της $I(X)$ σε ένα $\omega \in \Omega$ δεν χρησιμοποιούμε τον πλήρη συμβολισμό $I(X)(\omega)$.

Θα χρησιμοποιήσουμε πολλές φορές πιο κάτω ότι για $0 \leq s < t$,

$$\eta B_t - B_s \text{ είναι ανεξάρτητη από τη } \sigma\text{-άλγεβρα } \mathcal{F}_s, \quad (9.6)$$

το οποίο δικαιολογείται συνδυάζοντας την Παρατήρηση 5.11(α) και την Πρόταση 5.12.

Πρόταση 9.4. Έστω $X, Y \in \mathcal{H}_0^2$, και $a \in \mathbb{R}$. Τότε

$$(i) I(aX + Y) = aI(X) + I(Y).$$

$$(ii) \mathbf{E}(I(X)) = 0.$$

Απόδειξη. (i) Αρκεί να το δείξει κανείς για $Y = 0$ και έπειτα για $a = 1$. Αν η X γράφεται όπως στην (9.4), τότε η aX έχει παρόμοια γραφή με μόνη διαφορά ότι τη θέση της $A_i(\omega)$ έχει η $aA_i(\omega)$. Έτσι ο ορισμός της I δίνει $I(aX) = aI(X)$. Για να δείξουμε την $I(X + Y) = I(X) + I(Y)$ γράφουμε τις X, Y στη μορφή (9.4) και έπειτα φέρνουμε και τη $X + Y$ στην ίδια μορφή. Η απόδειξη αφήνεται ως άσκηση.

(ii) Έστω ότι η X γράφεται όπως στην (9.4). Οι $A_i, B_{t_{i+1}} - B_{t_i}$ είναι ανεξάρτητες γιατί η A_i είναι \mathcal{F}_{t_i} -μετρήσιμη, ενώ η $B_{t_{i+1}} - B_{t_i}$ είναι ανεξάρτητη της \mathcal{F}_{t_i} , όπως σημειώσαμε στην (9.6). Έπεται ότι $\mathbf{E}\{A_i(B_{t_{i+1}} - B_{t_i})\} = 0$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, k$ και άρα $\mathbf{E}(I(X)) = 0$. ■

Λήμμα 9.5 (Ισομετρία Ιτό στον \mathcal{H}_0^2). Αν $X \in \mathcal{H}_0^2$, τότε

$$\mathbf{E}\left\{\left(\int_0^\infty X(s, \omega) dB_s\right)^2\right\} = \mathbf{E}\left(\int_0^\infty X(s, \omega)^2 ds\right). \quad (9.7)$$

Απόδειξη. Έστω ότι η X είναι όπως στην (9.4). Τότε

$$X(s, \omega)^2 = \sum_{i=1}^k A_i^2(\omega) \mathbf{1}_{(t_i, t_{i+1}]}(s)$$

για κάθε $s \geq 0$ και το δεξί μέλος της (9.7) ισούται με

$$\sum_{i=1}^k \mathbf{E}\{A_i^2(\omega)\}(t_{i+1} - t_i).$$

Ο υπολογισμός του αριστερού μέλους της (9.7) γίνεται ακριβώς όπως στην Άσκηση 2.12. Παίρνουμε το τετράγωνο της έκφρασης (9.5) και παρατηρούμε ότι για $i < j$ η τυχαία μεταβλητή

$$A_i(\omega)(B_{t_{i+1}} - B_{t_i})A_j(\omega)(B_{t_{j+1}} - B_{t_j})$$

έχει μέση τιμή μηδέν. Αυτό γιατί η $B_{t_{j+1}} - B_{t_j}$ έχει μέση τιμή 0 και είναι ανεξάρτητη από την $A_i(\omega)(B_{t_{i+1}} - B_{t_i})A_j(\omega)$ γιατί η τελευταία είναι \mathcal{F}_{t_j} -μετρήσιμη, ενώ η $B_{t_{j+1}} - B_{t_j}$ είναι ανεξάρτητη

9.3 Επέκταση σε μετρήσιμες ανελίξεις

της \mathcal{F}_{t_i} . Χρειάζεται βέβαια να δείξουμε ότι $A_i(\omega)(B_{t_{i+1}} - B_{t_i})A_j(\omega) \in L^1$, που έπεται με χρήση ανεξαρτησίας και της ανισότητας Cauchy-Schwarz, δηλαδή

$$\begin{aligned} \mathbf{E} |A_i(\omega)(B_{t_{i+1}} - B_{t_i})A_j(\omega)| &\leq \{\mathbf{E} |A_i(\omega)(B_{t_{i+1}} - B_{t_i})|^2\}^{1/2} \{\mathbf{E} A_j^2(\omega)\}^{1/2} \\ &= \{\mathbf{E} A_i^2(\omega)\}^{1/2} (t_{i+1} - t_i)^{1/2} \{\mathbf{E} A_j^2(\omega)\}^{1/2} < \infty. \end{aligned}$$

Άρα

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(I(X)^2) &= \sum_{i=1}^k \mathbf{E}\{A_i^2(\omega)(B_{t_{i+1}} - B_{t_i})^2\} = \sum_{i=1}^k \mathbf{E}\{A_i^2(\omega)\} \mathbf{E}\{(B_{t_{i+1}} - B_{t_i})^2\} \\ &= \sum_{i=1}^k \mathbf{E}\{A_i^2(\omega)\}(t_{i+1} - t_i). \end{aligned}$$

Χρησιμοποιήσαμε την ανεξαρτησία των $A_i^2(\omega), B_{t_{i+1}} - B_{t_i}$ και το ότι η δεύτερη ροπή της $B_{t_{i+1}} - B_{t_i}$ είναι $t_{i+1} - t_i$. Ο ισχυρισμός μας αποδείχθηκε. ■

9.3 Επέκταση σε μετρήσιμες ανελίξεις

Σε αυτή την παράγραφο θα επεκτείνουμε τον ορισμό του $I(X)$ ώστε να έχει νόημα για κάθε X στοιχείο του \mathcal{H}^2 . Για την επέκταση υπάρχει μία φυσιολογική επιλογή αφού, όπως θα δείξουμε, ο \mathcal{H}_0^2 είναι πυκνό υποσύνολο του \mathcal{H}^2 .

Λήμμα 9.6. *Ο \mathcal{H}_0^2 είναι πυκνός υπόχωρος του \mathcal{H}^2*

Η απόδειξη του λήμματος δίνεται στο Παράρτημα Δ'. Είναι θέμα ανάλυσης.

Θεώρημα 9.7. *Για $X \in \mathcal{H}^2$ και ακολουθία $(X_n)_{n \geq 1}$ στον \mathcal{H}_0^2 με $\|X - X_n\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})} \rightarrow 0$,*

(i) *Η ακολουθία $(I(X_n))_{n \geq 1}$ συγκλίνει στον $L^2(\mathbf{P})$.*

(ii) *Το όριο δεν εξαρτάται από την επιλογή της ακολουθίας $(X_n)_{n \geq 1}$.*

Απόδειξη. (i) Για $m, n \geq 1$, χρησιμοποιώντας το ότι η I είναι γραμμική και ισομετρία στο \mathcal{H}_0^2 (Πρόταση 9.4 και Λήμμα 9.5), έχουμε

$$\|I(X_n) - I(X_m)\|_{L^2(\mathbf{P})} = \|I(X_n - X_m)\|_{L^2(\mathbf{P})} = \|X_n - X_m\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}.$$

Η τελευταία ποσότητα τείνει στο 0 για $m, n \rightarrow \infty$ αφού η $(X_n)_{n \geq 1}$ συγκλίνει. Άρα η $(I(X_n))_{n \geq 1}$ είναι βασική ακολουθία στον $L^2(\mathbf{P})$, ο οποίος είναι πλήρης. Άρα συγκλίνει.

(ii) Αυτό έπεται άμεσα από το (i). Έστω δύο ακολουθίες $(X_n)_{n \geq 1}, (Y_n)_{n \geq 1}$ στον \mathcal{H}_0^2 οι οποίες συγκλίνουν στη X ως προς τη $\|\cdot\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}$. Τότε και η ακολουθία $(Z_n)_{n \geq 1}$ που ορίζεται ως $X_1, Y_1, X_2, Y_2, \dots$ συγκλίνει στη X και, επομένως, από το (i), η $(I(Z_n))_{n \geq 1}$ συγκλίνει. Άρα

$$\lim_{n \rightarrow \infty} I(X_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} I(Z_{2n+1}) = \lim_{n \rightarrow \infty} I(Z_{2n}) = \lim_{n \rightarrow \infty} I(Y_n). \quad \blacksquare$$

Το προηγούμενο λήμμα επιτρέπει να διατυπώσουμε τον εξής ορισμό.

Ορισμός 9.8. Για $X \in \mathcal{H}^2$, ορίζουμε

$$I(X) := \lim_{n \rightarrow \infty} I(X_n),$$

όπου $(X_n)_{n \geq 1}$ είναι μια οποιαδήποτε ακολουθία στον \mathcal{H}_0^2 με $\|X - X_n\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})} \rightarrow 0$.

Πάλι, για το $I(X)$, χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό

$$\int_0^\infty X(s, \omega) dB_s.$$

Πρόταση 9.9. Έστω $X, Y \in \mathcal{H}^2$, και $a \in \mathbb{R}$. Τότε:

- (i) $I(aX + Y) = aI(X) + I(Y)$.
- (ii) $\mathbf{E}(I(X)) = 0$.

Απόδειξη. (i) Παίρνουμε ακολουθίες $(X_n)_{n \geq 1}, (Y_n)_{n \geq 1}$ που συγκλίνουν στις X, Y αντίστοιχα. Τότε $aX_n + Y_n \rightarrow aX + Y$ στον $L^2(\lambda \times \mathbf{P})$, οπότε

$$I(aX + Y) = \lim_{n \rightarrow \infty} I(aX_n + Y_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} aI(X_n) + I(Y_n) = aI(X) + I(Y).$$

Η δεύτερη ισότητα προκύπτει από τη γραμμικότητα τής I στον \mathcal{H}_0^2 (Πρόταση 9.4).

(ii) Τώρα, για $X \in \mathcal{H}^2$ θεωρούμε ακολουθία $(X_n)_{n \geq 1}$ όπως στο Θεώρημα 9.7. Η $(I(X_n))_{n \geq 1}$ συγκλίνει στην $I(X)$ στον $L^2(\mathbf{P})$, άρα και στον $L^1(\mathbf{P})$. Κατά συνέπεια $\mathbf{E}(I(X_n)) \rightarrow \mathbf{E}(I(X))$ και το συμπέρασμα έπεται. ■

Η απεικόνιση τού στοχαστικού ολοκληρώματος

$$I : \mathcal{H}^2 \rightarrow L^2(\mathbf{P}),$$

με βάση το (i) της προηγούμενης πρότασης, είναι γραμμική. Θα δείξουμε επιπλέον ότι είναι συνεχής και μάλιστα ισομετρία.

Πόρισμα 9.10 (Ισομετρία Itô στον \mathcal{H}^2). Αν $X \in \mathcal{H}^2$, τότε

$$\|I(X)\|_{L^2(\mathbf{P})} = \|X\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}.$$

Δηλαδή

$$\mathbf{E} \left\{ \left(\int_0^\infty X(s, \omega) dB_s \right)^2 \right\} = \mathbf{E} \left(\int_0^\infty X(s, \omega)^2 ds \right). \quad (9.8)$$

Απόδειξη. Θεωρούμε ακολουθία $(X_n)_{n \geq 1}$ στον \mathcal{H}_0^2 με $\lim_{n \rightarrow \infty} X_n = X$ ως προς τη νόρμα $\|\cdot\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}$. Έχουμε ότι $\lim_{n \rightarrow \infty} I(X_n) = I(X)$ στην $\|\cdot\|_{L^2(\mathbf{P})}$ νόρμα και

$$\|I(X_n)\|_{L^2(\mathbf{P})} = \|X_n\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}$$

για κάθε $n \geq 1$. Επειδή σε ένα χώρο με νόρμα η συνάρτηση νόρμα είναι συνεχής (έπεται από την $\| \|x\| - \|y\| \| \leq \|x - y\|$), για $n \rightarrow \infty$, η τελευταία ισότητα δίνει το ζητούμενο. ■

Το επόμενο βήμα είναι να ορίσουμε το ολοκλήρωμα για ανελίξη με σύνολο δεικτών ένα υποδιάστημα $[a, b] \subset [0, \infty)$.

Θα ορίσουμε πρώτα κάποιους χώρους ανελίξεων. Μια ανελίξη $X : [a, b] \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ λέγεται μετρήσιμη αν είναι μετρήσιμη ως προς τη σ-άλγεβρα $\mathcal{B}([a, b]) \otimes \mathcal{F}$. Ο χώρος $\mathcal{H}^2[a, b]$ περιέχει ακριβώς τις μετρήσιμες προσαρμοσμένες $X : [a, b] \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$\mathbf{E} \left(\int_a^b X(s, \omega)^2 ds \right) < \infty,$$

ενώ ο $\mathcal{H}_0^2[a, b]$ περιέχει τις $X : [a, b] \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ της μορφής

$$X(t, \omega) = \sum_{i=1}^k A_i(\omega) \mathbf{1}_{(t_i, t_{i+1}]}(t) \text{ για κάθε } (t, \omega) \in [a, b] \times \Omega, \quad (9.9)$$

με $k \in \mathbb{N}^+$, $a \leq t_0 < t_1 < \dots < t_{k+1} \leq b$, την A_i να είναι \mathcal{F}_{t_i} -μετρήσιμη, και $\mathbf{E}(A_i^2) < \infty$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, k$.

Για μια $X \in \mathcal{H}^2[a, b]$ θεωρούμε την επέκταση $\hat{X} : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ της X με

$$\hat{X}(t, \omega) = \begin{cases} X(t, \omega) & \text{αν } t \in [a, b], \\ 0 & \text{αν } t \in [0, \infty) \setminus [a, b], \end{cases} \quad (9.10)$$

η οποία είναι στοιχείο του \mathcal{H}^2 και ορίζουμε

$$\int_a^b X(s, \omega) dB_s := I(\hat{X}) = \int_0^\infty \hat{X}(s, \omega) dB_s.$$

Ειδικά για το ολοκλήρωμα $\int_0^t X(s, \omega) dB(s)$ χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό $I_t(X)$.

Βέβαια το $I(\hat{X})$ είναι το όριο $\lim_{n \rightarrow \infty} I(X_n)$ στον L^2 όπου $(X_n)_{n \geq 1}$ είναι μια ακολουθία στον \mathcal{H}_0^2 με $\|\hat{X} - X_n\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})} \rightarrow 0$, η ύπαρξη της οποίας εξασφαλίζεται από το Λήμμα 9.6. Από την απόδειξη του λήμματος προκύπτει ότι για τη $(X_n)_{n \geq 1}$ μπορούμε να υποθέσουμε ότι $X_n(t, \omega) = 0$ αν $t \in [0, \infty) \setminus [a, b]$ και άρα υπάρχει $Y_n \in \mathcal{H}_0^2[a, b]$ ώστε $X_n = \hat{Y}_n$.

9.4 Υπολογισμοί κάποιων ολοκληρωμάτων

Παράδειγμα 9.11. Για B τυπική κίνηση Brown και $t > 0$,

$$\int_0^t B_s dB_s = \frac{1}{2} B_t^2 - \frac{1}{2} t. \quad (9.11)$$

Απόδειξη. Ακολουθούμε τη διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Έχουμε $X(s, \omega) = B_s$ για κάθε $s \in [0, t]$ και έπειτα $\hat{X}(s, \omega) := B_s \mathbf{1}_{s \in [0, t]}$ για κάθε $t \in [0, \infty)$. Η \hat{X} δεν είναι στοιχείο του \mathcal{H}_0^2 αλλά του \mathcal{H}^2 (για τη μετρησιμότητα, εφαρμόζουμε την Άσκηση 4.12), οπότε βρίσκουμε ακολουθία στοιχείων του \mathcal{H}_0^2 που την προσεγγίζουν.

Για $n \in \mathbb{N}^+$ και $0 \leq j \leq 2^n$ θέτουμε $t_j^{(n)} := jt/2^n$. Και έπειτα, για $(s, \omega) \in [0, \infty) \times \Omega$ και $n \in \mathbb{N}^+$,

$$X_n(s, \omega) := \sum_{j=0}^{2^n-1} B_{t_j^{(n)}} \mathbf{1}_{(t_j^{(n)}, t_{j+1}^{(n)}]}(s). \quad (9.12)$$

Για την απόσταση των \hat{X}, X_n στον \mathcal{H}^2 έχουμε

$$\begin{aligned} \|\hat{X} - X_n\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}^2 &= \mathbf{E} \left(\int_0^t \{\hat{X}(s, \omega) - X_n(s, \omega)\}^2 ds \right) = \mathbf{E} \left(\sum_{j=0}^{2^n-1} \int_{t_j^{(n)}}^{t_{j+1}^{(n)}} (B_s - B_{t_j^{(n)}})^2 ds \right) \\ &= \sum_{j=0}^{2^n-1} \int_{t_j^{(n)}}^{t_{j+1}^{(n)}} \mathbf{E}(B_s - B_{t_j^{(n)}})^2 ds = \sum_{j=0}^{2^n-1} \int_{t_j^{(n)}}^{t_{j+1}^{(n)}} (s - t_j^{(n)}) ds \\ &= \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{2^n-1} (t_{j+1}^{(n)} - t_j^{(n)})^2 = \frac{1}{2} 2^n \frac{t^2}{2^{2n}} = \frac{t^2}{2^{n+1}}, \end{aligned}$$

9.5 Το ολοκλήρωμα και δέσμευση

που τείνει στο 0 για $n \rightarrow \infty$.

Έπειτα, χρησιμοποιώντας την ταυτότητα $2x(y-x) = y^2 - x^2 - (y-x)^2$ για $x, y \in \mathbb{R}$, παίρνουμε

$$\begin{aligned} I(X_n) &= \sum_{j=0}^{2^n-1} B_{t_j^{(n)}}(B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}}) = \frac{1}{2} \left(\sum_{j=0}^{2^n-1} (B_{t_{j+1}^{(n)}}^2 - B_{t_j^{(n)}}^2) - \sum_{j=0}^{2^n-1} (B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}})^2 \right) \\ &= \frac{1}{2} B_t^2 - \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{2^n-1} (B_{t_{j+1}^{(n)}}^2 - B_{t_j^{(n)}}^2)^2 \rightarrow \frac{1}{2} B_t^2 - \frac{t}{2} \end{aligned}$$

στον $L^2(\mathbf{P})$ για $n \rightarrow \infty$ λόγω του Θεωρήματος 8.8. Μάλιστα το ίδιο θεώρημα, εξαιτίας της επιλογής των σημείων $t_j^{(n)}$, δίνει ότι $I(X_n) \rightarrow (B_t^2 - t)/2$ με πιθανότητα 1. ■

Παράδειγμα 9.12. Για B τυπική κίνηση Brown και $t > 0$,

$$\int_0^t B_s^2 dB_s = \frac{1}{3} B_t^3 - \int_0^t B_s ds.$$

Απόδειξη. Εδώ ο ολοκληρωτέος είναι η ανέλιξη $Y(s, \omega) = B_s^2$ για κάθε $s \in [0, t]$. Ορίζουμε τα $t_j^{(n)}$ όπως στο προηγούμενο παράδειγμα. Και για $(s, \omega) \in [0, \infty) \times \Omega$,

$$\begin{aligned} \hat{Y}(s, \omega) &:= B_s^2 \mathbf{1}_{s \in [0, t]}, \\ Y_n(s, \omega) &:= \sum_{j=0}^{2^n-1} B_{t_j^{(n)}}^2 \mathbf{1}_{(t_j^{(n)}, t_{j+1}^{(n)}](s)}. \end{aligned}$$

Μπορεί να δεί κανείς ότι $\lim_{n \rightarrow \infty} \|\hat{Y} - Y_n\|_{\mathcal{L}^2(\lambda \times \mathbf{P})}^2 = 0$. Για την εύρεση τού ορίου τής

$$I(Y_n) = \sum_{j=0}^{2^n-1} B_{t_j^{(n)}}^2 (B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}}),$$

παρατηρούμε ότι

$$\begin{aligned} B_{t_{j+1}^{(n)}}^3 &= (B_{t_j^{(n)}} + B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}})^3 \\ &= B_{t_j^{(n)}}^3 + 3B_{t_j^{(n)}}^2 (B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}}) + 3B_{t_j^{(n)}} (B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}})^2 + (B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}})^3. \end{aligned}$$

Προσθέτοντας αυτές τις ισότητες για $j = 0, 1, \dots, 2^n - 1$ παίρνουμε

$$B_t^3 = 3I(Y_n) + 3 \sum_{j=0}^{2^n-1} B_{t_j^{(n)}} (B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}})^2 + \sum_{j=0}^{2^n-1} (B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}})^3.$$

Το πρώτο άθροισμα συγκλίνει στον $L^2(\mathbf{P})$ στο $3 \int_0^t B_s ds$ ενώ το δεύτερο στο 0 (Ασκήσεις 8.3, 8.2). Και το συμπέρασμα έπεται. ■

9.5 Το ολοκλήρωμα και δέσμευση

Πρόταση 9.13. Για $0 \leq a < c < b$ και $X \in \mathcal{H}^2[a, b]$ έχουμε:

- (i) $H \int_a^b X(s, \omega) dB_s$ είναι \mathcal{F}_b -μετρήσιμη τυχαία μεταβλητή. Ακριβέστερα, το ολοκλήρωμα $\int_a^b X(s, \omega) dB_s$ ως στοιχείο τού $L^2(\mathbf{P})$ έχει αντιπρόσωπο τυχαία μεταβλητή που είναι \mathcal{F}_b -μετρήσιμη.

(ii) Με πιθανότητα I ισχύει

$$\int_a^b X(s, \omega) dB_s = \int_a^c X(s, \omega) dB_s + \int_c^b X(s, \omega) dB_s.$$

(iii) Με πιθανότητα I ισχύει

$$\mathbf{E} \left\{ \int_a^b X(s, \omega) dB_s \middle| \mathcal{F}_a \right\} = 0.$$

(iv) (Ισομετρία Itô με δέσμευση) Με πιθανότητα I ισχύει

$$\mathbf{E} \left\{ \left(\int_a^b X(s, \omega) dB_s \right)^2 \middle| \mathcal{F}_a \right\} = \mathbf{E} \left\{ \int_a^b X(s, \omega)^2 ds \middle| \mathcal{F}_a \right\}.$$

Απόδειξη. (i) Έστω \hat{X} η ανέλιξη που ορίστηκε στην (9.10). Από το Λήμμα 9.6, υπάρχει $(X_n)_{n \geq 1}$ στον \mathcal{H}_0^2 με $\lim_{n \rightarrow \infty} X_n = \hat{X}$ στη νόρμα $\|\cdot\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}$. Όπως παρατηρήσαμε πριν τη διατύπωση τής πρότασης, μπορούμε να έχουμε ότι κάθε X_n ισούται με μια \hat{Y}_n με την $Y_n \in \mathcal{H}_0^2[a, b]$. Τότε κάθε $I(X_n)$, είναι \mathcal{F}_b -μετρήσιμη. Επειδή $\lim_{n \rightarrow \infty} I(X_n) = I(\hat{X})$ στην $\|\cdot\|_{L^2(\mathbf{P})}$ νόρμα, έπεται ότι υπάρχει υπακολουθία τής $I(X_n)$ που συγκλίνει στην $I(\hat{X})$ σχεδόν παντού. Μπορούμε μάλιστα να υποθέσουμε ότι η ίδια η $I(X_n)$ συγκλίνει (αλλιώς, την αντικαθιστούμε με μια συγκλίνουσα υπακολουθία της σε ό,τι ακολουθεί). Έστω $A := \{\omega \in \Omega : \lim_{n \rightarrow \infty} I(X_n) \text{ υπάρχει στο } \mathbb{R}\}$. Εύκολα δείχνουμε ότι $A \in \mathcal{F}_b$. Θέτοντας

$$Z(\omega) := \begin{cases} \lim_{n \rightarrow \infty} I(X_n) & \text{αν } \omega \in A, \\ 0 & \text{αν } \omega \in \Omega \setminus A, \end{cases}$$

έχουμε ότι η Z είναι \mathcal{F}_b -μετρήσιμη και, επειδή $\mathbf{P}(\Omega \setminus A) = 0$, ανήκει στην κλάση τού $I(\hat{X})$. Η Z είναι ο αντιπρόσωπος που ζητάμε.

(ii) Έστω \hat{X} όπως ορίστηκε στην (9.10) και

$$\begin{aligned} X_1(t, \omega) &= \hat{X}(t, \omega) \mathbf{1}_{t \leq c}, \\ X_2(t, \omega) &= \hat{X}(t, \omega) \mathbf{1}_{t > c} \end{aligned}$$

για κάθε $(t, \omega) \in \Omega \times [0, \infty)$. Τότε το αριστερό μέλος τής ζητούμενης ισότητας ισούται με $I(\hat{X})$, ενώ το δεξί με $I(X_1) + I(X_2)$, τα οποία ισούνται λόγω του ότι $\hat{X} = X_1 + X_2$ και της γραμμικότητας τής I (Πρόταση 9.9).

(iii) Υποθέτουμε πρώτα ότι η $X \in \mathcal{H}_0^2[a, b]$ και γράφεται όπως στην (9.9). Τότε

$$\mathbf{E} \left\{ \sum_{i=1}^k A_i(\omega) (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}) \middle| \mathcal{F}_a \right\} = \sum_{i=1}^k \mathbf{E} \left\{ A_i(\omega) (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}) \middle| \mathcal{F}_a \right\}.$$

Για $1 \leq i \leq k$, η $\mathcal{F}_a \subset \mathcal{F}_{t_i}$ συνεπάγεται ότι ο i όρος τού τελευταίου αθροίσματος ισούται με

$$\begin{aligned} \mathbf{E} \left\{ \mathbf{E} \left\{ A_i(\omega) (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}) \middle| \mathcal{F}_{t_i} \right\} \middle| \mathcal{F}_a \right\} &= \mathbf{E} \left\{ A_i(\omega) \mathbf{E} \left\{ (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}) \middle| \mathcal{F}_{t_i} \right\} \middle| \mathcal{F}_a \right\} \\ &= \mathbf{E} \left\{ A_i(\omega) \mathbf{E} (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}) \middle| \mathcal{F}_a \right\} = 0 \end{aligned}$$

αφού η $B_{t_{i+1}} - B_{t_i}$ είναι ανεξάρτητη από την \mathcal{F}_{t_i} . Τώρα για τη γενική περίπτωση, υπάρχει ακολουθία $(X_n)_{n \geq 1}$ στον $\mathcal{H}_0^2[a, b]$ ώστε $\|\hat{X} - \hat{X}_n\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})} \rightarrow 0$. Επειδή για κάθε X_n έχουμε δείξει την πρόταση, ισχύει ότι

$$\begin{aligned} \mathbf{E} \left[\left(\mathbf{E} \left\{ \int_a^b X(s, \omega) dB_s \middle| \mathcal{F}_a \right\} \right)^2 \right] &= \mathbf{E} \left[\left(\mathbf{E} \left\{ \int_a^b (X(s, \omega) - X_n(s, \omega)) dB_s \middle| \mathcal{F}_a \right\} \right)^2 \right] \\ &\leq \mathbf{E} \left(\mathbf{E} \left\{ \left(\int_a^b (X(s, \omega) - X_n(s, \omega)) dB_s \right)^2 \middle| \mathcal{F}_a \right\} \right) = \mathbf{E} \left\{ \left(\int_a^b (X(s, \omega) - X_n(s, \omega)) dB_s \right)^2 \right\} \\ &= \mathbf{E}(\{I(\hat{X}) - I(\hat{X}_n)\}^2) = \|\hat{X} - \hat{X}_n\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}^2. \end{aligned}$$

Η ανισότητα στη δεύτερη γραμμή προκύπτει από την ανισότητα Jensen για τη δεσμευμένη μέση τιμή. Η πρώτη ισότητα στην τελευταία γραμμή είναι απλώς ο ορισμός των ολοκληρωμάτων της προηγούμενης γραμμής. Η επόμενη ισότητα προκύπτει από τη γραμμικότητα της I και την ισομετρία Itô. Η ποσότητα στην οποία καταλήξαμε τείνει στο 0 για $n \rightarrow \infty$ και ο ισχυρισμός μας αποδείχθηκε.

(iv) Αρκεί να δείξουμε ότι για κάθε $A \in \mathcal{F}_a$ ισχύει

$$\mathbf{E} \left\{ \mathbf{1}_A \left(\int_a^b X(s, \omega) dB_s \right)^2 \right\} = \mathbf{E} \left\{ \mathbf{1}_A \int_a^b X(s, \omega)^2 ds \right\}. \quad (9.13)$$

Εφαρμόζοντας την ισομετρία του Itô στην ανάλυση

$$X_1(t, \omega) = \begin{cases} \mathbf{1}_A(\omega)X(t, \omega) & t \in [a, b], \\ 0 & t \in [0, \infty) \setminus [a, b], \end{cases}$$

η οποία είναι στοιχείο του \mathcal{H}^2 γιατί $A \in \mathcal{F}_a$, παίρνουμε ότι

$$\mathbf{E} \left\{ \left(\int_a^b \mathbf{1}_A X(s, \omega) dB_s \right)^2 \right\} = \mathbf{E} \left\{ \int_a^b \mathbf{1}_A^2 X(s, \omega)^2 ds \right\}.$$

Το $\mathbf{1}_A$ μπορεί να βγει έξω από το ολοκλήρωμα του αριστερού μέλους λόγω της Άσκησης 9.4. Το ίδιο γίνεται και στο δεξί μέλος και έτσι παίρνουμε την (9.13). ■

9.6 Μετρησιμότητα ολοκληρωμάτων Lebesgue

Αυτή η παράγραφος αφορά το ολοκλήρωμα ως προς το μέτρο Lebesgue στο $[0, \infty)$, και συγκεκριμένα δίνει το ανάλογο της Πρότασης 9.13(i) για αυτό το ολοκλήρωμα. Όπως παντού στις σημειώσεις αυτές, την ολοκλήρωση ως προς τη μεταβλητή t ως προς αυτό το μέτρο τη σημειώνουμε απλώς ως dt αντί του σχολαστικού $d\lambda(t)$.

Θεωρούμε ότι στον χώρο πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ υπάρχει μια πλήρης διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ (δηλαδή η \mathcal{F}_0 περιέχει όλα τα \mathbf{P} -μηδενοσύνολα), και ο όρος «προσαρμοσμένη» για μια ανάλυση αναφέρεται σε αυτή τη διήθηση.

Πρόταση 9.14. Έστω $X : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ μετρήσιμη και προσαρμοσμένη ανάλυση ώστε με πιθανότητα 1 να ισχύει $\int_0^t |X(s, \omega)| ds < \infty$ για κάθε $t > 0$, τότε η ανάλυση Y που ορίζεται για κάθε $t \geq 0$ ως

$$Y(t, \omega) := \begin{cases} \int_0^t X(s, \omega) ds & \text{αν } \int_0^t |X(s, \omega)| ds < \infty, \\ 0 & \text{διαφορετικά,} \end{cases}$$

είναι προσαρμοσμένη.

Η απόδειξη δίνεται στο Παράρτημα Δ'. Με βάση την υπόθεση, με πιθανότητα 1, η ανέλιξη ορίζεται από τον πρώτο κλάδο για κάθε $t \geq 0$.

Αν το ολοκλήρωμα ήταν Riemann, η απόδειξη θα ήταν άμεση. Γιατί θα ήταν ίσο με το όριο αθροισμάτων Riemann, και αυτά, ως πεπερασμένα αθροίσματα \mathcal{F}_t -μετρήσιμων συναρτήσεων, είναι \mathcal{F}_t -μετρήσιμα.

Ασκήσεις

Στις ασκήσεις πιο κάτω, B είναι μια τυπική κίνηση Brown.

9.1 Έστω $f : \mathbb{Q} \rightarrow \mathbb{R}$ ομοιόμορφα συνεχής. Ναδειχθεί ότι:

(α) Για κάθε Cauchy (βασική) ακολουθία $(x_n)_{n \geq 1}$ στο \mathbb{Q} , η ακολουθία $(f(x_n))_{n \geq 1}$ είναι Cauchy.

(β) Η f έχει μοναδική συνεχή επέκταση $\tilde{f} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$.

9.2 Για $a \in \mathbb{R}$ ναδειχθεί ότι η ανέλιξη X με $X(t, \omega) := e^{aB_t}$ για κάθε $(t, \omega) \in [0, \infty) \times \Omega$ δεν είναι στοιχείο του \mathcal{H}^2 , αλλά ο περιορισμός της στο $[0, 1] \times \Omega$ είναι στοιχείο του $\mathcal{H}^2[0, 1]$. Έπειτα να υπολογιστεί η διασπορά της τυχαίας μεταβλητής $I(a) := \int_0^1 e^{aB_t} dB_t$.

9.3 Για $a \in \mathbb{R}$, θεωρούμε την ανέλιξη X με $X(t, \omega) := e^{aB_t^2}$ για κάθε $(t, \omega) \in [0, 1] \times \Omega$. Να βρεθεί για ποια a είναι η X στοιχείο του $\mathcal{H}^2[0, 1]$ και να υπολογιστεί η διασπορά της τυχαίας μεταβλητής $J(a) := \int_0^1 e^{aB_t^2} dB_t$.

9.4 Στο πλαίσιο της Παραγράφου 9.3, έστω $0 \leq a < b$, $X \in \mathcal{H}^2[a, b]$, και Z μια \mathcal{F}_a -μετρήσιμη και φραγμένη τυχαία μεταβλητή. Ναδειχθεί ότι

$$\int_a^b Z(\omega) X(s, \omega) dB_s = Z(\omega) \int_a^b X(s, \omega) dB_s.$$

[Η \mathcal{F}_a -μετρησιμότητα της Z χρειάζεται για να έχουμε ότι η ZX είναι προσαρμοσμένη ανέλιξη.]

9.5 (α) Αν $f, g \in \mathcal{H}^2$, τότε

$$\mathbf{E}\{I(f)I(g)\} = \int_0^\infty \mathbf{E}\{f(t, \omega)g(t, \omega)\} dt.$$

(β) Ποια η συνδιακύμανση των τυχαίων μεταβλητών $\int_0^1 tB_t dB_t, \int_0^2 B_t^2 dB_t$;

9.6 Ναδειχθεί ότι για κάθε $t > 0$ ισχύει

$$\int_0^t s dB_s = tB_t - \int_0^t B_s ds.$$

9.7 Στο Παράδειγμα 9.11 είδαμε ότι για κάθε $t > 0$, για $n \rightarrow \infty$, έχουμε στον $L^2(\mathbf{P})$ τη σύγκλιση

$$\sum_{j=0}^{2^n-1} B_{t_j^{(n)}}(B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}}) \rightarrow \frac{1}{2}B_t^2 - \frac{t}{2}.$$

Ναδειχθεί ότι έχουμε επίσης τις συγκλίσεις

$$\sum_{j=0}^{2^n-1} B_{t_{j+1}^{(n)}}(B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}}) \rightarrow \frac{1}{2}B_t^2 + \frac{t}{2},$$

$$\sum_{j=0}^{2^n-1} B_{(t_j^{(n)} + t_{j+1}^{(n)})/2}(B_{t_{j+1}^{(n)}} - B_{t_j^{(n)}}) \rightarrow \frac{1}{2}B_t^2$$

στον $L^2(\mathbf{P})$ καθώς $n \rightarrow \infty$.

9.6 Μετρησιμότητα ολοκληρωμάτων Lebesgue

9.8 Για $0 \leq a < b$ και $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ Borel μετρήσιμη με $\int_a^b f^2(t) dt < \infty$, να δειχθεί ότι η τυχαία μεταβλητή

$$Z(f) := \int_a^b f(t) dB_t$$

ακολουθεί την κατανομή $N(0, \sigma^2)$ με $\sigma^2 = \int_a^b f^2(t) dt$.

Η άσκηση λέει ότι το ολοκλήρωμα Itô κάθε μη τυχαίας συνάρτησης, εφόσον αυτό μπορεί να οριστεί, ακολουθεί την κανονική κατανομή. Αυτό όμως δεν ισχύει για το ολοκλήρωμα Itô όλων των ανελίξεων. Για παράδειγμα, το ολοκλήρωμα στην (9.11) ακολουθεί μια κατανομή με στήριγμα το $[-t/2, \infty)$ την οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε εύκολα και σαφώς δεν είναι κανονική.

9.9 Στο Παράδειγμα 9.12, να δειχθεί ότι $\lim_{n \rightarrow \infty} \|Y - Y_n\|_{L^2(\lambda \times \mathbb{P})}^2 = 0$.

9.10 Έστω $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ Borel μετρήσιμη με $\int_0^1 f^2(t) dt < \infty$. Να δειχθεί ότι η τυχαία μεταβλητή

$$X := \int_0^1 f(t) \{\sin(B_t) + \cos(B_t)\} dB_t$$

έχει διασπορά $\text{Var}(X) = \int_0^1 f^2(t) dt$.

10

Το ολοκλήρωμα ως ανέλιξη

Στο προηγούμενο κεφάλαιο ορίσαμε για $X \in \mathcal{H}^2$ και κάθε $t \geq 0$ το ολοκλήρωμα $I_t(X) := \int_0^t X(s, \omega) dB_s$. Τώρα θέλουμε να μελετήσουμε την εξέλιξη αυτών των τυχαίων μεταβλητών $\{I_t(X) : t \geq 0\}$ καθώς το t μεταβάλλεται. Δηλαδή να τις δούμε ως μέλη μιας ανέλιξης. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα τού κεφαλαίου περιέχονται στην Παράγραφο 10.1. Η Παράγραφος 10.2 είναι τεχνική. Δίνει ένα αποτέλεσμα που θα χρειαστεί στο επόμενο κεφάλαιο για μια επιπλέον επέκταση τού ολοκληρώματος.

10.1 Συνεχής εκδοχή

Όταν $X \in \mathcal{H}_0^2$, τότε τα πράγματα είναι απλά. Για κάθε $\omega \in \Omega$ και $t > 0$, η τυχαία μεταβλητή $I_t(X)$ είναι μονοσήμαντα ορισμένη. Δεν χρειάζεται να τη δούμε ως στοιχείο τού $L^2(\mathbf{P})$. Επομένως, για κάθε $\omega \in \Omega$, η συνάρτηση $t \mapsto X(\omega, t)$ είναι καλά ορισμένη. Έχουμε τότε το εξής αποτέλεσμα.

Πρόταση 10.1. Έστω $X \in \mathcal{H}_0^2$. Τότε η ανέλιξη $(I_t(X))_{t \geq 0}$ είναι ένα συνεχές martingale ως προς τη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$.

Απόδειξη. Έστω ότι η X γράφεται όπως στη σχέση (9.4). Για $r \in \{1, \dots, k\}$ και $t \in [t_r, t_{r+1})$, έχουμε

$$X \mathbf{1}_{[0,t]}(s) = \sum_{i=1}^{r-1} A_i(\omega) \mathbf{1}_{(t_i, t_{i+1}]}(s) + A_r(\omega) \mathbf{1}_{(t_r, t]}(s).$$

Άρα για αυτό το t , με βάση τον Ορισμό 9.3,

$$I_t(X) = \sum_{i=0}^{r-1} A_i(\omega)(B_{t_{i+1}} - B_{t_i}) + A_r(\omega)(B_t - B_{t_r}).$$

Επίσης $I_t(X) = 0$ για $t < t_0$, και $I_t(X) = \sum_{i=1}^k A_i(\omega)(B_{t_{i+1}} - B_{t_i})$ για $t \geq t_{k+1}$. Από αυτές τις σχέσεις προκύπτει ότι η $(I_t(X))_{t \geq 0}$ είναι προσαρμοσμένη και έχει συνεχή μονοπάτια (γιατί η B είναι συνεχής).

Το ότι κάθε $I_t(X) \in L^1(\mathbf{P})$ προκύπτει γιατί από τον ορισμό τού ολοκληρώματος Itô ισχύει $I_t(X) \in L^2(\mathbf{P})$ για κάθε $X \in \mathcal{H}_0^2$ και $L^2(\mathbf{P}) \subset L^1(\mathbf{P})$. Έπειτα για $0 \leq s < t$,

$$\mathbf{E}(I_t(X) | \mathcal{F}_s) = \mathbf{E} \left(I_s(X) + \int_s^t X_r dB_r \middle| \mathcal{F}_s \right) = I_s(X) + 0 = I_s(X)$$

χρησιμοποιώντας τα (i), (ii), (iii) από την Πρόταση 9.13. Επομένως η ανέλιξη είναι martingale. ■

Θέλουμε να έχουμε το αποτέλεσμα τής προηγούμενης πρότασης και για $X \in \mathcal{H}^2$. Υπάρχει όμως ένα σοβαρό πρόβλημα. Η ανέλιξη $(I_t(X))_{t \geq 0}$ δεν είναι καλά ορισμένη ως απεικόνιση $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{[0, \infty)}$ της οποίας η εικόνα στο $\omega \in \Omega$ είναι η συνάρτηση $f(\omega)(t) = I_t(X)$.

10.2 Τοπικότητα τού ολοκληρώματος*

Για να το δούμε αυτό, ας προσπαθήσουμε να την ορίσουμε. Επειδή κάθε $I_t(X)$ είναι ορισμένη ως στοιχείο τού $L^2(\mathbf{P})$, επιλέγουμε έναν αντιπρόσωπο από την κλάση της (δηλαδή μια εκδοχή της), ας τον συμβολίσουμε με $I_t^{(1)}(X)$, και έχουμε έτσι μια ανέλιξη $(I_t^{(1)}(X))_{t \geq 0}$ καλώς ορισμένη στο $[0, \infty) \times \Omega$. Ονομάζουμε αυτή την ανέλιξη **εκδοχή** τής $(I_t(X))_{t \geq 0}$. Αν πάρουμε όμως άλλους αντιπροσώπους, θα έχουμε μια άλλη ανέλιξη $(I_t^{(2)}(X))_{t \geq 0}$. Θα θέλαμε αυτές οι δύο ανελίξεις να είναι μη διακρίσιμες (Ορισμός 4.6, ώστε η ανέλιξη $(I_t(X))_{t \geq 0}$ να είναι ουσιαστικά μοναδικά ορισμένη). Δηλαδή να υπάρχει μετρήσιμο σύνολο $\Omega_0 \subset \Omega$ με πιθανότητα 1 ώστε για $\omega \in \Omega_0$ οι συναρτήσεις $(t \mapsto I_t^{(1)}(X)), (t \mapsto I_t^{(2)}(X))$ να ταυτίζονται. Τότε για κάθε $t \geq 0$ θα ισχύει

$$\Omega_0 \subset \{I_t^{(1)}(X) = I_t^{(2)}(X)\} =: C_t.$$

Και επομένως οποιαδήποτε επιλογή Ω_0 θα είναι υποσύνολο τής τομής $\cap_{t \geq 0} C_t$. Επειδή κάθε C_t έχει πιθανότητα 1, η τομή θα είχε και αυτή πιθανότητα 1 αν ήταν πάνω σε αριθμήσιμο πλήθος από C_t . Επειδή όμως είναι πάνω σε υπεραριθμήσιμο πλήθος από C_t , δεν είναι σαφές καν αν είναι μη κενή. Εκ των προτέρων δηλαδή τίποτα δεν αποκλείει η τομή να έχει πιθανότητα 0 και τότε και το Ω_0 θα έχει πιθανότητα 0.

Συμπερασματικά, υπάρχει πρόβλημα ορισμού γιατί υπάρχει μεγάλη αυθαιρεσία στη διαδικασία ορισμού τού συνόλου των τυχαίων μεταβλητών $\{I_t(X) : t \geq 0\}$.

Εμείς θα επιδιώξουμε να κατασκευάσουμε μια ανέλιξη όπως την $I_t^{(1)}(X)$ πιο πάνω, δηλαδή μια εκδοχή τής $(I_t(X))_{t \geq 0}$, με τον επιπλέον περιορισμό η συνάρτηση $t \mapsto I_t(X)$ να είναι συνεχής με πιθανότητα 1.

Θεώρημα 10.2 (Συνεχής εκδοχή τού ολοκληρώματος). *Έστω ότι η ανέλιξη $(X_t)_{t \geq 0}$ είναι μετρήσιμη, προσαρμοσμένη, και*

$$\mathbf{E} \left(\int_0^t X^2(s, \omega) ds \right) < \infty \quad \text{για κάθε } t \geq 0. \quad (10.1)$$

Τότε υπάρχει μια εκδοχή τής

$$\left(\int_0^t X(s, \omega) dB_s \right)_{t \geq 0}$$

η οποία με πιθανότητα 1 είναι συνεχής συνάρτηση τού t . Επιπλέον, αυτή η εκδοχή είναι martingale.

Η απόδειξη τού θεωρήματος δίνεται στο Παράρτημα Γ'.

Η συνεχής εκδοχή τής $(I_t(X))_{t \geq 0}$, η ύπαρξη τής οποίας εξασφαλίζεται από το προηγούμενο θεώρημα, είναι ουσιαστικά η μοναδική συνεχής εκδοχή. Δηλαδή οποιαδήποτε άλλη συνεχής εκδοχή είναι μη-διακρίσιμη από αυτήν (Πρόταση 4.8). Συμβολίζουμε αυτή την ανέλιξη με $X \cdot B$, και ο συμβολισμός είναι ανάλογος με τη διακριτή περίπτωση τής Παραγράφου 3.3.

Στο εξής, όποτε θεωρούμε την ανέλιξη $(\int_0^t X(s, \omega) dB_s)_{t \geq 0}$, θα υποθέτουμε ότι παίρνουμε τη συνεχή εκδοχή της.

10.2 Τοπικότητα τού ολοκληρώματος*

Ας σκεφτούμε το εξής ερώτημα: Έστω $X \in \mathcal{H}^2$ και $t > 0$. Θέτουμε

$$A := \{\omega \in \Omega : X(s, \omega) = 0 \text{ για κάθε } s \in [0, t]\}.$$

Το A ενδεχομένως να είναι ένα σύνολο με πιθανότητα > 0 και < 1 , δηλαδή μη τετριμμένο. Ισχύει $\int_0^t X(s, \omega) dB_s = 0$ για κάθε $\omega \in A$;

Όταν η $X \in \mathcal{H}_0^2$, τότε αυτό ισχύει και είναι άμεσο γιατί το ολοκλήρωμα ορίστηκε με ξεκάθαρο τύπο για κάθε δεδομένο ω (τύπος 9.5). Όμως για $X \in \mathcal{H}^2$ το ολοκλήρωμα ορίστηκε ως ένα όριο στον $L^2(\mathbf{P})$ και δεν είναι σαφές αν η απάντηση στο ερώτημα είναι καταφατική [για περισσότερα, δες τη συζήτηση στην Παράγραφο 6.5 του Steele (2001)]. Η διαίσθησή μας λέει ότι το ίδιο θα ισχύει και στον \mathcal{H}^2 , αλλά πρέπει να το αποδείξουμε περνώντας μέσα από τον «περίεργο» ορισμό τού ολοκληρώματος. Στην παράγραφο αυτή θα μας απασχολήσει μια γενικότερη μορφή αυτού του ερωτήματος.

Αν T είναι χρόνος διακοπής και X ανέλιξη όπως στο Θεώρημα 10.2, θα δείξουμε ότι η σταματημένη ανέλιξη $(X \cdot B)^T$ προκύπτει και αυτή από ένα στοχαστικό ολοκλήρωμα. Πιο συγκεκριμένα, ισούται με την ανέλιξη $(X\mathbf{1}_{[0,T]}) \cdot B$. Δηλαδή,

$$(X \cdot B)^T = (X\mathbf{1}_{[0,T]}) \cdot B.$$

Κατ' αρχάς, οφείλουμε να δείξουμε ότι η ανέλιξη $X\mathbf{1}_{[0,T]}$ ικανοποιεί τις συνθήκες τού Θεωρήματος 10.2 ώστε η $(X\mathbf{1}_{[0,T]}) \cdot B$ να ορίζεται. Έστω λοιπόν $Y(t, \omega) = X(t, \omega)\mathbf{1}_{[0,T]}(t)$.

(i) Η Y είναι μετρήσιμη. Πρώτα παρατηρούμε ότι το $U := \{(t, \omega) : t \leq T(\omega)\} \in \mathcal{B}([0, \infty)) \otimes \mathcal{F}$ γιατί είναι η αντίστροφη εικόνα τού συνόλου Borel $\{(x, y) : 0 \leq x \leq y\}$ μέσω τής απεικόνισης $r(t, \omega) = (t, T(\omega))$. Για να δείξουμε ότι η τελευταία είναι μετρήσιμη, παρατηρούμε ότι για $0 \leq a \leq b$ και $c \leq d$ ισχύει $r^{-1}([a, b] \times [c, d]) = [a, b] \times T^{-1}([c, d]) \in \mathcal{B}([0, \infty)) \otimes \mathcal{F}$ αφού η T είναι μετρήσιμη. Τώρα, για $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$, έχουμε

$$\begin{aligned} Y^{-1}(A) &= \{(t, \omega) : Y(t, \omega) \in A, T(\omega) \geq t\} \cup \{(t, \omega) : Y(t, \omega) \in A, T(\omega) < t\} \\ &= (X^{-1}(A) \cap U) \cup V, \end{aligned}$$

όπου $V = U^c$ αν $0 \in A$, ενώ $V = \emptyset$ αν $0 \notin A$. Σε κάθε περίπτωση, το $Y^{-1}(A) \in \mathcal{B}([0, \infty)) \otimes \mathcal{F}$.

(ii) Η Y είναι προσαρμοσμένη. Αρκεί να το δείξουμε για την $\mathbf{1}_{[0,T]}(t)$. Για $t \geq 0$, η $\mathbf{1}_{[0,T]}(t)$ είναι η δείκτρια συνάρτηση τού συνόλου $\{\omega \in \Omega : t \leq T(\omega)\} = \Omega \setminus \{T < t\}$ και το τελευταίο σύνολο είναι στοιχείο τής \mathcal{F}_t με βάση την Άσκηση 4.5. Φαίνεται εδώ η σημασία να είναι ο T χρόνος διακοπής.

(iii) Τέλος, για κάθε $t > 0$,

$$\mathbf{E} \left(\int_0^t X_s^2 \mathbf{1}_{[0,T]}(s) ds \right) \leq \mathbf{E} \left(\int_0^t X_s^2 ds \right) < \infty.$$

Το αποτέλεσμα που μας ενδιαφέρει λοιπόν είναι το εξής.

Πρόταση 10.3. Έστω T χρόνος διακοπής. Με πιθανότητα 1 ισχύει

$$\int_0^{t \wedge T} X_s dB_s = \int_0^t X_s \mathbf{1}_{[0,T]}(s) dB_s \quad (10.2)$$

για κάθε $t > 0$.

Η απόδειξη τής πρότασης δίνεται στο Παράρτημα Δ'. Άμεση συνέπεια της είναι το επόμενο αποτέλεσμα, το οποίο απαντάει στην ερώτηση που τέθηκε στην αρχή τής παραγράφου και το οποίο θα χρειαστούμε για την επέκταση τού ολοκληρώματος σε ανελιξίες έξω από το σύνολο \mathcal{H}^2 .

Πρόταση 10.4. Έστω $X \in \mathcal{H}^2$ και T χρόνος διακοπής ώστε για κάθε $s \geq 0$ να ισχύει $X(s, \omega) = 0$ σχεδόν παντού στο $\{\omega \in \Omega : T(\omega) \geq s\}$. Τότε για κάθε $t \geq 0$ έχουμε

$$\int_0^t X(s, \omega) dB_s = 0$$

σχεδόν παντού στο $\{\omega \in \Omega : T(\omega) \geq t\}$.

Απόδειξη. Για το δεδομένο t , έχουμε με πιθανότητα 1

$$\int_0^{t \wedge T} X_s dB_s = \int_0^t X_s \mathbf{1}_{[0, T]}(s) dB_s. \quad (10.3)$$

Το δεξί μέλος τής ισότητας αυτής ισούται με 0 με πιθανότητα 1 γιατί με χρήση τού τύπου τού Ιτô η δεύτερή του ροπή είναι

$$\mathbf{E} \left(\int_0^t X_s^2 \mathbf{1}_{[0, T]}(s) ds \right) = \int_0^t \mathbf{E} \{ X_s^2 \mathbf{1}_{[0, T]}(s) \} ds = 0.$$

Η τελευταία ισότητα ισχύει γιατί για δεδομένο $s \in [0, t]$, η δείκτρια $\mathbf{1}_{[0, T]}(s)$ είναι $\neq 0$ μόνο στο $\{\omega \in \Omega : T(\omega) \geq s\}$, στο οποίο όμως $X_s = 0$ με πιθανότητα 1.

Τέλος, το αριστερό μέλος τής (10.3) ισούται με $\int_0^t X_s dB_s$ στο $\{\omega \in \Omega : T(\omega) \geq t\}$. Και η πρόταση έπεται. ■

Ασκήσεις

10.1 Έστω ανέλιξη X όπως στο Θεώρημα 10.2. Να δειχθεί ότι η ανέλιξη $(Y_t)_{t \geq 0}$ με

$$Y_t := \left(\int_0^t X(r, \omega) dB_r \right)^2 - \int_0^t X(r, \omega)^2 dr$$

για κάθε $t \geq 0$ είναι ένα martingale που με πιθανότητα 1 έχει συνεχή μονοπάτια.

11

Επεκτάσεις τού ολοκληρώματος

Στη γενική θεωρία στοχαστικής ολοκλήρωσης δίνεται νόημα στο ολοκλήρωμα

$$\int_a^b X dM$$

για αρκετές ανεξίτητες M και X , χωρίς να είναι απαραίτητο η M να είναι κίνηση Brown ούτε η X να ανήκει σε ένα σύνολο τόσο περιορισμένο όπως το \mathcal{H}^2 . Σε αυτό το κεφάλαιο θα κάνουμε δύο επεκτάσεις. Στην πρώτη θα κρατήσουμε ως M την κίνηση Brown και θα επιτρέψουμε περισσότερες X από ό,τι έχουμε κάνει ως τώρα, ενώ στη δεύτερη θα επιτρέψουμε περισσότερες M . Η δεύτερη είναι απλώς θέμα επέκτασης τού συμβολισμού και δεν απαιτεί κάποια δουλειά.

11.1 Περισσότεροι ολοκληρωτέοι

Θα περίμενε κανείς ότι αν η $X : [0, t] \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, με $0 < t < \infty$, έχει την ιδιότητα η $X(\cdot, \omega)$ να είναι συνεχής για κάθε $\omega \in \Omega$, τότε το ολοκλήρωμα $\int_0^t X(s, \omega) dB_s$ θα ορίζεται. Αυτό όμως δεν ισχύει απαραίτητα. Αν πάρουμε $X(s, \omega) = e^{B_s^2}$ (με B τυπική κίνηση Brown), τότε

$$\mathbf{E} \left(\int_0^t X(s, \omega)^2 ds \right) = \mathbf{E} \left(\int_0^t e^{2B_s^2} ds \right) = \int_0^t \mathbf{E}(e^{2B_s^2}) ds = \int_0^t \mathbf{E}(e^{2sZ^2}) ds,$$

με $Z \sim N(0, 1)$. Όμως

$$\mathbf{E}(e^{2sZ^2}) = \int_{\mathbb{R}} e^{2sx^2} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} e^{(2s-\frac{1}{2})x^2} dx,$$

το οποίο είναι πεπερασμένο μόνο για $s < 1/4$ (και ισούται με $1/\sqrt{1-4s}$). Άρα για $t > 1/4$, έχουμε ότι $X \notin \mathcal{H}^2[0, t]$ και το ολοκλήρωμα δεν μπορεί να οριστεί με τη διαδικασία τού προηγούμενου κεφαλαίου.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα ορίσουμε το στοχαστικό ολοκλήρωμα για περισσότερες X αντικαθιστώντας την απαίτηση $\mathbf{E} \left(\int_0^t X^2(s, \omega) ds \right) < \infty$, που όριζε τον $\mathcal{H}^2([0, t])$, με την ασθενέστερη απαίτηση

$$\mathbf{P} \left(\int_0^t X^2(s, \omega) ds < \infty \right) = 1. \quad (11.1)$$

Και για μια X όπως στην αρχή τής παραγράφου, το ολοκλήρωμα θα ορίζεται.

Όπως και πριν, θα δουλέψουμε με διάστημα ολοκλήρωσης το $[0, \infty)$, και εύκολα θα οριστεί μέσω αυτού το ολοκλήρωμα σε κάθε φραγμένο διάστημα $[0, t]$. Θέτουμε

$$\mathcal{H}_{Loc}^2 := \left\{ X : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R} \mid \begin{array}{l} X \text{ μετρήσιμη, προσαρμοσμένη, και για κάθε } t > 0 \\ \text{ισχύει } \int_0^t X^2(s, \omega) ds < \infty \text{ με πιθανότητα } 1. \end{array} \right\}$$

Περιγράφουμε εδώ το τι ισχύει και δίνουμε τις αποδείξεις στην Παράγραφο 11.3.

Για $X \in \mathcal{H}_{LOC}^2$, ορίζεται κατάλληλα το ολοκλήρωμα $\int_0^t X(s, \omega) dB_s$ (ας το συμβολίσουμε με $I_t(X)$) για κάθε $t \geq 0$. Αυτό το ολοκλήρωμα έχει τις εξής ιδιότητες:

- (i) Αν $X \in \mathcal{H}^2$, η ανάλιξη $(I_t(X))_{t \geq 0}$ συμπίπτει με αυτήν που ορίστηκε στην Παράγραφο 10.1.
- (ii) Η $(I_t(X))_{t \geq 0}$ έχει συνεχή μονοπάτια.
- (iii) Η $(I_t(X))_{t \geq 0}$ είναι local martingale (Ορισμός 4.16).

Όμοια, για $0 \leq a < b$, ορίζεται ο χώρος $\mathcal{H}_{LOC}^2[a, b]$ και το ολοκλήρωμα $\int_a^b X(s, \omega) dB_s$ για X σε αυτόν τον χώρο. Για το νέο ολοκλήρωμα ισχύουν οι ιδιότητες της Πρότασης 9.9 (i) και της Πρότασης 9.13 (i), (ii). Τώρα όμως το ολοκλήρωμα δεν έχει μέση τιμή 0. Μάλιστα ενδέχεται η μέση του τιμή να μην μπορεί να οριστεί ή να είναι ∞ ή $-\infty$. Γι' αυτό η ανάλιξη $(I_t(X))_{t \geq 0}$ δεν είναι απαραίτητα martingale, είναι όμως local martingale.

Υπό κάποιες προϋποθέσεις, το στοχαστικό ολοκλήρωμα $\int_a^b X(s, \omega) dB_s$ μπορεί να παρασταθεί ως όριο αθροισμάτων Riemann. Για τα αποτελέσματα που ακολουθούν, θα χρειαστούμε μια πολύ ειδική περίπτωση που αυτό συμβαίνει.

Πρόταση 11.1 (Προσέγγιση από αθροίσματα Riemann). Έστω B μονοδιάστατη κίνηση Brown, $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχής, $t > 0$, και για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$, $\Delta_n := \{0 = t_0^{(n)} < t_1^{(n)} < \dots < t_{k(n)}^{(n)} = t\}$ διαμέριση τού $[0, t]$ ώστε $\lim_{n \rightarrow \infty} \|\Delta_n\| = 0$. Τότε

$$\int_0^t f(B_s) dB_s = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^{k(n)} f(B_{t_{j-1}^{(n)}})(B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}}) \quad (11.2)$$

κατά πιθανότητα.

Η απόδειξη τής πρότασης δίνεται στο Παράρτημα Γ'.

Παρατήρηση 11.2. Στην πιο πάνω πρόταση, κατά τον σχηματισμό τού αθροίσματος Riemann, για κάθε διάστημα $[t_{j-1}^{(n)}, t_j^{(n)}]$ επιλέξαμε να υπολογίσουμε την τιμή τής f στο αριστερό άκρο τού διαστήματος. Αν επιλέξουμε κάποιο άλλο σημείο τού διαστήματος, τότε το άθροισμα ενδεχομένως να μην συγκλίνει στο ολοκλήρωμα Itô. Το έχουμε δει αυτό στην Άσκηση 9.7.

11.2 Περισσότεροι ολοκληρωτές

Έστω χώρος πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ στον οποίο ορίζεται μια m -διάστατη κίνηση Brown B και $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ η επαυξημένη διήθηση που αυτή παράγει.

Ορισμός 11.3. Ανάλιξη Itô σε αυτόν τον χώρο με τιμές στο \mathbb{R} λέμε κάθε ανάλιξη $X : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ που γράφεται ως

$$X_t = X_0 + \int_0^t u(s, \omega) ds + \int_0^t v(s, \omega) \cdot dB_s \quad (11.3)$$

για κάθε $t > 0$, με πιθανότητα 1, όπου υποθέτουμε ότι:

- (i) Η X_0 είναι \mathcal{F}_0 προσαρμοσμένη.
- (ii) Οι $u(t, \omega), v(t, \omega) = (v^{(i)}(t, \omega))_{1 \leq i \leq m}$ είναι μετρήσιμες προσαρμοσμένες ανελίξεις με τιμές στον \mathbb{R} και στον \mathbb{R}^m αντίστοιχα.

11.3 Ο ορισμός τής επέκτασης*

(iii) Για κάθε $t > 0$ και $i = 1, \dots, m$, με πιθανότητα 1, ισχύει

$$\int_0^t |u(s, \omega)| ds < \infty, \int_0^t v^{(i)}(s, \omega)^2 ds < \infty.$$

Οι συνθήκες είναι ακριβώς αυτές ώστε τα ολοκληρώματα να μπορούν να οριστούν και επιπλέον η X_t να είναι προσαρμοσμένη (για το ολοκλήρωμα $\int_0^t u(s, \omega) ds$ χρησιμοποιούμε την Πρόταση 9.14).

Πιο εύχρηστη είναι η γραφή μιας ανέλιξης Itô σε διαφορικό συμβολισμό, δηλαδή

$$dX_t = u(t, \omega)dt + v(t, \omega) \cdot dB_t = u(t, \omega)dt + \sum_{i=1}^m v^{(i)}(t, \omega)dB_t^{(i)}.$$

Το τελευταίο ολοκλήρωμα στην (11.3) είναι άθροισμα m στοχαστικών ολοκληρωμάτων, και με βάση τη σύμβαση που έχουμε κάνει αμέσως μετά την Πρόταση 11.6, είναι με πιθανότητα 1 συνεχής συνάρτηση τού t , οπότε η X έχει συνεχή μονοπάτια με πιθανότητα 1.

Επεκτείνουμε τον ορισμό τού ολοκληρώματος επιτρέποντας ο ολοκληρωτής να είναι ανέλιξη Itô όπως πιο πάνω. Θέτουμε

$$\begin{aligned} \int_0^t Y(s, \omega) dX_s &:= \int_0^t Y(s, \omega)u(s, \omega) ds + \int_0^t Y(s, \omega)v(s, \omega) \cdot dB_s \\ &= \int_0^t Y(s, \omega)u(s, \omega) ds + \sum_{i=1}^m \int_0^t Y(s, \omega)v^{(i)}(s, \omega) dB_s^{(i)}. \end{aligned}$$

Οι ανελίξεις Y για τις οποίες ορίζεται το ολοκλήρωμα είναι ακριβώς αυτές για τις οποίες έχουν νόημα τα ολοκληρώματα τού δεξιού μέλους τής τελευταίας ισότητας.

11.3 Ο ορισμός τής επέκτασης*

Στόχος τής παραγράφου αυτής είναι, για $X \in \mathcal{H}_{LOC}^2$, να ορίσει το ολοκλήρωμα $\int_0^t X(s, \omega) dB_s$ για κάθε $t \geq 0$.

Για $X : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ και $\tau : \Omega \rightarrow [0, \infty)$, θα συμβολίζουμε με $X^{(\tau)}$ την ανέλιξη που ορίζεται ως

$$X^{(\tau)}(t, \omega) = X(t, \omega)\mathbf{1}_{t \leq \tau(\omega)}$$

για κάθε $(t, \omega) \in [0, \infty) \times \Omega$. Προσοχή, ο ορισμός είναι διαφορετικός από αυτόν της σταματημένης στοχαστικής ανέλιξης που είδαμε στην Παράγραφο 3.5.

Ορισμός 11.4. Έστω $X : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$. Μια ακολουθία χρόνων διακοπής $(\tau_n)_{n \geq 1}$ λέγεται \mathcal{H}^2 -τοπικοποιούσα για τη X αν:

- (i) Η $(\tau_n)_{n \geq 1}$ είναι αύξουσα με πιθανότητα 1.
- (ii) $\lim_{n \rightarrow \infty} \tau_n = \infty$ με πιθανότητα 1.
- (iii) $X^{(\tau_n)} \in \mathcal{H}^2$ για κάθε $n \geq 1$.

Για κάθε $X \in \mathcal{H}_{LOC}^2$ υπάρχει \mathcal{H}^2 -τοπικοποιούσα ακολουθία. Πράγματι, αν ορίσουμε

$$\tau_n := n \wedge \inf \left\{ t > 0 : \int_0^t X^2(s, \omega) ds \geq n \right\}$$

με τη σύμβαση ότι $\inf \emptyset = \infty$, τότε η $(\tau_n)_{n \geq 1}$ είναι αύξουσα, με όριο το ∞ , και τέλος

$$E \left(\int_0^\infty (X^{(\tau_n)})^2(t, \omega) dt \right) = E \left(\int_0^{\tau_n} X^2(t, \omega) dt \right) \leq n < \infty.$$

Το ότι ο τ_n είναι χρόνος διακοπής έπεται από την Πρόταση 9.14 και το ανάλογο τής Πρότασης 5.13 για την ανέλιξη $t \mapsto \int_0^t X^2(s, \omega) ds$ αντί της B .

Τώρα, παίρνουμε μια τοπικοποιούσα ακολουθία $(\tau_n)_{n \geq 1}$ χρόνων διακοπής και για κάθε $t > 0$ ορίζουμε

$$I_t(X) := I_t(X^{(\tau_n)}) \text{ στο } \{\omega \in \Omega : t \leq \tau_n(\omega)\}. \quad (11.4)$$

Έστω $A_n := \{\omega \in \Omega : t \leq \tau_n(\omega)\}$ για κάθε $n \geq 1$. Έχουμε $\mathbf{P}(\cup_{n=1}^\infty A_n) = 1$ αφού $\lim_{n \rightarrow \infty} \tau_n(\omega) = \infty$ με πιθανότητα 1. Επομένως η $I_t(X)$ είναι μια τυχαία μεταβλητή που ορίζεται σε όλον τον Ω , εκτός ενδεχομένως από ένα σύνολο με πιθανότητα 0. Ένα πρόβλημα όμως είναι ότι επειδή η ακολουθία $(A_n)_{n \geq 1}$ είναι αύξουσα, για δεδομένο $\omega \in \Omega$, η $I_t(X)$ ορίζεται πολλές φορές! Δηλαδή την ορίζουμε ως $I_t(X^{(\tau_n)})$ για όλα τα n με $\tau_n(\omega) \geq t$. Θα δείξουμε αμέσως τώρα ότι το σύνολο των σημείων ω στο οποίο έχουμε σύγκρουση πολλαπλών ορισμών έχει πιθανότητα 0. Και άρα η $I_t(X)$ είναι καλά ορισμένη σε όλον τον Ω εκτός από ένα σύνολο με πιθανότητα 0.

Πρόταση 11.5. Για $t > 0$ σταθερό, η τυχαία μεταβλητή $I_t(X)$ ορίζεται μονοσήμαντα με πιθανότητα 1 και δεν εξαρτάται από την επιλογή τής τοπικοποιούσας ακολουθίας τ .

Απόδειξη. Θα δείξουμε πρώτα το εξής. Αν σ, τ είναι χρόνοι διακοπής που ικανοποιούν τη $\sigma \leq \tau$ στον Ω και $X^{(\sigma)}, X^{(\tau)} \in \mathcal{H}^2$, τότε

$$I_t(X^{(\sigma)}) = I_t(X^{(\tau)}) \quad (11.5)$$

σχεδόν παντού στο $\{\omega : \sigma(\omega) \geq t\}$. Πράγματι, για την $Y := X^{(\tau)} - X^{(\sigma)}$, έχουμε ότι $Y \in \mathcal{H}^2$ και για κάθε $\omega \in \Omega$ ισχύει $Y(\omega, s) = 0$ για $s \in [0, \sigma(\omega)]$. Με βάση την Πρόταση 10.4, έπεται ότι σχεδόν παντού στο $\{\omega : \sigma(\omega) \geq t\}$ ισχύει $I_t(Y) = 0$, δηλαδή $I_t(X^{(\sigma)}) = I_t(X^{(\tau)})$.

Τώρα εφαρμόζοντας την (11.5) για τους χρόνους τ_m, τ_n για $m < n$, έπεται ότι το σύνολο

$$C_{m,n} := \{\omega \in \Omega : t \leq \tau_m(\omega), I_t(X^{(\tau_m)}) \neq I_t(X^{(\tau_n)})\}$$

έχει πιθανότητα 0. Άρα το ίδιο ισχύει και για το $\cup_{1 \leq m < n} C_{m,n}$. Αυτό αποδεικνύει τον πρώτο ισχυρισμό τής πρότασης.

Για τον δεύτερο ισχυρισμό, παίρνουμε και μια άλλη τοπικοποιούσα ακολουθία $(\sigma_n)_{n \geq 1}$, εφαρμόζουμε την (11.5) για τα ζευγάρια χρόνων $\{\tau_n \wedge \sigma_n, \tau_n\}$, $\{\tau_n \wedge \sigma_n, \sigma_n\}$ και έχουμε ότι

$$I_t(X^{(\tau_n)}) = I_t(X^{(\tau_n \wedge \sigma_n)}) = I_t(X^{(\sigma_n)})$$

σχεδόν παντού στο $D_n = \{\omega \in \Omega : \sigma_n \wedge \tau_n \geq t\}$. Επειδή $\mathbf{P}(\cup_{n=1}^\infty D_n) = 1$, έπεται το συμπέρασμα. ■

Στο υπόλοιπο τής παραγράφου θα δούμε δύο σημαντικές ιδιότητες τού νέου ολοκληρώματος που ορίσαμε στην (11.4). Κατ' αρχάς, έχει και αυτό συνεχή τροποποίηση.

Πρόταση 11.6. Για $X \in \mathcal{H}_{LOC}^2$, η ανέλιξη $(I_t(X))_{t \geq 0}$ έχει συνεχή τροποποίηση.

Απόδειξη. Έστω ότι ορίζουμε την $(I_t(X))_{t \geq 0}$ μέσω μιας τοπικοποιούσας ακολουθίας $(\tau_n)_{n \geq 1}$. Για κάθε $n \geq 1$, η $(I_t(X^{(\tau_n)}))_{t \geq 0}$ έχει συνεχή τροποποίηση, έστω $(Z_{n,t})_{t \geq 0}$. Ορίζουμε $I_t(X) = Z_{n,t}$ για όλα τα $\{\omega \in \Omega : \tau_n \geq t > \tau_{n-1}\}$. ■

Σύμβαση: Στο εξής, όποτε δουλεύουμε με μια ανέλιξη $(\int_0^t X dB)_{t \geq 0}$ με $X \in \mathcal{H}_{LOC}^2$, θα θεωρούμε ότι παίρνουμε τη συνεχή έκδοσή της.

Πρόταση 11.7. Για $X \in \mathcal{H}_{LOC}^2$, η ανέλιξη $(I_t(X))_{t \geq 0}$ είναι *local martingale*.

Απόδειξη. Έστω $(\tau_n)_{n \geq 1}$ μια τοπικοποιούσα ακολουθία για τη X . Τότε για κάθε $n \geq 1$ έχουμε $I_{t \wedge \tau_n}(X) = I_t(X^{(\tau_n)})$ για κάθε t σε όλον τον Ω (από την Πρόταση 10.3). Όμως η $(I_t(X^{(\tau_n)}))_{t \geq 0}$ είναι *martingale* αφού $X^{(\tau_n)} \in \mathcal{H}^2$ και το συμπέρασμα έπεται. ■

Ασκήσεις

11.1 Έστω $(u(t, \omega))_{t \geq 0}, (v(t, \omega))_{t \geq 0}$ μετρήσιμες προσαρμοσμένες ανέλιξεις με τιμές στο \mathbb{R} ώστε για κάθε $t \geq 0$ να ισχύει $v \in \mathcal{H}^2[0, t]$ και, με πιθανότητα 1, $\int_0^t |u(s, \omega)| ds < \infty$. Θεωρούμε την ανέλιξη X που ορίζεται ως

$$X_t = X_0 + \int_0^t u(s, \omega) ds + \int_0^t v(s, \omega) dB_s,$$

με X_0 κάποια τυχαία μεταβλητή. Αν με πιθανότητα 1 έχουμε $X_t = 0$ για κάθε $t \geq 0$, τότε με πιθανότητα 1 ισχύει

$$\begin{aligned} X_0 &= 0 \\ u(t, \omega) &= 0 \quad \lambda\text{-σχεδόν για κάθε } t \geq 0, \\ v(t, \omega) &= 0 \quad \lambda\text{-σχεδόν για κάθε } t \geq 0. \end{aligned}$$

12

Ο τύπος του Ιτô

Για συνάρτηση $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ με συνεχή παράγωγο, έχουμε $df(s) = f'(s) ds$, που σε ολοκληρωτική μορφή σημαίνει

$$f(b) - f(a) = \int_a^b f'(s) ds \quad (12.1)$$

για κάθε $a < b$. Αν επιπλέον και η $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ έχει συνεχή παράγωγο, οι προηγούμενες σχέσεις για την $f \circ g$ γράφονται $d(f(g(s))) = f'(g(s))g'(s) ds = f'(g(s)) dg(s)$, και για $a < b$,

$$f(g(b)) - f(g(a)) = \int_a^b f'(g(s)) dg(s). \quad (12.2)$$

Όταν η g είναι η κίνηση Brown (και άρα όχι διαφορίσιμη), τη θέση αυτής της ισότητας παίρνει ο τύπος του Ιτô. Το αριστερό μέλος της (12.2) γράφεται ως άθροισμα δύο ολοκληρωμάτων. Ενός Riemann και ενός στοχαστικού (δες σχέση (12.3) πιο κάτω).

Παντού σε αυτό το κεφάλαιο, εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά, B είναι μια μονοδιάστατη κίνηση Brown, όχι απαραίτητα τυπική.

12.1 Τύπος Ιτô. Η απλούστερη μορφή

Θεώρημα 12.1 (Τύπος Ιτô. Έκδοση I). Έστω $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ δύο φορές παραγωγίσιμη με συνεχή δεύτερη παράγωγο. Τότε με πιθανότητα 1, ισχύει

$$f(B_t) = f(B_0) + \int_0^t f'(B_s) dB_s + \frac{1}{2} \int_0^t f''(B_s) ds \quad (12.3)$$

για κάθε $t > 0$.

Η απόδειξη δίνεται στο Παράρτημα Γ'. Εδώ θα δούμε χοντρικά γιατί ισχύει το αποτέλεσμα. Το περίεργο στην (12.3) σε σχέση με την (12.2) είναι η παρουσία του όρου $(1/2) \int_0^t f''(B_s) ds$.

Η ιδέα της απόδειξης: Η μεταβολή της $f(B_s)$ σε ένα μικρό διάστημα $[s, s + \Delta s]$ είναι

$$f(B_{s+\Delta s}) - f(B_s) \approx f'(B_s)(B_{s+\Delta s} - B_s) + \frac{1}{2} f''(B_s)(B_{s+\Delta s} - B_s)^2. \quad (12.4)$$

Αυτό είναι μέρος του αναπτύγματος Taylor. Αγνοούμε τους μετέπειτα όρους. Η (12.4) με τη βοήθεια διαφορικών κωδικοποιείται ως

$$df(B_s) \approx f'(B_s) dB_s + \frac{1}{2} f''(B_s) (dB_s)^2 \quad (12.5)$$

$$= f'(B_s) dB_s + \frac{1}{2} f''(B_s) ds \quad (12.6)$$

Το ότι $(dB_s)^2 = ds$ το έχουμε δει στην Παράγραφο 8.3 (δες Παρατήρηση 8.11).

12.2 Τύπος Itô. Μια μικρή γενίκευση

Η (12.3) θα προκύψει αθροίζοντας τις μεταβολές τής $f(B_s)$ σε όλο το διάστημα $[0, t]$. Δηλαδή παίρνουμε διαμέριση τού $[0, t]$ σε n διαστήματα, καθένα πάχους $\Delta s = t/n$, αθροίζουμε τις μεταβολές,

$$\sum_{k=0}^{n-1} \{f(B_{k\Delta s + \Delta s}) - f(B_{k\Delta s})\},$$

και τέλος παίρνουμε $n \rightarrow \infty$. Για τη μεταβολή τής $f(B_s)$ σε κάθε διάστημα παραλείπουμε όρους που συνολικά είναι της τάξης $(dB_s)^3 = (ds)^{3/2} \approx (t/n)^{3/2}$. Το άθροισμα αυτών των λαθών σε όλα τα n διαστήματα είναι της τάξης $n(t/n)^{3/2} = t^{3/2}n^{-1/2}$ και τείνει στο 0 καθώς $n \rightarrow \infty$. Έτσι η (12.3) βγαίνει ακριβώς.

Η (12.1) μπορεί να αποδειχθεί με τη βοήθεια τού αναπτύγματος Taylor όπως και ο τύπος τού Itô. Η διαφορά είναι ότι το υπόλοιπο Taylor δεύτερης τάξης στο ανάπτυγμα τής $f(s + ds)$ γύρω από το s είναι της τάξης $(ds)^2$ και το άθροισμα όλων των υπολοίπων πάνω στα σημεία μιας διαμέρισης τού $[a, b]$ τείνει στο 0 καθώς το πάχος τής διαμέρισης τείνει στο 0, όπως για παράδειγμα τείνει στο μηδέν το άθροισμα $\sum_{k=1}^n 1/n^2$ αφού ισούται με $1/n$.

Παράδειγμα 12.2. Θα δούμε μια άλλη απόδειξη τού τύπου

$$\int_0^t B_s dB_s = \frac{1}{2} B_t^2 - \frac{1}{2} t$$

για B τυπική κίνηση Brown και $t > 0$, τον οποίο έχουμε ήδη δει στο Παράδειγμα 9.11. Ο τύπος τού Itô για τη συνάρτηση $f(x) = x^2$ δίνει

$$B_t^2 = \int_0^t 2B_s dB_s + \frac{1}{2} \int_0^t 2 dt = 2 \int_0^t B_s dB_s + t,$$

που είναι η ζητούμενη.

12.2 Τύπος Itô. Μια μικρή γενίκευση

Θεώρημα 12.3 (Τύπος Itô. Έκδοση II). Έστω $f \in C^{2,1}(\mathbb{R} \times [0, \infty))$. Τότε με πιθανότητα 1, ισχύει

$$f(B_t, t) = f(B_0, 0) + \int_0^t \frac{\partial f}{\partial s}(B_s, s) ds + \int_0^t \frac{\partial f}{\partial x}(B_s, s) dB_s + \frac{1}{2} \int_0^t \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(B_s, s) ds \quad (12.7)$$

για κάθε $t > 0$.

Το σύνολο $C^{2,1}(\mathbb{R} \times [0, \infty))$ περιέχει ακριβώς τις συναρτήσεις $f : \mathbb{R} \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$, με όρισμα έστω (x, t) , για τις οποίες υπάρχουν παντού οι μερικές παράγωγοι $\partial^2 f / \partial x^2$, $\partial f / \partial t$ και είναι συνεχείς.

Η απόδειξη και αυτού του θεωρήματος δίνεται στο Παράρτημα Γ', αλλά πάλι θα περιγράψουμε εδώ την ιδέα της. Η διαφορά $f(B_t, t) - f(B_0, 0)$ ισούται με το άθροισμα των μεταβολών τής $s \mapsto f(B_s, s)$ στα σημεία οποιασδήποτε διαμέρισης τού $[0, t]$. Παίρνουμε μια διαμέριση με αρκετά μικρή λεπτότητα. Για $\Delta s > 0$ μικρό, η μεταβολή αυτής της απεικόνισης στο $[s, s + \Delta s]$, με βάση το θεώρημα Taylor μιας μεταβλητής χωριστά για τις x, t , είναι

$$\begin{aligned} f(B_{s+\Delta s}, s + \Delta s) - f(B_s, s) &= f(B_{s+\Delta s}, s + \Delta s) - f(B_{s+\Delta s}, s) + f(B_{s+\Delta s}, s) - f(B_s, s) \\ &\approx \frac{\partial f}{\partial s}(B_{s+\Delta s}, s) \Delta s + \frac{\partial f}{\partial x}(B_s, s)(B_{s+\Delta s} - B_s) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(B_s, s)(B_{s+\Delta s} - B_s)^2, \end{aligned}$$

που με χρήση διαφορικών γράφεται

$$\begin{aligned} df(B_s, s) &= \frac{\partial f}{\partial s}(B_s, s) ds + \frac{\partial f}{\partial x}(B_s, s) dB_s + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(B_s, s) (dB_s)^2 \\ &= \frac{\partial f}{\partial s}(B_s, s) ds + \frac{\partial f}{\partial x}(B_s, s) dB_s + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(B_s, s) ds. \end{aligned}$$

Αθροίζοντας αυτές τις «απειροστές» μεταβολές παίρνουμε τα τρία ολοκληρώματα που εμφανίζονται στο θεώρημα.

Αν γνωρίζαμε ότι όλες οι παράγωγοι πρώτης και δεύτερης τάξης της f υπάρχουν και είναι συνεχείς, θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε το θεώρημα Taylor δύο μεταβλητών. Τότε στην παραπάνω προσέγγιση θα εμφανίζονταν και οι όροι

$$\frac{\partial^2 f}{\partial s^2}(B_s, s)(ds)^2, \frac{\partial^2 f}{\partial s \partial x}(B_s, s) dB_s ds.$$

Αλλά αυτοί είναι μικρότερης τάξης από αυτούς που εμφανίστηκαν πιο πάνω. Το άθροισμά τους τείνει στο μηδέν καθώς η λεπτότητα της διαμέρισης του $[0, t]$ τείνει στο 0.

Παράδειγμα 12.4. Για $\lambda \in \mathbb{R}$ και B τυπική κίνηση Brown, η ανέλιξη $X_t := e^{\lambda B_t - \lambda^2 t/2}$, $t \geq 0$ είναι martingale, όπως είδαμε στο Θεώρημα 7.1. Θα δούμε εδώ μια άλλη απόδειξη. Εφαρμόζουμε τον τύπο του Ιτό για τη συνάρτηση $f(x, t) = e^{\lambda x - \lambda^2 t/2}$. Με πιθανότητα 1, ισχύει για κάθε $t \geq 0$,

$$\begin{aligned} X_t = f(B_t, t) &= 1 - \frac{\lambda^2}{2} \int_0^t f(B_s, s) ds + \lambda \int_0^t f(B_s, s) dB_s + \frac{1}{2} \lambda^2 \int_0^t f(B_s, s) ds \\ &= 1 + \lambda \int_0^t f(B_s, s) dB_s. \end{aligned}$$

Από το Θεώρημα 10.2, προκύπτει ότι η ανέλιξη που ορίζει το τελευταίο στοχαστικό ολοκλήρωμα είναι martingale αρκεί να δείξουμε ότι ικανοποιεί την (10.1). Πράγματι

$$\mathbf{E} \left(\int_0^t f(B_s, s)^2 ds \right) = \int_0^t \mathbf{E}(e^{2\lambda B_s - \lambda^2 s}) ds = \int_0^t e^{-\lambda^2 s} e^{2\lambda^2 s} ds = \int_0^t e^{\lambda^2 s} ds < \infty.$$

12.3 Τύπος Ιτό στις πολλές διαστάσεις

Για $f : \mathbb{R}^d \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ υπενθυμίζουμε τους συμβολισμούς

$$\begin{aligned} \nabla_x f(x, t) &= \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}(x, t), \frac{\partial f}{\partial x_2}(x, t), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_d}(x, t) \right) \\ \Delta_x f(x, t) &= \sum_{i=1}^d \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2}(x, t), \end{aligned}$$

που είναι το διάνυσμα κλίσης και η Λαπλασιανή της f όταν θεωρείται μόνο ως συνάρτηση του x .

Θεώρημα 12.5 (Τύπος Ιτό. Έκδοση III). Έστω $f \in C^{2,1}(\mathbb{R}^d \times [0, \infty))$ και $B = (B^{(1)}, B^{(2)}, \dots, B^{(d)})$ μια d -διάστατη κίνηση Brown. Τότε, με πιθανότητα 1, ισχύει

$$f(B_t, t) = f(B_0, 0) + \int_0^t \frac{\partial f}{\partial s}(B_s, s) ds + \int_0^t \nabla_x f(B_s, s) dB_s + \frac{1}{2} \int_0^t \Delta_x f(B_s, s) ds \quad (12.8)$$

για κάθε $t > 0$.

Ένα σχέδιο απόδειξης τού θεωρήματος δίνεται στο Παράρτημα Γ'. Όπως και στις προηγούμενες εκδόσεις τού τύπου, η απόδειξη βασίζεται στο ανάπτυγμα Taylor τής $f(B_t, t)$.

Παρατήρηση 12.6. Ο τύπος τού Itô είναι πιο εύχρηστος στη διατύπωσή του με διαφορικό συμβολισμό. Δηλαδή,

$$df(B_s, s) = \frac{\partial f}{\partial s}(B_s, s) ds + \nabla_x f(B_s, s) \cdot dB_s + \frac{1}{2} \Delta_x f(B_s, s) ds.$$

Παρατήρηση 12.7. Προκύπτει από το παραπάνω θεώρημα ότι, αν μια $f \in C^{2,1}(\mathbb{R}^d \times [0, \infty))$ ικανοποιεί την

$$\frac{\partial f}{\partial t}(x, t) + \frac{1}{2} \Delta_x f(x, t) = 0 \quad (12.9)$$

στο $\mathbb{R}^d \times [0, \infty)$ και B είναι μια d -διάστατη κίνηση Brown, τότε η $M_t := f(B_t, t), t \geq 0$ είναι local martingale γιατί ο τύπος τού Itô δίνει

$$df(B_s, s) = \frac{\partial f}{\partial s}(B_s, s) ds + \nabla_x f(B_s, s) dB_s + \frac{1}{2} \Delta_x f(B_s, s) ds = \nabla_x f(B_s, s) dB_s.$$

Βέβαια η M_t είναι martingale αν μπορούμε να δείξουμε ότι $\nabla_x f(B_s, s) \in \mathcal{H}^2[0, t]$ για κάθε $t \geq 0$.

Μια αξιοσημείωτη περίπτωση είναι εκείνη κατά την οποία η f είναι συνάρτηση μόνο τού x , έστω $f(x, t) = u(x)$, οπότε η (12.9) ζητάει $\Delta u = 0$, δηλαδή η u είναι αρμονική.

Παράδειγμα 12.8. Έστω $B = (B^{(1)}, B^{(2)}, \dots, B^{(d)})$ μια d -διάστατη κίνηση Brown και η συνάρτηση $f(x) := (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_d^2 + 1)^{1/2}$. Γράφουμε $x = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ και $|x| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_d^2}$. Η f έχει

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_i}(x) &= \frac{x_i}{\sqrt{|x|^2 + 1}}, \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2}(x) &= \frac{1 + |x|^2 - x_i^2}{(|x|^2 + 1)^{3/2}} \end{aligned}$$

για κάθε $i = 1, 2, \dots, d$ και ικανοποιεί τις υποθέσεις τού Θεωρήματος 12.5. Άρα για την ανέλιξη $X_t := f(B_t)$ έχουμε

$$dX_t = \frac{1}{\sqrt{|B_t|^2 + 1}} \sum_{i=1}^d B_t^{(i)} dB_t^{(i)} + \frac{d + (d-1)|B_t|^2}{2(|B_t|^2 + 1)^{3/2}} dt.$$

12.4 Τύπος Itô για ανελίξεις Itô

Επεκτείνουμε τον ορισμό τής ανέλιξης Itô για ανελίξεις με τιμές στον \mathbb{R}^d , με d θετικό ακέραιο.

Έστω χώρος πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$ στον οποίο ορίζεται μια m -διάστατη κίνηση Brown B και $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ η επαυξημένη διήθηση που αυτή παράγει.

Ορισμός 12.9. **Ανέλιξη Itô** σε αυτόν τον χώρο με τιμές στον \mathbb{R}^d λέμε κάθε ανέλιξη $X : [0, \infty) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}^d$ που γράφεται ως

$$X_t = X_0 + \int_0^t U(s, \omega) ds + \int_0^t V(s, \omega) \cdot dB_s \quad (12.10)$$

για κάθε $t > 0$, με πιθανότητα 1, όπου υποθέτουμε ότι:

- (i) Η X_0 είναι \mathcal{F}_0 προσαρμοσμένη.

(ii) Οι $U(t, \omega) = (u^{(i)}(t, \omega))_{1 \leq i \leq d}$, $V(t, \omega) = (v_{i,j}(t, \omega))_{\substack{1 \leq i \leq d \\ 1 \leq j \leq m}}$ είναι μετρήσιμες προσαρμοσμένες ανελίξεις με τιμές στον \mathbb{R}^d και στον $\mathbb{R}^{d \times m}$ αντίστοιχα.

(iii) Με πιθανότητα 1, για κάθε $t > 0$ και $i = 1, \dots, d, j = 1, \dots, m$ ισχύει

$$\int_0^t |u^{(i)}(s, \omega)| ds < \infty, \int_0^t v_{i,j}(s, \omega)^2 ds < \infty.$$

Το πρώτο ολοκλήρωμα στη (12.10) το λέμε **τιμήμα τάσης** τής ανελίξης, ενώ το δεύτερο, **τιμήμα διάχυσης**. Πιο εύχρηστη είναι η γραφή μας ανελίξης Itô σε διαφορικό συμβολισμό, δηλαδή

$$dX_t = \underbrace{U(t, \omega) dt}_{\text{τιμήμα τάσης}} + \underbrace{V(t, \omega) dB_t}_{\text{τιμήμα διάχυσης}},$$

και πιο αναλυτικά

$$\begin{pmatrix} dX_t^{(1)} \\ \vdots \\ dX_t^{(d)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u^{(1)}(t, \omega) \\ \vdots \\ u^{(d)}(t, \omega) \end{pmatrix} dt + \begin{pmatrix} v_{1,1}(t, \omega) & \cdots & v_{1,m}(t, \omega) \\ \vdots & & \vdots \\ v_{d,1}(t, \omega) & \cdots & v_{d,m}(t, \omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dB_t^{(1)} \\ \vdots \\ dB_t^{(m)} \end{pmatrix}. \quad (12.11)$$

Προφανώς, η ίδια η B είναι ανελίξη Itô. Συμβαίνει λοιπόν και για ανελίξεις Itô να υπάρχει έκδοση τού τύπου τού Itô, την οποία θα παραθέσουμε χωρίς απόδειξη αφού είναι ανάλογη με τις αποδείξεις των προηγούμενων εκδόσεων.

Θεώρημα 12.10 (Τύπος Itô. Έκδοση IV). Έστω $f \in C^2(\mathbb{R}^d)$ και X μια d -διάστατη ανελίξη Itô. Τότε, με πιθανότητα 1, ισχύει

$$f(X_t) = f(X_0) + \int_0^t \nabla f(X_s) \cdot dX_s + \frac{1}{2} \int_0^t \sum_{i,j=1}^d \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(X_s) dX_s^{(i)} dX_s^{(j)} \quad (12.12)$$

για κάθε $t > 0$.

Υπάρχει κάτι όμως που πρέπει να εξηγήσουμε. Τι σημαίνει το γινόμενο $dX_s^{(i)} dX_s^{(j)}$ στον πιο πάνω τύπο; Στη θέση τής ποσότητας $dX_s^{(i)} dX_s^{(j)}$ τοποθετούμε το αποτέλεσμα που προκύπτει αν στο γινόμενο των διαφορικών χρησιμοποιήσουμε τις εκφράσεις για αυτά που δίνει η (12.11), εφαρμόσουμε την επιμεριστική ιδιότητα, και τέλος χρησιμοποιήσουμε τις συμβάσεις

$$\begin{aligned} dt dt &= 0 \\ dB_t^{(i)} dt &= 0 \quad \text{για κάθε } i = 1, \dots, m. \\ dB_t^{(i)} dB_t^{(i)} &= dt \quad \text{για κάθε } i = 1, \dots, m. \\ dB_t^{(i)} dB_t^{(j)} &= 0 \quad \text{για κάθε } i, j = 1, \dots, m \text{ με } i \neq j. \end{aligned} \quad (12.13)$$

Δηλαδή οι μόνοι όροι που συνεισφέρουν είναι διαφορικά που αφορούν την ίδια (μονοδιάστατη) κίνηση Brown, δίνουν διαφορικό dt , και έτσι το δεύτερο ολοκλήρωμα στην (12.12) είναι Lebesgue και όχι στοχαστικό.

Παρατήρηση 12.11. Αυτό που λέει ο τύπος Itô σε όλες του τις μορφές είναι το εξής

$$\left. \begin{array}{l} X_t \text{ ανελίξη Itô,} \\ f \text{ αρκετά λεία} \end{array} \right\} \Rightarrow f(X_t) \text{ ανελίξη Itô.}$$

Επιπλέον, ο τύπος προσδιορίζει το τιμήμα τάσης και το τιμήμα διάχυσης τής ανελίξης $f(X_t)$.

12.4 Τύπος Itô για ανελίξεις Itô

\cdot	dt	$dB_t^{(i)}$	$dB_t^{(j)}$
dt	0	0	0
$dB_t^{(i)}$	0	dt	0
$dB_t^{(j)}$	0	0	dt

Πίνακας 12.1: Πολλαπλασιασμός διαφορικών. $B^{(i)}, B^{(j)}$ είναι δύο ανεξάρτητες μονοδιάστατες κινήσεις Brown.

Πολύ χρήσιμος είναι ο πιο κάτω τύπος που δίνει το διαφορικό γινομένου ανελίξεων Itô. Εναλλακτικά, είναι ο τύπος ολοκλήρωσης κατά μέρη για στοχαστικά ολοκληρώματα.

Πρόταση 12.12. Έστω $(X_t)_{t \geq 0}, (Y_t)_{t \geq 0}$ δύο μονοδιάστατες ανελίξεις Itô. Τότε ισχύει

$$d(X_t Y_t) = Y_t dX_t + X_t dY_t + dX_t dY_t. \quad (12.14)$$

Η αυστηρή γραφή τού τύπου είναι η ολοκληρωτική,

$$X_t Y_t - X_0 Y_0 = \int_0^t Y_s dX_s + \int_0^t X_s dY_s + \int_0^t dX_s dY_s,$$

όπου τα δύο πρώτα ολοκληρώματα είναι ολοκληρώματα ως προς ανελίξεις Itô και έχουν οριστεί στην Παράγραφο 11.2, ενώ το τελευταίο ολοκλήρωμα, με χρήση των συμβάσεων (12.13), δίνει ένα ολοκλήρωμα Lebesgue. Μια συνέπεια τού τύπου (12.14) είναι ότι η $X_t Y_t$ είναι ανέλιξη Itô.

Απόδειξη. Η ανέλιξη

$$Z_t = \begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \end{pmatrix}$$

είναι διδιάστατη ανέλιξη Itô (θα το δείξουμε στο τέλος). Εφαρμόζοντας τον τύπο τού Itô για τη συνάρτηση $f(x, y) = xy$ (που έχει μερικές παραγώγους $f_x = y, f_y = x, f_{x,y} = 1, f_{x,x} = f_{y,y} = 0$) παίρνουμε

$$d(X_t Y_t) = df(Z_t) = Y_t dX_t + X_t dY_t + \frac{1}{2}(dX_t dY_t + dY_t dX_t)$$

που είναι η ζητούμενη. Τώρα θα δείξουμε ότι η Z είναι πράγματι διδιάστατη ανέλιξη Itô. Από την υπόθεση, για τις X, Y έχουμε

$$\begin{aligned} dX_t &= u(t, \omega)dt + V(t, \omega) \cdot dB_t \\ dY_t &= \tilde{u}(t, \omega)dt + \tilde{V}(t, \omega) \cdot dB_t, \end{aligned}$$

όπου B είναι η m -διάστατη κίνηση Brown με βάση την οποία ορίζουμε την έννοια τής ανέλιξης Itô στον συγκεκριμένο χώρο πιθανότητας. Οι ανελίξεις u, \tilde{u} παίρνουν τιμές στο \mathbb{R} και οι V, \tilde{V} στο $\mathbb{R}^{1 \times m}$. Άρα

$$dZ_t = \begin{pmatrix} u(t, \omega) \\ \tilde{u}(t, \omega) \end{pmatrix} dt + \begin{pmatrix} V(t, \omega) \\ \tilde{V}(t, \omega) \end{pmatrix} \cdot dB_t.$$

■

Παράδειγμα 12.13. (Εκθετικά martingales) Έστω μετρήσιμη και προσαρμοσμένη ανέλιξη $(R_t)_{t \geq 0}$ ώστε για κάθε $t > 0$ να ισχύει $\int_0^t R_s^2 ds < \infty$ με πιθανότητα 1. Θέτουμε για κάθε $t \geq 0$,

$$Z_t := \exp\left(\int_0^t R_s dB_s - \frac{1}{2} \int_0^t R_s^2 ds\right).$$

Θα δείξουμε ότι η Z είναι local martingale.

Θεωρούμε την ανελίξη X που ορίζεται σε κάθε $t \geq 0$ ως

$$X_t := \int_0^t R_s dB_s - \frac{1}{2} \int_0^t R_s^2 ds$$

και τη συνάρτηση $f(x) = e^x$. Τότε, η X είναι ανελίξη Itô (Άσκηση) και $Z_t = f(X_t)$. Παρατηρούμε ότι

$$\begin{aligned} dX_t &= R_t dB_t - \frac{1}{2} R_t^2 dt, \\ (dX_t)^2 &= R_t^2 dt. \end{aligned}$$

Έτσι ο τύπος του Itô (έκδοση IV) δίνει

$$\begin{aligned} dZ_t &= f'(X_t) dX_t + \frac{1}{2} f''(X_t) (dX_t)^2 \\ &= Z_t R_t dB_t - \frac{1}{2} Z_t R_t^2 dt + \frac{1}{2} Z_t R_t^2 dt = Z_t R_t dB_t. \end{aligned}$$

Άρα για κάθε $t \geq 0$ έχουμε

$$Z_t = 1 + \int_0^t Z_s R_s dB_s,$$

και το συμπέρασμα έπεται από την Πρόταση 11.7.

Παρατηρούμε επιπλέον τα εξής δύο.

- Αν έχουμε $ZR \in \mathcal{H}^2[0, t]$ για κάθε $t \geq 0$, τότε η Z είναι martingale.
- Αν η ανελίξη R είναι σταθερή συνάρτηση στο $[0, \infty) \times \Omega$ και ίση με έναν αριθμό λ , τότε η Z είναι το martingale που είδαμε στο Θεώρημα 7.1(iii).

Παράδειγμα 12.14. Έστω ότι η $u = u(x, t) : \mathbb{R}^d \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ είναι στοιχείο του $C^{2,1}(\mathbb{R}^d \times [0, \infty))$, είναι φραγμένη σε κάθε σύνολο τής μορφής $\mathbb{R}^d \times [0, T]$ με $T > 0$, και ικανοποιεί

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{2} \Delta_x u \quad \text{στο } \mathbb{R}^d \times (0, \infty), \quad (12.15)$$

$$u(x, 0) = f(x) \quad \text{για κάθε } x \in \mathbb{R}^d, \quad (12.16)$$

όπου f είναι μιά δεδομένη συνεχής, φραγμένη συνάρτηση. Αν B είναι μια d -διάστατη κίνηση Brown, τότε για $t > 0$ σταθερό έχουμε:

(α) Η $(M_s)_{s \in [0, t]}$ με $M_s := u(B_s, t - s)$ για κάθε $s \in [0, t]$ είναι martingale.

(β) $u(x, t) = \mathbf{E}_x\{f(B_t)\}$ για κάθε $x \in \mathbb{R}^d$.

(α) Πράγματι, η $X_s = \begin{pmatrix} B_s \\ t - s \end{pmatrix}$ είναι μια ανελίξη Itô αφού

$$dX_s = \begin{pmatrix} dB_s \\ -ds \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} ds + \begin{pmatrix} \mathbf{1} \\ 0 \end{pmatrix} dB_s.$$

Συμβολίσουμε με $\mathbf{1}$ το διάνυσμα $(1, 1, \dots, 1)^t$ του \mathbb{R}^d . Ο τύπος Itô δίνει για $s \in [0, t]$

$$\begin{aligned} dM_s &= -\frac{\partial u}{\partial s}(B_s, t - s) ds + \nabla_x u(B_s, t - s) dB_s + \frac{1}{2} \Delta_x u(B_s, t - s) ds \\ &= \nabla_x u(B_s, t - s) dB_s \end{aligned}$$

Άρα η M είναι local martingale. Από την άλλη, είναι φραγμένη (από υπόθεση για την u), άρα είναι martingale (Πρόταση 4.18).

(β) Θεωρούμε τώρα μια κίνηση Brown B που να ξεκινάει από το δεδομένο x . Το ότι η M είναι martingale συνεπάγεται ότι $\mathbf{E}_x(M_t) = \mathbf{E}_x(M_0)$. Δηλαδή $\mathbf{E}_x\{u(B_t, 0)\} = \mathbf{E}_x\{u(x, t)\}$. Και έτσι λόγω της (12.16) παίρνουμε $\mathbf{E}_x\{f(B_t)\} = u(x, t)$.

Άρα, αν η εξίσωση θερμότητας (12.15), (12.16) έχει λύση η οποία είναι φραγμένη σε κάθε λωρίδα $\mathbb{R}^d \times [0, T]$ με $T > 0$, τότε αυτή η λύση δίνεται από τη σχέση

$$u(x, t) := \mathbf{E}_x\{f(B_t)\}. \quad (12.17)$$

Αυτή είναι μια πιθανοτική αναπαράσταση μιας λύσης.

Για περισσότερα σχετικά με εφαρμογές τού στοχαστικού λογισμού στη λύση μερικών διαφορικών εξισώσεων, δείτε το Κεφάλαιο 4 του Durrett (1996) και το Κεφάλαιο 4 του Karatzas and Shreve (1991).

12.5 Ο τύπος Ιτό σε γενικά χωρία

Αν X_t είναι μια ανέλιξη Ιτό στον \mathbb{R}^d με $X_0 = x_0$ και f είναι μια συνάρτηση με πεδίο ορισμού ένα ανοιχτό σύνολο $U \subset \mathbb{R}^d$ με $x_0 \in U$ (για παράδειγμα, $x_0 = 0, f(x) = \log(1 - |x|), U = \{x \in \mathbb{R}^d : |x| < 1\}$), τι μπορούμε να πούμε για την ανέλιξη $f(X_t)$; Ο τύπος Ιτό που έχουμε δει δεν εφαρμόζεται. Για τέτοιες περιπτώσεις θα δούμε μια ακόμα έκδοση τού τύπου.

Για ένα $A \subset \mathbb{R}^d$, θα γράφουμε A^c για το συμπλήρωμά του και

$$\tau_A := \inf\{t \geq 0 : X_t \in A^c\}$$

για τον χρόνο εξόδου από το A .

Αν η $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ είναι δυό φορές διαφορίσιμη, θα μας φανεί χρήσιμη η εξής προσέγγιση. Παίρνουμε $(K_n)_{n \geq 1}$ αύξουσα ακολουθία συμπαγών συνόλων υποσυνόλων τού U που έχουν ένωση το U και επιπλέον ικανοποιούν $K_n \subset K_{n+1}$ (π.χ., $K_n := \{x \in U : |x| \leq n, \text{dist}(x, U^c) \geq 1/n\}$). Υπάρχουν C^∞ συναρτήσεις $g_n : \mathbb{R}^d \rightarrow [0, 1]$ με $g_n = 1$ στο K_n και $g = 0$ στο $(K_{n+1}^c)^c$ [Θεώρημα 8.18 στο Folland (1999)]. Επεκτείνουμε την f στο \mathbb{R}^d θέτοντας την ίση με 0 στο U^c . Τότε η $f_n := fg_n \in C^2(\mathbb{R}^d)$ και η ίδια καθώς και οι παράγωγοι της πρώτης και δεύτερης τάξης ταυτίζονται με τις αντίστοιχες τής f στο K_n . Επίσης $f = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n$ σημειακά στο U .

Θεώρημα 12.15 (Τύπος Ιτό. Έκδοση V). Έστω $U \subset \mathbb{R}^d$ ανοιχτό σύνολο, $f \in C^2(U)$, και X μια d -διάστατη ανέλιξη Ιτό με $X_0 \in U$. Τότε με πιθανότητα 1, ισχύει

$$f(X_t) = f(X_0) + \int_0^t \nabla f(X_s) \cdot dX_s + \frac{1}{2} \int_0^t \sum_{i,j=1}^d \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}(X_s) dX_s^{(i)} dX_s^{(j)} \quad (12.18)$$

για κάθε $0 \leq t < \tau_U$.

Απόδειξη. Ο τύπος Ιτό για τις συναρτήσεις $f_n := fg_n$ δίνει ότι με πιθανότητα 1 ισχύει

$$f_n(X_t) = f_n(X_0) + \int_0^t \nabla_x f_n(X_s) \cdot dX_s + \frac{1}{2} \int_0^t \sum_{i,j=1}^d \frac{\partial^2 f_n}{\partial x_i \partial x_j}(X_s) dX_s^{(i)} dX_s^{(j)}$$

για κάθε $t \geq 0$ και για κάθε $n \geq 1$. Τώρα επειδή $\tau_{K_n^c} \rightarrow \tau_U$, αν $t < \tau_U$, υπάρχει n με $t < \tau_{K_n^c}$. Επειδή για $s < \tau_n$ το $X_s \in K_n$ όπου οι f, f_n καθώς και οι μερικές παράγωγοι τους πρώτης και δεύτερης

τάξης ταυτίζονται, το Λήμμα Γ'.1 (στο Παράρτημα Γ', μέσα στην απόδειξη της Πρότασης 11.1) δίνει ότι η προηγούμενη σχέση μετασχηματίζεται στην (12.18). Κάθε χρόνος $\tau_{K_n^\circ}$ είναι χρόνος διακοπής γιατί είναι ο χρόνος εισόδου στο κλειστό σύνολο $\mathbb{R}^d \setminus K_n^\circ$, και επομένως εφαρμόζεται η έκδοση της Πρότασης 5.13 στην περίπτωση d -διάστατης συνεχούς ανέλιξης στη θέση της B . Η απόδειξή της πρότασης έχει γραφεί ώστε η γενίκευση να είναι άμεση. ■

Ασκήσεις

12.1 Έστω B μονοδιάστατη τυπική κίνηση Brown. Δείξτε ότι για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ και $t > 0$, ισχύει

$$\int_0^t B_s^n dB_s = \frac{1}{n+1} B_t^{n+1} - \frac{1}{2} n \int_0^t B_s^{n-1} ds.$$

12.2 Έστω B μονοδιάστατη τυπική κίνηση Brown. Για $k \in \mathbb{N}$ και $t > 0$, θέτουμε $a_k(t) := \mathbf{E}(B_t^k)$. Να δειχθεί ότι για $k \in \mathbb{N}$ με $k \geq 2$ και $t > 0$, ισχύει

$$a_k(t) = \frac{1}{2} k(k-1) \int_0^t a_{k-2}(s) ds,$$

και άρα

$$a_{2k}(t) = \frac{(2k)!}{k! 2^k} t^k$$

για κάθε $k \in \mathbb{N}$.

12.3 Έστω $t > 0$ και $(\Delta_n)_{n \geq 1}$ ακολουθία διαμερίσεων τού διαστήματος $[0, t]$ όπως στην Πρόταση 8.10. Έστω επίσης B, W δύο ανεξάρτητες κινήσεις Brown. Να δειχθεί ότι η ακολουθία

$$R_n := \sum_{i=1}^{k(n)} (B_{t_i^{(n)}} - B_{t_{i-1}^{(n)}})(W_{t_i^{(n)}} - W_{t_{i-1}^{(n)}})$$

συγκλίνει στο 0 στον $L^2(\mathbf{P})$ καθώς $n \rightarrow \infty$. Αυτό το αποτέλεσμα είναι χρήσιμο για να δικαιολογήσει κανείς τη σύμβαση $dWdB = 0$.

12.4 Έστω B, W ανεξάρτητες μονοδιάστατες κινήσεις Brown. Να υπολογιστούν τα διαφορικά των εξής ανελιξιών:

(α) B_t^4 (β) $\cos(tB_t)$ (γ) $B_t^2 e^{\int_0^t s dB_s}$ (δ) $B_t^2 W_t$ (ε) $\sin\{B_t W_t\}$

12.5 Έστω B μονοδιάστατη κίνηση Brown και $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ η επαυξημένη διήθηση που παράγει. Να δειχθεί ότι είναι martingales ως προς αυτή τη διήθηση οι παρακάτω ανελιξίες.

(α) $X_t := t^2 B_t - 2 \int_0^t s B_s ds, t \geq 0$.

(β) $Y_t := (B_t + t)e^{-B_t - (t/2)}, t \geq 0$.

12.6 Να αποδειχθεί ότι η έκδοση IV του τύπου του Itô περιέχει τις τρεις προηγούμενες.

12.7 Έστω $u, g : \mathbb{R}^d \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ φραγμένες σε κάθε σύνολο τής μορφής $\mathbb{R}^d \times [0, T]$ με $T > 0$, με την g συνεχή και την $u = u(x, t)$ στοιχείο τού $C^{2,1}(\mathbb{R}^d \times [0, \infty))$, που επιπλέον ικανοποιούν

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= \frac{1}{2} \Delta_x u + g && \text{στο } \mathbb{R}^d \times (0, \infty), \\ u(x, 0) &= f(x) && \text{για κάθε } x \in \mathbb{R}, \end{aligned}$$

όπου f είναι μια δεδομένη φραγμένη, συνεχής συνάρτηση. Θεωρούμε $t > 0$ σταθερό. Να δειχθεί ότι:

(α) Για B οποιαδήποτε d -διάστατη κίνηση Brown, η $(M_s)_{s \in [0, t]}$ με

$$M_s := u(B_s, t-s) + \int_0^s g(B_r, t-r) dr$$

12.5 Ο τύπος Itô σε γενικά χωρία

για κάθε $s \in [0, t]$ είναι martingale.

(β)

$$u(x, t) = \mathbf{E}_x \left\{ f(B_t) + \int_0^t g(B_s, t-s) ds \right\}$$

για κάθε $x \in \mathbb{R}^d$. Υπενθυμίζουμε ότι ο συμβολισμός \mathbf{E}_x σημαίνει ότι η B είναι d -διάστατη κίνηση Brown με $B_0 = x$.

Μέρος IV

Εφαρμογές

13

Εφαρμογές στην κίνηση Brown

Σε αυτό το κεφάλαιο θέλουμε να κάνουμε για την πολυδιάστατη κίνηση Brown κάτι ανάλογο με αυτό που κάναμε στην Παράγραφο 7.2 για τη μονοδιάστατη κίνηση Brown. Δηλαδή να μελετήσουμε το πρόβλημα τής εξόδου από έναν δακτύλιο $\{x \in \mathbb{R}^d : r < |x| < R\}$. Η τακτική είναι η ίδια. Πρέπει πρώτα να βρούμε ένα κατάλληλο martingale και μετά να εφαρμόσουμε το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής.

Για την εύρεση martingale έχουμε τώρα ένα ακόμα εργαλείο, τον τύπο τού Itô. Συνέπεια τής τρίτης έκδοσης τού τύπου ήταν ότι αν η u είναι αρμονική συνάρτηση στον \mathbb{R}^d και η B είναι d -διάστατη κίνηση Brown, τότε η $(u(B_t))_{t \geq 0}$ είναι local martingale. Και αν ξέρουμε για αυτό ότι είναι φραγμένο ή ότι $\nabla u(B_s) \in \mathcal{H}^2[0, t]$ για κάθε $t \geq 0$, τότε είναι martingale (Πρόταση 4.18 για τον πρώτο ισχυρισμό). Αυτό είναι το σημείο εκκίνησης.

13.1 Αρμονικές συναρτήσεις και το πρόβλημα εξόδου

Για να λειτουργήσει το σχέδιό μας, χρειαζόμαστε αρμονική συνάρτηση που να είναι σταθερή σε κάθε σφαιρικό φλοιό $\{x \in \mathbb{R}^d : |x| = R\}$, δηλαδή ακτινικά συμμετρική. Ουσιαστικά, για κάθε διάσταση d , υπάρχει μόνο μία τέτοια μη σταθερή αρμονική συνάρτηση.

Για κάθε $d \in \mathbb{N}$ με $d \geq 2$, ορίζουμε τη συνάρτηση $u_d : \mathbb{R}^d \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$\begin{aligned} u_2(x) &:= \log |x| = \log \sqrt{x_1^2 + x_2^2} && \text{αν } d = 2, \\ u_d(x) &:= |x|^{2-d} = (x_1^2 + \dots + x_d^2)^{(2-d)/2} && \text{αν } d \geq 3 \end{aligned} \quad (13.1)$$

για κάθε $x = (x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d \setminus \{0\}$. Καθεμία από αυτές τις συναρτήσεις είναι αρμονική στο πεδίο ορισμού της.

Λήμμα 13.1. Για κάθε $d \in \mathbb{N}$ με $d \geq 2$, ισχύει

$$\Delta u_d(x) = 0$$

για κάθε $x \in \mathbb{R}^d \setminus \{0\}$.

Απόδειξη. Αφήνουμε την περίπτωση $d = 2$ για άσκηση. Υποθέτουμε $d \geq 3$. Τότε

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_d}{\partial x_1}(x) &= \left(1 - \frac{d}{2}\right) (x_1^2 + \dots + x_d^2)^{-d/2} 2x_1 = (2-d)(x_1^2 + \dots + x_d^2)^{-d/2} x_1, \\ \frac{\partial^2 u_d}{\partial x_1^2}(x) &= (2-d)|x|^{-d} - (2-d)(-d/2)|x|^{-(d+2)} 2x_1^2 = (2-d)\{|x|^{-d} - dx_1^2|x|^{-(d+2)}\} \end{aligned}$$

Οι εκφράσεις για τις παραγώγους ως προς τα άλλα x_i είναι ανάλογες. Οπότε προσθέτοντας βρίσκουμε

$$\Delta u_d(x) = (2-d)\{d|x|^{-d} - d|x|^2|x|^{-d-2}\} = 0. \quad \blacksquare$$

Υπενθυμίζουμε ότι όταν θεωρούμε μια κίνηση Brown με $B_0 = x \in \mathbb{R}^d$, μια κίνηση, δηλαδή, που ξεκινάει από το x , χρησιμοποιούμε για την πιθανότητα και τη μέση τιμή ως προς τη B τα σύμβολα $\mathbf{P}_x, \mathbf{E}_x$.

Πρόταση 13.2. Έστω $d \geq 2$ και $U \subset \mathbb{R}^d$ ανοικτό φραγμένο σύνολο, $u \in C^2(U) \cap C(\bar{U})$ με $\Delta u = 0$ στο U , και $\tau_U := \inf\{s \geq 0 : B_s \notin U\}$. Τότε

$$u(x) = \mathbf{E}_x\{u(B_{\tau_U})\}$$

για κάθε $x \in U$.

Απόδειξη. Έστω $R = \sup\{\|x - y\|_\infty : x, y \in U\}$, όπου για $z \in \mathbb{R}^d$ θέτουμε $\|z\|_\infty := \max\{|z_1|, |z_2|, \dots, |z_d|\}$. Ο τ_U είναι πεπερασμένος με πιθανότητα 1 γιατί είναι μικρότερος από τον χρόνο που χρειάζεται ώσπου η πρώτη συντεταγμένη της B να βγει από το διάστημα $[-R, R]$ και αυτός είναι πεπερασμένος με βάση την Πρόταση 5.15 (επίσης και λόγω της Πρότασης 7.2).

Έστω $(K_n)_{n \geq 1}$ και $(g_n)_{n \geq 1}$ όπως στην Παράγραφο 12.5. Ο τύπος Itô από την ίδια παράγραφο δίνει ότι με πιθανότητα 1, για κάθε $t \geq 0$, ισχύει

$$u(B_{t \wedge \tau_{K_n}^c}) = u(B_0) + \int_0^{t \wedge \tau_{K_n}^c} \nabla u(B_s) \cdot dB_s + \frac{1}{2} \int_0^{t \wedge \tau_{K_n}^c} \Delta u(B_s) ds. \quad (13.2)$$

Επειδή $\Delta u = 0$, με χρήση του Λήμματος Γ'.1, η προηγούμενη σχέση γίνεται

$$u(B_{t \wedge \tau_{K_n}^c}) = u(x) + \int_0^{t \wedge \tau_{K_n}^c} \nabla u(B_s) \cdot dB_s. \quad (13.3)$$

Επεκτείνουμε τη u στο \mathbb{R}^d ορίζοντας την ίση με 0 στο U^c . Τότε

$$\int_0^{t \wedge \tau_{K_n}^c} \nabla u(B_s) \cdot dB_s = \int_0^{t \wedge \tau_{K_n}^c} \nabla(g_n u)(B_s) \cdot dB_s = X_{t \wedge \tau_{K_n}^c}$$

όπου

$$X_t := \int_0^t \nabla(g_n u)(B_s) \cdot dB_s$$

για κάθε $t \geq 0$. Η $(X_t)_{t \geq 0}$ είναι συνεχές martingale γιατί από τις υποθέσεις προκύπτει ότι η $\nabla(g_n u)$ είναι φραγμένη. Για δεδομένο $t > 0$, ο $t \wedge \tau_{K_n}^c$ είναι φραγμένος χρόνος διακοπής (προφανής γενίκευση της Πρότασης 5.13), οπότε από το Θεώρημα 4.14 έχουμε $\mathbf{E}(X_{t \wedge \tau_{K_n}^c}) = \mathbf{E}(X_0) = 0$, και έπειτα η (13.3) δίνει

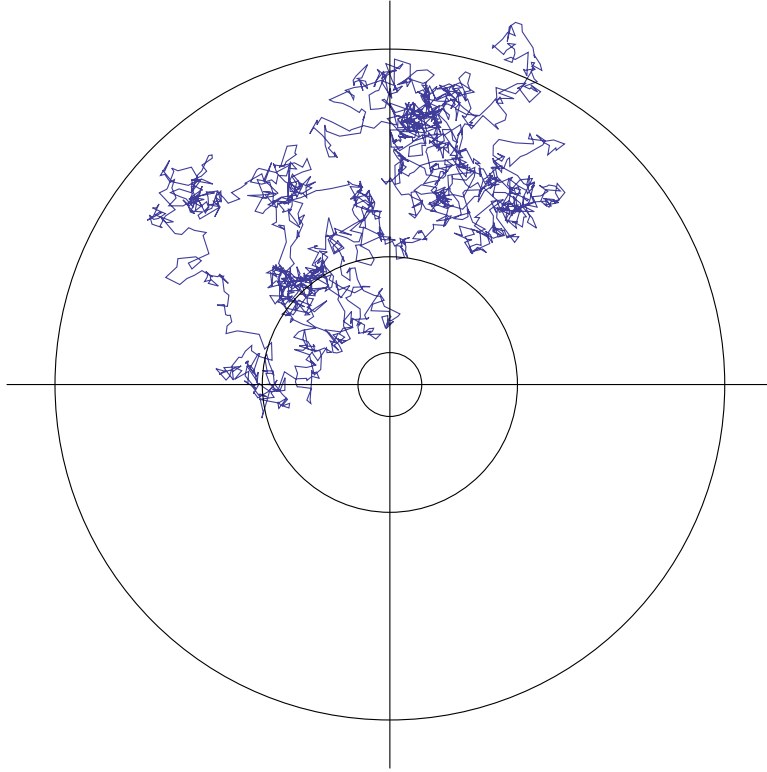
$$u(x) = \mathbf{E}_x\{u(B_{t \wedge \tau_{K_n}^c})\}.$$

Τώρα εφαρμόζουμε το θεώρημα φραγμένης σύγκλισης στο δεξί μέλος της τελευταίας σχέσης παίρνοντας $t \rightarrow \infty$ και έπειτα $n \rightarrow \infty$. ■

13.2 Έξοδος από δακτύλιο και επαναληπτικότητα

Παίρνουμε την κίνηση Brown B στο \mathbb{R}^d που ξεκινάει από ένα σημείο $x \neq 0$ και θεωρούμε δύο σφαίρες (κύκλους αν $d = 2$) ακτίνας r και R αντίστοιχα, όπου τα r, R ικανοποιούν $r < |x| < R$. Η κίνηση θα βγει κάποια στιγμή από τον δακτύλιο $\{w \in \mathbb{R}^d : r < |w| < R\}$. Η πιθανότητα η έξοδος να γίνει από το κέλυφος $\{w : |w| = r\}$ δίνεται από μια πολύ απλή έκφραση, την οποία θα υπολογίσουμε. Για τα παρακάτω θα χρησιμοποιήσουμε τον συμβολισμό

$$\tau_a = \inf\{s \geq 0 : |B_s| = a\}$$



Σχήμα 13.1: Πήραμε $r = 0.1, R = 1, |x| = 0.4$, συγκεκριμένα $x = (-0.4/\sqrt{2}, 0.4/\sqrt{2})$ και τρέξαμε την κίνηση Brown για χρόνο 1. Σε αυτή την πραγματοποίηση, η κίνηση Brown βγήκε από την εξωτερική περιφέρεια.

όπου $a \geq 0$. Είναι δηλαδή ο πρώτος χρόνος που η κίνηση συναντά την περιφέρεια ακτίνας a . Έπεται από την Πρόταση 5.13 ότι είναι χρόνος διακοπής.

Επίσης, καθεμία από τις u_d τής (13.1) είναι ακτινικά συμμετρική και γράφεται ως $u_d(x) = f_d(|x|)$ για κάθε x στο πεδίο ορισμού της, όπου η $f_d : (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ ορίζεται ως

$$\begin{aligned} f_2(r) &:= \log r & \text{αν } d = 2, \\ f_d(r) &:= r^{2-d} & \text{αν } d \geq 3, \end{aligned} \quad (13.4)$$

για κάθε $r > 0$.

Πρόταση 13.3. Για $0 < r < R$ και $x \in \mathbb{R}^d$ με $r < |x| < R$, ισχύει

$$\mathbf{P}_x(\tau_r < \tau_R) = \frac{f_d(R) - f_d(|x|)}{f_d(R) - f_d(r)}.$$

Απόδειξη. Έφαρμόζουμε την Πρόταση 13.2 για το σύνολο $G_{r,R} := \{x \in \mathbb{R}^d : r < |x| < R\}$ και τη συνάρτηση u_d . Ο χρόνος τ εξόδου από το $G_{r,R}$ ισούται με $\tau_r \wedge \tau_R$ και είναι χρόνος διακοπής (Πρόταση 5.13). Άρα

$$\begin{aligned} f_d(|x|) = u_d(x) &= \mathbf{E}_x\{u_d(B_\tau)\} = \mathbf{E}_x\{u_d(B_\tau)\mathbf{1}_{\tau_r < \tau_R} + u_d(B_\tau)\mathbf{1}_{\tau_R < \tau_r}\} = \mathbf{E}_x\{f_d(r)\mathbf{1}_{\tau_r < \tau_R} + f_d(R)\mathbf{1}_{\tau_R < \tau_r}\} \\ &= f_d(r)\mathbf{P}_x(\tau_r < \tau_R) + f_d(R)\mathbf{P}_x(\tau_R < \tau_r), \end{aligned}$$

απ' όπου προκύπτει το ζητούμενο. ■

Για κάθε Borel σύνολο $A \subset \mathbb{R}^d$ θέτουμε

$$T_A := \inf\{s \geq 0 : B_s \in A\},$$

τον πρώτο χρόνο που η κίνηση Brown συναντά το A . Επίσης, για $x \in \mathbb{R}^d$ και $r > 0$, θέτουμε

$$D(x, r) := \{y \in \mathbb{R}^d : |x - y| \leq r\},$$

την κλειστή σφαίρα με κέντρο x και ακτίνα r , όπου $|\cdot|$ είναι η Ευκλείδεια νόρμα.

Πόρισμα 13.4. Έστω B μια d -διάστατη κίνηση Brown, τότε για κάθε $r > 0$, $x \in \mathbb{R}^d$ με $|x| > r$ ισχύει

$$\mathbf{P}_x(T_{D(0,r)} < \infty) = \begin{cases} 1 & \text{αν } d = 2, \\ \left(\frac{r}{|x|}\right)^{d-2} < 1 & \text{αν } d \geq 3. \end{cases}$$

Απόδειξη. Επειδή η κίνηση Brown έχει συνεχή μονοπάτια και ξεκινάει εκτός του $D(0, r)$, θα ισχύει $T_{D(0,r)} = \tau_r$. Όπως στην απόδειξη της Πρότασης 13.2, παίρνουμε ότι $\tau_n < \infty$ με πιθανότητα 1 για κάθε ακέραιο $n > |x|$, και από τη συνέχεια των μονοπατιών, παίρνουμε ότι με πιθανότητα 1 ισχύει $\lim_{n \rightarrow \infty} \tau_n = \infty$ (αν για κάποιο $\omega \in \Omega$ το όριο είναι πεπερασμένο, έστω a , τότε το σύνολο $B([0, a])$ θα ήταν μη φραγμένο και άρα η B^ω όχι συνεχής). Έστω A η τομή όλων αυτών των συνόλων πιθανότητας 1 (έχουν αριθμησιμο πλήθος, άρα $\mathbf{P}(A) = 1$). Τότε $A \cap \{\tau_r < \infty\} = A \cap (\cup_{n=1}^{\infty} \{\tau_r < \tau_n\})$, η ένωση είναι πάνω σε αύξουσα ακολουθία συνόλων και άρα $\mathbf{P}_x(\tau_r < \infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}_x(\tau_r < \tau_n)$. Αν $d = 2$, για $r < |x| < n$ έχουμε

$$\mathbf{P}_x(\tau_r < \tau_n) = \frac{\log n - \log |x|}{\log n - \log r} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1.$$

Αν $d \geq 3$, για $r < |x| < n$ έχουμε

$$\mathbf{P}_x(\tau_r < \tau_n) = \frac{n^{2-d} - |x|^{2-d}}{n^{2-d} - r^{2-d}} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \left(\frac{r}{|x|}\right)^{d-2}$$

αφού $\lim_{n \rightarrow \infty} n^{2-d} = 0$. ■

Το προηγούμενο πόρισμα έχει την εξής συνέπεια.

Πόρισμα 13.5. Έστω B μια d -διάστατη κίνηση Brown με $B_0 = x \in \mathbb{R}^d$.

(α) Αν $d = 2$, τότε για κάθε ανοιχτό $U \subset \mathbb{R}^2$, με πιθανότητα 1, υπάρχει ακολουθία χρόνων $(t_n)_{n \geq 1}$ με $\lim_{n \rightarrow \infty} t_n = \infty$ και $B_{t_n} \in U$ για κάθε $n \geq 1$.

(β) Αν $d \geq 3$, τότε $\lim_{t \rightarrow \infty} |B_t| = \infty$ με πιθανότητα 1.

Απόδειξη. (α) Αρκεί να δείξουμε τον ισχυρισμό για $U = D(0, r)$ όπου $r > 0$ δεδομένο γιατί, για οποιαδήποτε άλλη σφαίρα $D(x_0, r)$, η $B_t \in D(x_0, r)$ αν και μόνο αν $W_t \in D(0, r)$ όπου $W_t := B_t - x_0$ είναι κίνηση Brown με $W_0 = x - x_0$. Θέτουμε

$$\begin{aligned} t_1 &= \inf\{s \geq 0 : |B_s| = r/2\}, \\ \sigma_{k+1} &= \inf\{s > t_{k+1} : |B_s| = r + 1\} && \text{για κάθε } k \in \mathbb{N}, \\ t_{k+1} &= \inf\{s > \sigma_k : |B_s| = r/2\} && \text{για κάθε } k \in \mathbb{N}, k \geq 1. \end{aligned}$$

Είναι χρόνοι διακοπής (άσκηση).

Ισχυρισμός. Με πιθανότητα 1 όλοι οι χρόνοι σ_k, t_k είναι πεπερασμένοι και $\lim_{k \rightarrow \infty} t_k = \infty$.

Ο $t_1 < \infty$ με πιθανότητα 1 είτε αν $|x| > r/2$ (από το προηγούμενο πόρισμα) είτε αν $|x| < r/2$ (από την Πρόταση 5.15). Για τον σ_1 , θεωρούμε την ανέλιξη $X_t := B(t_1 + t) - B(t_1)$, $t \geq 0$, η οποία, με βάση την ισχυρή ιδιότητα Markov, είναι κίνηση Brown ανεξάρτητη από την \mathcal{F}_{t_1} . Για κάθε $y \in \mathbb{R}^2$,

θεωρούμε την τυχαία μεταβλητή $T_X(y) := \inf\{u > 0 : |X_u + y| = r + 1\}$, η οποία είναι ανεξάρτητη της \mathcal{F}_{t_1} . Τότε

$$\sigma_1 = t_1 + T_X(B_{t_1})$$

και

$$\mathbf{P}(\sigma_1 < \infty) = \mathbf{E}(\mathbf{1}_{t_1 < \infty} \mathbf{1}_{T_X(B_{t_1}) < \infty}) = \mathbf{E}(\mathbf{1}_{t_1 < \infty} \mathbf{E}(\mathbf{1}_{T_X(B_{t_1}) < \infty} | \mathcal{F}_{t_1})).$$

Με βάση την πρόταση 2.13, $\mathbf{E}(\mathbf{1}_{T_X(B_{t_1}) < \infty} | \mathcal{F}_{t_1}) = \phi(B_{t_1})$ όπου $\phi(y) := \mathbf{P}(T_X(y) < \infty)$. Όμως $\phi(y) = 1$ για κάθε $y \in \mathbb{R}^2$. Άρα $\mathbf{P}(\sigma_1 < \infty) = 1$. Με όμοια διαδικασία, όπως για το σ_1 , δείχνουμε ότι $\mathbf{P}(t_2 < \infty) = 1$. Έτσι, με επαγωγή (την οποία παραλείπουμε), έπεται το πρώτο μέρος τού ισχυρισμού. Για το δεύτερο μέρος, ας ονομάσουμε Ω_1 ένα υποσύνολο τού Ω το οποίο έχει πιθανότητα 1 ώστε για $\omega \in \Omega_1$ η B να έχει συνεχές μονοπάτι και $t_k < \infty$ για κάθε $k \in \mathbb{N}$. Αν για κάποιο $\omega \in \Omega_1$ ισχύει $\lim_{k \rightarrow \infty} t_k(\omega) = a < \infty$, τότε επειδή $|B_{\sigma_k} - B_{t_k}| > 1$, παίρνοντας $k \rightarrow \infty$ στην ανισότητα οδηγούμαστε στην $0 = |B_a - B_a| \geq 1$, άτοπο.

Παρατηρούμε τέλος ότι $B_{t_k} \in U$ για κάθε $k \geq 1$, και έτσι το μέρος (α) αποδείχθηκε.

(β) Για κάθε $n \geq 1$, θέτουμε

$$\tau_n := \inf\{s \geq 0 : |B_s| = n^3\} \text{ και}$$

$$A_n := \{|B_t| > n \text{ για κάθε } t \geq \tau_n\}.$$

Ο τ_n είναι χρόνος διακοπής και με πιθανότητα 1 είναι πεπερασμένος. Εφαρμόζοντας την ισχυρή ιδιότητα Markov για τον τ_n υπολογίζουμε

$$\mathbf{P}_x(A_n^c) = \mathbf{E}_x \mathbf{E}_x(\mathbf{1}_{A_n^c} | \mathcal{F}_{\tau_n}) = \mathbf{E}_x\{\mathbf{P}_{B_{\tau_n}}(A_n^c)\} = \mathbf{E}_x\{\mathbf{P}_{B_{\tau_n}}(T_{D(0,n)} < \infty)\} = \left(\frac{n}{n^3}\right)^{d-2} = \frac{1}{n^{2(d-2)}}.$$

Άρα $\sum_{n \geq 1} \mathbf{P}_x(A_n^c) < \infty$ και το συμπέρασμα έπεται από το πρώτο Λήμμα Borel-Cantelli. ■

Με την ορολογία τής γενικής θεωρίας των στοχαστικών ανελίξεων, το προηγούμενο πόρισμα λέει ότι η κίνηση Brown είναι επαναληπτική για $d = 2$ και παροδική για $d \geq 3$.

Το Πόρισμα 13.4 λέει ότι η διδιάστατη κίνηση Brown επισκέπτεται με πιθανότητα 1 οποιαδήποτε περιοχή τού 0. Επισκέπτεται άραγε το 0 το ίδιο; Η απάντηση είναι όχι και είναι επίσης πόρισμα τής Πρότασης 13.3.

Πόρισμα 13.6. Για $d \geq 2$, η d -διάστατη κίνηση Brown ικανοποιεί

$$\mathbf{P}_x(\text{υπάρχει } t \geq 0 \text{ με } B_t = 0) = \mathbf{P}_x(T_{\{0\}} < \infty) = 0$$

για κάθε $x \in \mathbb{R}^d \setminus \{0\}$.

Απόδειξη. Επειδή η B ξεκινάει από το x , για κάθε $n \geq 1$ φυσικό με $1/n < |x|$, έχουμε $\tau_{1/n} < \tau_0$, άρα για $R > |x|$ ισχύει

$$\mathbf{P}_x(\tau_0 < \tau_R) \leq \mathbf{P}_x(\tau_{1/n} < \tau_R).$$

Με χρήση τής Πρότασης 13.3 παίρνουμε ότι η τελευταία ποσότητα τείνει στο 0 για $n \rightarrow \infty$ (απλώς παρατηρούμε ότι $\lim_{n \rightarrow \infty} |f_d(1/n)| = \infty$ για κάθε $d \geq 2$). Άρα $\mathbf{P}_x(\tau_0 < \tau_R) = 0$ για κάθε $R > |x|$. Όμοια όπως πιο πάνω, αυτό δίνει ότι $\mathbf{P}_x(\tau_0 < \infty) = \lim_{R \rightarrow \infty} \mathbf{P}_x(\tau_0 < \tau_R) = 0$. ■

Η συμπεριφορά τής μονοδιάστατης κίνησης Brown είναι πιο εύκολο να μελετηθεί. Χτυπάει κάθε πραγματικό αριθμό για οσοδήποτε μεγάλους χρόνους θέλουμε (προκύπτει από την Πρόταση 5.15). Δηλαδή είναι η «πιο επαναληπτική» από όλες τις κινήσεις Brown.

Παράδειγμα 13.7 (Ένα local martingale που δεν είναι martingale). Έστω $B = (B^{(1)}, B^{(2)})$ μια δι-διάστατη κίνηση Brown με $B_0 \neq 0$ και η συνάρτηση $f(x) := (1/2) \log(x_1^2 + x_2^2)$ που ορίζεται στο $U := \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$. Γράφουμε $x = (x_1, x_2)$ και $|x| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$. Η f έχει

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_i}(x) &= \frac{x_i}{x_1^2 + x_2^2}, \quad i = 1, 2. \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2}(x) &= \frac{x_2^2 - x_1^2}{(x_1^2 + x_2^2)^2}, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2}(x) = \frac{x_1^2 - x_2^2}{(x_1^2 + x_2^2)^2} \end{aligned}$$

και ικανοποιεί τις υποθέσεις τού Θεωρήματος 12.15. Άρα για την ανέλιξη $X_t := f(B_t)$ έχουμε

$$\begin{aligned} dX_t &= \frac{B_t^{(1)}}{|B_t|^2} dB_t^{(1)} + \frac{B_t^{(2)}}{|B_t|^2} dB_t^{(2)} + \frac{1}{2} \frac{(B_t^{(2)})^2 - (B_t^{(1)})^2}{|B_t|^4} dt + \frac{1}{2} \frac{(B_t^{(1)})^2 - (B_t^{(2)})^2}{|B_t|^4} dt \\ &= \frac{B_t^{(1)}}{|B_t|^2} dB_t^{(1)} + \frac{B_t^{(2)}}{|B_t|^2} dB_t^{(2)} \end{aligned}$$

για κάθε $t < \tau_U$. Όμως το $\tau_U = \infty$ λόγω του Πορισματος 13.6. Επειδή λοιπόν η X_t είναι ένα στοχαστικό ολοκλήρωμα ως προς την κίνηση Brown, έπεται από την Πρόταση 11.7 ότι είναι local martingale. Αποδεικνύεται με χρήση τού θεωρήματος σύγκλισης των martingales ότι η X δεν είναι martingale.

Επίσης, αποδεικνύεται ότι αν η B είναι d -διάστατη κίνηση Brown με $B_0 \neq 0$, τότε η $X_t = |B_t|^{2-d}$ είναι local martingale (άσκηση) αλλά όχι martingale.

14

Στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις

14.1 Γενικά

Στοχαστική διαφορική εξίσωση λέμε μια εξίσωση τής μορφής

$$\begin{aligned} dX_t &= \mu(t, X_t) dt + \sigma(t, X_t) dB_t, \\ X_0 &= x_0, \end{aligned} \quad (14.1)$$

με $\mu, \sigma : [0, \infty) \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ μετρήσιμες συναρτήσεις, $x_0 \in \mathbb{R}$, και B (μονοδιάστατη) κίνηση Brown. Όταν $\sigma \equiv 0$, η (14.1) είναι η γενική μορφή τής συνήθους διαφορικής εξίσωσης πρώτης τάξης.

Θεωρούμε την επαυξημένη διήθηση $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$ που παράγεται από την κίνηση Brown όπως στην Παράγραφο 5.3. Λύση τής (14.1) λέμε κάθε ανέλιξη $(X_t)_{t \geq 0}$ που

- έχει συνεχή μονοπάτια
- είναι προσαρμοσμένη στην $(\mathcal{F}_t)_{t \geq 0}$
- για κάθε $t > 0$, με πιθανότητα 1, ισχύει

$$\int_0^t |\mu(s, X_s)| ds < \infty, \quad \int_0^t \sigma^2(s, X_s) ds < \infty$$

- με πιθανότητα 1 ισχύει

$$X_t = x_0 + \int_0^t \mu(s, X_s) ds + \int_0^t \sigma(s, X_s) dB_s \quad \text{για κάθε } t > 0. \quad (14.2)$$

Θα σχολιάσουμε τώρα τη σημασία των συναρτήσεων μ, σ . Ας υποθέσουμε ότι είναι και οι δύο τους φραγμένες και συνεχείς συναρτήσεις. Με χρήση τής (14.2) και της Άσκησης 4.13 παίρνουμε

$$\mathbf{E}(X_{t+h} - X_t | \mathcal{F}_t) = \int_t^{t+h} \mathbf{E}(\mu(s, X_s) | \mathcal{F}_t) ds \approx h\mu(t, X_t),$$

δηλαδή η $\mu(t, x)$ δίνει το ρυθμό τής μέσης μεταβολής τής X τον χρόνο t δεδομένου τού παρελθόντος \mathcal{F}_t αν $X_t = x$. Για την ερμηνεία τής σ , υπολογίζουμε

$$\begin{aligned} \text{Var}(X_{t+h} - X_t | \mathcal{F}_t) &= \mathbf{E}(\{X_{t+h} - X_t - \mathbf{E}(X_{t+h} - X_t | \mathcal{F}_t)\}^2 | \mathcal{F}_t) \\ &= \mathbf{E}\left(\left\{\int_t^{t+h} \{\mu(s, X_s) - \mathbf{E}(\mu(s, X_s) | \mathcal{F}_t)\} ds + \int_t^{t+h} \sigma(s, X_s) dB_s\right\}^2 \middle| \mathcal{F}_t\right) \\ &= o(h) + \mathbf{E}\left(\left\{\int_t^{t+h} \sigma(s, X_s) dB_s\right\}^2 \middle| \mathcal{F}_t\right) = \mathbf{E}\left(\int_t^{t+h} \sigma^2(s, X_s) ds \middle| \mathcal{F}_t\right) + o(h) \\ &\approx h\sigma^2(t, X_t). \end{aligned}$$

Με $o(h)$ συμβολίζουμε μια συνάρτηση $g(h)$ που έχει την ιδιότητα $\lim_{h \rightarrow 0} g(h)/h = 0$. Η δεύτερη ισότητα τής τρίτης γραμμής ισχύει εξαιτίας τής Πρότασης 9.13(iv) (ισομετρία Itô με δέσμευση). Άρα, ξέροντας ότι $X_t = x$, για μικρό h , η διασπορά τής μεταβολής $X_{t+h} - X_t$ δεδομένου τού παρελθόντος \mathcal{F}_t είναι ανάλογη τού h και η $\sigma^2(t, x)$ είναι η σταθερά αναλογίας.

14.2 Χρήση στη μοντελοποίηση

Οι στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις συνήθως προκύπτουν στις εφαρμογές όταν σε ένα φαινόμενο που μοντελοποιείται από μια συνήθη διαφορική εξίσωση θέλουμε να συνυπολογίσουμε την επίδραση παραγόντων τυχειότητας/αβεβαιότητας.

Για παράδειγμα, αν «εκτοξεύσουμε» μέσα σε ένα δοχείο με υγρό σε ηρεμία (π.χ. νερό) ένα μικρό σωματίδιο μάζας m με δεδομένη ταχύτητα v_0 , πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι πάνω του ασκείται δύναμη αντίστασης από το υγρό, η οποία έχει φορά αντίθετη από αυτή της ταχύτητας και μέτρο ανάλογο τής ταχύτητας. Και η βαρυτική δύναμη έχει αμελητέα επίδραση. Έτσι, μένοντας σε αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας, παίρνουμε από τον δεύτερο νόμο τού Νεύτωνα την εξής εξίσωση για την ταχύτητα τού σωματιδίου

$$m \frac{dv}{dt} = -Cv.$$

Η σταθερά $C > 0$ εξαρτάται από το ιξώδες τού υγρού και το μέγεθος τού σωματιδίου. Δηλαδή, σε μικρό χρονικό διάστημα dt , για τη μεταβολή στην ορμή τού σωματιδίου έχουμε

$$mdv_t = -Cv_t dt.$$

Κοιτώντας το φαινόμενο πιο προσεκτικά, βλέπουμε ότι πολλά μόρια νερού, που κινούνται τυχαία, προσκρούουν στο σωματίδιο από όλες τις κατευθύνσεις. Κάθε χρονική στιγμή η επίδρασή τους στην ορμή τού σωματιδίου είναι αυξητική ή μειωτική και αλλάζει από στιγμή σε στιγμή. Αυτό το συνυπολογίζουμε εισάγοντας τυχειότητα στην εξίσωση και θεωρώντας τήν

$$mdv_t = -Cv_t dt + \sigma dB_t.$$

Το σ είναι μια θετική σταθερά και ο νέος όρος, σdB_t , έχει μέση τιμή 0 και διασπορά σdt . Η εξίσωση στην οποία καταλήξαμε λέγεται εξίσωση Ornstein-Uhlenbeck και θα την λύσουμε πιο κάτω. Αν θα την κρατήσουμε τελικά για τη μοντελοποίηση τού φαινομένου εξαρτάται από το πόσο συμφωνούν οι συνέπειές της με πειραματικές μετρήσεις.

14.3 Παραδείγματα

Όπως συμβαίνει με τις συνήθεις διαφορικές εξισώσεις, έτσι και με τις στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις (ΣΔΕ στο εξής), υπάρχουν μέθοδοι επίλυσης μόνο για μερικές από αυτές, που έχουν ειδική μορφή. Περισσότερα θα πούμε στο επόμενο κεφάλαιο. Για τώρα, θα λύσουμε τρεις απλές ΣΔΕ και στο τέλος τού κεφαλαίου θα αναφέρουμε ένα θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας λύσης. Πολύ χρήσιμος στη διαδικασία επίλυσης είναι ο τύπος τού Itô.

Παράδειγμα 14.1 (Η γεωμετρική κίνηση Brown). Η πρώτη εξίσωση που θα δούμε είναι αυτή που ορίζει τη γεωμετρική κίνηση Brown και είναι η

$$\begin{aligned} dX_t &= \mu X_t dt + \sigma X_t dB_t, \\ X_0 &= x_0, \end{aligned}$$

όπου $x_0 > 0$, $\mu \in \mathbb{R}$, $\sigma > 0$, και B είναι μια τυπική κίνηση Brown.

Θέτουμε $Y_t := \log X_t$. Ο τύπος του Itô (έκδοση IV) δίνει

$$\begin{aligned} dY_t &= \frac{1}{X_t} dX_t - \frac{1}{2} \frac{1}{X_t^2} (dX_t)^2 = \mu dt + \sigma dB_t - \frac{1}{2X_t^2} X_t^2 \sigma^2 dt \\ &= \left(\mu - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) dt + \sigma dB_t. \end{aligned}$$

Επομένως

$$Y_t - Y_0 = \left(\mu - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) t + \sigma B_t,$$

και άρα

$$X_t = x_0 e^{(\mu - \frac{1}{2} \sigma^2)t + \sigma B_t} \quad (14.3)$$

για κάθε $t > 0$.

Πιο πάνω, κάποια βήματά μας δεν τα δικαιολογήσαμε. Για παράδειγμα, δεν είναι σαφές αν η X_t είναι πάντοτε θετική ώστε να ορίζεται η Y_t . Τώρα που μαντέψαμε μια λύση, επιστρέφουμε και με τη χρήση του τύπου του Itô επιβεβαιώνουμε ότι πράγματι είναι λύση. Αυτή τη φορά, όλα τα βήματα μπορούν να δικαιολογηθούν.

Για την ασυμπτωτική συμπεριφορά της X έχουμε τα εξής:

- (i). Αν $\mu < \sigma^2/2$, τότε $\lim_{t \rightarrow \infty} X_t = 0$.
- (ii). Αν $\mu > \sigma^2/2$, τότε $\lim_{t \rightarrow \infty} X_t = \infty$.
- (iii). Αν $\mu = \sigma^2/2$, τότε $\underline{\lim}_{t \rightarrow \infty} X_t = 0, \overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} X_t = \infty$.

Αυτοί οι ισχυρισμοί προκύπτουν από τον τύπο (14.3) για τη X και τον νόμο επαναλαμβανόμενου λογαρίθμου [σχέσεις (5.13)]. Για τις (i), (ii) αρκεί η (5.4)]. Είναι αξιοπρόσεκτο ότι για $\mu \in (0, \sigma^2/2)$, το οποίο είναι θετικό και επομένως προκαλεί σταθερή ντετερμινιστική σχετική αύξηση στη X , η X συγκλίνει στο 0. Οι διακυμάνσεις της κίνησης Brown είναι αρκετά ισχυρές (λόγω του μεγάλου σ) ώστε συνεχώς να οδηγούν τη X σε μικρές τιμές.

Παράδειγμα 14.2 (Η ανέλιξη Ornstein-Uhlenbeck). Θεωρούμε τώρα τη стоχαστική διαφορική εξίσωση

$$\begin{aligned} dX_t &= -aX_t dt + \sigma dB_t, \\ X_0 &= x_0, \end{aligned}$$

όπου $x_0 \in \mathbb{R}, a, \sigma > 0$, και B είναι μια τυπική κίνηση Brown.

Για $c \in \mathbb{R}$ υπολογίζουμε το διαφορικό της $e^{ct} X_t$ χρησιμοποιώντας την Πρόταση 12.12.

$$\begin{aligned} d(e^{ct} X_t) &= d(e^{ct}) X_t + e^{ct} dX_t + d(e^{ct})(dX_t) = ce^{ct} X_t dt - ae^{ct} X_t dt + \sigma e^{ct} dB_t \\ &= (c - a)e^{ct} X_t dt + \sigma e^{ct} dB_t. \end{aligned}$$

Άρα επιλέγοντας $c = a$, έχουμε $d(e^{at} X_t) = \sigma e^{at} dB_t$, δηλαδή $e^{at} X_t - X_0 = \sigma \int_0^t e^{as} dB_s$ και άρα

$$X_t = x_0 e^{-at} + \sigma e^{-at} \int_0^t e^{as} dB_s \quad (14.4)$$

για κάθε $t \geq 0$. Αυτή είναι η ανέλιξη Ornstein-Uhlenbeck και, μιας και τη συναντήσαμε, να παρατηρήσουμε κάποιες ιδιότητές της.

14.4 Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης

Το στοχαστικό ολοκλήρωμα στην (14.4) είναι μια τυχαία μεταβλητή με κατανομή $N(0, s(t))$ (Άσκηση 9.8) όπου

$$s(t) = \sigma^2 e^{-2at} \mathbf{E} \left(\int_0^t e^{2as} ds \right) = \sigma^2 \frac{1 - e^{-2at}}{2a}.$$

Και από αυτή την παρατήρηση προκύπτουν τα εξής:

A. Η X_t συγκλίνει κατά κατανομή σε τυχαία μεταβλητή $Y \sim N(0, \sigma^2/2a)$. Αυτό προκύπτει από το ότι $\lim_{t \rightarrow \infty} s(t) = \sigma^2/2a$ και από την Πρόταση Α'.13.

B. Αν η αρχική τιμή τής X δεν είναι σταθερή αλλά είναι μια τυχαία μεταβλητή $X_0 \sim N(0, \sigma^2/2a)$ ανεξάρτητη από την κίνηση Brown, τότε για κάθε $t > 0$ ισχύει επίσης

$$X_t \sim N(0, \sigma^2/2a).$$

Αυτό γιατί η X_t ως άθροισμα δύο ανεξάρτητων κανονικών είναι και αυτή κανονική με μέση τιμή 0 και διασπορά

$$\frac{\sigma^2}{2a} e^{-2at} + \sigma^2 \frac{1 - e^{-2at}}{2a} = \frac{\sigma^2}{2a}.$$

Η X είναι μια διαδικασία Markov (δεν το δικαιολογούμε αυτό) και η κατανομή $N(0, \sigma^2/2a)$ είναι η στάσιμη κατανομή της. Τα **A**, **B** θυμίζουν αποτελέσματα που ενδεχομένως ο αναγνώστης έχει δει σε μάθημα αλυσίδων Markov σε διακριτό χώρο και χρόνο.

Οι πιο πάνω εξισώσεις έχουν λύσεις που ορίζονται σε όλο τον χρονικό ορίζοντα $[0, \infty)$. Τώρα θα δούμε και μια εξίσωση για την οποία αυτό δεν συμβαίνει.

Παράδειγμα 14.3. Θεωρούμε τη ΣΔΕ

$$\begin{aligned} dX_t &= X_t^3 dt + X_t^2 dB_t, \\ X_0 &= a, \end{aligned}$$

με $a \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ και B μια τυπική κίνηση Brown.

Αντίστοιχα με το προηγούμενο παράδειγμα, πειραματιζόμαστε υπολογίζοντας το $d(f(X_t))$ για συνάρτηση f της μορφής $f(x) = x^r$. Προκύπτει ότι το κατάλληλο r είναι το $r = -1$. Υπολογίζουμε λοιπόν το διαφορικό τής $Y_t = 1/X_t$.

$$dY_t = -\frac{1}{X_t^2} dX_t + \frac{1}{2} \frac{2}{X_t^3} (dX_t)^2 = -X_t dt - dB_t + (X_t)^{-3} X_t^4 dt = -dB_t.$$

Άρα $Y_t - Y_0 = -B_t$, δηλαδή $X_t^{-1} - a^{-1} = -B_t$ και άρα

$$X_t = \frac{1}{a^{-1} - B_t}.$$

Τώρα, σε πεπερασμένο χρόνο, η κίνηση Brown θα χτυπήσει το a^{-1} (Πρόταση 7.3) και λύση δεν μπορεί να υπάρχει από εκείνο τον χρόνο και μετά.

14.4 Ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης

Αναφέρουμε χωρίς απόδειξη το εξής θεώρημα σχετικά με την ύπαρξη και μοναδικότητα λύσης τής ΣΔΕ (14.1).

Θεώρημα 14.4. Έστω $T > 0$. Υποθέτουμε ότι υπάρχει $K > 0$ ώστε

$$|\mu(t, x) - \mu(t, y)| + |\sigma(t, x) - \sigma(t, y)| \leq K|x - y|, \quad (14.5)$$

$$|\mu(t, x)| + |\sigma(t, x)| \leq K(1 + |x|), \quad (14.6)$$

για κάθε $x, y \in \mathbb{R}, t \in [0, T]$. Τότε υπάρχει λύση της (14.1) στο διάστημα $[0, T]$ και οποιοσδήποτε δύο λύσεις X, Y είναι μη διακρίσιμες στο $[0, T]$. Δηλαδή $\mathbf{P}(X_t = Y_t \text{ για κάθε } t \in [0, T]) = 1$.

Η απόδειξη τού θεωρήματος δίνεται, για παράδειγμα, στην Παράγραφο 5.2 του Øksendal (2003).

Η (14.5) λέει ότι για κάθε t σταθερό οι $\mu(t, \cdot), \sigma(t, \cdot)$ είναι Lipschitz σε όλο το \mathbb{R} . Η (14.6) λέει ότι οι μ, σ αυξάνουν το πολύ γραμμικά ως προς x και επιπλέον έχουν γραμμικό άνω φράγμα το οποίο δεν εξαρτάται από το $t \in [0, T]$.

Το θεώρημα έχει την εξής άμεση συνέπεια που αφορά ύπαρξη και μοναδικότητα στον άπειρο χρονικό ορίζοντα $[0, \infty)$.

Πόρισμα 14.5. Υποθέτουμε ότι για κάθε $T > 0$ υπάρχει $K_T > 0$ ώστε

$$|\mu(t, x) - \mu(t, y)| + |\sigma(t, x) - \sigma(t, y)| \leq K_T|x - y|, \quad (14.7)$$

$$|\mu(t, x)| + |\sigma(t, x)| \leq K_T(1 + |x|) \quad (14.8)$$

για κάθε $x, y \in \mathbb{R}, t \in [0, T]$. Τότε υπάρχει λύση της (14.1) στο διάστημα $[0, \infty)$ και οποιοσδήποτε δύο λύσεις X, Y είναι μη διακρίσιμες στο $[0, \infty)$. Δηλαδή $\mathbf{P}(X_t = Y_t \text{ για κάθε } t \in [0, \infty)) = 1$.

Απόδειξη. Εφαρμόζουμε το προηγούμενο θεώρημα για $T = n \in \mathbb{N}^+$ και έχουμε ότι υπάρχει λύση $X^{(n)}$ της (14.1) στο $[0, n]$. Για $j, k \in \mathbb{N}^+$ με $j < k$ θέτουμε

$$A_{j,k} := \{\omega \in \Omega : X_t^{(j)} \neq X_t^{(k)} \text{ για κάποιο } t \in [0, j]\},$$

το οποίο λόγω του προηγούμενου θεωρήματος έχει πιθανότητα 0. Τότε και το $A := \cup_{1 \leq j < k} A_{j,k}$ έχει πιθανότητα 0. Θέτουμε $X_t := X_t^{(n)}$ για κάθε $t \in [n-1, n)$ και $n \in \mathbb{N}^+$. Για $\omega \in \Omega \setminus A$ ισχύει $X_t = X_t^{(n)}$ για κάθε $t \in [0, n]$, οπότε η X είναι λύση της (14.1) στο $[0, n]$. Και επειδή το n είναι αυθαίρετο και $\mathbf{P}(A) = 0$, έχουμε ότι η X είναι λύση της (14.1) στο $[0, \infty)$.

Αν X, Y είναι δύο λύσεις, τότε, με βάση το προηγούμενο θεώρημα, για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ το σύνολο $C_n := \{\omega \in \Omega : X_t \neq Y_t \text{ για κάποιο } t \in [0, n]\}$ έχει πιθανότητα 0. Άρα και το $\{\omega \in \Omega : X_t \neq Y_t \text{ για κάποιο } t \in [0, \infty)\}$ έχει πιθανότητα 0 ως υποσύνολο τού $\cup_{n=1}^{\infty} C_n$. ■

Επιστρέφοντας στα Παραδείγματα 14.1, 14.2, παρατηρούμε ότι οι ΣΔΕ που μελετήσαμε εκεί ικανοποιούν τις υποθέσεις τού Πορίσματος 14.5. Άρα οι λύσεις που βρήκαμε είναι και μοναδικές. Αντίθετα, η ΣΔΕ τού Παραδείγματος 14.3 δεν ικανοποιεί τις συνθήκες τού Θεωρήματος 14.4 σε κανένα πεπερασμένο υποδιάστημα $[0, T]$. Έτσι δεν είναι περίεργο ότι δεν έχει λύση που να ορίζεται σε όλο το $[0, \infty)$. Στην Άσκηση 14.2 συναντούμε μια ΣΔΕ η οποία έχει πάνω από μία λύση.

Άσκήσεις

Στις ασκήσεις πιο κάτω, B είναι μια μονοδιάστατη τυπική κίνηση Brown.

14.1 Να λυθεί στο $[0, 1)$ η ΣΔΕ

$$dX_t = -\frac{X_t}{1-t} dt + dB_t, \\ X_0 = 0.$$

14.4 Υπαρξη και μοναδικότητα λύσης

[Υπόδειξη: Υπολογίστε πρώτα το διαφορικό της ανέλιξης $Y_t := X_t/(1-t)$.]

14.2 Για $a > 0$ δεδομένο, θέτουμε $f(x) = (x-a)^3 \mathbf{1}_{x \geq a}$ και θεωρούμε την ανέλιξη $X_t := f(B_t)$. Να δειχθεί ότι η X λύνει τη ΣΔΕ

$$\begin{aligned}dX_t &= 3X_t^{1/3} dt + 3X_t^{2/3} dB_t, \\X_0 &= 0.\end{aligned}$$

Παρατήρηση: Κάθε a δίνει και άλλη λύση. Επομένως αυτή η ΣΔΕ έχει άπειρες λύσεις.

14.3 Να βρεθεί μια λύση της στοχαστικής διαφορικής εξίσωσης

$$\begin{aligned}dX_t &= dt + 2\sqrt{X_t} dB_t, \\X_0 &= 1.\end{aligned}$$

[Υπόδειξη: Αναζητήστε λύση της μορφής $X_t = f(B_t)$. Η λύση δεν μπορεί να οριστεί σε όλο το $[0, \infty)$.]

15

Επίλυση ειδικών μορφών ΣΔΕ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δούμε κάποιες ειδικές μορφές ΣΔΕ για τις οποίες υπάρχει μέθοδος επίλυσης. Περισσότερες μπορεί να δει κανείς στο Kloeden and Platen (1992), §4.2-4.4. Ο κύριος στόχος τού κεφαλαίου είναι να προσφέρει τριβή με τον τύπο τού Itô, δεν συνιστάται για διδασκαλία στην τάξη.

15.1 Συντελεστές γραμμικοί ως προς X

Θα λύσουμε τη ΣΔΕ

$$\begin{aligned} dX_t &= \{\mu_1(t)X_t + \mu_2(t)\} dt + \{\sigma_1(t)X_t + \sigma_2(t)\} dB_t, \\ X_0 &= x_0, \end{aligned} \quad (15.1)$$

όπου οι ανεξίτητες $\mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2$ είναι μετρήσιμες, προσαρμοσμένες, και με πιθανότητα 1 τοπικά φραγμένες.

Ακολουθούμε τη μέθοδο μεταβολής των παραμέτρων από τις συνήθεις διαφορικές εξισώσεις. Δηλαδή γράφουμε τη δοσμένη εξίσωση ως

$$dX_t - \mu_1(t)X_t dt - \sigma_1(t)X_t dB_t = \mu_2(t) dt + \sigma_2(t) dB_t dt.$$

Βήμα 1. Βρίσκουμε μη τετριμμένη λύση τής αντίστοιχης ομογενούς. Δηλαδή βρίσκουμε ανέλιξη Y_t που ικανοποιεί την

$$\begin{aligned} dY_t &= Y_t \mu_1(t) dt + Y_t \sigma_1(t) dB_t, \\ Y_0 &= 1. \end{aligned} \quad (15.2)$$

Με την ίδια διαδικασία όπως στο Παράδειγμα 14.1, βρίσκουμε ότι μια Y που ικανοποιεί την (15.2) είναι η

$$Y_t = \exp \left\{ \int_0^t \left(\mu_1(s) - \frac{1}{2} \sigma_1^2(s) \right) ds + \int_0^t \sigma_1(s) dB_s \right\}. \quad (15.3)$$

Μάλιστα προκύπτει από το Θεώρημα 14.4 ότι αυτή είναι η μοναδική λύση τής (15.2).

Βήμα 2. Αναζητούμε λύση τής αρχικής εξίσωσης που να έχει τη μορφή $X_t = Z_t Y_t$.

Θα βρούμε τι εξίσωση πρέπει να ικανοποιεί η Z . Υπολογίζουμε ότι

$$d(Y_t^{-1}) = -\frac{1}{Y_t^2} dY_t + \frac{1}{2} 2Y_t^{-3} (dY_t)^2 = -Y_t^{-1} (\mu_1(t) dt + \sigma_1(t) dB_t) + Y_t^{-1} \sigma_1^2(t) dt, \quad (15.4)$$

οπότε η $Z_t = Y_t^{-1} X_t$ δίνει

$$dZ_t = d(Y_t^{-1}) X_t + Y_t^{-1} dX_t + d(Y_t^{-1}) dX_t = \dots = Y_t^{-1} \{\mu_2(t) - \sigma_1(t) \sigma_2(t)\} dt + Y_t^{-1} \sigma_2(t) dB_t.$$

Χρησιμοποιήσαμε τις εκφράσεις (15.1), (15.4). Άρα

$$Z_t = x_0 + \int_0^t Y_s^{-1} \{\mu_2(s) - \sigma_1(s) \sigma_2(s)\} ds + \int_0^t Y_s^{-1} \sigma_2(s) dB_s.$$

Μπορούμε τώρα να ελέγξουμε ότι η $X_t := Y_t Z_t$, με την Y όπως στη (15.3) και τη Z όπως στην προηγούμενη σχέση, λύνει την (15.1) (Άσκηση).

15.2 Συντελεστής διάχυσης γραμμικός ως προς X

Μέθοδος λύσης υπάρχει και για τις ΣΔΕ της μορφής

$$\begin{aligned} dX_t &= f(t, X_t) dt + \sigma(t)X_t dB_t, \\ X_0 &= x_0, \end{aligned} \quad (15.5)$$

με τις f, σ συνεχείς (ντετερμινιστικές) συναρτήσεις με κατάλληλα πεδία ορισμού.

Ακολουθούμε παρόμοια διαδικασία όπως στην προηγούμενη παράγραφο. Λύνουμε την

$$\begin{aligned} dY_t &= \sigma(t)Y_t dB_t, \\ Y_0 &= 1. \end{aligned} \quad (15.6)$$

Βρίσκουμε όπως πριν ότι μοναδική λύση αυτής της ΣΔΕ είναι η

$$Y_t := \exp \left\{ \int_0^t \sigma(s) dB_s - \frac{1}{2} \int_0^t \sigma^2(s) ds \right\}.$$

Έπειτα αναζητούμε λύση της αρχικής εξίσωσης που να έχει τη μορφή $X_t = Z_t Y_t$. Υπολογίζουμε ότι

$$d(Y_t^{-1}) = Y_t^{-1} \{-\sigma(t)dB_t + \sigma^2(t) dt\},$$

και άρα η $Z_t := Y_t^{-1}X_t$ πρέπει να ικανοποιεί την

$$\begin{aligned} d(Y_t^{-1}X_t) &= X_t dY_t^{-1} + Y_t^{-1}dX_t + dY_t^{-1}dX_t \\ &= X_t Y_t^{-1} \{-\sigma(t)dB_t + \sigma^2(t) dt\} + Y_t^{-1} \{f(t, X_t) dt + \sigma(t)X_t dB_t\} - Y_t^{-1} \sigma^2(t)X_t dt \\ &= Y_t^{-1} f(t, X_t) dt. \end{aligned}$$

Δηλαδή έχουμε εξίσωση χωρίς όρο διάχυσης. Η Z ικανοποιεί την

$$dZ_t = Y_t^{-1} f(t, Y_t Z_t) dt, \quad (15.7)$$

η οποία για κάθε σταθερό ω στον χώρο πιθανότητας είναι μια συνήθης διαφορική εξίσωση. Αν είμαστε τυχεροί, αυτή θα λύνεται και έπειτα η $X_t := Y_t Z_t$ θα λύνει την αρχική εξίσωση.

Για την επίλυση της (15.7), σημειώνουμε ότι η Z_t είναι διαφορίσιμη με συνεχή παράγωγο. Αυτό γιατί σαφώς η Z_t από τον ορισμό της είναι συνεχής (για κάθε σταθερό ω) και έπειτα επειδή και οι f, Y είναι συνεχείς, γράφοντας την (15.7) σε ολοκληρωτική μορφή, έχουμε το ζητούμενο. Άρα, για κάθε g συνεχώς παραγωγίσιμη, θα έχουμε $dg(Z_t) = g'(Z_t)dZ_t$. Δεν χρειάζεται να επικαλεστούμε τον τύπο του Itô για τον υπολογισμό του $dg(Z_t)$.

Παράδειγμα 15.1. Θα λύσουμε τη ΣΔΕ

$$\begin{aligned} dX_t &= X_t^\gamma dt + aX_t dB_t, \\ X_0 &= x_0, \end{aligned} \quad (15.8)$$

όπου $x_0 > 0, a, \gamma \in \mathbb{R}$, και B είναι τυπική κίνηση Brown.

Ακολουθώντας την πιο πάνω μέθοδο βρίσκουμε ότι

$$Y_t^{-1} = e^{-aB_t + \frac{1}{2} a^2 t},$$

15.3 Λύση τής μορφής $f(t, B_t)$

οπότε η $Z_t := X_t Y_t^{-1}$ ικανοποιεί την

$$\begin{aligned} dZ_t &= Y_t^{-1} (Y_t Z_t)^\gamma dt = Y_t^{\gamma-1} Z_t^\gamma dt, \\ Z_0 &= x_0. \end{aligned} \quad (15.9)$$

Η πρώτη εξίσωση είναι η $Z_t^{-\gamma} dZ_t = Y_t^{\gamma-1} dt$ και, με βάση τα σχόλια πριν το παράδειγμα, αυτή μπορεί να γραφτεί ως

$$d(Z_t^{1-\gamma}) = (1-\gamma) Y_t^{\gamma-1} dt \quad (15.10)$$

όταν $\gamma \neq 1$ και ως $d(\log Z_t) = dt$ όταν $\gamma = 1$.

Διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις.

(i) $\gamma < 1$. Τότε ολοκληρώνοντας την (15.10) παίρνουμε

$$Z_t^{1-\gamma} - x_0^{1-\gamma} = (1-\gamma) \int_0^t Y_s^{\gamma-1} ds,$$

και άρα

$$X_t = Y_t Z_t = Y_t \left(x_0^{1-\gamma} + (1-\gamma) \int_0^t Y_s^{\gamma-1} ds \right)^{1/(1-\gamma)}. \quad (15.11)$$

Ο εκθέτης έξω από την παρένθεση είναι θετικός, όπως και η ποσότητα μέσα. Οπότε η λύση ορίζεται για κάθε $t \geq 0$.

(ii) $\gamma > 1$. Όμοια όπως πριν, φτάνουμε στην

$$Z_t^{1-\gamma} = x_0^{1-\gamma} - (\gamma-1) \int_0^t Y_s^{\gamma-1} ds.$$

Ο εκθέτης $1-\gamma$ είναι αρνητικός. Το δεξί μέλος τής ισότητας είναι θετικό για μικρά t , αλλά είναι γνησίως φθίνουσα συνάρτηση τού t . Με θετική πιθανότητα παίρνει την τιμή 0 για κάποιο πεπερασμένο χρόνο $t_0(\omega)$. Αυτό γιατί η ποσότητα μέσα στο ολοκλήρωμα είναι

$$e^{(\gamma-1)aB_s - \frac{1}{2}(\gamma-1)a^2s},$$

και έτσι, αν η aB_s πάρει μεγάλες τιμές για κάποιους χρόνους, θα δώσει στο ολοκλήρωμα τιμή $> x_0^{1-\gamma}/(\gamma-1)$. Αυτό σημαίνει ότι η Z , άρα και η X , εκρήγνυται (απειρίζεται) τον πεπερασμένο χρόνο $t_0(\omega)$. Σε αυτή την περίπτωση, λύση υπάρχει μόνο στο διάστημα $[0, t_0(\omega))$ και δίνεται πάλι από τη σχέση (15.11).

(iii) $\gamma = 1$. Όμοια βρίσκουμε ότι

$$X_t = x_0 e^t Y_t$$

για κάθε $t \geq 0$.

15.3 Λύση τής μορφής $f(t, B_t)$

Αν η ΣΔΕ

$$\begin{aligned} dX_t &= \mu(t, X_t) dt + \sigma(t, X_t) dB_t, \\ X_0 &= x_0 \end{aligned} \quad (15.12)$$

έχει λύση τής μορφής $X_t = f(t, B_t)$, τότε ένας τρόπος να βρούμε την f είναι ο εξής. Με βάση τον τύπο τού Itô, η $Y_t := f(t, B_t)$ ικανοποιεί την εξίσωση

$$dY_t = \left\{ \frac{\partial f}{\partial t}(t, B_t) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(t, B_t) \right\} dt + \frac{\partial f}{\partial x}(t, B_t) dB_t,$$

15.3 Λύση τής μορφής $f(t, B_t)$

η οποία ταυτίζεται με την πρώτη από τις (15.12) αν μπορούμε να έχουμε

$$\frac{\partial f}{\partial t}(t, x) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(t, x) = \mu(t, f(t, x)), \quad (15.13)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}(t, x) = \sigma(t, f(t, x)). \quad (15.14)$$

Η δεύτερη ισότητα προσφέρεται για άμεση ολοκλήρωση αν την γράψουμε ως

$$\frac{1}{\sigma(t, f(t, x))} \frac{\partial f}{\partial x}(t, x) = 1.$$

Γιατί αν η $g(t, y)$ είναι μια αρχική τής $1/\sigma(t, y)$ ως προς την παράμετρο y , τότε η τελευταία σχέση γράφεται

$$\frac{\partial g}{\partial x}(t, f(t, x)) = 1.$$

Άρα $g(t, f(t, x)) = x + c(t)$ με c κάποια συνάρτηση. Από εδώ ελπίζουμε, αντιστρέφοντας τήν $y \mapsto g(t, y)$, να βρούμε μια έκφραση για την f . Θέλουμε αυτή η έκφραση να ικανοποιεί την (15.13) και αυτή η απαίτηση, αν μπορεί να εκπληρωθεί, δίνει πληροφορία για τη c . Τέλος, η ικανοποίηση τής αρχικής συνθήκης $X_0 = x_0$ αντιμετωπίζεται εύκολα.

Αν η δεδομένη διαφορική εξίσωση δεν έχει λύση τής μορφής $f(t, B_t)$ (όπως συμβαίνει με την Ornstein-Uhlenbeck, Παράδειγμα 14.2), τότε η διαδικασία που περιγράψαμε θα παρουσιάζει κάποιο πρόβλημα και δεν θα μπορεί να περατωθεί.

Παράδειγμα 15.2. Θα λύσουμε με την παραπάνω μέθοδο τη ΣΔΕ

$$dX_t = \left(\sqrt{1 + X_t^2} + \frac{1}{2} X_t \right) dt + \sqrt{1 + X_t^2} dB_t, \quad (15.15)$$

$$X_0 = 0. \quad (15.16)$$

B είναι μια τυπική κίνηση Brown. Με βάση τα όσα είπαμε, ζητάμε μια συνάρτηση f ώστε

$$\frac{\partial f}{\partial t}(t, x) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(t, x) = \sqrt{1 + f^2(t, x)} + \frac{1}{2} f(t, x), \quad (15.17)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}(t, x) = \sqrt{1 + f^2(t, x)}. \quad (15.18)$$

Η $1/\sqrt{1 + y^2}$ έχει ως μια αρχική την $a(y) = \log(y + \sqrt{1 + y^2})$ η οποία είναι 1-1 και επί του \mathbb{R} με αντίστροφη τη \sinh . Οπότε η (15.18) γράφεται

$$\frac{\partial f}{\partial x} a(f(t, x)) = 1.$$

Άρα $a(f(t, x)) = x + c(t)$, δηλαδή, $f(t, x) = a^{-1}(x + c(t)) = \sinh(x + c(t))$. Για αυτή την f , το αριστερό μέλος τής (15.17) ισούται με

$$\cosh(x + c(t)) c'(t) + \frac{1}{2} \sinh(x + c(t)) = \sqrt{1 + f^2(t, x)} c'(t) + \frac{1}{2} f(t, x),$$

το οποίο συμφωνεί με το δεξί της μέλος αν έχουμε $c'(t) = 1$. Άρα $c(t) = t + c_0$ για κάποια σταθερά c_0 και έτσι

$$f(t, x) = \sinh(x + t + c_0).$$

Τα παραπάνω εξασφαλίζουν ότι η $X_t := f(t, B_t)$ ικανοποιεί την (15.15). Τέλος, η συνθήκη $X_0 = 0$ ικανοποιείται αν επιλέξουμε $c_0 = 0$. Έτσι, η $X_t := \sinh(B_t + t)$ λύνει το αρχικό πρόβλημα.

15.3 Λύση τής μορφής $f(t, B_t)$

Ασκήσεις

15.1 Να βρεθεί μια λύση τής ΣΔΕ

$$\begin{aligned} dX_t &= aX_t dt + e^{-t} dB_t, \\ X_0 &= 1. \end{aligned}$$

B είναι μια τυπική κίνηση Brown. Είναι η λύση μοναδική; Ποια η κατανομή τού X_t ; Να δειχθεί ότι για $a < 0$ και $t \rightarrow \infty$, η X_t συγκλίνει κατά κατανομή στη σταθερή τυχαία μεταβλητή 0.

15.2 Έστω g διαφορίσιμη και θετική συνάρτηση και $a, x_0 \in \mathbb{R}$. Με τη μέθοδο τής Παραγράφου 15.3 «ανακαλύψτε» ότι μια λύση τής ΣΔΕ

$$\begin{aligned} dX_t &= \left(ag(X_t) + \frac{1}{2}g(X_t)g'(X_t) \right) dt + g(X_t)dB_t, \\ X_0 &= x_0 \end{aligned}$$

δίνεται από τον τύπο

$$X_t = h^{-1}(B_t + at + h(x_0)),$$

όπου h είναι μια αρχική τής $1/g$.

15.3 Να βρεθεί μια λύση τής ΣΔΕ

$$\begin{aligned} dX_t &= (3 + X_t)(1 + X_t^2) dt + (1 + X_t^2)dB_t, \\ X_0 &= 1. \end{aligned}$$

15.4 (α) Έστω $a \in \mathbb{R}$, και $f, g : [0, 1) \rightarrow \mathbb{R}$ παραγωγίσιμες με συνεχή παράγωγο και με $f(t) \neq 0$ για κάθε $t \in [0, 1)$. Θεωρούμε την ανέλιξη

$$X_t := f(t) \left\{ a + \int_0^t g(s) dB_s \right\}, \quad t \in [0, 1).$$

Να δειχθεί ότι

$$dX_t = \frac{f'(t)}{f(t)} X_t dt + f(t)g(t) dB_t.$$

(β) Για $k > 0$, να λυθεί η στοχαστική διαφορική εξίσωση

$$\begin{aligned} dX_t &= -\frac{k}{1-t} X_t dt + dB_t \quad \text{για } t \in [0, 1), \\ X_0 &= 0. \end{aligned}$$

(γ) Για τη λύση X από το προηγούμενο ερώτημα, να υπολογιστεί η $\text{Var}(X_t)$ για $t \in [0, 1)$.

Χαρτοφυλάκια και arbitrage

16.1 Αγορές μετοχών

Ποια είναι η χρήση και η σημασία των μετοχών μιας εταιρείας; Κατά τη σύστασή της ή σε άλλες στιγμές τού χρόνου ύπαρξής της χρειάζεται να συγκεντρώσει κεφάλαιο για να προβεί σε κινήσεις που θα την μεγαλώσουν. Π.χ., αν θέλει να ανοίξει ένα νέο εργοστάσιο. Ζητάει λοιπόν κεφάλαιο από επενδυτές και σε αντάλλαγμα δίνει μετοχές. μια μετοχή είναι απλώς ένα έγγραφο και βεβαιώνει ότι στον κάτοχό της ανήκει ένα συγκεκριμένο ποσοστό τής εταιρείας. Συνήθως, σε τακτά χρονικά διαστήματα, και ιδιαίτερα όταν η εταιρεία έχει κέρδη, δίνει κάποια από αυτά στους μετόχους της (αυτά λέγονται μερίσματα). Είναι πιθανόν βέβαια η διοίκηση να διαχειριστεί την εταιρεία με λάθος τρόπο, ακόμη και να την οδηγήσει σε χρεοκοπία. Τότε το αρχικό ποσό που έδωσε ο επενδυτής χάνεται. Η μετοχή δεν του δίνει δικαίωμα σε κάτι.

Η μετοχή μετά την αρχική πώλησή της μπορεί να ξαναπουληθεί. Αυτό γίνεται στο χρηματιστήριο. Ένας επενδυτής που κατέχει μετοχές μιας εταιρείας A δηλώνει με τι τιμή προτίθεται να πουλήσει κάθε μετοχή τής A που έχει. Αν κάποιος άλλος επενδυτής θεωρεί συμφέρουσα την προσφορά, προχωρεί σε συμφωνία και αγοράζει όσες μετοχές τής A θέλει από τον πρώτο επενδυτή. Αν η τιμή θεωρείται υψηλή από όλους, ο επενδυτής τη μειώνει αν θέλει να πουλήσει τη μετοχή. Στο τέλος συμβαίνει να πουλιέται μια μετοχή από όλους τους κατόχους της σχεδόν με την ίδια τιμή. Αυτή η τιμή αντικατοπτρίζει την άποψη τής αγοράς για τη μελλοντική κερδοφορία τής εταιρείας. Και η τιμή της μεταβάλλεται με τον χρόνο, καθώς γίνονται γνωστές πληροφορίες για την επίδοση τής εταιρείας και οι επενδυτές αλλάζουν γνώμη για αυτήν.

Αν συμβολίσουμε με X_t την τιμή μιας μετοχής τής εταιρείας A κατά τον χρόνο t , τότε η υπόθεση που θα κάνουμε είναι ότι η $(X_t)_{t \geq 0}$ είναι μια στοχαστική ανέλιξη, δηλαδή κάθε X_t είναι μια τυχαία μεταβλητή. Αυτό αντικατοπτρίζει την αδυναμία μας να ξέρουμε την τιμή X_t πριν τον χρόνο t .

16.2 Το επιτόκιο τής τράπεζας

Μια επιλογή επένδυσης που υπάρχει πάντα είναι να τοποθετήσουμε ένα ποσό F στην τράπεζα. Αυτή η επένδυση θεωρείται ότι δεν έχει καθόλου ρίσκο. Αν το ετήσιο επιτόκιο τής τράπεζας είναι r , αυτό σημαίνει ότι σε ένα χρόνο το ποσό F έχει γίνει $(1+r)F$ (λέμε επίσης ότι το ετήσιο επιτόκιο είναι $100r\%$). Η τράπεζα αυτόματα τοποθετεί στο λογαριασμό μας το επιπλέον ποσό rF στο τέλος τού χρόνου. Βέβαια η τράπεζα κάνει αυτή τη διαδικασία πολύ πιο συχνά, ώστε για οσοδήποτε μικρό χρονικό διάστημα τοποθετήσουμε ένα ποσό σε λογαριασμό, το ποσό να παίρνει το επιτόκιο που αναλογεί σε εκείνο το διάστημα. Ένας τρόπος να το κάνει αυτό είναι ο εξής. Χωρίζει έναν χρόνο σε n ίσα διαστήματα και σε καθένα από αυτά τα διαστήματα δίνει στο ποσό επιτόκιο r/n . Έτσι, ένα ποσό που στην αρχή τής χρονιάς ήταν F , μετά από 4 διαστήματα έχει γίνει $(1 + \frac{r}{n})^4 F$. Μια χρονική στιγμή $t = j/n$ χρόνια μετά την αρχική κατάθεση, το ποσό έχει γίνει

$$\left(1 + \frac{r}{n}\right)^j F = \left(1 + \frac{r}{n}\right)^{nt} F \approx e^{rt} F$$

για n μεγάλο. Το $n \rightarrow \infty$ όριο αυτής της διαδικασίας δίνει αυτό που λέμε **συνεχή ανατοκισμό** με ρυθμό r . Ένα ποσό F_0 που τοποθετείται στην τράπεζα τη χρονική στιγμή 0 αυξάνει σε $F_t = F_0 e^{rt}$ τη χρονική στιγμή $t > 0$. Αυτό ισοδυναμεί με το ότι η στιγμιαία σχετική μεταβολή τού F_t ισούται με rdt . Δηλαδή, $dF_t/F_t = rdt$. Υπό συνεχή ανατοκισμό με ρυθμό r το ετήσιο επιτόκιο δεν ισούται με r αλλά με $e^r - 1$ που είναι περισσότερο από το r (για r μικρό, είναι πολύ κοντά).

16.3 Ανοιχτή πώληση

Ας υποθέσουμε ότι ένας επενδυτής ως τώρα δεν είχε καμία μετοχή μιας εταιρείας A . Διάφορα στοιχεία τον οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η τιμή τής μετοχής τής A θα αυξηθεί. Μπορεί να αξιολογήσει αυτή την πεποίθηση αγοράζοντας έναν αριθμό μετοχών τής A . Αν όμως συμπεράνει ότι η τιμή τής μετοχής θα μειωθεί, πώς μπορεί να το εκμεταλευτεί; Δεν έχει μετοχές τής A να πουλήσει. Για αυτό το σκοπό υπάρχει η διαδικασία τής ανοιχτής πώλησης, κατά την οποία κάποιος πουλάει μετοχές που δεν έχει.

Η διαδικασία δουλεύει ως εξής. Ο επενδυτής E_1 έχει λογαριασμό σε έναν χρηματιστή, ο οποίος διαχειρίζεται το χαρτοφυλάκιό του. Εκτελεί τις εντολές τού πρώτου για αγορές ή πωλήσεις μετοχών. Ο E_1 ζητάει από τον χρηματιστή να πουλήσει, ας πούμε, 100 μετοχές τής A . Ο χρηματιστής παίρνει αυτές τις μετοχές από τον λογαριασμό άλλου πελάτη E_2 , που τις έχει, και τις πουλάει. Τα έσοδα πάνε στον λογαριασμό τού E_1 , ο οποίος θα τα εκμεταλευτεί όπως νομίζει. Κάποια στιγμή ο E_1 πρέπει να επιστρέψει τις μετοχές στον λογαριασμό τού E_2 (τότε λέμε ότι κλείνει τη θέση του). Η ιδέα είναι να κλείσει τη θέση του κάποια στιγμή αργότερα, όταν η τιμή τής μετοχής θα έχει πέσει. Και ενώ νωρίτερα εισέπραξε, π.χ., 20 € κατά την πώληση τής μετοχής, έπειτα, για να την επιστρέψει, την αγοράζει στη χαμηλότερη τιμή 10 €. Κλείνει τη θέση του και έχει αποκομίσει κέρδος από τη διαδικασία. Ο χρόνος που θα το κάνει αυτό είναι γενικά δική του επιλογή. Σε κάποιες περιπτώσεις απλώς ενδέχεται να τον αναγκάσει ο χρηματιστής να το κάνει. Αν, για παράδειγμα, ο χρηματιστής δεν έχει καθόλου μετοχές τής A και ο E_2 του ζητήσει να πουλήσει τις δικές του μετοχές (οι οποίες βέβαια λείπουν). Σε ένα τέτοιο σενάριο ο E_1 αναγκαστικά πρέπει να κλείσει τη θέση του ακόμα και αν δεν τον συμφέρει αυτό.

Επίσης, από τη στιγμή που ο E_1 δανείζεται τις μετοχές από τον E_2 , υποχρεούται να παρέχει στον λογαριασμό τού E_2 οποιαδήποτε έσοδα προκύπτουν από την κατοχή των μετοχών (π.χ., μερίσματα). Πρακτικά, ο E_2 δεν αντιλαμβάνεται ότι οι μετοχές του έχουν πουληθεί.

16.4 Αυτοχρηματοδοτούμενα χαρτοφυλάκια

Σε αυτό το κεφάλαιο, υποθέτουμε ότι έχουμε μια αγορά στην οποία υπάρχουν N εταιρείες τις οποίες αριθμούμε ως $1, 2, \dots, N$. Ονομάζουμε $S_t^{(i)}$ την τιμή μιάς μετοχής τής εταιρείας i τη χρονική στιγμή t , και

$$S_t := (S_t^{(1)}, S_t^{(2)}, \dots, S_t^{(N)})$$

το διάνυσμα των τιμών όλων των μετοχών. Επίσης θεωρούμε τη διήθηση $(\mathcal{F}_t^S)_{t \geq 0}$ με

$$\mathcal{F}_t^S := \sigma(S_s^{(i)} : s \in [0, t], i = 1, \dots, N)$$

για κάθε $t \geq 0$.

Σε μη τεχνική γλώσσα, χαρτοφυλάκιο λέμε ένα υποσύνολο των υπάρχόντων χρηματιστηριακών προϊόντων σε μια αγορά. Συνήθως, είναι οι μετοχές ή συμβόλαια άλλου τύπου (θα δούμε τέτοια παρακάτω) που έχει στην κατοχή του ένας συγκεκριμένος επενδυτής. Στην αγορά των N τύπων μετοχών που θεωρούμε, ένα χαρτοφυλάκιο καθορίζεται από ένα διάνυσμα $(h^{(1)}, h^{(2)}, \dots, h^{(N)})$ πραγματικών αριθμών, όπου το $h^{(i)}$ δηλώνει πόσες μονάδες τής μετοχής i περιέχει το χαρτοφυλάκιο.

Αρνητικό $h^{(i)}$ δηλώνει ότι ο επενδυτής οφείλει $|h^{(i)}|$ μετοχές τύπου i ή οφείλει $|h^{(i)}|€$ στην τράπεζα. Στην πρώτη περίπτωση, αυτό έχει γίνει με τη διαδικασία τής ανοιχτής πώλησης, που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο.

Ένας επενδυτής, ξεκινώντας με χαρτοφυλάκιο $(h^{(1)}, h^{(2)}, \dots, h^{(N)})$ πραγματοποιεί αγορές και πωλήσεις, με αποτέλεσμα η σύσταση του χαρτοφυλακίου να αλλάζει συνεχώς στον χρόνο. Ας καλέσουμε λοιπόν $h_t := (h_t^{(1)}, \dots, h_t^{(N)})$ τη σύσταση του χαρτοφυλακίου κατά τον χρόνο t . Η τιμή του κατά τον χρόνο t ισούται με

$$V_t^h := \sum_{i=1}^N h_t^{(i)} S_t^{(i)} = h_t \cdot S_t.$$

Ο μαθηματικός ορισμός του χαρτοφυλακίου είναι ο εξής.

Ορισμός 16.1. (i) **Χαρτοφυλάκιο** λέμε κάθε \mathcal{F}_t^S -προσαρμοσμένη N -διάστατη στοχαστική ανάλιξη $h = \{h_t : t \geq 0\}$.

(ii) Ένα χαρτοφυλάκιο h λέγεται **αυτοχρηματοδοτούμενο** αν η διαδικασία τιμής του ικανοποιεί την

$$dV_t^h = \sum_{i=1}^N h_t^{(i)} dS_t^{(i)} = h_t \cdot dS_t. \quad (16.1)$$

Ένα χαρτοφυλάκιο $\{h_t : t \geq 0\}$ το λέμε επίσης και στρατηγική συναλλαγών.

Για να είμαστε ακριβείς, υποθέτουμε ότι η $(S_t)_{t \geq 0}$ είναι N -διάστατη ανάλιξη Itô, η αυστηρή διατύπωση τής (16.1) είναι η ολοκληρωτική της μορφή και οι ανελίξεις $(h_t^{(i)})_{t \geq 0}$ είναι κατάλληλες ώστε τα στοχαστικά ολοκληρώματα που υπονοούνται στην (16.1) να ορίζονται.

Το να είναι ένα χαρτοφυλάκιο αυτοχρηματοδοτούμενο σημαίνει ότι η αξία του μεταβάλλεται μόνο επειδή αλλάζει η αξία των συστατικών του. Δεν γίνεται σε αυτό εισροή χρήματος από άλλες πηγές (π.χ., δωρεές) ούτε εκροή (π.χ., χρήση κεφαλαίου για καταναλωτικές ανάγκες). Ας δούμε τώρα γιατί η (16.1) εκφράζει πράγματι αυτή τη συνθήκη. Έστω ότι συναλλαγές συμβαίνουν μόνο κατά πολλαπλάσια μιας χρονικής μονάδας Δt και έστω t ένα τέτοιο πολλαπλάσιο. Κατά τον χρόνο t το χαρτοφυλάκιο έχει σύνθεση h_t ενώ κατά τη χρονική περίοδο $(t, t + \Delta t)$ δεν γίνονται συναλλαγές. Στο τέλος τής περιόδου, το χαρτοφυλάκιο έχει την ίδια σύνθεση αλλά οι μετοχές έχουν αλλάξει τιμή, ενώ δεν έγινε εισροή ή εκροή κεφαλαίων. Άρα η αξία του χαρτοφυλακίου έχει μεταβληθεί κατά $\sum_{i=1}^N h_t^{(i)} (S_{t+\Delta t}^{(i)} - S_t^{(i)})$. Τώρα για $0 < a < b$ πολλαπλάσια του Δt , προσθέτοντας αυτές τις μεταβολές για όλους τους χρόνους $t_i = a + i\Delta t$ με $i = 0, \dots, (b-a)/(\Delta t)$ και θεωρώντας $\Delta t \rightarrow 0$, υπό κατάλληλες προϋποθέσεις στην h , παίρνουμε ότι

$$V_b^h - V_a^h = \int_a^b h_t \cdot dS_t,$$

που είναι η ολοκληρωτική μορφή τής (16.1). Υπενθυμίζουμε την Πρόταση 11.1 και τη βασική συνθήκη που ορίζει τις απλές συναρτήσεις (Ορισμός 9.2). Ότι δηλαδή η τιμή μιας τέτοιας συνάρτησης σε ένα διάστημα $(t_i, t_{i+1}]$ είναι \mathcal{F}_{t_i} μετρήσιμη.

16.5 Arbitrage

Η ύπαρξη arbitrage σε μια οικονομία σημαίνει ότι υπάρχει τρόπος να αποκομίσει κανείς κέρδος ντετερμινιστικά χωρίς καθόλου ρίσκο.

Παράδειγμα 16.2. (Ξεκάθαρη δυνατότητα arbitrage) Μια εταιρεία πουλάει πετρέλαιο με κόστος 100 δολάρια το βαρέλι, ενώ μια άλλη αγοράζει με 102 δολάρια το βαρέλι. Μπορούμε να αγοράσουμε από την πρώτη και να πουλήσουμε στη δεύτερη μια μεγάλη ποσότητα και να έχουμε κέρδος χωρίς να ρισκάρουμε τίποτα. Επειδή αυτό θα έκανε ο καθένας που θα το αντιλαμβανόταν, τέτοια ευκαιρία δεν είναι δυνατόν να υπάρξει.

Ορισμός 16.3. Δυνατότητα arbitrage σε μια οικονομία λέμε ένα αυτοχρηματοδοτούμενο χαρτοφυλάκιο h που ικανοποιεί τις

$$V_0^h = 0, \quad (16.2)$$

$$\mathbf{P}(V_T^h \geq 0) = 1, \quad (16.3)$$

$$\mathbf{P}(V_T^h > 0) > 0. \quad (16.4)$$

Δηλαδή, αν υπάρχει τέτοια δυνατότητα, ένας επενδυτής έχει θετική πιθανότητα να έχει κέρδος χωρίς να κινδυνέψει καθόλου να έχει ζημιά. Μια τέτοια ευκαιρία δεν είναι δυνατόν να υπάρξει σε κανονικές συνθήκες. Στο εξής λοιπόν υποθέτουμε ότι δυνατότητα arbitrage δεν υπάρχει στην αγορά που αποτελείται από τις μετοχές $1, 2, \dots, N$.

Υπάρχουν παραδείγματα αγορών και αυτοχρηματοδοτούμενων χαρτοφυλακίων σε αυτές με αρχικό κεφάλαιο δεδομένο, ας πούμε 1, και τελική τιμή δεδομένο αριθμό οσοδήποτε μεγάλο θέλουμε. Αυτά συνιστούν arbitrage. Μια ιδέα πώς γίνεται αυτό δίνει το επόμενο παράδειγμα.

Παράδειγμα 16.4 (Στρατηγική διπλασιασμού). Ας υποθέσουμε ότι σε ένα καζίνο ποντάρουμε ένα ποσό A σε ένα τυχερό παιχνίδι που έχει πιθανότητα επιτυχίας $p \in (0, 1]$ και αν κερδίσουμε, παίρνουμε A , ενώ αν χάσουμε, χάνουμε όλο το ποσό A . Ένας παίκτης μπορεί να κάνει το εξής. Ξεκινάει ποντάροντας ποσό M . Αν χάσει, ποντάρει ποσό $2M$. Αν χάσει πάλι, ποντάρει ποσό $4M$. Δηλαδή, εφόσον συνεχίζει να χάνει, διπλασιάζει το ποσό που ποντάρει. Μόλις κερδίσει μια φορά, αποσύρεται από το παιχνίδι. Για παράδειγμα, αν κερδίσει για πρώτη φορά την 5η φορά που παίζει, τότε το συνολικό του κέρδος θα είναι $-M - 2M - 4M - 8M + 16M = M$. Επειδή κάποια στιγμή θα κερδίσει, τελικά θα έχει καταφέρει να κερδίσει M . Έπειτα, μπορεί να επαναλάβει τη διαδικασία.

Η στρατηγική τού προηγούμενου παραδείγματος, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, μπορεί να μεταφερθεί και στο πλαίσιο μιας αγοράς μετοχών που η τιμή τους είναι στοχαστική ανέλιξη συνεχούς χρόνου και να δώσει παράδειγμα arbitrage (δες Steele (2001) § 14.5). Στα πραγματικά καζίνο αυτή η στρατηγική εμποδίζεται από περιορισμούς στο μέγεθος των πονταρισμάτων ή στο ποσό τού χρέους το οποίο αφήνεται να επωμιστεί ο παίκτης ή στο πλήθος των φορών που μπορεί να παίξει.

Έτσι, και σε κάθε δεδομένη οικονομία στην οποία δεν υπάρχουν ευκαιρίες arbitrage, υπάρχουν περιορισμοί στα χαρτοφυλάκια που μπορεί να δημιουργήσει κανείς. Θα ονομάζουμε **αποδεκτά** τα χαρτοφυλάκια τα οποία επιτρέπεται να δημιουργηθούν. Δεν δίνουμε μαθηματική περιγραφή τους γιατί είναι πολύ τεχνική (δες Steele (2001), § 14.5, 14.6). Στην αγορά των μετοχών $1, 2, \dots, N$, που μας απασχολεί, αυτά αποτελούν διανυσματικό χώρο θεωρούμενα ως ανελίξεις στον \mathbb{R}^N .

16.6 Παράγωγα προϊόντα και αναπαράγοντα χαρτοφυλάκια

Παράγωγο προϊόν λέμε ένα συμβόλαιο το οποίο κάποια στιγμή αποφέρει ένα κέρδος το οποίο εξαρτάται από τη συμπεριφορά τής τιμής άλλων συμβολαίων/προϊόντων που προϋπάρχουν στην αγορά και συνήθως είναι «βασικότερα» από αυτό. Για παράδειγμα, ένα συμβόλαιο που σε έναν μήνα από τώρα δίνει στον κάτοχό του ένα ποσό που ισούται με τη μέγιστη τιμή που είχε η τιμή τής μετοχής τής IBM αυτόν τον μήνα.

Σε αυτές τις σημειώσεις θα μας απασχολήσουν παράγωγα προϊόντα ενός πολύ συγκεκριμένου τύπου.

Ορισμός 16.5. **Συμβόλαιο Ευρωπαϊκού τύπου** (ή και Ευρωπαϊκό συμβόλαιο) με **ημερομηνία λήξης** $T > 0$ λέμε κάθε \mathcal{F}_T^S μετρήσιμη τυχαία μεταβλητή X . Ο κάτοχός του παίρνει το (τυχαίο) ποσό X τη μέρα T . Ένα τέτοιο συμβόλαιο λέγεται **απλό** αν έχει τη μορφή $X = g(S_T)$ για μια δεδομένη συνάρτηση $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$.

Παράγωγα προϊόντα χρησιμοποιούνται ήδη από τον 17ο αιώνα. Στην Ολλανδία, υπήρξε μεγάλη αγορά για δικαιώματα αγοράς και δικαιώματα πώλησης (έννοιες που θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο) στην τιμή της τουλίπας. Αργότερα επεκτάθηκαν και σε άλλες μετοχές/προϊόντα. Η τιμολόγηση ενός παράγωγου προϊόντος δεν είναι γενικά προφανής. Επιστημονικός τρόπος για την τιμολόγησή τους εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 1973 με τη δουλειά των Black και Scholes, στοιχεία από την οποία θα δούμε στο Κεφάλαιο 18.

Στη διαδικασία της τιμολόγησης ενός παράγωγου προϊόντος, η έννοια τού αναπαράγοντος χαρτοφυλακίου είναι θεμελιώδης.

Ορισμός 16.6. Το χαρτοφυλάκιο $h = \{h_t : t \in [0, T]\}$ λέγεται **αναπαράγον** για το συμβόλαιο Ευρωπαϊκού τύπου X αν είναι αυτοχρηματοδοτούμενο και ικανοποιεί την

$$V_T^h = X.$$

Το χαρτοφυλάκιο αυτό είναι ένας τρόπος να παραχθεί αξία X από αρχικό κεφάλαιο V_0^h .

Από άποψη εσόδων, το να έχει κανείς ένα αποδεκτό αναπαράγον χαρτοφυλάκιο ή το συμβόλαιο X είναι το ίδιο πράγμα. Επομένως, τη στιγμή 0, κατά την οποία εκδίδεται, πρέπει η τιμή τού συμβολαίου να ισούται με την τιμή V_0^h που έχει το χαρτοφυλάκιο τότε. Για τη στήριξη αυτού του ισχυρισμού πρέπει να δικαιολογήσουμε δύο πράγματα.

- (i) Αν για το συμβόλαιο X υπάρχουν δύο αποδεκτά αναπαράγοντα χαρτοφυλάκια h, \tilde{h} , τότε $V_0^h = V_0^{\tilde{h}}$. Πράγματι, αν για παράδειγμα $V_0^h > V_0^{\tilde{h}}$, τότε φτιάχνουμε το χαρτοφυλάκιο $\tilde{h} - h$, το οποίο είναι αποδεκτό. Δηλαδή αγοράζουμε το \tilde{h} και πουλάμε το h . Αυτό ενδεχομένως να εμπλέκει επιπλέον ανοιχτή πώληση, είναι όμως κάτι που γίνεται. Αυτό μας αποφέρει θετικό κέρδος $V_0^h - V_0^{\tilde{h}} > 0$. Τον χρόνο T χρωστάμε X λόγω του $-h$, αλλά έχουμε και X λόγω του \tilde{h} . Άρα η τελική αξία τού $\tilde{h} - h$ είναι 0, μας έχει αποφέρει όμως κέρδος στην αρχή.
- (ii) Η σωστή τιμή για το συμβόλαιο είναι V_0^h . Με όμοιο τρόπο όπως πριν, επιβάλλεται και αυτό από την απουσία arbitrage.

Η ύπαρξη ενός αποδεκτού αναπαράγοντος χαρτοφυλακίου καθορίζει/επιβάλλει τη σωστή τιμή ενός συμβολαίου με πρακτικό τρόπο. Δηλαδή αν κάποιος θεωρεί άλλη τιμή ως σωστή, μπορούμε χρησιμοποιώντας αυτό το χαρτοφυλάκιο να δημιουργήσουμε arbitrage και να τον αναγκάσουμε σε ζημιά.

Αν κάποια στιγμή $t \in (0, T)$, δηλαδή μετά την έκδοση και πριν τη λήξη τού συμβολαίου X , ο κάτοχός του θέλει να το πουλήσει, τότε η σωστή τιμή πώλησης είναι V_t^h , όπου h είναι ένα οποιοδήποτε αποδεκτό αναπαράγον χαρτοφυλάκιο για το X . Αυτό αποδεικνύεται ανάλογα όπως πριν.

Ευρωπαϊκά παράγωγα

17.1 Ευρωπαϊκά δικαιώματα

Ορισμός 17.1. 1) **Ευρωπαϊκό δικαίωμα αγοράς** σε μία μετοχή είναι ένα συμβόλαιο που δίνει στον κάτοχό του το δικαίωμα να αγοράσει μία μετοχή από τον εκδότη τού συμβολαίου σε έναν δεδομένο χρόνο T σε δεδομένη τιμή K .

2) **Ευρωπαϊκό δικαίωμα πώλησης** σε μία μετοχή είναι ένα συμβόλαιο που δίνει στον κάτοχο του το δικαίωμα να πουλήσει μία μετοχή στον εκδότη τού συμβολαίου σε έναν δεδομένο χρόνο T σε δεδομένη τιμή K .

Ο χρόνος T λέγεται **ημερομηνία λήξης** και η τιμή K λέγεται **τιμή άσκησης** τού δικαιώματος. Ο κάτοχος ενός από τα δύο πιο πάνω συμβόλαια δεν είναι υποχρωμένος να κάνει τη συναλλαγή που του επιτρέπεται. Την κάνει μόνο αν τη θεωρεί συμφέρουσα. Και η συναλλαγή είναι δυνατόν να γίνει μόνο κατά τον χρόνο T . Αν αυτός ο χρόνος περάσει, το συμβόλαιο είναι άχρηστο.

Τα δύο πιο πάνω παράγωγα είναι απλά Ευρωπαϊκά παράγωγα σύμφωνα με τον Ορισμό 16.5. Πράγματι, ας δούμε αναλυτικά το κέρδος που αποφέρουν τον χρόνο τής άσκησης. Για το δικαίωμα αγοράς, αν τον χρόνο T η τιμή S_T της μετοχής στην αγορά είναι γνήσια μεγαλύτερη από K , τότε ο κάτοχος τού δικαιώματος το ασκεί και αγοράζει μία μετοχή με τιμή K . Αμέσως την πουλάει στην αγορά σε τιμή S_T και έχει κέρδος $S_T - K$. Αν όμως ισχύει $S_T \leq K$, προφανώς δεν ασκεί το δικαίωμα. Γιατί να αγοράσει μια μετοχή σε τιμή K αν μπορεί να την βρεί στην αγορά πίο φθηνά; Άρα το κέρδος είναι $(S_T - K)^+$ σε κάθε περίπτωση και επομένως το παράγωγο έχει τη μορφή $g_c(S_T)$ με $g_c(x) = (x - K)^+$.

Για το δικαίωμα πώλησης, ο κάτοχός του ασκεί το δικαίωμα που έχει μόνο αν $S_T < K$, οπότε αγοράζει από την αγορά μία μετοχή με τιμή S_T και την πουλάει στον εκδότη τού δικαιώματος στη συμφωνημένη τιμή K . Έτσι έχει κέρδος $K - S_T$. Το κέρδος είναι $(K - S_T)^+$ σε κάθε περίπτωση και επομένως το παράγωγο έχει τη μορφή $g_p(S_T)$ με $g_p(x) = (K - x)^+$.

Ποιος ενδιαφέρεται να αγοράσει ένα Ευρωπαϊκό δικαίωμα αγοράς; Ένας επενδυτής που πιστεύει ότι η τιμή τής μετοχής θα ανέβει πολύ. Γιατί τότε αγοράζοντας φθηνά και πουλώντας στην τιμή αγοράς θα κερδίσει τη διαφορά. Αντίστοιχα, Ευρωπαϊκό δικαίωμα πώλησης αγοράζει ένας που πιστεύει ότι η τιμή τής μετοχής θα πέσει.

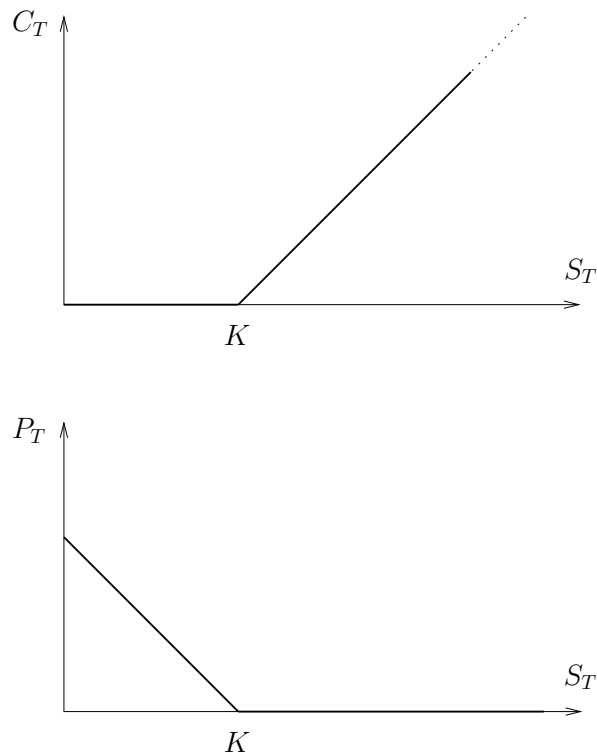
Αν όμως ένας επενδυτής πιστεύει ότι η τιμή τής μετοχής θα ανέβει, γιατί δεν αγοράζει την ίδια τη μετοχή; Στο επόμενο παράδειγμα φαίνεται ότι η αγορά ενός Ευρωπαϊκού δικαίωμα αγοράς είναι κίνηση που έχει περισσότερο ρίσκο αλλά και δυνατότητα για πολύ μεγαλύτερα κέρδη.

Παράδειγμα 17.2. Ας θεωρήσουμε ένα Ευρωπαϊκό δικαίωμα αγοράς στη μετοχή τής Xerox με $T = 20$ Ιουλίου 2012 και $K = 40\text{€}$. Υποθέτουμε ότι σήμερα είναι 10 Ιουνίου 2012 και η τιμή τής μετοχής είναι 36€. Αγοράζει αυτό το συμβόλαιο κάποιος που πιστεύει ότι η μετοχή στις 20 Ιουλίου θα έχει τιμή πάνω από 40 Ευρώ. Γιατί όμως δεν αγοράζει τη μετοχή την ίδια σήμερα;

Έστω ότι γνωρίζουμε ότι κατά τον χρόνο T μπορεί να συμβεί ένα από τα εξής σενάρια:

A : Η τιμή τής μετοχής είναι 30€,

17.1 Ευρωπαϊκά δικαιώματα



Σχήμα 17.1: Η συνάρτηση πληρωμής κατά τον χρόνο άσκησης T για ένα Ευρωπαϊκό δικαίωμα αγοράς (πάνω) και ένα Ευρωπαϊκό δικαίωμα πώλησης (κάτω) με κοινή τιμή άσκησης K .

B : Η τιμή τής μετοχής είναι 42€,

και ότι το πρώτο σενάριο έχει πιθανότητα $1/3$, ενώ το δεύτερο $2/3$. Ένας κάτοχος τού συμβολαίου θα έχει κέρδος 0€ στο σενάριο A (δεν θα το χρησιμοποιήσει) και κέρδος 2€ στο σενάριο B. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η σωστή τιμή τού συμβολαίου είναι 1€. Έστω λοιπόν ότι ένας επενδυτής έχει 360€. Ας μελετήσουμε τις εξής δύο επιλογές:

- 1 : Ο επενδυτής αγοράζει 10 μετοχές τής Xerox.
- 2 : Ο επενδυτής αγοράζει 360 Ευρωπαϊκά δικαιώματα αγοράς.

Κάθε επιλογή κοστίζει 360€. Αν συμβεί το σενάριο A, τότε η επιλογή 1 δίνει ζημιά 60€, ενώ η επιλογή 2 ζημιά 360€. Αν συμβεί το σενάριο B, η επιλογή 1 δίνει κέρδος 60€, ενώ η επιλογή 2 δίνει κέρδος $2 \times 360 - 360 = 360$ €. Δηλαδή η επιλογή 1 προσφέρει ή ζημιά 16.6% ή κέρδος 16.6% επί του αρχικού κεφαλαίου, ενώ η επιλογή 2 προσφέρει ή ζημιά 100% ή κέρδος 100% επί του αρχικού κεφαλαίου. Η επιλογή B είναι πιο επιθετική. Σε ευνοϊκή περίπτωση τριπλασιάζει κανείς το κεφάλαιό του. Η επιλογή A είναι πιο συντηρητική.

Ανάλογες παρατηρήσεις με τις παραπάνω μπορούμε να κάνουμε και για τα Ευρωπαϊκά δικαιώματα πώλησης.

Συμβόλαια όπως αυτά του Ορισμού 17.1 μπορούν να αφορούν ένα μέγεθος διαφορετικό από την τιμή μιας μετοχής, π.χ., την τιμή τού χρυσού ή του σιταριού.

Η χρήση των παραγώγων δεν είναι πάντοτε κερδοσκοπική. Μια άλλη τους χρήση είναι στην αντιστάθμιση κινδύνου. Για παράδειγμα, μια εταιρία ενδέχεται να θέλει να εξαλείψει την αβεβαιότητα στην τιμή μιας πρώτης ύλης που χρειάζεται. Έστω ότι αυτή η πρώτη ύλη είναι το πετρέλαιο.

Αγοράζει λοιπόν έναν αριθμό Ευρωπαϊκών δικαιωμάτων αγοράς με τιμή, π.χ., 1.5€ το λίτρο, και είναι σίγουρη ότι τη δεδομένη ημερομηνία στο μέλλον δεν χρειάζεται να ανησυχεί για την τιμή τού πετρελαίου. Θα της κοστίζει το πολύ 1.5€ το λίτρο.

17.2 Σχέση μεταξύ τιμών δικαιωμάτων αγοράς και πώλησης

Θεωρούμε ένα Ευρωπαϊκό δικαίωμα αγοράς και ένα Ευρωπαϊκό δικαίωμα πώλησης πάνω σε μια μετοχή που έχουν και τα δύο την ίδια ημερομηνία λήξης T και την ίδια τιμή άσκησης K . Έστω ότι τη χρονική στιγμή $t \leq T$ οι τιμές τους είναι C_t, P_t ενώ η τιμή τής μετοχής είναι S_t . Ένα επιχείρημα βασισμένο στην έλλειψη arbitrage δίνει μια απλή σχέση που ικανοποιούν οι τιμές C_t, P_t .

Πρόταση 17.3. *Αν το επιτόκιο τής τράπεζας είναι σταθερό, ίσο με r , και δεν υπάρχει δυνατότητα arbitrage, τότε για κάθε $t \leq T$ ισχύει*

$$C_t - P_t = S_t - Ke^{-r(T-t)}. \quad (17.1)$$

Απόδειξη. Η σχέση ισχύει για $t = T$, γιατί το αριστερό μέλος τής ισότητας ισούται με $(S_T - K)^+ - (K - S_T)^+ = (S_T - K)^+ - (S_T - K)^- = S_T - K$, που συμπίπτει με το δεξί μέλος.

Για $t < T$, τον χρόνο t κάνουμε το εξής. Αγοράζουμε ένα δικαίωμα πώλησης και μία μετοχή και πουλάμε ένα δικαίωμα αγοράς. Για την αγορά αυτού του χαρτοφυλακίου ξοδεύουμε

$$P_t + S_t - C_t.$$

Αυτό το χαρτοφυλάκιο αποφέρει τη χρονική στιγμή T ποσό K . Γιατί τότε η αξία του θα είναι

$$(K - S_T)^+ - (S_T - K)^+ + S_T = (K - S_T)^+ - (K - S_T)^- + S_T = (K - S_T) + S_T = K.$$

Να το δούμε και πρακτικά πώς θα δουλέψει. Τον χρόνο T , αν ισχύει $S_T < K$, ασκούμε το δικαίωμα πώλησης. Δηλαδή παίρνουμε τη μετοχή που έχουμε και την πουλάμε στον εκδότη τού δικαιώματος πώλησης στην τιμή K . Αν ισχύει $S_T \geq K$, τότε θα έρθει το άτομο στο οποίο έχουμε πουλήσει το δικαίωμα αγοράς για να αγοράσει μία μετοχή στην τιμή K . Του δίνουμε λοιπόν την μία μετοχή που έχουμε και παίρνουμε K .

Άρα το αρχικό χαρτοφυλάκιο δίνει ντετερμινιστικά το ποσό K τον χρόνο T (είναι αναπαράγον για το ποσό K τη χρονική στιγμή T). Το ίδιο κάνει και η τράπεζα αν καταθέσουμε τον χρόνο t το ποσό $Ke^{-r(T-t)}$. Πρέπει λοιπόν οι δύο επιλογές

A_1 : δικαίωμα πώλησης – δικαίωμα αγοράς + μετοχή,

A_2 : ποσό $Ke^{-r(T-t)}$ στην τράπεζα τον χρόνο t ,

να έχουν την ίδια αξία τη χρονική στιγμή t , γιατί διαφορετικά έχουμε arbitrage. Και αυτό ολοκληρώνει την απόδειξη.

Αλλά ας δούμε αναλυτικά πώς εμφανίζεται arbitrage αν δεν ισχύει η ισότητα. Για παράδειγμα, αν

$$P_t + S_t - C_t > Ke^{-r(T-t)},$$

τότε πουλάμε την επιλογή A_1 και αγοράζουμε την επιλογή A_2 . Πιο συγκεκριμένα, πουλάμε ένα δικαίωμα πώλησης, αγοράζουμε ένα δικαίωμα αγοράς και κάνουμε ανοιχτή πώληση σε μία μετοχή. Τέλος, βάζουμε στην τράπεζα ποσό $Ke^{-r(T-t)}$. Ό,τι και να γίνει τον χρόνο T , οι υποχρεώσεις μας θα έχουν κόστος K , αλλά το ποσό που είχαμε βάλει στην τράπεζα έχει γίνει πλέον K και τις καλύπτει ακριβώς. Όμως εμείς στην αρχή κερδίσαμε το ποσό $P_t + S_t - C_t - Ke^{-r(T-t)} > 0$. Αυτό είναι arbitrage. Όμοια δείχνουμε ότι και η $P_t + S_t - C_t < Ke^{-r(T-t)}$ οδηγεί σε arbitrage, και η πρόταση αποδείχθηκε. ■

17.3 Άλλα είδη δικαιωμάτων

Έστω $(S_t)_{t \geq 0}$ η ανέλιξη τής τιμής μιας συγκεκριμένης μετοχής. Ορίζονται με βάση αυτή την τιμή κάποια άλλα είδη δικαιωμάτων. Για την περιγραφή τους θα χρειαστούμε τις εξής ανελίξεις:

$$\underline{S}_t := \inf\{S_s : s \in [0, t]\}, \quad (17.2)$$

$$\bar{S}_t := \sup\{S_s : s \in [0, t]\} \quad (17.3)$$

για κάθε $t \geq 0$. Αυτές λέγονται το τρέχον ελάχιστο και τρέχον μέγιστο αντίστοιχα τής S .

Ασιατικά δικαιώματα. Ένα τέτοιο δικαίωμα δίνει στον κάτοχό του το δικαίωμα τη στιγμή τής λήξης T να πάρει ένα ποσό που είναι συνάρτηση τού μέσου όρου

$$\frac{1}{T} \int_0^T S_t dt$$

της τιμής τής μετοχής. Έτσι, ένα Ασιατικό δικαίωμα αγοράς με τιμή άσκησης K και χρόνο λήξης T δίνει το ποσό

$$\left(\frac{1}{T} \int_0^T S_t dt - K \right)^+.$$

Ένα Ασιατικό δικαίωμα πώλησης με τιμή άσκησης K και χρόνο λήξης T δίνει στον κάτοχό του τον χρόνο T το ποσό $(K - T^{-1} \int_0^T S_t dt)^+$.

Δικαιώματα με φράγματα. Στον ορισμό αυτών εμπλέκεται μια παράμετρος $c > 0$ (το φράγμα) η οποία συμφωνείται κατά την αγορά τους. Δύο είναι τα είδη αυτών των δικαιωμάτων, τα εντός και τα εκτός. Ένα δικαίωμα εντός λήγει με αξία μηδέν εκτός αν η ανέλιξη S κατά το χρονικό διάστημα $[0, T]$ επισκεφτεί και τα δύο διαστήματα $[0, c]$, $[c, \infty)$ (δηλαδή διασχίσει το φράγμα c). Ενώ ένα δικαίωμα εκτός λήγει με αξία μηδέν αν η ανέλιξη S κατά το χρονικό διάστημα $[0, T]$ επισκεφτεί και τα δύο διαστήματα $[0, c]$, $[c, \infty)$.

Τώρα, ανάλογα με την αρχική τιμή S_0 έχουμε τα εξής είδη.

- Άνω και εντός. Αν $S_0 < c$ και το δικαίωμα ενεργοποιείται μόνο αν $\bar{S}_T \geq c$. Δηλαδή πρέπει κάποια στιγμή κατά το διάστημα $[0, T]$ η τιμή τής μετοχής να ξεπεράσει το φράγμα c , διαφορετικά το δικαίωμα δεν δίνει τίποτα κατά τον χρόνο άσκησης.
- Κάτω και εντός. Αν $S_0 > c$ και το δικαίωμα ενεργοποιείται μόνο αν $\underline{S}_T \leq c$.
- Άνω και εκτός. Αν $S_0 < c$ και το δικαίωμα απενεργοποιείται αν $\bar{S}_T \geq c$.
- Κάτω και εκτός. Αν $S_0 > c$ και το δικαίωμα απενεργοποιείται αν $\underline{S}_T \leq c$.

Για παράδειγμα, ένα κάτω και εκτός δικαίωμα αγοράς με τιμή άσκησης K , χρόνο άσκησης T και φράγμα c δίνει τον χρόνο T το ποσό $(S_T - K)^+$ αν καθ' όλο το διάστημα $[0, T]$ η μετοχή είχε πάντοτε αξία μεγαλύτερη τού c . Διαφορετικά, το δικαίωμα δίνει ποσό 0.

Lookback δικαιώματα. Ένα lookback δικαίωμα αγοράς δίνει στον κάτοχό του το δικαίωμα να αγοράσει μία μετοχή τη χρονική στιγμή T στην τιμή \underline{S}_T . Αυτή η τιμή είναι σίγουρα χαμηλότερη από την τρέχουσα, επομένως το δικαίωμα ασκείται πάντοτε και δίνει κέρδος $S_T - \underline{S}_T$ αφού ο κάτοχός του μετά την αγορά πουλάει τη μετοχή αμέσως στην τιμή S_T .

Ένα lookback δικαίωμα πώλησης δίνει στον κάτοχό του το δικαίωμα να πουλήσει μία μετοχή τη χρονική στιγμή T στην τιμή \bar{S}_T . Επομένως έχει συνάρτηση πληρωμής $\bar{S}_T - S_T$.

Αμερικανικά δικαιώματα. Αυτά είναι δικαιώματα που έχουν δεδομένο χρόνο ζωής $[0, T]$ αλλά μπορούν να ασκηθούν οποιαδήποτε στιγμή τού διαστήματος $[0, T]$ θελήσει ο κάτοχός τους.

Για παράδειγμα, ένα Αμερικανικό δικαίωμα πώλησης με λήξη T και τιμή άσκησης K δίνει στον κάτοχό του το δικαίωμα να πουλήσει, οποιαδήποτε στιγμή στο $[0, T]$, στον εκδότη του δικαιώματος μία μετοχή στην τιμή K . Ένα τέτοιο δικαίωμα δίνει περισσότερες επιλογές από το αντίστοιχο Ευρωπαϊκό. Ας υποθέσουμε ότι για κάποιο $t < T$ συμβαίνει $S_t < K$ αλλά τη στιγμή λήξης ισχύει $S_T > K$. Σε ένα τέτοιο σενάριο, ο κάτοχος ενός Αμερικανικού δικαιώματος πώλησης, αν ασκήσει το δικαίωμα του τον χρόνο t , θα έχει κέρδος, ενώ ο κάτοχος ενός Ευρωπαϊκού δικαιώματος πώλησης δεν θα κερδίσει τίποτα.

Παρατηρήστε ότι όλα τα δικαιώματα που περιγράψαμε πιο πάνω ήταν Ευρωπαϊκά.

Ασκήσεις

17.1 Έστω δύο Ευρωπαϊκά δικαιώματα αγοράς σε μία μετοχή με κοινό χρόνο λήξης T και τιμή άσκησης K_1 και K_2 αντίστοιχα. Ονομάζουμε $C_1(t)$, $C_2(t)$ την αξία τους τον χρόνο $t \in [0, T]$. Υποθέτουμε ότι $K_1 < K_2$. Ναδειχθεί ότι αν στην αγορά δεν υπάρχει δυνατότητα arbitrage, τότε ισχύει

$$0 \leq C_1(t) - C_2(t) \leq (K_2 - K_1)e^{-r(T-t)}$$

για κάθε $t \in [0, T]$. r είναι το επιτόκιο τής τράπεζας.

18

Η εξίσωση Black-Scholes

18.1 Μια απλή αγορά

Θεωρούμε ότι έχουμε μια αγορά που έχει μόνο δύο προϊόντα. Το ένα είναι η δυνατότητα κατάθεσης σε μια τράπεζα (ισοδύναμα, αγορά ομολόγων τής τράπεζας) και το άλλο είναι μετοχές μιας εταιρίας. Συμβολίζουμε την τιμή τής μονάδας για καθένα από αυτά τη χρονική στιγμή t με β_t και S_t αντίστοιχα. Υποθέτουμε ότι οι τιμές αυτές εξελίσσονται ως εξής

$$d\beta_t = r\beta_t dt, \quad (18.1)$$

$$dS_t = S_t \mu dt + S_t \sigma dB_t, \quad (18.2)$$

όπου $r, \mu, \sigma > 0$ δεδομένες σταθερές. Για την τιμή τού ομολόγου μπορούμε να γράψουμε αμέσως $\beta_t = \beta_0 e^{rt}$ για κάθε $t \geq 0$. Δηλαδή το ποσό β_0 ανατοκίζεται με συνεχή και σταθερό ρυθμό ανατοκισμού r . Κατανοούμε τον τρόπο εξέλιξης τής τιμής τής μετοχής αν γράψουμε

$$\frac{dS_t}{S_t} = \mu dt + \sigma dB_t.$$

Η σχετική αλλαγή τής τιμής S_t σε ένα μικρό χρονικό διάστημα $[t, t + dt]$ προέρχεται από μια ντετερμινιστική αύξηση κατά μdt στην οποία προστίθεται μια τυχαία μεταβολή την οποία δεν ξέρουμε ακόμα τη χρονική στιγμή t . Ξέρουμε απλώς ότι έχει κατανομή $N(0, \sigma^2 dt)$.

Βέβαια, έχουμε λύσει πλήρως τη ΣΔΕ (18.2) στο Παράδειγμα 14.1 και η λύση της είναι η γεωμετρική κίνηση Brown. Σημειώνουμε ότι από τη μορφή τής λύσης προκύπτει ότι η S_t είναι θετική για όλους τους χρόνους t (εφόσον $S_0 > 0$), πράγμα που δεν είναι προφανές από τη ΣΔΕ γιατί η εξίσωση εμπλέκει τον όρο dB_t , ο οποίος παίρνει και αρνητικές τιμές. Και αυτό είναι πολύ λογικό. Η τιμή μιας μετοχής μπορεί να γίνει 0, αλλά ποτέ δεν θα πάρει αρνητική τιμή.

18.2 Παραγωγή τής εξίσωσης

Έστω ότι έχουμε ένα απλό συμβόλαιο Ευρωπαϊκού τύπου. Δηλαδή μια δεδομένη μελλοντική χρονική στιγμή T δίνει το ποσό $g(S_T)$ στον κάτοχό του. Κάνοντας κάποιες παραδοχές, θα προσδιορίσουμε τη σωστή τιμή τού συμβολαίου οποιαδήποτε χρονική στιγμή $t \in [0, T]$.

Θεώρημα 18.1. Έστω $g : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχής συνάρτηση για την οποία υπάρχουν θετικές σταθερές c_1, c_2 και $\rho < 2$ ώστε

$$|g(x)| \leq c_1 e^{c_2 |\log x|^\rho} \quad (18.3)$$

για κάθε $x > 0$. Τότε η σωστή τιμή τού Ευρωπαϊκού συμβολαίου $g(S_T)$ με ημερομηνία λήξης T κατά οποιαδήποτε χρονική στιγμή $t \in [0, T]$ ισούται με $V(S_t, t)$, όπου $V : [0, \infty) \times [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$ είναι η μοναδική λύση τού προβλήματος

$$\frac{\partial V}{\partial t}(x, t) + \frac{1}{2} \sigma^2 x^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}(x, t) + rx \frac{\partial V}{\partial x}(x, t) - rV(x, t) = 0 \quad \text{στο } (0, \infty) \times (0, T), \quad (18.4)$$

$$V(x, T) = g(x) \quad \text{στο } [0, \infty) \quad (18.5)$$

που επιπλέον ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\text{υπάρχουν } C_1, C_2 > 0 \text{ ώστε } |V(x, t)| \leq C_1 e^{C_2(\log x)^2} \text{ για κάθε } (x, t) \in [0, \infty) \times [0, T]. \quad (18.6)$$

Η μερική διαφορική εξίσωση 18.4 λέγεται εξίσωση Black-Scholes.

Δεδομένου ότι δεν έχουμε δώσει ακριβή περιγραφή των αποδεκτών χαρτοφυλακίων, θα μπορέσουμε να δώσουμε μόνο ένα σχέδιο τής απόδειξης. Πριν αρχίσουμε, θα πειραματιστούμε. Έστω X_t η σωστή τιμή τού συμβολαίου τον χρόνο t . Βέβαια η τιμή θα εξαρτάται από τις πληροφορίες που είναι γνωστές ως τότε, δηλαδή θα είναι \mathcal{F}_t -μετρήσιμη συνάρτηση. Θα υποθέσουμε όμως επιπλέον ότι:

- $X_t = V(S_t, t)$ για κάποια συνάρτηση $V : \mathbb{R} \times [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$.
- $V \in C^{2,1}(\mathbb{R} \times [0, T])$.

Δηλαδή η τιμή τού συμβολαίου τη στιγμή t εξαρτάται μόνο από την τιμή τής μετοχής τη χρονική στιγμή t (η προηγούμενη ιστορία τής τιμής είναι αδιάφορη) και βέβαια από τον χρόνο t . Και αυτή η εξάρτηση είναι αρκετά λεία. Στόχος μας είναι να βρούμε τη συνάρτηση V .

Υποθέτουμε ότι υπάρχει ένα αποδεκτό χαρτοφυλάκιο που είναι αναπαράγον για το συμβόλαιο και έστω ότι η σύνθεση τού χαρτοφυλακίου τη χρονική στιγμή t είναι (a_t, b_t) , δηλαδή περιέχει a_t μετοχές και b_t ομόλογα. Από τα σχόλια που ακολουθούν τον Ορισμό 16.6 έπεται ότι για κάθε χρονική στιγμή $t \in [0, T]$ η τιμή τού χαρτοφυλακίου ισούται με την τιμή τού συμβολαίου εκείνη τη στιγμή. Δηλαδή

$$a_t S_t + b_t \beta_t = V(S_t, t). \quad (18.7)$$

Επειδή το χαρτοφυλάκιο είναι αυτοχρηματοδοτούμενο, θα πρέπει

$$dV(S_t, t) = a_t dS_t + b_t d\beta_t. \quad (18.8)$$

Χρησιμοποιώντας τον τύπο τού Ιτô και την έκφραση (18.2) για το dS_t , γράφουμε το αριστερό μέλος τής προηγούμενης σχέσης ως

$$\frac{\partial V}{\partial t} dt + \frac{\partial V}{\partial x} dS_t + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} (dS_t)^2 = \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \mu S_t \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{2} \sigma^2 S_t^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) dt + \sigma S_t \frac{\partial V}{\partial x} dB_t,$$

και το δεξί ως

$$(a_t \mu S_t + r b_t \beta_t) dt + a_t \sigma S_t dB_t.$$

Θα ισχύει η (18.8) αν έχουμε

$$\begin{aligned} a_t &= \frac{\partial V}{\partial x}, \\ a_t \mu S_t + r b_t \beta_t &= \frac{\partial V}{\partial t} + \mu S_t \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{2} \sigma^2 S_t^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}. \end{aligned}$$

Αντικαθιστούμε τώρα στην τελευταία σχέση την τιμή τού a_t και την τιμή τού b_t που δίνει η (18.7), δηλαδή

$$b_t = (V(S_t, t) - a_t S_t) / \beta_t,$$

και παίρνουμε

$$\frac{\partial V}{\partial x} \mu S_t + r \left(V - S_t \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \frac{\partial V}{\partial t} + \mu S_t \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{2} \sigma^2 S_t^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2},$$

δηλαδή

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2}\sigma^2 S_t^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + rS_t \frac{\partial V}{\partial x} - rV = 0.$$

Στις τελευταίες σχέσεις παραλείψαμε το όρισμα της V , το οποίο είναι το (S_t, t) . Επομένως, αν η V ικανοποιεί τις (18.4), (18.5), θα έχουμε ότι το $(a_t, b_t)_{t \in [0, T]}$ είναι αυτοχρηματοδοτούμενο και αναπαράγον [Η επιλογή του a_t και η (18.4) εξασφαλίζουν ότι είναι αυτοχρηματοδοτούμενο, ενώ η επιλογή του b_t και η (18.5) εξασφαλίζουν ότι είναι αναπαράγον]. Αν το χαρτοφυλάκιο είναι και επιτρεπτό, έπεται ότι η σωστή τιμή του συμβολαίου τη χρονική στιγμή t θα είναι $X_t = V(S_t, t)$.

Σχέδιο απόδειξης του Θεωρήματος 18.1. Θα δείξουμε στην Παράγραφο 18.4 ότι το πρόβλημα (18.4), (18.5) έχει μοναδική λύση f που να ικανοποιεί την (18.6). Για τώρα, υποθέτουμε ότι έχουμε στη διάθεσή μας τη μοναδική αυτή λύση. Θεωρούμε το χαρτοφυλάκιο $(a_t, b_t)_{t \in [0, T]}$ που ορίζεται ως εξής για κάθε $t \in [0, T]$:

$$a_t := \frac{\partial f}{\partial x}(S_t, t), \quad (18.9)$$

$$b_t := \frac{f(S_t, t) - a_t S_t}{\beta_t}. \quad (18.10)$$

Η αξία του κάθε στιγμή t είναι $f(S_t, t)$.

ΙΣΧΥΡΙΣΜΟΣ 1: Το χαρτοφυλάκιο είναι αναπαράγον.

Πράγματι, αφού $f(S_T, T) = g(S_T)$ λόγω της (18.5).

ΙΣΧΥΡΙΣΜΟΣ 2: Το χαρτοφυλάκιο είναι αυτοχρηματοδοτούμενο.

Αυτό πρέπει να είναι σαφές από τον τρόπο που καταλήξαμε στην (18.4). Θα το ξανακάνουμε όμως. Για $t \in [0, T)$, υπολογίζουμε από τον τύπο του Itô,

$$\begin{aligned} df(S_t, t) &= \left(\frac{\partial f}{\partial t} + \mu S_t \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{1}{2} \sigma^2 S_t^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right) dt + \sigma S_t \frac{\partial f}{\partial x} dB_t \\ &= \left(rf - rS_t \frac{\partial f}{\partial x} + \mu S_t \frac{\partial f}{\partial x} \right) dt + \sigma S_t \frac{\partial f}{\partial x} dB_t \\ &= r(f - a_t S_t) dt + a_t S_t (\sigma dB_t + \mu dt) \\ &= rb_t \beta_t dt + a_t dS_t = a_t dS_t + b_t d\beta_t \end{aligned}$$

Στη δεύτερη ισότητα χρησιμοποιήσαμε το ότι η f ικανοποιεί τη (18.4), στην τρίτη ισότητα τον τύπο (18.9) για το a_t , και στην τέταρτη ισότητα τους τύπους (18.10), (18.1) για τα b_t, dS_t . Άρα

$$f(S_t, t) - f(S_0, 0) = \int_0^t a_s dS_s + \int_0^t b_s d\beta_s$$

για κάθε $t \in [0, T)$. Επειδή και τα δύο μέλη είναι συνεχείς συναρτήσεις του t έπεται ότι η ισότητα ισχύει και για $t = T$. Και ο ισχυρισμός αποδείχθηκε.

Αποδεικνύεται επίσης ότι το χαρτοφυλάκιο είναι αποδεκτό, οπότε, με βάση όσα είπαμε στην Παράγραφο 16.6, η σωστή τιμή του συμβολαίου κάθε χρονική στιγμή $t \in [0, T]$ ισούται με $f(S_t, t)$. ■

18.3 Η εξίσωση θερμότητας

Εξίσωση θερμότητας λέμε τη μερική διαφορική εξίσωση

$$u_t = \Delta u,$$

με $u : U \times I \rightarrow \mathbb{R}$, όπου $U \subset \mathbb{R}^d$ είναι ένα ανοικτό σύνολο και $I \subset [0, \infty)$ ένα διάστημα. Ο τελεστής Δ είναι η Λαπλασιανή τού \mathbb{R}^d , δηλαδή

$$\Delta f(x) = \sum_{k=1}^d \frac{\partial^2 f}{\partial x_k^2}$$

για κάθε $x \in \mathbb{R}^d$ και f συνάρτηση με πραγματικές τιμές που ορίζεται σε περιοχή του x και έχει δεύτερες παραγώγους στο x .

Σε αυτές τις σημειώσεις, μας ενδιαφέρει η περίπτωση $d = 1$ και $U \times I = \mathbb{R} \times [0, T]$ για κάποιο $T > 0$. Τότε η u είναι συνάρτηση δύο πραγματικών μεταβλητών (x, t) και η εξίσωση γράφεται

$$u_t = u_{xx}.$$

Βέβαια, πάντοτε την εξίσωση συνοδεύουν και κατάλληλες αρχικές/συνοριακές συνθήκες.

Για αυτή την εξίσωση θα διατυπώσουμε χωρίς απόδειξη δύο βασικά θεωρήματα. Το ένα δίνει μια έκφραση για μια λύση της και το άλλο εξασφαλίζει τη μοναδικότητα αυτής της λύσης μέσα σε μια αρκετά ευρεία κλάση συναρτήσεων. Τις αποδείξεις μπορεί να δει κανείς στις Παραγράφους (a), (b) του Κεφαλαίου 7 του John (1982) όπως και σε άλλα βιβλία μερικών διαφορικών εξισώσεων. Θεωρούμε τη συνάρτηση $R : \mathbb{R} \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$R(x, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi t}} e^{-x^2/4t}$$

για $x \in \mathbb{R}, t > 0$. Για σταθερό t , η συνάρτηση $x \mapsto R(x, t)$ είναι η πυκνότητα τής κατανομής $N(0, 2t)$.

Θεώρημα 18.2. Έστω $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχής συνάρτηση για την οποία υπάρχουν σταθερές $C_1, C_2 > 0$ και $\rho < 2$ ώστε

$$|g(x)| \leq C_1 e^{C_2|x|^\rho} \quad (18.11)$$

για κάθε $x \in \mathbb{R}$. Τότε η συνάρτηση $u : \mathbb{R} \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$u(x, t) := \int_{\mathbb{R}} g(y) R(x-y, t) dy = \frac{1}{\sqrt{4\pi t}} \int_{\mathbb{R}} g(y) e^{-(x-y)^2/4t} dy \quad (18.12)$$

$x \in \mathbb{R}, t > 0$ ικανοποιεί τα εξής:

- (i) $u \in C^{2,1}(\mathbb{R} \times (0, \infty))$.
- (ii) $u_t = u_{xx}$ στο $\mathbb{R} \times (0, \infty)$.
- (iii) $\lim_{\substack{(x,t) \rightarrow (x_0,0) \\ x \in \mathbb{R}, t > 0}} u(x, t) = g(x_0)$ για κάθε $x_0 \in \mathbb{R}$.

Το (iii) λέει ότι η u επεκτείνεται μοναδικά στο σύνορο τού $\mathbb{R} \times (0, \infty)$ και οι τιμές της εκεί συμπίπτουν με την g . Συμβολίζουμε και την επέκταση με u . Η u πλέον λύνει το πρόβλημα αρχικών τιμών

$$u_t - u_{xx} = 0 \quad \text{στο } \mathbb{R} \times (0, \infty), \quad (18.13)$$

$$u(x, 0) = g(x) \quad \text{στο } \mathbb{R}. \quad (18.14)$$

Σημειώνουμε ότι η (18.12) γράφεται επίσης ως $u(x, t) = \mathbf{E}_x g(B_{2t})$ (η μέση τιμή αφορά την κίνηση Brown B η οποία έχει σημείο εκκίνησης $B_0 = x$) αφού η B_{2t} έχει πυκνότητα $y \mapsto R(y-x)$. Με μικρές διαφορές στις υποθέσεις από τις οποίες προκύπτει, αυτός είναι ο ίδιος με τον τύπο (12.17) στο Παράδειγμα 12.14.

Η εξίσωση θερμότητας σε ένα χωρίο τής μορφής $\mathbb{R} \times [0, T]$ με $T > 0$ ή τής μορφής $\mathbb{R} \times [0, \infty)$, αν έχει τουλάχιστον μία λύση, τότε έχει άπειρες λύσεις όσο καλή και να είναι η αρχική συνθήκη g (δες Κεφάλαιο 7 του John (1982), σχέσεις 1.19, 1.20). Από όλες όμως τις λύσεις το πολύ μία έχει ελεγχόμενο μέγεθος για μεγάλα $|x|$.

Θεώρημα 18.3. Έστω $u \in C^{2,1}(\mathbb{R} \times (0, T))$ και συνεχής στο $\mathbb{R} \times [0, T]$ για την οποία υπάρχουν σταθερές $C_1, C_2 > 0$ ώστε

$$|u(x, t)| \leq C_1 e^{C_2 x^2} \quad (18.15)$$

για κάθε $(x, t) \in \mathbb{R} \times [0, T]$. Αν

$$u_t - u_{xx} = 0 \quad \text{στο } \mathbb{R} \times (0, T), \quad (18.16)$$

$$u(x, 0) = 0 \quad \text{στο } \mathbb{R}, \quad (18.17)$$

τότε $u \equiv 0$.

Αν δύο συναρτήσεις $u^{(1)}, u^{(2)} : \mathbb{R} \times [0, T] \rightarrow \mathbb{R}$ ικανοποιούν τις (18.16), (18.14), (18.15), τότε για τη διαφορά τους εφαρμόζεται το προηγούμενο θεώρημα και δίνει ότι $u^{(1)} \equiv u^{(2)}$. Δηλαδή το πρόβλημα των (18.16), (18.14) έχει το πολύ μία λύση που ικανοποιεί την (18.15). Από την άλλη, σημειώνουμε ότι για g που ικανοποιεί την (18.11), η συνάρτηση u που δίνεται από τη (18.12) ικανοποιεί τη (18.15) για κάθε $T > 0$.

18.4 Λύση τής εξίσωσης Black-Scholes

Θεώρημα 18.4. Έστω g όπως στο Θεώρημα 18.1. Υπάρχει μοναδική λύση τού προβλήματος (18.4), (18.5) που ικανοποιεί την (18.6), και δίνεται από τη σχέση

$$V(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-r(T-t)} \int_{\mathbb{R}} g(xe^{(T-t)(r-\frac{\sigma^2}{2})+z\sigma\sqrt{T-t}}) e^{-z^2/2} dz \quad (18.18)$$

για κάθε $(x, t) \in \mathbb{R} \times [0, T]$.

Απόδειξη. Με κατάλληλους μετασχηματισμούς, θα αναγάγουμε την εξίσωση Black-Scholes στην εξίσωση θερμότητας. Εισάγουμε νέες μεταβλητές, τις τ, y με

$$\tau := (T-t)\frac{\sigma^2}{2}, \quad y := \log x, \quad (18.19)$$

ως προς τις οποίες οι παλιές δίνονται από τις εκφράσεις

$$t = T - \frac{\tau}{\sigma^2/2}, \quad x = e^y, \quad (18.20)$$

και τη συνάρτηση

$$v(y, \tau) := V(x, t) = V\left(e^y, T - \frac{\tau}{\sigma^2/2}\right)$$

για κάθε $y \in \mathbb{R}$ και $\tau \in [0, T\sigma^2/2]$. Ένας υπολογισμός δίνει

$$\begin{aligned} v_\tau &= v_{yy} + (\lambda - 1)v_y - \lambda v & \text{στο } \mathbb{R} \times (0, T\sigma^2/2), \\ v(y, 0) &= g(e^y) & \text{στο } \mathbb{R}, \end{aligned}$$

με $\lambda := r/(\sigma^2/2)$. Έπειτα εισάγουμε τη συνάρτηση $u : \mathbb{R} \times [0, T\sigma^2/2] \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$v(y, \tau) = e^{-\frac{1}{2}(\lambda-1)y - \frac{1}{4}(\lambda+1)^2\tau} u(y, \tau).$$

Τότε η u ικανοποιεί

$$\begin{aligned} u_\tau &= u_{yy} && \text{στο } \mathbb{R} \times (0, T\sigma^2/2), \\ u(y, 0) &= e^{\frac{1}{2}(\lambda-1)y} g(e^y) && \text{στο } \mathbb{R}. \end{aligned}$$

Η συνθήκη (18.3) σε συνδυασμό με τα Θεωρήματα 18.2, 18.3 δίνει ότι η μοναδική λύση τού τελευταίου προβλήματος που ικανοποιεί τη (18.6) δίνεται από τη σχέση

$$u(y, \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau}} \int_{\mathbb{R}} u(w, 0) e^{-\frac{(y-w)^2}{4\tau}} dw.$$

Άρα,

$$\begin{aligned} V(x, t) &= e^{-\frac{1}{2}(\lambda-1)y - \frac{1}{4}(\lambda+1)^2\tau} \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau}} \int_{\mathbb{R}} u(w, 0) e^{-\frac{(y-w)^2}{4\tau}} dw \\ &= \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau}} e^{-\frac{1}{2}(\lambda-1)y - \frac{1}{4}(\lambda+1)^2\tau} \int_{\mathbb{R}} g(e^w) e^{\frac{1}{2}(\lambda-1)w} e^{-\frac{(y-w)^2}{4\tau}} dw. \end{aligned} \quad (18.21)$$

Ο εκθέτης μέσα στο τελευταίο ολοκλήρωμα είναι

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(\lambda-1)w - \frac{(y-w)^2}{4\tau} &= -\frac{1}{4\tau}\{w^2 - 2wy - 2\tau(\lambda-1)w + y^2\} \\ &= -\frac{1}{4\tau}\{w - (y + \tau(\lambda-1))\}^2 - \frac{1}{4\tau}y^2 + \frac{1}{4\tau}\{y + \tau(\lambda-1)\}^2 \\ &= -\frac{1}{4\tau}\{w - (y + \tau(\lambda-1))\}^2 + \frac{1}{4\tau}\{\tau^2(\lambda-1)^2 + 2y\tau(\lambda-1)\}. \end{aligned}$$

Προσθέτοντας σε αυτή την ποσότητα τον εκθέτη έξω από το ολοκλήρωμα, παίρνουμε

$$-\frac{1}{4\tau}\{w - (y + \tau(\lambda-1))\}^2 + \frac{1}{4}\tau(\lambda-1)^2 - \frac{1}{4}(\lambda+1)^2\tau = -\frac{1}{4\tau}\{w - (y + \tau(\lambda-1))\}^2 - \lambda\tau.$$

Παρατηρούμε ότι $\lambda\tau = r(T-t)$. Κάνουμε στο ολοκλήρωμα την αλλαγή μεταβλητής

$$z := \frac{w - (y + \tau(\lambda-1))}{\sqrt{2\tau}}.$$

Τότε

$$e^w = e^y e^{(\lambda-1)\tau + z\sqrt{2\tau}} = x e^{(T-t)(r - \frac{\sigma^2}{2}) + z\sigma\sqrt{T-t}},$$

και επομένως ο τύπος (18.21) για τη V συμπίπτει με αυτόν στη διατύπωση τού θεωρήματος. ■

18.5 Ειδική περίπτωση. Ευρωπαϊκό δικαίωμα αγοράς

Θα εφαρμόσουμε τον τύπο τού προηγούμενου θεωρήματος στην περίπτωση που $g(x) = (x-K)^+$ για κάποιο $K > 0$. Αυτό θα δώσει την τιμή ενός Ευρωπαϊκού δικαιώματος αγοράς με τιμή άσκησης K .

Πρόταση 18.5. Η τιμή ενός Ευρωπαϊκού δικαιώματος αγοράς με τιμή άσκησης K για τη μετοχή S στην αγορά (18.1), (18.2) ισούται με $C(S_t, t)$, όπου για $x > 0$ και $t \in [0, T)$,

$$C(x, t) := x\Phi(d_1(x, t)) - Ke^{-r(T-t)}\Phi(d_2(x, t)),$$

με Φ τη συνάρτηση κατανομής της $N(0, 1)$ και

$$d_1(x, t) := \frac{1}{\sigma\sqrt{T-t}} \left\{ \log \frac{x}{K} + \left(r + \frac{\sigma^2}{2} \right) (T-t) \right\},$$

$$d_2(x, t) := \frac{1}{\sigma\sqrt{T-t}} \left\{ \log \frac{x}{K} + \left(r - \frac{\sigma^2}{2} \right) (T-t) \right\}.$$

Απόδειξη. Η $g(x) = (x - K)^+$ ικανοποιεί τη (18.3). Θέτουμε

$$A := (T-t) \left(r - \frac{\sigma^2}{2} \right),$$

$$B := \sigma\sqrt{T-t},$$

$$L := \frac{1}{B} \left(\log \frac{K}{x} - A \right) = -d_2(x, t).$$

Ο τύπος (18.18) δίνει

$$\begin{aligned} C(x, t) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-r(T-t)} \int_{\mathbb{R}} (xe^{A+zb} - K)^+ e^{-z^2/2} dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-r(T-t)} \int_L^{\infty} (xe^{A+zb} - K) e^{-z^2/2} dz \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} xe^{-r(T-t)+A} \int_L^{\infty} e^{zB-z^2/2} dz - Ke^{-r(T-t)}(1 - \Phi(L)) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} xe^{-r(T-t)+A+B^2/2} \int_L^{\infty} e^{-(z-B)^2/2} dz - Ke^{-r(T-t)}\Phi(-L). \end{aligned}$$

Το ολοκλήρωμα στην τελευταία γραμμή ισούται με $\sqrt{2\pi}\{1 - \Phi(L - B)\} = \sqrt{2\pi}\Phi(B - L)$. Όμως $B - L = d_1(x, t)$, $-L = d_2(x, t)$ και $-r(T-t) + A + B^2/2 = 0$. Έτσι προκύπτει η ζητούμενη σχέση. ■

Ασκήσεις

18.1 Στο ίδιο πλαίσιο και συμβολισμό όπως στην Πρόταση 18.5, να δειχθεί ότι η σωστή τιμή ενός Ευρωπαϊκού δικαιώματος πώλησης με τιμή άσκησης K ισούται με $P(S, t)$, όπου για $x > 0$ και $t \in [0, T)$,

$$P(x, t) := Ke^{-r(T-t)}\Phi(-d_2(x, t)) - x\Phi(-d_1(x, t)).$$

Παραρτήματα

Α'

Πιθανότητες

Α'.1 Γκαουσιανές τυχαίες μεταβλητές

Λήμμα Α'.1. Έστω X τυχαία μεταβλητή με κατανομή την κανονική $N(0, 1)$. Η ροπογεννήτρια M_X τής X δίνεται από τη σχέση

$$M_X(t) := \mathbf{E}(e^{tX}) = e^{\frac{1}{2}t^2}$$

για κάθε $t \in \mathbb{R}$. Και άρα

$$\mathbf{E}(X^{2k}) = 1 \times 3 \times \dots \times (2k - 1) = \frac{(2k)!}{k!2^k}, \quad (\text{Α'.1})$$

$$\mathbf{E}(X^{2k+1}) = 0 \quad (\text{Α'.2})$$

για κάθε $k \in \mathbb{N}$.

Απόδειξη. Για $t \in \mathbb{R}$,

$$\mathbf{E}(e^{tX}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} e^{tx} e^{-x^2/2} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} e^{-\frac{1}{2}(x-t)^2} e^{t^2/2} dx = e^{t^2/2} \int_{\mathbb{R}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(x-t)^2} dx = e^{t^2/2}.$$

Η τελευταία ισότητα ισχύει γιατί στο τελευταίο ολοκλήρωμα ο ολοκληρωτέος είναι η πυκνότητα τής κατανομής $N(t, 1)$. Αναπτύσσοντας τα δύο μέλη σε δυναμοσειρά με κέντρο το μηδέν (τη δικαιολόγηση τού γιατί αναπτύσσεται έτσι το αριστερό μέλος το αφήνουμε στον αναγνώστη) έχουμε

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \mathbf{E}(X^n) t^n = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(\frac{t^2}{2}\right)^k = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!2^k} t^{2k}.$$

Από τη μοναδικότητα των συντελεστών σε δυναμοσειρά με θετική ακτίνα σύγκλισης, προκύπτουν οι σχέσεις για τις ροπές τής X . ■

Λήμμα Α'.2. Έστω X τυχαία μεταβλητή με κατανομή την κανονική $N(0, 1)$. Για κάθε $x > 0$ ισχύει

$$\frac{x}{x^2 + 1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \leq \mathbf{P}(X > x) \leq \frac{1}{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}.$$

Απόδειξη. Το άνω φράγμα για την πιθανότητα αποδεικνύεται ως εξής.

$$\mathbf{P}(X > x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt < \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \frac{t}{x} e^{-t^2/2} dt = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} (-e^{-t^2/2})' dt = \frac{1}{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}.$$

Για το κάτω φράγμα, θέτουμε $h : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$h(x) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2/2} dt - \frac{x}{x^2 + 1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$$

για κάθε $x \geq 0$. Η h έχει παράγωγο

$$h'(x) = -\frac{2}{\sqrt{2\pi}(1+x^2)^2} e^{-x^2/2} < 0,$$

οπότε είναι γνησίως φθίνουσα, και επειδή $\lim_{x \rightarrow \infty} h(x) = 0$, είναι παντού θετική. ■

Έστω d θετικός ακέραιος. Για μια τυχαία μεταβλητή X με τιμές στο \mathbb{R}^d , η χαρακτηριστική της συνάρτηση $\phi_X : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{C}$ ορίζεται ως

$$\phi_X(u) := \mathbf{E}(e^{i\langle u, X \rangle})$$

για κάθε $u \in \mathbb{R}^d$. Αποδεικνύεται ότι η ϕ_X χαρακτηρίζει την κατανομή μιας τυχαίας μεταβλητής. Δηλαδή, αν X, Y είναι τυχαίες μεταβλητές με τιμές στον \mathbb{R}^d και $\phi_X(u) = \phi_Y(u)$ για κάθε $u \in \mathbb{R}^d$, τότε οι X, Y έχουν την ίδια κατανομή.

Ορισμός A.3. Έστω $X = (X_1, X_2, \dots, X_d)^t$ τυχαία μεταβλητή με τιμές στον \mathbb{R}^d .

(1) Λέμε ότι η X είναι d -διάστατη τυπική κανονική τυχαία μεταβλητή αν οι X_1, X_2, \dots, X_d είναι ανεξάρτητες τυπικές κανονικές τυχαίες μεταβλητές.

(2) Λέμε ότι η X είναι Γκαουσιανή αν υπάρχουν $m \in \mathbb{N}^+$, $A \in \mathbb{R}^{d \times m}$, $b \in \mathbb{R}^d$, και Y m -διάστατη τυπική κανονική τυχαία μεταβλητή ώστε

$$X = AY + b. \quad (\text{A.3})$$

Με άλλα λόγια, ένα διάνυσμα είναι Γκαουσιανό αν υπάρχουν ανεξάρτητες τυπικές κανονικές τυχαίες μεταβλητές Y_1, Y_2, \dots, Y_m ώστε κάθε συντεταγμένη του διανύσματος να είναι γραμμικός συνδυασμός από αυτές τις κανονικές μαζί με μια μετατόπιση.

Άσκηση. Αν το διάνυσμα $(X_1, X_2, \dots, X_d)^t$ είναι Γκαουσιανό και $1 \leq r \leq d$, $i_1, i_2, \dots, i_r \in \{1, 2, \dots, d\}$, τότε και το διάνυσμα $(X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_r})^t$ είναι Γκαουσιανό.

Θεώρημα A.4. Μια τυχαία μεταβλητή X με τιμές στον \mathbb{R}^d είναι Γκαουσιανή αν και μόνο αν η χαρακτηριστική της συνάρτηση δίνεται από τον τύπο

$$\phi_X(u) := \mathbf{E}(e^{i\langle u, X \rangle}) = \exp \left\{ i\langle u, b \rangle - \frac{1}{2} \langle u, Cu \rangle \right\} \quad (\text{A.4})$$

για κάθε $u \in \mathbb{R}^d$, όπου $b \in \mathbb{R}^d$ και $C \in \mathbb{R}^{d \times d}$ θετικά ημιορισμένος πίνακας. Για μια τέτοια X , τα b, C καθορίζονται μοναδικά.

Υπενθυμίζεται ότι ένας πίνακας $C \in \mathbb{R}^d$ λέγεται θετικά ημιορισμένος αν είναι συμμετρικός και $\langle u, Cu \rangle \geq 0$ για κάθε $u \in \mathbb{R}^d$.

Απόδειξη. Αν η X είναι όπως στην (A.3), τότε

$$\langle u, X \rangle = \langle u, AY \rangle + \langle u, b \rangle = \langle A^t u, Y \rangle + \langle u, b \rangle = \sum_{k=1}^m (A^t u)_k Y_k + \langle u, b \rangle.$$

Συμβολίσουμε με $(A^t u)_k$ την k συντεταγμένη του διανύσματος $A^t u$.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(e^{i\langle u, X \rangle}) &= e^{i\langle u, b \rangle} \prod_{k=1}^m \mathbf{E}(e^{iY_k (A^t u)_k}) = e^{i\langle u, b \rangle} \prod_{k=1}^m e^{-\frac{1}{2}((A^t u)_k)^2} \\ &= e^{i\langle u, b \rangle} e^{-\frac{1}{2} \|A^t u\|^2}. \end{aligned}$$

Συμβολίζουμε με $\|x\|$ την Ευκλείδεια νόρμα τού διανύσματος x . Το τετράγωνο τής νόρμας στον εκθέτη ισούται με $\langle A^t u, A^t u \rangle = \langle u, AA^t u \rangle$, που αποδεικνύει το ζητούμενο με $C = AA^t$. Ο C προφανώς είναι συμμετρικός και θετικά ημιορισμένος αφού για κάθε $u \in \mathbb{R}^d$ έχουμε $\langle AA^t u, u \rangle = \|A^t u\|^2 \geq 0$.

Αντίστροφα, έστω X τυχαία μεταβλητή με χαρακτηριστική συνάρτηση όπως στην (Α.4). Υποθέτουμε ότι $b = 0$, αφού η γενική περίπτωση προκύπτει έπειτα θεωρώντας το διάνυσμα $X - b$. Αναζητούμε τώρα το διάνυσμα Y με τις ανεξάρτητες κανονικές τυχαίες μεταβλητές. Επειδή ο C είναι θετικά ημιορισμένος, υπάρχουν ορθογώνιος πίνακας $V \in \mathbb{R}^{d \times d}$ και διαγώνιος πίνακας $\Lambda \in \mathbb{R}^{d \times d}$ με μη αρνητικά στοιχεία στη διαγώνιο ώστε $C = V\Lambda V^t$. Έστω $\lambda_i = \Lambda_{i,i}$ για $i = 1, \dots, d$ τα διαγώνια στοιχεία τού Λ . Θα έχουμε $\mathbf{E}(e^{i\langle u, X \rangle}) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\langle V^t u, \Lambda V^t u \rangle\right\}$ για κάθε $u \in \mathbb{R}^d$. Βάζοντας όπου u το Vu , στο αριστερό μέλος, επειδή $\langle Vu, X \rangle = \langle u, V^t X \rangle$ και $VV^t = I$, παίρνουμε

$$\phi_{V^t X}(u) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\langle u, \Lambda u \rangle\right\} = \exp\left\{-\frac{1}{2}\sum_{j=1}^d \lambda_j u_j^2\right\},$$

το οποίο είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση ενός διανύσματος με ανεξάρτητες συντεταγμένες με την j συντεταγμένη να έχει κατανομή $N(0, \lambda_j)$. Έστω $\Delta \in \mathbb{R}^{d \times d}$ ο διαγώνιος πίνακας με $\Delta_{i,i} = \sqrt{\lambda_i}$ για $1 \leq i \leq d$. Θεωρούμε το διάνυσμα $\tilde{Y} \in \mathbb{R}^d$ με $\tilde{Y}_j = (V^t X)_j / \sqrt{\lambda_j} \sim N(0, 1)$ αν $\lambda_j \neq 0$ και $\tilde{Y}_j = 0$ αν $\lambda_j = 0$. Αν τα λ_j που είναι μη μηδενικά έχουν πλήθος r , τότε ονομάζουμε $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_r)^t$ το διάνυσμα που περιέχει τις \tilde{Y}_j που αντιστοιχούν σε αυτά τα λ_j . Υπάρχει τότε πίνακας $B \in \mathbb{R}^{d \times r}$ με στοιχεία 0 και 1 ώστε $\tilde{Y} = BY$. Για παράδειγμα, αν οι λ_j είναι αριθμημένες με τρόπο ώστε οι μη μηδενικές ιδιοτιμές να έχουν μικρότερο δείκτη από τις μηδενικές, τότε

$$B = \begin{Bmatrix} I_r \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix}$$

όπου I_r είναι ο $r \times r$ ταυτοτικός πίνακας και $\mathbf{0}$ είναι ο $(d - r) \times r$ μηδενικός πίνακας. Η Y είναι d -διάστατη τυπική κανονική και

$$V^t X = \Delta \tilde{Y} = \Delta B Y.$$

Η πρώτη ισότητα έπεται από τον ορισμό τού \tilde{Y} . Άρα $X = V\Delta B Y$ και ο ισχυρισμός αποδείχθηκε με $A = V\Delta B$. Παρατηρήστε ότι $AA^t = V\Delta B B^t \Delta V^t = V\Delta^2 V^t = C$.

Η μοναδικότητα των b, C αφήνεται ως άσκηση. ■

Από την απόδειξη τού θεωρήματος προκύπτει ότι ο A τής (Α.3) μπορεί να επιλεγεί ώστε $m = r \leq d$.

Πρόταση Α.5. Οι παράμετροι b, C της χαρακτηριστικής συνάρτησης ενός d -διάστατου Γκαουσιανού διανύσματος X προσδιορίζονται μοναδικά μέσω των σχέσεων

$$\begin{aligned} b_i &= \mathbf{E}(X_i), \\ C_{i,j} &= \text{Cov}(X_i, X_j) \end{aligned}$$

για κάθε $i, j \in \{1, 2, \dots, d\}$.

Απόδειξη. Από την απόδειξη τού προηγούμενου θεωρήματος έχουμε ότι η X γράφεται ως $X = AY + b$, όπως στην (Α.3), όπου το b είναι αυτό στη χαρακτηριστική συνάρτηση τής X και ο πίνακας A ικανοποιεί $C = AA^t$. Θα έχουμε λοιπόν για κάθε $1 \leq j \leq d$ ότι

$$X_j := \sum_{k=1}^m a_{j,k} Y_k + b_j. \tag{Α.5}$$

Άρα $\mathbf{E}(X_j) = b_j$ ενώ για $i, j \in \{1, 2, \dots, d\}$ έχουμε

$$\text{Cov}(X_i, X_j) = \sum_{k, \ell=1}^m a_{i,k} a_{j,\ell} \text{Cov}(Y_k, Y_\ell) = \sum_{k=1}^m a_{i,k} a_{j,k} = (AA^t)_{i,j} = C_{i,j}. \quad \blacksquare$$

Επομένως, αν ένα διάνυσμα είναι Γκαουσιανό, η χαρακτηριστική του συνάρτηση, και άρα η κατανομή του, καθορίζεται πλήρως από τις μέσες τιμές b των συνιστωσών και τον πίνακα συνδιακύμανσης C .

Για δεδομένα $b \in \mathbb{R}^d$ και $C \in \mathbb{R}^{d \times d}$ με C θετικά ορισμένο, συμβολίζουμε με $N(b, C)$ την κατανομή με χαρακτηριστική συνάρτηση την (Α'.4) και τη λέμε κανονική κατανομή με διάνυσμα μέσων τιμών b και πίνακα συνδιακύμανσης C .

Συνέπεια τής πιο πάνω πρότασης είναι το εξής πόρισμα.

Πόρισμα Α'.6. *Αν οι συνιστώσες ενός Γκαουσιανού διανύσματος είναι ασυσχέτιστες, τότε είναι και ανεξάρτητες.*

Απόδειξη. Έστω $X = (X_1, X_2, \dots, X_d)$ το διάνυσμα. Η υπόθεση δίνει ότι ο πίνακας συνδιακύμανσης είναι διαγώνιος με μη αρνητικά στοιχεία στη διαγώνιο, αφού είναι θετικά ημιορισμένος. Επομένως, η χαρακτηριστική συνάρτηση τού X είναι της μορφής

$$\phi_X(u) = e^{i(u,b)} e^{-\frac{1}{2} \sum_{j=1}^d C_{j,j} u_j^2} \text{ για κάθε } u \in \mathbb{R}^d.$$

Όμως αυτή είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση τού διανύσματος $(b_j + C_{j,j}^{1/2} Y_j)_{1 \leq j \leq d}$ με τις Y_1, Y_2, \dots, Y_d ανεξάρτητες τυπικές κανονικές (εύκολος υπολογισμός από τις στοιχειώδεις πιθανότητες). Επειδή η χαρακτηριστική συνάρτηση καθορίζει μονοσήμαντα την κατανομή, έπεται το συμπέρασμα. \blacksquare

Άσκηση. Έστω X_1, X_2, \dots, X_d τυχαίες μεταβλητές με τιμές στο \mathbb{R} . Αν για κάθε $u_1, u_2, \dots, u_d \in \mathbb{R}$ η τυχαία μεταβλητή $u_1 X_1 + \dots + u_d X_d$ ακολουθεί κανονική κατανομή, τότε το διάνυσμα (X_1, X_2, \dots, X_d) είναι Γκαουσιανό.

Σε κάποια βιβλία, η υπόθεση για τις X_1, X_2, \dots, X_d στην προηγούμενη άσκηση δίνεται ως ορισμός τού Γκαουσιανού διανύσματος.

Κατά την κατασκευή τής κίνησης Brown χρησιμοποιούμε το εξής αποτέλεσμα.

Πρόταση Α'.7. *Αν οι X, Y είναι ανεξάρτητες μονοδιάστατες τυχαίες μεταβλητές, καθεμία με κατανομή την $N(0, 1)$, τότε οι*

$$X - Y, X + Y$$

είναι ανεξάρτητες, καθεμία με κατανομή την $N(0, 2)$.

Απόδειξη. Το ότι καθεμία από τις $X - Y, X + Y$ ακολουθεί την κατανομή $N(0, 2)$ προκύπτει από γνώσεις στοιχειωδών πιθανοτήτων. Θα δείξουμε την ανεξαρτησία. Το διάνυσμα $(X - Y, X + Y)$ είναι Γκαουσιανό αφού παράγεται γραμμικά από τις X, Y , που είναι ανεξάρτητες $N(0, 1)$. Συγκεκριμένα,

$$\begin{pmatrix} X - Y \\ X + Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}.$$

Άρα η ανεξαρτησία θα προκύψει από τη μη συσχέτιση. Ένας απλός υπολογισμός δίνει ότι $\text{Cov}(X - Y, X + Y) = 0$, που είναι το ζητούμενο. \blacksquare

Τέλος, σημειώνουμε ότι μια τυχαία μεταβλητή X όπως στο Θεώρημα Α'.4 έχει πυκνότητα (ως προς το μέτρο Lebesgue) στον \mathbb{R}^d αν και μόνο αν ο C είναι θετικά ορισμένος. Και τότε μια πυκνότητα τής X είναι η

$$f(x) := \frac{1}{(2\pi)^{d/2}} \frac{1}{\sqrt{\det(C)}} \exp\left(-\frac{1}{2}(x - b)^t C^{-1}(x - \mu)\right) \quad (\text{Α'.6})$$

για κάθε $x \in \mathbb{R}^d$. Δεν χρησιμοποιούμε αυτό το αποτέλεσμα σε αυτές τις σημειώσεις.

A'.2 Σύγκλιση κατά κατανομή

Σε αυτή την παράγραφο, κάθε μετρικός χώρος θα θεωρείται μετρήσιμος χώρος με σ-άλγεβρα αυτήν των Borel υποσυνόλων του.

Έστω \mathcal{S} μετρικός χώρος και $X, (X_n)_{n \geq 1}$ τυχαίες μεταβλητές, με $X : \Omega \rightarrow \mathcal{S}, X_n : \Omega_n \rightarrow \mathcal{S}$ όπου $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P}), (\Omega_n, \mathcal{F}_n, \mathbf{P}_n)$ χώροι πιθανότητας. Συμβολίζουμε με \mathbf{E} τη μέση τιμή που αντιστοιχεί στο μέτρο \mathbf{P} και με \mathbf{E}_n τη μέση τιμή που αντιστοιχεί στο \mathbf{P}_n .

Ορισμός A'.8. Λέμε ότι η ακολουθία $(X_n)_{n \geq 1}$ συγκλίνει κατά κατανομή στη X αν για κάθε $f : \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχή και φραγμένη ισχύει

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}_n\{f(X_n)\} = \mathbf{E}\{f(X)\}. \quad (\text{A'.7})$$

Συνήθεις συμβολισμοί για τη σύγκλιση κατά κατανομή είναι οι $X_n \Rightarrow X, X_n \xrightarrow{d} X, X_n \xrightarrow{\mathcal{L}} X$.

Ισχύουν τα εξής πολύ χρήσιμα αποτελέσματα. Και για τα δύο υποθέτουμε ότι οι $\mathcal{S}, X, (X_n)_{n \geq 1}$ είναι όπως στην αρχή αυτής της παραγράφου. Αποδείξεις τους δίνονται στο Kallenberg (2021) (Θεωρήματα 5.27, 5.31).

Θεώρημα A'.9. (Θεώρημα συνεχούς απεικόνισης) Έστω $g : \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{Y}$ μετρήσιμη συνάρτηση, όπου \mathcal{Y} είναι μετρικός χώρος, και $D_g := \{x \in \mathcal{S} : \eta \ g \ \text{είναι} \ \text{ασυνεχής} \ \text{στο} \ x\}$. Αν $X_n \Rightarrow X$ και $\mathbf{P}(X \in D_g) = 0$, τότε $g(X_n) \Rightarrow g(X)$.

Πολύ συχνά θα έχουμε ότι η g είναι συνεχής (και άρα $D_g = \emptyset$). Η πρόταση λέει ότι τότε $g(X_n) \Rightarrow g(X)$, και σε αυτή την περίπτωση η απόδειξη τού θεωρήματος είναι άμεση.

Θεώρημα A'.10. (Skorohod, Dudley) Αν $X_n \Rightarrow X$ και ο \mathcal{S} είναι διαχωρίσιμος μετρικός χώρος, τότε υπάρχει χώρος πιθανότητας $(\tilde{\Omega}, \tilde{\mathcal{F}}, \tilde{\mathbf{P}})$ και τυχαίες μεταβλητές $Y, Y_n : \tilde{\Omega} \rightarrow \mathcal{S}$ ώστε $Y \stackrel{d}{=} X, Y_n \stackrel{d}{=} X_n$ και $\tilde{\mathbf{P}}(\lim_{n \rightarrow \infty} Y_n = Y) = 1$.

Το δεύτερο θεώρημα έχει άμεση συνέπεια το πρώτο στην περίπτωση που ο \mathcal{S} είναι διαχωρίσιμος. Για το υπόλοιπο τής παραγράφου υποθέτουμε ότι $\mathcal{S} = \mathbb{R}$.

Αν ονομάσουμε F_n και F τις συναρτήσεις κατανομής των X_n και X αντίστοιχα, τότε αποδεικνύεται ότι ο πιο πάνω ορισμός είναι ισοδύναμος με τη συνθήκη

$$\lim_{n \rightarrow \infty} F_n(x) = F(x)$$

σε κάθε σημείο $x \in \mathbb{R}$ που η F είναι συνεχής. Αυτός είναι ο ορισμός τής σύγκλισης κατά κατανομή που συνταντά κανείς σε εισαγωγικά μαθήματα πιθανοτήτων.

Επισημαίνουμε ότι δεν είναι απαραίτητο οι τυχαίες μεταβλητές $\{X_n : n \geq 1\}, X$ να ορίζονται στον ίδιο χώρο πιθανότητας. Σε πολλές περιπτώσεις όμως ορίζονται στον ίδιο χώρο και τότε έχει νόημα να εξετάσουμε τη σχέση αυτού του είδους σύγκλισης με τα υπόλοιπα βασικά είδη σύγκλισης τής θεωρίας πιθανοτήτων. Αυτό που ισχύει είναι ότι η σύγκλιση κατά κατανομή είναι ασθενέστερη από όλα.

Πρόταση A'.11. Έστω $(X_n)_{n \geq 1}, X$ τυχαίες μεταβλητές ορισμένες σε κοινό χώρο πιθανότητας και με τιμές στο \mathbb{R} . Τότε η $(X_n)_{n \geq 1}$ συγκλίνει στη X κατά κατανομή αν ένα από τα εξής συμβαίνει.

- (i) $H(X_n)_{n \geq 1}$ συγκλίνει στη X με πιθανότητα 1.
- (ii) $H(X_n)_{n \geq 1}$ συγκλίνει στη X κατά πιθανότητα.
- (iii) $H(X_n)_{n \geq 1}$ συγκλίνει στη X στον L^p για κάποιο $p \geq 1$.

Απόδειξη. (i) Έστω $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχής και φραγμένη. Λόγω συνέχειας θα ισχύει $\lim_{n \rightarrow \infty} f(X_n) = f(X)$ με πιθανότητα 1 και από το θεώρημα φραγμένης σύγκλισης έπεται η (A'.7).

(ii) Έστω ότι για μια f δεν ισχύει η (A'.7). Τότε υπάρχει $\varepsilon > 0$ και γνησίως αύξουσα ακολουθία φυσικών $(n_k)_{k \geq 1}$ έτσι ώστε

$$|\mathbf{E}\{f(X_{n_k})\} - \mathbf{E}\{f(X)\}| \geq \varepsilon \text{ για κάθε } k \geq 1. \quad (\text{A'.8})$$

Η ακολουθία $(X_{n_k})_{k \geq 1}$ συγκλίνει κατά πιθανότητα στη X και επομένως, με βάση γνωστή πρόταση, έχει μια υπακολουθία $(X_{n_{k_\ell}})_{\ell \geq 1}$ που συγκλίνει στη X με πιθανότητα 1. Από το προηγούμενο μέρος θα ισχύει $\lim_{\ell \rightarrow \infty} \mathbf{E}\{f(X_{n_{k_\ell}})\} = \mathbf{E}\{f(X)\}$. Άτοπο λόγω της (A'.8).

(iii) Σύγκλιση στον L^p συνεπάγεται σύγκλιση κατά πιθανότητα, οπότε το συμπέρασμα έπεται από το προηγούμενο μέρος τής πρότασης. ■

Πολύ χρήσιμος είναι ο χαρακτηρισμός τής σύγκλισης κατά κατανομή μέσω χαρακτηριστικών συναρτήσεων. Παραθέτουμε χωρίς απόδειξη το εξής πολύ σημαντικό θεώρημα [Durrett (2010), Θεώρημα 3.3.6].

Θεώρημα A'.12 (Θεώρημα συνέχειας τού Lévy). Έστω $(X_n)_{n \geq 1}$ ακολουθία τυχαίων μεταβλητών.

(i) Αν $X_n \Rightarrow X$, τότε $\phi_{X_n}(t) \rightarrow \phi_X(t)$ για κάθε $t \in \mathbb{R}$.

(ii) Αν υπάρχει συνάρτηση $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ ώστε $\phi_{X_n}(t) \rightarrow f(t)$ για κάθε $t \in \mathbb{R}$ και η f είναι συνεχής στο 0, τότε υπάρχει τυχαία μεταβλητή X με χαρακτηριστική συνάρτηση την f και $X_n \Rightarrow X$ καθώς $n \rightarrow \infty$.

Ο ισχυρισμός (i) έπεται αμέσως από τον ορισμό τής σύγκλισης κατά κατανομή γιατί οι συναρτήσεις $x \mapsto \cos(tx), x \mapsto \sin(tx)$ είναι συνεχείς και φραγμένες. Ο ισχυρισμός (ii) είναι ισχυρότερος από το αντίστροφο τού (i). Δηλαδή από αυτόν συνεπάγεται ότι το αντίστροφο τού (i) ισχύει. Είναι πιο απαιτητικός στην απόδειξή του και πιο χρήσιμος. Μια εφαρμογή του είναι η εξής.

Πρόταση A'.13. Έστω ακολουθία τυχαίων μεταβλητών $(X_n)_{n \geq 1}$ με $X_n \sim N(\mu_n, \sigma_n^2)$ και ότι

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_n &= \mu \in \mathbb{R}, \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \sigma_n^2 &= \sigma^2 \in [0, \infty). \end{aligned}$$

Τότε η $(X_n)_{n \geq 1}$ συγκλίνει κατά κατανομή σε μια τυχαία μεταβλητή με κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$.

Απόδειξη. Για $t \in \mathbb{R}$, οι χαρακτηριστικές συναρτήσεις των $\{X_n : n \geq 1\}$ ικανοποιούν

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \phi_{X_n}(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} e^{i\mu_n t - \frac{1}{2}\sigma_n^2 t^2} = e^{i\mu t - \frac{1}{2}\sigma^2 t^2}$$

για κάθε $t \in \mathbb{R}$. Η τελευταία έκφραση είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση μιας τυχαίας μεταβλητής με κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$. Το συμπέρασμα έπεται από το μέρος (ii) του προηγούμενου θεωρήματος. ■

Θεωρούμε ως κανονική κατανομή και την $N(\mu, 0)$, η οποία είναι η κατανομή τής σταθερής τυχαίας μεταβλητής μ .

Β'

Ανάλυση

Β'.1 Χώροι Hilbert

Καταγράφουμε σε αυτή την παράγραφο τη βασική ορολογία που χρειαζόμαστε από τη θεωρία των χώρων Hilbert. Για περισσότερα, μπορεί να ανατρέξει κανείς στις τελευταίες σελίδες του Κεφαλαίου 3 στο Νεγρεπόντης κ.ά. ή σε άλλα κλασικά βιβλία ανάλυσης (π.χ., Rudin, Folland).

Ορισμός Β'.1. Ένας διανυσματικός χώρος H (πάνω στο \mathbb{R}) εφοδιασμένος με μια συνάρτηση $\langle \cdot, \cdot \rangle : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ λέγεται **χώρος με εσωτερικό γινόμενο** αν ισχύουν τα εξής:

(i) $\langle x, x \rangle \geq 0$ για κάθε $x \in H$.

(ii) Αν $\langle x, x \rangle = 0$ τότε $x = 0$.

(iii) $\langle x, y \rangle = \langle y, x \rangle$ για κάθε $x, y \in H$.

(iv) $\langle ax + by, z \rangle = a\langle x, z \rangle + b\langle y, z \rangle$ για κάθε $x, y, z \in H$ και $a, b \in \mathbb{R}$.

Το εσωτερικό γινόμενο ορίζει στον H τη νόρμα $\|x\| := \sqrt{\langle x, x \rangle}$ για κάθε $x \in H$ και τη μετρική $d(x, y) = \|x - y\|$ για κάθε $x, y \in H$.

Ορισμός Β'.2. Ένας χώρος με εσωτερικό γινόμενο, $(H, \langle \cdot, \cdot \rangle)$, λέγεται **χώρος Hilbert** αν ο μετρικός χώρος (H, d) είναι πλήρης.

Παράδειγμα Β'.3. (i) Ο \mathbb{R}^n με το συνηθισμένο εσωτερικό γινόμενο είναι χώρος Hilbert αφού η μετρική που ορίζει το εσωτερικό γινόμενο είναι η Ευκλείδεια.

(ii) Έστω χώρος πιθανότητας $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbf{P})$. Ο $L^2(\mathbf{P})$ (δες Παράγραφο 1.5 για τον ορισμό του) εφοδιασμένος με το εσωτερικό γινόμενο

$$\langle X, Y \rangle = \mathbf{E}(XY)$$

για κάθε $X, Y \in L^2(\mathbf{P})$ είναι χώρος Hilbert λόγω του Θεωρήματος 1.13.

Σε έναν χώρο H με εσωτερικό γινόμενο λέμε ότι τα $x, y \in H$ είναι **κάθετα**, και γράφουμε $x \perp y$, αν $\langle x, y \rangle = 0$. Για κάθε $A \subset H$ θέτουμε

$$A^\perp := \{y \in H : y \perp x \text{ για κάθε } x \in A\},$$

το ορθογώνιο σύνολο στο A .

Πρόταση Β'.4. Έστω H χώρος Hilbert και $F \subset H$ κλειστός γραμμικός υπόχωρος του. Τότε για κάθε $x \in H$ υπάρχει μοναδικό $y \in F$ τέτοιο ώστε $x - y \in F^\perp$.

Κάθε $x \in H$ γράφεται μοναδικά ως $x = y + z$ με $y \in F$ και $z \in F^\perp$. Έτσι ορίζεται η απεικόνιση $P_F : H \rightarrow F$ με $P_F(x) = y$, η οποία ονομάζεται **ορθογώνια προβολή** τού H στον F .

Γενικά, αν ο H είναι χώρος Banach, προβολή στον H ονομάζεται κάθε φραγμένος τελεστής $P : H \rightarrow H$ με την ιδιότητα $P^2 = P$ (ονομάζεται επίσης ταυτοδύναμος). Ειδικά τώρα αν ο H είναι χώρος Hilbert, μια προβολή ονομάζεται ορθογώνια αν $\text{Ran}(P) \perp \text{Ker}(P)$ (η εικόνα και ο πυρήνας τού P). Ισχύει ότι μια προβολή είναι ορθογώνια αν και μόνο αν $P^* = P$, και τότε $\text{Ker}(P) = (\text{Ran}(P))^\perp$. Η P_F που ορίσαμε πιο πάνω είναι ορθογώνια προβολή με βάση αυτόν τον ορισμό αφού, με x, y, z όπως εκεί, $P_F^2(x) = y = P_F(x)$, $\text{Ker}(P_F) = F^\perp$, και $\text{Ran}(P_F) = F$.

B'.2 Το ολοκλήρωμα Riemann-Stieltjes

Στην παράγραφο αυτή θα ορίσουμε το ολοκλήρωμα Riemann-Stieltjes

$$\int_a^b f(x) dg(x)$$

όπου $[a, b]$ είναι ένα πεπερασμένο κλειστό διάστημα και $f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ συναρτήσεις. Θα αναφέρουμε επίσης κάποιες ιδιότητές του. Για λεπτομερειακή έκθεση τής θεωρίας αυτού του ολοκληρώματος παραπέμπουμε τον αναγνώστη σε βιβλία ανάλυσης, π.χ., στα Νεγρεπόντης κ.ά. (1992) Κεφάλαιο 15 και Apostol (1974) Κεφάλαιο 7.

Έστω λοιπόν $f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$.

Διαμέριση τού $[a, b]$ λέμε ένα οποιοδήποτε πεπερασμένο $P \subset [a, b]$ περιέχει τα a, b . Γράφουμε $P := \{x_0, x_1, \dots, x_k\}$ όπου $a = x_0 < x_1 < \dots < x_k = b$ είναι τα στοιχεία τού P , και ορίζουμε $\|P\| := \max\{|x_i - x_{i-1}| : i = 1, 2, \dots, k\}$, την λεπτότητα τής P . Για δύο διαμερίσεις P_1, P_2 του $[a, b]$ λέμε ότι η P_2 είναι *λεπτότερη* τής P_1 αν $P_1 \subset P_2$, δηλαδή η P_2 περιέχει τουλάχιστον τα σημεία τής P_1 .

Για δεδομένη διαμέριση P του $[a, b]$ όπως πιο πάνω, επιλογή ενδιάμεσων σημείων για την P λέμε οποιοδήποτε πεπερασμένο σύνολο k σημείων $E = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ με $t_i \in [x_{i-1}, x_i]$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, k$.

Άθροισμα Riemann-Stieltjes για την f ως προς την g που αντιστοιχεί στη διαμέριση P και στην επιλογή ενδιάμεσων σημείων E λέμε το άθροισμα

$$S(f, g, P, E) := \sum_{i=1}^k f(t_i) \{g(x_i) - g(x_{i-1})\}. \quad (\text{B'.1})$$

Ορισμός B'.5. Λέμε ότι η f είναι Riemann-Stieltjes ολοκληρώσιμη ως προς την g στο $[a, b]$ αν υπάρχει ένας πραγματικός αριθμός A ώστε για κάθε $\varepsilon > 0$ να υπάρχει διαμέριση P_ε του $[a, b]$ με την ιδιότητα: για κάθε διαμέριση P λεπτότερη από την P_ε και επιλογή ενδιάμεσων σημείων E για την P ισχύει

$$|S(f, g, P, E) - A| < \varepsilon.$$

Ο αριθμός A στον ορισμό σαφώς είναι μοναδικός, τον συμβολίζουμε με $\int_a^b f(x) dg(x)$, ή και απλώς $\int_a^b f dg$, και τον ονομάζουμε ολοκλήρωμα Riemann-Stieltjes της f ως προς την g . Η g ονομάζεται ολοκληρωτής και η f ολοκληρωτέος.

Όταν $g(x) = x$, το άθροισμα (B'.1) είναι ένα άθροισμα Riemann και το ολοκλήρωμα $\int_a^b f(x) dg(x)$ είναι το ολοκλήρωμα Riemann. Επίσης, όταν η f είναι συνεχής και η g παραγωγίσιμη με συνεχή παράγωγο τότε

$$\int_a^b f(x) dg(x) = \int_a^b f(x)g'(x) dx,$$

όπου το ολοκλήρωμα στο δεξί μέλος τής τελευταίας ισότητας είναι ολοκλήρωμα Riemann. Δεν το αποδεικνύουμε εδώ, απλώς παρατηρούμε ότι για δεδομένη διαμέριση P , μπορούμε να γράψουμε $g(x_i) - g(x_{i-1}) = g'(\xi_i)(x_i - x_{i-1})$ για κάποιο $\xi_i \in (x_{i-1}, x_i)$ για κάθε $i = 1, 2, \dots, k$. Οπότε, αν πάρουμε ως επιλογή ενδιάμεσων σημείων E το $\{\xi_i : i = 1, \dots, k\}$, το άθροισμα $S(f, g, P, E)$ είναι ένα άθροισμα Riemann για την $f(x)g'(x)$ στο $[a, b]$.

Παρατήρηση Β.6. Στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται και ένας εναλλακτικός ορισμός τής Riemann-Stieltjes ολοκληρωσιμότητας που ζητάει περισσότερα για τον ορισμό τού ολοκληρώματος. Συγκεκριμένα, ζητάει να υπάρχει πραγματικός αριθμός A ώστε για κάθε $\varepsilon > 0$ να υπάρχει $\delta > 0$ ώστε για κάθε διαμέριση P του $[a, b]$ με $\|P\| < \delta$ και επιλογή ενδιάμεσων σημείων E για την P να ισχύει

$$|S(f, g, P, E) - A| < \varepsilon.$$

Όπως πριν, ο αριθμός A ονομάζεται το ολοκλήρωμα Riemann-Stieltjes της f ως προς την g . Αν το ολοκλήρωμα υπάρχει με την έννοια αυτού του ορισμού, τότε υπάρχει και με την έννοια τού Β.5 (εύκολη άσκηση). Αν κάποια από τις f, g είναι συνεχής, τότε οι δύο έννοιες ταυτίζονται [§10 του Κεφαλαίου 2 στο Hildebrandt (1963)].

Παράδειγμα Β.7. Έστω $a := a_0 < a_1 < a_2 < a_3 < a_4 := b$ και $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ με τιμές $g(x) = G_i$ για κάθε $x \in [a_{i-1}, a_i)$ με $i = 1, 2, 3, 4$ και $g(b) = G_4$. Οι G_1, G_2, G_3, G_4 είναι δεδομένες σταθερές. Έστω και $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχής στα a_1, a_2, a_3 , δηλαδή στα σημεία ασυνέχειας τής g . Τότε

$$\int_a^b f(x) dg(x) = \sum_{i=1}^3 f(a_i) \{g(a_i+) - g(a_i-)\}.$$

$g(x+), g(x-)$ είναι τα όρια τής g δεξιά και αριστερά τού x αντίστοιχα. Η απόδειξη τής σχέσης αφήνεται ως άσκηση.

Η σημαντικότερη περίπτωση Riemann-Stieltjes ολοκληρώματος είναι αυτή κατά την οποία η g είναι αύξουσα (ή φθίνουσα). Τότε αποδεικνύεται το εξής θεώρημα.

Θεώρημα Β.8. Αν η g είναι αύξουσα και η f συνεχής, τότε η f είναι Riemann-Stieltjes ολοκληρώσιμη ως προς την g .

Κάθε συνάρτηση φραγμένης κύμανσης στο $[a, b]$ γράφεται ως διαφορά δύο αυξουσών συναρτήσεων [Θεώρημα 15.31 στο Νεγρεπόντης κ.ά. (1992)]. Έτσι έπεται άμεσα ότι το προηγούμενο θεώρημα ισχύει και με την υπόθεση ότι η g είναι φραγμένης κύμανσης γιατί αν $g = g_1 - g_2$ με τις g_1, g_2 αύξουσες, τότε μπορούμε να δείξουμε ότι το $\int_a^b f(x) dg(x)$ ορίζεται και ισούται με

$$\int_a^b f(x) dg_1(x) - \int_a^b f(x) dg_2(x).$$

B.3 Συναρτήσεις σε χώρους γινόμενο

Αποδείξεις για τα αποτελέσματα αυτής της παραγράφου μπορεί να βρει ο αναγνώστης σε βιβλία θεωρίας μέτρου, για παράδειγμα, στο Κουμουλλής και Νεγρεπόντης (1991) (Κεφάλαιο 9).

Έστω $(X, \mathcal{A}, \mu), (Y, \mathcal{B}, \nu)$ δύο χώροι σ-πεπερασμένου μέτρου. Ορίζεται κατά τα γνωστά η σ-άλγεβρα γινόμενο $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$, η οποία είναι η σ-άλγεβρα στο $X \times Y$ που παράγεται από τα σύνολα τής μορφής $A \times B$ με $A \in \mathcal{A}, B \in \mathcal{B}$ (αυτά τα καρτεσιανά γινόμενα λέγονται μετρήσιμα ορθογώνια).

B'.3 Συναρτήσεις σε χώρους γινόμενο

Για $f : X \times Y \rightarrow [-\infty, \infty] = \bar{\mathbb{R}}$, και $x \in X, y \in Y$ δεδομένα, ορίζουμε τις συναρτήσεις

$$\begin{aligned} f_x &: Y \rightarrow \bar{\mathbb{R}}, \\ f^y &: X \rightarrow \bar{\mathbb{R}} \end{aligned}$$

με $f_x(t) = f(x, t)$ για κάθε $t \in Y$ και $f^y(s) = f(s, y)$ για κάθε $s \in X$.

Πρόταση B'.9. Αν $\eta f : X \times Y \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ είναι $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$ -μετρήσιμη, τότε

*η f_x είναι \mathcal{B} -μετρήσιμη για κάθε $x \in X$ και
η f^y είναι \mathcal{A} -μετρήσιμη για κάθε $y \in Y$.*

Σενάριο 1: Για δεδομένη $f : X \times Y \rightarrow [0, \infty]$ που είναι $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$ -μετρήσιμη, θεωρούμε τις $\tilde{I}_f : X \rightarrow [0, \infty], \tilde{J}_f : Y \rightarrow [0, \infty]$ που ορίζονται ως

$$\begin{aligned} \tilde{I}_f(x) &:= \int f(x, y) d\nu(y) \text{ για κάθε } x \in X, \\ \tilde{J}_f(y) &:= \int f(x, y) d\mu(x) \text{ για κάθε } y \in Y. \end{aligned}$$

Τα ολοκληρώματα ορίζονται επειδή οι ολοκληρωτέοι είναι μετρήσιμες μη αρνητικές συναρτήσεις.

Πρόταση B'.10. (Θεώρημα Tonelli) Αν $\eta f : X \times Y \rightarrow [0, \infty]$ είναι $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$ -μετρήσιμη, τότε:

$$(i) \text{ Η } \tilde{I}_f \text{ είναι } \mathcal{A}\text{-μετρήσιμη.} \quad (\text{B'.2})$$

$$(ii) \text{ Η } \tilde{J}_f \text{ είναι } \mathcal{B}\text{-μετρήσιμη.} \quad (\text{B'.3})$$

$$(iii) \text{ Ισχύει } \int f(x, y) d(\mu \otimes \nu)(x, y) = \int \tilde{I}_f(x) d\mu(x) = \int \tilde{J}_f(y) d\nu(y). \quad (\text{B'.4})$$

Σενάριο 2: Θεωρούμε τώρα $f : X \times Y \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ που είναι $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$ -μετρήσιμη και με $\int |f| d(\mu \otimes \nu) < \infty$. Με βάση τα πιο πάνω, έχουμε

$$A_f := \{x \in X : \tilde{I}_{|f|}(x) = \infty\} \in \mathcal{A} \quad (\text{B'.5})$$

$$B_f := \{y \in Y : \tilde{J}_{|f|}(y) = \infty\} \in \mathcal{B} \quad (\text{B'.6})$$

και $\mu(A_f) = \nu(B_f) = 0$.

Ορίζουμε τις $I_f : X \rightarrow \mathbb{R}, J_f : Y \rightarrow \mathbb{R}$ ως εξής

$$I_f(x) := \begin{cases} \int f(x, y) d\nu(y) & \text{αν } x \in X \setminus A_f, \\ 0 & \text{αν } x \in A_f, \end{cases} \quad (\text{B'.7})$$

$$J_f(y) := \begin{cases} \int f(x, y) d\mu(x) & \text{αν } y \in Y \setminus B_f, \\ 0 & \text{αν } y \in B_f. \end{cases} \quad (\text{B'.8})$$

Πρόταση B'.11. (Θεώρημα Fubini) Αν $\eta f : X \times Y \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ είναι $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$ -μετρήσιμη και έχει $\int |f(x, y)| d(\mu \otimes \nu)(x, y) < \infty$, τότε:

$$(i) \mu(A_f) = \nu(B_f) = 0.$$

$$(ii) \text{ Η } I_f \text{ είναι } \mathcal{A}\text{-μετρήσιμη.}$$

$$(iii) \text{ Η } J_f \text{ είναι } \mathcal{B}\text{-μετρήσιμη.}$$

$$(iv) \text{ Ισχύει } \int f(x, y) d(\mu \otimes \nu)(x, y) = \int I_f(x) d\mu(x) = \int J_f(y) d\nu(y).$$

Σενάριο 3: Θεωρούμε τώρα $f : X \times Y \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ που είναι $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$ -μετρήσιμη και ορίζουμε το σύνολο A_f και τη συνάρτηση I_f όπως στο Σενάριο 2 πιο πάνω.

Πρόταση Β'.12. Αν $\eta f : X \times Y \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$ είναι $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$ -μετρήσιμη και έχει $\mu(A_f) = 0$, τότε η συνάρτηση I_f είναι \mathcal{A} -μετρήσιμη.

Απόδειξη. Έστω $(X_n)_{n \geq 1}$ αύξουσα ακολουθία στοιχείων τής \mathcal{A} με $\cup_{n=1}^{\infty} X_n = X$ και $\mu(X_n) < \infty$ για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$, και $(Y_n)_{n \geq 1}$ αύξουσα ακολουθία στοιχείων τής \mathcal{B} με $\cup_{n=1}^{\infty} Y_n = Y$ και $\nu(Y_n) < \infty$ για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ (εδώ χρησιμοποιούμε το ότι τα μέτρα είναι σ -πεπερασμένα). Για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ θεωρούμε τη συνάρτηση $f_n : X \times Y \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$f_n(x, y) := ((-n) \vee f(x, y)) \wedge n = \begin{cases} -n & \text{αν } f(x, y) < -n, \\ f(x, y) & \text{αν } -n \leq f(x, y) \leq n, \\ n & \text{αν } f(x, y) > n \end{cases}$$

για κάθε $(x, y) \in X \times Y$. Η f_n έχει $A_{f_n} = \emptyset$ και η I_{f_n} είναι \mathcal{A} -μετρήσιμη. Για κάθε $x \in X \setminus A_f$ έχουμε $\int |f(x, y)| d\nu(y) < \infty$ και $|f_n(x, y)| \leq |f(x, y)|$ για κάθε $y \in Y$. Από το θεώρημα κυριαρχημένης σύγκλισης, παίρνουμε $I_f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} I_{f_n}(x)$. Έπεται ότι ο περιορισμός τής I_f στο $X \setminus A_f$ είναι μετρήσιμη συνάρτηση ως όριο μετρήσιμων (και επειδή το $A_f \in \mathcal{A}$). Στο A_f η I_f είναι σταθερή, οπότε η μετρησιμότητα έπεται. ■

Γ'

Τεχνικά αποτελέσματα I

Απόδειξη τού Θεωρήματος 4.14

Απόδειξη. Θα χρησιμοποιήσουμε την έννοια τής σ-άλγεβρας \mathcal{F}_T που αντιστοιχεί στον χρόνο διακοπής T [σχέση (4.5)].

Βήμα 1. Αν ο χρόνος διακοπής T παίρνει πεπερασμένο πλήθος τιμών και a ένα άνω φράγμα αυτών των τιμών, τότε

$$X_T = \mathbf{E}(X_a | \mathcal{F}_T). \quad (\Gamma'.1)$$

Για την απόδειξη θα χρησιμοποιήσουμε τον ορισμό τής δεσμευμένης μέση τιμής. Έστω $\{t_1, t_2, \dots, t_r\}$ οι διαφορετικές τιμές που παίρνει ο T .

- Το αριστερό μέλος είναι \mathcal{F}_T -μετρήσιμη τυχαία μεταβλητή γιατί για κάθε $B \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$ και $t \geq 0$ ισχύει

$$\{X_T \in B\} \cap \{T \leq t\} = \cup_{j: t_j \leq t} \{X_T \in B, T = t_j\} = \cup_{j: t_j \leq t} \{X_{t_j} \in B, \tau = t_j\} \in \mathcal{F}_t$$

αφού το j σύνολο τής τελευταίας ένωσης ανήκει στην $\mathcal{F}_{t_j} \subset \mathcal{F}_t$, άρα $\{X_T \in B\} \in \mathcal{F}_T$.

- Για κάθε $A \in \mathcal{F}_T$ έχουμε

$$\int_A X_T d\mathbf{P} = \sum_{j=1}^r \int_A \mathbf{1}_{T=t_j} X_T d\mathbf{P} = \sum_{j=1}^r \int_{A \cap \{T=t_j\}} X_{t_j} d\mathbf{P} = \sum_{j=1}^r \int_{A \cap \{T=t_j\}} X_a d\mathbf{P} = \int_A X_a d\mathbf{P}.$$

Στην τρίτη ισότητα χρησιμοποιήσαμε το ότι $X_{t_j} = \mathbf{E}(X_a | \mathcal{F}_{t_j})$ και το $A \cap \{T = t_j\} \in \mathcal{F}_{t_j}$, που έπεται από τον ορισμό τής \mathcal{F}_T . Έτσι, η (Γ'.1) έπεται.

Βήμα 2. Αν ο T είναι φραγμένος χρόνος διακοπής, τότε $\mathbf{E}(X_T) = \mathbf{E}(X_0)$.

Ας υποθέσουμε ότι ο T είναι φραγμένος από το $a \in [0, \infty)$. Θεωρούμε την ακολουθία χρόνων διακοπής $(T_n)_{n \in \mathbb{N}^+}$ όπως στην Άσκηση 4.6. Οι χρόνοι αυτοί ικανοποιούν την $T_n < a + 1$ για όλα τα $n \in \mathbb{N}^+$. Από το Βήμα 1 έχουμε

$$\mathbf{E}(X_{T_n}) = \mathbf{E}(X_{a+1}) = \mathbf{E}(X_0). \quad (\Gamma'.2)$$

Η ακολουθία $(X_n)_{n \in \mathbb{N}^+}$ έχει όριο $\lim_{n \rightarrow \infty} X_{T_n} = X_T$ (λόγω της δεξιάς συνέχειας των μονοπατιών) και είναι ομοιόμορφα ολοκληρώσιμη αφού γράφεται $X_{T_n} = \mathbf{E}(X_{a+\varepsilon} | \mathcal{F}_{T_n})$ για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ (από το Βήμα 1). Από τη θεωρία τής ομοιόμορφης ολοκληρωσιμότητας, το όριο $\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}(X_{T_n}) = \mathbf{E}(X_T)$. ■

Απόδειξη τού Θεωρήματος 5.5

Απόδειξη. Θα κατασκευάσουμε την κίνηση Brown πρώτα στο $[0, 1]$, δηλαδή ως τυχαία μεταβλητή με τιμές στο $\mathbf{C}[0, 1]$, και η επέκταση στο $[0, \infty)$ θα είναι άμεση.

Βήμα 1. Κατασκευή.

Έστω

$$\mathcal{D}_n := \left\{ \frac{k}{2^n} : 0 \leq k \leq 2^n \right\} \text{ για κάθε } n \in \mathbb{N},$$

και $\mathcal{D} := \cup_{n=0}^{\infty} \mathcal{D}_n$ το σύνολο των δυαδικών αριθμών στο $[0, 1]$. Θεωρούμε έναν χώρο πιθανότητας στον οποίο ορίζεται ένα σύνολο $\{Z_t : t \in \mathcal{D}\}$ ανεξάρτητων τυπικών κανονικών τυχαίων μεταβλητών (τέτοιος χώρος υπάρχει).

Θέτουμε $B(0) = 0, B(1) = Z_1$, και έτσι έχουμε ορίσει τη B στο \mathcal{D}_0 . Αν για κάποιο $n \geq 1$ η B έχει ήδη οριστεί στο \mathcal{D}_{n-1} , την ορίζουμε σε κάθε σημείο $d \in \mathcal{D}_n \setminus \mathcal{D}_{n-1}$ ως

$$B(d) = \frac{B(d - 2^{-n}) + B(d + 2^{-n})}{2} + \frac{Z_d}{2^{(n+1)/2}}. \quad (\Gamma'.3)$$

[Ο ορισμός αυτός υπαγορεύεται από την Άσκηση 5.4. Σύμφωνα με εκείνη την άσκηση, για $0 \leq x < y$, η τυχαία μεταβλητή $B((x+y)/2) - B(x)$ δεδομένων των $B(x), B(y)$ ακολουθεί την κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$ με $\mu := (B(y) - B(x))/2$ $\sigma^2 := (y - x)/4$. Δηλαδή καθορίζεται η κατανομή τής τιμής τής B στο μέσο του $[x, y]$.]

Ορίζουμε τις συνεχείς συναρτήσεις $F_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$, $n \in \mathbb{N}$ ως εξής.

$$F_0(t) = \begin{cases} Z_1 & \text{για } t = 1, \\ 0 & \text{για } t = 0, \\ \text{γραμμική} & \text{στο } (0, 1), \end{cases}$$

και για $n \geq 1$,

$$F_n(t) = \begin{cases} Z_t/2^{(n+1)/2} & \text{για } t \in \mathcal{D}_n \setminus \mathcal{D}_{n-1}, \\ 0 & \text{για } t \in \mathcal{D}_{n-1}, \\ \text{γραμμική} & \text{ανάμεσα σε διαδοχικά σημεία του } \mathcal{D}_n \end{cases}$$

Για $t \in \mathcal{D}_n$ ισχύει

$$B(t) = \sum_{k=0}^n F_k(t) = \sum_{k=0}^{\infty} F_k(t).$$

Η απόδειξη τής πρώτης ισότητας γίνεται επαγωγικά και αφήνεται ως άσκηση. Η δεύτερη ισότητα ισχύει γιατί για κάθε $k \geq n+1$ η F_k είναι 0 στο \mathcal{D}_{k-1} και άρα και στο \mathcal{D}_n , το οποίο είναι υποσύνολο του \mathcal{D}_{k-1} .

Ισχυρισμός: Με πιθανότητα 1 η σειρά $\sum_{k=0}^{\infty} F_k$ συγκλίνει ομοιόμορφα στο $[0, 1]$.

Ισχύει $\|F_n\|_{\infty} = \max\{Z_d/2^{(n+1)/2} : d \in \mathcal{D}_n \setminus \mathcal{D}_{n-1}\}$. Άρα

$$\mathbf{P}(\|F_n\|_{\infty} \geq 2\sqrt{n}2^{-(n+1)/2}) \leq \sum_{d \in \mathcal{D}_n} \mathbf{P}(|Z_d| \geq 2\sqrt{n}) \leq (2^n + 1)e^{-2n} < e^{-n}.$$

Στην προτελευταία ανισότητα χρησιμοποιήσαμε το Λήμμα Α'.2 από το Παράρτημα Α'.1. Το πρώτο λήμμα Borel-Cantelli δίνει ότι με πιθανότητα 1 ισχύει τελικά

$$\|F_n\|_{\infty} < 2\sqrt{n}2^{-(n+1)/2}. \quad (\Gamma'.4)$$

Έτσι ο ισχυρισμός έπεται από το κριτήριο Weierstrass για ομοιόμορφη σύγκλιση σειράς συναρτήσεων. Ορίζουμε τη B στο $[0, 1]$ ως

$$B(t) = \sum_{k=0}^{\infty} F_k(t) \text{ για κάθε } t \in [0, 1]. \quad (\Gamma'.5)$$

Επειδή κάθε F_k είναι συνεχής, ο ισχυρισμός συνεπάγεται ότι η B είναι συνεχής με πιθανότητα 1.

Βήμα 2. Απόδειξη ιδιοτήτων στο $[0, 1]$.

Σε αυτό το βήμα θα δείξουμε ότι η B που ορίσαμε στο προηγούμενο βήμα ικανοποιεί τις ιδιότητες (i) και (ii) του Ορισμού 5.1 [η (iii) αποδείχθηκε πιο πάνω]. Θα δείξουμε αρχικά ότι για σταθερό $n \geq 0$, οι (i) και (ii) ισχύουν για χρόνους t_i, s, t στοιχεία του \mathcal{D}_n .

Για $n = 0$ ο ισχυρισμός αυτός ισχύει εξαιτίας τής επιλογής του $B(1)$ αφού $\mathcal{D}_0 = \{0, 1\}$ και $B(1) - B(0) = Z_1 - Z_0 = Z_1 \sim N(0, 1)$.

Έστω ότι για κάποιο $n \in \mathbb{N}$ οι (i) και (ii) ισχύουν για στοιχεία τού \mathcal{D}_n . Παρατηρούμε πρώτα το εξής.

Ισχυρισμός 1: Για $n \geq 1$ και $d \in \mathcal{D}_n \setminus \mathcal{D}_{n-1}$ οι $B(d) - B(d - 2^{-n})$, $B(d + 2^{-n}) - B(d)$ είναι ανεξάρτητες και καθεμία έχει κατανομή $N(0, 2^{-n})$.

Πράγματι, από τον ορισμό τής $B(d)$ στην (Γ'.3) οι δύο αυτές τυχαίες μεταβλητές ισούνται με

$$\frac{B(d + 2^{-n}) - B(d - 2^{-n})}{2} + \frac{Z_d}{2^{(n+1)/2}}, \frac{B(d + 2^{-n}) - B(d - 2^{-n})}{2} - \frac{Z_d}{2^{(n+1)/2}}, \quad (\text{Γ'.6})$$

δηλαδή με $X + Y, X - Y$ όπου η X είναι το πρώτο κλάσμα και $Y := Z_d/2^{(n+1)/2}$. Οι X, Y είναι ανεξάρτητες από την κατασκευή τής B γιατί η X έχει κατασκευαστεί από τις $\{Z_t : t \in \mathcal{D}_{n-1}\}$, ενώ η Z_d έχει $d \in \mathcal{D}_n \setminus \mathcal{D}_{n-1}$. Επίσης, από την επαγωγική υπόθεση, η X έχει κατανομή $N(0, 2^{-(n+1)})$ και την ίδια κατανομή έχει η Y από γνωστές ιδιότητες τής κανονικής κατανομής. Από την Πρόταση Α'.7 του Παραρτήματος Α'.1 έχουμε ότι οι $X + Y, X - Y$ είναι ανεξάρτητες, καθεμία με κατανομή $N(0, 2^{-n})$.

Έπειτα δείχνουμε το εξής.

Ισχυρισμός 2: Οι τυχαίες μεταβλητές $\{B(d) - B(d - 2^{-n}) : d \in \mathcal{D}_n \setminus \{0\}\}$ είναι ανεξάρτητες.

Το διάνυσμα $(B(d) - B(d - 2^{-n}) : d \in \mathcal{D}_n \setminus \{0\})$ είναι Γκαουσιανό γιατί κάθε συντεταγμένη του είναι γραμμικός συνδυασμός από τις ανεξάρτητες κανονικές $\{Z_t : t \in \mathcal{D}_n\}$ (δες στο Παράρτημα Α' σχετικά με Γκαουσιανά διανύσματα). Άρα αρκεί να δείξουμε ότι οι συντεταγμένες του είναι ανά δύο ανεξάρτητες (οπότε θα έχουν συνδιακύμανση 0). Παίρνουμε λοιπόν δύο στοιχεία

$$B(x) - B(x - 2^{-n}), B(y) - B(y - 2^{-n})$$

από αυτό το διάνυσμα, με $0 < x < y$ στοιχεία τού \mathcal{D}_n και θεωρούμε τις δύο δυνατές περιπτώσεις.

(1) $x = y - 2^{-n} = d \in \mathcal{D}_n \setminus \mathcal{D}_{n-1}$. Τότε η ανεξαρτησία αποδείχθηκε στην παρατήρηση πιο πάνω.

(2) Υπάρχει κάποιο $d \in \mathcal{D}_{n-1}$ με

$$x \leq d \leq y - 2^{-n}. \quad (\text{Γ'.7})$$

Έστω j ο ελάχιστος φυσικός για τον οποίο υπάρχει $d \in \mathcal{D}_j$ που να ικανοποιεί την (Γ'.7). Αυτό το d είναι στοιχείο τού $\mathcal{D}_j \setminus \mathcal{D}_{j-1}$. Επίσης $j \leq n - 1$ και

$$[x - 2^{-n}, x] \subset [d - 2^{-j}, d], [y - 2^{-n}, y] \subset [d, d + 2^{-j}],$$

γιατί διαφορετικά ένα από τα $d - 2^{-j}, d + 2^{-j}$ θα ήταν ανάμεσα στους $x, y - 2^{-n}$ και θα ανήκε στο \mathcal{D}_{j-1} , το οποίο είναι άτοπο από την επιλογή τού j . Από την επαγωγική υπόθεση, οι

$$B(d) - B(d - 2^{-j}), B(d + 2^{-j}) - B(d)$$

είναι ανεξάρτητες. Έπειτα, κάθε προσαύξηση τής B σε δεδομένο υποδιάστημα τού $[d - 2^{-j}, d]$ με άκρα σημεία τού \mathcal{D}_n κατασκευάζεται ως συνάρτηση τής προσαύξησης $B(d) - B(d - 2^{-j})$ και ενός συνόλου ανεξάρτητων από αυτήν τυχαίων μεταβλητών $I_1 := \{Z_t : t \in \mathcal{D}_n, d - 2^{-j} < t < d\}$. Αυτό προκύπτει επαγωγικά με χρήση των εκφράσεων (Γ'.6). Και όμοια, κάθε προσαύξηση τής B σε δεδομένο υποδιάστημα τού $[d, d + 2^{-j}]$ με άκρα σημεία τού \mathcal{D}_n κατασκευάζεται ως συνάρτηση τής προσαύξησης $B(d + 2^{-j}) - B(d)$ και ενός συνόλου $I_2 = \{Z_t : t \in \mathcal{D}_n, d < t < d + 2^{-j}\}$. Όμως όλες οι τυχαίες μεταβλητές τού συνόλου $\{B(d) - B(d - 2^{-j}), B(d + 2^{-j}) - B(d)\} \cup I_1 \cup I_2$ είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και έτσι έπεται το συμπέρασμα και στην περίπτωση τού σεναρίου (2).

Με χρήση των πιο πάνω ισχυρισμών 1 και 2 δείχνουμε εύκολα ότι $B(t) - B(s) \sim N(0, t - s)$ για $s, t \in \mathcal{D}_n$. Μένει να δείξουμε τις (i) και (ii) για στοιχεία τού $[0, 1]$. Έστω $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n$. Επειδή για κάθε $k \in \mathbb{N}$ το \mathcal{D}_k είναι ένα πλέγμα πάχους 2^{-k} στο $[0, 1]$, έπεται ότι για κάθε $j = 1, 2, \dots, n$ υπάρχει ακολουθία $(t_j^k)_{k \geq 1}$ που να συγκλίνει στο t_j και $t_j^k \in \mathcal{D}_k$, καθώς και $0 \leq t_1^k \leq t_2^k \leq \dots \leq t_n^k$ για κάθε $k \geq 1$.

Έστω $\phi(t) = e^{-\frac{1}{2}t^2}$, $t \in \mathbb{R}$ η χαρακτηριστική συνάρτηση τής $N(0, 1)$. Από αυτά που δείξαμε πιο πάνω έπεται ότι η τιμή τής χαρακτηριστικής συνάρτησης τού διανύσματος

$$Y^k := (B(t_2^k) - B(t_1^k), B(t_3^k) - B(t_2^k), \dots, B(t_n^k) - B(t_{n-1}^k))$$

στο $u := (u_1, u_2, \dots, u_n) \in \mathbb{R}^n$ είναι

$$\phi_{Y^k}(u) = \phi((t_2^k - t_1^k)^{1/2}u_1)\phi((t_3^k - t_2^k)^{1/2}u_2) \cdots \phi((t_n^k - t_{n-1}^k)^{1/2}u_n)$$

Έστω και

$$Y := (B(t_2) - B(t_1), B(t_3) - B(t_2), \dots, B(t_n) - B(t_{n-1})).$$

Τότε,

$$\phi_Y(u) := \mathbf{E}(e^{i\langle u, Y \rangle}) = \lim_{k \rightarrow \infty} \phi_{Y^k}(u) = \phi((t_2 - t_1)^{1/2}u_1)\phi((t_3 - t_2)^{1/2}u_2) \cdots \phi((t_n - t_{n-1})^{1/2}u_n).$$

Η δεύτερη ισότητα έπεται από το θεώρημα φραγμένης σύγκλισης αφού $\lim_{k \rightarrow \infty} Y^k = Y$ και η $v \mapsto e^{i\langle u, v \rangle}$ είναι φραγμένη. Η τρίτη ισότητα έπεται από τη συνέχεια τής συνάρτησης ϕ και της σύγκλισης καθεμίας ακολουθίας $(t_j^k)_{k \geq 1}$ στο t_j καθώς $k \rightarrow \infty$. Από τη μορφή τής χαρακτηριστικής συνάρτησης τού διανύσματος Y , που μόλις είδαμε, έπεται ότι οι συντεταγμένες τού Y ικανοποιούν τις (i) και (ii) του ορισμού τής κίνησης Brown.

Βήμα 3. Επέκταση στο $[0, \infty)$.

Θεωρούμε μια ακολουθία ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών $(B_k)_{k \geq 0}$ που καθεμία με πιθανότητα 1 παίρνει τιμές στο $\mathbf{C}[0, 1]$ και έχει κατανομή αυτήν της B που κατασκευάστηκε πιο πάνω. Ορίζουμε την τυχαία μεταβλητή B που με πιθανότητα 1 παίρνει τιμές στον χώρο $\mathbf{C}[0, \infty)$ ως

$$B(t) := B_n(t - n) + \sum_{k=0}^{n-1} B_k(1)$$

για κάθε $t \in [n, n + 1)$ και n θετικό ακέραιο. Δηλαδή το γράφημά της προκύπτει αν συγκολήσουμε διαδοχικά τα γραφήματα των B_k . Από τα παραπάνω προκύπτει εύκολα ότι η τυχαία μεταβλητή B είναι τυπική κίνηση Brown. ■

Απόδειξη τής Πρότασης 5.7(ii)

(ii) Θέλουμε να δείξουμε ότι οι σ -άλγεβρες $\sigma(\{B(s) : s \in [0, t_0]\})$, $\sigma(\{X(s) : s \geq 0\})$ είναι ανεξάρτητες. Οι δυο τους παράγονται αντίστοιχα από τις οικογένειες

$$\begin{aligned} \mathcal{C}_1 &:= \{(B(s_1), B(s_2), \dots, B(s_m)) \in A\} : m \in \mathbb{N}^+, s_1, s_2, \dots, s_m \in [0, t_0], A \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^m)\}, \\ \mathcal{C}_2 &:= \{(X(r_1), X(r_2), \dots, X(r_n)) \in \Gamma\} : n \in \mathbb{N}^+, r_1, r_2, \dots, r_n \in [0, \infty), \Gamma \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^n)\}, \end{aligned}$$

οι οποίες είναι κλειστές ως προς τις πεπερασμένες τομές. Άρα αρκεί να δείξουμε ότι οι $\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2$ είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους [Θεώρημα 2.1.3 στο Durrett (2010)]. Αυτό ισοδυναμεί με το ότι για m, n θετικούς ακεραίους και $0 \leq s_1 < s_2 < \dots < s_m \leq t_0$, $0 \leq r_1 < \dots < r_n$, η m -διάστατη τυχαία μεταβλητή

$$U := (B(s_1), B(s_2), \dots, B(s_m))$$

είναι ανεξάρτητη από την

$$\begin{aligned} V &:= (X(r_1), X(r_2), \dots, X(r_n)) \\ &= (B(t_0 + r_1) - B(t_0), B(t_0 + r_2) - B(t_0), \dots, B(t_0 + r_n) - B(t_0)). \end{aligned}$$

Αυτό όμως ισχύει γιατί, από το (i) του Ορισμού 5.1, οι τυχαίες μεταβλητές

$$B(s_1), B(s_2) - B(s_1), \dots, B(s_m) - B(s_{m-1}), \\ B(t_0 + r_1) - B(t_0), B(t_0 + r_2) - B(t_0 + r_1), \dots, B(t_0 + r_n) - B(t_0 + r_{n-1})$$

είναι (πλήρως) ανεξάρτητες μεταξύ τους και η U προκύπτει ως (μετρήσιμη) συνάρτηση των πρώτων m από αυτές, ενώ η V ως (μετρήσιμη) συνάρτηση των υπόλοιπων n .

Απόδειξη τού Θεωρήματος 6.1

Έστω \hat{B} η ανέλιξη με $\hat{B}(t) = B(T + t) - B(T)$ για κάθε $t \geq 0$ και W μια τυπική d -διάστατη κίνηση Brown.

Βήμα 1. Δείχνουμε το θεώρημα όταν ο T παίρνει τιμές σε ένα σύνολο $\{a_n : n \in \mathbb{N}\}$ όπου $(a_n)_{n \geq 1}$ είναι αύξουσα ακολουθία με $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \infty$.

Έστω B^n η ανέλιξη με $B^n(t) = B(a_n + t) - B(a_n)$ για κάθε $t \geq 0$ και W μια τυπική d -διάστατη κίνηση Brown. Για $A \in \mathcal{B}([0, \infty))$ και $C \in \mathcal{F}_T$ έχουμε

$$\mathbf{P}(\{\hat{B} \in A\} \cap C) = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{P}(\{\hat{B} \in A\} \cap C \cap \{T = a_n\}) = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{P}(\{B^n \in A\} \cap C \cap \{T = a_n\}) \quad (\Gamma'.8)$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{P}(\{B^n \in A\}) \mathbf{P}(C \cap \{T = a_n\}) \quad (\Gamma'.9)$$

$$= \mathbf{P}(\{W \in A\}) \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{P}(C \cap \{T = a_n\}) = \mathbf{P}(W \in A) \mathbf{P}(C). \quad (\Gamma'.10)$$

Στην τρίτη ισότητα χρησιμοποιήσαμε το ότι $C \cap \{T = a_n\} \in \mathcal{F}_{a_n}$ και την ανεξαρτησία της B^n από την \mathcal{F}_{a_n} (Πρόταση 5.12 για την πολυδιάστατη κίνηση Brown). Στην τέταρτη ισότητα το ότι η B^n είναι τυπική κίνηση Brown.

Για $C = \Omega$ παίρνουμε ότι $\mathbf{P}(\{\hat{B} \in A\}) = \mathbf{P}(W \in A)$. Άρα η \hat{B} είναι τυπική κίνηση Brown και η $\mathbf{P}(\{\hat{B} \in A\} \cap C) = \mathbf{P}(\{\hat{B} \in A\}) \mathbf{P}(C)$ δίνει την ανεξαρτησία.

Βήμα 2. Δείχνουμε το θεώρημα όταν ο T παίρνει τιμές στο $[0, \infty)$.

Έστω T_n η ακολουθία χρόνων διακοπής που ορίζεται ως $T_n = \lfloor 2^n T + 1 \rfloor / 2^n$ (δες Άσκηση 4.6).

Δείχνουμε ότι η \hat{B} είναι ανεξάρτητη από την \mathcal{F}_T . Η σ-άλγεβρα $\sigma(\hat{B})$ παράγεται από την οικογένεια

$$\{(\hat{B}(s_1), \hat{B}(s_2), \dots, \hat{B}(s_m)) \in A\} : m \in \mathbb{N}^+, s_1, s_2, \dots, s_m \in [0, \infty), A \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^m)\},$$

η οποία είναι κλειστή στις πεπερασμένες τομές. Αυτή η οικογένεια είναι ανεξάρτητη από την \mathcal{F}_T , γιατί για $m \in \mathbb{N}^+, s_1, s_2, \dots, s_m \in [0, \infty)$, και $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^m)$ έχουμε

$$(\hat{B}(s_1), \hat{B}(s_2), \dots, \hat{B}(s_m)) = \lim_{n \rightarrow \infty} (B(T_n + s_1) - B(T_n), B(T_n + s_2) - B(T_n), \dots, B(T_n + s_m) - B(T_n)) \quad (\Gamma'.11)$$

και για κάθε $n \geq 1$, λόγω του βήματος 1, η ανέλιξη $(B(T_n + t) - B(T_n))_{t \geq 0}$ είναι ανεξάρτητη από την \mathcal{F}_{T_n} , η οποία περιέχει την \mathcal{F}_T . Το συμπέρασμα έπεται από το Θεώρημα 2.1.3 στο Durrett (2010).

Το ότι η \hat{B} είναι κίνηση Brown προκύπτει με χρήση του βήματος 1 και της $(\Gamma'.11)$.

Απόδειξη τής Πρότασης 8.10

Απόδειξη. Υποθέτουμε πρώτα ότι η f είναι φραγμένη από μια σταθερά $M \in (0, \infty)$. Επειδή

$$\sum_{j=1}^{k(n)} f(B_{t_{j-1}^{(n)}})(t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)}) \rightarrow \int_0^t f(B_s) ds$$

με πιθανότητα 1 και άρα και κατά πιθανότητα, αρκεί να δείξουμε ότι η ακολουθία

$$\sum_{j=1}^{k(n)} f(B_{t_{j-1}^{(n)}}) \{(B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}})^2 - t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)}\} \quad (\Gamma'.12)$$

συγκλίνει στο 0 κατά πιθανότητα. Θα δείξουμε κάτι ισχυρότερο. Ότι συγκλίνει στο 0 στον $L^2(\mathbf{P})$. Έστω V_j ο j όρος του τελευταίου αθροίσματος. Τότε για $1 \leq i < j \leq k(n)$, θα έχουμε

$$\mathbf{E}(V_i V_j) = \mathbf{E} \{ V_i f(B_{t_{j-1}^{(n)}}) \mathbf{E}((B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}})^2 - t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)} | \mathcal{F}_{t_{j-1}^{(n)}}) \} = 0.$$

Χρησιμοποιήσαμε γνωστές ιδιότητες τής δεσμευμένης μέσης τιμής σε συνδυασμό με το ότι η τυχαία μεταβλητή $V_i f(B_{t_{j-1}^{(n)}})$ είναι $\mathcal{F}_{t_{j-1}^{(n)}}$ -μετρήσιμη, ενώ η $(B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}})^2 - t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)}$ είναι ανεξάρτητη τής $\mathcal{F}_{t_{j-1}^{(n)}}$, και έχει μέση τιμή 0. Επομένως η μέση τιμή τού τετραγώνου τής $(\Gamma'.12)$ ισούται με

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{k(n)} \mathbf{E}(V_j^2) &\leq M^2 \sum_{j=1}^{k(n)} \mathbf{E} \{ (B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}})^2 - t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)} \}^2 \\ &= 2M^2 \sum_{j=1}^{k(n)} (t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)})^2 \leq 2M^2 t \|\Delta_n\| \rightarrow 0 \end{aligned}$$

καθώς $n \rightarrow \infty$. Χρησιμοποιήσαμε την $\mathbf{E}\{(B_y - B_x)^2 - (y - x)\}^2 = 2(y - x)^2$ για $0 \leq x < y$, την οποία είδαμε κατά την απόδειξη τού Λήμματος 8.7.

Τώρα για τη γενική περίπτωση, ένα σχόλιο για το σκεπτικό τής απόδειξης. Η f ως συνεχής είναι φραγμένη σε κάθε συμπαγές, αλλά η κίνηση Brown που εμφανίζεται ως όρισμα τής f στις εκφράσεις $f(B_{t_{j-1}^{(n)}})$ έχει τη δυνατότητα να βρεθεί πολύ μακριά στο πεδίο ορισμού τής f και να ανακαλύψει πολύ μεγάλες τιμές τής f (αν η f είναι, π.χ., η $f(x) = x^2$). Η απόδειξη που ακολουθεί δείχνει ότι αυτό δεν πρέπει να μας φοβίζει. Με μεγάλη πιθανότητα, η κίνηση Brown στο χρονικό διάστημα $[0, t]$ δεν προλαβαίνει να πάει πολύ μακριά, οπότε ουσιαστικά εξερευνά μόνο ένα φραγμένο υποσύνολο τού \mathbb{R} . Σε αυτό το υποσύνολο η f είναι φραγμένη και αναγόμαστε στην περίπτωση που αποδείξαμε πριν.

Έστω $r > 0$ και $\tau_r := \inf\{s > 0 : |B_s| > r\}$. Για οποιαδήποτε συνεχή συνάρτηση $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, καλούμε $J_n(f)$, $J(f)$ το αριστερό και το δεξί μέλος τής (8.8) αντίστοιχα. Έστω και $g_r : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχής συνάρτηση που ισούται με 1 στο $[-r, r]$ και με 0 στο $\mathbb{R} \setminus [-r - 1, r + 1]$. Τότε για κάθε $\varepsilon > 0$,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(|J_n(f) - J(f)| > \varepsilon) &= \mathbf{P}(|J_n(f) - J(f)| > \varepsilon, \tau_r > t) + \mathbf{P}(|J_n(f) - J(f)| > \varepsilon, \tau_r \leq t) \\ &\leq \mathbf{P}(|J_n(fg_r) - J(fg_r)| > \varepsilon, \tau_r > t) + \mathbf{P}(|J_n(f) - J(f)| > \varepsilon, \tau_r \leq t) \\ &\leq \mathbf{P}(|J_n(fg_r) - J(fg_r)| > \varepsilon) + \mathbf{P}(\tau_r \leq t). \end{aligned}$$

Για την fg_r έχουμε ήδη δείξει το θεώρημα, οπότε για κάθε $r > 0$ έχουμε

$$\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}(|J_n(f) - J(f)| > \varepsilon) \leq \mathbf{P}(\tau_r \leq t) = \mathbf{P}(\tau_1 \leq t/r^2).$$

Η ισότητα έπεται από την Παρατήρηση 5.14 του Κεφαλαίου 5. Το όριο τής τελευταίας ποσότητας για $r \rightarrow \infty$ είναι $\mathbf{P}(\tau_1 = 0)$ το οποίο ισούται με 0 αφού η B είναι συνεχής με $B_0 = 0$. Έτσι η πρόταση αποδείχθηκε και στη γενική περίπτωση. ■

Απόδειξη τού Θεωρήματος 10.2

Απόδειξη. Αρκεί να δείξουμε ότι αυτό μπορεί να γίνει σε κάθε διάστημα $[0, T]$ με $T > 0$ σταθερό. Για την ανέλιξη \hat{X} με $\hat{X}(\omega, t) = X(\omega, t)\mathbf{1}_{[0, T]}(t)$, υπάρχει ακολουθία $(X_n)_{n \geq 1}$ στον \mathcal{H}_0^2 ώστε $\|X_n - \hat{X}\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})} \rightarrow 0$

για $n \rightarrow \infty$. Για κάθε $n \geq 1$ ορίζουμε την ανέλιξη M_n ως $M_n(t) := I_t(X_n)$ για κάθε $t \geq 0$. Με βάση την Πρόταση 10.1, κάθε M_n είναι συνεχές martingale. Για φυσικούς $1 \leq m \leq n$, η ανέλιξη $(M_n - M_m)^2$ είναι συνεχές submartingale, οπότε η Ανισότητα Doob (Θεώρημα 4.15) δίνει ότι

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\left(\sup_{0 \leq t \leq T} |M_n(t) - M_m(t)| \geq \varepsilon\right) &\leq \frac{1}{\varepsilon^2} \mathbf{E}(\{M_n(T) - M_m(T)\}^2) = \frac{1}{\varepsilon^2} \mathbf{E}(\{I_T(X_n - X_m)\}^2) \\ &= \frac{1}{\varepsilon^2} \|X_n - X_m\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}^2 \end{aligned}$$

Η τελευταία ποσότητα τείνει στο 0 για $m, n \rightarrow \infty$. Άρα υπάρχει γνησίως αύξουσα ακολουθία $(n_k)_{k \geq 1}$ φυσικών, ώστε για κάθε $k \geq 1$ και $m, n \geq n_k$ να ισχύει $\|X_n - X_m\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}^2 \leq 2^{-4k}$. Άρα για κάθε $k \geq 1$ έχουμε

$$\mathbf{P}\left(\sup_{0 \leq t \leq T} |M_{n_{k+1}}(t) - M_{n_k}(t)| \geq \frac{1}{2^k}\right) \leq \frac{1}{2^{2k}}.$$

Έστω $A_k := \{\sup_{0 \leq t \leq T} |M_{n_{k+1}}(t) - M_{n_k}(t)| \geq 2^{-k}\}$ για $k \in \mathbb{N}^+$. Το σύνολο $\Omega_0 := \Omega \setminus \limsup_{k \in \mathbb{N}} A_k$ ανήκει στην \mathcal{F}_T και από το πρώτο Λήμμα Borel-Cantelli έχει πιθανότητα 1. Για κάθε $\omega \in \Omega_0$, υπάρχει $N(\omega) \in \mathbb{N}$ με

$$\sup_{0 \leq t \leq T} |M_{n_{k+1}}(t) - M_{n_k}(t)| < \frac{1}{2^k}$$

για κάθε $k \geq N(\omega)$. Άρα για κάθε σταθερό $\omega \in \Omega_0$ η ακολουθία συναρτήσεων $(M_{n_k})_{k \geq 1}$ είναι βασική στον χώρο $(C[0, T], \|\cdot\|_\infty)$ των συνεχών συναρτήσεων στο $[0, T]$ με τη supremum μετρική. Αυτός ο χώρος είναι πλήρης, οπότε η ακολουθία συγκλίνει (ομοιόμορφα) σε ένα στοιχείο, έστω M , του $C[0, T]$ (Πρόταση 27.11 στο Νεγρεπόντης κ.ά. (1992), τόμος II). Για $\omega \in \Omega \setminus \Omega_0$, ορίζουμε $M(t)(\omega) = 0$ για κάθε $t \in [0, T]$. Για σταθερό t , το όριο $M(t)$ είναι \mathcal{F}_t μετρήσιμη και άρα είναι τυχαία μεταβλητή.

ΙΣΧΥΡΙΣΜΟΣ. Η M είναι εκδοχή τής $(I_t(X))_{t \in [0, T]}$.

Έστω $t > 0$ σταθερό. Αρκεί να δείξουμε ότι η τυχαία μεταβλητή $M(t)$ είναι επίσης το όριο τής $(M_t(X_{n_k}))_{k \geq 1}$ στον $L^2(\mathbf{P})$ και άρα ανήκει στην κλάση $I_t(X)$. Αυτό προκύπτει γιατί η $(M_t(X_{n_k}))_{k \geq 1}$ είναι Cauchy στον $L^2(\mathbf{P})$ (από το ότι η $(X_{n_k})_{k \geq 1}$ είναι Cauchy στον $L^2(\lambda \times \mathbf{P})$ και την ισομετρία Itô) και εύκολα δείχνει κανείς ότι οποιαδήποτε τυχαία μεταβλητή στην οποία συγκλίνει η $(M_t(X_{n_k}))_{k \geq 1}$ στον $L^2(\mathbf{P})$ είναι σχεδόν παντού ίδια με το σημειακό της όριο $M(t)$.

Το ότι η M είναι martingale προκύπτει από την Πρόταση 9.13(iii). ■

Απόδειξη τής Πρότασης 11.1

Θα χρειαστούμε το εξής τεχνικό αποτέλεσμα που έχει και από μόνο του ενδιαφέρον.

Λήμμα Γ'.1 (Τοπικότητα στον \mathcal{H}_{LOC}^2). Έστω $X, Y \in \mathcal{H}_{LOC}^2$, T χρόνος διακοπής ώστε για κάθε $s \geq 0$ να ισχύει $X(s, \omega) = Y(s, \omega)$ σχεδόν παντού στο $\{\omega \in \Omega : T(\omega) \geq s\}$. Τότε για κάθε $t > 0$ ισχύει

$$\int_0^t X(s, \omega) dB_s = \int_0^t Y(s, \omega) dB_s$$

σχεδόν παντού στο $\{\omega \in \Omega : T(\omega) \geq t\}$.

Απόδειξη. Για $n \in \mathbb{N}^+$ θέτουμε

$$\tau_n := n \wedge \inf \left\{ r > 0 : \int_0^r X^2(s, \omega) ds \geq n \text{ και } \int_0^r Y^2(s, \omega) ds \geq n \right\}.$$

Κάθε τ_n είναι χρόνος διακοπής και η ακολουθία $(\tau_n)_{n \geq 1}$ είναι \mathcal{H}^2 -τοπικοποιούσα για τις X, Y . Επειδή για κάθε $s \geq 0$ ισχύει $X^{(\tau_n)}(s, \omega) = Y^{(\tau_n)}(s, \omega)$ σχεδόν παντού στο $\{\omega : T(\omega) \geq s\}$, έχουμε

$$I_t(X^{(\tau_n)}) = I_t(Y^{(\tau_n)})$$

σχεδόν παντού στο $\{\omega : T(\omega) \geq t\}$. Άρα

$$I_t(X) = I_t(X^{(\tau_n)}) = I_t(Y^{(\tau_n)}) = I_t(Y)$$

στο $\{\omega : T(\omega) \geq t\} \cap \{\omega : \tau_n \geq t\}$, επομένως και στο

$$\{\omega : T(\omega) \geq t\} \cap \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} \{\omega : \tau_n \geq t\} \right) = \{\omega : T(\omega) \geq t\}.$$

Για να είμαστε ακριβείς, το σύνολο αριστερά τής ισότητας ίσως είναι γνήσιο υποσύνολο αυτού δεξιά γιατί η $\lim_{n \rightarrow \infty} \tau_n = \infty$ ισχύει με πιθανότητα 1 και όχι απαραίτητα παντού. Η διαφορά όμως των δύο συνόλων έχει πιθανότητα 0 και έτσι έχουμε το συμπέρασμα. ■

Απόδειξη τής Πρότασης 11.1. Κάνουμε την απόδειξη υποθέτοντας ότι η B είναι τυπική κίνηση Brown. Με ελάχιστες αλλαγές, προκύπτει η γενική περίπτωση.

Υποθέτουμε πρώτα ότι η f έχει συμπαγή φορέα. Δηλαδή το σύνολο $K := \{x \in \mathbb{R} : f(x) \neq 0\}$ είναι φραγμένο. Με αυτή την υπόθεση μάλιστα θα δείξουμε κάτι ισχυρότερο, δηλαδή ότι η σύγκλιση ισχύει στη νόρμα τού $L^2(\mathbf{P})$.

Για $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $\delta > 0$, και $I \subset \mathbb{R}$, ορίζουμε την ποσότητα

$$\text{osc}(g, I, \delta) := \sup\{|g(x) - g(y)| : x, y \in I, |x - y| < \delta\}, \quad (\Gamma'.13)$$

η οποία είναι ένα μέτρο τής ομοιόμορφης συνέχειας τής g στο I .

Θέτουμε $X(s, \omega) = f(B_s) \mathbf{1}_{s \leq t}$ για $s \geq 0$. Μια ακολουθία τού \mathcal{H}_0^2 που προσεγγίζει τη X στον \mathcal{H}^2 είναι η

$$X_n(s, \omega) = \sum_{j=1}^{k(n)} f(B_{t_{j-1}^{(n)}}) \mathbf{1}_{(t_{j-1}^{(n)}, t_j^{(n)}]}(s).$$

Πράγματι,

$$\begin{aligned} \|X - X_n\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}^2 &= \mathbf{E} \left(\int_0^t |X(s, \omega) - X_n(s, \omega)|^2 ds \right) = \mathbf{E} \left(\sum_{j=1}^{k(n)} \int_{t_{j-1}^{(n)}}^{t_j^{(n)}} |f(B_s) - f(B_{t_{j-1}^{(n)}})|^2 ds \right) \\ &\leq t \mathbf{E} \left(\{\text{osc}(f, K, \text{osc}(B, [0, t], \|\Delta_n\|))\}^2 \right). \end{aligned}$$

Η ποσότητα στην τελευταία μέση τιμή συγκλίνει στο 0 σημειακά για $n \rightarrow \infty$ αφού $\|\Delta_n\| \rightarrow 0$ και οι B, f είναι ομοιόμορφα συνεχείς στα σύνολα $[0, t], \mathbb{R}$ αντίστοιχα. Επίσης όμως είναι φραγμένη από $4 \sup |f(\bar{K})|$. Από το θεώρημα φραγμένης σύγκλισης έπεται ότι η μέση τιμή τείνει στο 0.

Άρα $I(X_n) \rightarrow I(X)$ στον $L^2(\mathbf{P})$. Όμως $I(X)$ είναι το αριστερό μέλος τής (11.2) και $I(X_n)$ είναι στο δεξί μέλος τής.

Τώρα για τη γενική περίπτωση, χρησιμοποιούμε την ίδια τεχνική όπως στην απόδειξη τής Πρότασης 8.10. Έστω $r > 0$ και $\tau_r := \inf\{s > 0 : |B_s| > r\}$. Για οποιαδήποτε συνεχή συνάρτηση $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, καλούμε $J_n(f), J(f)$ το αριστερό και το δεξί μέλος τής (8.8) αντίστοιχα. Έστω και $g_r : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ συνεχής συνάρτηση που ισούται με 1 στο $[-r, r]$ και με 0 στο $\mathbb{R} \setminus [-r - 1, r + 1]$. Τότε για κάθε $\varepsilon > 0$,

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(|J_n(f) - J(f)| > \varepsilon) &= \mathbf{P}(|J_n(f) - J(f)| > \varepsilon, \tau_r > t) + \mathbf{P}(|J_n(f) - J(f)| > \varepsilon, \tau_r \leq t) \\ &= \mathbf{P}(|J_n(fg_r) - J(fg_r)| > \varepsilon, \tau_r > t) + \mathbf{P}(|J_n(f) - J(f)| > \varepsilon, \tau_r \leq t) \\ &\leq \mathbf{P}(|J_n(fg_r) - J(fg_r)| > \varepsilon) + \mathbf{P}(\tau_r \leq t). \end{aligned}$$

Για την πρώτη ισότητα χρησιμοποιήσαμε το ότι στο $\{\tau_r > t\}$ ισχύει $J_n(f) = J_n(fg_r)$, το οποίο είναι προφανές, και ότι στο ίδιο σύνολο ισχύει $J(f) = J(fg_r)$, λόγω του Λήμματος $\Gamma'.1$ αφού για κάθε $s \geq 0$ έχουμε $f(B_s)g_r(B_s) = f(B_s)$ για κάθε $\omega \in \Omega$ με $\tau_r(\omega) \geq s$ (γιατί για τέτοια ω ισχύει $|B_s| \leq r$ και άρα $g_r(B_s) = 1$).

Για την fg , έχουμε ήδη δείξει το θεώρημα, οπότε έχουμε $\overline{\lim}_{n \rightarrow \infty} \mathbf{P}(|J_n(f) - J(f)| > \varepsilon) \leq \mathbf{P}(\tau_r \leq t)$ για κάθε $r > 0$. Όμως το όριο τής τελευταίας ποσότητας για $r \rightarrow \infty$ είναι 0 όπως έχουμε δείξει στο τέλος τής απόδειξης τής Πρότασης 8.10. ■

Απόδειξη τού Θεωρήματος 12.1

Απόδειξη. Έστω $(\Delta_n)_{n \in \mathbb{N}^+}$ ακολουθία διαμερίσεων τού $[0, t]$ με $\Delta_n := \{0 = t_0^{(n)} < t_1^{(n)} < \dots < t_{k(n)}^{(n)} = t\}$ και με $\|\Delta_n\| \rightarrow 0$. Με χρήση τού Θεωρήματος Taylor, γράφουμε

$$f(B_t) - f(B_0) = \sum_{j=1}^{k(n)} \{f(B_{t_j^{(n)}}) - f(B_{t_{j-1}^{(n)}})\} = \sum_{j=1}^{k(n)} \left\{ f'(B_{t_{j-1}^{(n)}})(B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}}) + \frac{1}{2} f''(\xi_j^{(n)})(B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}})^2 \right\}$$

με $\xi_j^{(n)}$ σημείο ανάμεσα στα $B_{t_{j-1}^{(n)}}, B_{t_j^{(n)}}$ για κάθε $1 \leq j \leq k$. Έπεται ότι

$$\left| f(B_t) - f(B_0) - \sum_{j=1}^{k(n)} f'(B_{t_{j-1}^{(n)}})(B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}}) - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k(n)} f''(B_{t_{j-1}^{(n)}})(B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}})^2 \right| \quad (\Gamma'.14)$$

$$\leq \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k(n)} |f''(\xi_j^{(n)}) - f''(B_{t_{j-1}^{(n)}})| (B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}})^2$$

$$\leq \frac{1}{2} \operatorname{osc}(f'', B([0, t]), \operatorname{osc}(B, [0, t], \|\Delta_n\|)) \sum_{j=1}^{k(n)} (B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}})^2. \quad (\Gamma'.15)$$

Η συνάρτηση osc έχει οριστεί στην (Γ'.13). Τώρα για $n \rightarrow \infty$, παρατηρούμε τα εξής:

- Το πρώτο άθροισμα στην (Γ'.14) συγκλίνει κατά πιθανότητα στο $\int_0^t f'(B_s) dB_s$ λόγω της Πρότασης 11.1.
- Το δεύτερο άθροισμα συγκλίνει κατά πιθανότητα στο $\int_0^t f''(B_s) ds$ λόγω της Πρότασης 8.10.
- Η ποσότητα

$$\operatorname{osc}(f'', B([0, t]), \operatorname{osc}(B, [0, t], \|\Delta_n\|))$$

τείνει στο 0 με πιθανότητα 1 γιατί για κάθε $B \in C[0, \infty)$, η $\delta_n := \operatorname{osc}(B, [0, t], \|\Delta_n\|)$ τείνει στο 0 αφού η B είναι ομοιόμορφα συνεχής στο συμπαγές σύνολο $[0, t]$ και $\lim_{n \rightarrow \infty} \|\Delta_n\| = 0$. Έπειτα, η f'' είναι ομοιόμορφα συνεχής στο συμπαγές σύνολο $B([0, t])$ και άρα η $\operatorname{osc}(f'', B([0, t]), \delta_n)$ τείνει στο 0 για $n \rightarrow \infty$ αφού $\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n = 0$.

- Το άθροισμα στην (Γ'.15) συγκλίνει κατά πιθανότητα στο t λόγω της Πρότασης 8.10.

Με χρήση γνωστού θεωρήματος από τη θεωρία μέτρου, βρίσκουμε γνησίως αύξουσα ακολουθία φυσικών $(n_k)_{k \geq 1}$ ώστε κατά μήκος αυτής της ακολουθίας όλες οι πιο πάνω συγκλίσεις να συμβαίνουν με πιθανότητα 1. Έτσι προκύπτει ότι η (12.3) ισχύει με πιθανότητα 1 για το συγκεκριμένο $t > 0$.

Επομένως οι δύο ανελίξεις που ορίζονται από το δεξί και το αριστερό μέλος τής (12.3) είναι τροποποίηση η μια της άλλης. Επειδή όμως με πιθανότητα 1 έχουν και οι δύο συνεχή μονοπάτια (με βάση τη σύμβαση για το στοχαστικό ολοκλήρωμα), έπεται από την Πρόταση 4.8 ότι οι δύο ανελίξεις είναι μη διακρίσιμες. Αυτός είναι ακριβώς ο ισχυρισμός τού θεωρήματος. ■

Απόδειξη τού Θεωρήματος 12.3

Απόδειξη. Θα χρησιμοποιήσουμε το Θεώρημα Taylor ως εξής. Για $(x_0, t_0), (x, t) \in \mathbb{R} \times [0, \infty)$,

$$\begin{aligned} f(x, t) - f(x_0, t_0) &= f(x, t) - f(x, t_0) + f(x, t_0) - f(x_0, t_0) \\ &= \frac{\partial f}{\partial t}(x, \tilde{t})(t - t_0) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, t_0)(x - x_0) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(\tilde{x}, t_0)(x - x_0)^2, \end{aligned}$$

για κάποια σημεία \tilde{t}, \tilde{x} , με το \tilde{t} ανάμεσα στα t_0, t και το \tilde{x} ανάμεσα στα x_0, x αντίστοιχα.

Έστω $\Delta := \{0 = t_0 < t_1 < \dots < t_k = t\}$ μια διαμέριση τού $[0, t]$. Πιο κάτω θα χρησιμοποιήσουμε τη συντομογραφία $\Delta t_j := t_j - t_{j-1}, \Delta B_j = B_{t_j} - B_{t_{j-1}}$ για $j = 1, 2, \dots, k$. Με χρήση τού Θεωρήματος Taylor γράφουμε

$$\begin{aligned} f(B_t, t) - f(B_0, 0) &= \sum_{j=1}^k \{f(B_{t_j}, t_j) - f(B_{t_{j-1}}, t_{j-1})\} \\ &= \sum_{j=1}^k \frac{\partial f}{\partial t}(B_{t_j}, \zeta_j) \Delta t_j + \sum_{j=1}^k \frac{\partial f}{\partial x}(B_{t_{j-1}}, t_{j-1}) \Delta B_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(\eta_j, t_{j-1}) (\Delta B_j)^2 \end{aligned}$$

με ζ_j σημείο ανάμεσα στα t_{j-1}, t_j και η_j σημείο ανάμεσα στα $B_{t_{j-1}}, B_{t_j}$ για κάθε $1 \leq j \leq k$. Έπεται ότι

$$\left| f(B_t, t) - f(B_0, 0) - \sum_{j=1}^k \frac{\partial f}{\partial t}(B_{t_j}, t_j) \Delta t_j - \sum_{j=1}^k \frac{\partial f}{\partial x}(B_{t_{j-1}}, t_{j-1}) \Delta B_j - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(B_{t_{j-1}}, t_{j-1}) (\Delta B_j)^2 \right| \quad (\Gamma'.16)$$

$$\leq \sum_{j=1}^k \left| \frac{\partial f}{\partial t}(B_{t_j}, t_j) - \frac{\partial f}{\partial t}(B_{t_j}, \zeta_j) \right| \Delta t_j + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k \left| \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(B_{t_{j-1}}, t_{j-1}) - \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(\eta_j, t_{j-1}) \right| (\Delta B_j)^2. \quad (\Gamma'.17)$$

Για κάθε συνάρτηση $g : \mathbb{R} \times [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$, σύνολο $A \subset \mathbb{R} \times [0, \infty)$, και $\delta_1 > 0, \delta_2 > 0$, ορίζουμε

$$w(g, A, \delta_1, \delta_2) := \sup\{|g(x_1, y_1) - g(x_2, y_2)| : (x_1, y_1), (x_2, y_2) \in A, |x_1 - x_2| < \delta_1, |y_1 - y_2| < \delta_2\},$$

το οποίο είναι ένα μέτρο τής ομοιόμορφης συνέχειας τής g στο A .

Ένα άνω φράγμα για την ποσότητα στην $(\Gamma'.17)$ είναι το

$$\begin{aligned} t w \left(\frac{\partial f}{\partial t}, B([0, t]) \times [0, t], \text{osc}(B, [0, t], \|\Delta\|), \|\Delta\| \right) \\ + w \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, B([0, t]) \times [0, t], \text{osc}(B, [0, t], \|\Delta\|), \|\Delta\| \right) \sum_{j=1}^k (\Delta B_j)^2. \end{aligned}$$

Έστω τώρα $(\Delta_n)_{n \in \mathbb{N}^+}$ ακολουθία διαμερίσεων τού $[0, t]$ με $\|\Delta_n\| \rightarrow 0$. Εφαρμόζουμε την ανισότητα $(\Gamma'.16), (\Gamma'.17)$ για τη διαμέριση Δ_n και παίρνουμε $n \rightarrow \infty$.

(i) Το πρώτο άθροισμα στην $(\Gamma'.16)$ συγκλίνει με πιθανότητα 1 στο $\int_0^t \frac{\partial f}{\partial s}(B_s, s) ds$.

(ii) Το δεύτερο άθροισμα συγκλίνει κατά πιθανότητα στο $\int_0^t \frac{\partial f}{\partial x}(B_s, s) dB_s$.

(iii) Το τρίτο άθροισμα συγκλίνει κατά πιθανότητα στο $\int_0^t \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(B_s, s) ds$.

(iv) Οι ποσότητες

$$w\left(\frac{\partial f}{\partial t}, B([0, t]) \times [0, t], \text{osc}(B, [0, t], \|\Delta_n\|), \|\Delta_n\|\right),$$

$$w\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, B([0, t]) \times [0, t], \text{osc}(B, [0, t], \|\Delta_n\|), \|\Delta_n\|\right)$$

τείνουν στο 0 με πιθανότητα 1.

(v) Το άθροισμα $\sum_{j=1}^{k(n)} (B_{t_j^{(n)}} - B_{t_{j-1}^{(n)}})^2$ συγκλίνει κατά πιθανότητα στο t .

Για την απόδειξη των (ii) και (iii) χρειάζεται να αποδείξει κανείς τις προφανείς γενικεύσεις των Προτάσεων 8.10, 11.1, ενώ για την απόδειξη της (iv) επιχειρηματολογούμε όπως στην απόδειξη του Θεωρήματος 12.1. Και η απόδειξη κλείνει όπως και αυτή του Θεωρήματος 12.1. ■

Απόδειξη του Θεωρήματος 12.5

Απόδειξη. (Σχέδιο) Η απόδειξη αυτής της έκδοσης είναι ανάλογη της έκδοσης II με κάποιες λεπτομέρειες παραπάνω οι οποίες είναι μη ουσιώδεις. Θα δώσουμε μόνο μια περιγραφή της. Με τον συμβολισμό της απόδειξης της έκδοσης II, πάλι γράφουμε

$$f(B_t, t) - f(B_0, 0) = \sum_{i=1}^n \{f(B_{t_i}, t_i) - f(B_{t_{i-1}}, t_{i-1})\},$$

και τώρα για κάθε όρο του αθροίσματος έχουμε

$$\begin{aligned} f(B_{t_i}, t_i) - f(B_{t_{i-1}}, t_{i-1}) &= f(B_{t_i}, t_i) - f(B_{t_i}, t_{i-1}) + f(B_{t_i}, t_{i-1}) - f(B_{t_{i-1}}, t_{i-1}) \\ &= \frac{\partial f}{\partial s}(B_{t_i}, \zeta) \Delta t_i + \sum_{j=1}^d \frac{\partial f}{\partial x_j}(B_{t_{i-1}}, t_{i-1}) \Delta B_i^{(j)} + \frac{1}{2} \sum_{j,k=1}^d \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k}(\eta, t_{i-1}) \Delta B_i^{(j)} \Delta B_i^{(k)} \quad (\Gamma'.18) \end{aligned}$$

για κάποιο $\zeta \in (t_{i-1}, t_i)$ και κάποιο $\eta \in \mathbb{R}^d$ στο ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει τα σημεία $B_{t_{i-1}}, B_{t_i}$.

Εφαρμόζοντας τα πιο πάνω σε μια ακολουθία διαμερίσεων $(\Delta_n)_{n \geq 1}$ όπως στην Πρόταση 8.10, είναι σαφές ότι οι πρώτοι δύο όροι στην (Γ'.18) δίνουν τα πρώτα δύο ολοκληρώματα στην (12.8). Ο τελευταίος όρος στην (Γ'.18) γράφεται

$$\sum_{j=1}^d \frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2}(\eta, t_{i-1}) (\Delta B_i^{(j)})^2 + \sum_{\substack{1 \leq j, k \leq n \\ j \neq k}} \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_k}(\eta, t_{i-1}) \Delta B_i^{(j)} \Delta B_i^{(k)}.$$

Το πρώτο από αυτά τα αθροίσματα οδηγεί στο τελευταίο ολοκλήρωμα της (12.8) με βάση την Πρόταση 8.10. Το δεύτερο άθροισμα δεν συνεισφέρει τίποτα και αυτό πηγάζει από το ότι αν οι B, W είναι ανεξάρτητες (μονοδιάστατες) κινήσεις Brown, η ακολουθία

$$\sum_{i=1}^{k(n)} (B_{t_i^{(n)}} - B_{t_{i-1}^{(n)}})(W_{t_i^{(n)}} - W_{t_{i-1}^{(n)}})$$

τείνει στο 0 στον $L^2(\mathbf{P})$ καθώς $n \rightarrow \infty$ (Άσκηση 12.3). ■



Τεχνικά αποτελέσματα II

Απόδειξη τής Πρότασης 5.20

Απόδειξη. Έστω \mathcal{C} το σύνολο των μετρήσιμων ορθογωνίων στο $\mathcal{S}^{[0,\infty)}$ με παράγοντες ανοιχτά σύνολα τού \mathcal{S} . Τα στοιχεία τού \mathcal{C} είναι ανοιχτά ως προς τη μετρική ρ που ορίσαμε στη σχέση (5.15) και, επειδή παράγουν την $\bigotimes_{t \in [0,\infty)} \mathcal{B}(\mathcal{S})$, έπεται ότι $\mathcal{A}_1 \subset \mathcal{A}_2$.

Για την $\mathcal{A}_2 \subset \mathcal{A}_1$, αρκεί να δείξουμε ότι κάθε ανοιχτό σύνολο στο Y είναι στοιχείο τής \mathcal{A}_1 . Ο Y είναι διαχωρίσιμος, άρα κάθε ανοιχτό σύνολό του γράφεται ως αριθμήσιμη ένωση σφαιρών. Έπειτα κάθε σφαίρα γράφεται ως αριθμήσιμη ένωση συνόλων τής μορφής

$$A_{f_0, n, \varepsilon} := \{f \in Y : \sup_{t \in [0, n]} d(f(t), f_0(t)) < \varepsilon\}$$

όπου $f_0 \in Y, n \in \mathbb{N}, \varepsilon > 0$. Αυτό το σύνολο είναι στοιχείο τής \mathcal{A}_1 γιατί γράφεται ως $\bigcup_{j \geq 1} \bigcap_{k \geq 1} B_{j,k}$ με

$$B_{j,k} := \left\{ f \in Y : \sup_{0 \leq m \leq n2^k} d(f(m/2^k), f_0(m/2^k)) \leq \varepsilon - (1/j) \right\}$$

και κάθε $B_{j,k}$ είναι τομή του Y με ένα μετρήσιμο ορθογώνιο. ■

Απόδειξη τού Λήμματος 9.6

Λήμμα 9.6 Ο \mathcal{H}_0^2 είναι πυκνός υπόχωρος τού \mathcal{H}^2 .

Απόδειξη. Η απόδειξη ακολουθεί τα βήματα που δίνονται στο Πρόβλημα 2.5 από το Κεφάλαιο 3 τού Karatzas and Shreve (1991).

Έστω $X \in \mathcal{H}^2$. Θέλουμε να βρούμε μια ακολουθία στον \mathcal{H}_0^2 που να προσεγγίζει τη X . Το θεώρημα κυριαρχημένης σύγκλισης δίνει ότι

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \|X - X_T\|_2 = 0,$$

όπου η ανέλιξη X_T ορίζεται ως

$$X_T(t, \omega) = X(t, \omega) \mathbf{1}_{t \in [0, T]} \mathbf{1}_{|X(t, \omega)| \leq T}.$$

Έπεται ότι μπορούμε από την αρχή να υποθέσουμε ότι υπάρχει $T > 0$ ώστε $|X(t, \omega)| \leq T$ για κάθε $(t, \omega) \in [0, \infty) \times \Omega$ (δηλαδή η X είναι φραγμένη) και $X(t, \omega) = 0$ για κάθε $(t, \omega) \in (T, \infty) \times \Omega$.

Επίσης, επεκτείνουμε τη X σε αρνητικούς χρόνους θέτοντας $X(t, \omega) = 0$ για κάθε $t < 0$ και $\omega \in \Omega$.

Βήμα 1. Για κάθε $\varepsilon > 0$, υπάρχει X^ε μετρήσιμη ανέλιξη ώστε για κάθε $\omega \in \Omega$ η συνάρτηση $t \mapsto X^\varepsilon(t, \omega)$ να είναι συνεχής και

$$\|X - X^\varepsilon\|_2 < \varepsilon. \quad (\Delta'.1)$$

Για την απόδειξη αυτού του ισχυρισμού, θεωρούμε για κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ την ανέλιξη

$$H_n(t, \omega) := n \int_{t-n^{-1}}^t X(s, \omega) ds,$$

η οποία είναι συνεχής ως προς t για κάθε σταθερό ω (χρησιμοποιούμε το ότι η X είναι φραγμένη). Έπειτα για κάθε $\omega \in \Omega$, το σύνολο $\{t \in [0, T] : \text{δεν ισχύει } \lim_{n \rightarrow \infty} H_n(t, \omega) = X(t, \omega)\}$ έχει μέτρο Lebesgue μηδέν [Θεώρημα 14.13 στο Κουμουλλής και Νεγρεπόντης (1991). Το ότι αυτό το σύνολο είναι μετρήσιμο έπεται από την Πρόταση 9.4 από την ίδια αναφορά]. Άρα το θεώρημα φραγμένης σύγκλισης δίνει ότι

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E} \left(\int_0^T |X(t, \omega) - H_n(t, \omega)|^2 dt \right) = 0$$

και ο ισχυρισμός αποδείχθηκε.

Βήμα 2. Ισχύει

$$\lim_{h \rightarrow 0^+} \mathbf{E} \left(\int_0^T |X(t, \omega) - X(t-h, \omega)|^2 dt \right) = 0. \quad (\Delta'.2)$$

Ο ισχυρισμός αυτός λέει ότι για κάθε $X \in \mathcal{H}^2$ και $T > 0$, η απεικόνιση τής μεταφοράς, η $S : [0, \infty) \rightarrow L^2([0, T] \times \Omega, \mathcal{B}([0, t]) \otimes \mathcal{F}, \lambda \times \mathbf{P})$ με $S(h)(t, \omega) := X(t-h, \omega)$ είναι συνεχής στο 0. Η απόδειξη γίνεται όπως και στην περίπτωση των χώρων $L^p(\mathbb{R})$ ($1 \leq p < \infty$) προσεγγίζοντας με συνεχείς συναρτήσεις.

Για $\varepsilon > 0$ βρίσκουμε μια X^ε όπως στο προηγούμενο βήμα. Τότε η τριγωνική ανισότητα για τη νόρμα $\|\cdot\|_2$ δίνει ότι

$$\begin{aligned} \left(\mathbf{E} \int_0^T |X(t, \omega) - X(t-h, \omega)|^2 dt \right)^{1/2} &\leq \left(\mathbf{E} \int_0^T |X(t, \omega) - X^\varepsilon(t, \omega)|^2 dt \right)^{1/2} \\ &+ \left(\mathbf{E} \int_0^T |X^\varepsilon(t, \omega) - X^\varepsilon(t-h, \omega)|^2 dt \right)^{1/2} + \left(\mathbf{E} \int_0^T |X^\varepsilon(t-h, \omega) - X(t-h, \omega)|^2 dt \right)^{1/2} \\ &\leq 2\varepsilon + \left(\mathbf{E} \int_0^T |X^\varepsilon(t, \omega) - X^\varepsilon(t-h, \omega)|^2 dt \right)^{1/2}. \end{aligned}$$

Το τελευταίο ολοκλήρωμα συγκλίνει στο 0 για $h \rightarrow 0^+$ με χρήση του θεωρήματος φραγμένης σύγκλισης και του ότι η X^ε είναι συνεχής ως προς το πρώτο της όρισμα. Επειδή το ε ήταν αυθαίρετο, το συμπέρασμα έπεται.

Για τη συνέχεια, θα ορίσουμε μερικές ακολουθίες ανελιξέων που σκοπό έχουν να προσεγγίσουν τη X . Για κάθε $n \in \mathbb{N}$, ορίζουμε

$$\phi_n : \mathbb{R} \rightarrow \left\{ \frac{j}{2^n} : j \in \mathbb{Z} \right\}$$

με

$$\phi_n(t) = \frac{j-1}{2^n} \text{ αν } t \in \left(\frac{j-1}{2^n}, \frac{j}{2^n} \right].$$

Έπειτα, για κάθε $s \in \mathbb{R}$, ορίζουμε την ακολουθία ανελιξέων $(X^{(n,s)})_{n \in \mathbb{N}}$ ως

$$X^{(n,s)}(t, \omega) := X(\phi_n(t-s) + s, \omega)$$

για κάθε $t \geq 0, \omega \in \Omega$. Με λόγια, για σταθερό ω , αυτή η ανέλιξη είναι σταθερή σε κάθε διάστημα τής μορφής $(s + (k-1)2^{-n}, s + k2^{-n}]$ και έχει ως τιμή την τιμή τής $X(\cdot, \omega)$ στο αριστερό άκρο τού διαστήματος (ενδέχεται το αριστερό άκρο να είναι < 0 , οπότε η $X(\cdot, \omega)$ έχει την τιμή 0).

Επειδή για κάθε $t \geq 0$ ισχύει $t - 2^{-n} \leq \phi_n(t-s) + s < t$, έπεται ότι η $X^{(n,s)}$ είναι προσαρμοσμένη. Αφήνεται ως άσκηση να δειχθεί ότι είναι στοιχείο τού \mathcal{H}_0 .

Βήμα 3.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E} \int_0^T \int_0^1 |X(t, \omega) - X^{(n,s)}(t, \omega)|^2 ds dt = 0. \quad (\Delta'.3)$$

Για t, ω δεδομένα, έχουμε

$$\int_0^1 |X(t, \omega) - X^{(n,s)}(t, \omega)|^2 ds \leq \sum_{j=[2^n t]-2^{n+1}}^{j=[2^n t]+1} \int_{t-j2^{-n}}^{t-(j-1)2^{-n}} |X(t, \omega) - X(\phi_n(t-s) + s, \omega)|^2 ds.$$

[Τα ολοκληρώματα στα δεξιά ενδέχεται να κάνουν ολοκλήρωση και σε διάστημα με $s < 0$ ή $s > 1$.] Παρατηρούμε ότι ο j όρος τού τελευταίου αθροίσματος ισούται με

$$\int_{t-j2^{-n}}^{t-(j-1)2^{-n}} |X(t, \omega) - X((j-1)2^{-n} + s, \omega)|^2 ds = \int_0^{2^{-n}} |X(t, \omega) - X(t-r, \omega)|^2 dr,$$

όπου κάναμε την αλλαγή μεταβλητής $r = t - s - (j-1)2^{-n}$. Άρα η μέση τιμή στην $(\Delta'.3)$ φράσσεται από

$$\begin{aligned} (2^n + 1) \mathbf{E} \int_0^T \int_0^{2^{-n}} |X(t, \omega) - X(t-r, \omega)|^2 dr dt &= (2^n + 1) \int_0^{2^{-n}} \mathbf{E} \int_0^T |X(t, \omega) - X(t-r, \omega)|^2 dt dr \\ &\leq (1 + 2^{-n}) \sup_{r \in [0, 2^{-n}]} \mathbf{E} \int_0^T |X(t, \omega) - X(t-r, \omega)|^2 dt. \end{aligned}$$

Η τελευταία ποσότητα τείνει στο 0 για $n \rightarrow \infty$ λόγω της $(\Delta'.2)$.

Βήμα 4. Απόδειξη τού Λήμματος.

Το Λήμμα Fatou και το προηγούμενο βήμα δίνουν ότι

$$\int_0^1 \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\mathbf{E} \int_0^T |X(t, \omega) - X^{(n,s)}(t, \omega)|^2 dt \right) ds \leq 0.$$

Άρα για σχεδόν όλα τα $s \in [0, 1]$ ισχύει

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E} \int_0^T |X(t, \omega) - X^{(n,s)}(t, \omega)|^2 dt = 0.$$

Επιλέγουμε ένα τέτοιο s . Υπάρχει γνήσια αύξουσα υπακολουθία φυσικών $(n_k)_{k \in \mathbb{N}^+}$ ώστε

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{E} \int_0^T |X(t, \omega) - X^{(n_k, s)}(t, \omega)|^2 dt = 0.$$

Κάθε $X^{(n_k, s)}$ είναι στοιχείο τού \mathcal{H}_0 , οπότε το λήμμα έπεται. ■

Απόδειξη τής Πρότασης 9.14

Απόδειξη. Το δείχνουμε πρώτα στην περίπτωση που $X \in \mathcal{H}_0$. Έστω ότι η X είναι όπως στην (9.4). Τότε

$$Y(t, \omega) = \sum_{i: t_i < t} A_i(\omega)(t_{i+1} \wedge t - t_i \wedge t).$$

Σε αυτό το άθροισμα, όλοι οι διαφορές είναι $t_{i+1} - t_i$ εκτός από αυτήν με το i που ικανοποιεί $t_i < t \leq t_{i+1}$, η οποία είναι $t - t_i$. Επειδή κάθε A_i είναι \mathcal{F}_i μετρήσιμη και $\mathcal{F}_i \subset \mathcal{F}_t$, έπεται ότι η $Y(t, \omega)$ είναι \mathcal{F}_t μετρήσιμη.

Για τη γενική περίπτωση, επειδή $Y(t, \omega) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^t X(s, \omega) \mathbf{1}_{|X(s, \omega)| \leq n} ds$ από το θεώρημα κυριαρχημένης σύγκλισης, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η X είναι φραγμένη.

Έστω $t > 0$ δεδομένο. Η απόδειξη του Λήμματος 9.6, αν σε αυτήν όπου T βάλουμε το t δίνει ότι υπάρχει ακολουθία ανελίξεων $(Z^{(k)})_{k \in \mathbb{N}^+}$ που είναι προσαρμοσμένες (η $Z^{(k)}$ είναι η $X^{(n_k, s)}$ σε εκείνη την απόδειξη), στοιχεία του \mathcal{H}_0 , ώστε $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{E} \int_0^t |X(s, \omega) - Z^{(k)}(s, \omega)|^2 ds = 0$. Αυτό είναι σύγκλιση στον L^2 ενός χώρου πεπερασμένου μέτρου, οπότε δίνει σύγκλιση στον L^1 (π.χ., με Cauchy-Schwarz), δηλαδή $\lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{E} \int_0^t |X(s, \omega) - Z^{(k)}(s, \omega)| ds = 0$.

Υπάρχει υπακολουθία $(Z^{(k_r)})_{r \in \mathbb{N}^+}$ ώστε με πιθανότητα 1 να ισχύει $\lim_{r \rightarrow \infty} \int_0^t |X(s, \omega) - Z^{(k_r)}(s, \omega)| ds = 0$. Έπεται ότι με πιθανότητα 1 το όριο $\lim_{r \rightarrow \infty} \int_0^t Z^{(k_r)}(s, \omega) ds$ υπάρχει και ισούται με $\int_0^t X(s, \omega) ds = Y(s, \omega)$. Κάθε όρος $\int_0^t Z^{(k_r)}(s, \omega) ds$ είναι \mathcal{F}_r -μετρήσιμη συνάρτηση, επομένως το σύνολο

$$A := \left\{ \omega : \text{το όριο } \lim_{r \rightarrow \infty} \int_0^t Z^{(k_r)}(s, \omega) ds \text{ υπάρχει στο } \mathbb{R} \right\} \in \mathcal{F}_t,$$

και η συνάρτηση

$$Z(t, \omega) := \begin{cases} \lim_{r \rightarrow \infty} \int_0^t Z^{(k_r)}(s, \omega) ds & \text{αν } \omega \in A, \\ 0 & \text{αν } \omega \in \Omega \setminus A, \end{cases}$$

είναι \mathcal{F}_t -μετρήσιμη. Επειδή οι $Y(t, \omega), Z(t, \omega)$ ισούνται με πιθανότητα 1 και η διήθηση είναι πλήρης, έχουμε ότι και η $Y(t, \omega)$ είναι \mathcal{F}_t -μετρήσιμη. ■

Απόδειξη τής Πρότασης 10.3

Πρόταση 10.3 Έστω T χρόνος διακοπής. Με πιθανότητα 1 ισχύει

$$\int_0^{t \wedge T} X_s dB_s = \int_0^t X_s \mathbf{1}_{[0, T]}(s) dB_s \quad (\Delta'.4)$$

για κάθε $t > 0$.

Απόδειξη. **Βήμα 1.** Υποθέτουμε ότι $X \in \mathcal{H}_0^2$ και ότι ο T παίρνει μόνο πεπερασμένο πλήθος τιμών. Μπορούμε να υποθέσουμε ότι η X γράφεται όπως στην (9.4) και ο T παίρνει τιμές μέσα στο σύνολο $\{t_i : i = 1, 2, \dots, k+1\}$. Και είναι θέμα ρουτίνας (εφαρμογή του Ορισμού 9.3) να ελέγξουμε ότι ισχύει η $(\Delta'.4)$ σε κάθε $\omega \in \Omega$.

Ξεκινάμε. Η ανελίξη $\{X_s \mathbf{1}_{[0, T]}(s) : s \geq 0\}$ είναι απλή γιατί γράφεται ως

$$X_s \mathbf{1}_{[0, T]}(s) = \sum_{i=1}^k A_i(\omega) \mathbf{1}_{T(\omega) \geq t_{i+1}} \mathbf{1}_{(t_i, t_{i+1}]}(s),$$

και αυτό γιατί, για $s \in (t_i, t_{i+1}]$, η απαίτηση $s \leq T(\omega)$ ισοδυναμεί με $t_{i+1} \leq T(\omega)$ αφού ο T δεν παίρνει τιμές στο (t_i, t_{i+1}) . Έπειτα η $\mathbf{1}_{T(\omega) \geq t_{i+1}}$ είναι \mathcal{F}_{t_i} -μετρήσιμη αφού είναι η δείκτρια του συνόλου $\{T \geq t_{i+1}\} = \Omega \setminus \{T \leq t_i\}$. Άρα το $\int_0^t X_s \mathbf{1}_{[0, T]}(s) dB_s$ ισούται με

$$\begin{cases} 0 & \text{αν } t < t_1 \\ \left\{ \sum_{i=1}^{\ell-1} A_i(\omega) \mathbf{1}_{T(\omega) \geq t_{i+1}} (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}) \right\} + A_\ell(\omega) \mathbf{1}_{T(\omega) \geq t_{\ell+1}} (B_t - B_{t_\ell}) & \text{αν } t \in [t_\ell, t_{\ell+1}) \text{ με } \ell \in \{1, 2, \dots, k\} \\ \sum_{i=1}^k A_i(\omega) \mathbf{1}_{T(\omega) \geq t_{i+1}} (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}) & \text{αν } t \geq t_{k+1} \end{cases}$$

Τώρα, αν $T(\omega) = t_r$, με $r \in \{1, 2, \dots, k+1\}$, αυτή η ποσότητα ισούται με

$$\begin{cases} 0 & \text{αν } t < t_1 \\ \left\{ \sum_{i=1}^{\ell-1} A_i(\omega) (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}) \right\} + A_\ell(\omega) (B_t - B_{t_\ell}) & \text{αν } t \in [t_\ell, t_{\ell+1}) \text{ με } \ell \in \{1, 2, \dots, r-1\} \\ \sum_{i=1}^{r-1} A_i(\omega) (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}) & \text{αν } t \geq t_r \end{cases} \quad (\Delta'.5)$$

Το αριστερό μέλος τής (Δ'.4), στο σύνολο που $T(\omega) = t_r$, ισούται με

$$\int_0^{t \wedge t_r} X_s dB_s$$

το οποίο παίρνει τιμές ακριβώς όπως στην (Δ'.5).

Βήμα 2. Υποθέτουμε ότι $X \in \mathcal{H}_0^2$ και ο T είναι οποιοσδήποτε χρόνος διακοπής. Επειδή τα δύο μέλη τής ζητούμενης ορίζουν ανεξίτητες που με πιθανότητα 1 έχουν συνεχή μονοπάτια, αρκεί να δείξουμε ότι αυτές οι ανεξίτητες είναι τροποποίηση η μια της άλλης. Το συμπέρασμα θα έπεται τότε από την Πρόταση 4.8.

Για $n \in \mathbb{N}^+$, θέτουμε

$$T_n(\omega) := \begin{cases} \frac{k}{2^n} & \text{αν } T(\omega) \in \left(\frac{k-1}{2^n}, \frac{k}{2^n}\right] \text{ με } k \in \mathbb{N}^+, k \leq n, \\ n & \text{αν } T(\omega) > n. \end{cases}$$

Εύκολα βλέπουμε ότι ο T_n είναι χρόνος διακοπής και βέβαια παίρνει μόνο πεπερασμένο πλήθος τιμών. Από το προηγούμενο βήμα έχουμε ότι με πιθανότητα 1 ισχύει

$$\int_0^{t \wedge T_n} X_s dB_s = \int_0^t X_s \mathbf{1}_{[0, T_n]}(s) dB_s \quad (\Delta'.6)$$

για κάθε $t > 0$. Στο ίδιο σύνολο πιθανότητας 1 μπορούμε να υποθέσουμε ότι η ανέλιξη $X \cdot B$ είναι συνεχής. Επομένως, επειδή $T_n \rightarrow T$, για δεδομένο $t > 0$, το αριστερό μέλος τής (Δ'.6) συγκλίνει στο $\int_0^{t \wedge T} X_s dB_s$. Έπειτα, το δεξί μέλος τής (Δ'.6) συγκλίνει στο $\int_0^t X_s \mathbf{1}_{[0, T]}(s) dB_s$ στον $L^2(\mathbf{P})$ γιατί

$$\mathbf{E} \left(\int_0^t X_s^2 |\mathbf{1}_{[0, T_n]}(s) - \mathbf{1}_{[0, T]}(s)|^2 ds \right) \rightarrow 0$$

καθώς $n \rightarrow \infty$ από το θεώρημα κυριαρχημένης σύγκλισης. Και περνώντας σε υπακοιουθία που συγκλίνει με πιθανότητα 1, έχουμε ότι για δεδομένο $t > 0$ ισχύει η ισότητα (Δ'.4) με πιθανότητα 1.

Βήμα 3. Δείχνουμε τώρα τη γενική περίπτωση. Όπως και στο προηγούμενο βήμα, θα επικαλεστούμε την Πρόταση 4.8.

Έστω $t > 0$ δεδομένο, και $(X^{(n)})_{n \geq 1}$ ακολουθία στον \mathcal{H}_0^2 που συγκλίνει στη $(X_s \mathbf{1}_{[0, t]}(s))_{s \geq 0}$ στον $L^2(\lambda \times \mathbf{P})$. Από το προηγούμενο βήμα, έχουμε ότι με πιθανότητα 1, για κάθε $n \geq 1$, ισχύει

$$\int_0^{t \wedge T} X_s^{(n)} dB_s = \int_0^t X_s^{(n)} \mathbf{1}_{[0, T]}(s) dB_s. \quad (\Delta'.7)$$

Αντίστοιχα όπως στην απόδειξη τού Θεωρήματος 10.2, υπάρχει σύνολο $\Omega_0 \subset \Omega$ πιθανότητας 1 και γνησίως αύξουσα ακολουθία $(n_k)_{k \geq 1}$ φυσικών ώστε στο Ω_0 να ισχύει

$$\int_0^r X_s^{(n_k)} dB_s \rightarrow \int_0^r X_s dB_s$$

ομοίωμορφα για $r \in [0, t]$. Επειδή $t \wedge T(\omega) \leq t$, έχουμε στο Ω_0 επίσης

$$\int_0^{t \wedge T} X_s^{(n_k)} dB_s \rightarrow \int_0^{t \wedge T} X_s dB_s.$$

Το δεξί μέλος τής (Δ'.7) συγκλίνει στο $\int_0^t X_s \mathbf{1}_{[0, T]}(s) dB_s$ στον $L^2(\mathbf{P})$ γιατί

$$\mathbf{E} \left(\int_0^t |X_s - X_s^{(n)}|^2 \mathbf{1}_{[0, T]}(s) ds \right) \leq \mathbf{E} \left(\int_0^t |X_s - X_s^{(n)}|^2 ds \right) \rightarrow 0.$$

Αυτές οι παρατηρήσεις και η (Δ'.7) δίνουν ότι η (Δ'.4) ισχύει με πιθανότητα 1. ■

Υποδείξεις για επιλεγμένες ασκήσεις

Κεφάλαιο 1

1.5 Για την κατεύθυνση που υποθέτουμε ότι η Y είναι $\sigma(X)$ -μετρήσιμη, δείχνουμε το ζητούμενο διαδοχικά για Y δείκτρια, για Y απλή, για $Y \geq 0$ μετρήσιμη, και τέλος για Y με τιμές στο $[-\infty, \infty]$.

Κεφάλαιο 2

2.1 (β) Δείχνουμε τη ζητούμενη πρώτα για X δείκτρια ενός μετρήσιμου συνόλου, έπειτα για $X \geq 0$ μετρήσιμη απλή, έπειτα για $X \geq 0$ μετρήσιμη, και τέλος για X μετρήσιμη με $\int |X| d\mu < \infty$.

2.3 (α) Το ότι $\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) \geq 0$ με πιθανότητα 1 είναι γνωστό από τη θεωρία. Μένει να δείξουμε ότι το $A := \{\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) = 0\}$ έχει πιθανότητα 0. Το A είναι στοιχείο τής \mathcal{G} και, εφαρμόζοντας για αυτό την (2.1), έπεται εύκολα ότι $\mathbf{P}(A) = 0$.
(β) Χρησιμοποιούμε την Πρόταση 2.8 αλλά πριν πρέπει να δείξουμε ότι η $X/\mathbf{E}(X | \mathcal{G})$ είναι ολοκληρώσιμη.

2.4 Όχι. Μπορούμε να κατασκευάσουμε αντιπαράδειγμα χρησιμοποιώντας το Παράδειγμα 2.6 ή και αλλιώς.

2.5 Γράφουμε $\mathbf{E}(X | \mathcal{F}_1) = \mathbf{E}(\mathbf{E}(X | \mathcal{F}_2) | \mathcal{F}_1)$.

2.6 Εφαρμόζουμε τη σχέση $\mathbf{E}(\mathbf{E}(Y | \mathcal{G})) = \mathbf{E}(Y)$ με $Y := X\mathbf{E}(X | \mathcal{G})$.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(X\mathbf{E}(X | \mathcal{G})) &= \mathbf{E}(\mathbf{E}(X\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) | \mathcal{G})) = \mathbf{E}(\mathbf{E}(X | \mathcal{G})\mathbf{E}(X | \mathcal{G})) \\ &= \mathbf{E}(\{\mathbf{E}(X | \mathcal{G})\}^2) \leq \mathbf{E}(\mathbf{E}(X^2 | \mathcal{G})) = \mathbf{E}(X^2) \end{aligned}$$

Η δεύτερη ισότητα ισχύει γιατί η $\mathbf{E}(X | \mathcal{G})$ είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη. Η ανισότητα προκύπτει από την ανισότητα Jensen.

2.7 Παρατηρούμε ότι η X είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη και δείχνουμε ότι $\mathbf{E}\{(X - Y)^2\} = 0$. Αυτό γιατί

$$\mathbf{E}(XY) = \mathbf{E}(\mathbf{E}(XY | \mathcal{G})) = \mathbf{E}(X\mathbf{E}(Y | \mathcal{G})) = \dots$$

2.9 (α) $\mathbf{E}(YX) = \mathbf{E}(\mathbf{E}(YX | \mathcal{G})) = \mathbf{E}(Y\mathbf{E}(X | \mathcal{G}))$ αφού η Y είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη.

(β) Ο ισχυρισμός είναι σχεδόν προφανής αν λάβουμε υπόψιν μας τη γεωμετρική ερμηνεία τής δεσμευμένης μέσης τιμής. Η γεωμετρία μάς οδηγεί να δείξουμε ότι

$$\mathbf{E}\{(X - Y)^2\} = \mathbf{E}\{(X - \mathbf{E}(X | \mathcal{G}))^2\} + \mathbf{E}\{(\mathbf{E}(X | \mathcal{G}) - Y)^2\},$$

και από αυτό έπεται ο ισχυρισμός.

2.10 Και τα δύο μέλη τής ισότητας ισούνται με $\mathbf{E}\{\mathbf{E}(X | \mathcal{G})\mathbf{E}(Y | \mathcal{G})\}$.

2.12 Το αριστερό μέλος ισούται με

$$\sum_{k=1}^n \mathbf{E}(a_k^2 X_k^2) + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq n} \mathbf{E}(a_i X_i a_j X_j).$$

Οι X_k, a_k είναι ανεξάρτητες γιατί η X_k είναι ανεξάρτητη από την \mathcal{F}_{k-1} και η a_k είναι \mathcal{F}_{k-1} -μετρήσιμη. Όμοια, για $i < j$, η X_j είναι ανεξάρτητη από τις a_i, a_j, X_i και άρα και από το γινόμενο $a_i a_j X_i$. Άρα

$$\mathbf{E}(a_k^2 X_k^2) = \mathbf{E}(a_k^2) \mathbf{E}(X_k^2) = \mathbf{E}(a_k^2),$$

ενώ για $1 \leq i < j \leq n$ ισχύει

$$\mathbf{E}(a_i X_i a_j X_j) = \mathbf{E}(a_i X_i a_j) \mathbf{E}(X_j) = 0.$$

2.14 (β) Δουλεύουμε όπως στην Άσκηση 2.1(β).

Κεφάλαιο 3

3.1 Προκύπτει με χρήση της Πρότασης 2.10.

3.2 (β) Εφαρμόζουμε το (α) για το σύνολο $\{X_m = 0\} \in \mathcal{F}_m$.

3.3 Όμοια όπως στο Παράδειγμα 3.2.

3.4 Όμοια όπως στα Παραδείγματα 3.2, 3.3. Μάλιστα η $(M_n)_{n \geq 0}$ είναι ειδική περίπτωση τού Παραδείγματος 3.3.

3.5 (α) Είναι συνδυαστικό πρόβλημα. Για n, k που είναι και οι δύο άρτιοι ή και οι δύο περιττοί και με $|k| \leq n$ ισχύει

$$\mathbf{P}(S_n = k) = \frac{1}{2^n} \binom{n}{\frac{n+k}{2}}.$$

(β) Χρησιμοποιούμε στο αποτέλεσμα τού (α) την προσέγγιση Stirling για το παραγοντικό. $k! \sim (k/e)^k \sqrt{2\pi k}$.

(γ) Έπεται από το (β).

3.6 Έπεται από τις σχέσεις

$$\begin{aligned} \{T \leq n\} &= \cup_{k=0}^n \{T = k\}, \\ \{T = n\} &= \{T \leq n\} \setminus \{T \leq n-1\}. \end{aligned}$$

3.9 Για $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$,

$$\{X_n^T \in A\} = \cup_{k=0}^{\infty} \{X_n^T \in A\} \cap \{T = k\} = \left(\cup_{k=0}^{\infty} \{X_k \in A\} \cap \{T = k\} \right) \cup \left(\{X_n \in A\} \cap \{T \leq n\}^c \right).$$

3.10 (α) Δουλεύουμε όπως στο Παράδειγμα 3.18 (i) χρησιμοποιώντας το martingale $(M_n)_{n \geq 0}$ από την Άσκηση 3.4.

(δ) Έστω $a < 0$ ακέραιος και $T = T_a \wedge T_b$. Χρησιμοποιούμε το martingale W από την Άσκηση 3.4 για να δείξουμε (με τον γνωστό τρόπο) ότι

$$\mathbf{E}(S_T) = (p - q) \mathbf{E}(T).$$

Δηλαδή

$$\mathbf{E}(T_a \wedge T_b) = \frac{1}{p - q} \{b \mathbf{P}(T_b < T_a) + a \mathbf{P}(T_a < T_b)\}.$$

Παίρνουμε $a \rightarrow -\infty$ και χρησιμοποιούμε την έκφραση για τις πιθανότητες $\mathbf{P}(T_b < T_a), \mathbf{P}(T_a < T_b)$ από το ερώτημα (α).

(ε) Ένας τρόπος είναι με χρήση τού νόμου των μεγάλων αριθμών.

(ζ) Για $n \in \mathbb{N}$,

$$\mathbf{P}(R \geq n) = \mathbf{P}(T_{-n} < \infty) = \frac{1}{\phi(-n)} = \left(\frac{q}{p}\right)^n.$$

3.11 Η N είναι γεωμετρική τυχαία μεταβλητή με παράμετρο $1/2$, δηλαδή $\mathbf{P}(N = k) = (1/2)(1/2)^{k-1}$ για κάθε $k \in \mathbb{N}^+$ γιατί $N = \min\{k \geq 1 : Z_k = 0\}$. Το θεώρημα επιλεκτικής διακοπής δεν μπορεί να εφαρμοστεί γιατί $\mathbf{E}(R_0) = 1$, ενώ $\mathbf{E}(R_N) = 0$.

3.14 Δείχνουμε ότι $\mathbf{E}_{\mathbf{P}}(X_{n+1}f | \mathcal{F}_n) = \mathbf{E}_{\mathbf{P}}(X_{n+1}f_{n+1} | \mathcal{F}_n)$ ως εξής

$$\mathbf{E}_{\mathbf{P}}(X_{n+1}f | \mathcal{F}_n) = \mathbf{E}_{\mathbf{P}}(\mathbf{E}_{\mathbf{P}}(X_{n+1}f | \mathcal{F}_{n+1}) | \mathcal{F}_n) = \mathbf{E}_{\mathbf{P}}(X_{n+1} \mathbf{E}_{\mathbf{P}}(f | \mathcal{F}_{n+1}) | \mathcal{F}_n) = \mathbf{E}_{\mathbf{P}}(X_{n+1}f_{n+1} | \mathcal{F}_n),$$

οπότε από την Άσκηση 2.14,

$$\mathbf{E}_{\mathbf{Q}}(X_{n+1} | \mathcal{F}_n) = \frac{\mathbf{E}_{\mathbf{P}}(X_{n+1}f_{n+1} | \mathcal{F}_n)}{f_n}.$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την ισότητα, δείχνουμε εύκολα την ισοδυναμία των (α) και (β).

3.20 Δείχνουμε ότι η ανέλιξη $(S_n)_{n \in \mathbb{N}^+}$ είναι martingale και επομένως η $(S_n^2)_{n \in \mathbb{N}^+}$ είναι submartingale.

Κεφάλαιο 4

4.1 Έστω \mathcal{G} το δεξί μέλος τής ισότητας. Δείχνουμε ότι $\mathcal{G} \subset \mathcal{F}$. Έπειτα δείχνουμε ότι η \mathcal{G} είναι σ-άλγεβρα (εδώ χρησιμοποιούμε το ότι η ένωση αριθμήσιμου πλήθους αριθμήσιμων συνόλων είναι αριθμήσιμο σύνολο), και επειδή προφανώς περιέχει τα μετρήσιμα ορθογώνια, έπεται ότι $\mathcal{F} \subset \mathcal{G}$.

4.5 $\{T < t\} = \cup_{n=1}^{\infty} \{T \leq t - n^{-1}\}$.

4.6 (α) Για κάθε $t \geq 0$ έχουμε

$$\{T_n \leq t\} = \{[2^n T] \leq 2^n t - 1\} = \{2^n T < [2^n t]\} = \{T < 2^{-n}[2^n t]\} \in \mathcal{F}_{2^{-n}[2^n t]} \subset \mathcal{F}_t.$$

Χρησιμοποιούμε την προηγούμενη άσκηση.

4.8 Για $0 \leq s \leq t$ και κάθε $n \in \mathbb{N}^+$ έχουμε

$$\mathbf{E}(X_{t \wedge \tau_n} | \mathcal{F}_s) = X_{s \wedge \tau_n}. \tag{Δ'.8}$$

Δείχνουμε ότι $\mathbf{E}|X_t| < \infty$ ως εξής.

$$\mathbf{E}|X_t| = \mathbf{E}X_t = \mathbf{E}(\lim_{n \rightarrow \infty} X_{t \wedge \tau_n}) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbf{E}(X_{t \wedge \tau_n}) = \mathbf{E}(X_0) < \infty.$$

Εφαρμόσαμε το Λήμμα Fatou. Η τελευταία ισότητα προκύπτει από την (Δ'.8) αν θέσουμε $s = 0$ και πάρουμε μέση τιμή. Για να δείξουμε ότι $\mathbf{E}(X_t | \mathcal{F}_s) \leq X_s$, παίρνουμε $n \rightarrow \infty$ στην (Δ'.8) και εφαρμόζουμε το Λήμμα Fatou για τη δεσμευμένη μέση τιμή (Θεώρημα 2.19).

4.13 (α) Αν η X είναι της μορφής $\mathbf{1}_{A \times B}$, με $A \in \mathcal{B}([a, b])$ και $B \in \mathcal{F}$, τότε επιλέγουμε μια εκδοχή Z της $\mathbf{E}(\mathbf{1}_B | \mathcal{G})$ και θέτουμε $h(t, \omega) := \mathbf{1}_A(t)Z(\omega)$. Η h έχει τις ζητούμενες ιδιότητες. Έστω

$$\mathcal{D} := \{C \in \mathcal{B}([a, b]) \otimes \mathcal{F} : \text{το ζητούμενο τού (α) ισχύει για την } X := \mathbf{1}_C\}.$$

Δείξαμε πριν ότι το \mathcal{D} περιέχει τα μετρήσιμα ορθογώνια. Δείχνουμε ότι είναι κλάση Dynkin. Εύκολα, αν $C_1 \subset C_2$ είναι στοιχεία τής \mathcal{D} , τότε $C_2 \setminus C_1 \in \mathcal{D}$. Αν $(C_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι αύξουσα ακολουθία στοιχείων τής \mathcal{D} και $(h_n)_{n \in \mathbb{N}}$ είναι οι ανελίξεις που αντιστοιχούν στις $(\mathbf{1}_{C_n})_{n \in \mathbb{N}}$, τότε για κάθε $t \in [a, b]$, με πιθανότητα 1, η ακολουθία $(h_n(t, \omega))_{n \in \mathbb{N}}$ είναι αύξουσα, θετικών όρων και φραγμένη από το 1, άρα συγκλίνει στο \mathbb{R} . Έπεται (θυμηθείτε την Παρατήρηση 1.7) ότι η $h : [a, b] \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ με

$$h(t, \omega) := \begin{cases} \lim_{n \rightarrow \infty} h_n(t, \omega) & \text{αν το όριο υπάρχει στο } \mathbb{R}, \\ 0 & \text{διαφορετικά,} \end{cases}$$

είναι $\mathcal{B}([a, b]) \otimes \mathcal{G}$ -μετρήσιμη (και $\lambda \times \mathbf{P}$ -σχεδόν παντού δίνεται από τον πρώτο κλάδο). Έστω $C := \cup_{n \in \mathbb{N}} C_n$. Για $t \in [a, b]$ δεδομένο, δείχνουμε ότι η $h(t, \omega)$ είναι εκδοχή τής $\mathbf{E}(\mathbf{1}_C(t, \cdot) | \mathcal{G})(\omega)$. Για οποιοδήποτε $G \in \mathcal{G}$ και οποιοδήποτε $n \in \mathbb{N}$, έχουμε $\int_G h_n(t, \omega) d\mathbf{P}(\omega) = \int_G \mathbf{1}_{C_n}(t, \omega) d\mathbf{P}(\omega)$. Όπως σχολιάστηκε πιο πάνω, με πιθανότητα 1, $\lim_{n \rightarrow \infty} h_n(t, \omega) = h(t, \omega)$, οπότε εφαρμόζοντας στην προηγούμενη ισότητα το θεώρημα μονότονης σύγκλισης, παίρνουμε $\int_G h(t, \omega) d\mathbf{P}(\omega) = \int_G \mathbf{1}_C(t, \omega) d\mathbf{P}(\omega)$. Άρα $C \in \mathcal{D}$ και δείξαμε ότι η \mathcal{D} είναι κλάση Dynkin.

Τα παραπάνω συνεπάγονται ότι η \mathcal{D} περιέχει την κλάση Dynkin που παράγουν τα μετρήσιμα ορθογώνια. Επειδή αυτά αποτελούν οικογένεια κλειστή στις πεπερασμένες τομές, η κλάση Dynkin που παράγουν ισούται με τη σ-άλγεβρα που παράγουν, η οποία είναι η $\mathcal{B}([a, b]) \otimes \mathcal{F}$, άρα $\mathcal{D} = \mathcal{B}([a, b]) \otimes \mathcal{F}$.

(β) Εφόσον η h του (α) είναι $\mathcal{B}([a, b]) \otimes \mathcal{G}$ -μετρήσιμη και ολοκληρώσιμη, η $\int_a^b h(t, \omega) dt$ είναι \mathcal{G} -μετρήσιμη (Πρόταση Β'.11). Έπειτα, για $A \in \mathcal{G}$,

$$\int_A \int_a^b h(t, \omega) dt = \int_a^b \int_A h(t, \omega) d\mathbf{P} dt = \int_a^b \int_A X(t, \omega) d\mathbf{P} dt = \int_A \int_a^b X(t, \omega) dt d\mathbf{P}.$$

Στην πρώτη και στην τρίτη ισότητα χρησιμοποιήσαμε το θεώρημα Fubini, στη δεύτερη τον ορισμό τής δεσμευμένης μέσης τιμής αφού $h(t, \omega) = \mathbf{E}(X(t, \cdot) | \mathcal{G})(\omega)$.

4.14 Έστω $D \subset \mathcal{S}$ ένα αριθμήσιμο πυκνό υποσύνολο του \mathcal{S} και $\mathcal{C} := \{B(x, r) : x \in D, r \in \mathbb{Q} \cap (0, \infty)\}$, όπου $B(x, r)$ συμβολίζει την ανοιχτή μπάλα κέντρου x και ακτίνας r στον \mathcal{S} . Το \mathcal{C} είναι αριθμήσιμο και έχουμε

$$\{X \neq Y\} = \cup_{U, V \in \mathcal{C} : U \cap V = \emptyset} (\{X \in U\} \cap \{Y \in V\}).$$

Κεφάλαιο 5

5.1 (α) $f(t) = \mathbf{P}(\sqrt{t}B(1) > t) = \mathbf{P}(B(1) > \sqrt{t})$ (από την ιδιότητα αλλαγής κλίμακας). Το ενδεχόμενο στην τελευταία πιθανότητα φθίνει ως προς t ($0 < s < t \Rightarrow \{B(1) > \sqrt{t}\} \subset \{B(1) > \sqrt{s}\}$) και το συμπέρασμα έπεται.

(β) $f(t) = \mathbf{P}(B(1) > \sqrt{t}) = \int_{\sqrt{t}}^{\infty} \phi(t) dt$ όπου ϕ είναι η πυκνότητα της κατανομής $N(0, 1)$. Άρα

$$f'(t) = -\frac{1}{2\sqrt{t}} \phi(\sqrt{t}) = -\frac{1}{2\sqrt{2\pi t}} e^{-t/2}.$$

5.2 Έστω ότι $0 \leq s \leq t$. Θέτουμε $X := B(s), Y := B(t) - B(s)$. Οι X, Y είναι ανεξάρτητες (ακόμα και όταν $s = t$) και

$$\text{Cov}((X + Y)^2, X^2) = \text{Cov}(X^2, X^2) + 2\text{Cov}(XY, X^2) + \text{Cov}(Y^2, X^2) = \text{Var}(X^2) = \dots$$

Χρησιμοποιούμε το ότι κάθε $Z \sim N(0, 1)$ έχει $\mathbf{E}(Z) = 0, \mathbf{E}(Z^2) = 1, \mathbf{E}(Z^4) = 3$ (Λήμμα Α'.1 του Παραρτήματος Α').

5.3 Γράφουμε τη δεδομένη τυχαία μεταβλητή ως γραμμικό συνδυασμό των $B(t_1), B(t_2) - B(t_1), \dots, B(t_n) - B(t_{n-1})$ (οι οποίες είναι ανεξάρτητες). Επειδή

$$B(t_r) = \{B(t_r) - B(t_{r-1})\} + \dots + \{B(t_2) - B(t_1)\} + B(t_1)$$

για κάθε $r \in \{1, \dots, n\}$, έχουμε

$$a_1 B(t_1) + a_2 B(t_2) + \dots + a_n B(t_n) = s_1 B(t_1) + s_2 \{B(t_2) - B(t_1)\} + \dots + s_n \{B(t_n) - B(t_{n-1})\}$$

όπου $s_i = a_i + \dots + a_n$ για κάθε $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. Κατά τα γνωστά από τις στοιχειώδεις πιθανότητες η τελευταία τυχαία μεταβλητή είναι κανονική με μέση τιμή 0 και διασπορά $s_1^2 t_1 + s_2^2 (t_2 - t_1) + \dots + s_n^2 (t_n - t_{n-1})$.

5.4 Θέτουμε $X := B(s) - B(r), Y := B(t) - B(s)$. Η δεσμευμένη κατανομή της X δεδομένης της $(B(r), B(t))$ είναι η ίδια με τη δεσμευμένη κατανομή της X δεδομένης της $(B(r), B(t) - B(r))$. Ισχύει $B(t) - B(r) = X + Y$. Η X είναι ανεξάρτητη από τη $B(r)$, οπότε αναγόμεστε στον υπολογισμό της κατανομής της $X | X + Y = y - x$ ξέροντας ότι $X \sim N(0, s - r), Y \sim N(0, t - s)$ και οι X, Y είναι ανεξάρτητες. Βρίσκουμε την από κοινού πυκνότητα των $(X, X + Y)$ και χρησιμοποιούμε την Πρόταση 2.12.

5.5 Γράφουμε τη X ως όριο αθροισμάτων Riemann. Έπειτα χρησιμοποιούμε την Άσκηση 5.3 και την Πρόταση Α'.13 στο Παράρτημα Α'. Βέβαια η μέση τιμή και η διασπορά της X υπολογίζονται και άμεσα με χρήση του Θεωρήματος Fubini και της παρατήρησης ότι $X^2 = \int_0^t \int_0^t B(s)B(r) ds dr$.

5.6 Το Θεώρημα Fubini δίνει άμεσα ότι $\mathbf{E}(Y) = t^2/2$. Έπειτα, γράφουμε

$$Y^2 = \int_0^t \int_0^t B^2(s)B^2(r) ds dr,$$

και χρησιμοποιώντας το Θεώρημα Fubini και την Άσκηση 5.2 βρίσκουμε ότι $\mathbf{E}(Y^2) = 7t^4/12$. Άρα $\text{Var}(Y) = t^4/3$.

5.7 Με χρήση τού ορισμού, όπως στο (i) της Πρότασης 5.7.

5.9 Συνδυάζουμε τις Προτάσεις 5.7, 5.16. Η εικόνα είναι ότι η B , ξεκινώντας από το σημείο $(t_0, B(t_0))$, θα αρχίσει αμέσως να ταλαντώνεται, πάνω και κάτω από την ευθεία $y = B(t_0)$, και δεν θα επιτρέψει τη δημιουργία τοπικού ακρότατου στο t_0 .

5.10 Αρκεί να δειχθεί για $t_0 = 0$. Αν η B είναι διαφορίσιμη στο 0 με θετική πιθανότητα, τότε επειδή

$$\mathbf{P}\left(\lim_{t \rightarrow 0} \frac{B(t)}{t} \text{ υπάρχει στο } \mathbb{R}\right) = \lim_{C \rightarrow \infty} \mathbf{P}\left(\lim_{t \rightarrow 0} \frac{B(t)}{t} \text{ υπάρχει και ανήκει στο } (-C, C)\right),$$

Υποδείξεις για επιλεγμένες ασκήσεις

υπάρχουν $\varepsilon, C \in (0, \infty)$ ώστε

$$\mathbf{P}\left(\lim_{t \rightarrow 0} \frac{B(t)}{t} \text{ υπάρχει και ανήκει στο } (-C, C)\right) > \varepsilon > 0.$$

Το γεγονός στην τελευταία πιθανότητα περιέχεται στο $\liminf_k A_k$ όπου $A_k := \{|B_{1/k}|/(1/k) < C\}$ για κάθε $k \in \mathbb{N}^+$. Όμως

$$\mathbf{P}(\liminf_k A_k) \leq \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{P}(A_k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{P}(|B(1)| < C/\sqrt{k}) = 0.$$

Μια εναλλακτική λύση προκύπτει με χρήση τής ιδιότητας αντιστροφής χρόνου (Πρόταση 5.10).

5.12 Η συνάρτηση $G : C[0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ με $G(f) := \int_0^1 f^2(t) dt$ είναι συνεχής, οπότε η (5.18) δίνει ότι

$$G(S_n^*) \Rightarrow G(B),$$

όπου B είναι μια τυπική κίνηση Brown. Υπολογίζουμε ότι

$$\begin{aligned} G(S_n^*) &= \frac{1}{n} \int_0^1 S^2(nt) dt = \frac{1}{n^2} \int_0^n S^2(r) dr = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \int_{k-1}^k (S_{k-1} + \{r - (k-1)\})(S_k - S_{k-1})^2 dr \\ &= \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \int_0^1 \{S_{k-1} + w(S_k - S_{k-1})\}^2 dw = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n S_k^2 + \frac{1}{3n^2} \sum_{k=1}^n X_k^2 - \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n X_k S_k. \end{aligned}$$

Η λύση ολοκληρώνεται με χρήση τού λήμματος Slutsky.

Κεφάλαιο 6

6.4 Για κάθε $t > 0$ ισχύει $\{T_a \leq t\} = \{M(t) \geq a\}$ με $M(t) := \sup\{B(s) : s \in [0, t]\}$.

Κεφάλαιο 7

7.5 Χρησιμοποιούμε την Πρόταση 2.13, δεσμεύουμε ως προς T_a .

Κεφάλαιο 8

8.1 Αρκεί να δειχθεί ότι για κάθε διάστημα I με ρητά άκρα, με πιθανότητα 1, η κίνηση Brown δεν είναι μονότονη στο I . Για $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ σημεία τού I ,

$$\{B \text{ αύξουσα στο } I\} \subset \{B(t_2) - B(t_1) \geq 0, B(t_3) - B(t_2) \geq 0, \dots, B(t_n) - B(t_{n-1}) \geq 0\}.$$

Το τελευταίο σύνολο έχει πιθανότητα 2^{-n} . Παίρνουμε $n \rightarrow \infty$.

8.2 Έστω A_n το άθροισμα στην (8.10). Υπολογίζουμε την $\mathbf{E}(A_n^2)$ χρησιμοποιώντας την ιδιότητα τής ανεξαρτησίας των προσανξήσεων για την κίνηση Brown και το ότι $B_t - B_s \stackrel{d}{=} |t-s|^{1/2} Z$ για οποιαδήποτε $s, t \geq 0$ και με $Z \sim \mathcal{N}(0, 1)$

8.4 (α) $\mathbf{E}(L_n) = \sum_{j=1}^{k(n)} \sqrt{t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)}} \mathbf{E}|B_1| \geq \mathbf{E}|B_1| \sum_{j=1}^{k(n)} (t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)}) / \|\Delta_n\|^{1/2}$.

(β) Η L_n είναι άθροισμα ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών, οπότε

$$\text{Var}(L_n) = \sum_{j=1}^{k(n)} \text{Var}\left(\sqrt{t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)}} |B_1|\right) = \sum_{j=1}^{k(n)} (t_j^{(n)} - t_{j-1}^{(n)}) (1 - A^2) = (1 - A^2)t.$$

(γ) $\mathbf{P}(L_n < \mathbf{E}(L_n)/2) \leq \mathbf{P}(|L_n - \mathbf{E}(L_n)| > \mathbf{E}(L_n)/2) \leq \dots$

(δ) Ερώτημα (γ) και πρώτο λήμμα Borel-Cantelli.

Αυτό που συμβαίνει είναι ότι η L_n έχει μεγάλη μέση τιμή και μικρή διασπορά. Άρα είναι πολύ συγκεντρωμένη γύρω από τη μέση της τιμή. Με πιθανότητα σχεδόν ένα θα παίρνει μεγάλες τιμές (κοντά στη μέση της τιμή).

8.6 Με χρήση τού ορισμού προκύπτει ότι η κύμανση τής X στο $[a, b]$ είναι φραγμένη από το $\int_a^b |u(s, \omega)| ds$.

Κεφάλαιο 9

9.2 $\mathbf{E}(I(a)) = 0$. Άρα

$$\begin{aligned} \text{Var}(I(a)) &= \mathbf{E}(I(a)^2) = \mathbf{E}\left(\int_0^1 e^{2aB_s} ds\right) = \int_0^1 \mathbf{E}(e^{2aB_s}) ds = \int_0^1 \mathbf{E}(e^{2a\sqrt{s}B_1}) ds \\ &= \int_0^1 e^{2a^2 s} ds = (e^{2a^2} - 1)/(2a^2). \end{aligned}$$

9.3

$$\mathbf{E}\left(\int_0^1 e^{2aB_s^2} ds\right) = \int_0^1 \mathbf{E}(e^{2asB_1^2}) ds.$$

Για $Z \sim N(0, 1)$ και $\lambda \in \mathbb{R}$,

$$\mathbf{E}(e^{\lambda Z^2}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} e^{\lambda x^2} e^{-\frac{1}{2}x^2} dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mathbb{R}} e^{-\frac{1}{2}(1-2\lambda)x^2} dx = \begin{cases} \infty & \text{αν } 1 - 2\lambda \leq 0, \\ \frac{1}{\sqrt{1-2\lambda}} & \text{αν } 1 - 2\lambda > 0. \end{cases}$$

Άρα το πιο πάνω ολοκλήρωμα είναι πεπερασμένο ακριβώς όταν $a \leq 1/4$.

9.5 Η ισομετρία Itô για την ανέλιξη $f+g$ είναι $\|I(f+g)\|_{L^2(\mathbf{P})} = \|f+g\|_{L^2(\lambda \times \mathbf{P})}$. Γράφουμε τις L^2 -νόρμες ως εσωτερικά γινόμενα και χρησιμοποιούμε τη διγραμμικότητα.

9.6 Όπως στα Παραδείγματα 9.11, 9.12.

9.7 Έστω L_n το άθροισμα από το παράδειγμα και R_n, M_n τα δύο νέα αθροίσματα τής άσκησης. Τότε η ποσότητα $R_n - L_n$ συγκλίνει στο t . Για το δεύτερο όριο, δείχνουμε ότι η $M_n - L_{n+1}$ συγκλίνει στο $t/2$.

9.8 Το δείχνουμε πρώτα για f κλιμακωτή και αριστερά συνεχή (οπότε είναι στοιχείο τού \mathcal{H}_0^2) και έπειτα χρησιμοποιούμε το ότι οι αριστερά συνεχείς κλικακωτές συναρτήσεις είναι πυκνές στον $L^2[a, b]$ (Πρόταση 11.29 στο Κουμουλλής και Νεγρεπόντης (1991), κοιτώντας την απόδειξη, βλέπουμε ότι μπορούμε να πάρουμε τις κλιμακωτές που κάνουν την προσέγγιση να είναι αριστερά συνεχείς).

Κεφάλαιο 10

10.1 Το υπολογιστικό κομμάτι πάει ως εξής. Για $0 \leq s \leq t$,

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(Y_t | \mathcal{F}_s) - Y_s &= \mathbf{E}(Y_t - Y_s | \mathcal{F}_s) = \mathbf{E}\left(\left(\int_s^t X dB_r\right)^2 + 2 \int_0^s X dB_r \int_s^t X dB_r - \int_s^t X^2 dr \mid \mathcal{F}_s\right) \\ &= \mathbf{E}\left(\left(\int_s^t X dB_r\right)^2 - \int_s^t X^2 dr \mid \mathcal{F}_s\right) + 2 \int_0^s X dB_r \mathbf{E}\left(\int_s^t X dB_r \mid \mathcal{F}_s\right) \\ &= 0 + 0 = 0. \end{aligned}$$

Χρησιμοποιούμε την Πρόταση 9.13 (όλα της τα μέρη).

Η Y είναι με πιθανότητα 1 συνεχής γιατί στον ορισμό της το μεν στοχαστικό ολοκλήρωμα είναι συνεχής συνάρτηση τού t (Θεώρημα 10.2), το δε ολοκλήρωμα Lebesgue είναι συνεχής συνάρτηση τού t , όπως δίνει το θεώρημα κυριαρχημένης σύγκλισης.

Κεφάλαιο 11

11.1 Θεωρούμε τις ανεξίξεις Y, Z που ορίζονται ως

$$\begin{aligned} Y_t &:= \int_0^t u(s, \omega) ds, \\ Z_t &:= \int_0^t v(s, \omega) dB_s \end{aligned}$$

Υποδείξεις για επιλεγμένες ασκήσεις

για κάθε $t \geq 0$. Τότε για κάθε $t \geq 0$ έχουμε από την Άσκηση 8.5,

$$0 = \langle X, X \rangle_{[0,t]} = \langle Z, Z \rangle_{[0,t]}$$

Από την Πρόταση 8.6 παίρνουμε ότι, με πιθανότητα 1, $Z_t = 0$ για κάθε $t \geq 0$. Τώρα από την ισομετρία Itô παίρνουμε το συμπέρασμα για τη v . Άρα $0 = X_t = X_0 + Y_t$ για κάθε $t \geq 0$. Παραγωγίζουμε ως προς t χρησιμοποιώντας το Θεώρημα 14.13 από το Κουμουλλής και Νεγρεπόντης (1991).

Κεφάλαιο 12

12.1 $d(B_t^{n+1}) = (n+1)B_t^n dB_t + \frac{1}{2}n(n+1)B_t^{n-1} dt.$

12.2 Παίρνουμε μέση τιμή στη σχέση τής προηγούμενης άσκησης.

Κεφάλαιο 14

14.2 Εφαρμόζουμε τον τύπο του Itô.

Βιβλιογραφία

- T. M. Apostol. *Mathematical analysis*. Addison Wesley Publishing Company, (1974).
- R. F. Bass. *Stochastic processes*, volume 33. Cambridge University Press, Cambridge, (2011).
- R. Durrett. *Stochastic calculus: A practical introduction*. Probability and Stochastics Series. CRC Press, Boca Raton, FL, (1996).
- R. Durrett. *Probability: theory and examples*. Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics. Cambridge University Press, Cambridge, fourth edition, (2010).
- A. Etheridge. *A course in financial calculus*. Cambridge University Press, Cambridge, (2002).
- G. B. Folland. *Real analysis: modern techniques and their applications*. John Wiley & Sons, second edition, (1999).
- T. H. Hildebrandt. *Introduction to the Theory of Integration*. Academic Press, New York, (1963).
- J. Jacod and P. Protter. *Probability essentials*. Universitext. Springer-Verlag, Berlin, second edition, (2003).
- F. John. *Partial differential equations, volume 1 of Applied Mathematical Sciences*. Springer-Verlag, New York, fourth edition, (1982).
- O. Kallenberg. *Foundations of modern probability*. Springer, third edition, (2021).
- I. Karatzas and S. E. Shreve. *Brownian motion and stochastic calculus*, volume 113 of *Graduate Texts in Mathematics*. Springer-Verlag, New York, second edition, (1991).
- P. Kloeden and E. Platen. *Numerical solution of stochastic differential equations*, volume 23 of *Applications of Mathematics*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, (1992).
- H.-H. Kuo. *Introduction to stochastic integration*. Universitext. Springer, New York, (2006).
- Γ. Κουμουλλής και Σ. Νεγρεπόντης. *Θεωρία Μέτρου*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, (1991).
- T. Mikosch. *Elementary stochastic calculus—with finance in view*, volume 6 of *Advanced Series on Statistical Science & Applied Probability*. World Scientific Publishing Co. Inc., River Edge, NJ, (1998).
- P. Mörters and Y. Peres. *Brownian motion*. With an appendix by Oded Schramm and Wendelin Werner. Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics. Cambridge University Press, Cambridge, (2010).
- Σ. Νεγρεπόντης, Σ. Γιωτόπουλος, και Ε. Γιαννακούλιας. *Απειροστικός Λογισμός*. Εκδόσεις Αίθρα, Αθήνα, (1992).
- Σ. Νεγρεπόντης, Θ. Ζαχαριάδης, Ν. Καλαμίδας, και Β. Φαρμάκη. *Γενική τοπολογία και συναρτησιακή ανάλυση*.

- B. Øksendal. *Stochastic differential equations. An introduction with applications*. Universitext. Springer-Verlag, Berlin, sixth edition, (2003).
- P. E. Protter. *Stochastic integration and differential equations*, volume 21 of *Stochastic Modelling and Applied Probability*. Springer-Verlag, Berlin, (2005). Second edition. Version 2.1, Corrected third printing.
- D. Revuz and M. Yor. *Continuous martingales and Brownian motion*, volume 293 of *Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften [Fundamental Principles of Mathematical Sciences]*. Springer-Verlag, Berlin, third edition, (1999).
- S. E. Shreve. *Stochastic calculus for finance. II. Continuous-time models*. Springer Finance. Springer-Verlag, New York, (2004).
- Ι. Σπηλιώτης. *Στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις. Με εφαρμογές στα χρηματοοικονομικά*. Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, (2004).
- J. M. Steele. *Stochastic calculus and financial applications*, volume 45 of *Applications of Mathematics (New York)*. Springer-Verlag, New York, (2001).
- D. Williams. *Probability with martingales*. Cambridge Mathematical Textbooks. Cambridge University Press, Cambridge, (1991).
- P. Wilmott, S. Howison, and J. Dewynne. *The mathematics of financial derivatives: a student introduction*. Cambridge University Press, (1995).

Ευρετήριο ελληνικών όρων

- Άθροισμα Riemann-Stieltjes, 158
Αμερικανικά δικαιώματα, 140
Ανέλιξη Ornstein-Uhlenbeck, 123
Ανέλιξη Itô, 99
Αναπαράγον χαρτοφυλάκιο, 136
Ανισότητα Doob, 33, 41
Ανισότητα Jensen, 16
Ανοιχτή πώληση, 133
Απλό συμβόλαιο, 136
Αποδεκτό χαρτοφυλάκιο, 135
Αρχή τής ανάκλασης, 65
Ασιατικά δικαιώματα, 140
Ασυμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος, 32
Αυτοχρηματοδοτούμενο χαρτοφυλάκιο, 134
Γεωμετρική κίνηση Brown, 122
Γκαουσιανό διάνυσμα, 152
Δεσμευμένη μέση τιμή, 9
Διήθηση, 21, 40
Διακριτό στοχαστικό ολοκλήρωμα, 26
Δικαιώματα με φράγματα, 140
Ευρωπαϊκό δικαίωμα αγοράς, 137
Ευρωπαϊκό δικαίωμα πώλησης, 137
Εκδοχή ανέλιξης, 95
Εκδοχή κλάσης τυχαίων μεταβλητών, 7
Εξίσωση Black-Scholes, 142
Εξίσωση θερμότητας, 144
Επαυξημένη διήθηση, 54
Ημερομηνία λήξης, 136, 137
Θεώρημα Donsker, 62
Θεώρημα επιλεκτικής διακοπής, 28, 41
Θεώρημα συνέχειας τού Lévy, 156
Ιδιότητα Markov, 43
Ισομετρία Itô, 85, 87
Ισχυρή ιδιότητα Markov, 44
Κίνηση Brown, d -διάστατη, 59
Κάλπη τού Ρόγια, 23
Κατανομές πεπερασμένης διάστασης, 38
Κατανομή ανέλιξης, 38
Κίνηση Brown, 49
Κίνηση Brown με τάση, 72
Κύμανση, 77
Λεπτότητα διαμέρισης, 77
Μετρήσιμη ανέλιξη, 38, 84
Μετρήσιμο ορθογώνιο, 38
Μη διακρίσιμες ανέλιξεις, 38
Μονοπάτι ανέλιξης, 37
Νόμος τού επαναλαμβανόμενου λογαρίθμου, 57
Νόμος τόξου ημιτόνου, 72
Ορθογώνια προβολή, 157
Πλήρης διήθηση, 54
Πλήρωση χώρου πιθανότητας, 54
Πολυδιάστατη κίνηση Brown, 59
Προβλέψιμη ακολουθία, 25
Προοδευτικά μετρήσιμη ανέλιξη, 45
Προσαρμοσμένη ακολουθία, 21
Προσαρμοσμένη ανέλιξη, 40
σ-άλγεβρα παραγόμενη από οικογένεια συνόλων, 3
σ-άλγεβρα παραγόμενη από συναρτήσεις, 5
Στοχαστική ανέλιξη, 37
Στοχαστική διαφορική εξίσωση, 121
Σύγκλιση κατά κατανομή, 155
Συμμετρικός απλός τυχαίος περίπατος, 21
Τετραγωνική κύμανση, 77
Τιμή άσκησης, 137
Τμήμα διάχυσης, 107
Τμήμα τάσης, 107
Τροποποίηση ανέλιξης, 38
Τροχιά ανέλιξης, 37
Τυπική κίνηση Brown, 49
Τύπος τού Itô, 103
Φραγμένη κύμανση, 84
Χρόνος διακοπής, 26, 41
Χώρος Hilbert, 17, 157
Χώρος με εσωτερικό γινόμενο, 157

Ευρετήριο ξενόγλωσσων όρων

Arbitrage, 134

Cauchy, κατανομή, 72

Local martingale, 42

Lookback δικαιώματα, 140

Martingale, 21, 41

Martingale του Doob, 23

Ornstein-Uhlenbeck, ανέλιξη, 123

Submartingale, 21, 41

Supermartingale, 21, 41

Μετάφραση ορολογίας

Άλγεβρα	Algebra
Αναπαράγον χαρτοφυλάκιο	Replicating portfolio
Ανέλιξη	Process
Ανοιχτή πώληση	Short selling
Αποδεκτό χαρτοφυλάκιο	Admissible portfolio
Αρχή της ανάκλασης	Reflection principle
Αυτοχρηματοδοτούμενο χαρτοφυλάκιο	Self-financing portfolio
Γκαουσιανό διάνυσμα	Gaussian vector
Δεσμευμένη μέση τιμή	Conditional expectation
Διάχυση	Diffusion
Διήθηση	Filtration
Δικαίωμα	Option
Δικαίωμα αγοράς	Call option
Δικαίωμα πώλησης	Put option
Δικαίωμα με φράγμα	Barrier option
Εξίσωση θερμότητας	Heat equation
Επαυξημένη διήθηση	Augmented filtration
Επιλεκτική διακοπή	Optional stopping
Εσωτερικό γινόμενο	Inner product
Ημερομηνία λήξης	Expiration date
Ισομετρία	Isometry
Κατανομές πεπερασμένης διάστασης	Finite dimensional distributions
Κατανομή	Distribution
Κάλπη του Pólya	Pólya urn
Κίνηση Brown	Brownian motion
Κύμανση	Variation
Μετρήσιμη ανέλιξη	Measurable process
Μη διακρίσιμες ανελιξεις	Indistinguishable processes
Μονοπάτι	Path
Νόμος επαναλαμβανόμενου λογαρίθμου	Law of the iterated logarithm
Ορθογώνια προβολή	Orthogonal projection
Προβλέψιμη ακολουθία	Predictable sequence
Προσαρμοσμένη ακολουθία	Adapted sequence
Στοχαστική ανέλιξη	Stochastic process
Στοχαστική διαφορική εξίσωση	Stochastic differential equation
Σύγκλιση κατά κατανομή	Convergence in distribution
Τάση	Drift
Τιμή άσκησης	Exercise price
Τετραγωνική κύμανση	Quadratic variation
Τροποποίηση	Modification
Τυπική κίνηση Brown	Standard Brownian motion
Τυχαίος περίπατος	Random walk
Χαρτοφυλάκιο	Portfolio
Χρόνος διακοπής	Stopping time