

Εξηγήστε γιατί οι ενεργές διατομές (δηλαδή οι πιθανότητες) αλληλεπίδρασης σε μια ορισμένη ενέργεια είναι $\sigma(\pi^+n) \approx \sigma(\pi^-p)$ στη σκέδαση πιονίων από νουκλεόνια, αλλά $\sigma(K^+n) \neq \sigma(K^-p)$ στη σκέδαση καονίων από νουκλεόνια.

Οι αντιδράσεις πιονίου-νουκλεονίου διατηρούν την παραδοξότητα και συνεπώς πραγματοποιούνται με την ισχυρή αλληλεπίδραση, έχοντας τους ίδιους **ολικούς** κβαντικούς αριθμούς ισοσπίν και υπερφορτίου:

	π^+	n	π^-	p
I	1	1/2	1	1/2
I_3	+1	-1/2	-1	+1/2
(I, I_3)	(1/2, + 1/2)		(1/2, - 1/2)	
	ή	(3/2, + 1/2)	ή	(3/2, - 1/2)
S	0	0	0	0
B	0	+1	0	+1
Y	+1		+1	

Οι αντιδράσεις πιονίου-νουκλεονίου **δεν** διατηρούν την παραδοξότητα και συνεπώς πραγματοποιούνται με την ασθενή αλληλεπίδραση, έχοντας τον ίδιο **ολικό** κβαντικό αριθμό ισοσπίν αλλά διαφορετικό **ολικό** κβαντικό υπερφορτίου:

	K^+	n	K^-	p
I	1/2	1/2	1/2	1/2
I_3	+1/2	-1/2	-1/2	+1/2
(I, I_3)	(0,0)		(0,0)	
	ή	(1,0)	ή	(1,0)
S	+1	0	-1	0
B	0	+1	0	+1
Y	+2		0	

Τα μέλη της βαρυονικής δεκαπλής ($J^P=3/2^+$) διασπώνται συνήθως μετά από 10^{-23} sec σε ένα μέλος της βαρυονικής οκταπλής ($J^P=1/2^+$) και ένα ψευδοβαθμωτό μεσόνιο ($J^P=0^-$). Π.χ. $\Delta^{++} \rightarrow p + \pi^+$. Αυτές οι διασπάσεις γίνονται με την ισχυρή αλληλεπίδραση κι επομένως, εκτός από το ηλεκτρικό φορτίο, διατηρούν και την παραδοξότητα.

(α) Γράψτε όλους τους τρόπους διάσπασης των βαρυονίων $\Delta^-(3/2^+)$, $\Sigma^+(3/2^+)$ και $\Xi^-(3/2^+)$ και αιτιολογήστε τον κάθε τρόπο.

(β) Ελέγξτε ποιες από τις διασπάσεις που προτείνετε στο ερώτημα **(α)** είναι ενεργειακά επιτρεπτές.

Οι μάζες (σε MeV) και τα λοιπά χαρακτηριστικά βαρυονίων και ψευδοβαθμωτών μεσονίων (παραδοξότητα, ισοσπίν, περιεχόμενο γεύσεων) δίνονται στους ακόλουθους πίνακες.

Βαρυονική δεκάδα

$J^P = 3/2^+$	S	I	Μέλη
$\Delta(1232)$ <i>ddd, udd, uud, uuu</i>	0	3/2	4 $\Delta^-, \Delta^0, \Delta^+, \Delta^{++}$
$\Sigma(1384)$ <i>dds, uds, uus</i>	-1	1	3 $\Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+$
$\Xi(1533)$ <i>dss, uss</i>	-2	1/2	2 Ξ^-, Ξ^0
$\Omega(1672)$ <i>sss</i>	-3	0	1 Ω^-

Βαρυονική οκτάδα

$J^P = 1/2^+$	S	I	Μέλη
$N(939)$ <i>udd, uud</i>	0	1/2	2 n, p
$\Sigma(1193)$ <i>dds, uds, uus</i>	-1	1	3 $\Sigma^-, \Sigma^0, \Sigma^+$
$\Lambda(1116)$ <i>uds</i>	-1	0	1 Λ
$\Xi(1318)$ <i>dss, uss</i>	-2	1/2	2 Ξ^-, Ξ^0

Καταστάσεις ψευδοβαθμωτών μεσονίων

$J^P = 0^-$	S	I	I_3	quarks
$\pi^+(140)$	0	1	+1	$u\bar{d}$
$\pi^0(135)$	0	1	0	$(d\bar{d} - u\bar{u})/\sqrt{2}$
$\pi^-(140)$	0	1	-1	$d\bar{u}$
$K^+(494)$	+1	1/2	1/2	$u\bar{s}$
$K^0(498)$	+1	1/2	-1/2	$d\bar{s}$
$K^-(494)$	-1	1/2	-1/2	$\bar{u}s$
$\bar{K}^0(498)$	-1	1/2	1/2	$\bar{d}s$
$\eta(549)$	0	0	0	$(d\bar{d} + u\bar{u} - 2s\bar{s})/\sqrt{6}$
$\eta'(958)$	0	0	0	$(d\bar{d} + u\bar{u} + s\bar{s})/\sqrt{3}$

(α) Το βαρυόνιο $\Delta^-(3/2^+)$ έχει μηδενική παραδοξότητα και με την ισχυρή αλληλεπίδραση μπορεί να διασπαστεί μόνο σε τελικές καταστάσεις με επίσης μηδενική συνολική παραδοξότητα. Υπάρχουν δύο δυνατότητες:

- 1) $\Delta^-(ddd) \rightarrow n(udd) + \pi^-(d\bar{u})$ ($Q=-1=0-1$, $S=0=0+0$, παραγωγή $u\bar{u}$),
- 2) $\Delta^-(ddd) \rightarrow \Sigma^-(dds) + K^0(d\bar{s})$ ($Q=-1=-1+0$, $S=0=-1+1$, παραγωγή $s\bar{s}$).

Το βαρυόνιο $\Sigma^+(3/2^+)$ έχει παραδοξότητα -1 , οπότε μπορεί να διασπαστεί ισχυρά μόνο σε τελικές καταστάσεις με παραδοξότητα επίσης -1 . Υπάρχουν τρεις δυνατότητες:

- 3) $\Sigma_{3/2}^+(uus) \rightarrow \Sigma_{1/2}^+(uus) + \pi^0(d\bar{d} - u\bar{u})$ ($Q=+1=1+0$, $S=-1=-1+0$, παραγωγή $d\bar{d}$ ή $u\bar{u}$),
- 4) $\Sigma_{3/2}^+(uus) \rightarrow \Lambda(uds) + \pi^+(u\bar{d})$ ($Q=+1=0+1$, $S=-1=-1+0$, παραγωγή $d\bar{d}$),
- 5) $\Sigma_{3/2}^+(uus) \rightarrow p(uud) + \bar{K}^0(\bar{d}s)$ ($Q=+1=1+0$, $S=-1=0-1$, παραγωγή $d\bar{d}$).

Το βαρυόνιο $\Xi^-(3/2^+)$ έχει παραδοξότητα -2 , οπότε μπορεί να διασπαστεί ισχυρά μόνο σε τελικές καταστάσεις με παραδοξότητα επίσης -2 . Υπάρχουν και πάλι τρεις δυνατότητες:

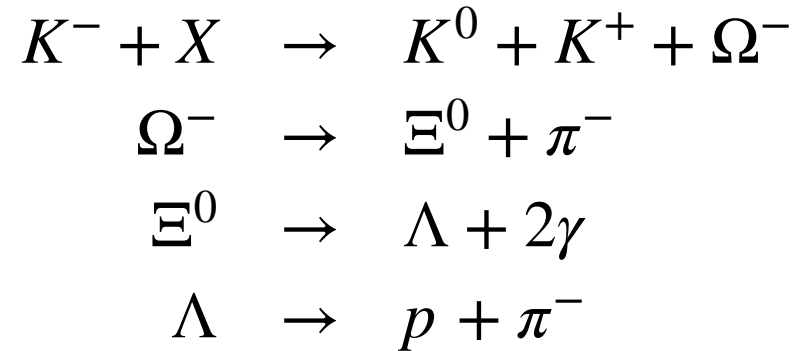
- 6) $\Xi_{3/2}^-(dss) \rightarrow \Xi_{1/2}^-(dss) + \pi^0(d\bar{d} - u\bar{u})$ ($Q=-1=-1+0$, $S=-2=-2+0$, παραγωγή $d\bar{d}$ ή $u\bar{u}$),
- 7) $\Xi_{3/2}^-(dss) \rightarrow \Sigma_{1/2}^-(dds) + \bar{K}^0(\bar{d}s)$ ($Q=-1=-1+0$, $S=-2=-2+0$, παραγωγή $d\bar{d}$),
- 8) $\Xi_{3/2}^-(dss) \rightarrow \Lambda(uds) + K^-(\bar{u}s)$ ($Q=-1=0-1$, $S=-2=-1-1$, παραγωγή $u\bar{u}$).

Σε όλες τις περιπτώσεις η διάσπαση γίνεται με παραγωγή ζεύγους κουάρκ-αντικουάρκ από ένα γλυνόνιο και αναδιάταξη των γεύσεων, δηλαδή η αλληλεπίδραση είναι όντως ισχυρή.

(β) Ενεργειακά επιτρεπτές είναι εκείνες οι διασπάσεις στις οποίες η μάζα M του μητρικού σωματιδίου είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών m_1+m_2 των θυγατρικών σωματιδίων. Για τις παραπάνω διασπάσεις,

- 1) $M=1232 \text{ MeV}, m_1+m_2=(939+140) \text{ MeV}=1079 \text{ MeV}$ (επιτρέπεται), $\Delta^-(ddd) \rightarrow n(udd) + \pi^-(d\bar{u})$
- 2) $M=1232 \text{ MeV}, m_1+m_2=(1193+498) \text{ MeV}=1691 \text{ MeV}$ (απαγορεύεται), $\Delta^-(ddd) \rightarrow \Sigma^-(dds) + K^0(d\bar{s})$
- 3) $M=1384 \text{ MeV}, m_1+m_2=(1193+135) \text{ MeV}=1328 \text{ MeV}$ (επιτρέπεται), $\Sigma_{3/2}^+(uus) \rightarrow \Sigma_{1/2}^+(uus) + \pi^0(d\bar{d} - u\bar{u})$
- 4) $M=1384 \text{ MeV}, m_1+m_2=(1116+140) \text{ MeV}=1256 \text{ MeV}$ (επιτρέπεται), $\Sigma_{3/2}^+(uus) \rightarrow \Lambda(uds) + \pi^+(u\bar{d})$
- 5) $M=1384 \text{ MeV}, m_1+m_2=(939+498) \text{ MeV}=1437 \text{ MeV}$ (απαγορεύεται), $\Sigma_{3/2}^+(uus) \rightarrow p(uud) + \bar{K}^0(\bar{d}s)$
- 6) $M=1533 \text{ MeV}, m_1+m_2=(1318+135) \text{ MeV}=1453 \text{ MeV}$ (επιτρέπεται), $\Xi_{3/2}^-(dss) \rightarrow \Xi_{1/2}^-(dss) + \pi^0(d\bar{d} - u\bar{u})$
- 7) $M=1533 \text{ MeV}, m_1+m_2=(1193+498) \text{ MeV}=1691 \text{ MeV}$ (απαγορεύεται), $\Xi_{3/2}^-(dss) \rightarrow \Sigma_{1/2}^-(dds) + \bar{K}^0(\bar{d}s)$
- 8) $M=1533 \text{ MeV}, m_1+m_2=(1116+494) \text{ MeV}=1610 \text{ MeV}$ (απαγορεύεται). $\Xi_{3/2}^-(dss) \rightarrow \Lambda(uds) + K^-(\bar{u}s)$

Το βαρυόνιο Ω^- ανακαλύφθηκε σε αντιδράσεις όπως οι ακόλουθες:



(α) Βρείτε το ηλεκτρικό φορτίο και την παραδοξότητα του σωματιδίου X και προτείνετε την ταυτότητά του.

(β) Προσδιορίστε το είδος της αλληλεπίδρασης που είναι υπεύθυνη για κάθε αντίδραση στην παραπάνω αλυσίδα παραγωγής και διάσπασης του Ω^- .

(α) Σε επίπεδο κουάρκ η παραγωγή του βαρυονίου Ω^- αναλύεται ως εξής:

	K^-	$+$	X	$\rightarrow$	K^0	$+$	K^+	$+$	Ω^-
	$\bar{u}s$				$d\bar{s}$		$u\bar{s}$		sss
Q :	-1				0		+1		-1
B :	0				0		0		+1
S :	-1				+1		+1		-3

Από τους τρεις κβαντικούς αριθμούς, το φορτίο Q και ο βαρυονικός αριθμός B πρέπει οπωσδήποτε να διατηρούνται, συνεπώς $Q=+1$ και $B=+1$. Οι επιλογές που μένουν για το X είναι το πρωτόνιο, το Δ^+ και το Σ^+ . Αλλά το Δ^+ και το Σ^+ έχουν χρόνους ζωής της τάξης των 10^{-23} sec και δεν προλαβαίνουν να αντιδράσουν με το καόνιο. Άρα το X πρέπει να είναι πρωτόνιο, δηλαδή $S=0$, οπότε και η παραδοξότητα διατηρείται.

(β) Εφόσον η παραδοξότητα διατηρείται, η παραγωγή του Ω^- γίνεται με την ισχυρή αλληλεπίδραση:

$$\begin{array}{ccccccc} K^- & + & p & \rightarrow & K^0 & + & K^+ & + & \Omega^- \\ \bar{u}s & & uud & & d\bar{s} & & u\bar{s} & & sss \end{array} \quad (u\bar{u} \rightarrow gg \rightarrow s\bar{s} s\bar{s}) \quad \text{ισχυρή}$$

Για τις συνακόλουθες διασπάσεις:

$$\begin{array}{ccccccc} \Omega^- & \rightarrow & \Xi^0 & + & \pi^- & & \\ sss & & uss & & d\bar{u} & & \end{array} \quad (s \rightarrow u + W^- \rightarrow u + d\bar{u}) \quad \text{ασθενής}$$

$$\begin{array}{ccccccc} \Xi^0 & \rightarrow & \Lambda & + & 2\gamma & & \\ uss & & uds & & & & \end{array} \quad (s \rightarrow u + W^- \rightarrow u + d\bar{u} \rightarrow d + 2\gamma) \quad \text{ασθενής} + \text{H/M}$$

$$\begin{array}{ccccccc} \Lambda & \rightarrow & p & + & \pi^- & & \\ uds & & uud & & d\bar{u} & & \end{array} \quad (s \rightarrow u + W^- \rightarrow u + d\bar{u}) \quad \text{ασθενής}$$

Θεωρήστε την αλυσίδα διασπάσεων

$$X_0 \rightarrow X_1 + X_2 \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu + \pi^0 \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

και υποθέστε ενεργές μόνο τις 3 ελαφρότερες γεύσεις κουάρκ.

α. (50%) Προτείνετε τη δομή των τριών σωματιδίων $X_{0,1,2}$ και ταυτοποιήστε τις αλληλεπιδράσεις που είναι υπεύθυνες για την αλυσίδα διασπάσεων.

α. Οι διασπάσεις $X_1 \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ και $X_2 \rightarrow \pi^0 \mu^- \bar{\nu}_\mu$ είναι ηλεκτρικά συζυγείς. Συνεπώς το X_2 πρέπει να είναι το αντισωματίδιο του X_1 . Εξάλλου, η παρουσία του ζεύγους μιονίου-νετρίνου υποδηλώνει την παρουσία ενός μποζονίου W^+ στη διάσπαση του X_1 κι ενός W^- στη διάσπαση του X_2 , άρα αυτά τα δύο σωματίδια διασπώνται με την ασθενή αλληλεπίδραση.

Οι δύο αυτές διασπάσεις είναι λοιπόν συμμετρικές, οπότε μελετάμε μόνο την $X_1 \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$. Το ουδέτερο πιόνιο είναι μίγμα καταστάσεων $u\bar{u}$ και $d\bar{d}$. Εφόσον υποθέτουμε ενεργές μόνο τις ελαφρότερες γεύσεις u, d, s , θεωρούμε το πιόνιο σε μια αμιγή κατάσταση $u\bar{u}$, ώστε το φορτίο της επάνω γεύσης να μπορεί να συνδυαστεί με το αντίθετο φορτίο μιας από τις δύο κάτω γεύσεις και να εξισορροπήσει το φορτίο του μποζονίου W^+ . Επομένως, το κουάρκ u πρέπει αρχικά να συνδυάζεται με ένα αντικουάρκ κάτω γεύσης, το οποίο θα διασπαστεί σε ένα αντικουάρκ $\bar{u}$ κι ένα μποζόνιο W^+ , σχηματίζοντας το π^0 και το ζεύγος $\mu^+ \bar{\nu}_\mu$ στην τελική κατάσταση. Το αρχικό αντικουάρκ κάτω γεύσης δεν μπορεί να είναι $\bar{d}$, γιατί τότε το X_1 θα είχε δομή $u\bar{d}$, δηλαδή θα ήταν ένα π^+ που δεν έχει αρκετή μάζα για να διασπαστεί σε $\pi^0 \mu^+ \nu_\mu$. Άρα το αρχικό αντικουάρκ κάτω γεύσης πρέπει να είναι $\bar{s}$, οπότε το X_1 έχει δομή $u\bar{s}$, δηλαδή είναι ένα μεσόνιο K^+ και συνεπώς το X_2 είναι ένα μεσόνιο K^- με δομή $\bar{u}s$. $K^+ = u\bar{s} \rightarrow u + \bar{u}W^+ \rightarrow u\bar{u} + W^+ = \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$

Το X_0 πρέπει να περιέχει τα δύο παράδοξα κουάρκ που διανέμονται στα δύο καόνια με τη διάσπαση $X_0 \rightarrow K^+ K^-$. Αφού λοιπόν περιέχει ένα ζεύγος κουάρκ-αντικουάρκ, πρέπει να είναι ένα μεσόνιο με δομή $s\bar{s}$. Το μεσόνιο αυτό υπάρχει και είναι το φ με μάζα 1020 MeV. Η διάσπασή του σε δύο καόνια είναι ενεργειακά επιτρεπτή και μπορεί να γίνει μέσω ενός γλουονίου που διακλαδίζεται σε ένα ζεύγος $u\bar{u}$, με τα δύο επάνω κουάρκ να συνδυάζονται στη συνέχεια με τα δύο παράδοξα κουάρκ και να σχηματίζουν τα δύο καόνια. Άρα η διάσπαση του φ γίνεται (κυρίως) με την ισχυρή αλληλεπίδραση.

$$\varphi = s\bar{s} \rightarrow s\bar{s} + g \rightarrow s\bar{s} + u\bar{u} \rightarrow u\bar{s} + \bar{u}s = K^+ + K^-$$

Δίνεται η αντίδραση



στην οποία δύο άγνωστα αλλά σταθερά αδρόνια x_1 και x_2 συγκρούονται και παράγουν πέντε νέα άγνωστα αδρόνια $y_1, \dots, y_5$. Η αρχική κατάσταση έχει κβαντικούς αριθμούς ισοσπίν και παραξενιάς $(I, I_3, S) = (1, +1, 0)$, ενώ η τελική κατάσταση έχει τους κβαντικούς αριθμούς $(I, I_3, S) = (2, 0, +2)$.

α. (50%) Προτείνετε τις ταυτότητες των αδρονίων που συμμετέχουν στην αντίδραση.

α. Από την τριγωνική ανισότητα $|I(x_1) - I(x_2)| \leq I \leq I(x_1) + I(x_2)$ και τη συνθήκη $I_3 = I_3(x_1) + I_3(x_2) \leq I$, το ισοσπίν (I, I_3) της αρχικής κατάστασης είναι συμβατό μόνο με την επιλογή $I(x_1) = I(x_2) = 1/2$, $I_3(x_1) = I_3(x_2) = +1/2$ που για σταθερά αδρόνια $x_{1,2}$ σημαίνει ότι και τα δύο είναι πρωτόνια. Αυτή η επιλογή είναι αποκλειστική (δεν υπάρχει άλλη).

Στην τελική κατάσταση μπορούμε να υποθέσουμε ότι έχουμε πάλι δύο νουκλεόνια $y_{1,2}$ όπως στην αρχική, ώστε να διατηρείται ο βαρυονικός αριθμός, τα οποία έχουν συνολικό ισοσπίν $1/2$ το καθένα και συνεπώς, από την τριγωνική ανισότητα, έχουν μαζί και τα δύο συνολικό ισοσπίν 0 ή 1 . Για να πάμε σε συνολικό ισοσπίν 2 που δίνεται στην εκφώνηση, μπορούμε να υποθέσουμε τα δύο νουκλεόνια να βρίσκονται στην κατάσταση $(I, I_3) = (1, 0)$ ή $(0, 0)$, δηλαδή το ένα είναι πρωτόνιο με $I_3 = +1/2$ και το άλλο νετρόνιο με $I_3 = -1/2$, και μετά να επιλέξουμε ένα τρίτο αδρόνιο με $(I, I_3) = (1, -1)$. Ένα τέτοιο αδρόνιο είναι το αρνητικό πιόνιο, οπότε $y_3 = \pi^-$. Με αυτές τις επιλογές, η σύνθεση του ισοσπίν μέσω της τριγωνικής ανισότητας ανάμεσα στο ισοσπίν του ζεύγους νουκλεονίων και το ισοσπίν του πιονίου επιτρέπει τις καταστάσεις $(I, I_3) = (2, -1)$ ή $(1, -1)$. Επιπλέον έχουμε δύο ακόμη αδρόνια με άθροισμα τρίτων προβολών ισοσπίν $+1$, ώστε η συνολική τρίτη προβολή ισοσπίν της τελικής κατάστασης να είναι 0 , τα οποία φέρουν συνολικά δύο μονάδες παραξενιάς που λείπουν από την αρχική κατάσταση. Οι συνθήκες αυτές ικανοποιούνται υποθέτοντας αυτά τα αδρόνια να είναι δύο θετικά καόνια, οπότε $y_4 = y_5 = K^+$. Το ισοσπίν των δύο καονίων μαζί μπορεί να είναι 0 ή 1 , οπότε η τριγωνική ανισότητα ανάμεσα στο ισοσπίν του ζεύγους καονίων και το ισοσπίν των αδρονίων $y_{1,2,3}$ επιτρέπει το συνολικό ισοσπίν της τελικής κατάστασης να πάρει την τιμή 2 . Άρα μια αντίδραση με αρχική και τελική κατάσταση που έχουν τους δοσμένους κβαντικούς αριθμούς, οι οποίοι επιβάλλουν και διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου, είναι η ακόλουθη:

$$p + p \rightarrow p + n + \pi^- + 2K^+.$$

Προφανώς, αντίθετα με την αρχική κατάσταση, η επιλογή της τελικής κατάστασης δεν είναι μονοσήμαντη. Π.χ. η ακόλουθη αντίδραση είναι επίσης αποδεκτή:

$$p + p \rightarrow n + n + \pi^0 + 2K^+.$$