

1. ΤΟ ΑΤΟΜΟ ΚΑΙ Ο ΠΥΡΗΝΑΣ ΤΟΥ

1.1 Οι αρχές της ατομικής σκέψης.

1.1.1 Η ατομική αντίληψη στην αρχαία Ελλάδα.

Αν θεωρηθεί σωστή η άποψη, ότι η επιστήμη αρχίζει εκεί που σταματά η δοξασία, οι ρίζες της σύγχρονης ατομικής επιστήμης βρίσκονται στην αρχαία Ελλάδα του 6^{ου} π.Χ. αιώνα. Ιδιαίτερο ρόλο στην ανάπτυξη της ατομικής σκέψης έπαιξε η ιωνική φιλοσοφική σχολή, η οποία απελευθερώθηκε από κάθε είδος μυστικισμού και δεισιδαιμονίας, έθεσε ως στόχο την κατανόηση της φύσης και την εξήγηση των φαινομένων της. Οι κύριοι εκπρόσωποι αυτής της σχολής ήταν ο Θαλής ο Μιλήσιος (640-550 π.Χ.), ο Αναξίμανδρος (611 -547 π.Χ.), ο Αναξίμανδρος (585 - 525 π.Χ.) και ο Ηράκλειτος (540 -475 π.Χ.).

Ο Θαλής ο Μιλήσιος θεώρησε ότι η ύλη, παρά την πολυμορφία της, προέρχεται από ένα πρωταρχικό στοιχείο, το νερό, σε τρεις μορφές (νέφος, ύδωρ, γη), που αντιστοιχούν στις τρεις καταστάσεις της ύλης.

Ο Αναξίμανδρος ο Μιλήσιος προχώρησε ακόμη περισσότερο στη φιλοσοφική αφαίρεση θεωρώντας, ότι η ύλη προέρχεται από ένα "άπειρο και ανεξάντλητο" πρωταρχικό στοιχείο, το άπειρο. Τα πάντα προέρχονται από το άπειρο και τα πάντα καταλήγουν σ' αυτό. Η φιλοσοφία του Αναξίμανδρου είναι εξελικτική και λαμβάνει υπόψη τη δημιουργία, τη ζωή και το θάνατο όλων των πραγμάτων. Το άπειρο του Αναξίμανδρου υλοποιήθηκε στη φιλοσοφία του Αναξίμανδρου του Μιλήσιου και ο αέρας θεωρήθηκε ως η πηγή της ζωής στο σύμπαν. Για τον Αναξίμανδρου, όπως και για τον Θαλή, τα πάντα έχουν ζωή.

Ο Ηράκλειτος ο Εφέσιος δίδαξε τη μεταβλητότητα της ύλης ("πάντα ρεῖ, πάντα χωρεῖ ...") και θεώρησε ως αρχή των πάντων τη φωτιά (το πύρ). Με τη φωτιά ως πρωταρχικό στοιχείο, άπτονται από τη φιλοσοφία του, κατά τον Heisenberg, τα όρια της σύγχρονης φυσικής αντίληψης¹. Ο Ηράκλειτος, εισάγοντας το σχετικιστικό λογισμό στη φιλοσοφική σκέψη, αποτελεί το

¹ W. Heisenberg, *Physik und Philosophie*, Stuttgart, 1959: "Μπορεί να αναφερθεί σ' αυτό το σημείο, ότι η σύγχρονη φυσική πλησιάζει κατά κάποιον τρόπο εξαιρετικά τη διδασχία του Ηράκλειτου. Αν αντικατασταθεί η λέξη φωτιά με τη λέξη ενέργεια, μπορεί κανείς να αναπαράγει την έκφραση του Ηράκλειτου σχεδόν λέξη κατά λέξη από σύγχρονη σκοπιά".

συνδυαστικό κρίκο της ιωνικής και της ελεατικής σχολής, που αναπτύχθηκε μετά τη καταστροφή της Μιλήτου από τους Πέρσες (497 π.Χ.).

Ιδρυτής της φιλοσοφικής σχολής της Ελέας (Ν. Ιταλία) ήταν ο Ξενοφάνης ο Κολοφώνιος (560 - 470 π.Χ.), που εγκατέλειψε την πατρίδα του όταν την κατέλαβαν οι Πέρσες. Ο Ξενοφάνης αγωνίσθηκε ενάντια στον ανθρωπομορφικό πολυθεϊσμό με όπλο τη βασική θεώρηση των Μιλησίων, "*την ενότητα όλων των πραγμάτων*". Το χαρακτηριστικό της ελεατικής σχολής είναι ότι η αρχέγονος ύλη, σε αντίθεση με τους Μιλήσιους φιλοσόφους, δεν περικλείει μέσα της καμία δημιουργό αιτία. Τα φυσικά φαινόμενα, κατά τους ελεάτες φιλόσοφους, αποτελούν απάτες των αισθήσεων πράγμα που οδηγεί και στην άποψη ότι η έρευνα του αισθητού κόσμου έχει το νόημα της επιστήμης των αισθητών πλανών.

Ο Παρμενίδης ο Ελεάτης (540 - 470 π.Χ.) συνδυάζοντας τη θεολογική κριτική του Ξενοφάνη με τη σχετικιστική αντίληψη του Ηράκλειτου δέχεται την ύπαρξη του *όντος* και αρνείται την ύπαρξη του *μή όντος*. Με τον όρο "*όν*" εννοεί την ύλη, που πληροί το χώρο, ενώ με το "*μή όν*" τον κενό χώρο. Το *όν* δεν έχει ούτε αρχή ούτε τέλος, γιατί δεν μπορεί να παραχθεί από το *μη όν*, ούτε να μετατραπεί σ' αυτό. Το *όν* είναι αδιαίρετο, αμετάβλητο κι ακίνητο και παντού όμοιο με τον εαυτό του. Εκτείνεται, σαν μία σφαίρα, συμμετρικά από το κέντρο προς όλες τις διευθύνσεις. Η φιλοσοφική αναζήτηση μίας ενιαίας αρχέγονης ύλης έφθασε με τον Παρμενίδη στο αποκορύφωμά της. Παρ' όλων ότι το *όν* δεν βρίσκεται σε κανένα συσχετισμό με τον υλικό κόσμο παίζει σπουδαίο ρόλο στην εξέλιξη της πλατωνικής ιδέας του *όντος* και της ατομικής θεωρίας του Λεύκιππου και του Δημόκριτου.

Ο Ζήνων ο Ελεάτης (495 - 435 π.Χ.), που εισήγαγε, κατά τον Αριστοτέλη, τη διαλεκτική, ήταν, όπως κι ο δάσκαλός του Παρμενίδης, ενάντιος στην πολλαπλότητα και την κίνηση. Οι αντινομίες των διαλεκτικών επιχειρημάτων του και του απτού κόσμου έδωσαν τα ερεθίσματα για τη διερεύνηση των εννοιών του χώρου, του χρόνου και της κίνησης.

Ο Εμπεδοκλής ο Ακραγαντίνος (495 - 435 π.Χ.) και ο Αναξαγόρας ο Κλαζομένιος (500 - 428 π.Χ.) θεωρούνται οι άμεσοι πρόδρομοι των καθαρά ατομιστών φιλοσόφων. Ο Εμπεδοκλής επηρεασμένος από τη φιλοσοφία του Παρμενίδη και την πλουραλιστική θεωρία των Πυθαγόρειων φιλοσόφων, που θεωρούσαν ότι οι αριθμοί είναι το συστατικό στοιχείο των πάντων, δίδαξε τη σύσταση του κόσμου από τέσσερα βασικά στοιχεία: *τη γη, το νερό, τον αέρα και τη φωτιά*. Όλα τα σώματα του ορατού κόσμου διαφέρουν μεταξύ τους μόνο όσον αφορά το πλήθος και το είδος του συνδυασμού των πρωταρχικών στοιχείων. Ο Εμπεδοκλής εισάγει για την εξήγηση της πολλαπλότητας των

μεταβολών στον υλικό κόσμο τους όρους "μίξις" και "διάλλαξις", που υπακούουν στις κοσμικές δυνάμεις "φιλότης" και "νείκος". Ο Αναξαγόρας, απ' την άλλη μεριά, με τη φράση του "όψις γαρ των αδήλων τα φαινόμενα" εισάγει την αναλογία στο φιλοσοφικό λογισμό και στη μεθοδική της επιστημονικής έρευνας. Ο Αναξαγόρας παραδέχεται έναν απεριόριστο αριθμό υλικών, που αποτελούνται από ομοιομερή σώματα (σπέρματα). Τα σπέρματα είναι "άπειρα και πλήθος και σμικρότητα". Μία δύναμη έξω και υπεράνω της ύλης, ο νους, ρυθμίζει τη μορφή και την τάξη των πάντων. Ο Αναξαγόρας δεν παραδέχεται την ύπαρξη του κενού χώρου αλλά διδάσκει τον δυϊσμό του πνεύματος (ενεργούσα αρχή) και της ύλης (ενεργούμενη αρχή).

Εισηγητές της ατομικής διδασκαλίας θεωρούνται ο Λεύκιππος ο Μιλήσιος (περίπου 440 π.Χ.) και ο Δημόκριτος ο Αβδηρίτης (460 -370 π.Χ.). Η πλήρης διάκριση της συνεισφοράς τους είναι δύσκολη, γιατί τα ονόματά τους αναφέρονται σχεδόν πάντοτε μαζί. Κατά πάσα πιθανότητα οι αρχικές ιδέες της κοινής φιλοσοφίας προέρχονται από τον Λεύκιππο αλλά αποδόθηκαν μετέπειτα στον Δημόκριτο, που τις επεξεργάστηκε περαιτέρω². Οι πληροφορίες για το έργο του Λεύκιππου και του Δημόκριτου είναι περιορισμένες και προέρχονται από αναφορές μεταγενεστέρων φιλοσοφικών κειμένων. Από τις αναφορές αυτές μπορεί να σχηματισθεί η εντύπωση, ότι η φιλοσοφία του Λεύκιππου προσπαθεί να πάρει μία ενδιάμεση θέση ανάμεσα στην *πολλαπλότητα* του Εμπεδοκλή και το *όν* του Παρμενίδη. Ο Λεύκιππος ανέπτυξε κυρίως κοσμογονικές απόψεις. Ο Δημόκριτος, από την άλλη πλευρά, ασχολήθηκε περισσότερο με τις μεταβολές της ύλης, τα διάφορα είδη των ατόμων, τις πρωτογενείς και δευτερογενείς ιδιότητές τους και συνέβαλε στην ωρίμανση της ατομικής σκέψης³.

Τα δύο συστατικά του σύμπαντος είναι, κατά τον Λεύκιππο, το *πλήρες* και το *κενόν*. Η ύλη αποτελείται από πολύ μικρά αδιαίρετα και αμετάβλητα πρωταρχικά τμήματα, που δε μπορούμε να τα αντιληφθούμε με τα αισθητήρια όργανά μας. Ο όρος *άτομος* προέρχεται επίσης, κατά πάσα πιθανότητα, από τον Λεύκιππο, παρ' όλον ότι για πρώτη φορά αναφέρεται σ' ένα απόσπασμα του Δημόκριτου⁴. Τα άτομα δεν καταστρέφονται και βρίσκονται σε μία συνεχή κίνηση. Υπάρχει άπειρος αριθμός και άπειρα είδη ατόμων, που διακρίνονται,

² Bertrand Russel: *History of Western Philosophy*, Unwin Paperbacks, London, 1979

³ A. Stückelberger: *Antike Atomphysik*, Tusculum Bücherei, Heimeran Verlag, München, 1979

⁴ "Νόμω γάρ φήσι γλυκύ, νόμω πικρόν, νόμω θερμόν, νόμω ψυχρόν, νόμω χροῦή, ετεή δέ άτομα και κενόν". (Μετάφραση: Έχουμε την εντύπωση μόνον ότι υπάρχει γλυκύ, πικρό, ζεστό, κρύο, έγχρωμο, στην πραγματικότητα υπάρχουν μόνον άτομα και κενό).

κατά τον Δημόκριτο, ως προς το σχήμα, τη θέση και την τάξη. Ο Δημόκριτος, κατά πάσα πιθανότητα, συνέλαβε επίσης και την ιδέα του ατομικού βάρους, η οποία αργότερα αποδίδεται στον Επίκουρο.

Τους υλιστές ακολούθησαν χρονικά οι σοφιστές, η σωκρατική σχολή και οι Επικούριοι φιλόσοφοι. Ο Πλάτων (429 - 347 π.Χ.), ο Αριστοτέλης (384 - 322 π.Χ.) και ο Επίκουρος (337 - 270 π.Χ.) αποτελούν τις αντιπροσωπευτικότερες μορφές των τάσεων της εποχής.

Ο Πλάτων, μαθητής του Σωκράτη και του Ευκλείδη, ταξίδεψε πολύ και ήρθε σε επαφή με τα σπουδαιότερα φιλοσοφικά ρεύματα της εποχής. Ο Πλάτων πίστευε στον ένα και μοναδικό θεό και η φιλοσοφία του βρισκόταν πλησιέστερα στη φιλοσοφία του Θαλή και του Ηράκλειτου παρά στη φιλοσοφία του Δημόκριτου. Η φυσική του ήδη θέτει τις αρχές τις καρτεσιανής φυσικής. Το μεγάλο όμως επίτευγμά του ήταν η ενοποίηση των μεταφυσικών ιδεών του Πυθαγόρα και του Παρμενίδη, της φυσικής του Θαλή και του Ηράκλειτου και της διαλεκτικής και της ηθικής του Σωκράτη.

Ο Αριστοτέλης, μαθητής του Πλάτωνα, ανέπτυξε, σε αντίθεση με τον δάσκαλό του, μία μάλλον ανθρωποκεντρική φιλοσοφία. Η φιλοσοφία του, παρά την περιορισμένη συμβατότητά της με τη χριστιανική θεολογία, χρησιμοποιήθηκε από την καθολική εκκλησία σαν όπλο ενάντια στον υλισμό του Δημόκριτου και του Επίκουρου. Ο Duquesne αναφέρει, ότι αν δεν υπήρχε η αριστοτελική φυσική οι επιστήμονες θα ήταν σε θέση να αναπτύξουν μία σωματιδιακή φυσική της ύλης δύο χιλιάδες χρόνια νωρίτερα⁵.

Η φυσική του Επίκουρου ήταν περισσότερο ρεαλιστική. Ο Επίκουρος ήταν ηθικός και όχι φυσικός φιλόσοφος. Ήταν επηρεασμένος από το Δημόκριτο, παρ' όλον ότι προσπάθησε να τον απορρίψει. Ο Επίκουρος έθεσε τις φυσικές γνώσεις στην υπηρεσία της ηθικής και ισχυριζόταν, ότι δεν είναι δυνατό να ξεπεράσει κανείς τις φοβίες του χωρίς να έχει μία εμπειριστατωμένη γνώση της φύσης του σύμπαντος. Γι' αυτό το λόγο, δεν είναι δυνατό να φθάσει κανείς στο επίπεδο της απόλυτης ικανοποίησης χωρίς τη μελέτη της φύσεως⁶. Τα άτομα του Επίκουρου δεν είναι *αμερή* (συμπαγή), αλλά αποτελούνται από μικρότερα τμήματα (*ελάχιστα*), τα οποία δεν μπορούν να διαχωριστούν από αυτά κι έτσι δεν σχηματίζουν αυτόνομες μονάδες. Με τη σκέψη αυτή ο Επίκουρος θεμελίωσε, κατά κάποιον τρόπο, και την ύπαρξη των στοιχειωδών σωματιδίων, που ανακαλύφθηκαν τον 20^ο αιώνα. Η δεύτερη σημαντική συνεισφορά της

⁵ Maurice Duquesne: "So eroberte die Wissenschaft das Atom", στο *Epoche Atom und Automation*, Τόμος 2ος, Wilhelm Limpert Verlag, Frankfurt a.M., 1958, σελ. 20-65.

⁶ Διογένης Λαέρτιος 10, 143.

φιλοσοφίας του Επίκουρου ήταν ασφαλώς η θεώρηση του βάρους του ατόμου ως καθοριστικού παράγοντα μαζί με το σχήμα και το μέγεθός του. Ο Επίκουρος απορρίπτει τη Δημοκρατική αντίληψη περί απείρου αριθμού ατόμων και εισάγει τον όρο *απερίληπτα*, δηλαδή πάρα πολλά.

Ο Ζήνων, από το Κίτιο της Κύπρου (336 - 264 π.Χ.), ήταν ο ιδρυτής της Στοάς και μπορεί να θεωρηθεί ως ένας από τους τελευταίους ελληνόφωνους ατομιστές φιλοσόφους. Η φιλοσοφία του ήταν υλιστική, όπως και του Επίκουρου, και εισάγει έναν πρόσθετο όρο ως αιτία των μεταβολών, τη *δύναμη*. Κάθε κίνηση στη φύση είναι το αποτέλεσμα μίας αιτίας, μίας *δύναμης*. Οι κοσμικές δυνάμεις *φιλότης* και *νείκος* του Εμπεδοκλή βρίσκουν την εξήγησή τους στη στοϊκή φιλοσοφία.

1.1.2 Η εξέλιξη της ατομικής αντίληψης από την Αλεξανδρινή εποχή μέχρι και τον Μεσαίωνα.

Οι νίκες του Μεγάλου Αλεξάνδρου και η επικράτηση των Ρωμαίων δημιούργησαν συνεχείς ανακατατάξεις στον πνευματικό κόσμο. Η Αλεξάνδρεια και η Ρώμη πήραν τη θέση της Αθήνας ως κέντρα της πνευματικής ζωής της εποχής. Η αλεξανδρινή σχολή, που απέκτησε αίγλη με την ανάπτυξη των μαθηματικών (Ευκλείδης, Αρχιμήδης, Απολλώνιος) και της αστρονομίας (Αρίσταρχος, Ίππαρχος, Πτολεμαίος), δεν προσέφερε τίποτε καινούργιο στην ανάπτυξη της ατομικής σκέψης. Καμιά συνεισφορά στην ατομική σκέψη δεν προσέφερε και το έργο του ποιητή Λουκρήτιου (97 - 55 π.Χ) στη Ρώμη, ο οποίος όμως άφησε λεπτομερείς πληροφορίες για το έργο των παλαιότερων φυσικών φιλοσόφων.

Με την επικράτηση της Ρώμης άρχισε μία σχετικά νεκρή περίοδος για τις φυσικές επιστήμες και τη φυσική φιλοσοφία, που τέλειωσε, αρκετούς αιώνες αργότερα, με την Αναγέννηση. Από την άλλη πλευρά η Αλχημεία, που ξεκίνησε από την χρωματοουργία των αρχαίων αιγυπτίων, έθεσε, παρά τις αμφισβητούμενες τεχνικές της, τις βάσεις της ανάπτυξης της σύγχρονης χημείας. Οι αλχημιστές, στην προσπάθειά τους να ανακαλύψουν τη *φιλοσοφική λίθο*, που θα μπορούσε να μετατρέψει όλα τα μέταλλα σε χρυσό, ανέπτυξαν μεθόδους παρασκευής νέων χημικών ουσιών.

Ένας από τους πιο διάσημους αλχημιστές και μία από τις πιο ενδιαφέρουσες επιστημονικές φυσιογνωμίες του μεσαίωνα υπήρξε αναμφισβήτητα ο Roger Bacon (1214 – 1294). Πέρα από τις φιλοσοφικές του αναζητήσεις, ο Roger Bacon κατέληξε πριν από το Galilei στο συμπέρασμα ότι

τα μαθηματικά πρέπει να είναι ένα βασικό συστατικό της εκπαίδευσης και το πείραμα βάση της επιστημονικής γνώσης.

Η Αναγέννηση ήταν μία εποχή, που, παρά τους πολέμους της, ευνόησε την ανάπτυξη του εμπορίου, της βιομηχανίας και της τεχνολογίας. Χαρακτηριστική μορφή της εποχής θεωρείται ο Leonardo da Vinci (1452 – 1519), που παράλληλα με τη ζωγραφική και τη γλυπτική, ασχολήθηκε με την ανατομία, βοτανική, μηχανική, μαθηματικά και τη φιλοσοφία. Ο da Vinci, μελετώντας τη συμβολή των κυμάτων στα υγρά, προέβλεψε 200 χρόνια πριν από τον Huyghens την κυματική φύση του φωτός. *Κάθε κινούμενο σώμα έχει ένα βάρος προς την κατεύθυνση της κίνησής του*, υποστήριξε ο da Vinci διαπιστώνοντας πριν τον Galilei ότι *η ταχύτητα ενός σώματος, που πέφτει, αυξάνει*. Ο ιατρός Cardan, ο Stevin και ο Κοπερνίκος είναι μερικές ακόμη εξέχουσες επιστημονικές προσωπικότητες της εποχής. Ο Cardan έκανε σημαντικές ανακαλύψεις στην Άλγεβρα και εισήγαγε τους *φανταστικούς αριθμούς*. Ο Stevin ανακάλυψε τον νόμο του παραλληλογράμμου για την πρόσθεση των δυνάμεων και, ερχόμενος αντιμέτωπος με την αριστοτελική φυσική, πρότεινε ότι η δύναμη δεν παράγει μόνο κίνηση αλλά έχει τη δυνατότητα να μεταβάλει μία ήδη υπάρχουσα. Ο Nikolaus Κοπερνίκος (1473 – 1543), λαμβάνοντας υπόψη τις θέσεις των Πυθαγόρειων φιλοσόφων και του Nikolaus von Kues για την περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της καθώς επίσης του Αρίσταρχου (320 -230 π.Χ.) για την περιστροφή της γης και των πλανητών γύρω από τον ήλιο, έθεσε τις βάσεις της σύγχρονης αστρονομίας.

Η Αναγέννηση προετοίμασε το έδαφος για τον Newton, τον Descartes και τις σημαντικές ανακαλύψεις του 17^{ου} και 18^{ου} αιώνα.

1.1.3 Η εποχή των μεγάλων ανακαλύψεων (17^{ος} και 18^{ος} αιώνας)

Με όπλο τα μαθηματικά, που γίνονται μετά τον Galilei⁷ αποδεκτά στη φυσική έρευνα, ο Newton προχωρά στην ανάπτυξη της θεωρίας της *βαρύτητας*, ο Descartes και ο Fermat προσπαθούν να εισάγουν πάλι τους αριθμούς στη Γεωμετρία, οι Cavalieri, Newton και Leibniz θέτουν τις βάσεις του απειροστικού λογισμού και οι Kepler και Galilei της σύγχρονης αστρονομίας. Οι ανακαλύψεις του Galilei βασιζόταν στην παρατήρηση του Σύμπαντος με το

⁷ “Δεν είναι δυνατόν να κατανοήσει κανείς το μεγάλο βιβλίο του Σύμπαντος αν δεν γνωρίζει τη γλώσσά του, τα Μαθηματικά“ (Galilei: Il Saggiatore)

τηλεσκόπιο, που κατασκεύασε και όχι μόνο σε υποθέσεις και υπολογισμούς⁸. Παρ' όλα αυτά το 1623 η Εκκλησία τον καταδικάζει, όπως επτά χρόνια νωρίτερα διέταξε και την απόσυρση των βιβλίων του Κοπερνίκους. Η Εκκλησία κατάλαβε ότι η ανάπτυξη νέων επιστημονικών ρευμάτων θα έθετε υπό αμφισβήτηση την απόλυτη αυθεντία της. Παρ' όλα αυτά, οι σπασμωδικές αντιδράσεις της Εκκλησίας δεν μπόρεσαν να σταματήσουν την εξέλιξη.

Στην Αγγλία ιδρύεται το 1662 η Royal Society κι εμφανίζεται το επιστημονικό περιοδικό Philosophical Transactions. Στη Γαλλία ο Colbert ιδρύει, επίσημα πλέον, την Ακαδημία των Επιστημών. Ένα χρόνο νωρίτερα κυκλοφόρησε και το πρώτο τεύχος του περιοδικού Journal des Savants. Η αξία της επιστήμης αναγνωρίζεται ήδη πλέον από το κράτος και γίνεται δεκτή η πρακτική της σημασία.

Η ατομική θεωρία είχε τον 17^ο αιώνα ισχυρούς υποστηρικτές. Ένας από αυτούς ήταν ο Robert Boyle (1627-1691), που, χρησιμοποιώντας την αντλία κενού του Otto von Guericke, πειραματίστηκε επάνω στην δυνατότητα συμπίεσης και στη διαστολή των αερίων και διαμόρφωσε την άποψη ότι η ύλη αποτελείται από σωματίδια. Η μόνη διαφορά μεταξύ των τριών καταστάσεων της ύλης οφείλεται στη συγκέντρωση και τους βαθμούς ελευθερίας αυτών των σωματιδίων. Επίσης ο Hooke προσπάθησε να εξηγήσει τις ιδιότητες των αερίων με βάση την ατομική θεωρία. Η προσπάθεια αυτή είναι η απαρχή της ανάπτυξης της κινητικής θεωρίας των αερίων, που συνεχίστηκε από τον Daniel Bernoulli τον 18^ο και τον Clausius τον 19^ο αιώνα. Η ανάπτυξη της θεωρίας της βαρύτητας από τον Newton άλλαξε την όλη θεώρηση της δομής της ύλης.

Ο 17^{ος} και 18^{ος} αιώνας είχαν ιδιαίτερη σημασία και για τη Χημεία. Οι χημικοί του 18^{ου} αιώνα, που εμπνεύστηκαν από το Δημόκριτο, διαπιστώνουν τη μεταβλητότητα της ύλης. Έχοντας ως κληρονομιά τις εμπειριστατωμένες πληροφορίες για μια σειρά χημικών ουσιών και τη σχετικά αναπτυγμένη χημική τεχνική, που άφησαν οι αλχημιστές, προχώρησαν με γοργά βήματα στην ανάπτυξη της σύγχρονης χημείας. Ο Robert Boyle προείδε την ύπαρξη των μορίων και υποστήριξε ότι κάθε χημική ουσία σχηματίζεται από στερεά σωματίδια που συνδεόμενα σχηματίζουν χαρακτηριστικές ενώσεις.

Η ανάπτυξη της φλογιστικής θεωρίας από τον Stahl⁹ (1660-1734) έπαιξε

⁸ «Είμαι εκτός εαυτού από θαυμασμό και ευγνώμων στο Θεό που μου επέτρεψε να ανακαλύψω αυτό το μεγάλο θαύμα»

⁹ Η φλογιστική θεωρία υποστηρίζει ότι κάθε ουσία, που καίγεται, αποτελείται από ένα αναφλέξιμο και ένα μη αναφλέξιμο συστατικό, το *φλόγιστον*. Όλες οι χημικές ουσίες κατά τον Stahl δεν είναι αμετάβλητες όπως ο χρυσός.

έναν μεταβατικό ρόλο αλλά δεν απετέλεσε τροχοπέδη στην ανάπτυξη των ιδεών της σύγχρονης χημείας. Ο Bacon ισχυρίζεται ότι *ο επιστήμονας δεν πρέπει να συλλέγει πρώτες ύλες, όπως το μυρμήγκι, ούτε να πλέκει ιστούς από δικό του υλικό, όπως η αράχνη, αλλά να εργάζεται όπως η μέλισσα, που ανακαλύπτει χυμούς λουλουδιών, τους επεξεργάζεται και παράγει το μέλι*. Από την άλλη πλευρά, ο Lavoisier (1743 – 1794) έθεσε τις βάσεις της μεθοδικής της χημικής έρευνας κάνοντας κανόνα το *ότι πρέπει να βαδίζει κανείς από το γνωστό προς το άγνωστο και να μη βγάζει συμπεράσματα αν δεν στηρίζονται στο πείραμα*. Η εισαγωγή της έννοια της ποσότητας και του βάρους στη χημεία ήταν επίσης μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις της εποχής, που οδήγησαν και τον Dalton (1766 - 1844) και τον Higgins (1763 - 1825) στη σύγχρονη θεώρηση της ατομικής μορφής των χημικών ενώσεων. Στην ανάπτυξη αυτής θεώρησης δεν μπορεί κανείς να αγνοήσει της συνεισφορά του γάλλου χημικού Proust (1755 – 1826), που ισχυρίστηκε ότι το νερό, ανεξάρτητα από την προέλευσή του έχει την ίδια σύσταση και τον ίδιο λόγο ατόμων υδρογόνου και οξυγόνου καθώς επίσης ότι στις χημικές ενώσεις υπάρχουν τα επιμέρους συστατικά με αμετάβλητα σταθερές αναλογίες. Δεν μπορεί κανείς ακόμη να αγνοήσει τη συνεισφορά ενός μεγάλου αριθμού επιστημόνων (π.χ. Rumford, Berthollet, Gay-Lussac, Avogadro, Ampère, Gaudin, Meyer, Mendelejeff, Bernoulli, Faraday, Braun κ.α.) που με το έργο τους έβαλαν τις βάσεις της σημερινής ατομικής αντίληψης.

1.2 Η σημερινή ατομική αντίληψη.

Σύμφωνα με τη σημερινή αντίληψη, ο ατομικός πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια, που είναι οι φορείς του θετικού του φορτίου, και από νετρόνια, τα οποία είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Τα πρωτόνια και νετρόνια του πυρήνα χαρακτηρίζονται συλλογικά με τον όρο *νουκλεόνια*. Ο αριθμός των πρωτονίων Z σε κάθε πυρήνα είναι χαρακτηριστικός του χημικού στοιχείου, στο οποίο ανήκει, και ονομάζεται *ατομικός αριθμός*. Αν προστεθεί ο ατομικός αριθμός Z ενός πυρήνα με τον αριθμό των νετρονίων του N λαμβάνεται ο *μαζικός αριθμός* A του ατομικού είδους, του *νουκλιδίου*. Ο μαζικός αριθμός παρέχει, κατά προσέγγιση, τη μάζα του ατόμου σε ατομικές μονάδες μάζας¹⁰.

Ο χαρακτηρισμός ενός νουκλιδίου πραγματοποιείται με τη γραφή του

¹⁰ Μία ατομική μονάδα μάζας (**u**) ισοδυναμεί με το 1/12 της μάζας του ισότοπου του άνθρακα με μαζικό αριθμό $A=12$, δηλαδή με $1.66053 \cdot 10^{-27}$ kg.

ονόματος του χημικού στοιχείου, στο οποίο ανήκει, καθώς επίσης του μαζικού και του ατομικού του αριθμού, A και Z , σε θέση δείκτη αντίστοιχα επάνω και κάτω αριστερά. Ο ατομικός αριθμός πολλές φορές παραλείπεται, επειδή υποδηλώνεται από το όνομα του χημικού στοιχείου.

π.χ. ${}^{16}_8\text{O}$ ή ${}^{16}\text{O}$ (η γραφή O-16 συνηθίζεται επίσης σε κείμενα)

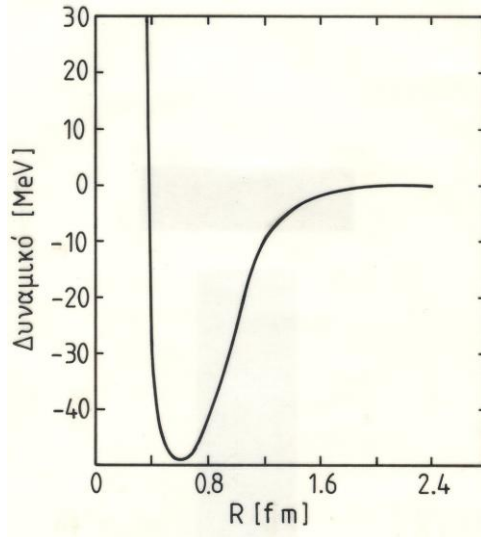
Για τη συστηματική παράσταση των διαφόρων νουκλιδίων επινοήθηκε ο *Πίνακας των Νουκλιδίων*, ο οποίος αποτελεί ένα διάγραμμα με συντεταγμένες τον αριθμό των νετρονίων N (x-άξονας) και τον ατομικό αριθμό Z (y-άξονας). Κάθε οριζόντια σειρά αυτού του πίνακα (*Διάγρ. 1-1*) περιλαμβάνει νουκλίδια με τον ίδιο αριθμό πρωτονίων Z στον πυρήνα τους, αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων N . Τα νουκλίδια αυτά αποτελούν διάφορα ατομικά είδη του ίδιου στοιχείου και ονομάζονται *ισότοπα*, γιατί καταλαμβάνουν την ίδια θέση στο περιοδικό σύστημα. Για παράδειγμα, τα νουκλίδια ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{14}\text{C}$, έχοντας 6 πρωτόνια στον πυρήνα τους, είναι ισότοπα του άνθρακα. Τα ισότοπα ενός στοιχείου, που μπορεί να είναι σταθερά ή ασταθή, έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες. Οι φυσικές τους ιδιότητες μπορεί να μπορεί να παρουσιάζουν διαφορές. Ο Πίνακας των Νουκλιδίων περιλαμβάνει σήμερα 270 σταθερά και πάνω από 2500 ασταθή ισότοπα των διαφόρων χημικών στοιχείων.

						12O	13O	14O	15O	16O	17O	18O	19O	20O	21O	22O	23O	24O	25O	26O	
							10N	11N	12N	13N	14N	15N	16N	17N	18N	19N	20N	21N	22N	23N	24N
		8C	9C	10C	11C	12C	13C	14C	15C	16C	17C	18C	19C	20C	21C	22C					
		7B	8B	9B	10B	11B	12B	13B	14B	15B	16B	17B	18B	19B							
			6Be	7Be	8Be	9Be	10Be	11Be	12Be	13Be	14Be										
	4Li	5Li	6Li	7Li	8Li	9Li	10Li	11Li													
		3He	4He	5He	6He	7He	8He	9He	10He												
	1H	2H	3H	4H	5H	6H															
	1H																				

Διάγρ. 1-1: Απόσπασμα του Πίνακα των Νουκλιδίων

1.2.1 Το φορτίο και η ακτίνα του πυρήνα.

Οι ατομικοί πυρήνες μπορεί να θεωρηθεί, ότι έχουν, κατά προσέγγιση, ένα σφαιρικό σχήμα με ακτίνα R . Η έννοια της πυρηνικής ακτίνας γίνεται πιο κατανοητή παρακολουθώντας την μεταβολή της δυναμικής ενέργειας ενός φορτισμένου σωματιδίου στην περιοχή ενός ατομικού πυρήνα (Διάγρ. 1-2).



Διάγρ. 1-2: Δυναμικό φορτισμένου σωματιδίου στην περιοχή του ατομικού πυρήνα.

Όταν ένα σωματίδιο πλησιάζει την επιφάνεια του πυρήνα υφίσταται μία ισχυρή έλξη, που γίνεται εμφανής από την απότομη ελάττωση της δυναμικής ενέργειας. Η δυναμική ενέργεια σε αποστάσεις $r > R$ μεταβάλλεται σύμφωνα τον νόμο του Coulomb. Έτσι η πυρηνική ακτίνα R ταυτίζεται με την ακτίνα δράσεως των πυρηνικών δυνάμεων.

Οι πειραματικές τιμές των πυρηνικών ακτίνων περιγράφονται από την εμπειρική σχέση

$$R = r_0 A^{1/3}$$

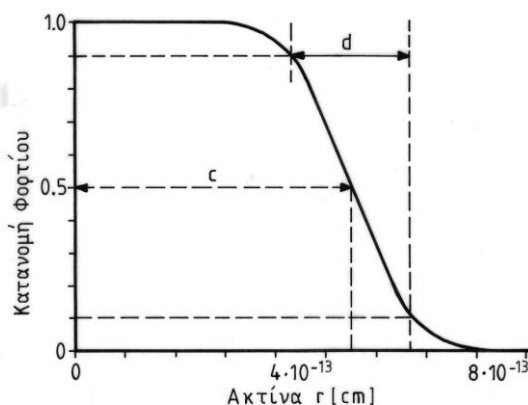
Η σταθερά r_0 λαμβάνει τιμές μεταξύ 1.2 και 1.5 fm¹¹. Οι διακυμάνσεις των πειραματικών τιμών της σταθεράς r_0 δείχνουν, ότι ο ακριβής προσδιορισμός των ορίων του ατομικού πυρήνα δεν είναι δυνατός.

Η πυκνότητα του πυρήνα ρ_N είναι ανεξάρτητη του αριθμού των νουκλεονίων του. Λαμβάνοντας $r_0 = 1.4$ fm και θεωρώντας τη μάζα των νουκλεονίων $m_N = 1.67 \cdot 10^{-27}$ kg¹² προκύπτει για την πυκνότητα του πυρήνα ρ_N η εξαιρετικά μεγάλη τιμή

$$\rho_N = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3 N_A} \approx 1.2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

Το N_A παριστάνει τον αριθμό του Ανογαδρο, δηλαδή τον αριθμό των ατόμων σε μία ποσότητα σε γραμμάρια ίση με την ατομική μάζα.

Για όλους τους πυρήνες με $A > 16$ η κατανομή του φορτίου παραμένει μόνο σε μία περιορισμένη περιοχή σταθερή και μετά, στα όρια του πυρήνα, τείνει προς το μηδέν (Διάγρ. 1-3).



Διάγρ. 1-3: Κατανομή του φορτίου στον ατομικό πυρήνα.

¹¹ 1 fm = 1 femtometer = 10^{-15} m = 1 fermi

¹² Η μάζα του πρωτονίου και του νετρονίου είναι αντίστοιχα $1.672614 \cdot 10^{-27}$ kg (1.0072766 u) και $1.674941 \cdot 10^{-27}$ kg (1.0086654 u).

1.2.2 Μάζα και σταθερότητα του ατομικού πυρήνα.

Η μάζα των ατόμων είναι πάρα πολύ μικρή. Για παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί, ότι η μάζα του ατόμου του υδρογόνου ισούται $1.67355 \cdot 10^{-27}$ kg, ενώ η μάζα των ατόμων των βαρύτερων στοιχείων είναι περίπου δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη. Για να αποφευχθούν υπολογισμοί με τόσο μικρούς αριθμούς ορίστηκε η *σχετική ατομική μάζα*, δηλαδή η μάζα των ατόμων σε σχέση με τη μάζα του ^{12}C , που λαμβάνεται ως νοκλίδιο αναφοράς. Έτσι, μια ατομική μονάδα μάζας (u) ισούται το $1/12$ της μάζας του ^{12}C και αντιστοιχεί σε $1.66053 \cdot 10^{-27}$ kg.

Λαμβάνοντας υπόψη την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας,

$$E = m c^2$$

μπορεί να υπολογισθεί το ενεργειακό ισοδύναμο μίας ατομικής μονάδας μάζας

$$u = 1.4923 \times 10^{-10} \text{ J} = 1.4923 \times 10^{-3} \text{ erg}$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s).

Στις πυρηνικές επιστήμες η ενέργεια εκφράζεται τις περισσότερες φορές σε ηλεκτρονιοβόλτ (eV) και τα πολλαπλάσιά του. Ένα ηλεκτρονιοβόλτ ισούται με την κινητική ενέργεια, που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο διασχίζοντας στο κενό μία διαφορά δυναμικού ενός Volt ($1 \text{ eV} = 1.6022 \times 10^{-19}$ J). Έτσι, μία ατομική μονάδα μάζας ισοδυναμεί με ενέργεια 931.502 MeV.

Λαμβάνοντας υπόψη την ατομική μάζα μπορεί να υπολογισθεί η μάζα του πυρήνα αφαιρώντας τη μάζα των ηλεκτρονίων ($m_e = 5.48592 \cdot 10^{-4} u = 9.109534 \cdot 10^{-31}$ kg). Η ενέργεια σύνδεσης των ηλεκτρονίων μπορεί να θεωρηθεί σ' αυτή την περίπτωση, αμελητέα.

Ακριβείς προσδιορισμοί των ατομικών μαζών διαφόρων νοκλιδίων έδειξαν ότι είναι κατά κάτι μικρότερες από το άθροισμα της μάζας των συστατικών τους (Z πρωτόνια, N νετρόνια και Z ηλεκτρόνια). Η διαφορά αυτή της μάζας (ΔM), που ονομάζεται *έλλειμμα μάζας* αντιστοιχεί στην ενέργεια, που απαιτείται για τη συγκράτηση των πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα, την *ενέργεια συνδέσεως* (E_B). Έτσι η μάζα ενός ουδέτερου ατόμου (M) δίνεται από τη σχέση

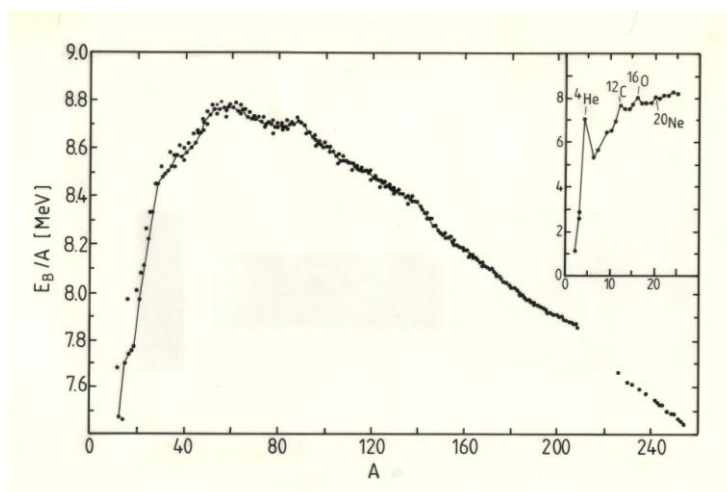
$$M = Zm_p + Nm_N + Zm_e - \delta M = Zm_H + Nm_N - \delta M$$

όπου m_p , m_N , m_e και m_H η μάζα του πρωτονίου, του νετρονίου, του ηλεκτρονίου και του ατόμου του υδρογόνου.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση της ισοδυναμίας μάζας και ενέργειας μπορεί από το έλλειμμα μάζας να υπολογισθεί η ενέργεια συνδέσεως (E_B) ενός πυρήνα. Διαιρώντας την ενέργεια συνδέσεως με τον αριθμό των νουκλεονίων του πυρήνα προκύπτει η ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο (E_B/A).

$$\frac{E_B}{A} = \frac{(Mc^2) - (Zm_p + Nm_N + Zm_e - M)c^2}{A} = \frac{(m_H + Nm_N - M)c^2}{A} \quad (1.x)$$

Το *Διάγρ. 1-4* δίνει την ενέργεια συνδέσεως των σταθερών πυρήνων σε συνάρτηση με τον αριθμό των νουκλεονίων τους A . Με εξαίρεση τους ελαφρούς πυρήνες, η ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο δεν μεταβάλλεται δραστικά. Ιδιαίτερη σημασία στο *Διάγρ. 1-4* έχει η απότομη πτώση της ενέργειας συνδέσεως στους πολύ ελαφρούς πυρήνες και η βαθμιαία πτώση στους πολύ βαρείς. Αυτό σημαίνει, ότι η σύντηξη των πολύ ελαφρών πυρήνων και η σχάση των πολύ βαρέων είναι εξώθερμα φαινόμενα, που οδηγούν σε απελευθέρωση ενέργειας συνδέσεως. Πέρα από αυτά, στο *Διάγρ. 1.4* μπορεί να



Διάγρ. 1-4: Ενέργεια συνδέσεως ανά νουκλεόνιο των διαφόρων πυρήνων.

παρατηρηθεί η ιδιαίτερα υψηλή σταθερότητα των πυρήνων με μαζικό αριθμό A περίπου 60 καθώς επίσης η αντιστοιχία των νουκλιδίων ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$ και ${}^{16}\text{O}$, που έχουν υψηλότερη ενέργεια συνδέσεως από τα γειτονικά τους νουκλίδια. Η υψηλή ενέργεια συνδέσεως του ${}^4\text{He}$ δικαιολογεί την αυθόρμητη διάσπαση του ${}^8\text{Be}$ σε δύο πυρήνες ${}^4\text{He}$ (σωματίδια- α) καθώς επίσης και τις τεράστιες ποσότητες ενέργειας, που παράγονται από την καύση (σύντηξη) του υδρογόνου σε ήλιο στον Ήλιο.

Οι H. Bethe και C.F. von Weizsäcker, βασιζόμενοι στο πρότυπο της σταγόνας υγρού (liquid drop model), πρότειναν μία ημιεμπειρική σχέση, που επιτρέπει τον υπολογισμό της ενέργειας συνδέσεως των πυρήνων με αρκετή ακρίβεια. Το πρότυπο της σταγόνας υγρού θεωρεί τον πυρήνα των ατόμων σαν μία σταγόνα ενός μη συμπιεστού ηλεκτρικά φορτισμένου υγρού και τα νουκλεόνια σαν μόριά της.

Σύμφωνα με τη σχέση των Bethe και Weizsäcker, η ενέργεια συνδέσεως των πυρήνων στη βασική τους κατάσταση δίνεται από το άθροισμα πέντε ενεργειακών παραγόντων

$$E_B = E_O + E_E + E_C + E_S + \varepsilon_{\sigma\zeta}$$

όπου E_B είναι η ενέργεια συνδέσεως, E_O η ενέργεια όγκου, E_E η ενέργεια επιφανείας, E_C η ενέργεια Coulomb, E_S η ενέργεια συμμετρίας και $\varepsilon_{\sigma\zeta}$ η ενέργεια συζεύξεως.

Η ενέργεια όγκου είναι μία συνάρτηση του R^3 , δηλαδή του A , και αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια συνδέσεως ενός πυρήνα με μαζικό αριθμό A και ίσο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων. Η άπωση μεταξύ των πρωτονίων δεν λαμβάνεται υπόψη σ' αυτόν τον παράγοντα της συνάρτησης, που δίνει την ενέργεια συνδέσεως ενός πυρήνα.

Η ενέργεια επιφανείας λαμβάνει υπόψη της το γεγονός, ότι τα επιφανειακά νουκλεόνια ενός πυρήνα είναι μονόπλευρα και συνεπώς ασθενέστερα συνδεδεμένα από τα αντίστοιχα στο εσωτερικό του. Η ενέργεια επιφανείας, που μειώνει την ενέργεια συνδέσεως και έχει αρνητικό πρόσημο, είναι ανάλογη με το R^2 , δηλαδή με $A^{2/3}$.

Η ενέργεια Coulomb, που αντιστοιχεί στην ηλεκτροστατική άπωση μεταξύ των πρωτονίων του πυρήνα, είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ακτίνα του πυρήνα (R^{-1}) και έχει επίσης αρνητικό πρόσημο.

Η ενέργεια συμμετρίας εκφράζει την τάση ιδιαίτερης σταθερότητας, που χαρακτηρίζει τους ελαφρούς πυρήνες με $Z = N$. Η ενέργεια αυτή είναι ανάλογη του $(N - Z)^2 / A$.

Τέλος, η ενέργεια συζεύξεως είναι ένας εμπειρικός διορθωτικός παράγοντας που εκφράζει την αύξηση της ενέργειας σύνδεσης κατά δ σε πυρήνες με άρτιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων. Ο σχηματισμός ζευγών πρωτονίων και νετρονίων με συνολικό σπιν $S = 0$ συνεπάγεται ένα ισχυρότερο δέσιμο αυτών των πυρήνων σε σύγκριση με αντίστοιχους, με περιττό αριθμό.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{συζ}} &= \delta, \text{ όταν } N: \text{ άρτιος και } Z: \text{ άρτιος} \\ \varepsilon_{\text{συζ}} &= 0, \text{ όταν } N: \text{ περιττός και } Z: \text{ άρτιος ή όταν } N: \text{ άρτιος και } Z: \text{ περιττός} \\ \varepsilon_{\text{συζ}} &= -\delta, \text{ όταν } N: \text{ περιττός και } Z: \text{ περιττός} \\ \delta &= 11.46 A^{-1/2} \text{ MeV.} \end{aligned}$$

Έτσι, η σχέση των Bethe και Weiszäcker παίρνει τη μορφή

$$E_B = a_0 A - a_E A^{2/3} - a_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_S \frac{(4-2Z)^2}{A} + \varepsilon_{\text{συζ}}$$

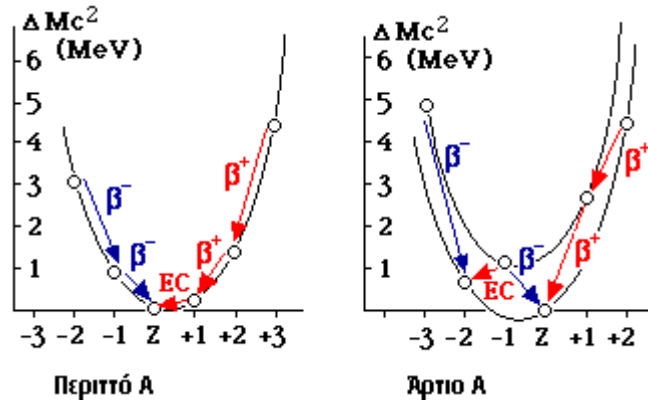
Οι σταθερές της σχέσεως των Bethe και Weiszäcker προσδιορίστηκαν με τη βοήθεια πειραματικών δεδομένων και έχουν τις τιμές:

$$\begin{aligned} a_0 &= 15.8 \text{ MeV} \\ a_E &= 17.8 \text{ MeV} \\ a_C &= 0.71 \text{ MeV} \\ a_S &= 23.22 \text{ MeV και} \\ \varepsilon_{\text{συζ}} &= 0 \text{ ή } \pm 11.46 A^{-1/2} \end{aligned}$$

Για ένα δεδομένο αριθμό νουκλεονίων A η σχέση των Bethe και Weiszäcker έχει τη μορφή μίας παραβολικής συνάρτησης με μεταβλητή τον ατομικό αριθμό των πυρήνων (Z).

Όταν ο αριθμός των νουκλεονίων είναι άρτιος προκύπτουν από τη συνάρτηση, λόγω του τελευταίου όρου της σχέσεως ($\varepsilon_{\text{συζ}}$), δύο καμπύλες (Διάγρ. 1-5), η μία για τους πυρήνες με άρτιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων (άρτιους, άρτιους-ή α,α-πυρήνες) και η άλλη για τους πυρήνες με περιττό (περιττούς, περιττούς-ή π,π-πυρήνες). Οι πυρήνες, που βρίσκονται πλησιέστερα στην κορυφή της παραβολικής καμπύλης, είναι οι σταθερότεροι της ισοβαρούς σειράς¹³, ενώ οι

¹³ Ισοβαρείς είναι οι πυρήνες με τον ίδιο μαζικό αριθμό, δηλαδή με το ίδιο άθροισμα του αριθμού των πρωτονίων Z και των νετρονίων N .

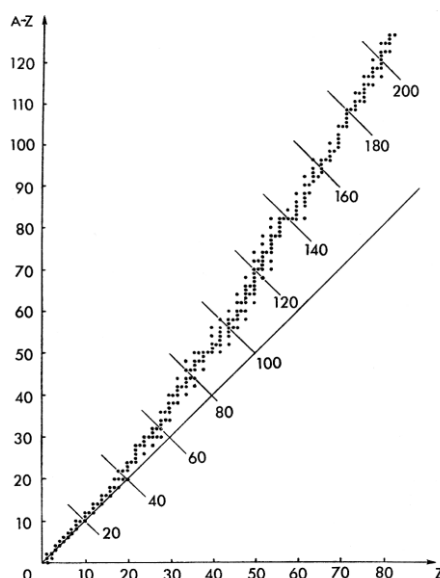


Διάγρ. 1-5: Ισοβαρείς καμπύλες για πυρήνες με περιττό και άρτιο αριθμό νουκλεονίων. Η διαφορά ενέργειας από το σταθερότερο νουκλίδιο της ισοβαρούς σειράς εκφράζεται ως $\Delta m c^2$.

υπόλοιποι διασπώνται εκπέμποντας ακτινοβολία-β μέχρι να φθάσουν στην κατάσταση της μέγιστης σταθερότητας.

Η παρατήρηση του Πίνακα των Νουκλιδίων οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι από τα 270 σταθερά νουκλίδια στη φύση τα 162 έχουν άρτιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα τους (α, α -νουκλίδια). Τα α, α -νουκλίδια χαρακτηρίζονται όχι μόνο από μεγάλη σταθερότητα αλλά και από μεγάλη αφθονία στη φύση (π.χ. το ^{16}O και το ^{28}Si αποτελούν τα 75% της μάζας του στερεού φλοιού της γης). Σταθερότητα επίσης παρατηρείται σε 55 νουκλίδια με άρτιο αριθμό πρωτονίων και περιττό νετρονίων καθώς και σε 50 με περιττό αριθμό πρωτονίων και άρτιο νετρονίων στον πυρήνα τους (αντίστοιχα π, α - και α, π -νουκλίδια). Μόνο πέντε σταθερά νουκλίδια (^2H , ^6Li , ^{10}B , ^{14}N και ^{180}Ta) έχουν περιττό αριθμό πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα τους (π, π -νουκλίδια). Στην τελευταία κατηγορία ανήκουν επίσης μερικά μακρόβια ασταθή νουκλίδια, όπως το ^{40}K , ^{50}V , ^{138}La και ^{175}Lu .

Στα ελαφρά σταθερά νουκλίδια ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα είναι σχεδόν ίσος με τον αριθμό των νετρονίων. Όταν αυξάνει το φορτίο του πυρήνα όλο και περισσότερα νετρόνια είναι απαραίτητα για την εξασφάλιση της σταθερότητας (βλ. Διάγρ. 1-6).



Διάγρ. 1-6: Συνοπτικός πίνακας των σταθερών νουκλιδίων.

Μεγάλος αριθμός σταθερών νουκλιδίων έχει στον πυρήνα του αριθμό πρωτονίων και νετρονίων ίσο με τους *μαγικούς αριθμούς* 2, 8, 20, 28, 50, 82 και 126 (π.χ. ο κασίτερος με $Z=50$ έχει 10 σταθερά ισότοπα). Η παρατήρηση αυτή είναι μία ένδειξη, ότι τα πρωτόνια και τα νετρόνια στους ατομικούς πυρήνες είναι κατανομημένα σε μία δομή με ενεργειακές στοιβάδες, όπως τα ηλεκτρόνια στο άτομο. Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η υψηλή σταθερότητα, που παρουσιάζουν τα νουκλίδια με αριθμό πρωτονίων και νετρονίων ίσο με έναν από τους παραπάνω μαγικούς αριθμούς.

Στοιχεία με άρτιο αριθμό πρωτονίων στον πυρήνα τους παρουσιάζουν πολλά σταθερά ισότοπα, αλλά το πολύ δύο με περιττό αριθμό νετρονίων (εξαιρέση: ^{115}Sn , ^{117}Sn , ^{119}Sn). Στοιχεία με περιττό αριθμό πρωτονίων στον πυρήνα τους παρουσιάζουν το πολύ δύο σταθερά ισότοπα με άρτιο αριθμό νετρονίων και κανένα με περιττό (εξαιρέσεις: ^2H , ^6Li , ^{10}B , ^{14}N , ^{180}Ta).

Ισοβαρείς σειρές με περιττό αριθμό νουκλεονίων A διαθέτουν μόνο ένα σταθερό νουκλίδιο (*Ιος Κανόνας του Mattauch*). Εξαιρέση αποτελεί μόνο η ισοβαρής σειρά με $A=113$.

Ισοβαρείς σειρές με άρτιο αριθμό νουκλεονίων διαθέτουν δύο, και σε σπανιότερες περιπτώσεις ($A=50, 96, 124, 130, 136, 180$) τρία, σταθερά νουκλίδια, των οποίων οι ατομικοί αριθμοί διαφέρουν κατά δύο μονάδες (2ος Κανόνας του *Mattauch*). Με εξαίρεση τις ισοβαρείς σειρές με $A = 50$ και 180 , δεν υπάρχουν γειτονικά σταθερά ισοβαρή νουκλίδια. Έτσι στις ομάδες ισοβαρών νουκλιδίων $^{40}\text{Ar} - ^{40}\text{K} - ^{40}\text{Ca}$, $^{138}\text{Ba} - ^{138}\text{La} - ^{138}\text{Ce}$ και $^{176}\text{Yb} - ^{176}\text{Lu} - ^{176}\text{Hf}$ το εκάστοτε μεσαίο νουκλίδιο είναι ασταθές (ραδιενεργό).

1.2.3 Το σπιν, η μαγνητική ροπή και η ηλεκτρική τετραπολική ροπή των ατομικών πυρήνων.

Εκτός από τη μάζα και το φορτίο, οι ατομικοί πυρήνες διαθέτουν και ένα χαρακτηριστικό σπιν (ιδιοστροφορμή), το οποίο συνίσταται από το σπιν και την τροχιακή στροφορμή των πρωτονίων και νετρονίων τους.

Το σπιν των νουκλεονίων είναι ίσο με $1/2(\hbar/2\pi)$, όπου \hbar η σταθερά του Planck ($\hbar = 6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$). Το σπιν ενός νουκλεονίου μπορεί να είναι προσανατολισμένο παράλληλα (σπιν $+1/2(\hbar/2\pi)$) ή αντιπαράλληλα (σπιν $-1/2(\hbar/2\pi)$) προς μία ορισμένη κατεύθυνση, π.χ. προς το σπιν ενός άλλου νουκλεονίου. Γενικά το σπιν των νουκλεονίων χαρακτηρίζεται με τον κβαντικό αριθμό s , που έχει την τιμή $1/2$.

Η τροχιακή στροφορμή των νουκλεονίων οφείλεται στη κίνησή τους μέσα στον πυρήνα και είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του $(\hbar/2\pi)$. Ο αντίστοιχος κβαντικός αριθμός l λαμβάνει ακέραιες τιμές ($l = 0, 1, 2, 3 \dots$). Το σπιν και η τροχιακή στροφορμή των νουκλεονίων είναι ισχυρά συζευγμένα. Συνεπώς, το συνολικό σπιν j ενός νουκλεονίου δίνεται από το διανυσματικό άθροισμα τους και ο αντίστοιχος κβαντικός αριθμός j από αριθμητικό άθροισμα των επιμέρους τιμών τους

$$j = l + s = l + \left(\pm \frac{1}{2} \right)$$

Το συνολικό σπιν του πυρήνα I ισούται με το διανυσματικό άθροισμα του σπιν j των επιμέρους νουκλεονίων και ο κβαντικός αριθμός του πυρηνικού σπιν I με το αριθμητικό άθροισμα των επιμέρους κβαντικών αριθμών j

$$I = \sum j$$

Έχει αποδειχθεί πειραματικά, ότι το σπιν των ατομικών πυρήνων με άρτιο αριθμό νουκλεονίων είναι ακέραιος αριθμός (π.χ. 0, 1, 2, 3, ...), ενώ το σπιν των πυρήνων με περιττό μη άρτιο πολλαπλάσιο του 1/2 (π.χ. 1/2, 3/2, 5/2, ...). Πυρήνες, που έχουν άρτιο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων (α,α – πυρήνες) έχουν πάντοτε στη βασική τους κατάσταση σπιν ίσο με το μηδέν. Οι πυρήνες με άρτιο μαζικό αριθμό A υπακούουν στη στατιστική Bose-Einstein, ενώ οι αντίστοιχοι με περιττό στη στατιστική Fermi-Dirac.

Κάθε κινούμενο ηλεκτρικά φορτισμένο σωματίδιο με φορτίο q , στροφορμή I και μάζα M διαθέτει, σύμφωνα με την κλαστική ηλεκτροδυναμική, μία *μαγνητική ροπή*

$$\mu = \frac{qI}{2M}$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Κατ' αναλογία με τη μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου (*μαγνητόνη του Bohr*), μπορεί να ορισθεί η *πυρηνική μαγνητόνη*, μ_K , αντικαθιστώντας στην αντίστοιχη σχέση τη μάζα του ηλεκτρονίου με τη μάζα του πρωτονίου, m_p , που είναι 1836 φορές μεγαλύτερη.

$$\mu_K = \frac{e \hbar / 2\pi}{2m_p c}$$

Η πυρηνική μαγνητόνη είναι αντίστοιχα 1836 φορές μικρότερη από τη μαγνητόνη του Bohr. Οι μαγνητικές ροπές των ατομικών πυρήνων δίνονται ως πολλαπλάσια της πυρηνικής μαγνητόνης.

Μετρήσεις της μαγνητικής ροπής έδειξαν ότι το πρωτόνιο διαθέτει μαγνητική ροπή κατά πολύ μεγαλύτερη από την αναμενόμενη ($\mu_p = 2.79276 \mu_K$), ενώ το νετρόνιο, παρά το μηδενικό του ηλεκτρικό φορτίο, παρουσιάζει επίσης μαγνητική ροπή ($\mu_N = -1.91315 \mu_K$). Οι μαγνητικές ροπές του πρωτονίου και νετρονίου αποτελούν μία ένδειξη της ύπαρξης εσωτερικής δομής σ' αυτά τα δύο σωματίδια. Το αρνητικό πρόσημο της μαγνητικής ροπής του νετρονίου δείχνει ότι η μαγνητική ροπή έχει αντίθετο προσανατολισμό με

το σπιν.

Οι πυρήνες, επειδή έχουν μόνο θετικό φορτίο, δεν διαθέτουν ηλεκτρική διπολική ροπή. Η έλλειψη απόλυτης σφαιρικότητας και η κατανομή του φορτίου των πυρήνων με $I > 1$ (ελλειψοειδές εκ περιστροφής) δικαιολογεί την ύπαρξη *ηλεκτρικής τετραπολικής ροπής*, Q_e . Η πυρηνική ηλεκτρική τετραπολική ροπή έχει διαστάσεις επιφάνειας και χρησιμεύει ως μέτρο της αποκλίσεως της κατανομής του φορτίου του πυρήνα από τη σφαιρική συμμετρία.

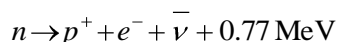
1.3 Τα στοιχειώδη σωματίδια.

Τα στοιχειώδη σωματίδια είναι τα μικρότερα συστατικά της ύλης. Για κάθε σωματίδιο υπάρχει και το αντίστοιχο *αντισωματίδιο*, το οποίο έχει τις ίδιες ιδιότητες αλλά αντίθετο φορτίο. Η συνύπαρξη σωματιδίων και αντισωματιδίων του ίδιου είδους στην ύλη δεν είναι δυνατή γιατί οδηγεί στον εκμηδενισμό της μάζας τους. Η ενέργεια, που αντιστοιχεί στη μάζα, που εκμηδενίζεται, εμφανίζεται με τη μορφή *φωτονίων* ή *μεσονίων*. Τα αντισωματίδια συμβολίζονται με το χαρακτηριστικό του σωματιδίου με μία οριζόντια γραμμή στο επάνω μέρος του (π.χ. νεutrίνο ν , αντινεutrίνο $\bar{\nu}$).

Τέσσερα από τα στοιχειώδη σωματίδια είναι σταθερά: το *φωτόνιο*, το *νεutrίνο*, το *ηλεκτρόνιο* και το *πρωτόνιο*. Το *φωτόνιο*, *quantum* φωτός, ταυτίζεται με το αντι-σωματίδιό του, πράγμα, το οποίο δεν συμβαίνει με τα υπόλοιπα τρία σταθερά στοιχειώδη σωματίδια. Τα υπόλοιπα στοιχειώδη σωματίδια διασπώνται με χαρακτηριστική διάρκεια ζωής (10^{-16} δευτερόλεπτα μέχρι 15 λεπτά) σε άλλα ελαφρύτερα. Η μάζα, που υπολείπεται, μεταδίδεται στα προϊόντα της διασπάσεως με τη μορφή κινητικής ενέργειας. Πρόσφατα ανακαλύφθηκαν στοιχειώδη σωματίδια με χρόνους υποδιπλασιασμού της τάξεως των 10^{-32} s. Τα σωματίδια αυτά, που ονομάζονται *συντονισμοί* (*resonances*), θεωρούνται διεγερμένες καταστάσεις άλλων σωματιδίων.

Τα στοιχειώδη σωματίδια (βλ. Πίνακα 1-1) μπορούν να χωρισθούν, ανάλογα με τη μάζα τους σε *λεπτόνια* (e^- , ν_e , μ , ν_μ), *μεσόνια* (π^0 , π^+ , π^- , K^0 , K^+ , η) και *βαρυόνια* (*νουκλεόνια*: p^+ , n και *υπερόνια*: Λ^0 , Σ^0 , Σ^+ , Σ^- , Ξ^0 , Ξ^- , Ω).

Το ελεύθερο νεutrίνο δεν είναι σταθερό και διασπάται με χρόνο υποδιπλασιασμού περίπου 12 λεπτά σε ένα πρωτόνιο, ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινεutrίνο.



Αυτή η διάσπαση του νετρονίου δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθεί στον πυρήνα λόγω της μεγάλης ενέργειας συνδέσεώς του. Η δημιουργία του ηλεκτρονίου σ' αυτή την περίπτωση απαιτεί περισσότερη ενέργεια απ' όση μπορεί να προσφερθεί από τη δημιουργία ενός ασθενέστερα συνδεδεμένου πρωτονίου.

Οι χαρακτηριστικότερες ιδιότητες των στοιχειωδών σωματιδίων, που συνήθως μελετώνται, είναι το φορτίο, η μάζα, το σπιν, ο χρόνος υποδιπλασιασμού και ο τρόπος διασπάσεώς τους.

Μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων μπορούν να διακριθούν τέσσερα διαφορετικά είδη αλληλεπιδράσεων:

- η ισχυρά
- η ηλεκτρομαγνητική
- η ασθενής και
- η της βαρύτητας.

Ο τελευταίος τρόπος αλληλεπίδρασης μεταξύ στοιχειωδών σωματιδίων είναι αρκετά ασθενής, ώστε να μην επηρεάζει τις ιδιότητές τους. Η ισχυρά και η ασθενής αλληλεπίδραση έχουν περιορισμένη εμβέλεια (περίπου την ακτίνα του πυρήνα), ενώ η ηλεκτρομαγνητική και αυτή της βαρύτητας άπειρη.

Η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη για τη σύνδεση των συστατικών των ατομικών πυρήνων και, συνεπώς, για την ύπαρξη των σταθερών πυρήνων. Η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση ρυθμίζει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων, ρευμάτων και μαγνητικών ροών στους ατομικούς πυρήνες. Τέλος, η ασθενής αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη για τη διάσπαση των βαρέων λεπτονίων σε ελαφρύτερα, ενώ η της βαρύτητας για την έλξη μεταξύ μαζών.

Οι διασπάσεις και οι αντιδράσεις των στοιχειωδών σωματιδίων υπακούουν τις αρχές της διατήρησης της ενέργειας, της ορμής, του ηλεκτρικού φορτίου και της στροφορμής.

Τα ενεργειακά φάσματα των διεγερμένων βαρυονίων και μεσονίων εξηγούνται, σύμφωνα με το πρότυπο των M. Gell-Mann και G. Zweig (1963), κάνοντας την παραδοχή ότι τα στοιχειώδη αυτά αποτελούνται από ακόμη μικρότερα συστατικά, τα *quarks*¹⁴. Πειραματικά μέχρι στιγμής έχει επιβεβαιωθεί η ύπαρξη πέντε τύπων quarks, που φέρουν τα χαρακτηριστικά **u**

¹⁴ Η ονομασία **quarks** προτάθηκε από τον Gell-Mann, ο οποίος και τα επινόησε σχεδόν ταυτόχρονα με τον George Zweig. Η ονομασία προέρχεται από το βιβλίο *Finnegan's Wake* του James Joyce.

(*up*), **d** (*down*), **s** (*strange*), **c** (*charmed*) και **b** (*beauty*). Θεωρητικά, υποστηρίζεται και η ύπαρξη ενός ακόμη quark με το χαρακτηριστικό **t** (*truth*).

Τα quarks έχουν καθορισμένη μάζα και φορτίο, που είναι τμήμα του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου. Τα u, c και t έχουν φορτίο ίσο με $(+2/3)e_0$, ενώ τα d, s και b ίσο με $(-1/3)e_0$. Το σπιν όλων των quarks είναι ίσο με $(\hbar/4\pi)$. Όπως τα στοιχειώδη σωματίδια τα quarks έχουν και τα αντίστοιχα *αντι-quarks*.

Κάθε quark μπορεί να υπάρξει σε τρεις κβαντικές καταστάσεις, που ονομάζονται *χρώματα*: το κόκκινο, το μπλε και το πράσινο. Υπάρχουν επίσης τα αντίστοιχα αντιχρώματα για τα αντι-quarks. Με τον συνδυασμό των διαφόρων quarks δημιουργούνται τα διάφορα στοιχειώδη σωματίδια. Τα βαρυόνια αποτελούνται από τρία quarks διαφορετικού χρώματος, ενώ τα μεσόνια από ένα ζεύγος quark – αντι-quark. Σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο, μπορούν να υπάρξουν ελεύθερα μόνο στοιχειώδη σωματίδια με συνδυασμό quarks, που οδηγεί στο λευκό χρώμα. Αυτό επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό quarks τριών χρωμάτων ή με την παρουσία ενός quark και του αντι-quark του με το αντίστοιχο αντιχρώμα. Είναι περιττό να αναφερθεί, ότι ο όρος *χρώμα* σ' αυτή την περίπτωση αποτελεί μία αφηρημένη έννοια, που επινοήθηκε για την κατανόηση των πυρηνικών δυνάμεων. Με βάση αυτή την αντίληψη επινοήθηκε η *κβαντο-χρωμοδυναμική* (*quantum chromodynamics*). Τα quanta του χρωματικού πεδίου, τα οποία εξηγούν την συγκράτηση των quarks μεταξύ τους, ονομάζονται συγκολλητές ή *γκλουόνια* (*gluons*)¹⁵. Τα quarks συγκρατούνται στα στοιχειώδη σωματίδια με πολύ ισχυρές δυνάμεις, που δεν εξασθενίζουν με την απόσταση. Αυτό εξηγεί και την αδυναμία της απομονώσεως των quarks. Ο πειραματικός διαχωρισμός ενός quark από κάποιο άλλο απαιτεί μεγαλύτερη ενέργεια από τη μάζα ηρεμίας του, πράγμα που οδηγεί στη δημιουργία ενός νέου quark. Έτσι παρ' όλον ότι η θεωρία των quarks εξηγεί τη συμπεριφορά και πολλές από τις ιδιότητες των στοιχειωδών σωματιδίων, δεν είναι ακόμα απόλυτα βέβαιο το κατά πόσον είναι πραγματικά σωματίδια ή μόνο μία θεωρητική εξήγηση πειραματικών δεδομένων.

¹⁵ Glue: κόλλα (αγγλ.)