

Η ατομική ιδέα: Ο θρίαμβος του Δημόκριτου

Εάν, σ' ένα παγκόσμιο κατακλυσμό, όλη η επιστημονική γνώση επρόκειτο να καταστραφεί εκτός από μία μόνο πρόταση που θα περνούσε στις επόμενες γενιές, ποια θα ήταν αυτή η πρόταση που θα περιείχε τη μέγιστη πληροφορία με τις ελάχιστες λέξεις;

Πιστεύω ότι είναι η ατομική ιδέα ότι, δηλαδή, τα πάντα είναι φτιαγμένα από άτομα-μικροσκοπικά σωμάτια που κινούνται γύρω-γύρω αέναα, έλκοντας άλληλα όταν είναι σε κοντινή απόσταση, αλλά απωθώντας άλληλα όταν συμπιεστούν το ένα πάνω στο άλλο.

Σ' αυτή τη μία πρόταση ενυπάρχει μια τεράστια ποσότητα πληροφορίας για τον Κόσμο, εάν διαθέσει κανείς λίγη φαντασία και σκέψη.

R. P. Feynman

Σύμφωνα με την ατομική ιδέα το καθετί αποτελείται από στοιχειώδη (δηλαδή αδιαίρετα) μικροσκοπικά σωμάτια³ που αλληλοέλκονται και αλληλοπαγιδεύονται χωρίς όμως να συνθλίβονται γιατί κινούνται αέναα. Έτσι σχηματίζεται, σε διαδοχικά στάδια, η τεράστια ποικιλία του Κόσμου. Τα σωμάτια αυτά θα τα ονομάσουμε στοιχειώδη σωμάτια ύλης (**σωμάτια-υ**) για να τα διακρίνουμε από τα στοιχειώδη μικροσκοπικά σωμάτια που είναι οι φορείς των διαφόρων ειδών δυνάμεων. Με άλλα λόγια, η ατομική δομή δεν περιορίζεται μόνο στην ύλη αλλά επεκτείνεται και στις δυνάμεις ή, πιο σωστά, και στις αλληλεπιδράσεις. Οι τελευταίες συνίστανται και ασκούνται μέσω ανταλλαγής αδιαίρετων σωματίων-φορέων που θα τα ονομάσουμε στοιχειώδη σωμάτια-φορείς αλληλεπιδράσεων (**σωμάτια-αλ**).

Η ατομική δομή του Κόσμου είναι πράγματι η πιο βασική ιδέα της Επιστήμης. Γιατί σ' αυτήν ενυπάρχει, όπως προσφύως επισημαίνει ο Feynman, τεράστια

³ Όμως η θεωρία των χορδών ή μεμβρανών (χωρίς πειραματική επιβεβαίωση μέχρι σήμερα (2012)) δέχεται στοιχειώδη αντικείμενα όχι σημειακά, αλλά γραμμικά ή διδιάστατα. κ.ο.κ.

ποσότητα πληροφορίας. Γιατί σ' αυτήν βρίσκεται η κρυμμένη απλότητα ενός Κόσμου που εμφανίζεται τόσο αφάνταστα ποικίλος και περίπλοκος στις δομές του. Γιατί αυτές οι δομές, τουλάχιστον όσες είναι σε θερμοδυναμική ισορροπία, μπορούν να κατανοηθούν σε ποσοτικό επίπεδο με βάση τις *ιδιότητες* και τις *κινήσεις* των μικροσκοπικών σωματίων που τις αποτελούν. Μ' άλλα λόγια, οι δομές αυτές εξαρτώνται μόνο από κάποιους λίγους αριθμούς μετρημένους στα δάχτυλα του ενός χεριού που χαρακτηρίζουν τα στοιχειώδη σωματία και τις αλληλεπιδράσεις τους. Π.χ., οι ποικίλες ιδιότητες των *διαφόρων* μετάλλων, όπως η πυκνότητά τους, η ηλεκτρική τους αντίσταση, η θερμική τους αγωγιμότητα, η μηχανική τους αντοχή, η τήξη τους, η σκληρότητά τους, το αν σκουριάζουν ή όχι, το αν μαγνητίζονται ή όχι, η αδιαφάνειά τους στο φως, το πόσο γρήγορα διαδίδεται ο ήχος σ' αυτά κ.λπ. εξαρτώνται, χάρη στην ατομική ιδέα, από τέσσερις μόνο αριθμούς. Από αυτούς οι τρεις (η λεγόμενη παγκόσμια σταθερά του Planck \hbar , το ηλεκτρικό φορτίο του πρωτονίου e , και η μάζα του ηλεκτρονίου m_e) είναι οι ίδιοι για όλα τα μέταλλα και για όλη την οικεία υλη και μόνο ο τέταρτος –ένας ακέραιος αριθμός που συμβολίζεται με Z και ονομάζεται ατομικός αριθμός– διαφέρει από στοιχείο σε στοιχείο. Στις ποσότητες αυτές θα επανέλθουμε σε λίγο.

Για να αποκτήσει «σάρκα και οστά» η ατομική ιδέα χρειάζεται να γνωρίζουμε με ποια είναι τα διάφορα είδη των στοιχειωδών σωματίων ύλης (σωματίων-υ) και ποια τα διάφορα είδη των στοιχειωδών σωματίων των αλληλεπιδράσεων (σωματίων-αλ), τι ιδιότητες έχουν, πώς τα πρώτα αλληλεπιδρούν με τα δεύτερα και επομένως ποιες αλληλοπαγιδεύσεις είναι εφικτές ώστε να προχωρήσουμε έτσι στα επόμενα στάδια οργάνωσης της ύλης.

1.1 Τα στοιχειώδη σωματία της ύλης σήμερα⁴

Η ύλη που μας περιβάλλει (στην παρούσα φάση της εξέλιξης του Σύμπαντος) ή μας αποτελεί δημιουργείται από δύο είδη **κουάρκ**⁵ (το **πάνω** κουάρκ u και το

⁴ Η μέχρι τώρα εμπειρία έχει δείξει ότι αυτά που κατά καιρούς θεωρούσαμε στοιχειώδη αποδείχτηκαν σύνθετα. Το κάθε άτομο δεν είναι στοιχειώδες, όπως αρχικά εθεωρείτο, αφού συνίσταται από πυρήνα και ηλεκτρόνια. Ο κάθε πυρήνας δεν είναι στοιχειώδης, αφού συνίσταται από πρωτόνια και νετρόνια (εκτός αυτού του απλού υδρογόνου). Τα πρωτόνια και τα νετρόνια δεν είναι στοιχειώδη, αφού συνίστανται από τρία κουάρκ. Ίσως με τα ηλεκτρόνια και τα κουάρκ να φτάσαμε επιτέλους στο τέλος. Έστω και αν τα ηλεκτρόνια, τα κουάρκ και όλα τα άλλα σωματία του Πίν. III είναι πράγματι στοιχειώδη, μπορεί να υπάρχουν και άλλα στοιχειώδη σωματία ύλης στο Σύμπαν που δεν έχουν βρεθεί πειραματικά. Αστρονομικές παρατηρήσεις συνηγορούν υπέρ της ύπαρξης τέτοιων μη ανακαλυφθέντων σωματίων, που αποτελούν τη λεγόμενη σκοτεινή ύλη.

⁵ Το κάθε κουάρκ εκτός από ηλεκτρικό φορτίο φέρει και ένα άλλο είδος φορτίου που έχει καθιερωθεί να ονομάζεται **χρωματικό φορτίο** (αν και δεν έχει καμία σχέση με χρώμα). Όπως το ηλεκτρικό φορτίο είναι πηγή και αποδέκτης της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης,

κάτω κουάρκ d) και μόνο ένα είδος **ηλεκτρονίου** που το σύμβολό του είναι e ή e^- . Στην πραγματικότητα, τα κουάρκ δεν έχουν παρατηρηθεί ελεύθερα αλλά πάντοτε ως συστατικά σύνθετων σωματίων ύλης όπως π.χ. τα πρωτόνια.

Το ηλεκτρόνιο, κατά τις αλληλεπιδράσεις του με σωματΙΑ-φορείς αλληλεπιδράσεων δημιουργεί, αυτοκαταστρεφόμενο σε ορισμένες περιπτώσεις, ένα σωματΙΟ που λέγεται **νετρίνο** και συμβολίζεται ως ν_e , το οποίο όμως διαφεύγει στο διάστημα και δεν παγιδεύεται στην ύλη. Τα ηλεκτρόνια και τα νετρίνα έχουν το κοινό όνομα **λεπτόνια**.

Έτσι, η συνήθης ύλη περιλαμβάνει τρία μόνο είδη σωματίων ύλης: δύο κουάρκ και ένα λεπτόνιο, το ηλεκτρόνιο. (Αν θέλουμε να μετρήσουμε και το νετρίνο, παρόλο που δε συμμετέχει στη συνήθη ύλη, τότε τα λεπτόνια είναι και αυτά δύο ειδών.) Οι ιδιότητες των σωματίων αυτών (περιλαμβανομένου και του νετρίνου) φαίνονται στην πρώτη οικογένεια του Πίν. III (σελ. 14 και 15). Και τα τέσσερα σωματΙΑ ύλης έχουν μια εσωτερική ιδιότητα που ονομάζεται **σπιν** και έχει την τιμή $1/2$ (ημιακέραιος). Το σπιν συνδέεται με την εσωτερική στροφορμή του σωματίου με τη σχέση: εσωτερική στροφορμή = σπιν $\times \hbar$, όπου \hbar είναι η σταθερά του Planck.

Δύο πάνω και ένα κάτω κουάρκ με την παρουσία και τη βοήθεια σωματίων-φορέων αλληλεπιδράσεων αλληλοπαγιδεύονται και δημιουργούν το πρωτόνιο

$$p = (u, u, d). \quad (1.1)$$

Δύο κάτω και ένα πάνω κουάρκ με την παρουσία και τη βοήθεια σωματίων-φορέων αλληλεπιδράσεων αλληλοπαγιδεύονται και δημιουργούν το νετρόνιο

$$n = (u, d, d). \quad (1.2)$$

Τα πρωτόνια, τα νετρόνια και άλλα παρόμοια σύνθετα σωματΙΑ, που αποτελούνται από τρία κουάρκ, φέρουν το κοινό όνομα **βαρυόνια** και τους αποδίδεται ο βαρυονικός αριθμός 1. Κατά συνέπεια αποδίδουμε στο κάθε κουάρκ **βαρυονικό αριθμό** $1/3$. Η τιμή μηδέν, για το λεπτονικό αριθμό των κουάρκ, δείχνει απλώς

έτσι και το χρωματικό φορτίο είναι πηγή και αποδέκτης της λεγόμενης ισχυρής δύναμης (βλ. Πίν. IV, σελ. 19). Σε αντίθεση με το ηλεκτρικό φορτίο (που είναι ενός μόνο τύπου) το χρωματικό φορτίο είναι τριών τύπων «κόκκινο» (R), «πράσινο» (G) και «μπλε» (B). Έτσι κάθε κουάρκ μπορεί να φέρει μια μονάδα, «κόκκινου» χρωματικού φορτίου ή «πράσινου» χρωματικού φορτίου ή «μπλε» χρωματικού φορτίου. Το κάθε αντικουάρκ φέρει αντίθετο χρωματικό φορτίο από το αντίστοιχο κουάρκ. Έχουμε έτσι για κάθε αντικουάρκ τη δυνατότητα «αντικόκκινου» \bar{R} ή «αντιπράσινου» \bar{G} ή «αντιμπλέ» \bar{B} χρωματικού φορτίου. Οι συνδυασμοί κουάρκ-αντικουάρκ ή τριών κουάρκ, $R\bar{R}$, $G\bar{G}$, $B\bar{B}$, RGB , $\bar{R}\bar{G}\bar{B}$ που εμφανίζονται στη φύση αντιστοιχούν πάντοτε σε μηδενικό συνολικό χρωματικό φορτίο.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ: ΤΑ ΓΝΩΣΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΑ ΤΗΣ ΥΛΗΣ

Τα στοιχειώδη σωματίια ύλης (σωμάτια-υ) είναι δύο τύπων (λεπτόνια και κουάρκ) και τριών “οικογενειών” (1^η, 2^η, 3^η). Η συνήθης ύλη αποτελείται από τρία μόνο είδη σωματίων (e , u , d). Τα νετρίνα είναι πολύ ελαφριά και πολύ ασθενώς αλληλεπιδρώντα για να παγιδευτούν στην ύλη και επομένως κυκλοφορούν παντού ελεύθερα. Τα σωματίια-υ των οικογενειών 2 και 3 έχουν περίσσεια ενέργειας ηρεμίας και ως εκ τούτου είναι μετασταθή και μετασχηματίζονται σε σωματίια της 1^{ης}

		ΛΕΠΤΟΝΙΑ					
		Όνομα/ Σύμβολο	Μάζα $\times c^2$ (MeV)	Σπιν	Ηλεκτρικό φορτίο	Βαρυονικός αριθμός	Λεπτονικός αριθμός
1 ^η Οικογένεια	Νετρίνο ηλεκτρονίου ν_e	$\approx 2 \times 10^{-9}$;	1/2	0	0	1_e	
	Ηλεκτρόνιο e	0,511 0,5109989	1/2	-1	0	1_e	
2 ^η Οικογένεια	Νετρίνο μιονίου ν_μ	$\approx 8 \times 10^{-9}$;	1/2	0	0	1_μ	
	Μιόνιο μ	105,658	1/2	-1	0	1_μ	
3 ^η Οικογένεια	Νετρίνο του τ ν_τ	$\approx 5 \times 10^{-8}$;	1/2	0	0	1_τ	
	Σωματίιο τ τ	1777,05	1/2	-1	0	1_τ	

ότι τα κουάρκ δεν είναι λεπτόνια. Το αντίθετο συμβαίνει για τα λεπτόνια: Το κάθε λεπτόνιο φέρει **λεπτονικό αριθμό** 1 και βαρυονικό αριθμό μηδέν.

Θυμίζουμε ότι για κάθε ένα από τα παραπάνω τέσσερα σωματίια⁶ υπάρχει το **αντισωματίο** του που συμβολίζεται με \bar{u} , \bar{d} , e^+ , $\bar{\nu}_e$ αντίστοιχα. Η μάζα, το σπιν και το μέγεθος του κάθε αντισωματίου είναι ακριβώς ίδια με αυτά του αντίστοιχου σωματίου, ενώ το ηλεκτρικό φορτίο, το χρωματικό φορτίο, ο βαρυονικός αριθμός και ο λεπτονικός αριθμός είναι ακριβώς αντίθετα. Ας σημειωθεί ότι τα αντισωματίια δε συμμετέχουν στη δομή της συνηθισμένης ύλης, τα παράγουμε όμως πειραματικά στους επιταχυντές-αντιδραστήρες υψηλής ενέργειας και

⁶ Τονίζουμε ότι το νετρίνο, επειδή δεν παγιδεύεται μαζί με άλλα σωματίια, δε συμμετέχει στη δομή των επόμενων επιπέδων οργάνωσης της ύλης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ (συνέχεια)

οικογένειας. Αστροφυσικές και κοσμολογικές παρατηρήσεις υποδεικνύουν ότι θα πρέπει να υπάρχουν και άλλα σωματΙΑ-υ, που προβλέπονται από κάποιες θεωρίες, αλλά δεν έχουν βρεθεί (ακόμη). Ας σημειωθεί ότι όλα τα σωματΙΑ-υ έχουν σπιν $1/2$. Τα κουάρκ φέρουν χρωματικό φορτίο τριών ειδών (R, G, B), απ' όπου και οι αντίστοιχοι κάτω δείκτες που συνοδεύουν το σύμβολό τους.

		ΚΟΥΑΡΚ					
		Όνομα/ Σύμβολο	Μάζα $\times c^2$ (MeV)	Σπιν	Ηλεκτρικό φορτίο	Βαρυονικός αριθμός	Λεπτονικός αριθμός
1 ^η Οικογένεια	πάνω κουάρκ u_{RGB}	1,5-4,5	1/2	2/3	1/3	0	
	κάτω κουάρκ d_{RGB}	5-8,5	1/2	-1/3	1/3	0	
2 ^η Οικογένεια	χαρισματικό c_{RGB}	1000- 1400	1/2	2/3	1/3	0	
	παράξενο s_{RGB}	80-155	1/2	-1/3	1/3	0	
3 ^η Οικογένεια	κορυφαίο t_{RGB}	174000	1/2	2/3	1/3	0	
	πυθμενικό b_{RGB}	4000- 4500	1/2	-1/3	1/3	0	

Άλλα σωματΙΑ ; Μάζα νετρίνων ;

προκύπτουν υποχρεωτικά και αβίαστα από τη θεωρία. Ένα κουάρκ και ένα αντι-κουάρκ σχηματίζουν σύνθετα σωματΙΑ που ονομάζονται **μεσόνια**. Τα μεσόνια είναι μετασταθή σωματΙΑ και άρα βραχύβια. Παράγονται κατά τις συγκρούσεις των κοσμικών ακτίνων με σωματΙΑ της ατμόσφαιρας ή, τεχνητά, σε επιταχυντές-αντιδραστήρες. Πρωτόνια και νετρόνια αλληλοπαγιδεύονται (με τη βοήθεια πάντοτε κάποιων σωματίων-φορέων αλληλεπιδράσεων) και δημιουργούν τους ατομικούς πυρήνες.

Οι πυρήνες, που είναι θετικά φορτισμένοι, παγιδεύουν γύρω τους ηλεκτρόνια (με τη βοήθεια των σωματίων-φορέων των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων) δημιουργώντας έτσι τα ουδέτερα άτομα (όταν ο αριθμός πρωτονίων στον

πυρήνα και ηλεκτρονίων είναι ίσος) ή τα ιόντα (όταν ο αριθμός πρωτονίων διαφέρει από τον αριθμό ηλεκτρονίων).

Η φύση φαίνεται ότι στάθηκε σπάταλη και δημιούργησε εκτός από την πρώτη οικογένεια των τεσσάρων σωματίων στον Πίν. III, και άλλες δύο παρόμοιες οικογένειες στοιχειωδών σωματίων, που η κάθε μια τους αποτελείται από τέσσερα σωματία ύλης (δύο κουάρκ και δύο λεπτόνια), όπως φαίνεται στον Πίν. III. Το κάθε ένα από τα κουάρκ c, s, t, b φέρει επίσης χρωματικό φορτίο που είναι τριών τύπων: R, G, B .

Τα σωματία των οικογενειών 2 και 3 του Πίν. III δεν μετέχουν στο σχηματισμό της ύλης, λόγω του ότι δεν είναι σταθερά. Αυτό γιατί είναι βαρύτερα από τα αντίστοιχα της οικογένειας 1 του Πίν. III και επομένως διαθέτουν περίσσεια ενέργειας ηρεμίας ώστε με τη βοήθεια σωματίων-φορέων αλληλεπιδράσεων να μετασχηματίζονται σε σωματία της πρώτης οικογένειας. Άρα τα σωματία των οικογενειών 2 και 3 του Πίν. III είναι μετασταθή με την έννοια ότι χαρακτηρίζονται από ένα πεπερασμένο **μέσο χρόνο ζωής** (mean lifetime) τ ή **χρόνο υποδιπλασιασμού** $t_{1/2}$. Ο χρόνος τ χαρακτηρίζει την εκθετική μείωση με την πάροδο του χρόνου t ενός αρχικού πληθυσμού N_0 , $N(t) = N_0 \exp(-t/\tau)$. Ο χρόνος $t_{1/2}$ είναι ο απαιτούμενος χρόνος για να υποδιπλασιαστεί ο αρχικός πληθυσμός: $N(t_{1/2}) \equiv N_0 \exp(-t_{1/2}/\tau) = N_0/2$. Έπεται ότι $t_{1/2} = (\ln 2)\tau \approx 0,693\tau$. Π.χ., το μόνιο μετασχηματίζεται ως εξής:



με χρόνο υποδιπλασιασμού $1,523 \times 10^{-6}$ s.

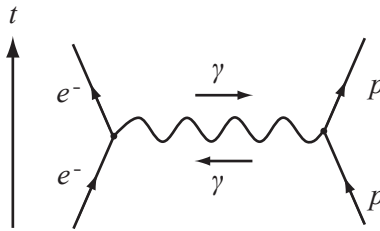
Όλα τα σωματία του Πίν. III έχουν τα αντισωματίά τους, όπως απαιτεί η θεωρία και επιβεβαιώνει το πείραμα. Και τα σωματία και τα αντισωματία του Πίν. III έχουν παρατηρηθεί και αναλυθεί πειραματικά. Κλείνοντας αυτήν την ενότητα, ας επισημάνουμε ξανά ότι από τα 12 σωματία του Πίν. III και τα 12 αντισωματίά τους μόνο τρία (το άνω κουάρκ u , το κάτω κουάρκ d , και το ηλεκτρόνιο e) μετέχουν στη δομή της ύλης που μας αποτελεί και μας περιβάλλει.

Αν λάβουμε υπόψη και το χρωματικό φορτίο, ο αριθμός των κουάρκ και των αντικουάρκ τριπλασιάζεται. Ας σημειωθεί ότι όλα τα σωματία ύλης του Πίν. III έχουν spin $1/2$, πράγμα που συνεπάγεται ότι υπόκεινται στην απαγορευτική αρχή του Pauli (βλ. σελ. 38, 39). Σωματία με spin ημιακέραιο ονομάζονται **φερμιόνια**.

1.2 Τα στοιχειώδη σωματία των δυνάμεων (ή αλληλεπιδράσεων)

Υπάρχουν τεσσάρων ειδών στοιχειώδεις δυνάμεις ή, πιο σωστά, στοιχειώδεις αλληλεπιδράσεις: Η βαρυτική, η ΗΜ, η ασθενής πυρηνική και η ισχυρή πυρηνική. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές εκτός από τη δημιουργία ελκτικών ή απωστικών δυνάμεων μπορούν να παίξουν ένα γενικότερο ρόλο με το να συμμετέχουν στο

μετασηματισμό σωματίων. Κάθε στοιχειώδες σωματίο (επομένως και κάθε σύνθετο) είναι πηγή αλλά και αποδέκτης μίας τουλάχιστον από τις τέσσερις στοιχειώδεις αλληλεπιδράσεις. Πηγή με την έννοια ότι μπορεί να εκπέμψει ένα σωματίο-φορέα της υπόψη αλληλεπίδρασης και αποδέκτης με την έννοια ότι μπορεί να απορροφήσει ένα σωματίο-φορέα της υπόψη αλληλεπίδρασης. Π.χ., η ηλεκτρική έλξη μεταξύ ενός ηλεκτρονίου και ενός πρωτονίου μπορεί να θεωρηθεί ότι οφείλεται στο ότι το ηλεκτρόνιο εκπέμπει το φορέα της ηλεκτρομαγνητικής (ΗΜ) αλληλεπίδρασης, που ονομάζεται **φωτόνιο**, και στο ότι το πρωτόνιο απορροφά αυτό το φωτόνιο ή αντίστροφα. Η διαδικασία αυτή μπορεί να παρασταθεί διαγραμματικά, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.1.



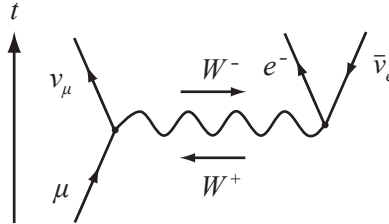
Σχ. 1.1 Η ηλεκτρομαγνητική (ΗΜ) αλληλεπίδραση ηλεκτρονίου-πρωτονίου οφείλεται στην ανταλλαγή ενός σωματίου-φορέα της ΗΜ αλληλεπίδρασης, που ονομάζεται φωτόνιο (γ). Στην περίπτωση αυτή ούτε το ηλεκτρόνιο ούτε το πρωτόνιο μετασηματίζεται σε άλλο σωματίο. Η προκύπτουσα δυναμική ενέργεια στην περίπτωση αυτή είναι της γνωστής μορφής Coulomb, $\psi \approx -e^2/r$, όπου e είναι το ηλεκτρικό φορτίο του πρωτονίου, $-e$ αυτό του ηλεκτρονίου και r η μεταξύ τους απόσταση. Το φωτόνιο στην παρούσα περίπτωση δεν εμφανίζεται ούτε στην αρχική ούτε στην τελική κατάσταση. Όταν συμβαίνει αυτό λέμε ότι το φωτόνιο εν προκειμένω (ή το σωματίο-αλ εν γένει) είναι εικονικό. Το βέλος αριστερά δείχνει τη φορά του χρόνου.

Ένα παράδειγμα μετασηματισμού που οφείλεται στη μεσολάβηση ενός σωματίου φορέα αλληλεπίδρασης είναι αυτό της σχέσης (1.3), η οποία μπορεί να παρασταθεί διαγραμματικά, όπως στο Σχ. 1.2.

Ας σημειωθεί ότι και η διαδικασία του Σχ. 1.1 μπορεί να θεωρηθεί ως ένας τετριμμένος (ταυτοτικός) μετασηματισμός όπου το αρχικό ζεύγος ηλεκτρονίου-πρωτονίου μετασηματίζεται σε ένα τελικό ζεύγος πάλι ηλεκτρονίου-πρωτονίου με τη βοήθεια ενός εικονικού φωτονίου.

Στον Πίν. IV (μεθεπόμενη σελίδα) δίνονται κάποια στοιχεία για τις τέσσερις βασικές αλληλεπιδράσεις. Τα σύμβολα που εμφανίζονται στην τρίτη στήλη του Πίν. IV έχουν ως εξής: G είναι η παγκόσμια σταθερά της βαρύτητας, \hbar είναι η σταθερά του Planck (διά 2π), το «σήμα κατατεθέν» της Κβαντομηχανικής, c είναι

η ταχύτητα του φωτός στο κενό, g_w είναι ένα μέτρο της έντασης της ασθενούς αλληλεπίδρασης, m_w είναι η μάζα του σωματίου-αλ W^+ και g_s είναι ένα μέτρο της έντασης της ισχυρής αλληλεπίδρασης.



Σχ. 1.2 Ο αφανισμός του μιονίου με την τελική δημιουργία ενός ηλεκτρονίου και ενός ζεύγους νετρίνου-αντινετρίνου επιτυγχάνεται με την εκπομπή ενός σωματίου, που συμβολίζεται με W^- και είναι ένας από τους φορείς της λεγόμενης ασθενούς αλληλεπίδρασης (το W^- στη συνέχεια αφανίζεται με τη δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-αντινετρίνου). Ο μετασχηματισμός αυτός γίνεται και με την απορρόφηση ενός W^+ , εάν αυτό έχει ήδη εκπεμφθεί ταυτόχρονα με τη δημιουργία του ζεύγους ηλεκτρονίου-αντινετρίνου. Ας σημειωθεί ότι τα αντισωματάρια τα παριστάνουμε με φορά αντίθετη από αυτή του βέλους του χρόνου, ως να προχωρούν προς το παρελθόν (βλ. [20], σελ. 576-578). Διαγράμματα όπως αυτά των σχημάτων 1.1, 1.2 και αυτών που ακολουθούν ονομάζονται διαγράμματα Feynman. Τα διαγράμματα αυτά είναι πολύ χρήσιμα, γιατί αφενός μεν δίνουν μια εναργή εικόνα της φυσικής διαδικασίας, αφετέρου δε επιτρέπουν μέσω συγκεκριμένων κανόνων τον υπολογισμό ποσοτήτων όπως είναι, π.χ., ο χρόνος ζωής του μιονίου.

Οι αριθμητικές τιμές των βασικών παγκόσμιων σταθερών δίνονται στον πίνακα 1 στο εσώφυλλο του βιβλίου. Η εμβέλεια r_0 των αλληλεπιδράσεων (εκτός της ισχυρής) συνδέεται με τη μάζα m των φορέων τους ως εξής: $r_0 = \hbar/mc$.

Ας σημειωθεί ότι το σπιν όλων των σωματίων-αλ είναι ακέραιο σε αντίθεση με αυτό των σωματίων-υ που έχουν σπιν ημιακέραιο. Ως συνέπεια του γεγονότος αυτού τα σωματάρια-αλ δεν υπόκεινται στην απαγόρευση του να βρεθούν περισσότερα από ένα όμοια στην ίδια κατάσταση. Μάλιστα, τα σωματάρια με ακέραιο σπιν, που ονομάζονται **μποζόνια**, προτιμούν να βρεθούν μαζί με άλλα όμοιά τους στην ίδια κατάσταση.

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι τα σωματάρια-φορείς των αλληλεπιδράσεων δεν είναι απλώς ένα νοητικό εργαλείο για να υπολογίζουμε σωστά τα αποτελέσματα των αλληλεπιδράσεων. Τα σωματάρια αυτά έχουν πραγματική υπόσταση και έχουν παρατηρηθεί και μετρηθεί⁷ στις πειραματικές διατάξεις που συνοδεύουν τους αντιδραστήρες υψηλών ενεργειών.

⁷ Εξαιρέση αποτελεί το βαρυτόνιο που δεν έχει παρατηρηθεί λόγω της απειροελάχιστης ισχύος αλληλεπίδρασης του.

ΠΙΝΑΚΑΣ IV: ΟΙ ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΑ ΣΩΜΑΤΙΑ-ΦΟΡΕΙΣ ΤΟΥΣ

Όνομα	Εμβέλεια (m)	Αδιάστατη ένταση	Σωματίο(α) φορέας(είς)	Σύμβολο	Μάζα $\times c^2$ ηρεμίας (MeV)	Ηλεκτρικό φορτίο	Σπιν	Χρωματικό φορτίο	Ποια σώματα είναι πηγές και αποδέκτες
Βαρύτητα	∞	$a_G = Gm_p^2/(\hbar c) = 5,9 \times 10^{-39}$	Βαρυτόνιο	-	0	0	2	0	Όλα (λεπτόνια, κουάρκ και αυτά του πάροντος πίνακα)
Ηλεκτρομαγνητική (ΗΜ)	∞ (αλλά + και -)	$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$	Φωτόνιο	γ	0	0	1	0	Όλα όσα έχουν ηλεκτρικό φορτίο
Ασθενής πυρηνική	10^{-18}	$\alpha_W = \frac{g_w^2}{\hbar c} \approx 10^{-5}$	Διανυσματικά μποζόνια	W^+ W^- Z^0	80000 80000 91000	1 -1 0	1 1 1	0	Κουάρκ και λεπτόνια, φωτόνια και διανυσματικά μποζόνια
Ισχυρή πυρηνική	10^{-15}	$\alpha_s = \frac{g_s^2}{\hbar c} \approx 1$	Γλοϊόνια*	g	0	0	1	Ναι*	Κουάρκ και γλοϊόνια

Σωματίο Higgs: Δεν έχει βρεθεί ακόμη (2012), αν και ανακοινώθηκαν σοβαρές ενδείξεις για την ύπαρξή του· $114 \text{ GeV} \leq m_H \times c^2 \leq 130 \text{ GeV}$, σπιν = 0, ηλ.φορτίο = 0. Αναμένεται να βρεθεί τα προσεχή χρόνια ή και μήνες.

* Τα γλοϊόνια είναι πάντοτε παγιδευμένα, όπως και τα κουάρκ, και δεν έχουν παρατηρηθεί ελεύθερα. Ας σημειωθεί ότι τα γλοϊόνια φέρουν συνδυασμό χρωματικού φορτίου και αντιφορτίου (σε αντίθεση με τα φωτόνια που είναι ηλεκτρικά ουδέτερα). Το αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι ότι και τα ίδια τα γλοϊόνια είναι πηγές και αποδέκτες της ισχυρής αλληλεπίδρασης. Ένα ακόμη αποτέλεσμα είναι ότι η ισχυρή αλληλεπίδραση δε διατηρεί κατ' ανάγκη το χρωματικό φορτίο ενός κουάρκ. Π.χ. ένα «κόκκινο (R) κουάρκ u μπορεί να γίνει «μπλε» (B) κουάρκ u εκπέμποντας ένα γλοϊόνιο $R\bar{B}$ ή απορροφώντας ένα γλοϊόνιο $B\bar{R}$. Αν λάβουμε υπόψη το χρωματικό φορτίο υπάρχουν οκτώ είδη γλοϊονίων: $R\bar{B}, R\bar{G}, G\bar{B}, B\bar{R}, B\bar{G}, G\bar{R}, R\bar{R}, G\bar{G}$ και $(R\bar{R} + G\bar{G})/\sqrt{6}$.

Ας σημειωθεί ότι η τρέχουσα προσπάθεια είναι να αναπτυχθεί μια ενιαία θεωρία και για τις τέσσερις αλληλεπιδράσεις έτσι ώστε να εμφανιστούν ως διαφορετικές «όψεις» μίας μόνο ενοποιημένης αλληλεπίδρασης (κατ' αντιστοιχία με την ενοποίηση των ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων που επέτυχαν οι εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητισμού του Maxwell). Η προσπάθεια ενοποίησης έχει αποδώσει καρπούς με τη δημιουργία του λεγόμενου **καθιερωμένου προτύπου** που εξετάζει με ενιαίο τρόπο τις τρεις από τις τέσσερις βασικές αλληλεπιδράσεις. (Η βαρύτητα «αρνείται» προς το παρόν να ενταχθεί στο ενιαίο σχήμα.)

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σωματίδια-φορείς των αλληλεπιδράσεων, καίτοι τα περισσότερα δεν έχουν μάζα ηρεμίας, εντούτοις έχουν ενέργεια E και επομένως με βάση τη σχέση του Einstein $E = mc^2$ έχουν και σχετικιστική μάζα (π.χ. το φωτόνιο έχει σχετικιστική μάζα $m = \hbar\omega/c^2$, παρόλο που έχει μάζα ηρεμίας μηδέν). Επομένως και τα σωματίδια-φορείς αλληλεπιδράσεων μπορούν να θεωρηθούν ως υλικά σωματίδια (με την ευρεία όμως έννοια) και ως εκ τούτου υπόκεινται στις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις.

Ας σημειωθεί επίσης ότι σε αρκετές περιπτώσεις χειριζόμαστε τις αλληλεπιδράσεις ως κλασικά κύματα ή ακόμη και ως κλασικές δυνάμεις με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συνήθως λαμβάνουμε υπόψη τον κυματοσωματιδιακό χαρακτήρα των αλληλεπιδράσεων, όταν πρόκειται για μετασχηματισμούς ή για υπολογισμούς υψηλής ακρίβειας. **Στο παρόν βιβλίο θα χειριστούμε τις αλληλεπιδράσεις ως επί το πλείστον ως κλασικά κύματα ή ακόμη και ως κλασικές δυνάμεις, δηλαδή με ακαριαία δράση από απόσταση.**

Στα επόμενα κεφάλαια του βιβλίου θα επανέλθουμε στα στοιχειώδη σωματίδια των Πίν. III και IV (που είναι στην πραγματικότητα κυματοσωματίδια) για να αναφέρουμε πώς αλληλοπαγιδεύονται και πώς μετασχηματίζονται. Προς το παρόν περιοριζόμαστε σε κάποιες επισημάνσεις που πρέπει να έχει υπόψη του ο αναγνώστης.

1.3 Σχόλια

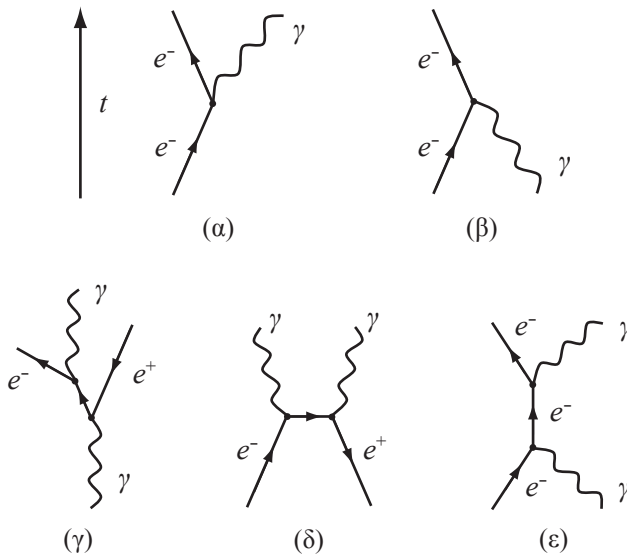
Η βαρυτική αλληλεπίδραση είναι αφάνταστα πιο ασθενική από οποιαδήποτε άλλη. Κάθε φορά που ανασηκώνετε ένα αντικείμενο, οι μύες σας, μάζας της τάξης ενός κιλού που λειτουργούν με ό,τι περισσεύει από τις προσθαιρέσεις των ΗΜ αλληλεπιδράσεων, υπερνικούν τη βαρύτητα που ασκεί όλη η Γη πάνω στο αντικείμενο που ανασηκώνετε. Εντούτοις, αυτή η απίστευτα ασήμαντη βαρυτική αλληλεπίδραση γίνεται συγκρίσιμη και φτάνει στο σημείο να κυριαρχήσει ενεργειακά σε αντικείμενα πολύ μεγάλου αριθμού στοιχειωδών σωματίων-υ, όπως είναι ένας πλανήτης (όπου ο αριθμός N_ν πρωτονίων και νετρονίων μαζί είναι της τάξης του 10^{50} - 10^{54}) ή ένα άστρο όπου το N_ν είναι της τάξης 10^{56} - 10^{59} .

Αυτό οφείλεται στο μοναδικό συνδυασμό δύο παραγόντων που χαρακτηρίζουν τη βαρύτητα: Του *πάντοτε* ελκτικού χαρακτήρα της και της μακράς εμβέλειάς της. Ένα άλλο μοναδικό χαρακτηριστικό της βαρύτητας είναι το ότι *όλων* των ειδών τα σωμάτια –και τα σωμάτια-υ και τα σωμάτια-αλ (περιλαμβανομένων και των ίδιων των βαρυτονίων)– είναι και πηγές και αποδέκτες της βαρυτικής αλληλεπίδρασης, αφού όλα τους έχουν μη μηδενική ενέργεια, άρα και μη μηδενική σχετικιστική μάζα. Αυτή η οικουμενικότητα της βαρύτητας φαίνεται κάπως δικαιολογημένη με βάση την κεντρική ιδέα της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας του Einstein. Σύμφωνα με αυτήν την ιδέα η βαρύτητα δεν είναι τίποτε άλλο παρά η *τροποποιημένη γεωμετρία του χωρόχρονου* λόγω της παρουσίας ενέργειας. Επομένως, αφού στη γεωμετρία υπόκειται το καθετί, το ίδιο θα ισχύει και για τη βαρύτητα. Θα κλείσω αυτήν την παράγραφο με την παρατήρηση ότι από τις τέσσερις στοιχειώδεις αλληλεπιδράσεις η λιγότερο κατανοητή είναι η βαρύτητα, παρόλο που είναι η πιο οικεία και παρόλο που προηγήθηκε κατά 200 χρόνια στην ποσοτική της μελέτη.

Η ΗΜ αλληλεπίδραση παρουσιάζει επίσης κάποιες μοναδικές ιδιότητες. Πρώτον, είναι η μόνη που καθορίζει τη δομή της ύλης από την κλίμακα του ατόμου (10^{-10} m) έως αυτήν ενός αστεροειδούς (10^5 m), είναι δηλαδή αυτή που “*βασιλεύει*” για 15 τάξεις μεγέθους. Δεύτερον, το στοιχειώδες σωμάτιο-αλ της ΗΜ αλληλεπίδρασης, το φωτόνιο, πέρα από το να “*μεσιτεύει*” την ΗΜ δύναμη, μπορεί να ταξιδεύει ελεύθερο στο χώρο μεταφέροντας σε μεγάλες αποστάσεις *ενέργεια* και *πληροφορία*. Κανένα άλλο σωμάτιο-αλ δεν είναι σε θέση να το κάνει αυτό: Το βαρυτόνιο είναι πολύ αδύναμο για να γίνει αισθητό τουλάχιστον με την παρούσα τεχνολογία. Τα διανυσματικά μποζόνια είναι πολύ βραχύβια για ένα τέτοιο ρόλο. Τέλος, τα γλοιόνια είναι για πάντα εγκλωβισμένα στα βαρυόνια και τα μεσόνια. Τρίτον, τα φωτόνια μπορούν εύκολα να εκπεμφθούν και να ανιχνευτούν (βλ. Σχ. 1.3, σελ. 22). Αυτές οι μοναδικές ιδιότητες των φωτονίων τα καθιστούν καίριας σημασίας για τον Κόσμο: Π.χ., υπάρχει ζωή στη Γη και χάρη στα φωτόνια που μεταφέρουν ενέργεια και πληροφορία από τον Ήλιο. Βλέπουμε τα διάφορα αντικείμενα χάρη στα εκπεμπόμενα από αυτά φωτόνια που καταλήγουν στα μάτια μας. Τα κινητά τηλέφωνα, οι τηλεοράσεις, το ασύρματο internet, οι τομογραφίες, τα τηλεκοντρόλ, κ.λπ., λειτουργούν χάρη σε φωτόνια που μεταφέρουν πληροφορίες με τις οποίες ξεκίνησαν από την πηγή ή τις οποίες συνέλεξαν στην πορεία τους. Στα φωτόνια θα επανέλθουμε σε επόμενο κεφάλαιο.

Ο κύριος ρόλος της ασθενούς αλληλεπίδρασης είναι ο μετασχηματισμός ενός λεπτονίου (όπως στο Σχ. 1.2) ή ενός κουάρκ (όπως στο Σχ. 1.4, σελ. 23) ή και ενός ζεύγους κουάρκ-λεπτονίου (όπως στο Σχ. 1.5) σε κάποια άλλα λεπτόνια/αντιλεπτόνια ή/και σε άλλα κουάρκ. Αυτοί οι μετασχηματισμοί επιτυγχάνονται

με την εκπομπή ενός σωματίου-αλ του τύπου W^- ή του τύπου W^+ ή ακόμη και του τύπου Z^0 και τη σχεδόν άμεση απορρόφησή του.



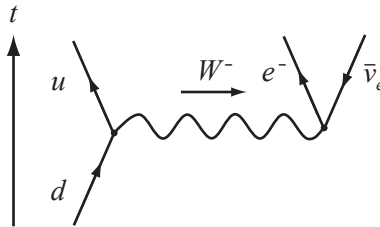
Σχ. 1.3 Διαδικασίες όπου μετέχει ένα ελεύθερο φωτόνιο: (α) Εκπομπή ενός φωτονίου από ηλεκτρόνιο (όπως στην παραγωγή ακτίνων X). (β) Απορρόφηση ενός φωτονίου από ηλεκτρόνιο (όπως στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο). (γ) Δίδυμη γένεση ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου με αφανισμό ενός φωτονίου και εκπομπή ενός φωτονίου. (δ) Δίδυμος αφανισμός ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου με δημιουργία δύο φωτονίων (στην περιοχή των ακτίνων γ με εφαρμογή στην ιατρική διαγνωστική μέθοδο PET), (ε) Απορρόφηση και εκπομπή φωτονίου από ηλεκτρόνιο (όπως στη σκέδαση Raman).

Όλα τα λεπτόνια και τα κουάρκ καθώς και τα W^+ , W^- , Z^0 , υπόκεινται στην ασθενή αλληλεπίδραση. Ας σημειωθεί το πόσο μεγάλη είναι η μάζα ηρεμίας των σωματιών W^+ , W^- , Z^0 , πράγμα που εξηγεί την εξαιρετικά μικρή εμβέλεια της ασθενούς αλληλεπίδρασης.

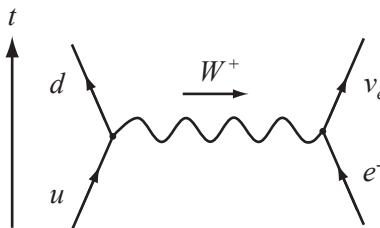
Σε κάθε στοιχειώδη κόμβο, όπου εκπέμπεται ή απορροφάται ένα σωματίο-αλ ορισμένες ποσότητες, όπως το ηλεκτρικό φορτίο, το χρωματικό φορτίο, ο βαρυονικός αριθμός, ο λεπτονικός αριθμός (για κάθε οικογένεια χωριστά⁸), η ορμή, κ.λπ., διατηρούνται. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε στοιχειώδη κόμβο το συνολικό, π.χ. ηλεκτρικό φορτίο των σωματιών που εισέρχονται στον κόμβο πρέπει να είναι ίσο με αυτό εκείνων που εξέρχονται. Ανάλογα με το είδος της αλληλεπίδρασης υπάρχουν και άλλες επιπλέον ποσότητες που διατηρούνται. Ας σημειωθεί

⁸ Σε σπάνιες περιπτώσεις εμφανίζεται κάποια παραβίαση αυτού του νόμου διατήρησης.

τέλος ότι η ενέργεια δεν είναι ανάγκη να διατηρείται σε κάθε στοιχειώδη κόμβο, οφείλει όμως να διατηρείται συνολικά, που σημαίνει ότι η ενέργεια των σωματίων πριν από την έναρξη μιας οποιασδήποτε αντίδρασης οφείλει να είναι ίση με την ενέργεια των προϊόντων της αντίδρασης μετά την ολοκλήρωσή της. Προφανώς, οι νόμοι διατήρησης επιβάλλουν περιορισμούς στο ποιες διαδικασίες μετασχηματισμού είναι εφικτές και ποιες όχι. Στο θέμα αυτό θα επανέλθουμε σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχ. 1.4 Η στοιχειώδης διαδικασία που οδηγεί στη λεγόμενη διάσπαση β^- . Η τελευταία είναι η βασική αντίδραση που συμβαίνει στους θυγατρικούς πυρήνες που προκύπτουν από τη σχάση του ουρανίου στους πυρηνικούς αντιδραστήρες και είναι υπεύθυνη για τη ραδιενέργειά τους. Η εικονιζόμενη αντίδραση, που οφείλεται στην ασθενή αλληλεπίδραση, μετατρέπει ένα κουάρκ d σε κουάρκ u (και επομένως ένα νετρόνιο σε πρωτόνιο) με ταυτόχρονη εκπομπή ενός σωματίου- W^- , το οποίο σχεδόν αμέσως αφανίζεται δημιουργώντας ένα ζεύγος ηλεκτρονίου και αντινετρίνου.



Σχ. 1.5 Ένα κουάρκ u εκπέμπει ένα σωματίο- W^+ και ταυτόχρονα μετατρέπεται σε κουάρκ d , πράγμα που μετατρέπει ένα πρωτόνιο σε νετρόνιο. Το σωματίο- W^+ σχεδόν αμέσως απορροφάται από ένα προϋπάρχον ηλεκτρόνιο που μετατρέπεται έτσι σε νεutrino. Η διαδικασία αυτή δε μπορεί να γίνει σε ένα άτομο υδρογόνου, γιατί θα παραβίαζε την αρχή διατήρησης της ενέργειας, αφού η ενέργεια ηρεμίας του νετρονίου και του νετρίνου είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια ηρεμίας του πρωτονίου και του ηλεκτρονίου μαζί. Μπορεί όμως να γίνει μέσα σε ένα πυρήνα, εάν οδηγεί σε μείωση της συνολικής ενέργειας ηρεμίας του πυρήνα.

Η παραπάνω διαδικασία δεν οδηγεί σε ραδιενεργές συνέπειες. Γιατί;

Οι ισχυρές αλληλεπιδράσεις πραγματοποιούνται με την ανταλλαγή σωματιόνων-αλ που λέγονται **γλοιόνια**. Από όλα τα σωματίδια μόνο τα κουάρκ και τα ίδια τα γλοιόνια είναι πομποί και αποδέκτες των γλοιονίων· άρα μόνο τα γλοιόνια και τα κουάρκ συμμετέχουν στην ισχυρή αλληλεπίδραση, η οποία είναι υπεύθυνη για τη σύνδεση τριών κουάρκ προς σχηματισμό των λεγομένων βαρυονίων, όπως είναι το πρωτόνιο, το νετρόνιο και πολλά άλλα βραχύβια βαρυόνια.

Ακόμη και το νετρόνιο όταν είναι ελεύθερο είναι μετασταθές λόγω της διαδικασίας που εικονίζεται στο Σχ. 1.4, $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$, η οποία μετατρέπει ένα νετρόνιο σε πρωτόνιο, συν ηλεκτρόνιο, συν αντινεutrino ηλεκτρονίου. Επειδή η ενέργεια ηρεμίας ενός ελεύθερου νετρονίου είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των ενεργειών ηρεμίας των προϊόντων της αντίδρασης ($p + e^- + \bar{\nu}_e$), η αντίδραση ικανοποιεί τη διατήρηση της ενέργειας (με την προσθήκη της κινητικής ενέργειας των προϊόντων της αντίδρασης). Ένα ελεύθερο πρωτόνιο δεν υφίσταται την αντίδραση $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$, γιατί τότε θα παραβιαζόταν η αρχή διατήρησης της ενέργειας συνολικά. Αντίθετα, μέσα σε ένα πυρήνα πρωτόνια μπορούν να μετατραπούν σε νετρόνια μέσω της αντίδρασης $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ ή μέσω της αντίδρασης $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$, που εικονίζεται σε επίπεδο κουάρκ στο Σχ. 1.5, όπως και νετρόνια μπορούν να μετατραπούν σε πρωτόνια βάσει της $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$. Από όλες αυτές τις αντιδράσεις μέσα σε ένα πυρήνα, μπορούν να γίνουν μόνο εκείνες οι οποίες μειώνουν τη συνολική ενέργεια ηρεμίας του πυρήνα. Έτσι, σε ένα πυρήνα, νετρόνια μπορούν να μετατραπούν σε πρωτόνια και αντίστροφα μέχρι ο πυρήνας να αποκτήσει την ελάχιστη ενέργεια ηρεμίας. Από κει και πέρα ο πυρήνας είναι σταθερός. Αλλιώς ο πυρήνας είναι ραδιενεργός μέχρι να καταλήξει σε κάποιο σταθερό πυρήνα μέσω κάποιας από τις παραπάνω αντιδράσεις και ενδεχομένως μέσω εκπομπής ελεύθερου φωτονίου.

Εκτός από βαρυόνια (σταθερά ή ασταθή), η ισχυρή αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη για το σχηματισμό των λεγόμενων μεσονίων που αποτελούνται από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ. Τα μεσόνια είναι όλα τους ασταθή. Τα μεσόνια ελάχιστης ενέργειας, που σχηματίζονται από κουάρκ της πρώτης οικογένειας, λέγονται **πιόνια** και είναι τα εξής τρία: $\pi^+ \equiv u\bar{d}$, $\pi^- \equiv d\bar{u}$, $\pi^0 \equiv (u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$.

Οι ιδιότητες και οι μετασχηματισμοί των στοιχειωδών σωματιών καθώς και των βαρυονίων και των μεσονίων που μελετώνται πειραματικά στους μεγάλους επιταχυντές είναι σε πλήρη συμφωνία με τους θεωρητικούς υπολογισμούς που βασίζονται στην αποδεκτή θεωρία η οποία είναι γνωστή ως το **καθιερωμένο πρότυπο** (ή μοντέλο). Το μοντέλο αυτό απαιτεί την ύπαρξη ενός ακόμη είδους στοιχειώδους σωματίου, που αποκαλείται **σωμάτιο Higgs** και είναι υπεύθυνο για το ότι τα στοιχειώδη σωματίδια έχουν ως επί το πλείστον μη μηδενική μάζα ηρεμίας. Το σωμάτιο Higgs δεν έχει ανιχνευθεί πειραματικά μέχρι τώρα (2012).

Η ενέργεια ηρεμίας του αναμένεται να είναι στην περιοχή 114000 έως 130000 MeV και το σπιν του να είναι μηδέν. Υπολογίζεται ότι ο νέος επιταχυντής LHC στο CERN θα δώσει αρκετή ενέργεια στα πρωτόνια που επιταχύνει ώστε κατά τη μετωπική σύγκρουσή τους να παραχθεί το σωματίο Higgs, προσφέροντας έτσι μια ακόμη επαλήθευση για το καθιερωμένο μοντέλο.

Το καθιερωμένο μοντέλο παρ' όλες τις επιτυχίες του αφήνει αναπάντητα κάποια θεμελιώδη ερωτήματα: Γιατί υπάρχουν τρεις οικογένειες κουάρκ και λεπτονίων και όχι μόνο μία ή π.χ. πέντε; Γιατί οι μάζες ηρεμίας των σωματιών-υ έχουν τις συγκεκριμένες τιμές; Γιατί οι εντάσεις των διαφορών αλληλεπιδράσεων έχουν τις τιμές που έχουν; Υπάρχει σ' ένα βαθύτερο επίπεδο και σε πολύ πιο μικρή κλίμακα μήκους μια δομή του Κόσμου από την οποία να προκύπτουν απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα; Μ' άλλα λόγια, υπάρχει μια πιο θεμελιώδης θεώρηση του Κόσμου από την οποία να προκύπτουν οι μάζες των στοιχειωδών σωματιών-υ και οι εντάσεις των διαφορών αλληλεπιδράσεων;

Δεν υπάρχει έλλειψη ιδεών και θεωρητικών προτάσεων πέρα από το καθιερωμένο μοντέλο που αποβλέπουν στο να απαντήσουν σε κάποια τουλάχιστον από τα παραπάνω ερωτήματα. Ένα τέτοιο θεωρητικό σχήμα, γνωστό ως **υπερσυμμετρικό**, συγκεντρώνει κάποιες σοβαρές ενδείξεις υπέρ του, αλλά όχι άμεση πειραματική επιβεβαίωση. Το μοντέλο αυτό προβλέπει ότι οι αλληλεπιδράσεις για πάρα πολύ υψηλή ενέργεια ενοποιούνται έχοντας ένα κοινό μέγεθος έντασης. Το υπερσυμμετρικό μοντέλο προβλέπει επίσης μια συμμετρία μεταξύ ύλης και δυνάμεων, με την έννοια ότι για κάθε ένα από τα φερμιόνια του Πίν. III υπάρχει ένα αντίστοιχο δίδυμο σωματίο που είναι μποζόνιο και για κάθε μποζόνιο του Πίν. IV υπάρχει ένα αντίστοιχο δίδυμο σωματίο που είναι φερμιόνιο. Επιπλέον, το υπερσυμμετρικό μοντέλο θεωρεί ότι οι φυσικοί νόμοι που ισχύουν για τα σωματία των πινάκων III και IV ισχύουν επίσης και για τα αντίστοιχα δίδυμά τους σωματία. Ένα προσόν της υπερσυμμετρικής υπόθεσης είναι ότι παρέχει υποψήφια σωματία από τα οποία ενδεχομένως να συνίσταται η λεγόμενη σκοτεινή ύλη που εμφανίζεται έμμεσα σε γαλαξιακές και κοσμολογικές παρατηρήσεις.

Ένα άλλο θεωρητικό μοντέλο, στενά συνδεδεμένο με το υπερσυμμετρικό και γνωστό ως **θεωρία χορδών**, υποθέτει ότι οι στοιχειώδεις μονάδες του Κόσμου δεν είναι σημειακά σωματία, αλλά ότι έχουν διαστάσεις, είτε μία (χορδές) είτε δύο (μεμβράνες) είτε και περισσότερες. Το μέγεθός τους είναι πολύ πιο μικρό από οτιδήποτε είναι προσιτό στη σύγχρονη τεχνολογία: 10^{-35} m, δηλαδή 17 τάξεις μεγέθους μικρότερο από τα σημερινά τεχνολογικά όρια. Το θεωρητικό αυτό σχήμα, χωρίς πειραματική στήριξη μέχρι σήμερα, έχει ορισμένες πολύ επιθυμητές ιδιότητες, π.χ., ανάγεται στη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας στο όριο που η σταθερά του Planck \hbar , τείνει στο μηδέν. Κάποια επιχειρήματα υπέρ του υπερ-

συμμετρικού μοντέλου και του μοντέλου των χορδών μπορεί να βρει ο αναγνώστης στο πρόσφατο βιβλίο των Hawking και Mlodinow, *Το Μεγάλο Σχέδιο* [3].

1.4 Σύνοψη

Η καθιερωμένη και επιβεβαιωμένη ιεραρχική δομή της ύλης ξεκινά από τα δύο κουάρκ της πρώτης οικογένειας, τα οποία με τη βοήθεια της ισχυρής αλληλεπίδρασης, δηλαδή μέσω ανταλλαγής γλοιονίων, συντίθεται σε δύο ειδών σύνθετα σωμάτια: Στο πρωτόνιο που αποτελείται από δύο πάνω κουάρκ και ένα κάτω κουάρκ το πρωτόνιο συνολικά φέρει μια μονάδα θετικού ηλεκτρικού φορτίου, μηδέν συνολικά χρωματικό φορτίο (είναι δηλαδή “άχρωμο”), έχει ενέργεια ηρεμίας 938,27 MeV και ακτίνα $0,84 \times 10^{-15}$ m. Και στο νετρόνιο που αποτελείται από δύο κάτω κουάρκ και ένα πάνω κουάρκ το νετρόνιο έχει συνολικά μηδέν ηλεκτρικό φορτίο και χρωματικό φορτίο, ενέργεια ηρεμίας 939,56 MeV και ακτίνα $0,84 \times 10^{-15}$ m. Τόσο το πρωτόνιο όσο και το νετρόνιο έχουν σπιν $\frac{1}{2}$, είναι δηλαδή φερμιόνια. Το ελεύθερο νετρόνιο είναι μετασταθές με μέσο χρόνο ζωής 14,76 λεπτά ή χρόνο υποδιπλασιασμού 10,23 λεπτά.

Το επόμενο βήμα στην ιεραρχική δομή της ύλης επιτυγχάνεται με το συνδυασμό πρωτονίων και νετρονίων προς σχηματισμό ατομικών πυρήνων με τη βοήθεια πάλι της ισχυρής αλληλεπίδρασης. Υπάρχουν περίπου 270 διαφορετικοί πυρήνες από τον μικρότερο που έχει μόνο ένα πρωτόνιο (και είναι ο πυρήνας του συνήθους ατόμου του υδρογόνου) μέχρι τον μεγαλύτερο που έχει 92 πρωτόνια και 146 νετρόνια (και είναι ο πυρήνας του ατόμου του ουρανίου με $238 = 92 + 146$ **νουκλεόνια**, όπως λέγονται από κοινού τα πρωτόνια και τα νετρόνια). Υπάρχει και ο μικρότερος πυρήνας του ουρανίου με 92 πρωτόνια και 143 νετρόνια, το ουράνιο 235.

Οι θετικά φορτισμένοι πυρήνες έλκουν ηλεκτρικά τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και τα παγιδεύουν γύρω τους, σε αποστάσεις όμως που κυμαίνονται από εκατό έως εκατό χιλιάδες φορές μεγαλύτερες από αυτές του πυρήνα. Έτσι σχηματίζονται τα 92 είδη των ατόμων. Το κάθε είδος ατόμου χαρακτηρίζεται μόνο από τον αριθμό των πρωτονίων στον πυρήνα του, ο οποίος ονομάζεται **ατομικός αριθμός** και συμβολίζεται με Z κεφαλαίο. Άτομα με το ίδιο Z αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων στον πυρήνα τους ονομάζονται **ισότοπα** του ίδιου στοιχείου. Π.χ. το ουράνιο 238 και το ουράνιο 235 είναι ισότοπα του ουρανίου με το ίδιο $Z = 92$ αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων.

Η διαδικασία συνεχίζεται με τη συνένωση ατόμων προς σχηματισμό μορίων, ατόμων ή/και μορίων προς σχηματισμό στερεών, υγρών, ιστών, οστών, φυτών, αστεροειδών ή και ακόμη μεγαλύτερων αντικειμένων όπως είναι οι πλανήτες, τα άστρα, κ.λπ., όπου επεμβαίνουν και οι βαρυτικές αλληλεπιδράσεις.

Η ιεραρχική δομή της ύλης, που βασίζεται στην ύπαρξη ελκτικών *συνολικά* αλληλεπιδράσεων, οδηγεί σε ένα συμπέρασμα και σε ένα καίριο ερώτημα:

Οι αλληλεπιδράσεις από μόνες τους αναμένεται να οδηγήσουν στη σύνθλιψη και κατάρρευση των δομών της ύλης λόγω του συνολικά ελκτικού χαρακτήρα τους (όπως συμβαίνει στις μαύρες τρύπες). Επομένως, κάτι πρέπει να αντιτίθεται στις αλληλεπιδράσεις και να εμποδίζει την κατάρρευση της ύλης.

Τι εμποδίζει λοιπόν την κατάρρευση των δομών της ύλης και εξασφαλίζει την ύπαρξή τους;

Σε τι οφείλεται η σταθερότητά τους χωρίς εντούτοις να αποκλείεται η δυνατότητα αλλαγής;

Η απάντηση βρίσκεται στη 2^η βασική ιδέα της Φυσικής:

ΚΥΜΑΤΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΟΣ ΔΥΪΣΜΟΣ!

Προβλήματα

1. Καταρτίστε ένα πίνακα των τριών οικογενειών λεπτονίων και κουάρκ δίνοντας κατά σειρά το όνομα, το σύμβολο, τη μάζα, το σπιν και το ηλεκτρικό φορτίο.
2. Καταρτίστε ένα πίνακα των τεσσάρων βασικών δυνάμεων της φύσης δίνοντας το όνομά τους, την εμβέλεια, τη σχετική έντασή τους, τα σωματια-φορείς τους (μαζί με τη μάζα τους, το ηλεκτρικό τους φορτίο, το σπιν τους και τις πηγές τους).
3. Το μεσόνιο π^0 διασπάται με πιθανότητα 99% σε δύο φωτόνια, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$. Ποια είναι η ορμή και η ενέργεια των φωτονίων στο σύστημα όπου το π^0 ακινητεί; Ποια η σχετική διεύθυνσή τους; Από ποια κουάρκ αποτελείται το π^0 ; Ποιο είναι πιο μακρόβιο, το π^0 ή τα π^\pm ;
4. Καταρτίστε ένα πίνακα των βασικών δομών της ύλης ξεκινώντας από τα θεωρούμενα στοιχειώδη σωματια και καταλήγοντας στο Σύμπαν ολόκληρο. Για κάθε δομή αναφέρετε το χαρακτηριστικό της μέγεθος, τα συστατικά της και τις αλληλεπιδράσεις που την καθορίζουν.