

# Οι στοιχειώδεις δυνάμεις, η δυναμική τους ενέργεια και τα κβάντα τους

**Σύνοψη:** Υπάρχουν τέσσερα είδη βασικών δυνάμεων: Οι Βαρυτικές, οι Ηλεκτρομαγνητικές, οι Ισχυρές Πυρηνικές και οι Ασθενείς Πυρηνικές. Το κάθε είδος δυνάμεων έχει τις ιδιομορφίες του και τις ζώνες επιρροής του. Οι πυρηνικές περιορίζονται σε απλά σύνθετα σωματίδια μερικών μόνο κουάρκ (μέχρι πέντε) και σε ατομικούς πυρήνες συγκροτούμενους από πρωτόνια και νετρόνια. Οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις κυριαρχούν απολύτως σε μια ευρύτατη περιοχή δομών που ξεκινούν από τα άτομα, τα μόρια, τα μεγαλομόρια, τους έμβιους οργανισμούς και φτάνουν σε αντικείμενα μεγέθους που προσεγγίζουν αυτό της Σελήνης. Οι βαρυτικές δυνάμεις παίζουν σημαντικό ρόλο για ουράνια σώματα μεγέθους από πλανήτη και πάνω, κυριαρχούν δε σε αστρικά αντικείμενα, παρόλο που στα ενεργά άστρα επανεμφανίζονται με ενεργό ρόλο και όλα τα άλλα είδη των δυνάμεων.

Στο παρόν κεφάλαιο έχοντας τα στοιχειώδη σωματίδια θα εξετάσουμε το πώς τα διάφορα είδη δυνάμεων δρουν ώστε να σχηματίσουν σύνθετα σωματίδια αλλά και να παράγουν σταδιακά την απίστευτη ποικιλία των δομών του Κόσμου. Τους πιο βασικούς νόμους κίνησης, δηλαδή το πώς οι δυνάμεις αυτές αλλάζουν την ενέργεια, τη θέση, την ταχύτητα και ίσως άλλες χαρακτηριστικές ιδιότητες των σωματιδίων, αλλά και το πώς αυτές οι αλλαγές καθορίζουν τις ιδιότητες μακροσκοπικών αντικειμένων θα τους παρουσιάσουμε στο τρίτο κυρίως κεφάλαιο. Από τα τέσσερα είδη δυνάμεων, τις ισχυρές, τις ασθενείς, τις ηλεκτρομαγνητικές και τις βαρυτικές, θα αρχίσουμε με τις ηλεκτρομαγνητικές.

### I. Οι ηλεκτρομαγνητικές (ΗΜ) δυνάμεις

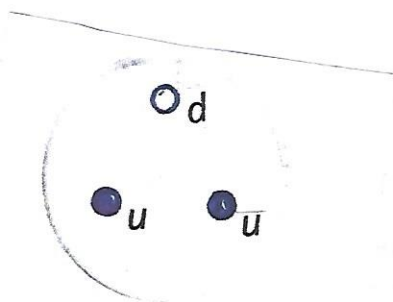
Αρχίζουμε με τις ηλεκτρομαγνητικές (ΗΜ) δυνάμεις γιατί, παρόλο που δεν είναι συνήθως άμεσα αισθητές ως δυνάμεις, είναι εντούτοις παρούσες στο καθετί γύρω μας και μέσα μας: Βλέπουμε χάρη σ' αυτές· υπάρχουμε ως ζώντες οργανισμοί εμείς, όπως και κάθε άλλη έμβια ύλη, λόγω των ΗΜ δυνάμεων· λαμβάνουμε από τον Ήλιο το κυριολεκτικά ζωογόνο φως του, που δεν είναι τίποτε άλλο παρά αυτές οι δυνάμεις· ό,τι βλέπουμε πάνω στη Γη δημιουργείται και υπάρχει με την παρέμβαση αυτών των δυνάμεων· αυτό ισχύει όχι μόνο για τις φυσικές δομές αλλά και για τις τεχνητές: Το κινητό μας τηλέφωνο, η τηλεόραση μας, το ιντερνέτ, τα διάφορα τηλεκοντρόλ, ο φωτισμός μας, οι διάφορες ηλεκτρικές συσκευές στο σπίτι μας, η μαγνητική τομογραφία, η κάθε άλλη ακτινογραφία, όπως π.χ. η PET, κλπ, κλπ, κλπ, έγιναν πραγματικότητα επειδή ο ανθρώπινος πολιτισμός έμαθε να ελέγχει αυτές τις δυνάμεις. Με άλλα λόγια ό,τι υπάρχει, από τα άτομα, τα μόρια, το DNA μέχρι και αντικείμενα του μεγέθους της Σελήνης, συγκροτείται με την παρέμβαση των ΗΜ δυνάμεων· επιπλέον αυτές οι δυνάμεις είναι επίσης ο κατ' εξοχήν φορέας για τη μεταφορά ενέργειας αλλά και πληροφορίας όχι μόνο διαμέσου διαφανούς ύλης αλλά και όταν μεσολαβεί ο κενός χώρος.

Σύμφωνα με τον γνωστό κανόνα, «ομώνυμα απωθούνται και ετερόνυμα έλκονται», θα ισχύει ότι δύο ηλεκτρόνια θα απωθούνται, δηλαδή το υπ'αρ. 1 θα ασκεί «εξ αποστάσεως» μια απωστική ηλεκτρική δύναμη στο υπ' αρ. 2· αντίστοιχα το υπ'αρ. 2 θα ασκεί στο υπ' αρ. 1 μια ηλεκτρική απωστική δύναμη σύμφωνα με την αρχή «κάθε δράση προκαλεί μια αντίδραση», όπως φαίνεται στο Σχ. 2.1



**Σχ. 2.1.** Η δύναμη που συμβολίζεται ως  $F_{12}$  είναι η ηλεκτρική απωστική δύναμη που ασκείται στο ηλεκτρόνιο 1 και προέρχεται από το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου 2 (αν το ηλεκτρόνιο 1 είχε διπλάσιο ηλεκτρικό φορτίο ενώ το φορτίο του ηλεκτρονίου 2 παρέμενε το ίδιο, η δύναμη  $F_{12}$  θα ήταν διπλάσια· αν το φορτίο του 1 ήταν τριπλάσιο, η δύναμη θα ήταν τριπλάσια κ.ο.κ. Επίσης, αν το ηλεκτρόνιο 2 είχε διπλάσιο ηλεκτρικό φορτίο ενώ το φορτίο του ηλεκτρονίου 1 παρέμενε το ίδιο, η δύναμη  $F_{12}$  θα ήταν διπλάσια· αν το φορτίο του 2 ήταν τριπλάσιο, η δύναμη θα ήταν τριπλάσια κ.ο.κ.). Η ηλεκτρική απωστική δύναμη  $F_{21}$  είναι η δύναμη που ασκείται στο ηλεκτρόνιο 2 (λόγω του ότι διαθέτει ηλεκτρικό φορτίο) και προέρχεται από το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου 1. Η δύναμη  $F_{21}$  έχει τις ίδιες ιδιότητες που μόλις αναφέραμε για τη δύναμη  $F_{12}$ . Η κάθε μία δύναμη έχει τέτοια κατεύθυνση ώστε να τείνει να απομακρύνει το ένα σωματίδιο από το άλλο· αυτό περιμένει κανείς από απωστικές δυνάμεις.

Στο σημείο αυτό και προκειμένου να παρουσιάσουμε ενδεικτικές και ρεαλιστικές όψεις των ΗΜ δυνάμεων θα χρειαστούμε να προτρέξουμε και να αναφέρουμε το γεγονός ότι δύο πάνω και ένα κάτω κουάρκ συνδυάζονται και σχηματίζουν ένα σύνθετο σταθερό σωματίδιο που ονομάζεται πρωτόνιο και συμβολίζεται ως  $p$ . Το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο του πρωτονίου σε μονάδες  $e$  είναι, αθροίζοντας τα ηλεκτρικά φορτία των συστατικών του,  $(2/3)+(2/3)-(1/3)=+1$ .



**Σχ. 2.2.** Το σύνθετο σωματίδιο που ονομάζεται πρωτόνιο,  $p$ , αποτελείται από δύο πάνω κουάρκ και ένα κάτω κουάρκ. Το συνολικό ηλεκτρικό του φορτίο είναι  $+1$  σε μονάδες  $e$ . Για το πώς και το γιατί του πρωτονίου βλέπε παρακάτω

Αφού το κάθε πρωτόνιο έχει θετικό ηλεκτρικό φορτίο θα ισχύει ότι, αν έχουμε δύο πρωτόνια, το ένα θα απωθεί το άλλο, όπως συμβαίνει και μεταξύ δύο ηλεκτρονίων και με την ίδια ηλεκτρική δύναμη. Αν όμως έχουμε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο θα εμφανιστούν ελκτικές ηλεκτρικές δυνάμεις όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.



**Σχ. 2.3.** Η δύναμη που συμβολίζεται ως  $F_{ep}$  είναι η ηλεκτρική ελκτική δύναμη που ασκείται στο ηλεκτρόνιο (λόγω του ότι διαθέτει ηλεκτρικό φορτίο) και προέρχεται από το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο του πρωτονίου. Η ηλεκτρική απωστική δύναμη  $F_{pe}$  είναι η δύναμη που ασκείται στο πρωτόνιο (λόγω του συνολικού του ηλεκτρικού φορτίου) και προέρχεται από το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου. Η κάθε μία δύναμη έχει το ίδιο μέγεθος και τέτοια κατεύθυνση ώστε να τείνει να πλησιάσει το ένα σωματίδιο στο άλλο· αυτό περιμένει κανείς από ελκτικές δυνάμεις

Για τις ηλεκτρικές δυνάμεις των σχημάτων 2.1 και 2.3, για τις οποίες ισχύει ό,τι αναφέραμε στη λεζάντα του Σχ. 2.1, θέτουμε επί πλέον τα εξής ερωτήματα: πόσο ισχυρές είναι; πώς μεταβάλλονται όταν η μεταξύ τους απόσταση μεγαλώνει ή μικραίνει; Το πρώτο ερώτημα δεν μπορεί να απαντηθεί με απόλυτο τρόπο, αλλά μόνο σχετικά, δηλ. σε σύγκριση με τα άλλα είδη δυνάμεων. Ας περιμένουμε λοιπόν την παρουσίαση και των άλλων δυνάμεων. Στο δεύτερο ερώτημα η απάντηση είναι ότι το μέγεθος της ηλεκτρικής δύναμης μειώνεται όσο η απόσταση μεταξύ των δύο σωματιδίων αυξάνει και μάλιστα αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της απόστασής τους· αυτό σημαίνει ότι αν η απόσταση διπλασιαστεί το μέγεθος της ηλεκτρικής

δύναμης θα γίνει τέσσερις φορές μικρότερο, αν η απόσταση τριπλασιαστεί, το μέγεθος θα γίνει εννιά φορές μικρότερο, κ.ο.κ.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφέρουμε ότι είναι πολύ πιο βολικό και πολύ πιο χρήσιμο αντί της έννοιας της δύναμης να χρησιμοποιούμε μια συναφή έννοια: αυτή της **δυναμικής ενέργειας**. Για να γίνει κατανοητή αυτή η έννοια ας εξετάσουμε την περίπτωση των δύο ηλεκτρονίων θεωρώντας ότι αρχικά η απόστασή τους είναι πάρα πολύ μεγάλη, πρακτικά άπειρη· εξ ορισμού η δυναμική ενέργεια του ζεύγους των ηλεκτρονίων για άπειρη μεταξύ τους απόσταση λαμβάνεται ως μηδέν. Για να φέρουμε σιγά-σιγά τα δύο ηλεκτρόνια στις θέσεις που εικονίζονται στο Σχ.1.1 θα πρέπει να καταναλώσουμε θετική ενέργεια για να υπερνικήσουμε την μεταξύ τους ηλεκτρική άπωση. Η ενέργεια αυτή δεν χάνεται αλλά αποθηκεύεται στο σύστημα των δύο ηλεκτρονίων, του οποίου επομένως η συνολική ενέργεια αυξήθηκε κατά το ποσό αυτό. Αυτή η αύξηση της συνολικής ενέργειας ονομάζεται *ηλεκτρική δυναμική ενέργεια* του συστήματος των δύο ηλεκτρονίων και είναι τόσο πιο μεγάλη όσο μικρότερη είναι η μεταξύ τους απόσταση. Ας θεωρήσουμε τώρα την ίδια διαδικασία για την περίπτωση ηλεκτρονίου-πρωτονίου· στην περίπτωση αυτή δεν χρειάζεται να καταναλώσουμε εμείς ενέργεια για να φέρουμε σιγά-σιγά το ηλεκτρόνιο κοντά στο πρωτόνιο, αφού αυτά από μόνα τους έλκονται. Αντίθετα μπορούμε να εκμεταλλευθούμε την αμοιβαία ηλεκτρική τους έλξη για να κερδίσουμε ενέργεια. Όμως, ό,τι ενέργεια κερδίσαμε εμείς την έχασε το σύστημα ηλεκτρονίου-πρωτονίου και επομένως η ολική ηλεκτρική ενέργεια του συστήματος μειώθηκε με το να πλησιάσουν σιγά-σιγά το ένα με το άλλο. Αυτό σημαίνει ότι η δυναμική ηλεκτρική ενέργεια του συστήματος ηλεκτρονίου-πρωτονίου είναι αρνητική και γίνεται όλο και πιο αρνητική όσο η απόστασή τους μειώνεται.

Συμπέρασμα: *Έλκτική αμοιβαία δύναμη συνεπάγεται αρνητική δυναμική ενέργεια του ζεύγους· απωστική αμοιβαία δύναμη συνεπάγεται θετική δυναμική ενέργεια του ζεύγους<sup>1</sup>.*

Δυστυχώς για τον μη εξοικειωμένο αναγνώστη (αλλά ευτυχώς για την ύπαρξή μας, την επιβίωσή μας και την τεχνολογική μας πρόοδο) τα σχήματα 2.1 και 2.3 χρειάζονται συμπλήρωση: Όταν υπάρχει *κίνηση* των δύο σωματιδίων είτε του σχήματος 2.1, είτε του σχήματος 2.3, τότε εμφανίζεται μία πρόσθετη, μικρή συνήθως, δύναμη που την ονομάζουμε *μαγνητική*. Η μεγάλη σημασία της μαγνητικής δύναμης έγκειται στο ότι η *μεταβολή* της γεννάει επί πλέον ηλεκτρική δύναμη πέρα από αυτήν που γεννούν τα ηλεκτρικά φορτία· αλλά, για να κλείσει ο κύκλος, και η *μεταβολή* της ηλεκτρικής δύναμης γεννάει επί πλέον μαγνητική δύναμη πέρα από αυτήν που γεννούν τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Έτσι η ηλεκτρική και η μαγνητική δύναμη αλληλοσυμπλέκονται σε ένα ενιαίο σύνολο, την *ηλεκτρομαγνητική δύναμη* που αυτοσυντηρείται (αφού η μεταβολή της μιας δημιουργεί την άλλη) και επομένως μπορεί να αποκολληθεί από τις πηγές της (τα ηλεκτρικά φορτία και τα ηλεκτρικά ρεύματα), να είναι

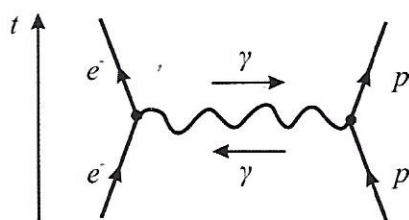
<sup>1</sup> Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια  $E_{\text{ΗΔ}}$  δύο σωματιδίων που το ένα φέρει ηλεκτρικό φορτίο  $q_1$  και το άλλο  $q_2$  και τα οποία απέχουν μεταξύ τους κατά  $r_{12}$  είναι ανάλογη του φορτίου  $q_1$ , είναι ανάλογη του φορτίου  $q_2$ , και είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης  $r_{12}$ , (ενώ η δύναμη μεταξύ τους είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης  $r_{12}$ ):

$$E_{\text{ΗΔ}} = \kappa \frac{q_1 \times q_2}{r_{12}}, \quad (2.1)$$

όπου το  $\kappa$  είναι μια θετική σταθερά που η αριθμητική της τιμή εξαρτάται από την επιλογή των μονάδων μέτρησης ενέργειας, ηλεκτρικού φορτίου και μήκους. Είναι φανερό από τον παραπάνω τύπο ότι αν τα φορτία είναι ομώνυμα η ενέργεια  $E_{\text{ΗΔ}}$  θα προκύψει θετική, ενώ αν είναι ετερόνυμα θα προκύψει αρνητική, όπως το περιμέναμε.

αυθύπαρκτη και να προχωρήσει ακόμη και στον κενό χώρο ως κύμα, το ονομαζόμενο ηλεκτρομαγνητικό (ΗΜ) κύμα (το ορατό φως είναι ένα μικρό μέρος του φάσματος των ΗΜ κυμάτων). Όπως γράφει ο Feynman, «η κάμπια έγινε πεταλούδα και πέταξε μακριά». Αυτή την «πεταλούδα» αξιοποιεί η Φύση για να φέρει και να σκορπίσει στη Γη ενέργεια (έμμεσα και πληροφορία) από τον Ήλιο και αυτήν την «πεταλούδα» έμαθε να χειραγωγεί ο άνθρωπος για να επιτύχει ακόμη και αυτά που ήσαν αδιανόητα μέχρι και πρόσφατα.

Η κατανόηση της ΗΜ δύναμης, που ξεκίνησε από την απλή στατική εικόνα των σχημάτων 2.1 και 2.3 και επεκτάθηκε στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, δεν σταμάτησε εκεί. Διαπιστώθηκε ότι τα ΗΜ κύματα αποτελούνται από *μικροσκοπικές αδιαίρετες οντότητες* που ονομάστηκαν κβάντα φωτός ή **φωτόνια**. Με άλλα λόγια διαπιστώθηκε ότι η ατομική ιδέα δεν αφορά μόνο την ύλη αλλά επεκτείνεται και στην ΗΜ δύναμη και τελικά σε όλα τα είδη των δυνάμεων, μια και όλες οι δυνάμεις συνίστανται και αυτές από αδιαίρετες μικροσκοπικές οντότητες, τα κβάντα. Οδηγηθήκαμε έτσι σε μια ριζική αναθεώρηση των αντιλήψεών μας για τη φύση των δυνάμεων αλλά και της ύλης, αφού πια όλο το οικοδόμημα πρέπει να συντεθεί από τα στοιχειώδη (δηλ. αδιαίρετα) σωματίδια της ύλης (ηλεκτρόνια, πάνω κουάρκ, κάτω κουάρκ) με τη βοήθεια των κβάντων των διαφόρων δυνάμεων. Όπως τονίσαμε προηγουμένως, τα κβάντα μπορούν δικαιολογημένα να θεωρηθούν και αυτά ως στοιχειώδη σωματίδια, αφού είναι μικροσκοπικές αδιαίρετες οντότητες που διαθέτουν ενέργεια (άρα και σχετικιστική μάζα, αν και η μάζα ηρεμίας τους είναι σε αρκετές περιπτώσεις μηδέν), οι οποίες με την ανταλλαγή τους μεταξύ ενός ζεύγους σωματιδίων ύλης, μπορούν να *εμφανιστούν ως απλές δυνάμεις*, όπως στα σχήματα 2.1 και 2.3.



**Σχ. 2.4.** Η ηλεκτρομαγνητική (ΗΜ) δύναμη π.χ. μεταξύ ηλεκτρονίου και πρωτονίου (που παρουσιάστηκε στο Σχ.2.3) σύμφωνα με τη σύγχρονη εικόνα των κβάντων οφείλεται στην ανταλλαγή ενός σωματίου-φορέα της ΗΜ αλληλεπίδρασης, ενός κβάντου δηλαδή που ονομάζεται **φωτόνιο** και συμβολίζεται με το γράμμα  $\gamma$ . Με άλλα λόγια το ηλεκτρόνιο εκπέμπει ένα φωτόνιο το οποίο αμέσως μετά απορροφάται από το πρωτόνιο. (ή, ισοδύναμα, το πρωτόνιο εκπέμπει ένα φωτόνιο που αμέσως μετά απορροφάται από το ηλεκτρόνιο). Το αποτέλεσμα είναι η ελκτική ηλεκτρική δύναμη μεταξύ ηλεκτρονίου-πρωτονίου ή, ισοδύναμα, η μεταξύ τους αρνητική δυναμική ενέργεια. Το φωτόνιο στην παρούσα περίπτωση δεν εμφανίζεται ούτε στην αρχική ούτε στην τελική κατάσταση. (βλ. στο σχήμα το κατακόρυφο βέλος που δείχνει τη φορά του χρόνου). Όταν συμβαίνει αυτό λέμε ότι το φωτόνιο εν προκειμένω (ή το κβάντο εν γένει) είναι **εικονικό** (virtual)

Όμως τα κβάντα μπορούν να εκτελέσουν και πρόσθετες απρόσμενες δράσεις, όπως να *εκπεμφθούν* από σωματίδια ύλης όντας πια *αυθύπαρκτα* (όχι εικονικά) και να *διαδοθούν ως κύματα*, όπως τα ΗΜ κύματα· αυτό ακριβώς συμβαίνει κατά την ακτινογραφία ακτίνων X, όπου ηλεκτρόνια επιβραδύνονται απότομα και ως αποτέλεσμα εκπέμπουν ακτίνες X που δεν είναι τίποτε άλλο παρά φωτόνια υψηλής ενέργειας· τα φωτόνια αυτά οδεύουν αυθύπαρκτα στο χώρο μπορούν να διαπεράσουν το ανθρώπινο σώμα απορροφούμενα μόνο εν μέρει, περισσότερο από τα οστά και λιγότερο από τους μαλακούς ιστούς, και τελικά να αφήσουν το αποτύπωμά τους στην καταγραφική πλάκα. Το φωτόνια μπορούν τέλος να *μετασχηματίσουν* ή να *αφανίσουν* άλλα

σωματίδια καθώς και να μετασηματισθούν ή να αφανισθούν αυτά τα ίδια. Π. χ. το φωτόνιο, το κβάντο της ΗΜ δύναμης, μπορεί να δημιουργήσει αφανιζόμενο ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου (αν έχει αρκετή ενέργεια), αλλά και αντίστροφα ένα ζεύγος ποζιτρονίου-ηλεκτρονίου μπορεί να εξαϋλωθεί παράγοντας δύο φωτόνια που εκπέμπονται σε αντίθετες κατευθύνσεις με την ίδια ενέργεια το καθένα τους (ίση με την ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου ή του ποζιτρονίου). (Σε αυτή την τελευταία διαδικασία βασίζεται η σχετικά πρόσφατη ιατρική διαγνωστική μέθοδος PET). Παρακάτω θα δούμε και άλλους πιο περίπλοκους μετασηματισμούς στοιχειωδών σωματιδίων μέσω κβάντων δυνάμεων, κυρίως των κβάντων της τέταρτης δύναμης, που ονομάζεται **ασθενής** και που θα την παρουσιάσουμε λίγο πιο κάτω.

Και μια τελευταία πολύ σημαντική παρατήρηση: *Επειδή ετερώνυμα έλκονται, υλικά σωματίδια αντίθετου φορτίου (όπως τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια) τείνουν να συνδυαστούν και να δημιουργήσουν ηλεκτρικά ουδέτερες δομές, δηλαδή δομές μηδενικού συνολικά ηλεκτρικού φορτίου (όπως είναι π.χ. τα άτομα).*

Ως αποτέλεσμα οι ηλεκτρικές δυνάμεις που ασκεί π.χ. ένα άτομο σε ένα άλλο άτομο τείνουν να αλληλοεξουδετερωθούν, δηλαδή να μηδενισθούν, αφού κάποιες είναι ελκτικές και κάποιες απωστικές (βλέπε επόμενη σελίδα). Αυτή η αλληλοεξουδετέρωση τείνει να γίνει πλήρης όσο η μεταξύ τους απόσταση μεγαλώνει. Έτσι οι ηλεκτρικές δυνάμεις και οι ηλεκτρικές δυναμικές ενέργειες μεταξύ σύνθετων σωματιδίων μηδενικού συνολικά ηλεκτρικού φορτίου (όπως είναι τα άτομα) εμφανίζουν *βραχεία εμβέλεια*. Αυτό σημαίνει ότι οι ηλεκτρικές δυνάμεις και οι ηλεκτρικές δυναμικές ενέργειες μεταξύ σύνθετων σωματιδίων μηδενικού συνολικά ηλεκτρικού φορτίου (όπως είναι τα άτομα) είναι αισθητές μόνο όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι πολύ μικρή, δηλαδή συγκρίσιμη ή λίγο μεγαλύτερη από το μέγεθος του ατόμου (ή όποιας άλλης ηλεκτρικά ουδέτερης μικροσκοπικής δομής). Όσο η απόσταση μεταξύ ηλεκτρικά ουδέτερων σύνθετων σωματιδίων μεγαλώνει, η αμοιβαία ηλεκτρική δύναμη ή η αμοιβαία ηλεκτρική δυναμική ενέργεια σβύνει σταδιακά μεν αλλά πάρα πολύ γρήγορα έτσι ώστε να είναι πρακτικά μηδέν πέραν μιας μικροσκοπικής απόστασης που δεν υπερβαίνει το ένα δισεκατομμυριοστό του μέτρου.

Το βασικό λοιπόν συμπέρασμα είναι το ακόλουθο: *Η ηλεκτρική δύναμη μεταξύ δύο σύνθετων σωματιδίων (που το καθένα τους έχει συνολικά μηδενικό ηλεκτρικό φορτίο και το αποτελείται από φορτισμένα στοιχειώδη σωματίδια) είναι πρακτικά μηδέν, όταν η μεταξύ τους απόσταση υπερβαίνει περίπου το ένα δισεκατομμυριοστό του μέτρου· τότε, όχι μόνο οι μεταξύ τους ηλεκτρικές δυνάμεις είναι πρακτικά μηδέν αλλά και η μεταξύ τους ηλεκτρική δυναμική ενέργεια μηδενίζεται.*

## II. Οι βαρυτικές δυνάμεις

Η βαρυτική δύναμη είναι η πιο οικεία γιατί την υφίσταται συνεχώς και ο καθένας μας και το κάθε αντικείμενο στη Γη. Γεννήτορας αυτής της δύναμης είναι η μάζα της Γης και αποδέκτης η μάζα του κάθε αντικειμένου. Γενικότερα, οποιαδήποτε μάζα, μικροσκοπική ή μακροσκοπική, είναι γεννήτορας της βαρυτικής δύναμης και οποιαδήποτε μάζα είναι επίσης αποδέκτης αυτής. Αφού μάζα και ενέργεια συνδέονται με την περίφημη σχέση του Αϊνστάιν και αφού ό,τι υπάρχει έχει ενέργεια, έπεται ότι το καθετί είναι γεννήτορας βαρυτικών δυνάμεων και το καθετί είναι αποδέκτης τους. Άρα η βαρυτική δύναμη είναι η πιο παγκόσμια. Π. χ. στο ηλεκτρόνιο 1 του Σχ. 2.1, εκτός από την ηλεκτρική δύναμη, του ασκείται και μια βαρυτική δύναμη (λόγω της μάζας του) που προέρχεται από το ηλεκτρόνιο 2 (που την γεννάει επίσης λόγω της μάζας του). Αλλά και στο ηλεκτρόνιο 2 του Σχ. 2.1, εκτός από την ηλεκτρική δύναμη, του ασκείται και μια

βαρυτική δύναμη (λόγω της μάζας του) που προέρχεται από το ηλεκτρόνιο 1 (που την γεννάει επίσης λόγω της μάζας του).

Σε αντίθεση με την ηλεκτρική δύναμη που είναι είτε ελκτική (για ηλεκτρικά φορτία με αντίθετο πρόσημο), είτε απωστική (για ηλεκτρικά φορτία με το ίδιο πρόσημο), η βαρυτική δύναμη είναι πάντα ελκτική: Κάθε μάζα έλκει οποιαδήποτε άλλη μάζα. Αυτός είναι ο νόμος της παγκόσμιας έλξης. Με την ίδια σχέση που το μέγεθος της ηλεκτρικής δύναμης μειώνεται όσο η απόσταση των δύο ηλεκτρικών φορτίων αυξάνεται, ακριβώς με την ίδια σχέση μειώνεται και το μέγεθος της ελκτικής βαρυτικής δύναμης όσο η απόσταση των δύο μαζών αυξάνεται.<sup>2</sup>

Ας συγκρίνουμε τώρα το μέγεθος της ελκτικής ηλεκτρικής δύναμης μεταξύ ενός ηλεκτρονίου και ενός πρωτονίου με αυτήν της ελκτικής βαρυτικής δύναμης πάλι ανάμεσα σε ηλεκτρόνιο και πρωτόνιο: Η ηλεκτρική δύναμη είναι αφάνταστα πιο ισχυρή, είναι δηλαδή

2.272.000.000.000.000.000.000.000.000.000 (!!!) φορές

πιο μεγάλη από τη βαρυτική. Αν είναι έτσι,

*Πώς είναι δυνατόν η μεν βαρυτική να είναι συνεχώς και έντονα αισθητή, ενώ η ηλεκτρική να μην είναι συνήθως αντιληπτή (με εξαίρεση τους κεραυνούς και τις αστραπές);*

Για να απαντήσουμε στο βασικό αυτό ερώτημα θα πρέπει να εξετάσουμε τι συμβαίνει όταν έχουμε περισσότερα από δύο σωματίδια. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε τέσσερα σωματίδια, δύο πρωτόνια (το  $p_1$  και το  $p_2$ ) και δύο ηλεκτρόνια (το  $e_1$  και το  $e_2$ ). Στο καθένα από τα τέσσερα αυτά σωματίδια ασκούνται τρεις ηλεκτρικές και τρεις βαρυτικές δυνάμεις που προέρχονται από τα άλλα τρία σωματίδια. Αντί να αθροίσουμε τις δυνάμεις είναι πολύ πιο εύκολο και τελικά πιο εποικοδομητικό να αθροίσουμε τις δυναμικές ενέργειες, χωριστά τις ηλεκτρικές και χωριστά τις βαρυτικές. Για τις ηλεκτρικές έχουμε έξη προσθετέους τους εξής:  $+|e_1e_2| + |p_1p_2| - |e_1p_1| - |e_1p_2| - |e_2p_1| - |e_2p_2|$ , όπου το  $|e_1e_2|$  συμβολίζει το μέγεθος της δυναμικής ηλεκτρικής ενέργειας του ζεύγους ηλεκτρόνιο1/ηλεκτρόνιο2 κοκ. Οι δύο πρώτοι προσθετέοι έχουν θετικό πρόσημο γιατί αντιστοιχούν σε απωστικές δυνάμεις, ενώ οι τέσσερις επόμενοι έχουν αρνητικό πρόσημο γιατί αντιστοιχούν σε ελκτικές δυνάμεις. Για τις βαρυτικές δυναμικές ενέργειες έχουμε πάλι τους παραπάνω έξη προσθετέους όμως όλους με αρνητικό πρόσημο, αφού όλοι αντιστοιχούν σε ελκτικές δυνάμεις:  $-|e_1e_2| - |p_1p_2| - |e_1p_1| - |e_1p_2| - |e_2p_1| - |e_2p_2|$  όπου ο τόνος σε κάθε όρο υποδηλώνει ότι πρόκειται για βαρυτικές δυναμικές ενέργειες πολύ, πολύ, πολύ μικρότερου μεγέθους από τις ηλεκτρικές: οι τελευταίες δηλώνονται χωρίς τόνο. Βλέπουμε ότι στην περίπτωση της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας υπάρχει μερική αλληλοαφαίρεση των όρων και έτσι απομένουν μόνο δύο όροι. Αυτή η αλληλοαφαίρεση πλησιάζει όλο και περισσότερο το 100%, όσο ο αριθμός των σωματιδίων αυξάνεται και όσο το κάθε αρνητικό φορτίο συνδυάζεται με το ίσο του θετικό ώστε να δημιουργηθούν τοπικά ηλεκτρικά ουδέτερες δομές (δηλαδή δομές

<sup>2</sup> Η βαρυτική δυναμική ενέργεια  $E_{B\Delta}$  δύο σωματιδίων που το ένα έχει μάζα  $m_1$  και το άλλο  $m_2$  και τα οποία απέχουν μεταξύ τους κατά  $r_{12}$  είναι ανάλογη της μάζας  $m_1$ , είναι ανάλογη της μάζας  $m_2$ , και είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης  $r_{12}$ :

$$E_{B\Delta} = -G \frac{m_1 \times m_2}{r_{12}}, \quad (1.2)$$

όπου το  $G$  είναι μια θετική παγκόσμια σταθερά που η αριθμητική της τιμή εξαρτάται από την επιλογή των μονάδων μέτρησης ενέργειας, μάζας και μήκους. Είναι φανερό από τον παραπάνω τύπο ότι η ενέργεια  $E_{B\Delta}$  θα προκύψει πάντα αρνητική, όπως το περιμέναμε, αφού οι αμοιβαίες βαρυτικές δυνάμεις είναι πάντα ελκτικές.

με συνολικό ηλεκτρικό ίσο με μηδέν, όπως τα άτομα). Αντίθετα στην περίπτωση της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας δεν υπάρχει αλληλοαναίρεση, αφού όλοι οι όροι έχουν το ίδιο πρόσημο. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι η βαρυτική δυναμική ενέργεια κάθε προσθετού δεν μειώνεται τόσο γρήγορα με την απόσταση των δύο σωματιδίων (βλέπε υποσημ. 2), συνεπάγεται ότι το μέγεθος της συνολικής βαρυτικής δυναμικής ενέργειας ενός συστήματος αυξάνεται σχεδόν ανάλογα με το πόσα διαφορετικά ζεύγη σωματιδίων περιέχει. Είδαμε ότι υπάρχουν 6 ζεύγη όταν ο αριθμός σωματιδίων είναι 4. Αν τα σωματίδια είναι 100, όλα τα ζεύγη είναι  $(100 \times 99) / 2 = 4950$ . Αν πάμε σε μεγαλύτερες ποσότητες, αν δηλαδή τα μικροσκοπικά σωματίδια ενός μακροσκοπικού αντικείμενου είναι ένα εξάκις εκατομμύριο, ή σε αριθμό

1.000.000.000.000.000.000.000

δηλαδή περίπου όσα περιέχει ένα μεταλλικό νόμισμα, τότε ο αριθμός των ζευγών είναι 5 ακολουθούμενο από 41 μηδενικά (!!!) που όλα τα ζεύγη έχουν το ίδιο πρόσημο και συμβάλλουν επομένως χωρίς αλληλοαναίρεσεις στη συνολική βαρυτική δυναμική ενέργεια.

Σε αντιδιαστολή οι προσθετοί για την ολική ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του ίδιου νομίσματος που απομένουν μετά τις αλληλοαναίρεσεις είναι επίσης αρνητικοί αλλά ο αριθμός είναι περίπου δέκα εξάκις εκατομμύρια (10.000.000.000.000.000.000.000) δηλαδή δέκα δισεκατομμύρια τρισεκατομμυρίων φορές λιγότεροι από αυτούς της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας. Έτσι στην ουσία όσο το μακροσκοπικό αντικείμενο γίνεται μαζικότερο (δηλαδή αποτελούμενο από όλο και περισσότερα μικροσκοπικά σωματίδια) τόσο ο αριθμός των προσθετέων που συμβάλλουν στην βαρυτική δυναμική ενέργεια γίνεται φανταστικά μεγαλύτερος από τον αριθμό των προσθετέων που συμβάλλουν στην ηλεκτρική δυναμική ενέργεια μετά τις αλληλοαναίρεσεις. Όταν ο αριθμός των προσθετέων που συμβάλλουν στη δυναμική βαρυτική ενέργεια γίνει

2.272.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000 φορές

μεγαλύτερος από τον αριθμό των προσθετέων που συμβάλλουν στη δυναμική ηλεκτρική ενέργεια, τότε η συμβολή των βαρυτικών δυνάμεων στο μέγεθος της ολικής δυναμικής ενέργειας του μακροσκοπικού αντικείμενου, παρόλο το αφάνταστα μικρό μέγεθος του κάθε προσθετέου, θα είναι ίση με τη συμβολή των ηλεκτρικών δυνάμεων (γιατί η τεράστια υπεροχή σε αριθμό προσθετέων της βαρύτητας θα εξουδετερώσει το τεράστιο μειονέκτημά της σε μέγεθος του κάθε προσθετέου). Αυτό πράγματι συμβαίνει για μέγεθος όσο ένας πλανήτη όπως η Γη, όπου ο αριθμός των ηλεκτρονίων των πρωτονίων και των λεγόμενων νετρονίων που περιέχονται στη Γη είναι συνολικά περίπου 5,6 ακολουθούμενο από 51 μηδενικά (!!!).

Μέχρι τώρα εξετάσαμε την ολική εσωτερική δυναμική ενέργεια ενός μόνο μακροσκοπικού αντικείμενου (όπως είναι π.χ. ένα νόμισμα ή ολόκληρη η Γη) και την επί μέρους συμβολή στην ενέργεια αυτή των ηλεκτρικών και των βαρυτικών δυνάμεων. Αν έχουμε δύο χωριστά μακροσκοπικά αντικείμενα, το Α και το Β, τότε η ολική δυναμική ενέργεια και των δύο μαζί είναι η δυναμική ενέργεια του Α (που αποτελείται από όλες τις δυναμικές ενέργειες μεταξύ των σωματιδίων του Α) συν τη δυναμική ενέργεια του Β (που αποτελείται από όλες τις δυναμικές ενέργειες μεταξύ των σωματιδίων του Β) συν την δυναμική ενέργεια αλληλεπίδρασης μεταξύ των μακροσκοπικών αντικείμενων Α και Β (που αποτελείται από όλες τις δυναμικές ενέργειες μεταξύ ζευγών σωματιδίων που το ένα μέλος του κάθε ζεύγους ανήκει στο Α και το άλλο στο Β). Ως παραδείγματα χωριστών μακροσκοπικών αντικείμενων αναφέρουμε το σύστημα Γης/Σελήνης ή Γης/ Ήλιου ή Γης/ενός ανθρώπου επί της Γης. Στην δυναμική ενέργεια αλληλεπίδρασης μακροσκοπικών ηλεκτρικά ουδέτερων αντικείμενων οι ηλεκτρικές δυνάμεις



έχουν πρακτικά μηδενική συμβολή, εν αντιθέσει με τις βαρυτικές που κυριαρχούν απολύτως. Ο λόγος είναι απλός: οι ηλεκτρικές δυνάμεις δημιουργούν (επειδή ετερόνυμα έλκονται) μικροσκοπικές ουδέτερες δομές (δηλ. μηδενικού συνολικού ηλεκτρικού φορτίου, όπως είναι π.χ. τα άτομα) και επομένως καθίστανται, όπως εξηγήσαμε προηγουμένως, βραχείας εμβέλειας. Αυτό σημαίνει ότι οι ηλεκτρικές δυνάμεις γίνονται αισθητές μόνο όταν η απόσταση μεταξύ αυτών των ουδέτερων μικροσκοπικών δομών δεν ξεπερνάει περίπου το ένα δισεκατομμυριοστό του μέτρου. Έτσι τα μικροσκοπικά ηλεκτρικά ουδέτερα σύνθετα σωματίδια (όπως τα άτομα) π.χ. της Ξελήνης δεν έχουν την παραμικρή ευκαιρία να αισθανθούν τις ηλεκτρικές δυνάμεις που γεννούν τα αντίστοιχα μικροσκοπικά ουδέτερα σωματίδια της Γης. Ακόμη και στην περίπτωση Γης/ανθρώπου, όπου φαίνεται να υπάρχει κάποια επαφή και επομένως υπάρχουν ζεύγη μικροσκοπικών ουδέτερων σωματιδίων που το ένα σωματίδιο ανήκει στον άνθρωπο και το άλλο στη Γη και που η μεταξύ τους απόσταση είναι συγκρίσιμη ή μικρότερη του ενός δισεκατομμυριοστού του μέτρου· ακόμη και τότε η συμβολή των ηλεκτρικών δυνάμεων στη δυναμική ενέργεια αλληλεπίδρασης είναι αμελητέα σε σύγκριση με τη συμβολή των βαρυτικών. Ένας πρόχειρος υπολογισμός, λαμβάνοντας υπόψη την μακράς εμβέλειας βαρυτική δύναμη, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συμβολή της τελευταίας στην δυναμική ενέργεια αλληλεπίδρασης μεταξύ Γης και ενός ανθρώπου επί της Γης είναι περίπου 100 τετράκις εκατομμύρια μεγαλύτερη από αυτήν της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας. Έτσι λοιπόν η βαρυτική δύναμη, παρόλο το αφάνταστα μικρό της μέγεθος, κυριαρχεί στην αλληλεπίδραση της Γης με τα μακροσκοπικά αντικείμενα επ' αυτής όσο η ηλεκτρική ουδετερότητα των δομών της ύλης δεν διαταράσσεται (όπως, π.χ. με τις αστραπές και τους κεραυνούς). Όμως όλοι μας έχουμε δει έντομα ή και μολυντήρια να στέκονται (για να μην πω να «κάθονται») στο ταβάνι. Φυσικά, οι βαρυτικές δυνάμεις τείνουν να τα ξεκολλήσουν από το ταβάνι και να τα ρίξουν στο πάτωμα. Αντίθετα, οι ηλεκτρικές δυνάμεις τα έλκουν προς το ταβάνι ενάντια στις βαρυτικές και προφανώς κερδίζουν τις βαρυτικές. Άρα φαίνεται να υπάρχουν εξαιρέσεις στο συμπέρασμα ότι η βαρυτική δύναμη κυριαρχεί έναντι της ηλεκτρικής στην αλληλεπίδραση της Γης με τα μακροσκοπικά αντικείμενα επ' αυτής. Πώς γίνεται αυτό; Για σκεφτείτε το.

Μα καλά, θα αναρωτηθεί ο προσεκτικός αναγνώστης, αν η εμβέλεια των ηλεκτρικών δυνάμεων δεν ξεπερνά το ένα δισεκατομμυριοστό του μέτρου, πώς δημιουργείται το φως του Ήλιου και πώς φτάνει σε μας διασχίζοντας 150 δισεκατομμύρια μέτρα σχεδόν κενού χώρου; Ασφαλώς είναι εύλογο ένα τέτοιο ερώτημα. Η απάντηση έχει δύο σκέλη. Το πρώτο είναι ότι στον Ήλιο λαμβάνουν χώρα βίαια γεγονότα που διαταράσσουν συνεχώς την τοπική ηλεκτρική ουδετερότητα και θέτουν σε κίνηση θετικά και αρνητικά φορτισμένα σωματίδια. Ως αποτέλεσμα έπεται το δεύτερο σκέλος, δηλαδή η εμφάνιση μεταβαλλόμενων μαγνητικών δυνάμεων και η δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που εκπέμπονται από τον Ήλιο και διαδίδονται στον κενό χώρο και μεταφέρουν ενέργεια από τον Ήλιο π.χ. στη Γη<sup>3</sup>. Στη διάρκεια ενός έτους η συνολική ενέργεια που έχει μεταφερθεί από τον Ήλιο στη Γη μέσω ΗΜ κυμάτων, καίτοι αποφασιστικής σημασίας για ό,τι συμβαίνει στην επιφάνεια της Γης, δεν είναι παρά το ένα δισεκατομμυριοστό της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας αλληλεπίδρασης μεταξύ Ήλιου-Γης.

<sup>3</sup> Η ενέργεια που φτάνει στη Γη από τον Ήλιο εν μέρει ανακλάται και εν μέρει απορροφάται· στη συνέχεια όμως ό,τι απορροφάται επανεκπέμπεται από τη Γη προς όλες τις κατευθύνσεις, ώστε να διατηρείται έτσι κατά μέσο όρο η θερμοκρασιακή ισορροπία. Η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα και των άλλων αερίων θερμοκηπίου επηρεάζουν την επανεκπομπή της ενέργειας και επομένως διαταράσσουν την θερμοκρασιακή ισορροπία στην επιφάνεια της Γης.

Το επόμενο ερώτημα είναι το ακόλουθο: Έχουν και οι βαρυτικές δυνάμεις τη δυνατότητα να εκδηλώσουν κυματικό χαρακτήρα, όπως οι ηλεκτρομαγνητικές; Και αν η απάντηση είναι ναι, γιατί δεν αξιοποιούμε τεχνολογικά τα βαρυτικά κύματα, όπως τα ηλεκτρομαγνητικά; Η απάντηση στο πρώτο ερώτημα είναι πράγματι *Ναι* και αυτό επαληθεύτηκε πειραματικά για πρώτη φορά πρόσφατα, το Σεπτέμβριο του 2015. Η απάντηση στο δεύτερο ερώτημα έχει ως εξής: Ένας είναι ο βασικός λόγος που τα βαρυτικά κύματα παραμένουν και θα παραμείνουν για πολλά χρόνια αναξιοποίητα τεχνολογικά (εκτός ενδεχομένως κοσμολογικών παρατηρήσεων). Και ο λόγος αυτός είναι η απίστευτη ασθενικότητα των βαρυτικών δυνάμεων· τα βαρυτικά κύματα που θα μπορούσαν να παραχθούν από επίγειες πηγές, είτε φυσικές είτε ανθρωπογενείς, φέρουν τόσο απίθανα ελάχιστη ενέργεια που η ανίχνευσή τους φαίνεται ανέφικτη. Επί πλέον η ανίχνευση τους δυσχεραίνεται ακόμη περισσότερο γιατί απαιτεί μέτρηση μηκών πολύ πέραν των σημερινών τεχνολογικών δυνατοτήτων.

Και μια τελευταία ερώτηση: Σε κβαντομηχανικό επίπεδο, που αποτελεί την πληρέστερη περιγραφή της φύσης των δυνάμεων, έχει διαπιστωθεί πειραματικά το αναμενόμενο κβάντο των βαρυτικών δυνάμεων; Η απάντηση είναι ένα κατηγορηματικό όχι. Κι' αυτό γιατί ούτε μια αποδεκτή κβαντική θεωρία της βαρύτητας έχει διατυπωθεί, ούτε φυσικά έχει καταστεί δυνατός ο πειραματικός προσδιορισμός ενός τέτοιου κβάντου για τους λόγους που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Σκεφτείτε: Αν είναι τόσο δύσκολο να διαπιστωθεί πειραματικά η ύπαρξη βαρυτικών κυμάτων (για τα οποία έχουμε επί πλέον μια αξιόπιστη θεωρία, τη γενική θεωρία της σχετικότητας) και τα οποία θα πρέπει να αποτελούνται από ένα τεράστιο αριθμό κβάντων, ο πειραματικός προσδιορισμός του κάθε κβάντου τους μοιάζει εντελώς ανέφικτος.

### III. Ισχυρές (πυρηνικές) δυνάμεις

Όπως αναφέραμε κατά τη σύντομη παρουσίαση του πάνω και του κάτω κουάρκ, γεννήτορας και αποδέκτης της ισχυρής δύναμης είναι το λεγόμενο χρωματικό φορτίο που είναι τριών τύπων, είτε *R*, είτε *G*, είτε *B*. Μόνο υλικά σωματίδια που φέρουν χρωματικό φορτίο, όπως τα κουάρκ υπόκεινται στην ισχυρή δύναμη, είτε ως γεννήτορες της είτε ως αποδέκτες της. Π. χ. το ηλεκτρόνιο ούτε αισθάνεται την ισχυρή δύναμη ούτε την γεννά. Το ίδιο ισχύει και για το φωτόνιο· σημειώτεον ότι το φωτόνιο ούτε την ηλεκτρομαγνητική δύναμη γεννά ή αισθάνεται (καίτοι είναι φορέας της), αφού δεν φέρει ηλεκτρικό φορτίο· το φωτόνιο όμως υπόκειται (ως γεννήτορας ή αποδέκτης) στη βαρυτική δύναμη, αφού έχει ενέργεια άρα και σχετικιστική μάζα (παρόλο που η μάζα ηρεμίας του φωτονίου είναι μηδέν).

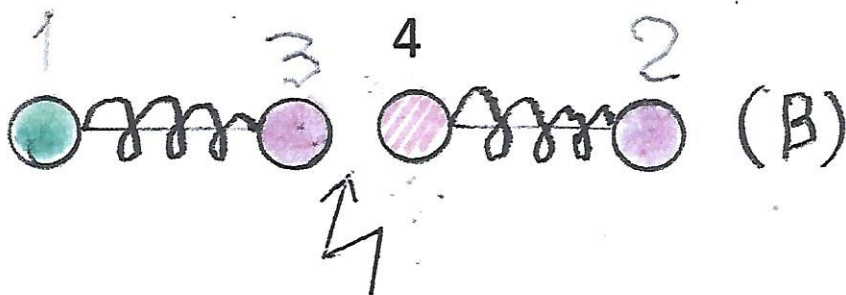
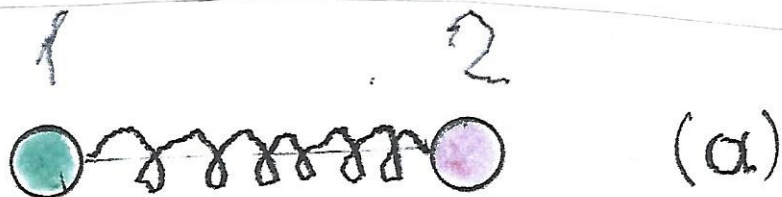
Η ισχυρή δύναμη φέρει αυτό το όνομα επειδή είναι πράγματι η ισχυρότερη. Είναι 137 φορές ισχυρότερη από την ηλεκτρομαγνητική. Ας θεωρήσουμε υποθετικά δύο κουάρκ (είτε και τα δύο πάνω, είτε και τα δύο κάτω, είτε ένα πάνω και ένα κάτω) οποιουδήποτε χρωματικού φορτίου το καθένα τους. Η μεταξύ τους απόσταση *a* είναι η τυπική απόσταση δύο κουάρκ στη φύση, π.χ. αυτή στο εσωτερικό ενός πρωτονίου που είναι ένα τετράκις εκατομμυριοστό του μέτρου,

$$\frac{1}{1.000.000.000.000.000} \text{ (!!!)}.$$

Τα δύο αυτά κουάρκ, το υπ' αριθμ. 1 και το υπ' αριθμ. 2, αφού φέρουν χρωματικό φορτίο, ασκούν το ένα στο άλλο την ισχυρή *ελκτική* δύναμη. Ας μη ξεχνάμε ότι υπόκεινται επίσης και στην ηλεκτρική δύναμη (αφού έχουν ηλεκτρικό φορτίο) και στη βαρυτική (αφού έχουν σχετικιστική μάζα καίτοι η μάζα ηρεμίας τους είναι μηδενική). Εμείς εδώ εστιάζουμε στην ισχυρή δύναμη που λόγω του μεγέθους της κυριαρχεί απολύτως. Η εξάρτηση της ισχυρής

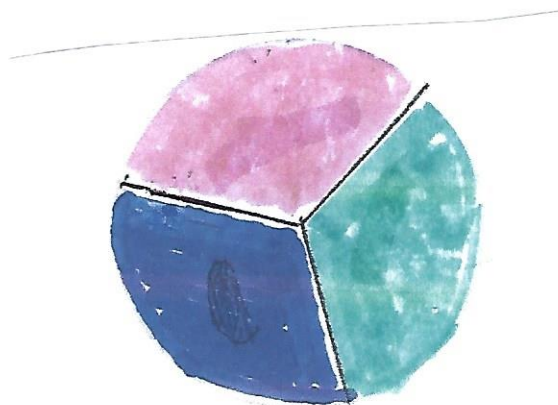
δύναμης από την απόσταση μεταξύ δύο κουάρκ είναι πολύ διαφορετική από την ηλεκτρική και από την βαρυτική. Σε αντίθεση με τις οικείες αυτές δυνάμεις, η ισχυρή δύναμη όντας *ελκτική* μένει περίπου σταθερή όσο η απόσταση μεταξύ των δύο κουάρκ αυξάνεται ενώ τείνει να μηδενισθεί όταν τα δύο κουάρκ πλησιάσουν υπερβολικά κοντά. Ο μηδενισμός της ισχυρής δύναμης για πολύ μικρές αποστάσεις ονομάζεται στη γλώσσα των ειδικών *ασυμπτωτική ελευθερία*, ενώ η αμείωτη παρουσία της δύναμης αυτής για μεγάλες αποστάσεις (που συνεπάγεται μια όλο και μεγαλύτερη παροχή ενέργειας προκειμένου να αυξήσουμε την απόσταση μεταξύ δύο κουάρκ) χαρακτηρίζεται ως *εγκλωβισμός*, που σημαίνει πρακτικά ότι δεν είναι δυνατόν να απομονώσουμε ένα μόνο κουάρκ, αφού κάτι τέτοιο φαίνεται ότι θα απαιτούσε άπειρη ενέργεια.

Μπορείτε να φανταστείτε την ισχυρή δύναμη μεταξύ δύο κουάρκ ως ένα νοητό ελατήριο που τα συνδέει (βλ. Σχ. 2.5α): όταν η απόσταση των κουάρκ είναι πολύ μικρή, το νοητό ελατήριο είναι χαλαρό και δεν ασκεί καμία (ισχυρή) δύναμη· όταν η απόστασή τους μεγαλώνει, το νοητό ελατήριο «τεντώνεται» και ασκεί μια περίπου σταθερή (ισχυρή) δύναμη. Τι θα συμβεί αν εξακολουθούμε να «τεντώνουμε» το νοητό ελατήριο προσδίδοντάς του συνεχώς ενέργεια; Σε κάποια στιγμή το νοητό ελατήριο θα «σπάσει», όταν το ποσό της ενέργειας που έχει συσσωρευθεί ξεπεράσει τη συνολική ενέργεια που αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος κουάρκ/αντικουάρκ· όμως το ζεύγος δύο κουάρκ δεν θα πάψει να υπάρχει, παρόλο που το νοητό «ελατήριο που συνδέει το κουάρκ 1 και το κουάρκ 2 «διερράγη». Αυτό που πράγματι θα συμβεί μπορεί να περιγραφεί ως εξής: στο ένα από τα δύο «άκρα» του νοητού ελατηρίου που προέκυψαν μετά τη «διάρρηξη» του θα εμφανισθεί ένα κουάρκ, ας το ονομάσουμε 3, και στο άλλο «άκρο» ένα αντικουάρκ, ας το ονομάσουμε 4 (βλ. Σχ. 2.5β)· το αρχικό κουάρκ 1 με το νεοδημιουργηθέν κουάρκ 3 θα αποτελέσουν ένα συνδεδεμένο με νοητό ελατήριο ζεύγος κουάρκ, όπως το αρχικό ζεύγος των κουάρκ 1 με 2· το αντικουάρκ 4 (που μόλις προέκυψε) συνδεδεμένο με το αρχικό κουάρκ 2 θα «αναχωρήσει» ως ενιαίο σύνθετο σωματίδιο κουάρκ/αντικουάρκ (βλ. Σχ. 2.5β). Αυτό το ενιαίο σύνθετο σωματίδιο που αποτελείται από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ (συνολικού χρωματικού φορτίου μηδέν) ονομάζεται **πίονιο**.



**Σχ.2.5** (α) Το νοητό 'ελατήριο', όντας 'τεντωμένο' απεικονίζει την περίπου σταθερή ελκτική ισχυρή δύναμη μεταξύ των δύο κουάρκ, του 1 και του 2, καθώς προσπαθούμε να τα αποχωρήσουμε. (β) Η 'θραύση' του νοητού 'ελατηρίου' συνοδεύεται με τη δημιουργία ενός ζεύγους κουάρκ/αντικουάρκ, του κουάρκ 3 και του αντικουάρκ 4 αντιστοίχως· το ζεύγος αντικουάρκ 4/κουάρκ 2 αναχωρεί ως ένα σύνθετο βραχύβιο σωματίδιο, που ονομάζεται πιόνιο, αφήνοντας πίσω πάλι ένα ζεύγος δύο συνδεδεμένων κουάρκ, το 1 και το 3.

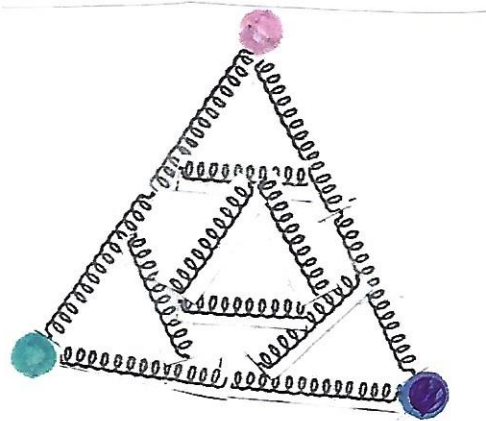
Στην παραπάνω παρουσίαση της ισχυρής δύναμης χρησιμοποιήσαμε για λόγους απλότητας ένα σύστημα δύο κουάρκ που το χαρακτηρίσαμε υποθετικό. Πράγματι είναι υποθετικό γιατί, όπως δεν μπορεί να υπάρξει ένα απομονωμένο κουάρκ, δεν μπορεί επίσης να υπάρξει και ένα απομονωμένο ζεύγος δύο κουάρκ. Ένα ζεύγος κουάρκ θα έφερε ένα μη μηδενικό συνολικό χρωματικό φορτίο, πράγμα που δεν επιτρέπεται. Οποιοδήποτε σύνθετο σωματίδιο που μπορεί να υπάρξει αυτοτελώς οφείλει να έχει συνολικά μηδενικό χρωματικό φορτίο, να είναι δηλαδή «άχρωμο». Οι απλούστεροι σχηματισμοί που έχουν συνολικά μηδενικό χρωματικό φορτίο είναι ένα κουάρκ με ένα αντικουάρκ του, όπως π.χ. στο πιόνιο που αναφέραμε προηγουμένως. Στην περίπτωση αυτή το συνολικό χρωματικό φορτίο θα είναι είτε  $R + \bar{R} = 0$ , είτε  $G + \bar{G} = 0$ , είτε  $B + \bar{B} = 0$ . Μηδενικό συνολικό χρωματικό φορτίο προκύπτει επίσης από την παρουσία και των τριών διαφορετικού τύπου χρωματικών φορτίων:  $R + G + B = 0$ , γι'αυτό άλλωστε επελέγησαν τα ονόματα κόκκινο, πράσινο, μπλε 'κατ' αναλογία με τον λεγόμενο δίσκο του Νεύτωνα που, παρόλο που φέρει τα χρώματα κόκκινο, πράσινο, μπλε, με την περιστροφή του παράγει το λευκό «χρώμα», δηλαδή το μη χρώμα.



**Σχ. 2.6** Ο λεγόμενος δίσκος του Νεύτωνα, που κατά το 1/3 είναι κόκκινος, κατά το 1/3 πράσινος και κατά το 1/3 μπλε· αν περιστραφεί αρκετά γρήγορα εμφανίζεται ως λευκός, δηλαδή ως «άχρωμος».

Ας έλθουμε τώρα στην κβαντική περιγραφή που αποδίδει ακριβέστερα την πραγματικότητα της ισχυρής δύναμης. Η περιγραφή αυτή απαιτεί την ταυτοποίηση του κβάντου αυτής της δύναμης που έχει ονομασθεί γλοιόνιο (θα μεταφράζαμε στα νεοελληνικά αυτό το όνομα ως κολλητήρι·

στα αγγλικά ο όρος είναι gluon από την ελληνική λέξη γλοιός). Το κάθε γλοιόνιο φέρει συνδυασμό χρωματικού/αντιχρωματικού φορτίου. Αυτοί οι συνδυασμοί είναι οκτώ διαφορετικοί, οι εξής:  $R\bar{G}$ ,  $R\bar{B}$ ,  $G\bar{R}$ ,  $G\bar{B}$ ,  $B\bar{R}$ ,  $B\bar{G}$  και δύο ακόμη (όχι τρεις) άχρωμοι που συνδυάζουν χρωματικό φορτίο με το ίδιο αντιχρωματικό φορτίο. Το ότι το κάθε γλοιόνιο φέρει κάποιον από τους παραπάνω συνδυασμούς χρωματικού/αντιχρωματικού φορτίου σημαίνει ότι συμμετέχει και αυτό στην ισχυρή δύναμη, ότι είναι δηλαδή γεννήτορας και αποδέκτης ισχυρών δυνάμεων. Αν υιοθετήσουμε την εικόνα των νοητών ελατηρίων, οι ισχυρές δυνάμεις που εμφανίζονται στο εσωτερικό ενός πρωτονίου που αποτελείται από τρία κουάρκ (δύο πάνω και ένα κάτω) θα είναι όπως στο Σχ. 2.7



**Σχ. 2.7** Οι ισχυρές δυνάμεις που παριστάνονται στο σχήμα ως νοητά ελατήρια συνδέουν και αλληλοπαγιδεύουν τα τρία κουάρκ που συγκροτούν το πρωτόνιο. Κάθε νοητό ελατήριο, ως φέρον συνδυασμό χρωματικού φορτίου/αντιφορτίου, συνδέεται με τα άλλα ελατήρια μέσω πάλι νοητών ελατηρίων κοκ.

Το Σχ.2.7 είναι ενδεικτικό του πόσο περίπλοκες είναι οι ισχυρές δυνάμεις και πόσο δύσκολος είναι ο υπολογισμός της συνολικής δυναμικής ενέργειας των τριών κουάρκ που συγκροτούν το πρωτόνιο. Εν τούτοις έχει γίνει εφικτός ο θεωρητικός υπολογισμός αυτής της συνολικής δυναμικής ενέργειας (που οφείλεται κυρίως στην ισχυρή δύναμη και σε πολύ μικρότερο βαθμό, περίπου 1% , στην ηλεκτρική δύναμη). Έχει επίσης μετρηθεί πειραματικά με μεγάλη ακρίβεια η ολική ενέργεια ηρεμίας του πρωτονίου (στην οποία συμβάλλουν η ενέργεια ηρεμίας των τριών κουάρκ (σε ποσοστό της τάξεως του 0,01%), η συνολική δυναμική ενέργεια των τριών κουάρκ και η κινητική ενέργεια των τριών κουάρκ). Η συνολική ενέργεια ηρεμίας του πρωτονίου είναι 1836,15 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του ηλεκτρονίου. Άρα και η μάζα ηρεμίας του πρωτονίου είναι 1836,15 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου. Για να συμπληρώσουμε τα χαρακτηριστικά του πρωτονίου θα αναφέρουμε ότι το μέγεθος του πρωτονίου καθορίζεται από το χώρο που χρησιμοποιούν για την αέναη χωρίς σταματημό κίνησή τους τα τρία αλληλοπαγιδευμένα κουάρκ· ο χώρος αυτός έχει σχήμα σφαιρικό και η διάμετρος του είναι 1,68 εκατομμυριοστά του δισεκατομμυριοστού του μέτρου [ $1,68/(1.000.000.000.000.000)$  του μέτρου]. Το σπιν του πρωτονίου συνολικά είναι 1/2 και η μικροσκοπική μαγνητική του «βελόνη»<sup>4</sup> έχει αντίθετο πρόσημο από αυτήν του ηλεκτρονίου (λόγω του αντίθετου ηλεκτρικού του φορτίου) και πολύ μικρότερο μέγεθος (λόγω της πολύ μεγαλύτερης μάζας του).

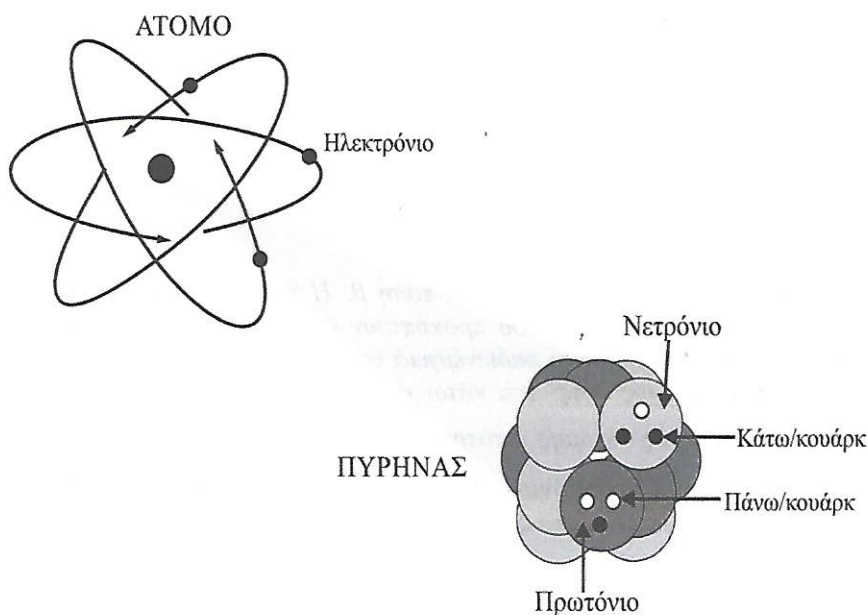
Πολύ παρόμοιο με το πρωτόνιο είναι το σύνθετο μικροσκοπικό σωματίδιο που αποτελείται και αυτό από τρία κουάρκ (όμως από δύο κάτω και από ένα πάνω κουάρκ) και ονομάζεται **νετρόνιο**, ενώ το σύμβολό του είναι  $n$ . Η βασική διαφορά του πρωτονίου από το νετρόνιο είναι στο *συνολικό* ηλεκτρικό τους φορτίο: ενώ του πρωτονίου είναι +1, του νετρονίου είναι μηδέν αφού, αθροίζοντας τα ηλεκτρικά φορτία των συστατικών του, έχουμε  $(2/3)-(1/3)-(1/3)=0$ . Το συνολικό χρωματικό φορτίο του νετρονίου είναι μηδέν, αφού τα χρωματικά φορτία των τριών κουάρκ του είναι  $R$ ,  $G$ , και  $B$ , όπως του πρωτονίου. Η κύρια συμβολή στη συνολική δυναμική ενέργεια του συστήματος των τριών κουάρκ που αποτελούν το νετρόνιο οφείλεται στην ισχυρή δύναμη και έχει την ίδια περίπλοκη δομή όπως αυτή του πρωτονίου. Η μάζα ηρεμίας του νετρονίου είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτήν του πρωτονίου, είναι δηλαδή 1838,68 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του ηλεκτρονίου. Το σπιν του νετρονίου είναι και αυτού 1/2 , όπως και του ηλεκτρονίου και του πρωτονίου. Η διάμετρος του χώρου που καταλαμβάνουν τα τρία αλληλοπαγιδευμένα κουάρκ του νετρονίου για την αέναη κίνησή τους είναι η ίδια με αυτήν του πρωτονίου. Η μικροσκοπική μαγνητική «βελόνη» του νετρονίου είναι μη μηδενική, παρόλο το μηδενικό του συνολικό ηλεκτρικό φορτίο, και έχει το ίδιο πρόσημο με αυτήν του ηλεκτρονίου και λίγο μικρότερο μέγεθος από αυτήν του πρωτονίου.

Η άλλη μεγάλη διαφορά του νετρονίου από το πρωτόνιο είναι η εξής: Ενώ ένα απομονωμένο πρωτόνιο είναι σταθερό, δηλαδή υπάρχει για πάντα, ένα απομονωμένο νετρόνιο είναι μετασταθές, δηλαδή δεν ζει για πάντα. Ο μέσος χρόνος ζωής του είναι 14,8 λεπτά της ώρας, που σημαίνει ότι ο χρόνος υποδιπλασιασμού είναι 10,2 λεπτά της ώρας. Ο χρόνος υποδιπλασιασμού είναι το χρονικό διάστημα στη διάρκεια του οποίου ο αριθμός όσων έχουν

<sup>4</sup> Αυτήν ακριβώς τη σούπερ μικροσκοπική μαγνητική «βελόνη» των πρωτονίων του σώματός μας εκμεταλλευόμαστε στη μαγνητική τομογραφία εξετάζοντας το πώς αυτή προσανατολίζεται με την επιβολή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου και το πώς στη συνέχεια αποπροσανατολίζεται όταν το πεδίο αυτό εκλείπει.

απομείνει είναι ο μισός του αρχικού.

Στο Σχ. 2.8 φαίνεται πώς πρωτόνια και νετρόνια αλληλοέλκονται και αλληλοπαγιδεύονται. Σχηματίζουν έτσι διάφορα σύνθετα μικροσκοπικά σωματίδια που τα ονομάζουμε πυρήνες (ή για αποφυγή παρεξηγήσεων ατομικούς πυρήνες) και πώς ο κάθε πυρήνας έλκει και παγιδεύει γύρω του ηλεκτρόνια σχηματίζοντας έτσι το επόμενο στάδιο στην ιεραρχική δομή της ύλης, που δεν είναι άλλο από αυτό που ονομάζουμε άτομα, παρόλο που δεν είναι ά-τομα.

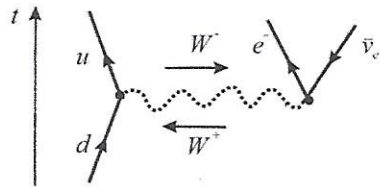


**Σχ. 1.8.** Τα πρώτα στάδια στην ιεραρχική οργάνωση των δομών της ύλης: Όπως αναφέραμε προηγουμένως, δύο πάνω κουάρκ και ένα κάτω κουάρκ αλληλοεγκλωβίζονται λόγω των ισχυρών δυνάμεων σχηματίζοντας ένα σύνθετο σωματίδιο που το ονομάζουμε πρωτόνιο. Με παρόμοιο τρόπο δύο κάτω κουάρκ και ένα πάνω κουάρκ αλληλοεγκλωβίζονται λόγω των ισχυρών δυνάμεων σχηματίζοντας ένα σύνθετο σωματίδιο που το ονομάζουμε νετρόνιο. Πρωτόνια και νετρόνια αλληλοέλκονται λόγω επίσης ισχυρών δυνάμεων και αλληλοπαγιδεύονται. Σχηματίζουν έτσι τους διάφορους πυρήνες, οι οποίοι φέρουν συνολικά θετικό ηλεκτρικό φορτίο ίσο με τον αριθμό των πρωτονίων που περιέχουν (σε μονάδες  $e$ ). (Π. χ. ο πυρήνας του ατόμου του άνθρακα αποτελείται από 6 πρωτόνια και 6 νετρόνια και γι' αυτό ονομάζεται άνθρακας-12. Ο πυρήνας του ατόμου του ουρανίου αποτελείται από 92 πρωτόνια και 146 νετρόνια και γι' αυτό ονομάζεται ουράνιο-238. Στο άλλο άκρο ο πυρήνας του ατόμου του υδρογόνου δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένα μόνο πρωτόνιο και θα μπορούσε να ονομάζεται υδρογόνο-1). Ο κάθε πυρήνας ασκεί ελκτικές ηλεκτρικές δυνάμεις στα ηλεκτρόνια (που φέρουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο) και τα παγιδεύει γύρω του σχηματίζοντας έτσι τα διάφορα άτομα που είναι ηλεκτρικά ουδέτερα (όταν ο αριθμός των παγιδευμένων ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων στον πυρήνα).

#### IV. Ασθενείς (πυρηνικές) δυνάμεις

Στην ασθενή δύναμη υπόκεινται όλα τα σωματίδια ύλης (ηλεκτρόνια, πάνω κουάρκ, κάτω κουάρκ κλπ) καθώς και τα φωτόνια και τα κβάντα της ασθενούς δύναμης. Με άλλα λόγια, όλα τα σωματίδια ύλης καθώς και τα κβάντα της ηλεκτρομαγνητικής και της ασθενούς δύναμης είναι γεννήτορες και αποδέκτες της ασθενούς δύναμης. Η ασθενής δύναμη είναι ασθενέστερη της ηλεκτρομαγνητικής κατά περίπου χίλιες έως περίπου εκατό χιλιάδες φορές, ανάλογα με το σε ποιες διαδικασίες αναφερόμαστε. Επομένως δικαίως φέρει το όνομα ασθενής.

Η κύρια λειτουργία της ασθενούς δύναμης είναι να αφανίζει/δημιουργεί σωματίδια ύλης μέσω εκπομπής ή απορρόφησης των κβάντων της. Π.χ. ένα κάτω κουάρκ μπορεί να μετατραπεί σε πάνω κουάρκ ενώ ταυτόχρονα εκπέμπεται ένα κβάντο της ασθενούς δύναμης που ονομάζεται διανυσματικό μποζόνιο και συμβολίζεται ως  $W^-$ . Το κβάντο αυτό στη συνέχεια αλλά σχεδόν ακαριαία εξαφανίζεται δημιουργώντας ένα ηλεκτρόνιο και ένα άλλο στοιχειώδες αντισωματίδιο που ονομάζεται αντινετρίνο ηλεκτρονίου, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.9.



**Σχ. 2.9** Η στοιχειώδης διαδικασία που οδηγεί στη λεγόμενη διάσπαση β. Η τελευταία είναι η βασική αντίδραση η οποία 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, έχει ως εξής: ένα κάτω κουάρκ  $d$  (που είναι μέρος ενός νετρονίου) εκπέμπει ένα κβάντο  $W^-$  της ασθενούς δύναμης μετατρέπόμενο ταυτόχρονα σε κουάρκ  $u$  (και επομένως έτσι αυτό το νετρόνιο μετατρέπεται σε πρωτόνιο). Το εκπεμφθέν κβάντο  $W^-$  της ασθενούς δύναμης σχεδόν αμέσως αφανίζεται δημιουργώντας ένα ζεύγος ηλεκτρονίου και αντινετρίνου ηλεκτρονίου

Να λοιπόν που προέκυψε η ανάγκη να παρουσιάσουμε ένα τέταρτο στοιχειώδες σωματίδιο (πέραν των  $e$ ,  $u$ ,  $d$ ), που ονομάζεται νετρίνο ηλεκτρονίου και συμβολίζεται ως  $\nu_e$  καθώς και το αντισωματίδιό του, το αντινετρίνο ηλεκτρονίου. Το στοιχειώδες αυτό σωματίδιο, το νετρίνο ηλεκτρονίου θα το τοποθετήσουμε στο πάνω αριστερά κουτάκι του Πιν.1 (σελ. ) ώστε να συμπληρωθεί η πρώτη οικογένεια.

Το **νετρίνο ηλεκτρονίου** (το αντισωματίό του είναι το αντινετρίνο ηλεκτρονίου που εμφανίστηκε στο Σχ.2.9) είναι ένα στοιχειώδες (δηλ. αδιαίρετο) σωματίδιο (επί πλέον των τριών που παρουσιάσαμε προηγουμένως) που δεν χρειάστηκε να το αναφέρουμε μέχρι τώρα. Το νετρίνο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, η δε μάζα του ηρεμίας είναι μη μηδενική αλλά τόσο μικρή που δεν ξέρουμε την ακριβή τιμή της· φαίνεται όμως ότι είναι μικρότερη από ένα εκατομμύριο φορές τη μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου. Τα νετρίνα ηλεκτρονίου και τα ηλεκτρόνια, επειδή μπορούν να μετατραπούν τα μεν στα δε με την παρέμβαση των ασθενών δυνάμεων, τα κατατάσσουμε στην ίδια ομάδα και τα αποκαλούμε **λεπτόνια** (υπάρχουν και άλλα τέσσερα στοιχειώδη σωματίδια που ανήκουν σε αυτή την ομάδα, τα οποία θα εξετάσουμε όταν η όταν η παρουσίασή μας το απαιτήσει). Το



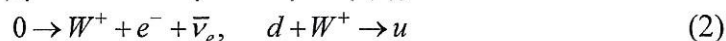
νετρίνο ηλεκτρονίου (όπως και όλα τα λεπτόνια και όλα τα κουάρκ) έχει σπιν 1/2. Επειδή το νετρίνο ηλεκτρονίου δεν υπόκειται ούτε στην ηλεκτρομαγνητική, ούτε στην ισχυρή δύναμη (αφού δεν φέρει ούτε ηλεκτρικό ούτε χρωματικό φορτίο), αλληλεπιδρά ελάχιστα με την συνήθη ύλη και επομένως δεν συμμετέχει στις δομές της, παρόλο που αφθονεί στη φύση.

Το κβάντο  $W^-$  της ασθενούς δύναμης, που εμπλέκεται στη διαδικασία αλλαγής ενός κάτω κουάρκ σε πάνω κουάρκ, φέρει ηλεκτρικό φορτίο -1, όσο και το ηλεκτρόνιο. Έχει πολύ μεγάλη μάζα ηρεμίας (περίπου 86 φορές τη μάζα του πρωτονίου, πράγμα που συνεπάγεται την πάρα πολύ μικρή εμβέλεια της ασθενούς δύναμης (περίπου χίλιες φορές μικρότερη από την μέση απόσταση δύο κουάρκ στο εσωτερικό του πρωτονίου)). Το σπιν του είναι 1 (όπως όλων των κβάντων όλων των δυνάμεων με εξαίρεση αυτό της βαρυτικής δύναμης, που περιμένουμε να είναι 2).

Στο παράδειγμα που αναφέραμε προηγουμένως είδαμε ότι το κβάντο  $W^-$  της ασθενούς δύναμης δρά ως ενδιάμεσος μεσάζων: με την εκπομπή του μετατρέπει ένα κάτω κουάρκ σε πάνω και αμέσως μετά με τον αφανισμό του δημιουργεί ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινετρίνο ηλεκτρονίου. Τα δύο αυτά βήματα της αντίδρασης μπορούν να περιγραφούν συμβολικά ως εξής:



όπου με  $\nu_e$  συμβολίζουμε το νετρίνο ηλεκτρονίου και με  $\bar{\nu}_e$  το αντινετρίνο ηλεκτρονίου. Το ίδιο ακριβώς τελικό αποτέλεσμα ( $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ ) θα είχε και η ακόλουθη διαδικασία, που αποτελεί «τρόπον τινά» χρονική αντιστροφή των δύο βημάτων: μέσω της ασθενούς δύναμης δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου/αντινετρίνου ηλεκτρονίου, ενώ ταυτόχρονα εκπέμπεται ένα άλλο κβάντο της ασθενούς δύναμης που φέρει μεν το ίδιο όνομα αλλά έχει ηλεκτρικό φορτίο ίσο με +1, δηλαδή αντίθετο με το ηλεκτρικό φορτίο του  $W^-$  και αντίθετο με αυτό του ηλεκτρονίου, και συμβολίζεται ως  $W^{+}$  κατά τα άλλα έχει τις ίδιες ιδιότητες με το  $W^-$ . Στη συνέχεια το  $W^+$  απορροφάται από το κουάρκ  $d$ , το οποίο μετατρέπεται έτσι σε κουάρκ  $u$ . Και με αυτή τη διαδικασία καταλήγουμε στο ίδιο συνολικό αποτέλεσμα, παρόλο που τα δύο ενδιάμεσα βήματα (τα μόνα που περιλαμβάνουν κβάντο ασθενούς δύναμης) είναι διαφορετικά (σύγκρινε τα δύο βήματα στην αντίδραση (1) με τα δύο στην αντίδραση (2))



Αναφέραμε το συγκεκριμένο παράδειγμα ( $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ ) αντίδρασης αφανισμού/ δημιουργίας που πραγματοποιείται μέσω των κβάντα της ασθενούς δύναμης (εκδοχή (1) και εκδοχή (2)) για δύο λόγους. Πρώτον, γιατί έχει μεγάλη πρακτική σημασία: Στα κατάλοιπα των πυρηνικών αντιδραστήρων συμβαίνει και η μία και η άλλη εκδοχή της παραπάνω αντίδρασης με αποτέλεσμα να μετατρέπεται ένα νετρόνιο σε πρωτόνιο και να εκπέμπεται ένα μεγάλης ταχύτητας ηλεκτρόνιο, που ευθύνεται για τα ανεπιθύμητα αποτελέσματα της ραδιενέργειας (στην τελευταία συμβάλλει και ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας που εκπέμπεται σχεδόν σε κάθε περίπτωση αμέσως μετά την παραπάνω αντίδραση· το αντινετρίνο δεν μας ενοχλεί γιατί πρακτικά δεν έχει σχεδόν καμία αλληλεπίδραση με την ύλη, έμβια ή άβια). Δεύτερον, γιατί μας επιτρέπει να παρατηρήσουμε και να διατυπώσουμε μερικούς κανόνες τους οποίους υπακούουν οι διάφοροι μετασχηματισμοί μικροσκοπικών σωματιδίων που οφείλονται στα κβάντα ή της ασθενούς, ή της ισχυρής, ή της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης:

1. Σε κάθε στοιχειώδες βήμα της αντίδρασης διατηρείται το ηλεκτρικό φορτίο, που σημαίνει ότι το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο πριν και μετά το κάθε βήμα είναι το ίδιο.

2. Σε κάθε βήμα διατηρείται το συνολικό χρωματικό φορτίο (ένα π.χ.  $\bar{R}$  λογίζεται ως μείον ένα  $R$ ).

3. Σε κάθε βήμα διατηρείται ο συνολικός αριθμός λεπτονίων (ένα αντιλεπτόνιο λογίζεται ως μείον ένα λεπτόνιο).

4. Σε κάθε βήμα διατηρείται ο συνολικός αριθμός των κουάρκ (ένα αντικουάρκ λογίζεται ως μείον ένα κουάρκ).

Σε κάθε ενδιάμεσο βήμα δεν είναι απαραίτητο να διατηρείται η ενέργεια. Είναι όμως απαραίτητο η ολική ενέργεια των προϊόντων της αντίδρασης μετά την ολοκλήρωσή της να είναι ίση με την ολική ενέργεια πριν την έναρξη της αντίδρασης. Αυτός είναι ο βασικός νόμος διατήρησης της ενέργειας. Π.χ. πριν την έναρξη της αντίδρασης ( $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ ) είχαμε ένα κάτω κουάρκ  $d$  που είναι συστατικό ενός νετρονίου (το οποίο πάντα επιτρέπεται να το θεωρούμε ως ακίνητο) μετά την ολοκλήρωση της αντίδρασης έχουμε ένα πάνω κουάρκ  $u$  (που είναι συστατικό ενός πρωτονίου), ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντινετρίνο ηλεκτρονίου. Η διατήρηση της ενέργειας, όπως τη διατυπώσαμε απαιτεί:

ενέργεια ηρεμίας του νετρονίου = ενέργεια ηρεμίας του πρωτονίου + ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου + ενέργεια ηρεμίας του αντινετρίνου + κινητική ενέργεια και του πρωτονίου και του ηλεκτρονίου και του αντινετρίνου.

Αφού η κινητική ενέργεια είναι πάντα θετική έπεται ότι η ενέργεια ηρεμίας του νετρονίου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των ενεργειών ηρεμίας των προϊόντων. Αυτό πράγματι ισχύει και γι' αυτό ένα απομονωμένο νετρόνιο ζει κατά μέσο όρο μόνο μερικά λεπτά (αφού η αντίδραση  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  ικανοποιεί τη διατήρηση της ενέργειας με τη παραπάνω έννοια), ενώ ένα απομονωμένο πρωτόνιο ζει για πάντα γιατί η αντίδραση

πρωτόνιο  $\rightarrow$  νετρόνιο + ποζιτρόνιο + νετρίνο ηλεκτρονίου,

δεν μπορεί να συμβεί, γιατί, παρολο που υπακούει και τους τέσσερις παραπάνω κανόνες, παραβιάζει την ισότητα της ενέργειας πριν την έναρξη και μετά την ολοκλήρωση της αντίδρασης.

Θα κλείσουμε την παρουσίαση της ασθενούς δύναμης επισημαίνοντας μια παραδοξότητα της κβαντικής περιγραφής. Στο πρώτο ενδιάμεσο βήμα της εκδοχής (2) της αντίδρασης εμφανίζεται η δημιουργία από το μηδέν ενός σωματιδίου, ενός αντισωματιδίου και ενός κβάντου, δηλαδή εμφανίζεται δημιουργία ενέργειας από το τίποτε (!!!). Τέτοια ενδιάμεσα γεγονότα όχι μόνο τα επιτρέπει αλλά τα χρησιμοποιεί κατά κόρον η κβαντική περιγραφή της πραγματικότητας αρκεί να έπεται αμέσως μετά ένα συμπληρωματικό ενδιάμεσο γεγονός που να αποκαθιστά τη συνολική διατήρηση της ενέργειας, όπως τη διατυπώσαμε προηγουμένως.

### Συνοψίζοντας την παρουσίαση των δυνάμεων

Από τις τέσσερις δυνάμεις οι δύο πυρηνικές είναι από τη φύση τους πολύ βραχείας εμβέλειας. Ως αποτέλεσμα ο ρόλος τους (που είναι σημαντικός) περιορίζεται στο σχηματισμό πρωτονίων, νετρονίων, πυρήνων και άλλων σύνθετων σωματιδίων που οι διαστάσεις τους δεν ξεπερνούν μερικά τετράκις εκατομμυριοστά του μέτρου. Σε αυτούς τους απίστευτα μικρούς νάνους κρύβονται εντούτοις φανταστικά μεγάλα ποσά ενέργειας (ακριβώς, όπως θα δούμε, λόγω του ότι είναι τόσο μικροσκοπικοί νάνοι).

Οι άλλες δύο δυνάμεις, η βαρυτική και η ηλεκτρομαγνητική έχουν μακροσκοπική εμβέλεια και επομένως είναι αισθητές σε ανθρώπινη αλλά και σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Η βαρυτική είναι απίστευτα ασθενική. Επειδή όμως είναι πάντα ελκτική, η βαρυτική ενέργεια κάθε ζεύγους σωματιδίων είναι αθροιστική και έτσι τελικά η βαρύτητα γίνεται αισθητή και τελικά κυριαρχεί για πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις μάζας όπως σε ένα πλανήτη ή σε ένα άστρο αντίστοιχα.

Η ηλεκτρομαγνητική κρύβει το πόσο αφάνταστα ισχυρή είναι έναντι της βαρυτικής επειδή, όντας είτε ελκτική είτε απωστική, δημιουργεί ηλεκτρικά ουδέτερες μικροσκοπικές δομές (όπως είναι τα άτομα) οι οποίες εμφανίζουν όσον αφορά τη συνολική ηλεκτρομαγνητική δύναμη βραχεία εμβέλεια της τάξεως δισεκατομμυριοστού του μέτρου. Οι δομές που οφείλονται ΗΜ δύναμη είναι είτε μικροσκοπικές είτε μακροσκοπικές και περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τα άτομα, τα μόρια, τα μεγαλομόρια, τους ιούς, τους ζώντες οργανισμούς, τα στερεά, τα υγρά, τα πλαστικά, τους αστεροειδείς, ακόμη και σώματα τόσο μεγάλα, όπως η Σελήνη. Για πλανήτες, όπως η Γη, οι ηλεκτρικές και οι βαρυτικές δυνάμεις συμβάλλουν περίπου εξίσου στην ολική δυναμική ενέργεια.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, είτε φυσικά είτε ανθρωπογενή, μεταξύ των οποίων και το φως, αποτελούν το βασικό μηχανισμό διακίνησης πληροφοριών και το κύριο χαρακτηριστικό του τεχνολογικού πολιτισμού μας.