

Κλασική Φυσική, ατομική θεωρία, και ο προφητικός Δρ. Μάξγουελ!



Εκ πρώτης όψεως, η ατομική θεωρία φαίνεται να παραβιάζει τους νόμους του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού. Και όμως, η κλασική θεωρία της ακτινοβολίας βρίσκει χώρο ακόμα και μέσα σε μία κβαντική δομή όπως το άτομο. Αρκεί να την επανερμηνεύσουμε κατάλληλα...



Κώστας Παπαχρήστου

SHARE IT



Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία: Ένας θρίαμβος της κλασικής Φυσικής!

Αν αναζητούσαμε την κορυφαία μορφή της θεωρητικής Φυσικής κατά τον δέκατο-ένατο αιώνα, θα καταλήγαμε χωρίς δυσκολία στον *James Clerk Maxwell* (1831-1879). Μεταξύ των πολλών επιτευγμάτων του, ο Maxwell ενοποίησε τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό σε μία ενιαία ηλεκτρομαγνητική θεωρία και πρόβλεψε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, χωρίς τα οποία οι επικοινωνίες μας, αλλά ακόμα περισσότερο η ίδια μας η ζωή, θα ήταν αδύνατες. Δυστυχώς, ο Maxwell έφυγε από τη ζωή αρκετά νέος και δεν ευτύχησε να δει, λίγα χρόνια αργότερα, την πειραματική επαλήθευση της θεωρίας του για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα...

Συχνά σκεφτόμαστε τον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό σαν δύο ξεχωριστά φαινόμενα. Και, πράγματι, εμφανίζουν μία θεμελιώδη διαφορά: Ένα ηλεκτρικό φορτίο δέχεται ηλεκτρική δύναμη ανεξάρτητα από την κίνησή του, ενώ δέχεται μαγνητική δύναμη μόνο όταν κινείται. Αν ζούσαμε σε έναν εξωπραγματικό κόσμο όπου όλα τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά πεδία έμεναν αμετάβλητα μέσα στον χρόνο, δεν θα είχαμε επίγνωση ότι τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά φαινόμενα είναι αλληλένδετα και αμοιβαία εξαρτημένα. Από μαθηματική άποψη, οι περίφημες τέσσερις εξισώσεις του *Maxwell* θα έσπαζαν σε δύο ανεξάρτητα ζευγάρια, ένα για κάθε πεδίο (ηλεκτρικό και μαγνητικό).

Το 1831, όμως, σε μία σειρά πειραμάτων του, ο *Michael Faraday* ανακάλυψε κάτι ενδιαφέρον: κάθε φορά που ένα μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται χρονικά, ένα ηλεκτρικό πεδίο κάνει απαραίτητα την εμφάνισή του! Αν και δεν υπήρχαν τότε ανάλογες πειραματικές ενδείξεις, ο Maxwell πρόβλεψε πως και το αντίστροφο ήταν αληθές. Δηλαδή, ένα μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται κάθε φορά που ένα ηλεκτρικό πεδίο αλλάζει χρονικά. Έτσι, δεν θα έπρεπε στο εξής να ξεχωρίζουμε απόλυτα τα ηλεκτρικά από τα μαγνητικά φαινόμενα, αφού το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μοιάζουν να είναι σε στενή εξάρτηση μεταξύ τους.

Από ιστορική άποψη, έχουμε εδώ την πρώτη θεωρία ενοποίησης φαινομενικά διαφορετικών δυνάμεων (αλληλεπιδράσεων) – των ηλεκτρικών και των μαγνητικών – σε μία ενιαία *ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση*. Ο εικοστός αιώνας θα διεύρυνε το «κάδρο» της ενοποίησης βάζοντας στο παιχνίδι την ασθενή και την ισχυρή αλληλεπίδραση, και κάνοντας μία ηρωική προσπάθεια να εντάξει στο σχήμα και την δύστροπη βαρύτητα...

Με την μαθηματική ιδιοφυΐα που τον διέκρινε, ο Maxwell κωδικοποίησε τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα με τέσσερις εξισώσεις που περιγράφουν την συμπεριφορά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στον χώρο και τον χρόνο. Από τις εξισώσεις αυτές προκύπτει το ενδιαφέρον συμπέρασμα ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει κυματικές ιδιότητες. Δηλαδή, μία μεταβολή (διαταραχή) του πεδίου σε κάποιο σημείο του χώρου δεν γίνεται ακαριαία αισθητή σε άλλα σημεία αλλά διαδίδεται μέσω ενός *ηλεκτρομαγνητικού κύματος* που ταξιδεύει με την ταχύτητα του φωτός. Ειδικά, το ίδιο το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα που έχει την ιδιότητα να γίνεται αντιληπτό από εμάς για τον λόγο ότι ερεθίζει το αισθητήριο της όρασής μας.

Δεν χρειάζεται, νομίζω, να τονίσω την σημασία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για τη ζωή μας! Μέσω αυτών λαμβάνουμε φως και ζέστη από τον Ήλιο (αλλά, δυστυχώς, και άλλες ακτινοβολίες που είναι βλαπτικές για εμάς), απολαμβάνουμε στερεοφωνική μουσική στο ραδιόφωνο, βλέπουμε ποδοσφαιρικούς αγώνες στην τηλεόραση, επικοινωνούμε με τα κινητά μας τηλέφωνα... Όμως, πώς παράγονται αυτά τα κύματα;

Καταρχήν, λίγη ορολογία: Η διάδοση ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καλείται *ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία*. (Στο εξής θα γράφουμε, σύντομα, «*H/M κύματα*» και «*H/M ακτινοβολία*».) Έτσι, ένα φυσικό σύστημα που εκπέμπει ενέργεια στη μορφή H/M κυμάτων λέμε ότι εκπέμπει H/M ακτινοβολία ή, απλά, ότι *ακτινοβολεί*. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων είναι τα άτομα, τα μόρια, οι πυρήνες, τα θερμά σώματα, οι κεραίες των ραδιοφωνικών σταθμών, κλπ.

Από μία προσεκτική εξέταση των εξισώσεων του Maxwell προκύπτει ότι η H/M ακτινοβολία παράγεται με βασικά δύο τρόπους: (α) με *επιταχυνόμενα μεμονωμένα ηλεκτρικά φορτία*, και (β) με *χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά ρεύματα*. Ειδικά, ένα φορτίο που κινείται με σταθερή ταχύτητα (ευθύγραμμο και ομαλά) *δεν* ακτινοβολεί. Συνηθίζω να το εξηγώ αυτό στους μαθητές μου χρησιμοποιώντας την παρακάτω παραβολή:

Μια ζεστή μέρα του καλοκαιριού πάτε ως το περίπτερο να αγοράσετε ένα παγωτό. Για να προλάβετε πριν λιώσει, αποφασίζετε να το φάτε στον δρόμο. Βαδίζετε αμέριμνοι σε ένα ευθύγραμμο μονοπάτι με σταθερό βήμα (άρα, με σταθερή ταχύτητα) χωρίς να πάρετε είδηση ένα σμήνος από μέλισσες που σας ακολουθούν πολιορκώντας το παγωτό σας! Όταν ξαφνικά τις αντιλαμβάνεστε, επιταχύνετε την κίνησή σας για να τους ξεφύγετε (είτε τρέχετε πιο γρήγορα προς τα μπρος, είτε απλά αλλάζετε κατεύθυνση πορείας). Τρομαγμένες, τότε, από την κίνησή σας αυτή, κάποιες μέλισσες αποκόπτονται από το σμήνος και πετούν μακριά, χωρίς ποτέ να επιστρέψουν...

Τι σημαίνουν όλα αυτά; Το «παγωτό» είναι ένα ηλεκτρικό φορτίο που αρχικά κινείται με σταθερή ταχύτητα, μεταφέροντας στην κατεύθυνση της κίνησής του την ολική ενέργεια του Η/Μ πεδίου του (το «σμήνος των μελισσών»), η οποία ενέργεια μένει σταθερή. Όταν το φορτίο επιταχύνεται, ένα μέρος της ενέργειας αυτής (οι «μέλισσες» που πέταξαν μακριά) αποσπάται, κατά κάποιον τρόπο, και απομακρύνεται προς το άπειρο με την ταχύτητα του φωτός, υπό μορφή Η/Μ κύματος. Και, όσο πιο μεγάλη είναι η επιτάχυνση του φορτίου, τόσο πιο μεγάλη είναι και η ενέργεια της εκπεμπόμενης Η/Μ ακτινοβολίας στη μονάδα του χρόνου.

Εδώ, τώρα, μπορεί να τεθεί το εξής ερώτημα: Η επιτάχυνση είναι κάτι το σχετικό. Αν ένα φορτίο επιταχύνεται ως προς έναν «ακίνητο» παρατηρητή, αυτός θα βλέπει το φορτίο να εκπέμπει Η/Μ ακτινοβολία. Ένας παρατηρητής, όμως, που κινείται μαζί με το φορτίο – άρα το φορτίο είναι ακίνητο ως προς αυτόν – πώς θα εξηγήσει την ακτινοβολία που αντιλαμβάνεται;

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να θυμηθούμε την έννοια του *αδρανειακού συστήματος αναφοράς*. Είναι ένα σύστημα συντεταγμένων (ή αξόνων) ως προς το οποίο ένα ελεύθερο σωματίο (δηλαδή, ένα σωματίο που δεν του ασκούνται δυνάμεις) είτε κινείται με σταθερή ταχύτητα (ευθύγραμμο και ομαλά) είτε δεν κινείται καθόλου. Ο παρατηρητής που χρησιμοποιεί ένα τέτοιο σύστημα αναφοράς λέγεται *αδρανειακός παρατηρητής*. Με βάση τον Νόμο της Αδράνειας (πρώτο νόμο του Νεύτωνα), δύο αδρανειακοί παρατηρητές κινούνται με σταθερή ταχύτητα (δεν επιταχύνονται) ο ένας ως προς τον άλλον.

Αυτό που πρέπει να θυμόμαστε είναι ότι σε αδρανειακά και μόνο συστήματα αναφοράς ισχύουν οι νόμοι του Νεύτωνα, καθώς και οι νόμοι του ηλεκτρομαγνητισμού. Ειδικά, ένα ηλεκτρικό φορτίο εκπέμπει Η/Μ ακτινοβολία όταν επιταχύνεται ως προς έναν *αδρανειακό* παρατηρητή. Ο παρατηρητής που κινείται μαζί με το φορτίο αυτό δεν είναι αδρανειακός. Έτσι, αν και σε εκείνον το φορτίο φαίνεται ακίνητο, άρα μη-επιταχυνόμενο, δεν έχει το «δικαίωμα» να ερμηνεύει τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα με βάση τις εξισώσεις του Maxwell και, αν επιμένει να το κάνει, θα φτάσει στο λανθασμένο συμπέρασμα ότι ακόμα και ένα ακίνητο φορτίο ακτινοβολεί! Στην πραγματικότητα, βέβαια, το φορτίο ακτινοβολεί επειδή επιταχύνεται *ως προς τον αδρανειακό παρατηρητή*.

Ο Maxwell ήταν άτυχος που δεν πρόλαβε την θεωρία της σχετικότητας, αφού με βάση αυτήν είναι πολύ εύκολο να αποδειχθεί ότι ένα φορτίο που κινείται με σταθερή ταχύτητα ως προς έναν αδρανειακό παρατηρητή δεν ακτινοβολεί. Ας δούμε πώς:

Έστω φορτίο q που κινείται με σταθερή ταχύτητα (ευθύγραμμο και ομαλά) ως προς έναν αδρανειακό παρατηρητή O . Θεωρούμε και έναν παρατηρητή O' που κινείται μαζί με το φορτίο, άρα είναι κι αυτός αδρανειακός (αφού κινείται με σταθερή ταχύτητα ως προς

τον O). Επειδή το q είναι ακίνητο ως προς τον O' , ο παρατηρητής αυτός θα αντιλαμβάνεται απλά ένα στατικό ηλεκτρικό πεδίο και δεν θα καταγράφει εκπομπή Η/Μ ακτινοβολίας από το q (η Η/Μ ακτινοβολία προϋποθέτει χρονική μεταβολή του Η/Μ πεδίου).

Ας κάνουμε τώρα την υπόθεση ότι ο «ακίνητος» παρατηρητής O , ως προς τον οποίο το q κινείται με σταθερή ταχύτητα, βλέπει το q να ακτινοβολεί. Σύμφωνα με την αρχή της σχετικότητας, η Η/Μ ακτινοβολία διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα c (ταχύτητα του φωτός) σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Έτσι, αν ο παρατηρητής O βλέπει ακτινοβολία που διαδίδεται με ταχύτητα c , τότε και ο παρατηρητής O' θα πρέπει να βλέπει την ίδια ακτινοβολία να διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα. Όμως, όπως είπαμε προηγουμένως, ο παρατηρητής O' δεν βλέπει καμία ακτινοβολία! Γιατί οδηγηθήκαμε σε άτοπο; Διότι κάναμε μία λανθασμένη υπόθεση: ότι ο παρατηρητής O βλέπει το φορτίο q να ακτινοβολεί. Συμπέρασμα: το q δεν μπορεί να ακτινοβολεί αν κινείται με σταθερή ταχύτητα ως προς τον αδρανειακό παρατηρητή O .

Σημειώνουμε ότι η επιχειρηματολογία που χρησιμοποιήσαμε καταρρέει αν το q επιταχύνεται ως προς τον O , αφού ο παρατηρητής O' που κινείται μαζί με το φορτίο δεν είναι τώρα αδρανειακός και, συνεπώς, η αρχή της σχετικότητας δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί για να συσχετίσει τις παρατηρήσεις των O και O' .

Κλασική Φυσική και ατομική θεωρία: Μία δύσκολη σχέση...

Ένα ατομικό σύστημα αποτελείται από ένα πλήθος θετικά και αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων (πυρήνας και ηλεκτρόνια, αντίστοιχα) τα οποία συγκρατούνται μεταξύ τους με ηλεκτρικές δυνάμεις έτσι ώστε το σύστημα να είναι *ευσταθές* (να διατηρεί την ταυτότητά του) για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα.

Όπως μπορεί να αποδειχθεί, ένα σύστημα φορτισμένων σωματιδίων δεν είναι δυνατό να βρίσκεται σε στατική ισορροπία κάτω από την επίδραση ηλεκτρικών δυνάμεων. Τα σωματίδια θα πρέπει να βρίσκονται σε κίνηση και, επειδή ο χώρος της κίνησής τους είναι περιορισμένος, η διεύθυνση της ταχύτητάς τους θα πρέπει να μεταβάλλεται συνεχώς. Με άλλα λόγια, τα σωματίδια θα έχουν (τουλάχιστον κεντρομόλο) επιτάχυνση.

Όμως, σύμφωνα με την κλασική θεωρία, κάθε επιταχυνόμενο φορτίο εκπέμπει Η/Μ ακτινοβολία χάνοντας διαρκώς ενέργεια. Έτσι, μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα το σύστημα θα πρέπει να συρρικνώνεται και να καταρρέει, χάνοντας τελικά την ταυτότητά του. Κάτι τέτοιο (ευτυχώς!) δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα, αφού τα ατομικά συστήματα είναι *ευσταθή*.

Ένα άλλο φαινόμενο που απαιτεί εξήγηση είναι ότι τα ατομικά συστήματα εκπέμπουν και απορροφούν την Η/Μ ακτινοβολία με τρόπο *επιλεκτικό*. Δηλαδή, κάθε τέτοιο σύστημα απορροφά και εκπέμπει συγκεκριμένες μόνο συχνότητες ακτινοβολίας. Όπως λέμε, το φάσμα εκπομπής και απορρόφησης του συστήματος είναι *γραμμικό*. Αυτό η κλασική Φυσική επίσης αδυνατεί να το εξηγήσει.

Εκεί που αποτυγχάνει η κλασική θεωρία, αναλαμβάνει δράση η κβαντική. Ας εξετάσουμε πώς συμβαίνει αυτό, παίρνοντας σαν παράδειγμα το απλούστερο ατομικό σύστημα: το άτομο του υδρογόνου. Και, πριν απ' όλα, ας δούμε και πάλι γιατί ένα τέτοιο σύστημα δεν είναι δυνατό να μελετηθεί με όρους κλασικής Φυσικής.

Μοντέλο του Rutherford: Μία σημαντική αρχή, με προβληματικά συμπεράσματα...

Το πρώτο σύγχρονο μοντέλο του ατόμου προτάθηκε το 1911 από τον *Ernest Rutherford*. Στην απλούστερη περίπτωση, αυτή του ατόμου του υδρογόνου, το μοναδικό ηλεκτρόνιο κινείται κυκλικά γύρω από τον πυρήνα (πρωτόνιο) με σταθερή γωνιακή ταχύτητα και αυθαίρετη ακτίνα τροχιάς.

Η εικόνα θυμίζει την κίνηση ενός πλανήτη γύρω από τον Ήλιο, ή ενός δορυφόρου γύρω από έναν πλανήτη. Με μία βασική διαφορά: στην περίπτωση του ατόμου, η κίνηση οφείλεται σε Η/Μ αλληλεπίδραση (την δύναμη Coulomb ανάμεσα σε πρωτόνιο και ηλεκτρόνιο) και όχι στη βαρύτητα, όπως συμβαίνει στα πλανητικά συστήματα. Και, επειδή το ηλεκτρόνιο έχει κεντρομόλο επιτάχυνση λόγω της συνεχούς μεταβολής στη διεύθυνση της κίνησής του, η κλασική θεωρία προβλέπει ότι το άτομο θα πρέπει να εκπέμπει συνεχώς Η/Μ ακτινοβολία χάνοντας ενέργεια, με αποτέλεσμα η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του ηλεκτρονίου να μειώνεται ολοένα ώσπου τελικά το ηλεκτρόνιο να μεταπέσει μέσα στον πυρήνα του ατόμου. Και η μετάπτωση αυτή, που θα σήμαινε ολική κατάρρευση του ατόμου, θα συνέβαινε μέσα σε απειροελάχιστο χρονικό διάστημα! Κάτι τέτοιο, βέβαια, δεν παρατηρείται στην πραγματικότητα: το άτομο του υδρογόνου – όπως και εκείνα των υπόλοιπων στοιχείων – είναι δομή ευσταθής.

Η ιστορία, όμως, έχει και συνέχεια. Καθώς θα μεταβάλλονταν συνεχώς η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου και η ενέργεια του ατόμου, με ομοίως συνεχή τρόπο θα μεταβαλλόταν και η συχνότητα της Η/Μ ακτινοβολίας που θα εξέπεμπε το άτομο. Όπως όμως αναφέραμε προηγουμένως, τα άτομα δεν φαίνεται να εκπέμπουν ακτινοβολία κατά τρόπο συνεχή, αλλά κάθε άτομο εκπέμπει επιλεκτικά συγκεκριμένες συχνότητες ακτινοβολίας, χαρακτηριστικές του ατόμου. Δηλαδή, τα φάσματα εκπομπής των ατόμων (όπως επίσης και των μορίων) είναι *γραμμικά*.

Το μοντέλο του Rutherford, λοιπόν, αν και αποτέλεσε ένα πρώτο σημαντικό βήμα στην κατανόηση της ατομικής δομής, δεν εξηγεί τόσο την ευστάθεια, όσο και την γραμμικότητα του φάσματος εκπομπής των ατόμων. Και εδώ μπαίνει στη σκηνή η κβαντική θεωρία. Με τις αρχικές αδυναμίες της κι αυτή...

Μοντέλο του Bohr: «Παντρεύοντας» κλασικές με κβαντικές ιδέες...

Το 1913 ο *Niels Bohr* επιχείρησε να «διορθώσει» τις αδυναμίες του μοντέλου του Rutherford για το άτομο του υδρογόνου, προτείνοντας ένα μοντέλο που συνδύαζε κλασικές έννοιες όπως η τροχιά ενός σωματιδίου, με νεωτεριστικές ιδέες όπως ο κβαντισμός της στροφορμής και της ενέργειας.

Ο Bohr εμπλούτισε το μοντέλο του Rutherford για το υδρογόνο, προσθέτοντας δύο αξιώματα:

1. Το ηλεκτρόνιο δεν επιτρέπεται να διαγράφει αυθαίρετες τροχιές γύρω από τον πυρήνα, αλλά πρέπει να κινείται σε κυκλικές τροχιές με αυστηρά καθορισμένες ακτίνες. Στις τροχιές αυτές το ηλεκτρόνιο δεν εκπέμπει Η/Μ ακτινοβολία, και η ενέργεια του ατόμου είναι καθορισμένη και σταθερή.

2. Το άτομο ακτινοβολεί μόνο όταν το ηλεκτρόνιο μεταπίπτει από μία τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας σε μία τροχιά μικρότερης ενέργειας, με παράλληλη μείωση της ακτίνας της τροχιάς του ηλεκτρονίου. Η ενέργεια ακτινοβολείται στη μορφή ενός φωτονίου.

Η θεωρία του Bohr εξηγεί την γραμμικότητα του φάσματος εκπομπής του υδρογόνου, προβλέποντας σωστά και τις συχνότητες της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Η γραμμικότητα αυτή εξηγείται με απλό τρόπο ως εξής: Σε μία μετάπτωση του ηλεκτρονίου από μία τροχιά ενέργειας E σε μία τροχιά μικρότερης ενέργειας E' , το άτομο εκπέμπει ενέργεια στη μορφή ενός φωτονίου συχνότητας $\nu=(E-E')/h$, όπου h η σταθερά του Planck. Και, επειδή τα E και E' παίρνουν διακριτές και όχι αυθαίρετες τιμές (δηλαδή, η ενέργεια του ατόμου είναι κβαντισμένη), το ίδιο θα ισχύει και για τις συχνότητες ν της εκπεμπόμενης Η/Μ ακτινοβολίας. Έτσι, ο κβαντισμός της ενέργειας είναι στενά συνδεδεμένος με την γραμμικότητα του ατομικού φάσματος εκπομπής.

Το μοντέλο του Bohr «πάσχει» σε δύο, κυρίως, σημεία:

1. Ενώ προβλέπει σωστά το φάσμα εκπομπής του ατόμου του υδρογόνου, αδυνατεί να κάνει το ίδιο για άτομα με δύο ή περισσότερα ηλεκτρόνια.

2. Αφήνει ανεξήγητο το ότι στις επιτρεπές τροχιές του το ηλεκτρόνιο, αν και έχει κεντρομόλο επιτάχυνση, δεν ακτινοβολεί, παραβιάζοντας έτσι τους νόμους του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού.

Και στα δύο αυτά ζητήματα δίνει απαντήσεις η *κβαντομηχανική*. Θα επικεντρωθούμε εδώ στο δεύτερο.

Πώς η κβαντομηχανική συμφιλιώνει τον Maxwell με τον Bohr!

Σύμφωνα με τον κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό, ένα σημειακό φορτίο που εκτελεί ομαλή κυκλική κίνηση εκπέμπει ακτινοβολία λόγω της κεντρομόλου επιτάχυνσής του. Αντίθετα, ένα κυκλικό ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής έντασης δεν ακτινοβολεί, αφού το H/M πεδίο που παράγει είναι απλά ένα στατικό μαγνητικό πεδίο. Και, όπως αναφέραμε νωρίτερα, η H/M ακτινοβολία προϋποθέτει χρονική μεταβολή του H/M πεδίου.

Όμως, στην κβαντομηχανική η εικόνα ενός σημειακού φορτίου που κινείται σε καθορισμένη τροχιά στερείται νοήματος, αφού η *αρχή της αβεβαιότητας* δεν επιτρέπει να γνωρίζουμε την ακριβή θέση και την ακριβή ταχύτητα ενός σωματιδίου του μικρόκοσμου. Στη θέση των τροχιών, η κβαντομηχανική μιλά για *στάσιμες καταστάσεις* με καλά καθορισμένες ενέργειες. Και, στη θέση της κίνησης ενός ηλεκτρονίου σε καθορισμένη τροχιά γύρω από τον πυρήνα, η θεωρία προτείνει ένα *«ρεύμα πιθανότητας»* που σχετίζεται με όλες τις θέσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το ηλεκτρόνιο κατά την κίνησή του. Όταν το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε μία από τις στάσιμες καταστάσεις, το αντίστοιχο ρεύμα πιθανότητας είναι *χρονικά σταθερό*.

Επί πλέον – και αυτή είναι μία κρίσιμη υπόθεση – το ρεύμα πιθανότητας μπορεί να θεωρηθεί ως μαθηματικά ανάλογο ενός *ηλεκτρικού ρεύματος* γύρω από τον πυρήνα του ατόμου. Σε μία στάσιμη κατάσταση, το ηλεκτρικό ρεύμα αυτό είναι χρονικά σταθερό. Και, σύμφωνα με την κλασική θεωρία, ένα σταθερό ρεύμα δεν αποτελεί πηγή εκπομπής H/M ακτινοβολίας.

Ας πάμε, ειδικά, στο άτομο του υδρογόνου. Οι επιτρεπτές τροχιές του Bohr, σε κάθε μία εκ των οποίων το ηλεκτρόνιο έχει καλά καθορισμένη ενέργεια, αντιστοιχούν στις στάσιμες καταστάσεις της κβαντομηχανικής. Και, όπως προαναφέραμε, στις καταστάσεις αυτές η κίνηση του ηλεκτρονίου είναι ισοδύναμη με ένα ηλεκτρικό ρεύμα σταθερής έντασης. Έτσι, στις «καταστάσεις Bohr» το άτομο δεν ακτινοβολεί, εκτός αν το ηλεκτρόνιο μεταπέσει από μία κατάσταση υψηλότερης ενέργειας σε μία κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας, οπότε το άτομο θα εκπέμψει ένα φωτόνιο συχνότητας ανάλογης με τη διαφορά ενέργειας ανάμεσα στις δύο καταστάσεις.

Όταν, τώρα, το άτομο του υδρογόνου δεν υπόκειται σε εξωτερική διέγερση, το ηλεκτρόνιό του «προτιμά» να βρίσκεται στη στάσιμη κατάσταση με την χαμηλότερη δυνατή ενέργεια, αντίστοιχη της πρώτης (θεμελιώδους) τροχιάς του Bohr. Και, επειδή δεν υπάρχει δυνατότητα περαιτέρω μεταπτώσεων, το ηλεκτρόνιο παραμένει επ' αόριστον στη θεμελιώδη κατάσταση, ενώ το άτομο δεν έχει πλέον τη δυνατότητα να ακτινοβολεί. Η ενέργεια του ατόμου μένει, έτσι, σταθερή, και το άτομο αποφεύγει την κατάρρευση.

Αντικαθιστώντας, λοιπόν, τις ημι-κλασικές τροχιές Bohr με τις στάσιμες καταστάσεις της κβαντομηχανικής, και θεωρώντας ότι το κβαντικό ρεύμα πιθανότητας είναι ανάλογο ενός πραγματικού ηλεκτρικού ρεύματος που περιβάλλει τον πυρήνα του ατόμου, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το άτομο του υδρογόνου είναι ευσταθές σύστημα. Και, το συμπέρασμα αυτό είναι σύμφωνο με μία καθαρά κλασική αρχή: ότι ένα χρονικά σταθερό ηλεκτρικό ρεύμα δεν ακτινοβολεί ενέργεια. Παρά την αρχική αμηχανία τού Rutherford, ο Maxwell και ο Bohr μπορούν, τελικά, να γίνουν φίλοι!

Επίλογος

Από φιλοσοφική άποψη, θα λέγαμε ότι η κβαντομηχανική όχι μόνο δεν καταργεί τον Maxwell σε ό,τι αφορά τα φαινόμενα του μικρόκοσμου, αλλά κατ' ουσίαν τον δικαιώνει. Αρκεί, βέβαια, να επανεξεταστούν «αυτονόητες» έννοιες της κλασικής Φυσικής, όπως η τροχιά ενός σωματιδίου ως γεωμετρικός τόπος επακριβώς καθορισμένων σημείων από τα οποία το σωματίδιο διέρχεται σε απόλυτα καθορισμένες χρονικές στιγμές. Η επανεξέταση αυτή επιβάλλεται λόγω της αρχής της αβεβαιότητας, σύμφωνα με την οποία δεν επιτρέπεται να γνωρίζουμε λεπτομέρειες του μικρόκοσμου σε τάξη μεγέθους συγκρίσιμη με (ή μικρότερη από) εκείνη της σταθεράς του Planck.

Αν σκεφτούμε ότι τον ηλεκτρομαγνητισμό του Maxwell δεν αμφισβήτησε ούτε η θεωρία της σχετικότητας (κάτι που έκανε για την νευτώνεια μηχανική), καταλαβαίνουμε γιατί ο μεγάλος αυτός επιστήμονας του 19ου αιώνα δικαίως μπορεί να χαρακτηριστεί ως ο κορυφαίος θεωρητικός Φυσικός πριν τον Αϊνστάιν!

** Το πιο πάνω κείμενο αποτελεί μεταφρασμένη και ελαφρά απλουστευμένη εκδοχή του παιδαγωγικού επιστημονικού άρθρου "But, how can the atom be so stable, Dr. Maxwell?" (<https://arxiv.org/abs/2105.08421>)*