

Σημειώσεις Κβαντομηχανικής. Τραχανάς.

Κατανομή Plank και εντροπία. Γιατί θερμική ακτινοβολία; Γιατί το φως που εκπέμπεται δεν έχει τις συχνότητες που επιβάλλουν οι ενεργειακές στάθμες των ατόμων του υλικού;

Σελίδα 40.

ΔΑΣΚΑΛΟΣ: Ακριβώς όπως το είπες: Η κατανομή του Πλανκ (έτσι λέγεται η κατανομή για την οποία συζητάμε) είναι αντικειμενικά (και μονοσήμαντα) καθορισμένη από την αρχή της μέγιστης εντροπίας (= αταξίας) για συστήματα σε θερμοδυναμική ισορροπία. Οπότε, το μόνο που έχει σημασία στην περίπτωση μας είναι να βεβαιωθούμε ότι όντως το φως που εκπέμπεται από ένα σώμα έχει έρθει σε θερμική ισορροπία μαζί του προτού εκπεμφθεί. Ότι είναι πράγματι θερμικό φως με θερμοκρασία ίδια με εκείνη του σώματος που το εξέπεμψε. Το οποίο σίγουρα θα έχει συμβεί αν το εκπεμπόμενο φως είχε την ευκαιρία να αλληλεπιδράσει επανειλημμένα με την ύλη του εκπέμποντος σώματος ώστε να «θερμοποιηθεί», όπως λέμε, και να γίνει όντως θερμικό φως.

...στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή η «θερμοποίηση» δεν είναι καθόλου δύσκολο να πραγματοποιηθεί. Στο κάτω-κάτω, τα φωτόνια που δημιουργούνται στο εσωτερικό του σώματος —π.χ. από διεγερμένα άτομα που αποδιεγείρονται— στην προσπάθειά τους να κινηθούν προς τα έξω θα συγκρουστούν επανειλημμένα με άλλα άτομα ή με ελεύθερα ηλεκτρόνια, παίρνοντας ή χάνοντας ενέργεια κατά περίπτωση, οπότε και η συχνότητά τους θα υφίσταται αλληπάλληλες μεταβολές, ώστε κατά την έξοδο από το σώμα να έχει χαθεί κάθε μνήμη της αρχικής τιμής της. Οι συχνότητες των φωτονίων που τελικά εκπέμπονται θα έχουν προσδιοριστεί από τις συγκρούσεις τους με τα άτομα του σώματος, των οποίων οι ταχύτητες έχουν επίσης την κατανομή που επιβάλλει η αρχή της μέγιστης αταξίας για τη δεδομένη θερμοκρασία του σώματος. Και το αποτέλεσμα αυτής της συνεχούς αλληλεπίδρασης ύλης και φωτός είναι ότι αυτά τα δύο φυσικά συστήματα —η ύλη και το φως— έρχονται σε θερμική ισορροπία. Αποκτούν δηλαδή την ίδια θερμοκρασία, όπως ακριβώς και δύο χονδρά σώματα που έρχονται σε επαφή για όσο χρόνο απαιτείται. Αν το θέλετε και λίγο διαφορετικά, το θερμικό φως είναι ένα αέριο που αντί για άτομα ή μόρια έχει φωτόνια! Είναι ένα φωτονικό αέριο, και μάλιστα πολύ πιο κοντά στο ιδανικό αέριο, αφού τα φωτόνια δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αλληλεπιδρούν με την ύλη και, γι' αυτό εξάλλου δεν μπορούν να θερμοποιηθούν από μόνα τους παρά μόνο μέσω της ύλης.

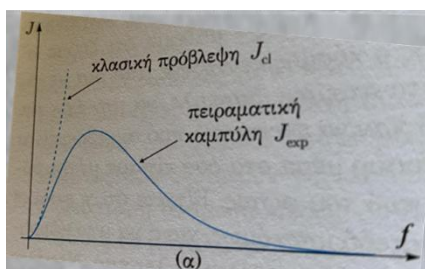
Γιατί μέλαν σώμα;

ΝΕΦΕΛΗ: Οπότε, αναγκαία συνθήκη για τη «θερμοποίηση», όπως τη λέτε, είναι να υπάρχει έντονη και επαναλαμβανόμενη αλληλεπίδραση ανάμεσα στο φως και την ύλη που το παράγει. Το φως να «νταλαβεριαστεί» πολύ μαζί της προτού καταφέρει να φτάσει στην επιφάνεια του σώματος και διαφύγει στα περίξ. Αυτό όμως

αρχίζει να μου θυμίζει λίγο τον ορισμό του μέλανος σώματος. Του οποίου η ύλη αλληλεπιδρά τόσο πολύ με το φως που πέφτει πάνω του, ώστε σχεδόν το παγιδεύει μέσα του. Το υποχρεώνει να «νταλαβεριστεί» πολύ μαζί του, όπως ακριβώς θέλουμε κι εμείς, ώστε να συντελεστεί η διαδικασία της θερμοποίησης και όταν επανεκπεμφθεί να μην είναι πια ορατό φως αλλά υπέρυθρο, δηλαδή λίγη ζέστη! Οπότε, βέβαια, το σώμα μαύρο θα φαίνεται, αφού το ορατό φως που του στείλαμε μας το επέστρεψε ως αόρατη θερμική ακτινοβολία. Δεν το φανταζόμουν ότι θα ήταν τόσο απλό!

Γιατί υπεριώδης κατάρρευση.

Η κλασσική θεώρηση δίνει το διάγραμμα



Πέρα από το ότι αν ίσχυε η κλασσική θεώρηση η ακτινοβολία που θα εξέπεμπε ένα θερμαινόμενο σώμα θα ήταν άπειρη (ίση με το εμβαδόν στο διάγραμμα), τα πολύ μικρά μήκη κύματος (μεγάλες συχνότητες) θα μετέφεραν και μεγάλα ποσά ενέργειας:

να πούμε ότι η πηγή διαθέσιμης ενέργειας για τον σχηματισμό των κβάντων είναι οι θερμικές κρούσεις, οι οποίες όμως έχουν μια μέση κινητική ενέργεια που είναι —ακόμα και σε θερμοκρασία πυρωμένου κάρβουνου— πολλές δεκάδες χιλιάδες φορές μικρότερη από την ενέργεια ενός κβάντου ακτίνων X. Να θυμίσουμε, με την ευκαιρία, το γνωστό από τη σχολική φυσική, ότι η μέση κινητική ενέργεια ενός μορίου σ' ένα ιδανικό αέριο θερμοκρασίας $(3/2)kT$ όπου k η λεγόμενη σταθερά του Μπόλτςμαν. Στην πράξη, έχει επικρατήσει να θεωρείται μέτρο της θερμικής κινητικής ενέργειας σε θερμοκρασία T kT χωρίς το $3/2$, του οποίου η τιμή σε θερμοκρασία δωματίου —δηλαδή $T=300$ είναι ίση με $1/40$ του ηλεκτρονιοβόλτ. Οπότε, σε θερμοκρασία πυρακτωμένου κάρβουνου —ας πούμε, για $T=900$ το γινόμενο kT θα είναι τρεις φορές η παραπάνω τιμή, δηλαδή $1/13$ του eV . Πράγματι, ασήμαντη ενέργεια συγκριτικά με τα πολλές χιλιάδες eV ενός φωτονίου ακτίνων X. Δεν χρειάζεται λοιπόν να ανησυχούμε, όταν καθόμαστε κοντά σ' ένα αναμμένο τζάκι, ότι θα εκτεθούμε σ' έναν καταιγισμό ακτίνων X και ακτίνων γ , όπως μας «υπόσχεται» η κλασσική φυσική. Όχι, τα κβάντα αυτών των ακτίνων έχουν τόσο μεγάλη ενέργεια, ώστε η παραγωγή τους στο εσωτερικό ενός πυρακτωμένου κάρβουνου είναι αδύνατη. Χάρη στη **κβάντωση**, η σταδιακή δημιουργία αυτών των κβάντων δεν είναι επιτρεπτή, και η «διά μιας» [sic] δημιουργία τους είναι επίσης αδύνατη με τις διαθέσιμες θερμικές ενέργειες στη δεδομένη θερμοκρασία. Για τα κβάντα υψηλής συχνότητας, λοιπόν, ο «κόφτης του Ορέστη» δουλεύει άψογα και πράγματι «σώζει» τη φυσική —και τους φυσικούς!— από όλα τα κακά και ανάποδα που περιγράψαμε προηγουμένως.

Ρώτησα την T.N.

«δηλαδή μπορούμε να μιλάμε για ένα "αέριο φωτονίων" μπορούμε να έχουμε ισορροπία μεταξύ του "αερίου" αυτού και της ύλης θερμοκρασίας π.χ. 1000K, όπως έχουμε θερμική ισορροπία όταν έχουμε δύο σώματα διαφορετικής θερμοκρασίας, όταν τα φέρνουμε σε επαφή».

Η απάντηση της deepseek:

Πολύ καλή και βαθιά ερώτηση! Η απάντηση είναι **ναι, αλλά με μια πολύ σημαντική διακριτική έννοια.**

Μπορούμε να μιλάμε για "αέριο φωτονίων" και για **Θερμική Ισορροπία** μεταξύ αυτού του αερίου φωτονίων και της ύλης. Αυτό ακριβώς περιγράφει η φαινόμενο της **Ακτινοβολίας Μέλανος Σώματος**.

Ας το δούμε βήμα-βήμα:

- **1. Το "Αέριο Φωτονίων"**

Ναι, τα φωτόνια μπορούν να θεωρηθούν ως ένα αέριο (κβαντικό αέριο μποζονίων). Σε αντίθεση με ένα αέριο ηλίου, τα φωτόνια:

- Δεν έχουν μάζα ηρεμίας.
- Μπορούν να δημιουργούνται και να καταστρέφονται (π.χ., όταν ένα άτομο απορροφά ή εκπέμπει φωτόνιο).
- Υπακούουν στη στατιστική Bose-Einstein.

- **2. Η Θερμική Ισορροπία Φωτονίων-Υλης**

Η βασική σκέψη σας είναι σωστή. Φανταστείτε μια κοιλότητα (cavity) της οποίας οι τοίχοι είναι σε θερμοκρασία $T = 1000 \text{ K}$.

1. Οι τοίχοι (η ύλη) είναι γεμάτοι ηλεκτρόνια και άτομα που ταλαντώνονται λόγω της θερμότητας.
2. Αυτές οι ταλαντώσεις προκαλούν την εκπομπή φωτονίων.
3. Τα φωτόνια ταξιδεύουν στην κοιλότητα και απορροφώνται από τους τοίχους.
4. **Σε θερμική ισορροπία**, ο ρυθμός εκπομπής και ο ρυθμός απορρόφησης είναι ίσοι. Το "αέριο" των φωτονίων μέσα στην κοιλότητα έχει έρθει **σε ισορροπία με τους τοίχους**.

Αυτό είναι το **Φαινόμενο του Μέλανος Σώματος**. Το φάσμα (η κατανομή των μηκών κύματος) των φωτονίων μέσα σε αυτή την κοιλότητα είναι ακριβώς αυτό που περιγράφεται από τον **νόμο του Planck**.

- **3. Η Σημαντική Διακριτική Έννοια: Θερμοκρασία vs. Ενταση**

Εδώ είναι η λεπτή διαφορά:

- **Δύο σώματα με διαφορετική θερμοκρασία:** Όταν τα βάλετε σε επαφή, η θερμότητα (δηλαδή η εσωτερική ενέργεια) ρέει από το πιο θερμό στο πιο ψυχρό, μέχρι να εξισωθούν οι **θερμοκρασίες τους**.
- **Υλη και αέριο φωτονίων σε ισορροπία:** Σε αυτή την περίπτωση, η "θερμοκρασία" που αναφέρουμε (π.χ., 1000 K) είναι **ιδιότητα της ύλης (των τοίχων)**. Το αέριο των φωτονίων **δεν έχει "θερμοκρασία" με την κλασική έννοια** (όπως την κατανοούμε για τα μόρια του αέρα), αλλά έχει ένα **φασματικό προφίλ που ορίζεται πλήρως από τη θερμοκρασία της ύλης με την οποία βρίσκεται σε**

ισορροπία.

Με άλλα λόγια, η πυκνότητα ενέργειας και η κατανομή των μηκών κύματος του φωτός στην κοιλότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας T των τοίχων: $U(\lambda, T)$. Λέμε λοιπόν ότι "το φως έχει θερμοκρασία 1000 K" ως συντόμευση για να πούμε ότι "αυτό το φως είναι το φάσμα μέλανος σώματος που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία πηγής 1000 K".

- **4. Η "Πίεση" του Αερίου Φωτονίων**

Για να δούμε πόσο "πραγματικό" είναι αυτό το αέριο, μπορούμε να σκεφτούμε και την **πίεση ακτινοβολίας**. Ένα αέριο φωτονίων σε θερμική ισορροπία σε θερμοκρασία T ασκεί μια πραγματική, μετρήσιμη πίεση στους τοίχους της κοιλότητας. Αυτή η πίεση δίνεται από τον τύπο: $P = (4\sigma / 3c) T^4$ (όπου σ η σταθερά Stefan-Boltzmann και c η ταχύτητα του φωτός).

- **Συμπέρασμα**

Ναι, έχει νόημα και είναι θεμελιώδες φαινόμενο.

Όταν λέμε "φως σε θερμοκρασία 1000 K", εννοούμε το **φάσμα θερμικής ισορροπίας** που προκύπτει όταν ένα αέριο φωτονίων βρίσκεται σε πλήρη θερμική ισορροπία με ύλη στους 1000 K. Αυτό το φαινόμενο είναι η βάση της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος και είναι απόλυτα συνεπές με τη θερμοδυναμική.

Η διαφορά από τη ροή θερμότητας μεταξύ δύο σωμάτων είναι λεπτή: Εδώ, το σύστημα (ύλη + φωτόνια) έχει μια ενιαία θερμοκρασία T , και η ιδιότητα του φωτός είναι συνέπεια αυτής της ισορροπίας.

Ισχύει η ΑΔΟ στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο;

ΔΑΣΚΑΛΟΣ: Γίνεται επειδή το ηλεκτρόνιο δεν είναι ελεύθερο αλλά ισχυρά προσδεδεμένο σ' ένα άτομο ή σ' ένα μέταλλο, οπότε το φωτόνιο και το ηλεκτρόνιο δεν αποτελούν απομονωμένο σύστημα ώστε να εφαρμόσουμε σ' αυτό την ΑΔΟ ή την ΑΔΕ, όπως σε μια σύγκρουση κλασικού τύπου. Γι' αυτό και η φωτοηλεκτρική εξίσωση του Αϊνστάιν, στην οποία αναφέρθηκες πριν, δεν προκύπτει με εφαρμογή της ΑΔΕ στο απομονωμένο σύστημα ηλεκτρόνιο+φωτόνιο (αυτό ήταν το λάθος σου), αλλά περιλαμβάνει και το ελκτικό πεδίο του μετάλλου για την υπερνίκηση του οποίου δαπανάται το έργο εξαγωγής ϕ .

Δάσκαλος: Γίνεται επειδή το ηλεκτρόνιο δεν είναι ελεύθερο αλλά ισχυρά προσδεδεμένο σ' ένα άτομο ή σ' ένα μέταλλο, οπότε το φωτόνιο και το ηλεκτρόνιο δεν αποτελούν απομονωμένο σύστημα ώστε να εφαρμόσουμε σ' αυτό την ΑΔΟ ή την ΑΔΕ, όπως σε μια σύγκρουση κλασικού τύπου. Γι' αυτό και η φωτοηλεκτρική

εξίσωση του Αϊνστάιν, στην οποία αναφέρθηκες πριν, δεν προκύπτει με εφαρμογή της ΑΔΕ στο απομονωμένο σύστημα ηλεκτρονίου–φωτονίου (αυτό ήταν το λάθος σου), αλλά περιλαμβάνει και το ελκτικό πεδίο του μετάλλου για την υπερνίκηση του οποίου δαπανάται το έργο εξαγωγής φ.

Αλληλεπίδραση ηλεκτρονίου με και ηλεκτρικό πεδίο:

Και ο λόγος είναι ότι χρειαζόμαστε και την κβαντική θεωρία του ίδιου του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, στο πλαίσιο της οποίας η ίδια η έννοια της δράσης ενός ηλεκτρικού πεδίου πάνω σ' ένα φορτισμένο σωματίδιο αλλάζει ριζικά.

Φαινόμενο Compton

ΝΕΦΕΛΗ: Όμως, δάσκαλε, εγώ θα ήθελα να δω πρώτα και κάποιου είδους απόδειξη της σχέσης $p=h/\lambda$ που τόσο «πονηρά» την... ξετρώπωσε ο Ορέστης. Είναι δυνατό κάτι τέτοιο;

ΔΑΣΚΑΛΟΣ: Βεβαίως, Νεφέλη. Και η βασική ιδέα είναι πολύ απλή. Αφού το φωτεινό κβάντο —το φωτόνιο, όπως θα το λέμε από δω και πέρα— έχει ενέργεια $E=hf$, σύμφωνα με τον Πλανκ, υποχρεούται να έχει και μια ισοδύναμη μάζα μ , σύμφωνα με τη σχέση ισοδυναμίας μάζας-ενέργειας, $E=mc^2$, του Αϊνστάιν. Όσο για την ορμή του φωτονίου, είναι εύλογο να την ορίσουμε όπως στον κλασικό τύπο $p=mv$, αλλά με $m=\mu$ και $v=c$, αφού το φωτόνιο κινείται με την ταχύτητα —τίνος άλλου;— του φωτός. Βάζοντας όλα αυτά μαζί, θα έχουμε:

$$hf = \mu c^2 \Rightarrow \mu = \frac{hf}{c^2}$$

$$p = \mu \cdot c = \frac{hf}{c^2} \cdot c = \frac{hf}{c} = \frac{hf}{\lambda f} = \frac{h}{\lambda}$$

«...υψηλών ενεργειών — από δεκάδες χιλιάδες eV έως εκατομμύρια eV. Οπότε μπορούμε, υποθέτω, να εικάσουμε ότι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο θα έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να συμβεί για φωτόνια χαμηλών ενεργειών, ενώ το φαινόμενο Κόμπτον θα είναι πολύ πιθανότερο με φωτόνια υψηλών ενεργειών. Είναι σωστό αυτό, δάσκαλε;

ΔΑΣΚΑΛΟΣ: Είναι και δεν είναι, Νεφέλη. Διότι υπάρχει και φωτοηλεκτρικό φαινόμενο υψηλών ενεργειών. Παραδείγματος χάριν, ακτίνες X που πέφτουν πάνω σε άτομα ενός βαρέος στοιχείου και αποσπούν όχι ηλεκτρόνια της εξωτερικής του στιβάδας —τα οποία απαιτούν μόλις λίγα eV—, αλλά ηλεκτρόνια των πολύ εσωτερικών στιβάδων του για τα οποία το έργο εξαγωγής μπορεί να είναι μέχρι και πολλές χιλιάδες eV. Αν αυτό σας σοκάρει, να πούμε ότι, για τα ηλεκτρόνια της βασικής στάθμης ενός βαρέος ατόμου με ατομικό αριθμό Z

για την απόσπαση ενός απ' αυτά είναι, πολύ χονδρικά, $Z^2 \cdot 13,6 \text{ eV}$, όπου $13,6 \text{ eV}$ είναι η τιμή αυτού του έργου για το άτομο του υδρογόνου, δηλαδή για $Z = 1$. Επομένως, για ένα στοιχείο όπως ο χρυσός με $Z = 79$, το έργο για το οποίο συζητάμε θα είναι $(79)^2 \cdot 13,6 = 84.877,6 \text{ eV}$, δηλαδή της τάξης των δεκάδων χιλιάδων ηλεκτρονιοβόλτ! Και το ερώτημα

τότε είναι μη τετριμμένο. Τι είναι πιθανότερο να κάνουν τα φωτόνια των ακτίνων Χ όταν πέσουν πάνω σ' ένα τέτοιο άτομο; Να προκαλέσουν φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ή μήπως φαινόμενο Κόμπτον; Και στην περίπτωση που συμβεί το πρώτο, ποια ατομικά ηλεκτρόνια έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να αποσπαστούν; Τα εσωτερικά ή τα εξωτερικά; Ε, λοιπόν, η απάντηση είναι μάλλον απροσδόκητη. Μεγαλύτερη πιθανότητα να αποσπαστούν έχουν τα εσωτερικά ηλεκτρόνια για έναν πολύ απλό λόγο. Ότι τα κρατάει σφιχτά ο πυρήνας, οπότε η προσπίπτουσα ακτινοβολία έχει περισσότερο χρόνο στη διάθεσή της να δράσει πάνω τους και να τους μεταφέρει την ενέργεια των φωτονίων της πριν αυτά φύγουν μακριά. Κι αν διερωτάστε πώς το ξέρουμε αυτό, να πούμε αμέσως ότι προκύπτει από φυσική ανάλυση του κβαντομηχανικού υπολογισμού των σχετικών πιθανοτήτων.

Εξημερώνοντας το ...άγριο φως:

ΔΑΣΚΑΛΟΣ: Πράγματι ζητάτε πολλά, αλλά... πέσατε μέσα! Το φαινόμενο Κόμπτον εμπλέκεται με τρόπο καίριο σε έναν βασικό κρίκο στην αλυσίδα των προϋποθέσεων που κάνουν δυνατή την ύπαρξη της ζωής στο σύμπαν. Και για να μην σας κρατήσω άλλο σε αγωνία, να πω αμέσως ότι ο κρίκος αυτός μπορεί να περιγραφεί με την κωδική φράση: «Εξημερώνοντας το... άγριο φως». Το «άγριο φως» είναι κατ' αρχάς το τεράστιο πλήθος φωτονίων ακτίνων γ, τα οποία παράγονται σε αφθονία από τις πυρηνικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στον υπέρθερμο (περίπου δέκα εκατομμύρια βαθμοί) πυρήνα κάθε ζωντανού άστρου όπως ο ήλιος μας. Αλίμονο όμως αν αυτό το «άγριο φως» —άγριο με την έννοια ότι είναι φως-δολοφόνος για την έμβια ύλη και όχι μόνο— έφτανε σ' αυτή τη μορφή μέχρι την επιφάνεια του άστρου κι εκτοξευόταν στα πέριξ. Ακόμη κι αν υπήρχαν πλανήτες σ' έναν τέτοιο κόσμο, η ένταση της ακτινοβολίας γ στην επιφάνειά τους θα ήταν ασυμβίβαστη όχι απλώς με τη ζωή, αλλά και με την ίδια την ύπαρξη ύλης σε ατομική ή σε μοριακή μορφή. Διότι, όπως ήδη ξέρουμε, τα φωτόνια των ακτίνων γ έχουν ενέργειες της τάξης των MeV —των εκατομμυρίων ηλεκτρονιοβόλτ—, ικανές όχι απλώς να διαλύσουν τα άτομα στα ηλεκτρόνια και στους πυρήνες τους, αλλά να διασπάσουν και τους ίδιους τους πυρήνες. Αλίμονο λοιπόν αν το «άγριο φως» που παράγεται στο εσωτερικό των άστρων έφτανε «ανεξήμερωτο» στην επιφάνειά του και διέφευγε στο Διάστημα. Κάποιος πρέπει να το «εξημερώσει» —δηλαδή να μειώσει την ενέργεια των φωτονίων του—, ώστε όταν πλέον εκπέμπεται από την επιφάνεια του άστρου να είναι πράγματι ένα «εξημερωμένο» —δηλαδή βιολογικά κατάλληλο— φως. Οι ενέργειες των φωτονίων του να είναι λίγο πιο χαμηλά από το κατώφλι των χημικών αντιδράσεων, ώστε αυτά να έχουν μεν αρκετή ενέργεια για να κάνουν χρήσιμο βιολογικό έργο, όχι όμως ικανή να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις οι οποίες θα διασπούσαν ξανά τα πολύτιμα βιολογικά μόρια που με τόσο κόπο είχαν σχηματιστεί στην αρχέγονη ατμόσφαιρα ενός κατάλληλου πλανήτη.

ΝΕΦΕΛΗ: Λέτε λοιπόν, δάσκαλε —επιτρέψτε μου να συνεχίσω τον συλλογισμό σας—, ότι την εξημέρωση αυτού του άγριου φωτός την έκανε η σκέδαση Κόμπτον των φωτονίων γ πάνω στα ηλεκτρόνια που κυκλοφορούν σχεδόν ελεύθερα στο εσωτερικό του άστρου, αφού οι τεράστιες θερμοκρασίες που επικρατούν εκεί (γύρω στα δέκα εκατομμύρια βαθμούς, όπως είπατε) σίγουρα θα...

-
- Σύντομη επεξηγηματική σημείωση:

Το κείμενο περιγράφει τη διαδικασία κατά την οποία τα υψηλής ενέργειας φωτόνια (ακτίνες γ) που γεννιούνται στον πυρήνα του Ήλιου συγκρούονται αλληπάλλληλα με ελεύθερα ηλεκτρόνια. Σε κάθε σύγκρουση (σκέδαση Κόμπτον), το φωτόνιο χάνει ένα μέρος της ενέργειάς του. Μετά από εκατομμύρια τέτοιες συγκρούσεις και χιλιάδες χρόνια ταξιδιού προς την επιφάνεια, τα φωτόνια «υποβιβάζονται» σε ορατό φως και υπέρυθρη ακτινοβολία, καθιστώντας τα πλέον ασφαλή για τη ζωή.

Το ηλεκτρόνιο σε μεγάλη ακτίνα

Άσκηση 5.3. Σας γεννάται κάποια στιγμή η εξής απορία: «Μα, καλά, αφού τα ηλεκτρόνια είναι μικροσκοπικά σωματίδια —κι αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο δεν μπορούν να κινηθούν πάνω στις τροχιές που τους λέει ο Μπορ στο άτομο του υδρογόνου— τότε πώς γίνεται και κινούνται πάνω σε κυκλικές τροχιές, ας πούμε όταν εισέρχονται σ' ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο κάθετα στις δυναμικές γραμμές του;»

Για να σκεφτείτε πάνω σ' αυτό το ερώτημα, υποθέστε ότι μιλάμε για ένα κύκλοτρον —εκείνα τα «αρχαία» της δεκαετίας του 1950—, και σας λέει κάποιος ότι, υπό την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, το ηλεκτρόνιο σ' ένα τέτοιο μηχάνημα εκτελεί κυκλική κίνηση με ακτίνα 10 m, και ότι η ταχύτητα περιφοράς του είναι περίπου το ένα εκατοστό της ταχύτητας του φωτός. Είναι άραγε συμβατή η ύπαρξη μιας τέτοιας τροχιάς με την αρχή της αβεβαιότητας ή μήπως πρόκειται για... αστικό μύθο;

Υπόδειξη: Σκεφτείτε ότι το μέγεθος της τροχιάς επιτρέπει τώρα να είμαστε πιο χαλαροί ως προς την ακρίβεια Δs που απαιτούμε στον προσδιορισμό της θέσης του ηλεκτρονίου πάνω στην τροχιά του, αν πράγματι αυτή υπάρχει.

Λύση: Χάρη στην υπόδειξη, η άσκηση είναι τελικά πολύ απλή. Διότι για ένα ηλεκτρόνιο που κινείται πάνω σ' ένα κύκλο ακτίνας 10 m (και με περίμετρο λίγο πάνω από 60 m) το να γνωρίζεις τη θέση του με ακρίβεια ενός χιλιοστού σου φτάνει και σου... περισσεύει! Κι αν θεωρείτε ότι είμαστε πολύ χαλαροί, ας την κάνουμε ένα δέκατο του χιλιοστού. Δηλαδή $\Delta s \approx 10^{-4}$ m.

Με αυτά τα δεδομένα θα έχουμε

$$\Delta v \sim \frac{\hbar}{m \cdot \Delta s} \approx \frac{10^{-34}}{10^{-30} \times 10^{-4}} = 1 \text{ m/s}.$$

Μεγάλη αβεβαιότητα, ίσως θα σκεφτείτε. Συγκρινόμενη όμως με τη δοθείσα ταχύτητα περιφοράς του ηλεκτρονίου

$$v = \frac{c}{100} = \frac{3 \times 10^8}{100} = 3 \times 10^6 \text{ m/s},$$

είναι μια αβεβαιότητα της τάξης του ένα στα τρία εκατομμύρια! Με το τραπεζικό ανάλογο να είναι τώρα το εξής: Να έχεις 3 εκατομμύρια ευρώ στον λογαριασμό σου με αβεβαιότητα μισό ευρώ προς τα πάνω ή μισό ευρώ προς τα κάτω!!! Μάλλον μπορείς να ζήσεις μ' αυτή τη φριχτή απροσδιοριστία στα οικονομικά σου!

Οπότε το συμπέρασμα για το ηλεκτρόνιο στο κύκλοτρό μας είναι σαφές. Παρότι μικροσκοπικό σωματίδιο, δεν έχει κανένα πρόβλημα να κινηθεί πάνω σε μια τροχιά μακροσκοπικών διαστάσεων. Η αρχή της αβεβαιότητας δεν το απαγορεύει. Η κλασική φυσική εφαρμόζεται άνετα και σε μικροσκοπικά σωματίδια που κινούνται σε μακροσκοπικές τροχιές. Πρόβλημα υπάρχει μόνο όταν τα μικροσκοπικά σωματίδια καλούνται να κινηθούν σε τροχιές μικροσκοπικής κλίμακας. Τότε η έννοια της τροχιάς καταρρέει και τα σωματίδια πρέπει να περιγραφούν ως «κβαντικά κύματα». Δηλαδή ως κύματα πιθανότητας, που μας λένε πόσο πιθανό είναι να βρούμε το σωματίδιο εδώ ή εκεί.

τεράστια διαφορά απόδοσης μεταξύ πυρηνικής και χημικής ενέργειας:

ΔΑΣΚΑΛΟΣ: «Επομένως, χάρη στην αρχή της αβεβαιότητας, ο πυρήνας κλείνει τεράστια ποσά ενέργειας, και μόνο όταν το καταλάβουμε μπορέσαμε να εξηγήσουμε και το μεγάλο μυστήριο της ηλιακής ενέργειας. Που λέει, με απλά λόγια, τούτο: Ότι αν ο ήλιος έκαιγε χημικά καύσιμα —π.χ. άνθρακα—, τότε, με τον ρυθμό με τον οποίο εκπέμπει ενέργεια στο Διάστημα, θα ζούσε —το πολύ— γύρω στις χιλιάδες χρόνια. Ενώ έχει ήδη ζήσει κοντά στα πέντε δισεκατομμύρια χρόνια και προβλέπεται να ζήσει άλλα τόσα! Και ο μόνος τρόπος να το έχει καταφέρει αυτό είναι να χρησιμοποιεί μια πηγή ενέργειας κάπου ένα εκατομμύριο φορές πιο αποδοτική απ' ό,τι είναι οι χημικές αντιδράσεις, όπου η εκλυόμενη ενέργεια είναι καθαρά ηλεκτρομαγνητικής έλευσης: Οφείλεται στις μετακινήσεις ηλεκτρονίων από άτομο σε άτομο, οπότε το μέγεθός της —δηλαδή το μέγεθος της ενέργειας που εκλύει μια τυπική χημική αντίδραση— καθορίζεται χονδρικά από το επίπεδο της ενέργειας που έχουν τα εξωτερικά ηλεκτρόνια σ' ένα άτομο. (Διότι, βεβαίως, τα εξωτερικά ηλεκτρόνια είναι αυτά που συμμετέχουν στη χημική... ζωή —δηλαδή στους χημικούς δεσμούς— του ατόμου.)

Νεφέλη, χρεώνεσαι τώρα και με μια άλλη άσκηση. Να μας δείξεις ότι η κινητική ενέργεια ενός νουκλεονίου στον πυρήνα είναι κάπου λίγα εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από την κινητική ενέργεια ενός εξωτερικού ηλεκτρονίου σ' ένα άτομο που, αν θέλεις, μπορείς να υποθέσεις ότι είναι το άτομο του υδρογόνου, χωρίς απώλεια γενικότητας, όπως θα καταλάβεις και μόνη σου αν σκεφτείς ως εξής: Τα ηλεκτρόνια των συμπληρωμένων εσωτερικών στιβάδων εξουδετερώνουν το μεγαλύτερο μέρος του θετικού πυρηνικού φορτίου, οπότε τα εξωτερικά ηλεκτρόνια υπόκεινται σε μειωμένη πυρηνική έλξη, και επομένως κινούνται πάνω σε τροχιακά συγκρίσιμου μεγέθους με εκείνο του υδρογόνου...»

• Βασικά Σημεία της Σελίδας:

- **Πυρηνική vs Χημική Ενέργεια:** Η πυρηνική ενέργεια (που βασίζεται στις δυνάμεις εντός του πυρήνα) είναι περίπου **1.000.000 φορές** πιο αποδοτική από τη χημική ενέργεια (που βασίζεται στις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις των εξωτερικών ηλεκτρονίων).

- **Ηλικία του Ήλιου:** Αν ο Ήλιος βασιζόταν σε χημική καύση (όπως ο άνθρακας), θα είχε σβήσει μέσα σε λίγες χιλιάδες χρόνια. Χάρη στην πυρηνική ενέργεια, ζει ήδη 5 δισεκατομμύρια χρόνια.
- **Εξωτερικά Ηλεκτρόνια:** Αυτά είναι υπεύθυνα για τη «χημική ζωή» και τους δεσμούς των ατόμων, αλλά οι ενέργειές τους είναι πολύ μικρότερες από αυτές των σωματιδίων του πυρήνα (νουκλεόνια).

Το άτομο.

«...επιτρέπουν να το πούμε αυτό τα σημερινά πειράματα—, τότε το μόνο μέρος του ατόμου όπου η ύλη πιάνει κάποιον όγκο είναι ο πυρήνας, του οποίου η ακτίνα είναι όμως 10^5 φορές μικρότερη από την ακτίνα του ατόμου, και ο όγκος του $(10^5)^3 = 10^{15}$ φορές μικρότερος από τον ατομικό όγκο, αφού ο όγκος είναι ανάλογος με τον κύβο της ακτίνας! Έχει δίκιο λοιπόν ο Βομβιστής, όταν συμπεραίνει ότι το 99, 999...99% (13 εννιάρια μετά την υποδιαστολή και 15 εννιάρια συνολικά, όπως θα έπρεπε, αφού μιλάμε για ποσοστό επί τοις εκατό) του ατομικού όγκου είναι άδειος!

ΔΑΣΚΑΛΟΣ: Και πώς εξηγείς, Ορέστη, ότι αυτά τα... άδεια μπαλόνια, που είναι τα άτομα, όχι μόνο δεν καταρρέουν υπό την πίεση του βάρους μας, αλλά χρειάζονται πιέσεις της τάξης των πολλών χιλιάδων ατμοσφαιρών για να συμπιεστεί, έστω και ελάχιστα, ένα κομμάτι ύλης σε στερεά ή σε υγρή μορφή; Γιατί, βέβαια, αφού τα άτομα ή τα μόρια είναι πυκνοστιβαγμένα στην πυκνή ύλη, για να συμπίεσεις ένα κομμάτι της πρέπει να συμπίεσεις τα άτομα ή τα μόρια που το αποτελούν. Επομένως, το ασυμπίεστο της μακροσκοπικής πυκνής ύλης προέρχεται κατ' ευθείαν από το ασυμπίεστο των ατόμων της. Τι λες λοιπόν, Ορέστη, για το ασυμπίεστο των ατόμων;

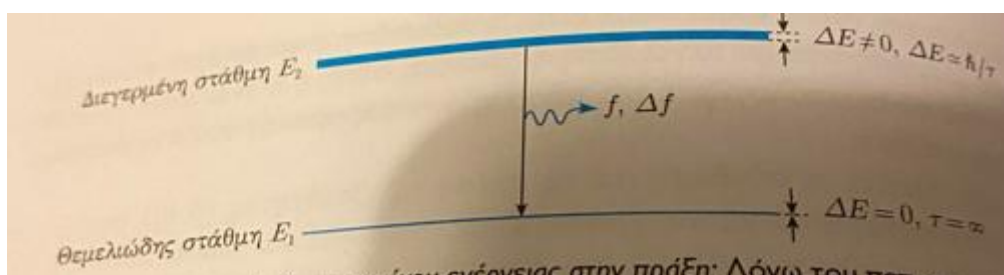
ΟΡΕΣΤΗΣ: Ότι είναι άμεση συνέπεια της αρχής της αβεβαιότητας, δάσκαλε. Διότι αν το ηλεκτρόνιο, υπό την επίδραση μιας μεγάλης εξωτερικής πίεσης, «στριμωχτεί» πιο κοντά στον πυρήνα, τότε θα μικρύνει η αβεβαιότητα στη θέση του και άρα θα μεγαλώσει η αβεβαιότητα στην ορμή του, επομένως και το μέτρο της ορμής του κατά μέσον όρο, όπως και η κινητική του ενέργεια. Το «στρίμωγμα» του ηλεκτρονίου σε μικρότερο χώρο γύρω από τον πυρήνα θα το κάνει λοιπόν να «αγριέψει» —δηλαδή η κίνησή του να γίνει πιο «βίαιη»— και έτσι θα εξισορροπήσει αμέσως την εξωτερική πίεση. Με τον ίδιο τρόπο που η αύξηση της θερμοκρασίας σ' ένα αέριο κάνει πιο «ζωηρά» τα μόριά του και επομένως πιο ικανά να αντιστέκονται στην εξωτερική πίεση.

ΔΑΣΚΑΛΟΣ: Μόνο που στην περίπτωση μας —αυτό μας είπες— δεν είναι η αύξηση της θερμοκρασίας αυτή που κάνει τα ηλεκτρόνια να «ζωηρεύουν», αλλά το «στρίμωγμά» τους σε μικρότερο χώρο, σε μικρότερο «σπίτι». Είναι η «ψυχρή θερμότητα», όπως το έλεγε ένας δάσκαλός μου.

ΟΡΕΣΤΗΣ: Οπότε, δάσκαλε, θα μπορούσαμε να δούμε την αρχή της αβεβαιότητας και ως την «αντίδραση στο στρίμωγμα»! Αν, παραδείγματος χάριν, τα ηλεκτρόνια είχαν φωνή, το σύνθημά τους θα ήταν: «Μη με στριμώχνετε!» Μάλιστα, καθώς το σκέφτομαι τώρα, η αντίδραση στο στρίμωγμα —ή η αντίδραση στον εντοπισμό ή τη φυλάκιση, όπως είδα να λέγεται στον Βομβιστή— είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η μάζα του σωματιδίου που στριμώχνεται. Και τούτο βεβαίως διότι η μάζα του σωματιδίου μπαίνει στον παρονομαστή του...»

- **Κεντρική Ιδέα: Το «Στριμώγμα» και η Ύλη**
 - **Ο «Άδειος» Χώρος:** Το άτομο είναι κατά 99,99...% κενό, αφού ο πυρήνας είναι 100.000 φορές μικρότερος από το ίδιο το άτομο.
 - **Γιατί δεν καταρρέουμε;** Η ύλη δεν συμπιέζεται εύκολα γιατί τα ηλεκτρόνια υπακούουν στην **Αρχή της Αβεβαιότητας**.
 - **Η Αντίδραση:** Όταν προσπαθούμε να περιορίσουμε («στριμώξουμε») ένα ηλεκτρόνιο σε μικρότερο χώρο ($\Delta x \downarrow$), η ορμή του και η ενέργειά του αναγκαστικά αυξάνονται ($\Delta p \uparrow$). Αυτή η «βίαιη» κίνηση δημιουργεί μια εσωτερική πίεση (την «ψυχρή θερμότητα») που ανθίσταται στην εξωτερική πίεση.

Αβεβαιότητα χρόνου – ενέργειας:



ΣΧΗΜΑ 5.2: Η αρχή της αβεβαιότητας χρόνου-ενέργειας στην πράξη: Λόγω του πεπερασμένου χρόνου παραμονής του ηλεκτρονίου σε μια διεγερμένη στάθμη, αυτή υφίσταται μια διαπλάτυνση ΔE η οποία συνδέεται με τον αντίστοιχο χρόνο ζωής τ μέσω της σχέσης $\Delta E \approx \hbar/\tau$. Αντίθετα, η θεμελιώδης στάθμη είναι μια μαθηματική γραμμή — δηλαδή με μηδενική διαπλάτυνση—, εφόσον γι' αυτήν ο χρόνος ζωής είναι άπειρος, άρα $\Delta E = 0$. Αφού όμως υπάρχει ένα «παίξιμο» ΔE στην ενέργεια της διεγερμένης στάθμης E_2 , θα «παίζει» επίσης κατά το ίδιο ποσό και η ενεργειακή της διαφορά $E_2 - E_1$ με τη θεμελιώδη, άρα και η ενέργεια $\epsilon = E_2 - E_1$ του εκπεμπόμενου φωτονίου. Και το «παίξιμο» αυτό θα μεταφέρεται τελικά στη συχνότητα f αυτού του φωτονίου, αφού είναι:

$$\epsilon = hf \Rightarrow \Delta\epsilon = h\Delta f \Rightarrow \Delta f = \frac{\Delta\epsilon}{h} = \frac{\Delta E}{h} = \frac{\hbar/\tau}{h} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

Η αρχή της αβεβαιότητας χρόνου-ενέργειας αποτυπώνεται λοιπόν με τον πιο αναμφίβολο τρόπο αρχικά στη διαπλάτυνση (broadening) των διεγερμένων σταθμών του ατόμου και τελικά στη διαπλάτυνση της συχνότητας των εκπεμπόμενων φωτονίων, άρα και των αντίστοιχων φασματικών γραμμών.

- Τι μας διδάσκει αυτή η σελίδα;

- **Η Αβεβαιότητα στην Ενέργεια:** Μας λέει ότι η ενέργεια μιας διεγερμένης στάθμης δεν είναι μια «καθαρή» τιμή, αλλά έχει ένα εύρος ΔE .
- **Ο Ρόλος του Χρόνου:** Όσο πιο γρήγορα «πέφτει» ένα ηλεκτρόνιο από μια στάθμη (μικρό τ), τόσο μεγαλύτερη είναι η αβεβαιότητα στην ενέργειά του ΔE .
- **Η Θεμελιώδης Στάθμη:** Επειδή το ηλεκτρόνιο μπορεί να μείνει εκεί για πάντα (άπειρος χρόνος), η ενέργειά της είναι απόλυτα καθορισμένη $\Delta E = 0$.
- **Το «Παίξιμο» στα Χρώματα:** Αυτή η αβεβαιότητα μεταφέρεται στο φως που βλέπουμε. Οι φασματικές γραμμές που παρατηρούμε στα τηλεσκόπια δεν είναι τέλειες γραμμές, αλλά έχουν ένα μικρό πάχος λόγω αυτού ακριβώς του κβαντικού φαινομένου.

Αβεβαιότητα ορμής...

$$\text{«...είναι ο } (\Delta p)^2 = \overline{(p - \bar{p})^2}, \text{ (5.13)}$$

και μας λέει το εξής απλό: Για να βρεις το τετράγωνο της αβεβαιότητας, πάρε τις αποκλίσεις από τη μέση τιμή $\bar{p}$ των διαφόρων τιμών του στατιστικού μεγέθους p (δηλαδή τις διαφορές $p - \bar{p}$), τετράγωνισέ τις, αφού δεν μας ενδιαφέρει αν μια τιμή είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη μέση τιμή παρά μόνο πόσο απέχει απ' αυτήν, και πάρε μετά τον μέσο όρο αυτών των τετραγωνισμένων αποκλίσεων από τη μέση τιμή. Και η Δp η οποία, στη

μαθηματική στατιστική, ονομάζεται διασπορά ή τυπική απόκλιση και αποτελεί ένα καλό ποσοτικό μέτρο του πόσο διεσπαρμένες είναι οι δυνατές τιμές ενός στατιστικού μεγέθους γύρω από τη μέση του τιμή. Όλα τα παραπάνω είναι τελείως γενικά και ισχύουν για τυχόν στατιστικό μέγεθος εντός ή εκτός κβαντομηχανικής. Και απλώς χρησιμοποιήσαμε το σύμβολο p της ορμής, γιατί αυτή μας ενδιαφέρει και σ' αυτήν επιστρέφουμε αμέσως τώρα για να πούμε τούτο: Ότι στις περιπτώσεις που κυρίως μας απασχολούν εδώ —όπου τα σωματίδια μας εκτελούν δέσμια κίνηση σ' ένα άτομο ή σ' έναν πυρήνα— η μέση ορμή είναι υποχρεωτικά μηδέν, αφού το σωματίδιο πάει πέρα-δώθε στο «κελλί» του (συγχωρέστε μας την κλασική εικόνα) κι επομένως αν συχνά πάει προς τη μία κατεύθυνση άλλες τόσες θα

πηγαίνει προς την αντίθετη. Θα είναι επομένως $\bar{p} = 0$, οπότε η (5.13) θα καταλήγει στην

$$(\Delta p)^2 = \overline{p^2} \Rightarrow \Delta p = \sqrt{\overline{p^2}},$$

οπότε τα όσα έχουμε πει για το Δp —ότι είναι πρακτικά ίσο με...»

- **Τι εξηγεί αυτή η σελίδα;**
 - **Ορισμός Αβεβαιότητας:** Η κβαντική αβεβαιότητα δεν είναι ένα «λάθος» μέτρησης, αλλά ταυτίζεται με τη **στατιστική διασπορά** (standard deviation).
 - **Η Μέση Ορμή $\bar{p}$:** Σε σωματίδια που είναι «φυλακισμένα» (δέσμια) σε άτομα ή πυρήνες, η μέση

ορμή είναι μηδέν γιατί το σωματίδιο κινείται ισότιμα προς όλες τις κατευθύνσεις μέσα στον περιορισμένο χώρο του.

- **Υπολογισμός:** Λόγω του ότι $\bar{p}=0$, η αβεβαιότητα Δp ισούται απλώς με την ενεργό τιμή (root mean square) της ορμής.

Αυτή η σελίδα είναι το «κλειδί» για να καταλάβουμε γιατί μπορούμε να χρησιμοποιούμε την ορμή p και την αβεβαιότητα Δp ως περίπου ταυτόσημες έννοιες όταν μελετάμε το «στρίμωγμα» των ηλεκτρονίων.

Αρχή της αβεβαιότητας (Βομβιστής και στρατηγός):

Για να τις διακρίνει ένα μικρό σωματίδιο το μικροσκόπιο, πρέπει το μήκος κύματος να είναι μικρότερο —ή έστω συγκρίσιμο— με το μέγεθός τους.

Ας φανταστούμε λοιπόν ένα μικροσκόπιο που προσπαθεί να δει πού ακριβώς βρίσκεται ένα ηλεκτρόνιο —να μετρήσει τη θέση του, με άλλα λόγια— φωτίζοντάς το με κατάλληλο φως. Οπότε —σύμφωνα με τα προηγούμενα— το μήκος κύματος του φωτός που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι τόσο μικρό όσο και η ακρίβεια με την οποία θέλουμε να γνωρίζουμε τη θέση του ηλεκτρονίου. Αν η επιδιωκόμενη ακρίβεια είναι πολύ μεγάλη —δηλαδή με μικρό σφάλμα Δx —, τότε το μήκος κύματος λ της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι αντίστοιχα μικρό. Δηλαδή λ μικρότερο ή περίπου ίσο με Δx . Όμως, στον κβαντικό κόσμο στον οποίο έχουμε πλέον εγκατασταθεί, το φως δεν είναι πια ένα καθαρό κύμα αλλά έχει ταυτόχρονα και σωματιδιακή υπόσταση, και τα σωματίδια που το αποτελούν —τα πασίγνωστα πλέον φωτόνια— θα έχουν όχι μόνο μήκος κύματος αλλά και ορμή, και οι δύο αυτές ποσότητες συνδέονται με τη γνωστή σχέση $p = h/\lambda$. Οπότε το συμπέρασμα για τη δυνατότητα του μικροσκοπίου μας να μετρήσει με ακρίβεια τη θέση του ηλεκτρονίου είναι άμεσο. Όσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιδιώκουμε τόσο μικρότερο πρέπει να είναι το μήκος κύματος του φωτός που θα χρησιμοποιήσουμε κι επομένως τόσο μεγαλύτερη και η ορμή, $p = h/\lambda$, των φωτονίων του. Δεδομένου όμως ότι η ελάχιστη δυνατή επίδραση που μπορεί να ασκήσει η φωτεινή δέσμη του μικροσκοπίου πάνω στο παρατηρούμενο ηλεκτρόνιο είναι να το «χτυπήσει» ένα από τα φωτόνιά της, το αποτέλεσμα θα είναι να μεταφερθεί στο ηλεκτρόνιο ένα μεγάλο (αλλά όχι προβλέψιμο) μέρος της ορμής του φωτονίου. Έτσι, θα έχουμε μάθει μεν τη θέση του ηλεκτρονίου με μεγάλη ακρίβεια, θα έχουμε όμως προκαλέσει μια αντίστοιχα μεγάλη ανακρίβεια στη γνώση της ορμής τους.

Μόλις σας περιγράψαμε —έστω σε αδρές γραμμές— τη λειτουργία του περίφημου μικροσκοπίου Χάιζενμπεργκ και ίσως σας πείσαμε ότι η αρχή της αβεβαιότητας είναι μια αναπόδραστη συνέπεια της θεμελιώδους αρχής του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού της ύλης. Θα συμφιλιωθούμε όμως ακόμα περισσότερο με την αρχή της αβεβαιότητας και την άμεση σύνδεσή της με την κυματική φύση των σωματιδίων, αν δούμε ότι και οι συνέπειές της, που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, μπορούν να προκύψουν και με κατευθείαν εφαρμογή της αρχής του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού.

Η ιδέα είναι ξανά πολύ απλή. Όσο μικρότερο είναι ένα φυσικό σύστημα —π.χ. ο πυρήνας σε σχέση με το

άτομο— τόσο μικρότερα θα είναι και τα μήκη κύματος των σωματιδίων που είναι παγιδευμένα εκεί σχηματίζοντας κατάλληλα στάσιμα υλικά κύματα. Οπότε τόσο μεγαλύτερες θα είναι και οι ορμές —άρα και οι κινητικές ενέργειες— αυτών των σωματιδίων.

Αν αυτό δεν σας είναι σαφές, σκεφτείτε ένα κλασικό ανάλογο: Σε μια μικρή λίμνη τα κυματάκια που μπορείς να δημιουργήσεις δεν γίνεται να έχουν μήκος κύματος μεγαλύτερο από το μέγεθος της ίδιας της λιμνούλας. Μικρότερο ναι, μεγαλύτερο όχι. Η μικρότερη... λιμνούλα που υπάρχει στη φύση είναι βεβαίως ο ατομικός πυρήνας. Έτσι, η εφαρμογή του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού στα σωματίδιά του (τα πρωτόνια και τα νετρόνια) μας λέει αμέσως ότι οι ενέργειές τους θα είναι ασύγκριτα μεγαλύτερες από εκείνες των ηλεκτρονίων στα άτομα, αφού τα μήκη κύματος ενός σωματιδίου που είναι παγιδευμένο στον πυρήνα θα είναι τουλάχιστον εκατό χιλιάδες φορές μικρότερα από τα μήκη κύματος των ηλεκτρονίων που είναι παγιδευμένα στον χώρο του ατόμου.

Ας μην έχουμε λοιπόν καμιά αμφιβολία για τη φυσική προέλευση της αρχής της αβεβαιότητας και των συνεπειών της. Όλα είναι «γραμμένα» στην αρχή του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού της ύλης και την πιθανοκρατική της ερμηνεία.

Βλέπουμε έτσι, με αυτή την ευκαιρία, και ένα άλλο χαρακτηριστικό που έχουν όλες οι θεμελιώδεις θεωρίες της φυσικής και στο οποίο αντανakλάται, με τον πιο εύγλωττο τρόπο, η ίδια η οικονομία της φύσης. Ότι οι νόμοι που την κυβερνούν μπορούν να συμπεκνωθούν σ' έναν ελάχιστο αριθμό θεμελιωδών νόμων και όλοι οι υπόλοιποι να είναι μαθηματικές τους συνέπειες: παράγωγοι νόμοι. Για να το πούμε και λίγο διαφορετικά: Το σύνταγμα της φυσικής —δηλαδή οι θεμελιώδεις νόμοι της— μπορεί να γραφτεί σε μία μόνο σελίδα, και κοινός νομοθέτης... δεν υπάρχει! Οι κοινοί νόμοι είναι απλές μαθηματικές συνέπειες των συνταγματικών νόμων!

Και για την αβεβαιότητα ενέργειας:

****5.5 Η αρχή της αβεβαιότητας χρόνου-ενέργειας**

Δεν πρέπει όμως να κλείσουμε τούτη τη συζήτηση χωρίς να πούμε δυο λόγια και για μια άλλη εκδοχή της αρχής της αβεβαιότητας, που είναι γνωστή ως η αρχή της αβεβαιότητας χρόνου-ενέργειας και γράφεται ως

$$\Delta t \cdot \Delta E \approx \hbar, \quad (2)$$

όπου όμως η αβεβαιότητα χρόνου Δt έχει τώρα ένα διαφορετικό φυσικό νόημα. Αντιπροσωπεύει τον μέσο χρόνο ζωής τ ενός ασταθούς κβαντικού συστήματος, όπως είναι, παραδείγματος χάριν, ένα άτομο σε διεγερμένη κατάσταση ή ένας ραδιενεργός πυρήνας που κάποτε θα διασπαστεί. Οπότε η φυσική ερμηνεία της (2), γραμμένης στην ισοδύναμη μορφή

$$\tau \cdot \Delta E \approx \hbar, \quad (3)$$

εκφράζεται με λόγια ως εξής: Όσο πιο βραχύβιο (μικρό τ) είναι ένα κβαντικό σύστημα τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αβεβαιότητα ΔE στην ενέργειά του. Και αντίστροφα: Όσο πιο μακρόβιο (μεγάλο τ) είναι αυτό το σύστημα τόσο μικρότερη αβεβαιότητα θα έχει η ενέργειά του.

Οι συνέπειες για τις ατομικές στάθμες είναι άμεσες. Αυστηρά καθορισμένη ενέργεια —δηλαδή $\Delta E = 0$ μπορεί να έχει μόνο η θεμελιώδης στάθμη, όπου το ηλεκτρόνιο, μην έχοντας χαμηλότερη στάθμη για να πάει, θα μένει για πάντα εκεί (δηλαδή $t = \infty$) και επομένως

$$\Delta E \approx h/\infty = 0, \text{ αφού είναι } \Delta E \approx h/\tau$$

σύμφωνα με την (3). Όσο για τις ενέργειες των διεγερμένων σταθμών, αυτές θα έχουν ένα μη μηδενικό «παίξιμο» ΔE στην τιμή τους, αφού το ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να παραμένει επ' αόριστον σ' αυτές αλλά θα έχει έναν μέσο χρόνο παραμονής τ και —λόγω αυτού— ένα αντίστοιχο ΔE περίπου ίσο με h/τ , όπως είπαμε πριν. Το «παίξιμο» είναι όμως αρκετά μικρό —περίπου ένα δισεκατομμύριο φορές μικρότερο από τις ενεργειακές διαφορές μεταξύ των σταθμών—, οπότε η επίδρασή του στις θέσεις των ορόφων της ατομικής πολυκατοικίας είναι πρακτικά αμελητέα. Απολύτως καλοδεχτό βεβαίως, διότι αλίμονο αν οι θέσεις των ορόφων —δηλαδή οι θέσεις των ατομικών σταθμών— «έπαιζαν» όσο και οι μεταξύ τους αποστάσεις. Διακριτοί όροφοι δεν θα υπήρχαν τότε και σίγουρα κανείς από μας για να το διαπιστώσει. Η αβεβαιότητα ΔE μπορεί να διαπιστωθεί παρ' όλα αυτά με ακριβείς μετρήσεις των ατομικών φασμάτων, διότι προκαλεί ένα αντίστοιχο μικρό «παίξιμο» $\Delta f \approx \Delta E/h$ στις συχνότητες των εκπεμπόμενων φωτονίων.

Παίζει άραγε κάποιον σημαντικό ρόλο στη φύση η αρχή της αβεβαιότητας χρόνου-ενέργειας, ώστε να αξίζει να τη βάλουμε στο ίδιο βάθρο με την αρχή της αβεβαιότητας θέσης-ταχύτητας; Μάλλον όχι, είναι μια πρώτη απάντηση που όμως θα αναθεωρηθεί προς το τέλος του βιβλίου (§12.2), όταν θα εστιάσουμε την προσοχή μας στον κβαντικό μηχανισμό δημιουργίας των θεμελιωδών δυνάμεων της φύσης —ο οποίος συζητείται σ' ένα πρώτο επίπεδο και στην §6.4— και θα διαπιστώσουμε ότι βασίζεται καίρια στη δυνατότητα να έχουμε μεγάλη απροσδιοριστία στην ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ δύο κβαντικών συστημάτων τα οποία αλληλεπιδρούν για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα και μετά χωρίζουν.

Μείνετε λοιπόν σε αναμονή, γιατί ο ρόλος της αρχής της αβεβαιότητας στη φύση δεν μας έχει ακόμα αποκαλυφθεί σε όλο του το μεγαλείο. Να σημειώσουμε όμως ότι ο μελαγχολικός τόνος που συνόδευε την είσοδό μας σε τούτο το επεισόδιο της ιστορίας μας —*Το τέλος του κλασικού κόσμου* ήταν ο τίτλος του, όπως θυμάστε— έχει ήδη αρχίσει να δίνει τη θέση του σ' ένα κύμα αισιοδοξίας για την εξηγητική ικανότητα της νέας θεωρίας. Ένα κύμα που θα συνεχίσει να «φουσκώνει» στα επόμενα κεφάλαια για να φτάσει στην κορύφωσή του στο Μέρος Γ' του βιβλίου, όταν θα έχουμε στη διάθεσή μας όλα τα στοιχεία για να συνθέσουμε τη μεγάλη ιστορία του κόσμου —από τη Μεγάλη Έκρηξη έως σήμερα— και να καταλάβουμε τη θέση μας μέσα σ' αυτόν.

Και ποιες είναι οι βασικές αρχές της QED;

Η **Κβαντική Θεωρία του Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου** (γνωστή και ως **Κβαντική Ηλεκτροδυναμική** ή **QED**) είναι η θεωρία που περιγράφει πώς αλληλεπιδρά το φως με την ύλη, αντιμετωπίζοντας το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με βάση τις αρχές της Κβαντομηχανικής.

Θεωρείται μία από τις πιο επιτυχημένες και ακριβείς θεωρίες στη Φυσική. Οι βασικές αρχές της QED είναι:

Βασικές Αρχές της Κβαντικής Ηλεκτροδυναμικής (QED)

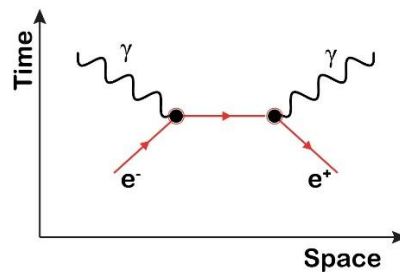
- **1. Η Κβάντωση του Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου (Φωτόνια)**

Η θεμελιώδης αρχή της QED είναι ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δεν είναι συνεχές, αλλά αποτελείται από διακριτά «πακέτα» ενέργειας, τα **κβάντα**.

- Το κβάντο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι το **φωτόνιο** (photon). Τα φωτόνια είναι οι φορείς της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης.
- Η ενέργεια ενός φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητάς του, $E = hf$.
- **2. Αλληλεπίδραση Φωτονίων - Φορτισμένων Σωματιδίων**

Η QED περιγράφει πώς τα **φορτισμένα σωματίδια** (όπως τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια) αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω της ανταλλαγής φωτονίων.

- **Δημιουργία και Καταστροφή:** Τα φορτισμένα σωματίδια μπορούν να **εκπέμπουν** και να **απορροφούν** φωτόνια.
- **Εικονικά Φωτόνια (Virtual Photons):** Η δύναμη μεταξύ δύο ηλεκτρονίων (π.χ., η άπωση Coulomb) εξηγείται ως η ανταλλαγή **εικονικών φωτονίων**



Shutterstock

Εξερεύνηση

. Αυτά τα φωτόνια υπάρχουν μόνο για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και δεν μπορούν να παρατηρηθούν απευθείας.

- **3. Η Αρχή της Σχετικότητας (Συνδυασμός με την Ειδική Σχετικότητα)**

Η QED είναι μία **σχετικιστική κβαντική θεωρία πεδίου**. Αυτό σημαίνει ότι είναι συνεπής τόσο με την κβαντομηχανική όσο και με την **Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας** του Αϊνστάιν.

- **Δημιουργία και Εξαϋλωση Ζευγών:** Η QED προβλέπει και περιγράφει φαινόμενα όπου ενέργεια μετατρέπεται σε ύλη (π.χ., δημιουργία ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου από ένα φωτόνιο) και αντίστροφως (εξαϋλωση).
- **4. Η Αρχή της Υπέρθωσης των Τροχιών (Path Integral Formulation)**

Η σύγχρονη QED, όπως διατυπώθηκε από τον **Richard Feynman**, βασίζεται στη διατύπωση του **ολοκληρώματος τροχιάς** (path integral).

- Για να υπολογιστεί η πιθανότητα να συμβεί ένα φυσικό γεγονός (π.χ., ένα ηλεκτρόνιο να μετακινηθεί από το σημείο A στο B), πρέπει να αθροιστούν όλες οι πιθανές **διαδρομές** που θα μπορούσε να ακολουθήσει το σωματίδιο, ακόμη και οι πιο απίθανες.
- Κάθε αλληλεπίδραση περιγράφεται από ένα **διάγραμμα Feynman**, το οποίο είναι μία γραφική

αναπαράσταση των μαθηματικών όρων της θεωρίας.

- **5. Επανακανονικοποίηση (Renormalization)**

Η αρχική διατύπωση της QED οδηγούσε σε **άπειρες** τιμές για ορισμένες φυσικές ποσότητες (όπως η μάζα και το φορτίο του ηλεκτρονίου).

- Η τεχνική της **επανακανονικοποίησης** είναι μια μαθηματική μέθοδος που επιτρέπει την αφαίρεση αυτών των απειρισμών, οδηγώντας σε πεπερασμένες και παρατηρήσιμες τιμές που συμφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα.

Συνοπτικά: Η QED μετασχημάτισε την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία αναγνωρίζοντας ότι η ενέργεια μεταφέρεται από **κβάντα** (φωτόνια), εξηγώντας έτσι πώς το φως και η ύλη αλληλεπιδρούν με **απίστευτη ακρίβεια**.

Το ίδιο από mistral:

Η **κβαντική θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου** (Quantum Electrodynamics, QED) είναι η κβαντική περιγραφή του πώς αλληλεπιδρούν τα φορτισμένα σωματίδια (όπως τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια) με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (όπως τα φωτόνια). Είναι μια από τις πιο επιτυχημένες φυσικές θεωρίες και αποτελεί μέρος του Καθιερωμένου Προτύπου της σωματιδιακής φυσικής.

- **Βασικές Αρχές της QED**

1. **Κβαντισμός του Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου** Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δεν περιγράφεται ως ένα συνεχές κύμα, αλλά ως ένα σύνολο διακριτών κβάντα ενέργειας, τα **φωτόνια**. Κάθε φωτόνιο μεταφέρει ενέργεια και ορμή, και η αλληλεπίδραση μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων γίνεται μέσω της ανταλλαγής φωτονίων.
2. **Αρχή της Υπέρθεσης** Τα κβαντικά συστήματα μπορούν να βρίσκονται σε μια υπέρθεση καταστάσεων μέχρι να γίνει μια μέτρηση. Αυτό σημαίνει ότι ένα ηλεκτρόνιο, για παράδειγμα, δεν έχει μια συγκεκριμένη θέση ή ορμή μέχρι να μετρηθεί.
3. **Αρχή της Αβεβαιότητας του Heisenberg** Υπάρχει ένα θεμελιώδες όριο στην ακρίβεια με την οποία μπορούμε να γνωρίζουμε ταυτόχρονα ορισμένα ζεύγη φυσικών μεγεθών (π.χ. θέση και ορμή). Αυτό επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο περιγράφουμε τις κβαντικές καταστάσεις.
4. **Αρχή της Τοπικότητας και της Αιτιότητας** Οι αλληλεπιδράσεις μεταδίδονται με πεπερασμένη ταχύτητα (την ταχύτητα του φωτός), και οι κβαντικές πιθανότητες πρέπει να σεβονται την αιτιότητα.
5. **Διαγράμματα Feynman** Τα διαγράμματα Feynman είναι γραφικές αναπαραστάσεις που βοηθούν στον υπολογισμό των πιθανοτήτων διάφορων κβαντικών γεγονότων. Κάθε διάγραμμα αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη μαθηματική έκφραση που περιγράφει την αλληλεπίδραση μεταξύ σωματιδίων.
6. **Κανονικοποίηση (Renormalization)** Η QED αντιμετωπίζει το πρόβλημα των απείρων που

προκύπτουν από τους υπολογισμούς, χρησιμοποιώντας τεχνικές κανονικοποίησης. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν την εξαγωγή πεπερασμένων, φυσικά ερμηνεύσιμων αποτελεσμάτων.

Συνοπτικά: Η QED συνδυάζει την ειδική σχετικότητα με την κβαντική μηχανική, περιγράφοντας με ακρίβεια φαινόμενα όπως η εκπομπή και απορρόφηση φωτονίων, η σκέδαση φωτός από ηλεκτρόνια (φαινόμενο Compton), και η ύπαρξη του μαγνητικού ροπής του ηλεκτρονίου (ανωμαλία $g-2$).