

ΜΑΘΗΣΙΑΚΌΣ ΣΤΑΘΜΌΣ IV: ΔΥΑΔΙΚΌΤΗΤΑ ΚΎΜΑΤΟΣ-ΣΩΜΑΤΙΔΪΟΥ	57
1 Κυματοσωματιδιακός δυϊσμός: Θεμελιώδης για το φως και την ύλη	57
2 Η κβαντική θεωρία του φωτός και της ύλης	58
2.a Ηλεκτρομαγνητικά κύματα και τα ενεργειακά τους κβάντα: φωτόνια.	59
2.b Κύματα ύλης και κβάντα	59
3 Κβαντικά Πεδία	61
3.α Η ένταση των κυμάτων δίνει την πιθανότητα για ανίχνευση κβάντων	61
3.β Ένα σωματίδιο ως κυματοπακέτο	62
3.γ Η αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg	64
4 Κβαντική Θεωρία Πεδίου	66
5 Έννοιες στον Σταθμό Μάθησης IV	67
3.a Η ένταση των κυμάτων δίνει την πιθανότητα για ανίχνευση κβάντων	61
3.b Ένα σωματίδιο ως κυματοπακέτο	62
3.c Η αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg	64
4 Κβαντική Θεωρία Πεδίου	66
5 Έννοιες στον Σταθμό Μάθησης IV	67

ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ:



Αναφορά Δημιουργού - Μη Εμπορική Χρήση - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές (CC BY-NC-SA 4.0)

Υπό τους ακόλουθους όρους:

- Αναφορά στον δημιουργό — Πρέπει να κάνετε [κατάλληλη μνεία](#), να παρέχετε σύνδεσμο στην άδεια και [να δηλώνετε τυχόν τροποποιήσεις](#). Αυτό μπορείτε να το κάνετε με οποιονδήποτε εύλογο τρόπο, χωρίς όμως να υπονοείται ότι ο αδειοδότης εγκρίνει εσάς ή τη χρήση σας.
- Μη-εμπορική — Δεν επιτρέπεται η χρήση του υλικού για [εμπορικούς σκοπούς](#).

Μπορείτε να:

- Μοιραστείτε - να αντιγράψετε και να αναδιανείμετε το υλικό με οποιοδήποτε μέσο ή μορφή
 - Προσαρμόσετε - να αναμείξετε, να τροποποιήσετε και να δημιουργήσετε πάνω στο υλικό
- Ο δικαιούχος δεν μπορεί να ανακαλέσει αυτές τις ελευθερίες, εφόσον τηρείτε τους όρους της άδειας.

Αναφορά στο έργο πρέπει να γίνεται ως εξής:

Frans R., Tamassia L., Andreotti E. (2015) Quantum SpinOff Learning Stations. Art of Teaching, UCLL, Diepenbeek, Βέλγιο

Το Quantum Spin-Off χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση υπό το πρόγραμμα LLP Comenius (540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).

Renaat Frans, Laura Tamassia, Erica Andreotti

Επαφή: renaat.frans@khlm.be



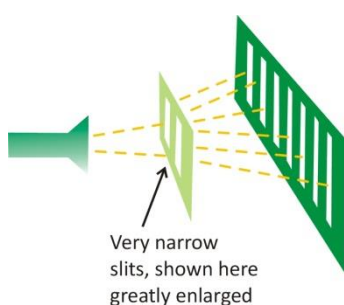
**Lifelong
Learning
Programme**

Το παρόν υλικό αντικατοπτρίζει τις απόψεις των συγγραφέων και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δεν μπορεί να θεωρηθεί υπεύθυνη για τη χρήση οποιασδήποτε πληροφορίας περιέχεται στο παρόν

Μαθησιακός σταθμός IV: Διαδικότητα Κύματος-Σωματιδίου

1 Κυματοσωματιδιακός δυϊσμός: Θεμελιώδης για το φως και την ύλη

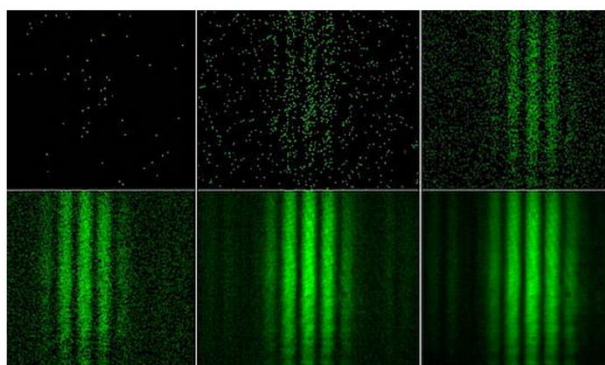
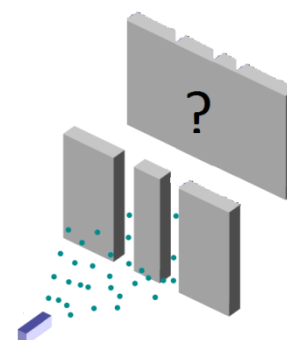
Τον 19ο αιώνα κατέστη σαφές ότι το φως είναι κυματικό φαινόμενο: ένα κύμα **ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων**. Σύντομα όμως φάνηκε ότι αυτή η ερμηνεία δεν αποκάλυπτε εύστοχα την αληθινή φύση του φωτός. Ας πάμε λοιπόν πίσω στο πείραμα της διπλής σχισμής για το φως:



Τι θα περιμένατε να δείτε στην οθόνη αν το φως κατέφθανε ως σωματίδια;.....

Τι θα περιμένατε να δείτε αν φως χαμηλής έντασης κατέφθανε στην οθόνη σαν κύματα;
.....

Στο πείραμα της διπλής σχισμής είδαμε ότι το φως δεν μπορεί να συμπεριφερθεί μόνο ως κύμα ή ως σωματίδιο. Δεν καταφθάνει ως σωματίδια (τα οποία θα εμφάνιζαν δύο γραμμές) ούτε ως κύματα (τα οποία θα δημιουργούσαν ένα διαμόρφωμα συμβολής το οποίο θα έσβηνε): το διαμόρφωμα συμβολής δημιουργείται με ένα σωματίδιο τη φορά (μαθησιακός σταθμός I). *Φαίνεται ότι τα σωματίδια «συμφωνούν» πως θα καταφθάσουν: με τη μορφή ενός διαμορφώματος συμβολής.* Κατα συνέπεια το φως φέρεται και σαν κύμα και σαν σωματίδιο ταυτόχρονα.



Εικόνα 1 Το φως σε ένα πείραμα διπλής σχισμής: καταφθάνει ως μεμονωμένα φωτόνια όμως όταν αυτά συσσωρεύονται δημιουργούν ένα διαμόρφωμα σαν να ήταν κύματα (Καταγραφή από τον: A. Weis, University of Fribourg)

Το ίδιο φαίνεται να ισχύει και για την ύλη: τα ηλεκτρόνια, τα νετρόνια ακόμα και τα μόρια.

Μπορούμε να αντιληφθούμε τα ηλεκτρόνια ή το φως στο πείραμα διπλής σχισμής σαν να αποτελείται μόνο από μικρές μπάλες; (ΝΑΙ/ΟΧΙ)

Μπορείτε να συγκρίνετε τα αποτελέσματα του πειράματος της διπλής σχισμής με ηλεκτρόνια (βλ. μαθησιακό σταθμό I), με αυτό του φωτός. Είναι συγκρίσιμα ή όχι;

.....

Σκεφτήκαμε νωρίτερα ότι τουλάχιστον η ύλη θα συμπεριφερόταν ως σωματίδια, αλλά ακόμα και τα μικρά υλικά σωματίδια δεν καταφθάνουν σαν ξεχωριστές γραμμές πίσω από τις σχισμές. Συσσωρεύονται κατασκευάζοντας ένα διαμόρφωμα συμβολής όπως και τα κύματα. Κατα συνέπεια η ύλη φαίνεται να έχει και αυτή κυματική συμπεριφορά.

Οι φυσικοί αποκαλούν αυτό το αδιανόητο πρόβλημα, δυαδικότητα κύματος-σωματιδίου. Η παράξενη φύση του φωτός προφανώς δεν είναι σύμφωνη με την κλασική θεωρία περί σωματιδίων ή κυμάτων.

Η δυαδικότητα κύματος-σωματιδίου αποτελεί θεμελιώδη αρχή του φωτός και της ύλης

Στη φύση, υπάρχει προφανώς ένα είδος συμμετρίας μεταξύ του φωτός και της ύλης. Στην κβαντική μηχανική, τα ηλεκτρόνια μπορούν να θεωρηθούν απλά ως "σφαιρίδια", και το ίδιο ισχύει για τα φωτόνια. Ένα ηλεκτρόνιο, όπως και ένα φωτόνιο, φέρουν χαρακτηριστικά τόσο των κυμάτων όσο και των σωματιδίων:

Τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια στο πείραμα της διπλής σχισμής καταφτάνουν *ένα-ένα*, αλλά το *μοτίβο που σχηματίζεται* από αυτά τα σωματίδια είναι ένα μοτίβο συμβολής, που προκαλείται από τα *κυματοειδή* χαρακτηριστικά αυτών των σωματιδίων!

Αυτή η δυαδικότητα κύματος-σωματιδίου φαίνεται να συνιστά θεμελιώδη αρχή στη φύση. Η κβαντική μηχανική έχει μεταβάλει πραγματικά τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τη φύση του κόσμου.



Εδώ βλέπετε πώς μια φωτογραφία επίσης σχηματίζεται από ένα φωτόνιο τη φορά (Πηγή: photonicswiki Rose, A (1973) Vision: human and electronic. Plenum Press)

Από το πείραμα της διπλής σχισμής για φως σε χαμηλή ένταση, γίνεται εμφανές ότι το *φως* εμφανίζει ιδιότητες κύματος και

Από το πείραμα της διπλής σχισμής για ηλεκτρόνια, γίνεται εμφανές ότι τα *ηλεκτρόνια* εμφανίζουν ιδιότητες σωματιδίων και

Η σωματιδιακή και η κυματική θεωρία είναι συμπληρωματικές, και η πραγματικότητα είναι πιο περίπλοκη από ό,τι οποιαδήποτε από τις δύο θεωρίες μπορούν να περιγράψουν ξεχωριστά. Η **δυαδικότητα κύματος-σωματιδίου** αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό του φωτός και της ύλης στη φυσική. Είναι χαρακτηριστικό της σύγχρονης φυσικής εν αντιθέσει με την κλασική φυσική.

2 Η κβαντική θεωρία του φωτός και της ύλης

Ο Αϊνστάιν υπέθεσε ότι η **ενέργεια του φωτός** (ή γενικότερα η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου) "διατίθεται" αποκλειστικά σε μικρά πακέτα ή κβάντα. Όχι με τον συνεχή τρόπο που θα περιμέναμε από τα κύματα. Με άλλα λόγια, η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δεν μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς, αλλά μόνο σε μικρά **διακριτά άλματα**, τα οποία ονομάζονται **κβάντα**. Τα κβάντα ενέργειας (ή τα σωματίδια αν θέλετε) του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ονομάζονται **φωτόνια**.

2.a Ηλεκτρομαγνητικά κύματα και τα ενεργειακά τους κβάντα: φωτόνια.

Τα **ενεργειακά κβάντα** του φωτός ονομάζονται **φωτόνια**. Ο Max Planck ανακάλυψε την ακριβή σχέση μεταξύ της ενέργειας ενός φωτονίου (σωματιδιακή ιδιότητα) και της συχνότητας του κύματος φωτός (κυματική ιδιότητα). Με αυτή τη διάσημη σχέση Planck-Einstein μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγεθος των ενεργειακών πακέτων του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου:

$$E = h \cdot f \quad (1.)$$

όπου h είναι μια πολύ μικρή αλλά θεμελιώδης **σταθερά της φύσης** που καταδεικνύει την εξαιρετικά κοκκώδη υφή του φωτός στα κβάντα: η τιμή της **σταθεράς του Planck** $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

- a) Να υπολογίσετε την τιμή του κβάντο φωτός για το κίτρινο φως με συχνότητα $f = 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$

$E = \dots\dots\dots$

Πρόκειται για το πιο μικρό κβάντο ενέργειας που εμφανίζεται στη φύση για φως αυτής της συχνότητας.

- b) Να υπολογίσετε την ενέργεια τριών κίτρινων φωτονίων:

$E = \dots\dots\dots$

Η ενέργεια του κίτρινου φωτός δεν μπορεί να λάβει κάποια αυθαίρετη τιμή αλλά είναι πάντα (ακέραιο / μη ακέραιο) πολλαπλάσιο της ενέργειας του φωτονίου που υπολογίσατε παραπάνω στο α). **Η ενέργεια του φωτός δεν είναι συνεχώς μεταβλητή, αλλά είναι κβαντισμένη.**

Επειδή, όμως, το φως αποτελείται από ένα παλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, συνάγουμε ότι η **ενέργεια του ίδιου του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου** είναι **κβαντισμένη**. Η ενέργεια εκλύεται από το πεδίο μόνο ανά φωτόνιο και άρα σε πακέτα.

Πείραμα: Στα πρακτικά πειράματα τα οποία συνοδεύουν αυτούς τους σταθμούς μάθησης υπάρχει ένα πείραμα στο οποίο μπορείτε να βρείτε την σταθερά του Planck μετρώντας τις διαφορετικές τιμές ηλεκτρικής τάσης στις οποίες ανάβει το κόκκινο, το κίτρινο, το πράσινο και το μπλέ LED.

Τεχνολογία: Το γεγονός ότι το φως ανιχνεύεται υπο μορφή ενεργειακών κβάντων χρησιμοποιείται σε κάθε ψηφιακή κάμερα. Στον Σταθμό Μάθησης VI μπορείτε να μάθετε για αυτήν την εφαρμογή.

2.b Κύματα ύλης και κβάντα

Οκ, τα σωματίδια του φωτός τα οποία παρατηρούμε είναι στην πραγματικότητα πακέτα ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η συμμετρία αυτή ανάμεσα στο φως και την ύλη θα μπορούσε να επεκταθεί για να θεωρήσουμε ότι τα υλικά σωματίδια είναι τα κβάντα κάποιου είδους πεδίου επίσης;



Χρόνια πριν την εκτέλεση του πειράματος της διπλής σχισμής για τα ηλεκτρόνια, ο Γάλλος φυσικός **Louis de Broglie** πρόβλεψε τις *κυματικές ιδιότητες* της ύλης. Ο Louis De Broglie πίστευε στην συμμετρία της φύσης: όταν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αλληλεπιδρούν κατά διακριτά κβάντα ενέργειας (που αντιλαμβανόμαστε ως φωτόνια), θεωρούσε προφανές ότι θα

ισχύει και το αντίθετο: τα σωματίδια της ύλης, που μέχρι σήμερα δεν θεωρούνται ως κβάντα κάποιου πεδίου, θα πρέπει επίσης να λογίζονται κατ' αυτόν τον τρόπο.

Το *κύμα* του οποίου τα κβάντα βλέπουμε ως σωματίδια, ονομάζεται "**υλικό κύμα**". Ο De Broglie *υποστήριξε* την ύπαρξη ανάλογων κυμάτων ύλης. Έτσι, ήταν ο πρώτος που αποδέχτηκε την κυματική φύση της ύλης. Επιπλέον, ο De Broglie μπόρεσε να διατυπώσει μια ακριβή σχέση που συνέδεε αυτό το μέχρι στιγμής άγνωστο υλικό πεδίο με τις κανονικές ιδιότητες της ύλης, όπως τη μάζα και την ταχύτητα.

Σε αυτόν τον τύπο, ο De Broglie εδραιώνει μια σχέση μεταξύ της γραμμικής ορμής η οποία είναι επίσης γνωστή στην κλασική μηχανική ως το γινόμενο της μάζας ενός σωματιδίου επί της ταχύτητας του

$$p = mv \quad (2.)$$

Η ορμή αποτελεί μια τυπική **ιδιότητα των σωματιδίων** επίσης γνωστή στη νευτώνεια μηχανική (π.χ. ένα φορτηγό που κινείται με μικρή ταχύτητα μπορεί να έχει ορμή όση και ένα μικρό αυτοκίνητο που κινείται με μεγάλη ταχύτητα).

Από την άλλη, μια **ιδιότητα των κυμάτων** είναι το μήκος κύματος. Ο De Broglie συνδέει τώρα αυτές τις μέχρι τότε ασυμβίβαστες ιδιότητες των σωματιδίων και των κυμάτων σε μια ακριβή σχέση:

Το μήκος κύματος είναι ιδιότητα των κυμάτων

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (3.)$$

Η γραμμική ορμή είναι ιδιότητα των σωματιδίων.

Η υπόθεση de Broglie συνδέει τη σωματιδιακή και την κυματική φύση της ύλης, ακριβώς μέσω της ελάχιστης σταθεράς του Planck:

Το μήκος κύματος της (ένα κβάντο) ύλης είναι αντιστρόφως ανάλογο προς τη γραμμική ορμή του.

Τα σωματίδια που έχουν μεγάλη ορμή, ως εκ τούτου, έχουν μικρό μήκος κύματος.

Για ένα ηλεκτρόνιο, η σχέση de Broglie ορίζει: $p = h / \lambda$, όπου p είναι του ηλεκτρονίου, και λ είναι το μήκος κύματος του που είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρόνιο.

Πώς γίνεται **να παρατηρούμε** (π.χ. στο πείραμα της διπλής σχισμής) το **μήκος κύματος ενός ηλεκτρονίου** και **να μη βλέπουμε το μήκος κύματος μιας σφαίρας**; Ας υπολογίσουμε τα μήκη κύματος των δύο σωματιδίων με τη σχέση De Broglie.

- a) Υπολογίστε το μήκος κύματος De Broglie ενός ηλεκτρονίου με ταχύτητα $v = 6 \times 10^6 \text{ m/s}$
(Χρειάζεστε τη μάζα του ηλεκτρονίου. Ψάξτε να τη βρείτε!) $m_e = \dots \dots \dots \text{ kg}$

$$\lambda = \dots \dots \dots$$

- b) Υπολογίστε το μήκος κύματος De Broglie μιας μπάλας με μάζα $m = 0,20 \text{ kg}$ και ταχύτητα $v = 15 \text{ m/s}$

$$\lambda = \dots \dots \dots$$

- c) Συγκρίνετε αυτά τα δύο μήκη κύματος με το μήκος κύματος του φωτός (ανατρέξτε σε έναν από τους προηγούμενους μαθησιακούς σταθμούς, όπου μιλήσαμε για το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα):

Το μήκος κύματος του ορατού φωτός κυμαίνεται μεταξύ

Το μήκος κύματος μιας κανονικής μπάλας είναι από το μήκος κύματος του ορατού φωτός.

Το μήκος κύματος ενός ηλεκτρονίου είναι από το μήκος κύματος του ορατού φωτός.

- d) Ποιος είναι ο λόγος που δεν παρατηρούμε τα κυματικά χαρακτηριστικά μιας κανονικής μπάλας (ακόμα και σε ένα υπερσύγχρονο εργαστήριο);

.....

Τι είδους κύμα είναι όμως ένα υλικό κύμα; Ας προσπαθήσουμε να βρούμε μια απάντηση.

3 Κβαντικά Πεδία

3.α Η ένταση των κυμάτων δίνει την πιθανότητα για ανίχνευση κβάντων

Ας ξαναδοούμε το πείραμα της διπλής σχισμής ξανά, αυτή τη φορά με την υπόθεση του De Broglie ότι ακόμα και η ύλη συνδέεται με ένα πεδίο.

Πώς μπορούμε να εξηγήσουμε το διαμόρφωμα συμβολής; Τα κύματα του πεδίου το οποίο συνδέεται με τα ηλεκτρόνια ή τα νετρόνια μπορούν να διέλθουν και από τις δύο σχισμές και αυτά τα κύματα μπορούν πράγματι να συμβάλλουν με τον εαυτό τους. Επομένως, η υπέρθεση και των δύο κυμάτων (από κάθε σχισμή) είναι υπεύθυνη για την δημιουργία ενός διαμορφώματος συμβολής με μέγιστα και ελάχιστα. Γνωρίζουμε ήδη ότι τα μέγιστα εμφανίζονται σε θέσεις όπου η διαφορά δρόμου είναι τέτοια ώστε το κύμα που ξεκινά από την μία σχισμή είναι σε φάση με το κύμα που προέρχεται από την άλλη σχισμή (ενισχυτική συμβολή). Σε άλλες θέσεις, το μήκος της διαδρομής είναι τέτοιο ώστε να συμβαίνει ακυρωτική συμβολή ανάμεσα στα δύο κύματα.



Εικόνα 3 Η Κβαντική Θεωρία υποθέτει ότι ένα πεδίο συνδέεται με σωματίδια όπως το ηλεκτρόνιο. Τα κύματα αυτού του πεδίου διέρχονται μέσα από τις σχισμές και συμβάλλουν (ενισχυτικά ή ακυρωτικά) σε διαφορετικές θέσεις. Στις θέσεις που το πλάτος είναι μεγάλο υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ότι ένα διακριτό και εντοπισμένο ενεργειακό κβάντο δίδεται από το πεδίο. Αυτό είναι που παρατηρούμε ως ένα σωματίδιο.

Η νέα ιδέα είναι ότι στις θέσεις που παρατηρούνται τα μέγιστα των κυμάτων, δεν είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε ότι ανιχνεύτηκε σίγουρα ένα σωματίδιο. Σε θέσεις όπου το πλάτος του πεδίου είναι μέγιστο, π.χ στα μέγιστα της συμβολής, υπάρχει απλά **μεγάλη πιθανότητα ένα ενεργειακό πακέτο να προσφέρθηκε από το πεδίο**. Κατα συνέπεια, στην περίπτωση ενός πειράματος διπλής σχισμής με ηλεκτρόνια, σε αυτά τα μέγιστα υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εμφανίζεται ένα ηλεκτρόνιο.

Η ένταση του πεδίου δίνει την πιθανότητα ότι ένα κβάντο του πεδίου μπορεί να ανιχνευτεί.

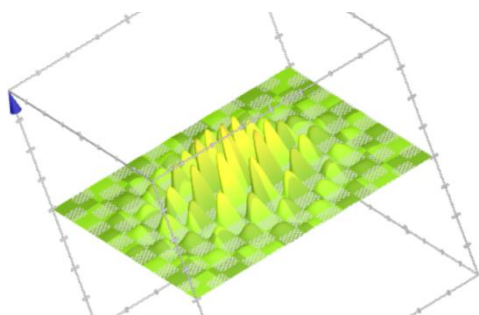
Αυτή η θεμελιώδης ιδιότητα της **πιθανότητας** εξηγεί την **τυχαία** εμφάνιση των σημείων ('σωματιδίων') στα πειράματα διπλής σχισμής. Η ακριβής εμφάνιση ενός ηλεκτρονίου δεν μπορεί να προβλεφθεί, μόνο οι πιθανότητες.

Στην περίπτωση ενός πειράματος διπλής σχισμής για φως, έχουμε το ίδιο φυσικό νόημα για το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο: ο μέγιστος αριθμός φωτονίων εμφανίζεται σε θέσεις που η ένταση του πεδίου είναι η μέγιστη: σε αυτά τα σημεία υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ότι το φωτόνιο δίδεται από το πεδίο.

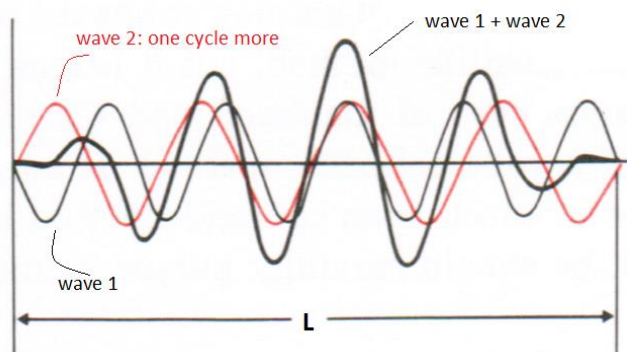
Ο Γερμανός φυσικός Max Born ήταν αυτός ο οποίος σκέφτηκε αυτήν την 'πιθανοκρατική ερμηνεία' της έντασης του πεδίου. Αυτή θα μπορούσε να φανεί αρκετά περίεργο και αρχικά πολλοί φυσικοί δεν πίστεψαν ότι μπορεί να είναι αληθινή, αλλά αποδείχθηκε ότι αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί η φύση. Γι' αυτό τα κβαντικά κύματα καλούνται 'κύματα πιθανότητας'. Η πιθανότητα είναι αυτή που μεταβάλλεται, η πιθανότητα ότι ένα κβάντο ενέργειας (το οποίο αντιλαμβανόμαστε ως ένα σωματίδιο) εμφανίζεται από το πεδίο.

3.β Ένα σωματίδιο ως κυματοπακέτο

Μία συνέπεια της κυματικής φύσης της ύλης είναι ότι τα σωματίδια δεν εντοπίζονται πλήρως όπως στην κλασική φυσική. Στην Νευτώνεια μηχανική ένα σωματίδιο έχει καθορισμένη θέση και ταχύτητα. Αλλά λόγω της κυματικής φύσης των σωματιδίων, η θέση και η ταχύτητα είναι πιο 'αβέβαιες'. Ας δούμε τι συμβαίνει αυτό ακριβώς.



Στην κβαντική θεωρία θα πρέπει να σκεφτούμε ένα σωματίδιο ως ένα κυματοπακέτο όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Ένα κυματοπακέτο απαρτίζεται από το άθροισμα διαφορετικών κυμάτων που συμβάλλουν ενισχυτικά σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Σε μακρύτερες αποστάσεις, τα κύματα που αθροίζονται έχουν διαφορεές φάσης οι οποίες τα ακυρώνουν μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα το σωματίδιο έχει πιθανότητα να ανιχνευθεί μόνο σε μια περιορισμένη περιοχή.



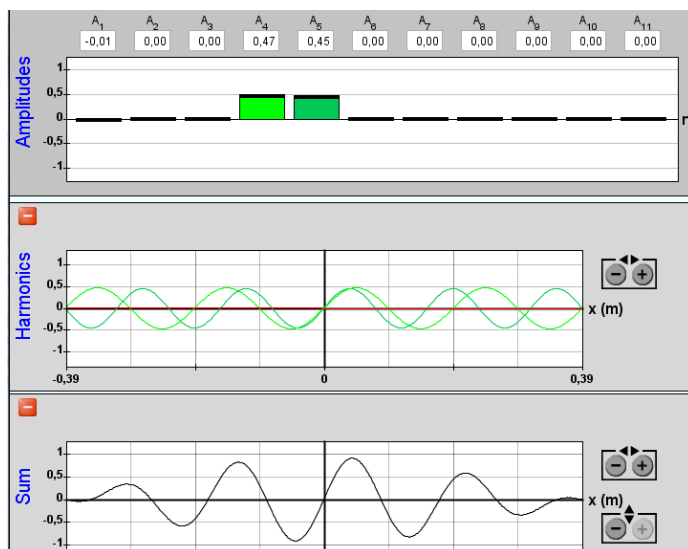
Δείτε αυτό το παράδειγμα: Δύο κύματα αθροίζονται για να φτιάξουν ένα τρίτο κύμα το οποίο είναι το κυματοπακέτο. Εδώ μπορούμε να δούμε μόνο 2 διαστάσεις. Βλέπετε ότι το κυματοπακέτο έχει μέγιστο στο μέσον του και φθίνει στις άκρες; Όλο αυτό έγινε απλά αθροίζοντας δύο κύματα με το ίδιο σταθερό πλάτος; το κύμα 1 έχει μήκος κύματος το οποίο προσαρμόζεται 4 φορές στο μήκος L.

Βλέπετε ότι τα δύο κύματα εμφανίζουν (ενισχυτική/ακυρωτική) συμβολή στις δύο πλευρές; Στο μέσον συμβάλλουν (ενισχυτικά/ακυρωτικά).

Άσκηση με την εφαρμογή Phet

Μπορείτε να εξετάσετε επιπλέον πως τα κύματα αθροίζονται για να σχηματίσουν ένα κυματοπακέτο στην εφαρμογή Phet 'Fourier': <https://phet.colorado.edu/en/simulation/fourier>

Προσπαθήστε να καταλήξετε στην παρπώνω περίπτωση όπου δύο κύματα διαφέρουν κατά έναν κύκλο στο μήκος L.



Ποια πιθανότητα διαλέξατε;

Αριθμός κύκλων στο κύμα 1:

.....

Αριθμός κύκλων στο κύμα 2:

.....

Τώρα προσπαθήστε να κάνετε το κύμα πιο εντοπισμένο. Μπορείτε να το κάνετε προσθέτοντας περισσότερα κύματα;

Αθροίζοντας περισσότερα κύματα με έναν ελαφρά διαφορετικό

αριθμό κύκλων, υπάρχει μια ολοένα και περισσότερο (ενισχυτική/ακυρωτική) συμβολή μακρύτερα. Μόνο στο μέσον τα κύματα συμβάλλουν (ενισχυτικά/ακυρωτικά).

Στην πραγματικότητα ο Γάλλος μαθηματικός Fourier απέδειξε ότι πρέπει να προσθέσεις έναν άπειρο αριθμό κύματων με ελαφρώς διαφορετικό αριθμό κύκλων.

Τα πιθανά πακέτα τα οποία θα μπορούσαν να εμφανιστούν σε μακρύτερη απόσταση 'καταστρέφονται' προσθέτοντας καλύτερα ρυθμισμένα κύματα. Επομένως μόνο το κεντρικό πακέτο απομένει. Εκεί βρίσκεται η μεγαλύτερη πιθανότητα να μετρηθεί ένα σωματίδιο. Ωστόσο, υπάρχει ακόμη μια πιθανότητα να βρεθεί το σωματίδιο στην κεντρική περιοχή όπου το άθροισμα των κυμάτων δεν είναι μηδέν. Κατα συνέπεια μπορούμε να πούμε με ακρίβεια το που βρίσκεται το σωματίδιο; Possible packets that could arise further away are 'killed' by adding more properly adjusted waves.

Ας επιστρέψουμε στο παράδειγμα: τι θα μπορούσαμε να πούμε για την θέση του σωματιδίου βασιζόμενοι σε αυτά τα επιχειρήματα σχετικά με την πιθανότητα; Με άλλα λόγια, ποιά είναι η «απροσδιοριστία» ή αλλιώς η αβεβαιότητα της θέσης του σωματιδίου;

Προτού κάνουμε μία μέτρηση, το σωματίδιο λέμε ότι βρίσκεται σε μια «κατάσταση υπέρθεσης»: αυτή είναι μια συνέπεια της κυματικής φύσης. Για παράδειγμα, όταν εκτελούμε ένα πείραμα διπλής σχισμής, δεν μπορούμε να γνωρίζουμε από ποια πλευρά θα διέλθει το σωματίδιο, δηλαδή την θέση του σωματιδίου. Ωστόσο, όταν αυτό αλληλεπιδρά με την οθόνη πίσω από τη διπλή σχισμή, τότε εμφανίζεται σε μια καθορισμένη θέση: έχουμε κάνει μία μέτρηση και η «κατάσταση υπέρθεσης» έχει εξαφανιστεί, δηλαδή το σωματίδιο βρίσκεται σε μια καλά καθορισμένη κατάσταση ως αποτέλεσμα της μέτρησης.

3.γ Η αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg

i) Απροσδιοριστία στην θέση και την ορμή ενός σωματιδίου

Ένα σωματίο δεν είναι πλήρως εντοπισμένο πριν ανιχνευθεί, και δεν υπάρχει κανένας τρόπος να προβλέψουμε 'που ακριβώς είναι το σωματίο' όπως συνηθίζαμε στην κλασσική φυσική. Η συνέπεια του παραπάνω είναι ότι αντίθετα με τη Νευτώνεια μηχανική, δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θέση και την ταχύτητα ενός σωματιδίου την ίδια στιγμή. Υπάρχει ένα είδος αντίβαρου: όσο περισσότερα γνωρίζουμε για την θέση ενός σωματιδίου, τόσο λιγότερα γνωρίζουμε για την ταχύτητά του. Ο Werner Heisenberg αποκάλυψε ότι υπάρχει μια ακριβής σχέση απροσδιοριστίας ανάμεσα στην θέση και την ορμή (η οποία είναι, όπως θα θυμάστε, το γινόμενο της με την). Δεν είναι ζήτημα κακής διαδικασίας μέτρησης η οποία μπορεί να διορθωθεί. Είναι μια ενδογενής ιδιότητα των σωματιδίων: δεν μπορείτε να προσδιορίσετε την θέση τους ακριβώς επειδή δεν έχουν ακριβή θέση πριν από μια μέτρηση. Τώρα, ας δούμε πώς αυτό είναι απλά μια συνέπεια της φύσης του σωματιδίου ως ενός κυματοπακέτου.

Η περίπτωση δύο κυμάτων τα οποία διαφέρουν κατά ένα κύκλο

Ας δούμε, τουλάχιστον για την περίπτωση δύο κυμάτων που διαφέρουν κατά ένα κύκλο (σε ένα μήκος L), πως αυτή οδηγεί σε απροσδιοριστία:

Ο αριθμός κύκλων μπορεί να βρεεί διαιρώντας το μήκος L με το μήκος κύματος λ . Επομένως:

$$\frac{L}{\lambda} = \text{αριθμός κύκλων στο μήκος } L$$

Επειδή η διαφορά κύκλων στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 1, μπορούμε να γράψουμε ότι η διαφορά

$$\text{αριθμός κύκλων στο κύματος 2 στο μήκος } L - \text{αριθμό κύκλων του κύματος 1 στο μήκος } L = \dots \dots \dots ?$$

Ή με σύμβολα:

$$\frac{L}{\lambda_2} - \frac{L}{\lambda_1} = \dots$$

Τώρα χρησιμοποιούμε την σχέση του De Broglie:

και αντικαθιστούμε το $\frac{1}{\lambda_n}$ με $\frac{p}{h}$

$$\text{Άρα έχουμε: } \frac{Lp_2}{h} - \frac{Lp_1}{h} = \dots \dots$$

Ή:

$$L(p_2 - p_1) = \dots \dots$$

Τώρα, βλέποντας ξανά το παραπάνω παράδειγμα, το L ισούται με την απροσδιοριστία του κυματοπακέτου (ή αλλιώς του σωματιδίου), η οποία συνήθως γράφεται ως Δx .

Και το $(p_2 - p_1)$ είναι η απροσδιοριστία στην ορμή (μάζα επί ταχύτητα) του σωματιδίου, η οποία γράφεται Δp . Αυτό θα μας δώσει πράγματι το εύρος πιθανών τιμών (καταστάσεων) τις οποίες μπορεί να έχει η ορμή του κυματοπακέτου.

Επομένως έχουμε την ακόλουθη σχέση απροσδιοριστίας (ελέγξτε αν το αποτέλεσμα σας είναι το ίδιο με το παρακάτω):

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα της υπέρθεσης 2 κυμάτων, καταλήγουμε με ένα κυματοπακέτο το οποίο 'απλώνεται' σε μια περιοχή μήκους L (ή Δx). Λόγω της σχέσης του De Broglie όπου το

κύμα συνδέεται με την ορμή p ενός σωματιδίου, αυτό μας οδηγεί σε μια απροσδιοριστία Δp επίσης. Άρα το γινόμενο των δύο απροσδιοριστιών είναι τουλάχιστον h σε αυτήν την περίπτωση. Το h είναι η μικρότερη πιθανή τιμή για την περίπτωση στην οποία προσθέτουμε δύο κύματα. Επομένως θα έπρεπε να γράψουμε " \geq "

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

Γενική σχέση αβεβαιότητας

Μια πιο γενική εξαγωγή από την παραπάνω, καταλήγει στο ότι το γινόμενο των απροσδιοριστιών θέσης και ορμής ενός σωματιδίου πρέπει να είναι μεγαλύτερο από $h/4\pi$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$$

Αυτή είναι η περίφημη **αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg** η οποία δηλώνει ότι δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε την θέση και την ορμή ενός σωματιδίου με άπειρη ακρίβεια, όχι λόγω των περιορισμών των συσκευών μέτρησής σας αλλά λόγω του κυματικού χαρακτήρα των σωματιδίων. Το σωματίδιο δεν έχει μία καθορισμένη θέση και ορμή. Η απροσδιοριστία στο γινόμενο $\Delta x \cdot \Delta p$ είναι πάντα μεγαλύτερη από $h/2\pi$.

Άρα η κβαντική φυσική μας έφερε την εικόνα ότι ο απόλυτος ντετερμινισμός δεν είναι ιδιότητα της φύσης (στον οποίο οι φυσικοί πίστευαν μέχρι την εμφάνιση της κβαντικής μηχανικής). Από την άλλη πλευρά οι νόμοι της φύσης δεν είναι εντελώς τυχαίοι. Τα ζητήματα αυτά είναι πολύ λεπτά και πολλές φιλοσοφικές συνέπειες είναι ακόμη υπο συζήτηση, σχετικά με το τι σημαίνει αυτό για το σύμπαν μας και την ζωή που βρίσκεται σε αυτό.

Άσκηση:

Ας υπολογίσουμε την αβεβαιότητα στην ταχύτητα ενός ηλεκτρονίου το οποίο είναι δέσμιο σε άτομο με διάμετρο 10^{-10} m

.....
(Απάντηση: $\Delta v \geq 10^6$ m/s !)

Όπως μπορείτε να δείτε το ερώτημα 'ποιά είναι η ταχύτητα του ηλεκτρονίου στο άτομο;' Δεν έχει νόημα αν η ταχύτητα του ηλεκτρονίου στο άτομο δεν μπορεί να προσδιοριστεί με τόσο μεγάλη αβεβαιότητα. Αυτό μας δείχνει και πάλι ότι η κλασσική εικόνα του Rutherford στην οποία ένα ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα είναι ένα αρκετά ανεπαρκές επιστημονικό μοντέλο.

ii) Αβεβαιότητα στην ενέργεια και τον χρόνο ενός σωματιδίου

Υπάρχει επίσης ένα αντίβαρο απροσδιοριστίας ανάμεσα σε ενέργεια και χρόνο.

Είναι επίσης μια συνέπεια του κυματικού χαρακτήρα των σωματιδίων. Μπορείτε να συγκρίνετε αυτά με την κατάσταση στην οποία θέλετε να προσδιορίσετε την συχνότητα ενός τόνου. Αν θέλετε να το κάνετε αυτό, θα πρέπει να ακούσετε τον τόνο (ή να μετρήσετε τον τόνο αν θέλετε) για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Επομένως υπάρχει μια σχέση

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq \text{κάποια τιμή}$$

Οκ, αυτή η σχέση απροσδιοριστίας ισχύει στην κλασσική φυσική όπως η φυσική του ήχου. Δεν μπορείτε να προσδιορίσετε την συχνότητα ενός κύματος αν το κύμα δεν διαρκεί τουλάχιστον για έναν κύκλο, στην περίπτωση του οποίου: $\Delta t = T$ και αφού $\Delta f = 1/T$ η 'κάποια τιμή' θα ισούται με 1.

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1$$

Τώρα, αφού τα σωματίδια στην κβαντική φυσική έχουν επίσης κυματικό χαρακτήρα και η συχνότητά τους εξαρτάται από την ενέργεια με βάση την σχέση των Einstein-Planck $E=h \cdot f$, παίρνουμε το παρακάτω αποτέλεσμα αντικαθιστώντας το f με E/h

$$\frac{\Delta E}{h} \cdot \Delta t \geq 1$$

Έτσι παίρνουμε την απροσδιοριστία ανάμεσα σε ενέργεια και χρόνο:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

Η ακριβής σχέση είναι και πάλι:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h/2\pi$$

Άρα η ενέργεια ενός σωματιδίου ορίζεται μόνο στα όρια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Δεν μπορείτε να μιλήσετε για την καθορισμένη τιμή ενέργειας ενός σωματιδίου σε ένα *καθορισμένο χρόνο* όπως κάνετε στην κλασική φυσική.

4 Κβαντική Θεωρία Πεδίου

Είδαμε νωρίτερα πως οι επιστήμονες ένωσαν άβολα στην ιδέα της «εξ αποστάσεως δράσης» σε σχέση με δυνάμεις, όπως οι βαρυτικές ή οι μαγνητικές. Για να είναι επιστημονικά ορθή αυτή η "εξ αποστάσεως δράση", εισήγαγαν την έννοια του **πεδίου**. Τα κλασικά πεδία, όπως το ηλεκτρομαγνητικό και το βαρυτικό **πεδίο**, θεωρούνται ως "διαμεσολαβητές" των δυνάμεων (ή μάλλον της ενέργειας). Στην κβαντική θεωρία, άλλωστε, τα υλικά κύματα (τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως υλικό πεδίο) μεταφέρουν την ενέργεια και η ιδέα του «διαμεσολαβητή» **ενέργειας** παραμένει αλλά εφαρμόζεται και στην ίδια την ύλη, γεγονός μάλλον απροσδόκητο.

Βασικά, οι φυσικοί ανέπτυξαν μια **κβαντική θεωρία πεδίου** από την οποία προκύπτουν όλα όσα μπορούμε να παρατηρήσουμε στη φύση: ύλη και δυνάμεις. Σε σύγκριση με τα κλασικά πεδία (όπως τα βαρυτικά ή τα κλασικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία) τα *κβαντικά πεδία* μπορούν να εκλύουν ενέργεια μόνο σε διακριτά πακέτα ή αλλιώς «κβάντα».

Τα κβαντικά πεδία ορίζονται, όπως τα κλασικά πεδία, σε όλα τα σημεία του χώρου. Μπορούν να μεταβάλλονται στον χρόνο όπως τα κύματα, και κατ' αυτόν τον τρόπο διαδίδονται.



Για παράδειγμα, ένα **φωτόνιο** μπορεί να δημιουργηθεί ως το κβάντο ενός **ηλεκτρομαγνητικού πεδίου**. Αλλά και η ίδια η ύλη, όπως τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια, είναι κβάντα παλλόμενων υλικών πεδίων. Για παράδειγμα, όλα τα σωματίδια που έχουν μετρηθεί στους επιταχυντές σωματιδίων, όπως το CERN στη Γενεύη, προβλέπονται από την κβαντική θεωρία πεδίου.

Στην μοντέρνα εκδοχή της κβαντικής θεωρίας πεδίου, ακόμα και οι δυνάμεις (Θυμηθείτε, με δράση εξ' αποστάσεως!) αντιμετωπίζονται ως το αποτέλεσμα ανταλλαγής ενεργειακών κβάντων ανάμεσα σε πεδία.

Ωστόσο υπάρχουν ακόμα μερικά προβλήματα: Το βαρυτικό πεδίο δεν μπορεί να εξηγηθεί στα πλαίσια της κβαντικής θεωρίας πεδίου. Η βαρύτητα αντιμετωπίζεται επομένως σαν ένα απλό κλασικό πεδίο, ακόμη και στην γενική σχετικότητα του Einstein. Οι φυσικοί ψάχνουν εδώ και 100 χρόνια για μια θεωρία κβαντικής βαρύτητας. Όλοι ελπίζουν ότι η πειραματική επιβεβαίωση της ύπαρξης του μποζονίου Brout-Englert-Higgs τον Ιούλιο του 2012, θα

δώσει μία καλύτερη οπτική στο θέμα αυτό (για το θέμα αυτό απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ για τον Βέλγο Francois Englert και τον Σκωτσέζο Peter Higgs το 2013). Η νέα φυσική μπορεί να εμφανιστεί όταν ψάχνουμε για φαινόμενα που δεν έχουμε ακόμη κατανοήσει όπως η σκοτεινή ύλη και η σκοτεινή ενέργεια.

Μόνο το μέλλον θα δείξει σε ποιές ιδέες και εν τέλει εφαρμογές θα οδηγήσουν όλα αυτά.



Εικόνα 2 Ο Francois Englert και ο Peter Higgs μετά την πειραματική επιβεβαίωση του μποζονίου Brout-Englert-Higgs τον Ιούλιο του 2012 στο Cern. Και οι δύο τιμήθηκαν με το βραβείο νόμπελ φυσικής τον Δεκέμβριο του 2013 για την πρόβλεψη αυτού του κβάντο στο πεδίο BEH, το οποίο είχαν προτείνει ήδη από τη δεκαετία του 1960. (Πηγή CERN, Γενεύη)

5 Έννοιες στον Σταθμό Μάθησης IV

Ολοκληρώστε προσθέτοντας τις έννοιες που λείπουν

Κλασσικές έννοιες:

Η ορμή είναι μια κλασσική ιδιότητα της

Το μήκος κύματος είναι μια κλασσική ιδιότητα των

Η έννοια του πεδίου ως «διαμεσολαβητή» των δυνάμεων.

Η θέση και η ταχύτητα των σωματιδίων είναι

Κβαντικές έννοιες:

Η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μπορεί να εμφανιστεί μόνο σε Η ενέργεια του φωτός δεν μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς, αλλά μόνο σε, που καλούνται

Το φως έχει κυματο-σωματιδιακή φύση.

..... είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό του φωτός και της ύλης.

Η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι κβαντισμένη. Το μέγεθος των ενεργειακών πακέτων του πεδίου (τα φωτόνια) μπορεί να υπολογιστεί με τη σχέση των Planck-Einstein: $E = h \cdot f$, όπου το f είναι

Η υπόθεση του De Broglie συνδέει την σωματιδιακή και την κυματική φύση της ύλης: $\lambda = h/mv$, όπου το λ είναι και m η

Κβαντική θεωρία πεδίου: τα κβαντικά πεδία μπορούν να δώσουν ενέργεια σε

Το φωτόνιο μπορεί να δημιουργηθεί ως το κβάντο ενός.....

Η ύλη, όπως τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια, είναι κβάντα ενός ταλαντούμενου

Το διακριτό διαμόρφωμα συμβολής ενός πειράματος διπλής οπής είναι στην πραγματικότητα η εικόνα της ότι ένα ενεργειακό πακέτο (κβάντο) ελευθερώνεται από το (ηλεκτρομαγνητικό ή υλικό) πεδίο.

Ιδιότητες των σωματιδίων όπως η θέση και η ταχύτητα έχουν ενδογενή