

Κβαντική σύμπλεξη (Quantum entanglement).

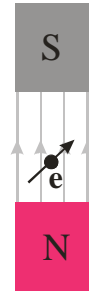
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

εισαγωγή:

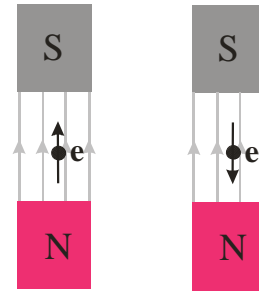
Το spin του ηλεκτρονίου δεν είναι ένα διάνυσμα με την κλασική έννοια του όρου. Για ένα διάνυσμα \vec{a} μπορούμε **ταυτόχρονα** να μετρήσουμε τις τρεις συνιστώσες του στο χώρο $|\vec{a}_x|$, $|\vec{a}_y|$, $|\vec{a}_z|$.

Για το spin όμως μπορούμε να γνωρίζουμε την τιμή του μόνο προς μια ορισμένη κατεύθυνση του χώρου, έστω την xx' (ή μια οποιαδήποτε τυχαία κατεύθυνση), και να μετρήσουμε την πιθανότητα να βρεθεί σε μια άλλη κατεύθυνση. Για παράδειγμα αν το spin του ηλεκτρονίου είναι στον άξονα $+x$ τότε η πιθανότητα για τον άξονα $-x$ είναι μηδέν, ενώ για τον $\pm y$ ή τον $\pm z$ ή οποιοδήποτε άλλο τυχαίο άξονα είναι $\frac{1}{2}$.

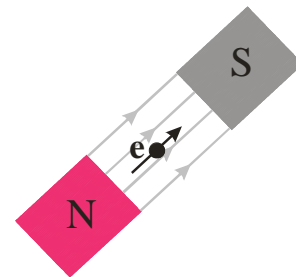
Αν ένα ηλεκτρόνιο τοποθετηθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο με έναν οποιονδήποτε αρχικό προσανατολισμό, τότε αυτό που θα παρατηρήσουμε πειραματικά είναι ότι ή θα εκπεμφθεί ένα φωτόνιο ή δεν θα εκπεμφθεί. Το spin του ηλεκτρονίου είναι λοιπόν ένα ιδιαίτερο διάνυσμα. **Το ηλεκτρόνιο έχει μόνο δυο πιθανές καταστάσεις.** Όπως και να το τοποθετήσουμε το ηλεκτρόνιο μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε μόνο δυο πράγματα μπορούν να συμβούν. Είτε να εκπέμψει είτε να μην εκπέμψει ένα φωτόνιο.



Αν το ηλεκτρόνιο που αρχικά είχε έναν τυχαίο προσανατολισμό, προσανατολιστεί τελικά μέσα στο μαγνητικό πεδίο με το spin του **παράλληλο** με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου τότε δεν εκπέμπει κανένα φωτόνιο. Αν όμως προσανατολιστεί μέσα στο μαγνητικό πεδίο με spin **αντιπαράλληλο** με το μαγνητικό πεδίο τότε σε σύντομο χρονικό διάστημα θα περιστραφεί και θα προσανατολιστεί τελικά παράλληλα με αυτό (περιστροφή κατά 180°) και θα εκπέμψει ένα φωτόνιο μιας καθορισμένης ενέργειας. Άρα το συνολικό φαινόμενο είναι όταν ένα ηλεκτρόνιο τυχαίου προσανατολισμού, τοποθετείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε αυτό να δίνει ένα φωτόνιο αν προσανατολιστεί προς τα κάτω ή να μη δίνει κανένα φωτόνιο αν το spin του δείχνει προς τα πάνω. Δηλαδή έχουμε ένα χώρο δυο καταστάσεων και λέμε ότι το spin είναι ένα **qbit** (quantum bit) δυο καταστάσεων όπου **τίποτα άλλο δεν υπάρχει ενδιάμεσα**. Καμιά άλλη φυσική κατάσταση εκτός από την «πάνω» ή την «κάτω» δεν μπορεί να παρατηρηθεί Αυτό σε αντιδιαστολή με ένα **cbit** (classical bit) όπου έχουμε ένα χώρο όπου το spin θα μπορούσε να δείχνει σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.



Τα «πάνω» ή «κάτω» θα μπορούσαν να αναφέρονται και στον διπλανό προσανατολισμό.



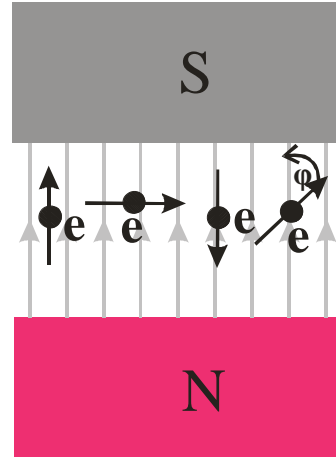
Το σημαντικό πάντως είναι πως με τις ίδιες αρχικές συνθήκες, δηλαδή αν το ίδιο ηλεκτρόνιο τοποθετηθεί με τον ίδιο αρχικό προσανατολισμό μέσα στο μαγνητικό πεδίο, τότε άλλες φορές εκπέμπεται και άλλες φορές δεν εκπέμπεται ένα φωτόνιο. Δηλαδή με τις ίδιες αρχικές συνθήκες δυο πράγματα μπορούν να συμβούν. Δεν είμαστε **βέβαιοι**. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει

στην κλασική φυσική, όπου εκεί με τις ίδιες αρχικές συνθήκες είτε θα βλέπαμε μόνο τη μία είτε μόνο την άλλη κατάσταση πάντα και με **βεβαιότητα**. Αυτές οι κβαντομηχανικές πιθανότητες είναι θεμελιώδεις στη φύση και δεν αναφέρονται σε ατελή γνώση.

κλασική θεώρηση

Σε μια κλασική θεώρηση θα περιμέναμε όταν εφαρμόσουμε ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο τότε το spin του ηλεκτρονίου να προσανατολίζεται σε ελάχιστο χρονικό διάστημα παράλληλα με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (ακτινοβολία). Όμως τότε η ενέργεια που εκπέμπεται θα περιμέναμε να είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι και η γωνία ϕ που σχηματίζει αρχικά το spin με τις δυναμικές γραμμές.

Έτσι αν το spin είναι παράλληλο με το μαγνητικό πεδίο τότε θα περιμέναμε να μην εκπέμπεται καθόλου ακτινοβολία αν πάλι σχηματίζει γωνία 90° έχουμε εκπομπή ακτινοβολίας και τέλος αν σχηματίζει αρχικά γωνία 180° περιμένουμε να εκπέμπεται η μέγιστη ακτινοβολία κ.ο.κ. Έτσι μπορούμε να βρούμε μέσα από αυτόν τον κλασικό τρόπο σκέψης μια **συνεχή συνάρτηση** που θα συνδέει την εκπεμπόμενη ακτινοβολία με τη γωνία που σχηματίζει αρχικά το spin του ηλεκτρονίου με το μαγνητικό πεδίο. Κάτι τέτοιο όμως πειραματικά δεν παρατηρείται.

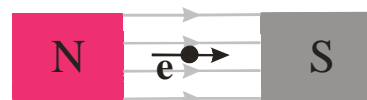


κβαντική θεώρηση

Προχωράμε λοιπόν στην κβαντική θεώρηση μέσα από την πειραματική διαπίστωση ότι για το spin του ηλεκτρονίου έχουμε μόνο δυο καταστάσεις. Δηλαδή όπως και να το τοποθετήσουμε αρχικά μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε μόνο δυο πράγματα μπορούν να συμβούν. Είτε να εκπέμψει είτε να μην εκπέμψει ένα φωτόνιο (ακτινοβολία). Η ενέργεια του φωτονίου της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είτε θα έχει την τιμή μηδέν είτε θα έχει μια πλήρως καθορισμένη ενέργεια για το συγκεκριμένο μαγνητικό πεδίο ανεξάρτητη από τη γωνία που σχημάτιζε αρχικά το spin του με αυτό.

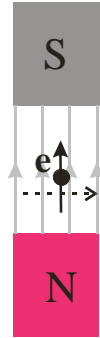
Μπορούμε δηλαδή να μιλάμε πλέον μόνο με **πιθανότητες**. Θα εκπέμψει ή όχι το ηλεκτρόνιο ένα φωτόνιο; Το **βέβαιο** είναι πως αν τοποθετήσουμε το ηλεκτρόνιο αρχικά με spin παράλληλο με το μαγνητικό πεδίο η πιθανότητα να εκπέμψει ένα φωτόνιο είναι **μηδέν** ή έστω πάρα πολύ μικρή, ενώ αν το η ηλεκτρόνιο τοποθετηθεί αρχικά στο μαγνητικό πεδίο με το spin του αντιπαράλληλο με τις δυναμικές γραμμές τότε έχουμε τη **μέγιστη** πιθανότητα να εκπέμψει ένα φωτόνιο, γιατί σίγουρα το ηλεκτρόνιο είναι προς τα κάτω και το μαγνητικό πεδίο προς τα πάνω. Τι θα γίνει όμως αν τοποθετήσουμε το ηλεκτρόνιο με το spin του κάθετο στις δυναμικές γραμμές;

Έστω λοιπόν ότι προετοιμάζουμε ένα ηλεκτρόνιο με ένα οριζόντιο μαγνητικό πεδίο και στη συνέχεια το τοποθετούμε σε ένα κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο.



Τότε έχουμε 50% πιθανότητα να εκπέμψει ένα φωτόνιο και 50% πιθανότητα να μην εκπέμψει.

Αν με το που εφαρμόζουμε το κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο το ηλεκτρόνιο προσανατολίζεται στην προς τα «πάνω» κατάσταση δηλαδή παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα, τότε δεν εκπέμπεται καμία ακτινοβολία. Αν όμως με το που τοποθετούμε το αρχικά οριζόντιο ηλεκτρόνιο μέσα στο κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο αυτό προσανατολίζεται στην προς τα «κάτω» κατάσταση τότε θα «θέλει» να γίνει παράλληλο με το μαγνητικό πεδίο και θα εκπέμψει ένα φωτόνιο πάντα με τη μέγιστη ενέργεια και τελικά θα γίνει και πάλι παράλληλο με το μαγνητικό πεδίο.



Άρα το ηλεκτρόνιο (the spin of the electron) με αυτή την έννοια είναι ένα **κβάντουμ bit**. Υπάρχουν μόνο δυο πιθανές καταστάσεις ή δυο πιθανές διαμορφώσεις.

Τι ισχύει για την πιθανότητα αν αρχικά δε σχηματίζει το spin του ηλεκτρονίου γωνία 90^0 , με το μαγνητικό πεδίο αλλά μια τυχαία γωνία; Τότε η πιθανότητα για τη μια ή την άλλη κατάσταση θα είναι πάλι $1/2$;

μαθηματικός formalισμός

... η συνέχεια θα ακολουθήσει...