

Αθανάσιος Χρ. Τζέμος

Φυσικός (B.Sc., M.Sc.)

Υποψήφιος Διδάκτωρ Θεωρητικής Φυσικής

Quantum Spin

Τί είναι το quantum spin?

- Είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα της ύλης που χαρακτηρίζει τα στοιχειώδη σωματίδια, τα σύνθετα σωματίδια και τους ατομικούς πυρήνες.
- Είναι τόσο θεμελιώδης ιδιότητα όσο το φορτίο και η μάζα.
- Είναι βασικό κριτήριο στη διάκριση των κατηγοριών των διαφόρων σωματιδίων.

Το spin είναι ιδιοπεριστροφή?

- Το spin είναι καθαρά κβαντική ιδιότητα και δεν απαντάται στην Κλασική Φυσική.
- Δεν είναι ιδιοπεριστροφή, κάτι που αποδεικνύεται πολύ εύκολα στα πειράματα σκέδασης.
- Είναι σταθερό για ένα συγκεκριμένο σωματίδιο καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του.

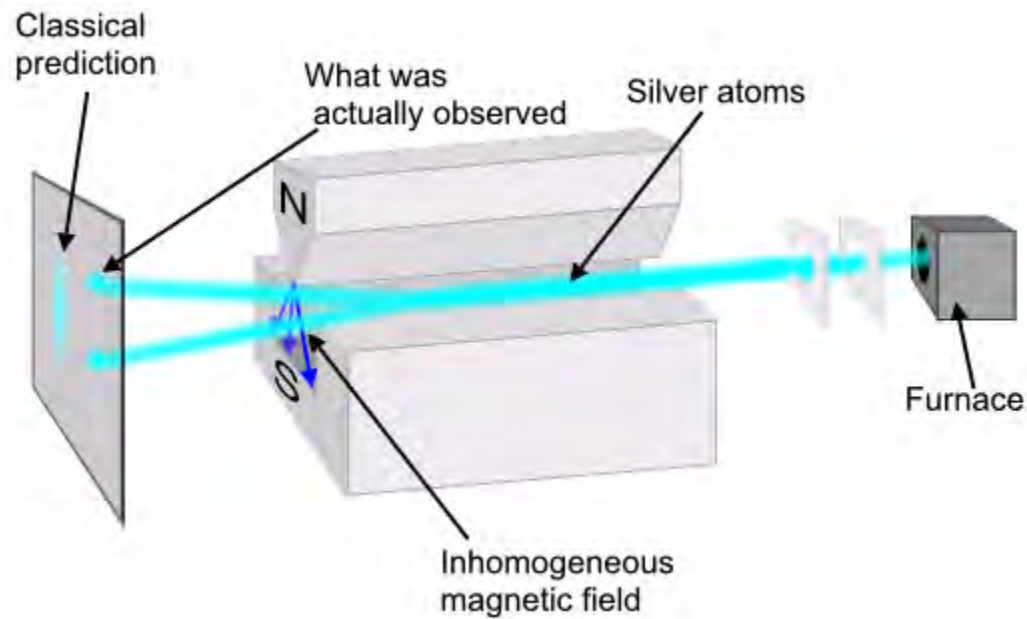
Εσωτερικός Βαθμός Ελευθερίας

- Το spin είναι ένας εσωτερικός βαθμός ελευθερίας, ο οποίος βρίσκεται σε αναλογία με την στροφορμή, εξού και λέμε πολλές φορές «στροφορμή spin».
- Επειδή είναι αφηρημένη ποσότητα, θεωρούμε σαν μηχανικό ανάλογο μια σφαίρα που περιστρέφεται. Το spin είναι είτε «+» (δεξιόστροφη περιστροφή) είτε «-» (αριστερόστροφη περιστροφή)

Διαφορές spin και τροχιακής στροφορμής

- Το S μπορεί να πάρει περιττές ημιακέραιες τιμές, ενώ το L όχι.
- Η διεύθυνση του spin μπορεί να αλλάξει, το μέτρο του όχι.
- Το spin είναι μόνιμο. Υπάρχει ακόμα και όταν δεν έχουμε τροχιακή στροφορμή.
- Το spin είναι ανεξάρτητο απ' τα τροχιακά χαρακτηριστικά του ηλεκτρονίου.

Πείραμα Stern-Gerlach



Πείραμα Stern-Gerlach

- Ατμοί αργύρου εισέρχονται μέσα σε ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο και αποτυπώνονται πάνω σε φωτογραφική πλάκα.
- Τα άτομα του αργύρου έχουν ένα μονήρες ηλεκτρόνιο σθένους το οποίο είναι θωρακισμένο ως προς την πυρηνική έλξη, λόγω των 46 εσωτερικών ηλεκτρονίων. Άρα είναι ιδανικά για τη μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων των ηλεκτρονίων.
- Απ' τη στιγμή που το ηλεκτρόνιο σθένους έχει μηδενική τροχιακή στροφορμή ($l=0$), δεν είναι αναμενόμενη οποιαδήποτε αλληλεπίδραση με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

$$F_z = -\frac{\partial U}{\partial z} = \pm \mu_B \frac{\partial B_z}{\partial z}$$

- Η Κλασική Φυσική μας λέει ότι μια μαγνητική διπολική ροπή θα δεχθεί δύναμη ανάλογη της πεδιακής βαθμίδας, αφού οι δύο «πόλοι» θα βρίσκονται μέσα σε διαφορετικό πεδίο. Αυτό σημαίνει ότι στο φωτογραφικό πέτασμα θα δει κανείς μια συνεχή κηλίδα, λόγω των διάφορων διευθύνσεων.
- Παρά ταύτα, παρατηρήθηκε ένας σαφής διαχωρισμός της δέσμης σε δύο μόνον διευθύνσεις, κάτι που μας οδηγεί στο να δεχτούμε ότι υπάρχουν μόνον δύο διευθύνσεις για τη μαγνητική ροπή του ηλεκτρονίου αυτού.

Ad hoc εισαγωγή του Spin

- Αφού λοιπόν δεν υπάρχει τροχιακή στροφορμή ώστε να παραχθεί μαγνητική διπολική ροπή, πώς εμφανίζεται η τελευταία?
- Το 1925 οι Samuel A. Goudsmit και George E. Uhlenbeck έθεσαν αξιωματικά ότι το ηλεκτρόνιο έχει μια εσωτερική στροφορμή, η οποία δεν εξαρτάται από τα τροχιακά του χαρακτηριστικά και λέγεται στροφορμή spin.
- Με κλασικούς όρους μια φορτισμένη σφαίρα θα είχε μαγνητική ροπή εάν εστρέφετο, έτσι ώστε το περιστρεφόμενο φορτίο να δημιουργούσε έναν effective βρόγχο ρεύματος. Αυτός είναι ο λόγος που αποδώθηκε ο όρος spin στην κβαντική αυτή ιδιότητα της ύλης.

Εξίσωση Dirac $(c\alpha \cdot \hat{p} + \beta mc^2)\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$

- Η θεωρητική θεμελίωση της ύπαρξης του spin ήλθε με τη βοήθεια της σχετικιστικής κβαντομηχανικής.
- Η έρευνα έγινε απ' τον P. Dirac, ο οποίος κατέληξε στην περίφημη εξίσωση που πήρε και το όνομά του.
- Με την εξίσωση του Dirac και την εξίσωση Klein-Gordon άνοιξε ο δρόμος για τη σύγχρονη Κβαντική Θεωρία Πεδίου.

Κβαντική διόρθωση στη μαγνητική διπολική ροπή και παράγων g

- $$\vec{\mu} = g \frac{-e}{2m_e} \vec{L} = -g \mu_B \frac{\vec{L}}{\hbar}$$

$$\vec{\mu}_S = -g_S \mu_B \frac{\vec{S}}{\hbar} \approx \mu_B$$

$$g_S \approx 2.00231930419922 \pm (1.5 \times 10^{-12})$$

Φερμιόνια και Μποζόνια

- Για χώρους με διάσταση $N \geq 3$ τα σωματίδια με ακέραιο spin λέγονται μποζόνια και αυτά με ημιακέραιο spin λέγονται φερμιόνια.
- Τα μποζόνια αφορούν τα σωματίδια που είναι φορείς πληροφορίας-αλληλεπίδρασης της ύλης και των διαφόρων πεδίων.
- Τα φερμιόνια είναι οι δομικοί λίθοι της ύλης.

Πίνακας Φερμιονίων-Μποζονίων

Three Generations
of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson

Gauge Bosons

Απαγορευτική Αρχή Pauli

- Δύο φερμιόνια ενός συστήματος δεν μπορούν ποτέ να έχουν ίδιους και τους 4 κβαντικούς αριθμούς. Δηλαδή δεν μπορούν να βρεθούν στην ίδια ακριβώς κατάσταση.
- Τα μποζόνια δεν υπακούουν στην παραπάνω απαγορευτική αρχή.
- Στην παραπάνω αρχή βασίζεται η δόμηση της ύλης και κατ' επέκτασιν το μέγεθος του Σύμπαντος.

Ανυόνια

- Είναι σωματίδια που εμφανίζονται σε διδιάστατα συστήματα. Αποτελούν γενίκευση των μποζονίων και φερμιονίων.

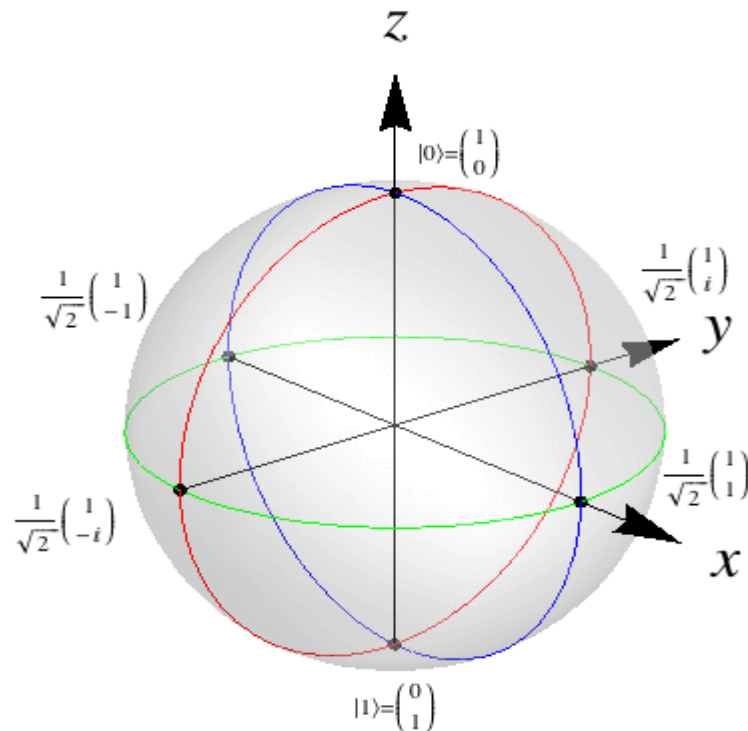
$$|\psi_1\psi_2\rangle = \pm |\psi_2\psi_1\rangle$$

- Σε διδιάστατο χώρο εμφανίζονται σωματίδια που παρουσιάζουν ενδιάμεσες ιδιότητες.

$$|\psi_1\psi_2\rangle = e^{i\theta} |\psi_2\psi_1\rangle$$

Qubit

- Είναι η στοιχειώδης λογική μονάδα πληροφορίας στην Κβαντική Πληροφορική.



Κβαντικοί Υπολογιστές

- Νέα γενιά υπολογιστών, οι οποίοι υπακούουν στους κβαντικούς νόμους της φύσεως και παρουσιάζουν μεγάλα πλεονεκτήματα στην ταχύτητα υπολογισμών και στην ασφάλεια των δεδομένων.
- Η Κβαντική Θεωρία Πληροφορίας αποτελεί τη Θεωρητική Φυσική των επόμενων δεκαετιών, αφού συνδυάζει όλους τους τομείς της Φυσικής, των Μαθηματικών, αλλά και της Πληροφορικής.
- Παρουσιάζονται θεμελιώδη εμπόδια που πρέπει να υπερκεραστούν, τα οποία έχουν να κάνουν με την αλληλεπίδραση ύλης ακτινοβολίας, την ευαισθησία των κβαντικών συστημάτων, αλλά και το θεμελιώδες πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης.

Το spin ως qubit

- Το qubit είναι ένα κβαντικό σύστημα δύο καταστάσεων.
- Η φυσική του αναπαράσταση δεν είναι μοναδική. Πολλά φυσικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως qubits.
- Τα περισσότερα υποψήφια qubits είναι αλυσίδες από spins διαφόρων ειδών.

Υποψήφια qubits

Physical support	Name	Information support	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
Photon	Polarization encoding	Polarization of light	Horizontal	Vertical
	Number of photons	Fock state	Vacuum	Single photon state
	Time-bin encoding	Time of arrival	Early	Late
Coherent state of light	Squeezed light	Quadrature	Amplitude-squeezed state	Phase-squeezed state
Electrons	Electronic spin	Spin	Up	Down
	Electron number	Charge	No electron	One electron
Nucleus	Nuclear spin addressed through NMR	Spin	Up	Down
Optical lattices	Atomic spin	Spin	Up	Down
Josephson junction	Superconducting charge qubit	Charge	Uncharged superconducting island ($Q=0$)	Charged superconducting island ($Q=2e$, one extra Cooper pair)
	Superconducting flux qubit	Current	Clockwise current	Counterclockwise current
	Superconducting phase qubit	Energy	Ground state	First excited state
Singly charged quantum dot pair	Electron localization	Charge	Electron on left dot	Electron on right dot
Quantum dot	Dot spin	Spin	Down	Up

Electronic Spin Resonance

Nuclear Magnetic Resonance

- Τα ESR και NMR είναι δύο ευρύτατα διαδεδομένες τεχνικές, με τις οποίες μπορούμε να μελετήσουμε τις φυσικές ιδιότητες υλικών, αλλά και να εκτελέσουμε βασικούς κβαντικούς υπολογισμούς.
- Χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών, πολλές εκ των οποίων αφορούν την Ιατρική (ανίχνευση καρκινικών ιστών).

Σύνοψη

- Το spin είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα της ύλης, καθαρά κβαντική.
- Η ανακάλυψή του έδωσε νέα ώθηση τόσο στην Θεωρητική όσο και στην Πειραματική Φυσική.
- Είναι απαραίτητο για την κατανόηση του Κόσμου που μας περιβάλλει, αλλά και για τις διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές.
- Η κατανόηση της δομής της ύλης είναι αδύνατη χωρίς το spin. Το μέγεθος του Σύμπαντος δε θα μπορούσε να δικαιολογηθεί.
- Εάν δεν είχαμε καταλάβει σε ικανοποιητικό βαθμό το spin, απλώς δε θα υπήρχε η Ηλεκτρονική Φυσική, με ότι αυτό συνεπάγεται για τη σημερινή τεχνολογία.

Σύνοψη

- Είναι απαραίτητο οι φοιτητές να καταλάβουν την έννοια του spin και να τη διαχωρίσουν από την απλή ιδιοπεριστροφή.
- Το spin και η εντροπία είναι οι πιο ασαφείς έννοιες σε ένα προπτυχιακό πρόγραμμα Φυσικής και από τις πλέον παρεξηγημένες...

Προτεινόμενη Βιβλιογραφία

- Κβαντομηχανική I και II, Στέφανος Τραχανάς (Π.Ε.Κ.)
- Quantum Mechanics, Eugene Merzbacher, Wiley.
- Quantum Field Theory, Mark Srednicki, Oxford Press.
- Relativistic Quantum Mechanics, Armin Wächter, Springer.

Ευχαριστώ πολύ!