ΚΒΑΝΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ

Μια εισαγωγή για το τι είναι που βαασίζονται πως λειτουργούν και σε τι διαφέρουν από του κλασικούς υπολογιστές

Τι είναι ο κβαντικός υπολογιστής

Βασίζονται στις πολύ ιδιαίτερες κβαντικές ιδιότητες του μικρόκοσμου παρέχοντας τη δυνατότητα να αποθηκευτεί τρομακτικός όγκος πληροφορίας. Η πληροφορία αυτή μπορεί να επεξεργαστεί ταχύτατα με παράλληλο τρόπο με την βοήθεια μοναδικών κβαντικών πυλών και πολύ έξυπνων αλγορίθμων. Ανάλογες πύλες και αλγόριθμοι δεν μπορούν να υπάρξουν στους κλασσικούς υπολογιστές. Οι κλασσικοί υπολογιστές όμως δεν θα καταργηθούν, αλλά θα υπάρχουν και θα λειτουργούν συμπληρωματικά με τους κβαντικούς υπολογιστές.

Πως αποθηκεύεται η πληροφορία

Βασίζονται στην αποθήκευση σε μορφή bit και την επεξεργασία της πληροφορίας σε κβαντικές ιδιότητες του μικρόκοσμου, όπως….

...το spin των σωματιδίων όπως ηλεκτρόνιο, πρωτόνιο, ιόντων...

...η ενεργειακή κατάσταση ενός σωματιδίου

..ο τρόπος ταλάντωσης κάποιων σωματιδίων κ.ά...

Πως προσδιορίζεται η πληροφορία και πως επεξεργάζεται η πληροφορία

Βασίζονται στις πολύ ιδιαίτερες ιδιότητες που παρατηρούνται μόνο στο μικρόκοσμο που περιγράφεται από τη κβαντική φυσική.
Οι ιδιότητες αυτές είναι:

Η **κβαντική υπέρθεση** και **συμβολή** και ο **κβαντικός εναγκαλισμός**

Τι είναι το κβαντικό bit

Τι είναι οι κβαντικές πύλες

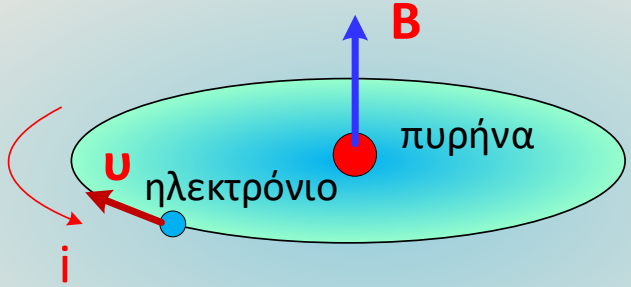
Τα προβλήματα που εμποδίζουν την διάδοση των κβαντικών υπολογιστών.

Τι περισσότερο ή διαφορετικό μπορεί να κάνει ο κβαντικός υπολογιστής σε σχέση με ένα κλασικό υπολογιστή.

Όλα τα παραπάνω θα περιγραφούν στα επόμενες σελίδες.

Τι είναι spin

Περιστρεφόμενο σημειακό φορτίο (ηλεκτρόνιο) γύρω από ένα κέντρο (πυρήνα ατόμου)...

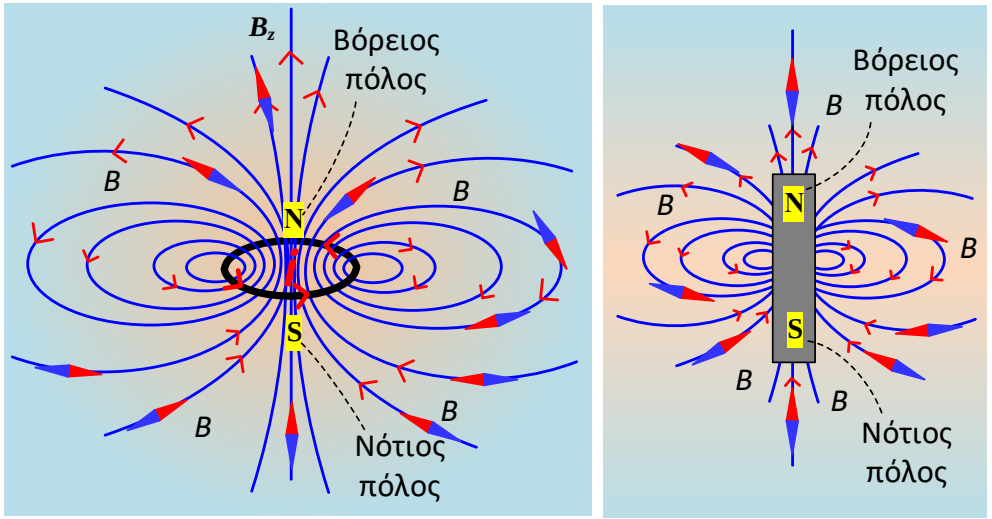


...αντιστοιχεί σε κυκλικό ρεύμα i.

Κάθε κυκλικό ρεύμα παράγει μαγνητικό πεδίο...

Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρεύματος

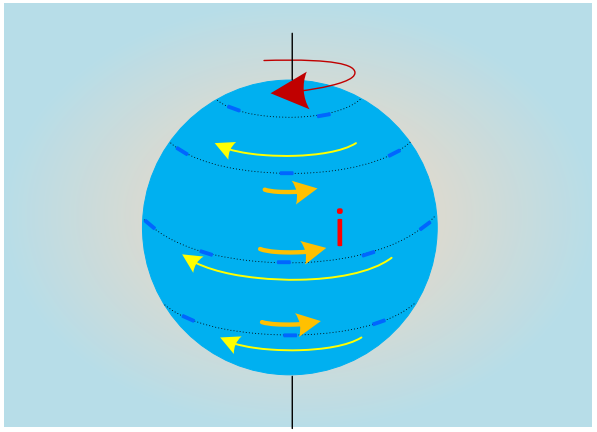
Μαγνητικό πεδίο ραβδόμορφου μαγνήτη



...όπως το μαγνητικό πεδίο ραβδόμορφου μαγνήτη.

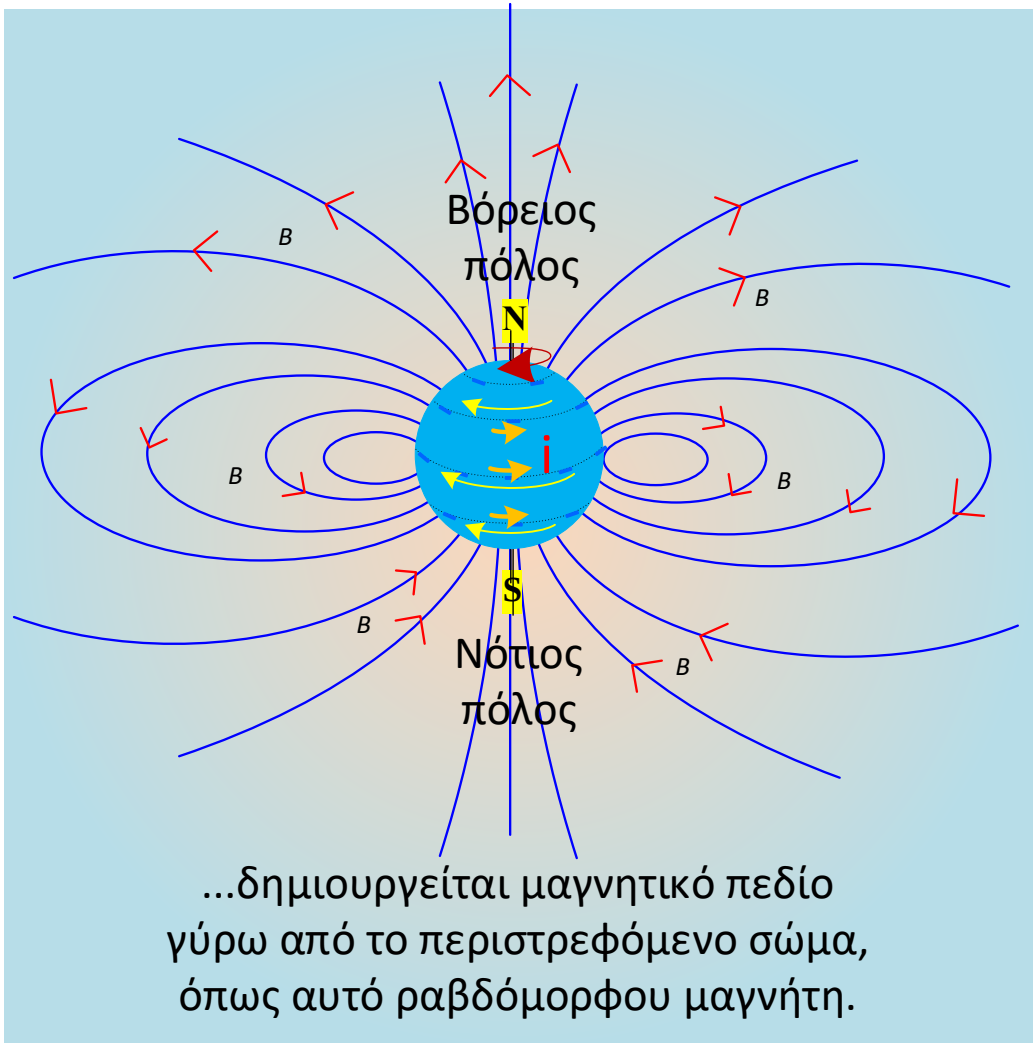
SPIN

Περιστρεφόμενο **φορτισμένο σώμα** γύρω από τον άξονα συμμετρίας του...



...δημιουργούνται κυκλικά ρεύματα i από τα περιστρφόμενα στοιχειώδη φορτία...

...Από τα κυκλικά ρεύματα των φορτίων του περιστρεφόμενου σώματος...



...δημιουργείται μαγνητικό πεδίο γύρω από το περιστρεφόμενο σώμα, όπως αυτό ραβδόμορφου μαγνήτη.

Στοιχειώδη σωματίδια όπως ηλεκτρόνια, πρωτόνια, νετρόνια κ. ά....

....αντιστοιχεί μια ιδιότητα Spin λόγω ιδιοπεριστροφής των παράγοντας μαγνητικό πεδίο όπως τα μακροσκοπικά φορτισμένα μακροσκοπικά σώματα.

Δεν σημαίνει όμως ότι το ηλεκτρόνιο το πρωτόνιο κ.ά. είναι μια περιστρεφόμενη σφαίρα....

....αλλά συμπεριφέρεται όπως τα τα μακροσκοπικά φορτισμένα περιστρεφόμενα σώματα.

....**δεν είναι μια περιστρεφόμενη σφαίρα, αλλά συμπεριφέρεται έτσι**.

Τα στοιχειώδη σωματίδια έχουν μία ιδιότητα που λέγεται spin

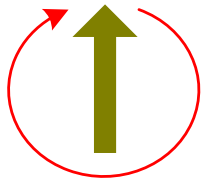
η ιδιότητα αυτή σχετίζεται με το πως φαίνεται το σωμάτιο από διαφορετικές διευθύνσεις στο χώρο

Spin 0

A

το σωματίδιο φαίνεται το ίδιο με οποιαδήποτε περιστροφή

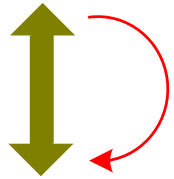
Spin 1



B

το σωματίδιο φαίνεται το ίδιο με περιστροφή κατά 360^o

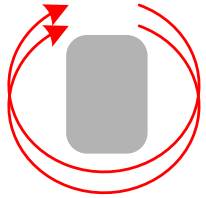
Spin 2



Γ

το σωματίδιο φαίνεται το ίδιο με περιστροφή κατά 180^o

Spin 1/2



Δ

το σωματίδιο φαίνεται το ίδιο με περιστροφή κατά 2 περιστροφές 2×360^o

Όλα τα σωματίδια στο σύμπαν κατατάσσονται σε 2 κατηγορίες

Σωματίδια ύλης με **Spin 1/2**

πρωτόνια, νετρόνια, ηλεκτρόνια, ...

Τα σωματίδια αυτά υπακούουν στην αρχή του Pauli

δεν επιτρέπει σε δύο σωματίδια να ευρίσκονται στην ίδια κατάσταση και να περιγράφονται από την ίδια Ψ.

αλλιώς τα σωματίδια θα κατέρρεαν σε μια κατάσταση μεγάλης πυκνότητας δεν θα σχηματίζονταν καλά ορισμένα πρωτόνια, νετρόνια και διαφορετικά άτομα

Σωματίδια-φορείς αλληλεπίδρασης με **Spin 0, 1 & 2**

φωτόνια, βαρυτόνια, π-μεσόνια, W^+, W^-, Z

τα σωματίδια αυτά ανταλλάσονται μεταξύ των δωματιδίων ύλης παράγονταας τις δυνάμεις (ηλεκτρομαγνητικές, βαρυτικές, ησχυρές & ασθενείς πυρηνικές)

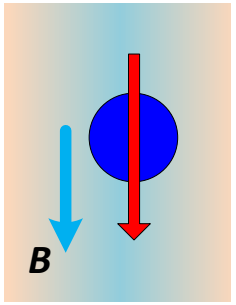
τα σωματίδια αυτά δεν υπακούουν στην αρχή του Pauli

χωρίς αυτή την αρχή δεν θα σχηματιζόταν η τεράστια ποικιλία της ύλης στη φύση

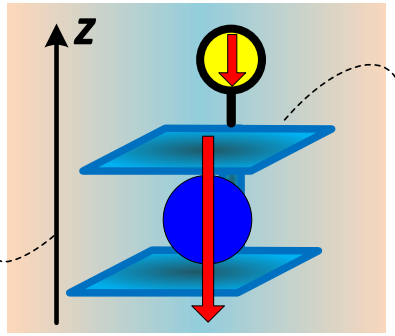
Ιδιότητες μέτρησης του Spin

δεν είναι όπως στη μέτρηση της ιδιοπεριστροφής στη κλασική φυσική, τα κβαντικά φαινόμενα είναι πολύ περίεργα.

Αρχικά το spin βρίσκεται σε μια βασική κατάσταση π.χ. spin κάτω παράλληλα στο μαγνητικό πεδίο ***B***....

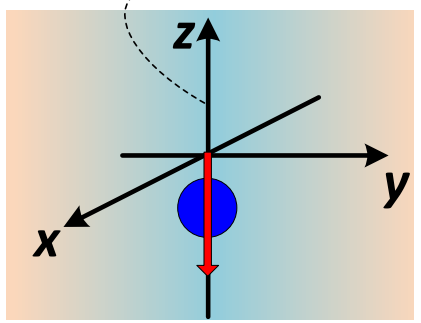


...Στην συνέχεια αν μετρήσουμε το spin στην κατακόρυφη διεύθυνση με τη βοήθεια κατάλληλης μετρητικής συσκευής στη κατακόρυφο διεύθυνση...



Μετρητική συσκευή μέτρησης του spin στη κατακόρυφο διεύθυνση.

... το spin θα το βρίσκουμε στην αρνητική κατακόρυφη διεύθυνση του άξονα *z*...



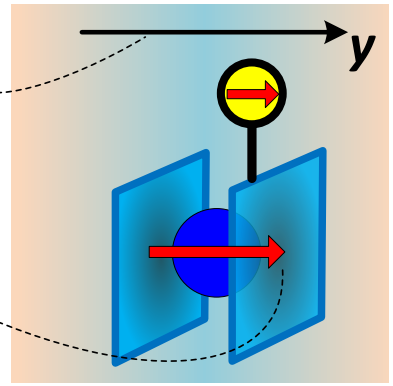
...**Αυτό δεν σημαίνει πως οι συνιστώσες του spin στις άλλες διευθύνσεις των αξόνων *y* και *z* είναι μηδέν**.

Στην κβαντική φυσική αυτό δεν συμβαίνει.

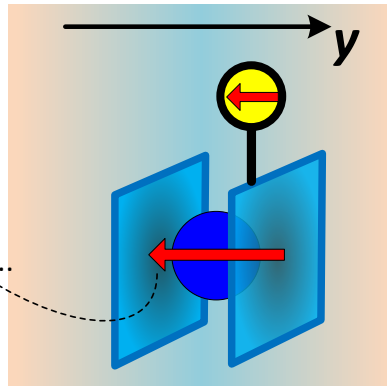
... δηλαδή το spin Βρίσκεται σε υπέρθεση δύο καταστάσεων του spin δεξιά (spin πάνω) και τις άλλες μισές φορές προς τα αρνητικά του άξονα *y* (spin κάτω).

Με τη μέτρηση του spin καταστρέφεται η υπέρθεση δύο καταστάσεων του spin δεξιά (spin πάνω) δηλ. συμβαίνει κατάρρευση της κυματοσυνάρτηση της υπέρθεσης και μετρείται μια από τις δύο συνιστώσες της υπέρθεσης (spin Πάνω ή κάτω.

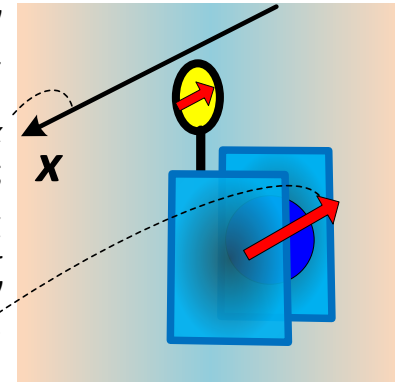
Για παράδειγμα αν μετρήσουμε το spin στη διεύθυνση του άξονα *y* θα το βρουμε τις μισές φορές προς τα θετικά του άξονα *y* που μπορεί να αντιστοιχεί στην κατάσταση spin επάνω....



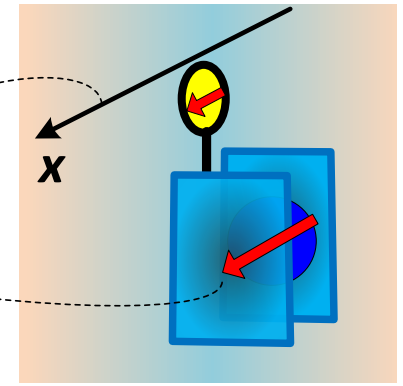
... και τις άλλες μισές φορές προς τα αρνητικά του άξονα *y* που μπορεί να αντιστοιχεί στην κατάσταση spin κάτω....



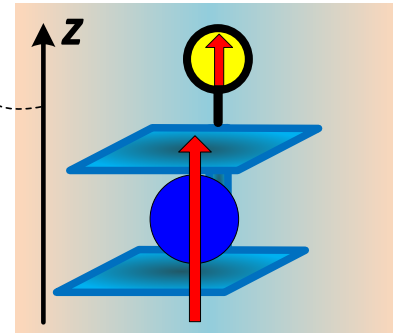
Παρόμοια συμβαίνουν αν επιλέξουμε να μετρήσουμε το spin στη διεύθυνση του άξονα *x* θα το βρούμε τις μισές φορές προς τα αρνητικά του άξονα *x* που μπορεί να αντιστοιχεί στην κατάσταση spin επάνω....



... και τις άλλες μισές φορές προς τα θετικά του άξονα *x* που μπορεί να αντιστοιχεί στην κατάσταση spin κάτω....



...Τέλος αν μετρήσουμε το spin ξανά στην κατακόρυφη διεύθυνση δεν θα τη βρούμε απαραίτητα και πάλι την αρχική θέση, γιατί η πληροφορία έχει χαθεί πλέον.



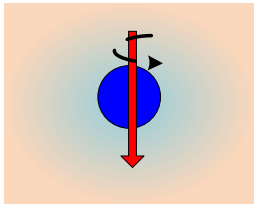
Spin ως κβαντικό bit qubit

Η ιδιότητα των σωματιδίων του μικρόκοσμου (ηλεκτρόνια, πρωτόνια, νετρόνια κ.ά) να παράγουν μικροσκοπικό μαγνητικό πεδίο λόγω spin (ιδιοπεριστροφής) αξιοποιείται για να αποθηκευτεί η πληροφορία σε μορφή bit...

Για παράδειγμα το spin ηλεκτρονίου ή το spin πυρήνων ατόμων μπορεί να είναι είτε:

...κάτω down spin..

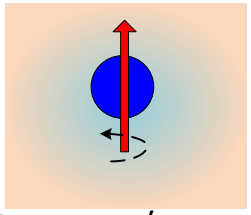
...και να αντιστοιχεί σε...



...bit στη κατάσταση 0

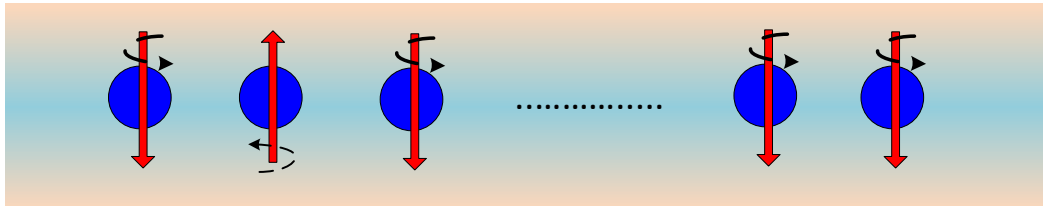
...επάνω up spin..

...και να αντιστοιχεί σε...



bit στη κατάσταση 1

Δημιουργώντας αλληλουχία τέτοιων σωματιδίων με κατάλληλο προσανατολισμό του spin των επάνω ή κάτω….



0 1 0 ……. 0 0

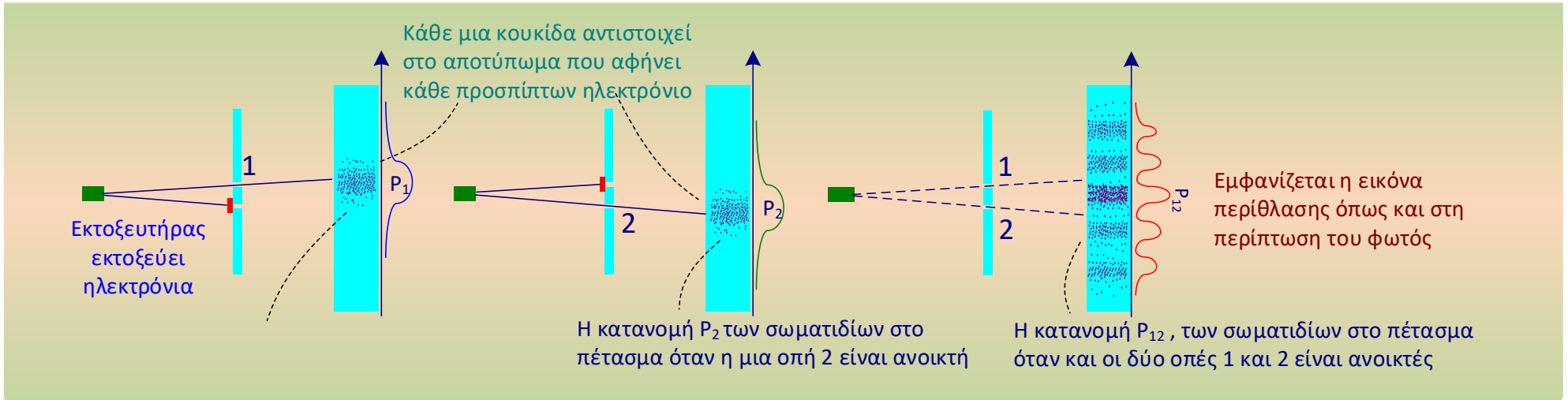
μπορούμε να αποθηκευτούν πληροφορίες σε μορφή **byte** σε κατάλληλους **καταχωρητές.** Στη συνέχεια αυτές οι πληροφορίες μετά να επεξεργαστούν με κατάλληλες **κβαντικές πύλες** και να εξαχθούν αποτελέσματα σε μορφή αλληλουχίας spin και να διαβαστούν με κατάλληλο τρόπο.

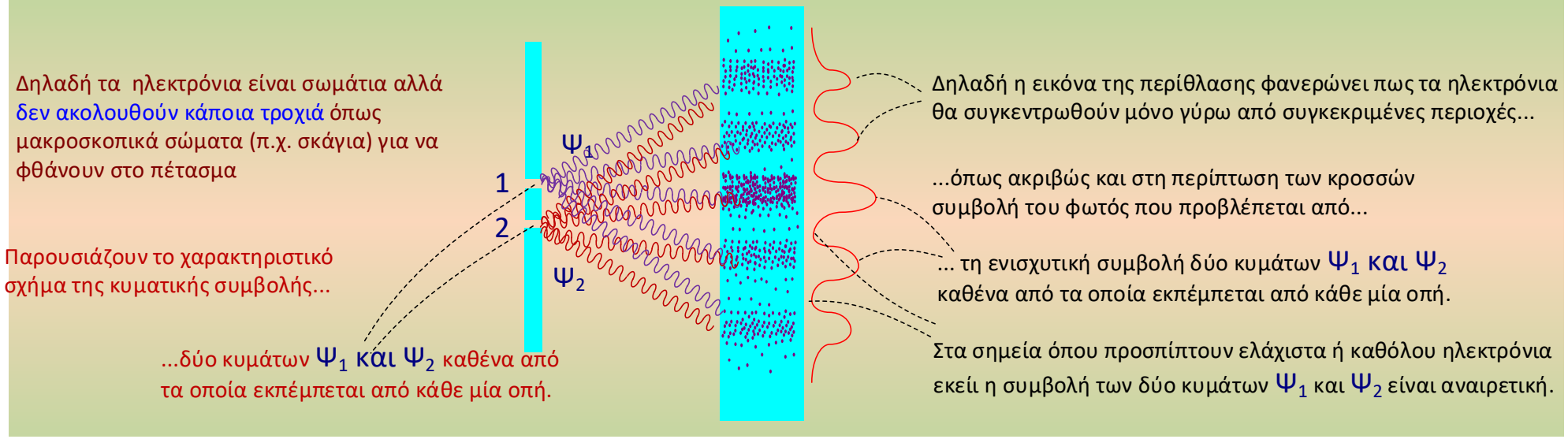
Όμως αυτή η διαδικασία όσο απλά περιγράφηκε είναι μια εντελώς διαφορετική διαδικασία από αυτή που υλοποιείται στους κλασσικούς υπολογιστές.

Για αυτό το λόγο είναι ένα εξαιρετικά δύσκολο τεχνολογικό εγχείρημα και πρόκληση για να πραγματοποιηθεί.

Οι ιδιότητες των σωματιδίων του μικρόκοσμου, όπως το spin κ.ά., σαν bit υπόκεινται σε 3 πολύ ιδιαίτερες ιδιότητες τη κβαντικής φυσικής στο μικρόκοσμο οι οποίες προσδίδουν τρομακτικές ιδιαίτερες δυνατότητες στην αποθήκευση και παράλληλη επεξεργασία της πληροφορίας. Οι δυνατότητες αυτές ανύπαρκτες και αδιανόητες για τους κλασσικούς υπολογιστές.

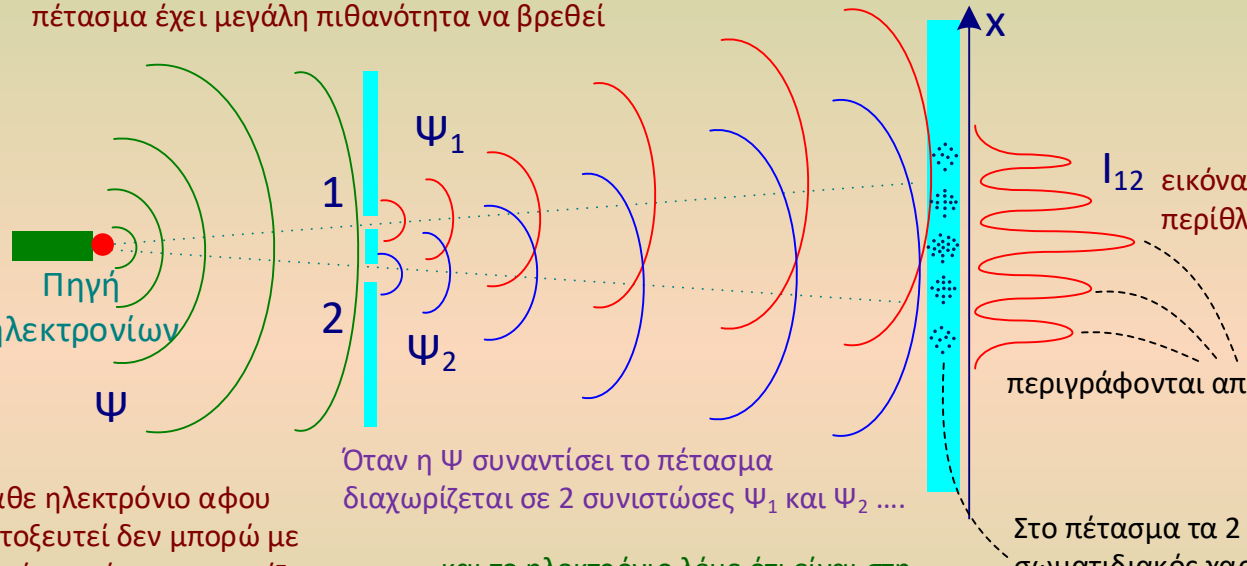
Οι 2 από τις 3 κβαντικές ιδιότητες είναι: η **κβαντική υπέρθεση** και **συμβολή**





Ακόμα κι αν τα ηλεκτρόνια εκτοξεύονται ένα-ένα, ανά μεγάλα χρονικά διαστήματα π.χ. ανά μία ώρα, τότε πάλι παίρνουμε την εικόνα περίθλασης….

…τότε η κυματοσυνάρτηση Ψ_{12} του ηλεκτρονίου αποτελούμενη από την **υπέρθεση** των συνιστουσών κυμάτων Ψ_1 και Ψ_2 κατόπιν της **συμβολής** τους καθορίζει σε ποια θέση στο πέτασμα έχει μεγάλη πιθανότητα να βρεθεί



Όταν η Ψ συναντίσει το πέτασμα διαχωρίζεται σε 2 συνιστώσες Ψ_1 και Ψ_2 ….

Κάθε ηλεκτρόνιο αφου εκτοξευτεί δεν μπορώ με κανένα τρόπο να γνωρίζω τη ακριβή θέση του, όμως το ηλεκτρόνιο συμπεριφέρεται σα κύμα και όχι σαν σωμάτιο και περιγράφεται από τη κυματοσυνάρτησή του Ψ η οποία επεκτείνεται σε όλο το χώρο

…και το ηλεκτρόνιο λέμε ότι είναι στη υπέρθεση 2 καταστάσεων Ψ_1 και Ψ_2 ….

..δεν μπορώ γνωρίζω αν το ηλεκτρόνιο πέρασε από τη μια ή ητην άλλη σχισμή ή αν πέρασε και από τις 2!!!

Το ηλεκτρόνιο στο δρόμο του προς το πέτασμα είναι κύμα και όχι σωματίδιο, δηλ. το ηλεκτρόνιο ως κύμα και και όχι ως σωμάτιο.πέρασε και από τις 2 σχισμές

Όταν δεν γνωρίζουμε σε ποιο από τις δύο ενεργειακές στάθμες βρίσκεται το ηλεκτρόνιο, λέμε ότι το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε **υπέρθεση** των καταστάσεων Ψ_1 και Ψ_2 γράφουμε

$$\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$$

Όπου οι συντελεστές c_1 και c_2 $\quad |c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$

με πιθανότητα $|c_1|^2$ το ηλεκτρόνιο να περνάει από την οπή 1 και πιθανότητα $|c_2|^2$ να περνά από την οπή 2.

περιγράφονται από το **πλάτος** του συνιστάμενου κύματος από τη συμβολή των 2 κυμάτων

$$|\Psi_{12}|^2 = |\Psi_1| + |\Psi_2|^2$$

Στο πέτασμα τα 2 κύματα αλληλεπιδρούν με το πέτασμα και τότε αποκαλύπτεται ο σωματιδιακός χαρακτήρας του ηλεκτρονίου αφήνοντας ένα αποτύπωμα σε μια τυχαία θέση από τις θέσεις όπου η ένταση $I_{12}=|\Psi_{12}|^2$ της συμβολής των 2 κυμάτων έχει μέγιστο

Όταναποκαλύπτεται ο σωματιδιακός χαρακτήρας του ηλεκτρονίου αφήνοντας ένα αποτύπωμα σε μια τυχαία θέση από τις θέσεις μεγίστου που ορίζει η ένταση $I_{12}=|\Psi_{12}|^2$ της συμβολής των 2 κυμάτων τότε λέμε ότι έχουμε

κατάρευση της κυματοσυνάρτησης

η έννοια αυτή εξηγείται καλύτερα παρακάτω.

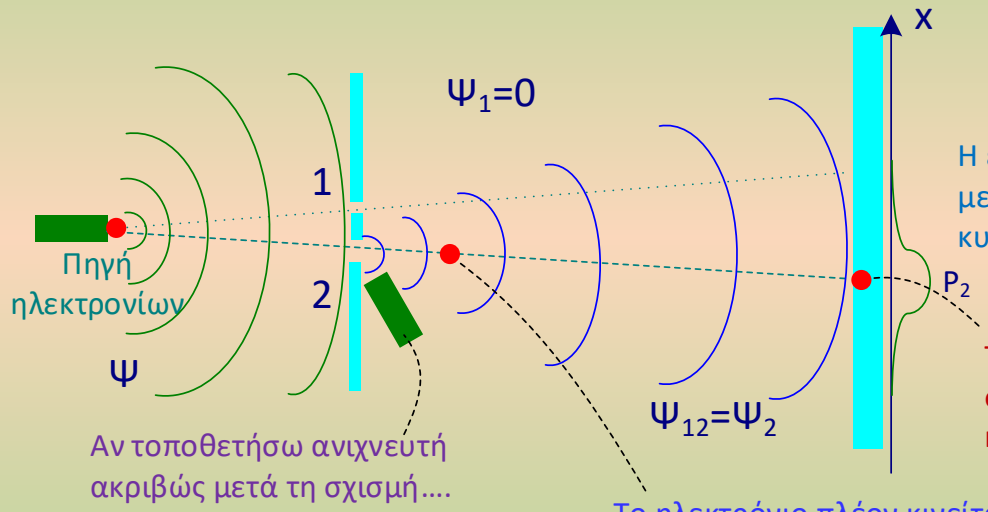
Πως μετρούμε τα σωματίδια στο μικρόκοσμο -διαδιακσία της μέτρησης

Κατ' επέκταση πως μετρούμε τη κατάσταση του spin ως αποτελέσματα των κβαντικών υπολογισμών στους κβαντικούς υπολογιστές.

Τι συμβαίνει με τη διαδικασία της μέτρησης?

Πως μπορεί να βρεθεί η θέση ενός ηλεκτρονίου;
Αυτό απαιτεί αλληλεπίδραση της κυματοσυνάρτισης του ηλεκτρονίου π.χ. με έναν ανιχνευτή που είναι ένα μακροσκοπικό αντικείμενο, αυτή μπορεί να είναι μια μακροσκοπική μετρητική συσκευή (ανιχνευτής).

Ανίχνευση ηλεκτρονίου από ανιχνευτή **συνιστά μέτρηση**



Η εικόνα της περίθλασης θα έχει καταστραφεί με το που αλληλεπίδρασε ο ανιχνευτής με τη κυματοσυνάρτηση του ηλεκτρονίου.

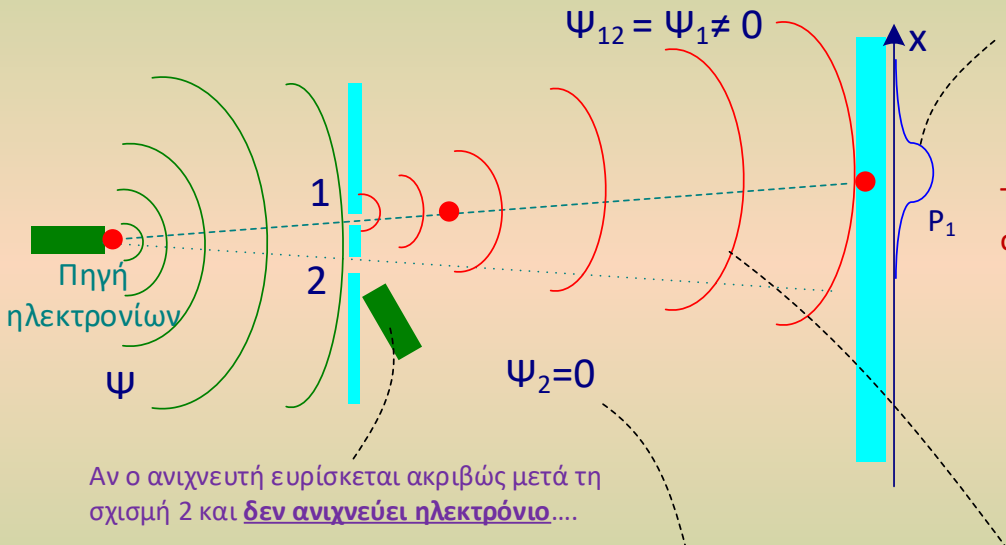
Το ηλεκτρόνιο θα ταξιδέψει σαν σωμάτιο και θα φθάσει στη περιοχή απέναντι από τη σχισμή 2 όπως και όταν σχισμή 1 ήταν κλειστή και η εικόνα της συμβολής θα έχει καταστραφεί.

…Το ηλεκτρόνιο πλέον κινείται σαν σωμάτιο και όχι σαν κύμα…

…τότε η κυματοσυνάρτιση του ηλεκτρονίου αλληλεπιδρά με τον ανιχνευτή και έχουμε κατάρευση της κυματοσυνάρτησης σε
$\Psi_1=0$ και $\Psi_2 \neq 0$
έτσι το ηλεκτρόνιο δεν είναι πλέον στη υπέρθεση 2 καταστάσεων Ψ_1 και Ψ_2
αλλά είναι πλέον $\Psi_{12} = \Psi_2$….

..αφού αποκαλύπτεται ότι το ηλεκτρόνιο πέρασε μόνο από τη σχισμή 2, παύει να υπάρχει σε υπέρθεση 2 καταστάσεων και έτσι συμπεριφέρεται πλέον σαν σωμάτιο. Άρα $\Psi_1=0$ και $\Psi_{12}=\Psi_2$

Μη ανίχνευση ηλεκτρονίου από ανιχνευτή πάλι **συνιστά μέτρηση**



Η εικόνα της περίθλασης θα έχει καταστραφεί με το που αλληλεπίδρασε ο ανιχνευτής με τη κυματοσυνάρτηση του ηλεκτρονίου.

Το ηλεκτρόνιο θα ταξιδέψει σαν σωμάτιο και θα φθάσει στη περιοχή απέναντι από τη σχισμή 1 όπως και όταν σχισμή 1 ήταν κλειστή και η εικόνα της συμβολής θα καταστραφεί

Αν ο ανιχνευτή ευρίσκεται ακριβώς μετά τη σχισμή 2 και **δεν ανιχνεύει ηλεκτρόνιο**….

..αφού αποκαλύπτεται ότι το ηλεκτρόνιο **δεν πέρασε από την 2** αλλά **πέρασε από τη 1**, παύει να υπάρχει σε υπέρθεση 2 καταστάσεων και έτσι συμπεριφέρεται πλέον σαν σωμάτιο. Άρα $\Psi_2=0$ και $\Psi_{12}=\Psi_1$

Κατά τη μέτρηση

Με την αλληλεπίδραση της κυματοσυνάρτισης του ηλεκτρονίου, π.χ. με έναν ανιχνευτή,

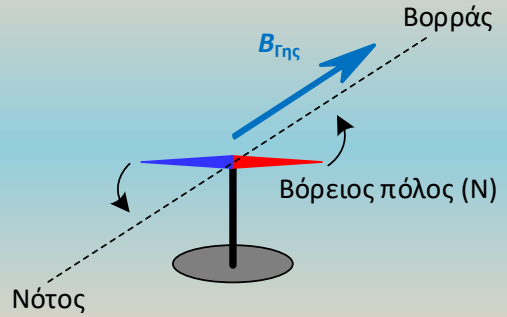
η κυματοσυνάρτηση Ψ παύει να υπάρχει σε **υπέρθεση καταστάσεων** γενικά ως Ψ_1, Ψ_2, Ψ_3 …… $\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2 + c_3\Psi_3 + \ldots$

και λέγεται πως συμβαίνει **κατάρευση της κυματοσυνάρτησης** Ψ σε μία από τις Ψ_i $\Psi = c_i\Psi_i$

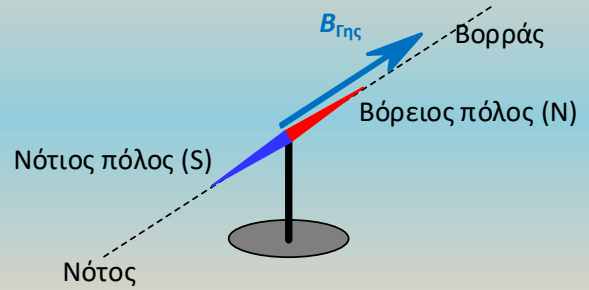
Μαγνητική βελόνα σε μαγνητικό πεδίο

Για να κατανοήσουμε το spin (ηλεκτρονίου) θα εξετάσουμε τη μαγνητική βελόνα μέσα στο μαγνητικό πεδίο της Γης $\boldsymbol{B}_{\Gamma\eta\varsigma}$ ...

Ένα spin (ηλεκτρονίου) αν και είναι κάτι εντελώς διαφορετικό, μοιάζει με τη μαγνητική βελόνα. Αυτή μέσα σε μαγνητικό πεδίο $\mathbf{B}_{\Gamma\eta\varsigma}$ ...

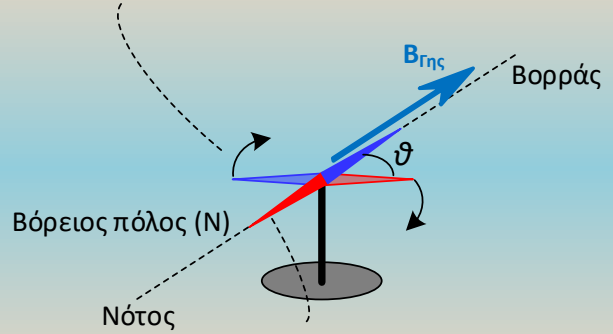


...προσανατολίζεται παράλληλα σε αυτό, όπου και ισορροπεί.



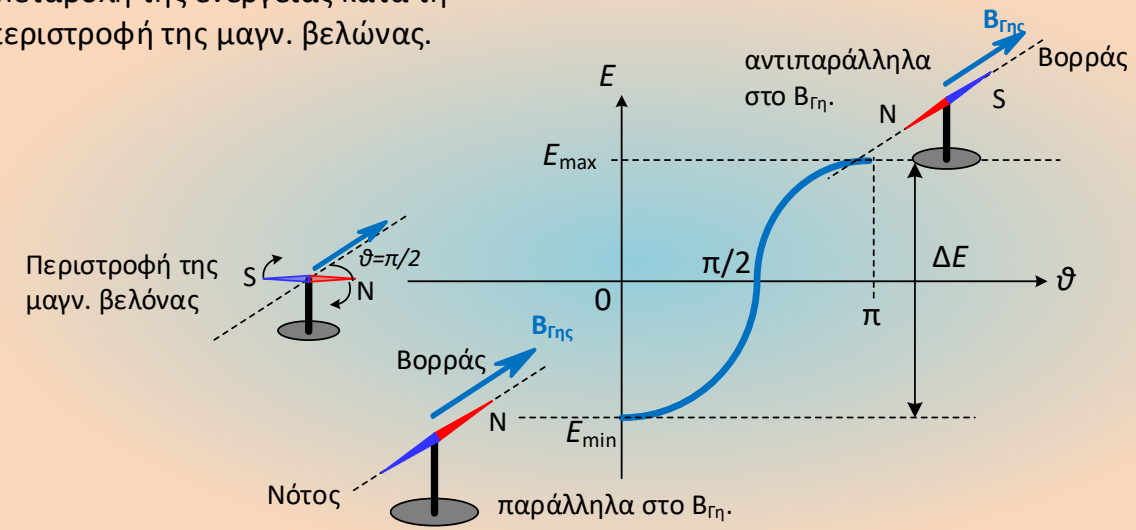
Κατάσταση ελάχιστης ενέργειας E_{min}

Ασκώντας ροπή και καταναλώνοντας ενέργεια μπορούμε να περιστρέψουμε τη βελώνα...



...στην αντίθετη κατεύθυνση από το $B_{\Gamma\eta\varsigma}$ η οποία είναι κατάσταση μέγιστης ενέργειας E_{max}

Μεταβολή της ενέργειας κατά τη περιστροφή της μαγν. βελώνας.



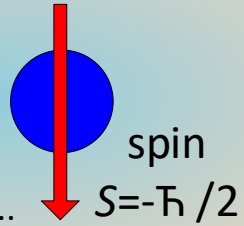
Πως θέτουμε ένα spin (πχ ηλεκτρονίου) σε μια θεμελιώδη κατάσταση κατάσταση 0 ή κατάσταση 1

Όπως η μαγνητική βελόνα έτσι και το spin ενός ηλεκτρονίου...

...μέσα σε ένα ασκούμενο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο **B**...

...έχει δύο δυνατότητες προσανατολισμού...

...προσανατολίζεται παράλληλα με το B...

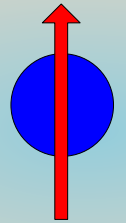


spin
$S=-\hbar/2$

...με spin κάτω ...

B

...ή αντιπαράλληλα...



...ή με το spin επάνω...

spin
$S=+\hbar/2$

Θεμελιώδης ή βασική **κατάσταση 0**

Θεμελιώδης ή βασική **κατάσταση 1**

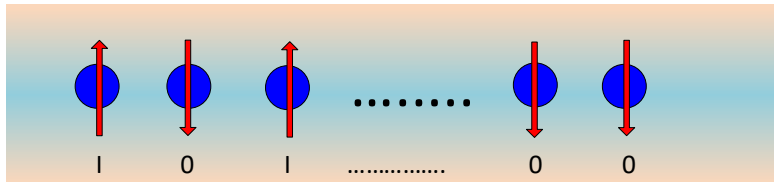
...συμβολίζεται με διανύσμα

Υιοθετώντας το συμβολισμό Dirac... ket ως $|0>$

...συμβολίζεται με διανύσμα

ket ως $|1>$

Έτσι με με αλληλουχίες τηλεκτρονίων με spin επάνω (I) και spin κάτω (0) μπορούμε να κωδικοποιήσουμε πληροφορίες στους κβαντικούς υπολογιστές.



Όμως αυτή η δυνατότητα **μόνο δεν θα προσέδιδε στους κβαντικούς υπολογιστές κάτι πολύ ξεχωριστό** από τους κλασσικούς υπολογιστές,

...παρά μόνο θα παρείχε την δυνατότητα αποθήκευσης περισσότερων bit σε πολύ μικρές διαστάσεις.

Όμως για την εγγραφή πληροφορίας στους κβαντικούς υπολογιστές χρησιμοποιούμε άλλη μια ιδιότητα του κβαντικού κόσμου την έννοια της **κβαντικής υπέρθεσης**...

...αυτή η ιδιότητα προσδίδει στους κβαντικούς υπολογιστές τεράστιες δυνατότητες αποθήκευσης και παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων που δεν υπάρχει αντίστοιχη λειτουργία στους κλασικούς υπολογιστές .

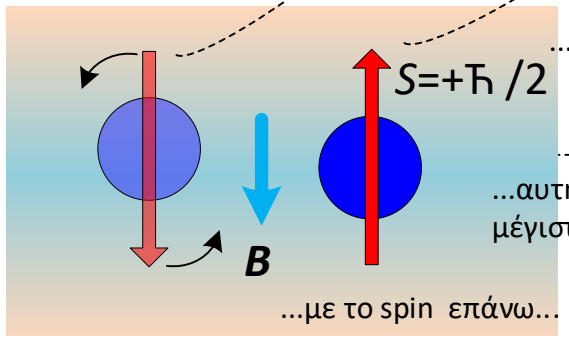
Πως παράγεται η **κβαντική υπέρθεση** στα spin ηλεκτρονίων, πρωτονίων, νετρονίων

Δυνατότητα περιστροφής στο spin

Προσφέροντας την κατάλληλη επιπλέον ενέργεια ΔΕ το spin μπορεί να περιστραφεί στην αντίθετη κατεύθυνση από το ***B*...**

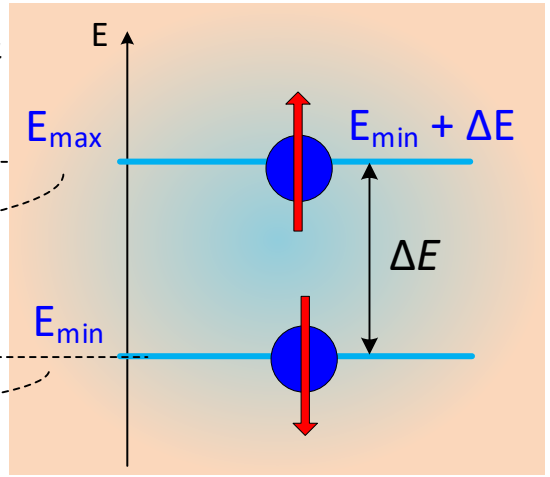
Όπως και η μαγνητική βελόνα με την άσκηση ροπής μπορεί να περιστραφεί αντίθετα στο μαγνητικό πεδίο.

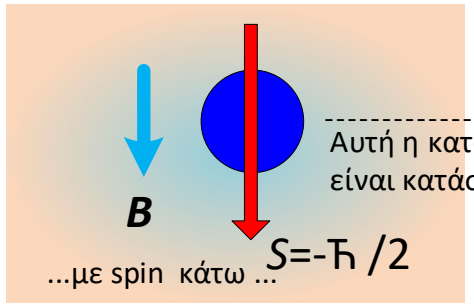
Όπως και η μαγνητική βελόνα μέσα σε μαγνητικό πεδίο....
...το spin τείνει να προσανατολίζεται παράλληλα με ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο Β...



...και να προσανατολίζεται και αντιπαράλληλα με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο Β.

...αυτή η κατάσταση είναι κατάσταση μέγιστης ενέργειας E_{min}





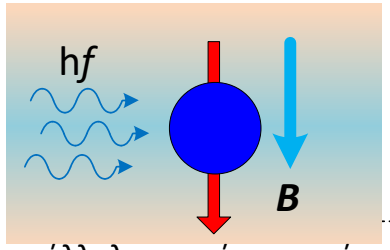
Αυτή η κατάσταση spin κάτω παράλληλα με το ***B*** είναι κατάσταση ελάχιστης ενέργειας E_{min}

Επομένως το spin έχουν τη δυνατότητα να προσανατολίζονται παράλληλα...

Πως μεταβάλλεται το spin

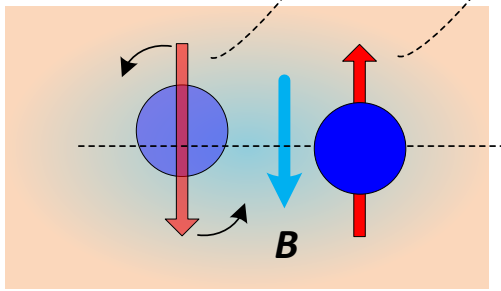
Για να χρησιμοποιηθεί το spin σαν qubit απαιτείται να μεταβάλλεται η θεμελιώδης κατάστασή του από επάνω σε κάτω spin με επιθυμητό και ελεγχόμενο τρόπο. Πως μπορεί να γίνει αυτό;

Προσφέροντας κατάλληλη επιπλέον ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία $\Delta E = hf$ όπου το μαγνητικό πεδίο της ταλαντώνεται με...



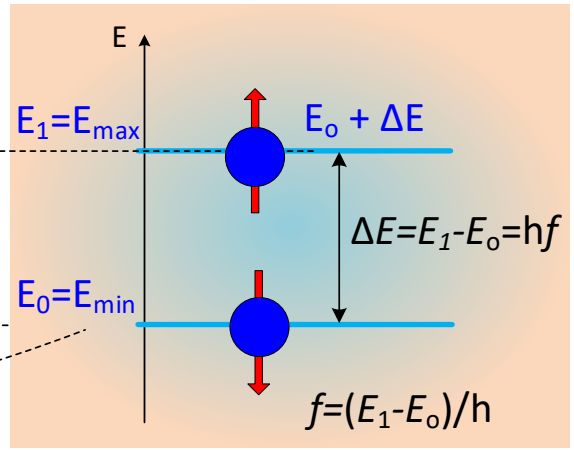
..κατάλληλη συχνότητα ω ώστε το spin μπορεί να περιστρέφεται και να ταλαντώνεται μεταξύ επάνω και κάτω spin.

Απορροφώντας την κατάλληλη επιπλέον ενέργεια $\Delta E=hf$ το spin μπορεί να περιστραφεί στην αντίθετη κατεύθυνση από το ***B*...**



...η οποία είναι κατάσταση μεγαλύτερης ενέργειας E_{Min}...

...από την αρχική κατάσταση spin κάτω που είναι ελάχιστης ενέργειας E_{min}



Η συχνότητα f που απαιτείται ώστε το spin να προσανατολίζεται αντιπαράλληλα για ισχυρό μαγνητικό πεδίο Β περίπου 1.5 Tesla είναι της τάξεως:

$$f=(E_1-E_o)/h\approx 10\ \text{GHz}$$

Έτσι η ενέργεια $\Delta E=hf$ για να μεταβεί το spin στην διεγερμένη E_1 με αντιπαράλληλο spin, είναι ανάλογη του B και πολύ μικρή...

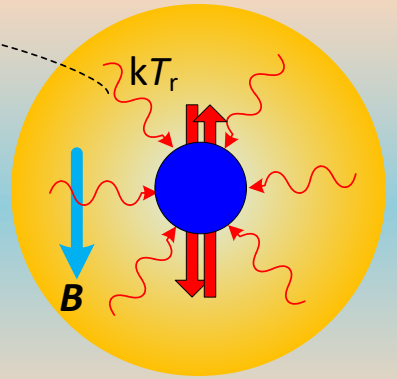
...της τάξεως της θερμικής ενέργειας kTo Θερμοκρασίας $To \approx 1$ K.

Γιατί τα κβαντικά bit και οι κβαντικοί υπολογιστές απαιτούν πολύ χαμηλές θερμοκρασίες

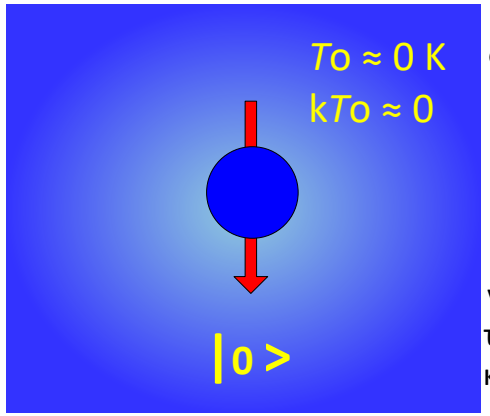
Στη θερμοκρασία περιβάλλοντος Tr=290 K θερμική ενέργεια kTr μπορεί να είναι για παράδειγμα 300 φορές μεγαλύτερη...

$$kT_r = 300\ kT_o = 300\ \Delta E$$

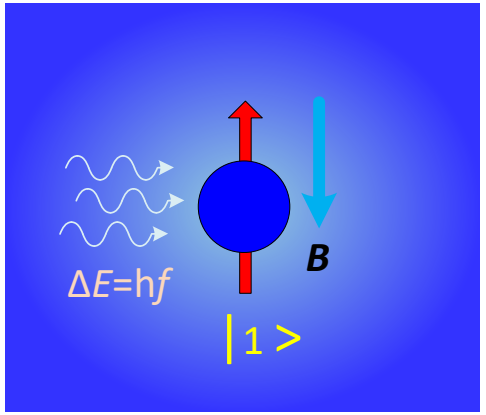
...έτσι **δεν μπορεί το spin να είναι στην *E*min = *E*o** γιατί μπορεί πολύ εύκολα να απορροφίσει από το περιβάλλον θερμική ενέργεια kTr και να μεταβεί σε ανώτερη ενεργειακή κατάσταση



Έτσι μόνο κοντά στο απόλυτο μηδέν $To \approx 0$ K είναι $kTo \approx 0$

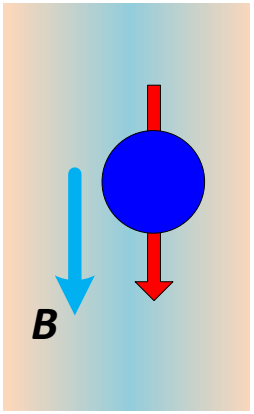


...και το spin μπορεί να διατηρεί την θεμελιώδη κατάσταση (Spin κάτω) Emin=Eo και να διεγείρεται μόνο όταν επιθυμούμε στην E1 με ακτινοβολία hf και έτσι να αλλάζει η κατάστασή των στη λειτουργεία των κβαντικών υπολογιστών.

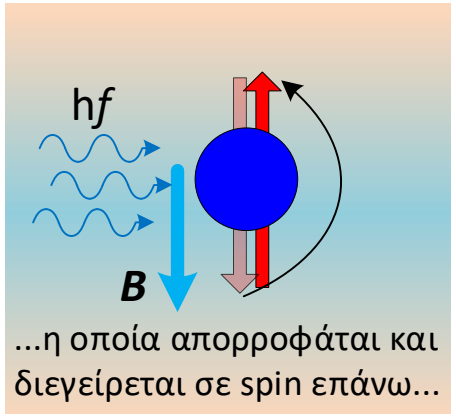


Πως το Spin τίθεται σε κατάσταση υπέρθεσης - η διαδικασία μέτρησης

Αρχικά θέτουμε το spin σε μια βασική κατάσταση π.χ. spin κάτω

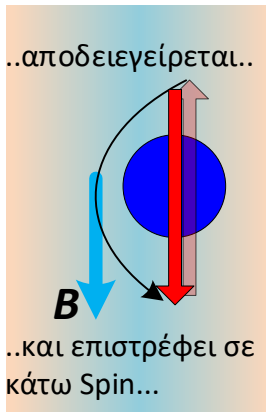


Επιλέγοντας κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας *f* ..



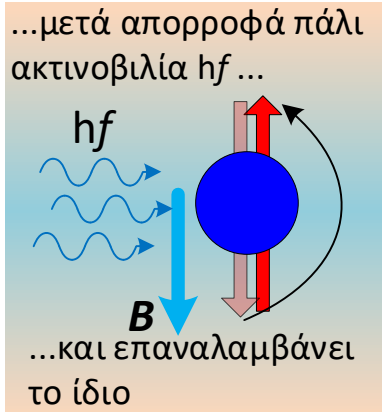
...η οποία απορροφάται και διεγείρεται σε spin επάνω...

Στη συνέχεια αν μετρήσουμε με μετρητική συσκευή στην κατακόρυφη διεύθυνση που είναι κάθετη στο Spin του ηλεκτρονίου,...



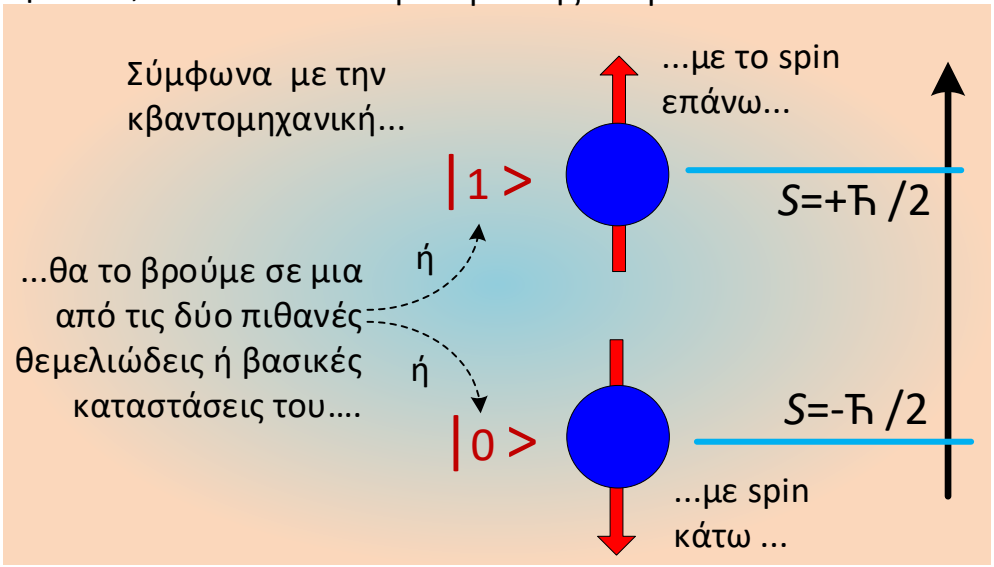
..και επιστρέφει σε κάτω Spin...

...μετά απορροφά πάλι ακτινοβιλία h*f* ...



...και επαναλαμβάνει το ίδιο

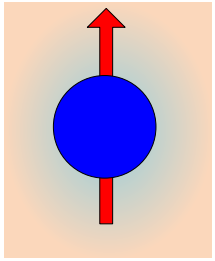
...τότε όπως αναφέραμε παραπάνω η μετρητική συσκευή θα μας αποκαλύψει ότι το spin είναι σε κατάσταση υπέρθεσης το spin πάνω και κάτω.



Αυτό λέγεται **Electron Spin Reasonance** (συντονισμός ηλεκτρονιακού σπιν)

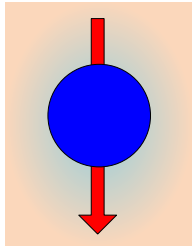
Αν το spin το βρούμε (μετρήσουμε) τις μισές φορές στη κτάσταση....

|1 >



....και τις άλλες μισές στη κατάσταση....

|0 >



Τότε το spin λέμε ότι βρίσκεται σε .

υπέρθεση των δύο καταστάσεων

..όπως στη περίπτωση του ηλεκτρονίου όταν διέρχεται από δύο σχισμές βρίσκεται στην υπέρθεση των καταστάσεων που πέρασε από τι σχισμή 1 και τη σχισμή 2

Γράφεται $\Psi = c_1\Psi_1+c_2\Psi_2$ ...με άθροισμα πιθανοτήτων:

$$|\Psi> = c_1|0> + c_2|1> \qquad |c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$$

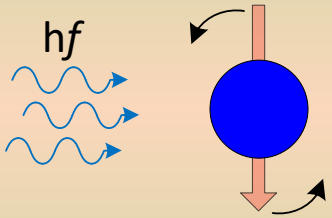
$$|c_1|^2 = |c_2|^2 = 1/2$$

$$c_1 = c_2 = 1/\sqrt{2} \qquad |\Psi> = 1/\sqrt{2}\,|0> + 1/\sqrt{2}\,|1>$$

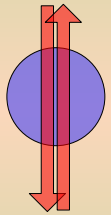
Επομένως....

...ακτινοβολώντας το ηλεκτρόνιο με ηλεκτρομαγνητική ενέργεια $\Delta E = hf$ με το μαγνητικό πεδίο της να ταλαντώνεται με κατάλληλη συχνότητα *f*...

...τότε το spin θα ταλαντώνεται δηλαδή θα βρεθεί σε...



...υπέρθεση των δύο καταστάσεων...



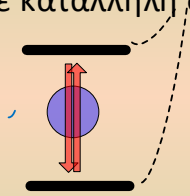
...του spin επάνω και του spin κάτω (στη κατακόρυφο διεύθυνση)...

Με τη μέτρηση

καταστρέφεται η υπέρθεση

(κατάρευση της κυματοσυνάρτησης)

Δηλαδή μετρώντας στην κατακόρυφη διεύθυνση με κατάλληλη συσκευή ...



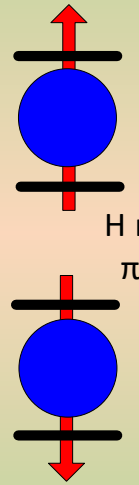
...τότε θα βρούμε το spin...

ή

$|1>$

ή

$|0>$



Η κάθε μια με πιθανότητα 50 %

Οι πιθανότητες των ιδιο-καταστάσεων μπορεί να είναι διαφορετικές

π.χ. η μια είναι 64 % και η άλλη 36 %

Γράφεται $\Psi = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$

$|\Psi> = c_1|0> + c_2|1>$

$|c_1|^2 = 0.64$ ή $c_1 = 0.8$

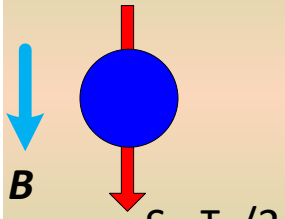
$|c_2|^2 = 0.36$ ή $c_2 = 0.6$

Σημαντικό

Εδώ θα πρέπει να ξεχωρίσουμε την περίπτωση όπου το Spin...

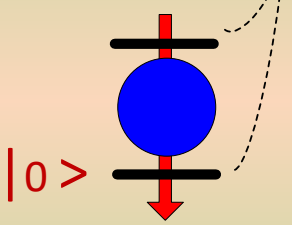
Δηλαδή έχει τεθεί με τη βοήθεια μαγνητικού πεδίου σε μια βασική κατάσταση π.χ. στην κατάσταση...

... δεν βρίσκεται σε κατάσταση υπέρθεσης.



...με spin κάτω ...

Μετρώντας στην κατακόρυφη διεύθυνση με κατάλληλη συσκευή ...



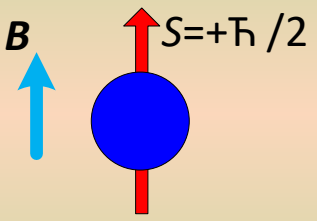
...θα βρίσκουμε το spin **πάντα** κάτω...

και γράφεται

$|\Psi> = c_1|0>$

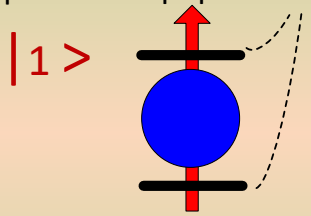
όπου $c_2=0$

.Αν έχει τεθεί με τη βοήθεια μαγνητικού πεδίου στην βασική κατάσταση...



...με spin πάνω ...

Μετρώντας στην κατακόρυφη διεύθυνση με κατάλληλη συσκευή ...



...θα βρίσκουμε το spin **πάντα** πάνω...

και γράφεται

$|\Psi> = c_2|1>$

όπου $c_1=0$

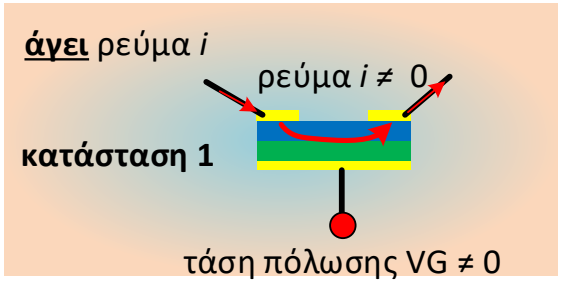
Αποθήκευση πληροφορίας στους κλασικούς και κβαντικούς υπολογιστές

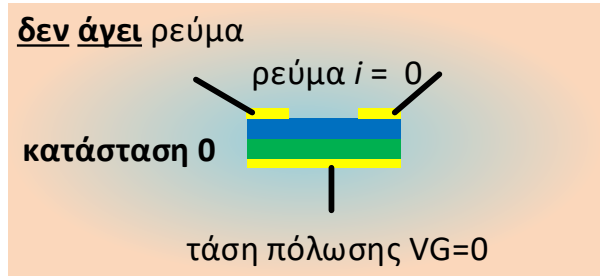
Στους κλασσικούς υπολογιστές:

Η πληροφορία αποθηκεύεται με μορφή αλληλουχίας bit 01001110110001….

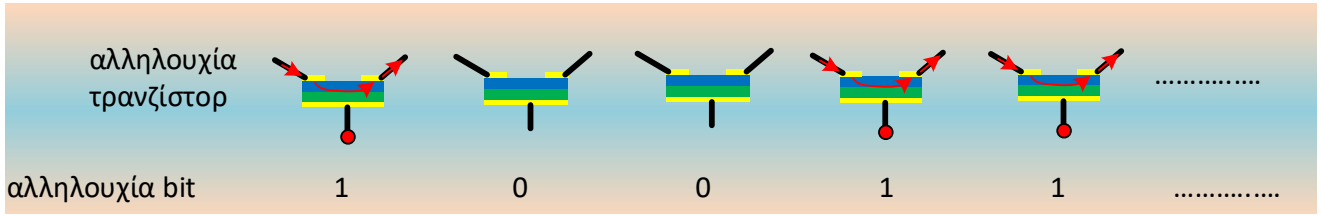
Για αυτό χρησιμοποιούνται τρανζίστορ όπου διατηρείται αποθηκευμένη η πληροφορία (bit).

Όμως το bit μπορεί να είναι ένα ηλεκτρονικό στοιχείο π.χ. ένα τρανζίστορ, το οποίο
όταν **πολώνεται** με κατάλληλη τάση **άγει** ρεύμα (κατάσταση 1) και όταν
δεν πολώνεται με τάση **δεν άγει** ρεύμα (κατάσταση 0)





Επομένως για την αποθήκευση της πληροφορίας χρειάζονται τόσα τρανζίστορ όσα και τα bit που θα χρειαστούμε

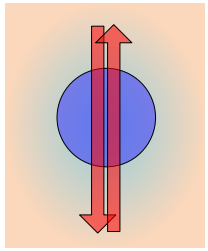


Στους κβαντικούς υπολογιστές:

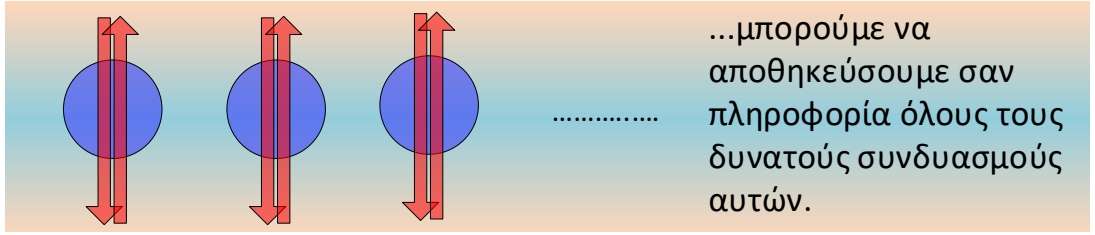
Εδώ το bit είπαμε ότι μπορεί να είναι ένα κβαντικό σωματίδιο π.χ. το spin ηλεκτρονίου, πρωτονίου, νετρονίου.

Εκμεταλευόμενοι τη κβαντική υπέρθεση αποθηκεύουμε τεράστιες πληροφορίες με πολύ λιγότερα κβαντικά bit

Τα Spin ως κβαντικά bit σε κβαντική υπέρθεση μπορούν να βρίσκοντα δύο καταστάσεις ταυτόχρονα χωρίς να απαιτούνται δύο bit

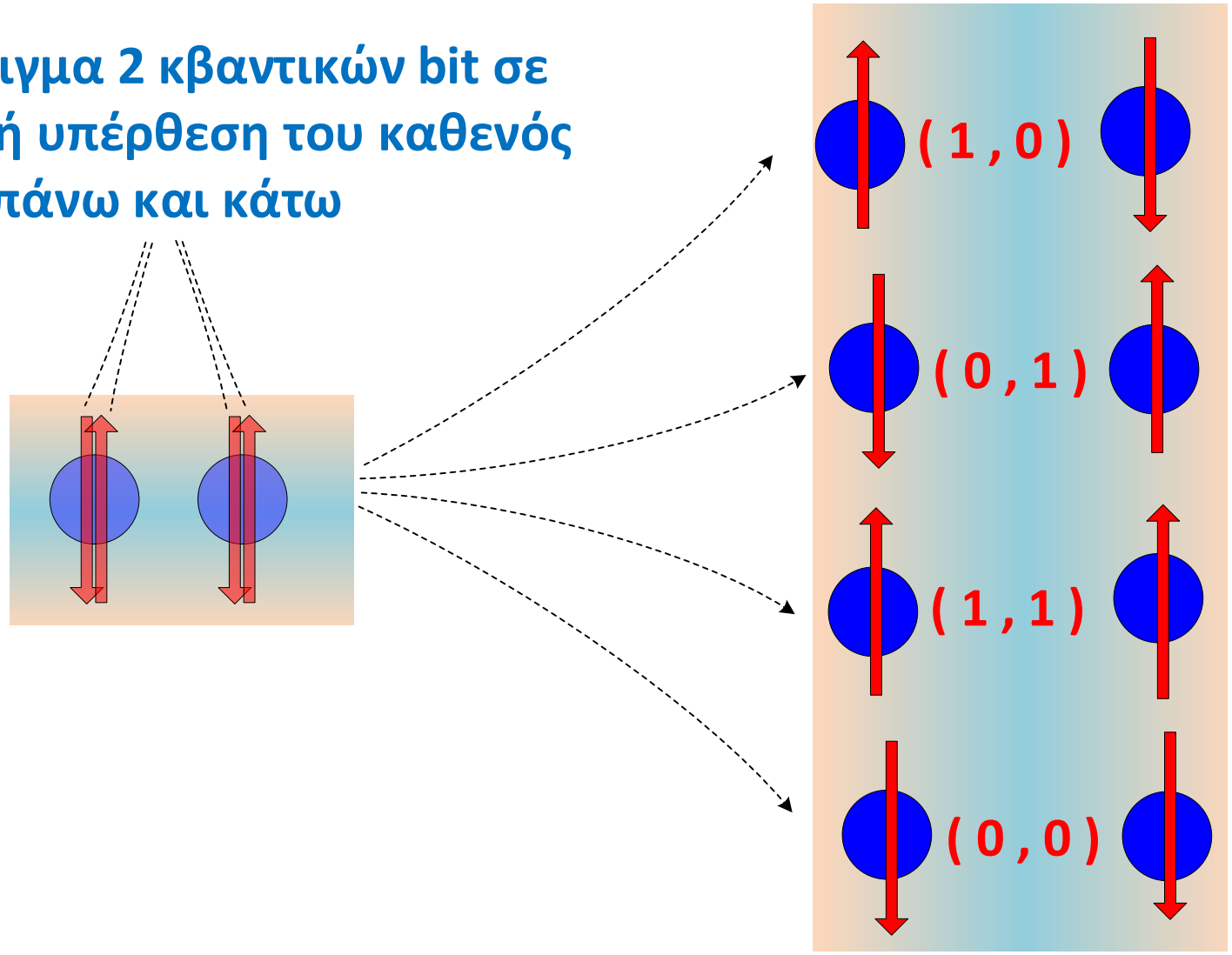


Συνδιάζοντας δύο ή περισσότερα spin το καθένα σε κβαντική υπέρθεση



...μπορούμε να αποθηκεύσουμε σαν πληροφορία όλους τους δυνατούς συνδυασμούς αυτών.

Παράδειγμα 2 κβαντικών bit σε κβαντική υπέρθεση του καθενός σε spin πάνω και κάτω



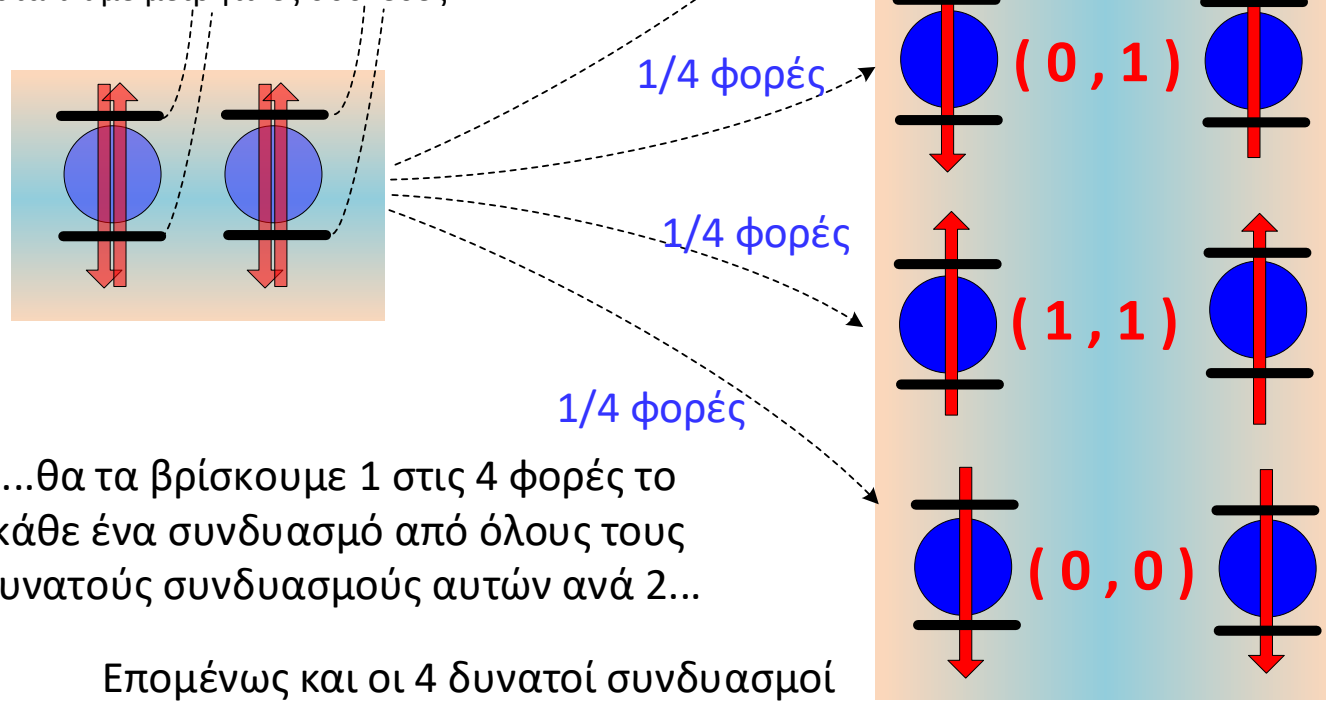
Βρίσκονται σε υπέρθεση 4 δυνατών καταστάσεων του Spin

Αυτά μπορούν να βρίσκονται ταυτόχρονα σε κάθε μια από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των ανά 2

Δηλαδή από 2 κβαντικά bit....

παίρνουμε $4=2^2$ διαφορετικές καταστάσεις του spin

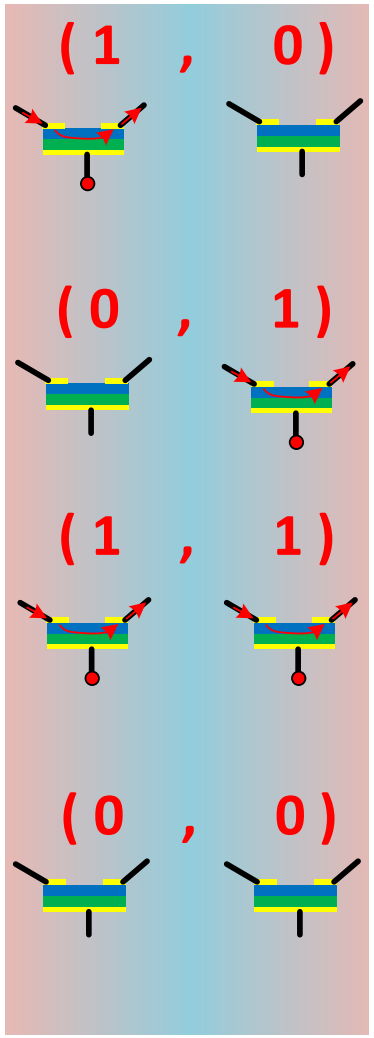
Αυτό σημαίνει πως αν μετρούμε τα δύο αυτά bit με μετρητικές συσκευές…



…θα τα βρίσκουμε 1 στις 4 φορές το κάθε ένα συνδυασμό από όλους τους δυνατούς συνδυασμούς αυτών ανά 2…

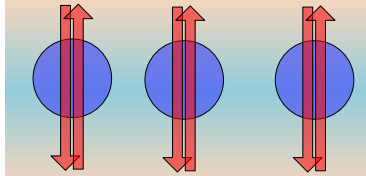
Επομένως και οι 4 δυνατοί συνδυασμοί υπάρχουν ανά πάσα στιγμή και μπορούμε να τους επεξεργαστούμε...

….και αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας **μόνο δύο κβαντικά bit**



…αντί για 8 κλασικά bit όπου απαιτούνται 8 τρανζίστορ

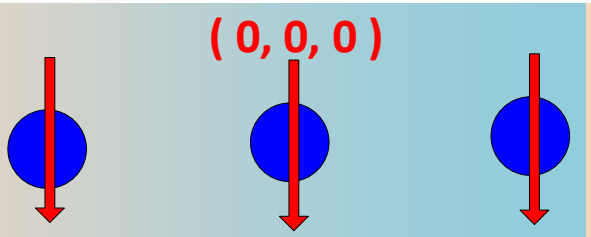
Παράδειγμα 3 Κβαντικών bit



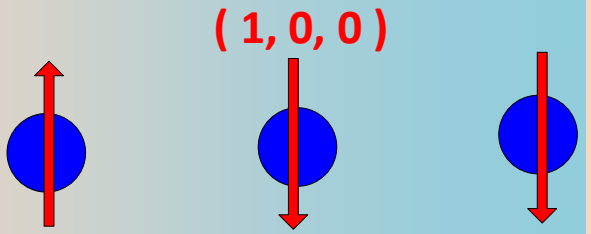
Βρίσκονται σε υπέρθεση $2^3=8$ δυνατών καταστάσεων του Spin

Μπορεί να αντιπροσωπεύουν τα ονόματα με τους αριθμούς μητρώου φοιτητών

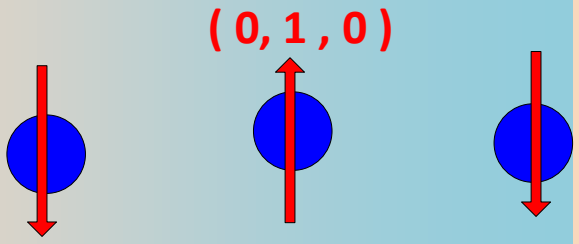
Ανδρέας
ΑΜ 108xxx1



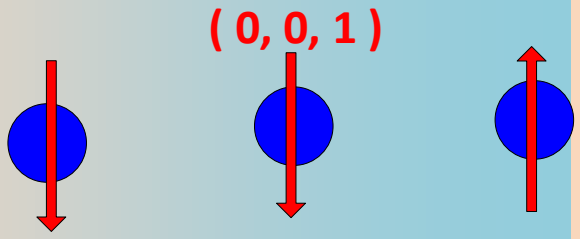
Νίκος
ΑΜ 1084xx2



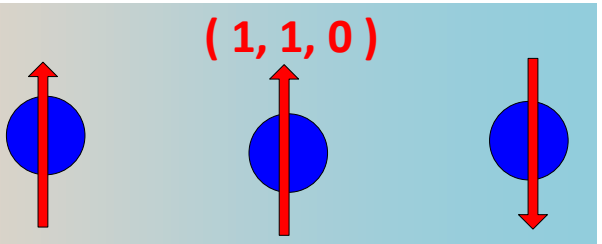
Ιωάννα
ΑΜ 1084xx3



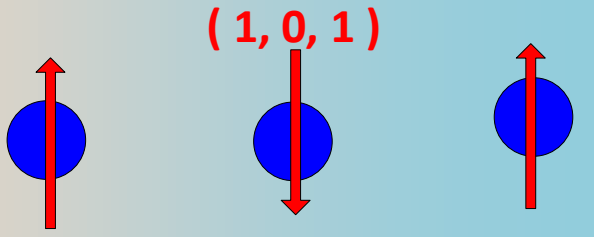
Δημήτρης
ΑΜ 1084xx4



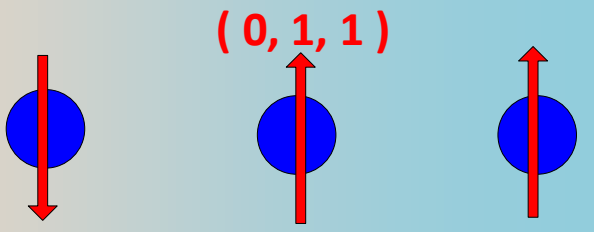
Παναγιώτα
ΑΜ 1084xx5



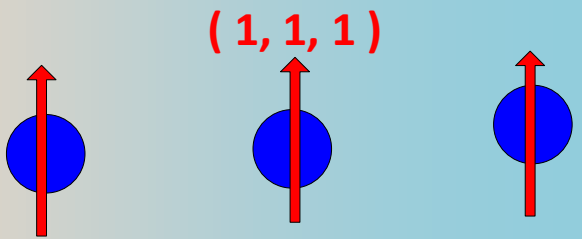
Άννα
ΑΜ 1084xx6



Γιάννης
ΑΜ 1084xx7



Αριάνα
ΑΜ 1084xx8



Και οι 8 δυνατοί συνδυασμοί υπάρχουν ανά πάσα στιγμή χρησιμοποιώντας **μόνο 3 κβαντικά bit** ...

...αντί για
24 κλασικά bit
ή 24 Τρανζίστορ!

Το μέγεθος της αποθηκευμένης πληροφορίας μεγαλώνει εκθετικά χρησιμοποιώντας περισσότερα bit

συνδυασμούς

από 4 κβαντικά bit παίρνω $2^4 = 16$

από 5 κβαντικά bit παίρνω $2^5 = 32$

από 6 κβαντικά bit παίρνω $2^6 = 64$

από 7 κβαντικά bit παίρνω $2^7 = 128$

από 8 κβαντικά bit παίρνω $2^8 = 256$

Παρατηρούμε πως αυξάνοντας τον αριθμό των bit κατά 1 διπλασιάζονται οι συνδυασμοί και ο όγκος της πληροφορίας που μπορούμε να αποθηκεύσουμε.

Με το τελευταίο συνδυασμό φαίνεται πως από 8 μόνο κβαντικά bit παίρνουμε 256 συνδυασμούς μπορούμε να αποθηκεύσουμε όλους τους ASCI χαρακτήρες που χρειαζόμαστε.

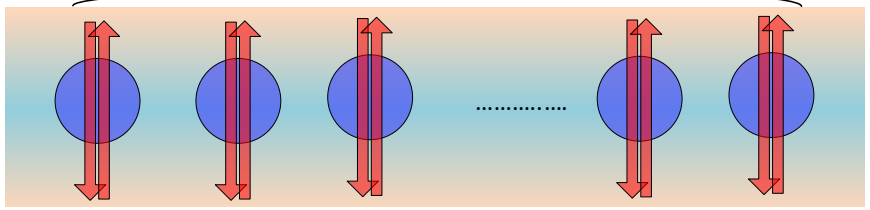
Αν διαθέσουμε 300 μόνο bit

παίρνουμε 2^{300} δυνατούς συνδυασμούς ή 10^{90}

αυτούς για να τους καταγράψουμε είναι περισσότεροι και από τα σωματίδια ολόκληρου του σύμπαντος!!!

Η αποθηκευμένη πληροφορία δεν μπορεί να αντιγραφεί και επομένως ούτε και να υποκλαπεί

Διαθέτουμε... Ν κβαντικά Bit....

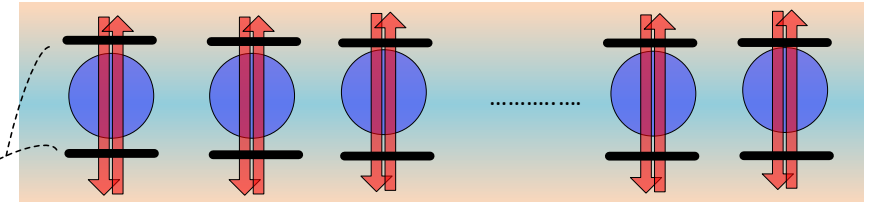


...βρίσκονται το καθένα σε υπέρθεση 2 καταστάσεων

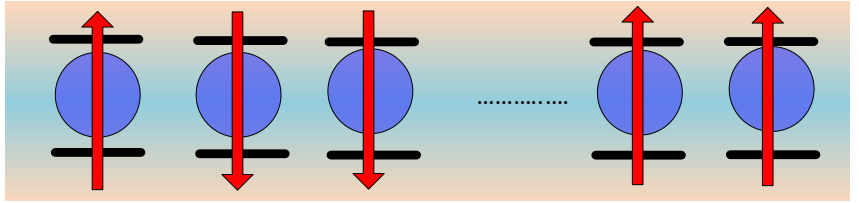
Η πληροφορία που είναι αποθηκευμένη είναι σε 2^N διαφορετικούς συνδυασμούς.

Ενώ όλη η πληροφορία αυτή υπάρχει είναι πραγματική και μπορούμε να την επεξεργαστούμε, όμως **<u>δεν μπορούμε να την μετρήσουμε ή να την αντιγράψουμε</u>**.

Δηλαδή αν επιχειρήσουμε να μετρήσουμε τα κβαντικά bt με μια μετρητική συσκευή,



τότε θα καταρρεύσει η υπέρθεση...



αλληλουχία bit 1 0 0 ..... 1 1

...και θα προσδιορίσουμε μόνο μια αλληλουχία από όλες τις βασικές καταστάσεις υπέρθεσης των κβαντικών Bit.

Σήμερα έχουν κατασκευαστεί κβαντικοί υολογιστές μέχρι μόνο της τάξεως περίπου των 50 bit

Ποιο είναι το πρόβλημα γιατί δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα κβαντικά bit ;

Το πρόβλημα παραμένει το πως θα αποτραπεί η αποσυνοχή, η οποία είναι η ανεπιθύμητη αλληλεπίδραση κάποιου bit (spin) με το περιβάλλον, όπως συμβαίνει και κατά τη διαδικασία της μέτρησης που περιγράψαμε παραπάνω, και έτσι χάνονται πληροφορίες.

Το πρόβλημα παραμένει το πως θα αποτραπεί η αποσυνοχή. Γι'αυτό χρησιμοποιούνται τεχνικές υπέρψυκτων ατόμων με Laser ή τεχνικές NMR (μαγνητικού συντονισμού).

Ετσι για την ώρα αποκλείονται μικροί φορητοί κβαντικοί υπολογιστές

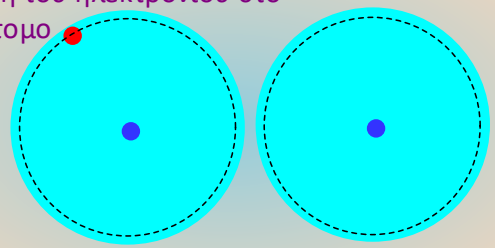
Άλλα παραδείγματα κβαντικού bit

Εκτός από το παράδειγμα του Spin των ηλεκτρονίων μπορεί να βρίσκονται στην υπέρθεση δύο καταστάσεων...

...κάθε σωματίδιο του μικρόκοσμου που μπορεί να βρεθεί σε δύο ελεγχόμενες διαφορετικές καταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν Qubit, όπως τα επόμενα παραδείγματα:

Να βρίσκεται το ηλεκτρόνιο σε δύο διαφορετικά ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια).

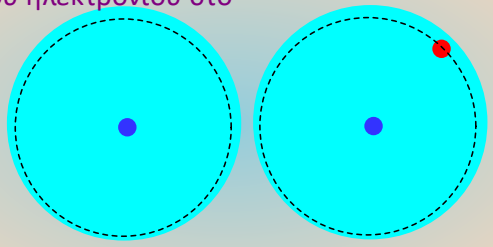
Η κατάσταση του ηλεκτρονίου στο αριστερό άτομο



Αυτή μπορεί να είναι η θεμελιώδης ή βασική κατάσταση 0

...συμβολίζεται με διανύσμα ket ως $|0>$

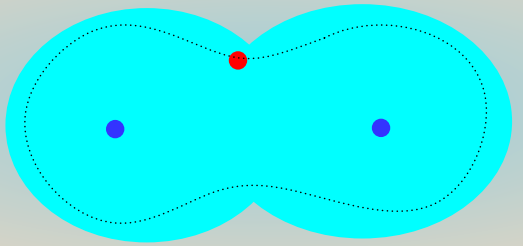
Η κατάσταση του ηλεκτρονίου στο δεξιό άτομο



Μπορεί τότε να είναι η θεμελιώδης ή βασική κατάσταση 1

...συμβολίζεται με διανύσμα ket ως $|1>$

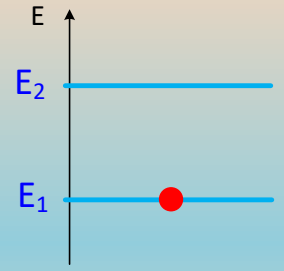
Μπορούμε να δημιουργήσουμε μια κβαντική υπέρθεση των δύο προηγούμενων καταστάσεων όπου το ηλεκτρόνιο μπορεί να ανήκει και στα δύο άτομα..



και γράφεται: $|\Psi> = c_1|0> + c_2|1>$

με πιθανότητα $|c_1|^2$ να είναι στην 0 και $|c_2|^2$ να είναι στην 1.

Να βρίσκεται το ηλεκτρόνιο σε δύο (ή περισσότερες) διαφορετικές ενεργειακές καταστάσεις E1 και E2

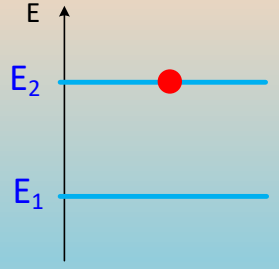


Η κατάσταση του ηλεκτρονίου στη κατώτερη ενεργειακή στάθμη

Αυτή μπορεί να είναι η θεμελιώδης ή βασική

κατάσταση 0

...συμβολίζεται με διανύσμα ket ως $|0>$

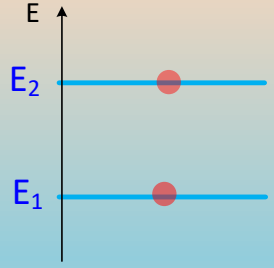


Η κατάσταση του ηλεκτρονίου στη ανώτερη ενεργειακή στάθμη

Αυτή μπορεί να είναι η θεμελιώδης ή βασική

κατάσταση 1

...συμβολίζεται με διανύσμα ket ως $|1>$

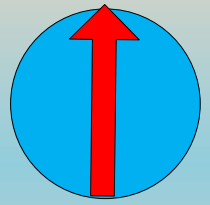


Μπορούμε να δημιουργήσουμε μια κβαντική υπέρθεση των δύο προηγούμενων καταστάσεων όπου το ηλεκτρόνιο μπορεί να είναι και στις δύο...

και γράφεται: $|\Psi> = c_1 |0> + c_2 |1>$

με πιθανότητα $|c_1|^2$ να είναι στην E_1
και $|c_2|^2$ να είναι στην E_2.

Qubit μπορεί να είναι τα φωτόνια χρησιμοποιώντας το φαινόμενο της πόλωσης του φωτός

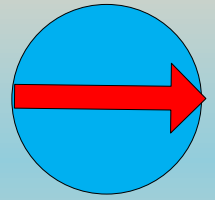


Η πόλωση του φωτονίου μπορεί να είναι κατακόρυφη.

Αυτή μπορεί να είναι η θεμελιώδης ή βασική

κατάσταση 0

...συμβολίζεται με διανύσμα ket ως $|0>$

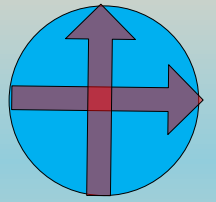


Η πόλωση του φωτονίου μπορεί να είναι οριζόντια.

Αυτή μπορεί να είναι η θεμελιώδης ή βασική

κατάσταση 1

...συμβολίζεται με διανύσμα ket ως $|1>$



Μπορούμε να δημιουργήσουμε φωτόνια σε κβαντική υπέρθεση των δύο προηγούμενων πολώσεων...

και γράφεται: $|\Psi> = c_1 |0> + c_2 |1>$

με πιθανότητα $|c_1|^2$ να είναι στην E_1
και $|c_2|^2$ να είναι στην E_2.

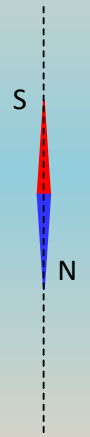
Κβαντικός εναγκαλισμός (Quantum entaligment)

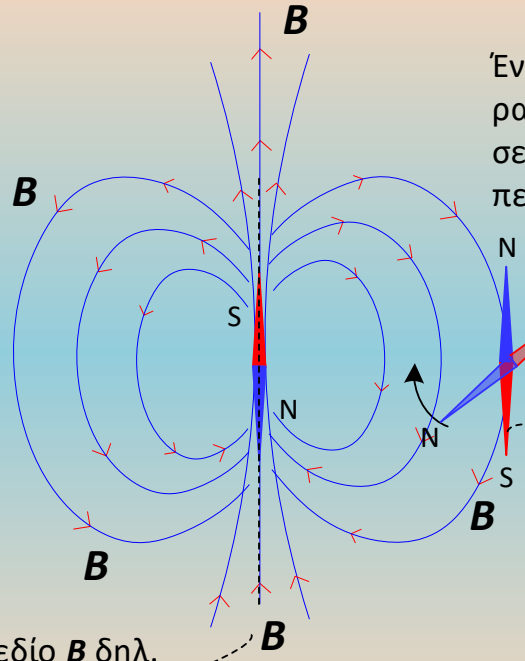
Εκτός από την έννοια της **κβαντικής υπέρθεσης** που είδαμε ότι προσδίδει στους κβαντικούς υπολογιστές τεράστιες δυνατότητες αποθήκευσης και παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων...

...υπάρχει και άλλη μια σπουδαία και μοναδική ιδιότητα του μικρόκοσμου, ο **κβαντικός εναγκαλισμός**. Αυτή η ιδιότητα προσδίδει στους κβαντικούς υπολογιστές ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες που δεν υπάρχουν ανάλογες στους κλασικούς υπολογιστές .

Για να κατανοήσουμε το κβαντικό εναγκαλισμό θα θα εξετάσουμε το φαινόμενο που παρατηρείται στην ευθυγράμμιση δύοραβδόμορφων μαγνητών σε κοντινή απόσταση ...

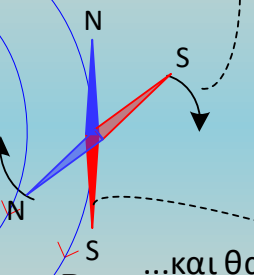
Ένας ραβδόμορφος μαγνήτης στο χώρο...





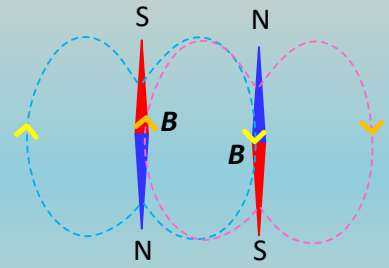
...δημιουργεί μαγνητικό πεδίο ***B*** δηλ. μαγνητικές δυναμικές γραμμές...

Ένας άλλος ραβδόμορφος μαγνήτης σε κοντινή απόσταση θα περιστραφεί...



...και θα διαταχθεί παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο ***B*** του πρώτου μαγνήτη σε αντιπαράλληλη διάταξη.

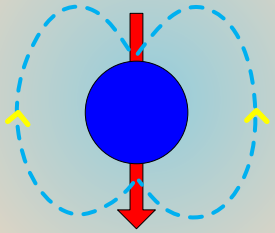
Επομένως δύο ραβδόμορφοι μαγνήτες σε κοντινή απόσταση θα ισορροπήσουν...



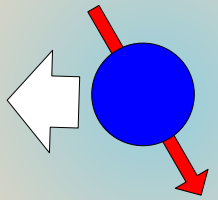
...σε αντιπαράλληλη διάταξη.

...ο ένας παράλληλα στο μαγνητικό πεδίο ***B*** του άλλου μαγνήτη.

Παρόμοια συμβαίνουν και με το Spin δύο γειτονικών ηλεκτρονίων που μπορεί να αλλληλοεπιδρούν…

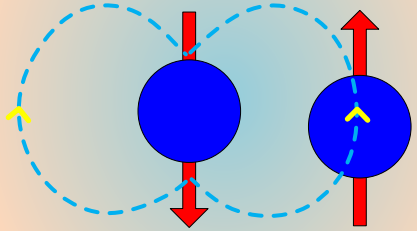


Το ένα παράγει μικρό μαγνητικό πεδίο στο γύρω χώρο…

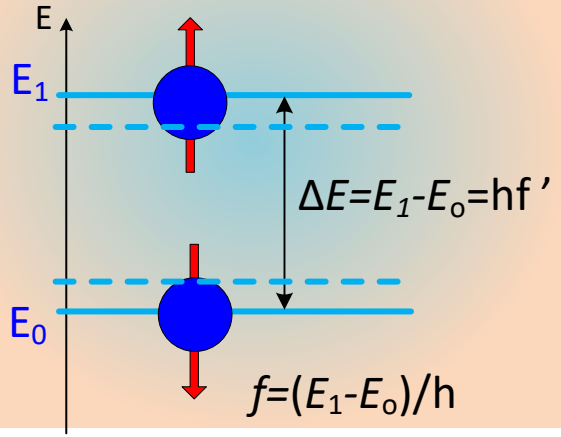


…και ένα άλλο ηλεκτρόνιο πλησιάζει το πρώτο…

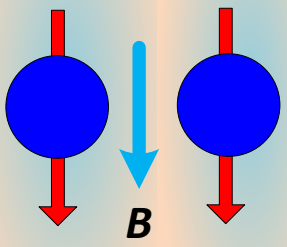
Το μαγνητικό πεδίο στο γύρω χώρο του ενός ηλεκτρονίου…



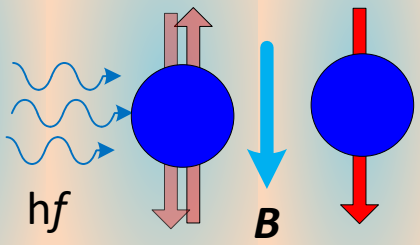
…επηρεάζει τις ενέργειες Eo (spin κάτω) και E1 (spin πάνω) του άλλου γειτονικού ηλεκτρονίου.



Αρχικά θέτουμε και τα δύο spin στην ίδια βασική κατάσταση π.χ. spin κάτω

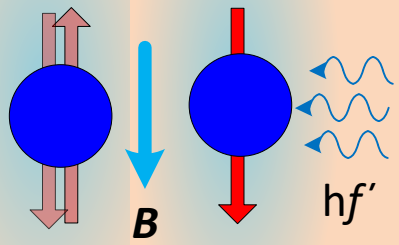


Μετά με το ταλαντούμενο μαγνητικό πεδίο κατάλληλης συχνότητας *F* μικροκυμάτων…



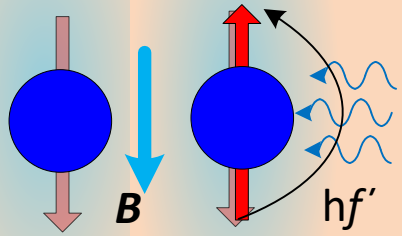
…μπορώ να περιστρέφω (flip) το spin του πρώτου ηλεκτρονίου.

Μετά με το ταλαντούμενο μαγνητικό πεδίο κατάλληλης συχνότητας *f'* μικροκυμάτων…



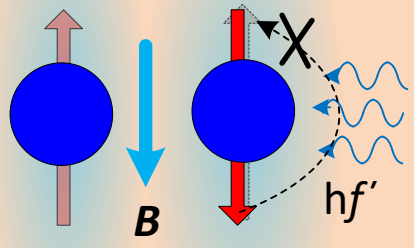
…μπορώ να περιστρέφω (flip) το spin του δευτέρου ηλεκτρονίου….

…μόνον όταν το πρώτο ηλεκτρόνιο καθώς ταλαντώνεται βρίσκεται σε κάτω spin…



…μόνο τότε περιστρέφεται (flip) σε spin επάνω το δεύτερο ηλεκτρόνιο….

…γιατί όταν το πρώτο ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε spin επάνω…

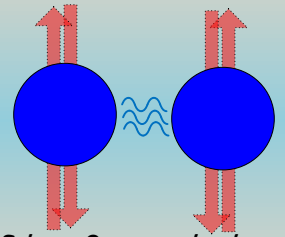


…η ενέργεια hf ' δεν αρκεί για να περιστραφεί σε spin επάνω.

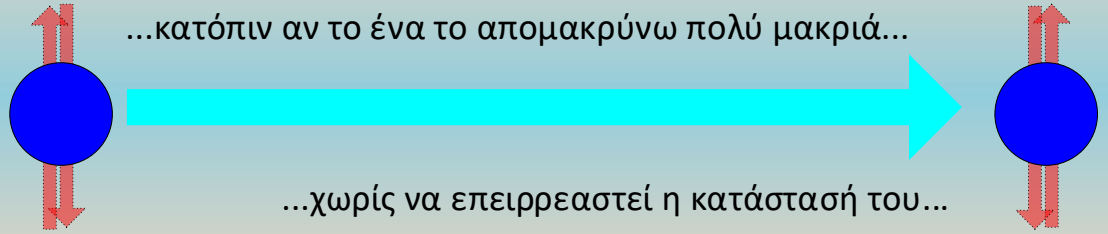
Πείραμα EPR

Αυτά έχουν επιβεβαιωθεί πολλές φορές πειραματικά είναι γνωστό σαν πείραμα...

...από τα αρχικά αυτών που το πρότειναν (Einstein, Podolsky, Rosen)



Αρχικά τα δύο κβαντικά είναι σε κατάσταση υπέρθεσης του Spin Επάνω και κάτω και είναι κοντά και σε κβαντικό εναγκαλισμό (εμπλοκή)...

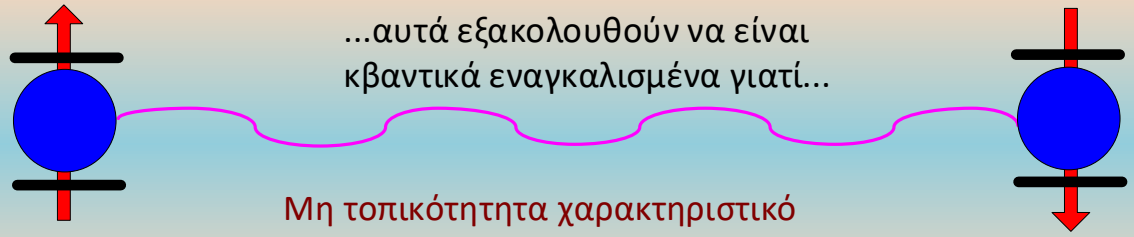


...κατόπιν αν το ένα το απομακρύνω πολύ μακριά...

...χωρίς να επειρρεαστεί η κατάστασή του...

Αν το ένα μετρηθεί με μια μτρητική συσκευή...

...και βρεθεί να είναι spin επάνω...



...αυτά εξακολουθούν να είναι κβαντικά εναγκαλισμένα γιατί...

Μη τοπικότητητα χαρακτηριστικό του κβαντικού κόσμου

...τότε στιγμιαία το άλλο αν θα μετρηθεί...

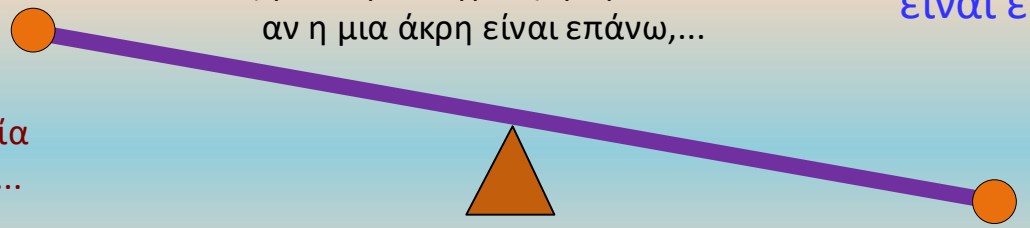
...οπωσδήποτε θα βρεθεί να είναι spin κάτω, ισχύει δε και το αντίστροφο

Αυτό συμβαίνει γιατί τα σωματίδια είναι εναγκαλισμένα ακόμα και όταν τα απομακρύνω σε οποιαδήποτε μακρινή απόσταση...

...χωρίς όμως να διαδίδεται πληροφορία ακαριαία (ταχύτερα από το φως) αλλά...

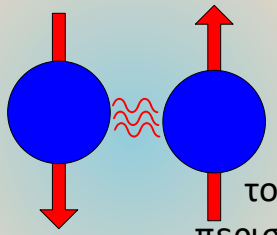
Το ζεύγος των 2 ηλεκτρονίων είναι ένα αδιάσπαστο όλον.

...όπως για παράδειγμα η τραμπάλα αν η μια άκρη είναι επάνω,...



...τότε η άλλη άκρη θα είναι οπωσδήποτε κάτω

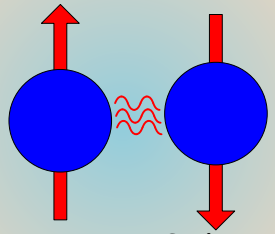
Δηλαδή αν το πρώτο είναι spin κάτω...



το δεύτερο περιστρέφεται σε spin πάνω...

ή

...και όταν το πρώτο είναι spin πάνω...



το δεύτερο δεν περιστρέφεται μένει σε spin κάτω.

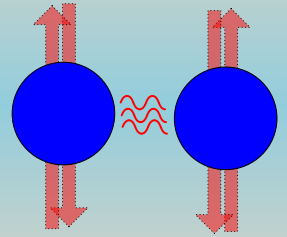
Έτσι τα spin είναι πάντα αντιπαράλληλα.

Αυτά τα ηλεκτρόνια λέμε ότι είναι συζευγμένα ηλεκτρόνια και βρίσκονται σε **κβαντική εμπλοκή**,

το φαινόμενο αυτό λέγεται **κβαντικός εναγκαλισμός** (**quantum entaligment**)

και τα σωματίδια λέγονται **κβαντικά εναγκαλισμένα**.

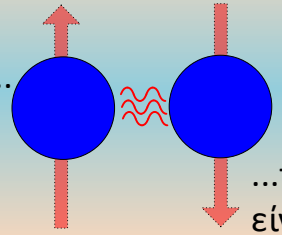
Τα κβαντικά εναγκαλισμένα spin αποτελούν σα qubit μια μοναδική περίπτωση,
που δεν υπάρχει ανάλογη σε κλασικά bit...



...γιατί αυτά ενώ δεν έχουν κάποια συγκεκριμένη τιμή του spin,...

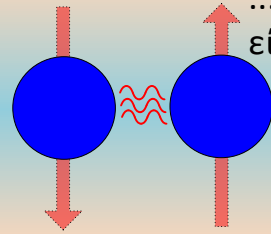
...αυτά έχουν πάντα αντίθετες τιμές-αντίθετα spin...

...το ένα spin είναι επάνω....



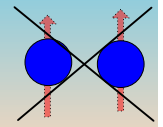
...το άλλο είναι κάτω.

...το άλλο είναι επάνω.

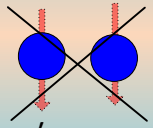


...ή το ένα spin είναι κάτω....

Αλλά **<u>ποτέ</u>** δεν είναι και τα δύο επάνω (1,1)



ή και τα δύο κάτω (0,0)



Μόνο τα qubit σε κβαντική εμπλοκή το προσφέρουν αυτό.

Κβαντικός καταχωρητής

Σε κλασικούς υπολογιστές οι τιμές κάποιων μεταβλητών καταχωρούνται σε ένα σύνολο από bit στους λεγόμενους καταχωρητές.
Στους κβαντικούς υπολογιστές υπάρχουν οι κβαντικοι καταχωρητές όπου οι πληροφορίες καταχωρούνται με τη μορφή qubit.

Σε κλασικούς υπολογιστές οι τιμές κάποιων μεταβλητών καταχωρούνται σε ένα σύνολο από bit στους λεγόμενους καταχωρητές.
Στους κβαντικούς υπολογιστές υπάρχουν οι κβαντικοι καταχωρητές όπου οι πληροφορίες καταχωρούνται με τη μορφή qubit.

Παράδειγμα κλασικού καταχωρητή

Σε ένα κλασικό καταχωρητή 2 bit μπορούμε να αποθηκεύσουμε :
ή τον δυαδικό αριθμό ή 0,0 ή 0,1 ή 1,0 ή 1,1

κβαντικού καταχωρητή

Σε ένα κβαντικό καταχωρητή των 2 qubit μπορούμε να αποθηκεύσουμε :

και τον δυαδικό 0,0 και τον 0,1 και τον 1,0 και τον 1,1

Η δυνατότητα να κρατηθούν ταυτόχρονα όλες οι δυνατές καταστάσεις των qubit στους κβαντικού καταωρητές βαασίζεται η λειτουργία της **κβαντικής παραλληλίας**

Παράδειγμα

Έστω ότι έχω μια οποιαδήποτε συνάρτηση p.x. F(x)=x+2 Όπου η μεταβλητή x Παίρνει τις 4 παραπάνω τιμές θέλω να υπολογίσω το αποτέλεσμα της F(x)

σε κλασικό σειριακό υπολογισμό

Ένας καταχωρητής των 2 bit φορτώνεται 4 φορές με τις τιμές του x

0,0 → F(0) 1,0 → F(1) 0,1 → F(2) 1,1 → F(3)

και κάθε φορά υπολογίζεται σειριαακά η F(x)

Πρώτα φορτώνεται η 0,0 και υπολογίζεται η F(0)

Μετά φορτώνεται η 0,1 και υπολογίζεται η F(1)

.....

Τέλος φορτώνεται η 1,1 και υπολογίζεται η F(3)

σε κλασικό παράλληλο υπολογισμό

4 καταχωρητές των 2 bit φορτώνεται με τις τιμές του x

και παράλληλα υπολογίζεται η F(x)

0,0 → F(0)
1,0 → F(1)
0,1 → F(2)
1,1 → F(3)

σε κβαντικό παράλληλο υπολογισμό

Ένας κβαντικός καταχωρητής των 2 qubit φορτώνεται μια φορά και τις 4 τιμές του x

0, 0 → F(0), F(1), F(2), F(3)

και σε **<u>έναν υπολογισμό</u>** υπολογίζεται η F(x) και για τις 4 τιμές του x

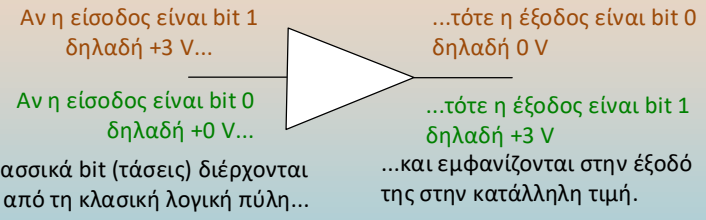
Κβαντικές λογικές πύλες

Αυτές φαινομενικά μοιάζουν με τις αντίστοιχες λογικές πύλες των κλασικών υπολογιστών, είναι απλές υπολογιστικές διατάξεις οι οποίες αντί να τροφοδοτούνται με ηλεκτρικά ρεύματα (κλασσικές πύλες) τροφοδοτούνται με ένα ή περισσοότερα quibit και εκτελείται μια απλή πράξη.

Διαφέρουν όμως ριζικά από τις κλασσικές λογικές πύλες

Οι κλασσικοί υπολογιστές αποτελούνται από κυκλώματα, που μπορούν να περιλαμβάνουν τρανζίστορ. Μέσα από αυτά διέρχεται το ηλεκτρικό ρεύμα ή η τάση (0 V-5V) που μεταφέρουν η πληροφορία σε bit 0 (0 ρεύμα ή ταση)-1(περνάει ρεύμα ή έχει τάση) στην είσοδο των λογικών ψηφιακών πυλών και την μετατρέπουν μετά από ψηφιακή επεξεργασία στην έξοδο σύμφωνα με τον πίνακα αληθείας που καθορίζεται από το αντίστοιχο λογικό κύκλωμα.

Παράδειγμα: Η κλασική πύλη NOT



Τα κλασσικά bit (τάσεις) διέρχονται μέσα από τη κλασική λογική πύλη...

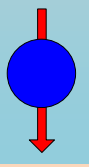
...και εμφανίζονται στην έξοδό της στην κατάλληλη τιμή.

Οι κβαντικές πύλες δεν είναι φυσικά συστήματα, αλλά ισοδυναμούν σε μαθηματικές δράσεις που ασκούνται σε qubits ή σε κβαντικούς καταχωρητές και αλλάζουν τα qubit (τα περιστρέφουν ή αλλάζουν τα πλάτη των βασικών καταστάσεών των).

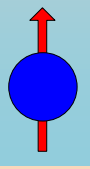
Στους κβαντικούς υπολογιστές η πληροφορία δεν διέρχεται μέσα από τις κβαντικές πύλες αλλά παραμένει αποθηκευμένη στα qubits και στους κβαντικούς καταχωρητές.

Παράδειγμα: Η κβαντική πύλη NOT

Αυτή η κβαντική πύλη δρώντας σε ένα qubit (spin)....



...αντιστρέφει στο σπίν

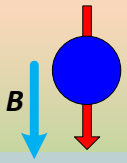


Παραδείγματα σημαντικών κβαντικών πυλών

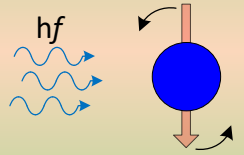
Η SRN square root (τετραγωνική ρίζα) NOT λογική κβαντική πύλη

Αυτή θέτει μια βασική κατάσταση qubit π.χ. spin με επάνω ή κάτω σε υπέρθεση του να είναι του να είναι το spn επάνω και κάτω. Όπως είδαμε αυτό επιτυγχάνεται...

Αρχικά θέτουμε το spin σε μια βασική κατάσταση π.χ. spin κάτω

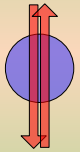


με κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία....



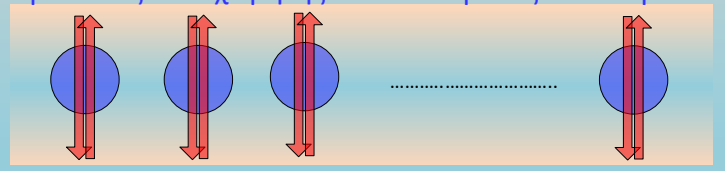
...τότε το spin θα ταλαντώνεται δηλαδή θα βρεθεί σε...

...υπέρθεση των δύο καταστάσεων...



Η SRN δρώντας σε 2 ή περισσότερα qubit ενός κβαντικού καταχωρητή που είναι σε μια βασική κατάσταση θέτει αυτά σε υπέρθεση του καταστάσεων όπου του κάθε qubit το spin είναι και επάνω και κάτω και παίρνουμε όλους του δυνατους συνδιασμούς αυτών.

Κβαντικός καταχωρητής αποτελούμενος από n qubit



Η SRN πύλη δρα στα qubit του καταχωρητή και τα θέτει σε κβαντική υπέρθεση.

Στους κλασικούς υπολογιστές είναι γνωστό ότι όταν συνδυάσουμε ενός bit NOT λογικές πύλες με δύο bit AND λογικές πύλες μπρούμε να κάνουμε οποιοδήποτε λογική λειτουργία.

Στους κβαντικούς υπολογιστές δεν επιτρέπονται όλες οι λογικές πύλες λόγω κβαντομηχανικών περιορισμών.

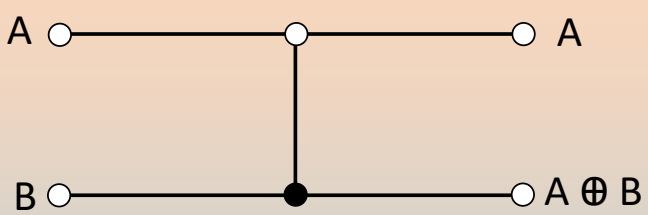
Μια σημαντική λογική πύλη που επιτρέπεται είναι η CNOT, Control NOT ή ελεγχόμενου όχι λογική κβαντική πύλη με δύο qubit.

Με CNOT κβαντικές λογικές πύλες μπορεί να γίνει οποιαδήποτε λογική λειτουργία στους κβαντικούς υπολογιστές.

Η CNOT λογική κβαντική πύλη σε δύο qubit A, B (δεν υπάρχει ανάλογη στους κλασικούς υπολογιστές)

Το A είναι το qubit ελέγχου (control)

Το B είναι το qubit στόχος (target)



Εφαρμόζει μια NOT λειτουργία στο qubit B **μόνον** όταν το A είναι στην κατάσταση 1

A	B	A	A ⊕ B	
|0 >	|0 >	|0 >	|0 >	το B μένει ίδιο γιατί το A=0
|0 >	|1 >	|0 >	|1 >	
|1 >	|0 >	|1 >	|1 >	το B αντιστρέφεται γιατί το A=1
|1 >	|1 >	|1 >	|0 >	

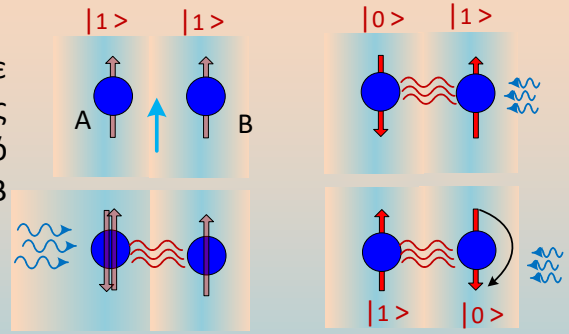
Παρατηρούμε ότι...

...από 4 διαφορετικές εισόδους...

...παίρνουμε 4 διαφορετικές εξόδους.

Η CNOT υλοποιείται με spin ηλεκτρονίου σαν qubit ως εξής:

το A τίθεται σε κατάσταση υπέρθεσης και σε κβαντικό εναγκαλισμό με το B



...έτσι το B με κατάλληλη ακτινοβολία μπορεί να αντιστρέφεται μόνο όταν το A είναι επάνω spin.

Έτσι κάθε διαφορετική έξοδος μπορούμε να γνωρίζουμε από ποια είσοδο προήλθε...

...αυτό φανερώνει ότι οι κβαντικές λογικές πύλες είναι **αντιστρέψιμες ή συμμετρικές στο χρόνο** και ότι η **πληροφορία δεν χάνεται**.

Αυτές οι ιδιότητες είναι μοναδικές γιατί δεν υπάρχουν στις κλασικές λογικές πύλες.

Κβαντικός αλγόριθμος

Με την κατάλληλη εφαρμογή είναι παρόμοιες με αυτές των κλασικών υπολογιστών, είναι απλές υπολογιστικές διατάξεις οι οποίες αντί να τροφοδοτούνται με ηλεκτρικά ρεύματα (κλασσικές πύλες) τροφοδοτούνται με ένα ή περισσοότερα quibit και εκτελείται μια απλή πράξη.

Παράδειγμα κβαντικού αλγορίθμου

Ένας πολύ έξυπνος και πολύπλοκος χαρακτηριστικός αλγόριθμος του είναι αυτός του Grover.

Έστω ότι έχουμε έναν αλφαβητικό κατάλογο με N (π.χ. 1.000.000) ονόματα όπου στο καθένα όνομα υπάρχει ένας αριθμούς (τηλεφώνου ή ο αριθμός μητρώου φοιτητή κ.ά.)

Έστω ότι έχουμε έναν από αυτούς τους αριθμούς και θέλουμε να βρούμε σε ποιο όνομα αντιστοιχεί.

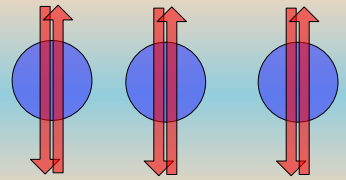
Επειδή ο κατάλογος δεν είναι ταξινομημένος ως προς τους αριθμούς αλλά ως προς τα ονόματα,
ένας κλασικός υπολογιστής θα έψαχνε κάνοντας συνεχώς προσπάθειες όπου συγκρίνει τον αριθμό αυτόν με όλους έναν-έναν τους αριθμούς του καταλόγου.

Μετά από περίπου N/2 (500.000) προσπάθειες θα είχε μεγάλη πιθανότητα ο κλασικός υπολογιστής να βρεί το όνομα που αντιστοιχεί στον αριθμό.

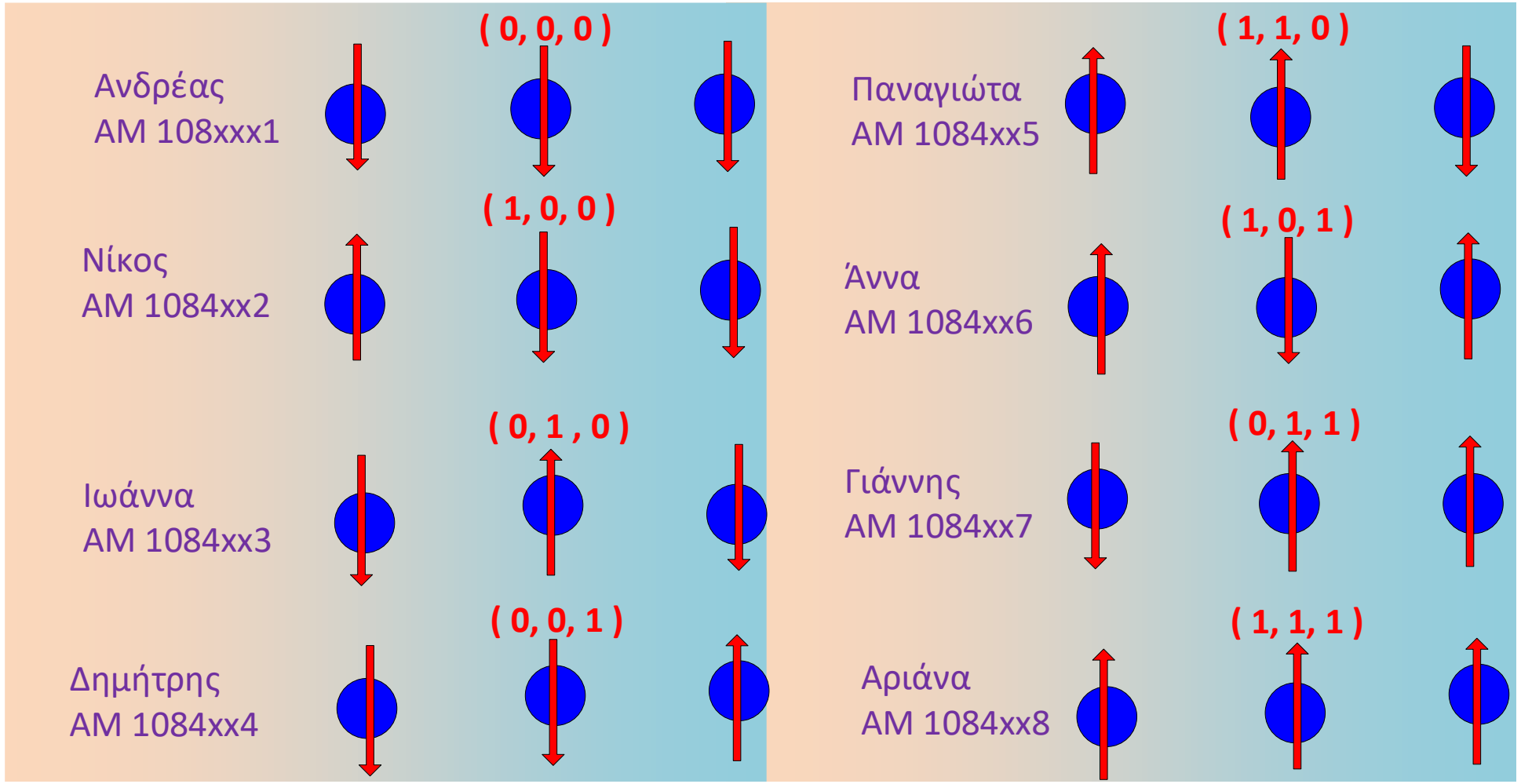
Ένας κβαντικός υπολογιστής εφαρμόζοντας το αλγόριθμο του Grover θα το βρει με μεγάλη πιθανότητα κάνοντας πολύ λιγότερες προσπάθειες μόνο **τη τετραγωνική ρίζα του N** του αριθμού των ονομάτων που περιέχονται στο κατάλογο ($N^{½}$) δηλαδή μόνο 1.000 !!! ονόματα του καταλόγου.

Θα δούμε τη λειτουργία αυτού του αλγόριθμου σε ένα μικρό δείγμα

Θα παρουσιάσουμε τη λειτουργία του αλγόριθμου με το απλό παράδειγμα των 8 ονομάτων, ο οποίος απαιτεί 3 κβαντικά bit (qubits) να είναι σε κβαντική υπέρθεση.



Βρίσκονται σε υπέρθεση $2^3=8$ δυνατών καταστάσεων του Spin



Η υπέρθεση όλων αυτών των γράφεται :

$$|\Psi> = = c_1|0,0,0> + c_2|1,0,0> + c_3|0,1,0> + c_4|0,0,1> + c_5|1,1,0> + c_6|1,0,1> + c_7|0,1,1> + c_8|1,1,1>$$

Όπου ο κάθε συντελεστής c_i με το τεράγωνό του c_i^2 δηλώνει την πιθανότητα να βρεθεί το κάθε qubit στην συγκεκριμένη κατάσταση.

Επειδή η πιθανότητα αυτή είναι ίδια ίση με $c_i^2=1/8$ για όλα τα qubit τότε είναι $c_i=1/(8)^{1/2}$.

Απλουστευμένη λειτουργία κβαντικού αλγόριθμου Grover

Έστω ότι θέλουμε να βρούμε σε ποιο όνομα αντιστοιχεί το στοιχείο | 0, 0, 1 >

Τότε εφαρμόζουμε μια λειτουργία σε όλα τα qubit

Αυτή η λειτουργία είναι πολύπλοκη και αρκετά δυσνόητη,...

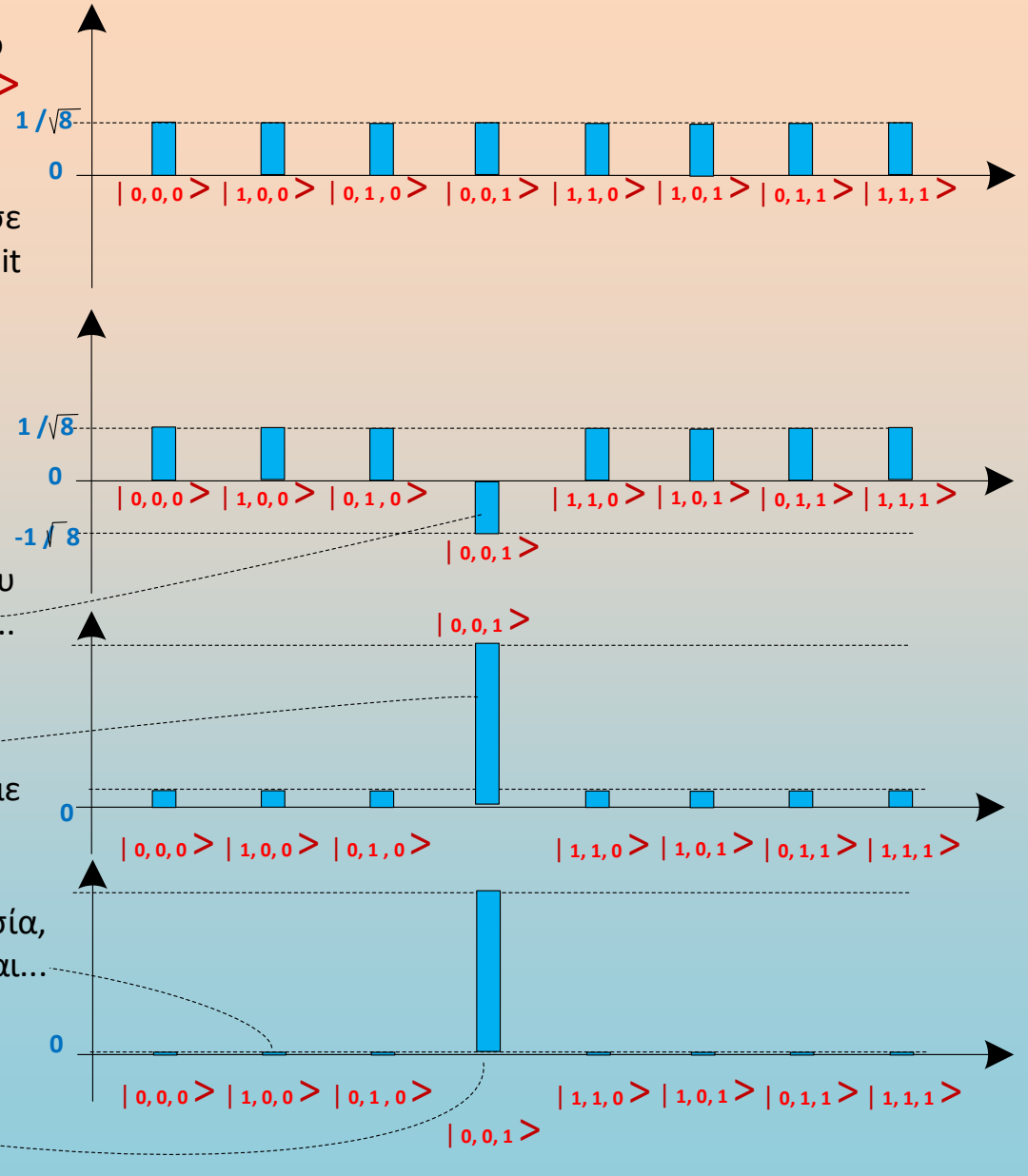
όμως αυτή έχει σαν τελικό αποτέλεσμα ότι ...

...το συγκεκριμένο qubit που ψάχνουμε αλλάζει πρόσημο...

...Μετά εφαρμόζεται μια άλλη λειτουργία που ενισχύει τη διαφορά το συγκεκριμένου qubit που ψάχνουμε σε σχέση με τα υπόλοιπα.

...Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, τότε όλα μηδενίζονται...

...και παραμένει μη μηδενικό το συγκεκριμένου qubit που ψάχνουμε το οποίο και μετρείται.



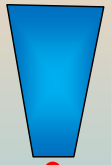
Το αποτέλεσμα ενός κβαντικού υπολογισμού θα είναι η τελική κατάσταση του κβαντικού καταχωρητή.

Κβαντικά bit ηλεκτρονικών συσκευών στερεάς κατάστασης (qubits solid state electronic devices)

Τα qubits που βασίζονται σε spin ηλεκτρονίων ή πυρήνων που βρίσκονται επάνω σε ηλεκτρονικές συσκευές στερεάς κατάστασης είναι η πιο υποσχόμενη τεχνολογία για κατασκευαστούν σήμερα κβαντικοί υπολογιστές.

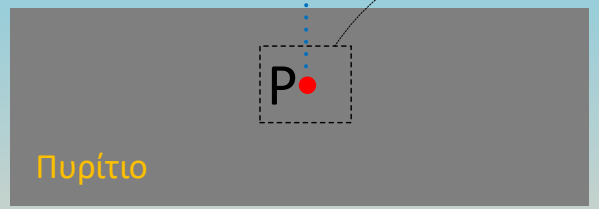
Τα τελευταία χρόνια βρέθηκε από μια ερευνητική ομάδα του University of New South Wales (Sydney) ότι χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία του πυριτίου όπου βασίζονται οι κλασικοί υπολογιστές και χτίζονται οι μικροεπεξεργατές (CPU) μπορούμε να χτίσουμε την τεχνολογία των κβαντικών υπολογιστών...

...χρησιμοποιώντας την τεχνικη της ιοντικής εμφύτευσης ενός μόνον ατόμου σε πυρίτιο.

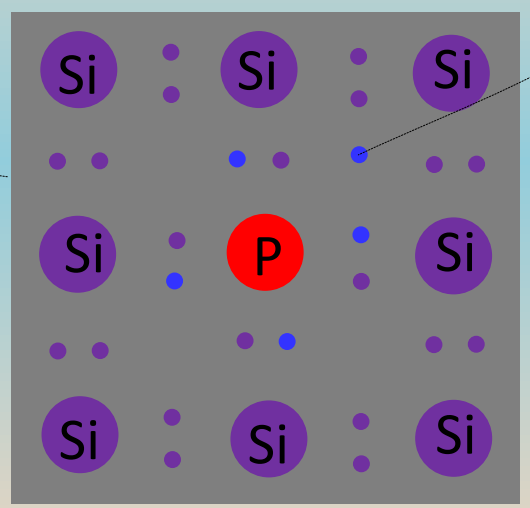


Άτομο φωσφόρου (P)

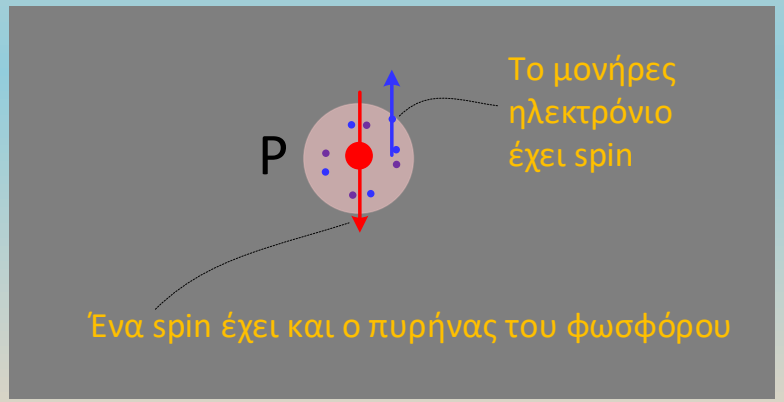
Εμφύτευση ενός ατόμου φωσφόρου βαθειά μέσα στο πυρίτιο



Το εμφυτευμένο άτομο φωσφόρου παίρνει τη θέση ενός ατόμου πυριτίου (Si) το οποίο έχει εκδιώξει και κάνει 4 ομοιοπολικούς με τα 4 γειτονικά άτομα Si.



Το πέμπτο όμως μονήρες ηλεκτρόνιο του φωσφόρου δεν κάνει δεσμό με άλλο άτομο Si γιατί δεν υπάρχει διαθέσιμο πέμπτο άτομο SI.

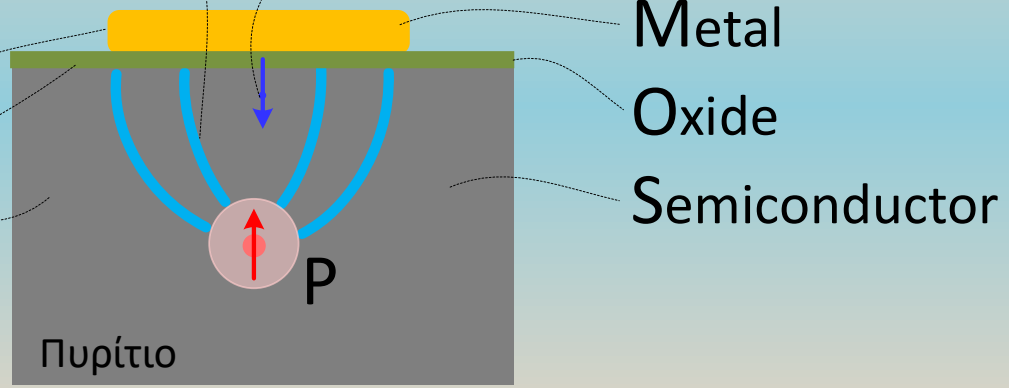


Το σύστημα των Spin του πυρήνα και του μονήρους ηλεκτρονίου του φωσφόρου αποτελούν το qubit

Εφαρμόζοντας μικρή θετική τάση στο ηλεκτρόδιο πύλης, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο...

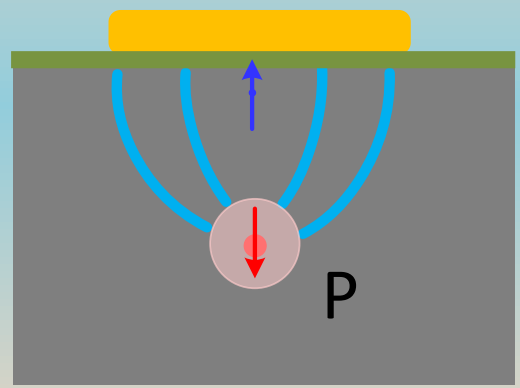
...και το μονήρες ηλεκτρόνιο του φωσφόρου έλκεται κοντά στο ηλεκτρόδιο πύλης (gate)

Ηλεκτρονική δομή μετάλλου οξειδίου (μονωτή) ημιαγωγού (MOS)



Σε αυτή τη διάταξη των spin έχουμε την θεμελιώδη κατάσταση $|0>$

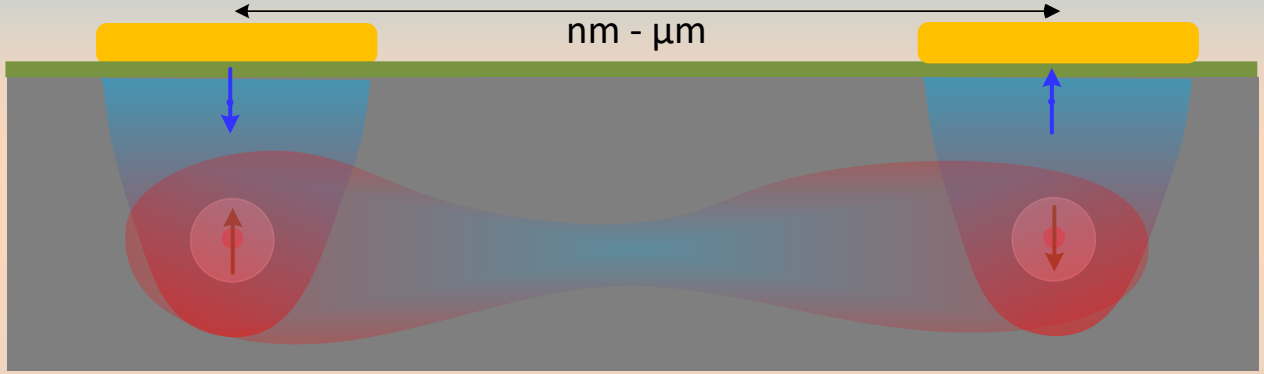
Εφαρμόζοντας ηλεκτρική τάση περιστρέφονται τα Spin **χωρίς να απαιτείται μαγνητικό πεδίο** διευκολύνοντας πολύ τον έλεγχο της θσμςλιώδους κατάστασης αυτών των qubits



Ενώ σε αυτή τη διάταξη των spin έχουμε την θεμελιώδη κατάσταση $|1>$

Πολύ πρόσφατα η ερευνητική ομάδα του University of New South Wales (Sydney) βρήκε πως δεν απαιτούνται πολύ μικρές ενδοατομικές αποστάσεις της τάξεως των nm ώστε αυτά τα qubit να επικοινωνούν μεταξύ των και να βρίσκονται σε εμπλοκή ώστε να γίνουν κβαντικοί υπολογισμοί. Τα qubit Μπορεί να βρίσκονται σε αοστάσεις ακόμα και μερικών μm και να επικοινωνούν μεταξύ των.

Επειδή το σύστημα μονήρες ηλεκτρόνιο και το θετικό ιόν του φοσφώρου αποτελούν ηλεκτρικό δίπολο που δημιουργούν ηεκτρικό πεδίο στο χώρο, αυτά μπορούν να αλληλεπιδρούν από πολύ μεγάλες αποστάσεις της τάξεως των μm.

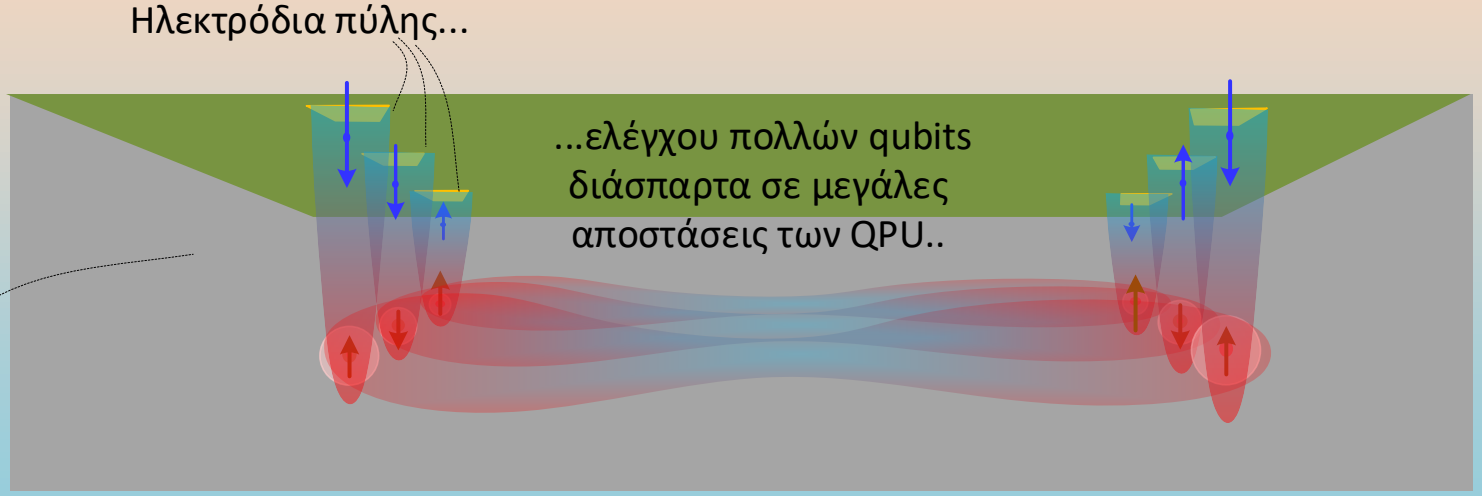


Χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία του πυριτίου τώρα υπάρχει για πρώτη φορά η δυνατότητα να διαχειριστούν πολλά qubits και...

...έτσι να χτιστούν οι κβαντικοί

μικροεπεξεργατές QPU

των κβαντικών υπολογιστών.



...χτισμένα σε υπάρχουσα τεχνολογία πυριτίου.