

Κβαντικός Υπολογιστής και Κβαντική Πληροφορία

Κοκκινάκης Δημήτριος



**ΕΘΝΙΚΟΝ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΝ ΑΘΗΝΩΝ**

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΘΕΜΑ: ΚΒΑΝΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΗΣ
& ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ**

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΟΚΚΙΝΑΚΗΣ
Α.Μ.: 200400096

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ ΔΡ.ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΔΑΝΕΖΗΣ

ΑΘΗΝΑ 2014

Ευχαριστιες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου Δρ. Εμμανουήλ Δανέζη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον θέμα, καθώς επίσης για την καθοδήγηση, την επεξήγηση πολύπλοκων εννοιών, τα σχόλια και τις διορθώσεις στο τελικό κείμενο. Επίσης ευχαριστώ θερμά τον Μιχάλη Παπαδάκη για την βοήθεια τον χρόνο που μου διέθεσε .Τέλος , ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους εκείνους που με έμαθαν να «προσπερνώ» και βοήθησαν να γίνουν «ανεκτοί» οι συμβιβασμοί των τελευταίων χρόνων: την οικογένεια και τους φίλους μου. Στην Κατερίνα, που με την συμπαράσταση, την υπομονή και την θετική της σκέψη, ιδιαίτερα τις εποχές των μεγάλων διλημμάτων, συνέβαλε στην εκπλήρωση του στόχου μου, αφιερώνεται η εργασία αυτή.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Κβαντικός υπολογιστής....σ9

1.2 Ιστορική αναδρομή....σ9

Κεφάλαιο 2 : Βασικές έννοιες δομής-λειτουργίας....σ12

2.1 Bits & Qubits....σ12

2.2 Κβαντική διεμπλοκή-συσχετισμός....σ15

2.3 Κβαντική τηλεμεταφορά....σ17

2.3.1 Το απλούστερο μοντέλο κβαντικής τηλεμεταφοράς....σ18

2.4 Κβαντικό φαινόμενο σήραγγας....σ20

2.5 Κβαντικός καταχωρητής....σ23

2.5.1 Μέτρηση ενός κβαντικού καταχωρητή....σ26

2.6 Κβαντικές πύλες....σ26

2.6.1 Κβαντική πύλη αδράνειας....σ27

2.6.2 Κβαντική πύλη μετατόπισης φάσης....σ27

2.6.3 Κβαντική πύλη Hadamard....σ28

2.6.4 Κβαντική πύλη ελεγχόμενης άρνησης (CNOT)....σ28

2.6.5 Κβαντική πύλη ελεγχόμενης μετατόπισης φάσης....σ29

2.6.6 Κβαντική πύλη διπλά ελεγχόμενης άρνησης (CCNOT)....σ29

2.6.7 Κβαντική πύλη Fredkin....σ30

Κεφάλαιο 3: Κβαντικός υπολογισμός και κβαντικοί αλγόριθμοι....σ31

3.1 Κβαντικοί υπολογισμοί....σ31

3.2 Κβαντικός Επεξεργαστής....σ32

3.3 Κβαντικοί αλγόριθμοι....σ33

3.3.1 Ο κβαντικός αλγόριθμος του Deutsch....σ33

3.3.2 Ο κβαντικός αλγόριθμος του Grover....σ35

3.3.3 Ο κβαντικός αλγόριθμος του Shor....σ37

Κεφάλαιο 4: Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα κβαντικών υπολογιστών....σ40

Κεφάλαιο 5: Ένα βήμα πιο κοντά....σ43

5.1 Ένα βήμα πιο κοντά στους κβαντικούς υπολογιστές....σ43

5.2 Βραβείο νόμπελ φυσικής 2012....σ44

5.3 Νέο ρεκόρ για τους κβαντικούς υπολογιστές....σ47

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα-Επίλογος....σ49

Βιβλιογραφία....σ51

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Κβαντικός υπολογιστής

Ο κβαντικός υπολογιστής είναι μία υπολογιστική συσκευή που εκμεταλλεύεται χαρακτηριστικές ιδιότητες της κβαντομηχανικής, όπως είναι η αρχή της υπέρθεσης και της διεμπλοκής καταστάσεων, για να φέρει εις πέρας επεξεργασία δεδομένων και εκτέλεση υπολογισμών. Ένας κβαντικός υπολογιστής μπορεί να ερευνήσει με πρωτοφανή ταχύτητα τεράστιες και αδόμετες βάσεις δεδομένων, να σπάσει κάθε γνωστό κρυπτογραφικό κώδικα, να προσομοιώσει πολύπλοκες διεργασίες, και να επιλύσει προβλήματα τα οποία είναι αδύνατον να λυθούν από τους κλασικούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές οι οποίοι πλέον ονομάζονται συμβατικοί υπολογιστές.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η αρχική ιδέα ενός υπολογιστή που βασίζεται στην κβαντική φυσική είχε εξερευνηθεί από τη δεκαετία του 1970 από φυσικούς και επιστήμονες που ασχολούνται με τους υπολογιστές. Ήδη το 1969 ο Steven Wiesner πρότεινε την κβαντική επεξεργασία πληροφοριών ως πιθανό τρόπο για την καλύτερη εκτέλεση κρυπτογραφικών προβλημάτων. Οι πρώτες γνωστές δημοσιεύσεις έγιναν στις αρχές της δεκαετίας του 1980 από τον Charles H. Bennett της IBM Thomas J. Watson Research Center, Paul A. Benioff του Argonne National Laboratory στο Illinois, David Deutsch του University of Oxford, καθώς και του Richard P. Feynman από το California Institute of Technology. Η ιδέα προέκυψε καθώς οι επιστήμονες ερευνούσαν τα θεμελιώδη φυσικά όρια του υπολογισμού. Εάν η τεχνολογία συνέχιζε να υπακούει στο «Νόμο του Moore», τότε το συνεχώς συρρικνόμενο μέγεθος των κυκλωμάτων που συσκευάζονται πάνω σε τσιπ πυριτίου θα κατέληγε σε ένα σημείο όπου τα επιμέρους στοιχεία δεν θα ήταν μεγαλύτερα από λίγα άτομα. Αλλά καθώς οι φυσικοί νόμοι που διέπουν τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες του υποθετικού κυκλώματος σε ατομική κλίμακα είναι κυρίως κβαντομηχανικής φύσεως και όχι κλασικής, το φυσικό ερώτημα που προκύπτει είναι αν ένα νέο είδος υπολογιστή μπορεί να επινοηθεί με βάση τις αρχές της κβαντικής φυσικής. Ο Feynman ήταν από τους πρώτους που επιχείρησαν να δώσουν απάντηση στο ερώτημα αυτό, παράγοντας ένα αφηρημένο μοντέλο το 1982 που έδειξε πως ένα κβαντικό σύστημα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσουμε υπολογισμούς. Εξήγησε επίσης πως μια τέτοια μηχανή θα είναι σε θέση να ενεργεί ως προσομοιωτής για την κβαντική φυσική και ότι κάθε κλασικός υπολογιστής που θα αξιοποιηθεί για το έργο αυτό θα το κάνει αναποτελεσματικά, επισύροντας μια εκθετική επιβράδυνση στο χρόνο υπολογισμού. Το 1985 ο David Deutsch πρότεινε τη πρώτη κβαντική μηχανή Turing, που είναι ένα θεωρητικό μοντέλο γνωστή και ως ο καθολικός κβαντικός υπολογιστής, και άνοιξε το δρόμο για το κβαντικό κυκλωματικό

μοντέλο και το 1990 ο Itamar Pitowsky έθεσε το ερώτημα κατά πόσον η αρχή της επαλληλίας θα επιτρέψει στους κβαντικούς υπολογιστές την επίλυση NP-πλήρη προβλημάτων. Η πρόοδος στους κβαντικούς αλγόριθμους ξεκίνησε τη δεκαετία του 1990, με την ανακάλυψη της oracle μηχανής του Deutsch-Josza (1992) και της oracle μηχανής του Simon (1994). Η τελευταία παρείχε τη βάση για τον αλγόριθμο Shor για τη παραγοντοποίηση, για τον οποίο θα ασχοληθούμε παρακάτω. Το 1996, ο Lov Grover από τα εργαστήρια της Bell εφηύρε τον αλγόριθμο κβαντικής αναζήτησης που δίνει μία τετραγωνική επιτάχυνση σε σύγκριση με την κλασικό αντίστοιχό του. Από το 2000 ο τομέας είδε μεγάλη ανάπτυξη καθώς νέα παραδείγματα κβαντικών αλγορίθμων έχουν εμφανιστεί, όπως αδιαβατικοί αλγόριθμοι, αλγόριθμοι που βασίζονται σε μετρήσεις, και τοπολογικοί αλγόριθμοι με βάση τη κβαντική θεωρία του πεδίου, νέων φυσικών μοντέλων για την πραγματοποίηση μίας μεγάλης κλίμακας κβαντικών υπολογιστών με ψυχρές παγίδες ιόντων, κβαντικών οπτικών (χρησιμοποιώντας φωτόνια και οπτική κοιλότητα), συμπυκνωμένα συστήματα ύλης και στερεάς φυσικής κατάστασης.

NP-προβλήματα, Υπολογισιμότητα και Μηχανή Τούρινγκ: Καθολική Μηχανή Τούρινγκ ονομάζεται μία Μηχανή Τούρινγκ που δέχεται ως είσοδο κατάλληλα κωδικοποιημένες συμβολοσειρές που συμβολίζουν άλλες Μηχανές Τούρινγκ (M) και μία είσοδο γι' αυτές (w) και προσομοιώνει τη λειτουργία της M με είσοδο w. Με αυτόν τον τρόπο κωδικοποίησης ένα οποιοδήποτε υπολογιστικό πρόβλημα μπορεί να εκφραστεί ως ένα σύνολο συμβολοσειρών, δηλαδή μία γλώσσα, και να επιλυθεί από μία κατάλληλη Μηχανή Τούρινγκ που αποφασίζει αυτή τη γλώσσα· δηλαδή τερματίζει με βεβαιότητα για όλες τις εισόδους της. Αν για ένα υπολογιστικό πρόβλημα δεν μπορεί να βρεθεί μία Μηχανή Τούρινγκ που να αποφασίζει την αντίστοιχη γλώσσα, τότε το πρόβλημα αυτό είναι μη επιλύσιμο, δεν μπορεί δηλαδή να υπάρξει αλγόριθμος που το επιλύει. NP ονομάζεται το σύνολο των γλωσσών που αναπαριστούν υπολογιστικά προβλήματα για τα οποία είναι γνωστή μη ντετερμινιστική Μηχανή Τούρινγκ που τα επιλύει σε πολυωνυμικό χρόνο αλλά όχι ντετερμινιστική (οι ισοδύναμες ντετερμινιστικές Μηχανές Τούρινγκ έχουν αυξημένη εκθετική πολυπλοκότητα). Τα προβλήματα του NP που δεν φαίνεται να ανήκουν στο P έχουν την ιδιότητα να ανάγονται όλα σε ένα μικρό σύνολο βασικών και καλά μελετημένων προβλημάτων. Αυτή η ιδιότητα ονομάζεται πληρότητα και τα εν λόγω προβλήματα ονομάζονται NP-πλήρη.

Νόμος του Moore: Ο νόμος του Moore είναι μια πρόβλεψη / μέτρηση που αφορά στην αύξηση των επιδόσεων των ηλεκτρονικών υπολογιστών μέσα στον χρόνο -και πιο συγκεκριμένα στους ρυθμούς βελτίωσης των μικροεπεξεργαστών. Ο νόμος προβλέπει ότι ο αριθμός των τρανζίστορ σε ένα μικροεπεξεργαστή διπλασιάζεται κάθε περίπου δύο έτη. Για πολλές δεκαετίες ο νόμος του Moore έχει επαληθευτεί από την πραγματικότητα καθιστώντας τον ιδιαίτερα δημοφιλή στους χρήστες πληροφορικής. Σημειώνεται ότι ο Gordon Moore υπήρξε συνιδρυτής της κορυφαίας εταιρείας κατασκευής μικροεπεξεργαστών Intel (ΗΠΑ), ενώ διατύπωσε τον περίφημο νόμο του το 1965. Το 2007 σε μια συνέντευξη του ο Moore αναφέρει ότι ο νόμος του δε θα διαρκέσει για πάντα. Στην συνέντευξή του λέει τα εξής: "Δεν είμαστε μακριά από αυτό. Πριν γίνει η επανάσταση με το υλικό άφνιο είχαμε φτάσει σε ένα σημείο όπου ήμασταν στα 5 μοριακά στρώματα στη δομική πύλη των τρανζίστορ. Έτσι αν συνεχίζαμε τη προσπάθεια για βελτίωση θα είχαμε σοβαρότερα προβλήματα να αντιμετωπίσουμε." Το Άφνιο είναι ένα συνθετικό υλικό που χρησιμοποιείται από την Intel για τις μονώσεις διηλεκτρικών πυλών των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (της γενιάς των 45 nm). Πριν από το άφνιο, η εταιρεία βασιζόταν σε μονωτές πυριτίου. Σύμφωνα με την Intel το άφνιο μπορεί να παράγει τσιπ με μεγαλύτερες ταχύτητες και περισσότερη εξοικονόμηση ενέργειας, επιτρέποντας τη μείωση του μεγέθους του κυκλώματος κάτω από τα 45nm. Ο Moore τόνισε ότι υπάρχουν θεμελιώδεις όρια στο νόμο του, ανεξαρτήτως από τα υλικά. Ανέφερε πως εκπλήσσεται συνεχώς στο ότι οι τεχνολόγοι πνέζουν αυτά τα όρια. Παρόλο αυτά ξεκαθάρισε ότι το τέλος είναι κοντά. Όταν ρωτήθηκε για πόσο καιρό ακόμα θα ισχύει ο νόμος του, η απάντησή του ήταν γύρω στα 10 με 15 χρόνια.

Κεφάλαιο 2: Βασικές έννοιες δομής-λειτουργίας

2.1 Bits & Qubits

Στον κλασικό ηλεκτρονικό υπολογιστή στοιχειώδης μονάδα πληροφορίας πληροφορίας είναι το bit, ενώ σε έναν κβαντικό υπολογιστή το qubit (κβαντικό δυαδικό ψηφίο). Τα bit μπορούν να αναπαραστήσουν την τιμή 1 ή 0 ενώ το qubit μπορεί να αναπαραστήσει την τιμή 1, 0 ή οποιαδήποτε υπέρθεση αυτών των 2. Δύο qubits μπορούν να αναπαραστήσουν οποιαδήποτε υπέρθεση τεσσάρων δυνατών καταστάσεων, 3 qubits οποιαδήποτε υπέρθεση 8 καταστάσεων. Γενικά ένας κβαντικός υπολογιστής με n qubits μπορεί να βρίσκεται σε αυθαίρετη υπέρθεση των έως 2^n δυνατών καταστάσεων ταυτόχρονα, ενώ ένας κλασικός υπολογιστής μπορεί να βρίσκεται μόνο σε μια από αυτές τις καταστάσεις κάθε στιγμή.

Έτσι, σε έναν υπολογιστή με 200 θέσεις μνήμης μπορεί να επεξεργαστεί πληροφορία qubit, και μάλιστα με τη δυνατότητα να υπάρχουν σε κατάσταση επαλληλίας με αποτέλεσμα να μπορούν να βρίσκονται ταυτόχρονα και "πάνω" και "κάτω". Δηλαδή, μπορούν να καταχωρούν και να διαχειρίζονται και το 0 και το 1 ταυτόχρονα. Κάθε qubit λοιπόν παραμένει σε διάφορες καταστάσεις επαλληλίας, οπότε το υπολογιστικό πρόγραμμα εκτελείται ταυτόχρονα ή παράλληλα και για τις δύο τιμές της δυαδικής μεταβλητής του κάθε qubit. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως μαζικός κβαντικός παραλληλισμός και αποτελεί το θεμελιώδη μηχανισμό λειτουργίας ενός κβαντικού υπολογιστή.

Qubits	ΚΑΤΑΧΩΡΕΙ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΑ	ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ bits
1	(0 και 1)	2
2	(0 και 1) (0 και 1)	$2 \times 2 = 2^2 = 4$
3	(0 και 1) (0 και 1) (0 και 1)	$2 \times 2 \times 2 = 2^3 = 8$
⋮	⋮	⋮
300	(0 και 1) (0 και 1)..... (0 και 1)	2^{300}

Το qubit μπορεί να βρεθεί σε οποιαδήποτε υπέρθεση των δύο βασικών καταστάσεων:

$$|q\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle, \text{ όπου } [a^2] + [b^2] = 1$$

Οι δύο βασικές καταστάσεις του qubit μπορούν να γραφούν ως πίνακες:

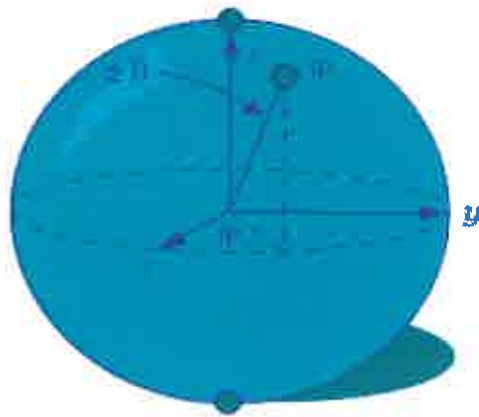
$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Το ίδιο και η υπέρθεση καταστάσεων:

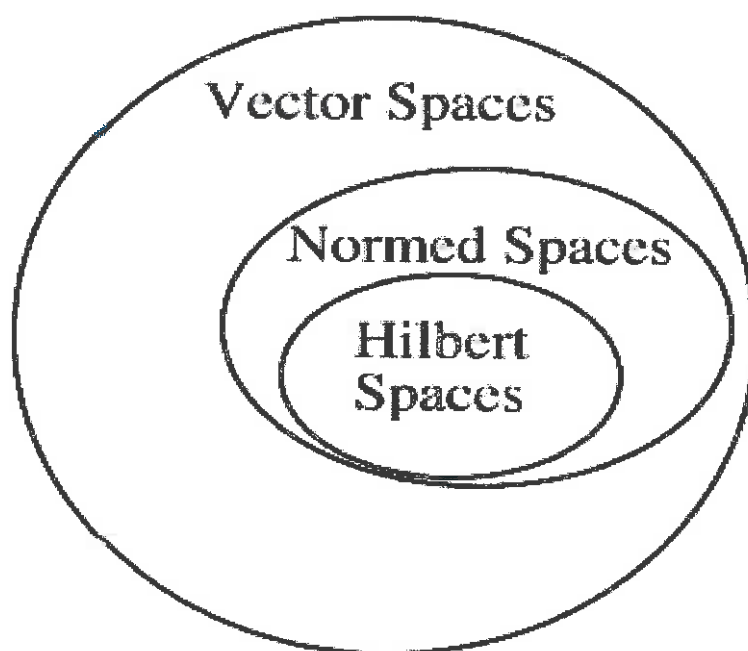
$$|q\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle = a \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

Όπου a, b : πλάτη πιθανότητας και είναι μιγαδικοί αριθμοί και το $|q\rangle$ του qubit είναι δυδιάστατο διάνυσμα στο χώρο Hilbert.

Μια πολύ χρήσιμη παράσταση για το qubit, η οποία απεικονίζει σχεδόν όλα τα χαρακτηριστικά του, είναι η σφαίρα Bloch. Είναι μια γεωμετρική αναπαράσταση του χώρου καθαρής κατάστασης ενός κβαντομηχανικού συστήματος δύο επιπέδων που πήρε το όνομά της από τον φυσικό Φέλιξ Μπλοχ. Εναλλακτικά, είναι ο χώρος καθαρής κατάστασης ενός κβαντικού καταχωρητή 1 qubit. Η σφαίρα Μπλοχ είναι και γεωμετρικά μια σφαίρα και η αντιστοιχία μεταξύ των στοιχείων της σφαίρας και των καθαρών καταστάσεων μπορεί να δοθεί σαφώς. Σε γενικευμένη μορφή, η σφαίρα Μπλοχ μπορεί επίσης να αναφέρεται στο ανάλογο χώρο ενός κβαντικού συστήματος n επιπέδων. Η κβαντική μηχανική είναι μαθηματικά διατυπωμένη σε ένα χώρο Χίλμπερτ ή προβαλλόμενο χώρο Χίλμπερτ. Ο χώρος των καθαρών καταστάσεων ενός κβαντικού συστήματος δίνεται από τις ακτίνες στον χώρο Χίλμπερτ (τα σημεία του προβαλλόμενου χώρου Χίλμπερτ). Ο χώρος των ακτίνων σε οποιοδήποτε διανυσματικό χώρο είναι ένας προβαλλόμενος χώρος, και συγκεκριμένα, ο χώρος των ακτίνων σε ένα δισδιάστατο χώρο Χίλμπερτ είναι η μιγαδική προβολική γραμμή, η οποία είναι ισομορφική προς τη σφαίρα.



- Χώρος Hilbert:** Η μαθηματική έννοια του χώρου Hilbert που πήρε το όνομά του από τον David Hilbert, γενικεύει την έννοια του Ευκλείδειου χώρου. Επεκτείνει τις μεθόδους της γραμμικής άλγεβρας και του λογισμού από το δισδιάστατο επίπεδο και τρισδιάστατο χώρο σε χώρους με κάθε πεπερασμένο ή άπειρο αριθμό διαστάσεων. Η ουσιαστική διαφορά είναι ότι η βάση του χώρου και τα στοιχεία του αποτελούνται από συναρτήσεις αντί από διανύσματα. Ο χώρος Hilbert μπορεί να είναι πραγματικός ή μιγαδικός.



2.2 Κβαντική διεμπλοκή-Συσχετισμός

Η κβαντική διεμπλοκή (entanglement) ή συσχετισμός, είναι το φαινόμενο κατά το οποίο, δύο αντικείμενα που δημιουργούνται μαζί (για παράδειγμα δύο ηλεκτρόνια) μένουν σε κατάσταση διεμπλοκής μεταξύ τους, ασχέτως του χώρου που μεσολαβεί πλέον από το ένα στο άλλο. Αν στείλουμε το ένα από τα δύο στο άλλο άκρο του σύμπαντος και κάνουμε κάτι σε οποιοδήποτε από τα δύο, το άλλο αντιδρά ακαριαία. Έτσι, είτε πρέπει να δεχτούμε πως η πληροφορία μπορεί να ταξιδέψει με άπειρη ταχύτητα είτε πως στην πραγματικότητα τα δύο αντικείμενα βρίσκονται ακόμα σε «επαφή», σε σύνδεση μεταξύ τους, σε κατάσταση διεμπλοκής. Η κβαντική διεμπλοκή είναι υπαρκτό φαινόμενο και παρατηρείται σε πειράματα, όχι μόνο στο μικρόκοσμο, αλλά και σε μεγαλύτερες κλίμακες. Έτσι, δύο ή περισσότερα Qubit μπορούν να περιγραφούν σαν συνδυασμός των καταστάσεων του κάθε bit ξεχωριστά. Όταν τα δύο qubits, βρίσκονται σε διεμπλοκή, η μέτρηση της κατάστασης του ενός qubit καθορίζει την κατάσταση του άλλου. Αυτή η απόλυτη συσχέτιση ισχύει πάντα ανεξάρτητα με τον τρόπο που γίνεται η μέτρηση. Προέκταση της κβαντικής διεμπλοκής, με την προϋπόθεση πως συνέβη η μεγάλη έκρηξη, είναι πως τα πάντα, αφού δημιουργήθηκαν μαζί, είναι ακόμα συνδεδεμένα μεταξύ τους, «ακουμπούν» υπό μία έννοια ακόμα το ένα το άλλο. Έτσι ο χώρος εμφανίζεται σαν ένα κατασκεύασμα που δίνει την ψευδαίσθηση πως υπάρχουν χωριστά αντικείμενα. Υπό την έννοια αυτή, η κβαντική διεμπλοκή κάνει να καταρρέει η εμπειρία μας για τον χώρο.

Μαθηματικά, δύο συστήματα βρίσκονται σε κβαντική διεμπλοκή, όταν η κατάστασή τους δεν μπορεί να γραφεί σαν τανυστικό γινόμενο των βασικών τους καταστάσεων.

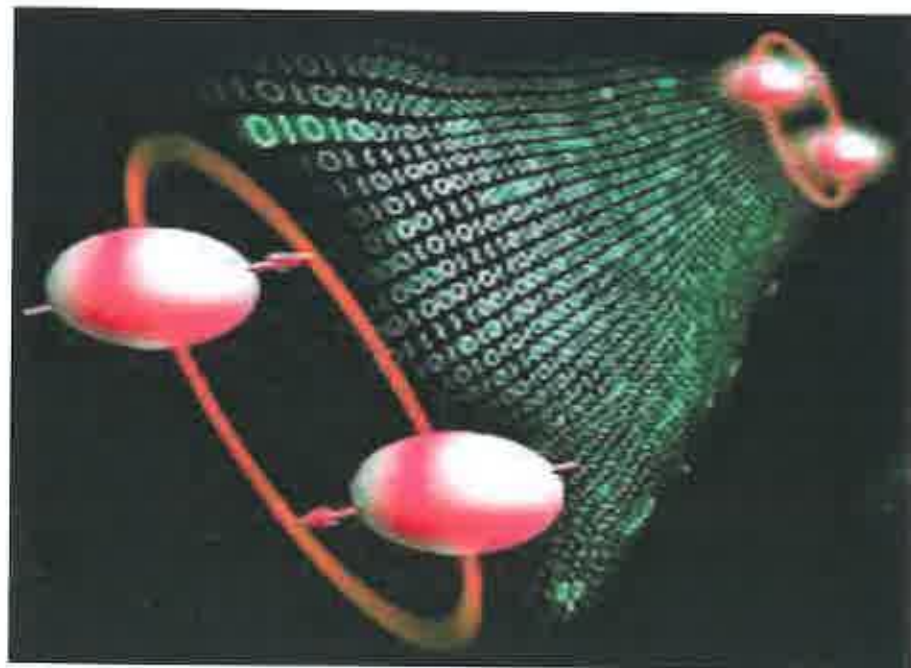
Αν θεωρήσουμε λοιπόν δύο qubits $|q_{e0}\rangle$ και $|q_{e1}\rangle$ τα οποία βρίσκονται στην κατάσταση $|q_e\rangle$ που δίνεται από την σχέση:

$$|q_e\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0 \ 0\rangle + |1 \ 1\rangle)(1 \ 1),$$

η $|q_e\rangle$ δεν μπορεί, να γραφεί σαν τανυστικό γινόμενο των καταστάσεων των δύο qubits, οπότε τα $|q_{e0}\rangle$ και $|q_{e1}\rangle$ βρίσκονται σε κβαντική διεμπλοκή. Αν μετρήσουμε δηλαδή την κατάσταση του $|q_{e1}\rangle$ θα βρούμε με πιθανότητα

0,5 ότι βρίσκεται στην κατάσταση $|0\rangle$ και με πιθανότητα 0,5 ότι βρίσκεται στην κατάσταση $|1\rangle$. Αν βρεθεί στην κατάσταση $|1\rangle$, τότε, αν μετρήσουμε την κατάσταση του qubit $|q_{e0}\rangle$ θα βρούμε σίγουρα ότι βρίσκεται και αυτό στην κατάσταση $|1\rangle$, αφού τα δύο qubits, βρίσκονται σε διεμπλοκή, η μέτρηση της κατάστασης του ενός qubit καθορίζει την κατάσταση του άλλου.

Αυτή η απόλυτη συσχέτιση ισχύει πάντα ανεξάρτητα με τον τρόπο που γίνεται η μέτρηση (π.χ. αν τα qubit υλοποιούνται μέσω συστήματος spin, τότε ανεξάρτητα από τον άξονα μέτρησης του spin για τα δύο σωματίδια θα παίρνουμε πάντα συσχετισμένα αποτελέσματα). Η συσχέτιση αυτή ισχύει ανεξάρτητα από τη χωρική απόσταση των δύο qubits. Η κβαντική διεμπλοκή είναι ένα φυσικό φαινόμενο που παρατηρείται σε πειράματα μικρής και μεγάλης κλίμακας, και παίζει κυρίαρχο ρόλο σε τομείς όπως η ανάπτυξη κβαντικών υπολογιστών και η ασφάλεια τηλεπικοινωνιών.



Για τους κβαντικούς υπολογιστές η κβαντική διεμπλοκή είναι ένας φυσικός πόρος, όπως είναι η ενέργεια, τον οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε στην εκτέλεση κβαντικών υπολογισμών και την ανάπτυξη κβαντικών αλγορίθμων. Έτσι, σημασία δεν έχει η κατανόηση της φύσης της κβαντικής διεμπλοκής, αλλά να μάθουμε να την παράγουμε και να τη χρησιμοποιούμε.

Είναι σημαντικό να δούμε τη διαφορά μεταξύ της υπέρθεσης και της διεμπλοκής. Αν μετρήσουμε την κατάσταση ενός qubit $|q_{s1}\rangle$ της κατάστασης $|q_s\rangle$, θα βρούμε ότι βρίσκεται στην κατάσταση $|1\rangle$. Μετά τη μέτρηση, το qubit $|q_{s0}\rangle$ μπορεί να βρίσκεται στην κατάσταση $|0\rangle$ ή $|1\rangle$ με πιθανότητα 0,5 για κάθε περίπτωση. Δηλαδή η μέτρηση της κατάστασης ενός qubit δεν μπορεί να καθορίσει την κατάσταση του άλλου.

Αν τώρα έχουμε κβαντική διεμπλοκή, και μετρήσουμε την κατάσταση του qubit $|q_{e1}\rangle$ της κατάστασης $|q_e\rangle$, θα βρούμε ότι βρίσκεται στην κατάσταση $|0\rangle$ ή $|1\rangle$ με πιθανότητα 0,5. Αν το βρούμε στην $|0\rangle$, τότε αν μετρήσουμε την κατάσταση του $|q_{e0}\rangle$, θα δούμε ότι και αυτό θα βρίσκεται στην $|0\rangle$. Με λίγα λόγια, εφόσον τα δύο qubits βρίσκονται σε κατάσταση κβαντικής διεμπλοκής, η μέτρηση του ενός καθορίζει την κατάσταση του άλλου, και μπορούμε να γνωρίζουμε την κατάσταση του χωρίς να το μετρήσουμε.

2.3 Κβαντική τηλεμεταφορά

Αρκετοί επιστήμονες θεωρούν πλέον ότι κάποτε θα καταστεί εφικτή η τηλεμεταφορά ολόκληρων ανθρώπων από το ένα μέρος στο άλλο. Προς το παρόν πάντως -και για αρκετό ακόμη καιρό- θα πρέπει να αρκεστούμε στην τηλεμεταφορά κβαντικών πληροφοριών.

Το όφελος θα είναι η δημιουργία του «κβαντικού διαδικτύου», που θα διασυνδέει αστραπιαία εξίσου γρήγορους κβαντικούς υπολογιστές. Ακόμη πιο άμεσα, προτού υλοποιηθεί το κβαντικό διαδίκτυο, η τηλεμεταφορά κβαντικών δεδομένων θα καταστήσει πιο ασφαλής από τους «ωτακουστές» τις σημερινές επικοινωνίες, καθώς η μετάδοση κβαντικών δεδομένων θεωρείται 100% ασφαλής (θεωρητικά τουλάχιστον). Οι ερευνητές, με επικεφαλής τον καθηγητή Ρόναλντ Χάνσον του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης του Πανεπιστημίου Τεχνολογίας Ντελφτ (ενός εκ των κορυφαίων ευρωπαϊκών πολυτεχνείων), έκαναν τη σχετική δημοσίευση στο περιοδικό «Science», σύμφωνα με τους «Τάιμς της Νέας Υόρκης» και τη βρετανική «Telegraph». Ο Χάνσον δήλωσε ότι οι νόμοι της Φυσικής δεν απαγορεύουν την τηλεμεταφορά μεγάλων αντικειμένων, άρα και ανθρώπων. Όπως είπε, κάποια στιγμή στο απώτερο μέλλον δεν αποκλείεται οι άνθρωποι να διακτινίζονται ακόμη και στο διάστημα. Σύμφωνα με τους επιστήμονες, η τηλεμεταφορά αφορά κατά βάση την κατάσταση ενός σωματιδίου. «Εφόσον πιστεύει κανείς ότι δεν είμαστε παρά μια συλλογή ατόμων συνενωμένων με ένα συγκεκριμένο τρόπο, θεωρητικά φαίνεται δυνατό να τηλεμεταφέρουμε τους εαυτούς μας από το ένα

μέρος στο άλλο. Πρακτικά, κάτι τέτοιο θα είναι πολύ απίθανο, αλλά το να πούμε ότι ποτέ δεν θα γίνει, αυτό θα ήταν επικίνδυνο. Δεν θα το απέκλεια, επειδή κανείς θεμελιώδης φυσικός νόμος δεν το εμποδίζει. Αν όμως συμβεί ποτέ, θα είναι στο μακρινό μέλλον», δήλωσε ο Χάνσον. Οι ερευνητές έδειξαν, με το νέο πείραμά τους, ότι είναι δυνατό να τηλεμεταφερθούν (και μάλιστα με αξιοπιστία 100%) πληροφορίες, κωδικοποιημένες σε υποατομικά σωματίδια, ανάμεσα σε δύο σημεία που απέχουν τρία μέτρα. Η τηλεμεταφορά βασίζεται στο μυστηριώδες φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης, κατά την οποία η κατάσταση ενός σωματιδίου επηρεάζει αυτόματα την κατάσταση ενός άλλου μακρινού σωματιδίου (κάτι που καθόλου δεν άρεσε στον Αϊνστάιν, επειδή δεν μπορούσε να το εξηγήσει). Στο ολλανδικό πείραμα χρησιμοποιήθηκαν «συν-πλεκόμενα» ηλεκτρόνια πανιδευσμένα μέσα σε κρύσταλλο διαμαντιού σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία. Οι ερευνητές πέτυχαν την τηλεμεταφορά τεσσάρων διαφορετικών καταστάσεων των υποατομικών σωματιδίων, που η κάθε μία αντιστοιχούσε σε μια μονάδα κβαντικής πληροφορίας (qubit) – κατ’ αντιστοιχία των συμβατικών δυαδικών μονάδων ψηφιακής πληροφορίας (bit). Ένας βασικός στόχος των επιστημόνων είναι να δημιουργήσουν έναν ισχυρό κβαντικό υπολογιστή, που θα μπορεί να δουλεύει με έναν μεγάλο αριθμό «συν-πλεκόμενων» κβαντικών μονάδων πληροφοριών (qubits), κάτι που όμως ακόμη δεν έχει καταστεί εφικτό. Οι επιστήμονες του Ντελφτ σχεδιάζουν, τον Ιούλιο, μια πολύ πιο φιλόδοξη τηλεμεταφορά σε απόσταση 1.300 μέτρων στο χώρο του πανεπιστημίου. Συνολικά σε όλο τον κόσμο, πέντε έως έξι επιστημονικές ομάδες ανταγωνίζονται για το ποιά θα πετύχει πρώτη την κβαντική τηλεμεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις, ίσως και με ταχύτητα μεγαλύτερη και από του φωτός. Και έτσι, μεταξύ άλλων, να κάνουν τα κόκαλα του Αϊνστάιν να τρίζουν για τα καλά.

2.3.1 Το απλούστερο μοντέλο κβαντικής τηλεμεταφοράς

Η κβαντική τηλεμεταφορά βασίζεται στο φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης (entanglement), ένα κβαντικό φαινόμενο που έγινε γνωστό, από το πείραμα σκέψης που πρότειναν οι Einstein-Podolsky-Rosen (ή παράδοξο EPR).

Στην απλούστερη περίπτωση το πρόβλημα της κβαντικής τηλεμεταφοράς τίθεται ως εξής:

Μας δίνονται τρία qubits – για παράδειγμα, τα σωματίδια #1, #2 που σύμφωνα με την «παράδοση» θεωρούμε ότι ελέγχονται από την φυσικό Alice και το σωματίδιο #3 που ελέγχεται από τον φυσικό Bob. Τα σωματίδια θα μπορούσαν να έχουν ως μόνο βαθμό ελευθερίας τον προσανατολισμό του σπιν τους. Σπιν πάνω που συμβολίζεται με $|0\rangle$ και σπιν κάτω με το διάνυσμα $|1\rangle$. Υποθέτουμε ότι το πρώτο qubit – δηλαδή το πρώτο σωματίδιο #1 που συνήθως ανήκει στην φυσικό Alice – βρίσκεται στην κατάσταση

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

και θέλουμε η κατάσταση αυτή να μεταφερθεί στο τρίτο σωματίδιο #3 (που ανήκει στον φυσικό Bob) χωρίς βέβαια την φυσική αντιμετάθεση των δυο σωματιδίων.

Αυτό που θέλουμε είναι να μεταφερθεί η κατάσταση και όχι το σωματίδιο που την φέρει.

Το σωματίδιο δέκτης #3 δεν μας είναι καν προσβάσιμο. Είναι κλεισμένο «κάπου» και αν οι τεχνικές συνθήκες του «πειράματος» το επιτρέπουν μπορεί

να θεωρηθεί επίσης πολύ απομακρυσμένο από τα άλλα δυο. Η επιδιωκόμενη μεταφορά θα πρέπει να επιτευχθεί μόνο με κβαντομηχανικούς χειρισμούς (μοναδιαίοι μετασχηματισμοί + μέτρηση) πάνω στα δυο πρώτα σωματίδια (#1 και #2) του συστήματος. Να επιτευχθεί δηλαδή μόνο με τηλεχειρισμούς, έτσι ώστε να είναι μια τηλεμεταφορά.

Αυτό όμως απαιτεί μια καίρια αρχική συνθήκη. Το σωματίδιο #3 να έχει τεθεί εξ αρχής, σε μια κατάσταση σύμπλεξης με το σωματίδιο #2, ώστε να υπάρχει καταρχήν η δυνατότητα να μπορεί να επηρεαστεί η κατάστασή του με τους τηλεχειρισμούς. Δηλαδή, με κβαντομηχανικές «δράσεις» πάνω στα σωματίδια #1 και #2. Η απλούστερη τέτοια σύμπλεξη περιγράφεται από την κατάσταση Bell, $|B_{00}\rangle$.

$$|B_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

ενώ για την κατάσταση και των τριών σωματιδίων μαζί θα έχουμε:

$$|\psi_0\rangle = |\varphi\rangle |B_{00}\rangle = (a|0\rangle + \beta|1\rangle) |B_{00}\rangle$$

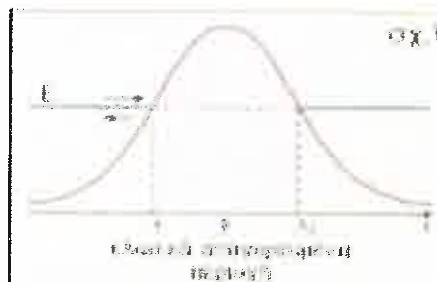
όπου $|\varphi_0\rangle = a|0\rangle + \beta|1\rangle$ η δοθείσα – αλλά άγνωστη – κατάσταση του πρώτου σωματιδίου.

Αφού το σωματίδιο #1 δεν βρίσκεται σε σύμπλεξη με κανένα από τα άλλα δύο σωματίδια, οποιαδήποτε δράση πάνω σ' αυτό δεν θα έχει καμιά επίδραση στα άλλα δυο. Επομένως, για να επιτευχθεί η μεταφορά της κατάστασης του σωματιδίου #1 στο σωματίδιο #3, απαιτείται η σύμπλεξή του με το γειτονικό του σωματίδιο #2. Αρχικά πρέπει να χρησιμοποιηθεί η κβαντική πύλη CNOT. Η πύλη CNOT χρησιμοποιεί το πρώτο qubit ως qubit ελέγχου (control qubit) και το δεύτερο qubit ως στόχο (target qubit). Όταν το πρώτο qubit είναι στην κατάσταση $|0\rangle$ η πύλη CNOT δεν κάνει τίποτε στο δεύτερο, ενώ αν το πρώτο qubit είναι στην κατάσταση $|1\rangle$ η πύλη CNOT αναστρέφει το δεύτερο. Στη συνέχεια απαιτείται η δράση στο σωματίδιο #1 της κβαντικής πύλης H (Hadamard).

Θα δούμε ότι στο σωματίδιο #3 έχει μεταφερθεί μια κατάσταση επαλληλίας που εξαρτάται από την κατάσταση των δύο πρώτων σωματιδίων. Βλέπουμε λοιπόν ότι η κβαντική τηλεμεταφορά αναφέρεται στην μεταφορά της κατάστασης ενός σωματιδίου σε ένα άλλο. Είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί εφόσον είμαστε διατεθειμένοι να καταστρέψουμε την κατάσταση του πρώτου και η μεταφορά αυτή είναι αδύνατον να γίνει ακαριαία.

2.4 Κβαντικό φαινόμενο σήραγγας

Το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας θα μπορούσαμε να το πούμε και σαν πέρασμα μέσα από ένα φράγμα δυναμικού, είναι άλλο ένα παράξενο φαινόμενο που συμβαίνει στον κβαντικό κόσμο. Είναι μια κατεξοχήν κβαντική διαδικασία, η οποία επιτρέπει στα σωματίδια του μικρόκοσμου να "διεισδύουν" διαμέσου φραγμάτων δυναμικής ενέργειας, που είναι ενεργειακά απαγορευμένες για τα κλασικά σωματίδια. Εξηγήθηκε για πρώτη φορά από τον Gamow το 1927. Γνωρίζουμε ότι στην Κλασική Μηχανική η αρχή διατήρησης της ενέργειας, για ένα σώμα με $E = 1/2mv^2 + V(x) = \text{σταθερή}$ σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η κινητική ενέργεια είναι πάντα θετική, δεν επιτρέπει σ' ένα σωματίδιο δεδομένης ολικής ενέργειας E να διεισδύσει σ' εκείνες τις περιοχές του χώρου όπου η δυναμική ενέργεια $V(x)$ είναι μεγαλύτερη της ολικής. Η κίνηση του σωματιδίου θα περιορίζεται μόνο σ' εκείνα τα x για τα οποία είναι $V(x) < E$, ενώ οι περιοχές του άξονα x όπου ισχύει η $V(x) > E$, θα είναι κλασικά απαγορευμένες.

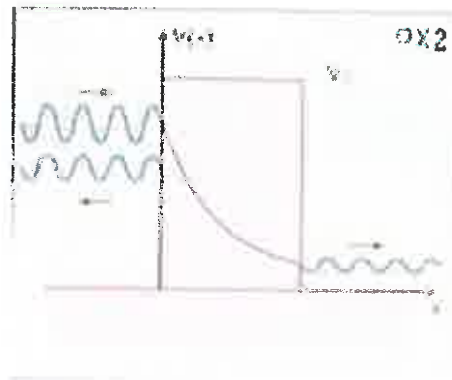


Έτσι, παραδείγματος χάρη, όταν ένα κλασικό σωματίδιο πλησιάζει από αριστερά το φράγμα δυναμικού του σχήματος 1, θα μπορέσει να φθάσει μόνο μέχρι το σημείο x_1 , όπου $V(x_1) = E$, στο οποίο η ταχύτητά του θα μηδενιστεί, ενώ αμέσως μετά θα αλλάξει πρόσημο και η κίνηση του σωματιδίου θα αντιστραφεί. Αυτό που σίγουρα αποκλείεται είναι να περάσει το κλασικό σωματίδιο από την άλλη μεριά του φράγματος και να συνεχίσει την κίνησή του προς τα δεξιά. Μεταξύ των δύο κλασικά επιτρεπόμενων περιοχών κίνησης, $x < x_1$, και $x > x_2$, μεσολαβεί η κλασικά απαγορευμένη περιοχή $x_1 < x < x_2$, την οποία κανένα κλασικό σωματίδιο δεν μπορεί να διαβεί.

Στην Κβαντική Μηχανική εντούτοις, ένα μικροσκοπικό σωματίδιο έχει πάντα μια πεπερασμένη πιθανότητα να περάσει από την άλλη μεριά ενός φράγματος δυναμικού όσο μικρή και αν είναι η ενέργειά του. Ο χαρακτηρισμός αυτού του κλασικά αδύνατου φαινομένου ως φαινομένου της σήραγγας έχει τη βάση του στην κλασική εικόνα ενός οχήματος, π.χ. ενός αυτοκινήτου, που επιχειρεί ν' ανέβει σ' ένα λόφο με σβησμένη μηχανή και με αρχική ταχύτητα που δεν του επιτρέπει να φτάσει ως την κορυφή. Εντούτοις, και ενώ το αυτοκίνητο είναι έτοιμο να σταματήσει σε κάποιο ύψος, μια σήραγγα εμφανίζεται από το πουθενά, έτσι ξαφνικά και του επιτρέπει να περάσει από την άλλη μεριά του λόφου χωρίς να έχει φτάσει ποτέ στην κορυφή του.

Ο καθιερωμένος τρόπος για να εξηγούμε πώς συμβαίνει το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας είναι να προσφεύγουμε στη σχέση απροσδιοριστίας του Χάιζενμπεργκ $\Delta E \Delta t \sim h$ μεταξύ της ενέργειας και του χρόνου: με την

προϋπόθεση ότι το ενεργειακό φράγμα στο οποίο ένα σωματίδιο πρέπει να διανοίξει σήραγγα δεν είναι ούτε πολύ ψηλό ούτε πολύ πλατύ, μπορεί να δανειστεί αρκετή ενέργεια από το περιβάλλον του για να περάσει το φράγμα. Κάτι τέτοιο επιτρέπεται με την προϋπόθεση ότι το σωματίδιο θα επιστρέψει αυτή την ενέργεια στο χρονικό διάστημα $\Delta t \sim h/\Delta E$ που θέτει η σχέση της απροσδιοριστίας. Ακριβέστερα, πρέπει να θεωρήσουμε κυματοσυνάρτηση του σωματιδίου σαν υπέρθεση της ύπαρξης του και στις δυο πλευρές του φράγματος ταυτόχρονα. Η κυματοσυνάρτηση είναι αυτή που διαπερνάει το φράγμα. Μόνο με την παρατήρηση – όπως δέχεται η ερμηνεία της Κοπεγχάγης – προκαλούμε την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης και βρίσκουμε το σωματίδιο είτε στη μία πλευρά είτε στην άλλη. Το κβαντικό φαινόμενο σήραγγας παίζει σημαντικό ρόλο σε πολλές διεργασίες. Αποτέλεσε την πρώτη επιτυχημένη εφαρμογή της κβαντομηχανικής στην εξήγηση της ραδιενεργού εκπομπής σωματιδίων α και είναι η βάση πολλών σύγχρονων ηλεκτρονικών διατάξεων όπως η δίοδος σήραγγος. Ένα καθημερινό παράδειγμα του φαινομένου σήραγγας συμβαίνει σε οικιακά καλώδια αργιλίου. Ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του αργιλίου θα σχηματιστεί στην επιφάνεια εκτεθειμένων ηλεκτρικών καλωδίων, δημιουργώντας ένα μονωτικό στρώμα μεταξύ δύο συρμάτων που έχουν ενωθεί έτσι ώστε να υπάρξει σύνδεση. Σύμφωνα με την κλασική φυσική, αυτό θα έπρεπε να διακόπτει τη ροή του ρεύματος. Όμως το στρώμα είναι αρκετά λεπτό ώστε τα ηλεκτρόνια να ανοίγουν σήραγγα και η ροή ρεύματος να διατηρείται. Η δυνατότητα των κβαντικών σωματιδίων να διέρχονται μέσα από κλασικά απαγορευμένες περιοχές είναι θεμελιώδους σημασίας για τη δομή του κόσμου μας. Η ακτινοβολία α των πυρήνων είναι ιστορικά το πρώτο παράδειγμα μικροσκοπικού φαινομένου που έγινε δυνατό να εξηγηθεί με αυτόν τον καθαρά κβαντικό μηχανισμό.



Στο δεύτερο σχήμα φαίνεται η καμπύλη της δυναμικής ενέργειας ενός φορτισμένου πυρηνικού σωματιδίου (π.χ. πρωτονίου ή σωματιδίου α) καθώς αυτό πλησιάζει τον πυρήνα από το εξωτερικό του. Λόγω της ηλεκτρικής άπωσης του πυρήνα η καμπύλη είναι αρχικά "انهφορική", αλλά μετατρέπεται σ' ένα βαθύ ελκτικό πηγάδι μόλις το πυρηνικό σωματίδιο "αγγίζει" τον πυρήνα, οπότε δέχεται την πολύ ισχυρότερη ελκτική επίδραση των πυρηνικών δυνάμεων. Την ίδια καμπύλη δυναμικής ενέργειας "αισθάνεται", βεβαίως, και ένα σωματίδιο α που ήταν εξαρχής μέρος ενός βαρέος πυρήνα (λόγω της μεγάλης ευστάθειας των πυρήνων ηλίου, δηλαδή των σωματιδίων

α, τα πρωτόνια και τα νετρόνια των βαρύτερων πυρήνων μπορούν να θεωρηθούν ως οργανωμένα σε συσσωματώματα πυρήνων ηλίου). Επίσης η σύντηξη λαμβάνει χώρα μόνο χάρη στη δυνατότητα που παρέχει το φαινόμενο της σήραγγας στους πυρήνες, να έρχονται σε επαφή περνώντας μέσα από το φράγμα δυναμικού που «υψώνει» ανάμεσά τους η ηλεκτροστατική άπωση των φορτίων τους. Χωρίς αυτή τη δυνατότητα είναι πολύ αμφίβολο αν θα υπήρχαν άστρα με τη σταθερότητα και μακροβιότητα αυτών που γνωρίζει ο άνθρωπος και ακόμη πιο αμφίβολο αν αυτός θα βρισκόταν εδώ για να τα μελετήσει. Το φαινόμενο όμως της σήραγγας ενέχεται στις προϋποθέσεις της ύπαρξής μας και μ' έναν πολύ πιο άμεσο τρόπο. Τα ηλεκτρόνια που συμμετέχουν στους χημικούς δεσμούς και εξασφαλίζουν την ύπαρξη των μορίων (και τη δική μας), μπορούν να επιτελούν αυτή τη λειτουργία μόνο χάρη στο γεγονός ότι έχουν την ευχέρεια να «μεταπηδούν» από το ένα άτομο στο άλλο, περνώντας διαρκώς μέσα από την ενεργειακά απαγορευμένη περιοχή μεταξύ των δύο ατόμων. Επίσης μπορεί να εξηγήσει το φαινόμενο των ραδιενεργών διασπάσεων στους πυρήνες και την εξάρτηση του χρόνου ζωής ενός ραδιενεργού πυρήνα από την ενέργεια του εκπεμπόμενου σωματίου α. Ο άνθρακας, το οξυγόνο και το άζωτο μαζί με όλα τα στοιχεία που σχηματίζουν τις χημικές ενώσεις (απαραίτητες για τη ζωή), συντέθηκαν στο εσωτερικό αστέρων πριν από δισεκατομμύρια χρόνια. Αυτοί οι αστέρες δεν υπάρχουν πια, εξερράγησαν ως σουπερνόβα και τα συστατικά τους εκτοξεύτηκαν και σκορπίστηκαν στο διάστημα. Αυτός είναι ο λόγος για την πολύ γνωστή και αληθινή φράση ότι όλοι είμαστε φτιαγμένοι από αστροσκοπή. Πολλά βαρύτερα στοιχεία δημιουργούνται μόνο όταν ένας αστέρας με πολύ μεγάλη μάζα εκραγεί βίαια ως σουπερνόβα. Όσο πιο θερμός είναι ένας αστέρας και όσο πιο ακραίες οι συνθήκες που επικρατούν, τόσο ταχύτερα προχωρεί η διαδικασία σύνθεσης και τόσο βαρύτερα είναι τα στοιχεία που σχηματίζονται, ιδιαίτερα στις τελευταίες στιγμές της ζωής του. Τα δύο ελαφρότερα στοιχεία, το υδρογόνο και το ήλιο, δεν δημιουργήθηκαν στο εσωτερικό αστέρων αλλά στο πολύ πρώιμο Σύμπαν λίγο μετά τη Μεγάλη Έκρηξη. Σχεδόν το 98% όλης της ορατής ύλης του Σύμπαντος αποτελείται σήμερα από αυτά τα δύο στοιχεία, ενώ το υπόλοιπο 2% αποτελείται από όλα τα υπόλοιπα. Η ποικιλία των πυρήνων βασίζεται στους ατέλειωτους συνδυασμούς πρωτονίων και νετρονίων και οφείλεται σε δύο λόγους. Ο πρώτος είναι ότι τα πρωτόνια και τα νετρόνια υπακούουν σε παρόμοιους κβαντικούς κανόνες με τα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω τους, και σύμφωνα με αυτούς διατάσσονται μέσα στους πυρήνες. Ακριβώς όπως τα ηλεκτρόνια πρέπει να περιγράφονται από κυματοσυναρτήσεις — τα σχήματα των οποίων καθορίζονται από τους κβαντικούς αριθμούς τους — έτσι και τα νουκλεόνια πρέπει να θεωρούνται εξαπλωμένες οντότητες κατανεμημένες μέσα στον πυρήνα σύμφωνα με τους κβαντικούς αριθμούς τους.

Για τα ηλεκτρόνια τουλάχιστον έχουμε την πολυτέλεια της νοητικής εικόνας μιας μικροσκοπικής μπάλας σε τροχιά, ακόμη κι αν αυτή η εικόνα δεν είναι σωστή. Μέσα στον πυρήνα ο χώρος είναι πολύτιμος και τα νουκλεόνια είναι στριμωγμένα έτσι ώστε η μόνη εικόνα που μπορούμε να εικάσουμε είναι εκείνη μιας σακούλας γεμάτης από μπάλες που διεκδικούν μια θέση. Στην πράξη, η εικόνα που έχουμε για ένα νουκλεόνιο εξαρτάται από το πώς προσπαθούμε να το εξετάσουμε. Αν θέλουμε να περιγράψουμε τον τρόπο με

τον οποίο αλληλεπιδρούν πρωτόνια ή νετρόνια υψηλών ενεργειών που εκτοξεύονται προς έναν πυρήνα με τα υπόλοιπα νουκλεόνια, καταλήγουμε ότι είναι προτιμότερο να τα αντιμετωπίσουμε ως μικροσκοπικά εντοπισμένα σωματίδια. Όμως ένα εξωτερικό νετρόνιο σε έναν πυρήνα με άλλω έχει μια κυματοσυνάρτηση που είναι απλωμένη σε μεγάλο όγκο γύρω από ολόκληρο τον πυρήνα. Ο δεύτερος λόγος για την πολυπλοκότητα των πυρήνων βρίσκεται στη φύση της ισχυρής πυρηνικής δύναμης, η οποία αποδεικνύεται πως έχει ακόμη πιο θεμελιώδη προέλευση από αυτή που προέβλεψε ο Γιουκάβα στη θεωρία του περί ανταλλαγής πιονίων. Στο δεύτερο μισό του 20ού αιώνα, οι φυσικοί άρχισαν να αναρωτιούνται μήπως μέσα στον πυρήνα συνέβαινε κάτι πιο πολύπλοκο. Σε ένα πιο μακροσκοπικό επίπεδο, το φαινόμενο της σήραγγας είναι υπεύθυνο για τη λεγόμενη ψυχρή εκπομπή ηλεκτρονίων, η οποία παρατηρείται κατά την τοποθέτηση ενός μετάλλου στην κάθοδο ενός σωλήνα κενού του οποίου η άνοδος βρίσκεται σ' ένα πολύ υψηλό δυναμικό. Σε επίπεδο πρακτικών εφαρμογών η χρήση του φαινομένου της σήραγγας είναι εντυπωσιακή. Αποτελεί πλέον συστατικό στοιχείο της λειτουργίας πολλών ημιαγωγικών (πχ η δίοδος σήραγγας) και υπεραγώγιμων διατάξεων υψηλής ακρίβειας και ειδικών απαιτήσεων, η επαφή Josephson. Στο φαινόμενο της σήραγγας βασίζεται επίσης η λειτουργία του περίφημου μικροσκοπίου σήραγγας το οποίο επιτρέπει να "δούμε" την επιφάνεια ενός στερεού με ακρίβεια που φτάνει τα όρια της μιας ατομικής διαμέτρου.

2.5 Κβαντικός καταχωρητής

Στους Κβαντικούς υπολογιστές, ο κβαντικός καταχωρητής αποτελείται από ένα σύνολο qubits, συνήθως διατεταγμένα σε σειρά, σε αντίθεση με το κλασικό υπολογιστή που ένα σύνολο bits αποτελεί έναν καταχωρητή. Σ' έναν κβαντικό καταχωρητή μπορούμε να αποθηκεύσουμε πολύ περισσότερη πληροφορία από όση στον κλασικό καταχωρητή. Για παράδειγμα στη κλασική περίπτωση ενός καταχωρητή δύο bits οι δυνατές καταστάσεις είναι $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$ και $|11\rangle$. Ενώ οι δυνατές καταστάσεις ενός κβαντικού είναι ένας γραμμικός συνδυασμός της μορφής :

$$\alpha_{00} |00\rangle + \alpha_{01} |01\rangle + \alpha_{10} |10\rangle + \alpha_{11} |11\rangle$$

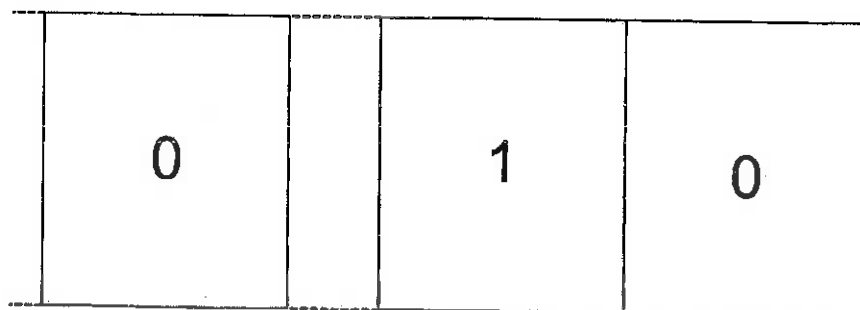
Ορίζουμε την κατάσταση ενός καταχωρητή δύο bit σαν ένα διάνυσμα ενός μιγαδικού διανυσματικού χώρου τεσσάρων διαστάσεων με βάση:

$$\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$$

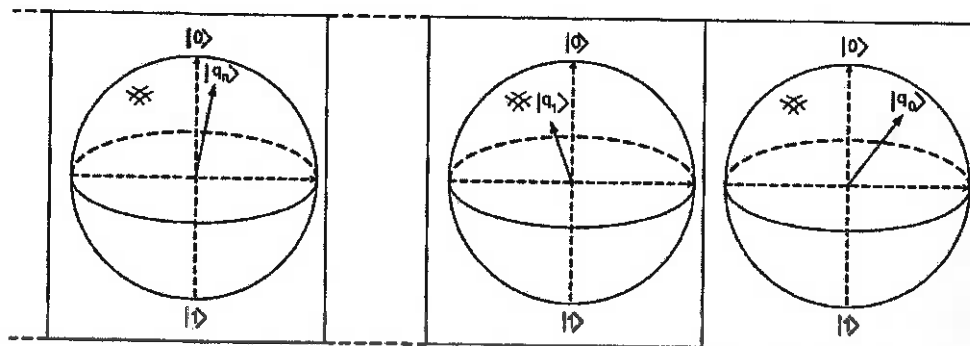
Έστω δύο qubit $|p\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ και $|q\rangle = c|0\rangle + d|1\rangle$, τότε η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένας καταχωρητής των δύο bit ο οποίος αποτελείται από τα p και q είναι:

$$|p, q\rangle = ac|00\rangle + ad|01\rangle + bc|10\rangle + bd|11\rangle$$

Συμπεραίνουμε πως υπάρχουν πιθανές καταστάσεις για έναν καταχωρητή των 2 bits οι οποίες δεν μπορούν να περιγραφούν πλήρως σαν συνδυασμός των καταστάσεων δύο ανεξάρτητων κβαντικών bit. Αυτές ονομάζονται διαπλεγμένες καταστάσεις και είναι αυτές για τις οποίες μιλήσαμε στη προηγούμενη παράγραφο.



(α)



(β)

α) Ένας κλασικός και (β) ένας κβαντικός καταχωρητής

Για το λόγο ότι οι κβαντικοί υπολογιστές εκτελούν υπολογισμούς, αυτό που έχει σημασία είναι η έκφραση του τανυστικού γινομένου με μορφή πινάκων. Έτσι αν έχουμε τους πίνακες:

$$A = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad B = \begin{bmatrix} c \\ d \end{bmatrix}$$

τότε το τανυστικό γινόμενο των δύο πινάκων είναι ο πίνακας C:

$$C = \begin{bmatrix} a \cdot c \\ a \cdot d \\ b \cdot c \\ b \cdot d \end{bmatrix}$$

Η κατάσταση ενός καταχωρητή που αποτελείται από n qubits δίνεται από τη σχέση:

$$|q_R\rangle = |q_{n-1}\rangle \otimes \dots \otimes |q_1\rangle \otimes |q_0\rangle = |q_{n-1} \dots q_1 q_0\rangle$$

Το διάνυσμα κατάστασής του υπάρχει σε ένα χώρο Hilbert με 2^n διαστάσεις κι έχει 2^n βασικές καταστάσεις που είναι όλες ορθογώνιες μεταξύ τους. Αν θεωρήσουμε τη δεκαδική αναπαράσταση των καταστάσεων μπορούμε αυτό να το γράψουμε ως εξής:

$$\langle k|m\rangle = \delta_{km} \quad \text{όπου } k, m \in \{0, 1, 2, \dots, 2^n - 1\}$$

Όταν ο καταχωρητής αυτός τεθεί σε υπέρθεση κρατά ταυτόχρονα 2^n αριθμούς και προκύπτει ότι :

$$|q_R\rangle = \dots = \sum_{i=0}^{2^n-1} c_i |i\rangle$$

Τα c_i είναι τα πλάτη πιθανότητας των αντίστοιχων βασικών καταστάσεων και είναι μιγαδικοί αριθμοί. Η δυνατότητα να κρατηθούν ταυτόχρονα και οι 2^n καταστάσεις από τον κβαντικό καταχωρητή αποτελεί τη βάση της κβαντικής παραλληλίας, για την οποία θα μιλήσουμε παρακάτω.

Παρατήρηση:

Έστω ότι έχουμε μία συνάρτηση $F(x)$ με τη μεταβλητή x να πέρνει τιμές 0, 1, 2, 3.

Για να γίνει με έναν κλασικό υπολογιστή, ο παράλληλος υπολογισμός των τιμών της συνάρτησης για κάθε τιμή του x χρειάζονται τέσσερις καταχωρητές των δύο bits και τέσσερις υπολογισμοί της συνάρτησης. Αντίθετα, σε έναν κβαντικό υπολογιστή θα χρειαστεί μόνο ένας καταχωρητής των δύο qubits και ένας μόνο υπολογισμός της συνάρτησης που θα δώσει και τις τέσσερις τιμές.

2.5.1 Μέτρηση ενός κβαντικού καταχωρητή

Σε ένα κβαντικό καταχωρητή σε υπέρθεση, όπου όπως είπαμε προηγουμένως ισχύει: $|q_R\rangle = \dots = \sum_{i=0}^{2^n-1} c_i |i\rangle$, η πιθανότητα να προκύψει $|i\rangle$ κατά τη μέτρηση του $|q_R\rangle$ είναι $|c_i|^2$. Όμως, η μέτρηση αυτή θα επιφέρει στο σύστημα μία μη αντιστρέψιμη αλλαγή. Στην ουσία καταστρέφει την υπέρθεση. Αυτό είναι πολύ σημαντικό και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά το σχεδιασμό κβαντικών αλγορίθμων. Η μέτρηση πρέπει να γίνεται την κατάλληλη στιγμή διαφορετικά το αποτέλεσμα δεν θα είναι το αναμενόμενο.

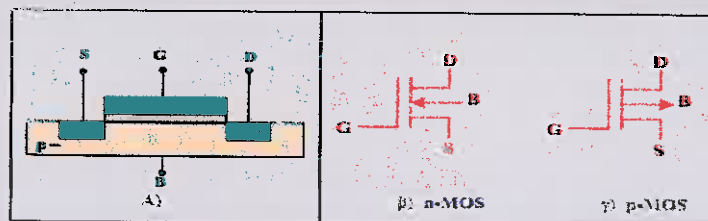
2.6 Κβαντικές πύλες

Ένας κλασικός υπολογιστής αποτελείται από αγωγούς και λογικές πύλες οι οποίες συγκροτούν κυκλώματα. Οι αγωγοί μεταφέρουν την πληροφορία με τη μορφή τάσης ή ρεύματος από πύλη σε πύλη. Οι πύλες αυτές είναι φυσικά συστήματα κατασκευασμένα από πυρίτιο, αποτελούνται από τρανζίστορς που ονομάζονται MOSFETs και επεξεργάζονται και μετατρέπουν την πληροφορία που έρχεται στην είσοδό τους σύμφωνα με τον πίνακα αληθείας τους. Δηλαδή η πληροφορία διέρχεται μέσα από τις πύλες των κλασικών υπολογιστών. Στους κβαντικούς υπολογιστές το κάθε qubit χαρακτηρίζεται από υπέρθεση της κατάστασης $|0\rangle$ και $|1\rangle$. Μια κβαντική πύλη είναι ένα είδος κυκλώματος, το οποίο πραγματοποιεί πράξεις σε qubits για κάποιο χρονικό διάστημα, που σε αντίθεση με τις κλασικές, είναι αντιστρεπτικές και επομένως έχουν τον ίδιο αριθμό εισόδων και εξόδων. Οι κβαντικές πύλες δεν είναι φυσικά συστήματα αλλά δράσεις οι οποίες αντιπροσωπεύονται από τελεστές οι οποίοι περιγράφονται από πίνακες. Η πληροφορία, σε αντίθεση με τις κλασικές πύλες δεν διέρχεται μέσα από τις κβαντικές, αλλά βρίσκεται αποθηκευμένη σε qubits ή κβαντικούς καταχωρητές και παραμένει εκεί. Οι καταστάσεις των qubits και των κβαντικών καταχωρητών είναι διανύσματα στο χώρο Hilbert. Οι κβαντικές πύλες είναι τελεστές του χώρου Hilbert. Δηλαδή οι κβαντικές πύλες περιστρέφουν τα διανύσματα κατάστασης των qubits και των καταχωρητών, έχοντας δύο βασικές ιδιότητες:

- Να μη μεταβάλλουν το μήκος του διανύσματος κατάστασης
- Να τηρούν τη χρονική συμμετρία των κβαντικών συστημάτων

Οι τελεστές με αυτές τις δύο ιδιότητες ονομάζονται ορθομοναδιαίοι και περιγράφονται από ορθομοναδιαίους πίνακες.

MOSFET: mosfet είναι τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, (Field Effect Transistor) απομονωμένης εισόδου, γι' αυτό και αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως IGFET (Insulated Gate). Τα κυκλώματα με MOS τρανζίστορ παρουσιάζουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος συγκριτικά με αντίστοιχα κυκλώματα με διπολικά τρανζίστορ, όμως, υστερούν ως προς την ταχύτητα λειτουργίας τους. Επίσης, οι διαστάσεις κατασκευής MOS τρανζίστορ, σε ολοκληρωμένη μορφή, είναι κατά πολύ μικρότερες διπολικών τρανζίστορ, γεγονός που καθιστά την MOS τεχνολογία πολύ ελκυστική για κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το MOSFET είναι ένα "σάντουιτς" τριών υλικών, μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού. Η πύλη διαχωρίζεται από το κανάλι με τη χρήση μονωτικού υλικού (διοξείδιο του πυριτίου SiO_2) πολύ μεγάλης αντίστασης.



Οι βασικές κβαντικές πύλες είναι:

- Κβαντική πύλη αδράνειας
- Κβαντική πύλη μετατόπισης φάσης
- Κβαντική πύλη Hadamard
- Κβαντική πύλη ελεγχόμενης άρνησης (CNOT)
- Κβαντική πύλη ελεγχόμενης μετατόπισης φάσης
- Κβαντική πύλη διπλά ελεγχόμενης άρνησης (CCNOT)
- Κβαντική πύλη Fredkin

2.6.1 Κβαντική πύλη αδράνειας

Η κβαντική πύλη αδράνειας είναι μία κβαντική πύλη που δρα σε ένα μόνο qubit και περιστρέφει το διάνυσμα κατάστασης ενός qubit μέσα στη σφαίρα Bloch μεταβάλλοντας τις γωνίες θ και ϕ . Η κβαντική πύλη αδράνειας συμβολίζεται με I και περιγράφεται από τον ακόλουθο πίνακα:

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2.6.2 Κβαντική πύλη μετατόπισης φάσης

Η κβαντική πύλη μετατόπισης φάσης δρα κι αυτή σε ένα μόνο qubit. Η δράση της πύλης αυτής αλλάζει μόνο τη γωνία φάσης του qubit

Συμβολίζεται με F και περιγράφεται από τον ακόλουθο πίνακα:

$$\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\varphi} \end{pmatrix}$$

2.6.3 Κβαντική πύλη Hadamard

Η κβαντική πύλη Hadamard δρα επίσης σε ένα μόνο qubit. Συμβολίζεται με H και περιγράφεται από τον ακόλουθο πίνακα:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Η πύλη Hadamard δρα σε qubits που βρίσκονται σε μία από τις δύο βασικές καταστάσεις και τα θέτει σε μία κατάσταση η οποία είναι υπέρθεση των βασικών καταστάσεων. Ενώ όταν δρα σε qubits που βρίσκονται στην υπέρθεση καταστάσεων, επιστρέφει τα qubits στις βασικές τους καταστάσεις.

2.6.4 Κβαντική πύλη ελεγχόμενης άρνησης (CNOT)

Η κβαντική πύλη CNOT δρα σε δύο qubit. Το ένα ονομάζεται ελέγχου και το άλλο στόχος και συμβολίζονται με c και t αντίστοιχα. Οι καταστάσεις των δύο qubits είναι $|c_i\rangle$ και $|t_i\rangle$ ενώ μετά τη δράση της CNOT είναι $|c_o\rangle$ και $|t_o\rangle$.

Η εξίσωση που δίνει τη δράση της πύλης είναι $CNOT|c_i t_i\rangle = |c_o t_o\rangle$.

Ο πίνακας που περιγράφει την πύλη CNOT είναι :

$$CNOT = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Η πύλη CNOT αλλάζει την κατάσταση του qubit στόχου, όταν η κατάσταση του qubit ελέγχου είναι $|1\rangle$ ενώ την αφήνει αναλλοίωτη όταν είναι $|0\rangle$. Έτσι η κατάσταση του qubit ελέγχου δε μεταβάλλεται, αλλά ισχύει πάντα $|c_i\rangle = |c_o\rangle$

2.6.5 Κβαντική πύλη ελεγχόμενης μετατόπισης φάσης

Η κβαντική πύλη ελεγχόμενης μετατόπισης φάσης συμβολίζεται με $C\Phi$ και δρα κι αυτή σε δύο qubit. Έχει παρόμοια μορφή δράσης με τη CNOT αλλά η πύλη $C\Phi$ πολλαπλασιάζει την κατάσταση του qubit στόχου με τον παράγοντα φάσης $e^{i\varphi}$ όταν η κατάσταση του qubit ελέγχου και η κατάσταση του qubit στόχου είναι $|1\rangle$ ενώ στις άλλες καταστάσεις την αφήνει αναλλοίωτη.

Ο πίνακας που περιγράφει τη πύλη αυτή είναι:

$$C\Phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i\varphi} \end{pmatrix}$$

2.6.6 Κβαντική πύλη διπλά ελεγχόμενης άρνησης (CCNOT)

Η κβαντική πύλη CCNOT δρα σε τρία qubit, δύο ελέγχου c_1 και c_2 και ένα qubit στόχος που συμβολίζεται με t . Η γενική περιγραφή της δράσης της πύλης είναι:

$$CCNOT|c_{2i} \ c_{1i} \ t_i\rangle = |c_{20} \ c_{10} \ t_0\rangle$$

Και ο πίνακας που περιγράφει την πύλη :

$$CCNOT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Η πύλη *CCNOT* αλλάζει την κατάσταση του qubit στόχου, όταν και τα δύο qubits ελέγχου βρίσκονται στην κατάσταση $|1\rangle$, ενώ οι καταστάσεις των qubits ελέγχου δε μεταβάλλονται.

2.6.7 Κβαντική πύλη Fredkin

Η πύλη Fredkin συμβολίζεται με F και δρα και αυτή σε τρία qubits. Ένα ελέγχου που συμβολίζεται με c και δύο στόχους t_1 και t_2 .

Η περιγραφή της δράσης της πύλης είναι :

$$F|c_1 \ t_{21} \ t_{11}\rangle = |c_0 \ t_{20} \ t_{10}\rangle$$

Και ο αντίστοιχος πίνακας:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Η πύλη F εναλλάσσει τις καταστάσεις των qubits στόχων, όταν το qubit ελέγχου βρίσκεται στην κατάσταση $|1\rangle$, ενώ όταν βρίσκεται στην $|0\rangle$ οι καταστάσεις των qubits στόχων δεν αλλάζουν. Η κατάσταση του qubit ελέγχου δε μεταβάλλεται.

Κεφάλαιο 3: Κβαντικός υπολογισμός και κβαντικοί αλγόριθμοι

3.1 Κβαντικοί υπολογισμοί

Οι κβαντικοί υπολογισμοί είναι στην ουσία δράσεις τελεστών οι οποίοι μπορούν να περιστρέφουν διανύσματα στο χώρο Hilbert. Τα διανύσματα αυτά εκφράζουν τις κβαντικές καταστάσεις που βρίσκονται στον κβαντικό καταχωρητή. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται σήμερα για την αναπαράσταση κβαντικών υπολογισμών είναι το κυκλωματικό μοντέλο των κβαντικών υπολογισμών, με το οποίο κάθε κβαντικός υπολογισμός μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα κύκλωμα. Αυτά τα κυκλώματα αποτελούνται από κβαντικούς καταχωρητές, κβαντικές πύλες και qubits. Στα κβαντικά αυτά κυκλώματα δεν υπάρχει ροή πληροφορίας από πύλη σε πύλη αλλά διαδοχικές δράσεις κβαντικών πυλών σε κβαντικούς καταχωρητές στους οποίους βρίσκεται αποθηκευμένη η πληροφορία. Αναπαριστούν το πότε και πως δρα η κβαντική πύλη στο κβαντικό καταχωρητή.

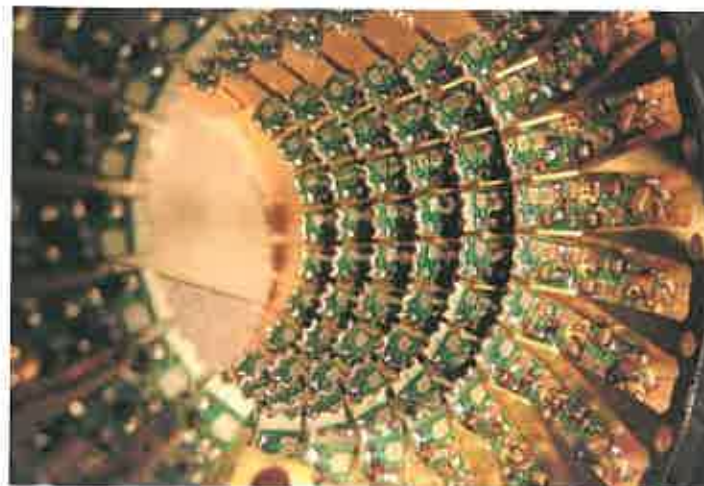
Παρακάτω φαίνεται η διαδικασία για την εκτέλεση κβαντικών υπολογισμών:

- Αρχικά δίνετε η κατάσταση των qubits του καταχωρητή. Στη συνέχεια υπολογίζουμε το τανυστικό γινόμενο των πινάκων των καταστάσεων των qubits. Θα προκύψει ένας πίνακας που είναι η αρχική κατάσταση του κβαντικού καταχωρητή.
- Υπολογίζουμε το τανυστικό γινόμενο των πινάκων που περιγράφουν τις κβαντικές πύλες
- Ο χρήστης μπορεί να δώσει με όποια σειρά θέλει την κατάσταση των qubit εισόδου. Έτσι πρέπει να γίνει προσαρμογή του πίνακα κατάστασης του καταχωρητή ώστε να σθμφωνεί με τις προδιαγραφές των πυλών.
- Πολλαπλασιάζουμε τον πίνακα που προκύπτει από το τανυστικό γινόμενο με τον πίνακα κατάστασης του κβαντικού καταχωρητή και προκύπτει με αυτόν τον τρόπο ο πίνακας της νέας κατάστασης του κβαντικού καταχωρητή.
- Στη συνέχεια ξαναλλάζουμε τη νέα κατάσταση του κβαντικού καταχωρητή ώστε να συμφωνεί με την αρχική σειρά των qubits.
- Επαναλαμβάνουμε τα προηγούμενα βήματα όσες φορές είναι τα βήματα του κβαντικού υπολογισμού και προκύπτει η τελική κατάσταση π είναι το αποτέλεσμα του υπολογισμού

Κάτι που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι στα κβαντικά κυκλώματα δεν πρέπει να υπάρχουν διακλαδώσεις, εφόσον η κατάσταση ενός qubit δε γίνεται να αντιγραφεί. Επίσης δε πρέπει να υπάρχουν βρόχοι ανάδρασης, και τέλος σε ένα κβαντικό υπολογισμό, το “δεν κάνω τίποτα” θεωρείται κι αυτό μία δράση.

3.2 Κβαντικός Επεξεργαστής

Ερευνητές του Τμήματος Φυσικής του πανεπιστημίου Γιέηλ των ΗΠΑ, δημιούργησαν τον πρώτο κβαντικό επεξεργαστή στερεάς κατάστασης, με την χρήση παρόμοιων τεχνικών με αυτές που χρησιμοποιεί η βιομηχανία παραγωγής τσιπ πυριτίου. Μέχρι τώρα είχε αποδειχτεί τρομερά δύσκολο να δημιουργηθούν τμήματα ενός κβαντικού υπολογιστή και συγκεκριμένα του επεξεργαστή από τα συνήθη στερεά υλικά. Ο επεξεργαστής χρησιμοποίησε δύο προγράμματα επεξεργασίας, που αποκαλούνται κβαντικοί αλγόριθμοι, για να λύσει δύο διαφορετικά προβλήματα. Κβαντικοί αλγόριθμοι είχαν δημιουργηθεί και παλαιότερα, αλλά για χρήση μόνο σε εξωτερικά συστήματα που χρησιμοποιούσαν λέιζερ ή αιωρούμενα ιόντα με τη βοήθεια ισχυρών μαγνητών. Τώρα, είναι η πρώτη φορά που δημιουργήθηκε ένας κβαντικός επεξεργαστής, πλησιέστερα στην στερεή φύση και στην λειτουργία των σημερινών επεξεργαστών. Η συσκευή που έφτιαξε η ομάδα του Γιέηλ, αποτελείται από δύο «transmon qubits», δηλαδή από μικροσκοπικά κομμάτια ενός υπεραγώγιμου υλικού, το οποίο αποτελείται από ένα φιλμ νιόβιου πάνω σε ένα λεπτό υπόστρωμα οξειδίου του αλουμινίου, όπου έχουν χαραχτεί κενά. Το ηλεκτρικό ρεύμα διατρέχει αυτά τα κενά, ενώ τα δύο qubits είναι διαχωρισμένα από μια κοιλότητα που περιέχει μικροκύματα. Οι ερευνητές κατάφεραν να ελέγξουν το κβαντικό σύστημα χρησιμοποιώντας τα μικροκύματα με τέτοια συχνότητα, ώστε τα qubits να εισέρχονται στην κατάσταση της «κβαντικής εμπλοκής» και της «κβαντικής υπέρθεσης». Το σύστημα επεξεργάστηκε αλγορίθμους γραμμένους ειδικά για κβαντικά συστήματα για τους οποίους θα μιλήσουμε παρακάτω.



Ο κβαντικός επεξεργαστής κάνοντας χρήση της υπέρθεσης των qubits ,είναι σε θέση να αποθηκεύσει και να επεξεργαστεί τεράστιες ποσότητες πληροφορίας σε σχέση με τους συμβατικούς υπολογιστές. Επίσης το πλεονέκτημα των κβαντικών επεξεργασιών ενισχύεται και από την αρχή της διεμπλοκής ή συσχετισμός φωτονείων, επιτρέποντας την αστραπιαία επεξεργασία ασύλληπτου όγκου πληροφοριών.

3.3 Κβαντικοί αλγόριθμοι

Οι κβαντικοί αλγόριθμοι διαφέρουν από τους κλασικούς. Η δομή τους συνδέουν το χώρο της κβαντικής υπέρθεσης και γενικότερα κβαντικών φαινομένων με τον κλασικό χώρο. Η είσοδος και η έξοδος ενός κβαντικού αλγορίθμου είναι η κλασικά bits. Η ουσία του κβαντικού αλγορίθμου βρίσκεται στο ενδιάμεσο αθέατο κομμάτι που λαμβάνουν χώρα τα κβαντικά φαινόμενα. Οι κβαντικοί αλγόριθμοι είναι πιθανοκρατικοί. Η έξοδος λοιπόν είναι “τυχαία”. Αυτό όμως δεν είναι πρόβλημα, εφόσον η σωστή απάντηση προκύψει με μία μεγάλη πιθανότητα , επαναλαμβάνουμε τον αλγόριθμο με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιήσουμε την πιθανότητα σφάλματος. Έτσι χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές όπως είναι η αύξηση πιθανότητας της βασικής κατάστασης π θέλουμε να παρατηρήσουμε (αλγόριθμος του Grover) , και η εύρεση κοινού χαρακτηριστικού μεταξύ όλων των συναρτήσεων $f(x)$. (αλγόριθμος του Shor).

3.3.1 Ο κβαντικός αλγόριθμος του Deutsch

Ο πρώτος κβαντικός αλγόριθμος, δηλαδή ένας αλγόριθμος που να μπορεί να εκτελεστεί μόνο σε κβαντικό υπολογιστή αναπτύχθηκε απο τον Deutsch το 1985. Ο αλγόριθμος αυτός κάνει χρήση της κβαντικής παραλληλίας , δηλαδή της υπέρθεσης των βασικών καταστάσεων των qubits και φαίνεται για πρώτη φορά το γεγονός ότι ο κβαντικός υπολογιστής μπορεί να εκτελέσει πράξεις που δεν μπορεί να εκτελέσει ο κλασικός υπολογιστής.

Το βασικό πρόβλημα του Deutsch είναι το εξής :

Έστω μία συνάρτηση $f(x)$ με τη μεταβλητή x και την συνάρτηση να μπορούν να πάρουν τις τιμές 0 ή 1:

$$f(x) : \{0,1\} \rightarrow \{0,1\}$$

Για κάθε τέτοια συνάρτηση υπάρχουν δύο περιπτώσεις :

- $f(0)=f(1)$, οπότε η συνάρτηση είναι σταθερή
- $f(0) \neq f(1)$, και η συνάρτηση ονομάζεται ισορροπημένη

Αν λοιπόν δοθεί μια τέτοια συνάρτηση, με έναν υπολογισμό να βρεθεί αν είναι ισορροπημένη ή σταθερή.

Σε έναν κλασικό υπολογιστή πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε την τιμή $f(0)$, στη συνέχεια την τιμή $f(1)$, και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα. Είναι αδύνατον να γίνει λοιπόν με έναν μόνο υπολογισμό. Αντιθέτως, αν χρησιμοποιήσουμε κβαντικό υπολογιστή αυτό είναι δυνατό.

Σε αυτό το στάδιο ας περιγράψουμε το κβαντικό κύκλωμα του αλγορίθμου του Deutsch:



Το κύκλωμα αποτελείται από έναν κβαντικό καταχωρητή με δύο qubits, το $|a\rangle$ και το $|x\rangle$ και από συνδυασμό κβαντικών πύλων που στο σχήμα παριστάνεται από το ορθογώνιο U_f . Ο συνδυασμός κβαντικών πύλων δρα στα δύο qubits, αφήνοντας το δεύτερο αμετάβλητο, ενώ φέρνει το πρώτο στην κατάσταση που αντιστοιχεί με το άθροισμα με βάση το 2 του πρώτου qubit $|a\rangle$ με τη συνάρτηση $f(x)$ όπου x είναι το δεύτερο qubit. Δηλαδή υπολογίζεται η $f(x)$ και το άθροισμά της με το $|a\rangle$:

$$0 \oplus 0 = 0$$

$$0 \oplus 1 = 1$$

$$1 \oplus 0 = 1$$

$$1 \oplus 1 = 0$$

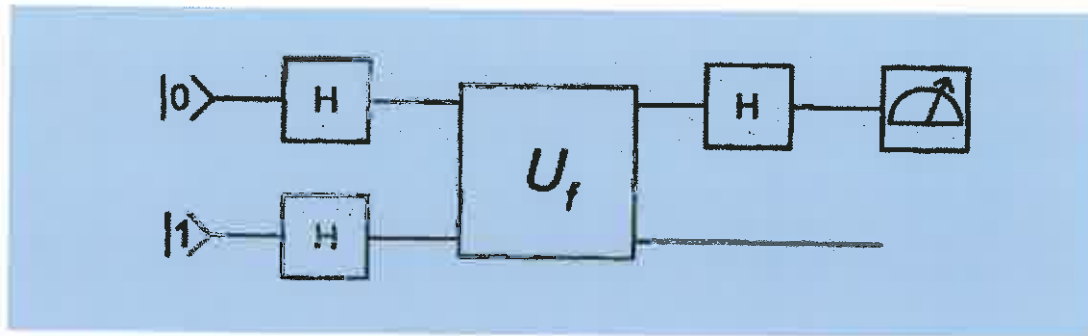
Όπου $\oplus$ σημαίνει πρόσθεση με βάση το 2.

Το κβαντικό κύκλωμα του παραπάνω σχήματος δίνεται από τη σχέση :

$$U_{f(|x\rangle|a\rangle)} = |x\rangle |a \oplus f(x)\rangle$$

Βήματα αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος του Deutsch είναι ένας κβαντικός υπολογισμός και περιγράφεται από το κύκλωμα που περιγράψαμε. Η αρχική κατάσταση του πρώτου qubit είναι $|0\rangle$ και του δεύτερου είναι $|1\rangle$.



Βήμα1: η κατάσταση του κβαντικού καταχωρητή είναι $|01\rangle$.

Βήμα2: δρουν δύο κβαντικές πύλες H.

Βήμα3: δρα ο συνδυασμός κβαντικών πύλων U_f που περιγράψαμε

Βήμα4: δρα η κβαντική πύλη H στο πρώτο qubit και η πύλη αδράνειας I στο δεύτερο qubit

Βήμα5: μετράται η κατάσταση του πρώτου qubit

Αν το qubit βρεθεί στην κατάσταση $|0\rangle$ τότε η συνάρτηση είναι σταθερή, ενώ αν βρεθεί στην κατάσταση $|1\rangle$ τότε είναι ισορροπημένη.

3.3.2 Ο κβαντικός αλγόριθμος του Grover

Ο Lov Grover το 1996 επινόησε τον λεγόμενο φερώνυμο κβαντικό αλγόριθμο ταχείας αναζήτησης ενός στοιχείου μέσα σε μία μη δομημένη βάση δεδομένων με N στοιχεία και απέδειξε ότι είναι δυνατόν να βρεθεί ένα ζητούμενο στοιχείο με $O(\sqrt{N})$ δοκιμές, ενώ στους κλασικούς υπολογιστές είναι γνωστό ότι επιτυγχάνεται με $O(N)$ δοκιμές.

Αναζήτηση σε μη δομημένες βάσεις δεδομένων : Ας σκεφτούμε έναν τηλεφωνικό κατάλογο. Όλα τα ονόματα είναι ταξινομημένα σε αλφαβητική σειρά και μπορούμε με ευκολία να βρούμε το τηλέφωνο που αντιστοιχεί σε ένα όνομα. Δηλαδή, οι τηλεφωνικοί κατάλογοι είναι δομημένες βάσεις δεδομένων όσο αναφορά τα ονόματα. Αν όμως μας δώσουν ένα τηλέφωνο κ θελήσουμε να βρούμε το όνομα στο οποίο αντιστοιχεί ο αριθμός αυτός, το πρόβλημα αυτό είναι δύσκολο, διότι ο τηλεφωνικός κατάλογος είναι μη δομημένος όσον αναφορά τους αριθμούς.

Ένας κλασικός υπολογιστής για να λύσει το πρόβλημα αυτό θα δοκιμάσει ένα προς ένα όλα τα στοιχεία της βάσης. Ο Lov Grover σε ένα άρθρο του με τίτλο " Η κβαντική μηχανική μπορεί να μας βοηθήσει να βρούμε μια βελόνα στα άχυρα" απέδειξε ότι σε έναν κβαντικό υπολογιστή μπορούμε να βρούμε ένα στοιχείο μη δομημένης βάσης δεδομένων με $\sqrt{N}$ προσπάθειες.

Η μέθοδος με την οποία ερευνά ο κβαντικός υπολογιστής μία μη δομημένη βάση δεδομένων ονομάζεται κβαντικός αλγόριθμος του Grover. Η διαφορά στην ταχύτητα υπολογισμού είναι τεράστια κ μεγαλώνει όσο και περισσότερο, όσο μεγαλώνει το μέγεθος της βάσης δεδομένων.

Ο αλγόριθμος του Grover

Έστω μία βάση με N στοιχεία . Κάθε στοιχείο μπορεί να αριθμηθεί με έναν αριθμό από το 0 έως το $N-1$. Αυτό που κάνει το σύστημα είναι να του παρουσιάζουμε έναν αριθμό, αυτό επεξεργάζεται τον αριθμό και μας λέει αν είναι αυτός που ψάχνουμε ή όχι. Το σύστημα αυτό σε έναν κλασικό υπολογιστή, μπορεί να είναι ένας καταχωρητής που έχουμε αποθηκεύσει τον αριθμό που ψάχνουμε και ένα κύκλωμα λογικών πυλών. Το κύκλωμα αυτό συγκρίνει κάθε αριθμό που έρχεται στην εισοδό του με τον αποθηκευμένο ζητούμενο αριθμό. Το σύστημα αυτό ,που θεωρείται ως ένα μύρο κουτί,ονομάζεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως oracle.

Το πρόβλημα λοιπόν από έναν κλασικό υπολογιστή ,με έναν απλό μαθηματικό τρόπο είναι το εξής:

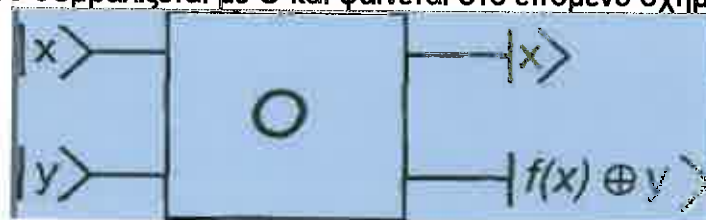
Θεωρούμε N στοιχεία που αποτελούν τη βάση δεδομένων και έχουμε αντιστοιχίσει κάθε στοιχείο από έναν αριθμό από το 0 έως το $N-1$.Το στοιχείο που αντιστοιχεί στον αριθμό k συμβολίζεται με x_k . Το oracle είναι μία συνάρτηση που πέρνει τιμές 0 και 1 . Έτσι αν ψάχνουμε το x_i :

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{αν } x = x_i \\ 0 & \text{αν } x \neq x_i \end{cases}$$

Ας δούμε τώρα το πρόβλημα με τη χρήση ενός κβαντικού υπολογιστή. Θεωρούμε ότι η βάση έχει N στοιχεία και χωρίς βλάβη της σχετικότητας μπορούμε να πούμε ότι :

$$N = 2^n, n=1,2,3,\dots$$

Αντιστοιχίζοντας κάθε ένα από τα στοιχεία με μία από τις βασικές καταστάσεις ενός κβαντικού καταχωρητή που περιλαμβάνει n qubits, δηλαδή , το στοιχείο που αντιστοιχεί στη βασική κατάσταση $|00\dots 0101\rangle$ που στη δεκαδική αναπαράσταση είναι η $|5\rangle$ και συμβαλίζεται με $|x_s\rangle$. Το κβαντικό oracle που διακρίνει αν ένα στοιχείο είναι αυτο που ψάχνουμε ή όχι ,είναι το κβαντικό κύκλωμα που συμβαλίζεται με O και φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Αυτό που κάνει στην ουσία το κβαντικό oracle είναι να δρα στις βασικές καταστάσεις $|x\rangle$ που αντιστοιχούν σε στοιχεία της μη δομημένης βάσης δεδομένων . Αν η βασική αυτή κατάσταση δεν αντιστοιχεί στο ζητούμενο στοιχείο , την αφήνει ως έχει, αλλιώς της αλλάζει το πρόσημο.

Βήματα αλγορίθμου

Βήμα1: Θέτουμε κβαντικό καταχωρητή με n qubits σε κατάσταση υπέρθεσης βασικών καταστάσεων. Το πλάτος πιθανότητας θα πρέπει να είναι ίδιο για κάθε κατάσταση. Αυτό γίνεται ξεκινώντας στην κατάσταση όπου όλα τα qubits είναι $|0\rangle$, και στη συνέχεια θα δράσουμε στο κάθε qubit με μία κβαντική πύλη Hadamard.

Βήμα2: Δρα στον κβαντικό καταχωρητή ο τελεστής $\hat{O} = \hat{I} - 2|x\rangle\langle x|$

Βήμα3: Δρα στον κβαντικό καταχωρητή ο τελεστής $\hat{G} = 2|s\rangle\langle s| - \hat{I}$

Βήμα4: Μετράμε την κατάσταση του κβαντικού καταχωρητή. Είναι βέβαιο ότι βρίσκεται στην ζητούμενη κατάσταση.

Τελεστές κβαντικού oracle : Όπως έχουμε πει οι κβαντικές πύλες είναι τελεστές του χώρου Hilbert που δρουν σε qubits αλλάζοντας την κατάστασή τους. Έτσι και το κβαντικό oracle είναι τελεστής στον Hilbert. Αν το στοιχείο που ψάχνουμε είναι το $|x\rangle$, ο τελεστής του κβαντικού oracle είναι : $\hat{O} = \hat{I} - 2|x\rangle\langle x|$ ο οποίος αλλάζει το πρόσημο της κατάστασης που ψάχνουμε. Κατά αναλογία με τον τελεστή $\hat{O}$ ο Grover όρισε ακόμα έναν τελεστή : $\hat{G} = 2|s\rangle\langle s| - \hat{I}$ του οποίου η δράση είναι να αφήνει αναλλοίωτα και ίσα τα πλάτη πιθανότητας όλων των βασικών καταστάσεων, εκτός από το πλάτος πιθανότητας της επιθυμητής κατάστασης.

3.3.3 Ο κβαντικός αλγόριθμος του Shor

Ο κβαντικός αλγόριθμος του Shor είναι ένας πολυωνιμικός αλγόριθμος για την παραγοντοποίηση μεγάλων αριθμών, ο οποίος παροσιείστηκε από τον Peter Shor το 1994.

Περιγραφή αλγορίθμου

Το πρόβλημα που λύνει ο κβαντικός αλγόριθμος του Shor είναι το εξής:
Αν δοθεί ένας ακέραιος αριθμός n , να βρεθεί η περίοδος της συνάρτησης $f_{n,a}(x) = a^x$, όπου το a είναι τυχαίος αριθμός ακέραιος που είναι πρώτος ως προς τον n . Εάν βρεθεί η περίοδος της συνάρτησης και εφόσον είναι άρτια, τότε οι πρώτοι παράγοντες του n είναι οι μέγιστοι κοινόι διαιρέτες:

$$\gcd(n, a^{\frac{r}{2}} - 1) \text{ και } \gcd(n, a^{\frac{r}{2}} + 1)$$

Ο κβαντικός καταχωρητής στον αλγόριθμο του Shor ονομάζεται Reg και αποτελείται από δύο κβαντικούς καταχωρητές, Reg1 και Reg2. Αν η κατάσταση του Reg1 είναι $|\psi_1\rangle$ και η κατάσταση του Reg2 είναι $|\psi_2\rangle$, η κατάσταση του Reg είναι η $|\psi\rangle$ που δίνεται από την :

$$|\psi\rangle = |\psi_1\rangle|\psi_2\rangle = |\psi_1\psi_2\rangle - |\psi_2\psi_1\rangle$$

Φέρνουμε τον Reg1 σε κατάσταση υπέρθεσης όλων των βασικών καταστάσεων. Ο Reg1 αποτελείται από τον κατάλληλο αριθμό από qubits. Στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή της $f_{n,a}(x) = a^x$ για κάθε x και τα αποτελέσματα καταγράφονται στον Reg2 ο οποίος κρατά την υπέρθεση όλων των τιμών της $f_{n,a}(x) = a^x$. Στη συνέχεια γίνεται μέτρηση της κατάστασης του Reg2. ο Reg2 βρίσκεται σε υπέρθεση όλων των τιμών της συνάρτησης όμως το αποτέλεσμα της μέτρησης θα δώσει μόνο μία τιμή της συνάρτησης, έστω k. Δηλαδή μετά τη μέτρηση ο Reg2 βρίσκεται στην κατάσταση $|k\rangle$, και εξαιτίας της κβαντικής διεμπλοκής, στον Reg1 θα βρίσκονται πια μόνο οι αριθμοί x για τους οποίους ισχύει:

$$f_{n,a}(x) = a^x = k$$

Βήματα αλγορίθμου του Shor

Βήμα1: Επιλέγουμε ακέραιο αριθμό q ώστε $n^2 \leq q \leq 2n^2$

$$q = 2^s, \quad s = 2\log_2 n$$

Βήμα2: Επιλέγουμε τυχαία ακέραιο αριθμό $a(1 < a < n-1)$ που είναι πρώτος ως προς τον n, δηλαδή $\gcd(a,n)=1$

Για $i=1$ έως $\log_2(q)$:

Βήμα3: Αρχικοποίηση του κβαντικού καταχωρητη $Reg|\psi\rangle = |0,0\rangle$

Βήμα4: Δρα ο κβαντικός μετασχηματισμός Fourier στον Reg1

Βήμα5: Υπολογίζουμε την τιμή της $f_{n,a}(x)$ για κάθε x και καταγράφονται τα αποτελέσματα στον Reg2 ο οποίος κρατά την υπέρθεση όλων των τιμών της $f_{n,a}(x)$

Βήμα6: Μετράται η κατάσταση του Reg2

Βήμα7: Δρα ο κβαντικός μετασχηματισμός Fourier στον Reg1

Βήμα8: Μετράται η κατάσταση του Reg1 και προκύπτει το δείγμα i
Τέλος,

Βήμα9: Υπολογίζεται το gcd των δειγμάτων, έστω G

Βήμα10: Η περίοδος r είναι η τιμή q/G

Βήμα11: Υπολογίζονται οι $\gcd(n, a^{\frac{r}{2}} - 1)$ και $\gcd(n, a^{\frac{r}{2}} + 1)$. Οι τιμές είναι οι παράγοντες του n.

Αν η περίοδος είναι περιττός αριθμός ή οι παράγοντες του n είναι οι προφανείς $(1, n)$ επιστρέφουμε στο βήμα 1 και επαναλαμβάνουμε τον αλγόριθμο.

Κβαντικός μετασχηματισμός Fourier: Είναι ένας ορθομοναδιαίος τελεστής του χώρου Hilbert, ο οποίος αποτελεί τη βάση για πολλούς κβαντικούς αλγορίθμους. Δρά σε καταχωρητές μεταβάλλοντας τα πλάτη πιθανότητας και τις φάσεις των καταστάσεων τους, αποκαλύπτει την περιοδικότητα συναρτήσεων και δεδομένων και προκαλεί αλληλεπιδράσεις μεταξύ qubits και κβαντικών καταχωρητών. Δηλαδή ο κβαντικός μετασχηματισμός Fourier μετασχηματίζει μία βασική κατάσταση ενός κβαντικού καταχωρητή σε υπέρθεση όλων των βασικών καταστάσεων, όπου όλες οι βασικές καταστάσεις έχουν το ίδιο πλάτος πιθανότητας αλλά διαφορετικές φάσεις.

Κεφάλαιο 4: Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα κβαντικών υπολογιστών

Γιατί αντικατάσταση από κβαντικούς υπολογιστές

Όπως και η κλασική Νευτώνεια φυσική έχει φτάσει στα όρια της , και ο κόσμος λειτουργεί κβαντικά, έτσι και οι συμβατικοί υπολογιστές οι οποίοι βασίζονται σε κλασικά μοντέλα και στον ευκλείδιο κόσμο , έχουν φτάσει στα όριά τους . Πρώτα απ'όλα όσο αναφορά την κατασκευή των συμβατικών υπολογιστών , είναι βασισμένοι στο πυρίτιο το οποίο σε είκοσι χρόνια και ίσως λιγότερο ,θα συναντήσει τα κατασκευαστικά του όρια με αποτέλεσμα την αδυναμία του σε περαιτέρω σμίκρυνσή του.Επίσης η ανάγκη για παγκόσμια διαδικτυακή κρυπτογραφία είναι τόσο μεγάλη στις μέρες μας που ο σημερινός υπολογιστής αδυνατεί να ανταποκριθεί πλήρως ,ειδικά στον τομέα απόρρητων προσωπικών ή πολιτικών διπλωματικών στοιχείων καθώς και στον τομέα ηλεκτρονικού εμπορίου.Τέλος , οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές παρουσιάζουν αδυναμία ισχύος επεξεργασίας , καθώς είναι αδύνατο να λύσει διάφορα πολύπλοκα προβλήματα και πολυπαραμετρικά μαθηματικά , ή στην καλύτερη περίπτωση απαιτείται πολύς χρόνος για την επεξεργασία δεδομένων .

Δυνατότητες του κβαντικού υπολογιστή

Με τη χρήση των κβαντικών υπολογιστών επιτυγχάνεται η λύση πολλών και προβλημάτων ταυτόχρονα ,λόγω της υπέρθεσης καταστάσεων ,των οποίων η πολυπλοκότητα αυξάνεται εκθετικά και όχι γραμμικά όσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητα ενός προβλήματος .Ως qubit μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα ηλεκτρόνιο, ένα φωτόνιο , ένα ιόν ή ένα μόριο με αποτέλεσμα πολλές αποτελεσματικές και χρήσιμες επιλογές. Επίσης , με τη χρήση δύο qubits μπορούμε να έχουμε το 0 και 1 ταυτόχρονα σε όλους τους συνδυασμούς , σε αντίθεση με τα σημερινά bits .

Έτσι μπορούμε να τονίσουμε τα κυριότερα πλεονεκτήματα ενός κβαντικού υπολογιστή, τα οποία είναι :

- μεγαλύτερη ταχύτητα
- τεράστια μνήμη
- απεριόριστη ισχύς
- λύση πολλών σύνθετων προβλημάτων ταυτόχρονα

Τα **μειονεκτήματα** που συναντάμε σε έναν κβαντικό υπολογιστή σε σχέση με έναν συμβατικό είναι :

- δεν έχει όλες τις δυνατότητες ενός συμβατικού ηλεκτρονικού υπολογιστή , όπως είναι για παράδειγμα η επεξεργασία κειμένου , το web surfing. Είναι κυρίως εξειδικευμένος στην πολυεπεξεργασία δεδομένων και τη λύση προβλημάτων.

- Έλλειψη προς το παρόν κατάλληλων ανθεκτικών υλικών για την υλοποίηση ενός κβαντικού υπολογιστή που θα αντέχει στο χρόνο . Τα υλικά που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα δεν μπορούν να αντέξουν τις μεγάλες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται λόγω των τεράστιων ταχυτήτων μεταφοράς δεδομένων. Οι πολύ ψηλές θερμοκρασίες οφείλονται στη μεγάλη εσωτερική τριβή των υλικών .

- Επειδή τα qubits αλληλεπιδρούν έντονα με το περιβάλλον , είναι δύσκολο να απομονωθούν αυτά τα υλικά και επομένως να είναι λειτουργικά καθώς η αλληλεπίδραση αυτή οδηγεί στην κατάρρευση της υπέρθεσης των καταστάσεων που περιγράφεται από τη γνωστή κυματοσυνάρτηση του Schrodinger.

Η προοπτική και το μέλλον των κβαντικών υπολογιστών

Οι κβαντικοί υπολογιστές δεν είναι κατάλληλοι για όλες τις υπολογιστικές διεργασίες. Παραδείγματος χάριν δεν μπορούν να επιταχύνουν την επεξεργασία κειμένου ή την πλοήγηση στο διαδίκτυο. Το πιθανότερο είναι να χρησιμοποιηθούν υβρίδια κλασικών και κβαντικών υπολογιστών στο μέλλον. Η βασική μελλοντική τους εφαρμογή θα είναι η χρήση τους για την προστασία απόρρητων και προσωπικών δεδομένων γιατί θα είναι αδύνατο να μπορούν να εισέρχονται σε e-mails και τραπεζικούς λογαριασμούς χρηστών του διαδικτύου, λόγω της ασφάλειας που θα παρέχουν. Επίσης, η αναζήτηση πληροφορίας στο διαδίκτυο θα διεξάγεται πολύ πιο γρήγορα, εφόσον υπάρχει κβαντικός αλγόριθμος αναζήτησης δεδομένων σε λίστα ο οποίος είναι μικρότερης τάξεως από τον αντίστοιχο κλασικό. Τέλος μία άλλη εφαρμογή που έχει χρήση και στην καθημερινή ζωή είναι η βελτίωση στη χρήση GPS δηλαδή συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτοκίνητα για να ανιχνεύεται μία θέση προς αναζήτηση. Αυτά τα συστήματα βασίζονται σε ρολόγια που λειτουργούν με βάση τις αρχές της κβαντομηχανικής. Οι κβαντικοί υπολογιστές θα μπορούν να βελτιώσουν αυτές τις ρυθμίσεις και η αναζήτηση με τα μηχανήματα να δίνει καλύτερα και πιο έγκυρα αποτελέσματα.

Συμπερασματικά, οι κβαντικοί υπολογιστές αναμένεται να φέρουν επανάσταση στο σύγχρονο κόσμο δίνοντας απίστευτη ώθηση σε κάθε τομέα έρευνας, από την πληροφορική και τη φυσική μέχρι την ιατρική. Όμως η κατασκευή και η

Λειτουργία κβαντικών υπολογιστών είναι προς το παρόν αρκετά δύσκολη , οπότε το πιθανότερο είναι να χρησιμοποιηθούν υβριδικά συστήματα κλασικών και κβαντικών υπολογιστών στο μέλλον.

Η πρώτη πώληση κβαντικού υπολογιστή

Πρόσφατα έγινε η πρώτη πώληση ενός κβαντικού υπολογιστή. Η εταιρία Lockheed Martin που είναι η μεγαλύτερη προμηθεύτρια του αμερικανικού πενταγώνου , αγόρασε έναν κβαντικό υπολογιστή από την εταιρία D-wave που εδρεύει στον Καναδά. Ο D-wave One , όπως ονομάζεται ο κβαντικός υπολογιστής μοιάζει με ένα τεράστιο μαύρο κουτί . Αυτό που είναι γνωστό είναι ότι χρησιμοποιείται ένα υπεραγώγιμο τσιπ των 128 qubits που ονομάζεται Rainier. Ο επεξεργαστής αυτός είναι θωρακισμένος με ειδικά φίλτρα για την προστασία του από κάθε είδους εξωτερικό παράγοντα ώστε να μην καθυστερεί η επεξεργασία. Κατά τη λειτουργία του , έχει επιτευχθεί η ψύξη του σχεδόν στο απόλυτο μηδέν, ώστε να μην υπερθερμάνεται. Η χωρητικότητα του είναι τεράστια καθώς τα 128 qubits είναι ισοδύναμα με $3,8 \times 10^{25}$ Terabits.



Κεφάλαιο 5: Ένα βήμα πιο κοντά

5.1 Ένα βήμα πιο κοντά στους κβαντικούς υπολογιστές

Επιστήμονες από το Πανεπιστήμιο του Γέιλ ανακάλυψαν ένα νέο τρόπο αξιοποίησης σημάτων μικροκυμάτων που θα βοηθήσει το μακροπρόθεσμο στόχο για την ανάπτυξη του πρώτου κβαντικού υπολογιστή, ένα πανίσχυρο εργαλείο που θα φέρει επανάσταση στην επεξεργασία της πληροφορίας και την καθημερινή μας ζωή με την άνευ προηγουμένου ταχύτητα και ισχύ του. Η έρευνα, η οποία δημοσιεύθηκε στο τελευταίο τεύχος του επιστημονικού περιοδικού Nature , περιλαμβάνει φωτόνια, τις μικρότερες μονάδες σημάτων μικροκυμάτων, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν ως μνήμη του κβαντικού υπολογιστή, όπως οι μνήμες RAM ενός σύγχρονου υπολογιστή.

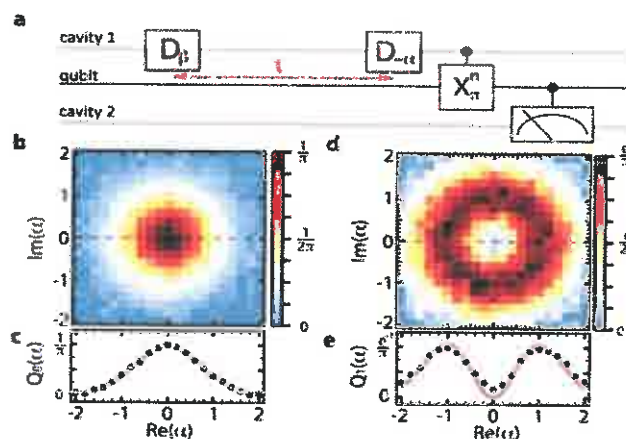
Τα φωτόνια μπορούν να συγκρατήσουν και να μεταφέρουν κβαντική πληροφορία για μεγάλο χρονικό διάστημα, διότι κατά κανόνα αντιδρούν πολύ αδύναμα με το μέσο στο οποίο μεταφέρονται, για παράδειγμα ομοαξονικά καλώδια ή αέρας. Η αδυναμία αυτών των αλληλεπιδράσεων αποτρέπει την απορρόφηση των φωτονίων από το μέσο μεταφοράς και διατηρεί την κβαντική πληροφορία, αφού αυτή κωδικοποιηθεί.

Οι ερευνητές αναφέρουν πως κατάφεραν να δημιουργήσουν ένα τεχνητό μέσο στο οποίο φωτόνια απωθούν φωτόνια, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα αποτελεσματικής και μη καταστρεπτικής κωδικοποίησης, καθώς και επεξεργασίας των κβαντικών πληροφοριών.

«Το πείραμα μάς έδειξε ότι μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα μέσο το οποίο μας επιτρέπει να επεξεργαζόμαστε την φωτονική κατάσταση χωρίς να απορροφά τα φωτόνια και να καταστρέφει την κβαντική πληροφορία που φέρουν», δήλωσε ο Γκέρχαρντ Κίρχμαϊρ, μέλος της ερευνητικής ομάδας υπό τον καθηγητή Σέλκοτφ και συγγραφέας της δημοσίευσης.

«Το γεγονός αυτό δημιουργεί μία πηγή για καινοφανείς κβαντικές καταστάσεις χωρίς τη χρήση πολύπλοκων μηχανισμών ελέγχου και ταυτόχρονα απλοποιεί ορισμένους αλγόριθμους κβαντικών υπολογισμών. Στο εγγύς μέλλον θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα από τα απαραίτητα συστατικά για την κατασκευή ενός κβαντικού υπολογιστή», πρόσθεσε.

Το τεχνητό μέσο αποτελείται από ένα υπεραγώγιμο qubit (το κβαντικό ανάλογο του bit) συζευγμένο σε ένα αντηχείο. Τα επόμενα πειράματα της ομάδας επικεντρώνονται στην ενεργοποίηση και απενεργοποίηση αυτού του μηχανισμού κατά βούληση.



5.2 Βραβείο νόμπελ φυσικής 2012

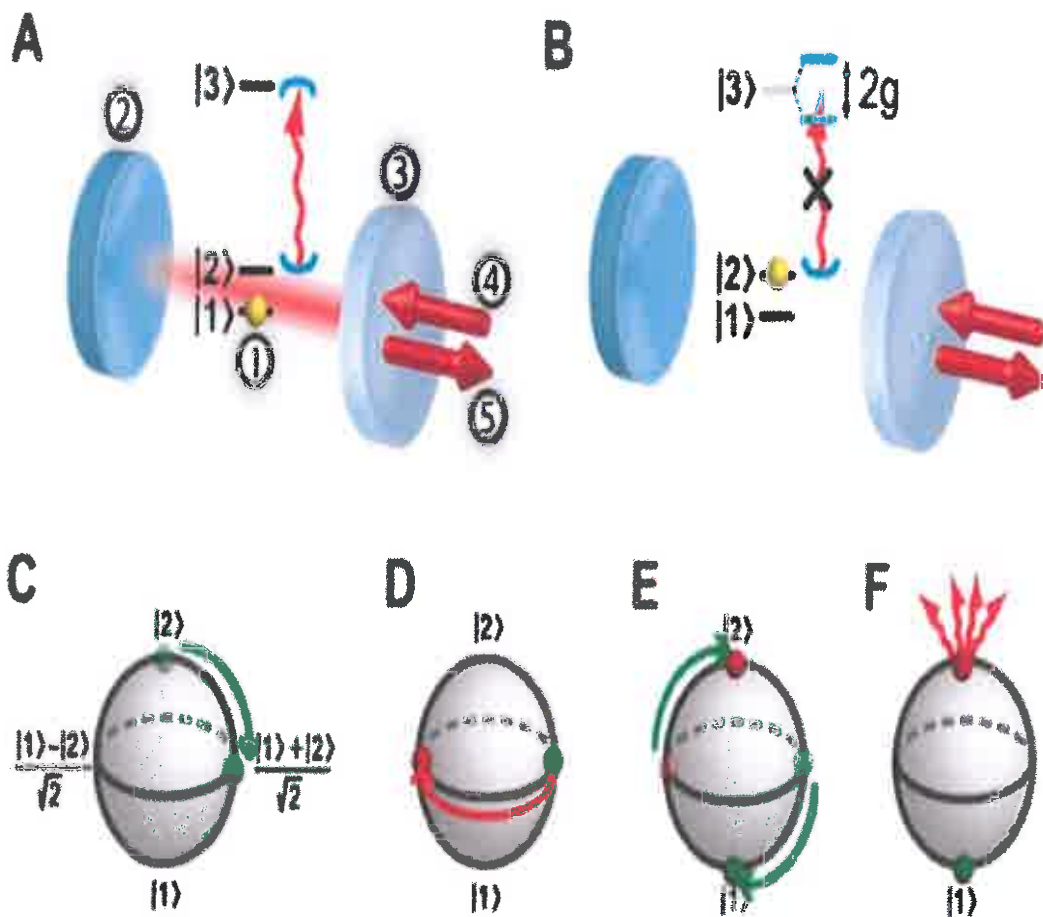
Το βραβείο Nobel Φυσικής (2012) μοιράστηκαν δυο φυσικοί, σχετικά άγνωστοι στο ευρύ κοινό, οι Serge Haroche (Σερζ Αρός) και David J. Wineland (Ντέιβιντ Γουάινλαντ). Οι Haroche και Wineland ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον ανακάλυψαν και εφάρμοσαν πρωτοποριακές πειραματικές μεθόδους που επιτρέπουν την μέτρηση και τον χειρισμό απομονωμένων κβαντικών συστημάτων, ενώ αυτά διατηρούν την κβαντομηχανική τους φύση. Ήταν οι πρώτοι που κατάφεραν να ελέγξουν και να μετρήσουν πολύ «ευαίσθητες» κβαντικές καταστάσεις και οδήγησαν το πεδίο της έρευνάς τους στα πρώτα βήματα προς την κατασκευή των κβαντικών υπολογιστών. Το πεδίο έρευνας των δυο αυτών πρωτοπόρων φυσικών γνωρίζει πλέον μεγάλη επιτυχία και συνεχώς δημοσιεύονται νέα επιτεύγματα, νέες τεχνικές και νέα ρεκόρ, όπως για παράδειγμα οι 2 εργασίες που δημοσιεύθηκαν πρόσφατα με τους παρακάτω τίτλους :

1. «Nondestructive Detection of an Optical Photon», Reiserer et al και
2. «Room-Temperature Quantum Bit Storage Exceeding 39 Minutes Using Ionized Donors in Silicon-28»

1. Πώς «βλέπουμε» ένα φωτόνιο χωρίς να το «καταστρέψουμε»

Στην πρώτη από τις δυο εργασίες (Nondestructive Detection of an Optical Photon) εξετάζεται το πώς μπορούμε να ανιχνεύσουμε ένα φωτόνιο χωρίς να το «καταστρέψουμε», ώστε να μπορούμε να το ξανα-ανιχνεύσουμε. Αυτό φαίνεται να αντιφάσκει με την λογική της κβαντομηχανικής που μας λέει ότι είναι αδύνατον να παρατηρήσουμε κάτι στον μικρόκοσμο χωρίς να το επηρεάσουμε. Οι Reiserer et al όμως το κατάφεραν κατευθύνοντας φωτόνια σε μια οπτική κοιλότητα, αποτελούμενη από δύο καθρέπτες, ο ένας υψηλότερης ανακλαστικότητας και ο δεύτερος ημιδιαπερατός, σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους. Στο μέσον της κοιλότητας ήταν παγιδευμένο ένα άτομο ρουβιδίου που βρισκόταν σε υπέρθεση δυο καταστάσεων. Στην μια κατάσταση από αυτές το άτομο δεν αλληλεπιδρά ούτε με την κοιλότητα ούτε με το φωτόνιο που προσπίπτει στην κοιλότητα. Σ' αυτή την περίπτωση το φωτόνιο εισέρχεται στην κοιλότητα και δεν αλληλεπιδρά με το άτομο. Στην

άλλη κατάσταση της υπέρθεσης το άτομο αλληλεπιδρά με την κοιλότητα και το προσπίπτον φωτόνιο. Τώρα το άτομο και η κοιλότητα αντιπροσωπεύουν ένα ισχυρά συζευγμένο σύστημα με εμφανώς διαφορετικές ιδιότητες από τα μέρη του. Αντίθετα με την πρώτη περίπτωση, ένα φωτόνιο που βρίσκεται σε συντονισμό με την κοιλότητα, δεν μπορεί να εισέλθει σ' αυτή. Ανακλάται και δεν απορροφάται. Ωστόσο το φωτόνιο αφήνει το ίχνος του στο άτομο. Η κατάσταση συντονισμού βιώνει μια μετατόπιση φάσης η οποία μπορεί να μετρηθεί. Έτσι το φωτόνιο ανιχνεύεται χωρίς να καταστρέφεται. Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται η ανίχνευση μεμονωμένων φωτονίων με απόδοση 74% και με πιθανότητα επιβίωσης 66%. Το σημαντικό στην τεχνική αυτή είναι ότι τα φωτόνια έχουν μήκη κύματος παρόμοια μ' αυτά που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες. Η αύξηση της απόδοσης ανίχνευσης αναμένεται να έχει σημαντικές συνέπειες για όλα τα πειράματα, όπου χρησιμοποιούνται φωτόνια για την κωδικοποίηση και την μεταφορά κβαντικής πληροφορίας.



2. Ρεκόρ διατήρησης qubit σε θερμοκρασία δωματίου

Ένα σημαντικό βήμα, επίσης προς την κατεύθυνση της κατασκευής κβαντικών υπολογιστών, πραγματοποίησαν οι ερευνητές Saeedi et al στην εργασία τους με τίτλο "Room-Temperature Quantum Bit Storage Exceeding 39 Minutes Using Ionized Donors in Silicon-28", διατηρώντας σταθερά για χρονικό διάστημα – ρεκόρ, περίπου 39 λεπτών, σε θερμοκρασία δωματίου, τα επανομαζόμενα qubits (κβαντικά μπιτ). Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ κλασικού υπολογιστή και κβαντικού υπολογιστή είναι η εξής:

Στους γνωστούς υπολογιστές η βασική μονάδα εγγραφής και επεξεργασίας της πληροφορίας στο δυαδικό σύστημα – με τα γνωστά ψηφία 0 και 1 για τα οποία χρησιμοποιείται ο όρος bit (binary digit)– είναι ένα κλασικό αντικείμενο, π.χ. μια μαγνητική ψηφίδα μνήμης. Στους κβαντικούς υπολογιστές η βασική μονάδα εγγραφής είναι ένα κβαντικό σύστημα. Για παράδειγμα ένα άτομο υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση, όπου το μηδέν αντιπροσωπεύεται από την ηλεκτρονιακή κατάσταση με σπιν πάνω και το ένα από την κατάσταση με σπιν κάτω. Η κατάσταση με σπιν πάνω συμβολίζεται με $|0\rangle$ και η κατάσταση με σπιν κάτω με $|1\rangle$. Όμως επειδή το άτομο είναι ένα κβαντικό σύστημα, εκτός από τις παραπάνω δυο καταστάσεις $|0\rangle$ και $|1\rangle$, θα είναι επίσης μια πραγματοποιήσιμη κατάσταση και κάθε γραμμικός συνδυασμός της μορφής:

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle \quad \text{όπου } a^2 + b^2 = 1$$

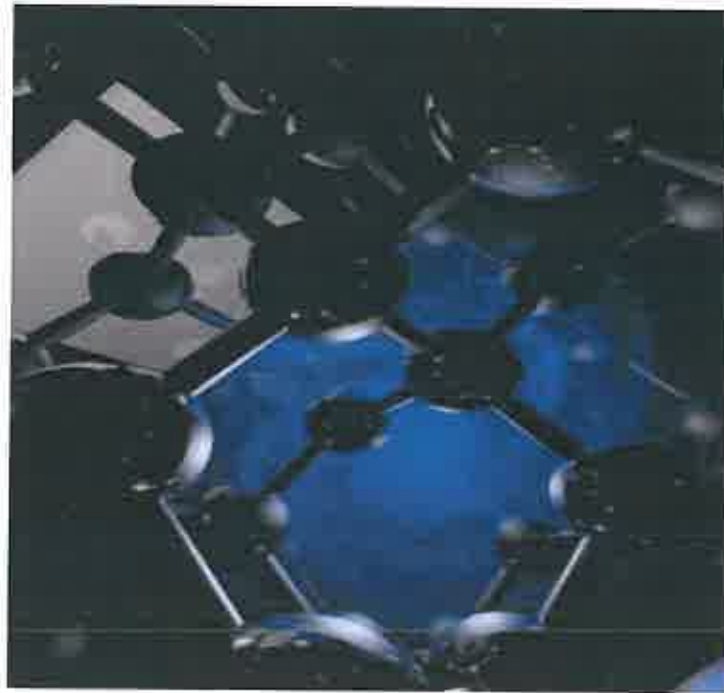
Και εδώ βρίσκεται η πηγή της θεμελιώδους διαφοράς μεταξύ ενός κλασικού και ενός κβαντικού υπολογιστή. Ότι στους κβαντικούς υπολογιστές η βασική μονάδα μνήμης μπορεί να βρίσκεται όχι μόνο στις καταστάσεις 0 και 1 αλλά και σε κάθε δυνατή επαλληλία. Έτσι στην περίπτωση των κβαντικών υπολογιστών μιλάμε για qubit (quantum bit) Για να καταφέρει να δουλέψει ένας κβαντικός υπολογιστής θα πρέπει να μπορεί να διατηρήσει τη συμφωνία φάσεως στις καταστάσεις επαλληλίας των qubit του τουλάχιστον για τόσο χρονικό διάστημα όσο διαρκεί ο υπολογισμός. Όμως ο καταχωρητής δεν λειτουργεί στο κενό. Είναι ένα μικροσκοπικό – και, προοπτικά, ένα μεσοσκοπικό – κβαντικό σύστημα που αλληλεπιδρά με ένα πολύ μεγαλύτερο «περιβάλλον», συν-πλέκεται μαζί του και ως αποτέλεσμα αυτής της σύμπλεξης υφίσταται απώλεια συμφωνίας η οποία καταστρέφει τις επαλληλίες και μαζί μ' αυτές όλα τα αναμενόμενα πλεονεκτήματα έναντι του κλασικού υπολογιστή. Αυτή η αποσυμφώνηση (decoherence) λόγω σύμπλεξης με το περιβάλλον, είναι όντως η αχίλλειος πτέρνα του κβαντικού υπολογιστή και από την επιτυχή ή όχι αντιμετώπιση αυτού του θεμελιώδους προβλήματος εξαρτάται η κατασκευή ρεαλιστικών κβαντικών υπολογιστών. Οι Saeedi et al κατάφεραν να διατηρήσουν ένα σύστημα κβαντικής μνήμης σταθερό σε θερμοκρασία δωματίου, Κωδικοποίησαν πληροφορίες σε άτομα φωσφόρου, τα οποία είχαν τοποθετηθεί σε μια φέτα από πυρίτιο, από το οποίο πρώτα απομακρύνθηκε κάθε πρόσμιξη που θα μπορούσε να διαταράξει τη μαγνητική κατάσταση των ατόμων. Χρησιμοποιώντας μαγνητικά πεδία δημιούργησαν μια υπέρθεση των καταστάσεων σπιν πάνω και σπιν κάτω. Το πείραμα έδειξε ότι η υπέρθεση έμενε σταθερή για 3 ώρες σε θερμοκρασία -269 βαθμών Κελσίου και για 29 λεπτά σε θερμοκρασία 25 βαθμών – ένας χρόνος που θεωρείται αρκετός για εκατομμύρια υπολογισμούς. Πρόκειται για χρόνους ζωής δεκαπλάσιους σε σχέση με προηγούμενες έρευνες.



5.3 Νέο ρεκόρ για τους κβαντικούς υπολογιστές

Δύο ερευνητικές ομάδες οι οποίες εργάζονται στα ίδια εργαστήρια στο UNSW Australia ανακάλυψαν ξεχωριστές «λύσεις» προς την κατεύθυνση της δημιουργίας πανίσχυρων κβαντικών υπολογιστών. Οι ομάδες δημιούργησαν δύο ομάδες κβαντικών bit (qubits)- τα δομικά στοιχεία των κβαντικών υπολογιστών- που επεξεργάζονται κβαντικά δεδομένα με ακρίβεια άνω του 99%. Τα αποτελέσματα της δουλειάς των δύο ομάδων δημοσιεύθηκαν ταυτόχρονα στο Nature Nanotechnology. «Για να γίνουν πραγματικότητα οι κβαντικοί υπολογιστές πρέπει να λειτουργούμε τα bit με πολύ χαμηλά ποσοστά/ ρυθμούς λάθους» αναφέρει ο Andrew Dzurak, Scientia Professor και διευθυντής του Australian National Fabrication Facility στο UNSW. «Ανακαλύψαμε δύο παράλληλους τρόπους για τη δημιουργία ενός κβαντικού υπολογιστή σε πυρίτιο, ο καθένας εκ των οποίων επιδεικνύει αυτή την εκπληκτική ακρίβεια» προσθέτει ο Andrea Morello, επίκουρος καθηγητής της σχολής Ηλεκτρολογίας Μηχανολογίας και Τηλεπικοινωνιών του UNSW. Οι δύο ομάδες, οι οποίες συνεργάζονται επίσης με το ARC Centre for Excellence for Quantum Computation & Communication Technology, είχαν επιδείξει σημαντικά επιτεύγματα στο αντικείμενο το 2012 και το 2013. Τώρα, η ομάδα του Dzurak βρήκε έναν τρόπο να δημιουργήσει ένα qubit «τεχνητού ατόμου» με μια συσκευή παρεμφερή στα τρανζίστορ πυριτίου που χρησιμοποιούνται στις καταναλωτικές ηλεκτρονικές συσκευές (MOSFET). Ο μεταδιδακτορικός ερευνητής Menno Veldhorst, επικεφαλής συντάκτης του paper που περιγράφει το εν λόγω qubit, χαρακτηρίζει «εκπληκτικό το ότι μπορούμε να

φτιάξουμε ένα τόσο ακριβές qubit χρησιμοποιώντας σε γενικές γραμμές τα ίδια μέσα που έχουμε στα laptops και τηλέφωνα μας».



Στο μεταξύ, η ομάδα του Morello σπρώχνει το qubit «φυσικού» ατόμου φωσφόρου στα όρια των επιδόσεών του. Κατά τον Dr. Juha Muhonen, μεταδιδακτορικό ερευνητή και επικεφαλής συντάκτη του paper, «το άτομο φωσφόρου περιέχει στην ουσία δύο qubit: το ηλεκτρόνιο και τον πυρήνα. Ειδικά με τον πυρήνα έχουμε πετύχει ακρίβεια κοντά στο 99,99%. Αυτό σημαίνει ένα λάθος για κάθε 10.000 κβαντικές διεργασίες». Όπως επισημαίνει ο Dzurak, αν και υπάρχουν μέθοδοι διόρθωσης λαθών, η αποτελεσματικότητα είναι εγγυημένη μόνο εάν λαμβάνουν χώρα λιγότερο από το 1% των περιπτώσεων. «Τα πειράματά μας είναι ανάμεσα στα πρώτα σε στερεά κατάσταση και τα πρώτα που έγιναν ποτέ σε πυρίτιο, τα οποία πληρούν αυτές τις προδιαγραφές». Το επόμενο βήμα για τους ερευνητές είναι η δημιουργία ζευγών εξαιρετικά ακριβών κβαντικών bit. Οι μεγάλοι κβαντικοί υπολογιστές αναμένεται να αποτελούνται από χιλιάδες ή εκατομμύρια qubit και πιθανώς να ενσωματώνουν τόσο φυσικά όσο και τεχνητά άτομα. Η ομάδα του Morello πέτυχε επίσης παγκόσμιο ρεκόρ στον «χρόνο συνοχής» για ένα μεμονωμένο κβαντικό bit που κρατήθηκε σε στερεά κατάσταση. Ο χρόνος συνοχής είναι το πόσο μπορεί να διατηρηθεί η κβαντική πληροφορία πριν χαθεί. Όσο μεγαλύτερο το χρονικό διάστημα αυτό, τόσο πιο εύκολη είναι η διεξαγωγή μακρών ακολουθιών διεργασιών, και ως εκ τούτου πιο σύνθετων υπολογισμών. Ειδικότερα, η ομάδα ήταν σε θέση να αποθηκεύσει κβαντική πληροφορία σε έναν πυρήνα φωσφόρου για πάνω από 30 δευτερόλεπτα, «μία αιωνιότητα στον κβαντικό κόσμο», όπως επισημαίνει ο Morello.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα-Επίλογος

Στην εργασία αυτή επιχειρήθηκε μία σύντομη εισαγωγή στο χώρο της κβαντικής πληροφορίας και των κβαντικών κυκλωμάτων. Αρχικά παρουσιάστηκε η ιστορία των κβαντικών υπολογιστών. Περιγράφηκε η πορεία προς την ανακάλυψη και σύνθεση των κβαντικών υπολογιστών, των κβαντικών αλγορίθμων καθώς και των βασικών κβαντικών φαινομένων. Παρουσιάστηκαν οι κβαντικές πύλες και η λειτουργία τους. Γενικά, η δημιουργία βέλτιστων κυκλωμάτων είναι στόχος και πεδίο έρευνας πολλών ερευνητών, καθώς είναι κρίσιμης σημασίας για την υλοποίηση κβαντικών υπολογισμών στο μέλλον. Διαβάζοντας κάποιος όλα όσα αναφέρθηκαν στη παρούσα διπλωματική εργασία, θα διαπιστώσει πως ο πρωταρχικός στόχος της δημιουργίας ενός λειτουργικού προγράμματος που θα είναι σε θέση να πραγματοποιεί κβαντικούς υπολογισμούς και να χρησιμοποιεί ένα γραφικό περιβάλλον για την εξυπηρέτηση του σκοπού αυτού, επιτεύχθηκε. Όπως διαπιστώθηκε το πρόγραμμα δουλεύει σωστά, καθώς και τα αποτελέσματα που επιστρέφει για τους κβαντικούς υπολογισμούς που επεξεργάζεται είναι έγκυρα.

Τέλος, αυτό που έχει σημασία να κατανοήσουμε είναι το γεγονός ότι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές δεν έχουν αλλάξει ως φιλοσοφία ούτε ένα χιλιοστό από την εποχή των λυχνιών έως την σημερινή εποχή των τρανζίστορς. Βασίζονται στην Ευκλείδια φυσική και στο bit. Όμως, στην πορεία της η επιστήμη κατάφερε να δείξει ότι πλέον ζούμε σε ένα κβαντικό σύμπαν που δεν συμφωνεί με τους Ευκλείδειους νόμους. Ο χώρος, δεν αποτελείται από τρεις διαστάσεις και δεν είναι ευθύγραμος, το φράγμα της ταχύτητας του φωτός έχει "σπάσει", και ο χρόνος δεν είναι μια μονόδρομη σταθερή πορεία.

Όταν την δεκαετία του '80 έγινε η σύλληψη της ιδέας των κβαντικών υπολογιστών, πολλοί λίγοι άνθρωποι ίσως θα πίστευαν πως κάποια στιγμή θα μπορούσαμε όντως να δημιουργήσουμε στην πράξη ένα τέτοιο λειτουργικό μηχάνημα, επεμβαίνοντας στις ίδιες τις κβαντικές καταστάσεις της ύλης και της ενέργειας. Και όμως, το μακρινό εκείνο μέλλον, είναι πλέον το δικό μας παρόν.

Βιβλιογραφία

- μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία Αλεξης Κουρτέλης, Κβαντικοί υπολογιστές
- ΑΠΟ-ΕΝΑΝ-ΣΤΟΧΑΣΜΟ-ΤΟΥ-1960-ΣΤΟ-ΒΡΑΒΕΙΟ-NOBEL-ΦΥΣΙΚΗΣ-2012-ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΤΙΚΗ-ΕΡΓΑΣΙΑ
- Γιώργος Σταματίου, Διδακτορική Διατριβή, Μελέτη Ιδιοτήτων της Κβαντικής πληροφορίας
- Διπλωματική Εργασία της φοιτήτριας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών ΠΕΤΡΟΥΛΑΣ ΚΩΝ/ΝΟΥ ΜΑΥΡΙΔΗ Θέμα «Ανάπτυξη Βιβλιοθήκης και Περιβάλλοντος Εξομοίωσης Κβαντικών Υπολογισμών σε Γλώσσα Python»
- ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ,ΓΟΥΣΙΑ ΠΟΛΥΞΕΝΗ, ΚΒΑΝΤΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ: Μέθοδοι υλοποίησης κβαντικών πυλών
- Quantum Computing - Lecture Notes Mark Oskin Department of Computer Science and Engineering University of Washington

- Quantum Computation and Quantum Information, Michael A. Nielsen & Isaac L. Chuang, 10th Anniversary Edition
- lukac_perkowski_book_introduction_and_quantum_mechanics
- <http://physics4u.wordpress.com/2012/02/24/%CF%8C-%CF%8C-%CE%AE/>
- Wikipedia
- <http://physicsgg.me/>
- <http://physics4u.wordpress.com/>
- ΤΡΑΧΑΝΑΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ, ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ 2
- <http://www.digitallife.gr/how-quantum-computers-work-68054>
- <http://oem.gr/main/index.php/hy-foritoi/4658-kvantikoi-ypologistes-apo-tin-epistimoniki-fantasia-stin-pragmatikotita>