



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Κβαντική Επεξεργασία Πληροφορίας

Ενότητα 35: Κβαντικό Hardware

Σγάρμπας Κυριάκος

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας
Υπολογιστών

Σκοποί ενότητας

Κβαντικό Hardware



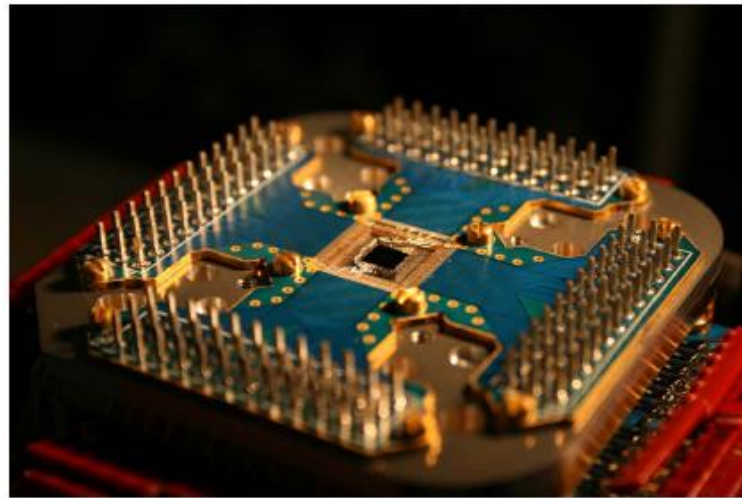
Περιεχόμενα ενότητας

- Κβαντικό Hardware
- Διάφορες υλοποιήσεις
- di Vincenzo Criteria
- Τεχνολογίες που έχουν δοκιμαστεί
- Decoherence
- Αδιαβατική προσέγγιση

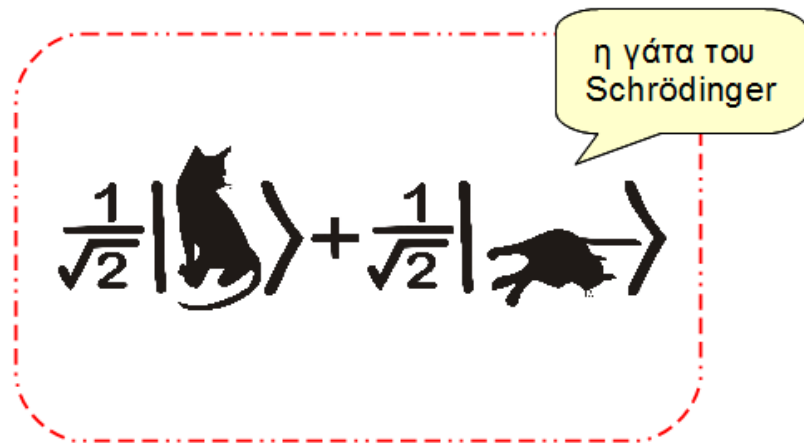
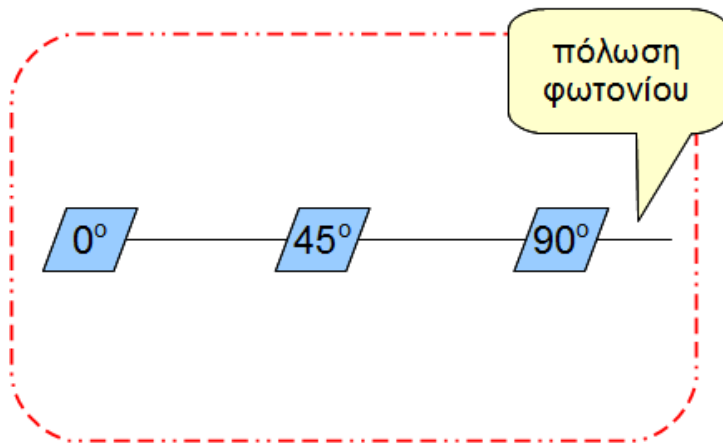
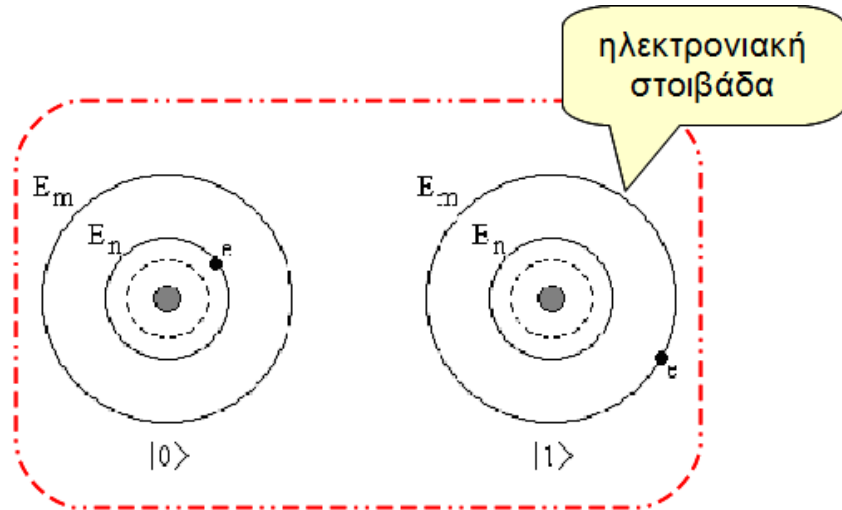
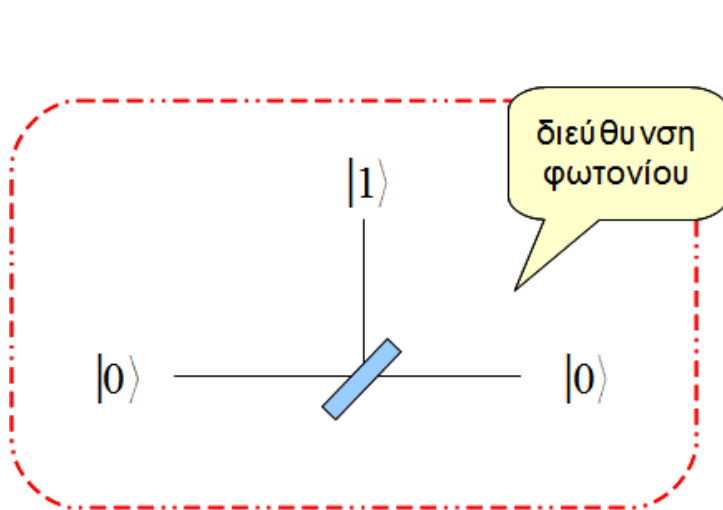


Κβαντικό Hardware

Κβαντικό Hardware



Διάφορες Υλοποιήσεις μιας Πύλης Hadamard



“Flying” & “Static” qubits

Δεν προσφέρονται όλα τα κβαντικά συστήματα για υπολογιστική χρήση.



di Vincenzo Criteria

- Για να μπορεί ένα κβαντικό σύστημα να λειτουργήσει ως κβαντικός υπολογιστής θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:
 - Δυνατότητα κλιμάκωσης (scalability) σε ικανοποιητικό πλήθος qubits
 - Δυνατότητα αρχικοποίησης της κβαντικής κατάστασης (συνήθως στην κατάσταση $|0\rangle$)
 - Ικανοποιητική χρονική διάρκεια διατήρησης της κατάστασης πριν την αποσυγκρότηση (decoherence)
 - Δυνατότητα υλοποίησης ενός πλήρους συνόλου κβαντικών πυλών (πχ. Pauli)
 - Ύπαρξη μιας αξιόπιστης διαδικασίας μέτρησης της κβαντικής κατάστασης

D. di Vincenzo, “The Physical Implementation of Quantum Computation”, *Fortsschritte der Physik*, Vol.48, pp.771-783, 2000



Τεχνολογίες που έχουν δοκιμαστεί

- **Παγίδες ιόντων (ion traps):** Μια ομάδα ιόντων (συνήθως βηρυλλίου) παγιδεύεται μέσα σε ένα συνδυασμό ηλεκτρικών πεδίων και με μια ακτίνα laser τα ιόντα εξαναγκάζονται να μεταβάλουν τις ατομικές τους καταστάσεις που αντιστοιχούν στα qubits του συστήματος
- **Μαγνητικός πυρηνικός συντονισμός (NMR = Nuclear Magnetic Resonance):** Τα qubits αντιστοιχούν στην φορά περιστροφής (spin) των πυρήνων των ατόμων που απαρτίζουν ένα μόριο (συνήθως χλωροφόρμιο). Χρησιμοποιείται εναλασσόμενο μαγνητικό πεδίο για να μεταβάλλει το spin στους πυρήνες οι οποίοι συντονίζονται με αυτό.
- **Κβαντικές κηλίδες (quantum dots):** Ημιαγωγικές περιοχές (της τάξης των νανομέτρων), όπου η μετακίνηση ηλεκτρονίων / οπών προκαλεί παρατηρήσιμες αλλαγές στην επιφάνειά τους (spin, ηλεκτρικό φορτίο, ακόμα και μεταβολή στις οπτικές ιδιότητες).
- **Ηλεκτροδυναμική κβαντικής κοιλότητας (CQED = Cavity Quantum Electrodynamics):** Σε μια οπτική κοιλότητα με διαστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος του φωτός μετρώνται ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά ακτινοβολιών που αλληλεπιδρούν με άτομα ύλης μέσα στην κοιλότητα.
- **Υπεραγώγιμοι βρόχοι (superconductor flux):** Τα qubits αντιστοιχούν στον προσανατολισμό της μαγνητικής ροής που δημιουργείται από το ρεύμα σε μια συστοιχία υπεραγώγιμων βρόχων. Οι βρόχοι συνδέονται μεταξύ τους με μη γραμμικά στοιχεία που ονομάζονται Josephson junctions.



Αποσυγκρότηση (Decoherence)

- Οι καταστάσεις υπέρθεσης είναι ασταθείς.
- Το σύστημα πέφτει πολύ γρήγορα σε μια ευσταθή κατάσταση (αποσυγκροτείται).
- Η αποσυγκρότηση είναι ένα μη αναστρέψιμο γεγονός που ισοδυναμεί με μέτρηση ή ανταλλαγή ενέργειας / πληροφορίας με το περιβάλλον.
- Κάθε τεχνολογία υλοποίησης προσφέρει διαφορετικούς χρόνους αποσυγκρότησης (τ_Q) και απόκρισης (τ_{op}).
- Ο χρόνος απόκρισης αντιστοιχεί σε μια πλήρη περιστροφή του διανύσματος κατάστασης.
- Ο λόγος (τ_Q / τ_{op}) εκφράζει το πλήθος των “πράξεων” που προλαβαίνουμε να κάνουμε στον κβαντικό καταχωρητή πριν επέλθει η αποσυγκρότηση.



Ενδεικτικές Τιμές τ_Q, τ_{op}

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ	τ_Q (sec)	τ_{op} (sec)	τ_Q / τ_{op}
NMR	$10^{-2} - 10^8$	$10^{-3} - 10^{-6}$	$10^5 - 10^{14}$
Ion Traps	10^{-1}	10^{-14}	10^{13}
Quantum Dots	10^{-6}	10^{-9}	10^3
CQED	10^{-5}	10^{-14}	10^9

(για 1 qubit)



Αδιαβατική Προσέγγιση

Εξίσωση Schrödinger:
$$i \hbar \frac{\partial |\psi(t)\rangle}{\partial t} = H |\psi(t)\rangle$$

περιγράφει τη χρονική εξέλιξη της κατάστασης ενός κλειστού κβαντικού συστήματος

Χαμιλτονιανή:
ένας πίνακας που εκφράζει τη συνολική ενέργεια (κινητική και δυναμική) του συστήματος

Χρησιμοποιούμε μια παραμετρική Χαμιλτονιανή:

$$H = (1-s) H_{init} + s H_{final}$$

που δημιουργείται από έναν απλό αρχικό πίνακα και τον τελικό που αντιστοιχεί στις συνθήκες που πρέπει να ικανοποιεί η λύση του προβλήματος.

Βάζουμε το s να μεταβάλλεται πολύ αργά από 0 σε 1.

Μετράμε τον καταχωρητή που πλέον περιέχει τη λύση.



Χρονική Εξέλιξη

- Οι σημαντικότερες υλοποιήσεις κβαντικών υπολογιστών:
 - 1998: 3 qubits, NMR (Los Alamos & MIT)
 - 2000: 7 qubits, NMR (Los Alamos)
 - 2005: 8 qubits, ion traps (University of Innsbruck)
 - 2007: 16 qubits, αδιαβατικός (D-Wave)
 - 2011: 128 qubits, superconductor flux (D-Wave)



Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.0**.

Έχουν προηγηθεί οι κάτωθι εκδόσεις:

- Έκδοση **1.0** διαθέσιμη [εδώ](#).



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, **Σγάρμπας Κυριάκος**. «**Κβαντική Επεξεργασία Πληροφορίας, Κβαντικό Hardware**». Έκδοση: **1.0**. Πάτρα **2014**.
Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

https://eclass.upatras.gr/modules/course_metadata/opencourses.php?fc=15



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες

Διαφάνεια 5 : Orion chip (D-Wave 2007)

<http://www.nature.com/news/2007/070212/full/news070212-8.html>

