

# ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

## 1. Εισαγωγή

Οί ηλεκτρονικοί υπολογιστές αποτελούν μία από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις του ανθρώπου. Άλλαξαν τον τρόπο σκέψεως και τον τρόπο ζωής μας σε τέτοιο βαθμό, που να μη μπορούμε να ζήσουμε χωρίς αυτούς.

Η ιστορία των ηλεκτρονικών υπολογιστών άρχισε κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Υπήρχαν βεβαίως και προηγούμενοι μηχανικοί υπολογιστές, όπως η μηχανή του Pascal (1645), η μηχανή του Leibniz (1674) και ο θεωρητικός υπολογιστής του Babbage (1822), ο οποίος έκανε πολύπλοκες πράξεις. Αλλά η χρησιμοποίηση των ηλεκτρονικών κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο έδωσε τεράστιες δυνατότητες για υπολογισμούς. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν λυχνίες, αλλά γρήγορα αντικαταστάθηκαν από transistors, που αύξησαν την υπολογιστική ικανότητα των υπολογιστών, ενώ μίκρυναν σημαντικά το μέγεθός τους.

Άμέσως μετά τον πόλεμο άρχισαν οι επιστημονικές εφαρμογές των υπολογιστών. Π.χ., το 1955 οί Fermi, Pasta και Ulam (με τη βοήθεια της Έλληνίδας Τσίγκου) έκαναν όρισμένους υπολογισμούς σε ένα σύστημα συζευγμένων ταλαντωτών, που έδωσε άπροσδόκητα αποτελέσματα και άνοιξε τον δρόμο για τη μη γραμμική δυναμική. Στην Αστρονομία ένας από τους πρώτους υπολογισμούς έγινε γύρω στο 1956 από τον Σουηδό P. O. Lindblad, που έδειξε ότι οί σπειρές των γαλαξιών είναι συρόμενες (trailing) και όχι ήγούμενες

(leading), όπως ενομιζετο μέχρι τότε. Έγώ προσωπικά (Γεώργιος Κοντόπουλος) χρησιμοποίησα το 1957 με τη βοήθεια του P. O. Lindblad τον ηλεκτρονικό υπολογιστή BESK της Στοκχόλμης, για να υπολογίσω 2 τροχιές άστέρων σε 3 διαστάσεις. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών ήταν άπροσδόκητα και οδήγησαν στη θεωρία του 3ου ολοκληρώματος στους γαλαξίες.

Στην Ελλάδα ο πρώτος υπολογιστής ήταν ένας IBM 650 στο Ε. Μ. Πολυτεχνείο, αλλά άμέσως κατόπιν το Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης προμηθεύθηκε το 1962 έναν υπολογιστή IBM 1620, που άξιопοιήθηκε πολύ συστηματικά. Σήμερα, εκτός από τους μεγάλους υπολογιστές, κάθε έρευντής, αλλά και σχεδόν κάθε δημόσιος υπάλληλος, έχει έναν προσωπικό υπολογιστή (personal computer), που είναι συγκριτικά ταχύτερος από τους μεγαλύτερους παλαιότερους υπολογιστές.

Θά αναφέρω ένα προσωπικό παράδειγμα. Όταν το 1963 επέστρεψα από τις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου είχα κάνει πολλούς υπολογισμούς με τους υπολογιστές της NASA στη Νέα Υόρκη, συνέχισα να στέλνω σε ένα συνεργάτη μου στη NASA τα αρχικά δεδομένα των υπολογισμών που ήθελα να κάνω, υπό μορφή τρυπημένων καρτών (punched cards). Μετά από ένα μήνα έπαιρνα τα αποτελέσματα των υπολογισμών (τροχιές σχεδιασμένες αυτόματως). Κατ' αυτόν τον τρόπο πετύχαμε πολύ σημαντικά αποτελέσματα. Σήμερα όμως οί υπολογισμοί αυτοί γίνονται με

έναν προσωπικό υπολογιστή στο έργο-σπίριό μας μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα!

Μιά σημαντική εξέλιξη άπτετέλεσαν οί διάφορες «γλώσσες» που χρησιμοποιούν οί υπολογιστές. Έκτός από τις συνήθειες γλώσσες Fortran, C++, Pascal, Cobol, Java κτλ., που κάνουν ταχύτατα αριθμητικούς υπολογισμούς, υπάρχουν και γλώσσες που κάνουν άλγεβρικές πράξεις, όπως ή Mathematica, ή Maple, ή Matlab, ή Maxima κτλ., που βοηθούν ουσιαστικά τον κάθε έρευντή. Π.χ., όταν χρειάστικα να υπολογίσω τó 3ο όλοκλήρωμα μέχρις όρουσ 10ου βαθμού (χιλιάδες όρουσ, που ήταν αδύνατον να υπολογισθούν με τó χέρι), ανέπτυσσα ένα πρόγραμμα σε γλώσσα FORTRAN, και έδωσε πολύ σημαντικά άποτελέσματα. Σήμερα όμως, με τις γλώσσες Mathematica,

*Οί ήλεκτρονικοί  
ύπολογιστές άποτελούν  
μία από τις μεγαλύτερες  
άνακαλύψεις του άνθρώπου.  
Άλλαξαν τόν τρόπο  
σκέψεωσ και τόν τρόπο  
ζωήσ μας σε τέτοιο βαθμό,  
που να μη μπορούμε  
να ζήσουμε χωρίσ αυτούσ.*

Maple κτλ., φθάνουμε σε άναπτύγματα τάξεωσ πάνω από 100, που περιέχουν πολλά έκατομμύρια όρουσ.

Οί πρώτοι υπολογισμοί σε συστήματα πολλών σωμάτων άρχισαν τó 1960 από τον von Hoerner με 16 σώματα. Άργότερα όμως ó αριθμόσ αυτόσ αύξήθηκε σε χιλιάδες και έκατομμύρια, και σήμερα φθάνουμε σε μερικά τρισεκατομμύρια σωμάτια. Πράγματι, υπάρχουν σήμερα όρισμένα προγράμματα που χρησιμοποιούν τó μεγαλύτερο μέρος των υπολογιστών όλησ τήσ Γήσ.

Συγχρόνωσ άρχισε ή χρησιμοποίηση των ήλεκτρονικών υπολογιστών σε διάφορες έφαρμογές στο έμπόριο, την Ίατρική, τις τηλεπικοινωνίες, τó διάστημα και στη διεξαγωγή του πολέμου. Είνα αδύνατον να λειτουργήσει ένα μεγάλο κατάστημα, μια τράπεζα ή μια έταιρεία χωρίσ τη συνεχή χρησιμοποίηση των υπολογιστών. Η Ίατρική έχει προχωρήσει σε άπίστευτες έφαρμογές τήσ τεχνολογίασ, με έγχειρήσεις που γίνονται από ρομπότ και άνιχνευτικές συσκευές μέσα στο σώμα του άνθρώπου. Τέλος, οί σημερινοί πόλεμοι γίνονται σε μεγάλο βαθμό με ειδικευμένους υπολογιστές, που κάνουν στοχευμένους βομβαρδισμούς από μη έπανδρωμένα άεροπλάνα ή κατευθυνόμενουσ πυραύλουσ με ύψηλή άκρίβεια από τεράστιες άποστάσεις.

Όμως, παρ' όλες αυτές τις καταπληκτικές εξέλιξεις, τó βασικό πρόβλημα είναι τó έξή: "Όσ που μπορεί να φθάσει ή εξέλιξη των υπολογιστών; Στο έρώτημα αυτό προσπαθεί να δώσει άπάντηση ή έπιστήμη των υπολογιστών.

## 2. Θεωρία

Η έπιστήμη των υπολογιστών άποτελεί σήμερα ένα νέο και άναπτυσσόμενο κλάδο τήσ έπιστήμησ. Υπάρχουν θεωρήματα που έχουν τεράστιες θεωρητικές έφαρμογές. Ένα τέτοιο παράδειγμα άποτελεί ή θεωρητική μηχανή του Turing. Αυτή έχει μόνο ένα σύμβολο, τó (1), και τó κενό (0), και περιέχει όλα τα δεδομένα και τις έντολές κάθε προβλήματος σε δυαδικό σύστημα. Π.χ., τó 2 γράφεται 10, τó 10 ως 1010 κ.ο.κ. Ό υπολογιστής περιέχει μια ταινία, στην όποία γράφονται και από την όποία διαβάζονται οί αριθμοί. Η ταινία αυτή μπορεί να κινηθεί δεξιά ή άριστερά, και θεωρείται ότι έχει άπερίοριστο μήκοσ. Άποδεικνύεται ότι ή άπλούστατη αυτή μηχανή Turing μπορεί

να κάνει όποιοδήποτε υπολογισμό που κάνει ένας οποιοσδήποτε υπολογιστής (universal computer machine).

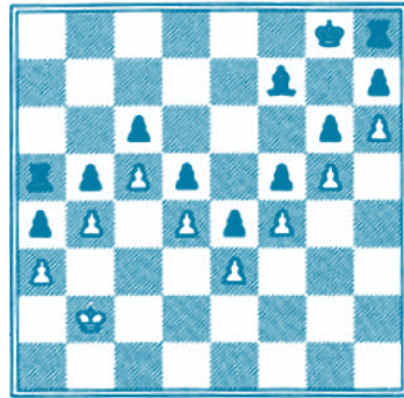
Ένα πολύ σημαντικό θεώρημα του Turing είναι ότι δεν μπορεί να υπάρξει ένας αλγόριθμος που να μας λέει αν ένα πρόβλημα έχει λύση ή όχι. Αυτό είναι το λεγόμενο πρόβλημα του τερματισμού (halting problem) και διατυπώνεται ως εξής: "Αν ένας υπολογιστής εργάζεται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, αυτό οφείλεται στο ότι το πρόβλημα είναι δύσκολο ή στο ότι είναι άλυτο; Μπορούμε να πούμε αν ο υπολογιστής θα σταματήσει κάποτε ή όχι; Π.χ., έστω ένας υπολογιστής που βρίσκει τα διαδοχικά ψηφία του αριθμού  $\pi$ , και του ζητούμε να σταματήσει, αν βρεί 10 διαδοχικές μονάδες 1111111111. Θεωρείται ότι μια τέτοια ακολουθία υπάρχει στα ψηφία του  $\pi$ , αλλά, για να βρεθεί αυτή ή ακολουθία, ίσως χρειαστούν χιλιάδες ή και εκατομμύρια έτη υπολογισμών. Πάντως φαίνεται ότι οι υπολογισμοί κάποτε θα τελειώσουν." Αν όμως ζητήσουμε από τον υπολογιστή να βρεί ένα περιττό αριθμό 1,3,5 που να διαιρείται διά του 2, αυτός θα εργάζεται επ' άπειρον, χωρίς ποτέ να σταματήσει. Το αποτέλεσμα βεβαίως το ξέρουμε εκ των προτέρων από τον ορισμό των περιττών αριθμών. Αλλά σε πιο περίπλοκες περιπτώσεις δεν μπορούμε να πούμε αν ο υπολογιστής θα σταματήσει ή όχι. Το θεώρημα του Turing αποδεικνύει ότι δεν υπάρχει ένας αλγόριθμος που να δίνει απάντηση για κάθε δοθέν πρόγραμμα, αν ο υπολογιστής θα σταματήσει ή όχι.

Το θεώρημα του Turing είναι ανάλογο προς το θεώρημα του Gödel στη λογική, που αποδεικνύει ότι δεν υπάρχει δυνατότητα να δοθεί απόδειξη ότι το σύστημα των αξιωμάτων των μαθηματικών είναι απηλλαγμένο από αντιφάσεις.

Παρ' όλα αυτά, οι χειριστές των υπολογιστών μπορούν να δημιουργήσουν κατάλληλα προγράμματα, ώστε ν' αντιμετω-

πίσουν ιδιαίτερα πολύπλοκα συστήματα. Π.χ., οι υπολογιστές μπορούν να φάξουν και να νικήσουν εξαιρετικά νομίμονες αντιπάλους, όπως έγινε με τον υπολογιστή Deep Blue, που νίκησε τον πρωταθλητή στο σκάκι Kasparov.

Έν τούτοις, δεν είναι καθόλου βέβαιο ότι ο υπολογιστής θα κερδίζει πάντοτε. Ένα παράδειγμα είναι της ακόλουθης διάταξης, την οποία παραθέτει ο Penrose στο βιβλίο του *Shadows of the Mind*.



Παίζουν τα λευκά. Μια φαινομενικά καλή κίνηση είναι να κτυπήσει το πιόνι της 2ης στήλης τον μαύρο πύργο. Αυτό πράγματι έπαιξε ο υπολογιστής Deep Thought, ο πιο ισχυρός υπολογιστής, που είχε ως τότε νικήσει μερικούς πρωταθλητές του κόσμου στο σκάκι. Έπαιξε και έχασε. Είναι όμως προφανές ότι τα λευκά πιόνια αποτελούν ένα αδιαπέραστο φράγμα για τα μαύρα, καίτοι τα μαύρα έχουν δύο πύργους και έναν αξιωματικό. Έπομένως, αν τα λευκά κινούν μόνον τον βασιλιά τους, θα έχουμε ισοπαλία και όχι ήττα. Είναι προφανές ότι ο υπολογιστής δεν είχε προγραμματισθεί στο να ξετάξει υπολογιστικές διατάξεις όπως η παρούσα. Ένα καλύτερο πρόγραμμα βεβαίως θα μπορούσε να αποφύγει την ατυχή κίνηση,

Ἡ θεωρία τῶν ὑπολογιστῶν μᾶς ὁδηγεῖ στὸ ἐρώτημα κατὰ πόσον ὁ ὑπολογιστὴς μπορεῖ νὰ μιμηθεῖ τὸν ἄνθρωπο. Αὐτὸ εἶναι τὸ πρόβλημα τῆς τεχνητῆς νοημοσύνης (artificial intelligence). Δὲν ὑπάρχει ἀμφιβολία ὅτι ὁ ὑπολογιστὴς μπορεῖ νὰ μιμηθεῖ τὸν ἄνθρωπο σὲ πάρα πολλές σκέψεις του ἢ ἐκδηλώσεις του, π.χ., ἕνα ρομπὸτ μπορεῖ νὰ κάνει πολὺπλοκες ἐργασίες, ὅπως νὰ μαγειρεύει, νὰ ψωνίζει ἢ νὰ ὁδηγεῖ αὐτοκίνητο. Αὐτὸ σημαίνει ὅτι ὁ ὑπολογιστὴς «σκέπτεται» καὶ «ἀποφασίζει»; Ἡ ἀπάντηση εἶναι ὅτι ὑπάρχουν ὅρια στὶς δυνατότητες τῶν ἠλεκτρονικῶν ὑπολογιστῶν. Τὰ ὅρια αὐτὰ δὲν εἶναι οὔτε ἡ ταχύτης οὔτε τὸ μέγεθος τῶν ὑπολογιστῶν (ἀντιθέτως, ὁ ὑπολογιστὴς κάνει ταχύτερους καὶ περισσότερους ὑπολογισμοὺς ἀπὸ κάθε ἄνθρωπο), ἀλλὰ ἡ ποιοτικὴ διαφορὰ τῶν ὑπολογισμῶν. Π.χ., ὅταν ζητοῦμε ἀπὸ τὸν ὑπολογιστὴ νὰ βρεῖ ἕνα περιττὸ ἀριθμὸ ποὺ νὰ διαιρεῖται μὲ τὸ 2, ἡ ἀπάντηση δὲν βρίσκεται στὸ ψάξιμο μεγάλου πλήθους ἀριθμῶν 1,3,5,..., ἀλλὰ στὴ διαπίστωση ὅτι οἱ περιττοὶ ἀριθμοὶ ἐξ ὀρισμοῦ δὲν διαιροῦνται διὰ τοῦ 2.

ἀλλὰ δὲν ὑπάρχει πρόγραμμα ποὺ νὰ ἐξετάξει ὅλους τοὺς δυνατοὺς συνδυασμοὺς.

Ἡ θεωρία τῶν ὑπολογιστῶν μᾶς ὁδηγεῖ στὸ ἐρώτημα κατὰ πόσον ὁ ὑπολογιστὴς μπορεῖ νὰ μιμηθεῖ τὸν ἄνθρωπο. Αὐτὸ εἶναι τὸ πρόβλημα τῆς τεχνητῆς νοημοσύνης (artificial intelligence). Δὲν ὑπάρχει ἀμφιβολία ὅτι ὁ ὑπολογιστὴς μπορεῖ νὰ μιμηθεῖ τὸν ἄνθρωπο σὲ πάρα πολλές σκέψεις του ἢ ἐκδηλώσεις του, π.χ., ἕνα ρομπὸτ μπορεῖ νὰ κάνει πολὺπλοκες ἐργασίες, ὅπως νὰ μαγειρεύει, νὰ ψωνίζει ἢ νὰ ὁδηγεῖ αὐτοκίνητο. Αὐτὸ σημαίνει ὅτι ὁ ὑπολογιστὴς «σκέπτεται» καὶ «ἀποφασίζει»;

Ἡ ἀπάντηση εἶναι ὅτι ὑπάρχουν ὅρια στὶς δυνατότητες τῶν ἠλεκτρονικῶν ὑπολογιστῶν. Τὰ ὅρια αὐτὰ δὲν εἶναι οὔτε ἡ ταχύτης οὔτε τὸ μέγεθος τῶν ὑπολογιστῶν (ἀντιθέτως, ὁ ὑπολογιστὴς κάνει ταχύτερους καὶ περισσότερους ὑπολογισμοὺς

ἀπὸ κάθε ἄνθρωπο), ἀλλὰ ἡ ποιοτικὴ διαφορὰ τῶν ὑπολογισμῶν.

Π.χ., ὅταν ζητοῦμε ἀπὸ τὸν ὑπολογιστὴ νὰ βρεῖ ἕνα περιττὸ ἀριθμὸ ποὺ νὰ διαιρεῖται μὲ τὸ 2, ἡ ἀπάντηση δὲν βρίσκεται στὸ ψάξιμο μεγάλου πλήθους ἀριθμῶν 1,3,5,..., ἀλλὰ στὴ διαπίστωση ὅτι οἱ περιττοὶ ἀριθμοὶ ἐξ ὀρισμοῦ δὲν διαιροῦνται διὰ τοῦ 2.

Ὅμως ἡ διαπίστωση ποιοτικῶν χαρακτηριστικῶν δὲν εἶναι εὐκόλη. Γι' αὐτὸ ἡ ἀναζήτηση μᾶς λύσεως σ' ἕνα ἰδιαίτερα πολὺπλοκο πρόβλημα δὲν ἐπιτυγχάνεται μὲ πολλές σκέψεις ἢ ὑπολογισμοὺς (ἄλλωστε, ὁ ὑπολογιστὴς κάνει πολὺ ταχύτερα τέτοιους ὑπολογισμοὺς), ἀλλὰ μὲ τὴν προσπάθεια νὰ βρεθῆ ἕνας διαφορετικὸς τρόπος ἀντιμετωπίσεως τοῦ προβλήματος. Ἔτσι, τὸ Πυθαγόρειο Θεώρημα δὲν λύνεται μὲ ἀριθμητικὸ ὑπολογισμὸ πολλῶν τριγῶνων, ἀλλὰ μὲ συλλογισμοὺς



πὸ ἀφοροῦν ὅλα γενικῶς τὰ ὀρθογώνια τρίγωνα.

Παρ' ὅλα αὐτά, ἡ τεχνητὴ νομοσύνη εἶναι ἓνα πολύτιμο βοήθημα τοῦ ἀνθρώπου. Πολλὲς φορὲς ὁ ἄνθρωπος μπερδεύεται μὲ σκέψεις καὶ ὑπολογισμοὺς ποὺ εἶναι ἄσχετοι μὲ τὸ πρόβλημα καὶ τὸν κάνουν νὰ εἶναι ὑποδεέστερος καὶ ὄχι ἀνώτερος ἀπὸ μιὰ μηχανή. Τότε εἶναι πολὺ χρήσιμο νὰ δεῖ ποιὲς εἶναι οἱ συνέπειες τῶν διαφόρων συλλογισμῶν καὶ ὑπολογισμῶν ποὺ κάνει. Ἐντούτοις, ἡ λύση τοῦ προβλήματος τις περισσότερες φορὲς ὀφείλεται σὲ μιὰ ἔκλαμψη, σὲ μιὰ διαίσθησις ποὺ εἶναι πέρα ἀπὸ τοὺς ἄλλους ὑπολογισμοὺς ποὺ μπορεῖ νὰ κάνει ἡ τεχνητὴ νομοσύνη ἑνὸς τελειοποιημένου ὑπολογιστοῦ.

Μερικοὶ ἰσχυρίζονται ὅτι ὁ ἐγκέφαλος τοῦ ἀνθρώπου ἔχει τὴ δυνατότητα νὰ κάνει πολὺ περισσότερους συλλογισμοὺς καὶ ὑπολογισμοὺς ἀπὸ αὐτοὺς ποὺ συνειδητὰ παρακολουθοῦμε. Οἱ ἀσυνείδητες αὐτὲς διαδικασίες τοῦ ἐγκεφάλου εἶναι μὴ ἀλγοριθμικὲς, δηλαδὴ δὲν μποροῦν νὰ καταγραφοῦν μὲ ἓνα συγκεκριμένο ἀλγόριθμο. Ὁ Penrose θεωρεῖ ὅτι οἱ μὴ ἀλγοριθμικὲς αὐτὲς διαδικασίες εἶναι φυσικὲς, δηλαδὴ ὀφείλονται στὴ φυσικὴ κατάσταση τοῦ ἐγκεφάλου. Ὅμως εἶναι πῶς εὐλόγο νὰ πεῖ κανεὶς ὅτι ἡ διάνοια τοῦ ἀνθρώπου εἶναι κάτι περισσότερο ἀπὸ τὸ σύνολο τῶν κυττάρων καὶ τῶν κινήσεων τῆς ὕλης μέσα στὸν ἐγκέφαλο. Εἶναι κάτι παρόμοιο μὲ τὴν ὠραιότητα ἑνὸς μουσικοῦ ἀριστουργήματος, ποὺ εἶναι κάτι παραπάνω ἀπὸ τὸ ἄθροισμα τῶν ἤχων ποὺ τὸ ἀπαρτίζουν.

Μερικοὶ τονίζουν ὡς διάκριση μεταξὺ ἀνθρώπου καὶ ὑπολογιστοῦ τὰ συναισθήματα. Ὁ ἄνθρωπος χαίρεται καὶ λυπᾶται, πονάει καὶ καταλαβαίνει τὸν πόνο στοὺς ἄλλους, δείχνει ἀγάπη (ἢ μῖσος) καὶ προσπαθεῖ νὰ βοηθήσει τὸν συνάνθρωπό του. Θὰ ἔλεγε κανεὶς ὅτι τέτοια «συναισθήματα» εἶναι ἄγνωστα στὸν ὑπολογιστή.

Ἄλλὰ δὲν μπορεῖ ὁ ὑπολογιστὴς νὰ προγραμματισθεῖ, ὥστε νὰ λέει «σ' ἀγαπῶ» ἢ νὰ σπεύδει νὰ βοηθήσει κάποιον ποὺ κινδυνεύει; Θὰ μποροῦσε κάλλιστα νὰ λέει «πονῶ», ἂν κάποιος τὸν κτυπήσει, ἢ νὰ γελάει, ἂν οἱ γύρω του γελοῦν, κτλ. Μποροῦμε νὰ δημιουργήσουμε ρομπὸτ ποὺ νὰ κάνουν καλύτερο φιλανθρωπικὸ ἔργο ἀπὸ διάφορους ἀπρόσωπους ὀργανισμοὺς. Ἄλλωστε, αὐτοὶ ποὺ ἐργάζονται σὲ τέτοιους ὀργανισμοὺς πολλὰς φορὲς τὸ κάνουν ὄχι ἀπὸ φιλανθρωπία, ἀλλὰ ἐπειδὴ παίρνουν ἀνάλογο μισθό.

Ἐπομένως, οἱ ἐξωτερικὲς ἐκδηλώσεις δὲν εἶναι ἀρκετὲς, γιὰ νὰ ποῦμε γιὰ κάποιον ὅτι ἔχει συμπόνοια, ὅτι χαίρει μετὰ χαιρόντων καὶ κλαίει μετὰ κλαιόντων. Ἡ διαφορὰ μεταξὺ ἐξωτερικῶν ἐκδηλώσεων καὶ ἐσωτερικῶν βιωμάτων θὰ φανεῖ κυρίως σὲ πράξεις θυσίας, σὲ περιπτώσεις ποὺ ὑπερβαίνουν τὴ συνήθειες ἐκδηλώσεις. Καὶ ἐδῶ οἱ διαφορὲς εἶναι ποιοτικὲς καὶ ὄχι ποσοτικὲς.

Ἐνα ἐρώτημα σχετικὸ μὲ τοὺς ὑπολογιστὲς εἶναι ἂν κάνουν λάθη. Ἡ ἀπάντησις εἶναι ὅτι βεβαίως κάνουν λάθη. Τὰ λάθη ὀφείλονται: (1) Στὴν κακὴ λειτουργία ἢ τὴν καταστροφὴ ἑνὸς ἢ περισσοτέρων τμημάτων τοῦ ὑπολογιστῆ (transistors ἢ καλώδια), π.χ. λόγω θέρμανσης ἢ ἐξωτερικοῦ κτυπήματος. (2) Σὲ ἓνα κακὸ πρόγραμμα. (3) Σὲ κακὰ δεδομένα, γιὰ τὰ ὁποῖα τὸ δοθὲν πρόγραμμα δὲν ἔχει ἀπαντήσεις, καὶ (4) σὲ ἀτέλεια τῆς γλώσσας τοῦ ὑπολογιστοῦ.

Στὸ παρελθὸν ἔχουμε ἀντιμετωπίσει ὅλων τῶν εἰδῶν τὰ σφάλματα. Π.χ. (1) Σὲ ὀρισμένες περιπτώσεις ἔπρεπε ὁ ὑπολογιστὴς νὰ «κρῶσει», ὥστε νὰ μὴ κάνει σφάλματα λόγω ὑπερθέρμανσης. (2) Ἐνας δορυφόρος τὸ 1962 ἀπέτυχε στὴν ἀποστολή του, διότι τὸ πρόγραμμά του εἶχε ἓνα κόμμα ἀντὶ μιὰ τελεία. (3) Ὅταν παλαιότερα χρησιμοποιούσαμε κάρτες μὲ δεδομένα, μιὰ χαλασμένη κάρτα μᾶς χάλαι-

σε ένα μεγάλο πρόγραμμα. (4) Τέλος, σε μιὰ περίπτωση ἐπισημάναμε μιὰ ἀτέλεια τῆς γλώσσας FORTRAN. Δὲν γνώριζε τί νὰ κάνει, ὅταν ὁ ὑπολογισμὸς ἔδινε μιὰ ποσότητα 0^0, ποὺ εἶναι ἀπροσδιόριστη. Ἄντὶ νὰ δώσει ἔνδειξη σφάλματος, ἔκανε πολὺ περιέργους ὑπολογισμοὺς.

Στὴν ἀκροαία περίπτωσι ποὺ ἔνα τμήμα τοῦ ὑπολογιστοῦ καταστρέφεται, εἶναι δυνατὸν τὸ τμήμα αὐτὸ νὰ ἀντικατασταθεῖ. Στὸ σημεῖο αὐτὸ ὁ ὑπολογιστὴς ὑπερέχει τοῦ ἀνθρώπινου ἐγκεφάλου, ποὺ δὲν μπορεῖ νὰ ἀντικαταστήσει ἕνα μέρος του ποὺ ὑφίσταται βλάβη (περιέργως ὅμως πολλὲς λειτουργίες τοῦ ἐγκεφάλου συνεχίζουν νὰ γίνονται ἀπὸ ἄλλα μέρη του).

Τὸ πρόβλημα εἶναι πῶς θὰ διαπιστωθεῖ τὸ σφάλμα, ἰδίως ἂν τὸ σφάλμα εἶναι μικρὸ. Ὑπάρχουν προγράμματα ποὺ κάνουν ἐλέγχους καλῆς λειτουργίας τοῦ ὑπολογιστῆ (π.χ. στὸ hardware, δηλαδὴ στὰ ἠλεκτρονικά του καὶ λοιπὰ μέρη). Ἐπίσης, κάθε καλὸ πρόγραμμα (software) περιέχει ἐλέγχους, ὥστε νὰ βεβαιώνεται κανεὶς ὅτι τὰ ἀποτελέσματα εἶναι σωστά.

Ἀλλὰ δὲν ὑπάρχει ἕνα πλῆρες πρόγραμμα ἀντιμετωπίσεως τῶν λαθῶν. Γι' αὐτό, ὅταν τὰ ἀποτελέσματα ἑνὸς προγράμματος εἶναι ἀπροσδόκητα, τὸ ἐρώτημα εἶναι ἂν ἔγινε μιὰ σημαντικὴ ἀνακάλυψη ἢ ἂν ὅλα εἶναι λάθη.

Ἐνα παράδειγμα εἶναι τὰ προβλήματα  $N$  σωμάτων ποὺ ἔλκονται μεταξύ τους με βαρυτικὲς δυνάμεις, ὅταν τὸ  $N$  εἶναι πολὺ μεγάλο (ἑκατομμύρια ἢ δισεκατομμύρια). Ἐπειδὴ δὲν εἶναι εὐκόλο νὰ ὑπολογισθοῦν ὅλες οἱ δυνάμεις μεταξύ ὄλων τῶν σωμάτων ποὺ εἶναι τῆς τάξεως τοῦ  $N^2$ , χρησιμοποιοῦνται προσεγγιστικοὶ τύποι, ὅπως ἡ μέθοδος τοῦ «δένδρου» (tree code). Ὁ ἔλεγχος τότε γίνεται με σύγκριση τῶν ὑπολογισμῶν με διαφορετικὲς μεθόδους ἢ ἔστω με διαφορετικὰ βήματα ὁλοκληρώσεως.

Ἐνα τέτοιο πρόβλημα ἀντιμετωπίσαμε στὴν ἀρχὴ τῶν ὑπολογισμῶν  $N$  σω-

μάτων (γύρω στὸ 1966). Ζητήσαμε ἀπὸ ὄλους τοὺς ἐρευνητὲς νὰ ὑπολογίσουν τὶς τροχιὲς γιὰ τὶς ἴδιες ἀρχικὲς συνθήκες γιὰ  $N=25$ . Συγκρίναμε τὰ διάφορα ἀποτελέσματα στὸ συνέδριο τῆς Besançon. Τὰ περισσότερα μεγέθη (κατανομὴ τῶν σωμάτων σὲ ἀπόσταση, κατανομὴ τῶν ταχυτήτων τους κλπ.) ἦταν παρόμοια. Ἐκεῖ ὅπου ὑπῆρχε σημαντικὴ διαφορὰ ἦταν στὸν ἀριθμὸ τῶν σωμάτων ποὺ ἔφρευαν ἀπὸ τὸ σημεῖο στὸ ἄπειρο. Ἄλλοι εἶχαν βρεῖ μιὰ διαφυγὴ, ἄλλοι 3 καὶ ἄλλοι 5. Ἔτσι τελικὰ ἀποφασίσαμε ὅτι οἱ διαφυγὲς εἶναι  $3 \pm 2!$  Ἀλλὰ φυσικὰ αὐτὸ δὲν ἦταν ἕνα ἱκανοποιητικὸ ἀποτέλεσμα. Πολὺ ἀργότερα, βεβαίως, ἡ βελτίωση τῶν ὑπολογιστῶν ἔδωσε πολὺ καλύτερα ἀποτελέσματα.

### 3. Ὅρια τῶν κλασικῶν ὑπολογιστῶν

Ἀπὸ τὴν ἀρχὴ τῶν ὑπολογιστῶν κατασκευάζονται ὄλο καὶ μεγαλύτεροι καὶ ταχύτεροι ὑπολογιστὲς. Ἐνας γρήγορος προσωπικὸς ὑπολογιστὴς ἐκτελεῖ περίπου 70 δισεκατομμύρια ὑπολογισμοὺς κινήτῆς ὑποδιαστολῆς τὸ δευτερόλεπτο (Flops), ἐνῶ ἡ μνήμη του φθάνει καὶ τὰ 64 GB<sup>1</sup>. Δὲν εἶναι δυνατὸν νὰ γίνουν πολὺ ταχύτεροι ὑπολογιστὲς, ἀφοῦ ἔχουμε πλησιάσει στὰ ὅρια μετάδοσης σημάτων ἐντὸς τῶν ὑπολογιστῶν με τὴν ταχύτητα τοῦ φωτός. Ἐξάλλου, ἡ αὐξησι τοῦ μεγέθους τῶν ὑπολογιστῶν δὲν μπορεῖ νὰ συνεχισθεῖ ἐπ' ἄπειρον. Γιὰ νὰ εἶναι ἀποτελεσματικὸς ἕνας ὑπολογιστὴς, πρέπει τὰ διάφορα μέρη του νὰ ἐπικοινωνοῦν μεταξύ τους. Αὐτὸ σημαίνει ὅτι δὲν ἀρκεῖ νὰ αὐξηθεῖ ὁ ἀριθμὸς τῶν transistors τους. Πρέπει νὰ ὑπάρχει καὶ ἡ συνεργασία μεταξύ τῶν διαφορῶν τμημάτων, ἢ δυνατότης ἀντικα-

1. 1 byte = 8 bits καὶ 1 GB = 1.000.000.000 bytes.

ταστάσεως των φθαρμένων στοιχείων και ό έλεγχος τής όρθης λειτουργίας.

Υπάρχουν όμως προβλήματα που υπερβαίνουν κατά πολύ τις δυνατότητες των σημερινών και των μελλοντικών υπολογιστών. Ένα παράδειγμα είναι ή δυνατότης υπολογισμού έξ ύπαρχής τής λειτουργίας ενός μορίου DNA που περιέχει 1000 άτομα. Αν γνωρίζουμε τις δυνάμεις μεταξύ των διαφόρων ατόμων, αλλά δεν γνωρίζουμε προσεγγιστικά ή δομή του μορίου, χρειαζόμαστε προσεγγιστικά  $1000^{1000}$  δοκιμαστικούς υπολογισμούς, για να βρεθούν οί συνδυασμοί των ατόμων που είναι δυνατόν να λειτουργήσουν άπολεσματικά με ευστάθεια. Αλλά ό αριθμός  $1000^{1000}$  είναι ασύγκριτα μεγαλύτερος από τον αριθμό των ατόμων όλου του Σύμπαντος, που είναι τής τάξεως του  $10^{80}$ . Δηλαδή, αν όλο το Σύμπαν ήταν ένας υπολογιστής, πάλι δεν θα μπορούσε να μάς δώσει έξ ύπαρχής τις δομές του DNA.

Αν σήμερα μπορούμε να κατασκευάζουμε πειραματικά πολύπλοκα μακρομόρια (όπως έγινε με την τεχνητή παραγωγή ανθρώπινης ίνσουλίνης από τον καθηγητή Α. Τρακατέλλη και τους συνεργάτες του), αυτό γίνεται, διότι έχουμε πειραματικά δεδομένα που μάς δείχνουν με άρκετη άκρίβεια ή δομή των μορίων αυτών. Οί υπολογισμοί είναι πολύπλοκοι, αλλά δεν υπερβαίνουν τις δυνατότητες των σύγχρονων υπολογιστών.

#### 4. Κβαντικοί υπολογιστές

Μια μεγάλη ανακάλυψη με τεράστιες προοπτικές άποτελούν οί κβαντικοί υπολογιστές. Ως κβαντικό υπολογιστή όρίζουμε μια μηχανή που χρησιμοποιεί τις άρχές τής Κβαντικής Μηχανικής, ώστε να επιτελέσει λειτουργίες που είναι έξ όρισμού άδύνατες σε κλασικό επίπεδο.

Η Κβαντική Μηχανική χαρακτηρίζεται,

ώς γνωστόν, από μια σειρά έξωτικων χαρακτηριστικών που δεν άπαντώνται σε κλασικό επίπεδο, τα όποια συνοπτικά είναι:

1. Η κβαντική υπέρθεση: Ένα σύστημα που μπορεί να βρεθεί στις καταστάσεις A ή B (π.χ. σπιν  $1/2$  ή A και  $-1/2$  ή B) μπορεί να βρεθεί και σε μια υπέρθεση αυτών, μια ιδιότυπη μίξη αυτών. Πριν λοιπόν έκτελεσθεί μέτρηση, το σύστημα βρίσκεται σε μια μετέωρη κατάσταση, ή όποια περιέχει τις πιθανότητες για την κατάληψη των A και B καταστάσεων μετά ή μέτρηση. Η μέτρηση δηλαδή είναι αυτή που όδηγει το σύστημα στις καταστάσεις A, B.

2. Η κατάρρευση τής κατάστασης: Από ή στιγμή που μια κβαντική υπέρθεση έχει μετρηθεί και βρεθεί το άποτέλεσμα A ή B, τότε όποιαδήποτε περαιτέρω μέτρηση θα ξαναδώσει το ίδιο άκριβως άποτέλεσμα. Έχει πραγματοποιηθεί δηλαδή ή λεγόμενη κατάρρευση τής κβαντικής υπέρθεσης σε μια από τις καταστάσεις που έμπεριείχε.

3. Η κλασική φύση των μετρητών: Είναι βασική παραδοχή τής Κβαντικής Μηχανικής ότι οί μετρητές πρέπει να είναι κλασικά συστήματα, ειδάλλως θα έχουμε φαινόμενα υπέρθεσης στις τιμές που μάς δίνουν τα όργανα σε ένα όποιοδήποτε εργαστήριο Φυσικής, κάτι που προφανώς δεν συμβαίνει! Η καθιερωμένη Κβαντική Μηχανική μάς λέει τί γίνεται πριν και μετά ή μέτρηση ενός συστήματος. Τη στιγμή όμως που ένας μετρητής προκαλεί την κατάρρευση τής κατάστασης, κανείς δεν ξέρει τί γίνεται.

4. Σύμπλεξη: οί κβαντικές υπερθέσεις χαρακτηρίζονται έν γενεί από το φαινόμενο τής κβαντικής σύμπλεξης (quantum entanglement). Οί καταστάσεις A και B που έμπεριέχονται στις υπερθέσεις βρίσκονται σε πληροφοριακή σύμπλεξη, κάτι που σημαίνει ότι ή περιγραφή μιας υπέρθεσης δεν γίνεται να άναχθεί στις έπιμέρους περιγραφές των καταστάσεων που την άπαρτίζουν (δεν ίσχυει ή λεγόμενη

πληροφοριακή προσθετικότητα). Η κβαντική σύμπλεξη βρίσκεται στην καρδιά της Κβαντικής Πληροφορικής, διότι πάνω σ' αυτήν στηρίζονται όλες οι δυνατότητες των κβαντικών υπολογιστών για ταχύτατη επεξεργασία και μετάδοση της πληροφορίας.

5. Άβεβαιότητας: Σε αντίθεση με την Κλασική Φυσική, στην Κβαντομηχανική δεν μπορούμε να γνωρίζουμε ταυτόχρονα τη θέση  $x$  και την όρμη  $p=mv$  ενός σωματιδίου, κάτι που εκφράζεται με την περίφημη σχέση άβεβαιότητας του Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$ . Η άβεβαιότητα αυτή είναι έγγενες χαρακτηριστικό της Φύσης σε μικροσκοπικό επίπεδο, και όχι μια τεχνολογική αδυναμία του ανθρώπου. Η Κβαντομηχανική είναι μια στατιστική θεωρία που μάς μιλάει όχι για ακριβείς επιμέρους τιμές, αλλά για μέσες τιμές των διαφόρων ποσοτήτων που μάς ενδιαφέρουν.

Το κβαντικό ανάλογο του θεμελιώδους λίθου της πληροφορίας, του γνωστού μας bit, είναι το λεγόμενο qubit (quantum bit). Ός qubit όριζεται οιοδήποτε φυσικό σύστημα μπορεί να λάβει δύο σαφώς καθορισμένες διακριτές καταστάσεις, που συμβατικά καλούμε 0 και 1. Αυτές μπορεί να είναι τα επίπεδα πόλωσης ενός φωτονίου, ή διεύθυνση του σπίν ενός ηλεκτρονίου ως προς τον δεδομένο άξονα κ.ο.κ. Η είδοποιός διαφορά μεταξύ κλασικών και κβαντικών bits είναι και η ικανότητα των qubits να βρίσκονται σε υπέρθεση των καταστάσεων 0 και 1. Λόγω αυτής της υπέρθεσης, ένα σύστημα που αποτελείται από  $n$  qubits περιγράφεται από  $2^n$  αριθμούς, δηλαδή πολύ περισσότερα δεδομένα πληροφορίας από  $n$  κλασικά bits. Κατά συνέπεια, ένας κβαντικός υπολογιστής είναι πολύ ταχύτερος από έναν κλασικό.

Η εύρεση του κατάλληλου συστήματος που θα παίζει τον ρόλο του qubit είναι μια απαιτητική διαδικασία. Έχουν προταθεί qubits φωτονικής φύσεως, qubits που βασίζονται στα σπίνς φερμιονίων, υπερα-

γώγμια qubits, qubits κβαντικών κουκίδων (τεχνητών ατόμων) κλπ.

Παρά ταύτα, η κατασκευή των κβαντικών υπολογιστών ή εν πάση περιπτώσει των κβαντικών οργάνων που θα εκτελούν στοιχειώδεις πράξεις υπολογισμών είναι εξαιρετικά δύσκολη, διότι η κβαντική σύμπλεξη καταστρέφεται πολύ γρήγορα λόγω της άλληλεπίδρασης των qubits με το περιβάλλον τους, με αποτέλεσμα τα qubits να συμπεριφέρονται κλασικά. Η διαδικασία κατά την οποία ένα κβαντικό σύστημα χάνει την κβαντική του πληροφορία λόγω της άλληλεπίδρασής του με το περιβάλλον του λέγεται κβαντική αποσυνοχή ή αποσυμφωνία (quantum decoherence), είναι εξαιρετικά γρήγορη (δισεκατομμυριοστά του δευτερολέπτου) και αποτελεί το βασικό εμπόδιο φυσικής και όχι τεχνολογικής προελεύσεως για την κατασκευή αξιόπιστων κβαντικών υπολογιστικών μονάδων.

Χωρίς να θέλουμε να υπεισέλθουμε σε τεχνικές λεπτομέρειες, η σημερινή κοινότητα της Κβαντικής Πληροφορικής έχει χωριστεί χονδρικά σε 3 κατευθύνσεις:

1. Στη μελέτη της κατασκευής των ιδεατών συνθηκών για τη συντήρηση της κβαντικής σύμπλεξης για όσο το δυνατόν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, κάτι που ισοδυναμεί με το μέγιστο δυνατό αποκλεισμό των qubits από περιβάλλοντα που μπορούν να επιφέρουν γρήγορα την αποσυνοχή. Η μελέτη αυτή συνοδεύεται από την ανάπτυξη των τεχνικών που διορθώνουν σε κάποιο βαθμό κάποια σφάλματα στους υπολογισμούς λόγω του περιβάλλοντος των qubits.

2. Στην εις βάθος μελέτη του βαθμού άλληλεπίδρασης των κβαντικών συστημάτων με το περιβάλλον τους (όσο μεγαλύτερος είναι αυτός, τόσο πιο «ανοικτό» είναι το σύστημα) και στη δυναμική εξέλιξη του φαινομένου της αποσυνοχής.

3. Στην ανάπτυξη των λεγόμενων ύβρι-



δικών συστημάτων, τὰ ὁποῖα χειρίζονται τὴν πληροφορία ἐν μέρει κλασικὰ καὶ ἐν μέρει κβαντικά. Ἡ διαδικασία αὐτὴ ἔχει ἄμεση σχέση μὲ τὴν Κβαντικὴ Βιολογία, ὅπου ἡ μετάδοση τῆς πληροφορίας σὲ βασικὸ ἐπίπεδο στοὺς ζῶντες ὁργανισμοὺς πραγματοποιεῖται σὲ διάφορα στάδια, στὰ ὁποῖα, ὅταν χρειάζεται ὑψηλὴ ταχύτητα, ἔχουμε ἐκμετάλλευση τῶν κβαντικῶν χαρακτηριστικῶν τῆς ὕλης, ἐνῶ σὲ περιπτώσεις ποὺ ἡ ταχύτητα δὲν παίζει τέτοιο ρόλο λαμβάνουν χώρα κλασικὲς διαδικασίες. Ἡ προσέγγιση αὐτὴ εἶναι προφανῶς ἡ πλέον φιλόδοξη, ἀλλὰ θὰ ἀποδώσει καρποὺς σὲ μεγάλο βᾶθος χρόνου.

Ἡ ἀνάπτυξη τῶν κβαντικῶν ὑπολογιστῶν εἶναι ἀπόρροια τῶν ἰδεῶν καὶ συμπερασμάτων ποὺ προκύπτουν ἀπὸ τὰ θεμέλια τῆς Κβαντικῆς Φυσικῆς τῶν ἀνοικτῶν συστημάτων. Τὸ 1976, ἄλλωστε, ὁ Goran Lindblad δημοσίευσε τὴν ἐξίσωση ἐξέλιξης ἐνὸς ἀνοικτοῦ κβαντικοῦ συστήματος, ἡ ὁποία πλέον λέγεται ἐξίσωση Master τύπου Lindblad καὶ κυριαρχεῖ στὰ βιβλία τῆς Κβαντικῆς Πληροφορικῆς.

Μποροῦν ὅμως οἱ κβαντικοὶ ὑπολογιστὲς νὰ λύσουν ἓνα πρόβλημα ποὺ ἔχει πρακτικὴ ἀξία καὶ ἐνδιαφέρει τοὺς ἀνθρώπους, ἢ ἡ ταχύτητά τους φαίνεται σὲ εἰδικὲς μόνον περιπτώσεις; Τὸ 1994 ὁ Peter Shor ἔδειξε ὅτι οἱ κβαντικοὶ ὑπολογιστὲς μποροῦν νὰ παραγοντοποιήσουν μεγάλους ἀκέραιους ἀριθμοὺς μὲ ὑψηλὴ ἀξιοπιστία. Δεδομένου ἐνὸς ἀριθμοῦ  $N=pxq$ , ὁ ἀλγόριθμος τοῦ Shor δίνει τὰ  $p$  καὶ  $q$ . Δὲν ὑπάρχει ἀξιόπιστος κλασικὸς ἀλγόριθμος γιὰ τὸ ἐν λόγω πρόβλημα. Τὸ χαρακτηριστικὸ τοῦ ἀλγόριθμου τοῦ Shor εἶναι ὅτι «σπάει» τὴν κρυπτασφάλεια τοῦ διαδικτύου, ἢ ὁποῖα ἐθεωρεῖτο ἐξασφαλισμένη μὲ τοὺς κλασικοὺς ὑπολογιστὲς. Μιὰ ἐπόμενη ἐπιτυχία πραγματοποιήθηκε τὸ 1996 μὲ τὸν περίφημο ἀλγόριθμο τοῦ Grover, ὁ ὁποῖος ἀφορᾷ ἓνα ἀπὸ τὰ βασικότερα προβλήματα τῆς ἐπιστήμης τῶν ὑπολογιστῶν: τὴν

*Οἱ κβαντικοὶ ὑπολογιστὲς  
εἶναι ἡ ἐπόμενη γενεὰ  
ὑπολογιστικῶν μηχανημάτων.  
Παρ' ὅλη ὅμως τὴν πρόοδο  
στὸν τομέα αὐτόν, ὑπάρχουν  
βασικὰ προβλήματα γιὰ τὴν  
κατασκευὴ τους, ὅπως  
ἡ δημιουργία μηχανημάτων  
μεγάλης κλίμακος λόγω  
ἀποσυνοχῆς καὶ ἡ εὕρεση  
κβαντικῶν ἀλγορίθμων  
μὲ πρακτικὴ ἀξία.*

εὕρεση ἐνὸς στοιχείου μέσα σὲ μιὰ ἀκανόνιστη βάση δεδομένων. Ἔστω ὅτι ἔχουμε  $n$  κουτιά ποὺ περιέχουν ἓνα 0 ἢ 1 τὸ καθένα. Μποροῦμε νὰ δοῦμε τί περιέχει ἓνα κουτὶ μὲ κόστος μιὰ ἐρώτηση. Θέλουμε τώρα νὰ βροῦμε ἓνα κουτὶ ποὺ περιέχει ἓνα 1. Σὲ ἓναν κλασικὸ ὑπολογιστὴ θὰ χρειάζομασταν, στὴ χειρότερη περίπτωση,  $n$  ἐρωτήσεις. Μὲ τὸν ἀλγόριθμό του ὁ Lov Grover δίνει λύση στὸ παραπάνω πρόβλημα μὲ  $\sqrt{n}$  ἐρωτήσεις, ὅποτε εἶναι κατὰ πολὺ ταχύτερος. Αὐτὴ ἡ ἐπιτάχυνση ποὺ ἔδωσε ὁ ἐν λόγω ἀλγόριθμος βρῖσκει ἐφαρμογὴ σὲ πολλὲς ἐφαρμογὲς εὕρεσης στοιχείων μέσα σὲ βάσεις δεδομένων καὶ σὲ προβλήματα βελτιστοποίησης.

Τὸ 1996 ὁ Seth Lloyd πρότεινε ἓναν κβαντικὸ ἀλγόριθμο ποὺ μπορεῖ νὰ κάνει ἐξομοίωση τῶν κβαντικῶν συστημάτων. Ἕνας κβαντικὸς ὑπολογιστὴς μὲ μερικὲς δεκάδες qubits θὰ μπορούσε μὲ λίγες δεκάδες βήματα ὑπολογισμῶν νὰ κάνει ἐξομοιώσεις ποὺ θὰ χρειάζονταν πράξεις τῆς τάξεως τοῦ ἀριθμοῦ τοῦ Avogadro ( $6 \times 10^{23}$ ) σὲ κλασικοὺς ὑπολογιστὲς. Μετὰ τὴ δημοσίευση τῶν ἀνωτέρω ἀλγορίθμων, οἱ ἐπιστημονικὲς δημοσιεύσεις ποὺ ἀφοροῦσαν τοὺς κβαντικοὺς ὑπολογιστὲς

έκτοξεύθηκαν σε ύψη (από 250 περίπου το 1998 στις 2500 το 2010).

Η κατασκευή κβαντικών υπολογιστών με πολλά qubits έχει, όπως προείπαμε, βασικό αντίπαλο την κβαντική αποσυνοχή. Παρά ταυτα, οι προσπάθειες να υπερικηθεί το φαινόμενο αυτό είναι άοκνες και έχουν οδηγήσει σε πολλές πρότυπες εργαστηριακές κατασκευές και διατάξεις. Η εταιρεία που ισχυρίστηκε ότι έβγαλε τον πρώτο έμπορικό κβαντικό υπολογιστή είναι η D-Wave Inc., της οποίας ο όμιλνυμος υπολογιστής ξεκίνησε με 128 υπεραγώγμια qubits το 2011, έφθασε τα 512 qubits το 2013 και τα 1000+ το 2015, σε συνεργασία με τη Google και τη NASA. Η κριτική όμως που δέχθηκε κατά καιρούς ήταν άφθονη, αφού το μηχάνημα αυτό δεν είναι στην πραγματικότητα ένας υπολογιστής γενικών καθηκόντων σαν αυτούς που γνωρίζουμε, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνον για ένα συγκεκριμένο αλγόριθμο. Τα qubits που χρησιμοποιούνται είναι θορυβώδη και δεν ικανοποιούν αυστηρά όρια σφάλματος. Επίσης, δεν έχουν επιδείξει ακόμα ικανοποιητική σύμπλεξη εύρειας κλίμακος, δηλαδή δεν μπορούν να διατηρήσουν τη σύμπλεξη σε υψηλά επίπεδα, όταν ο αριθμός των qubits είναι αυξημένος, ενώ πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι μερικοί κλασικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να νικήσουν τον D-Wave II.

Όλες οι σύγχρονες εταιρείες υπερυψηλής τεχνολογίας έχουν πλέον τμήματα έρευνας στο πεδίο της Κβαντικής Πληροφορικής (IBM, Microsoft, Google, ID Quantique – η πρώτη εταιρεία που το 2002 έκανε επίδειξη κβαντικών κρυπτογραφικών κλειδιών). Το 2013 ο ιδρυτής της Blackberry Mike Lazaridis (έλληνηκής καταγωγής) ανακοίνωσε επένδυση 100 εκατομμυρίων δολαρίων για έρευνα στο έν λόγω πεδίο, ενώ το 2014 η κυβέρνηση του Ήνωμένου Βασιλείου διέθεσε 270 εκατομμύρια λίρες για παραγωγή και έμπορευμα-

τοποίηση των κβαντικών τεχνολογιών. Οι εκτιμήσεις για την αγορά των κβαντικών υπολογιστών υπολογίζεται ότι θα είναι 10 περίπου δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι τα τέλη του 2020.

Συνοψίζοντας, οι κβαντικοί υπολογιστές είναι η επόμενη γενεά υπολογιστικών μηχανημάτων. Παρ' όλη όμως την πρόοδο στον τομέα αυτόν, υπάρχουν βασικά προβλήματα για την κατασκευή τους, όπως η δημιουργία μηχανημάτων μεγάλης κλίμακος λόγω αποσυνοχής και η εύρεση κβαντικών αλγορίθμων με πρακτική αξία. Η εύρεση ενός κβαντικού υπολογιστή γενικής χρήσεως στα ράφια των έμπορικών καταστημάτων αναμένεται να καθυστερήσει για 20-30 ακόμα έτη, αλλά οι προσπάθειες, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο, είναι έντατικές.

## 5. Συμπεράσματα

Οι κβαντικοί υπολογιστές έχουν τεράστιες προοπτικές. Θα είναι ασυγκρίτως ταχύτεροι από τους κλασικούς υπολογιστές. Εν τούτοις, η αξιοποίηση του τεράστιου όγκου των υπολογισμών τους απαιτεί την εξέταση του κάθε αποτελέσματος, κάτι που είναι μια βραδεία διαδικασία και περιορίζει δραστικά την αποτελεσματικότητα των κβαντικών υπολογιστών. Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των κβαντικών υπολογιστών έπαφίεται σε συνήθεις υπολογιστές, άρα τελικά η ταχύτης των συστημάτων κλασικών-κβαντικών υπολογιστών εξαρτάται τελικώς από τους συνήθεις υπολογιστές. Το φαινόμενο αυτό είναι ανάλογο με τον υπολογισμό της ταχύτητας μίας νηοπομπής, η οποία ουσιαστικά είναι ίση με την ταχύτητα του βραδύτερου πλοίου.

Ένα γνωστό παράδειγμα είναι η περίπτωση ενός πλήθους πιθήκων που συνεχώς κτυπούν τα πληκτρα γραφομηχανών. Οι περισσότερες γραμμές που

*Οί κβαντικοί υπολογιστές έχουν τεράστιες προοπτικές. Θα είναι ασυγκρίτως ταχύτεροι από τους κλασικούς υπολογιστές. Έν τούτοις, η αξιοποίηση του τεράστιου όγκου των υπολογισμών τους απαιτεί την εξέταση του κάθε αποτελέσματος, κάτι που είναι μια βραδεία διαδικασία και περιορίζει δραστικά την αποτελεσματικότητα των κβαντικών υπολογιστών. Η αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των κβαντικών υπολογιστών επαφίεται σε συνήθεις υπολογιστές, άρα τελικά η ταχύτης των συστημάτων κλασικών-κβαντικών υπολογιστών εξαρτάται τελικώς από τους συνήθεις υπολογιστές. Το φαινόμενο αυτό είναι ανάλογο με τον υπολογισμό της ταχύτητας μιας νηοπομπής, η οποία ουσιαστικά είναι ίση με την ταχύτητα του βραδύτερου πλοίου.*

βγαίνουν από αυτές τις γραφομηχανές δεν έχουν νόημα. Όμως η πιθανότητα να γράψουν ένα σωστό κείμενο δεν είναι μηδενική. Έπομένως, μέσα στο πλήθος των άχρηστων κειμένων θα υπάρχουν και όλα τα κείμενα που έχουν γραφεί κατά καιρούς από όλους τους συγγραφείς της γης. Το παράδειγμα αυτό είχε διατυπωθεί από τον E. Borel (1913), από τον A. Eddington και άλλους, και είναι γνωστό ως το «θεώρημα των απείρων πιθίκων» (υπάρχει ένδεικτικό άρθρο στη Wikipedia).

Ποιά όμως είναι η πιθανότητα να γραφεί ένας συγκεκριμένος στίχος 20 γραμμάτων από τον Άμλετ του Shakespeare; Δεδομένου ότι τα γράμματα του αγγλικού αλφαβήτου είναι 26, η πιθανότητα να γραφεί το πρώτο γράμμα είναι  $1/26$ . Η πιθανότητα να γραφούν τα 20 γράμματα στη σειρά είναι  $1:26^{20}$ , δηλαδή περίπου  $1/2 \times 10^{28}$ . Ολόκληρος ο Άμλετ περιέχει περίπου 130000 γράμματα. Έπομένως, η πιθανότητα να γραφεί ολόκληρο το κείμενο αυτό είναι περίπου  $1:3.4 \times 10^{18400}$  (δεκαοκτώ χιλιάδες μηδενικά μετά το 1). Άν είχαμε τόσους πιθίκους και μηχανές

όσο το σύνολο των πρωτονίων του όρατου Σύμπαντος ( $10^{80}$ ) και όλοι αυτοί δούλευαν με ταχύτατο ρυθμό (2000 χαρακτήρες ανά λεπτό) από την αρχή του Σύμπαντος (το Big Bang) μέχρι σήμερα, θα είχαν γράψει συνολικά κάπου  $10^{100}$  γράμματα. Ο αριθμός αυτός είναι ασίμαντος μπροστά στο πλήθος των περιπτώσεων ( $10^{18400}$ ). Άρα η πιθανότητα να είχαν γράψει τον Άμλετ θα ήταν σχεδόν μηδενική.

Αλλά και αν είχαν πράγματι γράψει τον Άμλετ ή ένα άλλο κλασικό κείμενο, που θα το βρίσκαμε αυτό μέσα στον τεράστιο όγκο των άχρηστων αποτελεσμάτων; (Αν τύπωναν τα αποτελέσματά τους, θα είχαμε χαρτί πολύ περισσότερο από ολόκληρο το Σύμπαν).

Έπομένως, και αν ακόμη οί κβαντικοί υπολογιστές επιταχύνουν καταπληκτικά την παραγωγή πληροφοριών, η αναζήτηση των αποτελεσμάτων, που γίνεται με συνήθεις υπολογιστές, θα απαιτούσε τεράστιους χρόνους, μεγαλύτερους από την ηλικία του Σύμπαντος, για να βρούμε όχι το κείμενο του Άμλετ ή κείμενα άλλων συγγραφέων, αλλά για να λύσουμε ένα «μικρό»

σχετικά πρόβλημα, όπως είναι να βρεθεί έξ ύπαρχῆς ἡ δομὴ τοῦ DNA. Ἡ μόνη μας διέξοδος εἶναι νὰ παρακολουθήσουμε τὴ φύση καὶ νὰ μιμηθοῦμε ὅσο τὸ δυνατόν καλύτερα τὴ δομὴ τοῦ DNA ποὺ ὑπάρχει στὴ Φύση. Τὸ τελικὸ συμπέρασμα εἶναι ὅτι οἱ δυνατότητες τῶν κβαντικῶν ὑπολογιστῶν εἶναι περιορισμένες, ὅπως καὶ οἱ δυνατότητες τῶν κλασικῶν ὑπολογιστῶν.

**ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΟΝΤΟΠΟΥΛΟΣ**  
Ἀκαδημαϊκός

**ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΧΡ. ΤΖΕΜΟΣ**  
Δρ Κβαντικῆς Φυσικῆς

## Βιβλιογραφία (ἐνδεικτική)

1. *Quantum Computation and Quantum Information*, Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang, Cambridge University Press, 2011.
2. *Quantum Computing Devices: Principles, Designs and Analysis*, Goong Chen et al., Chapman and Hall / CRC, 2006.
3. *The Theory of Open Quantum Systems*, Heinz Peter Breuer and Francesco Petruccione, Oxford University Press, 2002.

---

# ΠΟΥ ΘΑ ΣΕ ΒΡΟΥΜΕ, ΙΗΣΟΥ;

«Διέλθετε ἕως Βηθλεὲμ καὶ εὐρήσετε Βρέφος ἐσπαργανωμένον,  
κείμενον ἐν φάτνῃ... ὅς ἐστι Χριστὸς Κύριος».  
(Λουκᾶ, β' 11)

Ἀπόψε τὴ νυχτιά, φέγγει ἐν' ἀστέρι  
ἀνάσβηστο ψηλὰ στὸν οὐρανό,  
ποιὸς ξέρει σὰν τί μίνυμα θὰ φέρει  
καὶ λάμπει τόσο, τόσο φωτεινό.

Καὶ γίνηκε τ' ἀστέρι φωτολύχνι,  
βοσκοὶ καὶ Μάγοι πᾶν στὴ σιγαλιά,  
τὸ δρόμο τὸν τρισπόθητο τοὺς δείχνει,  
τοὺς ὀδηγεῖ στὴν ἄγνωρη σπηλιά.

Ζητᾶμ' ἐδῶ κι ἐκεῖ νὰ λυτρωθοῦμε  
καὶ κράζουμε, σὰν τ' ἄδολα παιδιά.  
– Ποῦ τάχα, Ἰησοῦ, θὲ νὰ Σε βροῦμε,  
ἐτούτη τὴν τρισάγια τὴ βραδιά;

– Ἀπόψε, ἀναμεριάστε κάθε νέφος  
κι ἐλάτε στὴ φτωχὴ τὴ Βηθλεὲμ,  
στὴ φάτνῃ θὰ με βρεῖτε μέσα Βρέφος,  
ἢ φάτνῃ ἀπόψε γίνεται Ἐδέμ.

Εἶτ' εἴσαστε φτωχοί, πρίγκηπες εἶτε,  
ἐλάτε καὶ με Μάγους καὶ βοσκούς,  
ἐκεῖ σπαργανωμένο θὰ με βρεῖτε,  
Ἄγγελοι ἐκεῖ θὰ λέν' σκοποὺς γλυκοῦς.

Ἐμὲ θὰ διαλαλοῦνε τ' Ἀγγελούδια,  
Ἐγὼ εἶμαι τοῦ κόσμου ὁ Λυτρωτής.  
– Ὡ, Λυτρωτή, σ' Ἐσένα τὰ τραγούδια,  
τῆς νύχτας οἱ ψαλμοὶ σ' Ἐσέν' αὐτῆς.

Ἐσένα καρτεροῦσαν οἱ αἰῶνες,  
Ἐσένα καὶ τὰ Ἔθνη, μόνο Ἐσέ,  
μ' Ἐσέν' ἀνθοῦν τῆς θέωσης οἱ ἀνθῶνες,  
μ' Ἐσένα, ὦ, Παράδεισε χρυσέ.

Ἔπεσε... Δὲν μποροῦσε, Δημιουργέ μας,  
τὸ πλάσμα Σου ἀπ' τὸ ρύπτο του νὰ βγεῖ,  
τόσο δὲ σπικωθήκαμε ποτέ μας,  
ἦρθες νὰ μᾶς σπικώσεις ἀπ' τὴ γῆ.

ΓΙΑΝΝΗΣ ΑΝ. ΣΑΝΤΑΡΜΗΣ