

# ΝΑΝΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Δρ. Δ. Λαμπάκης  
(1<sup>ο</sup> σειρά διαφανειών)

# Εισαγωγή

→ Η σύγχρονη τεχνολογία χαρακτηρίζεται από την έμφαση που δίνει στη **ελαχιστοποίηση** των διαστάσεων (σμίκρυνση-  
miniaturization).

→ Χαρακτηριστικό παράδειγμα: τα **ηλεκτρονικά**.

Αξιόλογη τεχνολογική πρόοδος έχει προέλθει από μειώσεις στο μέγεθος των τρανζίστορ, αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των τρανζίστορ ανά τσιπ (chip).

→ Με περισσότερα τρανζίστορ ανά chip, σχεδιαστές είναι σε θέση να δημιουργήσουν πιο εξελιγμένα ολοκληρωμένα κυκλώματα (integrated circuits).

✓ Τα τελευταία 35 χρόνια, οι μηχανικοί αύξησαν την πολυπλοκότητα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κατά >5 τάξεις μεγέθους.

✓ Αυτό το αξιοπρόσεκτο επίτευγμα έχει μεταμορφώσει την κοινωνία.

✓ Ακόμη και στις περισσότερες μηχανικές κατασκευές της σύγχρονης τεχνολογίας, η μισή τους αξία είναι στα ηλεκτρονικά (π.χ. το αυτοκίνητο).

# Εισαγωγή

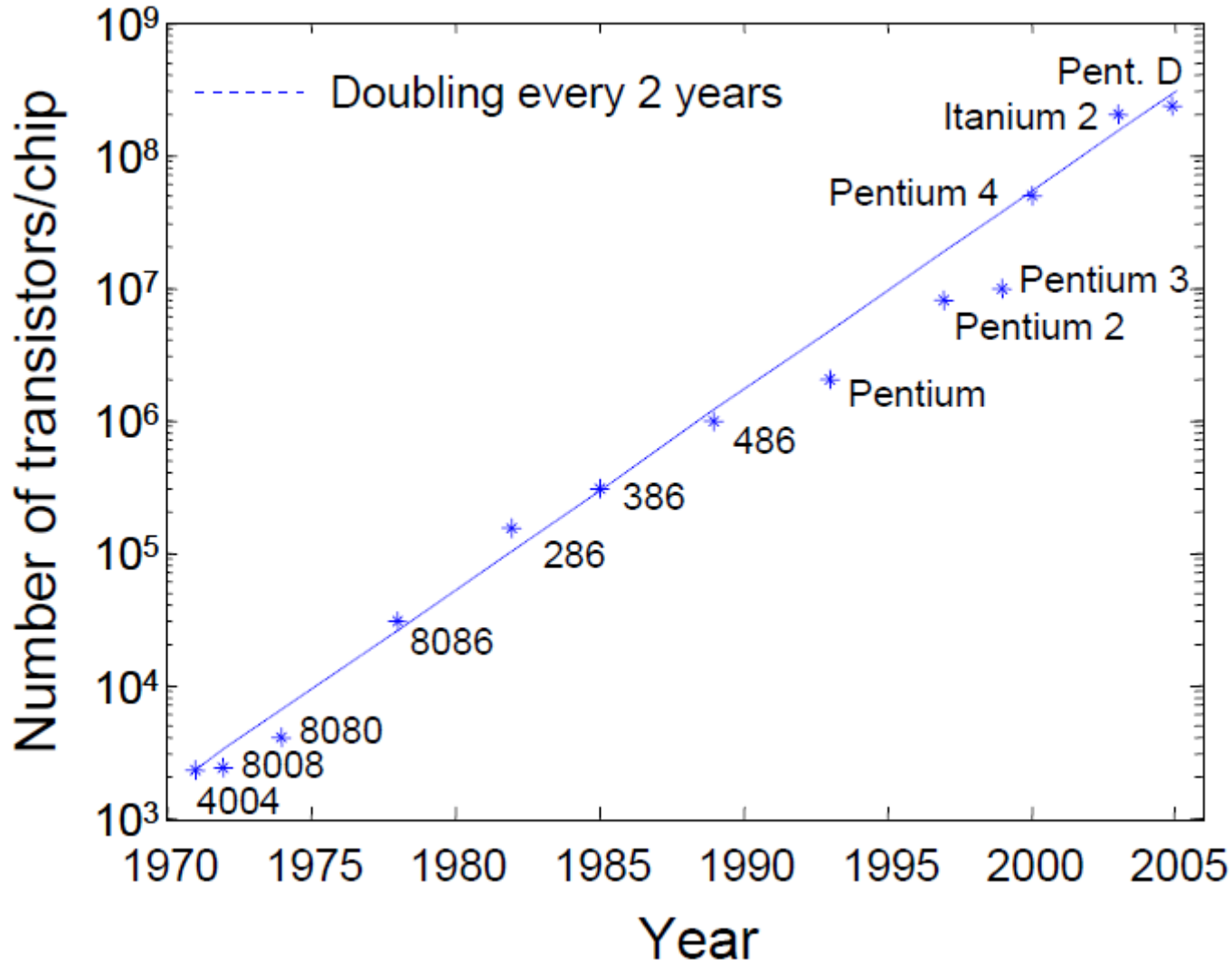
Gordon Moore (συνιδρυτής της Intel): Η ιστορία της βιομηχανίας δείχνει σταθερή αύξηση της πολυπλοκότητας.

**Νόμος Moore:** δηλώνει ότι η πολυπλοκότητα ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, σε σχέση με το ελάχιστο δυνατό κόστος, θα διπλασιάζεται κάθε περίπου 18 μήνες.

Όμως, η τάση δείχνει διπλασιασμό κάθε δύο χρόνια, περίπου, και όχι 18 μήνες όπως είχε αρχικά προβλεφθεί από τον Gordon Moore.

# Εισαγωγή

Ο αριθμός των τρανζίστορ σε επεξεργαστές Intel ως συνάρτηση του χρόνου.



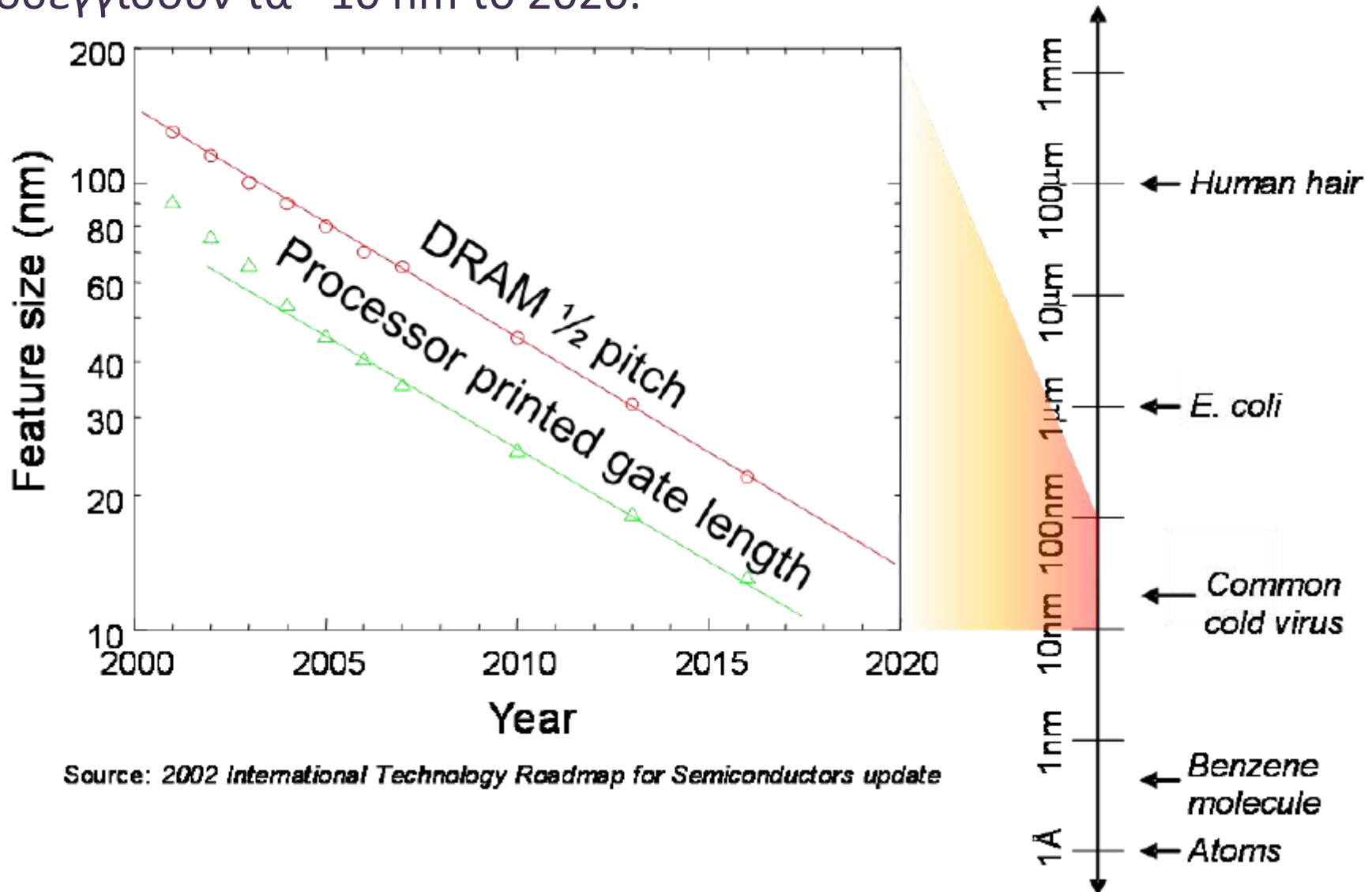
# Εισαγωγή

The International Technology Roadmap for Semiconductors, ή απλώς 'the roadmap' (οδικός χάρτης), προβλέπει τις σημαντικές τάσεις στη βιομηχανία.

Ο «οδικός χάρτης» ενημερώνεται κάθε λίγα χρόνια και συνοψίζονται σε μια ημιλογαριθμική γραφική παράσταση τα κρίσιμα χαρακτηριστικά μεγέθη στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα

# Εισαγωγή

Ο οδικός χάρτης προβλέπει ότι τα χαρακτηριστικά μεγέθη θα προσεγγίσουν τα ~10 nm το 2020.



# Εισαγωγή

Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (Central Processing Unit - CPU) της Intel του Pentium D, έχει μήκος πύλη των 65 nm.

Σύμφωνα με τον οδικό χάρτη, τα χαρακτηριστικά μεγέθη σε επεξεργαστές αναμένεται να προσεγγίσουν τις μοριακές κλίμακες (<10 nm) εντός ~10 ετών.

Αλλά οι εκθετικές τάσεις δεν μπορούν να συνεχιστούν επ'άπειρον...

# Εισαγωγή

Ήδη, στους επεξεργαστές (CPU) έχουν αρχίσει να εμφανίζονται αμυδρές ενδείξεις από τα θεμελιώδη εμπόδια καθώς πλησιάζουμε σε μικρότερες κλίμακες μήκους.

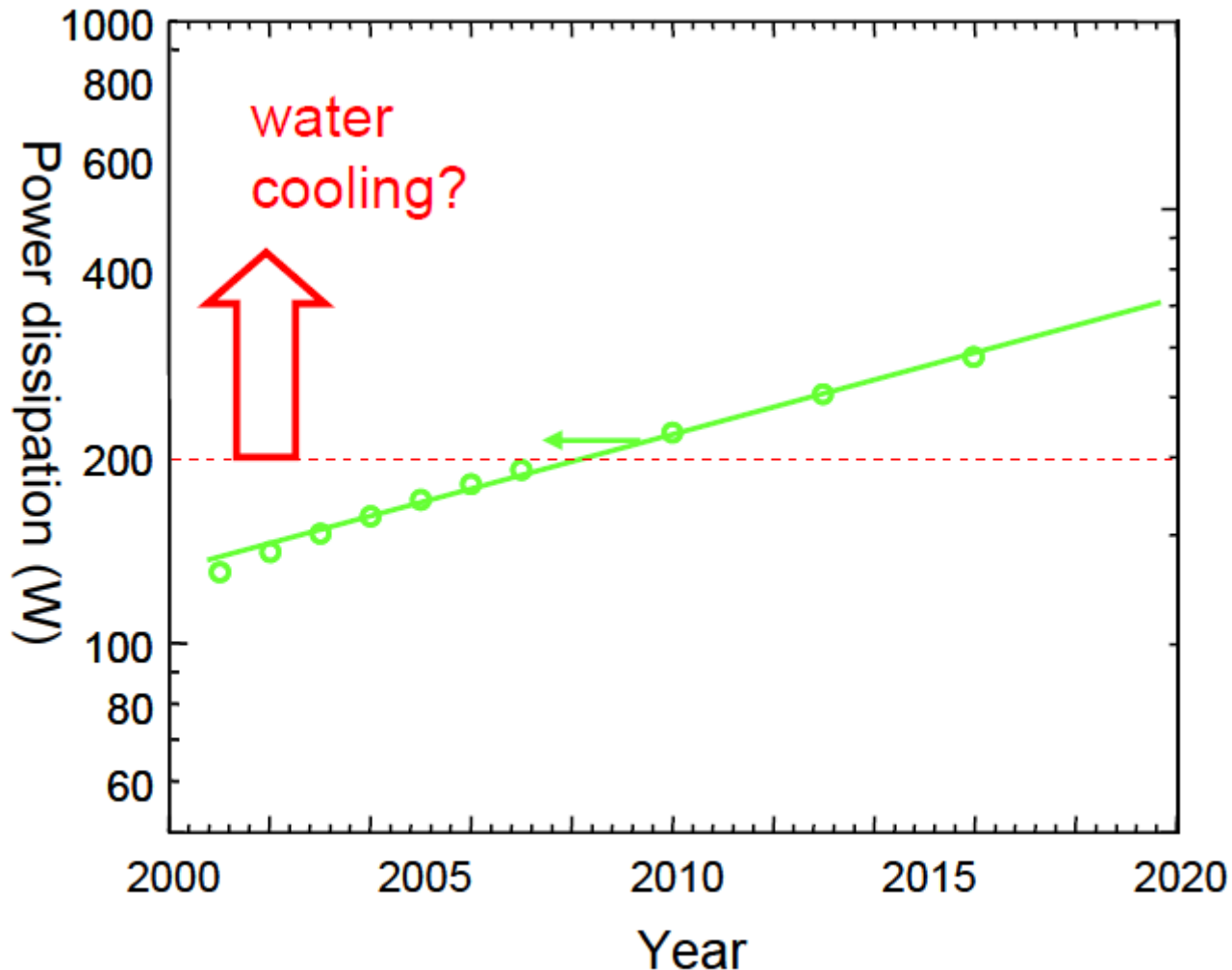
Έχει γίνει όλο και πιο δύσκολο να εμποδίσουμε τη θερμότητα που παράγεται από την λειτουργία του CPU σε **υψηλή ταχύτητα**.

Όσο περισσότερα τρανζίστορ περιέχονται πλέον σε τσιπ, τόσο μεγαλύτερη είναι η πυκνότητα ισχύος (θερμότητα) που πρέπει να εμποδίσουμε.



# Εισαγωγή

Αναμενόμενες τάσεις στην κατανάλωσης ισχύος του CPU, σύμφωνα με τον οδικό χάρτη.



Source: 2002 International Technology Roadmap for Semiconductors update

Στις μέρες μας, η **πυκνότητα ισχύος** των σύγχρονων επεξεργαστών είναι περίπου  $150 \text{ W/cm}^2$

**Σημείωση 1:** η πυκνότητα ισχύος στην επιφάνεια του ήλιου είναι περίπου  $6000 \text{ W/cm}^2$

**Σημείωση 2:** Ο ήλιος ακτινοβολεί αυτή την ισχύ με θέρμανσή του, που φτάνει έως  $6000 \text{ K}$

# Εισαγωγή

Ωστόσο, οι επεξεργαστές (CPUs) πρέπει να διατηρούνται σε θερμοκρασία δωματίου, περίπου.

Το θερμικό φορτίο των CPUs έχει ωθήσει τους συμβατικούς ανεμιστήρες ψύξης (air cooling) στα όρια της πρακτικότητας.

Πέρα από την ψύξη με αέρα είναι η ψύξη με νερό (water cooling), η οποία, με μεγαλύτερη δαπάνη, είναι ικανή να απομακρύνει εκατοντάδες Watts από τσιπ μεγέθους  $1\text{cm}^2$ .

Όμως, πέρα από την ψύξη του νερού, δεν υπάρχει καμία γνωστή και φθηνή λύση.

# Εισαγωγή

Η κατανάλωση ισχύος είναι το πιο ορατό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η βιομηχανία ηλεκτρονικών σήμερα.

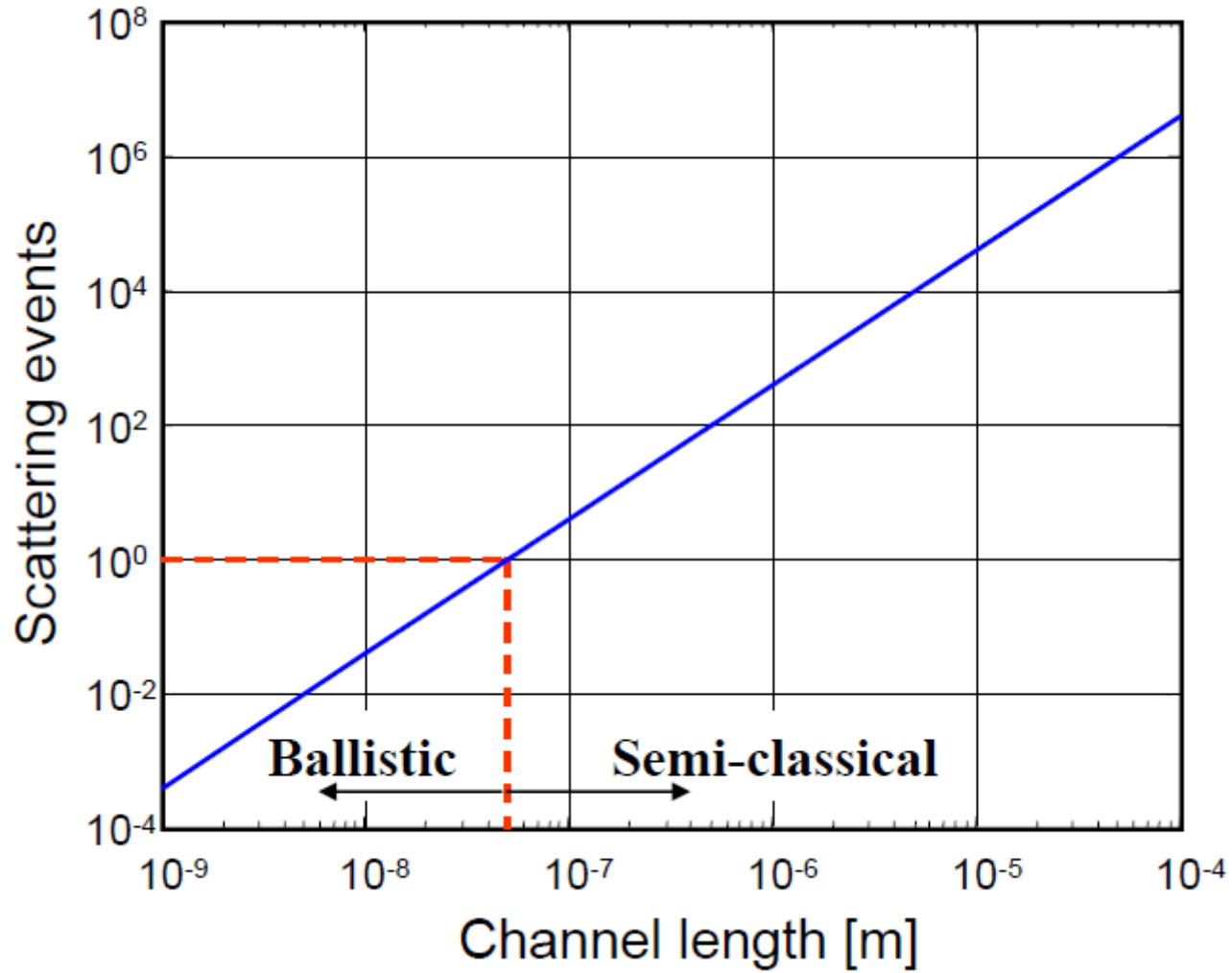
Αλλά, καθώς οι ηλεκτρονικές συσκευές προσεγγίζουν την μοριακή κλίμακα, η παραδοσιακή αντίληψη μας για τις ηλεκτρονικές συσκευές θα πρέπει επίσης να αναθεωρηθεί.

Τα κλασικά πρότυπα για τη συμπεριφορά των συσκευών πρέπει να εγκαταλειφθούν.

# Εισαγωγή

Π.χ. πολλά ηλεκτρόνια στα σύγχρονα τρανζίστορ φαίνεται ότι ταξιδεύουν "βαλλιστικά" – δηλαδή δεν συγκρούονται με κανένα από τα συστατικά του καναλιού πυριτίου.

Το «κατώφλι» βαλλιστικής συμπεριφοράς εμφανίζεται για μήκη καναλιού της τάξης των 50nm, περίπου .



# Εισαγωγή

Αυτές οι βαλλιστικές συσκευές **δεν** μπορούν να αναλυθούν με τη χρήση συμβατικών μοντέλων τρανζίστορ.

Για να προετοιμαστούμε για την επόμενη γενιά των ηλεκτρονικών συσκευών, πρέπει να διδαχτούμε τη θεωρία του ρεύματος, της τάσης και της αντίστασης σε ατομική κλίμακα.

# Εισαγωγή

## Το κβαντικό σωματίο (The Quantum Particle)

Αρχικά, θα πρέπει να γίνει η εισαγωγή των βασικών «εργαλείων» για την περιγραφή των ηλεκτρονίων σε νανοσυσκευές-νανοδιατάξεις.

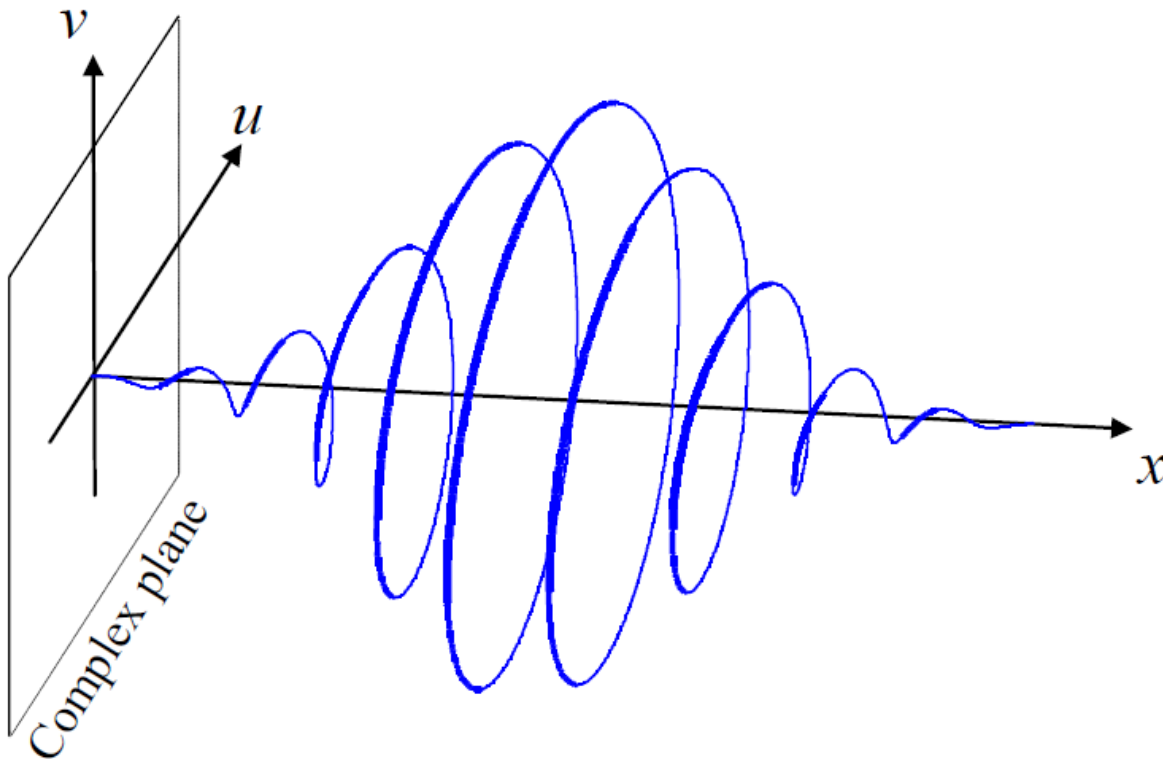
Στα πρώτα τρανζίστορ, τα ηλεκτρόνια μπορούν να αντιμετωπίζονται ως καθαρά σωματία σημείου.

Αλλά στην νανοηλεκτρονική, η θέση, η ενέργεια και η ορμή ενός ηλεκτρονίου πρέπει να περιγράφονται με βάση τις πιθανότητες.

# Εισαγωγή

## Το κβαντικό σωματίο (The Quantum Particle)

Θα πρέπει επίσης να εξεταστούν τις κυματικές ιδιότητες των ηλεκτρονίων, και να συμπεριληφθούν οι πληροφορίες φάσης στις περιγραφές του ηλεκτρονίου



→ Αναπαράσταση ενός ηλεκτρονίου, γνωστή ως κυματοπακέτο (waverpacket).

→ Η θέση του ηλεκτρονίου περιγράφεται στη 1 διάσταση και η πυκνότητα πιθανότητας της θέσης είναι μια Γκαουσιανή (Gaussian).

→ Το μιγαδικό επίπεδο περιέχει την πληροφορία φάσης.

# Εισαγωγή

## Το κβαντικό σωματίο (The Quantum Particle)

Απαραίτητες είναι επίσης οι βασικές αρχές της Κβαντομηχανικής

Θα πρέπει ακόμη να βρεθεί η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου μέσα σε ένα ελκτικό κιβωτιόμορφο (box-shaped) δυναμικό, γνωστό και ως "τετραγωνικό φρέαρ".



# Εισαγωγή

## Το κβαντικό σωματίο σε ένα «κουτί» (The Quantum Particle in a box)

Για την περίπτωση «Το κβαντικό σωματίο σε ένα κουτί», θα εφαρμοστεί τη λύση σε αυτήν την περίπτωση του τετραγωνικού δυναμικού, και θα γίνει η εισαγωγή του απλούστερου μοντέλου του ενός ηλεκτρονίου σε έναν αγωγό, το επονομαζόμενο μοντέλο «σωμάτιο σε κουτί» (“particle in a box model”).

Ο αγωγός διαμορφώνεται ως ένα ομοιογενές «κουτί».

# Εισαγωγή

## Το κβαντικό σωματίο σε ένα «κουτί» (The Quantum Particle in a box)

Ακόμη, εισάγεται η έννοια της πυκνότητας καταστάσεων, ώστε να μπορούμε να μετράμε τα ηλεκτρόνια σε αγωγούς.

Αυτός ο υπολογισμός θα διενεργηθεί για:

→ τις «**κβαντικές τελείες**» (“**quantum dots**”), οι οποίες είναι σημειακά σωματίδια, που είναι, επίσης, γνωστές ως 0-διαστάσεων αγωγοί,

→ τα «**κβαντικά καλώδια (σύρματα)**» (“**quantum wires**”), τα οποία είναι ιδανικοί 1-διαστάσεων αγωγοί,

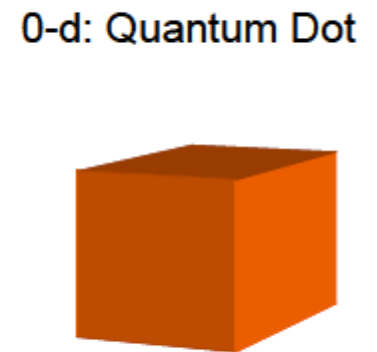
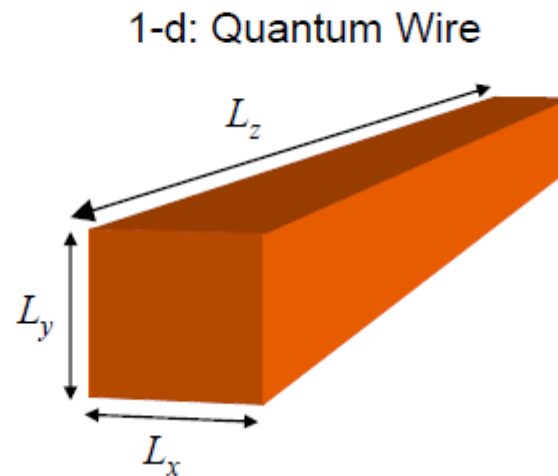
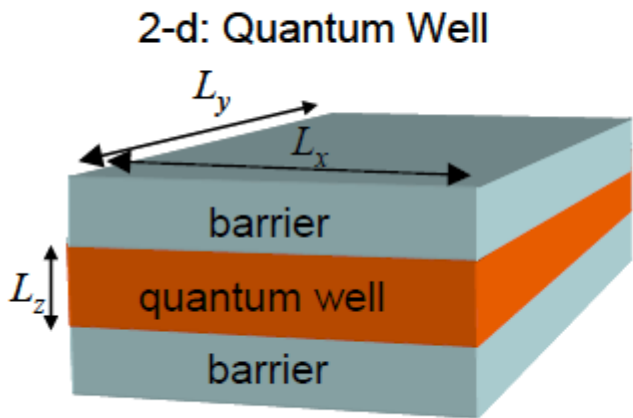
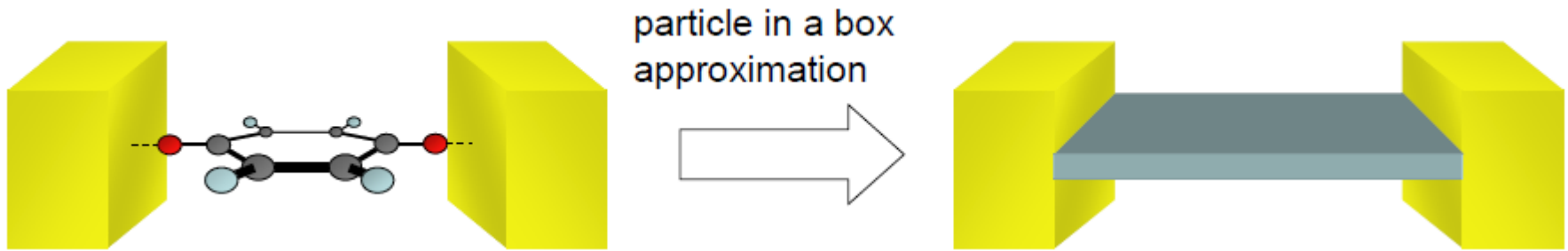
→ τα «**κβαντικά φρέατα**» (“**quantum wells**”) τα οποία είναι 2-διαστάσεων αγωγοί, και

→ τα συμβατικά 3-διαστάσεων υλικά (bulk materials).

# Εισαγωγή

## Το κβαντικό σωματίο σε ένα «κουτί» (The Quantum Particle in a box)

Η προσέγγιση σωματίου σε κουτί και αγωγοί διαφόρων διαστάσεων.



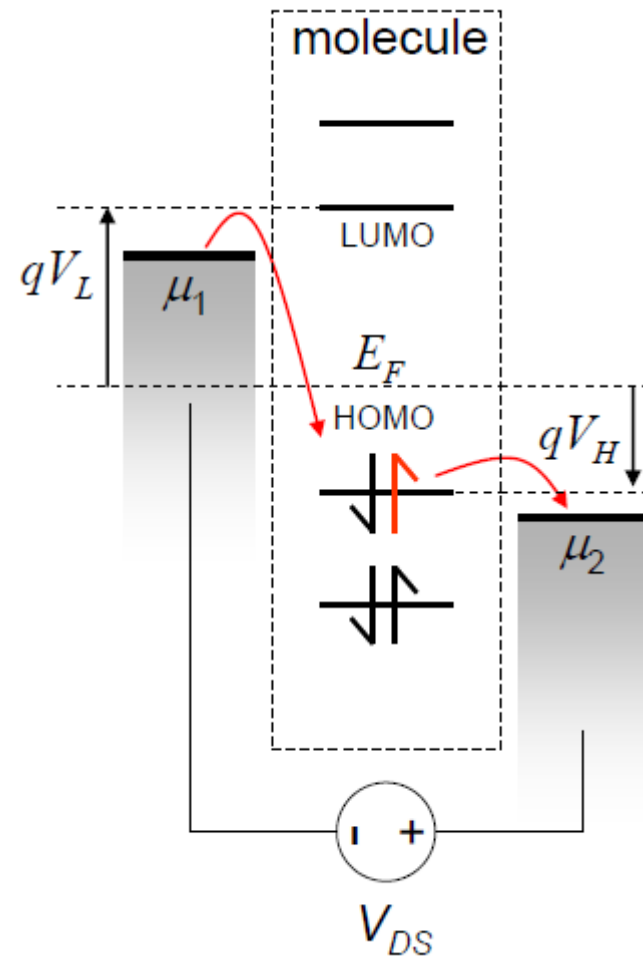
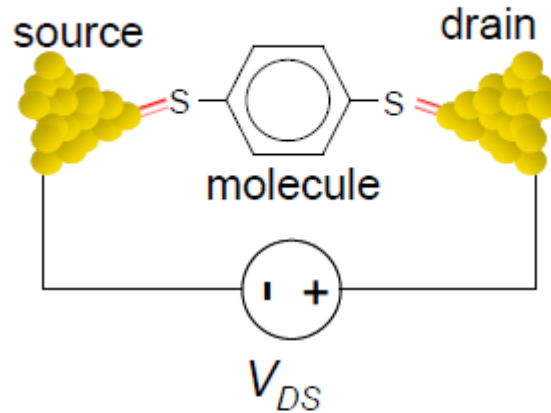
# Εισαγωγή

## Διατάξεις Κβαντικής Τελείας δύο Τερματικών (Two Terminal Quantum Dot Devices)

Εδώ, εξετάζουμε τη ροή του ρεύματος μέσω των αγωγών 0-διαστάσεων.

Στο διπλανό σχήμα βλέπουμε μια διάταξη δύο τερματικών, με έναν μοριακό αγωγό.

Υπό δυναμικό πολώσεως σε αυτό το μόριο, τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από το υψηλότερο κατειλημμένο μοριακό τροχιακό (Highest Occupied Molecular Orbital - HOMO).



# Εισαγωγή

## Διατάξεις Κβαντικού Καλωδίου δύο Τερματικών (Two Terminal Quantum Wire Devices)

Το μοντέλο αυτό εξηγεί την αγωγιμότητα μέσω νανοκαλωδίων (νανοσυρμάτων).

Εδώ, γίνεται η εισαγωγή της "βαλλιστικής" μεταφοράς (μεταγωγής) ("ballistic" transport) - όπου το ηλεκτρόνιο δεν συγκρούεται με κανένα από τα συστατικά του αγωγού.

Θα πρέπει ναδειχτεί ότι για τα νανοκαλώδια η αγωγιμότητα είναι κβαντισμένη.

Στην πραγματικότητα, η αντίσταση ενός νανοκαλωδίου με απειροστά μικρή διατομή ( $\rightarrow 0$ ) δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 12,9 ΚΩ.

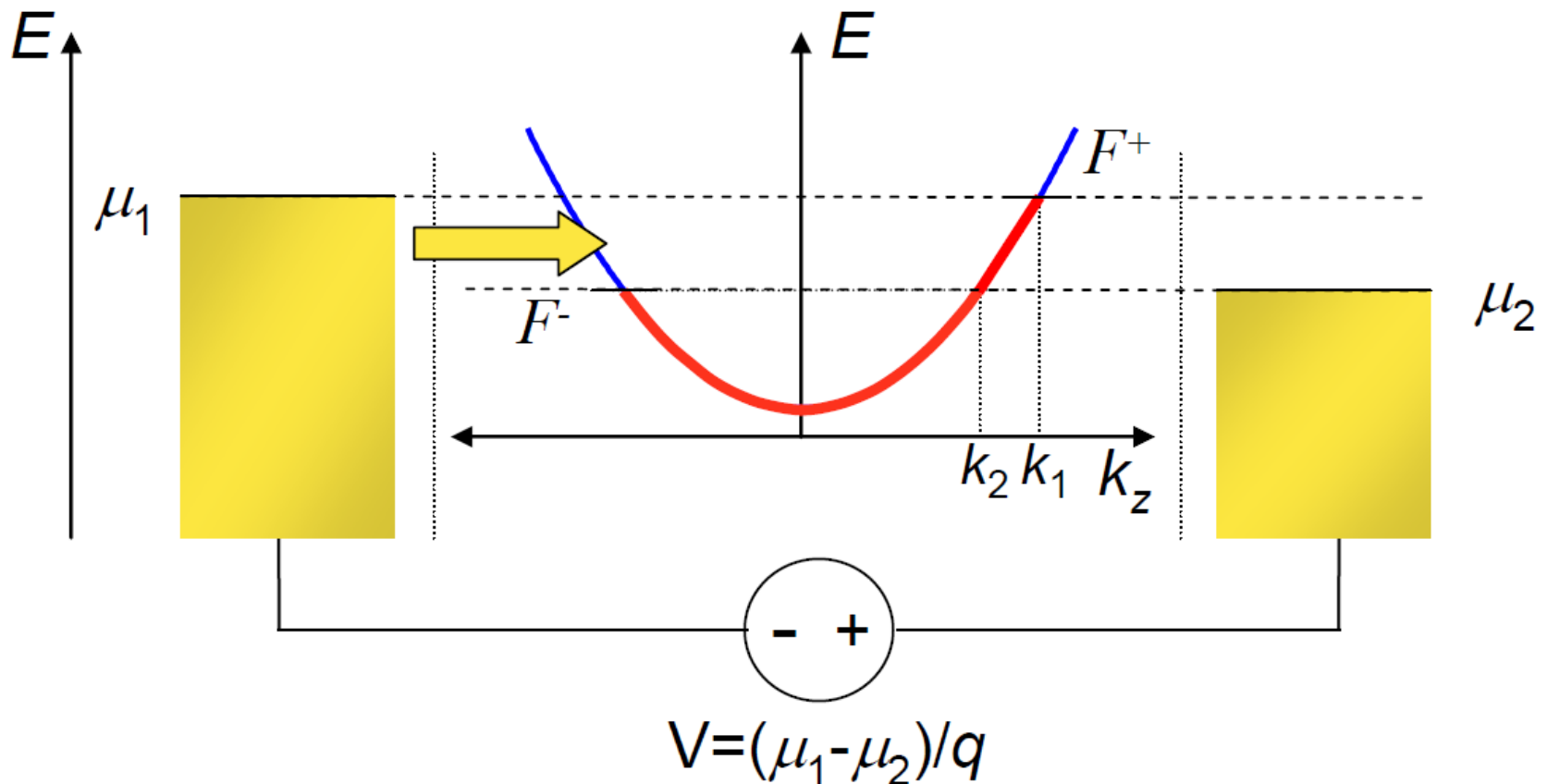
Ακόμη, θα πρέπει να εξηγηθεί γιατί αυτή η αντίσταση είναι ανεξάρτητη από το μήκος του νανοκαλωδίου.

Τέλος, θα πρέπει να εξηγηθεί η προέλευση του νόμου του Ohm και τα «κλασικά» μοντέλα μεταφοράς φορτίου.

# Εισαγωγή

## Διατάξεις Κβαντικού Καλωδίου δύο Τερματικών (Two Terminal Quantum Wire Devices)

Το παρακάτω διάγραμμα που εξηγεί την αγωγιμότητα φορτίου μέσω ενός νανοκαλωδίου. Η αριστερή επαφή δίνει (διαχέει) τα ηλεκτρόνια. Η αντίσταση του σύρματος υπολογίζεται να είναι 12,9 kΩ και ανεξάρτητη από το μήκος του καλωδίου.



# Εισαγωγή

## Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Field Effect Transistors)

Εδώ, θα πρέπει να αναπτυχθεί η θεωρία για αυτήν την σημαντικότερη εφαρμογή.

Θα πρέπει να γίνει διερεύνηση των τρανζίστορ διαφορετικών διαστάσεων και να συγκριθούν οι επιδόσεις των «βαλλιστικών» και των συμβατικών τρανζίστορ επίδρασης πεδίου.

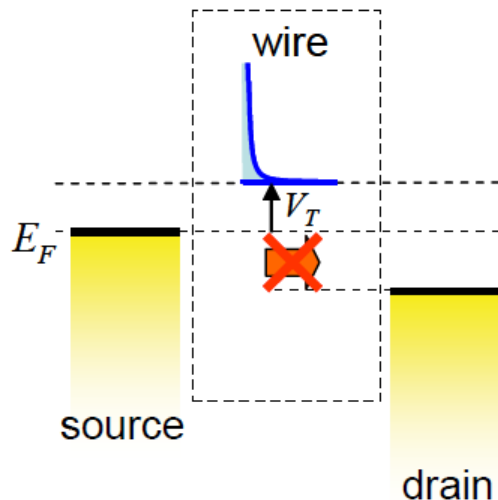
Θα πρέπει ακόμη ναδειχτεί ότι τα συμβατικά μοντέλα των τρανζίστορ αποτυγχάνουν σε νανοκλίμακα.

# Εισαγωγή

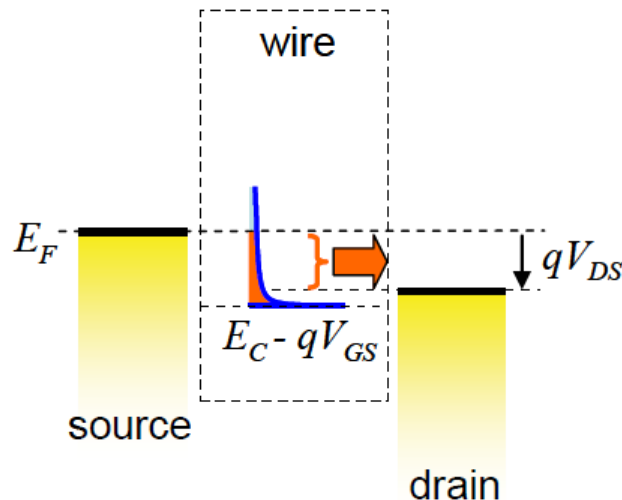
## Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Field Effect Transistors)

- Υπάρχουν τρεις τρόποι λειτουργίας σε ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου νανοκαλωδίου.
- Σε τρόπο λειτουργίας subthreshold («υπό-κατώφλι») μόνο θερμικά διεγερμένα ηλεκτρονία από την πηγή μπορεί να καταλάβουν ενεργειακές καταστάσεις στο κανάλι.
  - Στη γραμμική περιοχή (linear), ο αριθμός των διαθέσιμων ενεργειακών καταστάσεων για αγωγιμότητα στο κανάλι αυξάνει με το δυναμικό πόλωσης πηγής-απαγωγού.
  - Σε κορεσμό (saturation), ο αριθμός των διαθέσιμων ενεργειακών καταστάσεων του καναλιών είναι ανεξάρτητη από το δυναμικό πόλωσης πηγής-απαγωγού, αλλά εξαρτάται από το δυναμικό πόλωσης της πύλης.

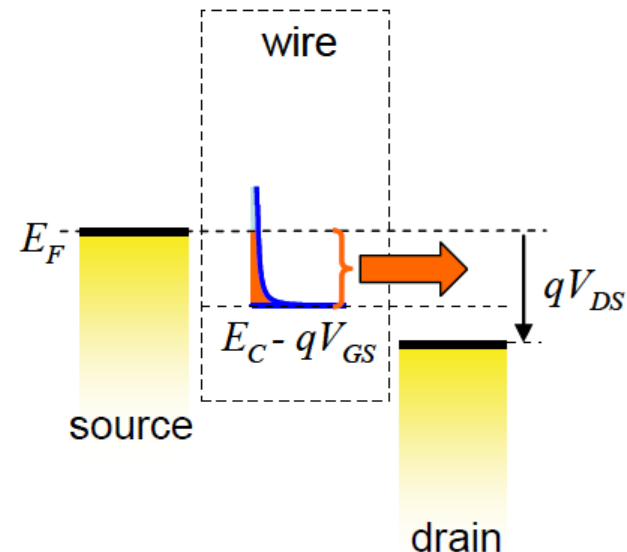
(a) subthreshold



(b) linear



(c) saturation





# Εισαγωγή

## Η ηλεκτρονική δομή των υλικών (Electronic Structure of Materials)

Η ηλεκτρονική δομή των υλικών επιστρέφει στο πρόβλημα του υπολογισμού της πυκνότητας καταστάσεων και επεκτείνεται στο απλό μοντέλο του σωματίου σε ένα κουτί.

Εδώ, θα πρέπει να εξετάσουμε τις ηλεκτρονικές ιδιότητες μεμονωμένων μορίων, καθώς και υλικών που παρουσιάζουν περιοδικότητα.

Θα πρέπει να γίνουν υπολογισμοί για τα αρχετυπικά υλικά 1 και 2 - διαστάσεων, συμπεριλαμβανομένων του πολυακετυλενίου, του γραφενίου και των νανοσωλήνων άνθρακα.

Τέλος, θα πρέπει να εξηγηθεί ο σχηματισμός των ζωνών ενέργειας, καθώς και η προέλευση των μετάλλων, μονωτών και ημιαγωγών.

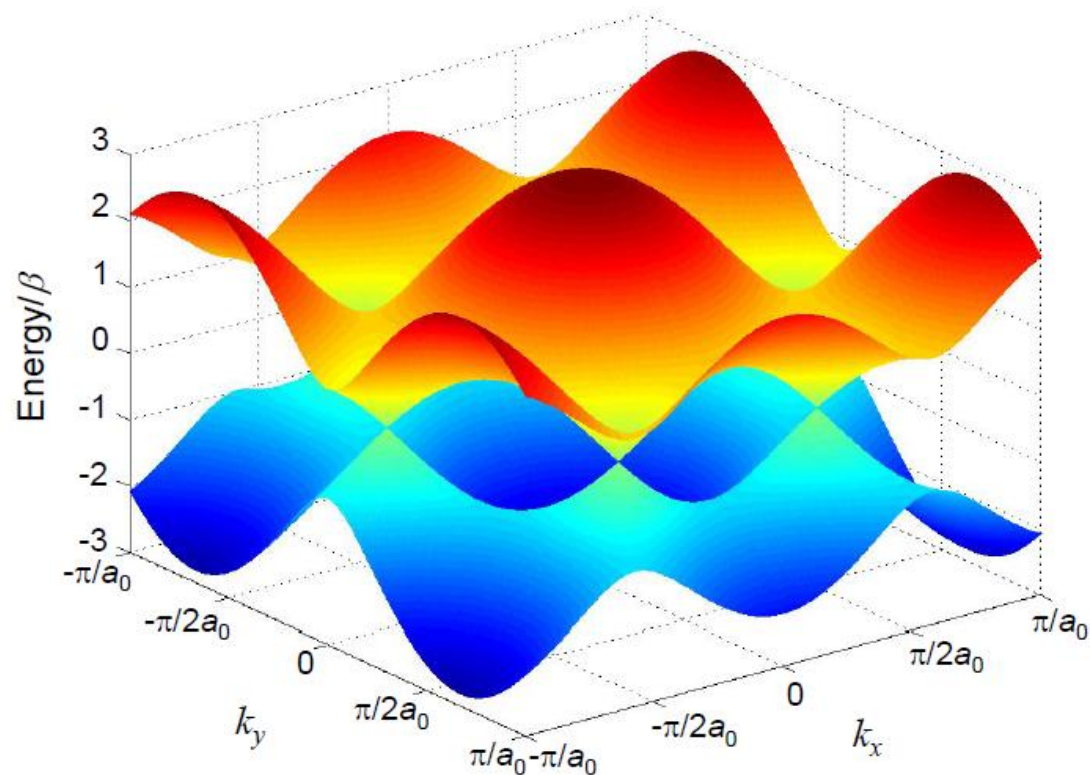
# Εισαγωγή

## Η ηλεκτρονική δομή των υλικών (Electronic Structure of Materials)

Στο σχήμα φαίνεται η δομή ζωνών του γραφενίου. Υπάρχουν δύο επιφάνειες που άπτονται 6 διακριτών σημείων, που αντιστοιχούν σε 3 διαφορετικές κατευθύνσεις μεταφοράς ηλεκτρονίων μέσα σε ένα «φύλλο» γραφενίου (graphene sheet).

→ Κατά μήκος αυτών των κατευθύνσεων το γραφένιο συμπεριφέρεται όπως ένα μέταλλο.

→ Κατά μήκος των άλλων κατευθύνσεων αγωγιμότητας, το γραφένιο συμπεριφέρεται ως μονωτής.



# Εισαγωγή

## Θεμελιώδη Όρια Υπολογισμών (Fundamental Limits in Computation)

Τέλος, πρέπει να γίνει ένα βήμα πίσω και να εξεταστεί η μεγάλη (σε κλίμακα) εικόνα των ηλεκτρονικών.

Θα πρέπει να επανεξεταστεί το πρόβλημα της κατανάλωσης ισχύος, και να συζητηθούν πιθανά θεμελιώδη όρια θερμοδυναμικής στον υπολογισμό.

Θα πρέπει ακόμη να γίνει εισαγωγή και εν συντομία ανάλυση των εννοιών για «αναστρέψιμο» υπολογισμό χωρίς διάχυση (dissipation-less “reversible” computing).

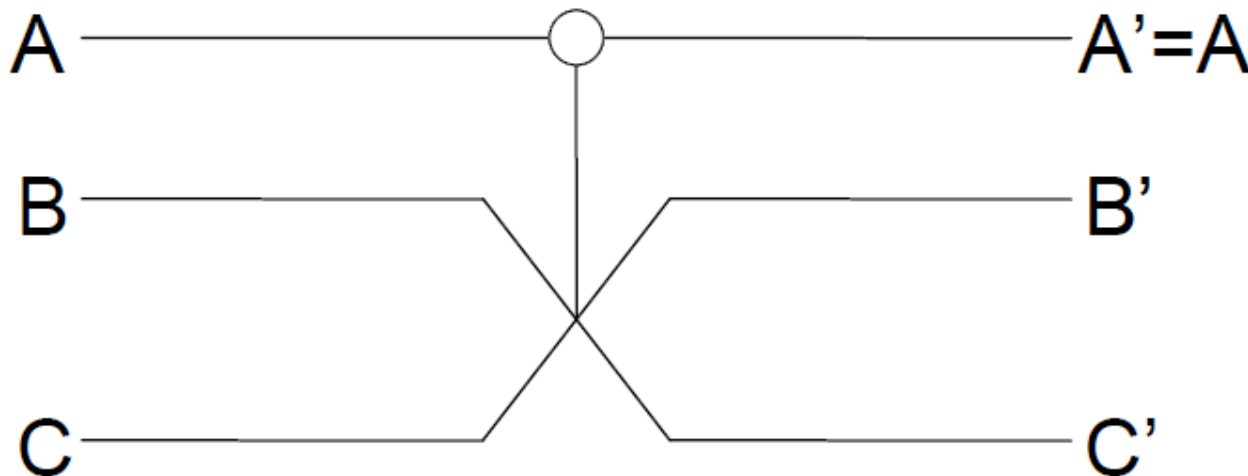
# Εισαγωγή

## Θεμελιώδη Όρια Υπολογισμών (Fundamental Limits in Computation)

Π.χ., η πύλη Fredkin είναι ένα αναστρέψιμο λογικό στοιχείο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως η δομική μονάδα για αυθαίρετα λογικά κυκλώματα.

→ Το σήμα A μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανταλλαγή των σημάτων B και C.

→ Επειδή η είσοδος και η έξοδος της πύλης περιέχουν τον ίδιο αριθμό bits, δε χάνεται καμία πληροφορία, και ως εκ τούτου η πύλη είναι, κατ' αρχήν, χωρίς διάχυση (dissipation-less).



A	B	C	A'	B'	C'
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1
1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1

# Βιβλιογραφία

- **Marc Baldo**, *Introduction to Nanoelectronics*, MIT OpenCourse Ware Publication May 2011.
- International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) JCGM\_200\_2012 ([www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_200\\_2012.pdf](http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf))
- Solenoidal field. A.B. Ivanov (originator), Encyclopedia of Mathematics. URL: [http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Solenoidal\\_field&oldid=19139](http://www.encyclopediaofmath.org/index.php?title=Solenoidal_field&oldid=19139)