



# ΝΑΝΟ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ & ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΝΑΝΟΚΛΙΜΑΚΑΣ

Δρ. Αλέξανδρος Απόστολος Α. Μπουλογεώργος

e-mail: [ampoulog@uth.gr](mailto:ampoulog@uth.gr)

URL: <https://ampoulog.wordpress.com/>

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

- Ιστορικά
- Παράγοντες που επηρέασαν την ανάπτυξη της νανο-τεχνολογίας
- Από τα νανο-υλικά στις νανο-μηχανές
- Νανο-αισθητήρες
- Εφαρμογές νανοτεχνολογίας
- Δίκτυα και επικοινωνίες νανο-αισθητήρων

# Richard Feynman's Lecture (1959)

## **"There's Plenty of Room at the Bottom"**

*An Invitation to Enter a New Field of Physics*

*"Why cannot we write the entire 24 volumes of the Encyclopedia Britannica on the head of a pin?"*

*"The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom."*

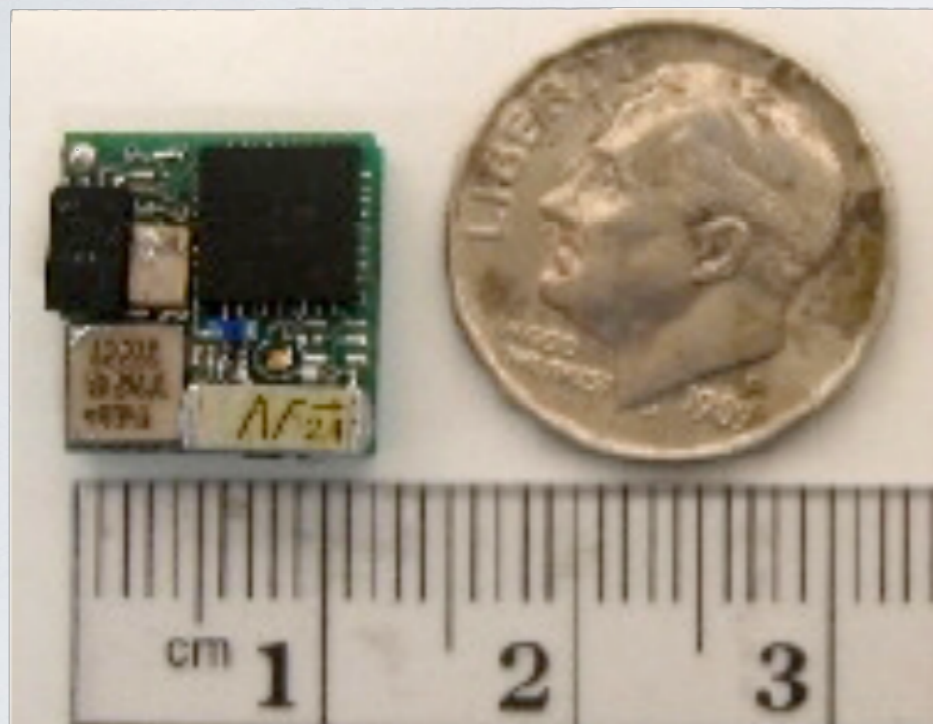
*"I don't know how to do this on a small scale in a practical way, but I do know that computing machines are very large; they fill rooms. Why can't we make them very small, make them of little wires, little elements – and by little, I mean *little*. For instance, the wires should be 10 or 100 atoms in diameter, and the circuits should be a few thousand angstroms across."*



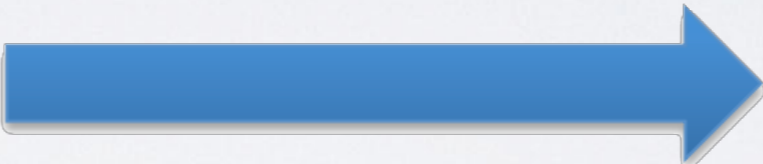
### *Other Concepts:*

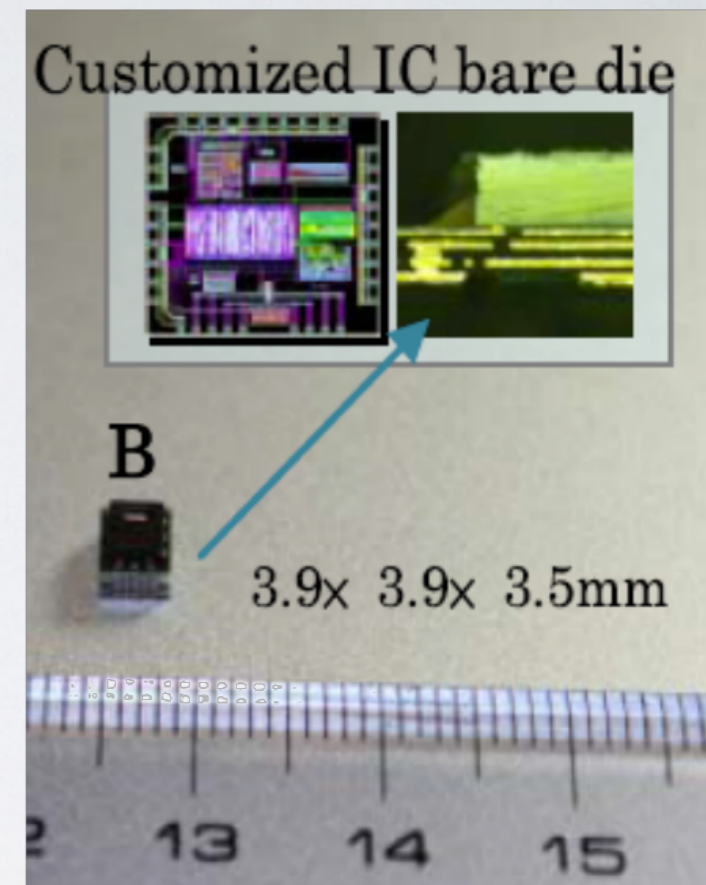
- *Rearranging atoms, Micro-machines, Chemical synthesis, Micro-antenna arrays*

# Η ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΟΛΟ ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΤΕΡΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ



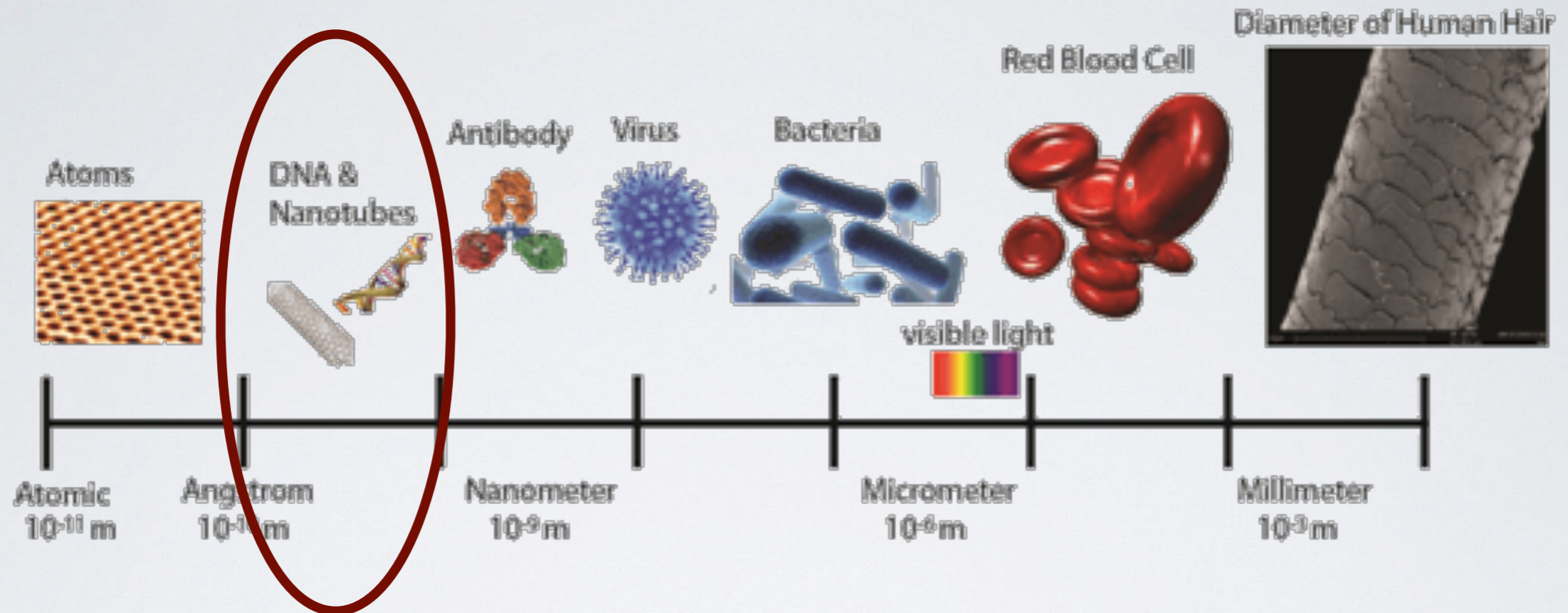
**[Park2005]**

  
**12 mm to 4 mm in 9 years**



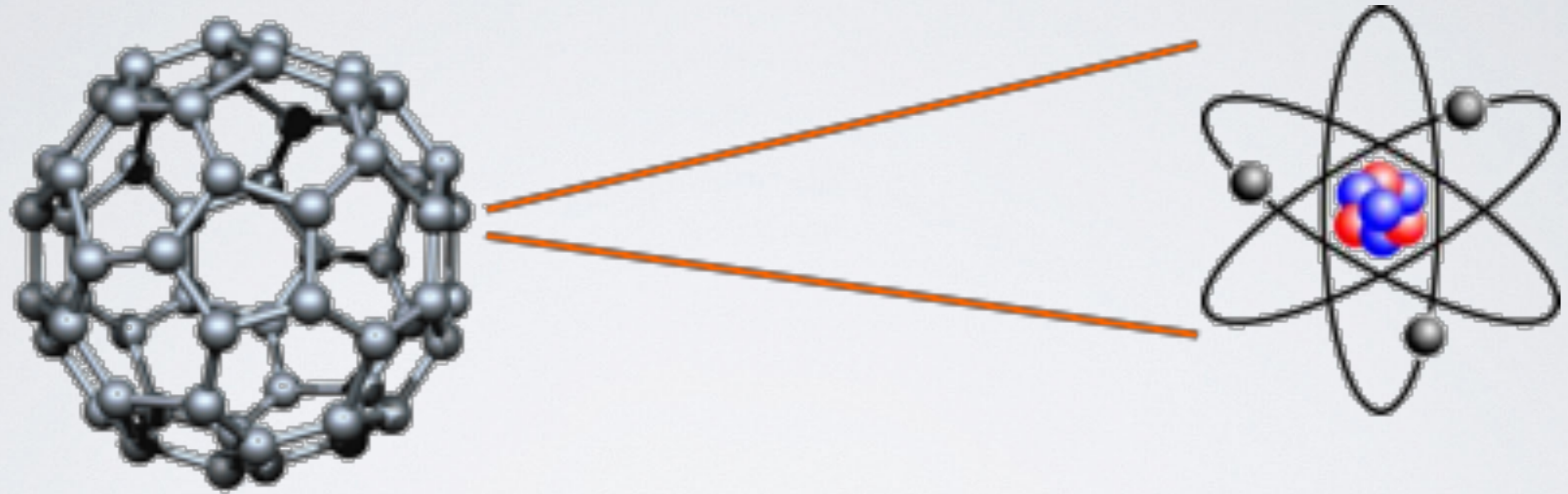
**[Lu2014]**

# ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΑΝ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΝΑΝΟ-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



- Ανάπτυξη στις τεχνολογίες των υλικών και των συσκευών
- Μπορούμε να κατασκευάσουμε υλικά στη νανο-κλίμακα
- Στη νανο-κλίμακα, τα υλικά παρουσιάζουν κάποιες “παράξενες” ιδιότητες, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για να επιτευχθεί ασύρματη επικοινωνία νανο-κλίμακας

# ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

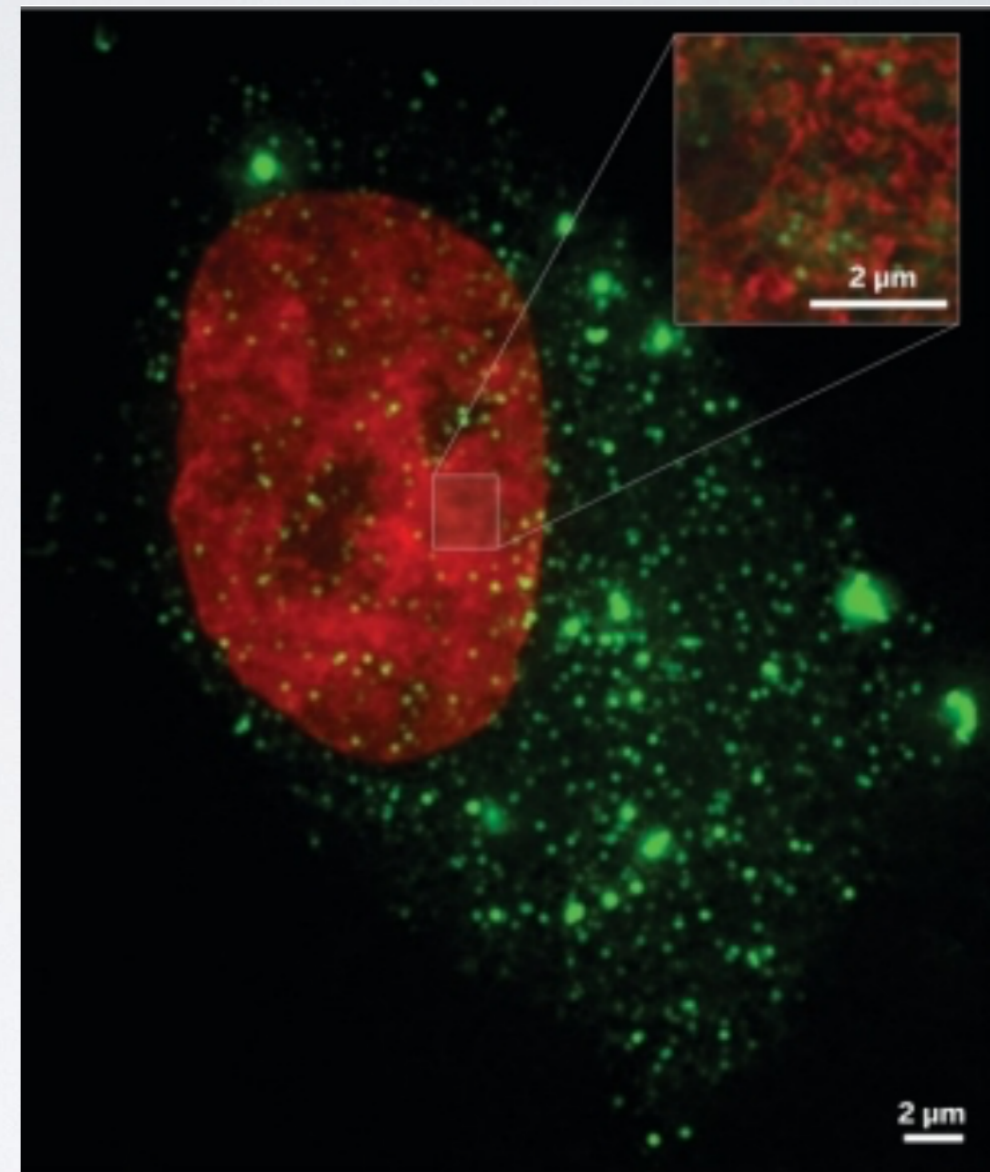


- Επιτρέπει τον χειρισμό της ύλης στην ατομική ή μοριακή κλίμακα (1-100 nm).

# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΝΑΝΟ-ΥΛΙΚΩΝ

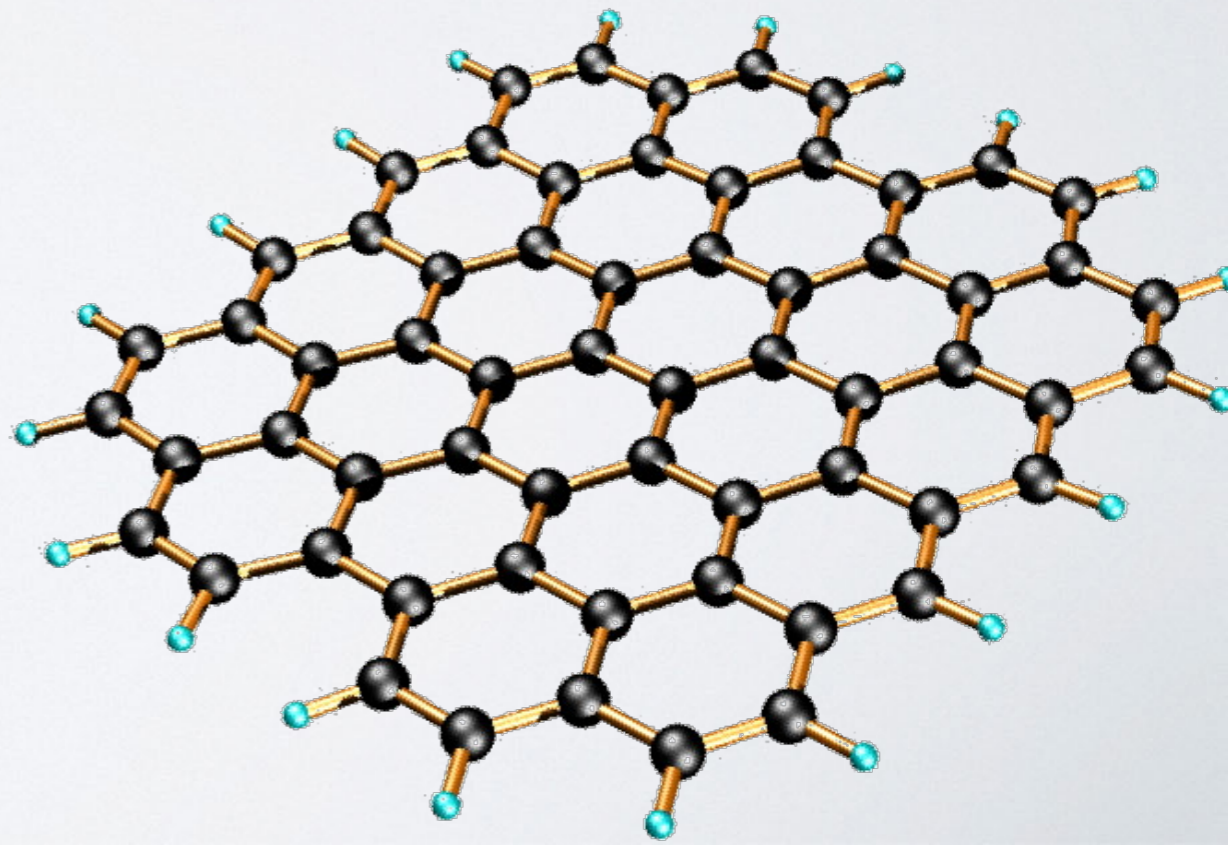
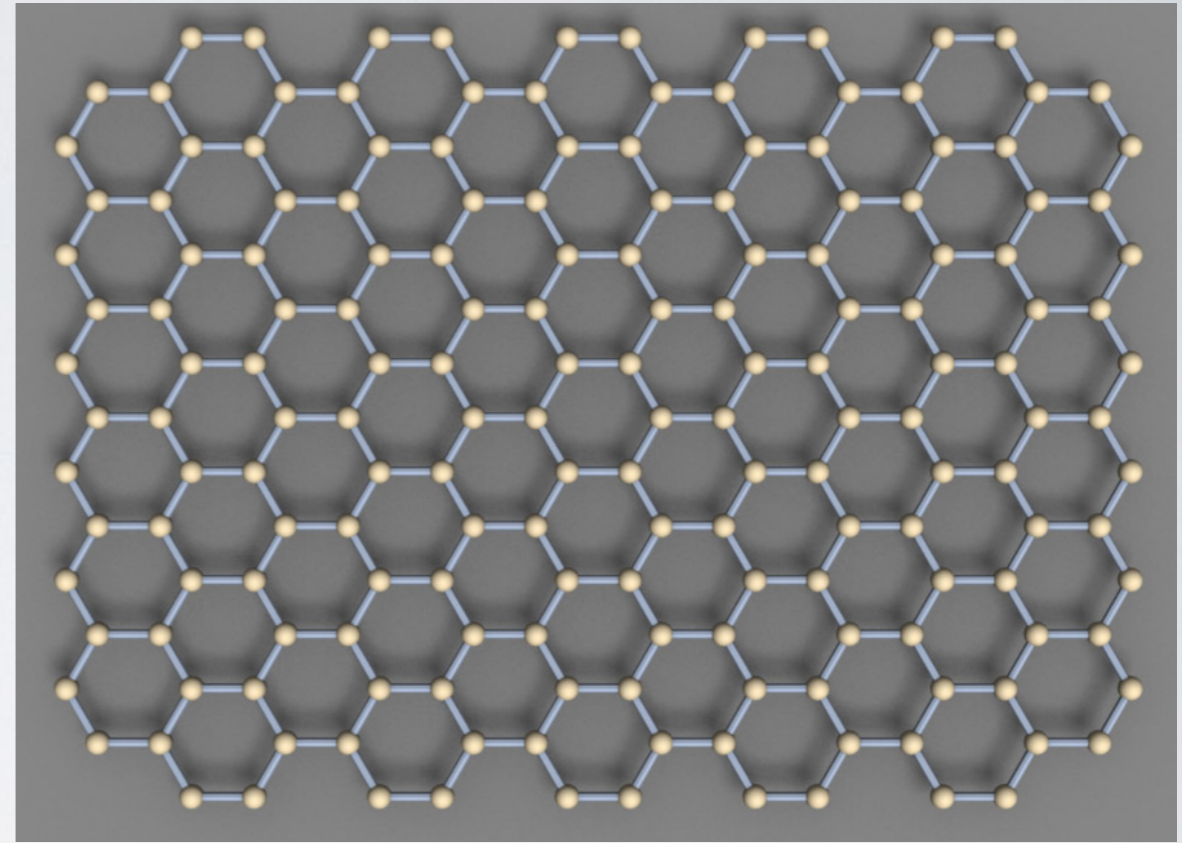
Source: ACS Nano

- Χρυσά νανο-σωματίδια  
(Gold nanoparticles)
  - 5-400 nm
  - Παροχή φαρμακευτικών ουσιών
  - Αισθητήρες τροφίμων
  - Σκεδαστές φωτός - βιολογική απεικόνιση



# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΝΑΝΟ-ΥΛΙΚΩΝ

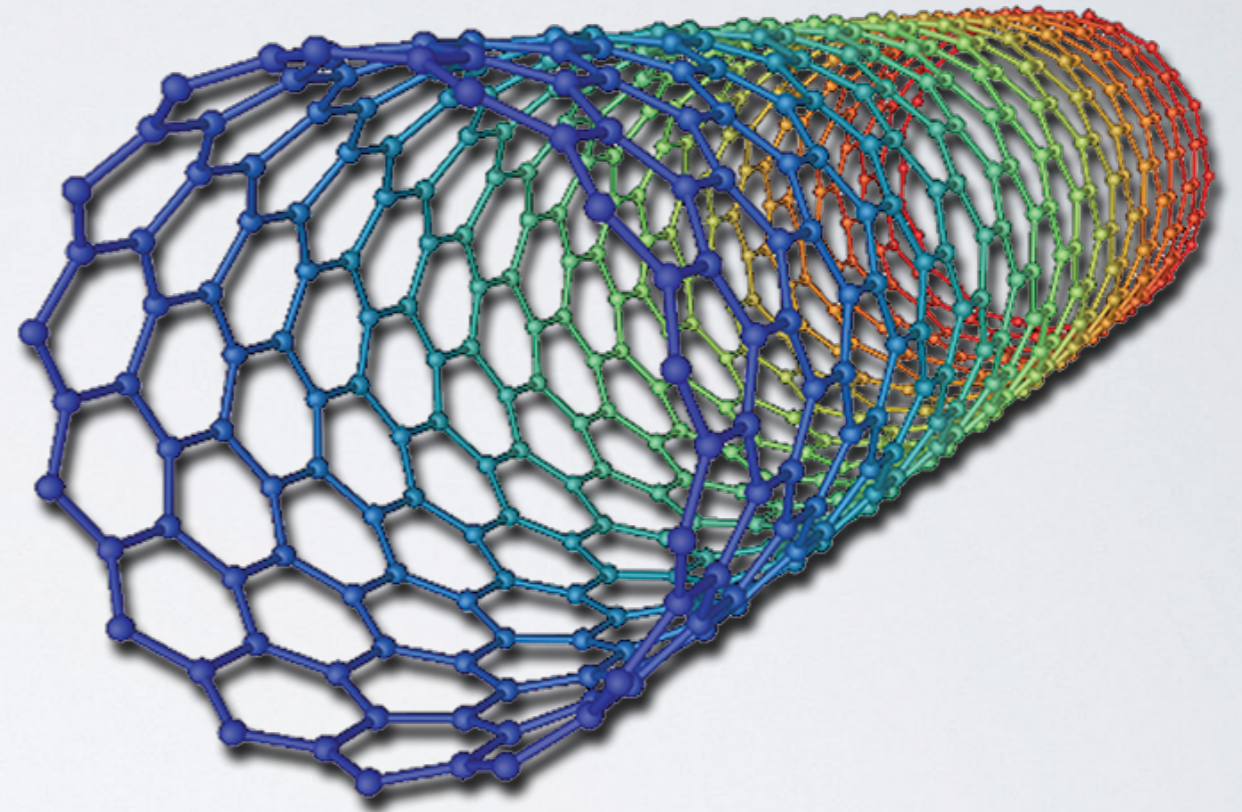
- Γραφένιο (Graphene)
  - Θεωρείται ένα 2D υλικό
  - Πάχος περίπου ίσο με ένα άτομο
  - Ελαφρύ ( $\sim 0.77\text{mg/m}^2$ )
  - Ανθεκτικό (100-300 x του ατσαλιού)
  - Βέλτιστος αγωγός ηλεκτρισμού (μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση κεραίας).





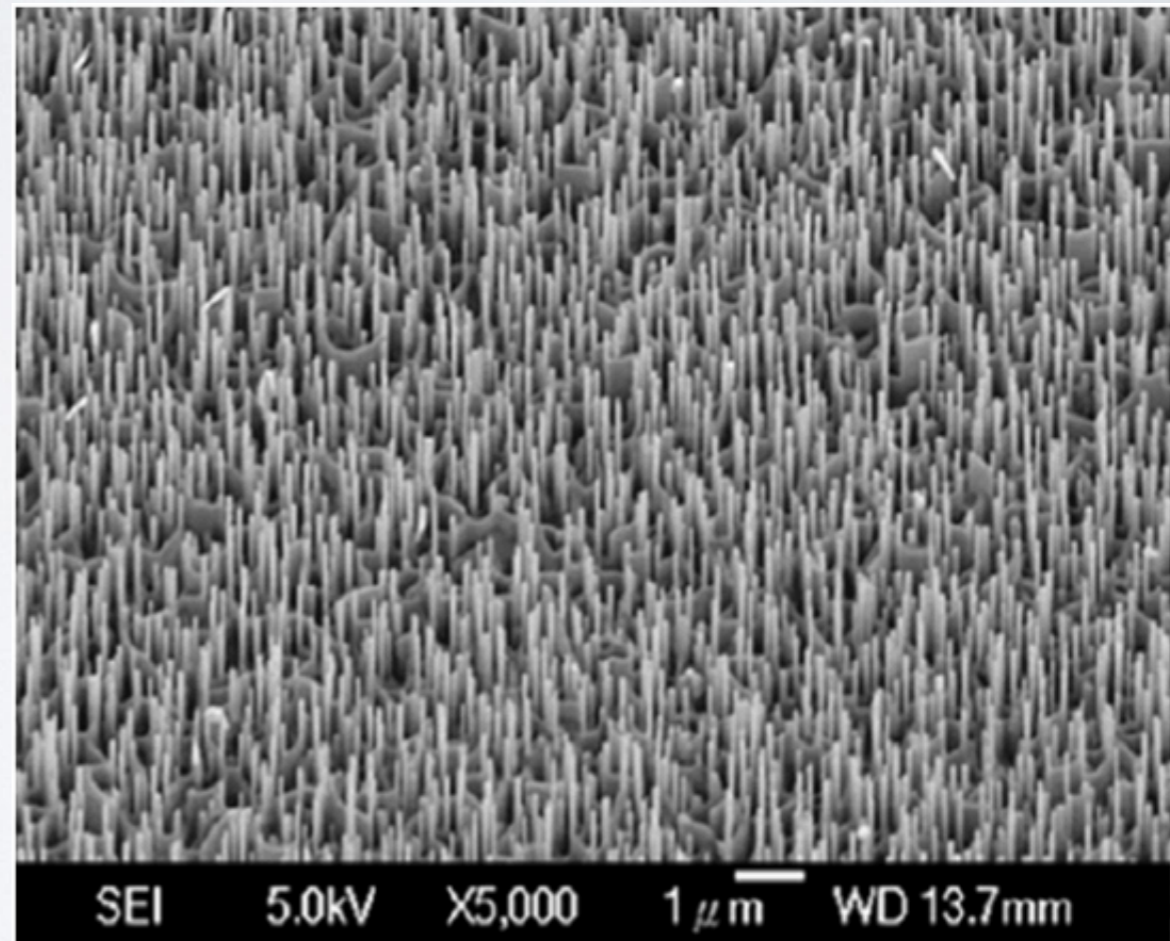
# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΝΑΝΟ-ΥΛΙΚΩΝ

- Carbon Nano Tube
  - Διάμετρος της τάξεως των nm
  - Μπαταρίες με βελτιωμένο χρόνο ζωής
  - Βιο-αισθητήρες



# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΝΑΝΟ-ΥΛΙΚΩΝ

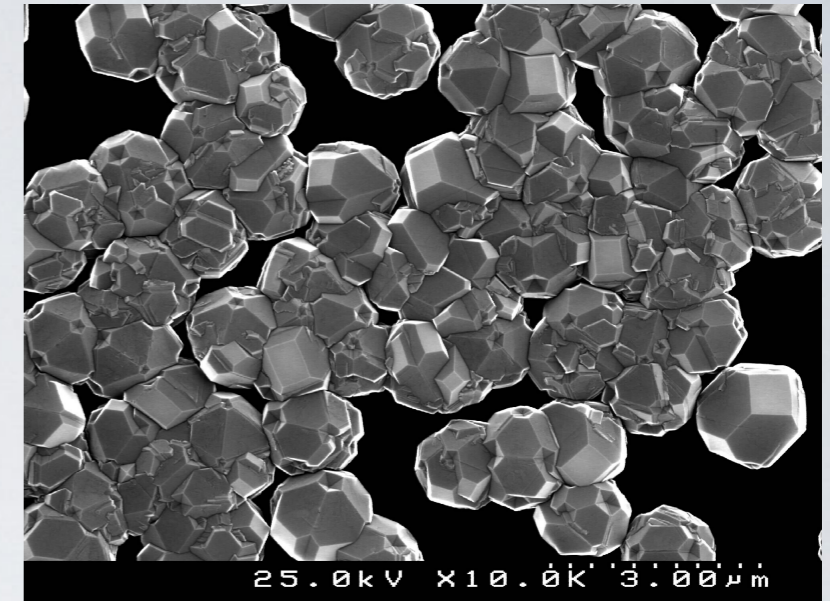
- Νανο-σωλήνες (Nano-wires)
  - Μήκος της τάξεως των  $\mu\text{m}$ .
  - Διάμετρος της τάξεως των δεκάδων  $\text{nm}$ .
  - Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή:
    - μπαταριών, και
    - συλλεκτών ενέργειας.



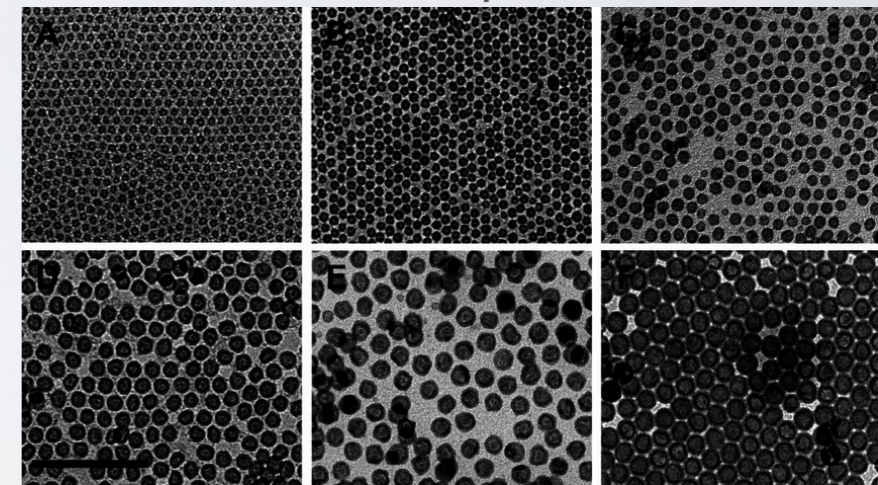
# ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΠΟ ΝΑΝΟ-ΥΛΙΚΑ

- Νανο-διαμάντη
  - Αύξηση των οστών γύρω από εμφυτεύματα των αρθρώσεων.
- Νανოსωματίδια σιδήρου
  - Καθαρισμός ρύπανσης σε υπόγεια ύδατα.
- Νανοςωματίδια παλλάδιου
  - αισθητήρες υδρογόνου
- και πολλά άλλα ...

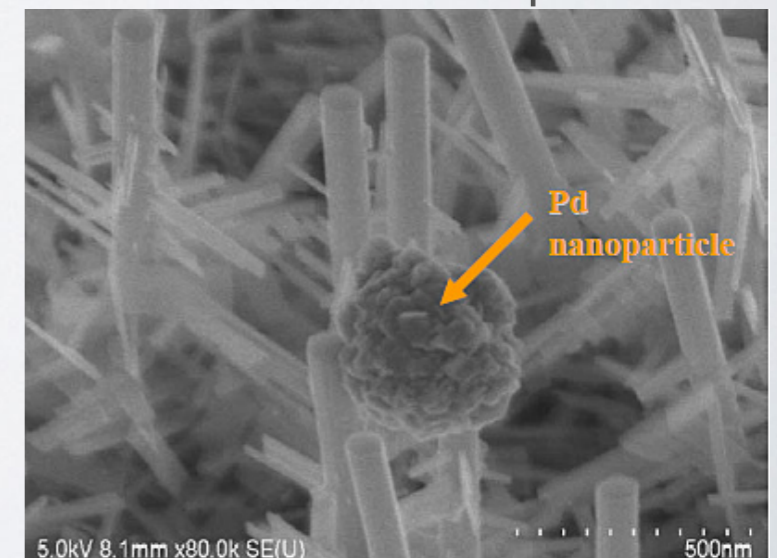
Nanodiamond



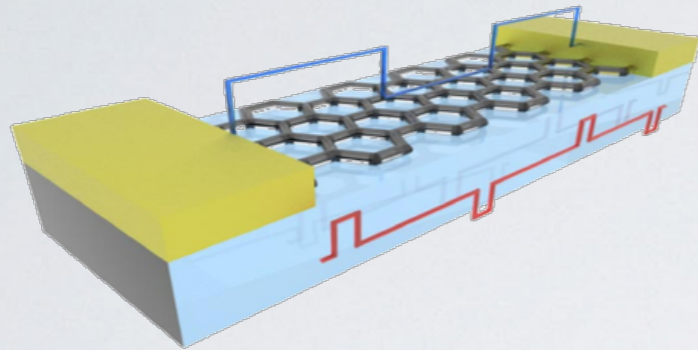
Iron nanoparticles



Palladium nanoparticles

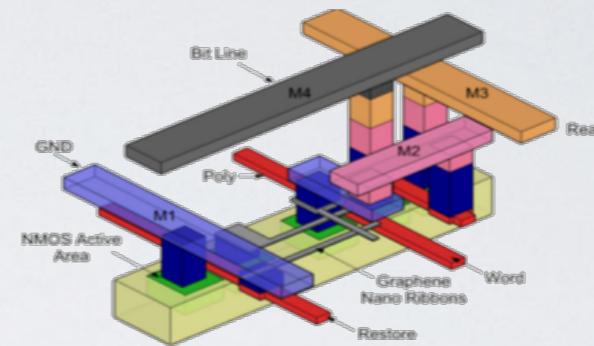


## Nano-scale Memory

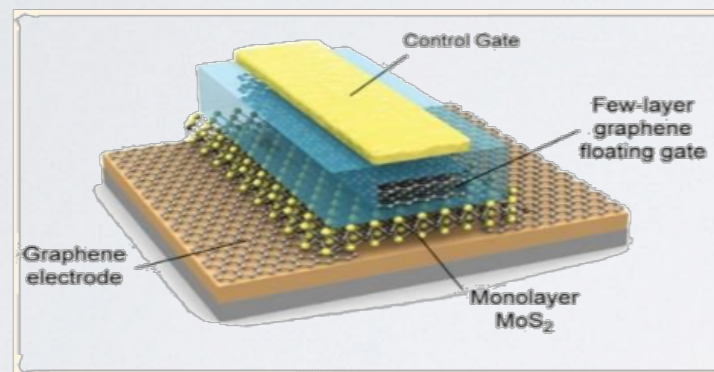


Graphene nanoribbon memory cell

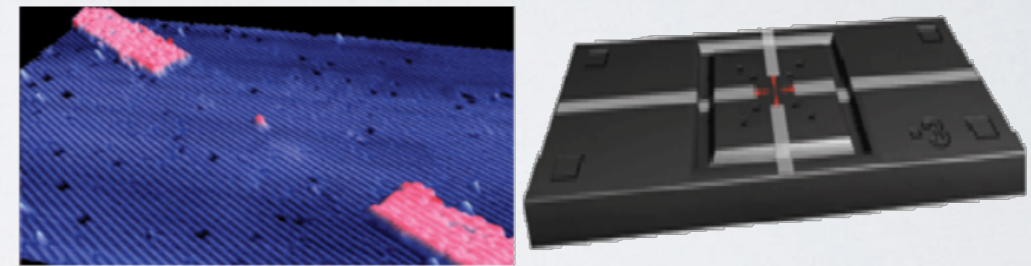
## Nano-scale CMOS/Processor



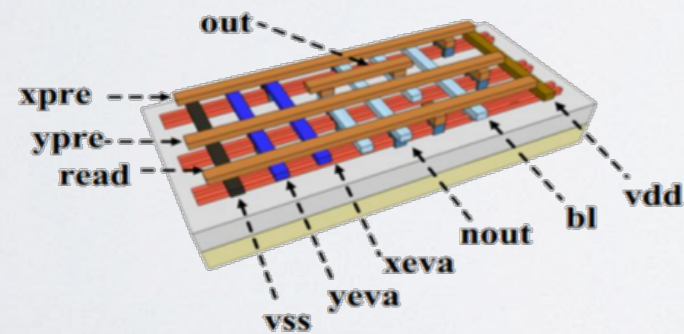
Graphen-based CMOS



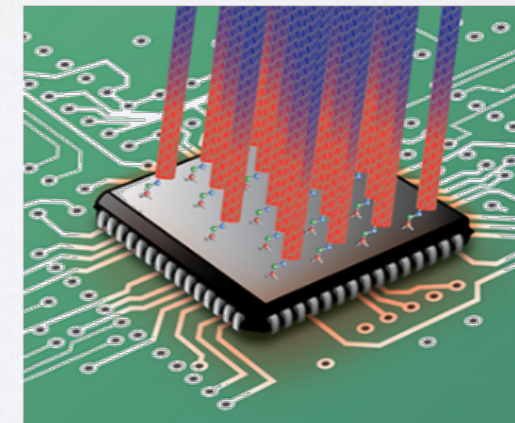
Nano-scale flash memory using graphene



single-atom transistor developed at UNSW

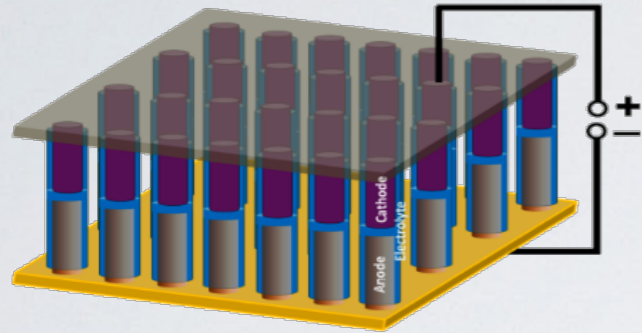


8T-Nanowire RAM Array



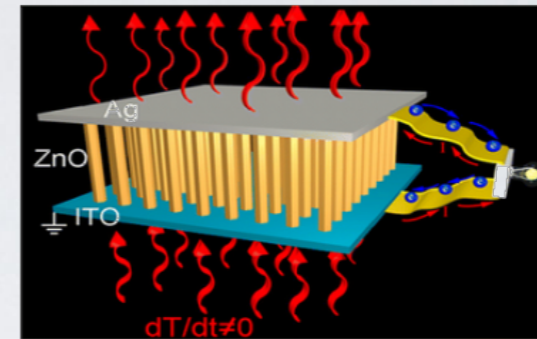
A carbon nanotube CPU

## Nano-scale Battery

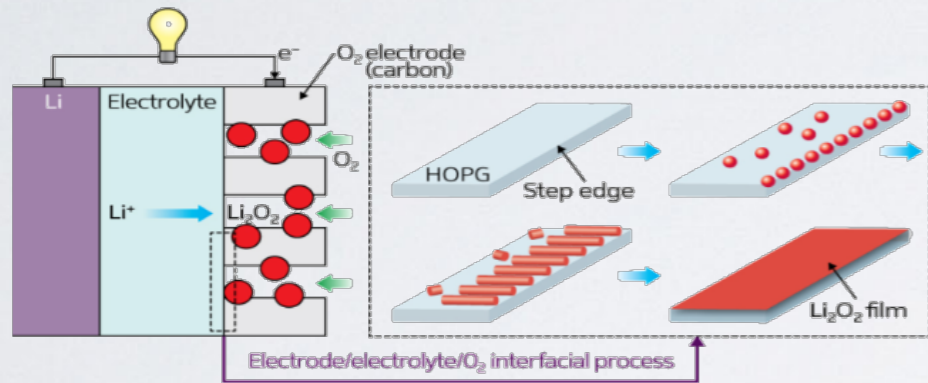


Nanoscale battery/supercapacitor devices

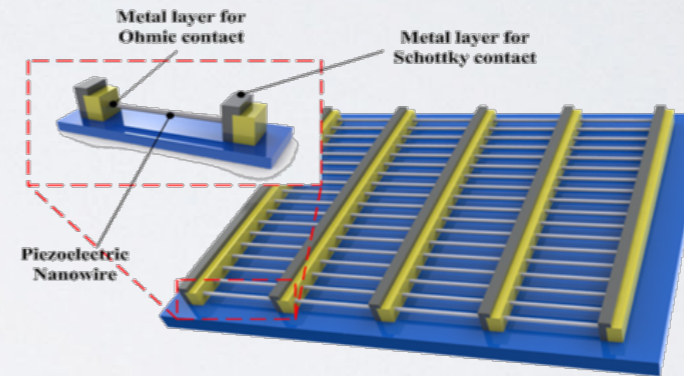
## Nano-scale Energy harvesting devices



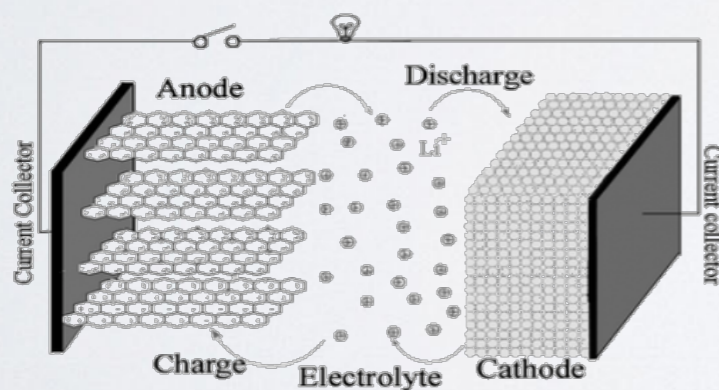
Pyroelectric Nanogenerators for Harvesting Thermoelectric Energy



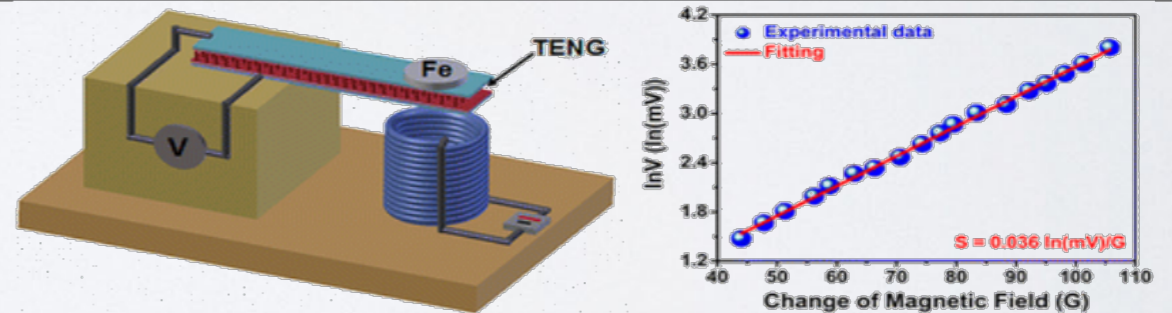
A nanoscale battery



Schematic view of typical Lateral nanowire Integrated Nanogenerator



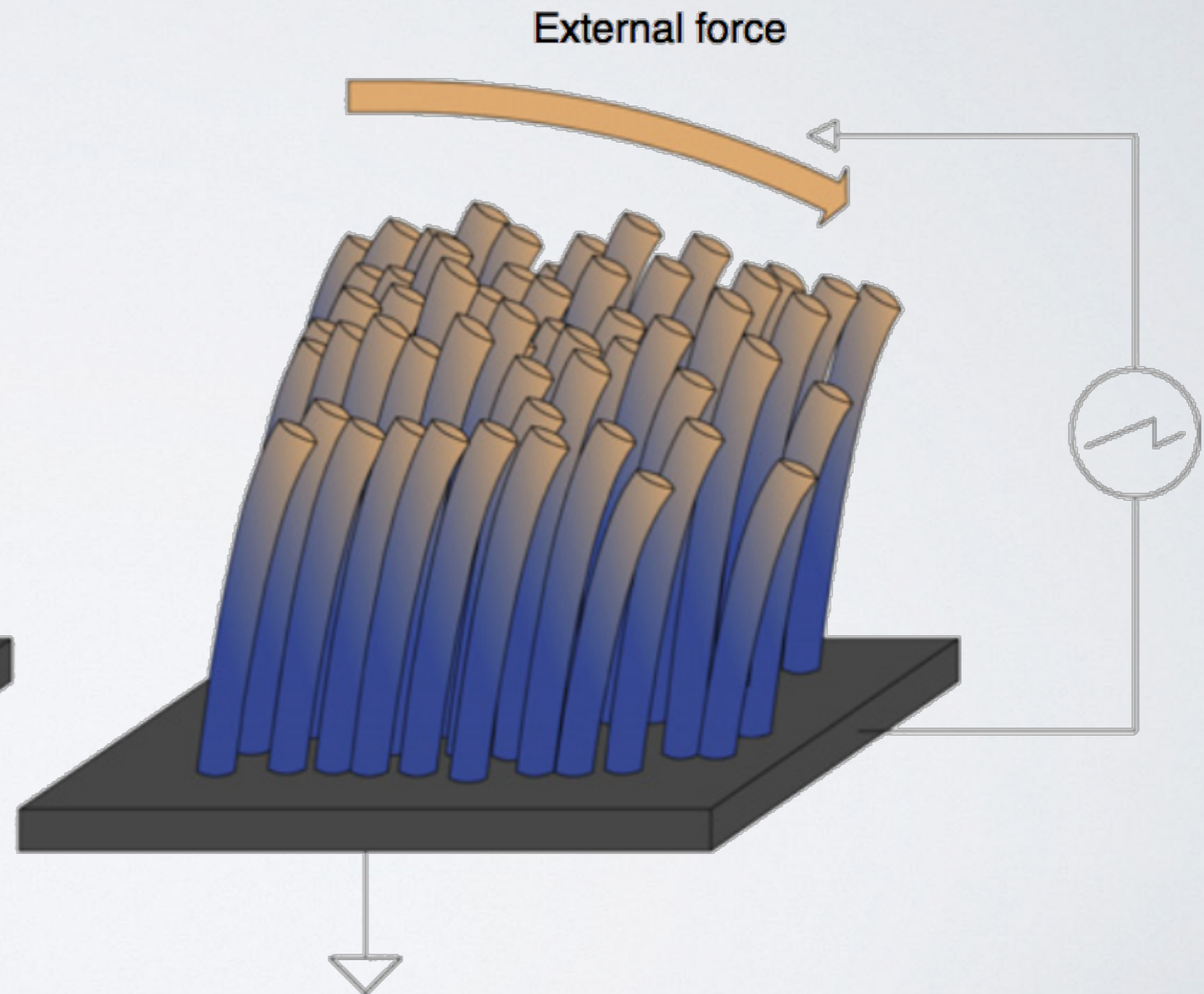
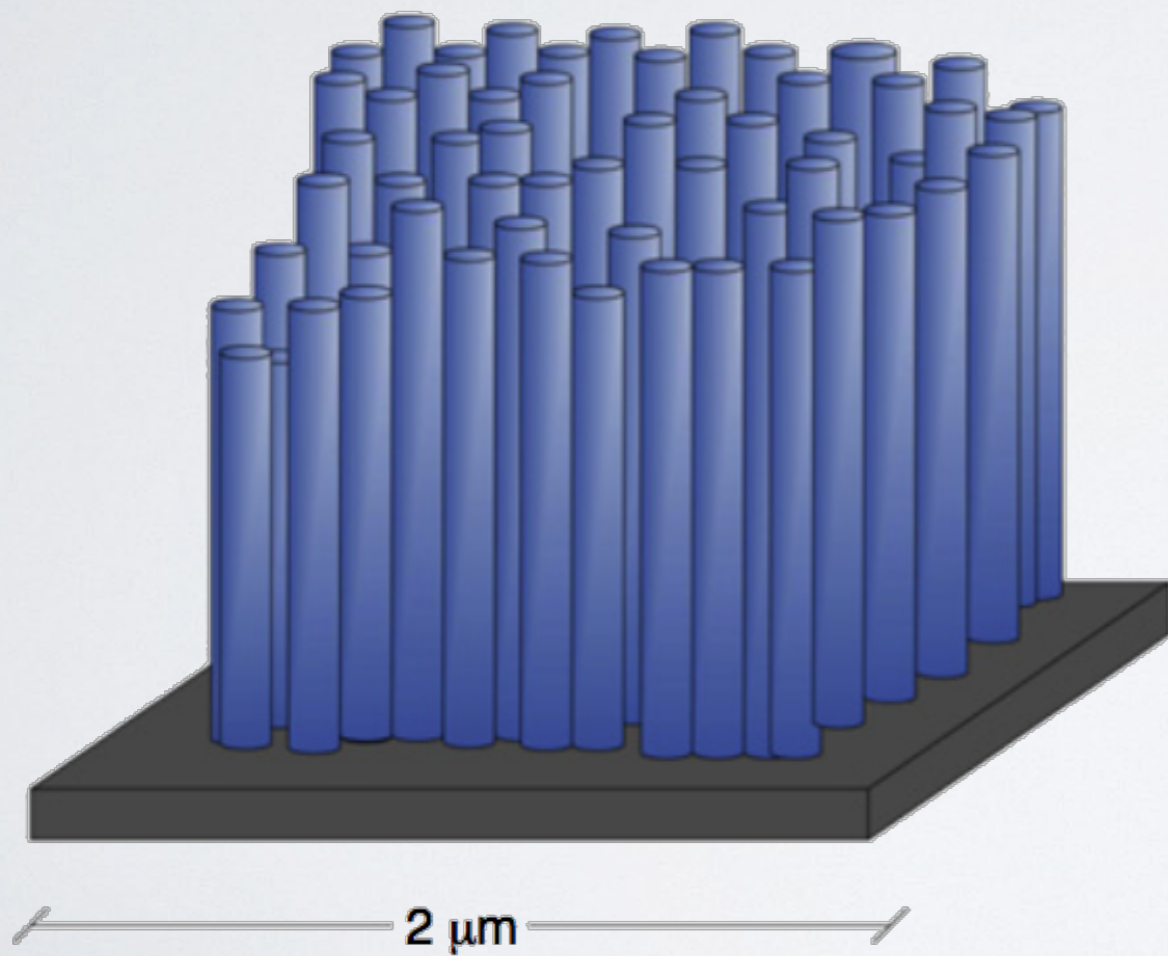
Schematic illustration of a rechargeable lithium battery



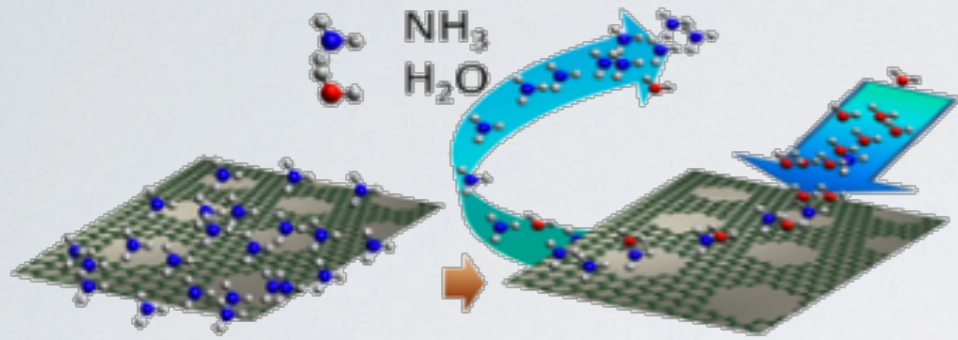
Triboelectric Nanogenerator for harvesting Magnetic Field

# ΣΥΛΛΟΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

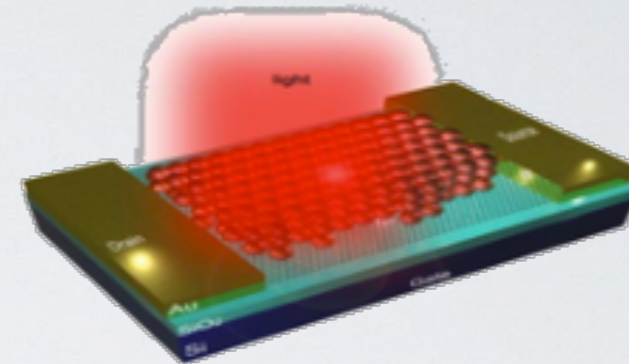
Array of Zinc Oxide Nanowires



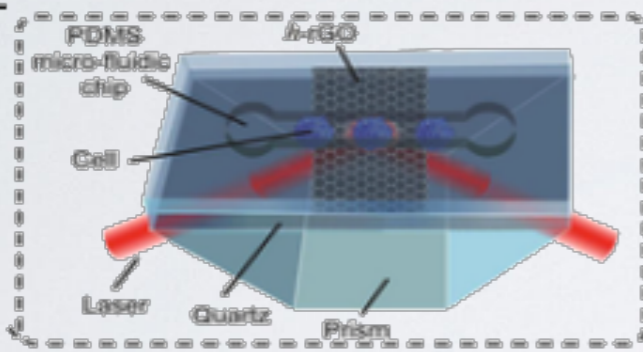
## Nano-Sensors



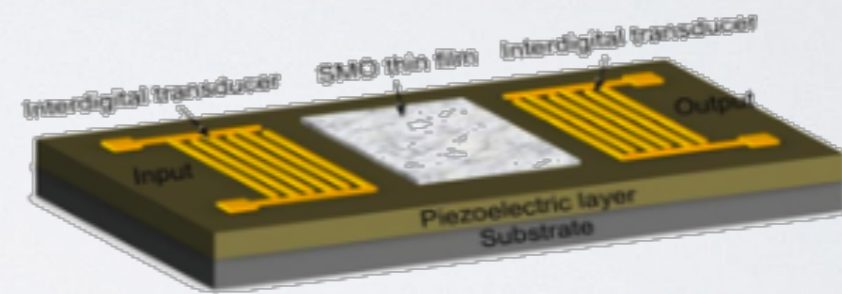
Nanoscale toxic gases Detector (Developed at CSIRO)



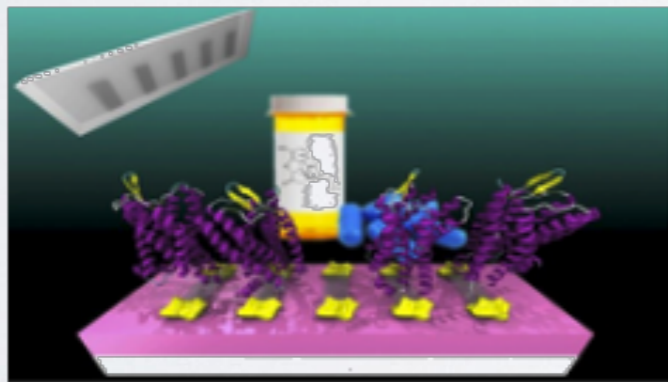
A graphene-based light detector



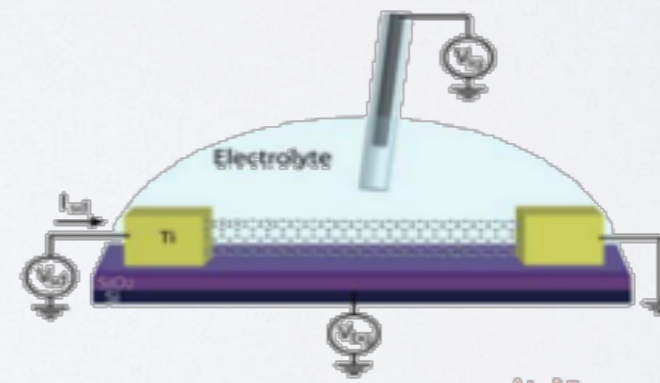
Graphene-based optical sensor detects single cancer cells



A Nano-scale hydrogen sensor



A Bio-Chemical Nanosensors



A Single-Molecule Detector

# NANO-SENSORS

## Τύποι νανο-αισθητήρων

### Φυσικοί νανο-αισθητήρες

- Μάζα
- Πίεση
- Δύναμη
- Μετατόπιση

### Χημικοί νανο-αισθητήρες

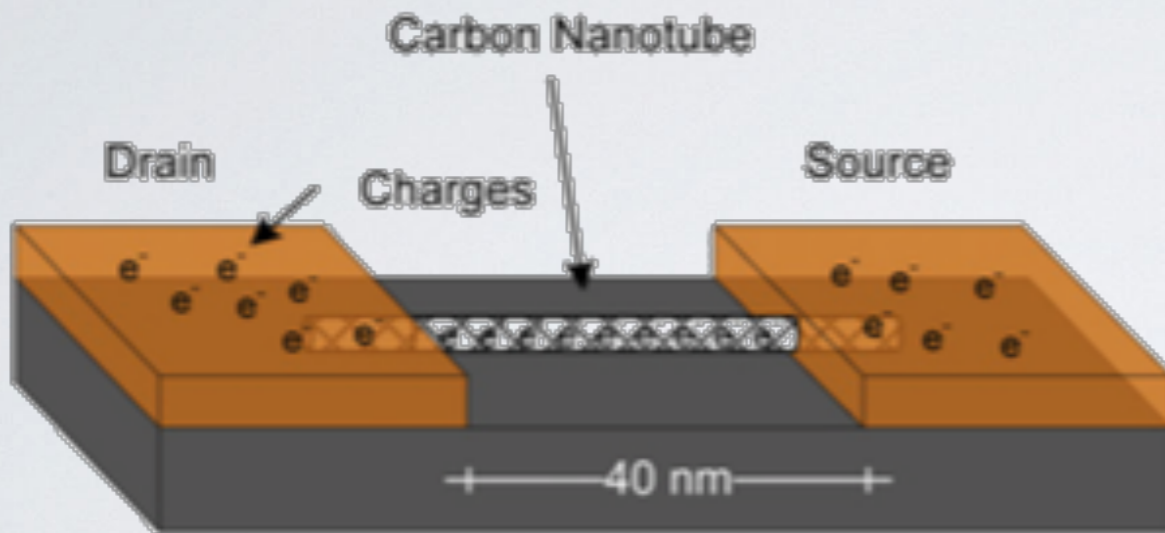
- Εντοπισμός συγκεκριμένου τύπου μορίου
- Χημική σύσταση
- Συγκέντρωση μορίων

### Βιολογικοί νανο-αισθητήρες

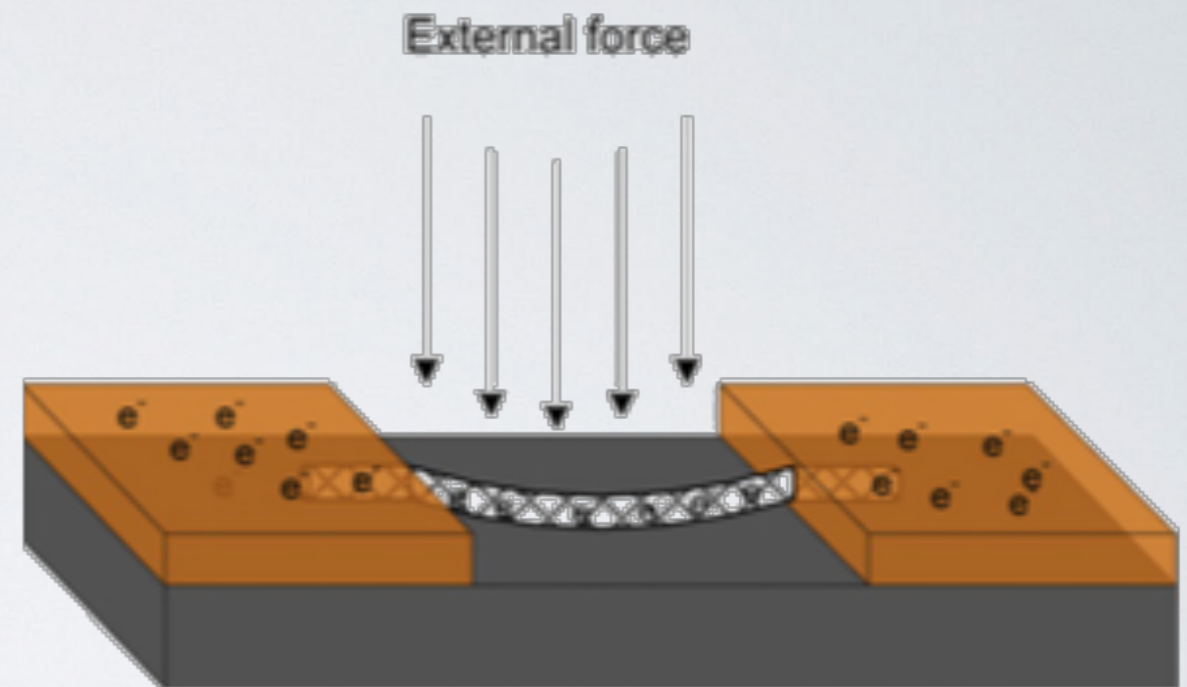
- Αλληλεπίδραση αντιγόνων/αντισωμάτων
- Αλληλεπιδράσεις DNA
- Αλληλεπιδράσεις ενζύμων



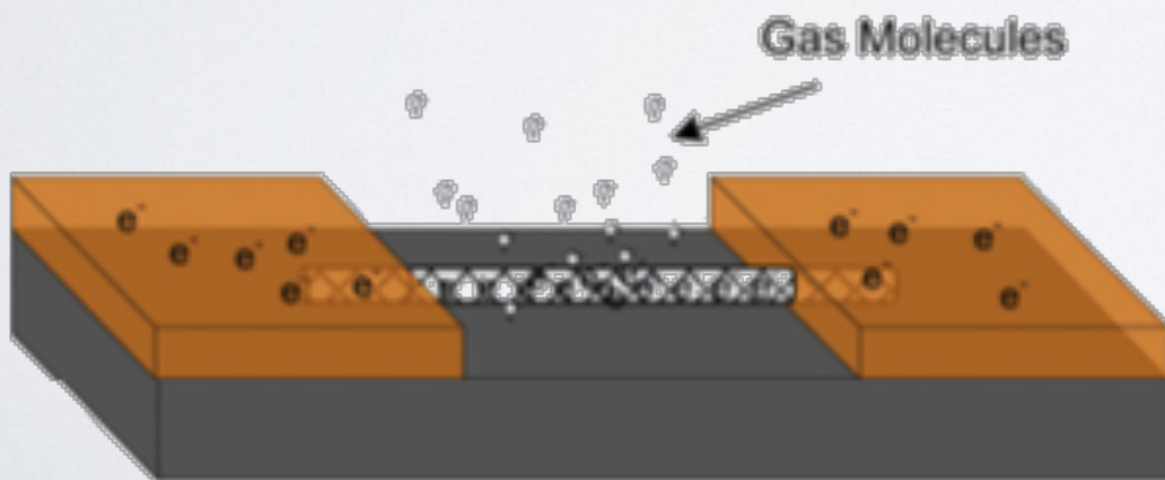
# NANOSENSORS



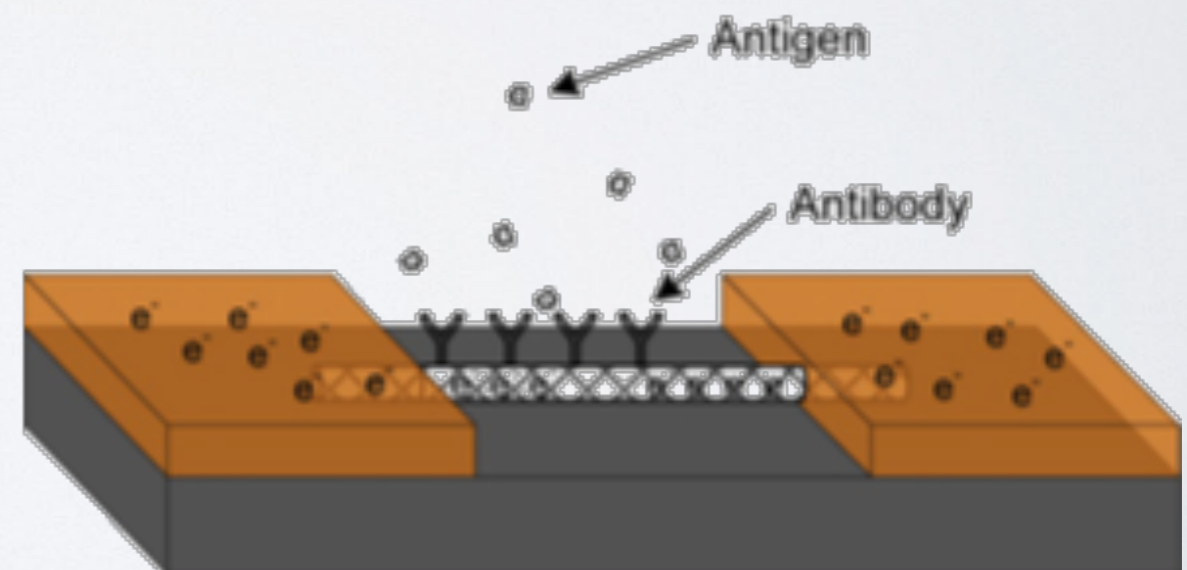
(a) CNT-based FET transistor.



(b) Physical nanosensor.



(c) Chemical nanosensor.



(d) Biological nanosensor.

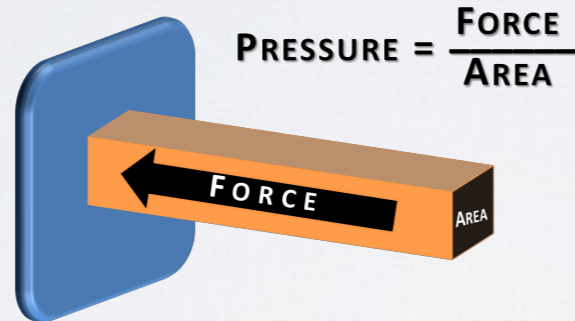
# ΦΥΣΙΚΟΙ ΝΑΝΟ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

- Μετράνε μεγέθη:

- μάζα,



- πίεση,

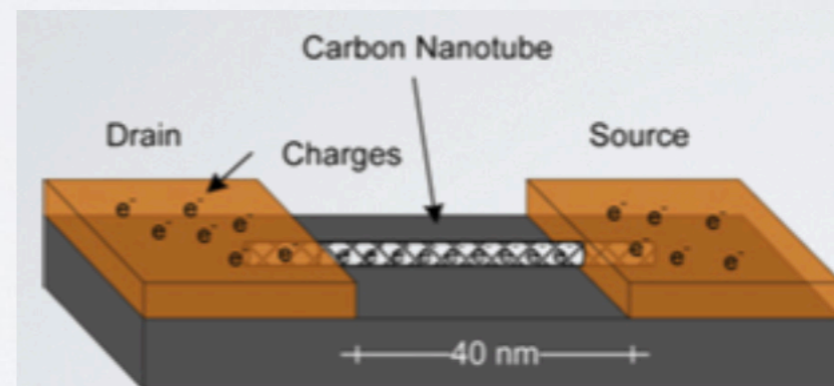


- δύναμη,

- μετατόπιση, κ.α.



Αρχή λειτουργίας  
Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των nanotubes και των nanoribbons, αλλάζουν όταν αυτά λυγίζουν ή παραμορφώνονται.

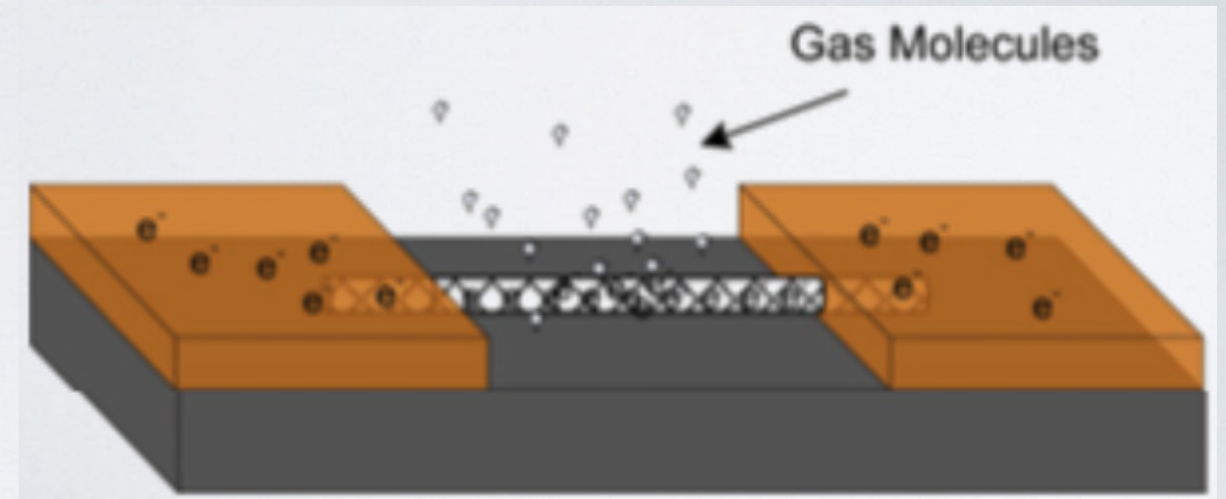


(a) CNT-based FET transistor.

Μία τοπική παραμόρφωση στο nanotube, προκαλεί αλλαγή στο κατώφλι τάσης on/off του transistor.

# ΧΗΜΙΚΟΙ ΝΑΝΟ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

- Μετράνε μεγέθη:
  - συγκέντρωση αερίου,
  - παρουσία συγκεκριμένου τύπου μορίων,
  - μοριακή σύνθεση μίας ουσίας

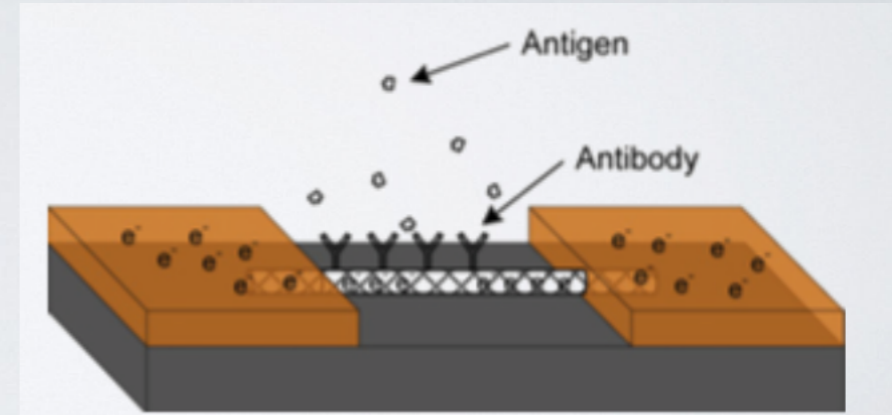


## Αρχή λειτουργίας

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των nanotubes και των graphene nanoribbons αλλάζουν (περισσότερα ή λιγότερα ηλεκτρόνια κινούνται μέσω του πλέγματος άνθρακα), όταν διαφορετικοί τύποι μορίων απορροφούνται από αυτά.

# ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΙ ΝΑΝΟ-ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

- Παρακολουθούν βιολογικές διαδικασίες



- αλληλεπιδράσεις αντιγόνων/αντισωμάτων,
- αλληλεπιδράσεις ενζύμων,
- διαδικασίες επικοινωνίας, κ.α.

Ένας βιολογικός αισθητήρας αποτελείται από:

- ένα βιολογικό σύστημα αναγνώρισης ή ένα βιο-αποδέκτη, όπως
  - αντίσωμα,
  - ένζυμο,
  - πρωτεΐνη, ή
  - αλυσίδα DNA
- ένα μηχανισμό μεταγωγής, όπως:
  - ηλεκτρο-χημικό ανιχνευτή
  - οπτικό μετατροπέα
  - ανιχνευτή ρεύματος, τάσης ή μαγνήτισης

# Τύποι βιολογικών νανο-αισθητήρων

## Ηλεκτροχημικοί

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες αλλάζουν όταν απορροφεί:

- μία πρωτεΐνη ή κάποια άλλη χημική ουσία, που συνδέεται με την λειτουργικότητα του nanotube
- ένα συγκεκριμένο αντιγόνο που συνδέεται με αντίσωμα “δεμένο” στο nanotube
- Ένας κλάδος αλυσίδας DNA που συνδέεται με ένα άλλο κλάδο DNA προσκολλημένο στο nanotube

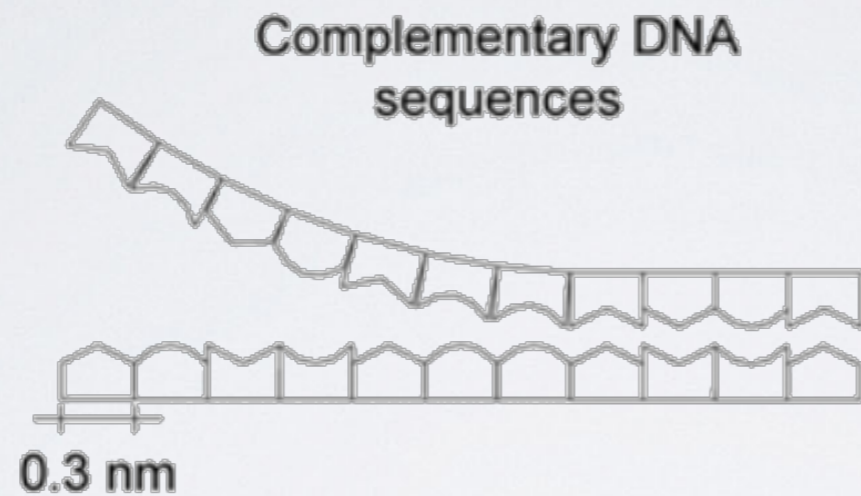
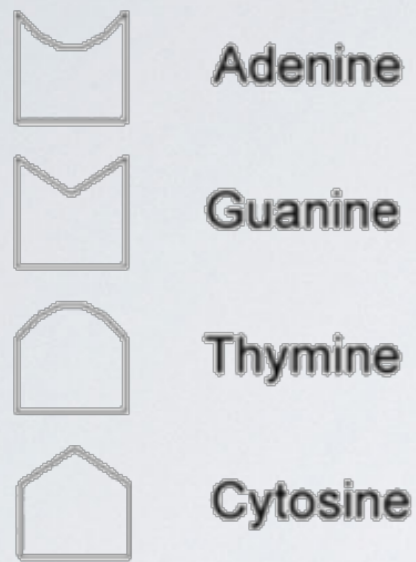
## Φωτομετρικοί

Βασίζονται στην χρήση μεταλλικών νανο-σωματιδίων και τη διέγερση που προκαλείται από οπτικά κυμματα και επιφανειακά plasmons (σύμφωνα ηλεκτρικά κύματα στην επιφάνεια μεταξύ των σωματιδίων).

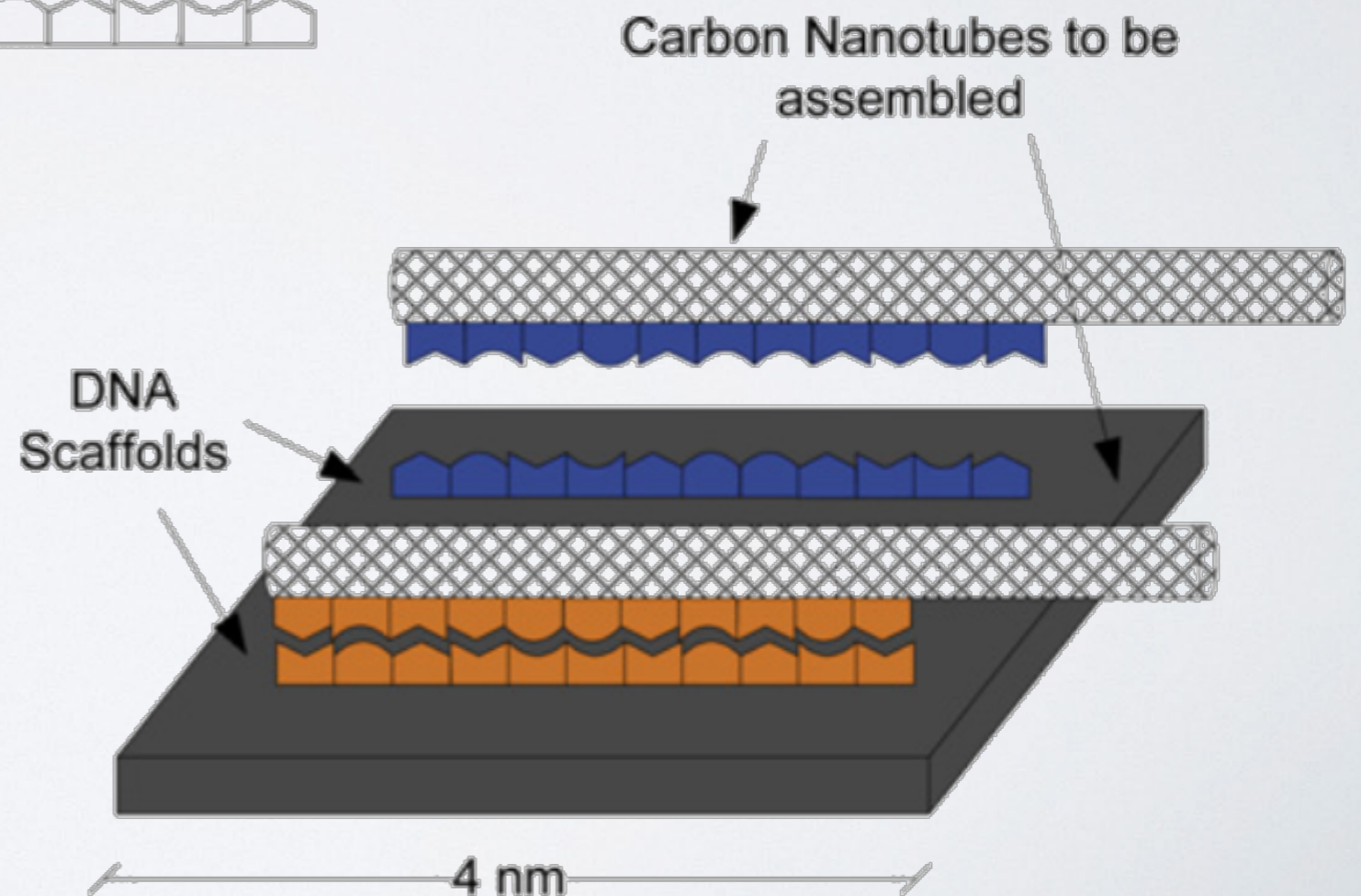
Εντοπισμός:

- καρκίνου
- άσματος
- διάφορους συνηθισμένους ιούς

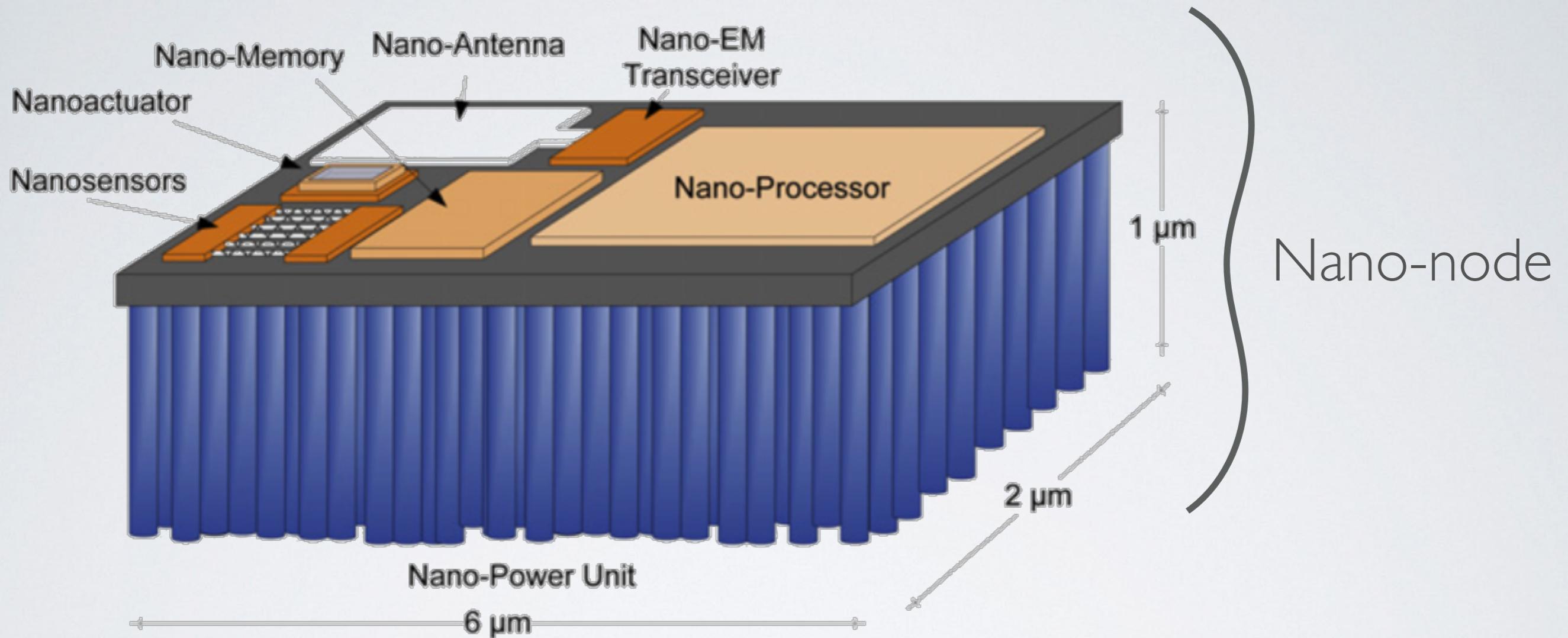
# ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΟΥ NANO-ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ



Diameter of human hair	20-200 $\mu\text{m}$
Typical cell diameter	10 $\mu\text{m}$
DNA double-helix diameter	2 nm
Carbon atoms bond length	0.145 nm



# KAI AN TA BALOYME OLA MAZI



Diameter of human hair	20-200 $\mu\text{m}$
Typical cell diameter	10 $\mu\text{m}$
DNA double-helix diameter	2 nm
Carbon atoms bond length	0.145 nm

# ΤΙ ΜΠΟΡΟΥΜΕ ΝΑ ΚΑΝΟΥΜΕ ΜΕ ΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΝΑΝΟ-ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ;

## Swallowing the surgeon

It would be interesting in surgery if you could swallow the surgeon. You put the mechanical surgeon inside the blood vessel and it goes into the heart and “looks” around... other small machines might be permanently incorporated in the body to assist some inadequately- functioning organ.

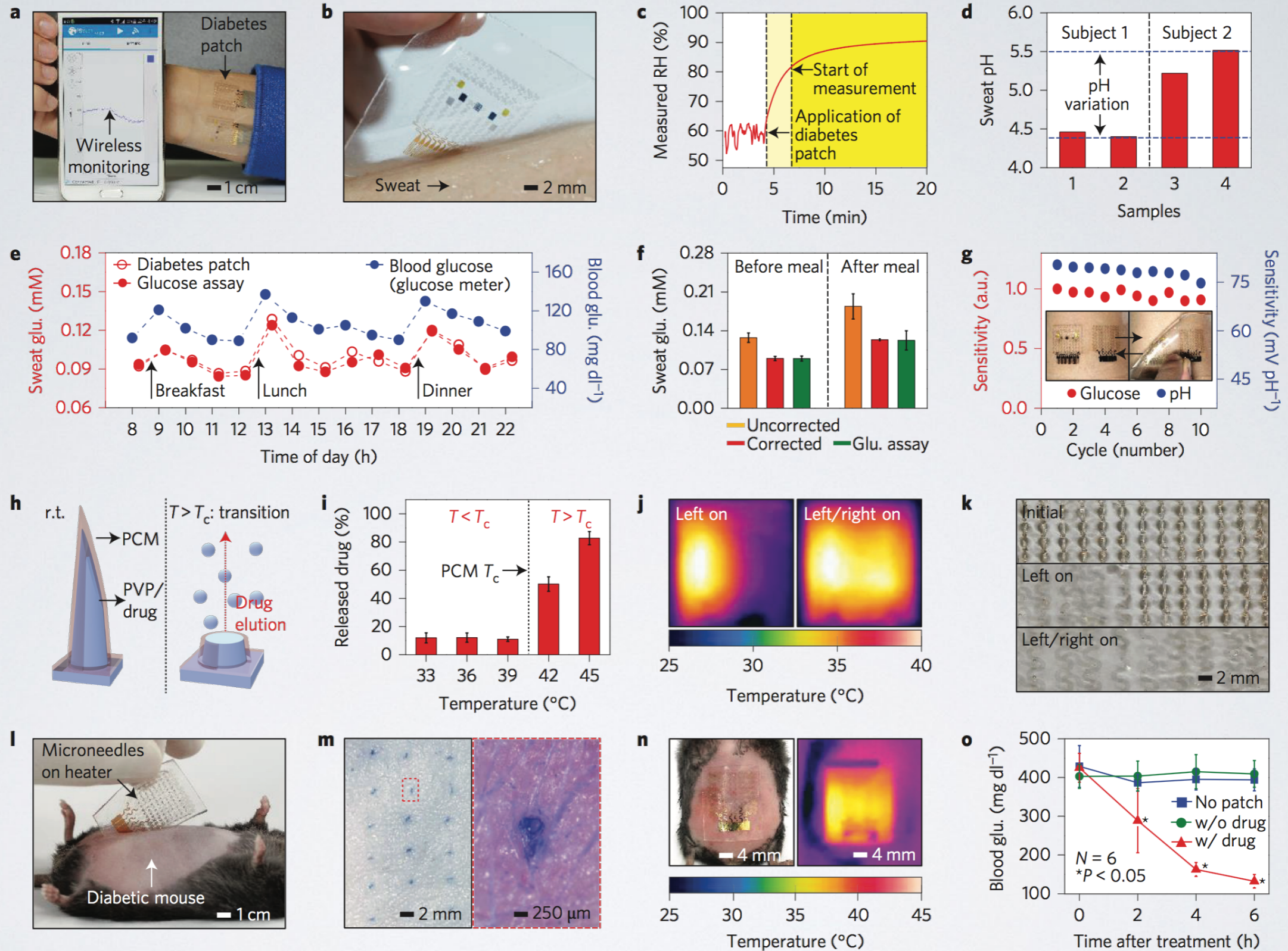
RICHARD P. FEYMAN 1959( nobel prize, physics 1965)

• VAMS

• Η επιστημονική φαντασία γίνεται πραγματικότητα



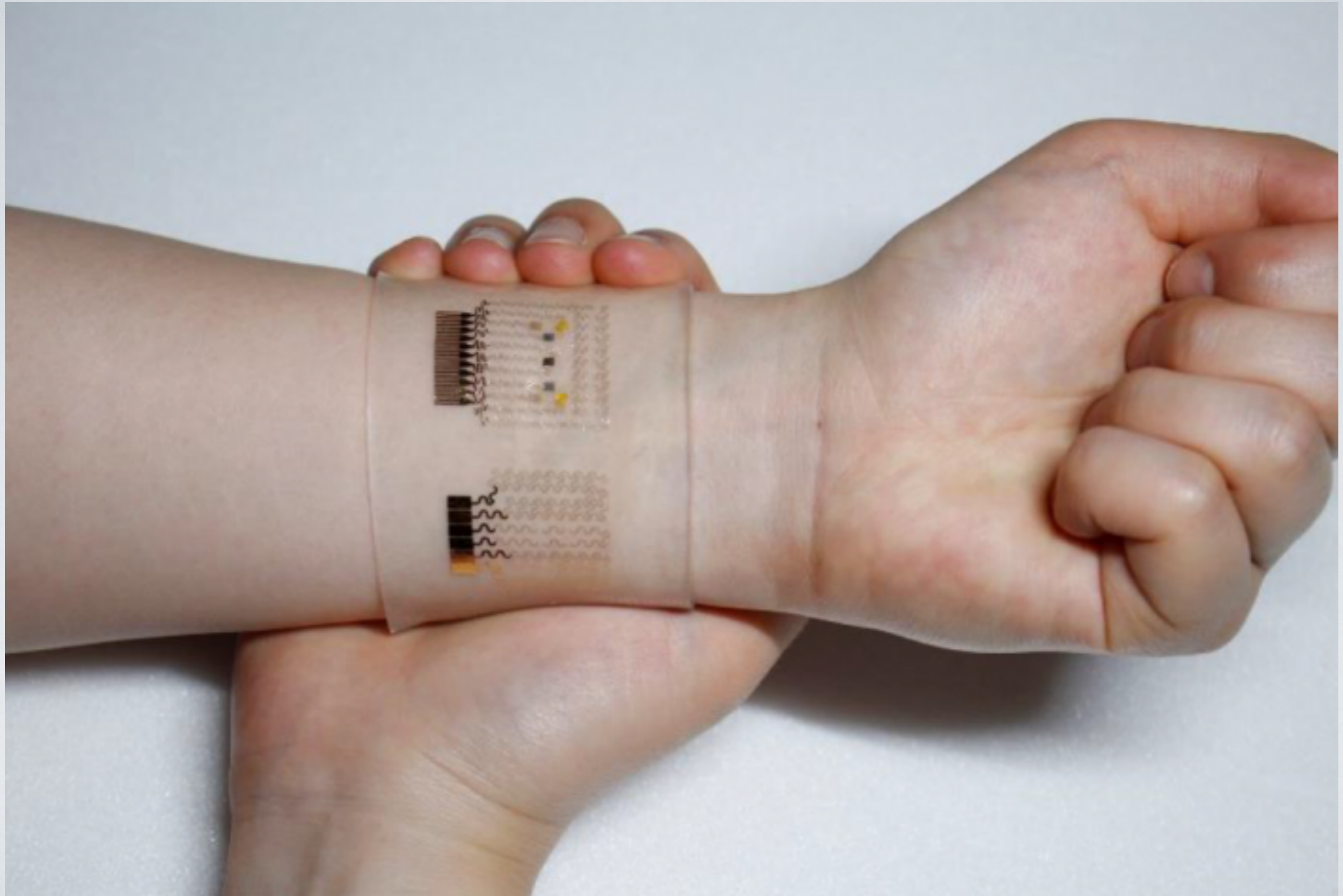
# Η ΝΑΝΟ-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ



- Παρακολούθηση επιπέδου γλυκόζης στο αίμα.
- Συνεχής
- Μη επεμβατική

Πηγή: A graphene-based electrochemical device with thermoresponsive microneedles for diabetes monitoring and therapy, @Nature Nanotechnology

# Η ΝΑΝΟ-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ



# Η ΝΑΝΟ-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ

**Loading/injection of  
nanobots (transmitter)**

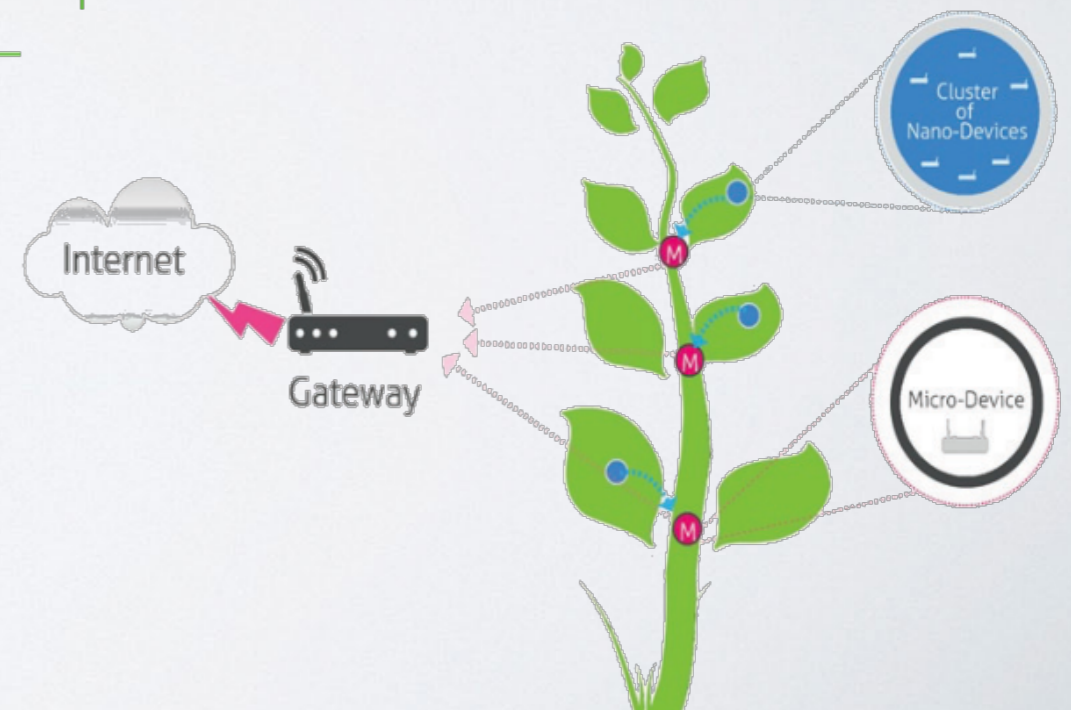
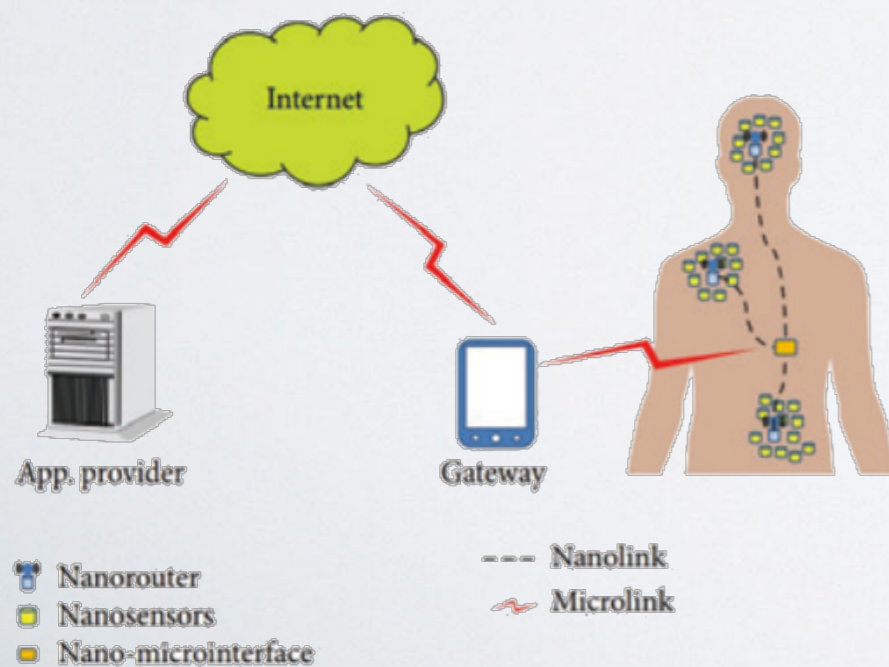
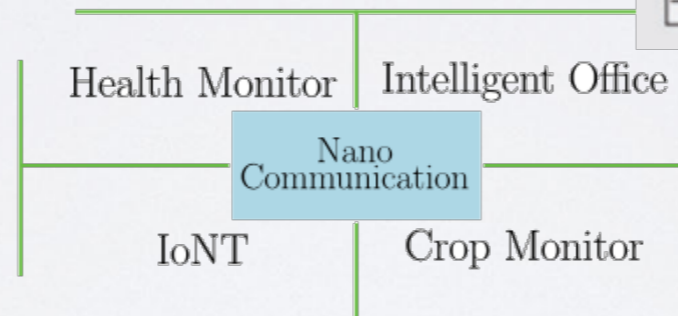
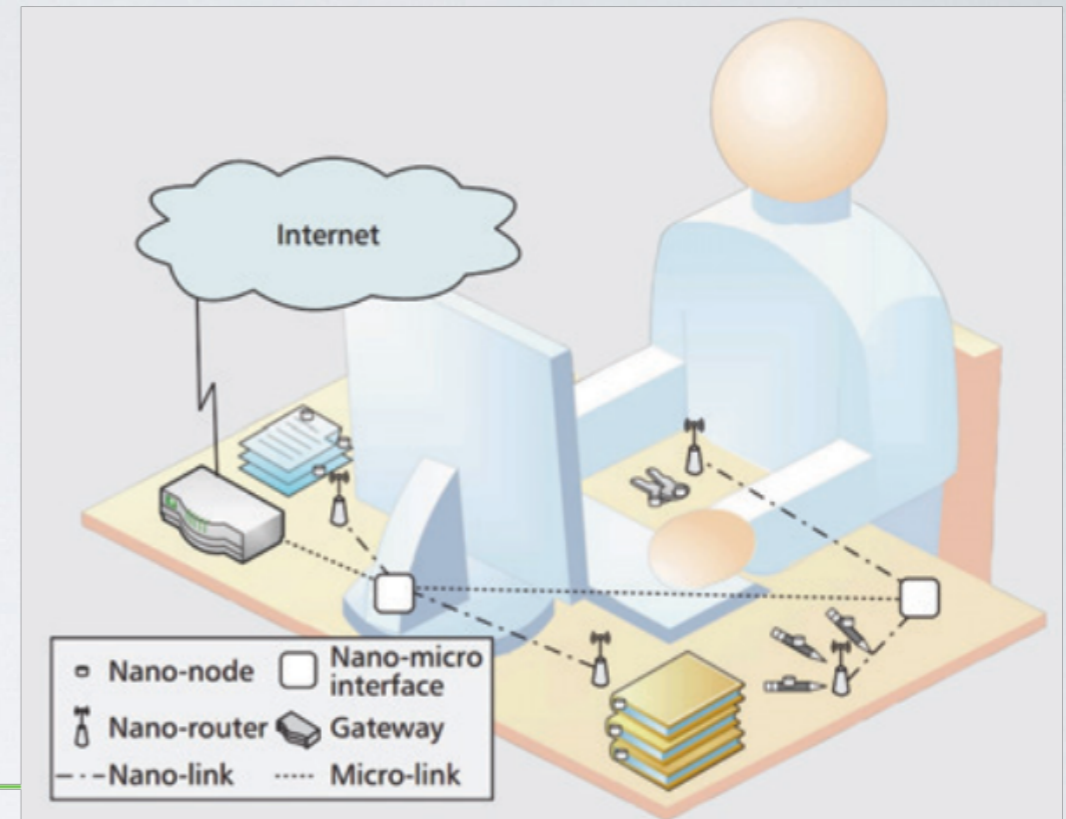
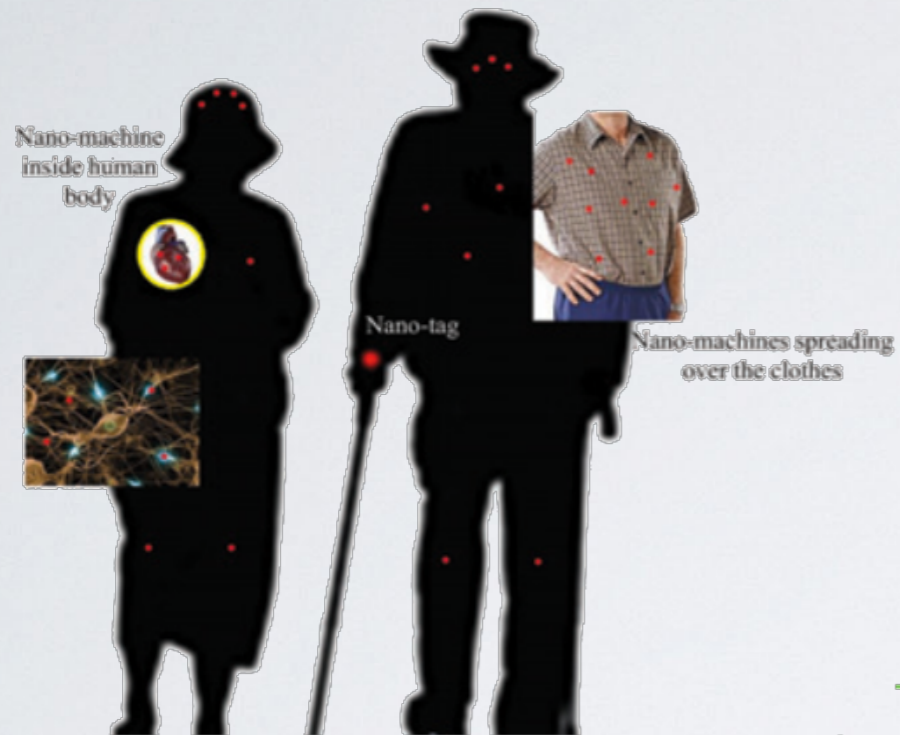


**Unloading at tumor cells  
(receiver)**

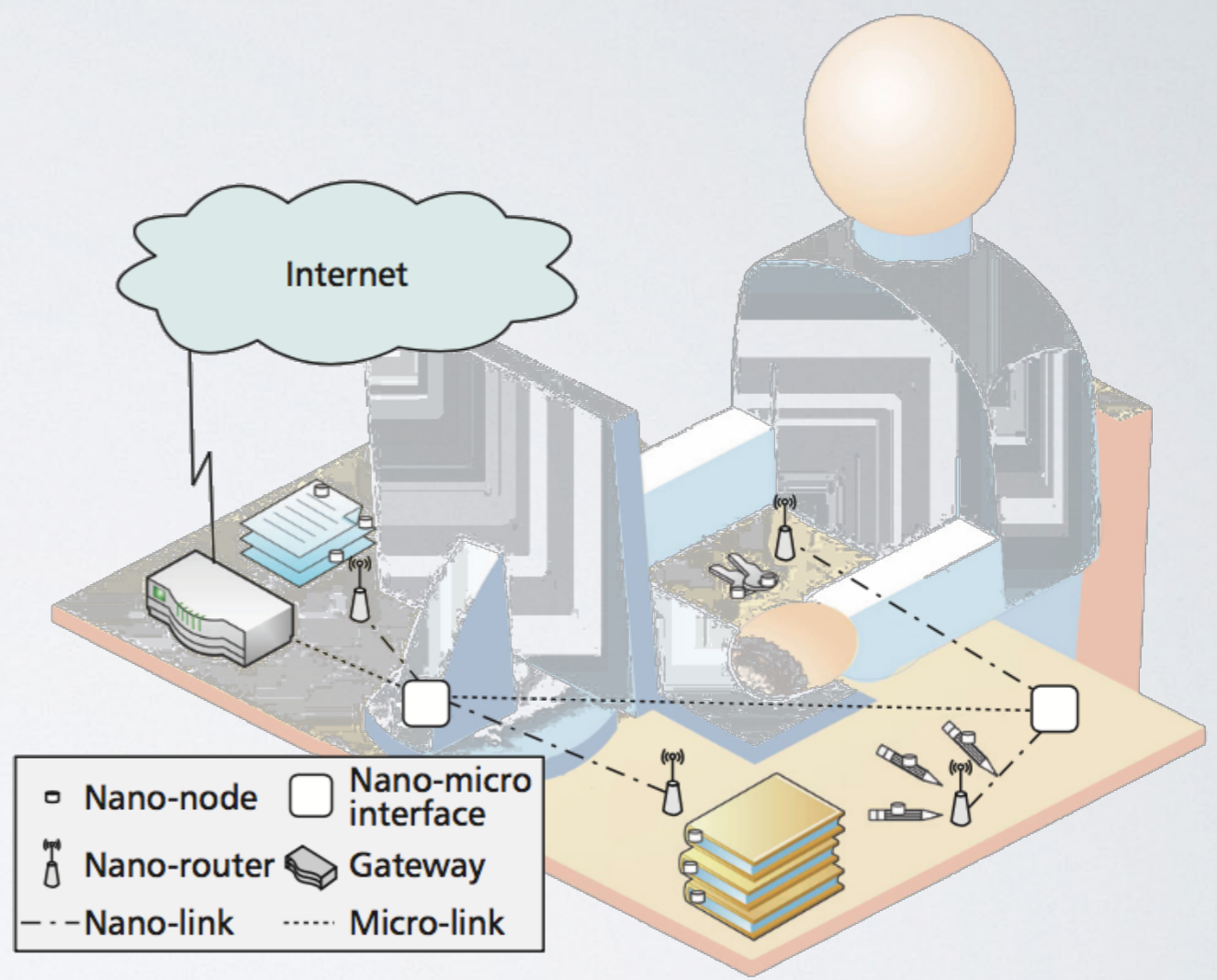
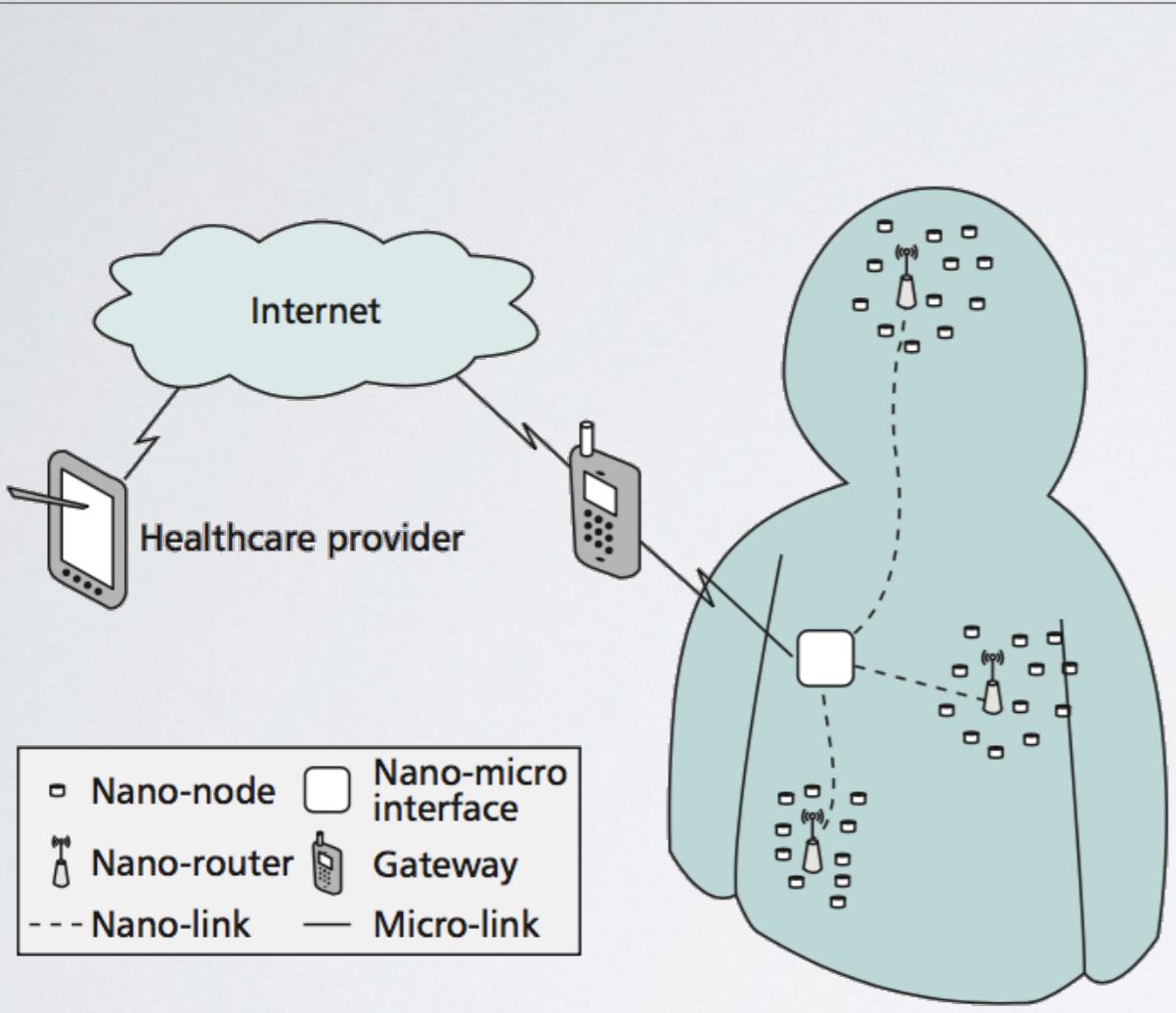
# Η ΝΑΝΟ-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΤΗΝ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ



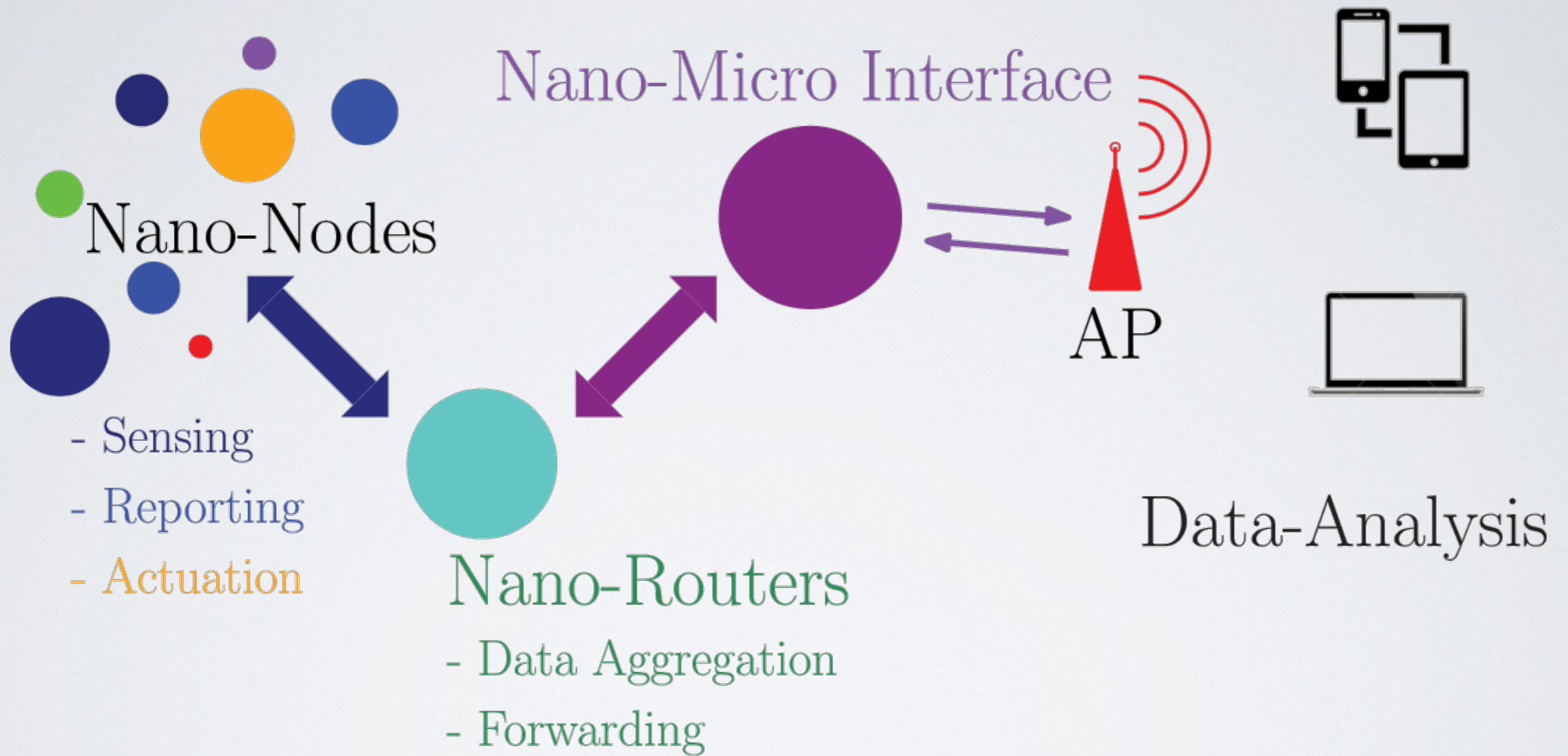
# ΣΕΝΑΡΙΑ ΧΡΗΣΗΣ NANO-COMMUNICATION NETWORKS



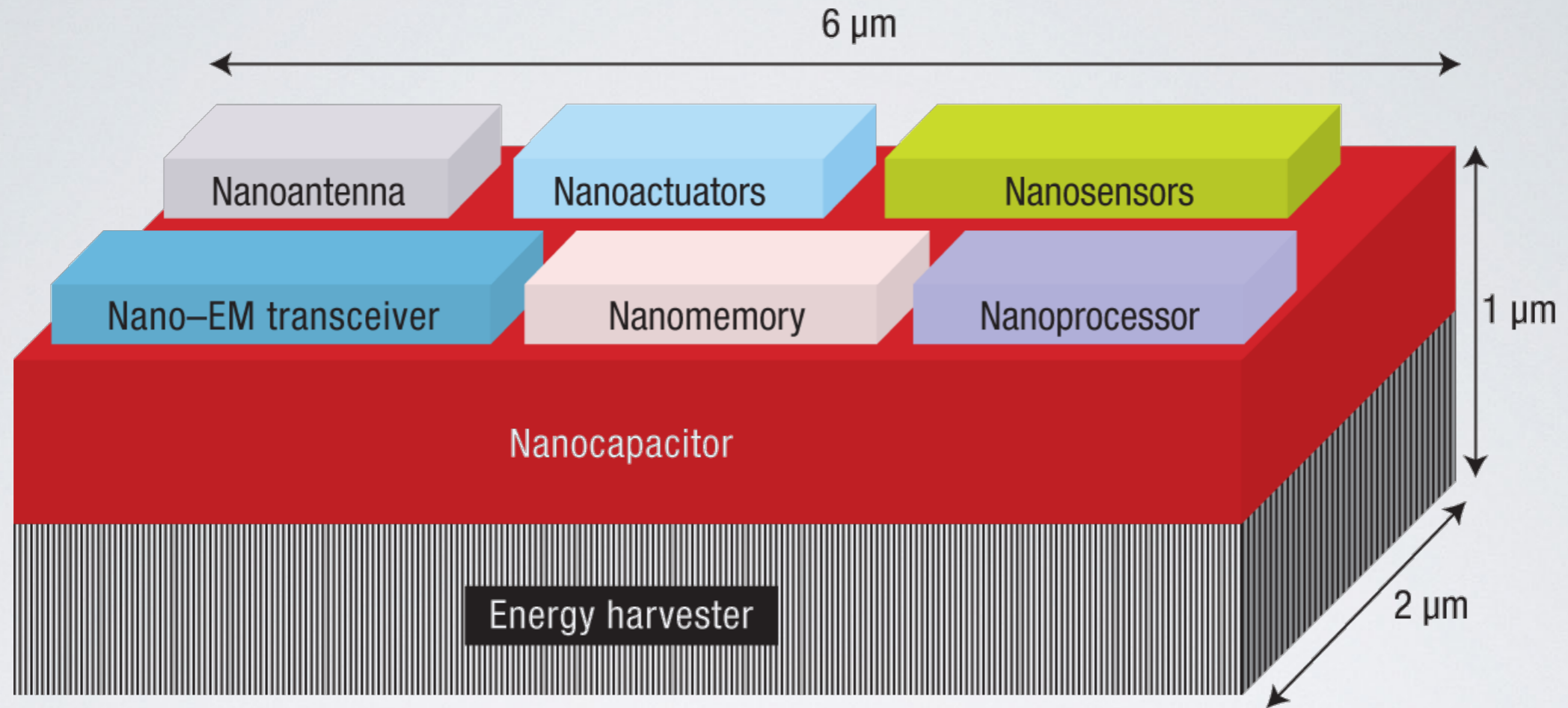
# THE INTERNET OF NANO-THINGS



# NANOSENSOR NETWORK



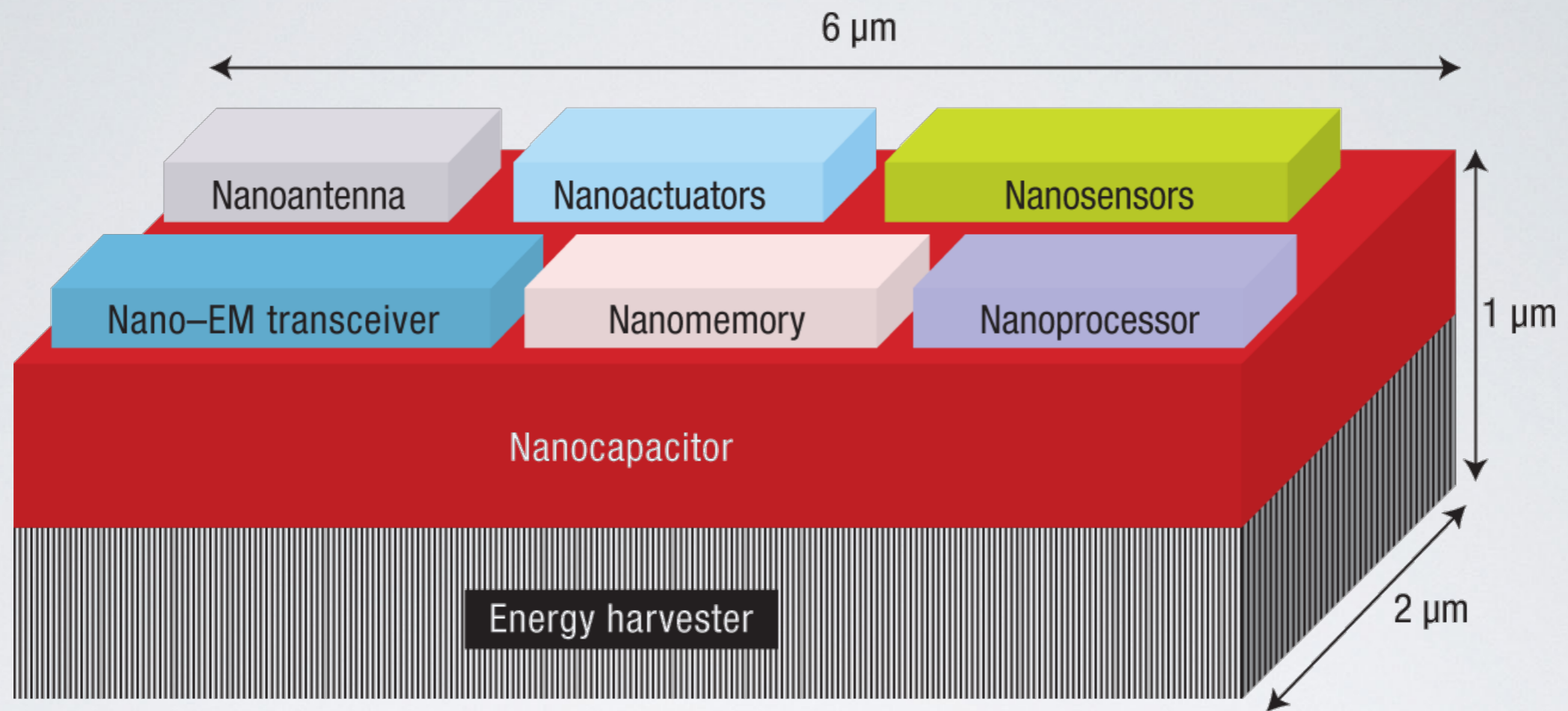
# NANO-NODES



- Παίζει το ρόλο του
  - νανο-αισθητήρα, και
  - νανο-ενεργοποιητή
- Μπορούν να εκτελέσουν απλούς υπολογισμούς
- Έχουν πεπερασμένη μνήμη
- Μπορούν να εκπέμπουν σε πολύ μικρές αποστάσεις
  - περιοσμένη ενέργεια,
  - χαμηλές δυνατότητες επικοινωνίας



# NANO-NODES



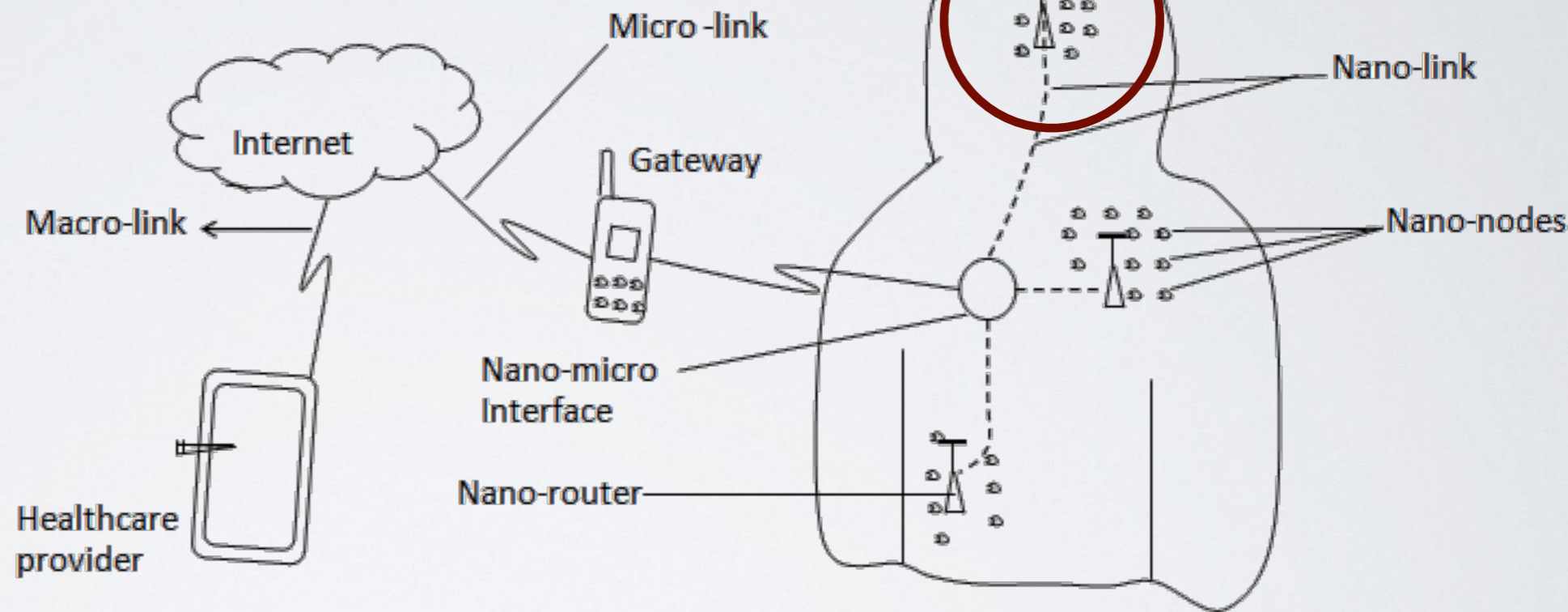
- Μέγιστη χωρητικότητα νανο-μπαταρίας: 800 pJ.
- Αποστολή ενός παλμού: 1 pJ.
- Λήψη ενός παλμού: 0.1 pJ.
- Λύση: Energy Harvesting.

# NANO-ROUTER

- Συλλέγουν την πληροφορία από τα nano-nodes και την προωθούν στο nano-micro interface

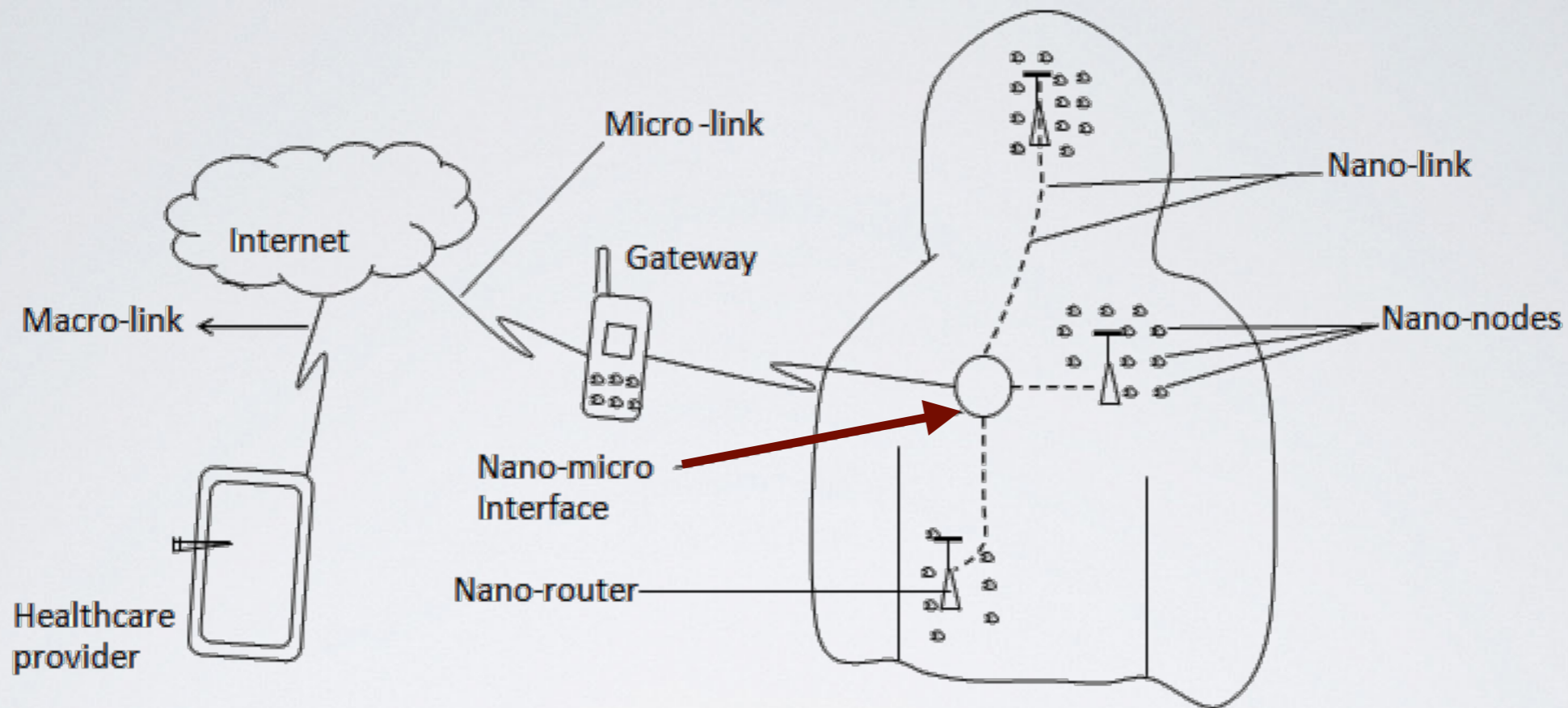
- Δίνουν εντολές ελέγχου στα nano-nodes:

- on/off
- sleep,
- read value,
- κ.α.



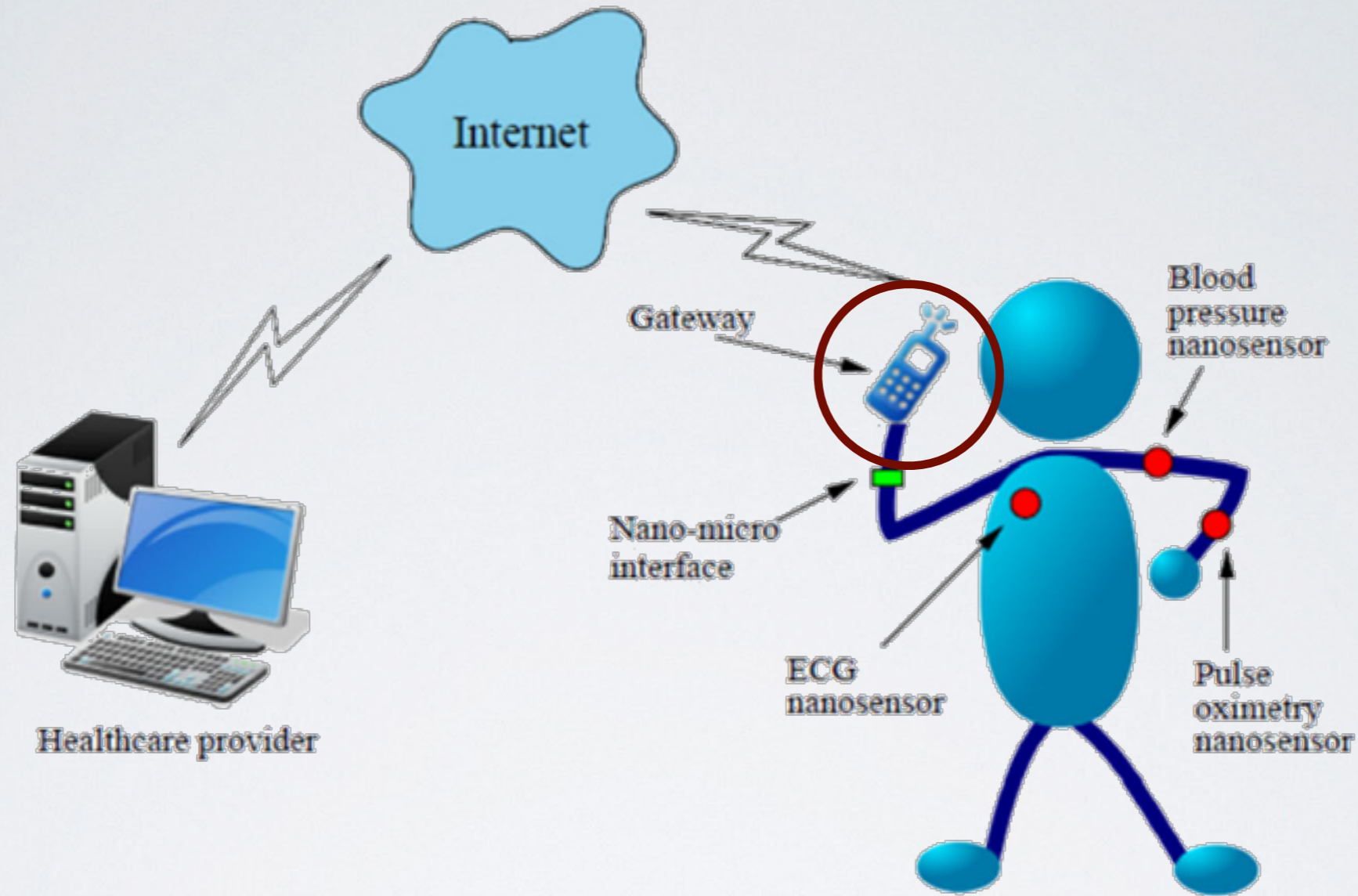
- Διαθέτουν μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ σε σχέση με τα nano-nodes
- Έχουν μεγαλύτερο μέγεθος

# NANO-MICRO INTERFACE



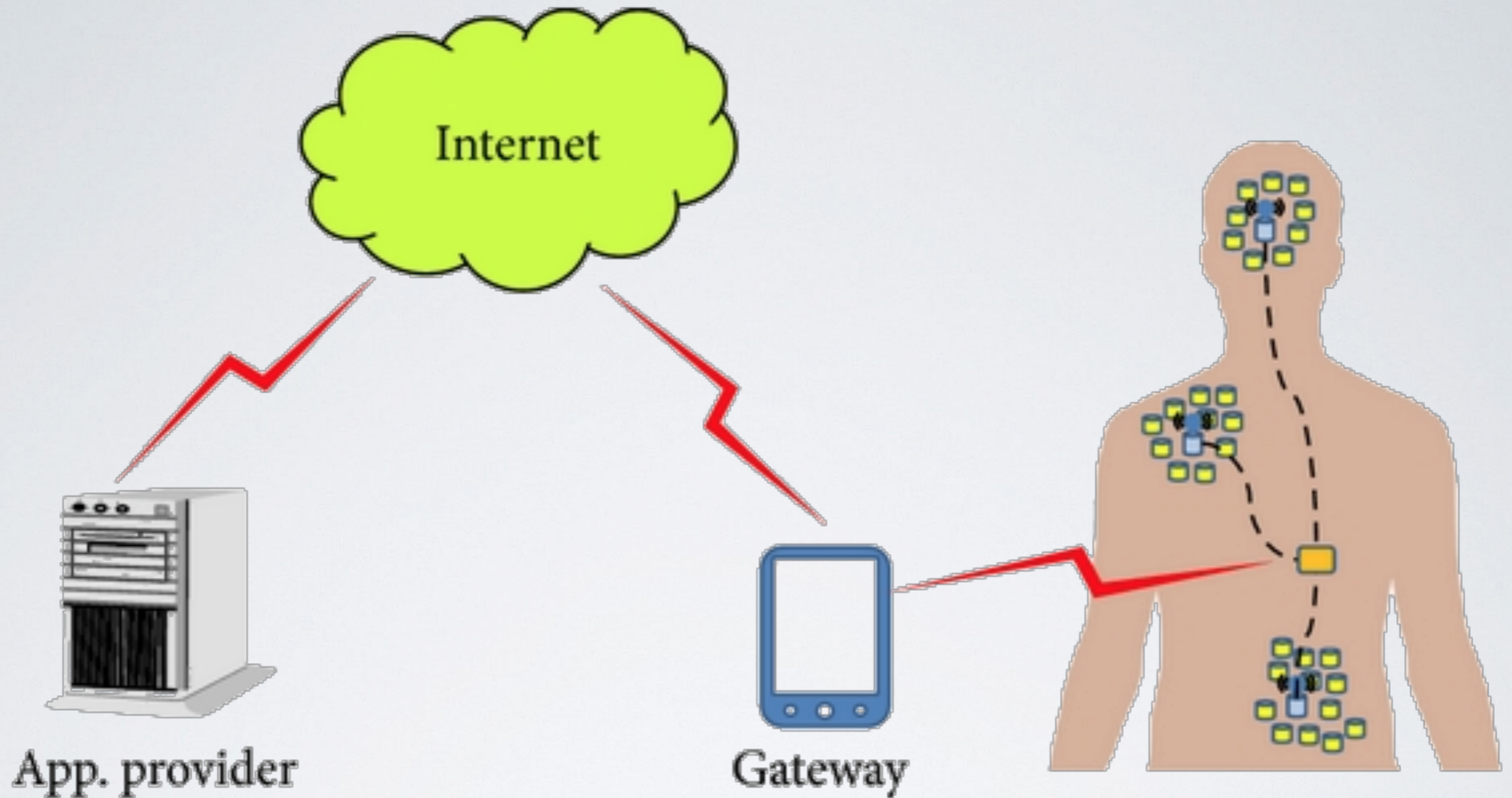
- Συλλέγουν τα σήματα που έρχονται από τα nano-router,
- τα μετατρέπουν το σήμα από σήμα νανο-επικοινωνιών σε RF.
- τα προωθούν στο gateway,
- και αντίστροφα.




# GATEWAY

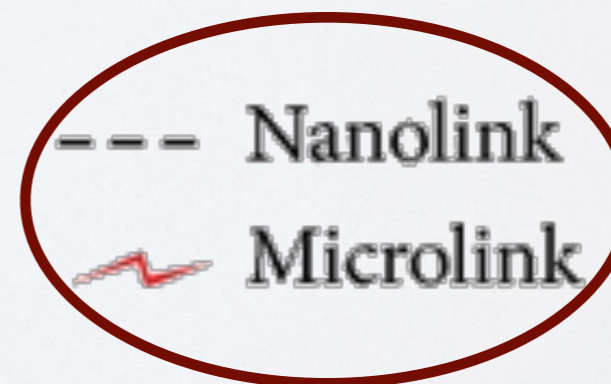


- Η συσκευή αυτή επιτρέπει τον απομακρυσμένο έλεγχο του δικτύου νανο-αισθητήτων μέσω του Internet.

# ΚΕΡΑΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ



-  Nanorouter
-  Nanosensors
-  Nano-microinterface



# ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Σε μία μεταλλική επιφάνεια, τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν με ταχύτητα που τείνει σε αυτή του φωτός.

$$f = \frac{3 \times 10^8}{\lambda}$$

Antenna Length  
( $\lambda/2$ )

Frequency

33.33 cm / 2 = 16 cm

900 MHz

12.5 cm / 2 = 6 cm

2.4 GHz

5 mm / 2 = 2.5 mm

60 GHz

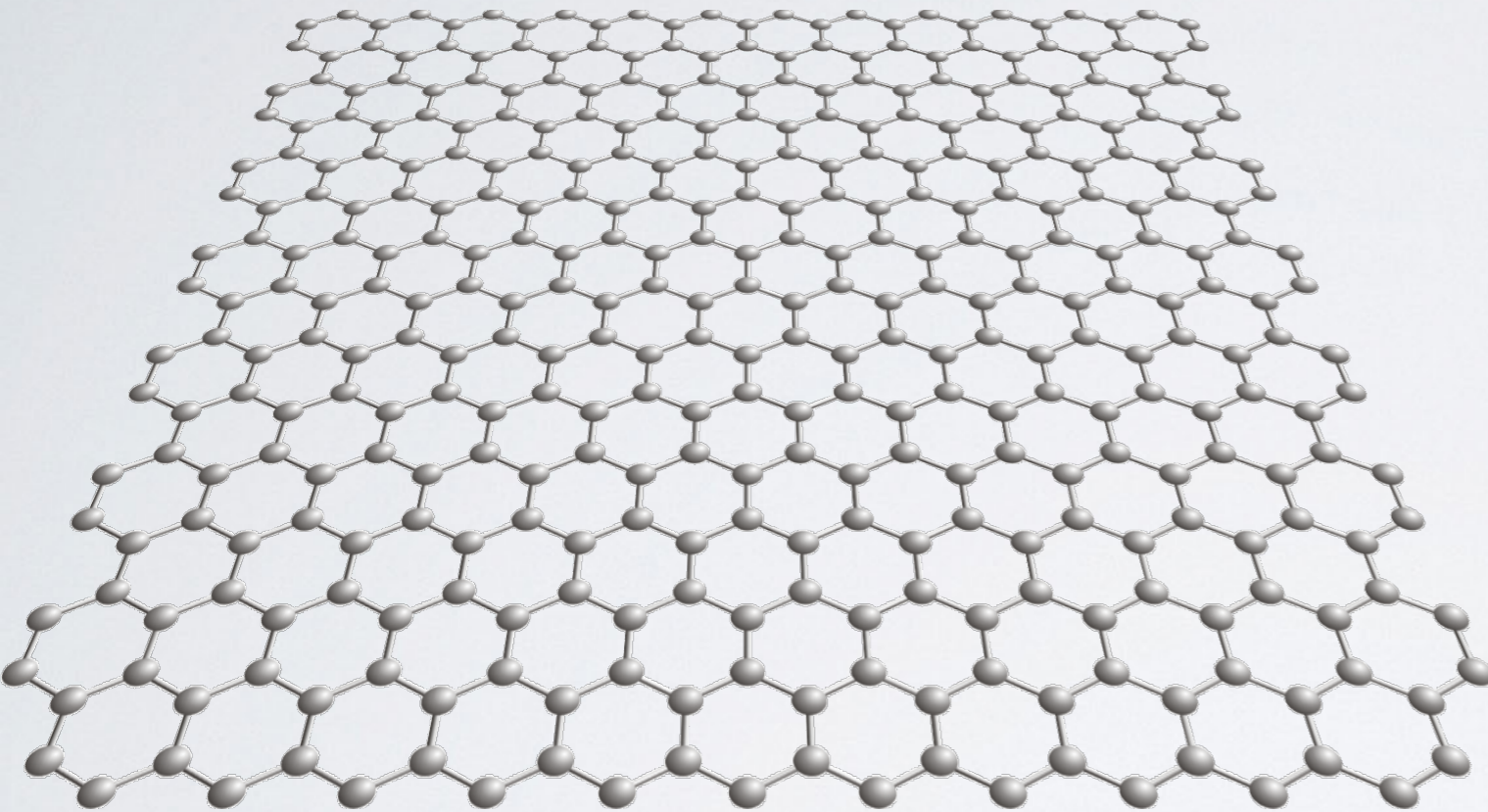
**4  $\mu\text{m}$  / 2 = 2  $\mu\text{m}$**

**150 THz**

Πολύ μεγάλες απώλειες



# Η ΑΝΑΚΑΛΥΨΗ ΤΟΥ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ



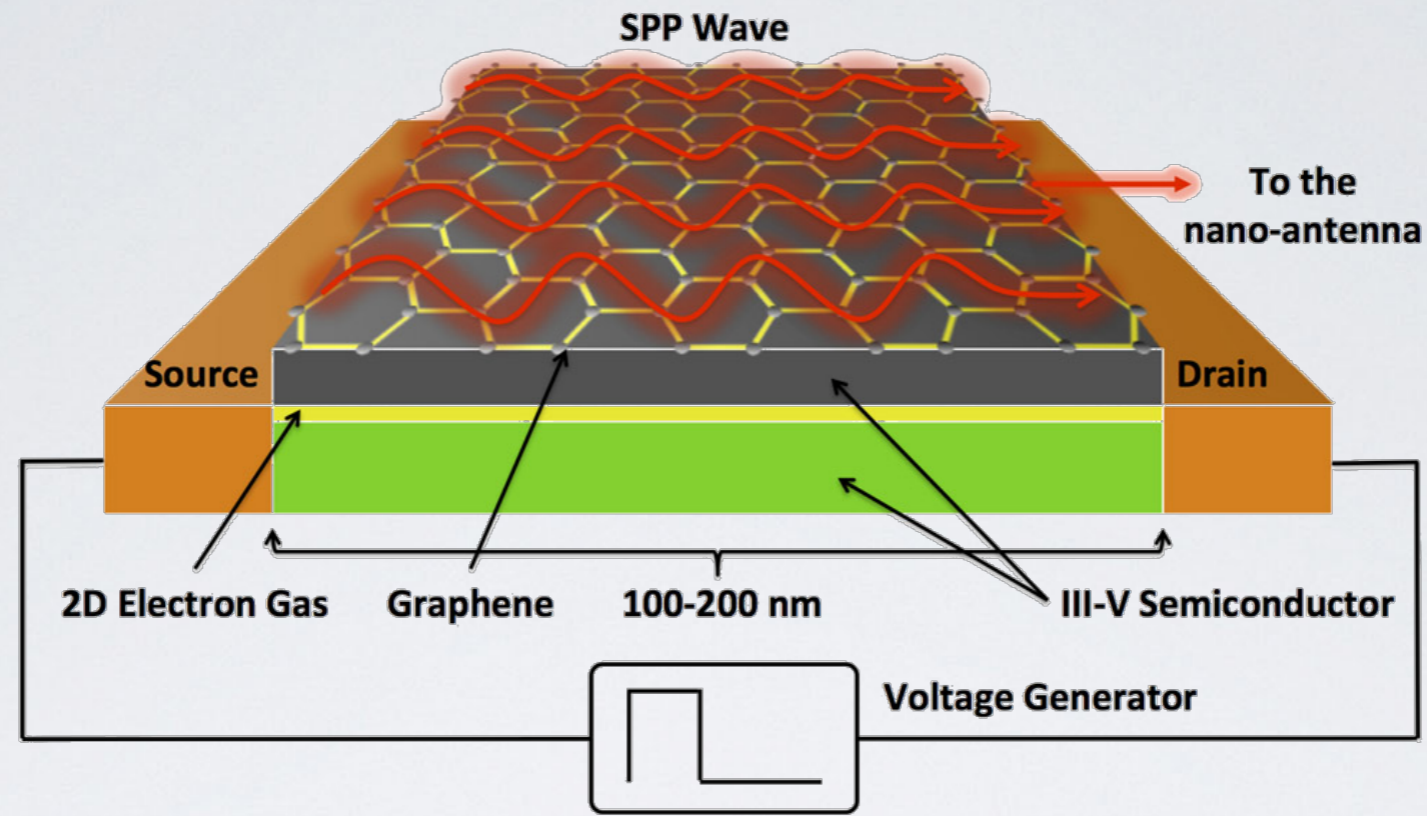
Nobel Φυσικής (2011)

Πάχος 1 ατόμου  
2D δομή κηρήθρας

Οι κηρήθρες μειώνουν την  
ταχύτητα του  
ηλεκτρονικού και 300  
φορές

Μεγαλύτερα μήκη  
κύματος (μικρότερες  
συχνότητες) μπορούν να  
χρησιμοποιηθούν για την  
κατασκευή μικρότερου  
μεγέθους κεραιών

# Η ΖΩΝΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΓΙΑ ΝΑΝΟ-ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ



- Μία κεραία στην νανο-κλίμακα που βασίζεται στο γραφένιο έχει συχνότητες συντονισμού στην ζώνη των **0.1-10 THz**.
- Εξαιρετικά ευρεία ζώνη
- Ένας νάνο σταθμός βάσης μπορεί να κατανήμει μη παρεμβαλόμενα κανάλια σε εκατομμύρια νανο-συσσκευές
- Αχρησιμοποίητη μέχρι στιγμής περιοχή του φάσματος
- Οι νανο-επικοινωνίες μπορούν εύκολα να συνυπάρξουν με τις μικρο και μακρο-υλοποιήσεις.
- Οι επικοινωνίες στην περιοχή των THz φαίνεται να μην έχουν επιβλαβείς επιπτώσεις στον άνθρωπο.



# ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΜΟΡΙΩΝ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΩΝ ΤΗΖ

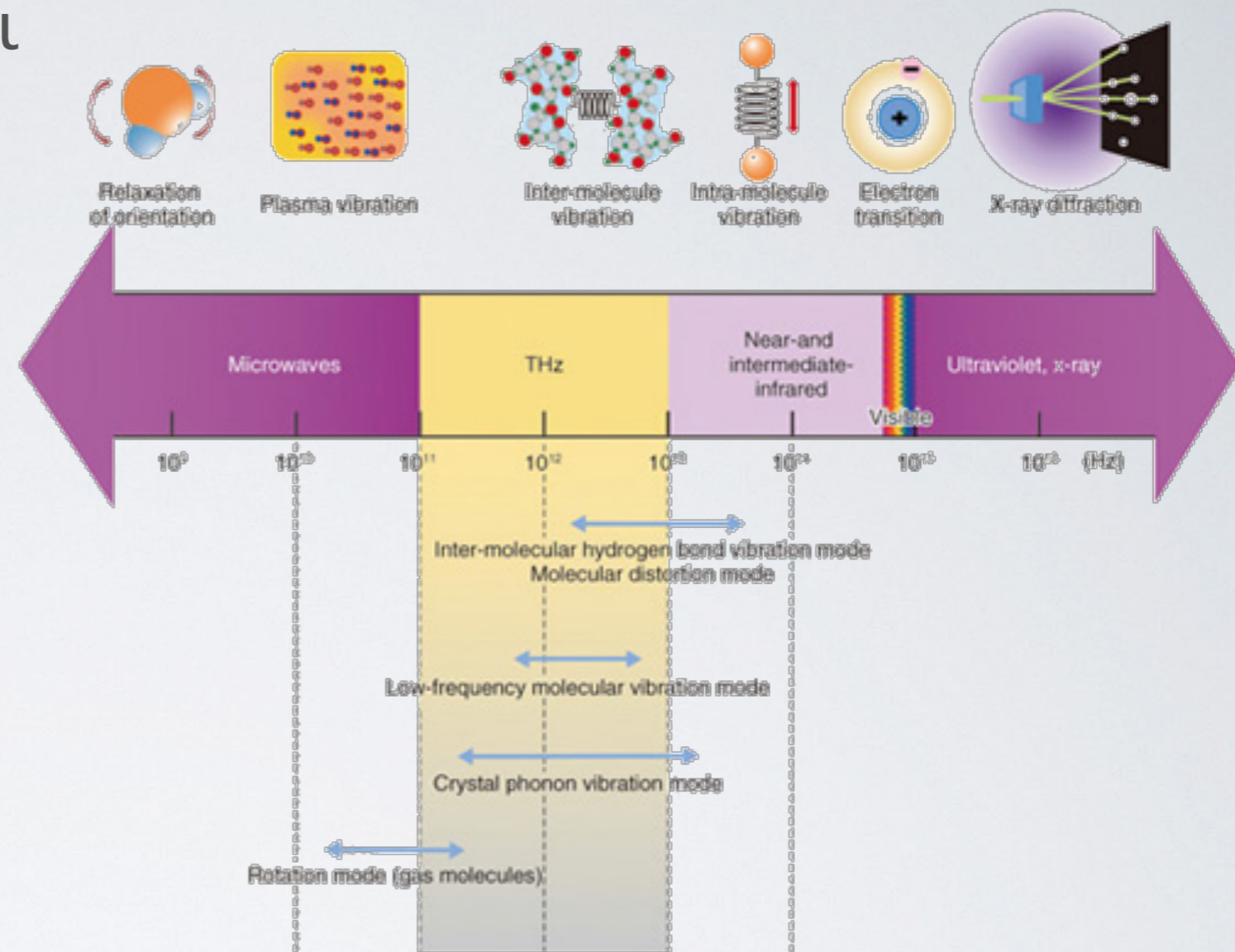
- Πολλά μόρια συντονίζονται στις συχνότητες των THz.

- Ένα συντονισμένο μόριο απορροφά ενέργεια από το σήμα.

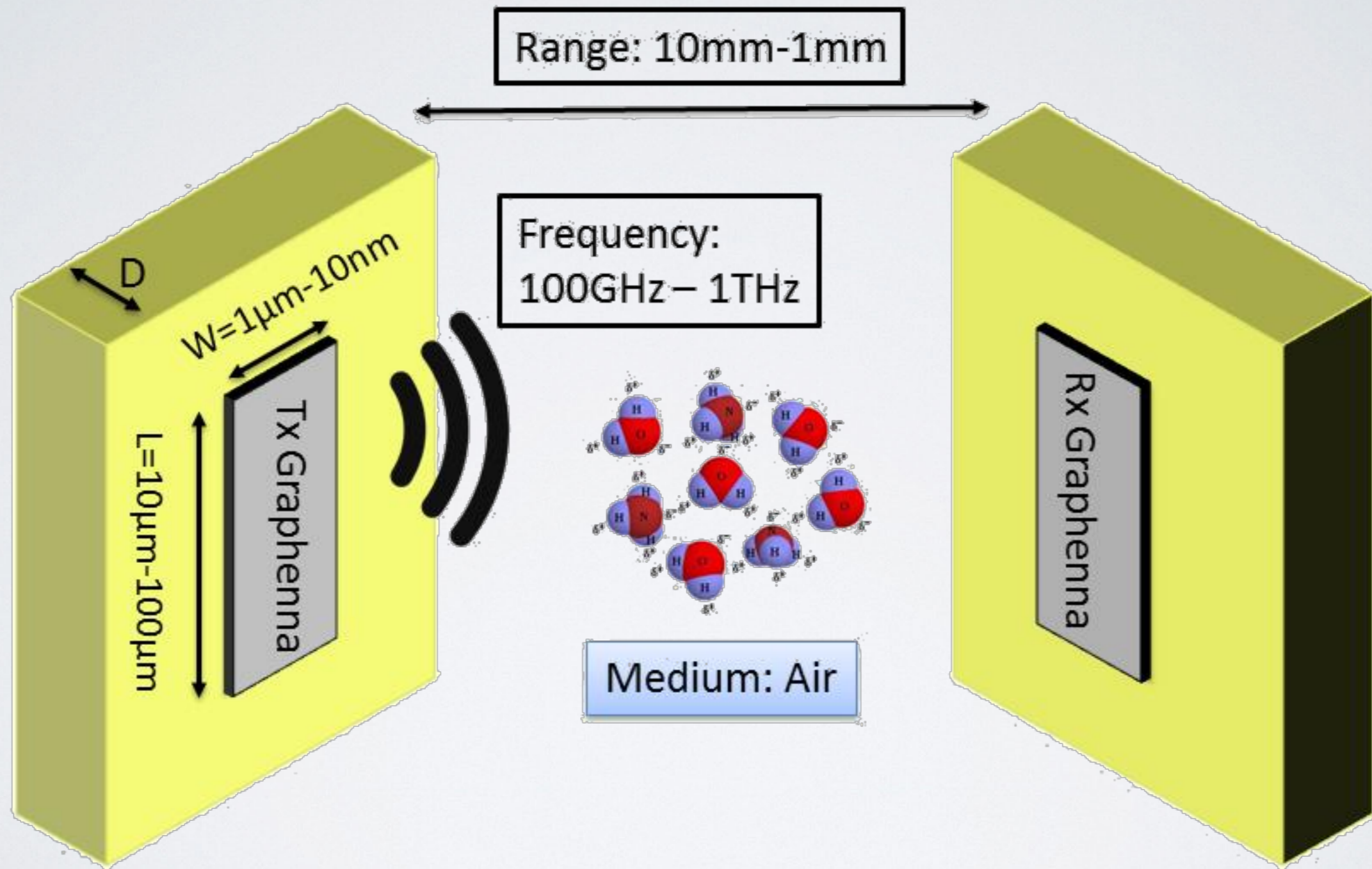
- Διαφορετικά μόρια έχουν διαφορετικές συχνότητες συντονισμού

- Διαφορετικά μόρια απορροφούν διαφορετική ποσότητα ενέργειας

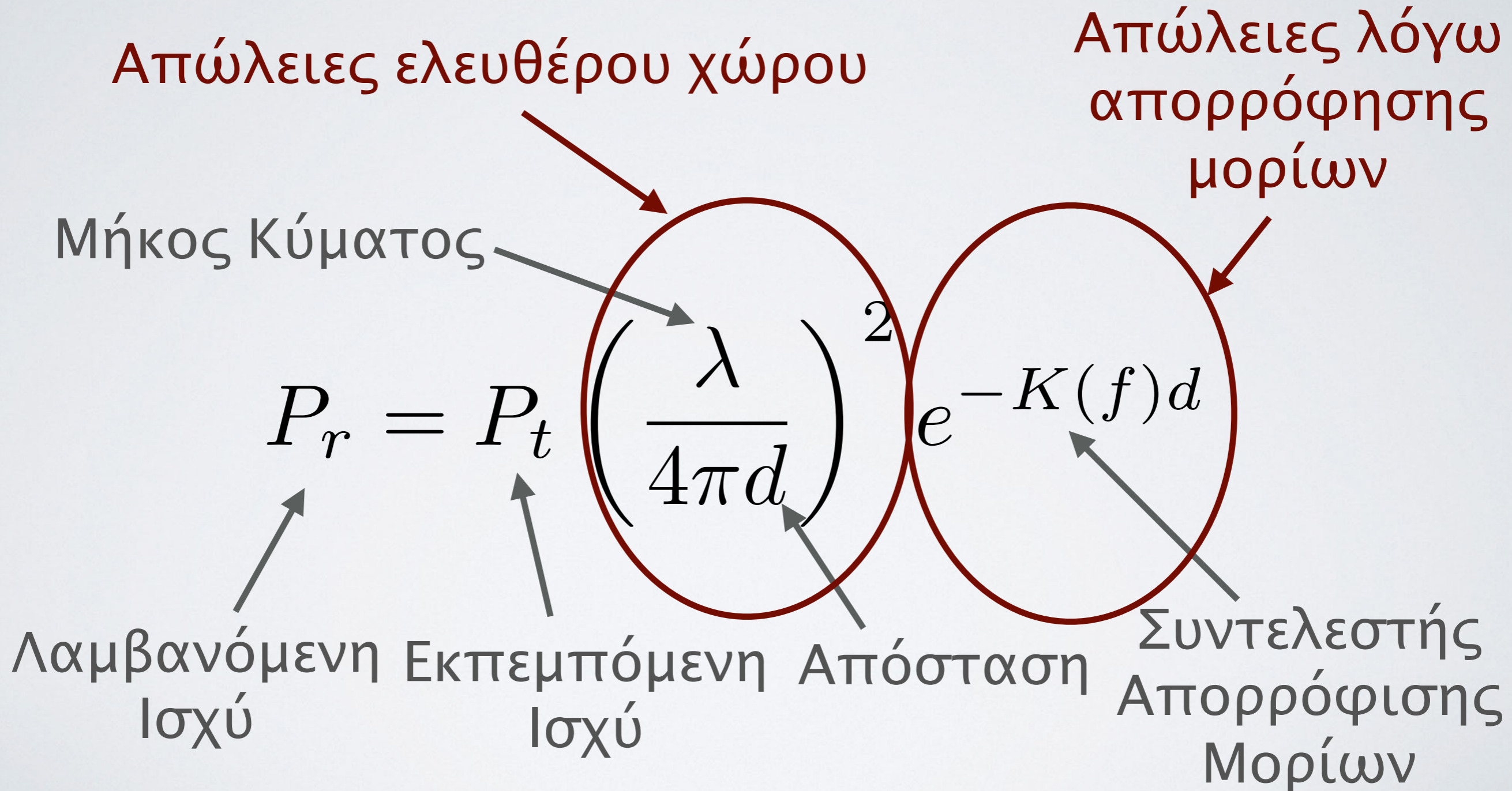
- Η απορρόφηση των μορίων εξαρτάται και από την πίεση και την θερμοκρασία



# NANO-ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ



# ΣΧΕΣΗ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΔΙΑΔΡΟΜΗΣ ΓΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΤΗΖ



# ΑΠΟΡΡΟΦΙΣΗ ΜΟΡΙΩΝ ΑΠΟ ΚΑΝΑΛΙ

Ο συντελεστής  
απορρόφισης  
του στοιχείου  $m$

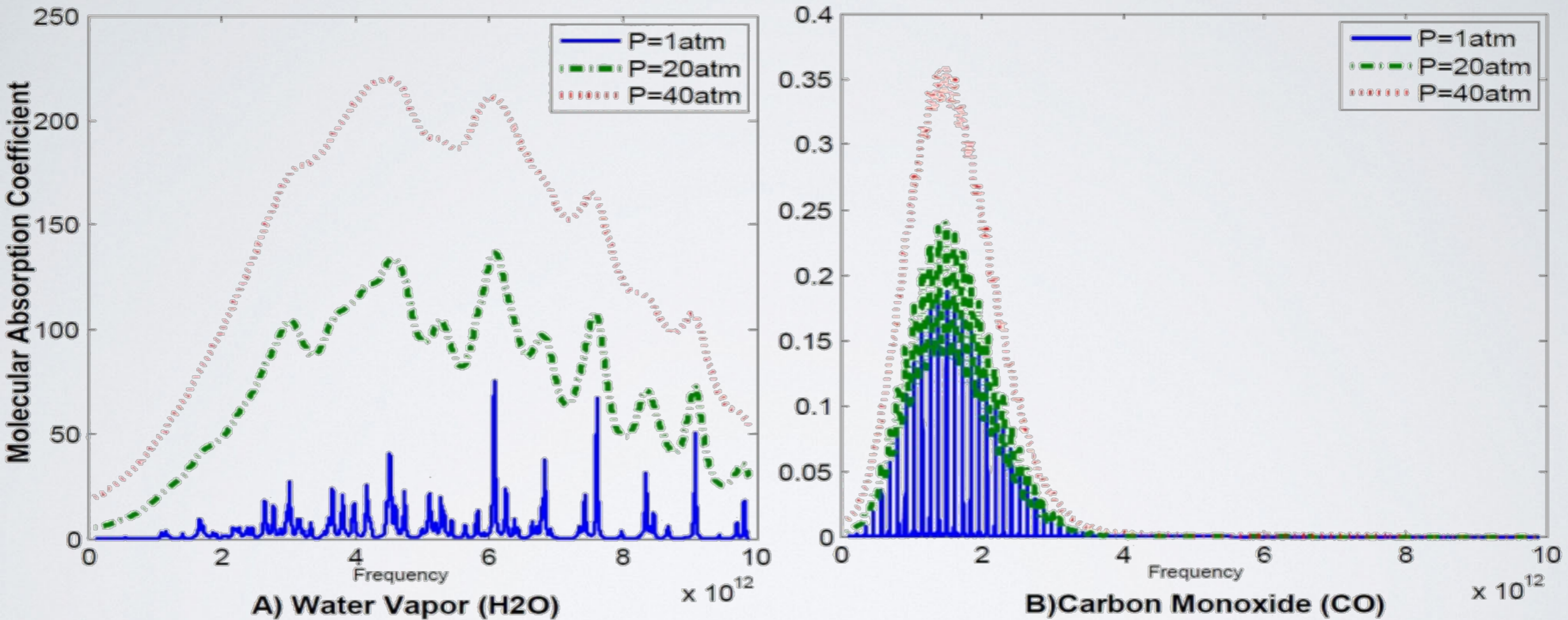
$$K = \sum_{m \in \mathcal{M}} z_m k_m$$

Το σύνολο των  
στοιχείων  
του καναλιού

Γραμμομοριακό  
κλάσμα (mole fraction)

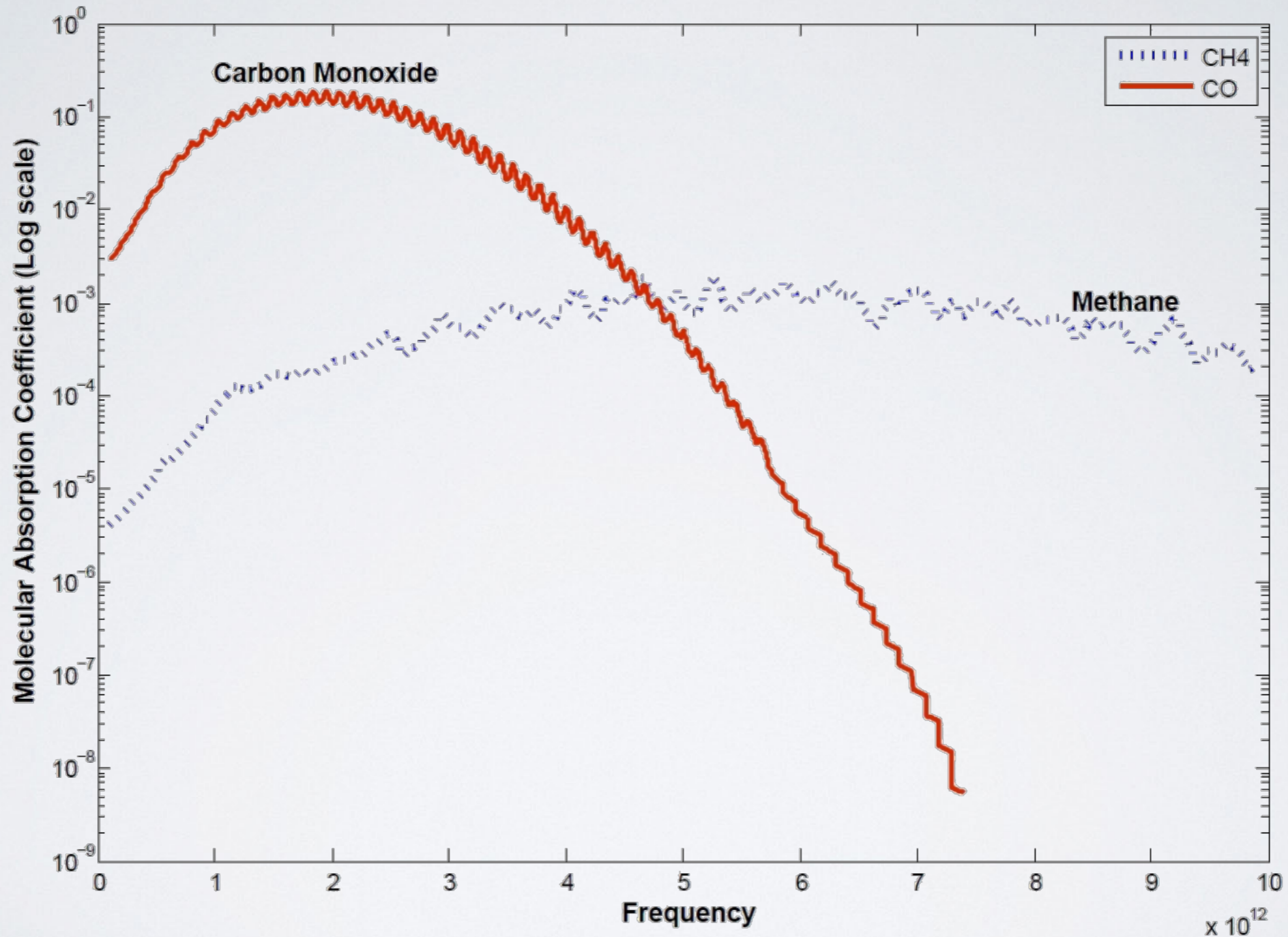
- Το κανάλι επικοινωνίας είναι τυπικά ένα σύνολο από διαφορετικών τύπων μορίων.
- Χρειάζεται να γνωρίζουμε τη σύνθεση των μορίων του καναλιού.

# ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΜΟΡΙΩΝ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΩΝ ΤΗΖ - Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΙΕΣΗΣ



Molecular Absorption Coefficient at 296 Kelvin

# ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΜΟΡΙΩΝ ΣΤΗ ΖΩΝΗ ΤΩΝ ΤΗΖ - Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΟΡΙΩΝ



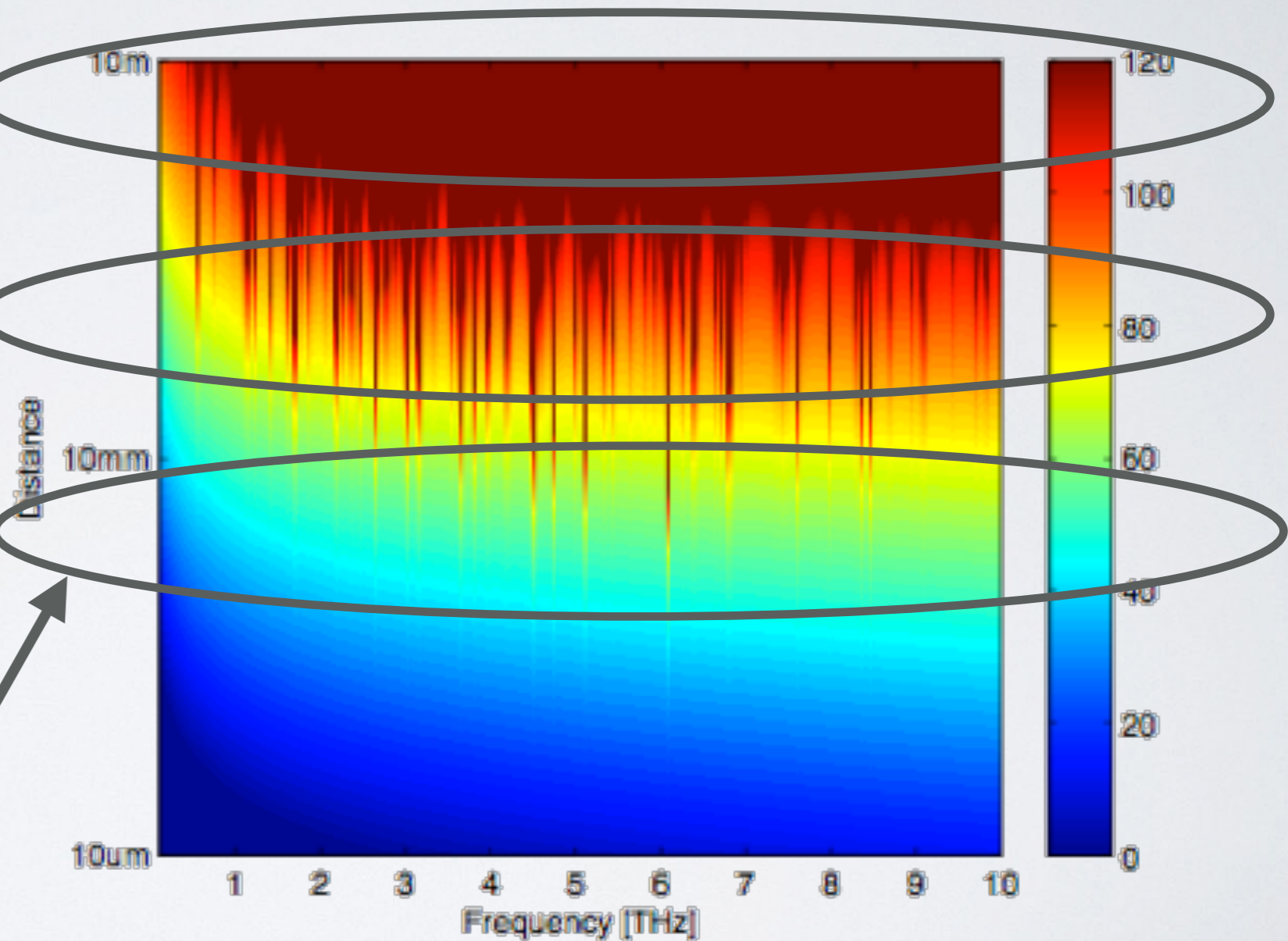
Molecular Absorption Coefficient at T=550 K P=40 atm.

# ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Σχεδόν μηδενική  
διάδοση σε αυτές  
τις αποστάσεις

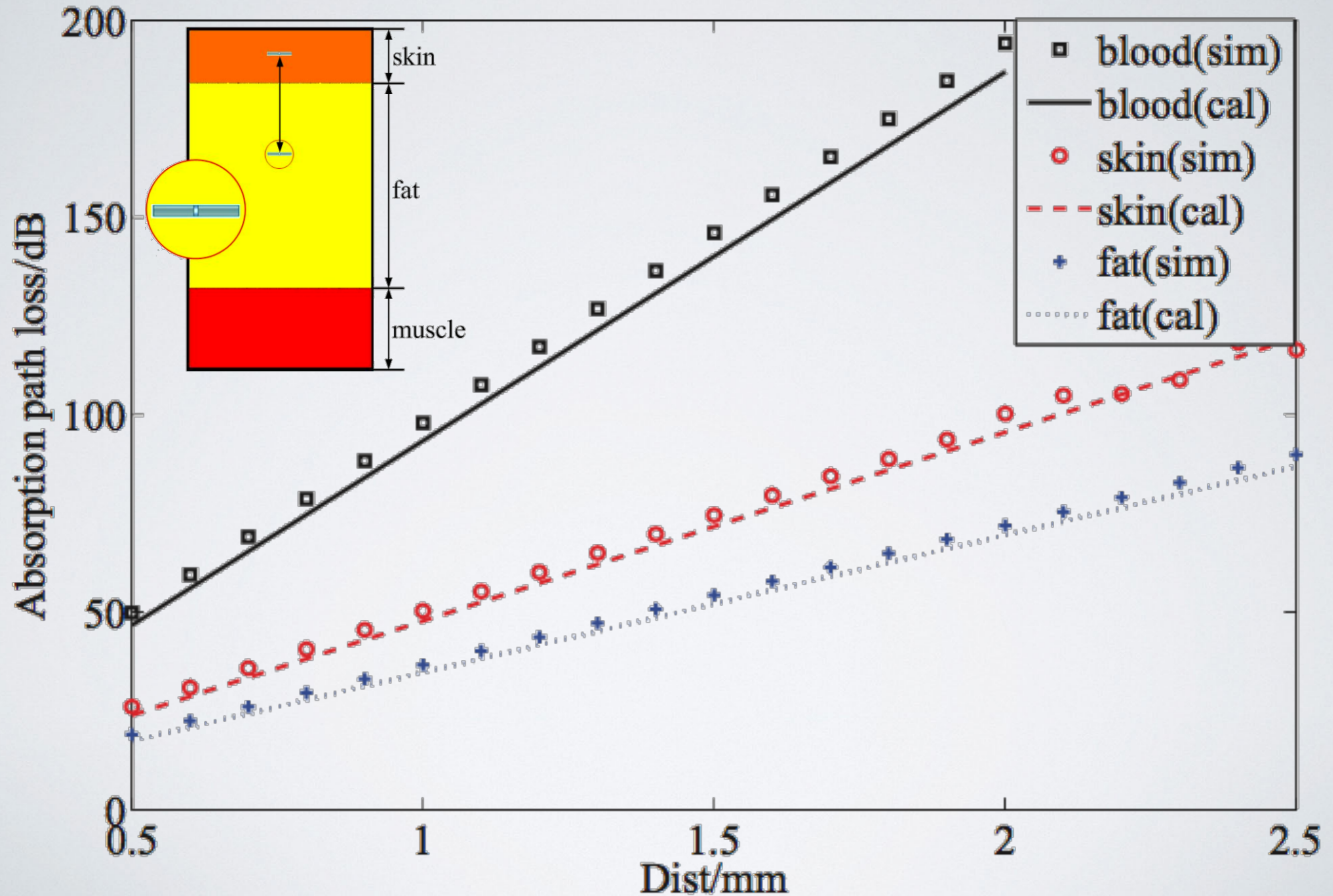
Αρκετά παράθυρα  
με εύρος ζώνης  
κάτι δεκάδες GHz

Σχεδόν 10 THz  
παράθυρο διάδοσης



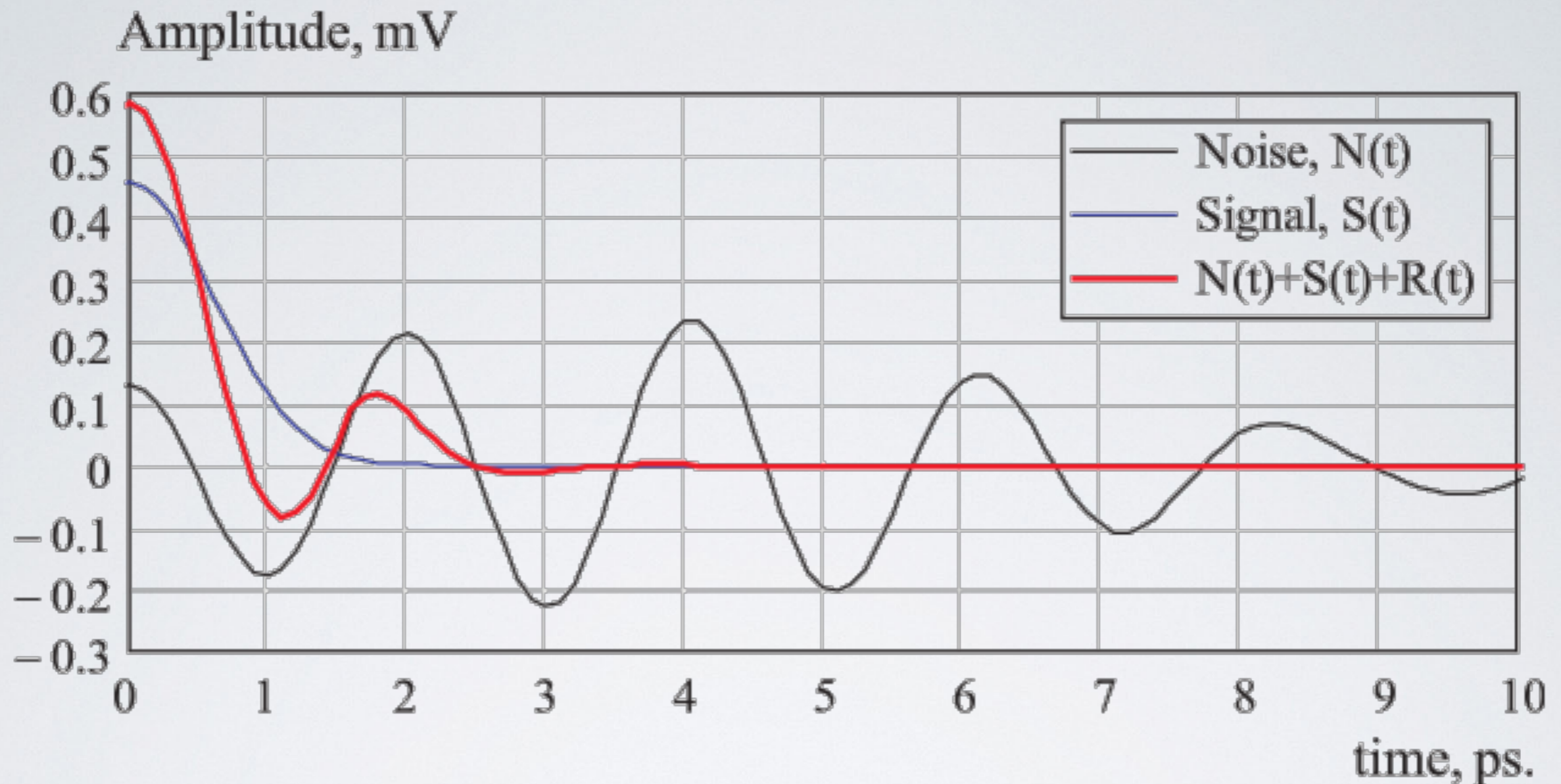
# ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΣ ΣΤΟ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟ ΣΩΜΑ

Comparison between numerical and analytical results





# ΘΟΡΥΒΟΣ

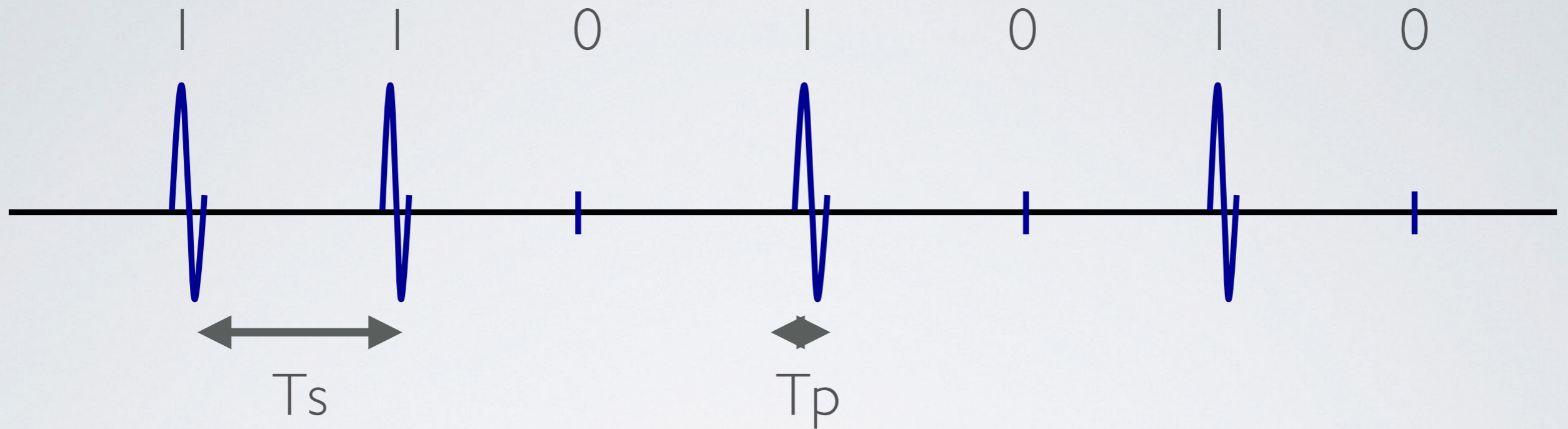


- Ο συνολικός θόρυβος στο δέκτη θα προέρχεται από:
  - Θόρυβο ηλεκτρονικών: σχετικά μικρός εξαιτίας της χρήσης του γραφενίου
  - Θόρυβος μορίων: εξαιτίας της απορρόφισης ενέργειας από τα μόρια.

# ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ & ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΝΑΝΟ-ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

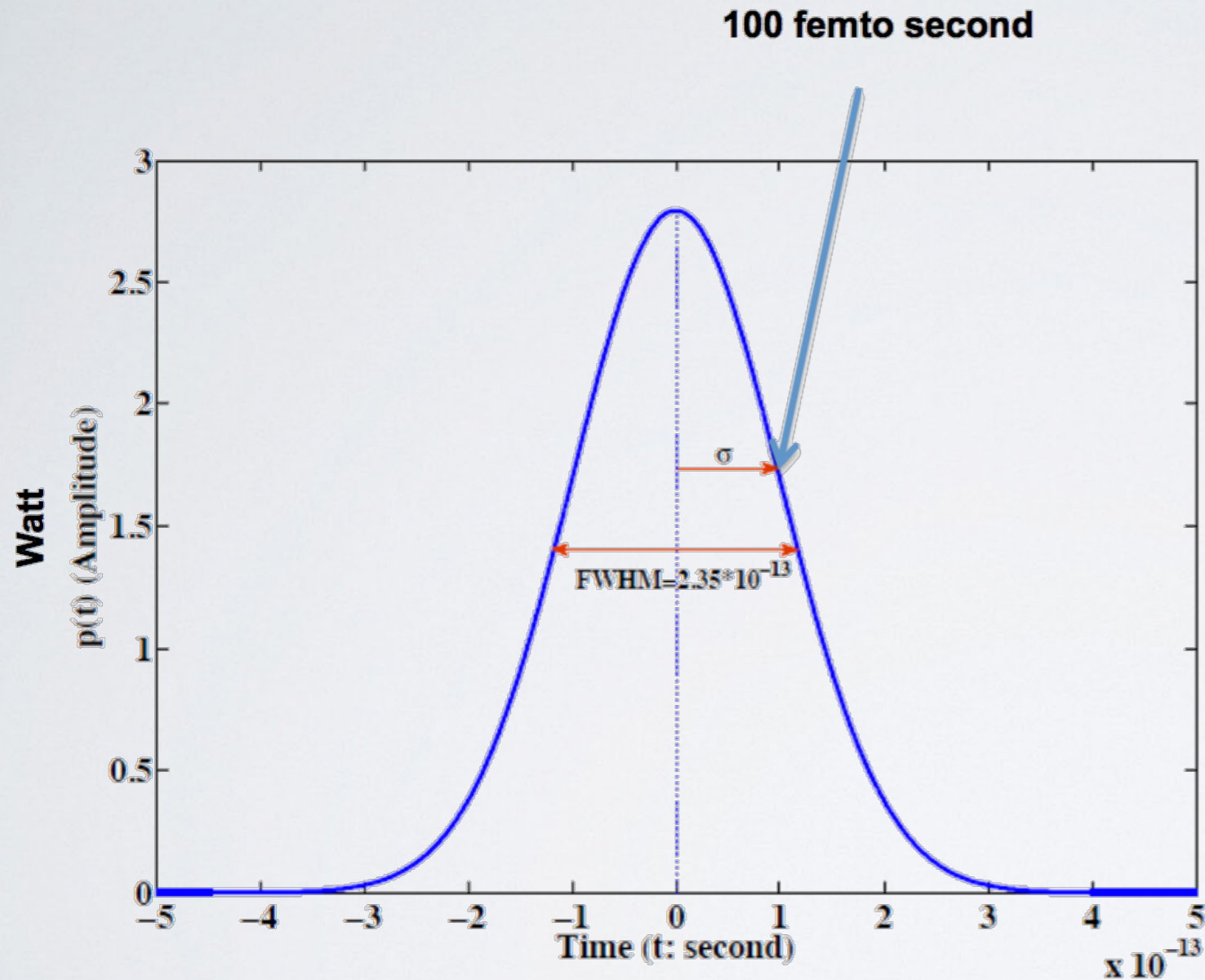
- Οι διαμορφώσεις φέροντος είναι ενεργειακά απαιτητικές
- Διαμορφώσεις που βασίζονται σε παλμούς έχουν προταθεί για νανο-επικοινωνίες
  - On-Off Keying (OOK)
    - Στέλνει παλμό για το '1'
    - Δεν στέλνει για το '0'
  - Time-spread OOK (TS-OOK): θεωρείτε ένα βελτιστοποιημένο OOK για νανο-επικοινωνίες.

# ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ & ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΓΙΑ ΝΑΝΟ-ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ



- Το λογικό “1” κωδικοποιείται με ένα παλμό
  - Διάρκεια παλμού:  $T_p = 100$  fs
  - Ενέργεια παλμού:  $< 1$  pJ !!!
- Το λογικό “0” στέλνεται σαν μη υπαρχη παλμού
  - Ιδανικά δεν χρειάζεται ενέργεια.

# ΓΚΑΟΥΣΙΑΝΟΣ ΠΑΛΜΟΣ



A 100-fs Gaussian pulse

$$p(t) = \frac{a_0}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln(2)}\sigma^2 \approx 2.35\sigma$$

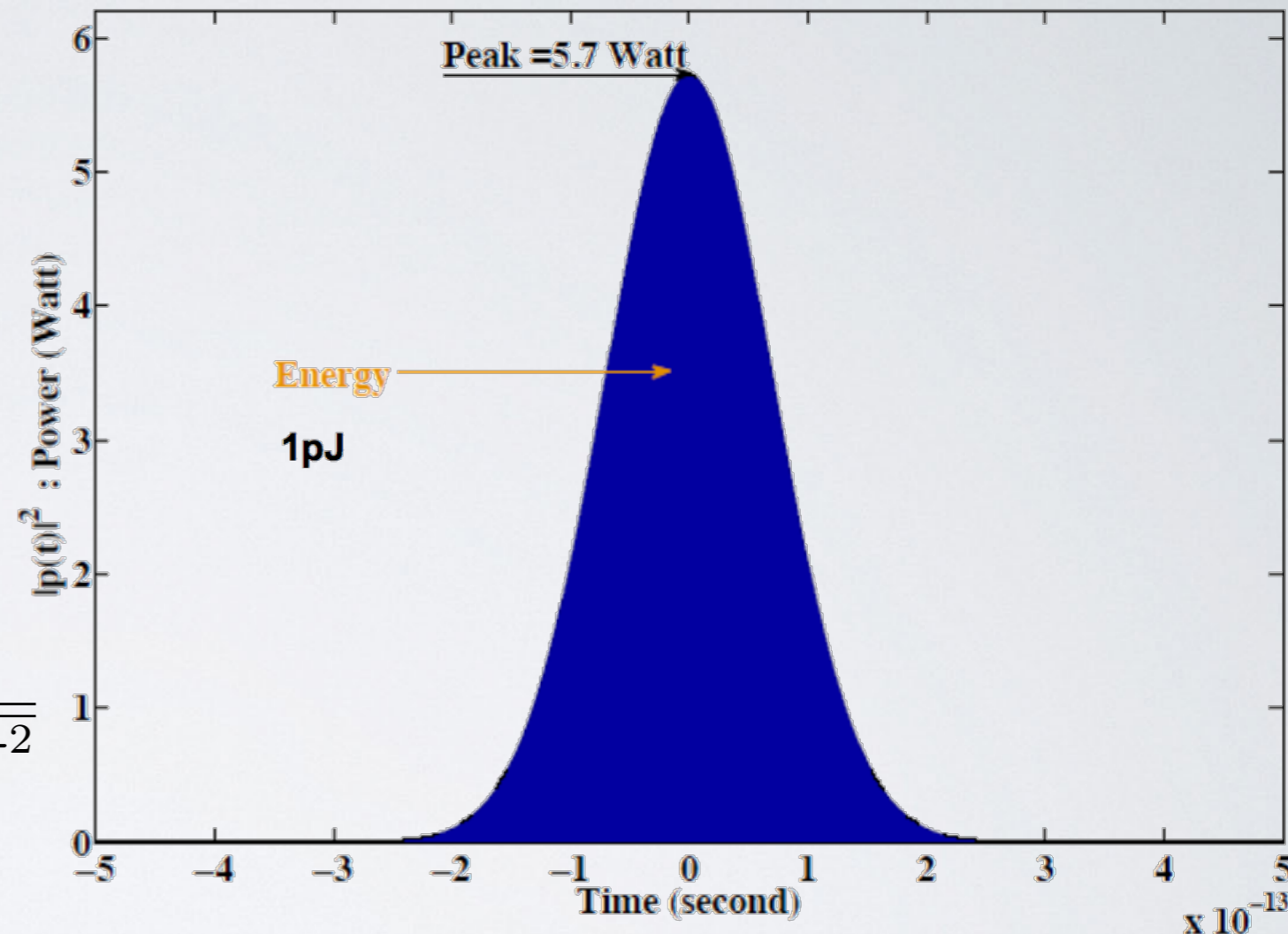
# ΓΚΑΟΥΣΙΑΝΟΣ ΠΑΛΜΟΣ

Ισχύ

$$p(t) = \frac{a_0}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Ενέργεια

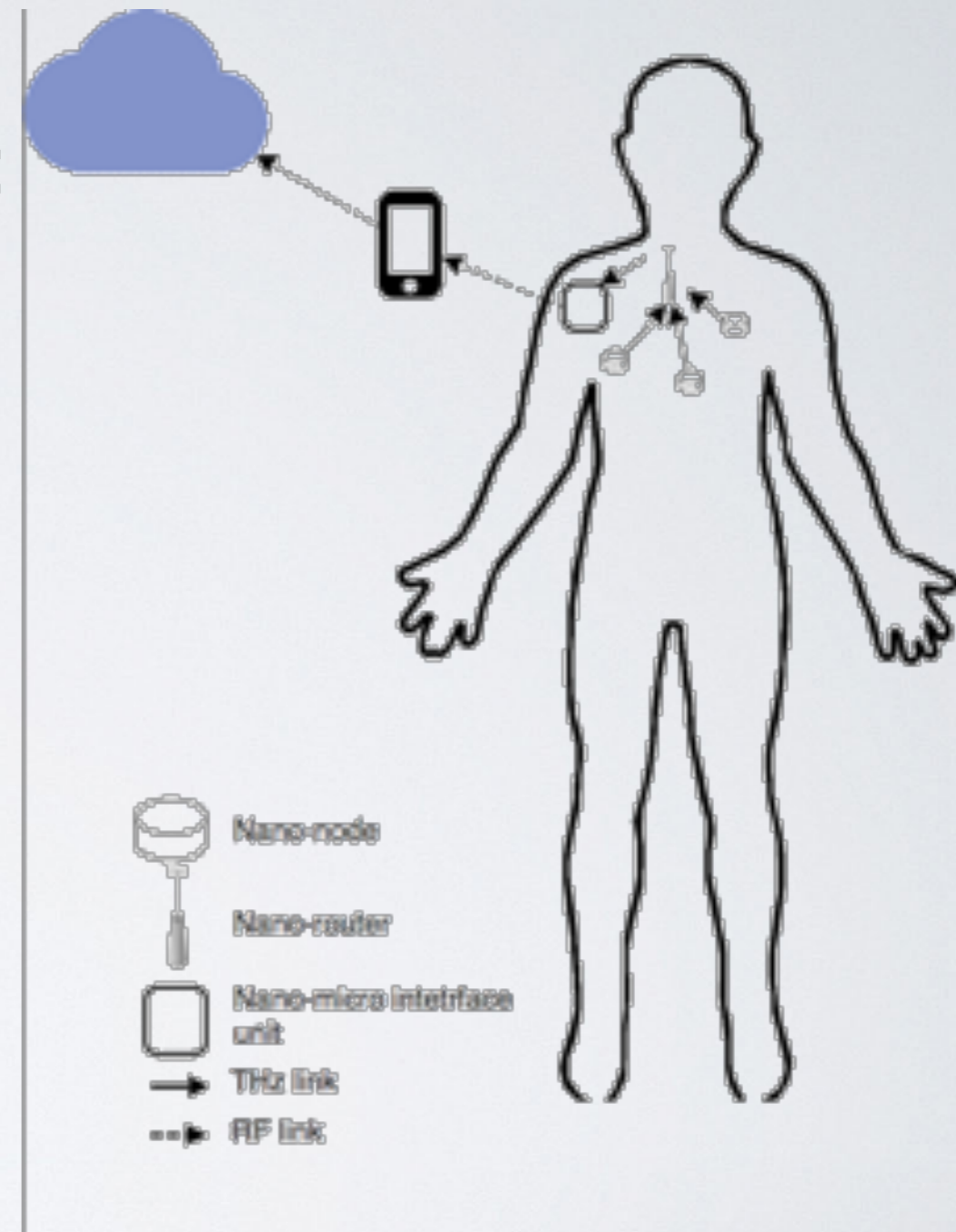
$$E_G = \int_{-\infty}^{+\infty} |p(t)|^2 dt = \frac{a_0^2 \operatorname{erf}\left(\frac{t}{\sigma}\right)}{4\sqrt{\pi\sigma^2}} = \frac{a_0^2}{2\sqrt{\pi\sigma^2}}$$



- Για την παραγωγή παλμού 100 fs ισχύος 2.55 Watt απαιτείται ενέργεια ίση με 1.1 pJ.

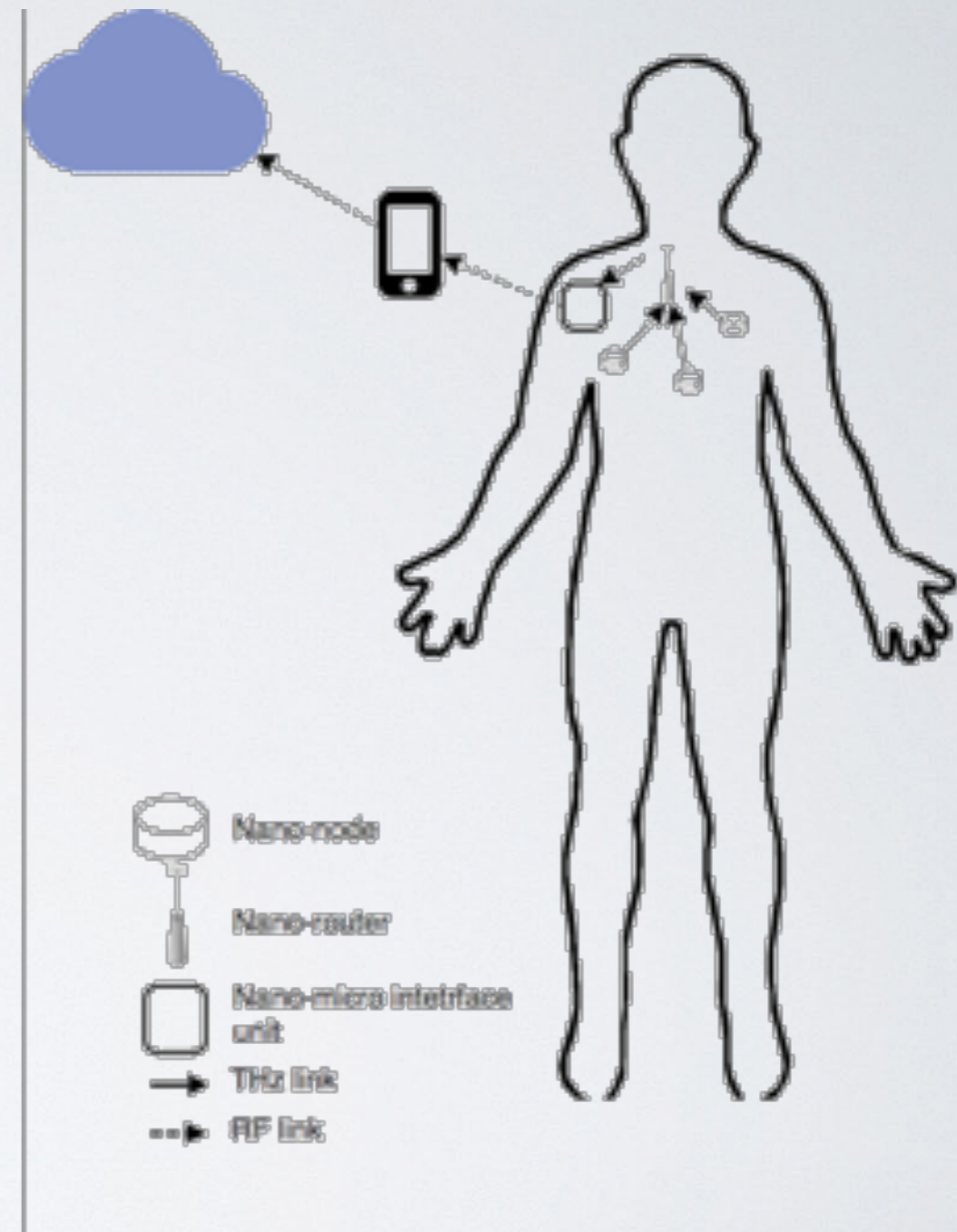
# ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

- Ακριβή μοντέλα καναλιών που λαμβάνουν υπόψιν τους:
  - την απορρόφιση των μορίων,
  - τον μοριακό θόρυβο,
  - το φαινόμενο των πολλαπλών διαλείψεων, κ.α.



# ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

- Νέες τεχνικές επικοινωνίας
  - παλμοί
  - διαμορφώσεις πολλαπλών φερόντων
  - συστήματα πολλαπλών κεραιών



# ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

- Νέες τεχνικές κωδικοποίησης πληροφορίας
- αντιμετώπιση χαρακτηριστικών καναλιού (χρονο μεταβλητότητα, όχι λευκός θόρυβος).

