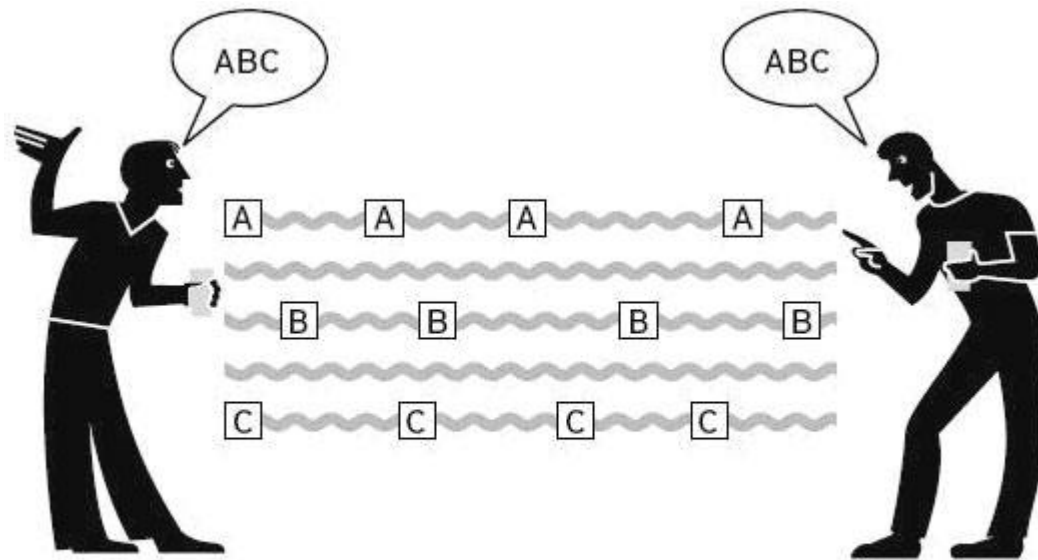
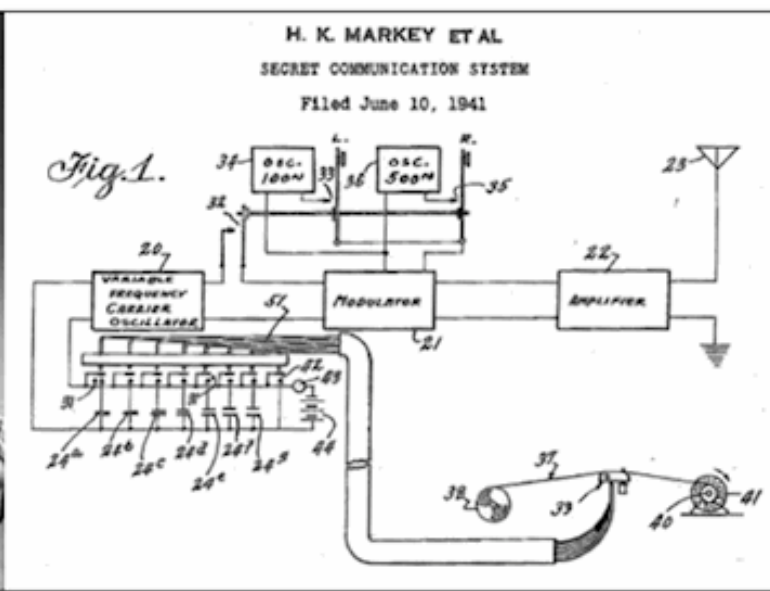
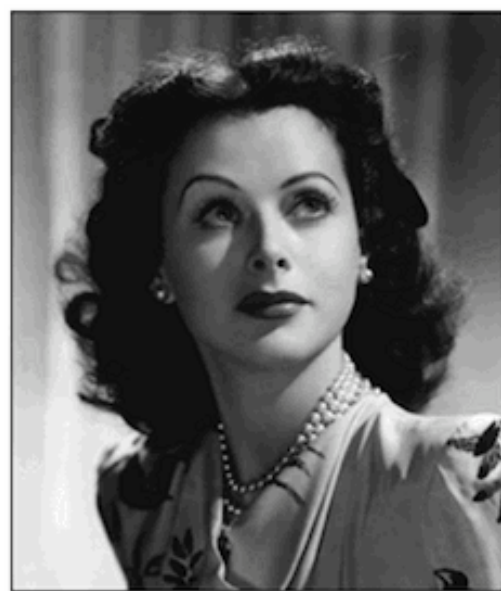


Il transistor, la diva del cinema e il computer (a carbone).

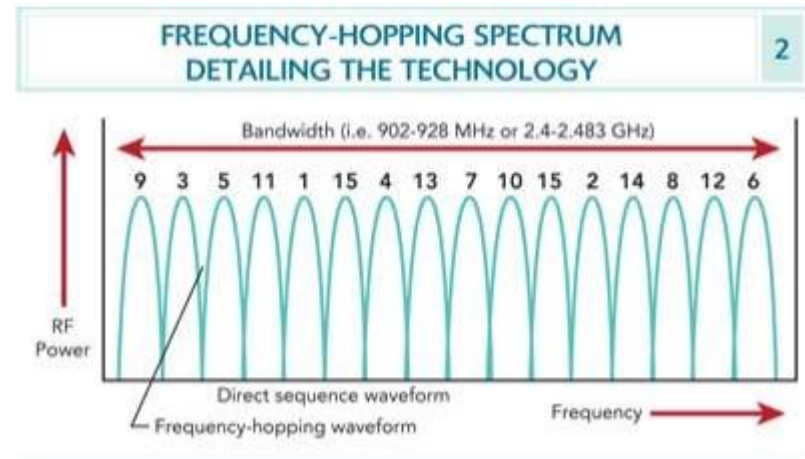
Prof. Claudio Goletti

Dipartimento di Fisica,
Università di Roma "Tor Vergata"
goletti@roma2.infn.it





SPREAD SPECTRUM: In spread-spectrum communications, low-power radio transmitters divide their signals into coded packets across a range of frequencies and receivers reconstruct the message.





Any girl can be glamorous. All you have to do is stand still and look stupid.

Hedy Lamarr

Cosa è l'elettronica? E che cosa era prima del transistor?

Enciclopedia Treccani

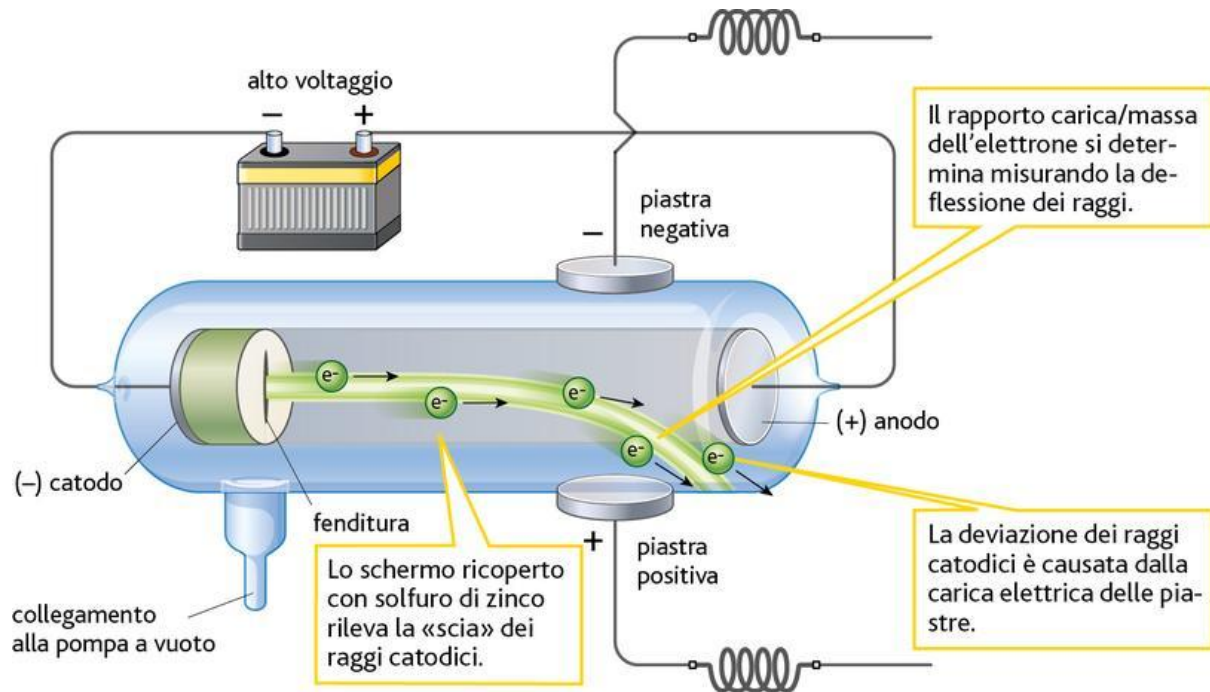
Treccani.it
L'ENCICLOPEDIA ITALIANA

“Il termine *elettronica* fu **introdotto intorno al 1940** per indicare quella parte della scienza elettrica dedicata allo studio dei fenomeni associati al moto di fasci di elettroni nel vuoto e nei gas (American standard definition of electrical terms, 1941).

La definizione di *elettronica* comprendeva anche i vari dispositivi, circuiti e applicazioni basati su tali fenomeni e, in particolare, i tubi a vuoto e a gas e molti dei dispositivi circuitali utilizzati in radiotecnica e nei sistemi di trasmissione telefonica.

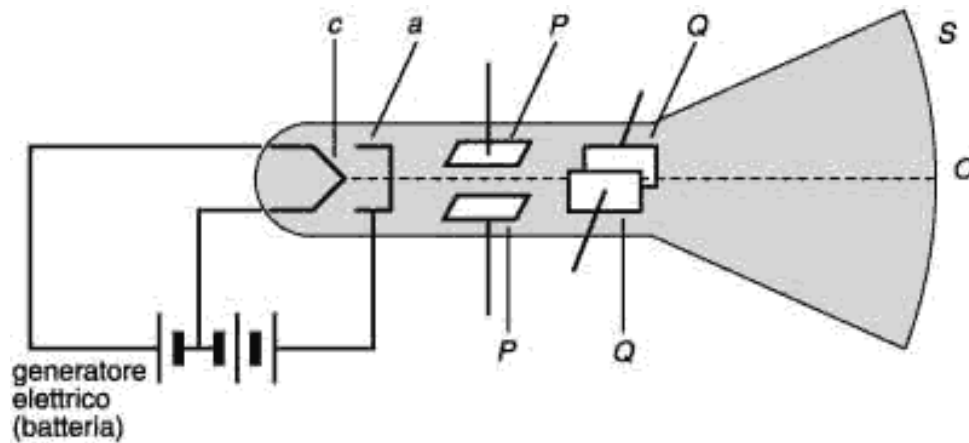
Poiché in tutti questi casi le intensità delle correnti elettriche e i livelli di potenza erano di gran lunga inferiori a quelli utilizzati nella elettrotecnica tradizionale, si usava anche la locuzione ‘tecnica delle correnti deboli’ come sinonimo di e., in contrapposizione a ‘tecnica delle correnti forti’ come sinonimo di elettrotecnica.”

1897 Joseph John Thompson: scoperta dell'elettrone



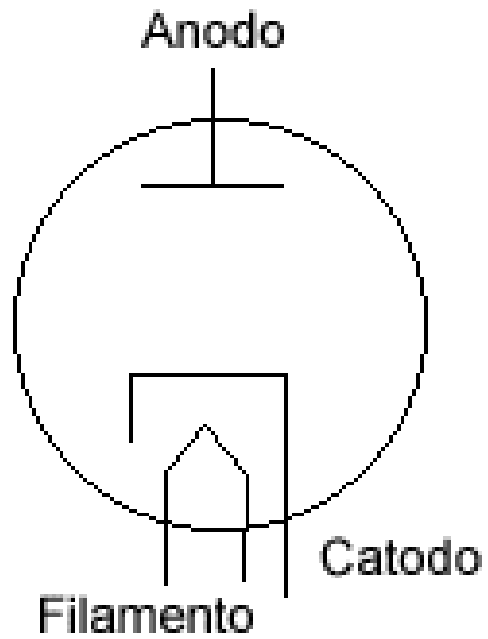
Premio Nobel della fisica 1906

1897 Karl Ferdinand Braun: primo tubo a raggi catodici

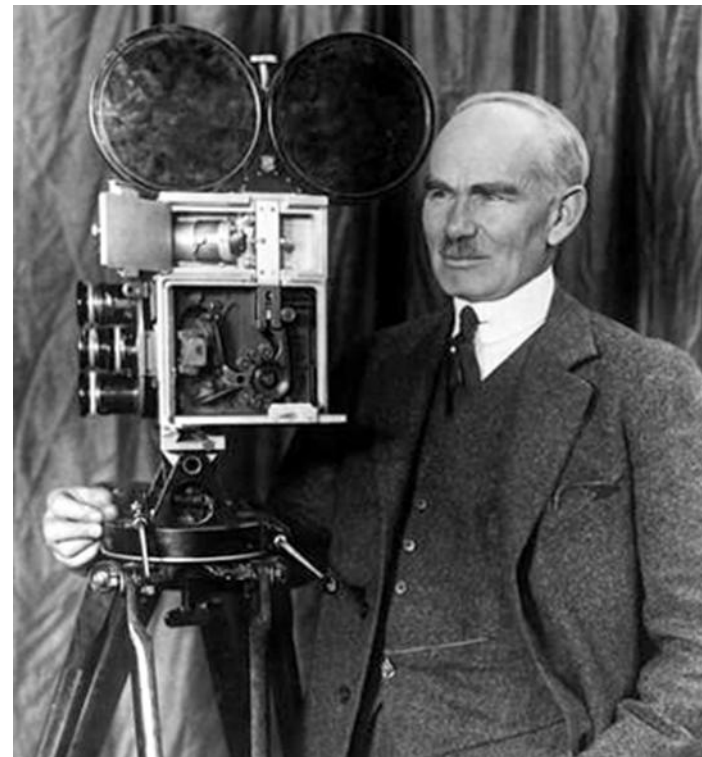
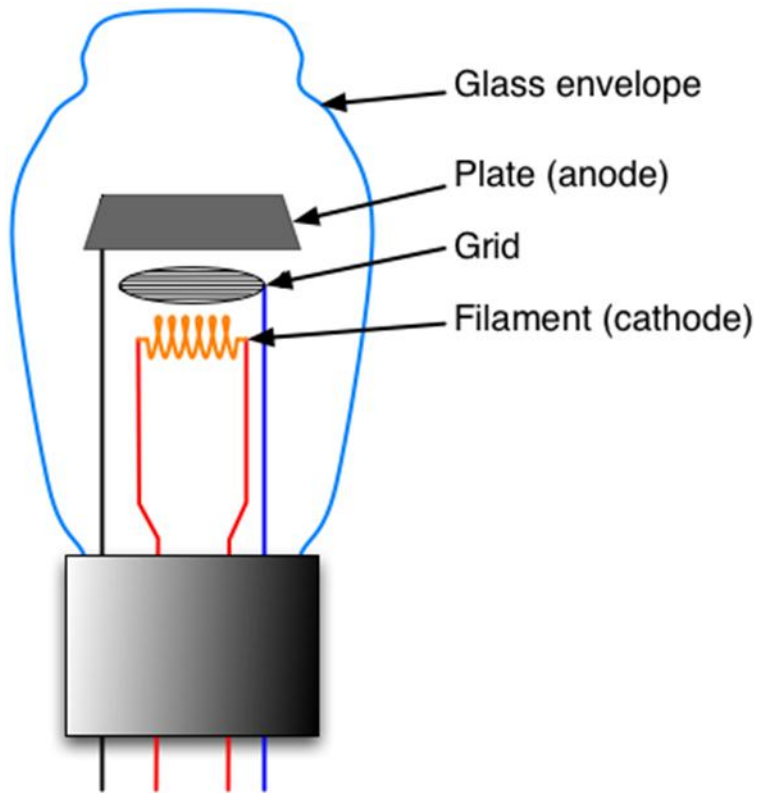


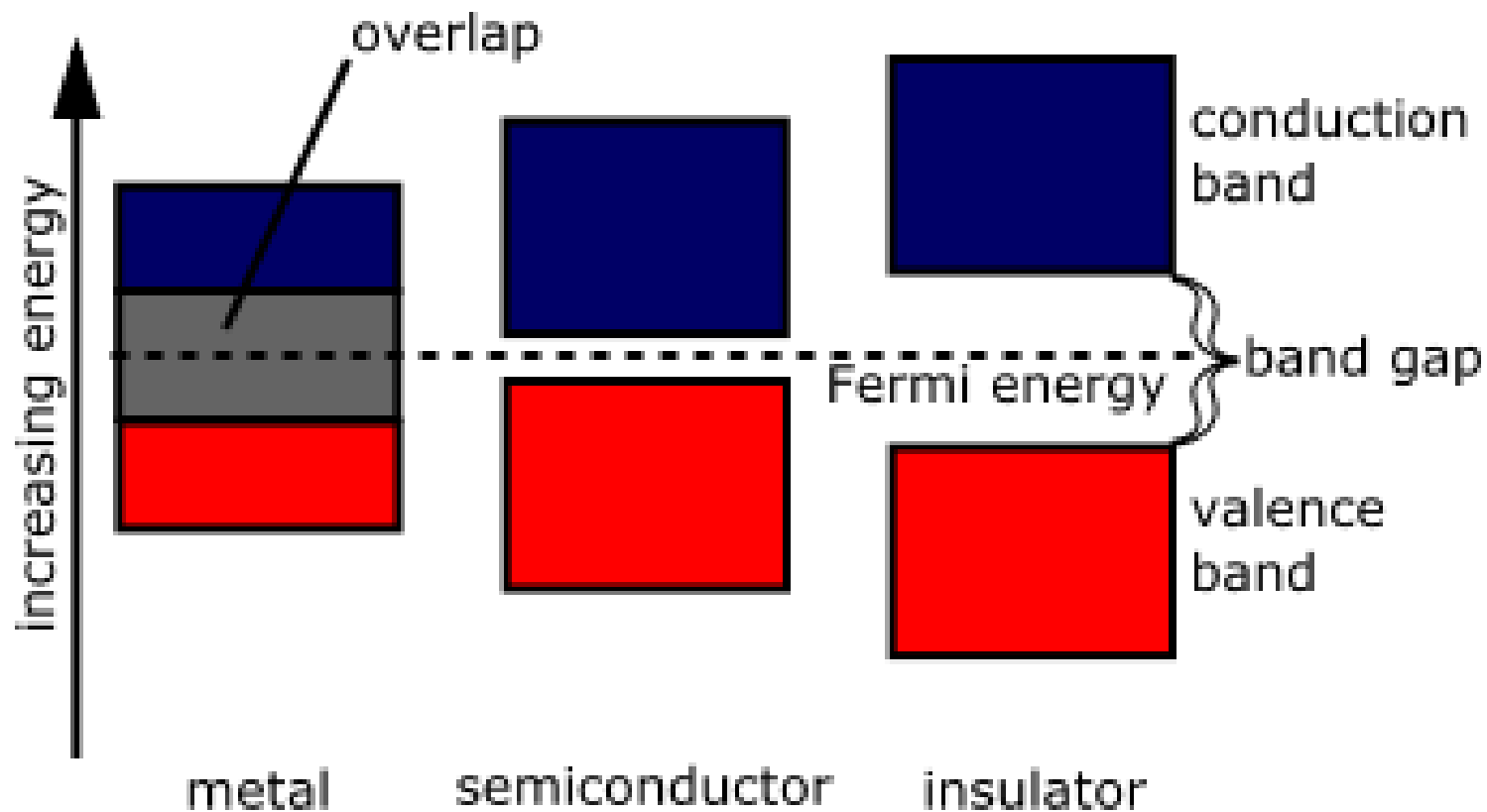
Premio Nobel della fisica 1909

1902 John Ambrose Fleming: primo diodo a vuoto

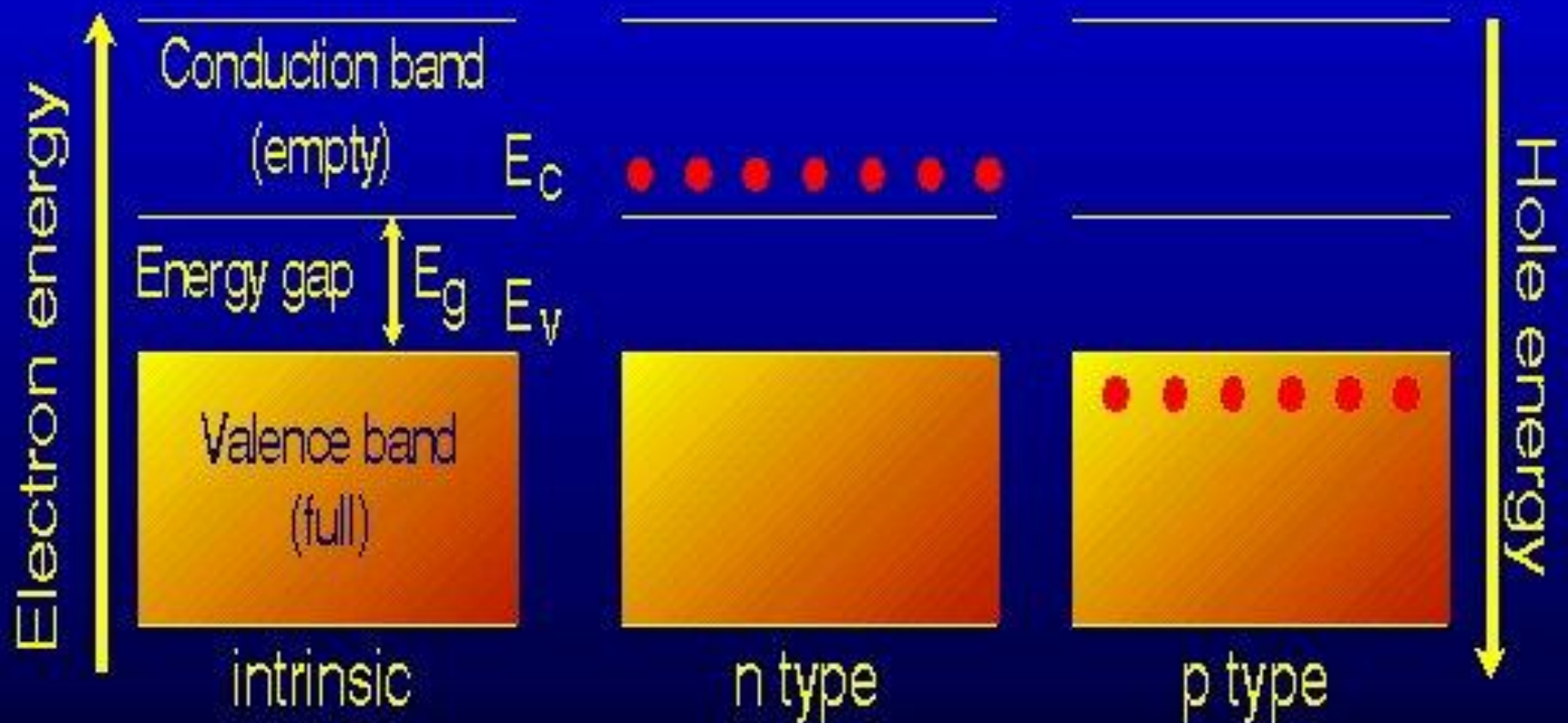


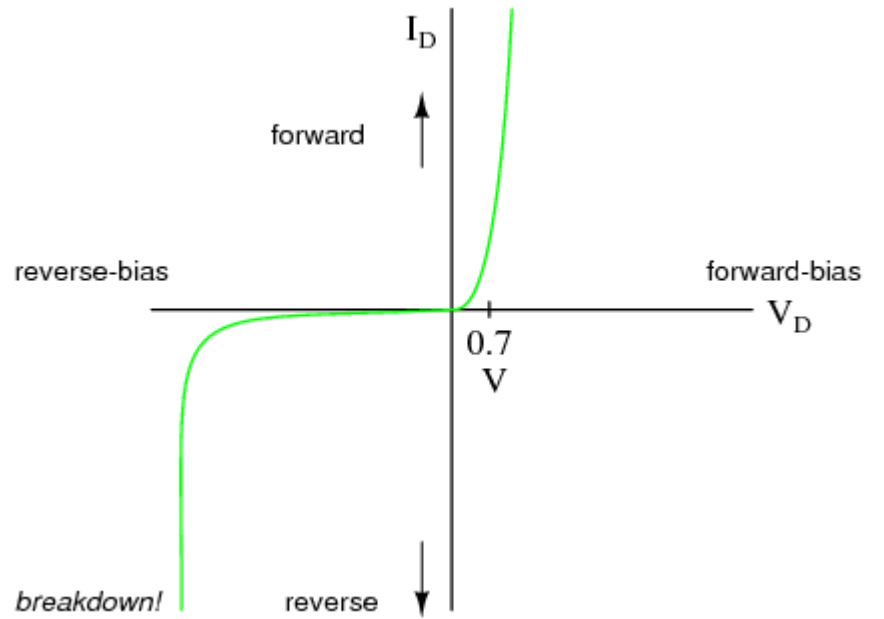
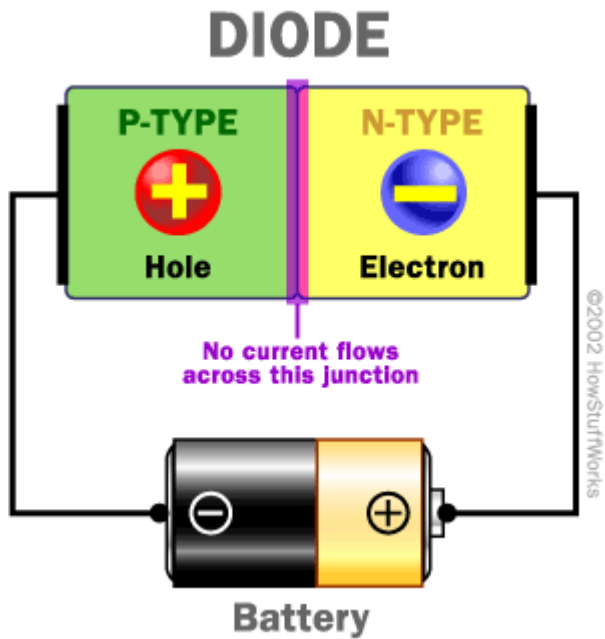
1906 Lee De Forest: il triodo (audion)



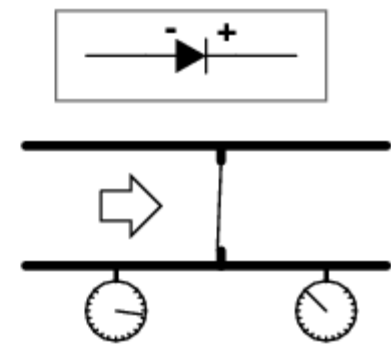
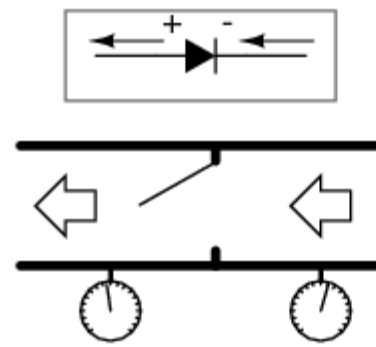


Band diagram and the electron-hole distribution in semiconductors





Hydraulic check valve

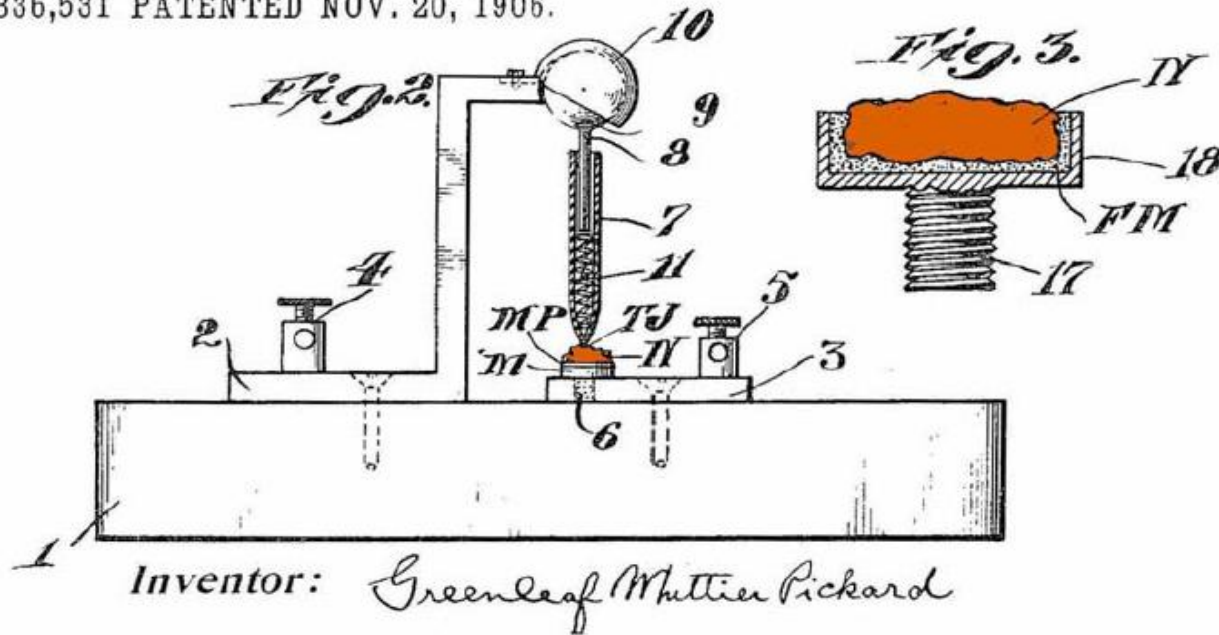


G. W. PICKARD.

MEANS FOR RECEIVING INTELLIGENCE COMMUNICATED BY ELECTRIC WAVES.

APPLICATION FILED AUG. 30, 1906.

No. 836,531 PATENTED NOV. 20, 1906.



Shown above is a section of G.W. Pickard's 1906 patent of a silicon crystal (Fig 3) used with a metal spring-loaded "cat's whisker" (Fig 2) and adjusted to detect radio waves. This is one of the first U.S. patents of a crystal diode detector.

I primi diodi a semiconduttore



GERMANIO

Clemens Winkler 1886

Z=32
PA 72.61

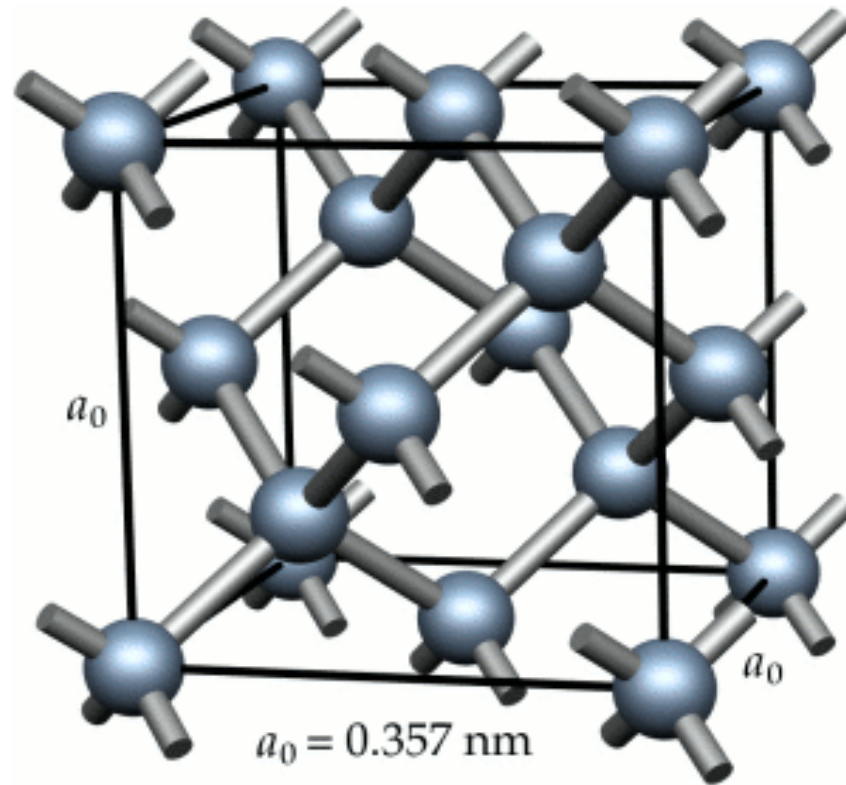


SILICIO

Antoine Lavoisier 1787

Z=14
PA: 28.09

Reihen	Gruppe I. — R^2O	Gruppe II. — RO	Gruppe III. — R^2O^3	Gruppe IV. RH^4 RO^2	Gruppe V. RH^3 R^2O^5	Gruppe VI. RH^2 RO^3	Gruppe VII. RH R^2O^7	Gruppe VIII. — RO^4
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	Ge=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —



Si 0.543071 nm

Ge 0.5658 nm



AP

New York, Natale 1947



1854 L'inventore italiano Antonio Meucci realizzò un primo rudimentale apparecchio telefonico con il quale stabilì un collegamento con la propria abitazione.

1875 Alexander Graham Bell fonda la AT&T (American Telephone and Telegraph Corporation).

1876 A.G.B. avrebbe inventato il telefono (dal sito della AT&T).

1915 AT&T inaugura la prima linea transcontinentale (20.70\$ per i primi tre minuti, e il volume del segnale è basso).

1919 Prima linea telefonica a composizione, a Norfolk VA.

1925 Nascono i Bell Telephone Laboratories Inc. (463 West Street New York).

Per buona parte del XX secolo, i laboratori Bell hanno rappresentato l'ambiente scientifico più innovativo esistente al mondo.

Con questi risultati:

11 premi Nobel, circa 20000 brevetti.

Alcuni risultati importanti:

1947 invenzione del transistor

- invenzione del laser (1958: Charles Townes)
- celle solari al silicio (1954)
- primi satelliti per telecomunicazioni (lancio di Telstar I: 1962)
- teoria e sviluppo della comunicazione digitale
- primo sistema di telefonia cellulare (primo sviluppo dell'idea: 1947. Ma a quel tempo la tecnologia necessaria ancora non esisteva)
- invenzione della CCD (alla base della fotografia digitale) (1969)
- primi sistemi in fibra ottica (1977)
- sviluppo di Unix (1969) e C (1983)



Come è possibile spiegare che un solo gruppo, relativamente piccolo, di scienziati al lavoro nei Bell Labs in New Jersey per un intervallo di tempo relativamente breve abbia potuto produrre un tale impressionante insieme di idee e di tecnologie? Quegli scienziati, quegli ingegneri, **inventarono il futuro per il XX secolo.**

Mervin Kelly (ai Bell Labs dai 1925 al 1959)

I Lab Bells dovevano essere (e furono) un Istituto di tecnologia creativa.

La condizione era che una massa critica di ricercatori di grande talento lavorassero in un ambiente stimolante dove fosse possibile un continuo scambio di idee.

Per questo era necessario che lavorassero fianco a fianco, nello stesso ambiente (magari progettato ad hoc). Nel progetto che portò al transistor, intenzionalmente Kelly mise insieme fisici, esperti di metallurgia, ingegneri elettronici.

Aspirazione (I Bell Labs non furono concepiti come una torre d'avorio)

Organizzazione

Tempo

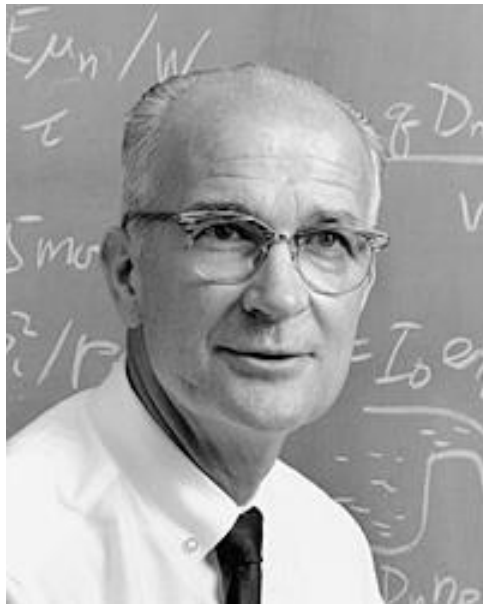
→ La fabbrica delle idee (The Ideas Factory)



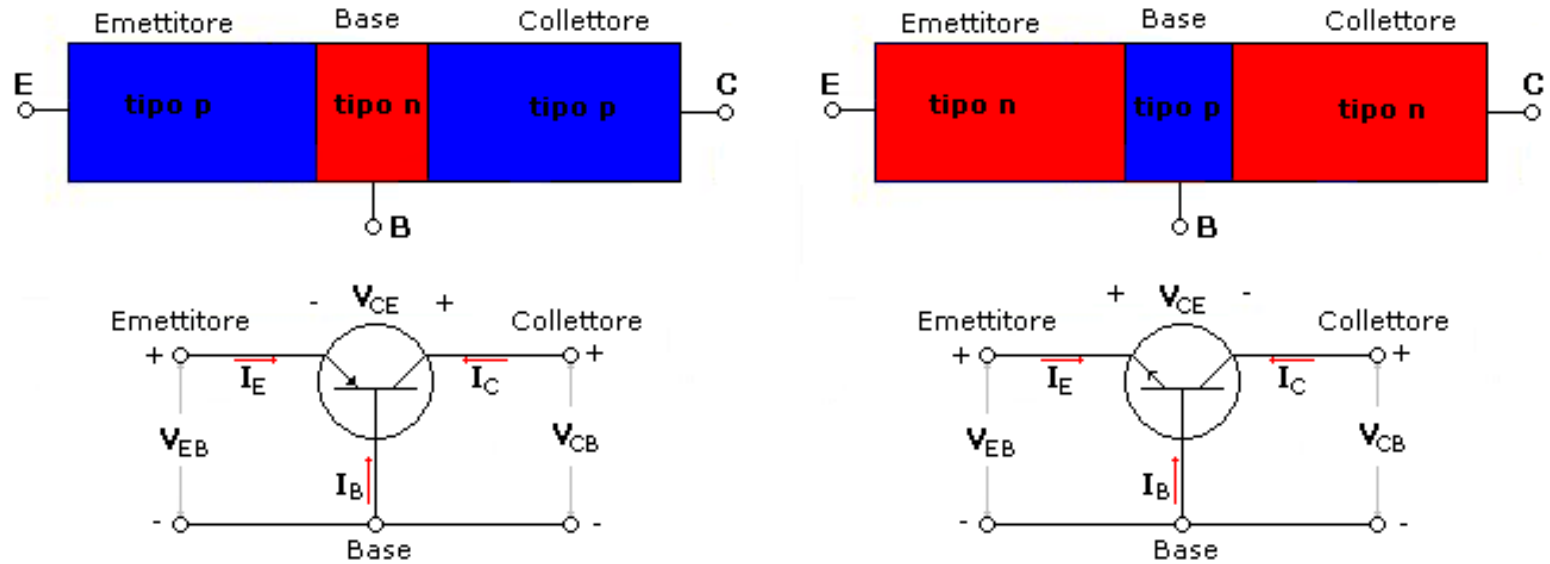
Il fisico **William Shockley** e il chimico Stanley Morgan erano stati incaricati di organizzare un nuovo gruppo. Altri ricercatori della Bell come **Walter Brattain**, Gerald Pearson e Robert Gibney furono trasferiti nel gruppo ed altri come **John Bardeen** si aggiunsero presto.

Shockley fece partire una sezione all'interno del gruppo che si interessasse sulla ricerca dei semiconduttori.

La loro ricerca era basata sulle teorie della meccanica quantistica applicata ai semiconduttori, sviluppata durante gli anni '30 da scienziati come Eugene Wigner e Frederick Seitz. Era un gruppo fenomenale e creativo. Una delle virtù di Shockley era la sua capacità di mettere insieme gli scienziati più intelligenti che aveva intorno e questo gruppo particolare di menti lavorò bene insieme.

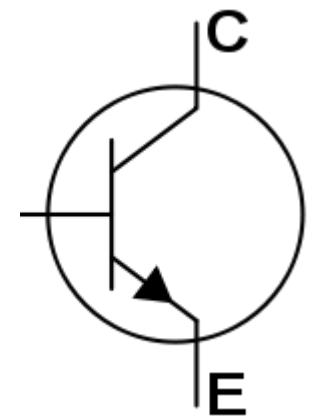
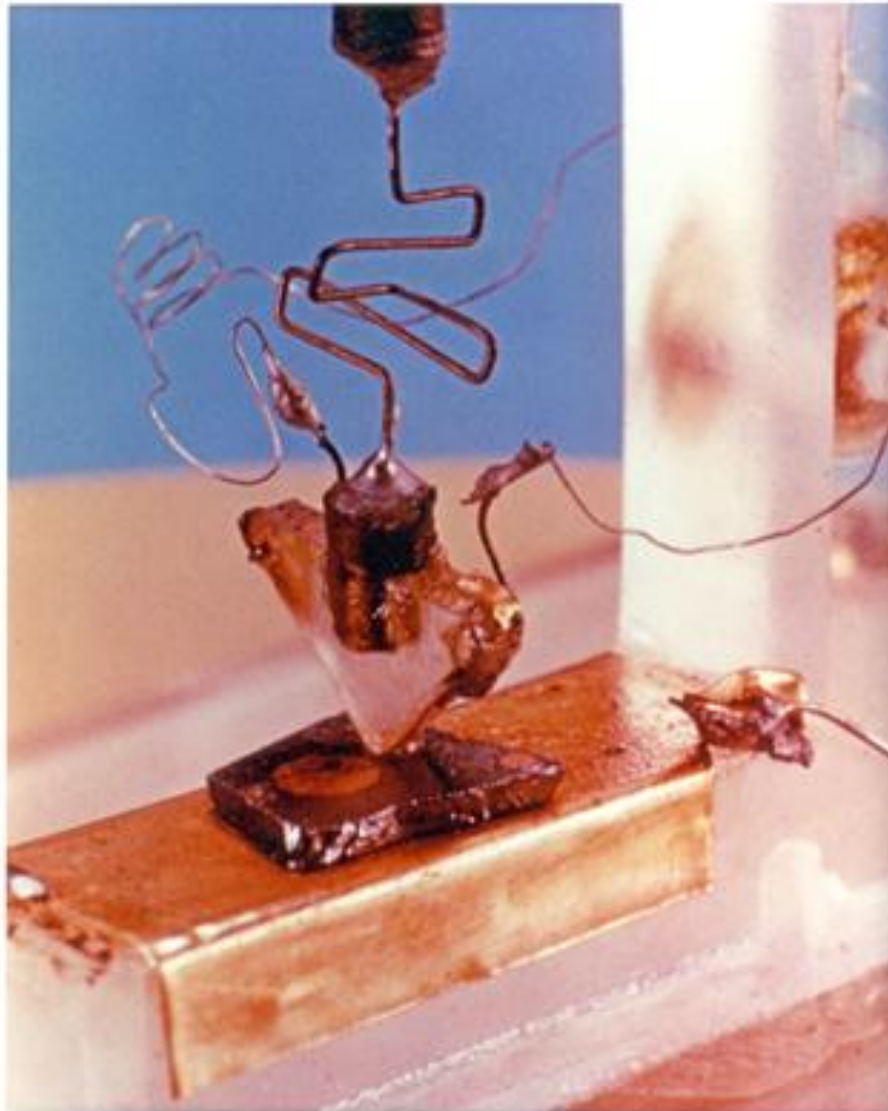


Che cosa è il transistor?



Transistor bipolare a giunzione tipo p-n-p e n-p-n con rappresentazione circuitale.

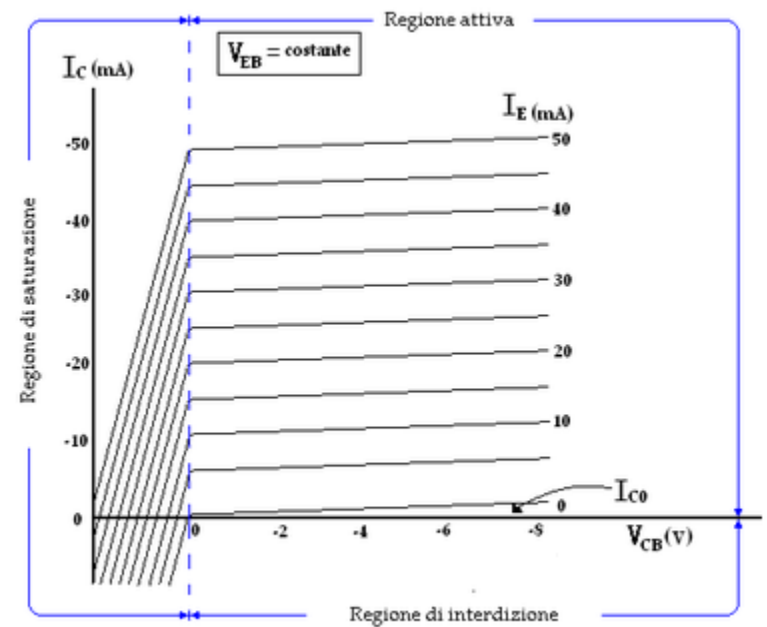
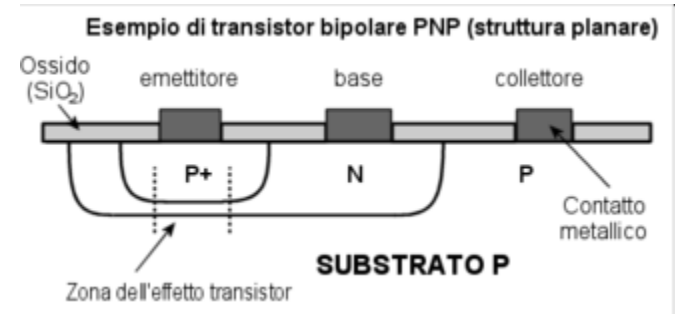




Il primo transistor, presentato presso i Bell Labs nella storica data del 23 dicembre 1947.



Brattain, Shockley e Bardeen
(Nobel per la Fisica, 1956)





William Brandford Shockley

(Londra, 13 febbraio 1910 – Stanford, 12 agosto 1989)

Straordinario insegnante.

Lascia la Bell nel 1953, fonda la Shockley Semiconductor, dando impulso nei pressi di Santa Clara a quella che sarà la Silicon Valley (un'altra sua geniale intuizione).

Nel 1963 inizia a sostenere idee eugenetiche (<http://www.youtube.com/watch?v=uWa9Bp1krPk>), che lo isoleranno sempre di più, nel mondo accademico e nella sua stessa famiglia.

I suoi due figli (che non lo vedevano da 20 anni) sapranno della sua morte dai giornali.



John Bardeen

(Madison, 23 maggio 1908 – Boston, 30 gennaio 1991)

La mattina di giovedì 1 novembre 1956, John Bardeen stava facendo la prima colazione e stava ascoltando la radio. Mentre preparava le sue uova strapazzate, sentì un annunciatore dare la notizia che avrebbe ricevuto il premio Nobel nella fisica insieme a Brattain e a Shockley per l'invenzione del transistor. Bardeen lasciò perdere la padella e corse nella camera da letto per comunicare a sua moglie la notizia.

Nel 1972 vince un secondo premio Nobel per la fisica, per la teoria della superconduttività.

Walter Houser Brattain

(Amoy, 10 febbraio 1902 – Seattle, 13 ottobre 1987)



Straordinario sperimentale. Lavorando con le idee di William Shockley e di John Bardeen, le mani di Brattain hanno costruito il primo transistor.

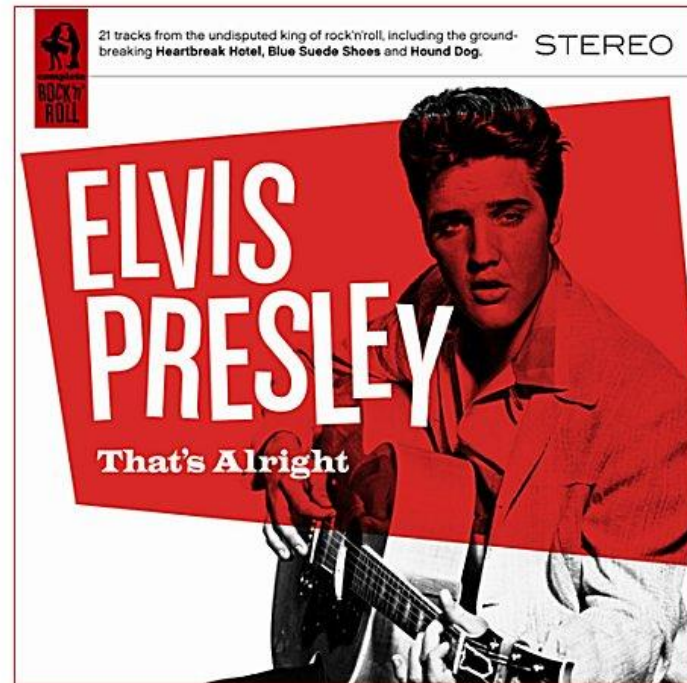
Il giorno dopo l'annuncio del Nobel, Brattain entrò nella sua stanza ai Bell Labs. Tutti si levarono in piedi e spontaneamente lo applaudirono. Scoppiò in lacrime. Successivamente scrisse: "Ciò che accadde è qualcosa da ricordare, soprattutto l'estrema emozione che uno sente nel ricevere l'acclamazione dei suoi colleghi ed amici.

Io so bene che non avrei potuto compiere il lavoro che ho fatto senza di loro, e che era stato realmente soltanto un colpo di fortuna che fossi io e non uno di loro a vincere il Nobel".

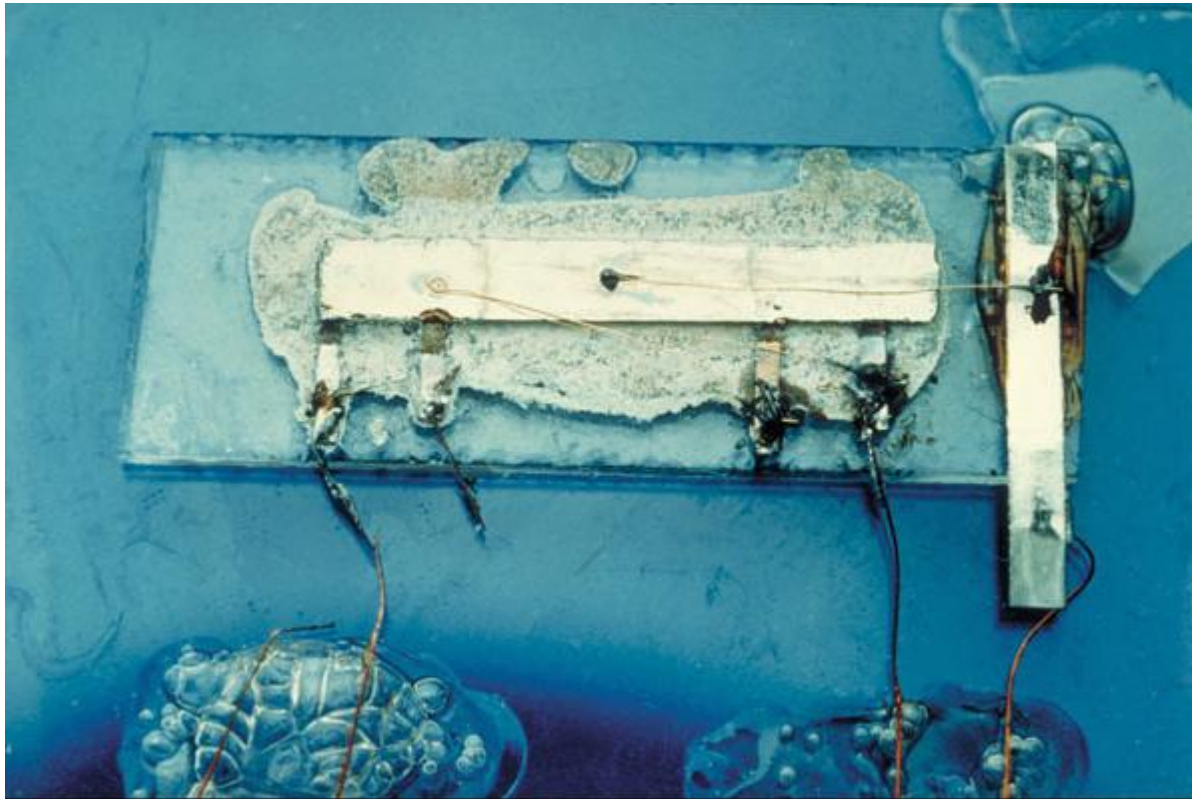
"L'unico rammarico che ho sul transistor è il suo uso per il rock and roll", disse più di una volta.



The Regency TR-1 was the first commercial all transistor pocket radio in the world. Its production begun in 1954 and the early sets were marketed on Christmas 1954 at the price of about \$ 50.

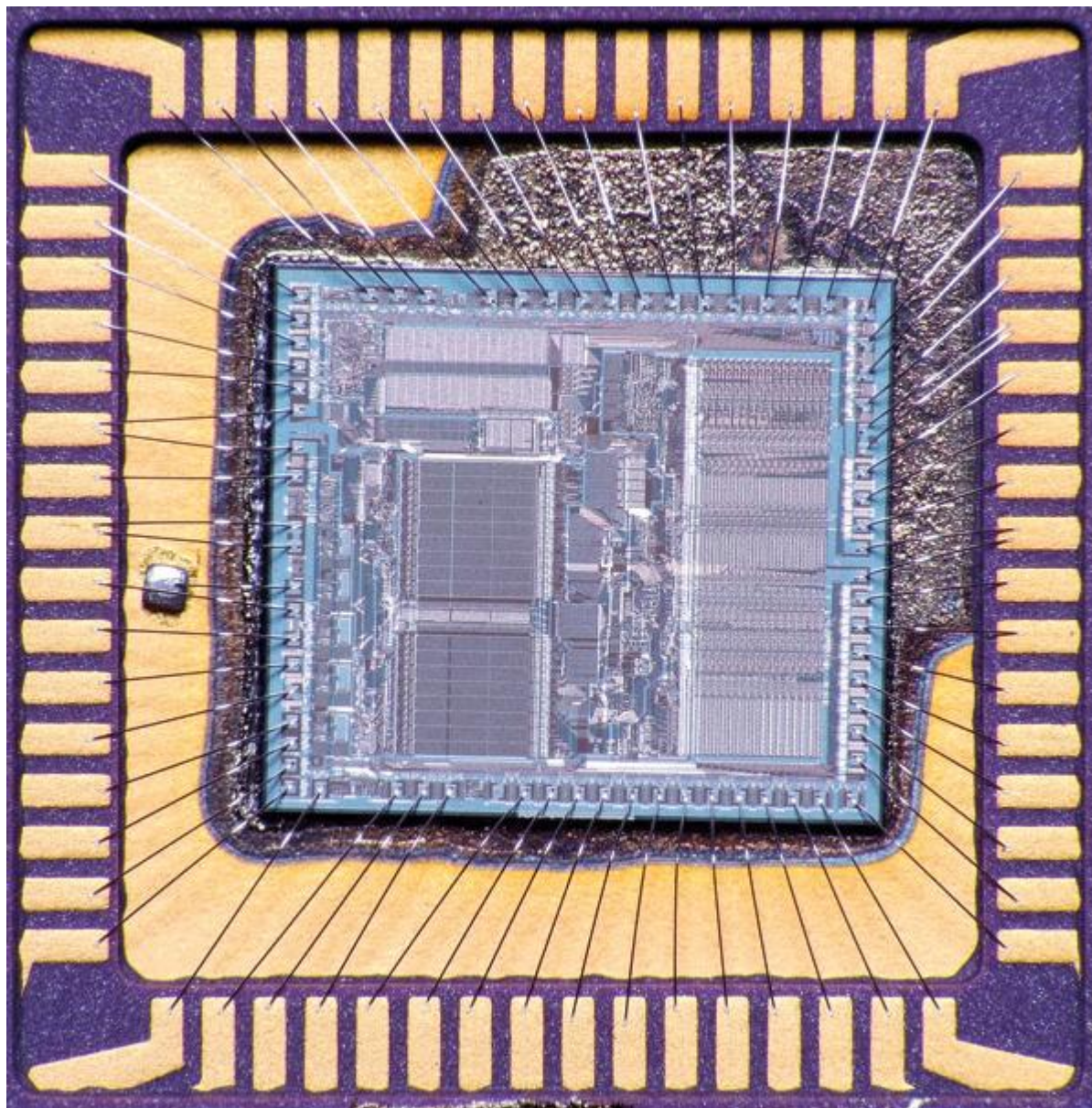


That's alright Mama, 1954

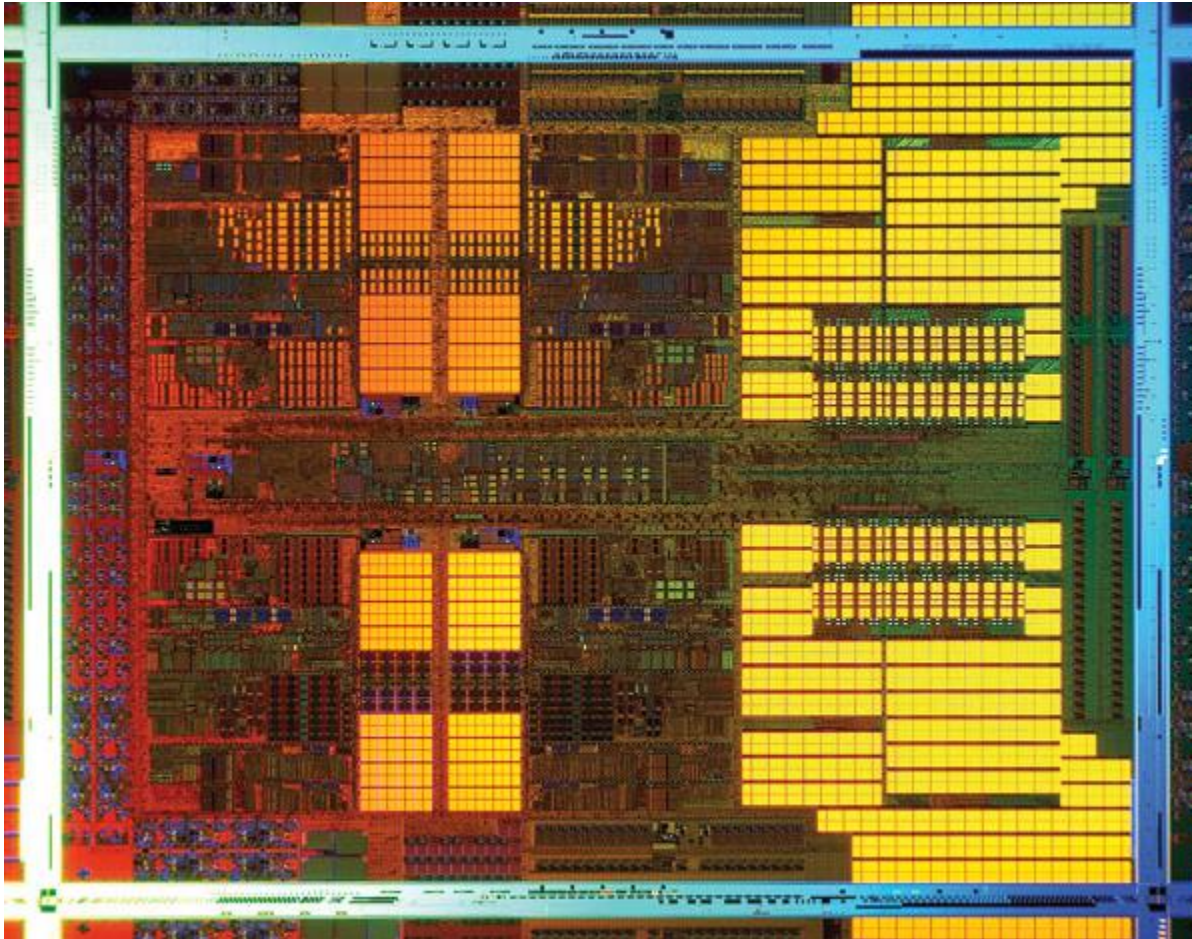


Il primo circuito integrato (1958)

Fu realizzato su germanio da Jack Kilby alla Texas Instruments in 1958. Questo prototipo presenta un transistor (pallino piccolo sulla sinistra) unito a due fili d'oro e un condensatore (pallino nero nel mezzo). Il germanio, bloccato sul lato di un vetrino, è diviso in tre resistori dalle linguette sul retro. Il merito di Kilby è stato avere mostrato che i tre tipi di componenti potevano coesistere e funzionare sullo stesso pezzo di germanio, aprendo così la via verso un aumento delle prestazioni e un abbassamento dei costi dei dispositivi elettronici.

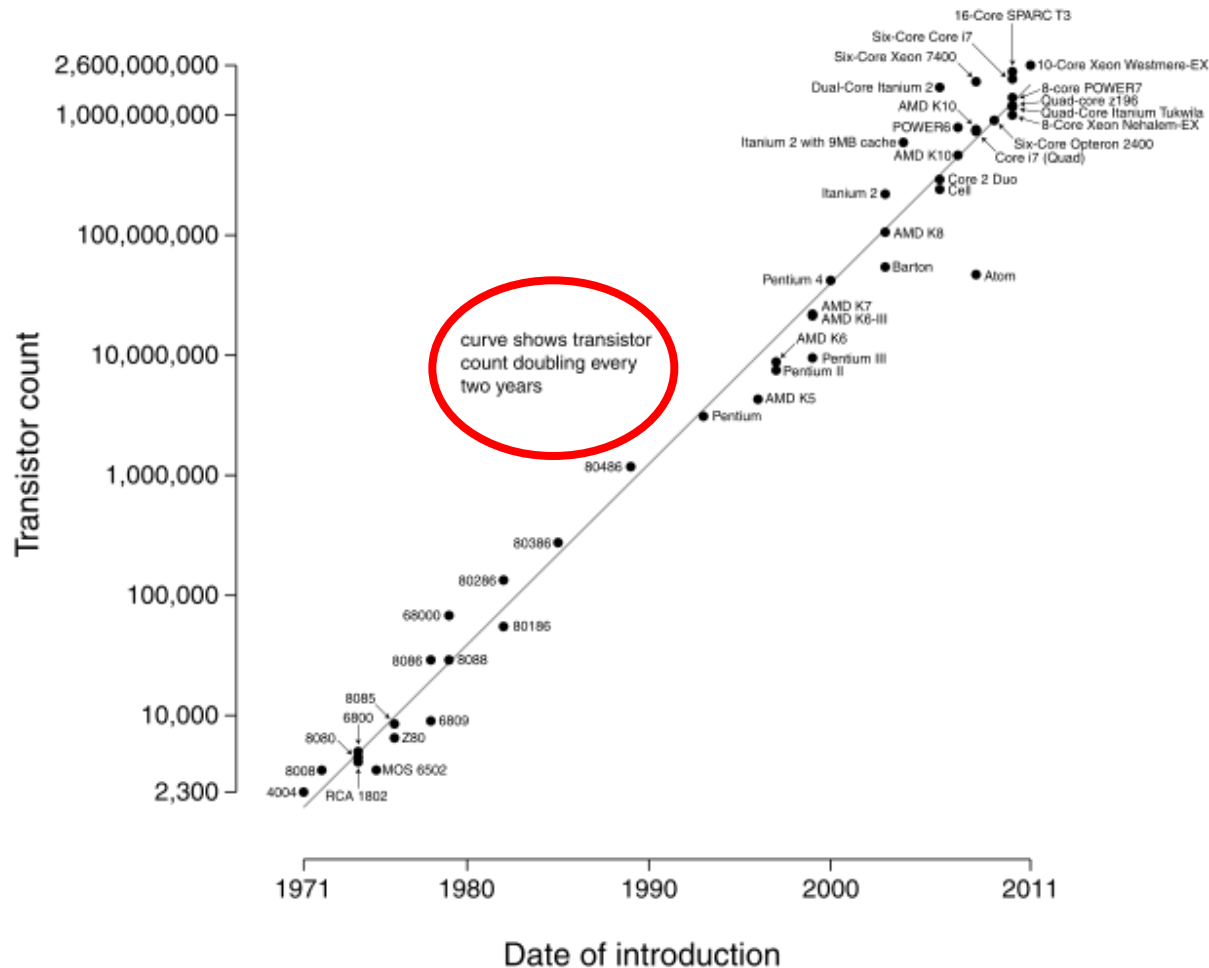


Il microprocessore Motorola 68000, introdotto nel 1979, aveva 68,000 transistor and alimentava il computer Macintosh 128K.



Phenom II della AMD, immesso nel mercato all'inizio del 2009, contiene 758 milioni di transistori

Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law



Prima legge di Gordon Moore (co-fondatore di Intel, da un suo articolo del 1965)

« Le prestazioni dei processori, e il numero di transistor ad esso relativo, raddoppiano ogni 18 mesi. »

... e corollario di Karlgaard (1998)

« Nel 2008 i chip Pentium II e PowerPC costeranno circa 75 cent »

TEM Images of High Performance FETs

90nm node

65nm node

45nm node

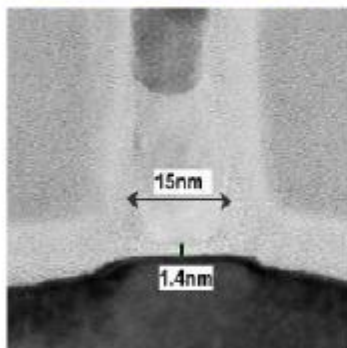
32nm node



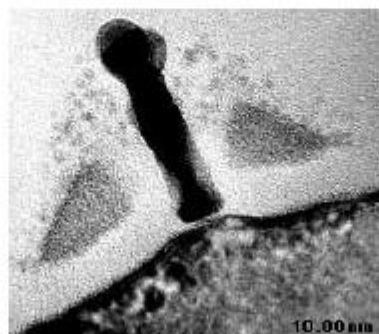
Are Smaller Transistors Possible?

- Yes, here are several examples:

15nm AMD IEDM 2001



10nm Intel Tech. J. 2002



6nm IBM SSDM 2002



(Victor Moroz, Berkeley seminar, october 2011)

Quali sono le sfide (ovvero i limiti) per il futuro dei circuiti integrati?

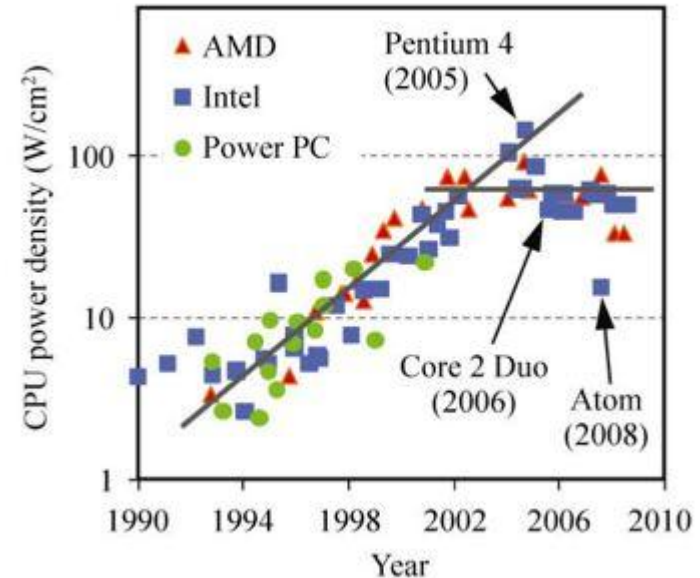
1. Dissipazione di energia

386 → 5W/cm²

Pentium 2 → 10 W/cm²

Ugelli di un razzo → 2000 W/cm² (1200 °C)

Sole → 10000 W/cm²



2. Consumo di energia

Necessità di batterie sempre più efficienti (e leggere).

3. Sincronizzazione

All'aumentare della velocità diminuisce il tempo a disposizione per il segnale elettromagnetico per espandersi da un punto all'altro del chip. Non solo. L'incremento di dimensione del chip stesso crea dei percorsi interni di trasmissione del segnale con distanze differenti. Questo sta diventando critico per la trasmissione del clock, il segnale di sincronismo che, come un direttore d'orchestra, dà il tempo a tutte le parti del chip.

4. Processo produttivo

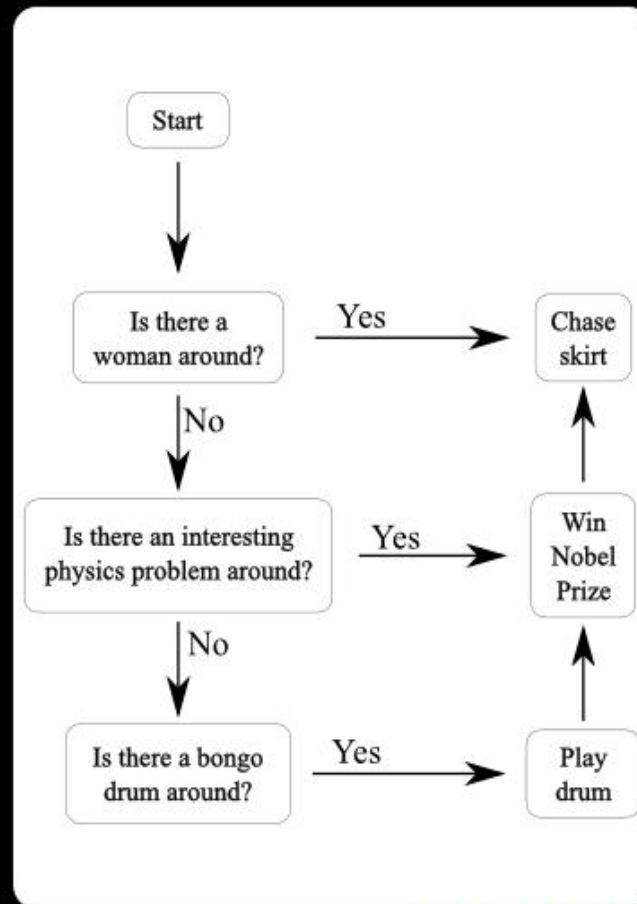
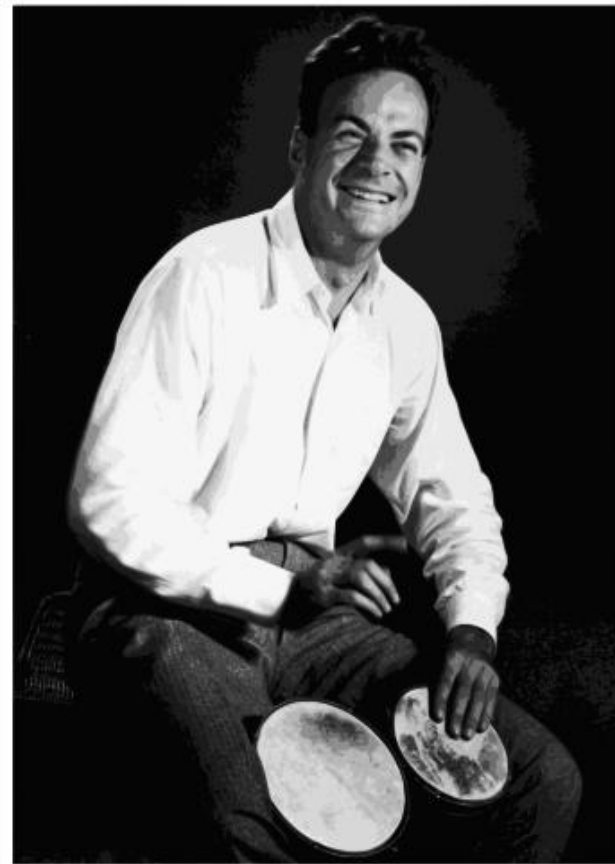
→ **Nanotecnologie**



“There's Plenty of Room at the Bottom”

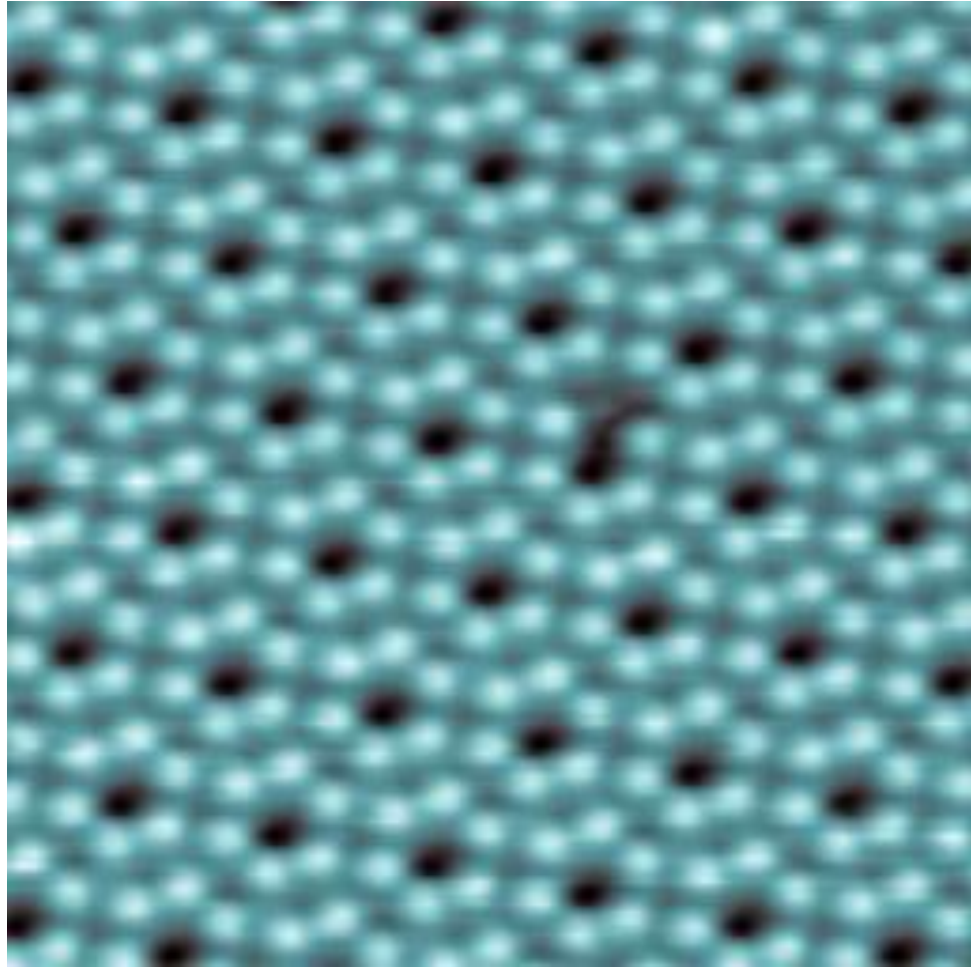
(Richard Feynman a un meeting della American Physical Society
al Caltech, 29 Dicembre 1959)

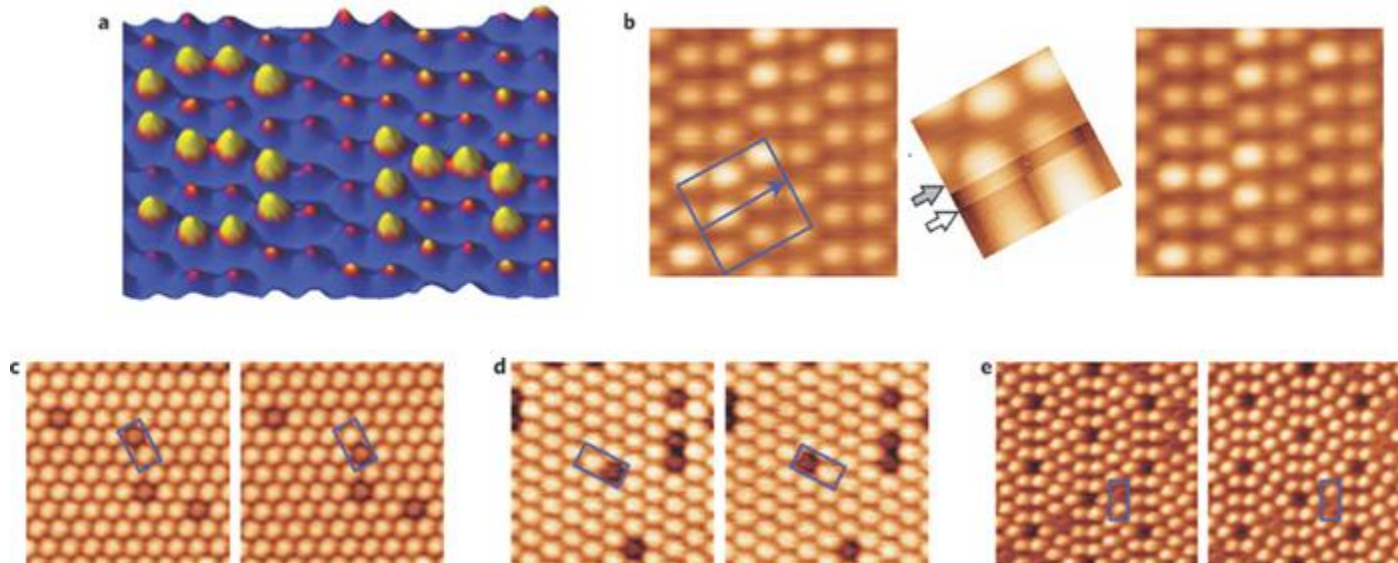
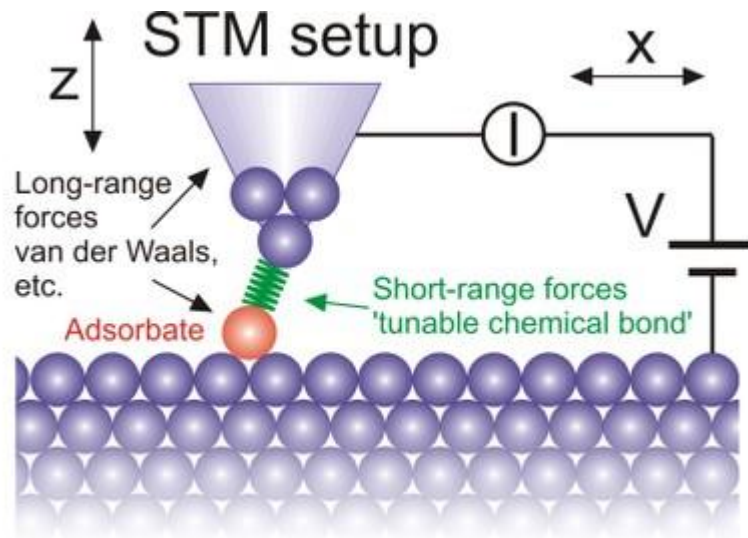
W.W.R.F.D.?



WellingtonGrey.net

Il diagramma di flusso su come prendere una decisione (Feynman: Premio Nobel per la Fisica nel 1965)





[Atomic force microscopy as a tool for atom manipulation](#), Oscar Custance, Ruben Perez & Seizo Morita, Nature Nanotechnology 4, 803 - 810 (2009) Published online: 6 December 2009

A single-atom transistor

Martin Fuechsle¹, Jill A. Miwa¹, Suddhasatta Mahapatra¹, Hoon Ryu², Sunhee Lee³,
Oliver Warschkow⁴, Lloyd C. L. Hollenberg⁵, Gerhard Klimeck³ and Michelle Y. Simmons^{1*}

The ability to control matter at the atomic scale and build devices with atomic precision is central to nanotechnology. The scanning tunnelling microscope¹ can manipulate individual atoms² and molecules on surfaces, but the manipulation of silicon to make atomic-scale logic circuits has been hampered by the covalent nature of its bonds. Resist-based strategies have allowed the formation of atomic-scale structures on silicon surfaces³, but the fabrication of working devices—such as transistors with extremely short gate lengths⁴, spin-based quantum computers^{5–8} and solitary dopant optoelectronic devices⁹—requires the ability to position individual atoms in a silicon crystal with atomic precision. Here, we use a combination of scanning tunnelling microscopy and hydrogen-resist lithography to demonstrate a single-atom transistor in which an individual phosphorus dopant atom has been deterministically placed within an epitaxial silicon device architecture with a spatial accuracy of one lattice site. The transistor operates at liquid helium temperatures, and millikelvin electron transport measurements confirm the presence of discrete quantum levels in the energy spectrum of the phosphorus atom. We find a charging energy that is close to the bulk value, previously only observed by optical spectroscopy¹⁰.

Silicon technology is now approaching a scale at which both the number and location of individual dopant atoms within a device will determine its characteristics¹¹, and the variability in device performance caused by the statistical nature of dopant placement¹² is expected to impose a limit on scaling before the physical limits associated with lithography and quantum effects¹³ are reached. Controlling the precise position of dopants within a device and understanding how this affects device behaviour have therefore become essential^{14–17}. Devices based on the deterministic placement of single dopants in silicon are also leading candidates for solid-state quantum computing architectures, because the dopants can have extremely long spin-coherence¹⁸ and spin-relaxation times¹⁹, and because this approach would be compatible with existing complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) technology.

One of the earliest proposals for a solid-state quantum computer involved arrays of single ³¹P atoms in a silicon crystal, with the two nuclear spin states of the ³¹P atom providing the basis for a quantum bit (qubit)⁵. Subsequently, qubits based on the electron spin states^{6,7}

ability to place individual phosphorus atoms into silicon with atomic precision²¹ and to register electrostatic gates and readout devices to each individual dopant.

Figure 1 shows the approach we used to deterministically place a single phosphorus atom between highly phosphorus-doped source and drain leads in a planar, gated, single-crystal silicon transport device. This involved the use of hydrogen-resist lithography^{22–24} to

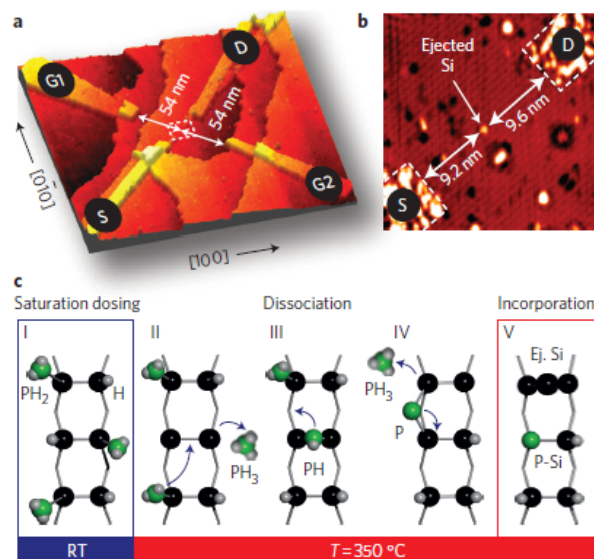
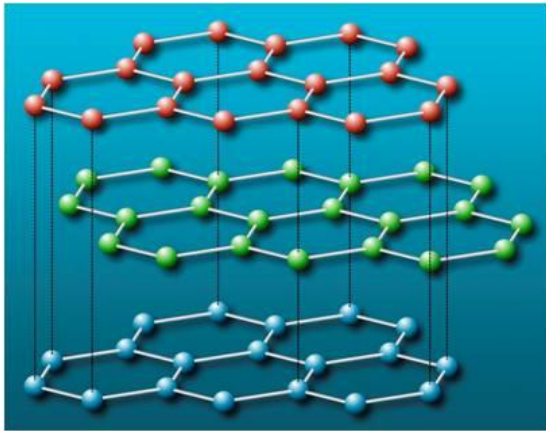
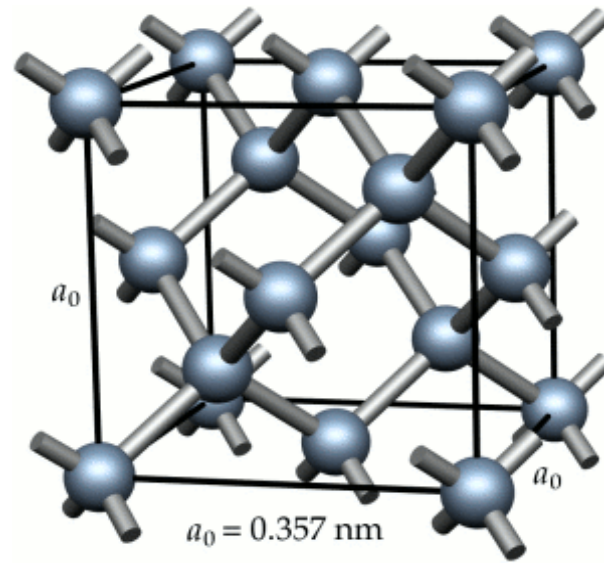
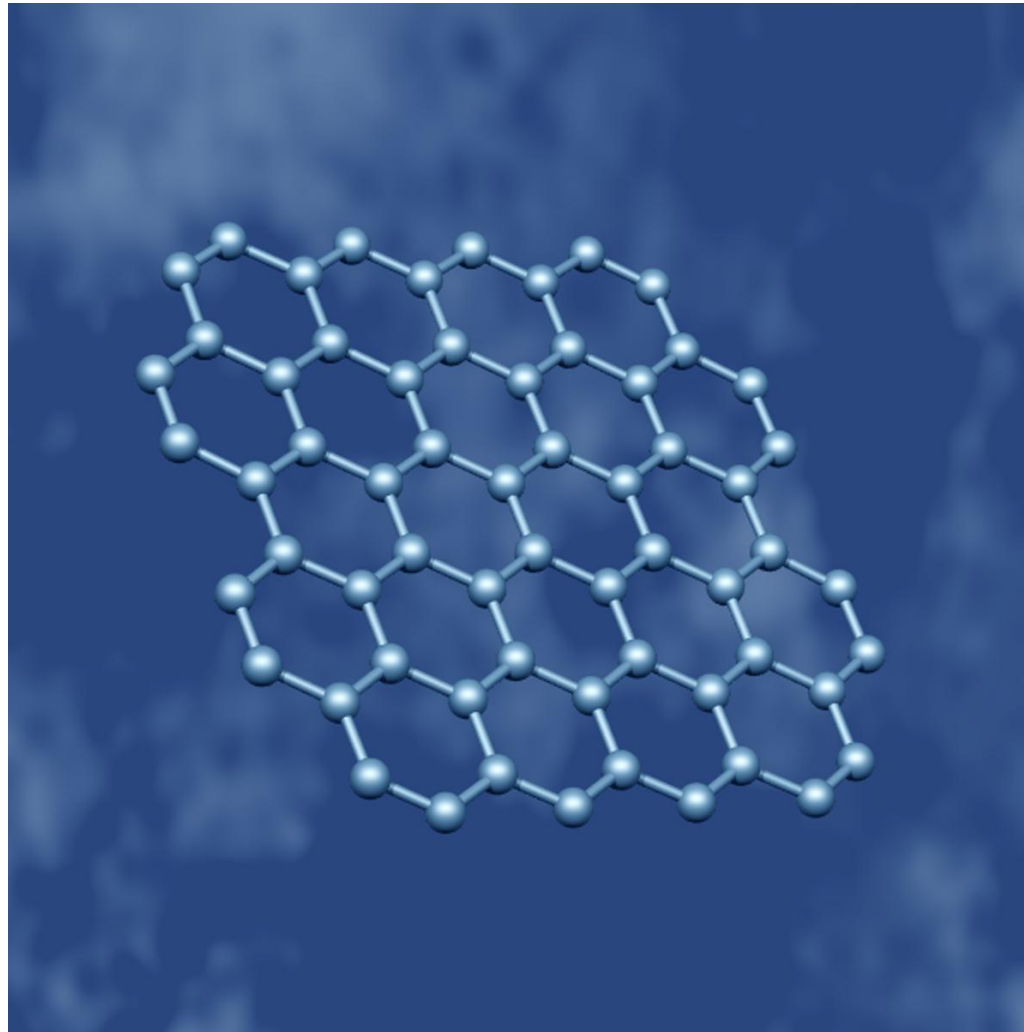


Figure 1 | Single-atom transistor based on deterministic positioning of a phosphorus atom in epitaxial silicon. **a**, Perspective STM image of the device, in which the hydrogen-desorbed regions defining source (S) and drain (D) leads and two gates (G1, G2) appear raised due to the increased tunnelling current through the silicon dangling bond states that were created. Upon subsequent dosing with phosphine, these regions form highly phosphorus-doped co-planar transport electrodes of monatomic height, which are registered to a single phosphorus atom in the centre of the device. Several atomic steps running across the Si(100) surface are also visible.

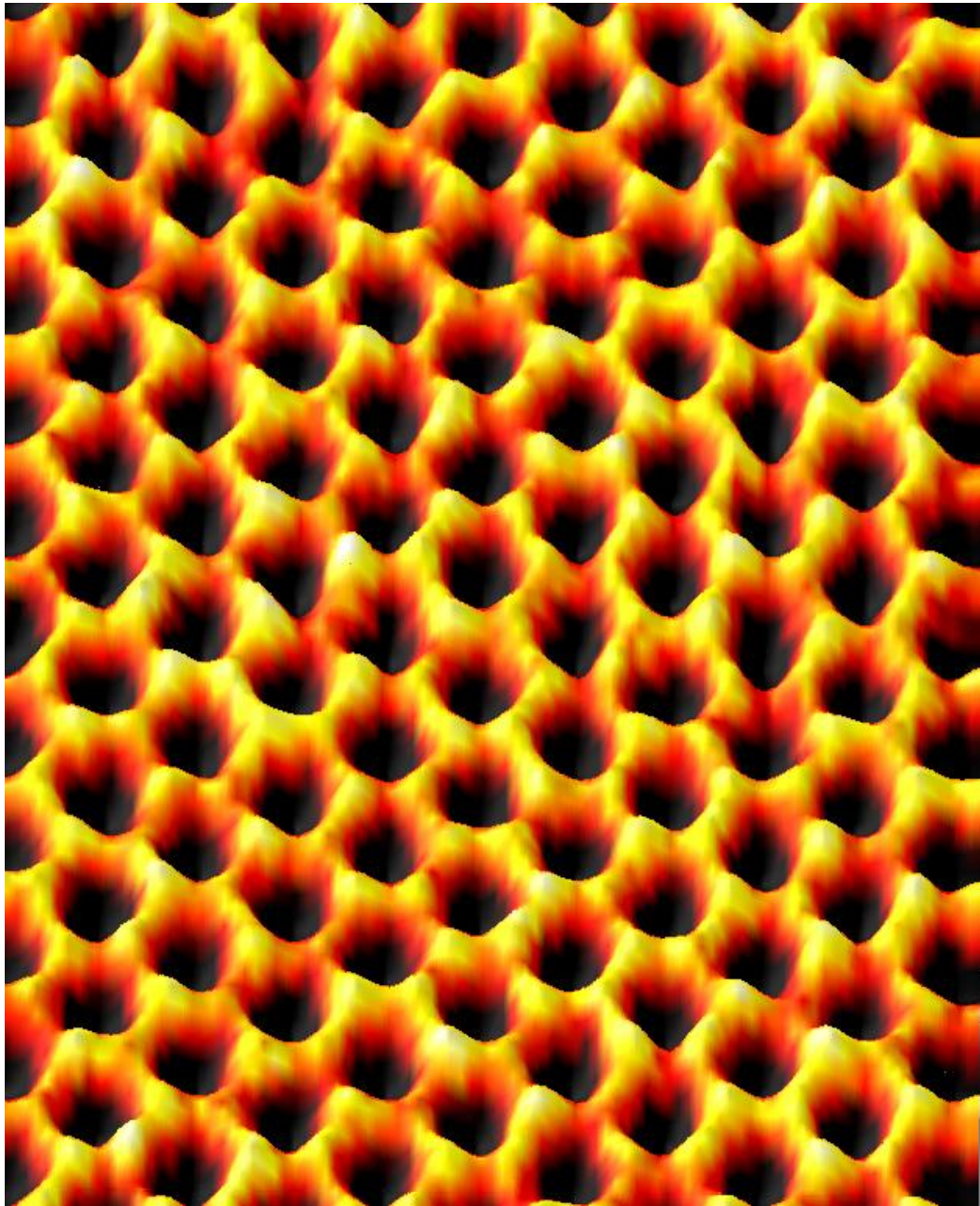


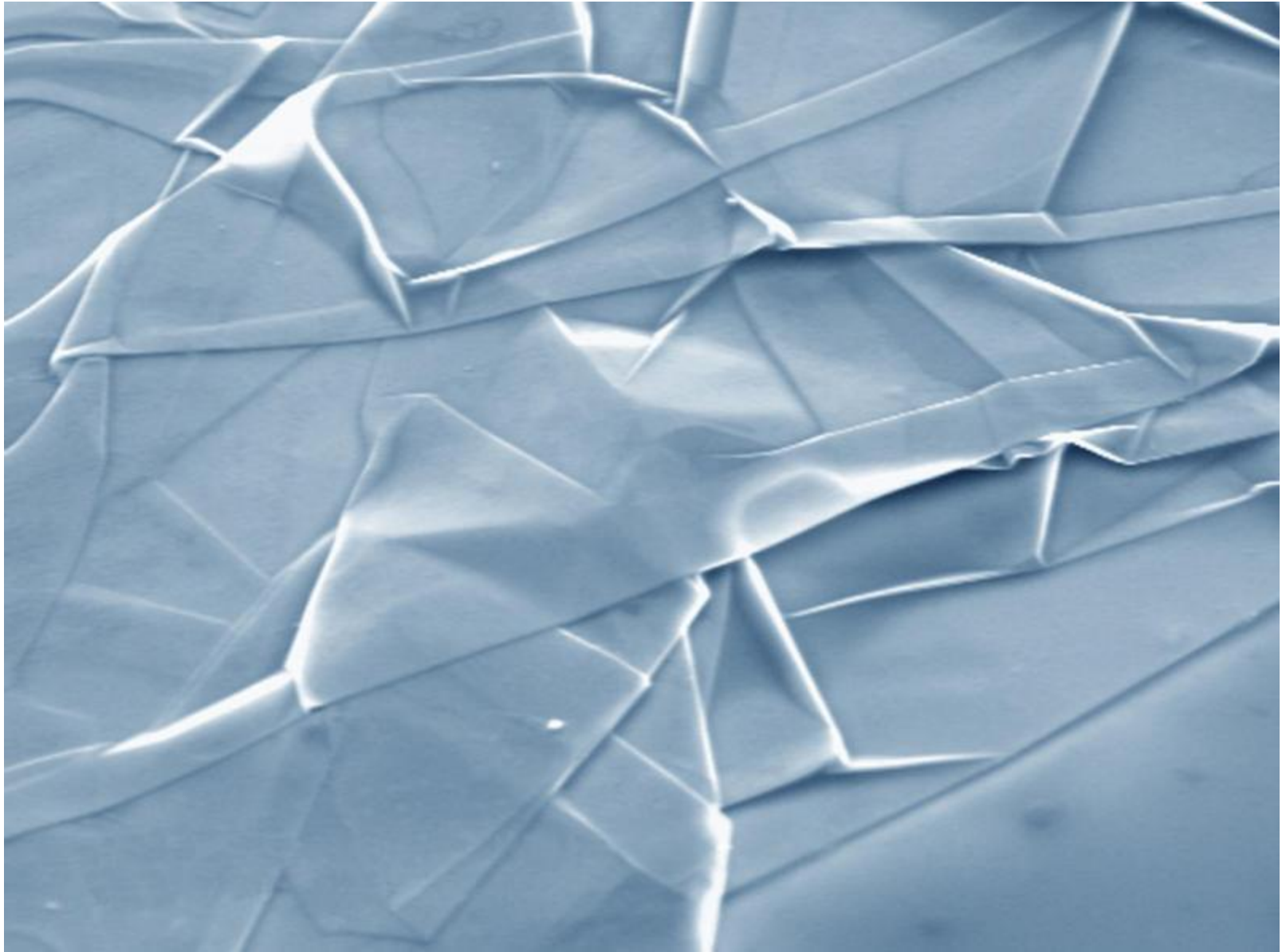
GRAFENE

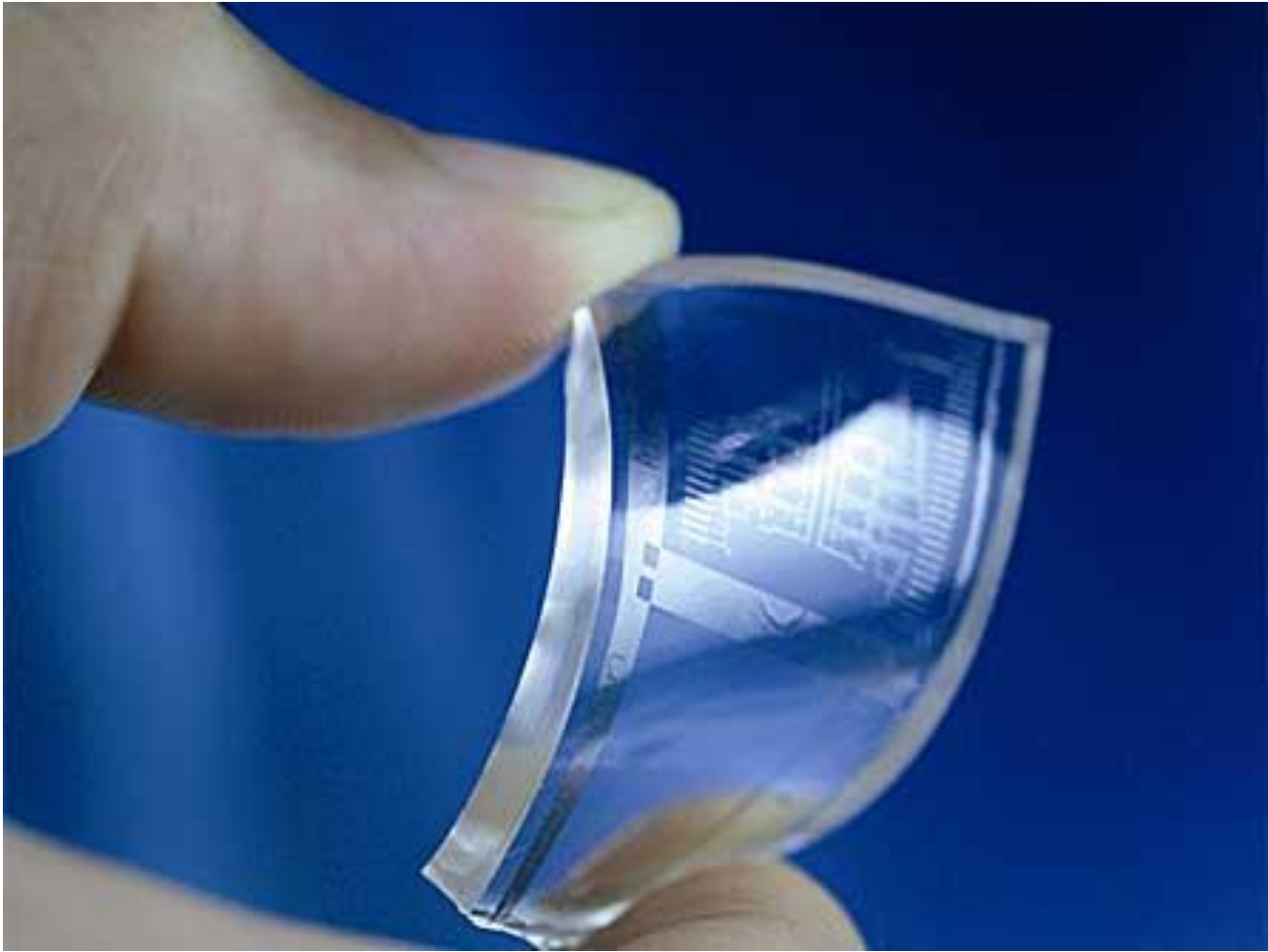


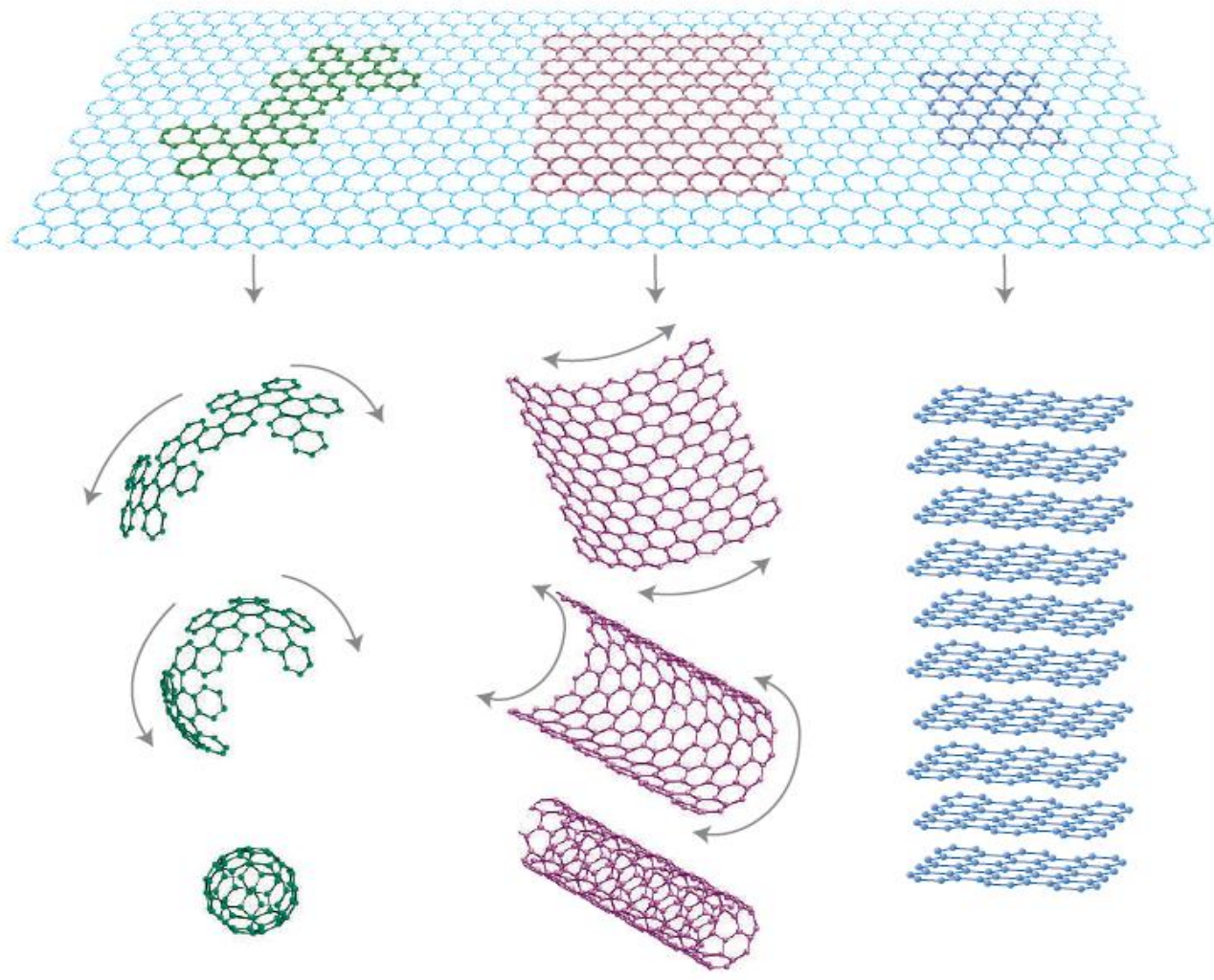
Il **grafene** è una **molecola bidimensionale** (spessa cioè un solo atomo) di atomi di carbonio. Gli atomi sono ibridizzati nella forma sp^2 , e si dispongono quindi a formare esagoni con angoli di 120° .



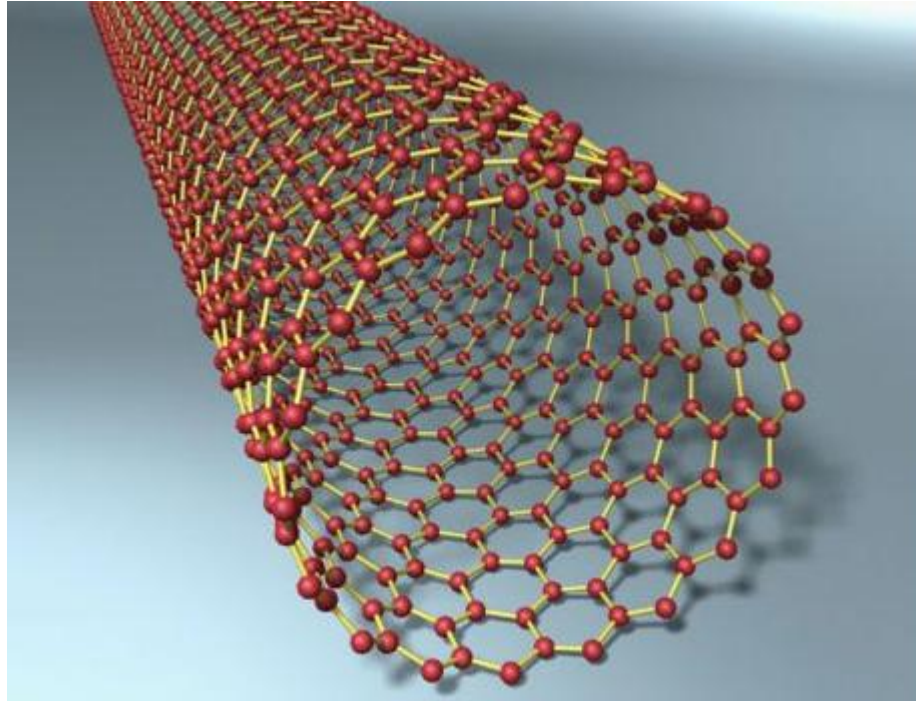








NANOTUBI



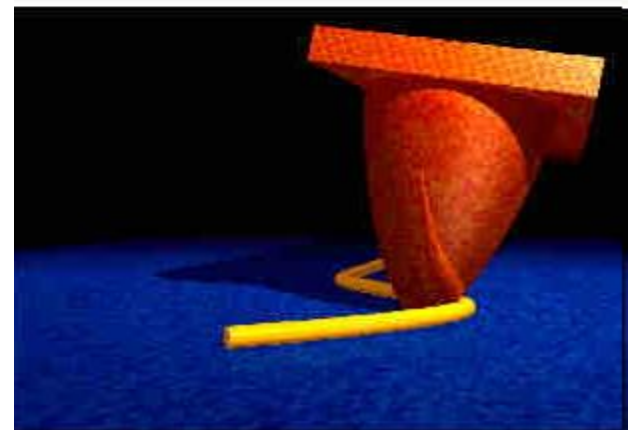
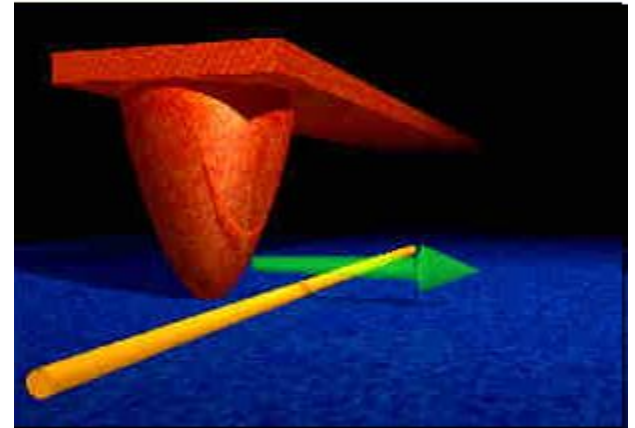
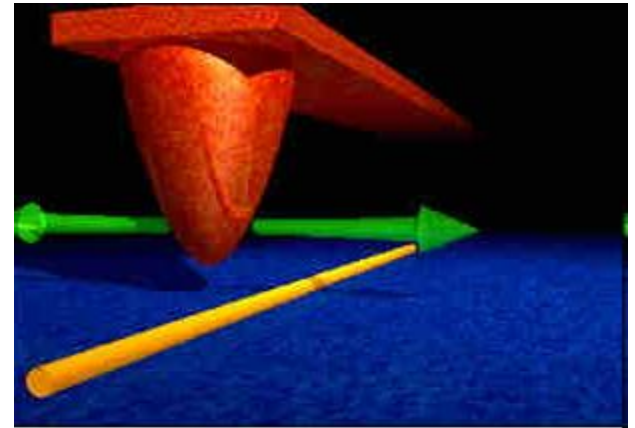
I nanotubi rappresentano probabilmente il più significativo prodotto della ricerca sui fullereni. Sono strati singoli di grafite arrotolati in cilindri. Presentano diametri di pochi nanometri, e lunghezze fino ad alcuni millimetri, con un rapporto lunghezza-diametro estremamente vario. Il carattere molecolare rappresenta una novità senza precedenti per oggetti di queste dimensioni. Il numero delle possibili applicazioni sta crescendo costantemente..

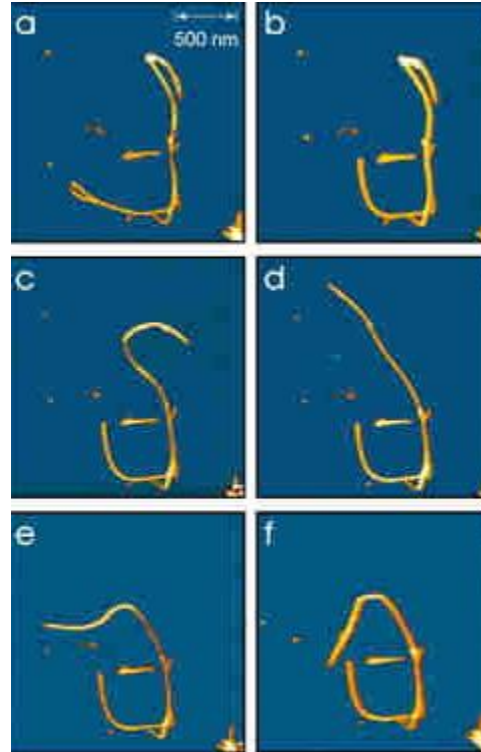
Per realizzare dispositivi coi nanotubi, è necessario essere in grado di manipolarli in modo controllato. Ad esempio, usando un AFM (microscopio a forza atomica) per spostarli, deformarli o tagliarli.

Innanzitutto, l'AFM usato in modo "non-contact" fornisce l'immagine del nanotubo.

La punta AFM è quindi portata fino alla superficie utilizzando come un aratro microscopico per muovere il nanotubo.

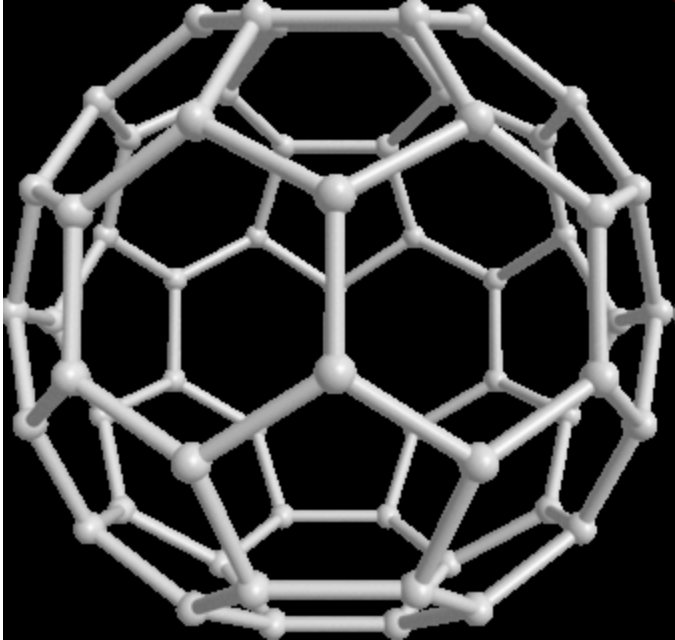
A causa della forte interazione tra il nanotubo e la superficie mediante forze di van der Waals, il nanotubo benchè piegato rimane al suo posto e mantiene la sua forma, invece di ritornare alla sua configurazione originale dritta.





Questo è un altro esempio di come un nanotubo possa essere manipolato fino a formare forme complesse: le sei immagini AFM dimostrano come la punta AFM sia stata utilizzata per formare la lettera greca “theta” partendo da un nanotubo lungo 2.5 micron.

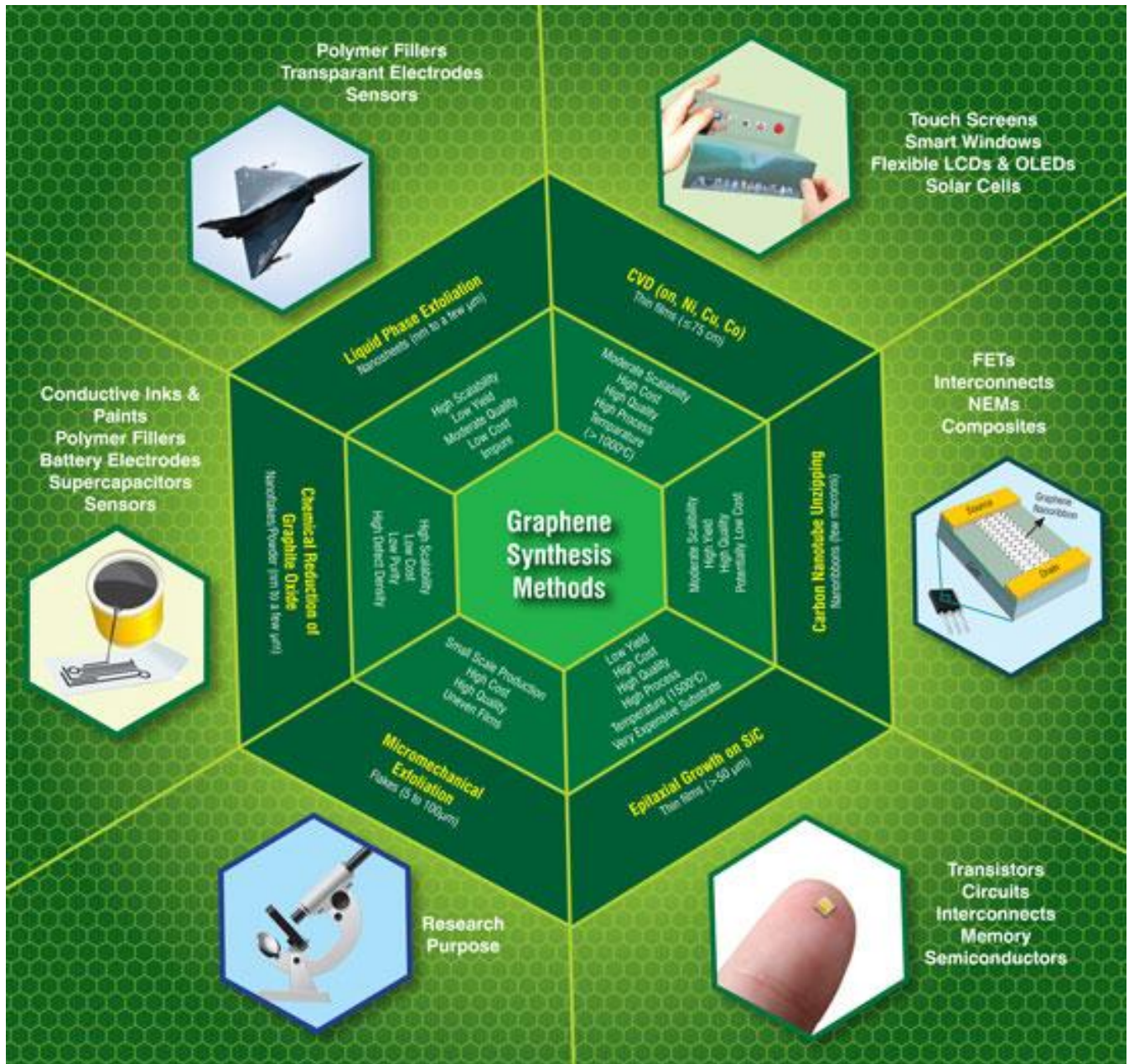
FULLERENE

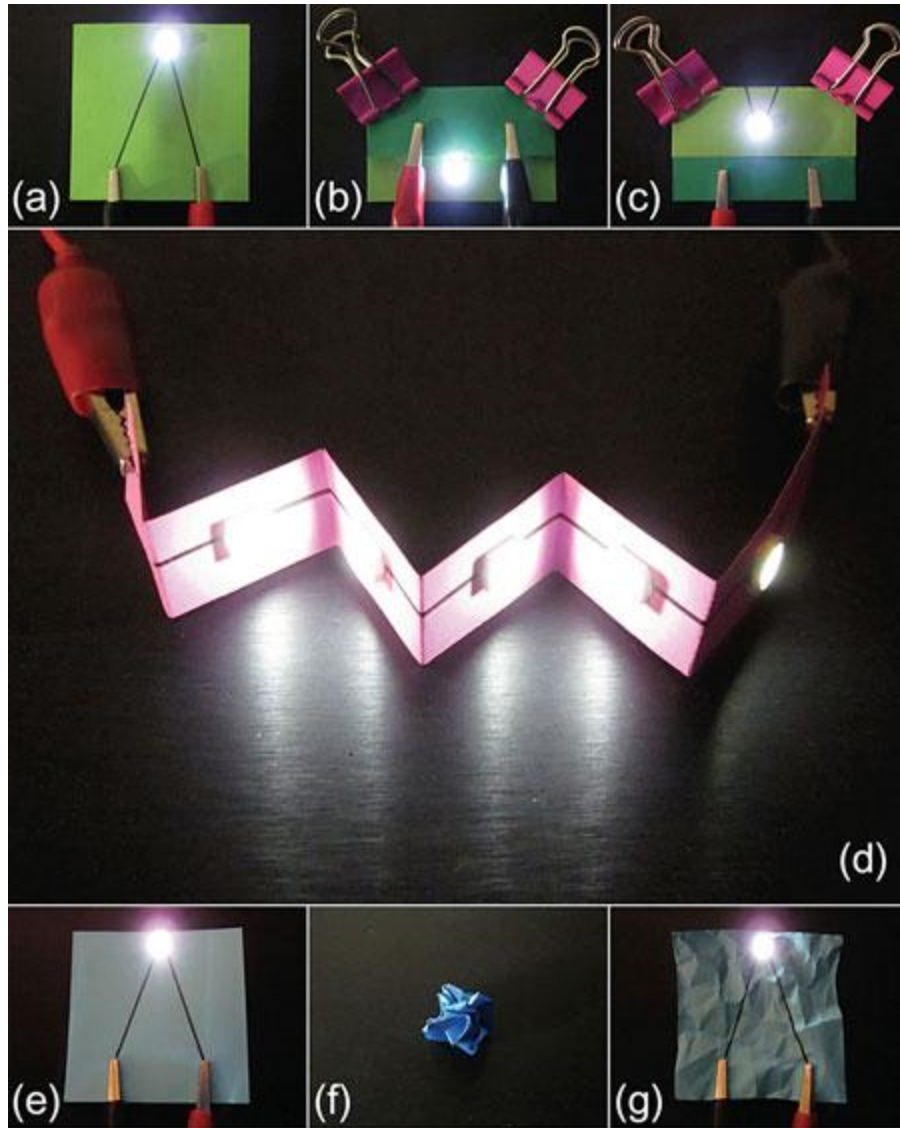


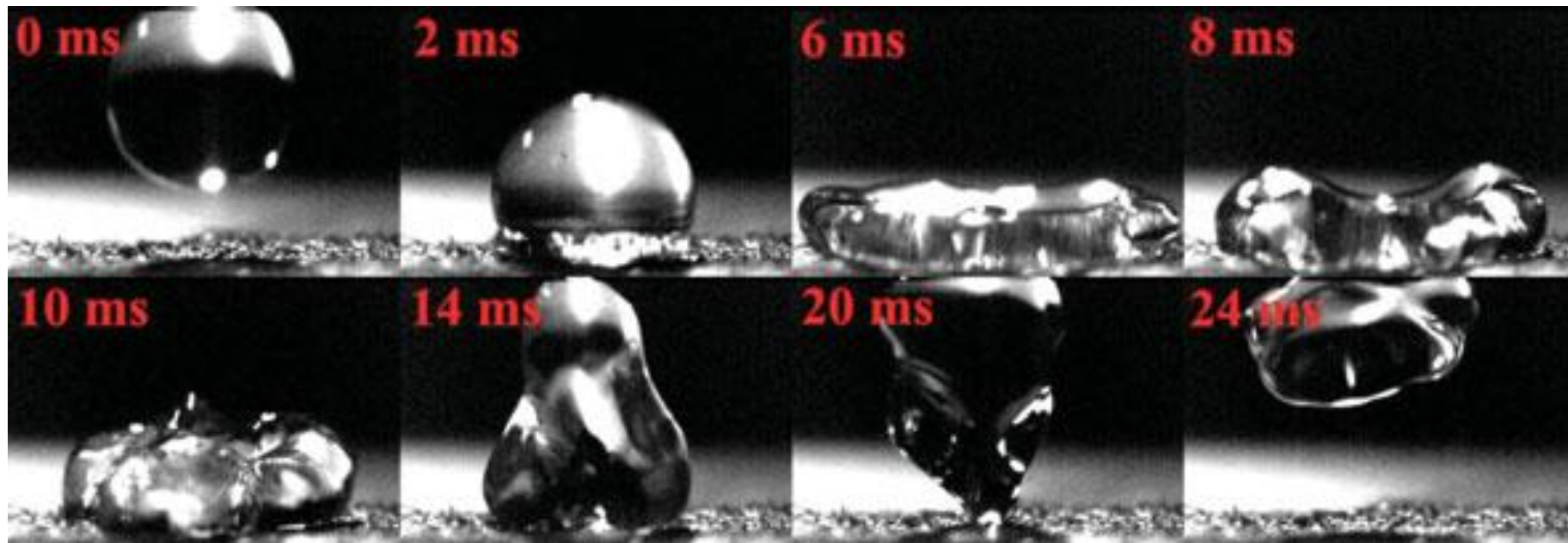
Il fullerene rappresenta una famiglia di molecole allotrope del carbonio, composte di soli atomi di carbonio, a formare una sfera cava (buckyballs).

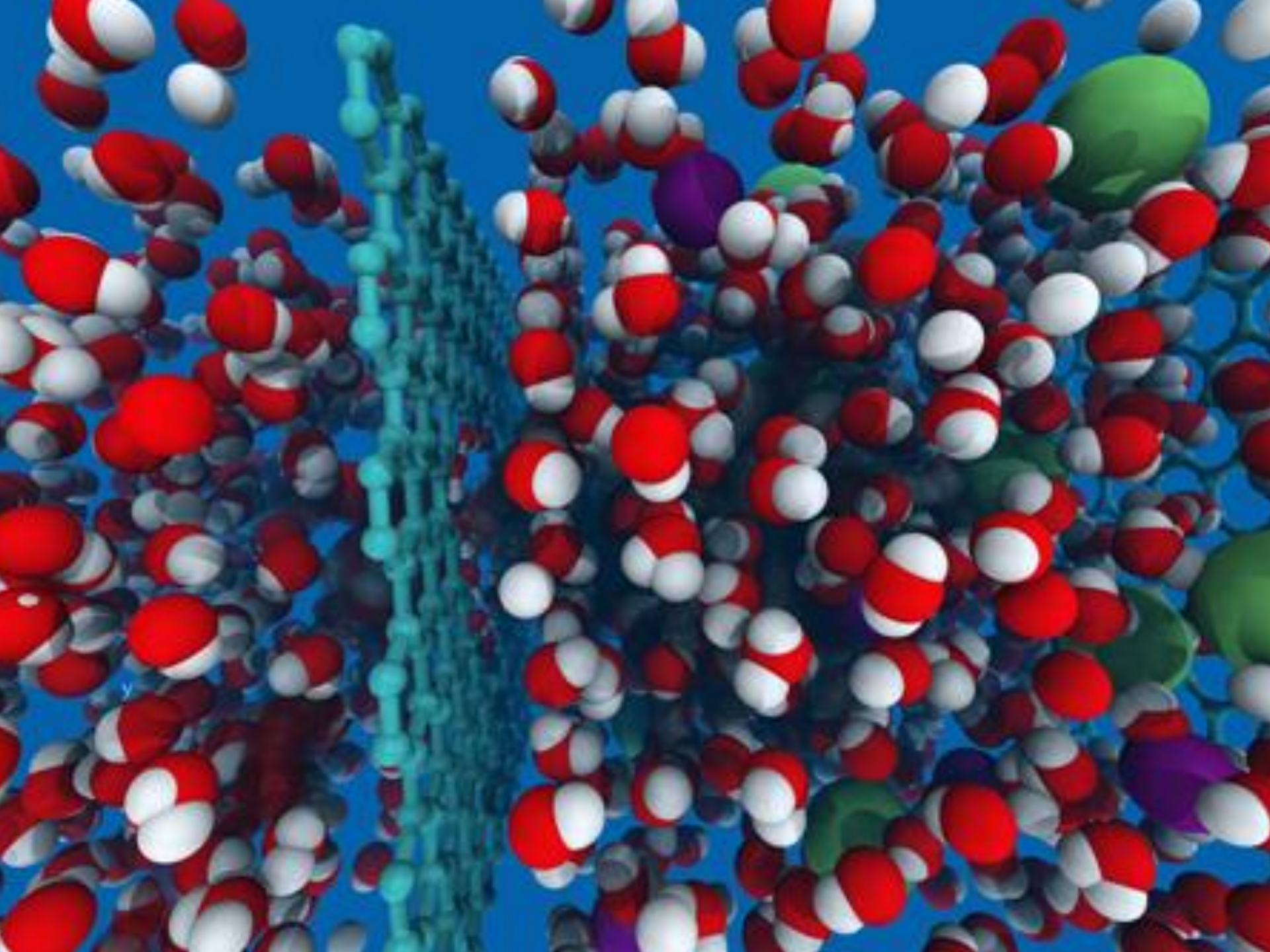
Il fullerene fu scoperto nel 1985 da [Robert Curl](#), [Harold Kroto](#) e [Richard Smalley](#), E' così chiamato da [Richard Buckminster Fuller](#), un architetto a cui si devono forme geometriche che richiamano fortemente le strutture molecolari.

Kroto, Curl, e Smalley hanno vinto il Premio Nobel per la chimica nel 1996.



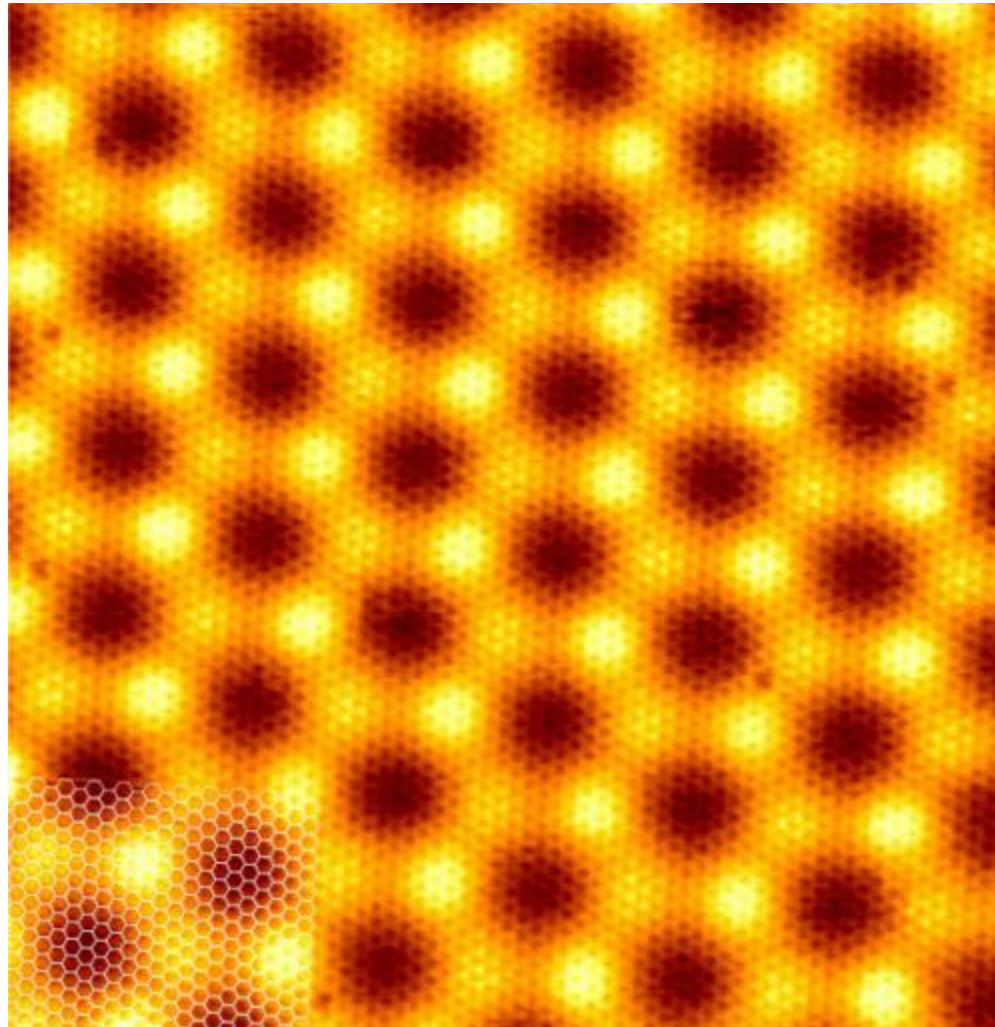






Breakthrough may lead to industrial production of graphene devices

Feb 09, 2015



**“Hope & curiosity
about the future
seemed better
than guarantees.
The unknown was
always so
attractive to
me...and still is.”**

Hedy Lamarr

