

# Fisica Quantistica e Scienza dei Materiali: i semiconduttori, l'elettronica miniaturizzata il Laser e la superconduttività

*Associazione*  
**UNIVERSITA'  
DEL TEMPO LIBERO  
DI CARAVAGGIO** *aps*



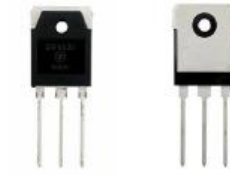
*G. Battistoni*  
*INFN Milano*

# Fisica Quantistica e Tecnologia

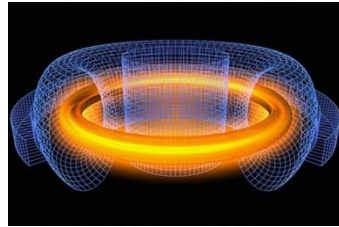
Nonostante tanti aspetti controintuitivi, la meccanica quantistica ha resistito a tutti i tentativi di confutazione, e ha permesso di ottenere un enorme quantità di ricadute, soprattutto nelle discipline che riguardano la **“Struttura della Materia”**



Laser



Transistor



Magneti Supercoduttori



Touch Screen

La fisica quantistica all'inizio (anni 1910-1930) aveva l'obiettivo di comprendere la natura atomica  
L'oggetto principale di studio era il singolo atomo

Una volta che gli strumenti matematici furono elaborati sufficientemente, si cercò di fare il salto successivo:

Prima rivoluzione quantistica

=

“sfruttare la meccanica quantistica per dominare il comportamento di un sistema di molti atomi”

# Metalli, Isolanti e Semiconduttori

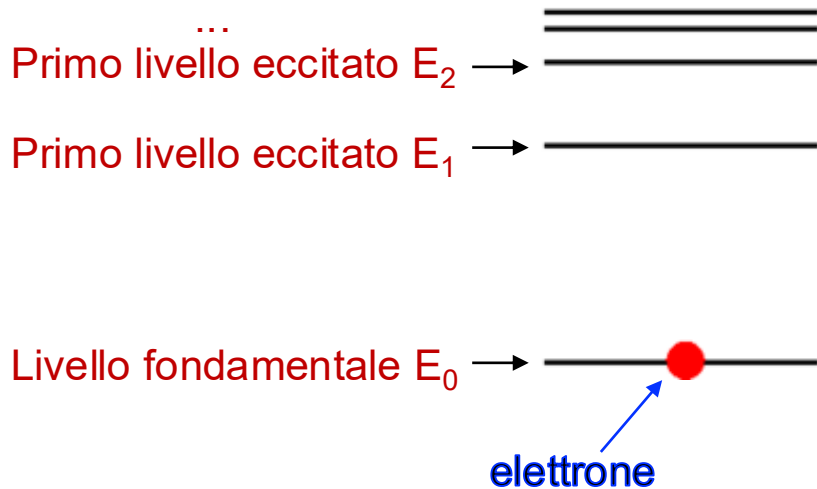
Perché alcuni materiali sono **conduttori** di corrente elettrica (tipicamente i metalli) e altri sono invece **isolanti**?

Esistono poi anche dei materiali che hanno un comportamento intermedio fra metalli e conduttori:  
i “**semiconduttori**”

*(Il termine “semiconduttore” fu usato per primo da Alessandro Volta, nel **1782**, osservando il comportamento dei materiali, ma con un significato diverso da quello che intendiamo oggi)*

# Dai livelli atomici alle “bande” di energia

Già nella seconda metà degli anni '20 del 900, la meccanica quantistica permetteva di stabilire che nei singoli atomi, e nelle molecole semplici, gli elettroni non potevano avere un'energia qualsiasi, ma potevano solo occupare dei livelli aventi un preciso valore



# Dai livelli atomici alle “bande” di energia

Già dal 1700-1800 si ipotizzava che la forma dei materiali cristallini fosse dovuta ad un particolare ordine degli elementi costituenti

Nel 1912, grazie ai raggi X (!!), Max Von Laue dimostra che sono gli atomi a disporsi in modo regolare: il “reticolo cristallino”

L'anno successivo W.H Bragg e W.L. Bragg riescono a misurare la distanza fra gli atomi nei reticoli cristallini

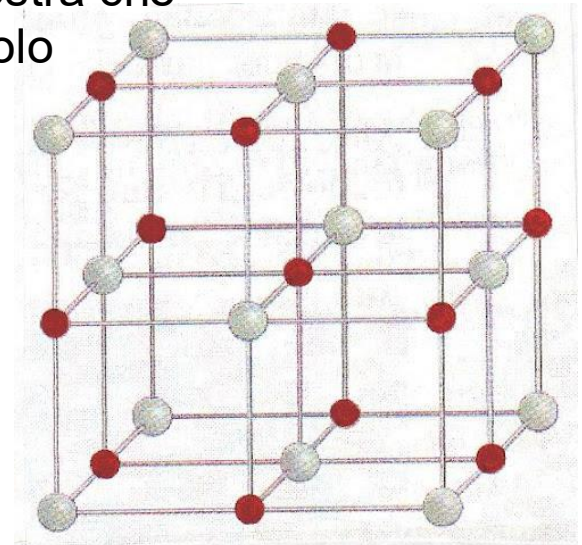


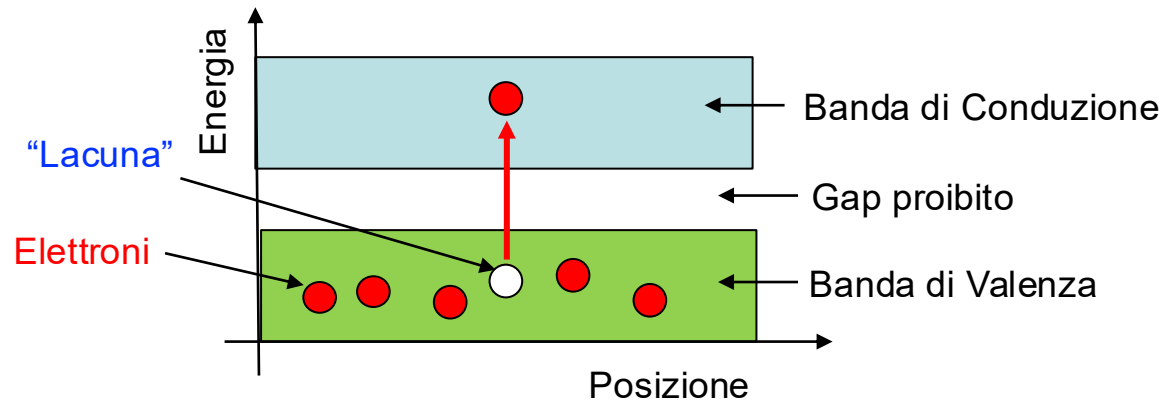
figura d

# Dai livelli atomici alle “bande” di energia

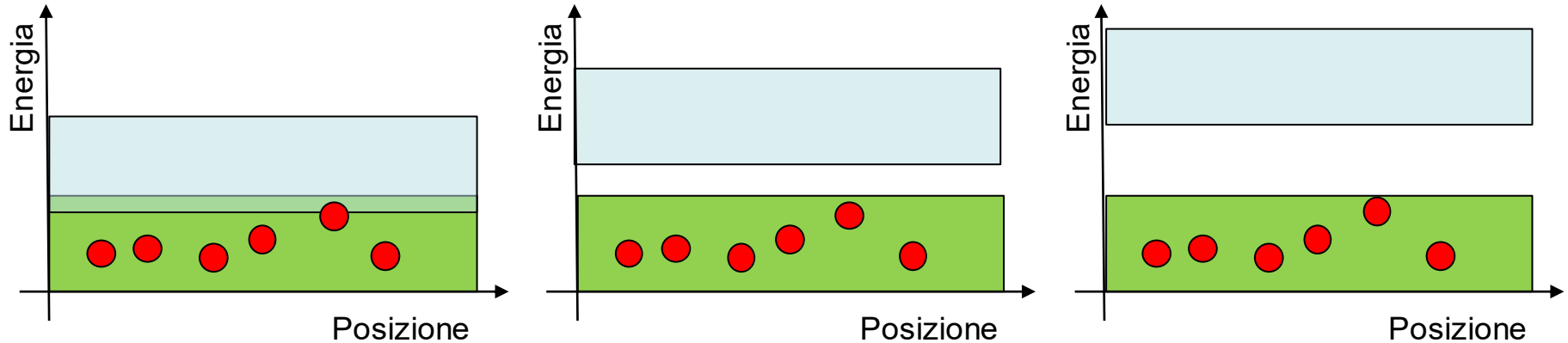


Nel 1928 Felix Bloch risolve le equazioni della meccanica quantistica per gli atomi nei reticoli: gli elettroni si muovono come onde attraverso il reticolo

Grazie anche all’apporto di altri fisici, da questo risultato si scopre che nei reticoli non ci sono più livelli di energia precisi, ma nascono delle “bande” di energia, alcune permesse e altre vietate



# Metalli, Isolanti e Semiconduttori



Condotore  
(metallo)

Semiconduttore

Isolante



*Germanio, Silicio, Arseniuro di Gallio, ....*

## Facciamo un passo indietro: l'elettronica

Non appena iniziò l'era delle telecomunicazioni (fine 800, inizio 900) nacque la necessità di trattare segnali elettrici ad alta frequenza

Nasce la tecnologia che chiamiamo “elettronica”

Sfruttando il fenomeno “**termoionico**”, nascono all'inizio del 900 le “**valvole termoioniche**”

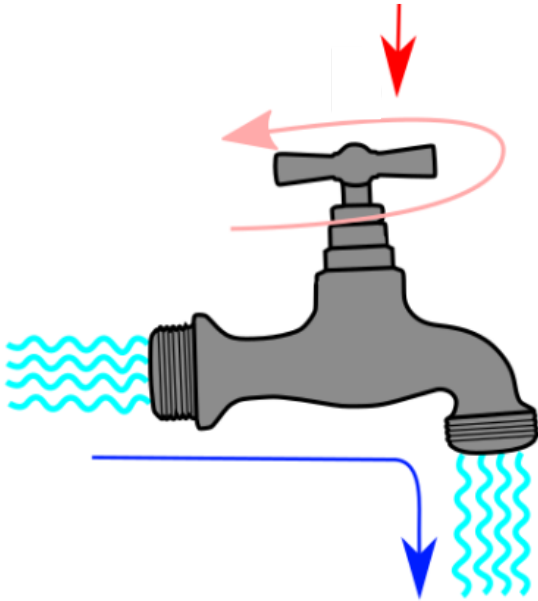
*Siamo ancora ampiamente nell'ambito della fisica classica*



Dispositivo basato sul fenomeno dell'emissione termoionica che fu scoperto casualmente da Edison nel 1884

La “Valvola” è un’invenzione di John Ambrose Fleming del 1904, poi migliorata nel 1906

## La similitudine idraulica



La valvola termoionica permette di **aprire, chiudere o regolare** un **flusso di elettroni** (= **corrente elettrica**), così come un rubinetto fa con un flusso di acqua

Permette di generare, amplificare e manipolare segnali di corrente elettrica: nasce l'elettronica e la tecnologia moderna della radio

Ma con l'elettronica puoi anche fare dei “circuiti logici”

I **Circuiti Logici** gestiscono l'elemento base di informazione:

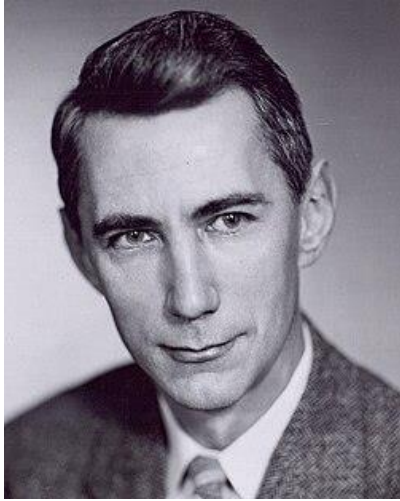
**Vero (1)** o **Falso (0)**

Ed esercitare funzioni logiche, per esempio come:

”**questo E quello**” oppure “**questo O quello**”

E' facile far corrispondere **1** e **0** a dei livelli fissati di tensione elettrica:

**Acceso** o **Spento**



Claude E. Shannon

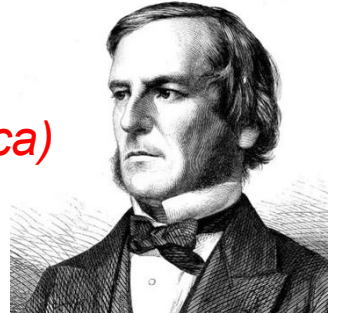
E' lui che nella sua tesi magistrale al MIT, nel 1937, dimostra che in certe condizioni, i circuiti elettronici possono realizzare le funzioni logiche

Inoltre dimostra che che con questi circuiti logici si possono creare strutture calcolanti

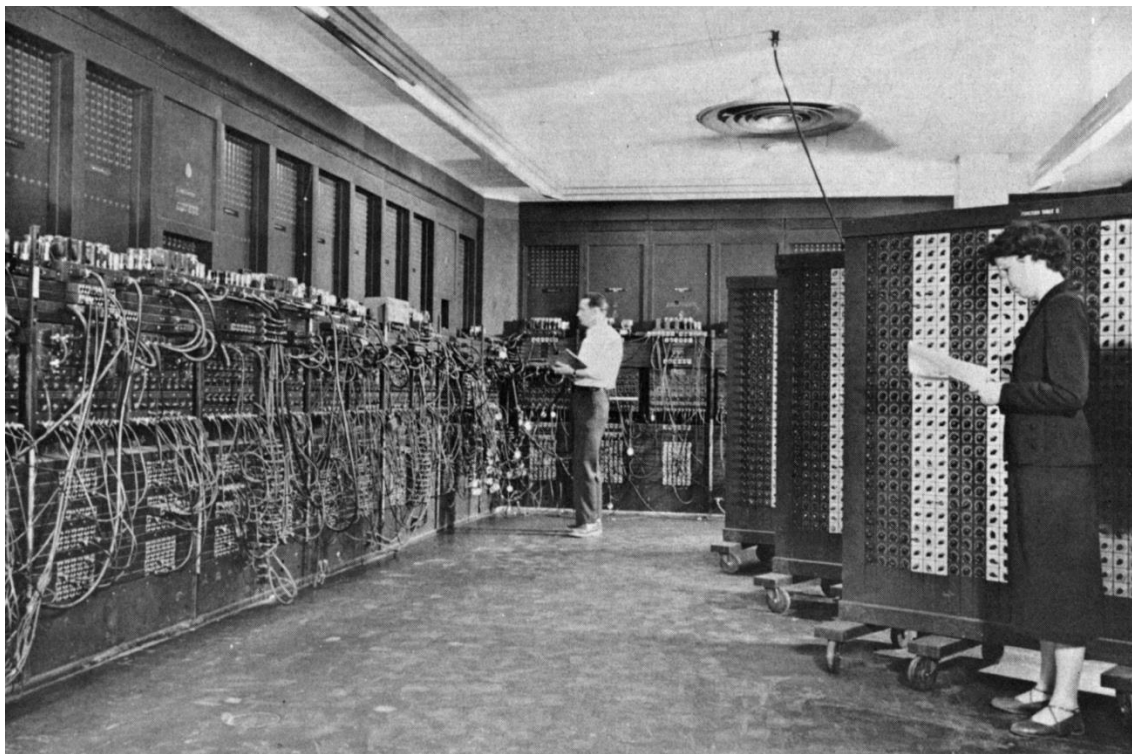
*Tutto ciò che serve è già formalizzato in matematica nella disciplina chiamata “**algebra di Boole**” formulata a metà dell'Ottocento, dal matematico britannico George Boole (1815-1864), dove bastano solo le cifre 1 e 0*

**→ nasce il calcolo elettronico (e ciò che ora chiamiamo informatica)**

Profondo impatto nella tecnologia, ma anche nella scienza di base, ed in particolare nella fisica e nelle sue applicazioni



# ENIAC: Electronic Numeric Integrator And Computer



Costruito fra il 1943 e il 1945 Univ. of Pennsylvania, Philadelphia, USA  
Annunciato nel 1946. Sviluppato per conto dell'esercito per calcolare le tabelle balistiche d'artiglieria.

**Dimensioni:** ENIAC occupava una stanza di **150 metri quadrati**, pesava **30 tonnellate** e conteneva oltre **17.000 valvole**

**Velocità di calcolo:** L'ENIAC poteva eseguire circa **5.000 addizioni o 300-350 moltiplicazioni al secondo**. Un processore moderno esegue miliardi di operazioni al secondo. L'ENIAC **operava a circa 100.000 cicli al secondo** (100 kHz), mentre i computer moderni operano a frequenze nell'ordine dei gigahertz (miliardi di cicli al secondo, 3-5 GHz).

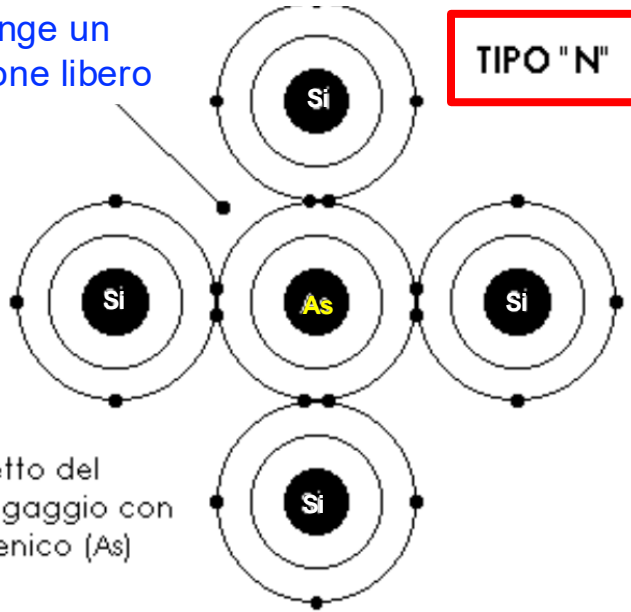
**Capacità di memoria:** **poteva memorizzare solo 20 numeri (di 10 cifre) alla volta**.

**Consumo Energetico:** L'ENIAC richiedeva **150 kW di potenza** per funzionare, mentre un PC moderno consuma poche centinaia di watt, offrendo una potenza infinitamente superiore

# La svolta che ha cambiato l'elettronica: i Semiconduttori "drogati" (Germanio e Silicio)

Aggiunge un  
Electrone libero

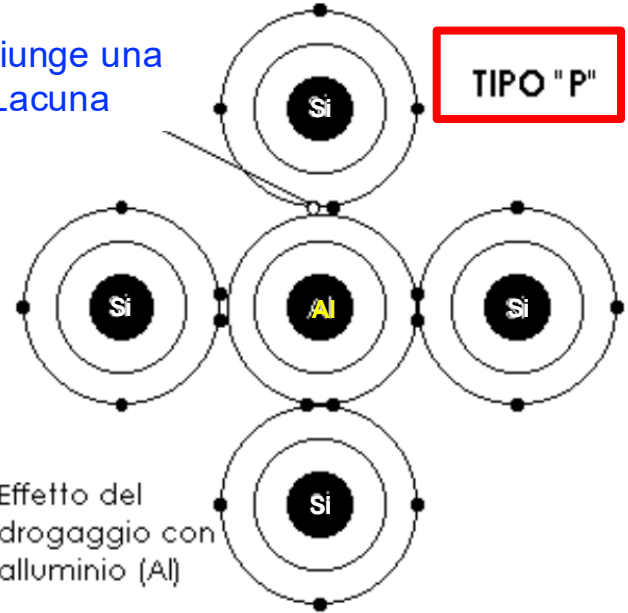
TIPO "N"



Effetto del  
drogaggio con  
arsenico (As)

Aggiunge una  
Lacuna

TIPO "P"



Effetto del  
drogaggio con  
alluminio (Al)

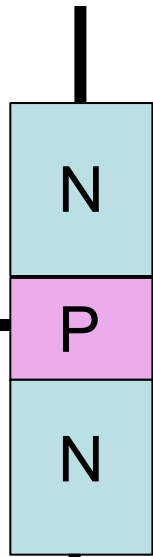
Il drogaggio aumenta la capacità di condurre corrente

E mettendo a contatto strati drogati P e N ("Giunzione P-N") si creano campi elettrici che fanno passare la corrente solo in una direzione (*effetto scoperto nel 1939*)

John Bardeen, William Shockley, Walter Brattain  
Nobel 1956

Collettore

Base



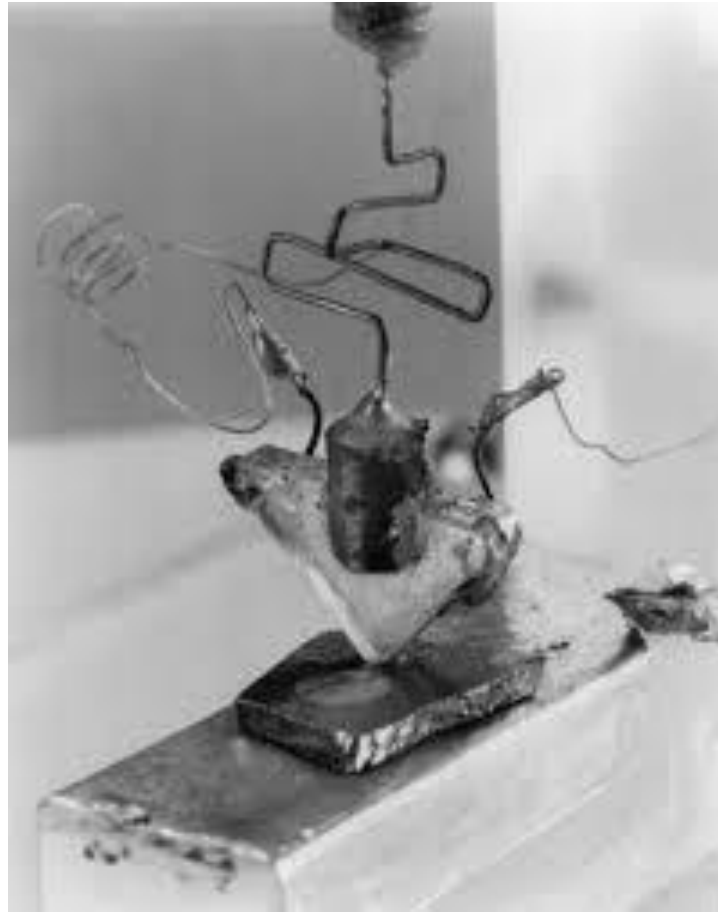
Emettitore



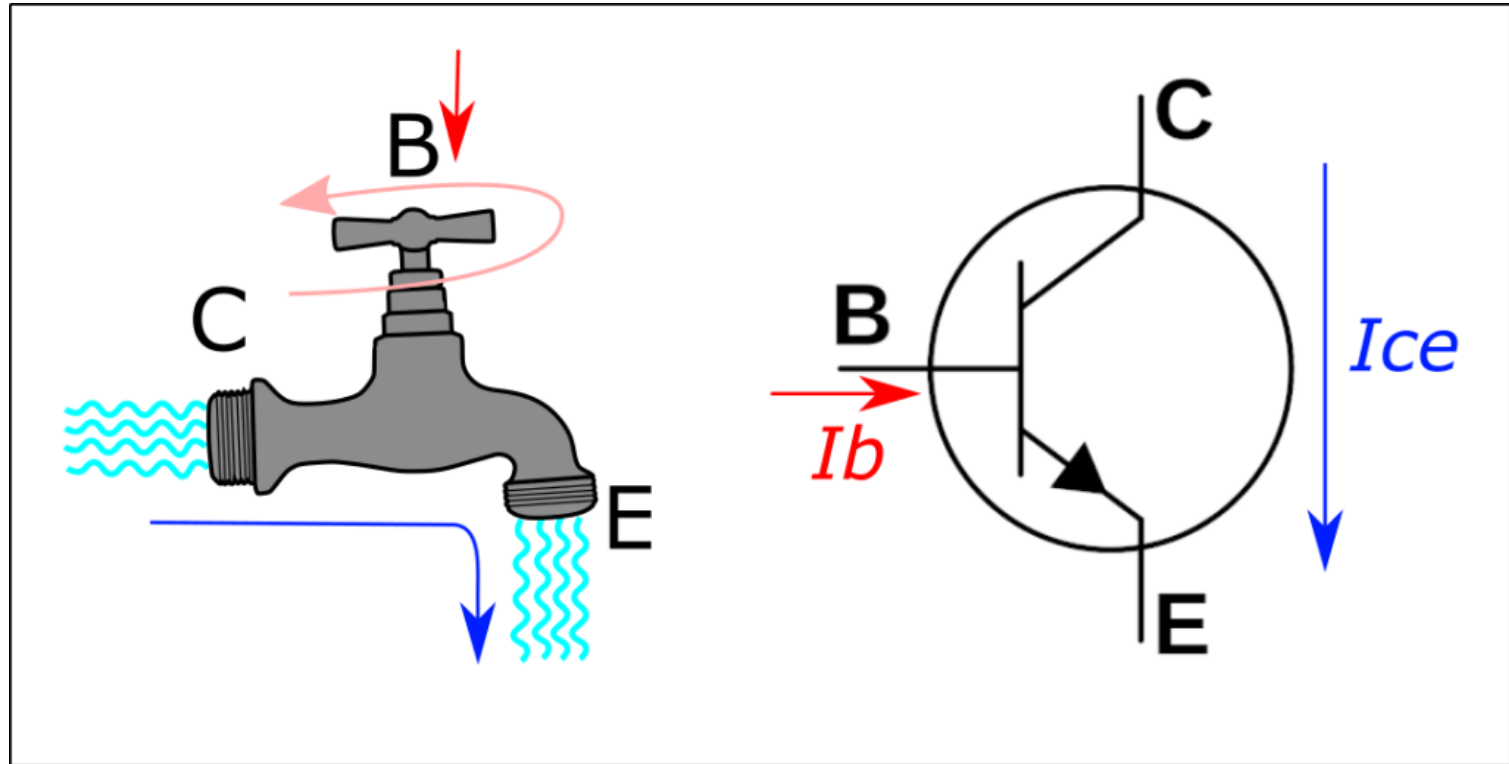
“...for their researches on semiconductors and their discovery of the **transistor effect**” (TRANSfer reSISTOR)

➡ Sostituzione delle valvole termoioniche

➡ Miniaturizzazione, Basso consumo!



## Vale la stessa analogia idraulica



# La prima radiolina a transistor

## Regency-TR1

(Texas Instruments)

USA, Novembre 1954

Usava 4 transistor e  
necessitava di una  
batteria da 22.5 V

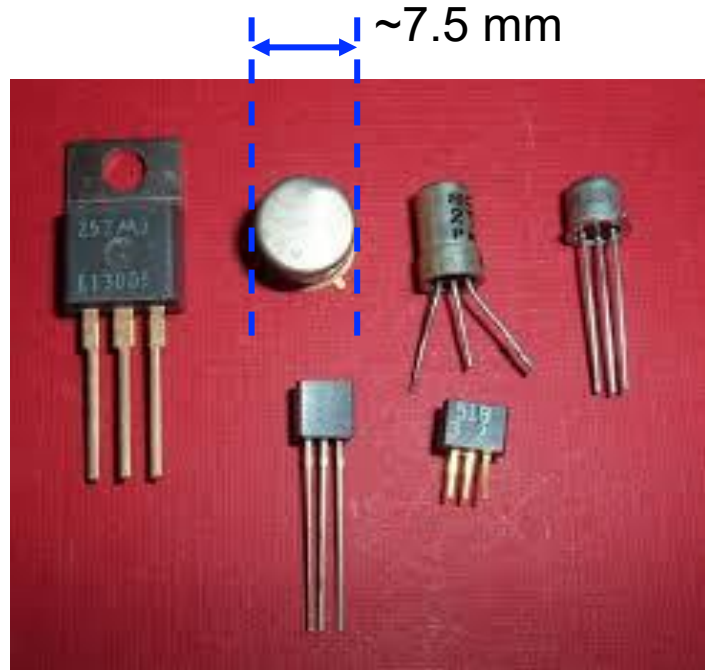
*Si vendeva a 49.95 \$*

12.7 cm

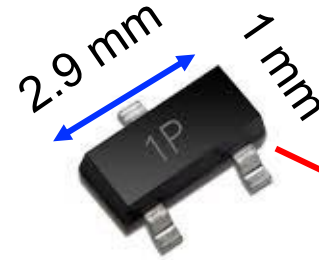
7.62 cm



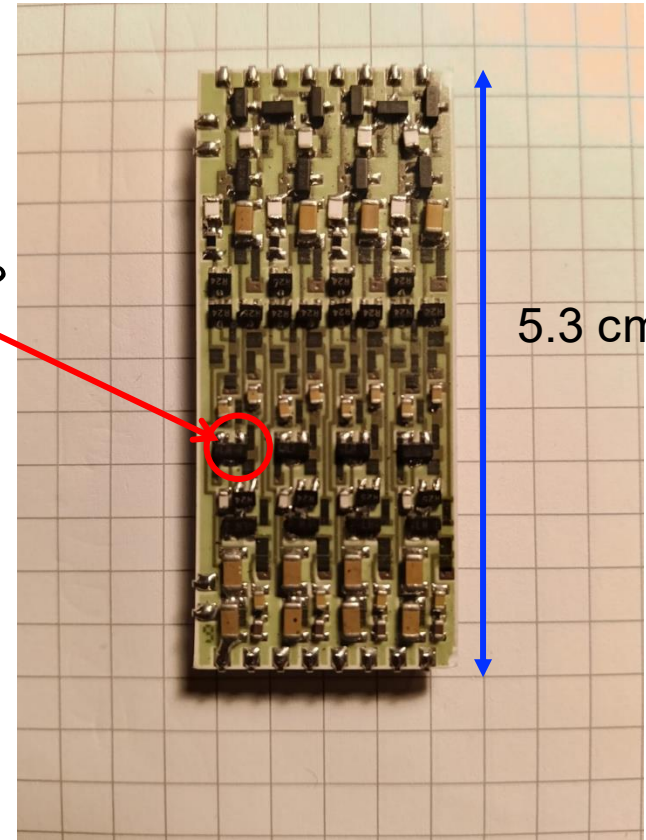
# I transistor: come sono evoluti



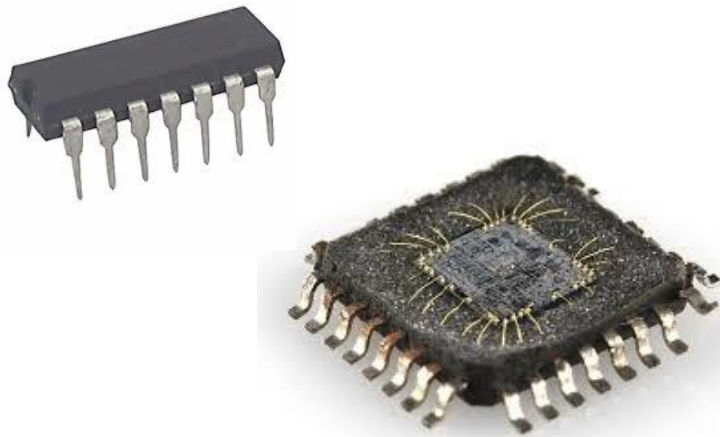
Per montaggi su circuito stampato



Per montaggi  
su circuito  
ibrido ceramico

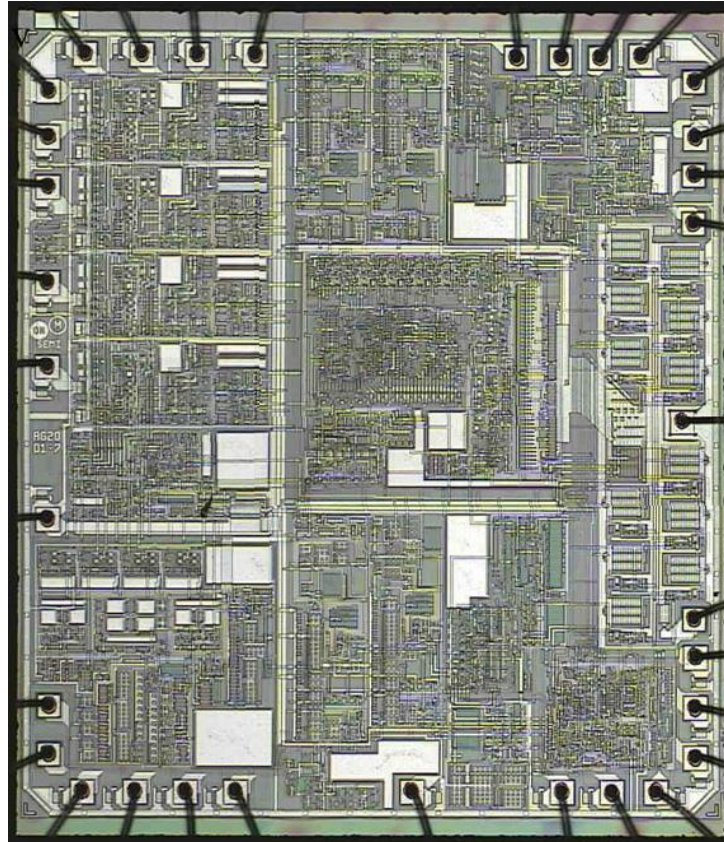


# I circuiti integrati



Oggi un singolo transistor occupa un'area di circa 60x60 nm

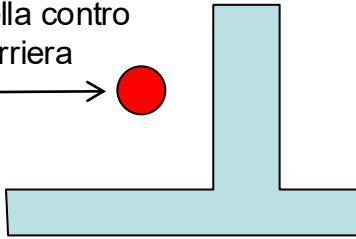
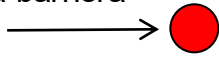
I chip possono ospitare circa **30 miliardi di transistor** in 1 cm<sup>2</sup>



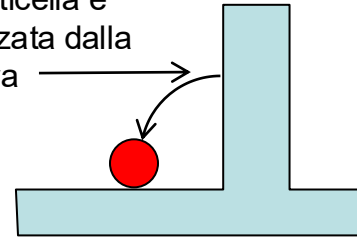
# L' "effetto tunnel" nella meccanica quantistica

## Fisica Classica

Particella contro una barriera

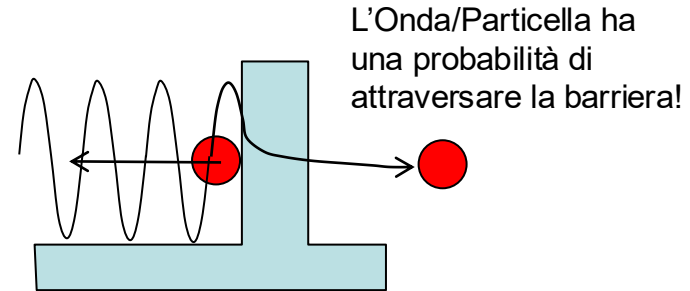
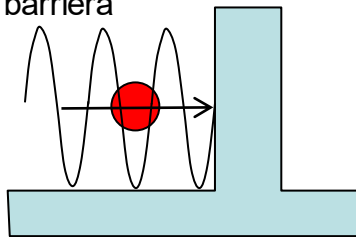


La particella è rimbalzata dalla barriera

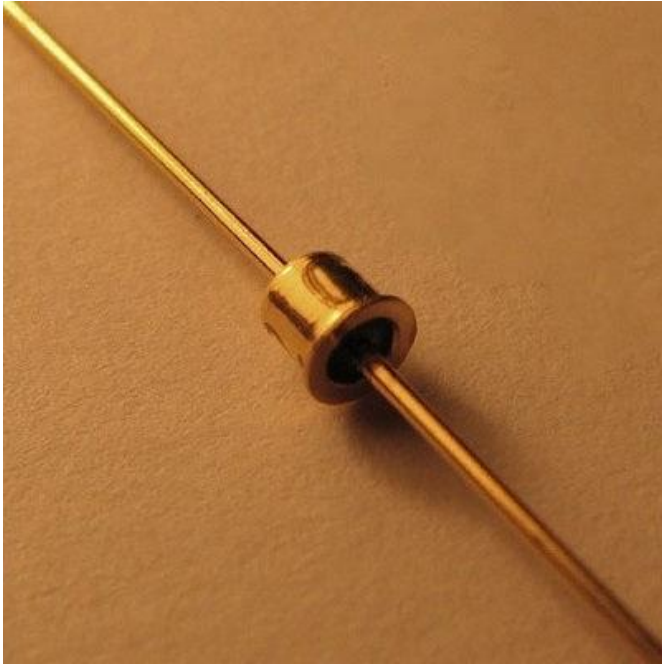


## Fisica Quantistica

Onda/Particella contro una barriera



## Il Diode Tunnel

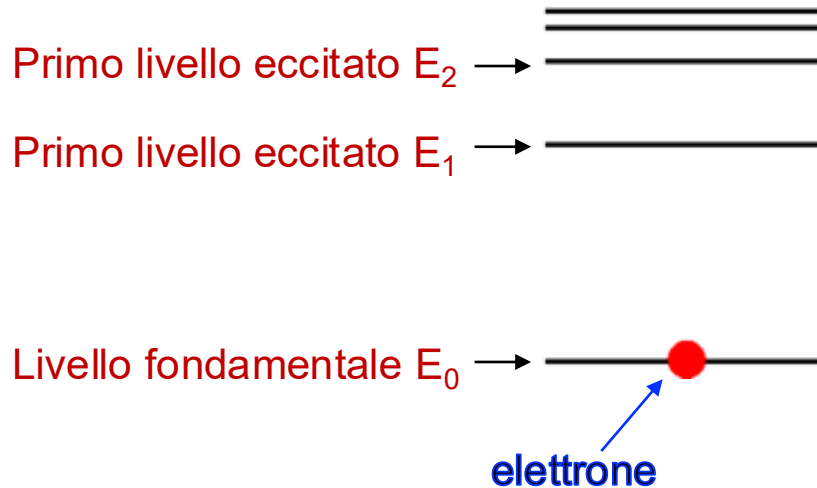


gli elettroni possono "attraversare" (tunneling) una barriera P-N anche se non hanno energia sufficiente per superarla classicamente, quasi come se passassero attraverso un muro

Impiego nell'elettronica ad altissima frequenza, in particolare per le microonde (radar, ecc.)

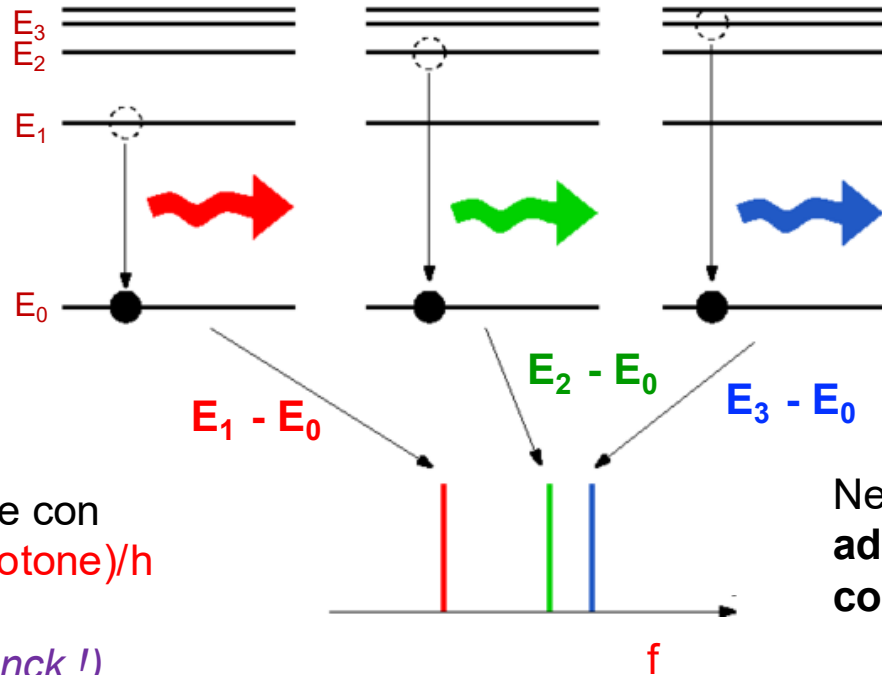
# Luce e livelli energetici degli atomi - 1

Ricordiamo ancora una volta come la meccanica quantistica ci abbia permesso di capire che, negli atomi, gli elettroni non possono avere un'energia qualsiasi, ma solo dei precisi valori (“livelli energetici”), caratteristici di ogni



# Luce e livelli energetici degli atomi - 2

Gli elettroni poi tendono a tornare allo stato energetico più basso (“livello fondamentale”), restituendo energia sotto forma di un “quanto” (fotone) che ha un preciso valore di energia



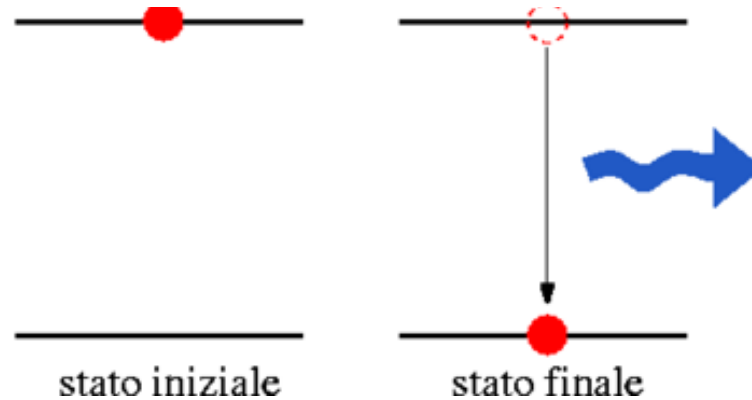
Pacchetto di onde con  
frequenza  $f = E(\text{fotone})/h$

*(la formula di Planck !)*

Nello spettro di luce visibile,  
ad ogni frequenza (o energia)  
corrisponde un colore

## Luce e livelli energetici degli atomi - 3

Questa si chiama “Emissione Spontanea”



Praticamente tutta la luce che noi vediamo viene generata per Emissione Spontanea

# Ed ecco di nuovo Albert Einstein!

Manometer für Überdruck . . .	$\phi = 1$	6	12	kg/qcm
Halbmesser der Röhrenfeder	$r_0 = 5,50$	5,56	5,55	cm
Große Halbachse d. Ellipse . . .	$a = 1,138$	0,847	0,850	„
Kleine „ „ „ . . .	$b = 0,293$	0,243	0,241	„
Wandstärke . . . . .	$h = 0,031$	0,048	0,065	„
Bogenlänge der Röhrenfeder	$\chi = 270^\circ$	270°	270°	
Aufbiegung nach Versuch . . .	$\Delta\chi : \phi = 4,575$	0,896	0,454	
„ „ Gl. (25a) . . .	$\Delta\chi : \phi = 0,982$	0,766	0,578	

Mit Rücksicht auf die nur unvollkommene Ellipsengestalt der Meridiankurven sowie auf die Verlötung der Enden, welche zweifellos die Theorie zugrunde liegende Achsensymmetrie um ZZ beeinträchtigt, kann man die Abweichungen der berechneten und gefundenen Aufbiegungen an der 6 kg- und 12 kg-Röhrenfeder als zulässig hinnehmen, zumal sie entgegengesetzte Vorzeichen besitzen. Bei der schwachen 1 kg Feder dagegen reicht dies zur Erklärung einer 4,8fachen Aufbiegung jedenfalls nicht aus, so daß man hierfür auf die strengere Formel (18) zurückgreifen müßte. Außerdem ist es nicht unwahrscheinlich, daß in diesem Falle die Doppelsymmetrie bei der Formänderung verloren gegangen ist, ein Umstand, dem man in Gl. (8) näherungsweise durch Hinzufügung eines oder mehrerer Terme mit geraden Vielfachen von  $\eta$  genügen könnte.

Danzig-Langfuhr, Techn. Hochschule.  
(Eingegangen 26. Februar 1917.)

## Zur Quantentheorie der Strahlung.

Von A. Einstein<sup>1)</sup>

Die formale Ähnlichkeit der Kurve der chromatischen Verteilung der Temperaturstrahlung mit Maxwell'schen Geschwindigkeits-Verteilungsgesetz ist zu frappant, als daß sie lange hätte verborgen bleiben können. In der Tat wurde bereits W. Wien in der wichtigen theoretischen Arbeit, in welcher er sein Verschiebungsgesetz

$$\rho = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad (1)$$

ableitete, durch diese Ähnlichkeit auf eine weitergehende Bestimmung der Strahlungsformel geführt. Er fand hierbei bekanntlich die Formel

$$\rho = \epsilon \nu^3 \frac{e^{-h\nu/kT}}{kT} \quad (2)$$

sche Strahlungsformel). Heute wissen wir, daß keine Betrachtung, welche auf die klassische Mechanik und Elektrodynamik aufgebaut ist, eine brauchbare Strahlungsformel liefern kann, sondern daß die klassische Theorie notwendig auf die Rayleigh'sche Formel

$$\rho = \frac{k\alpha}{h} \nu^2 T \quad (3)$$

führt. Als dann Planck in seiner grundlegenden Untersuchung seine Strahlungsformel

$$\rho = \alpha \nu^3 \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (4)$$

auf die Voraussetzung von diskreten Energie-Elementen gegründet hatte, aus welcher sich in rascher Folge die Quantentheorie entwickelte, geriet jene Wiensche Überlegung, welche zur Gleichung (2) geführt hatte, naturgemäß wieder in Vergessenheit.

Vor kurzem nun fand ich eine der ursprünglichen Wienschen Betrachtung<sup>1)</sup> verwandte, auf die Grundvoraussetzung der Quantentheorie sich stützende Ableitung der Planck'schen Strahlungsformel, in welcher die Beziehung der Maxwell'schen Kurve zu der chromatischen Verteilungskurve zur Geltung kommt. Diese Ableitung verdient nicht nur wegen ihrer Einfachheit Beachtung, sondern besonders deshalb, weil sie über den für uns noch so dunklen Vorgang der Emission und Absorption der Strahlung durch die Materie einige Klarheit zu bringen scheint. Indem ich einige vom Standpunkte der Quantentheorie nabeliegende Hypothesen über die Strahlungs-Emission und -Absorption von Molekülen zugrunde legte, zeigte ich, daß Moleküle mit im Sinne der Quantentheorie bei Temperaturgleichgewicht verteilten Zuständen, im dynamischen Gleichgewicht mit Planck'scher Strahlung stehen; es ergab sich auf diesem Wege die Planck'sche Formel (4) in verblüffend einfacher und allgemeiner Weise. Sie ergab sich

Articolo del 1917 dal titolo:

”Sulla teoria quantistica della radiazione”

Dimostra che può esistere anche una

”Emissione stimolata”

# Emissione Stimolata di luce

Se ho un atomo  
dove un elettrone si  
trova già ad un  
livello eccitato  
(per esempio  $E_1$ )



E invio un fotone  
con energia  
esattamente  $E_1 - E_0$



In questo modo si può aumentare il numero di quanti!  
→ un amplificatore di luce

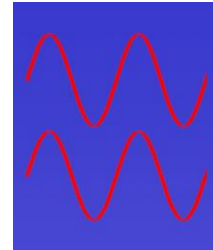
# Caratteristiche dell'Emissione Stimolata

I due fotoni che si trovano nello stato finale sono del tutto indistinguibili: hanno la stessa energia, la stessa fase, sono emessi nella stessa direzione.

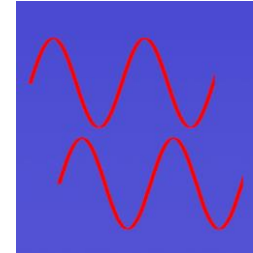
La luce ordinaria non ha queste caratteristiche:

- fotoni di tante energie diverse,
- fasi randomiche,
- tutte le direzioni

In fase



fuori fase

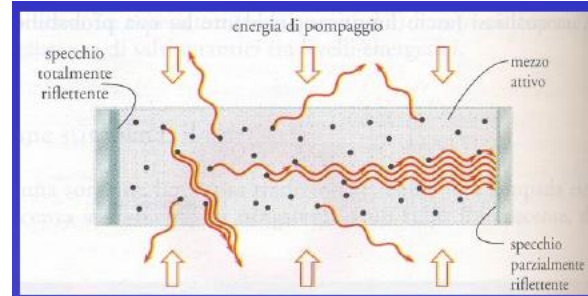


Ma non si può creare energia dal nulla:

un sistema di atomi, prima di poter essere stimolato, deve essere "pompato" in uno stato eccitato

# Come generare in modo efficiente la luce per emissione stimolata

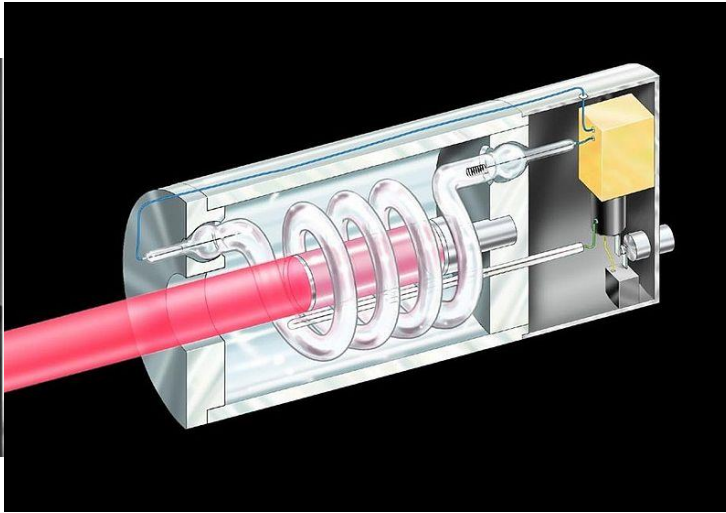
Un sistema di molti atomi viene “pompato” ad un livello energetico eccitato  $E_1$ .



Vengono generati fotoni di energia  $E_1 - E_0$  per emissione spontanea

# LASER

## *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*



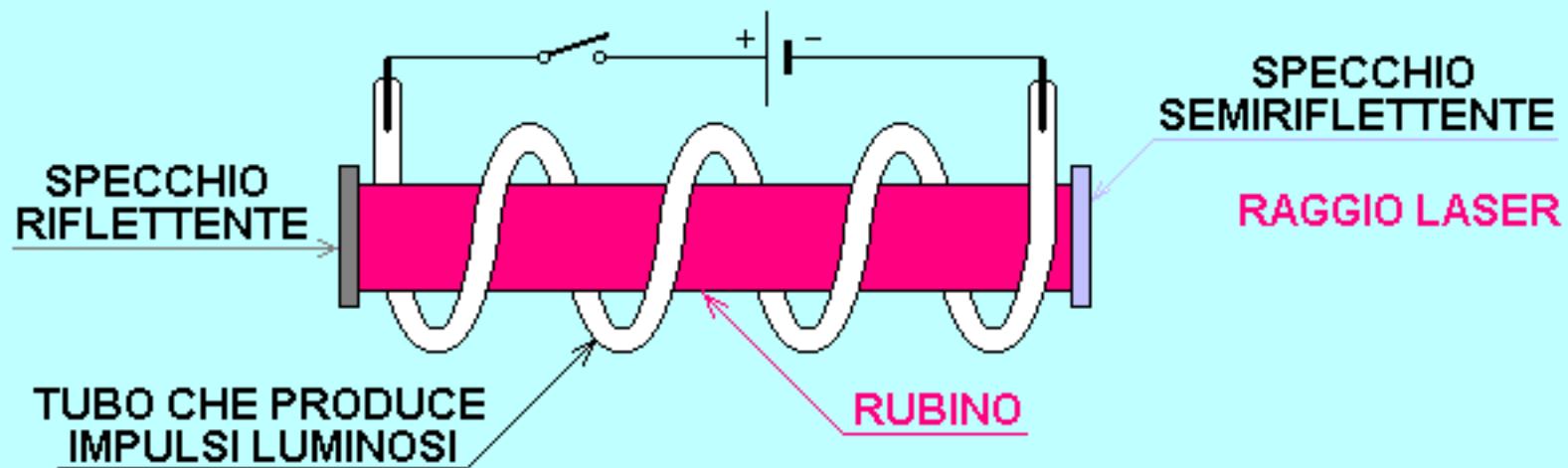
Cilindretto di rubino sintetico  
lungo circa 2 cm e con diametro 1 cm

Estremità, pulite e rese perfettamente  
parallele, erano ricoperte da uno strato  
d'argento, riflettente da una parte e  
semiriflettente dall'altra.

Il rubino, che è un materiale fluorescente,  
veniva pompato con una sorgente di luce  
bianca ad alta intensità disposta a spirale

Theodore Maiman, Hughes Labs (USA) 1960.

**Luce rossa** con lunghezza d'onda **694.3 nm**  
(frequenza 431 791 GHz, energia = 1.786 eV)



# Tappe precedenti nella storia del Laser

In realtà prima fu inventato il **MASER** (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) 1953-1954

Il fisico americano **Charles H. Townes**, insieme ai colleghi della Columbia University, e contemporaneamente, i fisici sovietici **Nikolay Basov** e **Aleksandr Prokhorov**  
**Premio Nobel 1964:** Charles Townes, Nikolay Basov e Aleksandr Prokhorov

Altri scienziati furono fondamentali: **Gordon Gould**, che rivendicò l'invenzione del termine "laser", e **Arthur Schawlow**

Microonde:

$\lambda$  tra 1 mm e 30-33 cm (tra le onde radio e gli infrarossi) → frequenze tra 1 GHz e 300 GHz

Il Maser si usa in vari campi: Orologi atomici e navigazione satellitare, Radioastronomia, Amplificazione a bassissimo rumore, Ricerca e Sviluppo

# Come sfruttare le caratteristiche della luce LASER

**La coerenza temporale** (capacità di rimanere in fase nel tempo):

permette di creare impulsi ultra-brevi e precisi.

È il motivo per cui possiamo usare i laser per la chirurgia oculare o per leggere i dati da un supporto ottico senza "sbavature".

**La coerenza spaziale** (capacità di rimanere in fase mantenendo la direzione per lunghe distanze) :

consente di concentrare una quantità enorme di energia in un punto piccolissimo.

Per esempio: questo è essenziale per il **taglio laser** industriale o per misurare con precisione millimetrica la distanza tra la Terra e la Luna.

# Esistono tanti tipi di Laser

Tipi di laser	Mezzo attivo	$\lambda$ principale ( $\mu\text{m}$ )	Efficienza
Laser a Stato Solido	Rubino	0.6943	alta
	Nd <sup>3+</sup> :YAG	1.064	
	Fibre di silicio	1.55	
Laser a gas	He-Ne	0.6328	bassa
	Ar <sup>+</sup>	0.515	
Laser a eccimeri	KrF eccimeri	0.248	bassa
	ArF eccimeri	0.193	
Laser a stato solido		dall'IR all'UV	alta

# Applicazioni mediche

Con il LASER si possono avere azioni di tipo:

- Fotoablativa
- Fototermica
- Fotomeccanica
- Fotochimica



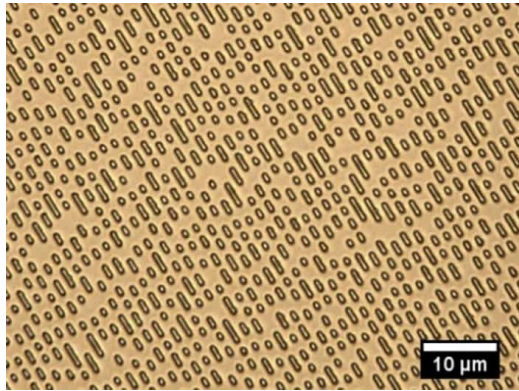
Oftalmologia

Dermatologia



La tecnologia del Laser ad “eccimeri” è quella principale per le applicazioni mediche

# CD e DVD

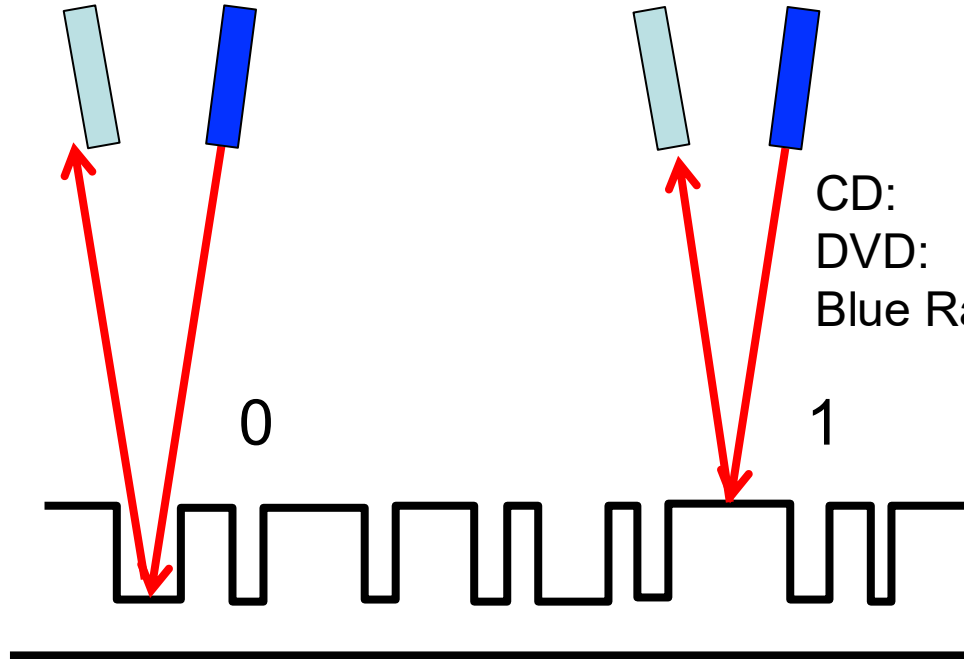


Sensore  
Ottico

Emittitore  
Laser

Sensore  
Ottico

Emittitore  
Laser



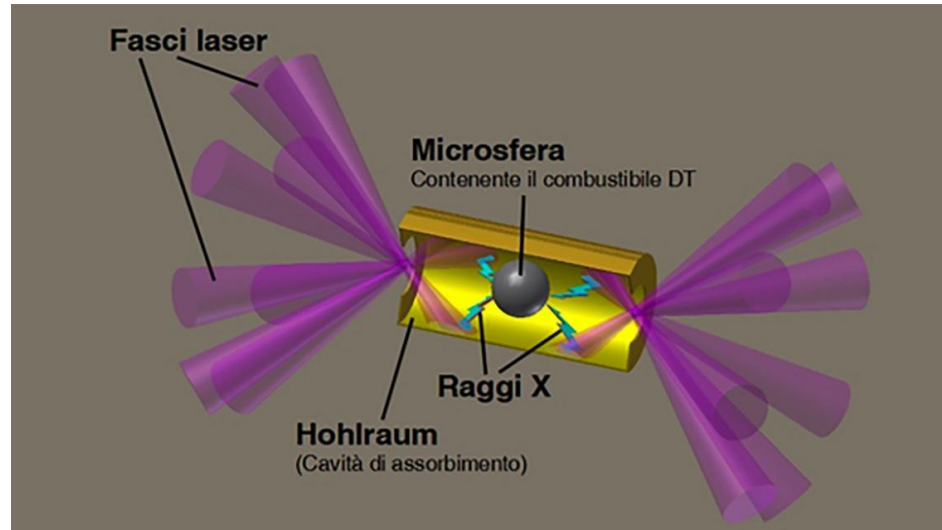
CD:  $\lambda \sim 780 \text{ nm}$   
DVD:  $\lambda \sim 650 \text{ nm}$   
Blue Ray:  $\lambda \sim 405 \text{ nm}$

Dimensioni "solco": CD:  $800 \text{ nm}$ ; DVD:  $400 \text{ nm}$ ; Blue Ray:  $150 \text{ nm}$

# Laser e Fusione Nucleare Inerziale

Si possono generare impulsi laser della durata di  $10^{-12}$  s in cui il livello di potenza durante l'impulso raggiunge i  $10^{15}$  W (1000 volte la potenza complessiva di tutte le centrali elettriche del mondo)

Permettono di comprimere una miscela deuterio-trizio per innescare la fusione nucleare



# La superconduttività



Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926).  
Premio Nobel per la Fisica 1913.

Nel 1911 ottenne un risultato straordinario, oltre che incompatibile con tutte le previsioni esistenti: la resistenza elettrica del mercurio, alla temperatura dell'elio liquido ( $-269^{\circ}\text{C}$ ), crollava improvvisamente a zero, tanto da suggerirgli un nuovo stato della materia, che chiamò “superconduttività”.

*Ci volle molto tempo prima di poterla capire...*

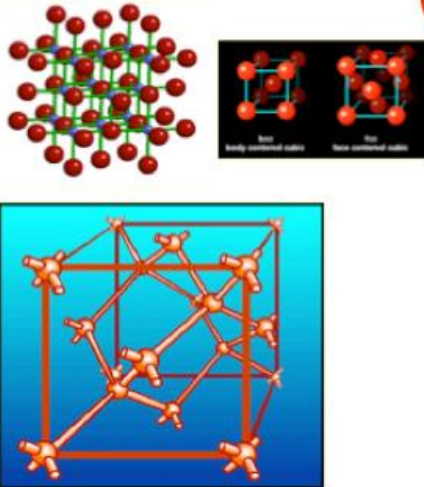
Si manifesta in certi materiali al di sotto di un determinato valore di temperatura, diverso per ogni materiale (**Temperatura Critica**)

Oggi sappiamo che è uno dei pochissimi effetti quantistici che si manifesta su scala macroscopica (*un'altro è l'emissione stimolata che abbiamo discusso poco fa*)

## Qualche parola in più sul fenomeno

L'esperienza attuale mostra la presenza, di tipi di superconduttori con strutture chimiche profondamente differenti

metallici bassa  $T_c$   
Struttura 3-Dimensionale



Quelli di natura metallica che presentano una temperatura critica bassa con valori a partire da **frazioni di grado Kelvin** fino ai 23K (-250°C) del composto di Niobio-Germanio (Nb<sub>3</sub>Ge)

## Qualche parola in più sul fenomeno

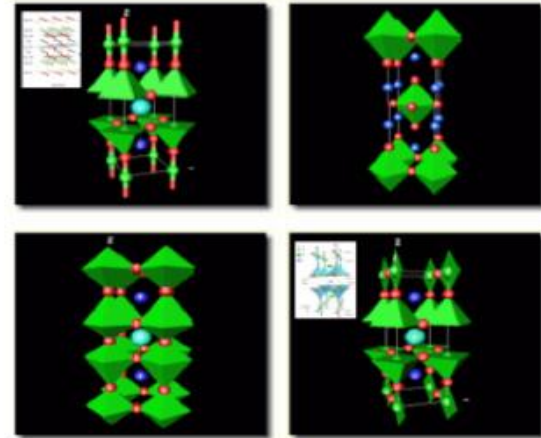
E poi ce ne sono altri di natura ceramica con una struttura chimica complessa a strati, scoperti da Bednord e Muller (Nobel 1986), dove la temperatura critica va da 30K (-243°C) e sale fino a 133K (-140°C) del composto  $\text{Hg}_{0.8}\text{Pb}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ .

Per l'uso dei primi c'è bisogno dell'elio allo stato liquido mentre per i secondi è sufficiente l'azoto liquido → molto meno costoso.

Sono stati scoperti recentemente altri materiali che diventano superconduttori a temperatura più elevata:

→ oggi la ricerca in questo campo è concentrata su questa direzione

Ceramici alta  $T_c$   
Struttura 2-dimensionale  
a strati



# La spiegazione fisica

La spiegazione è una conseguenza del comportamento quantistico che è alla base del fenomeno della superconduttività e fu interpretato dai fisici **Bardeen, Cooper, Schrieffer** nel **1957** (Nobel **1973**).



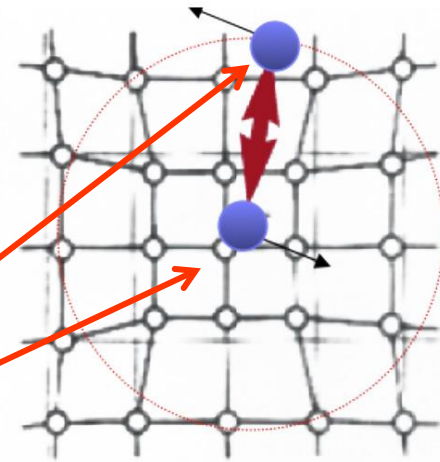
J. Bardeen



L. N. Cooper



J. R. Schrieffer



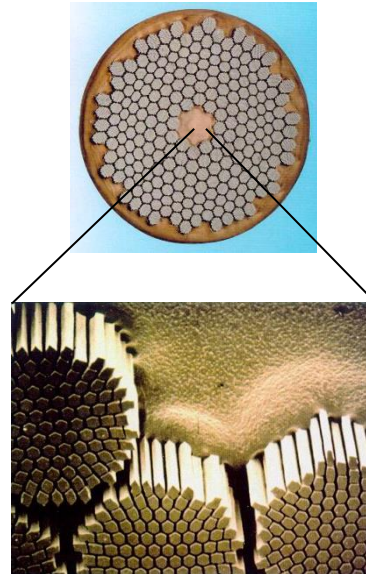
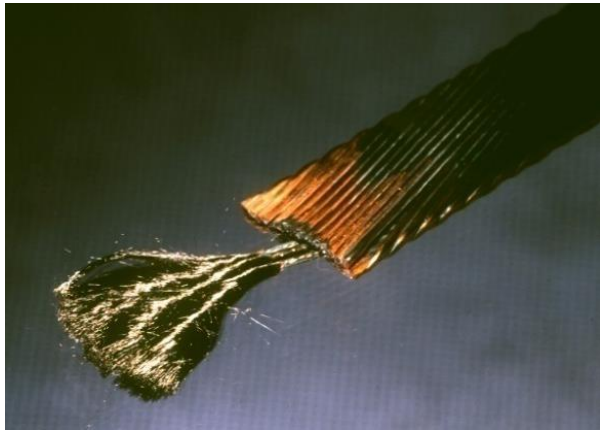
*Lo stesso del transistor!!!*

Sotto una certa temperatura, gli **elettroni di conduzione con "spin" diretto in direzioni opposte** si accoppiano 2 a 2 ("**coppie di Cooper**") e in questo modo diventano una sorta di nuova particella libera di muoversi senza resistenza da parte del reticolo cristallino

# Applicazioni della superconduttività

A partire dagli anni '60, si riescono a costruire elettro-magneti superconduttori con campi al di sopra di 1 Tesla

Problema: un cavo di materiale superconduttore massiccio (tipo il classico filo di rame) non va bene: bisogna avere filamenti sottili in una matrice di rame: i filamenti hanno un diametro di 10-100 micron!



Magneti ad alto campo ma con un consumo ridotto di potenza elettrica

# Applicazioni della superconduttività

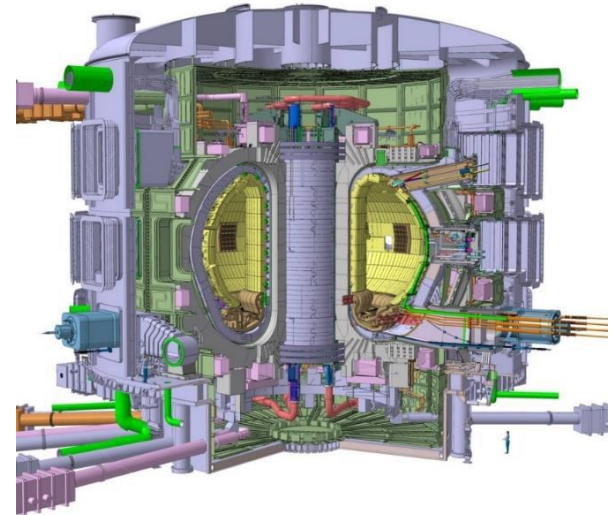


Le RMN con campi da 3 Tesla o più (dopo il 2000):  
Un magnete ordinario richiederebbe una potenza di esercizio di oltre 100-200 kW.  
Per un magnete superconduttore di questo tipo bastano pochi kW

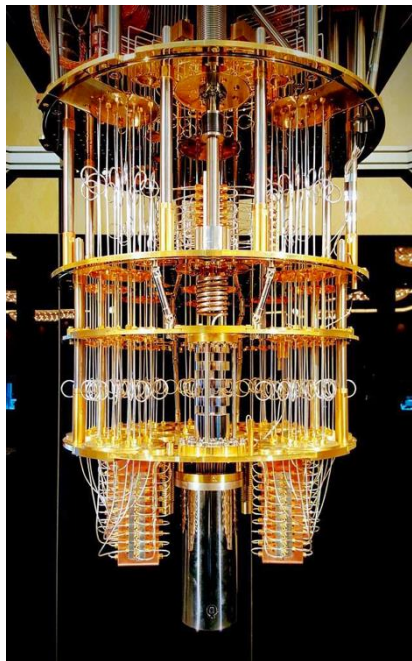


Gli acceleratori di particelle  
LHC: 8 Tesla

Il campo magnetico per confinare il plasma nei reattori a fusione (~12 Tesla)



# Applicazioni della superconduttività



I computer “quantistici”



Linee elettriche ad alta densità di corrente (100 volte più del rame!)

Es.: Long Island (574 MW, 138 kV, 600 m)

Il treno a “levitazione magnetica”



Grazie per  
l'attenzione!



Per qualsiasi domanda sul tema:  
[giuseppe.battistoni@mi.infn.it](mailto:giuseppe.battistoni@mi.infn.it)