

Venerdì 14 novembre 2025  
ore 21:00

Salone Estense del Comune di Varese -  
Via Sacco, 5



Incontri tra Cielo...

Conferenza  
"I 100 anni della  
meccanica quantistica"



... e Terra

In occasione del centenario della prima formulazione coerente della meccanica quantistica, ripercorriamo l'articolata storia di questa straordinaria teoria.


Relatore: prof. Luca Molinari

Docente di Fisica all'Università degli Studi di Milano e  
Presidente della Società Astronomica Schiaparelli



Seguici anche  
sui social



A photograph of a coastal cliffside with a church and a lighthouse in the background. The cliff is composed of layered, reddish-brown rock. In the background, there is a small town with a prominent church spire and a lighthouse. The sea is visible to the right.

I 100 anni  
della MECCANICA QUANTISTICA  
1925 - 2025

Luca G. Molinari - 14 novembre 2025  
Società Astronomica G.V. Schiaparelli



Werner Heisenberg  
(1901-1976)

Nel giugno 1925, qui a Helgoland, il 23enne Werner Heisenberg fece un passo decisivo nella formulazione della MQ, la teoria fondamentale delle leggi naturali del mondo degli atomi, che ha influito sul pensiero umano ben oltre la fisica.



IM JUNI DES JAHRES 1925  
GELANG HIER AUF HELGOLAND  
DEM 23-JÄHRIGEN  
WERNER HEISENBERG  
DER DURCHBRUCH  
IN DER FORMULIERUNG  
DER QUANTENMECHANIK,  
DER GRUNDLEGENDEN THEORIE  
DER NATURGESETZE  
IM ATOMAREN BEREICH,  
DIE DAS MENSCHLICHE DENKEN  
WEIT ÜBER DIE PHYSIK HINAUS  
TIEFGREIFEND BEEINFLUSST HAT.

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PHYSIK  
WERNER-HEISENBERG-INSTITUT  
UND  
DEUTSCHE PHYSIKALISCHE GESELLSCHAFT  
14 JUNI 2000

Niels Bohr  
W. Heisenberg

Copenhagen



Max Born  
Wolfgang Pauli  
Werner Heisenberg  
Pascual Jordan

Gottinga

Berlino

Max Planck,  
Albert Einstein  
Gustav Hertz

Arnold Sommerfeld  
Gustav Wien

Monaco

Louis de Broglie (Parigi)  
Erwin Schrödinger (Zurigo)  
Paul A.M. Dirac (Cambridge)

Copenhagen (1921)



1885-1962

La seconda rivoluzione quantistica si compì in soli due anni. Fu impresa di giovani brillanti, con Niels Bohr, Max Born, ed Erwin Schrödinger

Göttingen



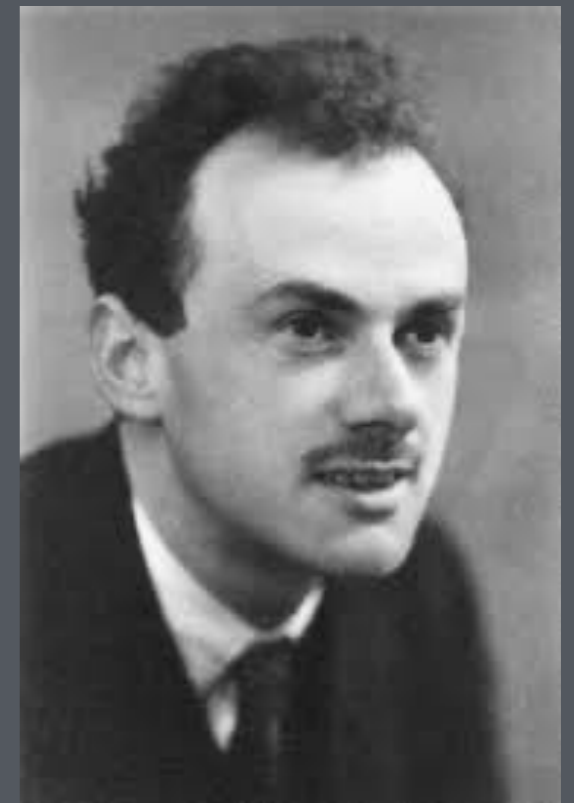
1882-1970



Werner Heisenberg  
(Wurzburg 1901-  
Monaco B.1976)



Erwin Schrödinger  
(Vienna 1887-  
Vienna 1961)



Paul M. A. Dirac  
(Bristol 1902 -  
Tallahassee 1984)



Pascual Jordan  
(Hannover 1902-  
Amburgo 1980)



Wolfgang Pauli  
(Vienna 1900-  
Zurigo 1958)

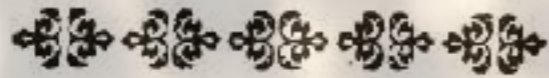
La seconda rivoluzione quantistica (1925-27) fu preceduta dalla prima, inaugurata nel 1900 da Planck, e poi dalle idee di Einstein, Bohr, de Broglie e molti altri, in risposta ai problemi aperti della fisica dell'ottocento

# Alcuni antefatti

## 1800-1900

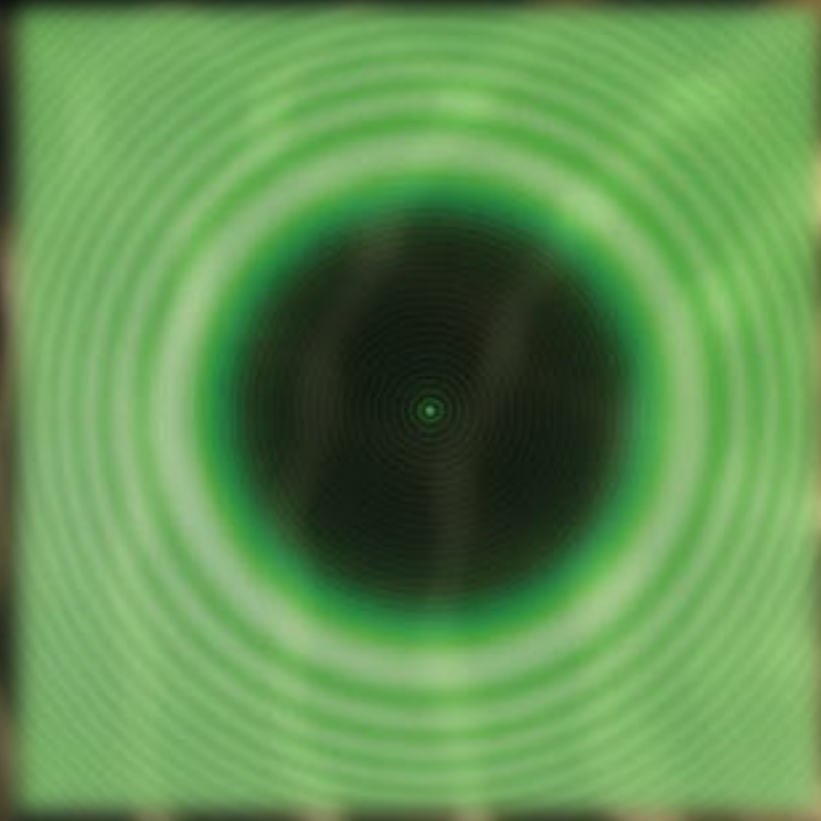
# PROPOSITIO I.

*Lumen propagatur seu diffunditur non solum Directè,  
Refractè, ac Reflexè, sed etiam alio quodam  
Quarto modo, DIFFRACTE'.*



Gesuita F. M. Grimaldi,  
De lumine (1665)

Si afferma il modello ondulatorio della luce



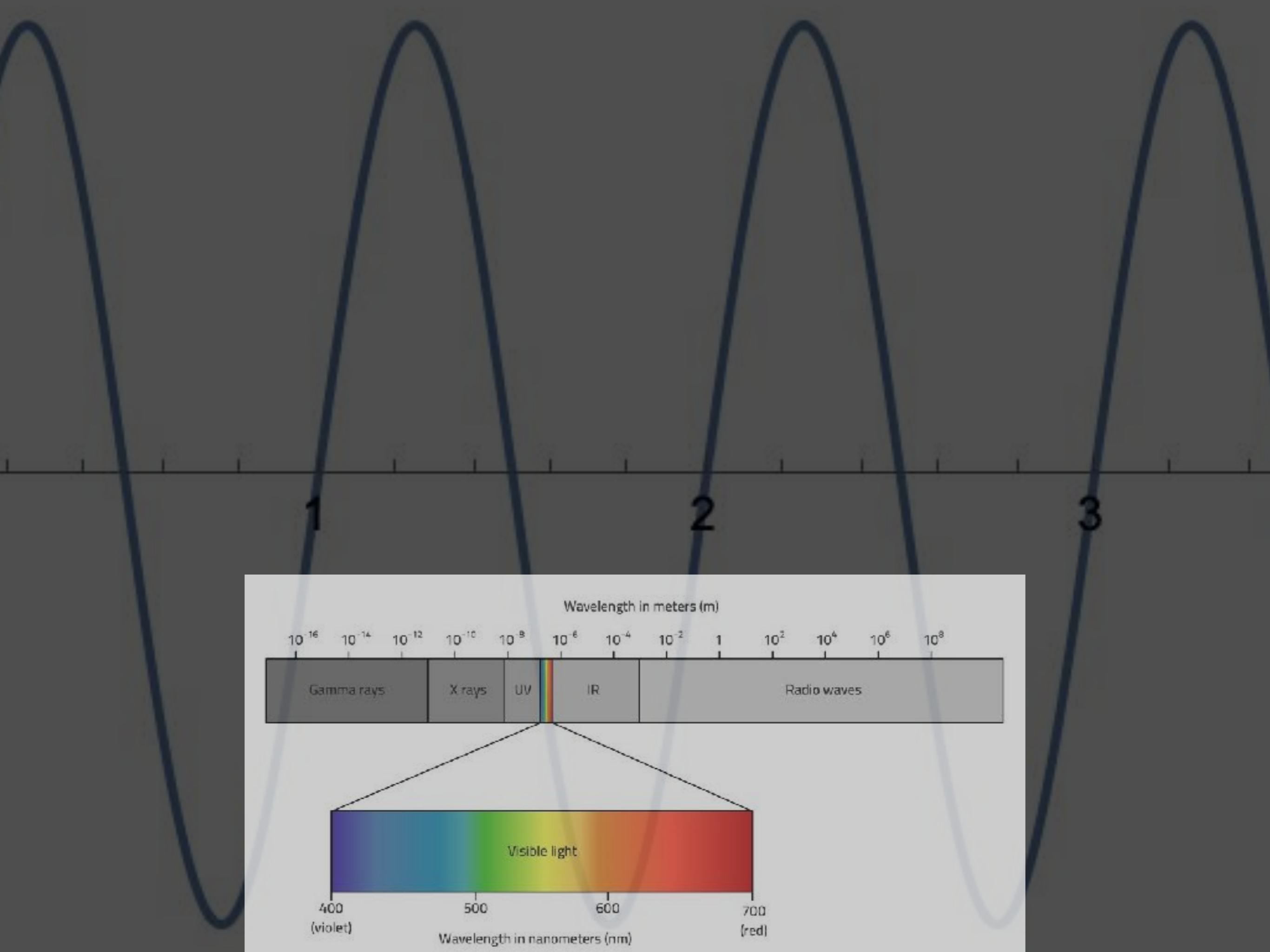
Pierre Fresnel, 1818

Interferenza di Young, 1801

# 1864 LA LUMINOSA SCOPERTA



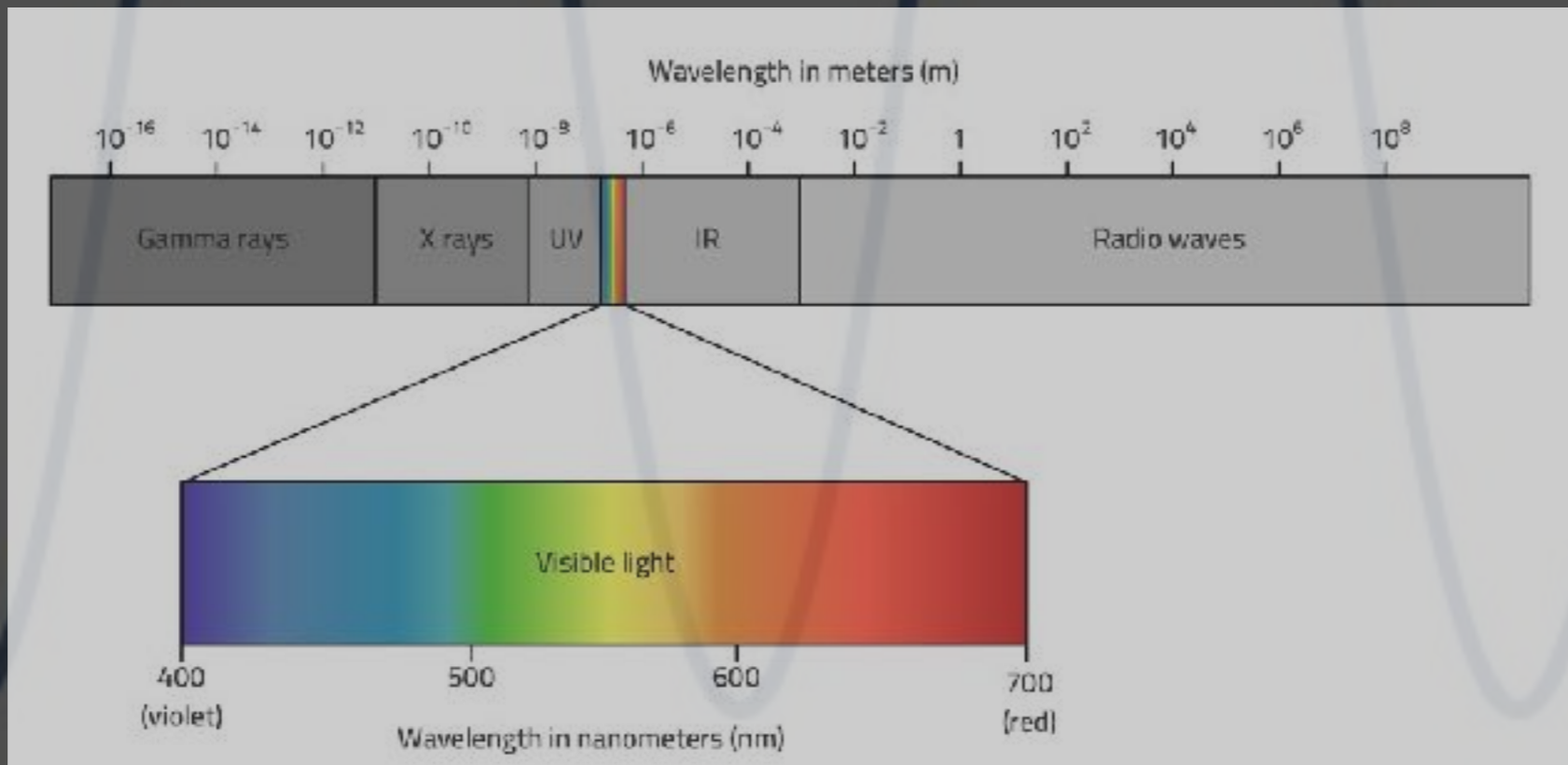
JAMES CLERK MAXWELL



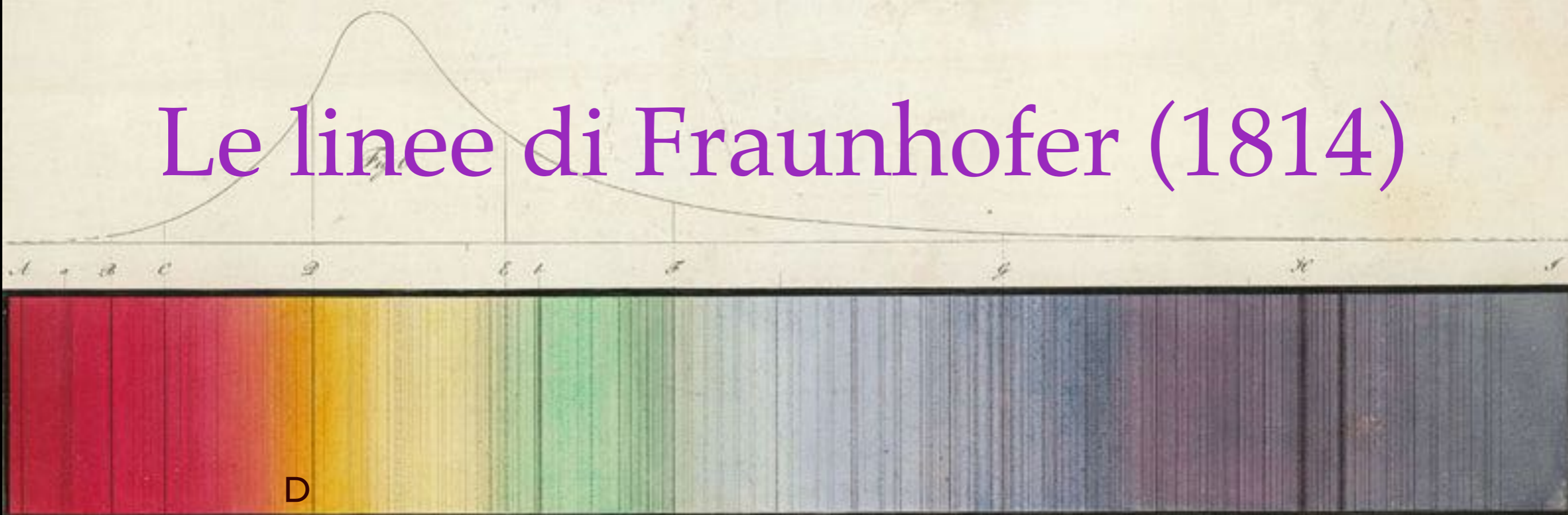
1

2

3



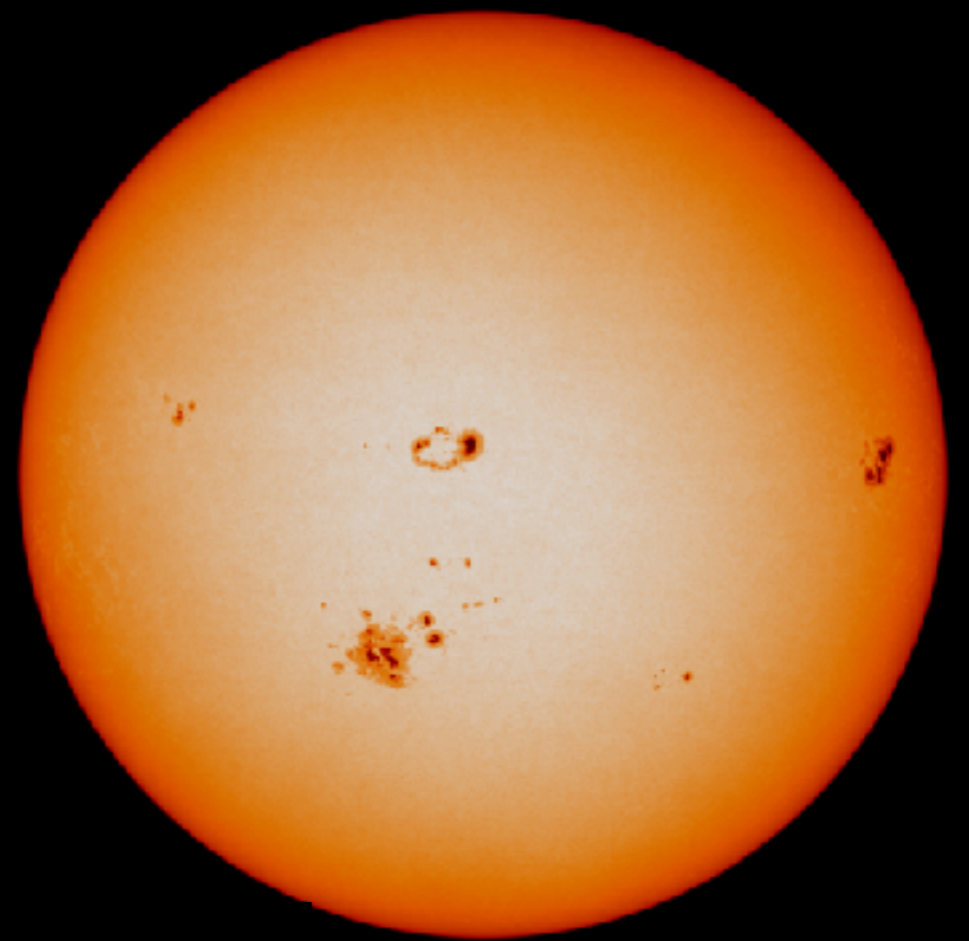
# Le linee di Fraunhofer (1814)



Lo spettro del Sole, sufficientemente disperso, è attraversato da sottili linee scure (ne contò più di 500).

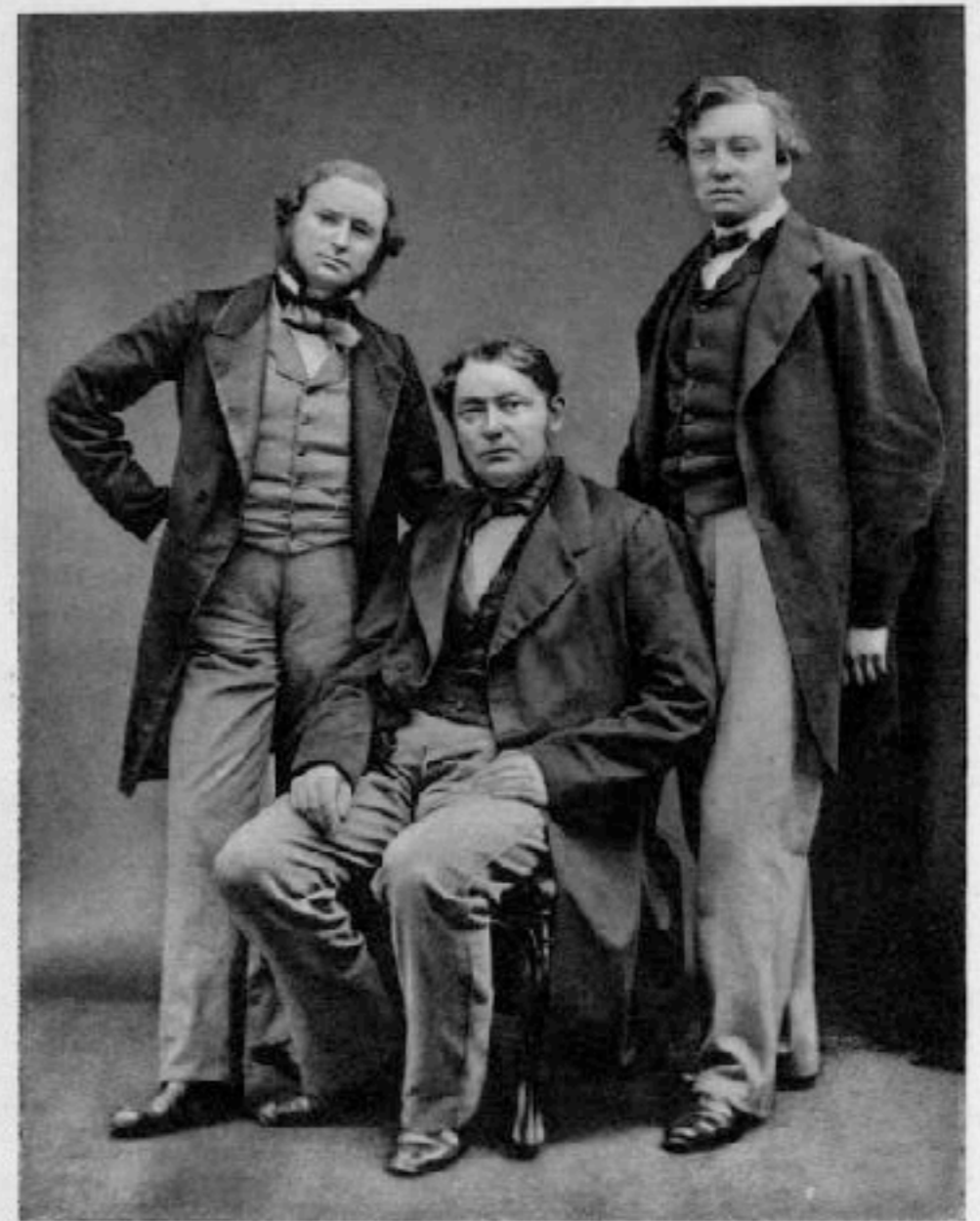
Lo spettro della Luna mostra le stesse linee nere del Sole.

Il doppietto scuro D corrisponde al doppietto brillante del Sodio, ma non fu in grado di darne spiegazione.



Gustav Robert Kirchhoff  
(1824-1887)  
& Robert Wilhelm Bunsen  
(1811-1899)

Posero le basi della spettroscopia, scoprendo che ogni riga spettrale è caratteristica dell'elemento chimico che la emette (o assorbe)



*R.W. Bunsen, G. Kirchhoff, and H.E. Roscoe  
1862*

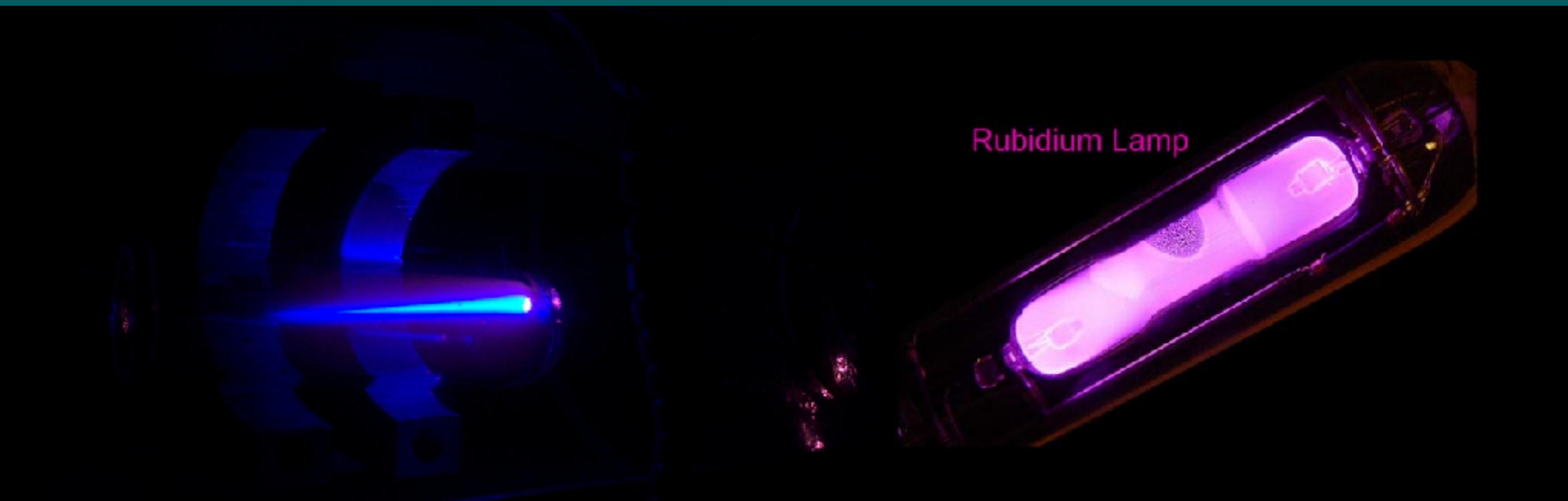
Il sodalizio ebbe inizio nel 1850 a Breslavia dove Kirchhoff insegnava. Hertz e Planck furono studenti di Kirchhoff a Berlino

Le linee di Fraunhofer nello spettro solare sono dovute all'assorbimento dello spettro continuo (emesso dall'interno del Sole) da parte degli elementi nell'atmosfera solare.

Über die fraunhoferschen Linien, Annalen der Physik (1860)



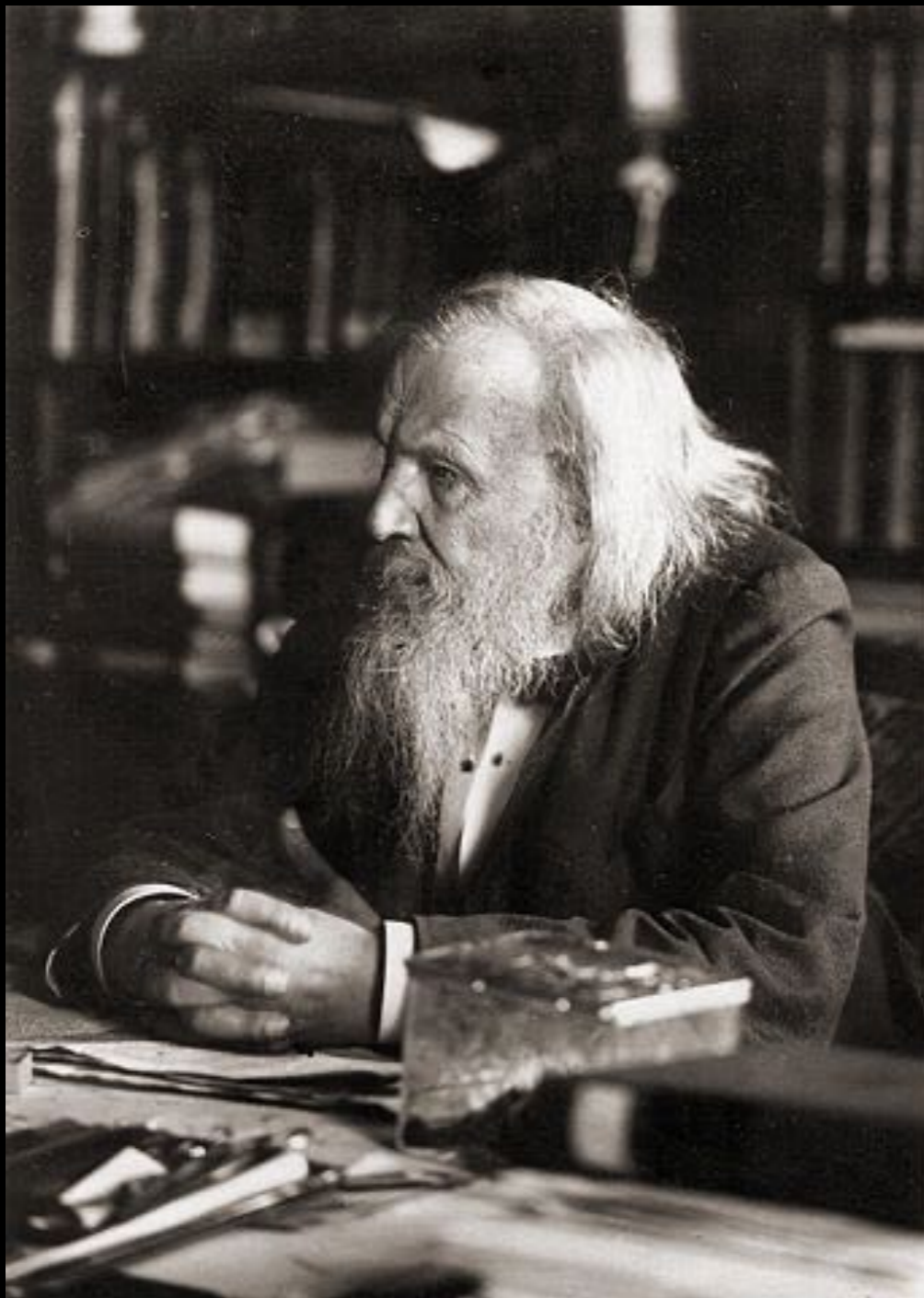
## Lo spettro del Sole



CESIO (1860) *caesius* = azzurro cielo

RUBIDIO (1861) *rubidus* = rosso cupo

# 1869 : LA TAVOLA PERIODICA



Dimitrij Ivanovic Mendeleev  
(1834-1907)

Organizzò i 63 elementi per peso atomico e per valenza evidenziando spazi vuoti per elementi sconosciuti (furono scoperti il Gallio (1871), lo Scandio, il Germanio, ...). La scoperta dei gas nobili richiese l'8a colonna con valenza 0

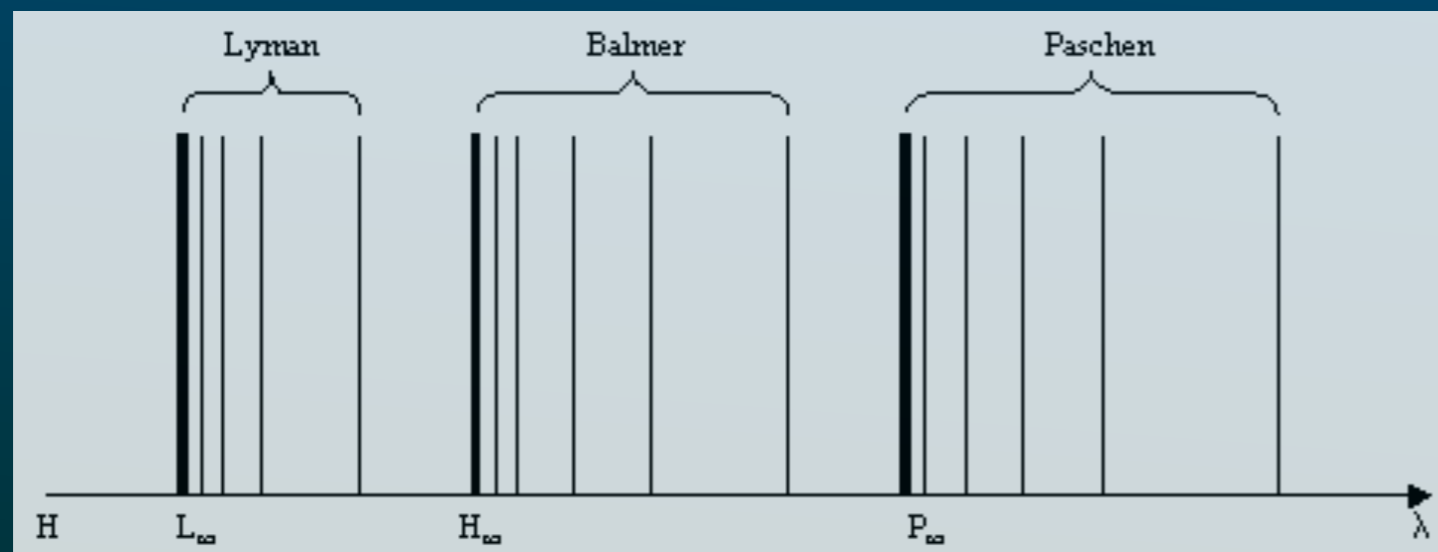
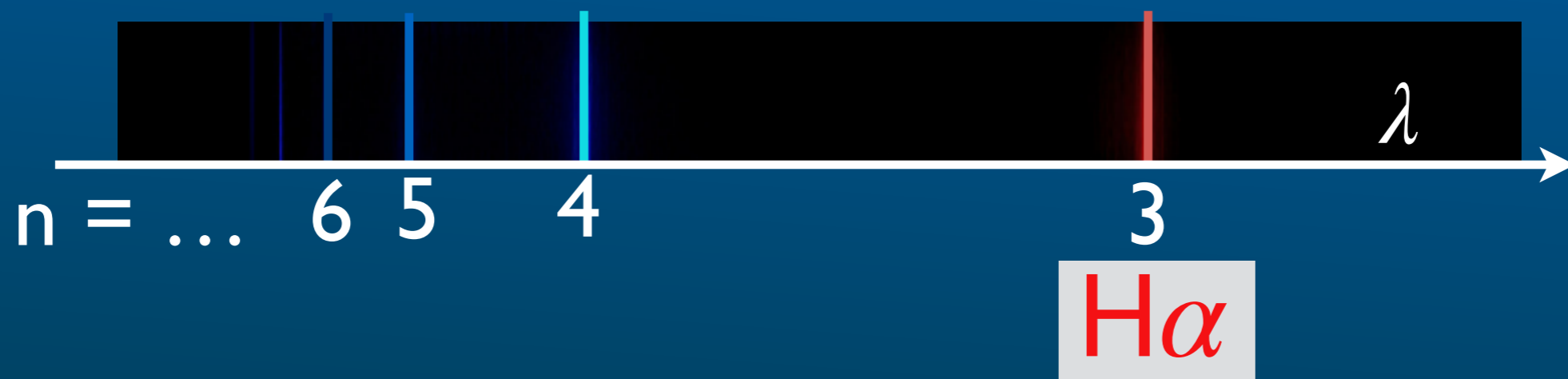
ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.  
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

	Ti=50	Zr=90	?=190.		
	V=51	Nb=94	Ta=182.		
	Cr=52	Mo=96	W=186.		
	Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,1.		
	Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.		
	Ni=Co=59	Pd=106,6	Os=199.		
H=1	Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.		
Be=9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112		
B=11	Al=27,1	?=68	Ur=116	Au=197?	
C=12	Si=28	?=70	Sn=118		
N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210?	
O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?		
F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127		
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204.
		Ca=40	Sr=87,6	Ba=137	Pb=207.
		?=45	Ce=92		
		?Er=56	La=94		
		?Yt=60	Di=95		
		?In=75,6	Th=118?		

Д. Менделѣевъ

# Le serie spettrali dell'Idrogeno

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left[ \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right] \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad \text{Balmer (1885)}$$

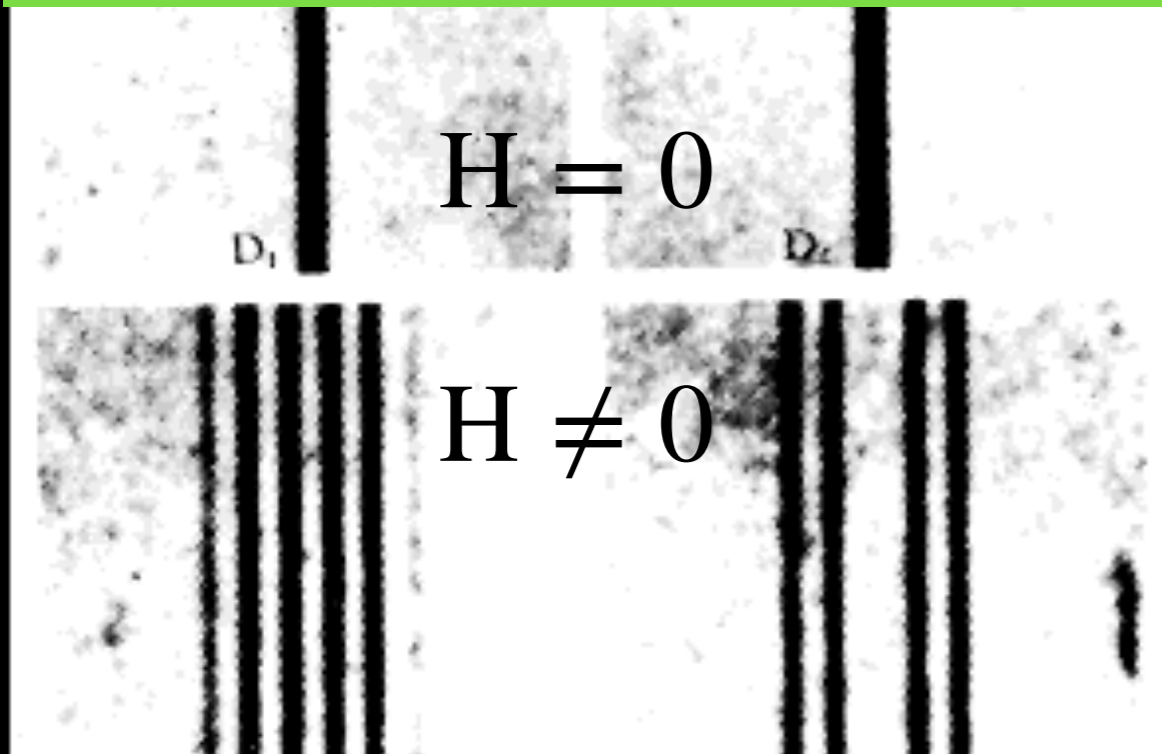


Lyman UV (1906)

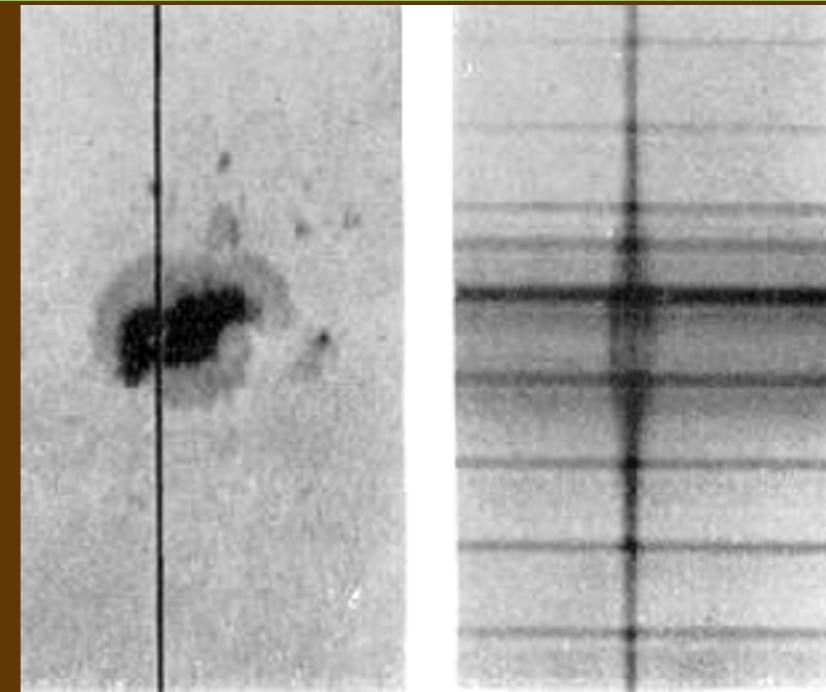
Paschen IR (1908)

# 1896 - (il misterioso) EFFETTO ZEEMAN

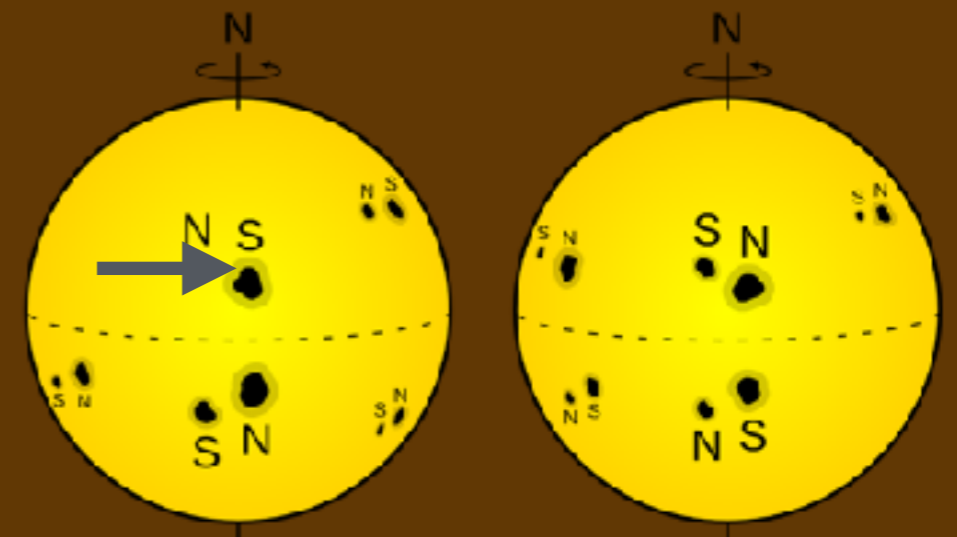
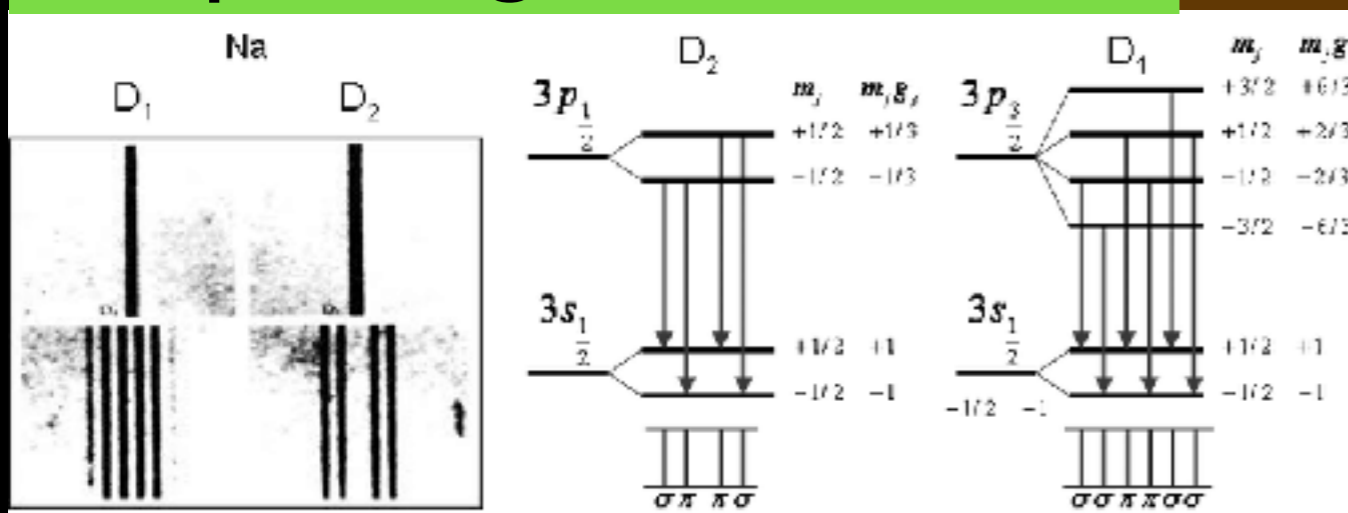
(Pieter Zeeman, Nobel 1902)



Comparsa di multipletti di linee spettrali in campo magnetico  $H$

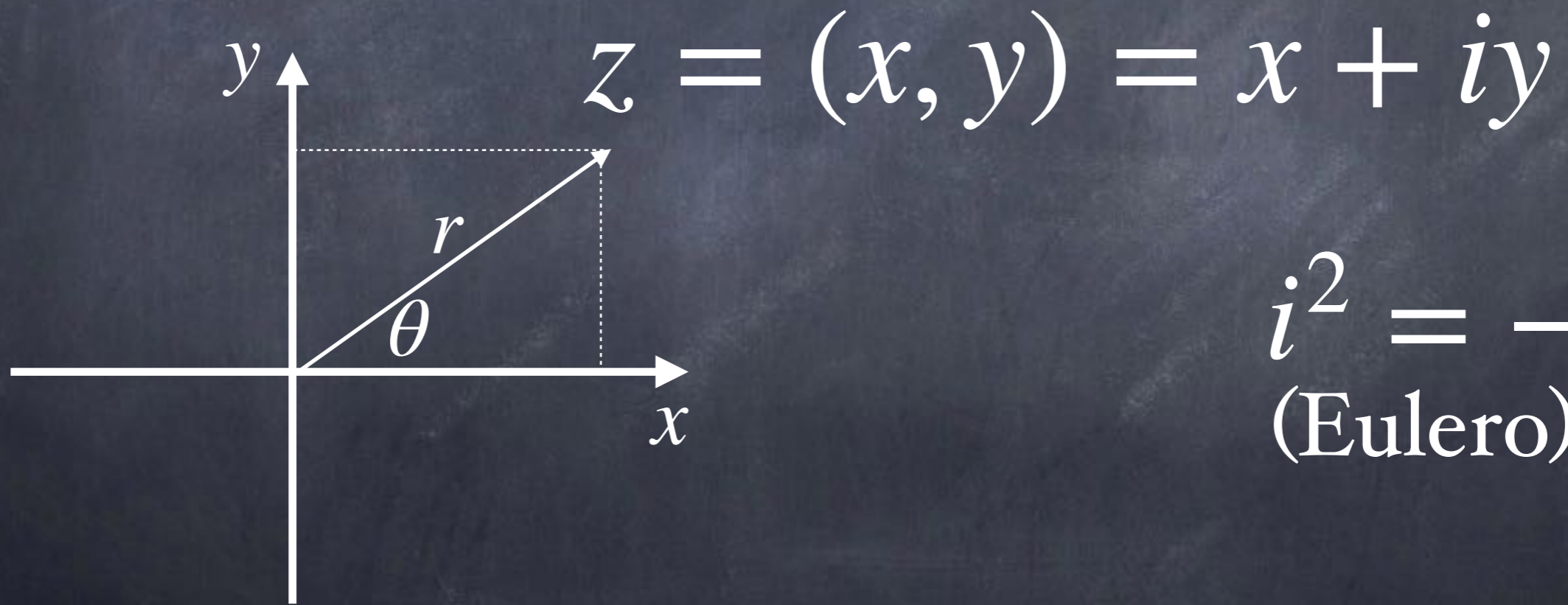


Nel 1908 George E. Hale osservò l'effetto Zeeman nello spettro delle macchie solari, e dedusse le leggi della polarità delle macchie (con ciclo 11 anni).



**1833:** Sir Rowland Hamilton annuncia a Dublino  
gli assiomi del campo dei numeri complessi  
(regole di somma e prodotto)

Gli insiemi numerici:  $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$



$$i^2 = -1$$

(Eulero)

$$z = r(\cos \theta + i \sin \theta) = re^{i\theta}$$

# 1855: Il calcolo delle MATRICI (Arthur Cayley)

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots \\ a_{21} & a_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots \\ b_{21} & b_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix}$$

$$(A + B)_{ij} = a_{ij} + b_{ij}$$

$$(A \cdot B)_{ij} = a_{i1}b_{1j} + a_{i2}b_{2j} + \dots + a_{in}b_{nj}$$
$$\neq (B \cdot A)_{ij}$$

# La fisica quantistica

L'elettrone (Thompson 1895)

La legge di Planck del corpo nero (1900)

I fotoni (Einstein, 1905)

L'atomo di Rutherford e il nucleo atomico (1911)

L'atomo di Bohr (1913)

Dualismo onda - corpuscolo (de Broglie 1923)

L'esperimento di Stern & Gerlach (1927)



Nernst (1920), Einstein (1921), Planck (1918)

Millikan (1923), Laue (1914) (foto del 1931)

# IL CORPO NERO (1860 Kirchhoff)

Il rapporto tra l'energia emessa e quella assorbita nell'unità di tempo e di frequenza  $\nu$ , è una funzione universale di  $\nu$  e della temperatura assoluta  $T$

$$\frac{e(\nu, T)}{a(\nu, T)} = f(\nu, T)$$

(Wien e Rayleigh-Jeans ne daranno andamenti a piccola e grande frequenza)

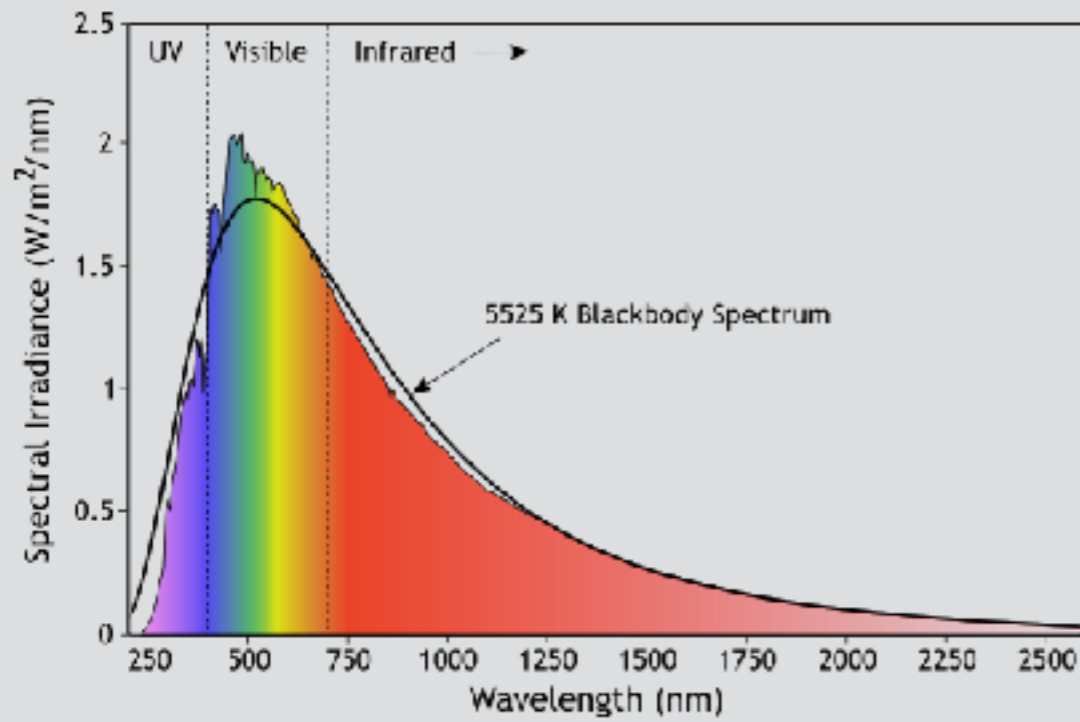
$f(\nu, T)$  coincide con l'emissività di un assorbitore ideale  $a(\nu, T) = 1$  (corpo nero)



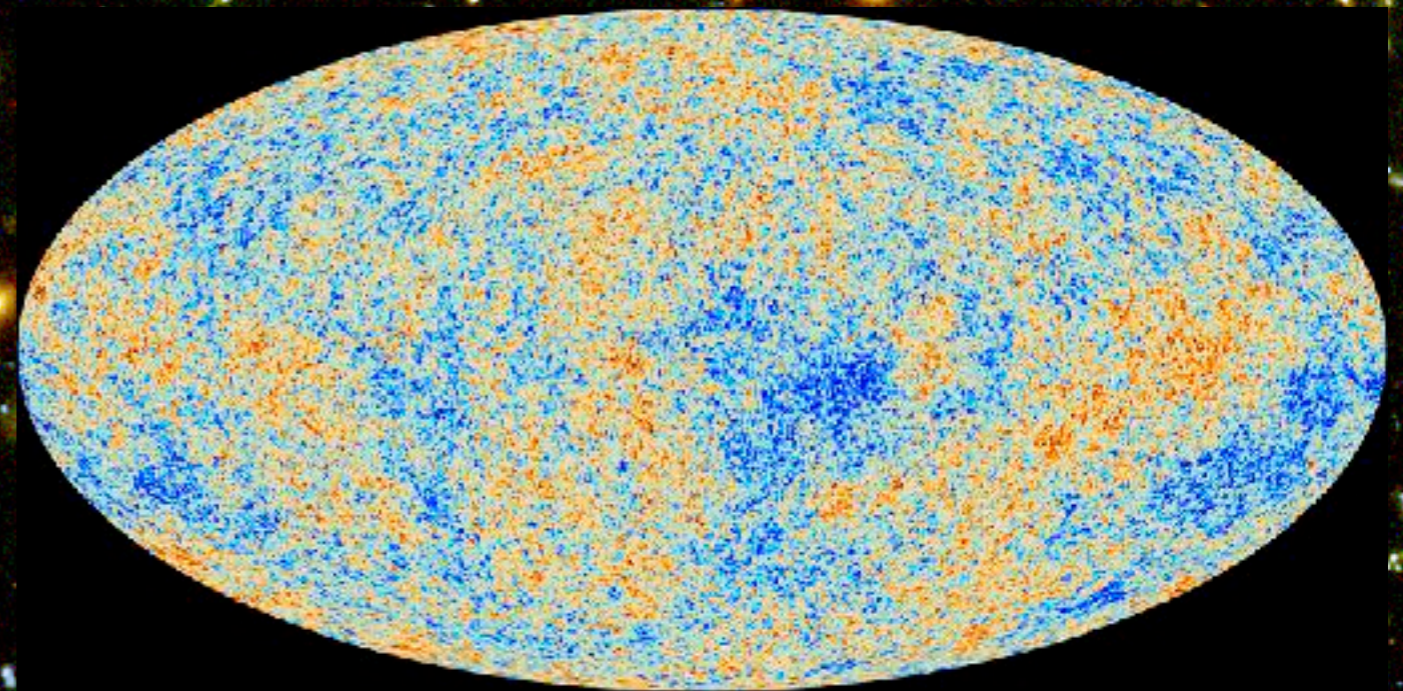
# LA LEGGE DI PLANCK - 1900 (densità di energia nel corpo nero)

$$u(\nu, T) = 2 \frac{4\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

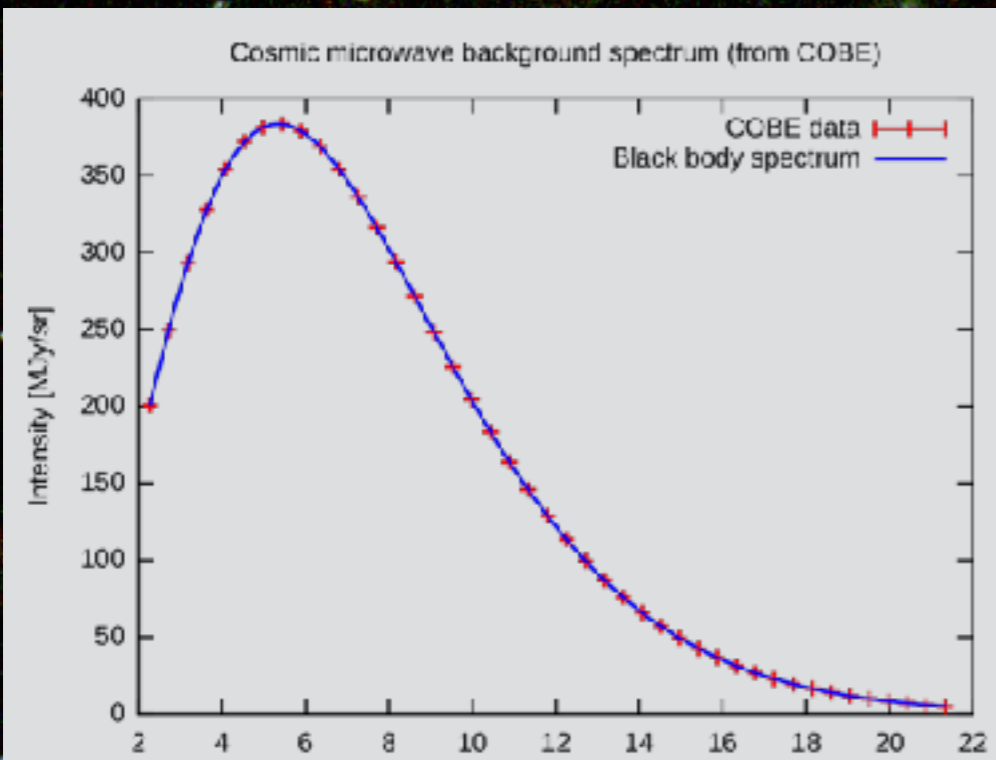
$$[h] = L m v$$



1992

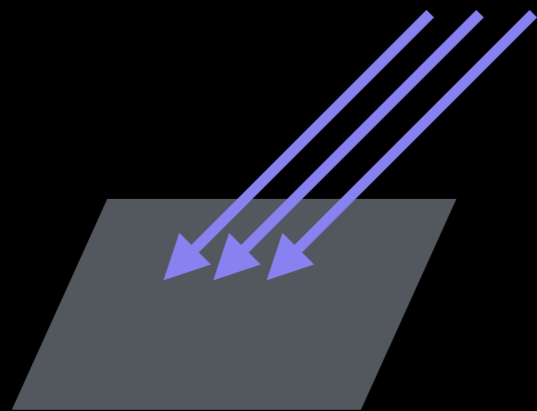


il fondo cosmico di microonde



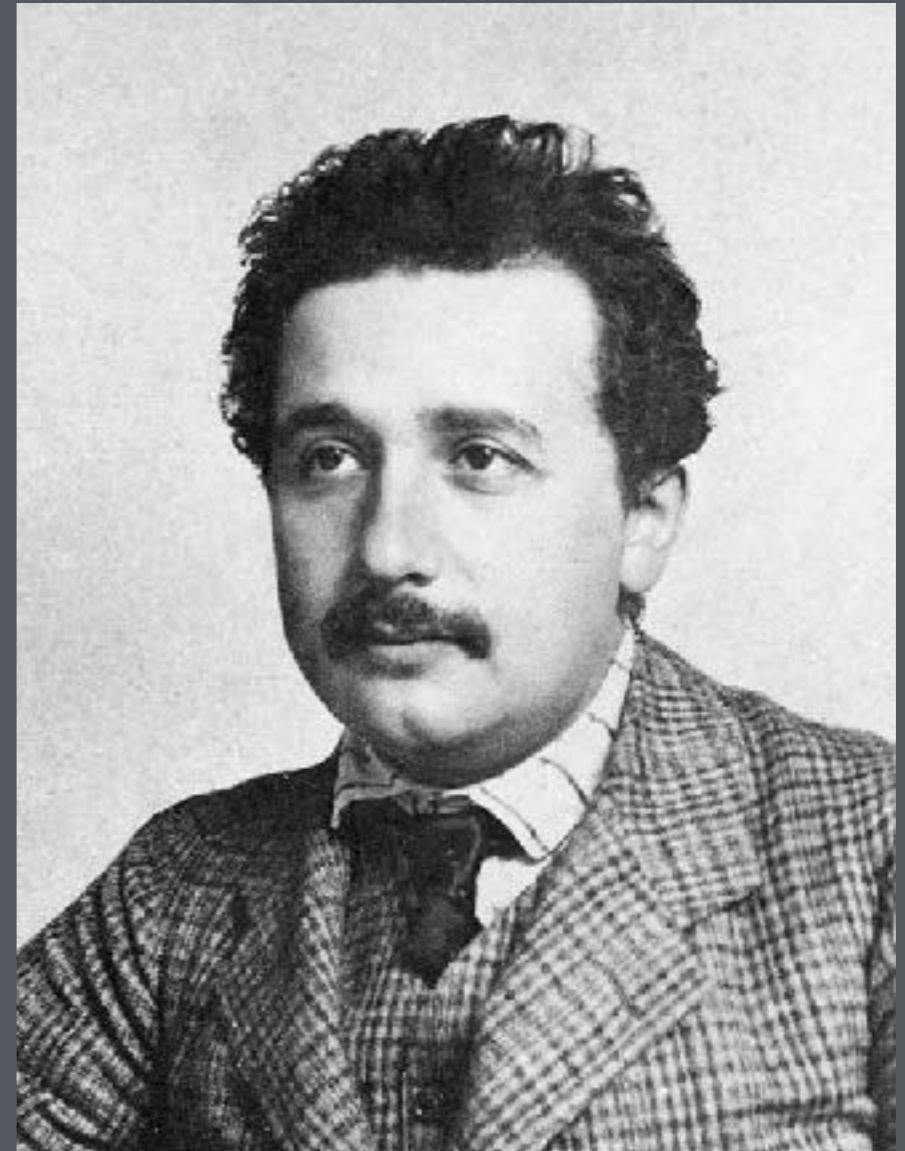
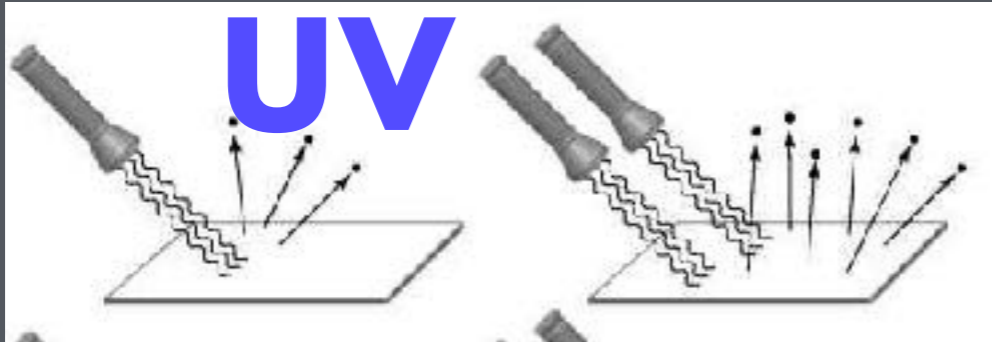
# Gli esperimenti di Hertz

**Heinrich Hertz** fu il primo a produrre e studiare le onde radio. Nel fare questo scoprì l'effetto Hertz (fotoelettrico)



Irraggiando un metallo con radiazione UV esso si carica.  
L'effetto aumenta col crescere dell'intensità.  
Fu poi osservato nei gas.

# 1905: spiegazione dell'effetto fotoelettrico

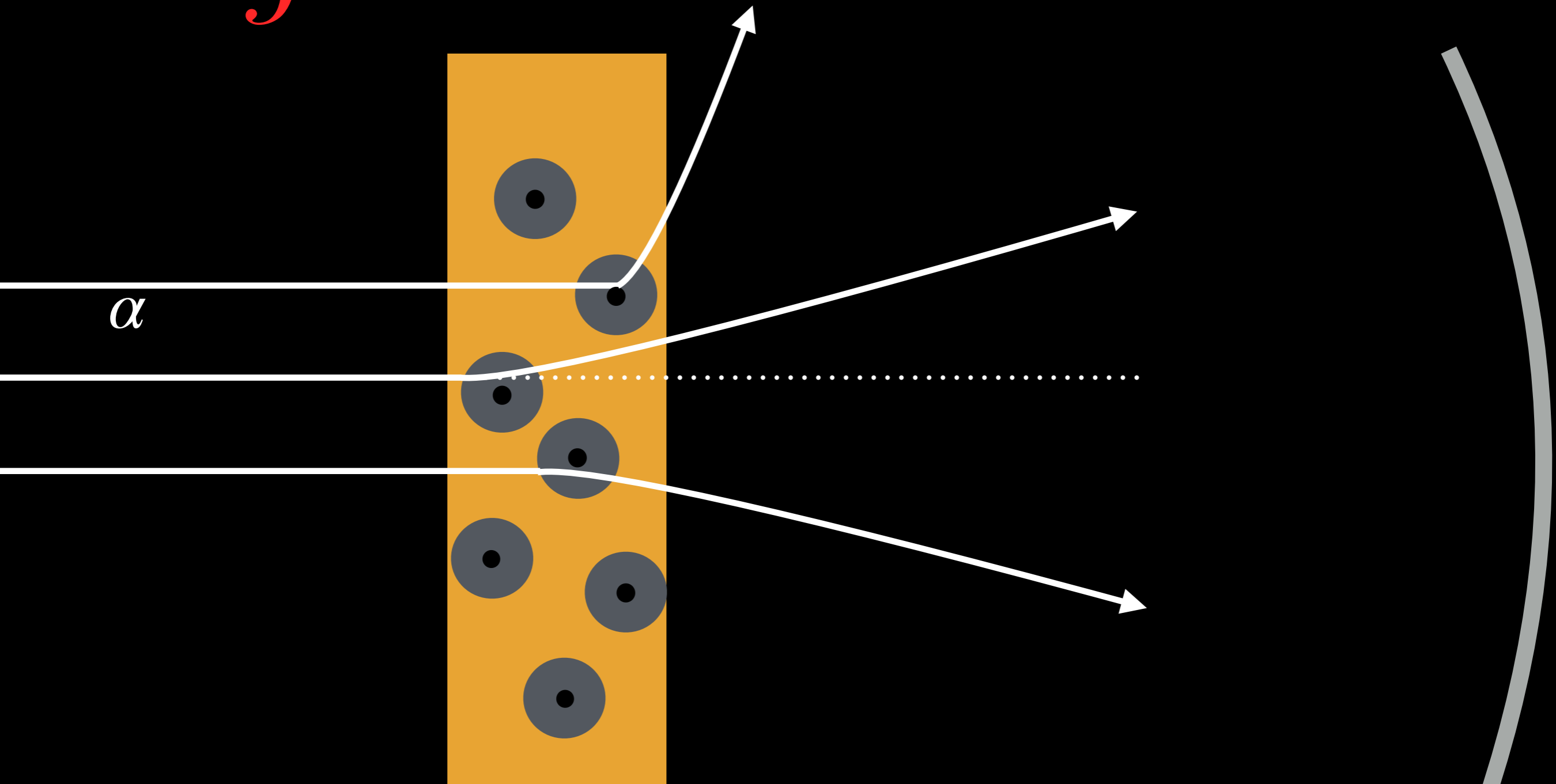


1879-1955

Le onde e.m. cedono energia alla materia in forma di particelle senza massa: I **FOTONI** con energia  $E = h\nu$

Il fotone UV ha l'energia per liberare l'elettrone dal metallo  
(Albert Einstein 1905 - Nobel 1921)

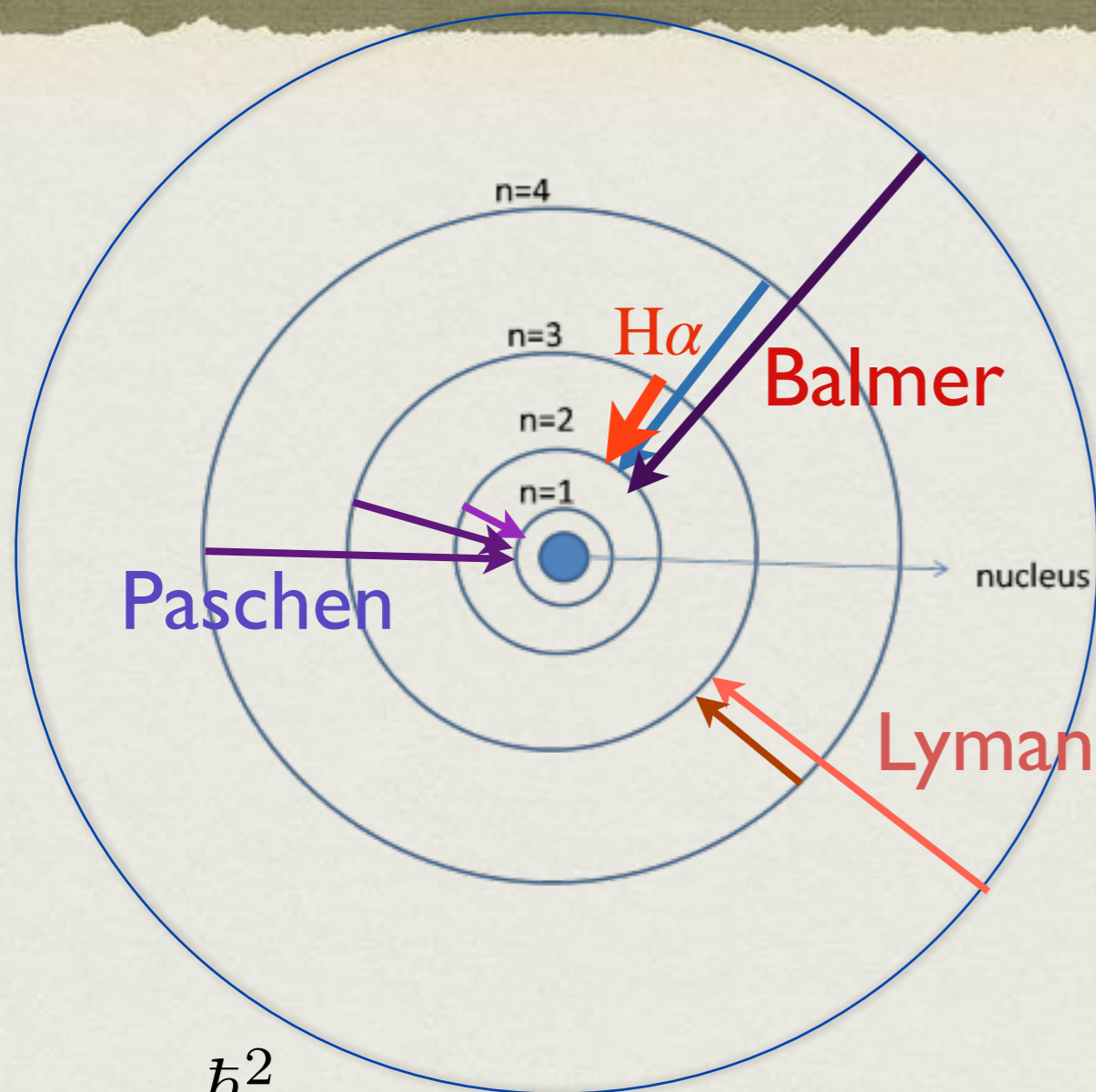
# 1911: l'atomo di Rutherford



Nuclei di Elio ( $\alpha$ ) su lamina d'oro di spessore  $4 \times 10^{-5}$  cm

1 su 20 mila è deflesso di angolo  $> 90^\circ$

Il nucleo è 100.000 volte più piccolo del raggio atomico



$$a_0 = \frac{\hbar^2}{me^2} \approx 0.5 \text{ Angstrom} \text{ (raggio di Bohr)}$$



Niels Bohr  
Premio Nobel 1922

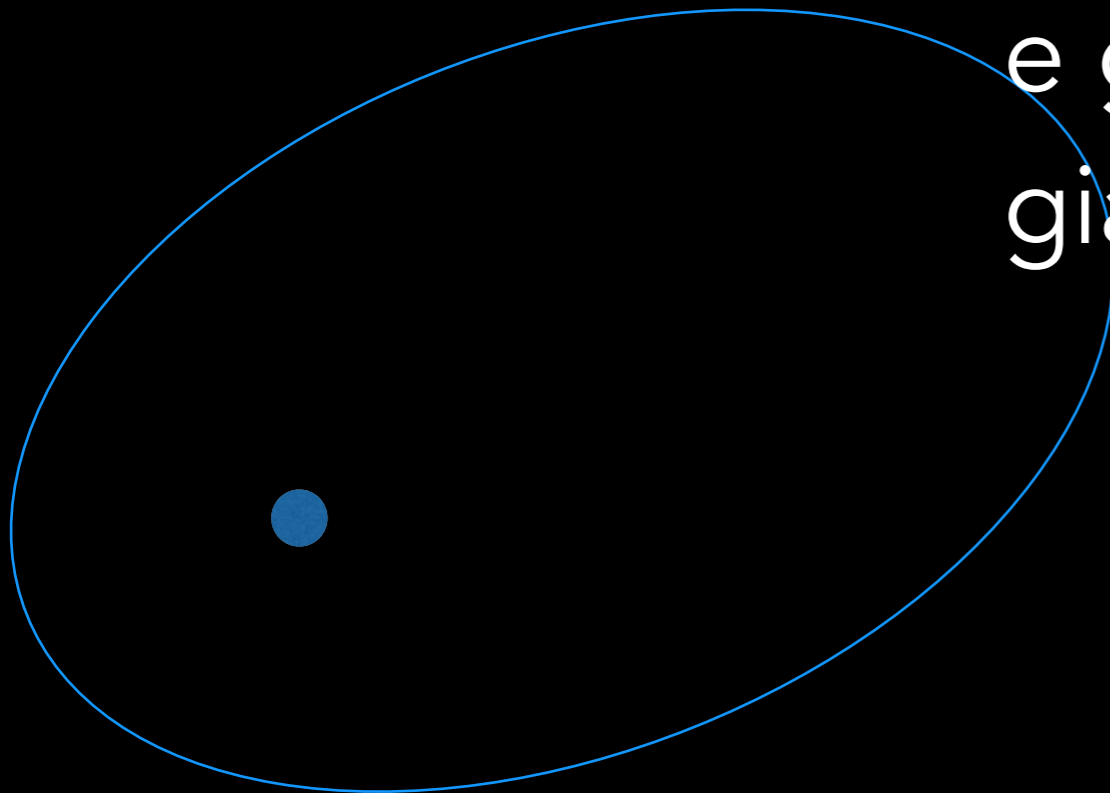
Bohr, N. (1913). I. On the constitution of atoms and molecules.

The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 26(151), 1–25.



Arnold Sommerfeld

La teoria di Bohr - Sommerfeld non spiegava lo spostamento e la moltiplicazione delle righe dell'atomo di Idrogeno in campo elettrico, e gli atomi a più elettroni, già a partire dall'Elio



# IL DUALISMO ONDA CORPUSCOLO



Louis Viktor Pierre Raimond  
VII duca de Broglie

(1892-1987)

Wikimedia commons

1814-19 decodificava i messaggi tedeschi  
nella stazione radio sulla torre Eiffel

**Tesi di dottorato 1923**

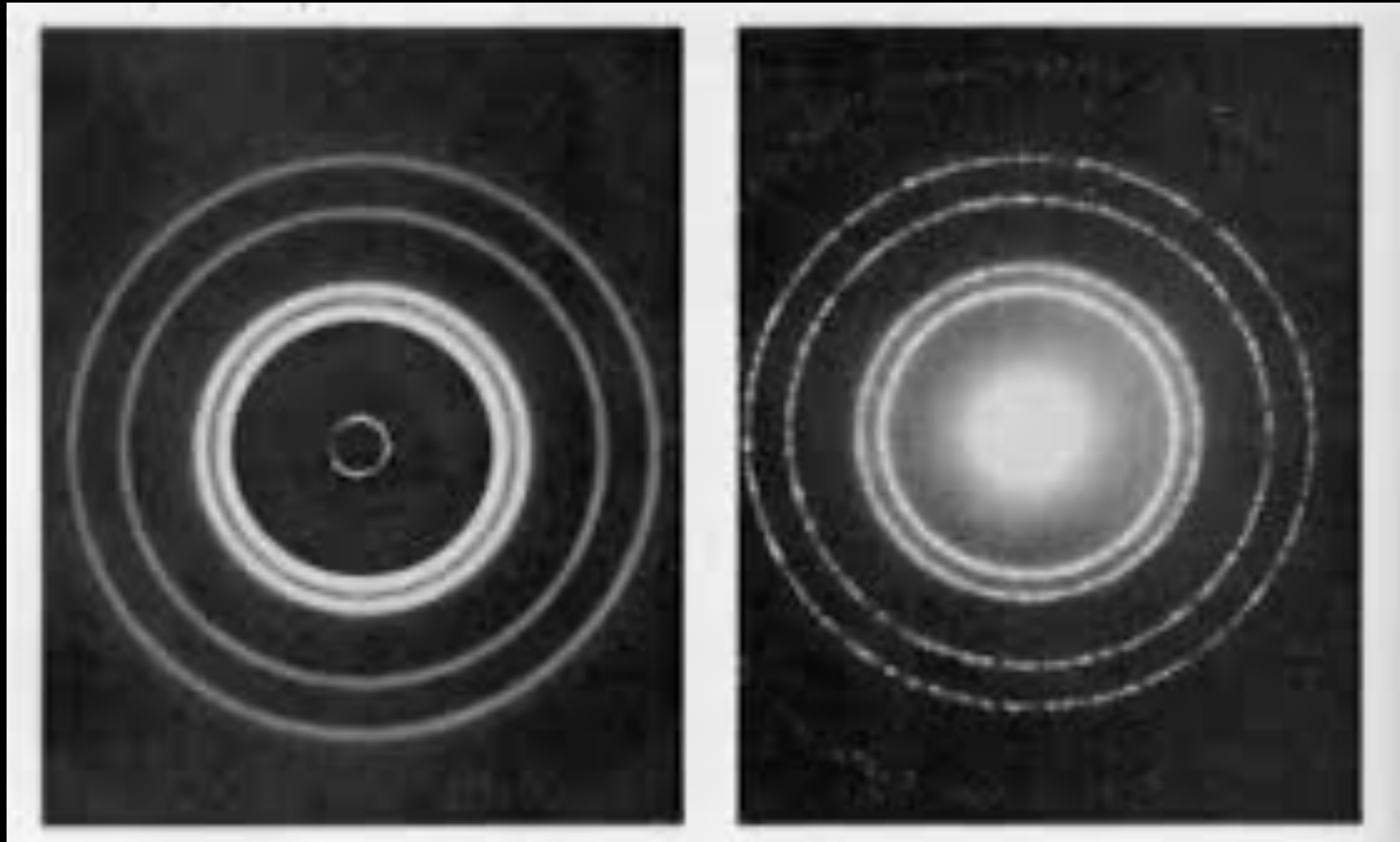
*Recherches sur la théorie des quanta*

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \nu = \frac{E}{h}$$

Suggerì l'esperimento di diffrazione  
di elettroni su cristalli  
(come per i raggi X)

**Premio Nobel 1929**

# Davisson & Germer (Bell Labs 1927 - Nobel 1937)

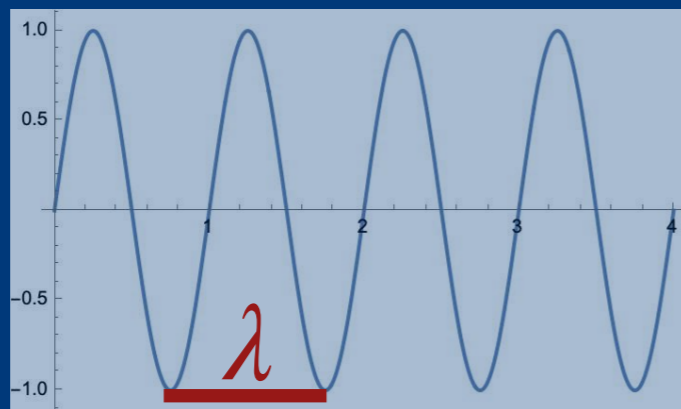


Diffrazione di raggi X  
attraverso foglio di Al

Diffrazione di elettroni  
attraverso foglio di Al

Onda e.m.  
monocromatica  
(1864, Maxwell)

$$\lambda \nu = c$$



Fotone  
(1905, Einstein)

$$E = h\nu \quad p = \frac{h}{\lambda}$$



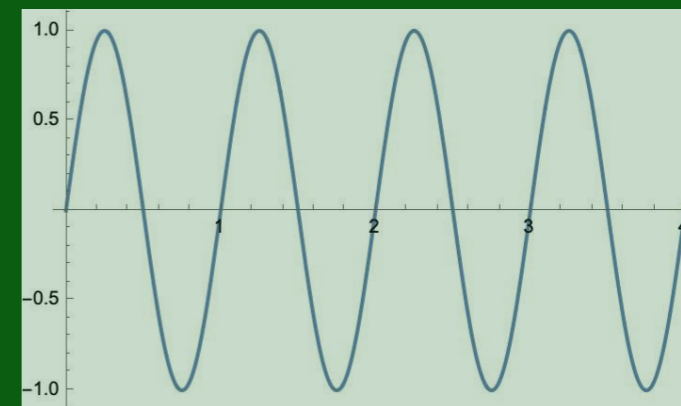
Particella



$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad p = mv$$

Onda di materia  
(1923, L. de Broglie)

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \nu = \frac{E}{h}$$



# La nuova meccanica quantistica

La Meccanica delle Matrici  
e il principio di indeterminazione  
(Heisenberg, Born, Jordan, 1925)

La Meccanica Ondulatoria  
(Schrödinger, 1926)

L'equazione di Dirac (1928)

# Università Georg-August di Gottinga (dal 1737)



C. F. Gauss, B. Riemann, P. Dirichlet, H. Minkowski ...  
David Hilbert (1862-1943), Felix Klein (1849-1925), allievi:  
E. Noether (1882-1935), R. Courant (1888-1972), H. Weyl (1885-1955)  
L. Prandtl (1875-1953), P. Debye (1884-1966)...  
Max Born (1882-1970), James Frank (1882-1964)

# Gottinga, istituto di fisica, 1925-1930 (1933 la “grande purga nazista”)





# Max Born

(Breslavia 1885 - Gottinga 1970)

Laurea a Gottinga (1906), poi a Cambridge, Gottinga e Berlino.

**Dal 1921 al 1933 fu professore di fisica teorica a Gottinga.**

Riparò a Cambridge e Edinburgo fino al 1953, quando tornò in Germania.

Oltre alla MQ contribuì alla mecc. statistica, e fu autore di un noto libro di ottica (Born & Wolf)

Suoi assistenti:

Werner Heisenberg, abilitazione 1924 con tesi su effetto Zeeman anomalo,

Wolfgang Pauli (anno 1922)

Pascual Jordan (dal 1923)

**Faremo conoscenza di alcuni suoi allievi**

## Nel 1924 Enrico Fermi trascorse 6 mesi a Gottinga

*Quando Fermi arrivò a Gottinga vi trovò parecchi giovani brillantissimi ... Però il soggiorno non fu così fruttuoso come ci si sarebbe potuto aspettare. ... Può darsi che i suoi grandi coetanei Heisenberg, Jordan e Pauli ... fossero così assorti nei loro importanti lavori che non si siano accorti della sua abilità.*

*Inoltre Fermi era timido e fiero allo stesso tempo e anche abituato alla solitudine e può darsi che per questo sia rimasto isolato.*

*Solamente più tardi divenne buon amico di Heisenberg e di Pauli.*

*(Emilio Segrè)*



E. Fermi (1901-1954)

*Pauli era stato raccomandato da Sommerfeld come enfant prodige. Prima di laurearsi (18 anni) scrisse la migliore presentazione della relatività esistente.*

*Era nottambulo. I vicini erano un po' preoccupati quando lo vedevano seduto alla sua scrivania fino alle ore piccole, ondeggiando lentamente come un Buddha in preghiera*

*Perfino davanti allo scenario alpino più bello maestoso Pauli seguiva a discutere di fisica: in compagnia di un tipo dinamico come lui era difficile rilassarsi mentalmente.*



Wolfgang Pauli  
(1900 - 1958)

**Premio Nobel nel 1945 per il  
Principio di esclusione**

Le particelle elementari sono **IDENTICHE, INDISTINGUIBILI**

La teoria è invariante nello scambio delle variabili  $(x,p,s)$  di ciascuna particella (anche in fisica classica)

Spin  $0,1,\dots$  (bosoni): uno scambio di particelle **non cambia** il segno della funzione d'onda  $\psi(x_1, s_1; \dots; x_N, s_N)$

Spin  $1/2, 3/2,\dots$  (fermioni): uno scambio di particelle **cambia il** segno della funzione d'onda  $\psi(x_1, s_1; \dots; x_N, s_N)$

## 1925, Pauli

**Principio di Esclusione:** due fermioni non possono essere nello stesso stato di 1 particella (es:  $(x, s)$ )

La tavola periodica, la teoria dei metalli,  
la fisica della materia!

Pauli, W. Über den Einfluß der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Elektronenmasse auf den **Zeemaneffekt**. Z. Physik 31, 373–385 (1925)

*Heisenberg arrivò a Gottinga nel 1923. Aveva l'aspetto semplice di un ragazzo di campagna, coi capelli biondi tagliati corti, occhi chiari e brillanti, e una espressione attraente. Aveva una incredibile velocità di apprendimento.*

*Dopo un semestre tornò a Monaco per sostenere i colloqui (tesi di dottorato di fluidodinamica) ... rimasi molto stupito quando lo vidi ricomparire con una espressione imbarazzata sul volto. Era passato col minimo, grazie alla difesa di Sommerfeld, con la contrarietà del grande Wien. (M. Born)*

*Dal 1924 al 1927 con una borsa della Rockefeller Foundation andò da Niels Bohr a Copenhagen.*



Werner Heisenberg  
(1901-1976)



# L'istituto Niels Bohr

Riunione del 1930



Klein Bohr

Heisenberg

Pauli

Gamow

Landau

Kramers

# 1925, HELGOLAND: EUREKA!

La teoria non deve occuparsi di orbite, ma di **QUANTITA' OSSERVABILI** come le righe spettrali, le energie, le intensità, ...

W. Heisenberg, Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen, Z. Phys 33, 879 (1925)  
(Sulla reinterpretazione in teoria dei quanti delle relazioni cinematiche e meccaniche)

**Abstract: scopo del lavoro è tentare di stabilire i fondamenti teorici per una meccanica quantistica che sia esclusivamente basata su relazioni tra quantità che siano, in linea di principio, osservabili.**

*Ho tentato molte volte di leggere l'articolo ... e sebbene io pensi di capire la MQ, non ho mai capito le motivazioni per i passi matematici del lavoro.  
I fisici teorici nei loro lavori di successo sono dei saggi oppure dei maghi: i primi in genere sono comprensibili, i secondi no. Il lavoro di Heisenberg del 1925 è pura magia. (S. Weinberg)*

Heisenberg era assillato dal problema dell'intensita' delle righe spettrali. Considera la formula

$$P = \frac{4e^2}{3c^3} |\ddot{\mathbf{x}}|^2$$

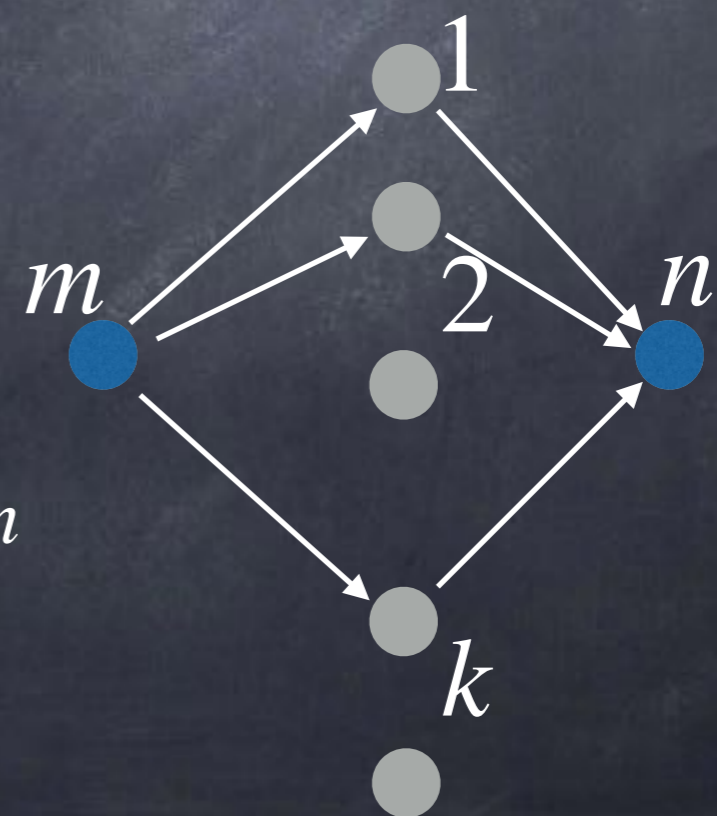
energia emessa al secondo da un elettrone non relativistico accelerato (Larmor, 1897). Antenna!

e la modifica per un elettrone oscillante con la stessa frequenza della radiazione diffusa, introducendo una tabella "posizione"  $\exp(i2\pi\nu_{m \rightarrow n}t)[x]$

$$[X] = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots \\ x_{21} & x_{22} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

$$P(m \rightarrow n) = \frac{64\pi^2 e^2}{3c^3} \nu_{mn}^4 \sum_k x_{mk} x_{kn}$$

(Probabilita' di transizione)



# LA MECCANICA DELLE MATRICI



M. Born and P. Jordan,  
Zur Quantenmechanik,  
Z. Phys. 34, 858 (1925);

M. Born, W. Heisenberg, and P. Jordan,  
Zur Quantenmechanik II,  
Z. Phys. 35, 557 (1925).

Pauli effettua il calcolo mancante:  
l'atomo di Idrogeno (1926)

Nel 1927 ottenne l'incarico di professore di fisica teorica all'Università di Lipsia. Nel '29 tenne conferenze pubbliche a Chicago. Professore a Berlino (1941-45), Gottinga (1946-58) e Monaco (1958-76).

Born, Jordan e Heisenberg approfondirono il primo lavoro di Heisenberg sulla MQ. Le quantità Posizione e Momento sono descritte da matrici, con la proprietà

$$xp - px = i\hbar \quad (\text{Born})$$

Conseguenza è la famosa disuguaglianza

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Non è possibile misurare simultaneamente con arbitraria precisione la POSIZIONE e la VELOCITA` di una particella (nella stessa direzione)



Pascual Jordan

$$\hbar \approx 1.05 \times 10^{-34} \text{Joule.secondi}$$

$$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{Kg}$$

---

Calcoliamo l'incertezza (minima) della velocità  $v$ :

Se  $\Delta x = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$

$$\Delta v = \frac{\hbar}{2m_e \Delta x} = \frac{10^{-34}}{2 \times 10^{-30} \times 10^{-6}} = 50 \text{ m/s}$$

Se  $\Delta x = 1 \text{nm} = 10^{-9} \text{m}$        $\Delta v = 50 \text{ km/s}$

# ELIO SOLIDO?

He è più leggero dei **gas nobili**.

He4 diventa liquido a circa 4K (-269 C)

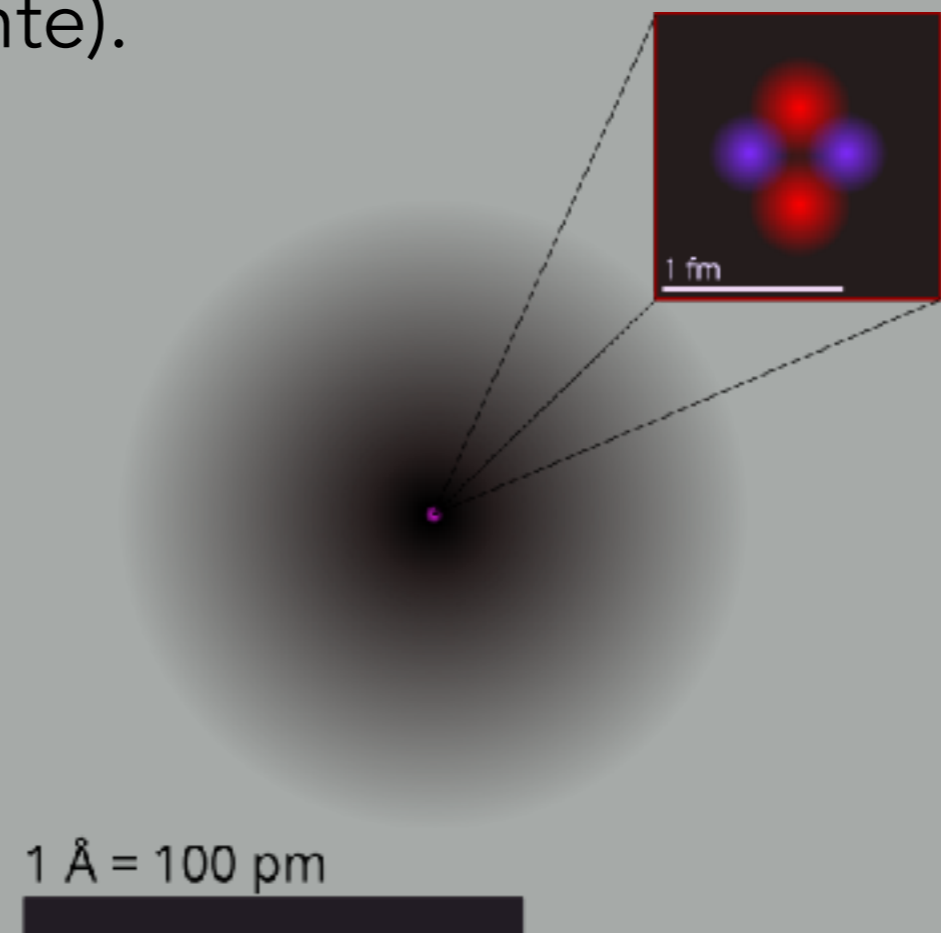
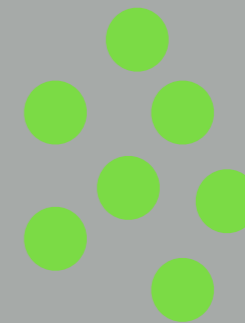
È l'unico elemento che a  $T=0\text{K}$  rimane liquido (impossibile localizzare gli atomi in un reticolo cristallino a pressione ambiente).

Diventa solido a 25 atm.

He3 è solido a pressione maggiore

L'idrogeno diventa solido

a 1atm,  $T=14\text{K}$  (Dewar, 1899)





Erwin Schrödinger  
(Times Literary Suppl.)

1926: la funzione d'onda

$\Psi$

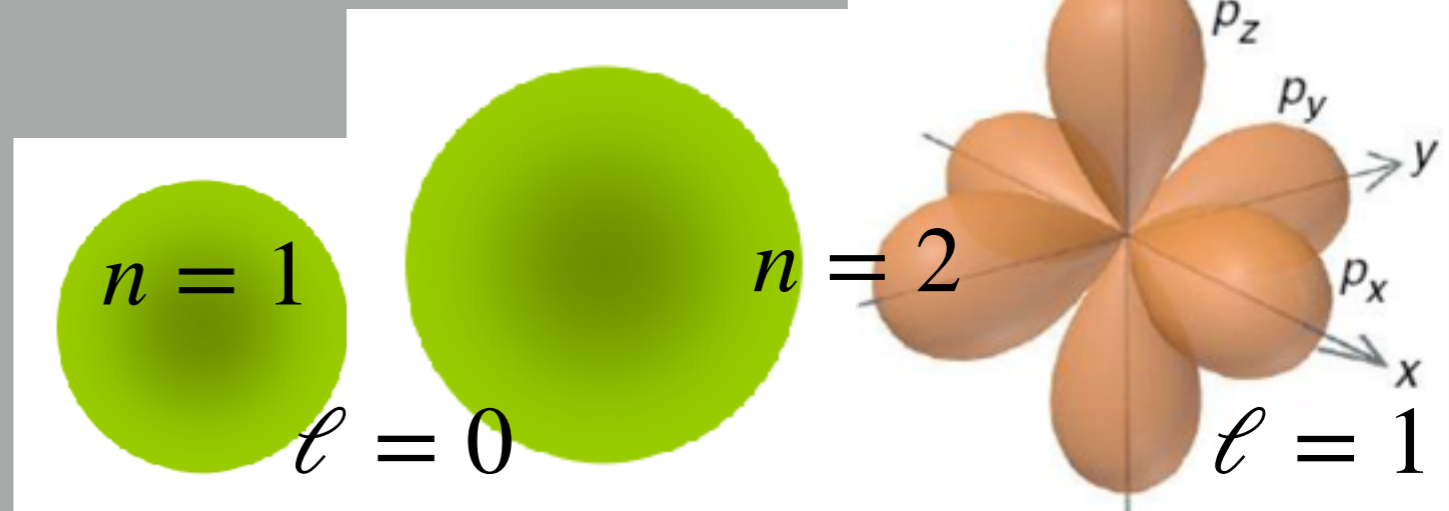
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(x, t) + U(x)\psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(x, t)$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Atomo di Idrogeno

$$E_n = -\frac{e^2}{2a_0} \frac{1}{n^2}$$

$$\psi_{n,\ell,m,m_s}(r, \theta, \varphi, \omega)$$

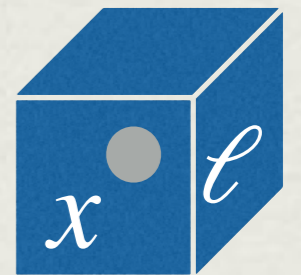


L'equazione di Schrodinger è molto più semplice della meccanica delle matrici. Richiede una matematica ben nota, ed è universalmente utilizzata.

Tuttavia, le equazioni esattamente risolubili “a mano” ... si contano sulle dita della mano.

Già nei primi anni dopo il 1928 erano disponibili tecniche per trattare approssimativamente sistemi anche con molti elettroni (Hartree-Fock, Thomas-Fermi)

$|\psi(x, t)|^2 \ell^3 =$  probabilità che la particella sia al tempo  $t$  nel cubetto di lato  $\ell$  centrato nel punto di coordinate  $x$



Lo stato  $\psi$  è una sovrapposizione di tante possibilità, ciascuna con propria probabilità di realizzarsi.  
La misura della posizione nel volumetto fornisce o no un clic di un contatore: 1, 0. Se la probabilità di essere nel volumetto è 3% avrò 3 volte clic e 97 volte 0 in ripetizioni dello stesso esperimento. L'informazione della misura modifica lo stato: se misuro 1 lo stato "collassa" in un nuovo stato  $\psi'$  con probabilità 1 nel volumetto, o in uno stato  $\psi''$  con probabilità 0 (se la misura è 0).



Congresso Voltiano di Como, settembre 1927  
Presentazione dell'interpretazione di Copenhagen

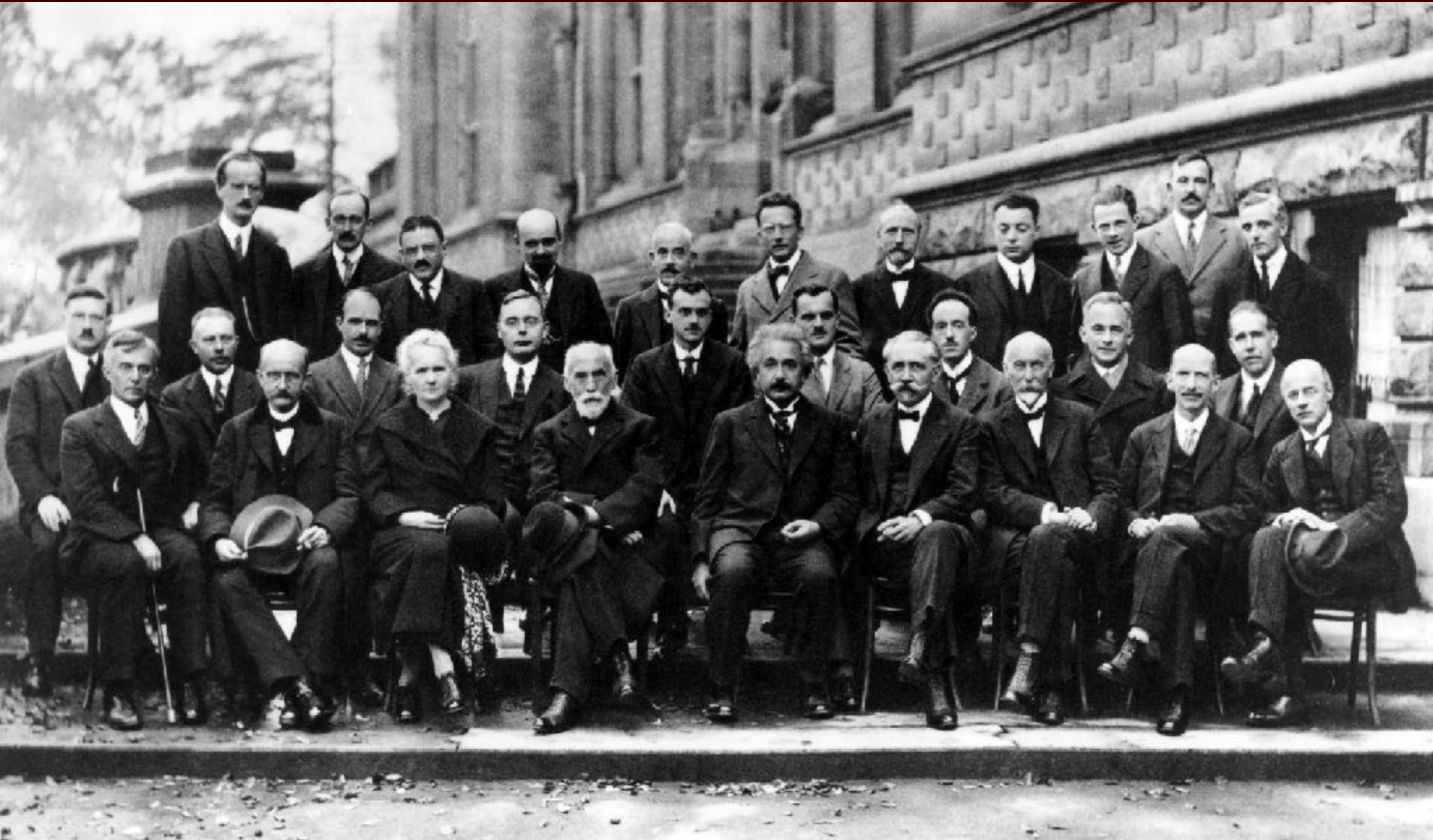
Einstein era assente per opposizione al regime



Pauli, Heisenberg e Fermi

# Congresso Solvay, Elettroni e fotoni Bruxelles ottobre 1927

Schrödinger, Pauli, Heisenberg  
Dirac, de Broglie, Born, Bohr  
Planck, Curie, Lorentz, Einstein

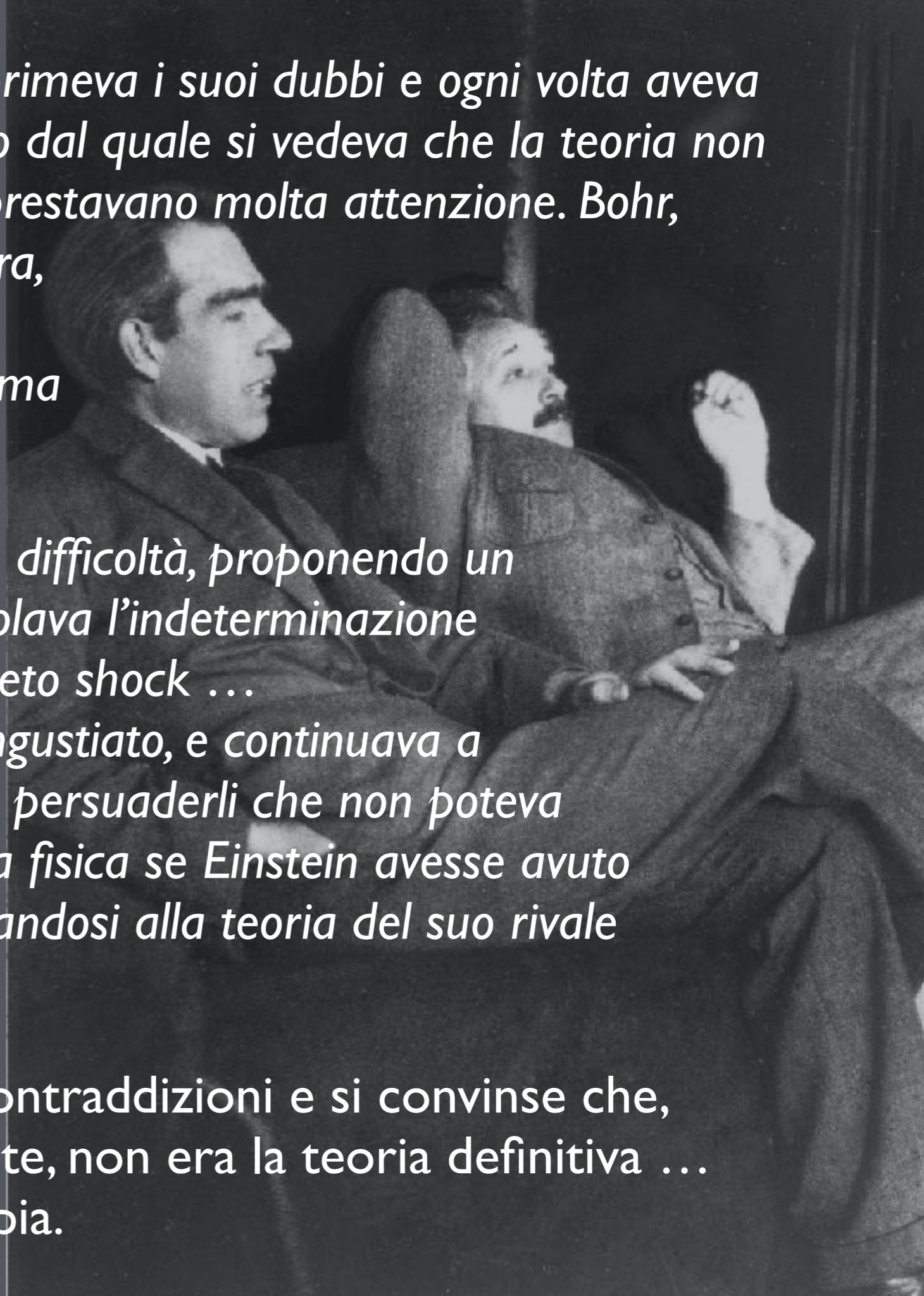


*Einstein scendeva a colazione ed esprimeva i suoi dubbi e ogni volta aveva immaginato qualche bell'esperimento dal quale si vedeva che la teoria non funzionava. Pauli e Heisenberg non prestavano molta attenzione. Bohr, viceversa, ci rifletteva a fondo e la sera, a cena, quando eravamo tutti riuniti, analizzava minuziosamente il problema fino a chiarirlo.*

*Una volta Einstein mise Bohr in seria difficoltà, proponendo un esperimento che apparentemente violava l'indeterminazione tempo-energia. Per Bohr fu un completo shock ...*

*Per tutta la sera fu estremamente angustiato, e continuava a passare dall'uno all'altro, cercando di persuaderli che non poteva essere, che sarebbe stata la fine della fisica se Einstein avesse avuto ragione ... ma alla fine riuscì, appellandosi alla teoria del suo rivale (la relatività). (Otto Stern)*

*Einstein abbandonò la ricerca di contraddizioni e si convinse che, sebbene fosse logicamente coerente, non era la teoria definitiva ... era una parte di una verità più ampia.*



*Ricordo discussioni con Bohr (nel 1928) che proseguivano per ore fino a notte alta e ci lasciavano quasi in uno stato di disperazione. E quando alla fine io andavo da solo a fare una passeggiata nel parco vicino, mi ripetevo più e più volte la domanda: è possibile che la natura sia così assurda come sembra apparirci in questi esperimenti atomici?*



1936

Gottinga 1927:  
Paul Dirac, Yoshikatsu Sugiura  
e Robert Oppenheimer

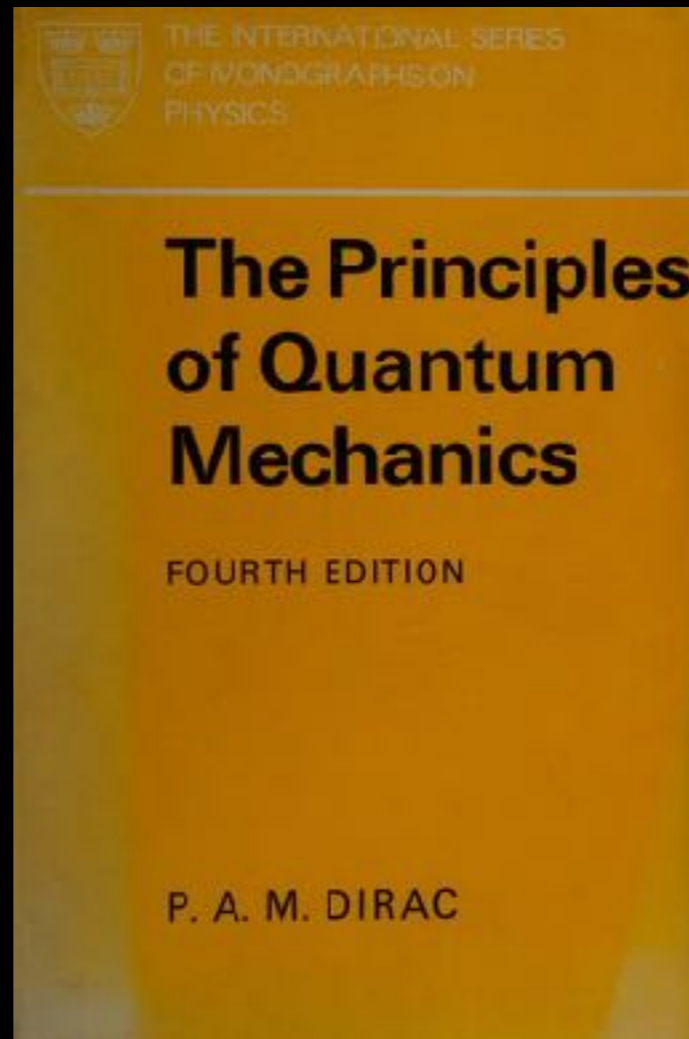


[http://purl.fcla.edu/fsu/MSS\\_1989-009](http://purl.fcla.edu/fsu/MSS_1989-009)



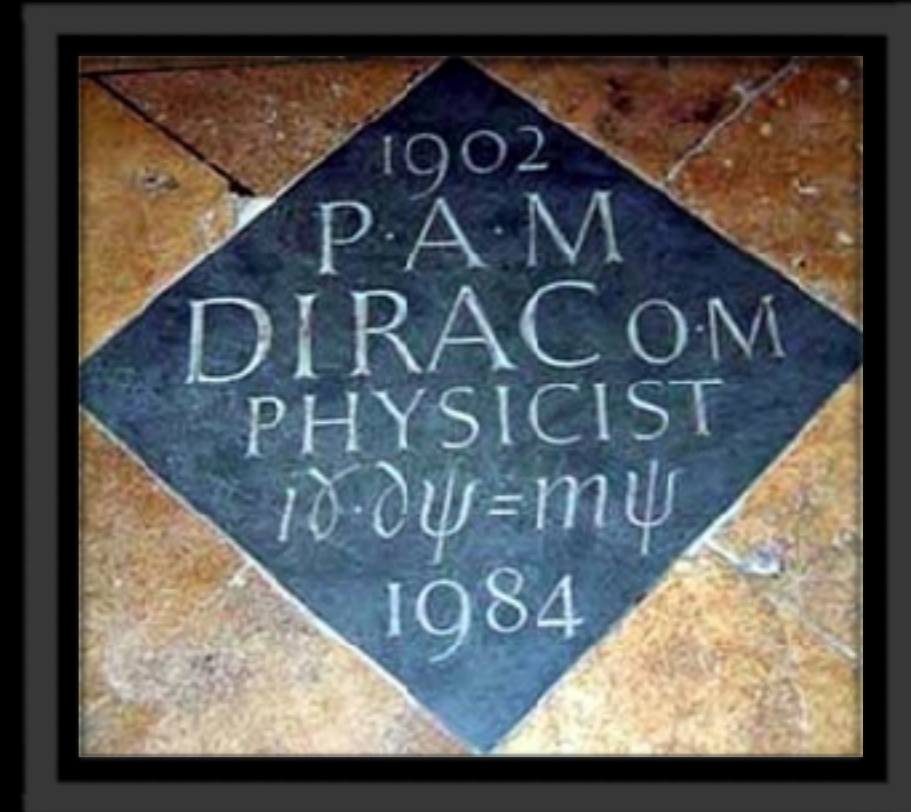


Paul Maurice Adrien Dirac  
(1902-1984)



1a edizione: 1930

L'equazione di Dirac  
una delle formule più eleganti  
e sorprendenti della fisica



Westminster Abbey

Equazione relativistica per l'elettrone (1928)  
(e del il positrone, osservato nel 1932)

Il periodo di **Robert Oppenheimer** nel Laboratorio Cavendish a Cambridge, nel 1925, fu fallimentare: era scarso negli esperimenti di laboratorio.

Nel 1926, si trasferì a Gottinga attratto dalla nuova MQ.



Robert Oppenheimer  
1904-1967

Con Max Born nel 1927 pubblicò

“On the Quantum Theory of Molecules”, una nuova teoria per lo studio delle molecole in MQ.

Ottenne il dottorato in fisica nel maggio 1927.

**Eugene Wigner** (1902-1995)  
fu assistente di Hilbert dal 1927  
Con **Hermann Weyl** applicò  
la teoria dei gruppi  
alla nuova MQ



Heisenberg e Wigner, 1928



M. Goeppert Mayer  
(1906-1972)

Gottinga 1924-30,  
tesi con M. Born  
Sull'assorbimento  
a 2 fotoni (1931)  
Nobel 1963  
(nucleo a shell)

Janos von Neumann  
(1903-1957)

A Gottinga 1925-27  
con D. Hilbert  
assiomi della MQ  
(Mathematical  
foundations of  
quantum mechanics  
1932)



Eduard Teller  
(1908-2003)

laurea in chimica.  
Fisica a Monaco  
con Sommerfeld.  
Dottorato nel 1930 a  
Lipsia con  
Heisenberg e Hund:  
About the Hydrogen  
molecular ion.  
A Gottinga 1930-33

Victor Weisskopf  
(1908-2002)

Gottinga 1928-31  
Dottorato con  
M. Born (1931)  
Tesi di  
spettroscopia



# EFFETTO TUNNEL

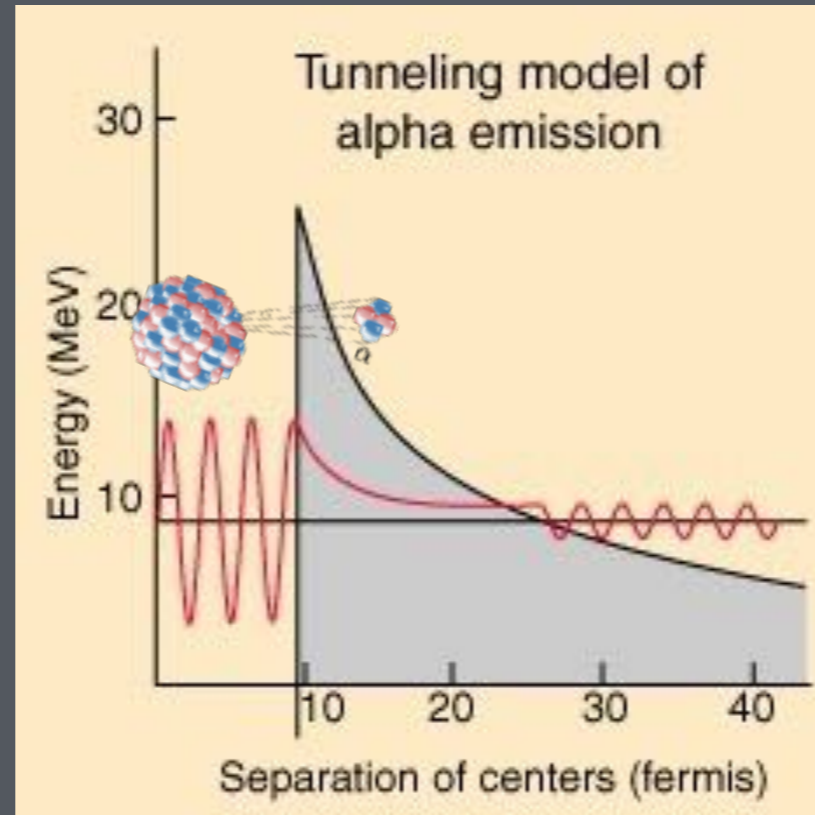


**George Gamov**

(Odessa 1904 - Boulder 1968)

3 mesi a Gottinga (Born) nel 1928

poi a Copenhagen (Bohr)



Decadimento radioattivo  
Zur Quantentheorie des Atomkernes,  
Z. Physik 51 (1928).

Fu allievo di Friedmann a Leningrado.  
Dopo l'Europa, emigrò in U.S.  
Formulò la teoria del Big Bang caldo  
con la Radiazione Cosmica e i rapporti  
degli elementi primordiali.



# LA NUOVA MECCANICA QUANTISTICA

Dirac (1933), Heisenberg (1932) e Schrödinger (1933)  
vanno a Stoccolma a ricevere i premi Nobel

*Caro Signor Born,*

*Se non le ho scritto per tanto tempo e non le ho ancora inviato i miei ringraziamenti per le sue congratulazioni, questo è dovuto in gran parte ad un senso di colpevolezza che provo nei suoi confronti.*

*Il fatto che io sia il solo a ricevere il Premio Nobel per un lavoro fatto a Gottinga in collaborazione - da lei, Jordan e me - mi deprime al punto che quasi non so cosa scriverle.*

*Sono naturalmente contento che i nostri comuni sforzi vengano ora apprezzati e conservo un grato ricordo dei bei tempi della nostra collaborazione.*

*Credo anche che tutti i buoni fisici sappiano quanto sia stato grande il contributo suo e di Jordan alla struttura della MQ, e questo non può essere alterato da una decisione sbagliata che viene dall'esterno.*

*Io tuttavia non posso fare altro che ringraziarla ancora una volta per la bella collaborazione, e provare un po' di vergogna.*

*Con i migliori saluti,*

*Suo W. Heisenberg*

*Zurigo, 25 novembre 1933*

Quando Born ricevette la lettera aveva 51 anni ed era rifugiato a Cambridge.

La riporterà nella sua biografia con toni gentili, osservando che l'allievo la spedì da Zurigo, per sfuggire alla censura nazista.

Avrà il premio Nobel nel 1954 “for his fundamental research in quantum mechanics, especially for his statistical interpretation of the wavefunction”

Il problema dell'interpretazione fisica  
si dimostrò ben più difficile  
del semplice scrivere le equazioni (Dirac)

# Gli esperimenti

Interferenza con due fenditure

di elettroni: Merli, Missiroli, Pozzi 1974, Tonomura 1989

di molecole di Fullerene, Zeilinger 1999

di antimateria, UniMi, PoliMi, Berna, 2019

Esperimento ideale EPR

(Einstein, Podolsky, Rosen, 1934)

Variabili Nascoste e Disuguaglianze di Bell

# Interferenza di elettroni in doppia fenditura

1961: Claus Jonsson (il primo esperimento, ignorato)

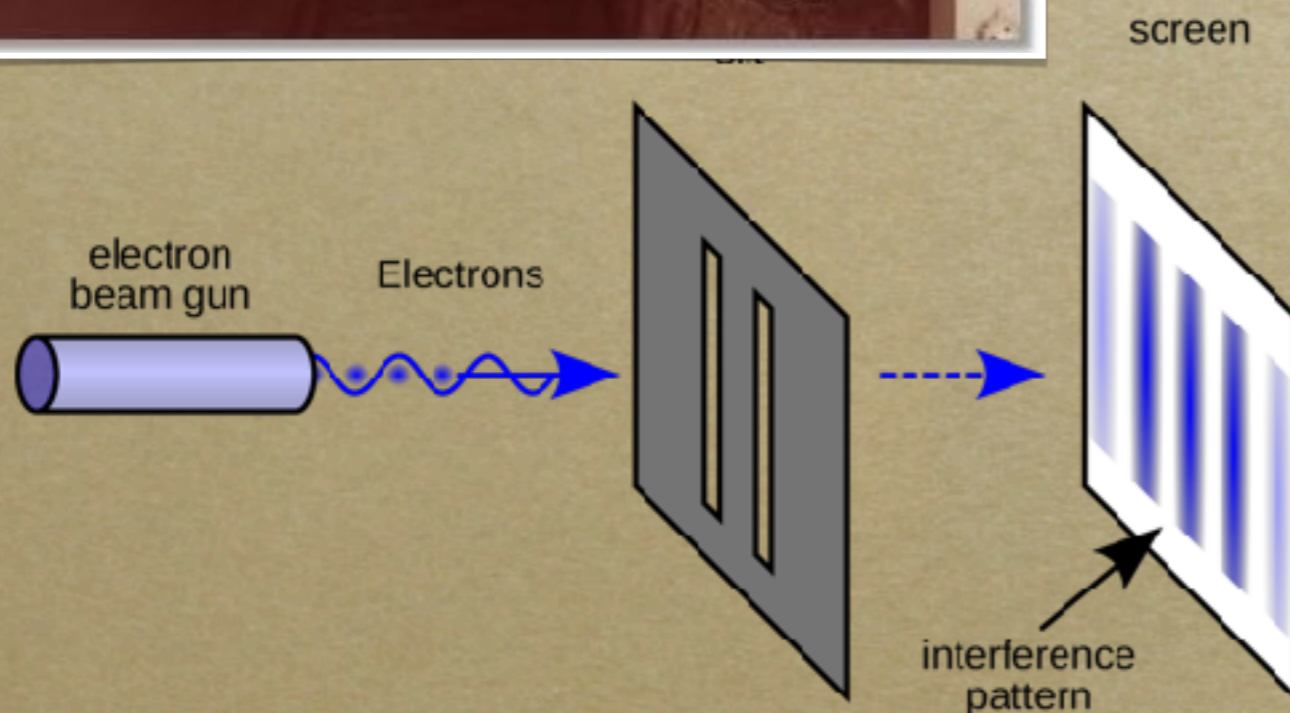


**Esperimenti in cui l'apparato è percorso da un solo elettrone per volta:**

1976, Bologna, Pier Giorgio Merli, GianFranco Missiroli, e Giulio Pozzi.

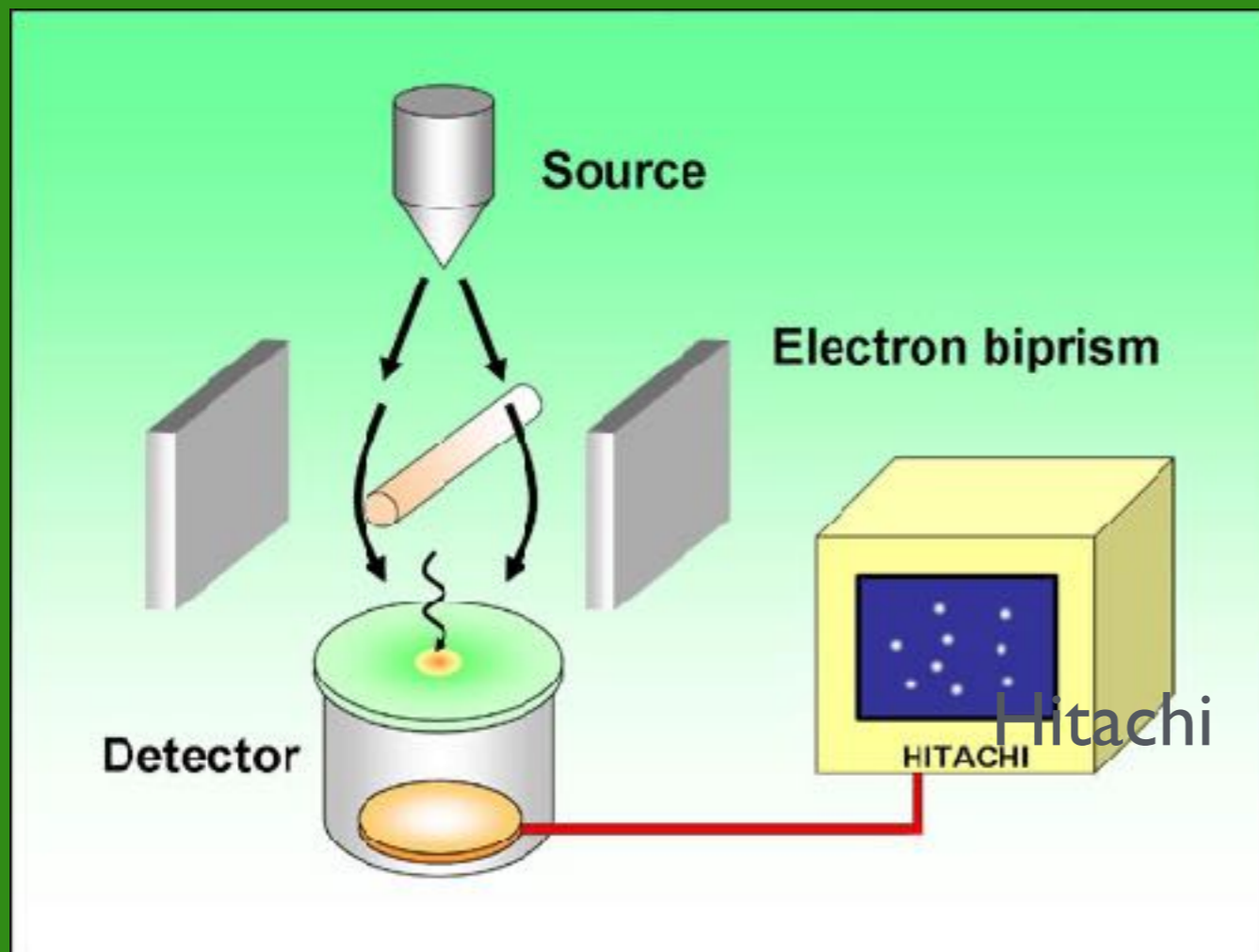


1989: Akira Tonomura (Hitachi)



# L'esperimento di Tonomura

(1989, Hitachi)



Velocità =  $c/40$

Filamento:  $1/1000$  mm

Rate: 10 elettroni/s

Tempo di volo:  $10^{-8}$  s

Efficienza: 100 %

Durata esperimento: 30 m

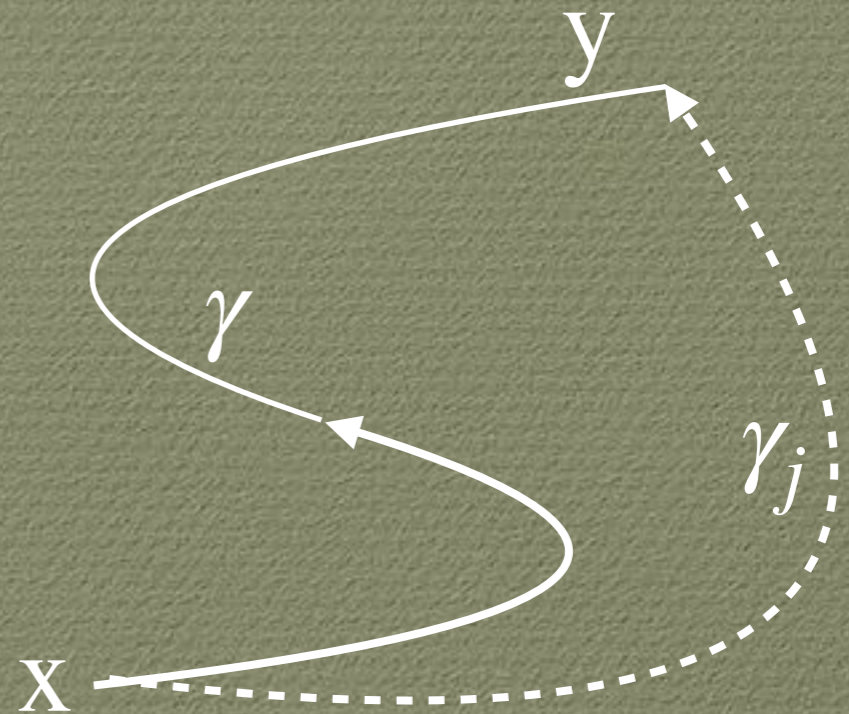


# 1948: La somma dei cammini

Richard Feynman (1918-1988)

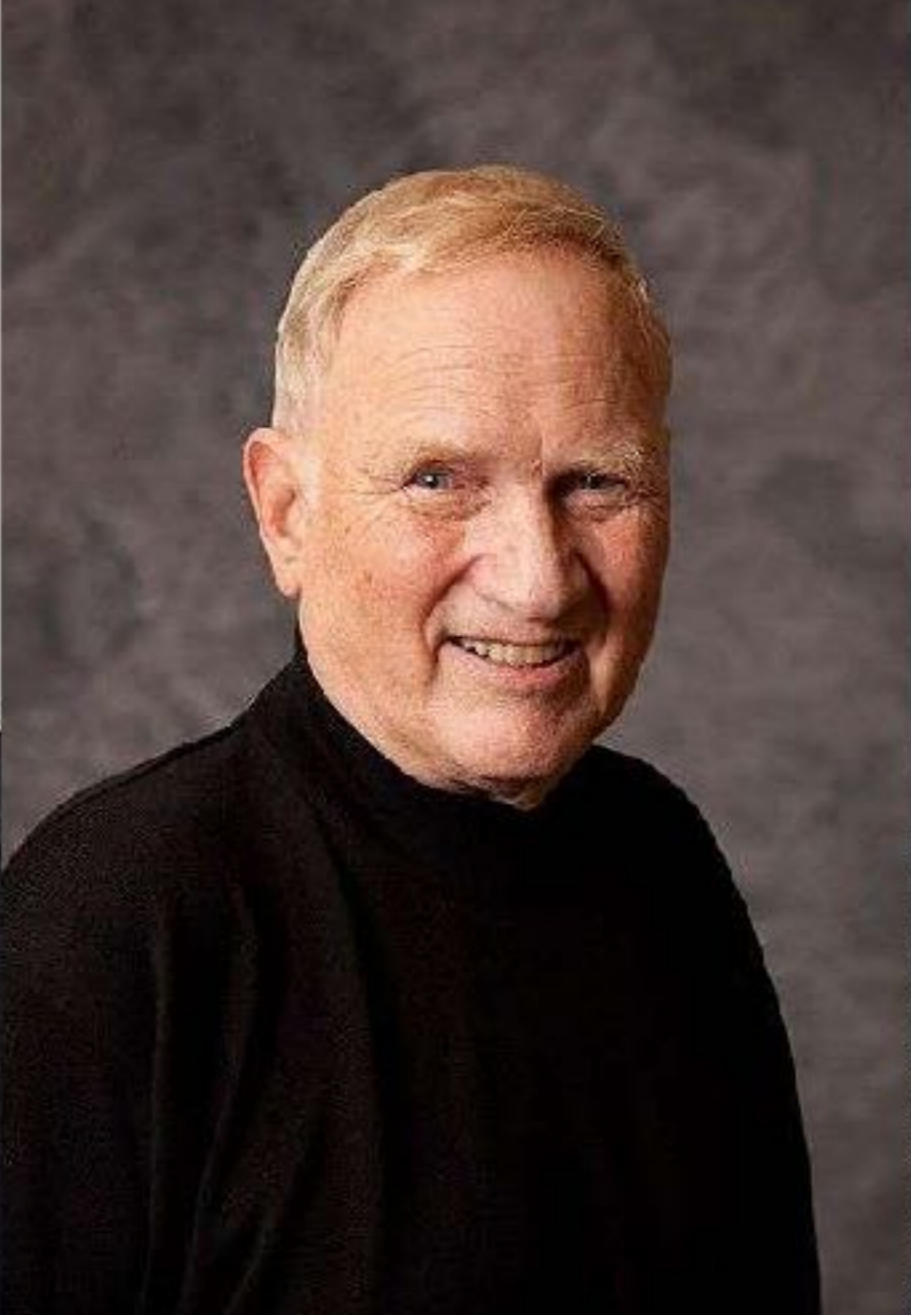
In fisica classica, dati due punti  $x$  e  $y$  e un tempo  $t$ , una particella percorre **IL cammino**  $\gamma$  da  $x$  a  $y$  nel tempo  $t$  che rende minima l'azione  $A(\gamma)$  (calcolata con l'energia cinetica e potenziale).

Feynman dimostra che la probabilità quantistica  $P(x \rightarrow y, t)$  (di trovare la particella in  $y$  al tempo  $t$  partendo da  $x$ ), può essere ottenuta sommando i pesi  $\exp[\frac{i}{\hbar}A(\gamma_j)]$  di **TUTTI i cammini**  $\gamma_j$  che uniscono  $x$  a  $y$  (come se la particella esplorasse tutti i possibili percorsi)

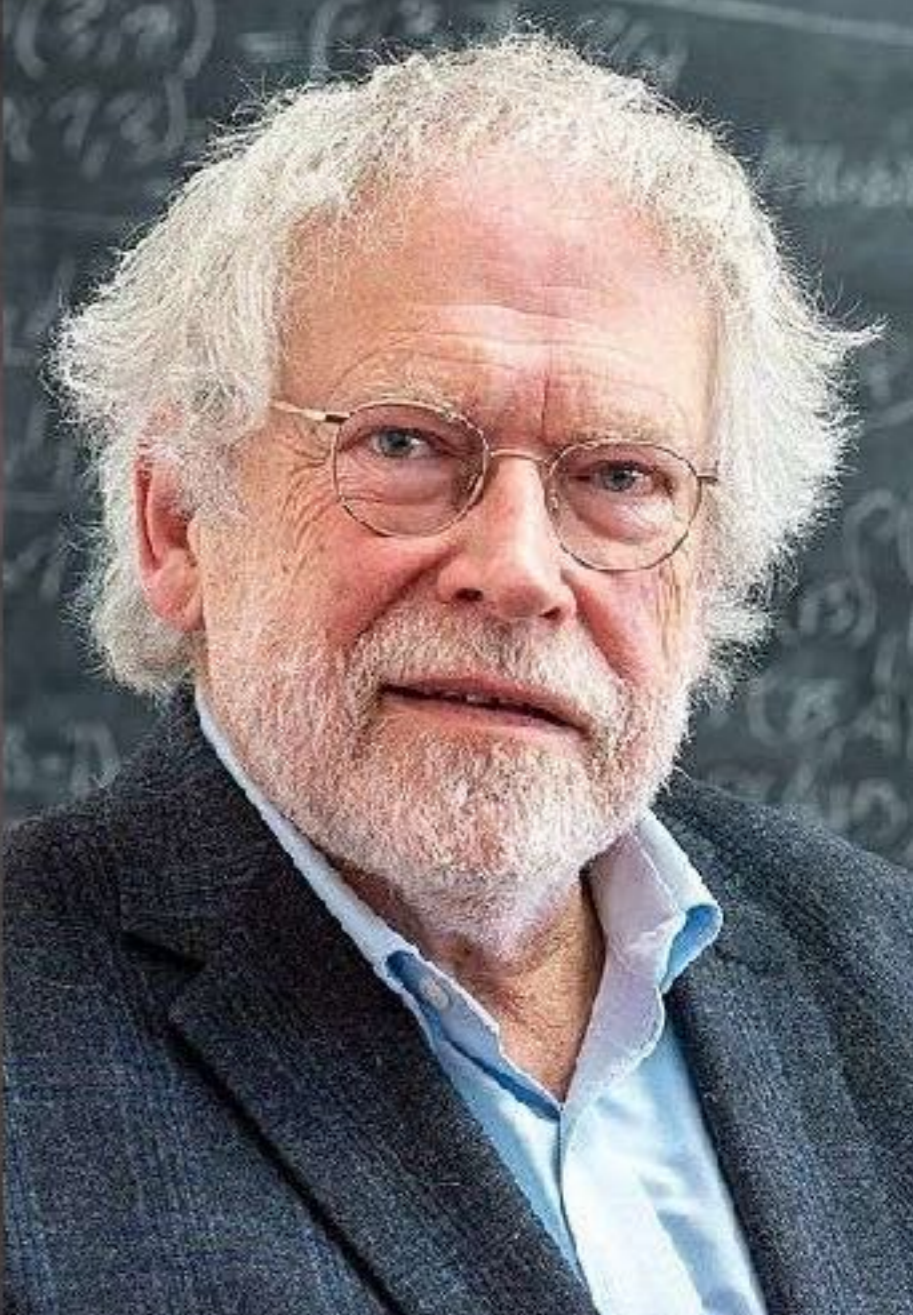




Alain Aspect



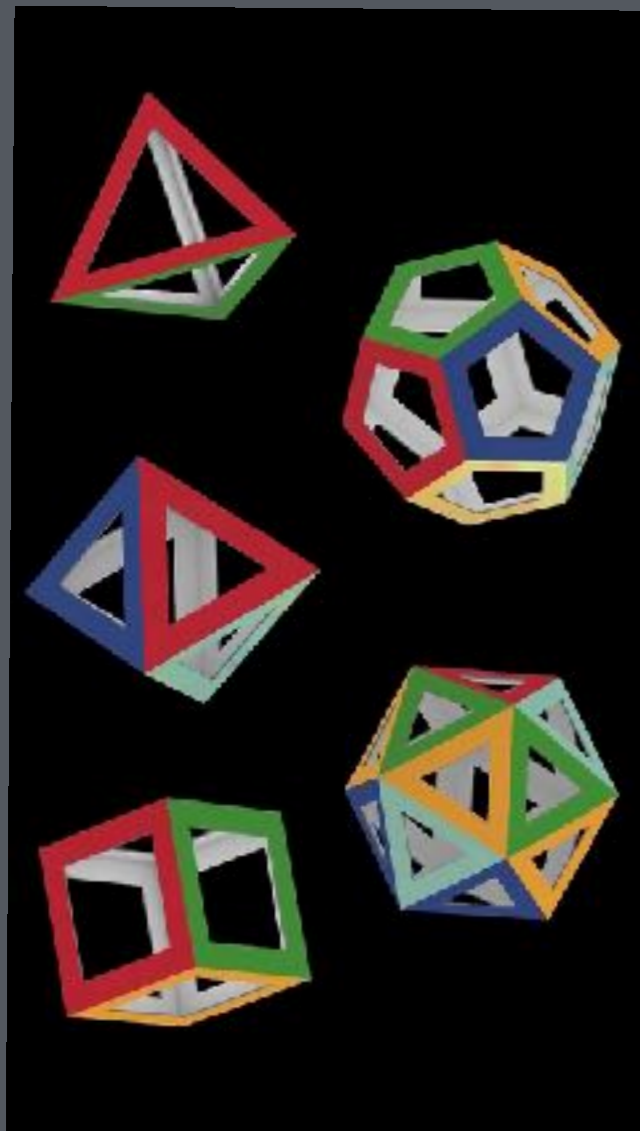
John Clauser



Anton Zeilinger

**Nobel 2022** "for experiments with entangled photons, establishing the violation of Bell inequalities and pioneering quantum information science"

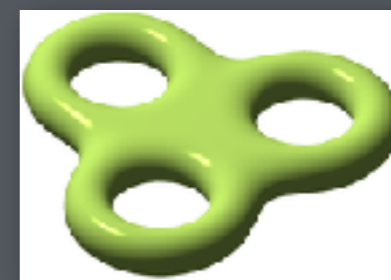
$$\text{EULERO: } 2 - 2H = F + V - E$$



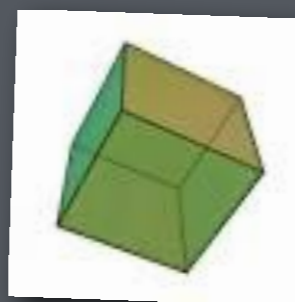
$h=0$



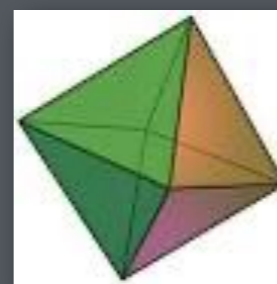
$h=1$



$h=3$



Cubo  
 $F=6, V=8, E=12$   
 $h=0$



Ottaedro  
 $F=8, V=6, E=12$   
 $h=0$

N pentagoni , M esagoni

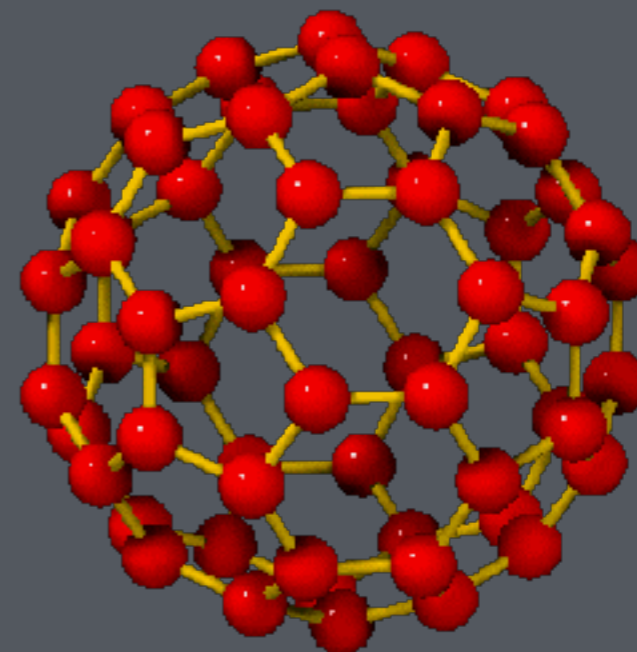
$$F=N+M,$$

$$E=(5N+6M)/2,$$

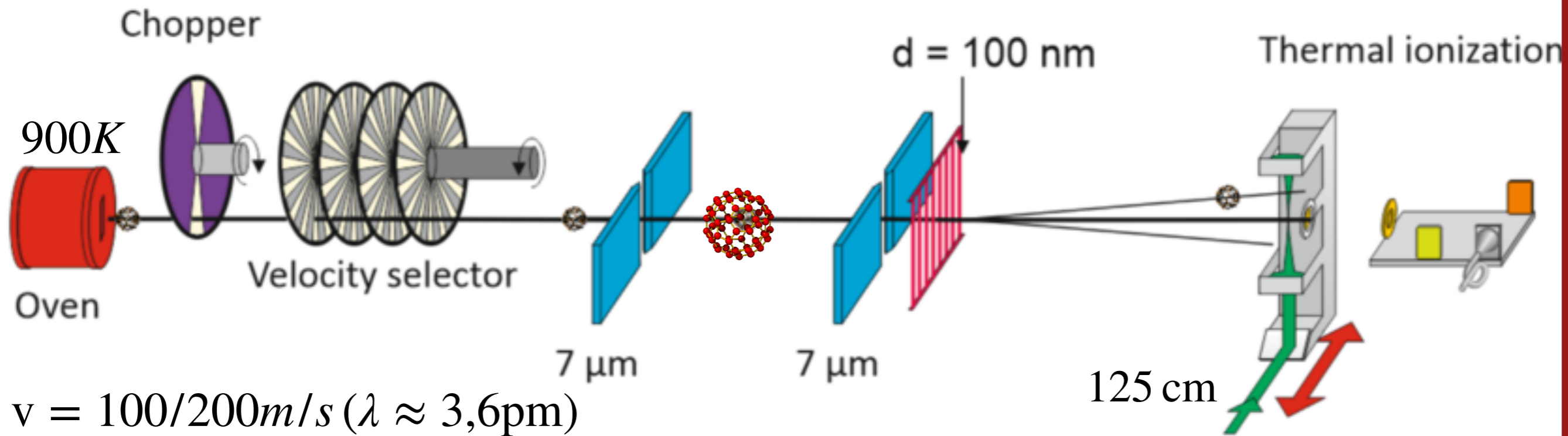
Vertici trivalenti:

$$2E=3V \rightarrow V=5/3 N+2M$$

**N deve essere 12**



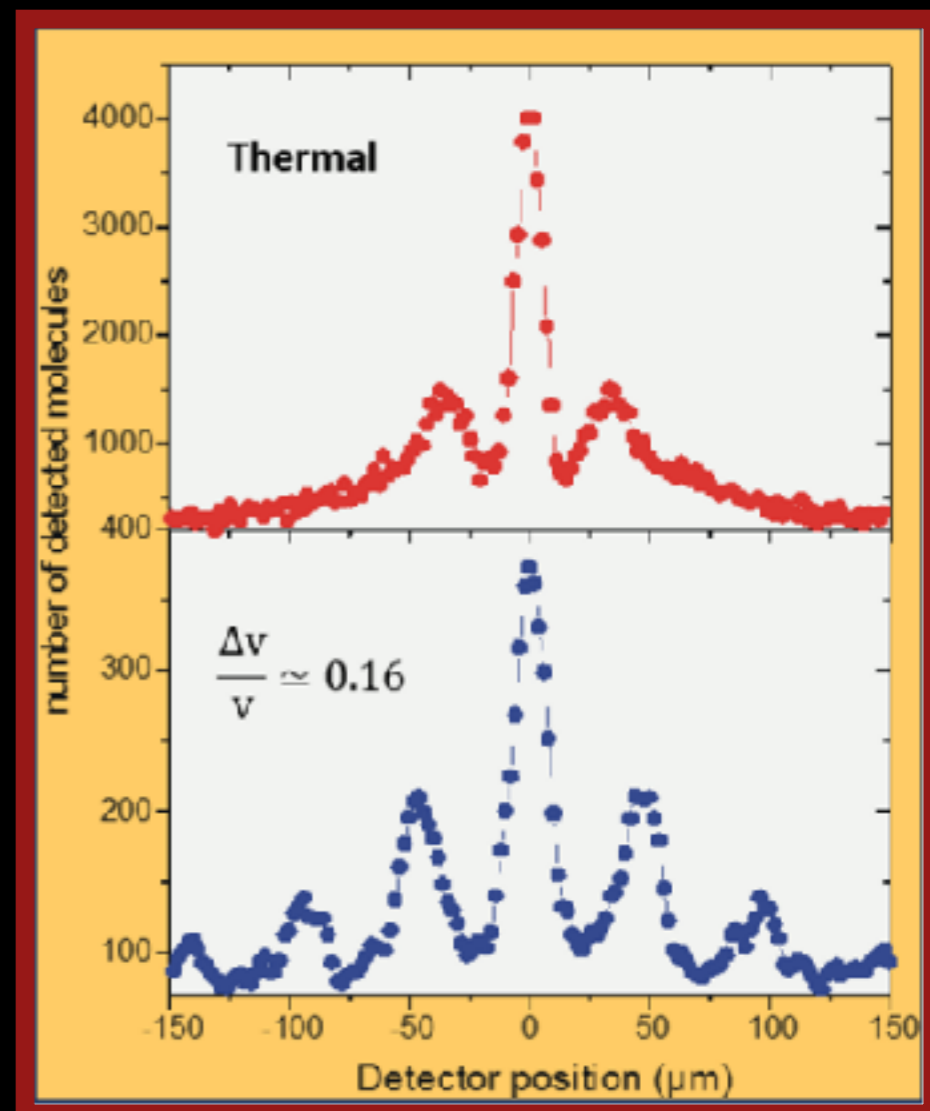
Fullerene  $C_{60}$



Fullerene  $\text{C}_{60}$  - diametro  $7 \times 10^{-10} \text{ m} \gg \lambda_{dB}$

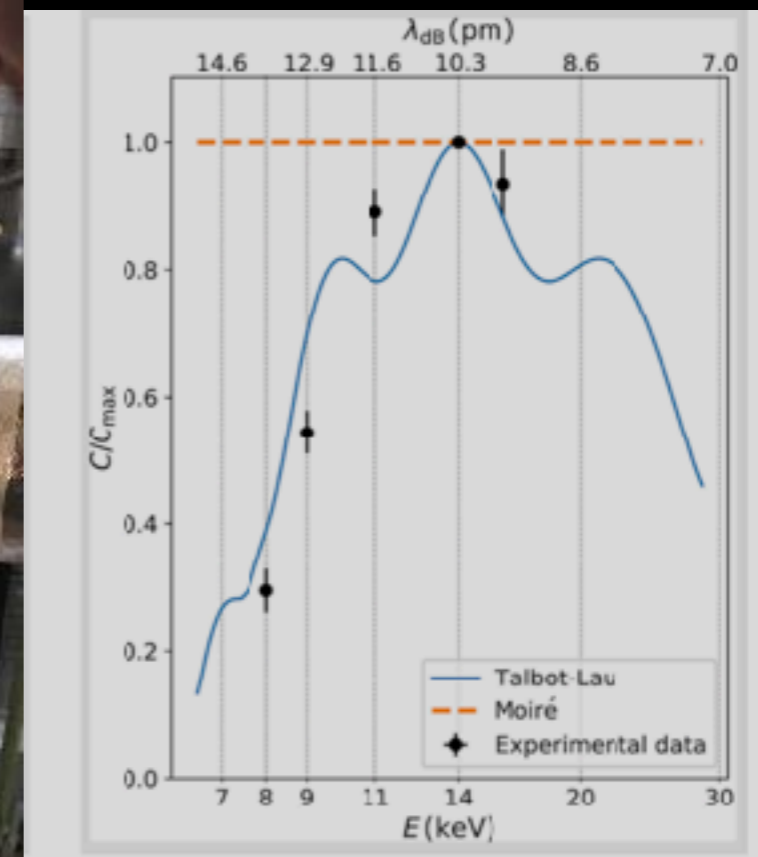
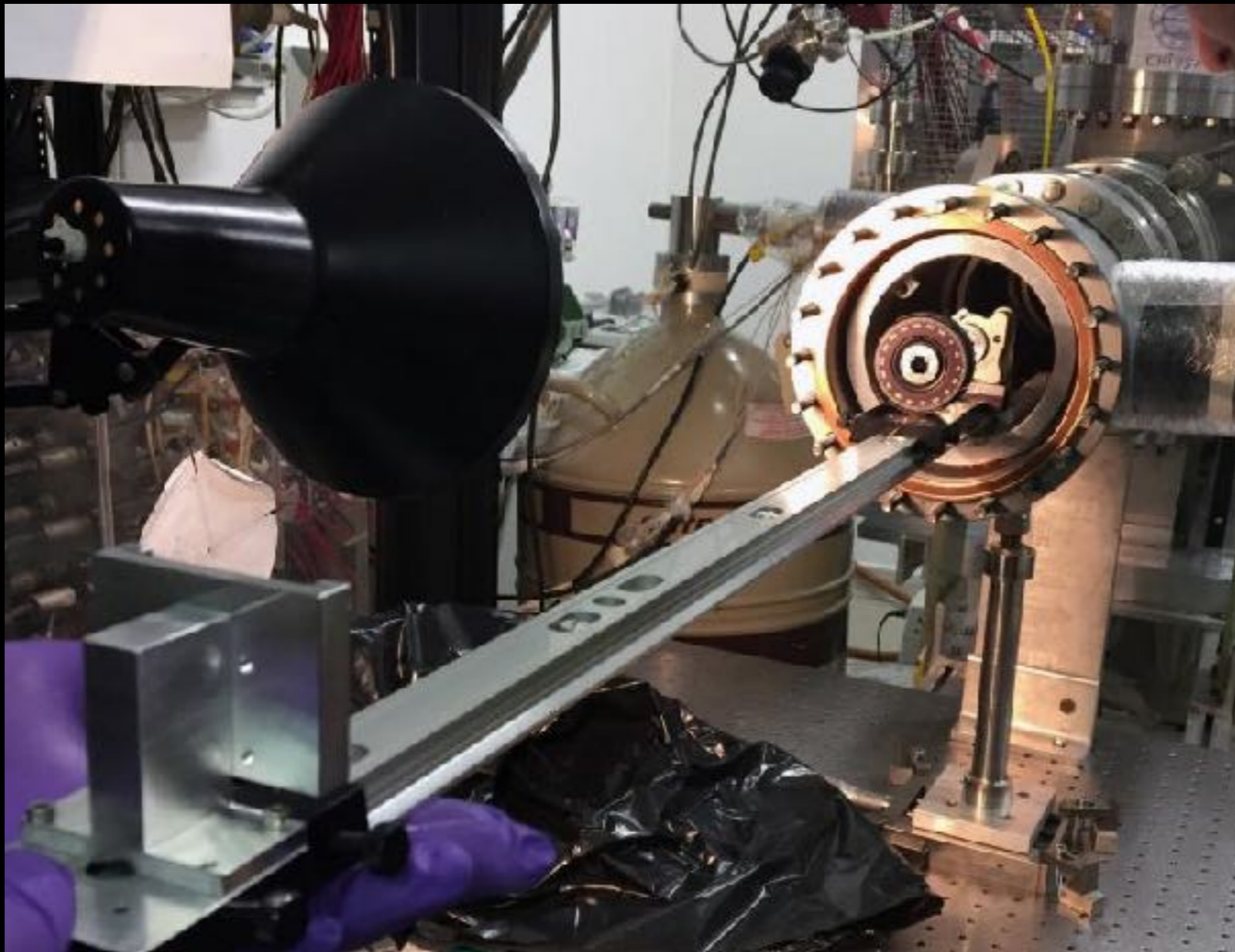
## Zeilinger (1999, Vienna)

Ogni particella ... interferisce solo con se stessa. In esperimenti con macromolecole ciò è particolarmente intuitivo dal momento che la probabilità che due molecole siano identiche in tutti gli stati interni (elettronico, vibraz., rotaz., ...) è praticamente nulla.



# 2019: Interferenza di antimateria ( $e^+$ )

Esperimento QUPLAS con positroni del laboratorio L-NESS (Politecnico di Milano - Como campus) a energie 8-18 keV. L'interferometro ha prodotto una figura di interferenza sul rivelatore ad alta risoluzione a emulsione nucleare. Il flusso di  $e^+$  era tale da garantire in ogni istante la presenza di una sola antiparticella nell'interferometro. È stato possibile dimostrare per la prima volta l'interferenza di **singole antiparticelle**.



Ogni misura con circa 20 milioni di  $e^+$ , una alla volta, in circa 8 giorni.

# L'ESPERIMENTO IDEALE EPR

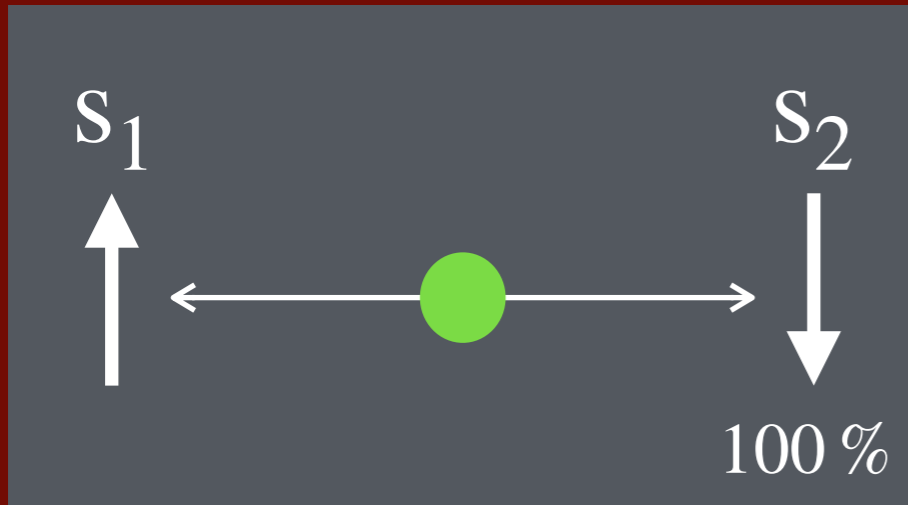
A.Einstein, B.Podolsky, N.Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*,  
Phys. Rev. 47, 777 (1935)

David Bohm nel 1951 propose una variante più semplice dell'esperimento, che consentì molti progressi

Un atomo emette una coppia di particelle in direzioni opposte in uno stato “entangled”: hanno spin opposti e sono ugualmente probabili entrambi gli orientamenti

$$\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$$

Secondo la MQ se la misura dello spin  $s_1$  fornisce  $+1$  allora la stessa misura dello spin  $s_2$  DEVE dare il valore  $-1$ , e viceversa



Il paradosso è nel fatto che le due misure sono fatte in posti distanti tra loro, e possiamo predire in anticipo il risultato della misura di una qualsiasi componente di spin 2 misurando prima la stessa componente di spin 1.

È la richiesta di località, o più precisamente che il risultato della misura di un sistema sia indisturbato da operazioni effettuate su un sistema distante con cui esso abbia interagito nel passato, a creare la principale difficoltà.

Poiché la funzione d'onda iniziale  $\psi$  non determina il risultato di una singola misura, la predeterminazione implica secondo Bohm la possibilità di una più completa specificazione dello stato.



**John Bell**  
(Belfast 1928, Ginevra 1990)

David Bohm:  
L'indeterminazione della MQ  
è dovuta alla conoscenza  
imperfetta per la presenza di  
altre variabili non direttamente  
osservabili (variabili nascoste)

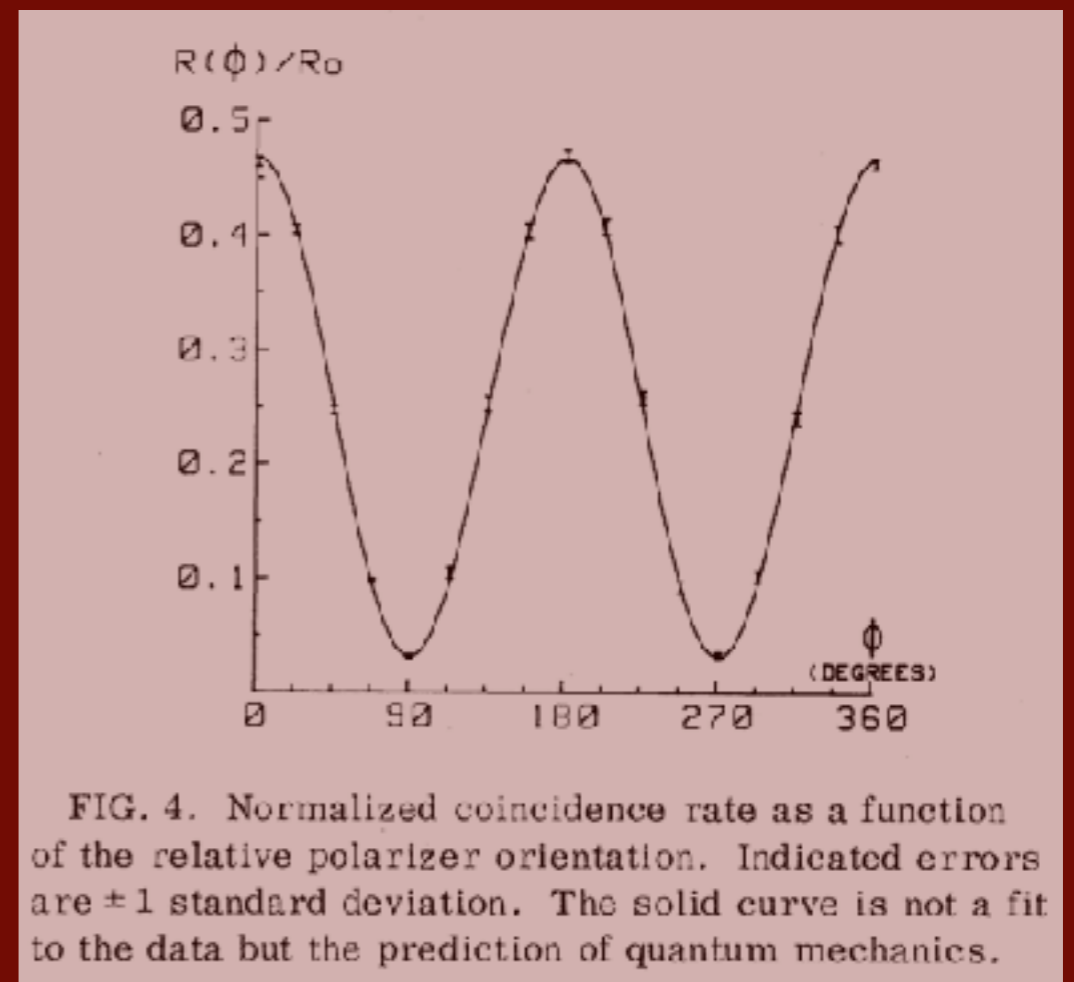
La conoscenza completa delle  
variabili nascoste, implicherebbe  
le disuguaglianze di Bell.  
Esse sono VIOLATE dagli  
esperimenti.

# 1981: esperimento di Aspect, violazione delle disuguaglianze di Bell

Un atomo di Calcio emette coppie di fotoni con polarizzazioni correlate, che si separano.

Si fanno misure remote delle loro polarizzazioni in varie direzioni.

I risultati sono in eccellente accordo con le previsioni della MQ, e violano nettamente le disuguaglianze di Bell.



Vogliamo concludere richiamando l'attenzione dei filosofi sul fatto che ciò che è veramente importante (almeno pei fisici) in una teoria fisica non è la sua interpretazione (la quale non è nemmeno unica) ma la sua capacità a prevedere e a collegare risultati suscettibili di essere verificati sperimentalmente

Piero Caldirola e Angelo Loinger

La M.Q. è una teoria di altissima precisione.  
Ha avviato una enorme trasformazione della fisica,  
della chimica, della biologia e della tecnologia.

La M.Q. statistica è il ponte tra la microfisica di  
molte particelle e la macrofisica.

La M.Q. e la relatività speciale hanno originato la  
teoria quantistica dei campi per le interazioni  
fondamentali



Una nuova generazione di giovani fisici si ritrova, dopo Los Alamos, a **Shelter Island (1947)**, per discutere nuovi effetti quantistici, e inaugurare la teoria quantistica dei campi per le interazioni fondamentali.

La riga  $H\alpha$  dell'Idrogeno (Lamb)

Il momento magnetico dell'elettrone (Kush)

*Quegli anni, quando il Lamb shift era il tema centrale della fisica, furono anni d'oro per tutti i fisici della mia generazione. Eravamo i primi a vedere questo minuscolo spostamento così sfuggente e difficile da misurare, che avrebbe chiarito il nostro pensiero sulle particelle e i campi.  
(Freeman Dyson)*



1947: W. Lamb, A. Pais, R. Feynman, J.A.Wheeler, H. Feshbach, J. Schwinger

# Q.E.D.

## Quantum Electro-Dynamics

teoria relativistica di elettroni-positroni  
interagenti con fotoni



Sin Itiro  
Tomonaga



Richard  
Feynman



Julian  
Schwinger

Nobel della fisica 1965

Mit vielen herzlichen Grüßen

Ihr

W. Heisenberg

Con molti cordiali saluti  
Vostro W. Heisenberg