

# La complessa semplicità dell'atomo di idrogeno



Bergamo, venerdì 1 Febbraio 2013



**Stefano Covino**

*INAF - Osservatorio Astronomico di Brera*

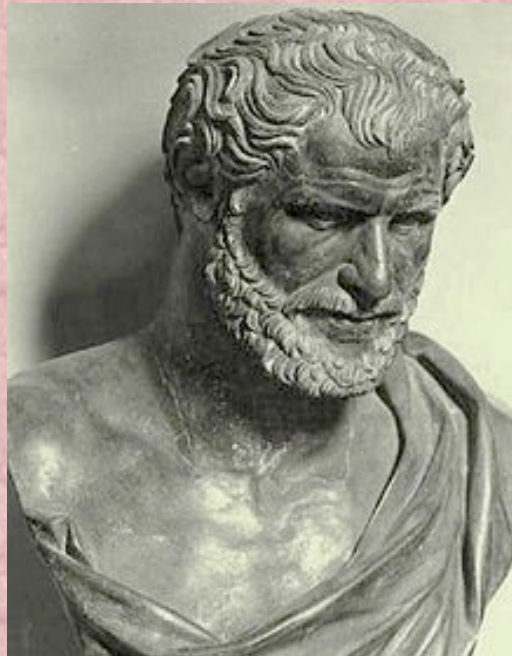


# Un po' di terminologia...

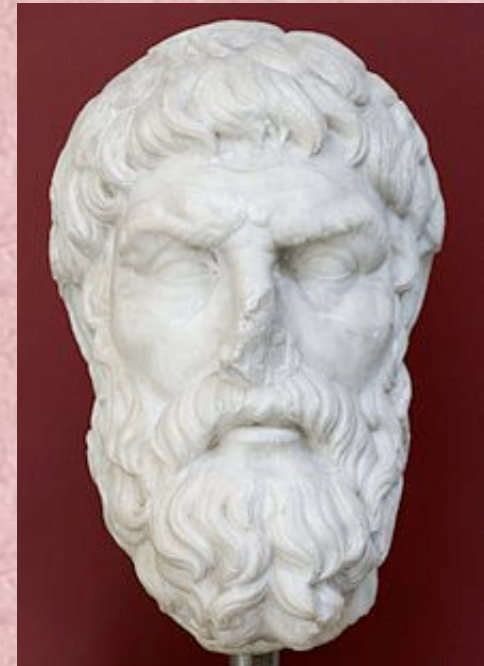
- Atomo (dal greco, indivisibile):
  - “atomismo” (Leucippo, Democrito, Epicuro)



Leucippo - V secolo a.C.



Democrito - 460 a.C. – 360 a.C.



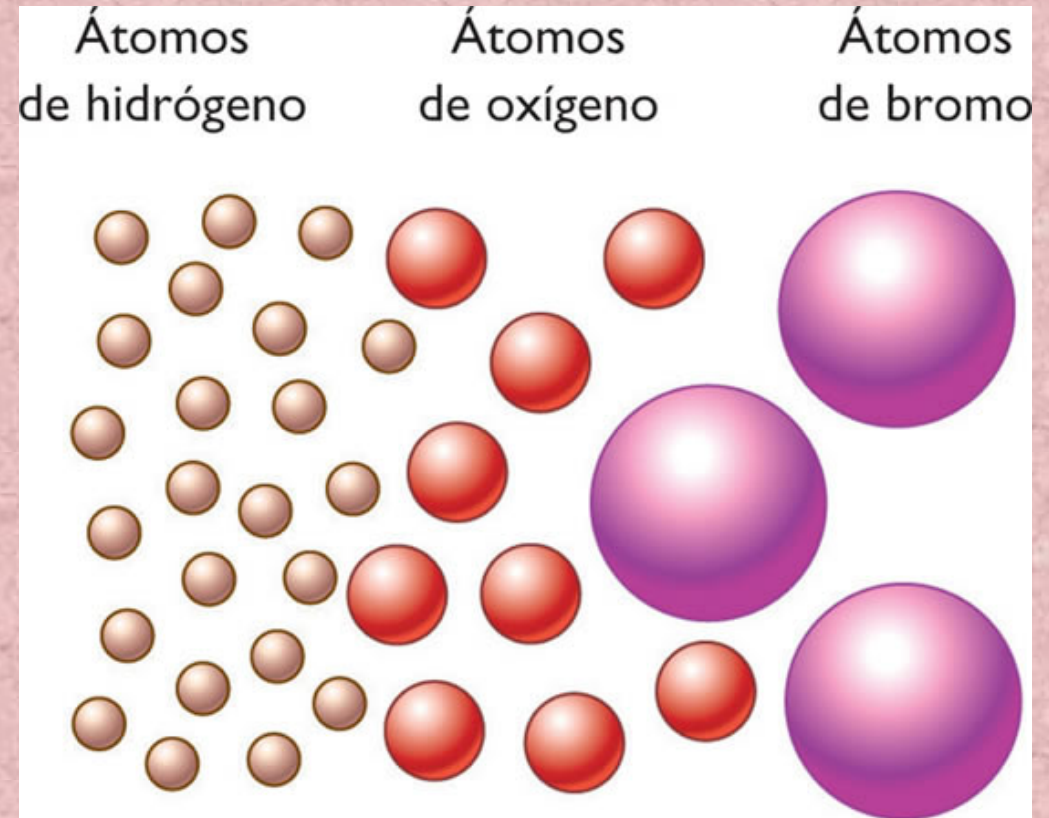
Epicuro – 10/2/241 a.C. – 271 a.C.

# Gli atomi come “sferette”

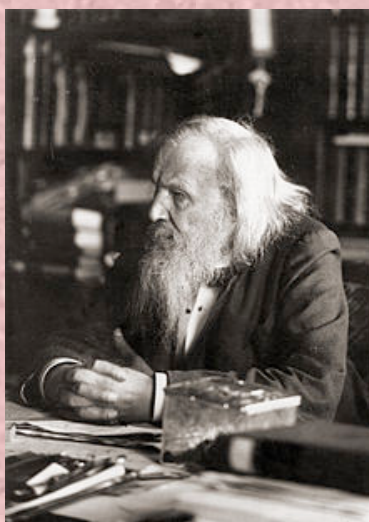
- L'idea che la materia sia, a livello microscopico, formata da atomi, ovvero particelle indivisibili, viene ripreso da Dalton ad inizio '800.



John Dalton  
6/9/1766 – 27/7/1844



# Gli atomi però non sono tutti uguali...



D.I. Mendeleev  
8/2/1834 – 2/2/1907

**PERIODIC TABLE**  
**Atomic Properties of the Elements**

**NIST**  
National Institute of Standards and Technology  
Technology Administration, U.S. Department of Commerce

**Frequently used fundamental physical constants**  
For the most accurate values of these and other constants, visit [physics.nist.gov/constants](http://physics.nist.gov/constants)  
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of  $^{133}\text{Cs}$

speed of light in vacuum  $c$  299 792 458 m s<sup>-1</sup> (exact)  
Planck constant  $h$  6.626 070 15 × 10<sup>-34</sup> J s (exact) ( $\hbar = h/2\pi$ )  
elementary charge  $e$  1.602 2 × 10<sup>-19</sup> C  
electron mass  $m_e$  9.109 383 56 × 10<sup>-31</sup> kg  
 $m_e c^2$  0.5110 MeV  
proton mass  $m_p$  1.672 6 × 10<sup>-27</sup> kg  
fine-structure constant  $\alpha$  1/137.036  
Rydberg constant  $R_\infty$  10 973 732 m<sup>-1</sup>  
 $R_\infty c$  3.289 842 × 10<sup>15</sup> Hz  
 $R_\infty h c$  13.6057 eV  
Boltzmann constant  $k$  1.380 7 × 10<sup>-23</sup> J K<sup>-1</sup>

■ Solids  
■ Liquids  
■ Gases  
■ Artificially Prepared

Group	1 IA	2 IIA											13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA						
1	<b>H</b> Hydrogen 1.00784 1s																		<b>He</b> Helium 4.002602 1s <sup>2</sup>					
2	<b>Li</b> Lithium 6.941 1s <sup>2</sup> 2s <sup>1</sup>	<b>Be</b> Beryllium 9.012182 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup>																	<b>B</b> Boron 10.811 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>	<b>C</b> Carbon 12.0107 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup>	<b>N</b> Nitrogen 14.0067 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup>	<b>O</b> Oxygen 15.9994 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup>	<b>F</b> Fluorine 18.9984032 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup>	<b>Ne</b> Neon 20.1797 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>
3	<b>Na</b> Sodium 22.989770 [Ne]3s <sup>1</sup>	<b>Mg</b> Magnesium 24.3050 [Ne]3s <sup>2</sup>																<b>Al</b> Aluminum 26.981538 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>	<b>Si</b> Silicon 28.0855 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup>	<b>P</b> Phosphorus 30.973761 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup>	<b>S</b> Sulfur 32.065 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup>	<b>Cl</b> Chlorine 35.453 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup>	<b>Ar</b> Argon 39.948 [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>	
4	<b>K</b> Potassium 39.0983 [Ar]4s <sup>1</sup>	<b>Ca</b> Calcium 40.078 [Ar]4s <sup>2</sup>	<b>Sc</b> Scandium 44.955910 [Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Ti</b> Titanium 47.867 [Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>V</b> Vanadium 50.9415 [Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Cr</b> Chromium 51.9961 [Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup>	<b>Mn</b> Manganese 54.938049 [Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Fe</b> Iron 55.845 [Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Co</b> Cobalt 58.933200 [Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Ni</b> Nickel 58.6934 [Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Cu</b> Copper 63.546 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	<b>Zn</b> Zinc 65.409 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>	<b>Ga</b> Gallium 69.723 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup>	<b>Ge</b> Germanium 72.64 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup>	<b>As</b> Arsenic 74.92160 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup>	<b>Se</b> Selenium 78.96 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup>	<b>Br</b> Bromine 79.904 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup>	<b>Kr</b> Krypton 83.798 [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>						
5	<b>Rb</b> Rubidium 85.4678 [Kr]5s <sup>1</sup>	<b>Sr</b> Strontium 87.62 [Kr]5s <sup>2</sup>	<b>Y</b> Yttrium 88.90585 [Kr]4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup>	<b>Zr</b> Zirconium 91.224 [Kr]4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup>	<b>Nb</b> Niobium 92.90638 [Kr]4d <sup>4</sup> 5s <sup>1</sup>	<b>Mo</b> Molybdenum 95.94 [Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>1</sup>	<b>Tc</b> Technetium (98) [Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup>	<b>Ru</b> Ruthenium 101.07 [Kr]4d <sup>7</sup> 5s <sup>1</sup>	<b>Rh</b> Rhodium 102.90550 [Kr]4d <sup>8</sup> 5s <sup>1</sup>	<b>Pd</b> Palladium 106.42 [Kr]4d <sup>10</sup>	<b>Ag</b> Silver 107.8682 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>1</sup>	<b>Cd</b> Cadmium 112.411 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>	<b>In</b> Indium 114.818 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup>	<b>Sn</b> Tin 118.710 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup>	<b>Sb</b> Antimony 121.760 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup>	<b>Te</b> Tellurium 127.60 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup>	<b>I</b> Iodine 126.90447 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup>	<b>Xe</b> Xenon 131.293 [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>						
6	<b>Cs</b> Cesium 132.90545 [Xe]6s <sup>1</sup>	<b>Ba</b> Barium 137.327 [Xe]6s <sup>2</sup>		<b>Hf</b> Hafnium 178.49 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Ta</b> Tantalum 180.9479 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>W</b> Tungsten 183.84 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Re</b> Rhenium 186.207 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>1</sup>	<b>Os</b> Osmium 190.23 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Ir</b> Iridium 192.217 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Pt</b> Platinum 195.078 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s <sup>1</sup>	<b>Au</b> Gold 196.96655 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>1</sup>	<b>Hg</b> Mercury 200.59 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Tl</b> Thallium 204.3833 [Xe]6p <sup>1</sup>	<b>Pb</b> Lead 207.2 [Xe]6p <sup>2</sup>	<b>Bi</b> Bismuth 208.98038 [Xe]6p <sup>3</sup>	<b>Po</b> Polonium (209) [Xe]6p <sup>4</sup>	<b>At</b> Astatine (210) [Xe]6p <sup>5</sup>	<b>Rn</b> Radon (222) [Xe]6p <sup>6</sup>						
7	<b>Fr</b> Francium (223) [Rn]7s <sup>1</sup>	<b>Ra</b> Radium (226) [Rn]7s <sup>2</sup>		<b>Rf</b> Rutherfordium (261) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Db</b> Dubnium (262) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Sg</b> Seaborgium (266) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Bh</b> Bohrium (264) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>5</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Hs</b> Hassium (277) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Mt</b> Meitnerium (268) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Uun</b> Ununium (281) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>8</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Uuu</b> Ununium (272) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Uub</b> Ununium (285) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>		<b>Uuq</b> Ununquadium (289) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>1</sup>		<b>Uuh</b> Ununhexium (292) [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>2</sup>								
			<b>Lanthanides</b>	<b>La</b> Lanthanum 138.9055 [Xe]5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Ce</b> Cerium 140.116 [Xe]4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Pr</b> Praseodymium 140.90785 [Xe]4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Nd</b> Neodymium 144.24 [Xe]4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Pm</b> Promethium (145) [Xe]4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Sm</b> Samarium 150.36 [Xe]4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Eu</b> Europium 151.964 [Xe]4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Gd</b> Gadolinium 157.25 [Xe]4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Tb</b> Terbium 158.92534 [Xe]4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Dy</b> Dysprosium 162.500 [Xe]4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Ho</b> Holmium 164.93032 [Xe]4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Er</b> Erbium 167.259 [Xe]4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Tm</b> Thulium 168.93421 [Xe]4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Yb</b> Ytterbium 173.04 [Xe]4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>Lu</b> Lutetium 174.967 [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>						
			<b>Actinides</b>	<b>Ac</b> Actinium (227) [Rn]6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Th</b> Thorium 232.0381 [Rn]6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Pa</b> Protactinium 231.03688 [Rn]6d <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>U</b> Uranium 238.02891 [Rn]6d <sup>3</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Np</b> Neptunium (237) [Rn]6d <sup>4</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Pu</b> Plutonium (244) [Rn]6d <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Am</b> Americium (243) [Rn]6d <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Cm</b> Curium (247) [Rn]6d <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Bk</b> Berkelium (247) [Rn]6d <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Cf</b> Californium (251) [Rn]6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Es</b> Einsteinium (252) [Rn]6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Fm</b> Fermium (257) [Rn]6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Md</b> Mendelevium (258) [Rn]6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>No</b> Nobelium (259) [Rn]6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>Lr</b> Lawrencium (262) [Rn]6d <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> 7p <sup>1</sup>						

Atomic Number: 58, Ground-state Level:  $1G_4$ , Symbol: **Ce**, Name: Cerium, Atomic Weight: 140.116, Ground-state Configuration:  $[\text{Xe}]4f15d6s2$ , Ionization Energy (eV): 5.5387

<sup>†</sup>Based upon  $^{12}\text{C}$ . () indicates the mass number of the most stable isotope.

For a description of the data, visit [physics.nist.gov/data](http://physics.nist.gov/data)

NIST SP 966 (September 2003)

# Si aveva anche un'idea delle dimensioni atomiche...

- Numero di Avogadro, densità e peso atomico
- Fe:  $N_A \approx 6 \times 10^{23}$ ,  $\rho \approx 7,87 \text{ g/cm}^3$ ,  $A \approx 56$ 
  - 1 mol Fe = A g =  $N_A$  atomi
  - atomi (1gr) =  $N_A / A \approx 1,1 \times 10^{22}$
  - volume (1gr) =  $1 / \rho \approx 0.13 \text{ cm}^3$
  - volume / atomo  $\approx 1,2 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$
  - volume =  $4\pi r^3$
  - $r \approx 10^{-8} \text{ cm} = 10^{-10} \text{ m}$



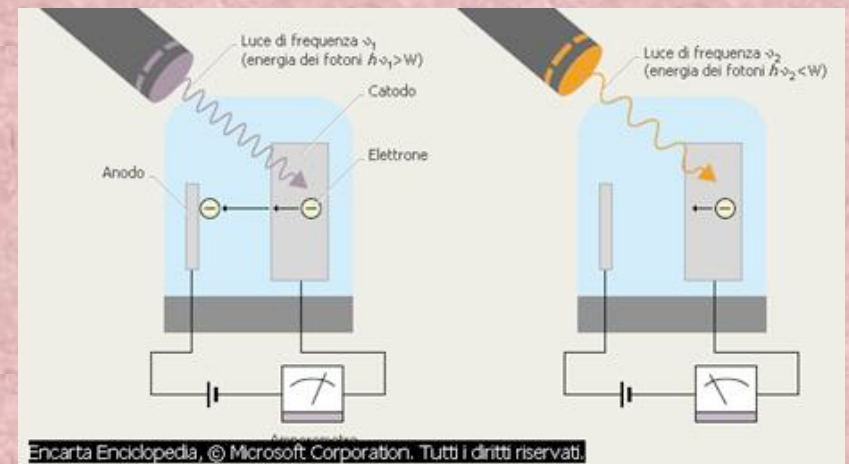
Amedeo Avogadro  
9/8/1776 – 9/7/1856

Per sapere come si ricava  $N_A$ :

<http://www.vialattea.net/esperti/php/risposta.php?num=8519>

# All'inizio del ventesimo secolo, si sapeva che:

- gli atomi contenevano elettroni (diffrazione raggi X, effetto foto-elettrico, ecc.);
- il numero di elettroni,  $Z$ , era circa metà del peso atomico,  $A$ ;
- gli atomi sono normalmente neutri, e quindi dovevano contenere cariche positive;
- la massa degli elettroni è piccolissima rispetto a qualunque atomo: la massa è concentrata nella carica positiva ( $m_e = m_p / 1836$ );
- Il raggio degli atomi era  $\sim 10^{-10}$  m.



# E quindi le prime idee quantitative sull'atomo...

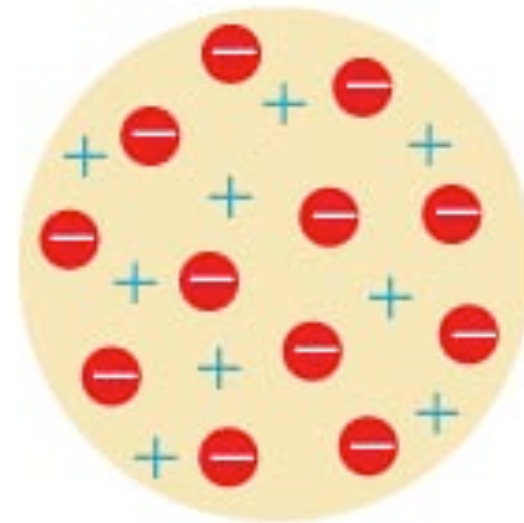
Come sono distribuite le cariche?

- il modello a “plum pudding”
- per avere neutralità e stabilità le cariche sono distribuite uniformemente.



Joseph J. Thomson  
18/12/1856 – 20/8/1940

Thomson's atomic model



~  $10^{-10}$  m

# Curiosità!



George P. Thomson  
3/5/1892 – 10/9/1975



- J.J. Thomson, padre, fu insignito del premio Nobel nel 1906 per avere mostrato che l'elettrone era una particella subatomica.
- G.P. Thomson, figlio, fu insignito del premio Nobel nel 1937 per avere messo in evidenza le proprietà ondulatorie dell'elettrone.



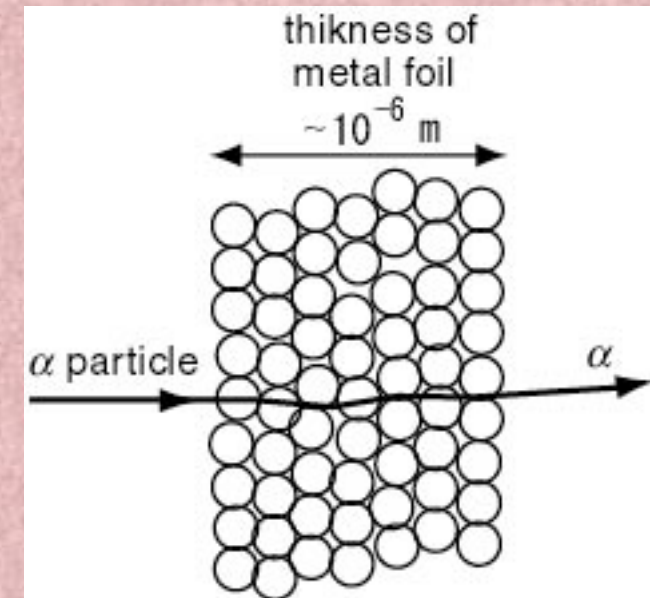
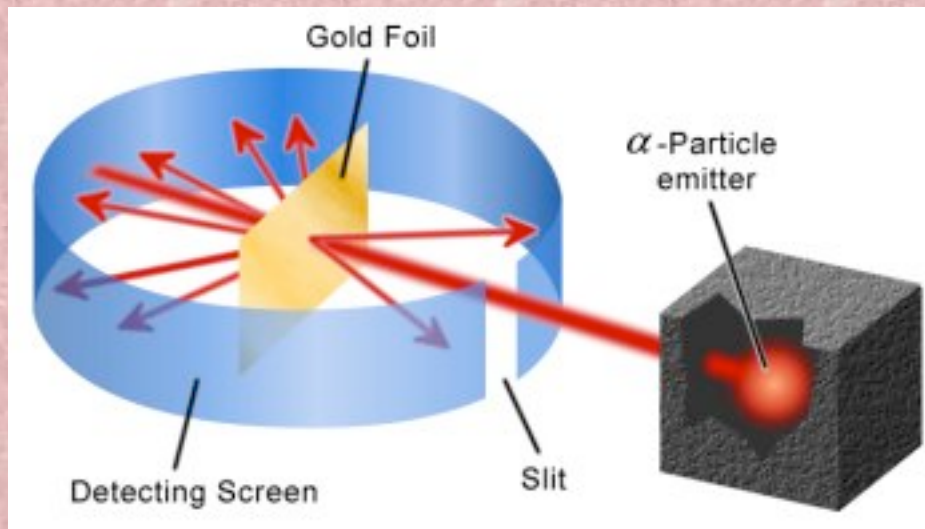
# L'esperimento di Geiger e Marsden



Ernest Marsden - Hans Geiger  
1889 - 1970 1882 - 1945

Si tratta di un classico esperimento di “scattering”:

- Un fascio di particelle alfa (nuclei di elio) è lanciato attraverso un sottile foglio di metallo.
- Nel modello di Thomson l'angolo di deviazione risulta essere molto piccolo.



Per calcolare lo scattering previsto (in inglese):

[http://www.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld1\\_E/Part2\\_E/P24\\_E/Thomson\\_scattering\\_E.htm](http://www.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld1_E/Part2_E/P24_E/Thomson_scattering_E.htm)

# L'interpretazione di Rutherford...

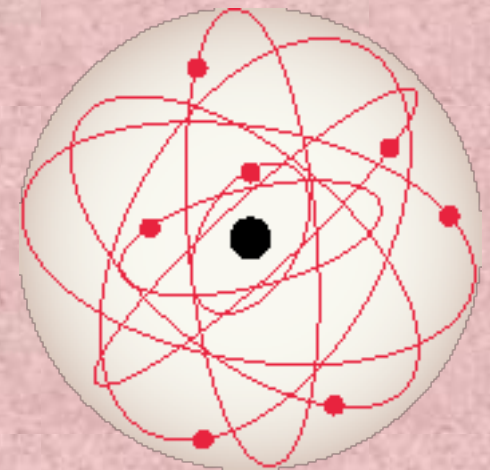
## Fatti osservati:

- Praticamente tutte le particelle  $\alpha$  attraversano il foglio di metallo (quasi) indisturbate
- Occasionalmente abbiamo però deviazioni a grandi angoli. Anche autentici “rimbalzi”.
- La probabilità di questi ultimi dipende dal peso atomico del materiale bersaglio.



Ernest Rutherford  
30/8/1871– 19/10/1937

Quindi l'ipotesi: la massa (e la carica positiva) è concentrata nel nucleo dell'atomo, circondata dagli elettroni che occupano praticamente tutto il volume!



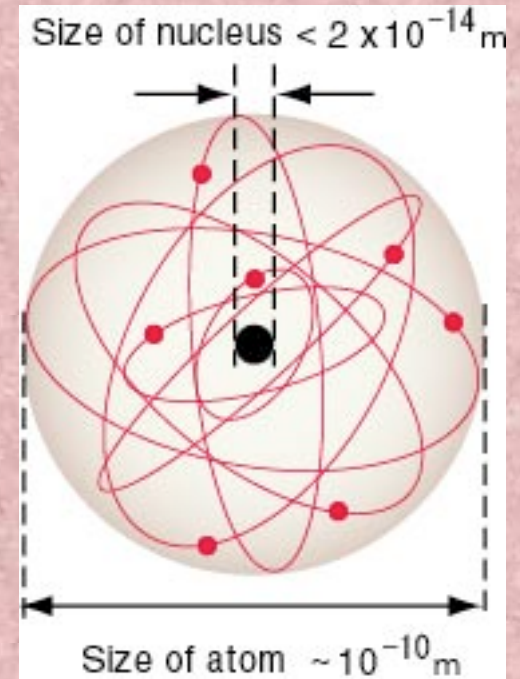
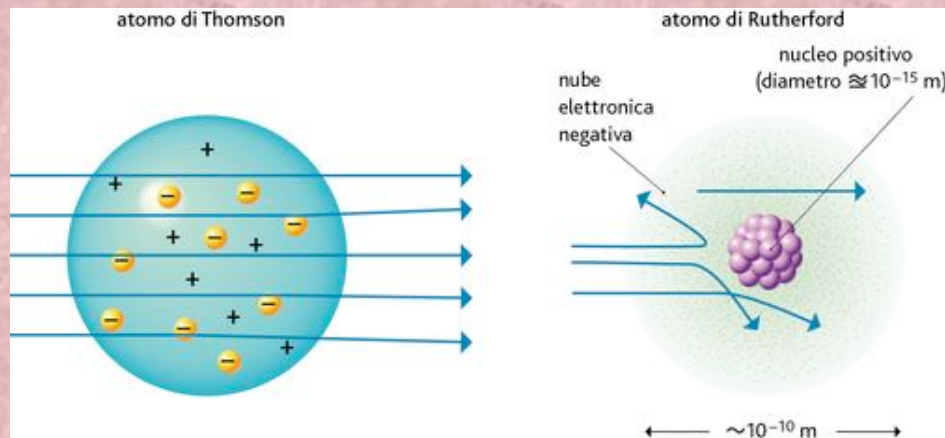
Per calcolare lo scattering previsto (in inglese):

[http://www.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld1\\_E/Part2\\_E/P25\\_E/Rutherford\\_scattering\\_E.htm](http://www.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld1_E/Part2_E/P25_E/Rutherford_scattering_E.htm)

## Secondo le parole dello stesso Rutherford:

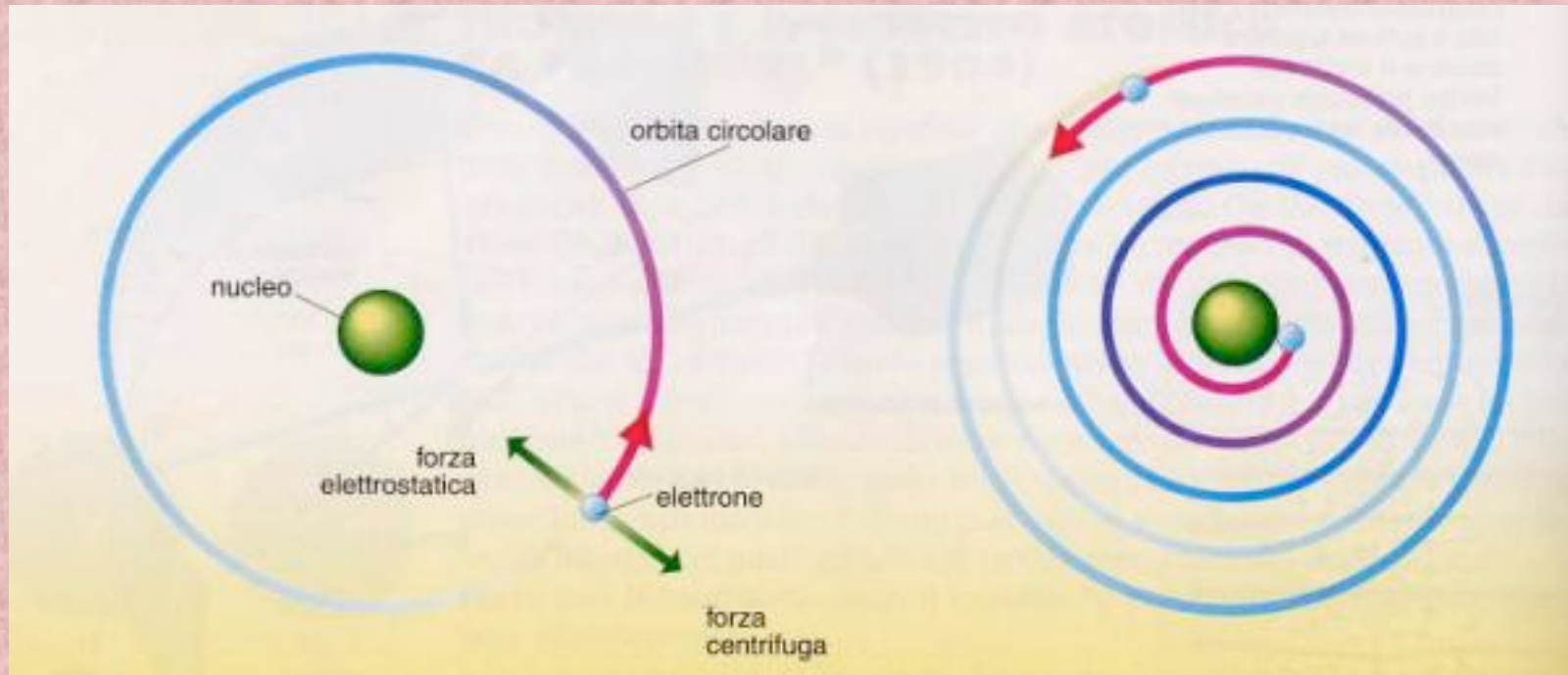
“It was quite the most incredible event that ever happened to me in my life. It was as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you.”

Analizzando i risultati degli esperimenti si poté anche stimare la dimensione del nucleo:  $10^{-14}$  m



Problema: può una struttura del genere essere stabile?

Gli elettroni non possono essere “fermi” nel modello di Rutherford, devono quindi “orbitare”. Però cariche accelerate emetteranno radiazione e perderanno energia. L'atomo dovrebbe collassare in  $10^{-12}$  s!

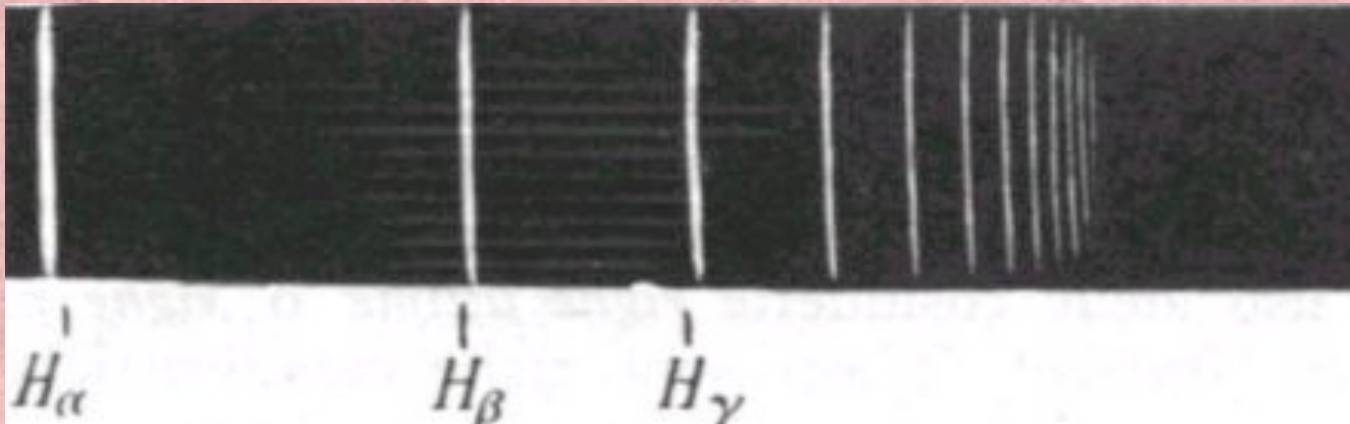
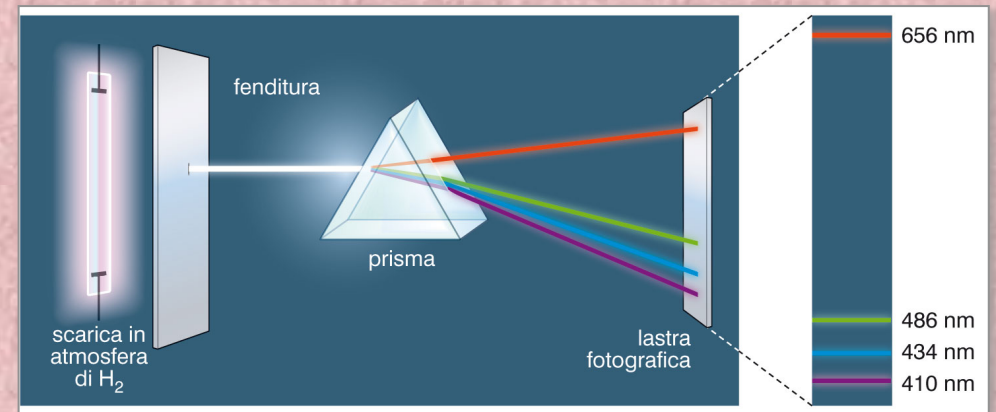


# Gli spettri atomici

Effettivamente gli atomi emettono radiazioni, ma sono anche osservati essere stabili. Che tipo di radiazione emettono?

$$k = 1/\lambda = R_H (1/2^2 - n^2)$$

Serie di Balmer,  $R_H$  costante di Rydberg

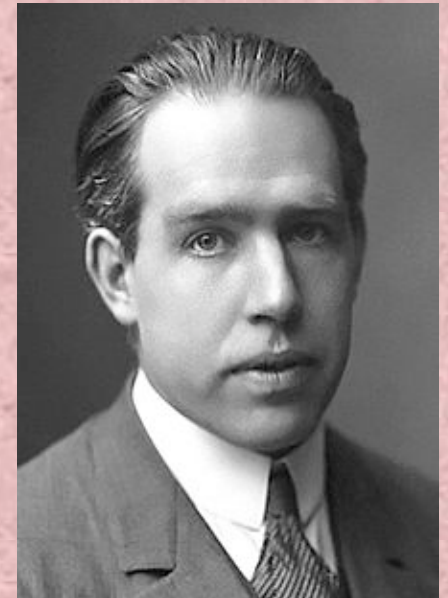


Spettro dell'atomo di idrogeno

# Come interpretare gli spettri atomici?

Nel 1913 Niels Bohr ideò un modello che descriva accuratamente le osservazioni. Si basava però su alcuni postulati:

1. Un elettrone in un atomo si muove in orbite circolari sotto l'influenza della forza di Coulomb.
2. Invece delle infinite orbite possibili solo quelle per cui il momento angolare orbitale è un multiplo di  $h/2\pi$  sono possibili.
3. In queste orbite gli elettroni sebbene accelerati non emettono radiazione.
4. Si ha invece emissione se un elettrone "salta" da un'orbita ad un'altra.



Niels Bohr  
7/10/1885 – 18/11/1962

# Momento angolare ed energia

Supponiamo di avere un elettrone in orbita circolare attorno ad un nucleo di carica  $Z$  ad una distanza  $r$ :

Forza di Coulomb:  $F = 1 / 4\pi\epsilon_0 Ze^2 / r^2$

Forza Centripeta:  $F = m v^2 / r$

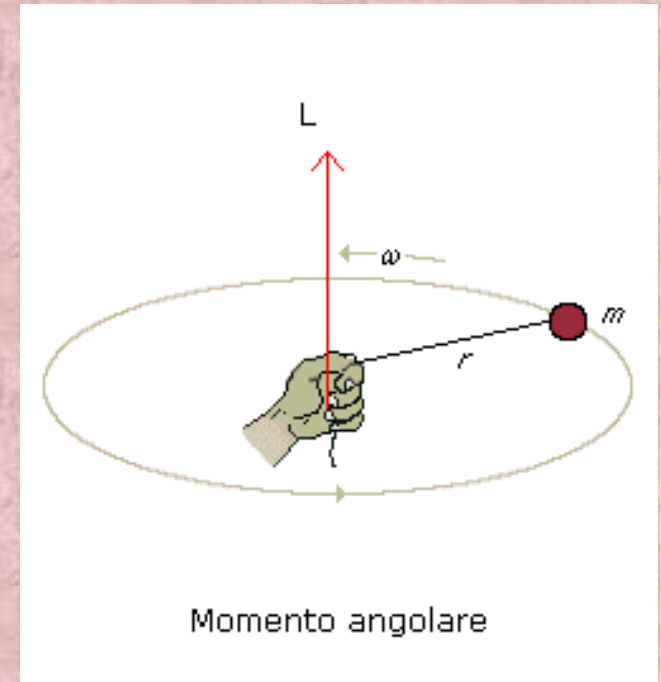
Momento Angolare:  $L = mvr$

$$1 / 4\pi\epsilon_0 Ze^2 / r^2 = m v^2 / r$$

con un po' di algebra...

$$mvr = n h / 2\pi$$

$$r = 4\pi\epsilon_0 n^2 (h / 2\pi) / (mZe^2)$$

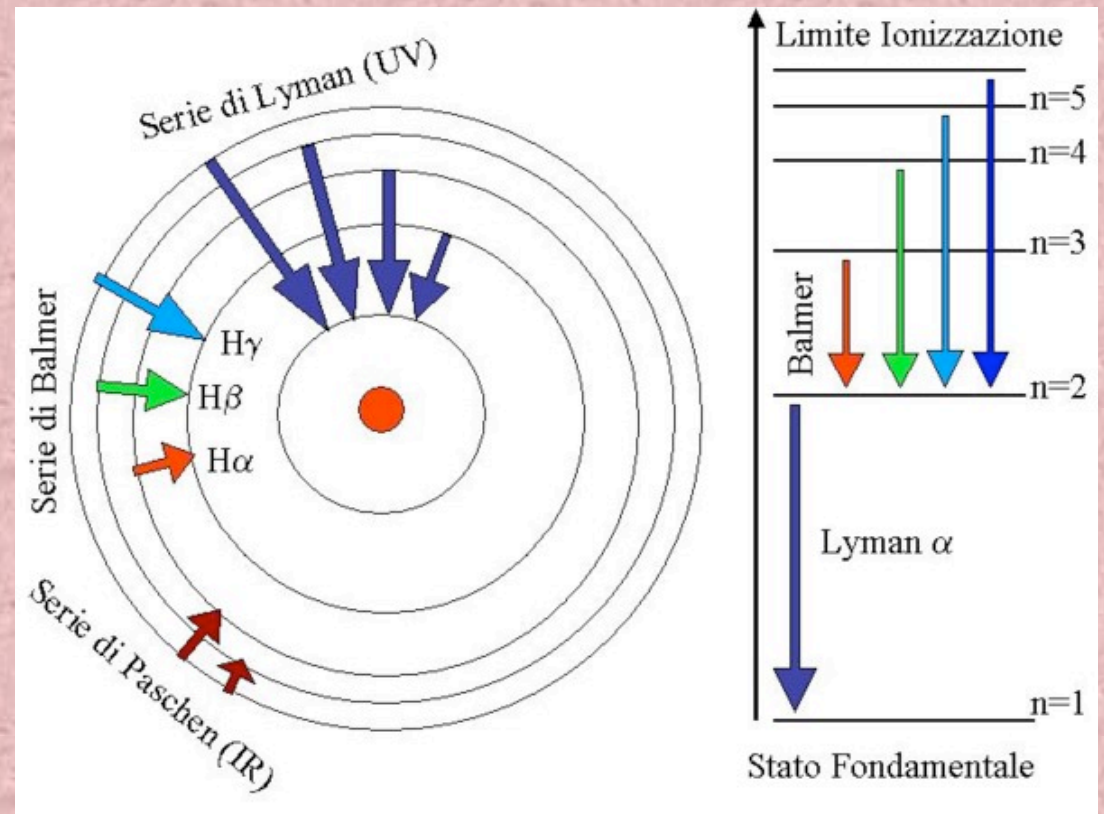


# Livelli energetici

Sempre con un po' di algebra...

Energia orbitale:  $E = \{-mZ^2e^4 / [(4\pi\epsilon_0)^2 2(h/2\pi)^2]\} 1/n^2$  [n = 1,2,3...]

*In pratica la quantizzazione del momento angolare orbitale degli elettroni porta alla quantizzazione dell'energia totale!*

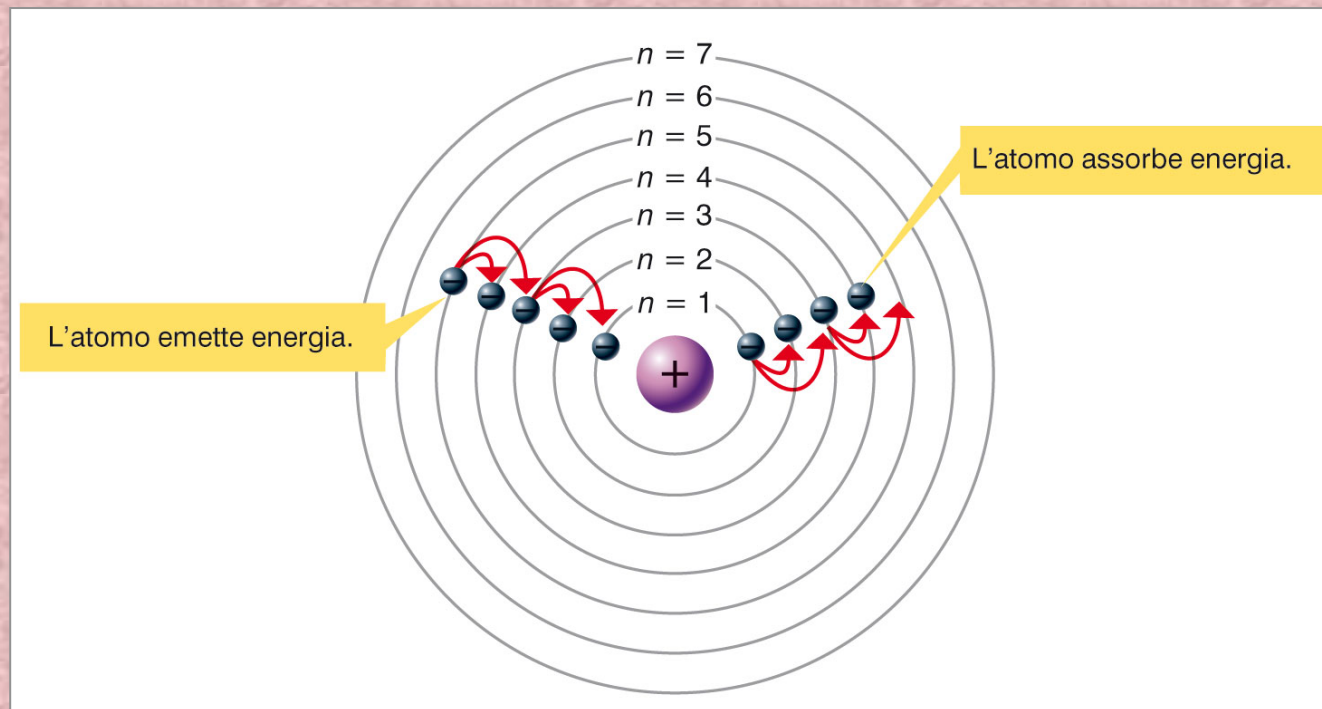
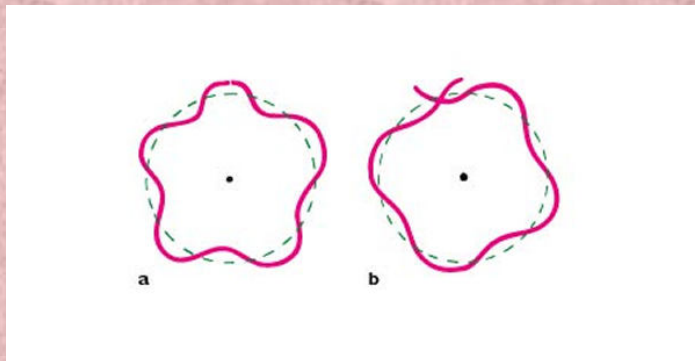




# Emissione o assorbimento di fotoni

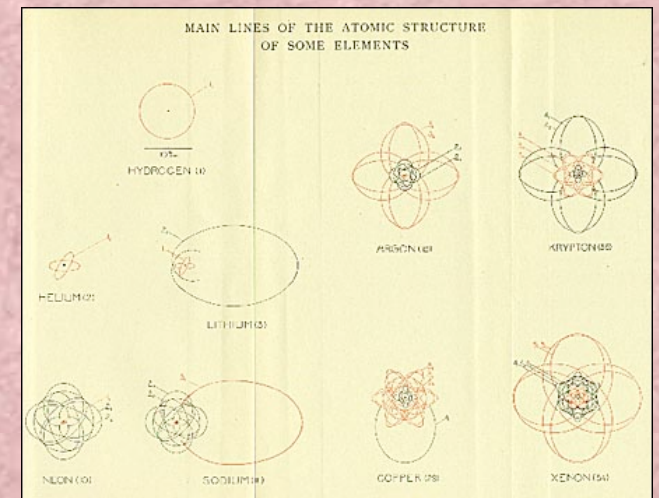
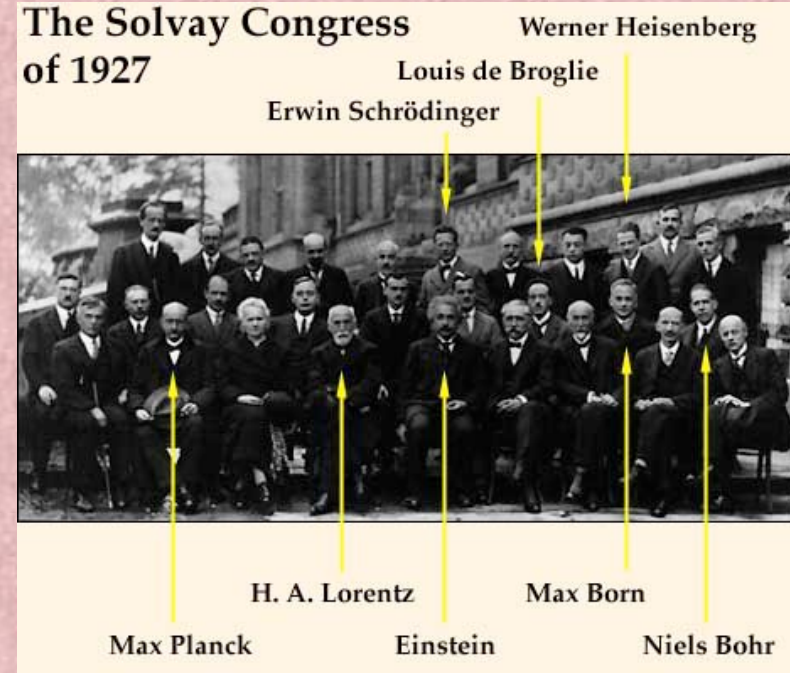
- Conoscendo l'energia associata ad ogni livello, il “salto” di livello corrisponde ad assorbimento od emissione.
- I livelli energetici “permessi” sono quelli per un numero intero di lunghezze d'onda si chiudono nella circonferenza.

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



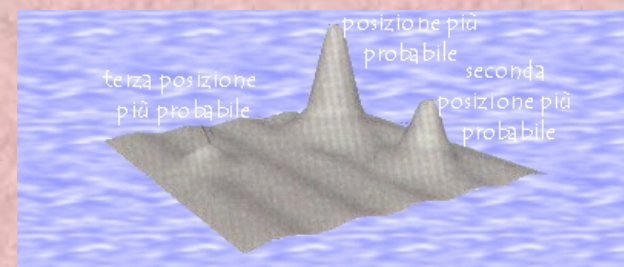
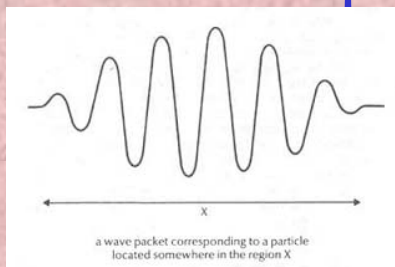
# Meccanica Quantistica?

- Il modello di Bohr, con sviluppo successivi (Sommerfeld, ecc.) ha un grosso pregio: “funziona”.
- Tuttavia ci sono anche una serie di fenomeni che in questo scenario non sono riproducibili (atomi a più elettroni, ecc.)
- E, non ultimo, tutto lo scenario appare un po’ “artificioso”, mancante di coerenza intellettuale.



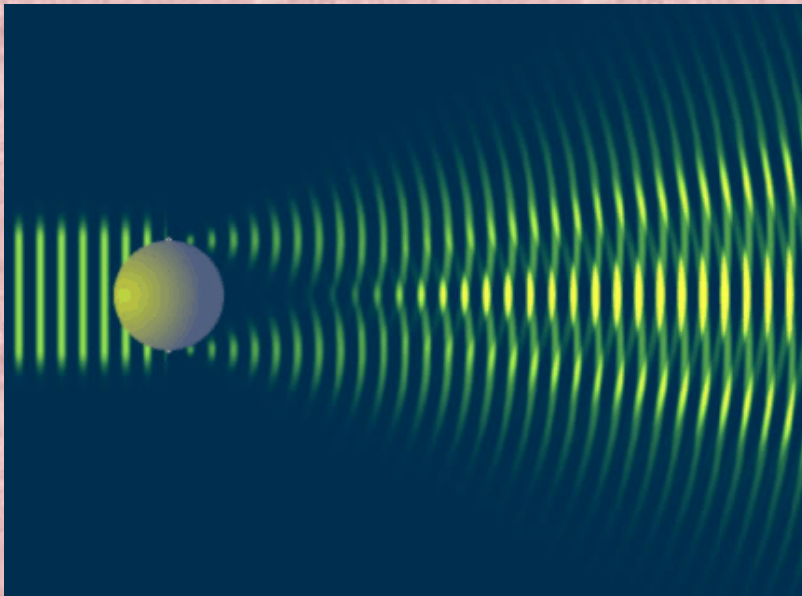
# Verso la “moderna” meccanica quantistica...

- Il concetto di quantizzazione era presente sotto diversi aspetti all’inizio del ‘900. Si pensi ai lavori di Einstein, Planck, de Broglie, ecc.
- Il passo successivo avrà però delle caratteristiche diverse: introdurrà una maniera nuova di affrontare i problemi fisici con un approccio statistico anziché rigidamente deterministico.
- Si arriva così ad un concetto fondamentale della moderna meccanica quantistica: quello di funzione d’onda.



# Dualismo onda-corpuscolo

- Diverse evidenze sperimentali hanno mostrato come sia i fotoni che le particelle subatomiche possono essere descritte a seconda dei fenomeni come “particelle” o come “onde”.
- Pensiamo, per esempio, ai fenomeni di interferenza e diffrazione.



$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$



Louis de Broglie  
15/8/1892 – 19/3/1987

# La funzione d'onda

- L'idea di base è che lo “stato” di un sistema fisico dipenda dalla sua funzione d'onda, una funzione complessa delle coordinate spaziali e temporali.

Discutere di funzioni d'onda è complesso... e dire cose come: *“è la proiezione di uno stato quantistico sulla base degli autostati di un'osservabile la cui dinamica è descritta dall'equazione di Schrödinger”* non è che aiuti molto...

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 \psi}{dx^2} + V(x)\psi = E\psi$$



Erwin Schrödinger  
12/8/1887 – 4/1/1961

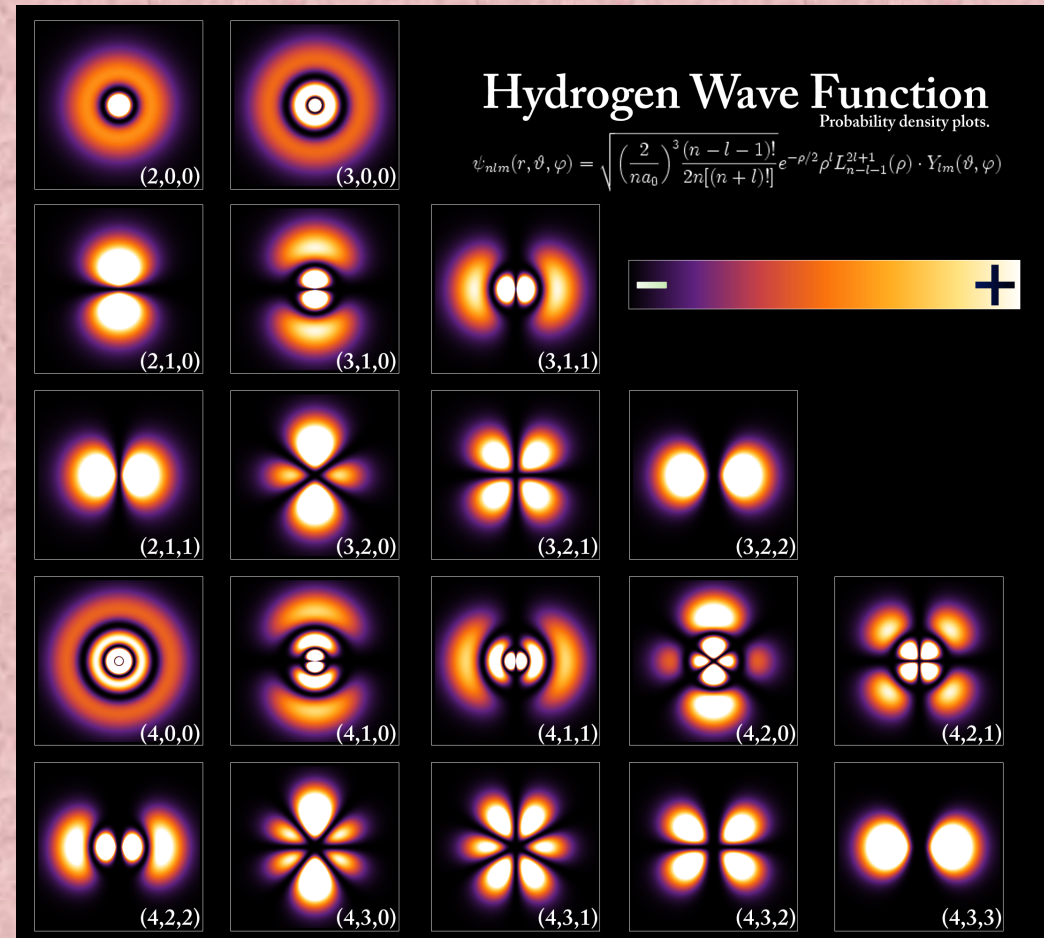
# Proprietà (sunto...) delle funzioni d'onda...

- La funzione d'onda è associata una "densità di probabilità" (interpretazione dovuta in realtà a Born)

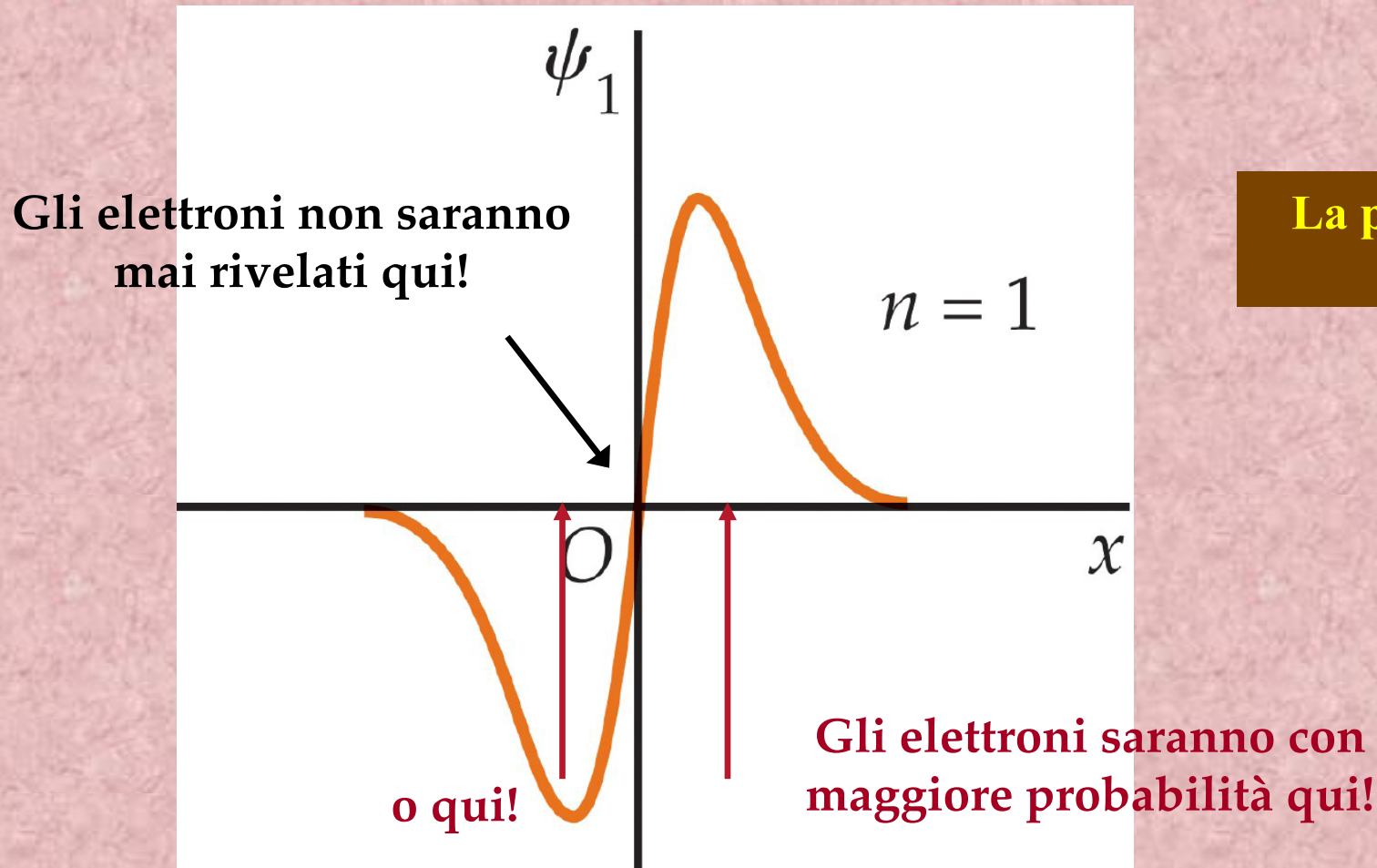
$$\|\psi\| = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(q, t)|^2 dq = 1$$



Max Born  
11/12/1882 – 5/1/1970



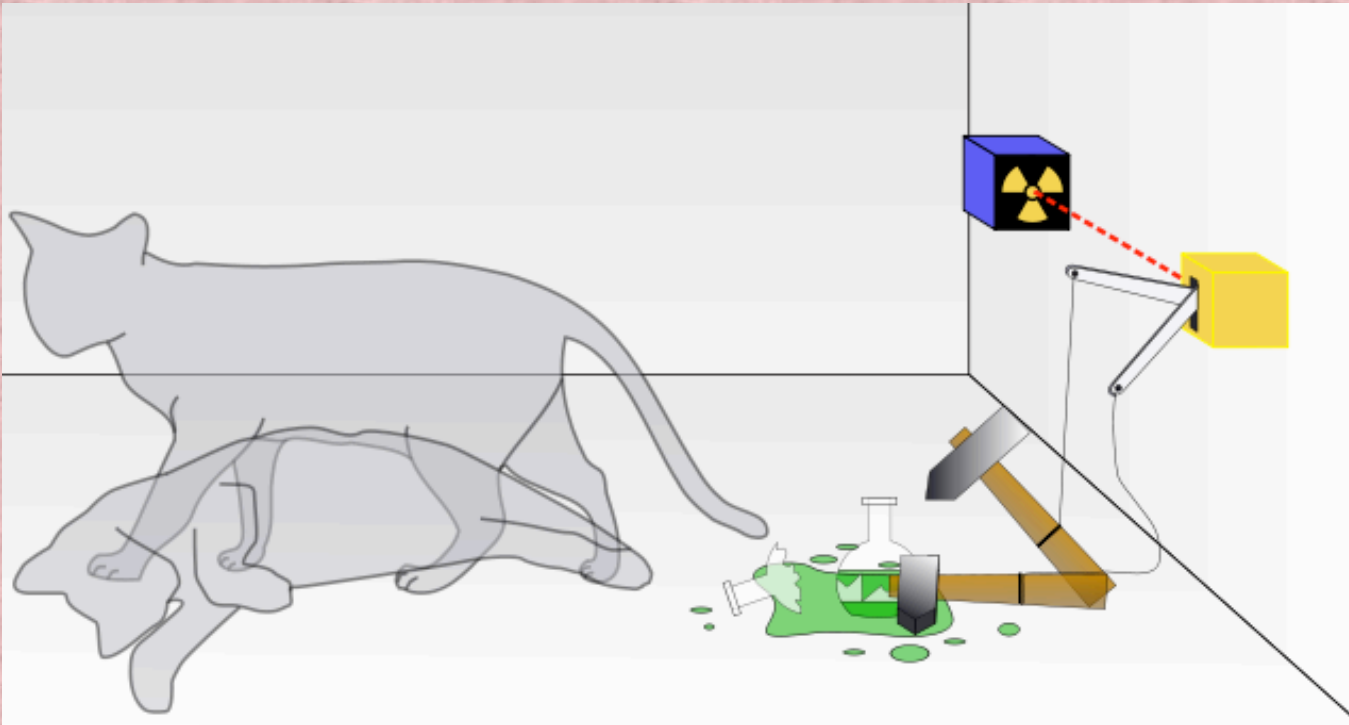
# Vediamo un esempio semplice mono-dimensionale



La probabilità di rivelare un elettrone è  $\propto \psi^2$

# Ma cosa significa tutto quanto?

- La meccanica quantistica funziona, e molto bene.
- Rimane però sempre aperto un dibattito importante: è una buona “rappresentazione della realtà” o è la “realtà”?



Ad esempio il ben noto paradosso del gatto di Schrödinger



## Da Thomson ad Heisenberg



Grazie per l'attenzione!

<http://mitescienza.blogspot.it>