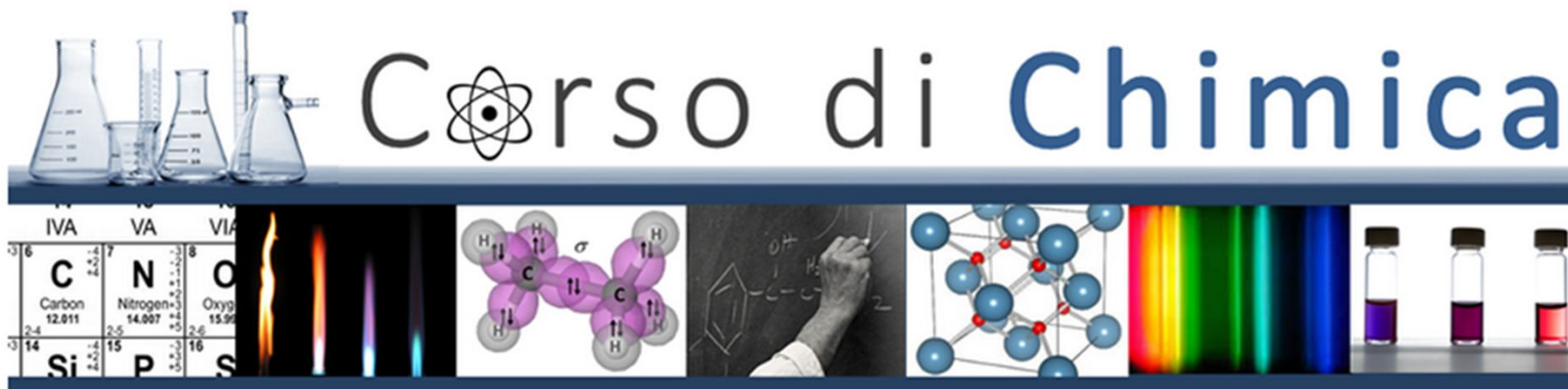




UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

Dipartimento di Ingegneria ed Architettura



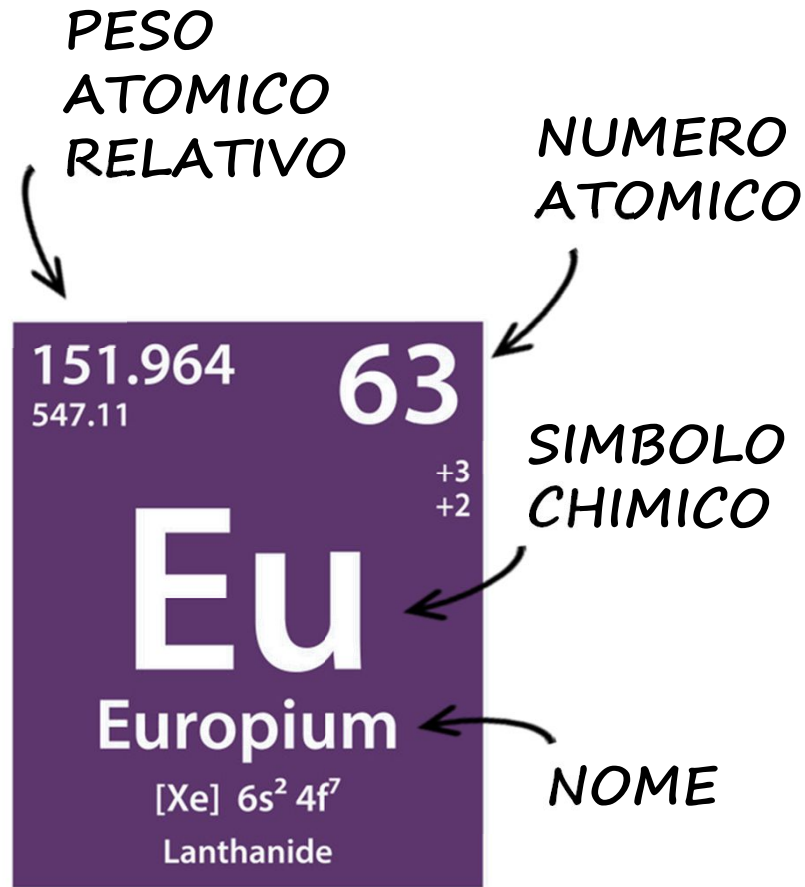
docente

Alois Bonifacio

(abonifacio@units.it)

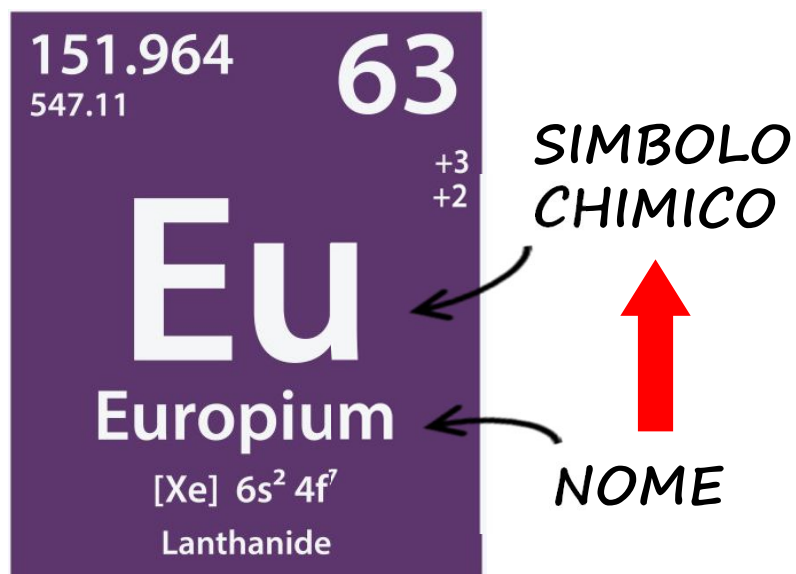
Università di Trieste
2020-21
A. A.

Parte 1: Struttura atomica



informazioni (minime) associate ad un elemento nella tavola periodica

nomi e simboli degli elementi



derivano dai nomi degli elementi:

- prima lettera maiuscola, seconda lettera minuscola;
- se il simbolo esiste già, allora si prende la lettera successiva

es. Calcio – **Ca**
Cadmio – **Cd**

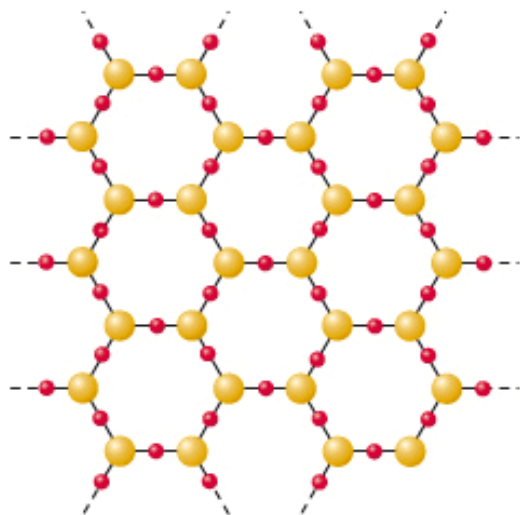
simboli non collegati al nome (italiano):

H (hydrogen), **N** (nitrogenum), **P** (phosphorus),
S (sulfur), **Cu** (cuprum), **Au** (aurum), **K** (kallium),
Na (natrium), **W** (wolfram), **Hg** (hydrargyrum)

*molte
eccezioni*



Cristallo di quarzo



SiO₂ cristallino

● Ossigeno
● Silicio

silicio

ossigeno



formula
chimica

2 atomi
di ossigeno

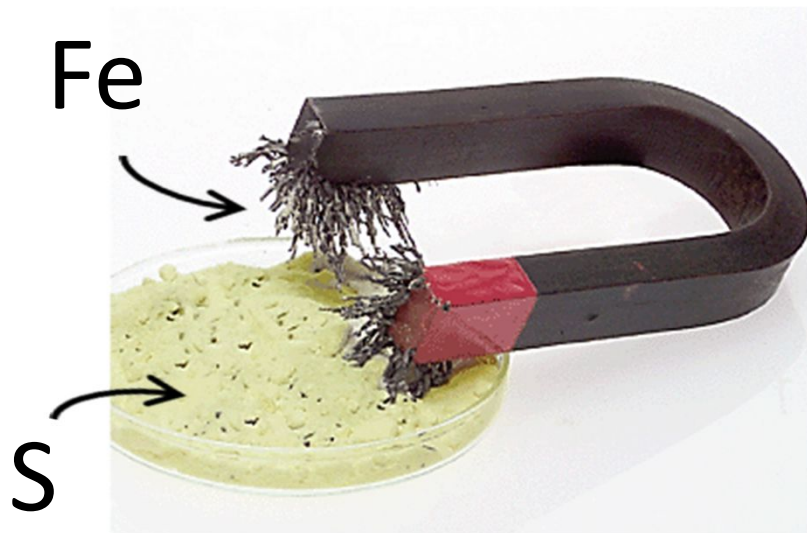
sistema
chimicamente
eterogeneo

ferro (1 parte)
zolfo (2 parti)

sistema
chimicamente
omogeneo

Fe, 2S

FeS_2 formula
chimica



miscela

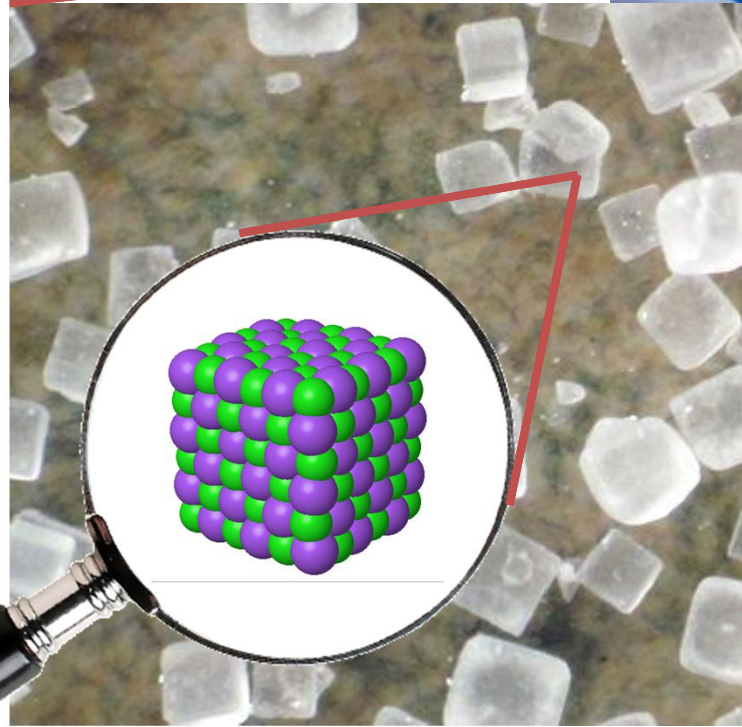


composto

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

A. A.
2020-21
Università di Trieste

Teoria atomica della materia



slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

Univ.
di Trieste
2020-21
A. A.

1789

conservazione
massa
(Lavoisier)

Sia una sostanza metallica qualunque S.M.

Un acido qualunque

L'acqua

Ossigeno

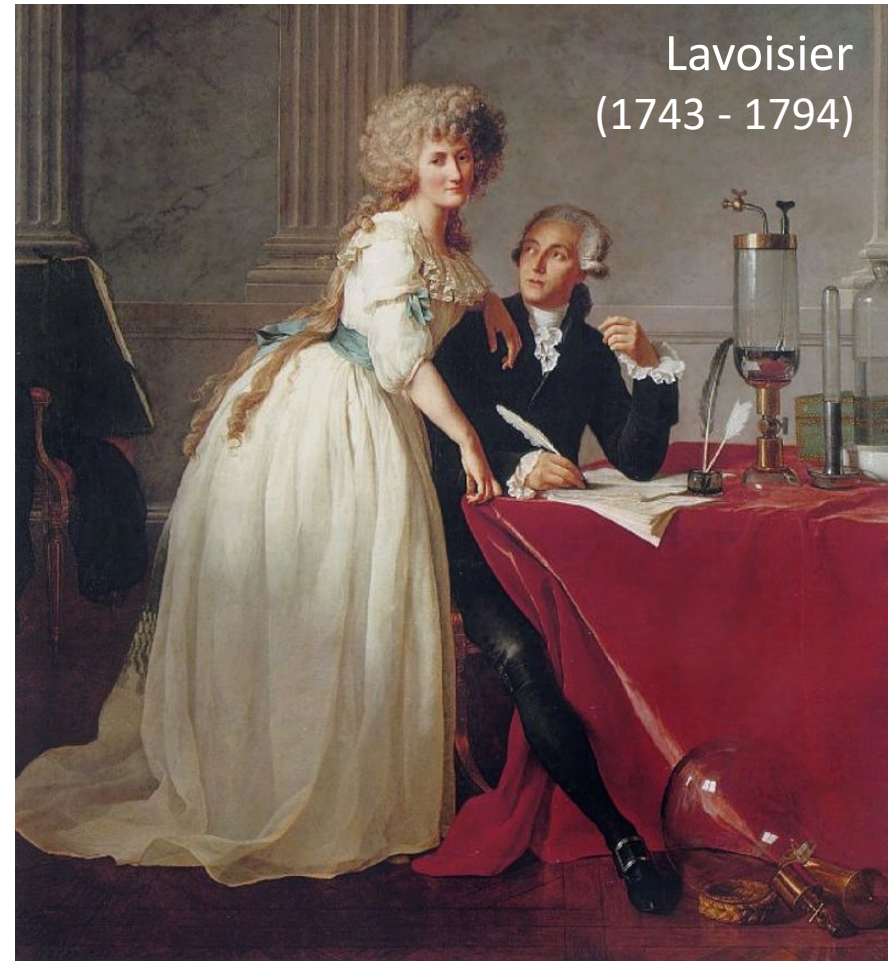
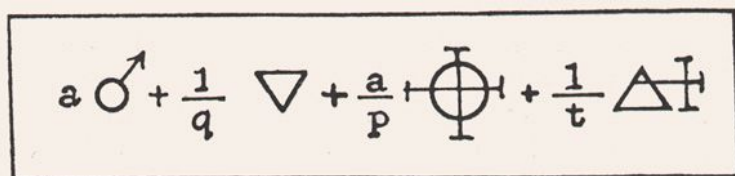
Aria nitrosa

Acido nitroso

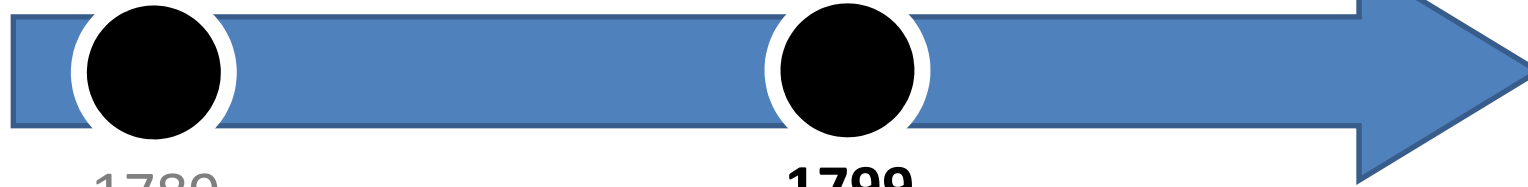


$$(a \text{♁}) + (2 \nabla + \frac{1}{q} \nabla) + (\frac{1}{s} \text{⊕} + \frac{1}{t} \text{Δ}) =$$

$$(a \text{♁} + \frac{a}{p} \text{⊕}) + (2 \nabla + \frac{1}{q} \nabla) + (\frac{1}{s} \text{⊕} - \frac{a}{p} \text{⊕} + \frac{1}{t} \text{Δ} - \frac{a}{p} \text{Δ})$$



Lavoisier
(1743 - 1794)



1789

conservazione
massa
(Lavoisier)

1799

proporzioni
definite
(Proust)

TEORIA
ATOMICA



Joseph Proust
(1754 – 1826)

“in un dato composto chimico i **rapporti di massa** degli elementi di cui esso è costituito sono **costanti** indipendentemente dall’origine del composto o dal modo di preparazione”





1789

conservazione
massa
(Lavoisier)



1799

proporzioni
definite
(Proust)

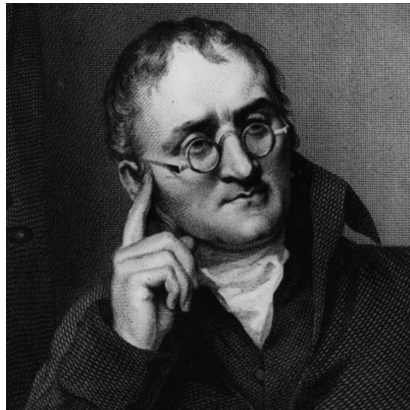


1803

proporzioni
multiple
(Dalton)

TEORIA
ATOMICA

slides
delle lezioni
A. BOMMARITO



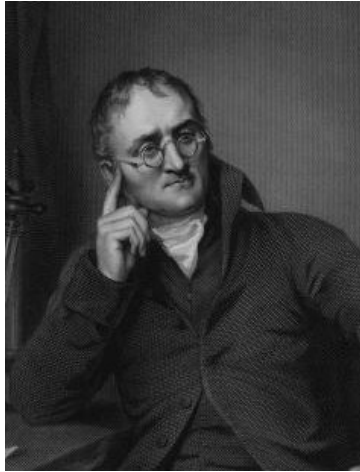
John Dalton
(1766 – 1844)

“quando due elementi formano più di un composto tra loro, le **masse** di uno degli elementi che si combinano con una massa uguale dell’altro elemento sono fra loro **in rapporti dati da numeri interi e piccoli**”

	carbonio	ossigeno
<i>composto 1</i>	12 g	16 g
<i>composto 2</i>	12 g	32 g

= 2 x 16

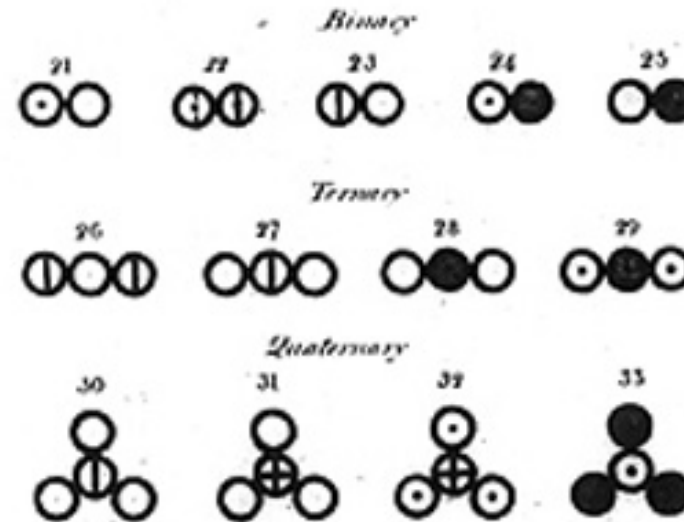
Università di Trieste
2020-21
A. A.



teoria atomica di Dalton (1808)

- Ogni sostanza è costituita da atomi
- Gli atomi sono indistruttibili ed invisibili
- Gli atomi di ogni elemento sono identici
- Gli atomi di elementi diversi hanno masse diverse
- Le reazioni chimiche comportano riarrangiamenti dei legami tra atomi

ELEMENTS				
	Hydrogen	1	Strontian	46
	Azote	5	Barytes	68
	Carbon	5	Iron	50
	Oxygen	7	Zinc	56
	Phosphorus	9	Copper	56
	Sulphur	13	Lead	90
	Magnesia	20	Silver	190
	Lime	24	Gold	190
	Soda	28	Platina	190
	Potash	42	Mercury	167



A New System of Chemical Philosophy (1808).

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

come definisco un atomo?

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

ATOMO
la più piccola parte di un
elemento che ne mantiene
le proprietà chimiche



ELEMENTO
materia costituita da un
solo tipo di **atomi**

MATERIA
qualsiasi cosa che ha
massa ed occupa spazio

A. A.
2020-21
Università di Trieste

atomi e molecole



Amedeo Avogadro
(1776 - 1856)

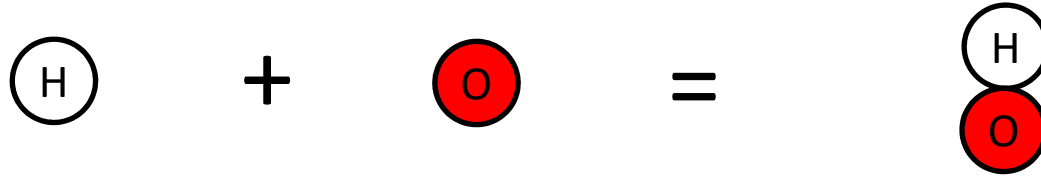
1811

“Volumi uguali di gas diversi, misurati nelle stesse condizioni di temperatura e pressione, contengono lo stesso numero di **particelle**”

*particelle costituite da 2
atomi uguali legati tra loro
(molecole)*

Dalton

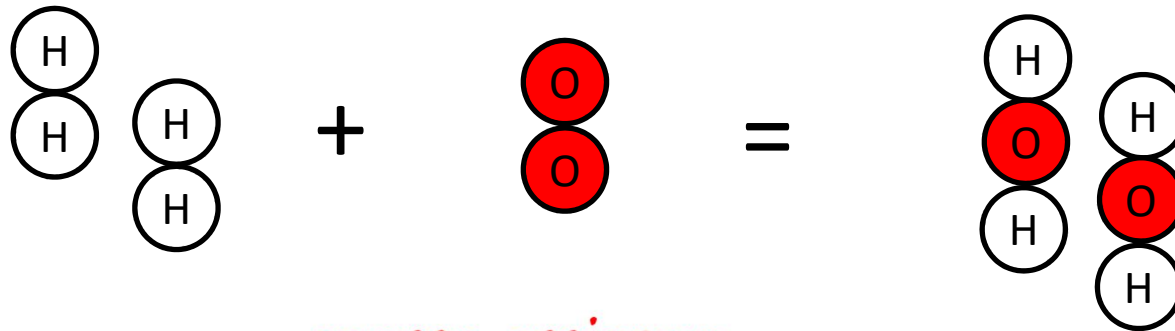
1 g idrogeno + 8 g ossigeno = 9 g vapore acqueo



$$\frac{\text{massa ossigeno}}{\text{massa idrogeno}} = 8$$

Avogadro

2 L idrogeno + 1 L ossigeno = 2 L vapore acqueo

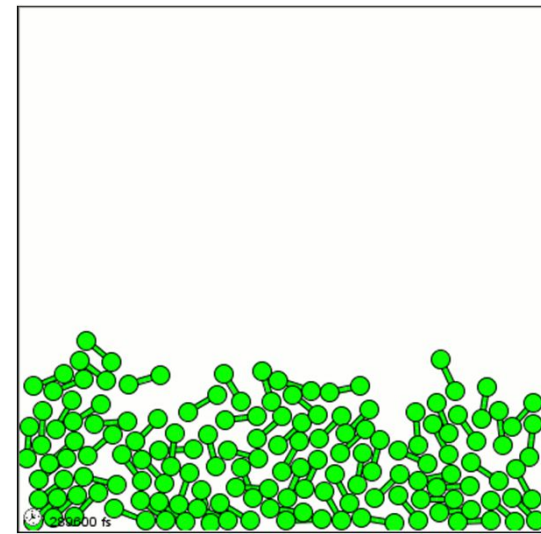
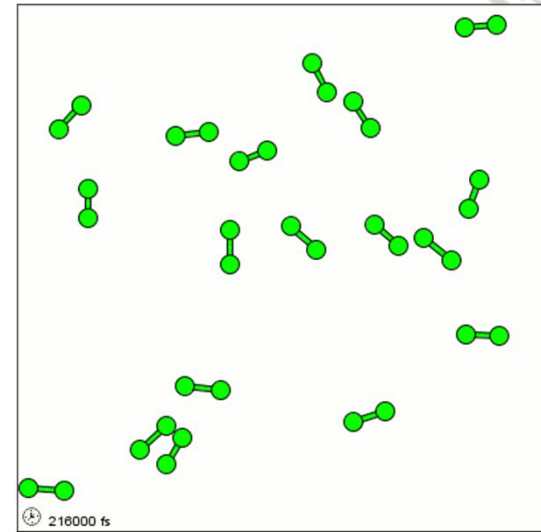


$$\frac{\text{massa ossigeno}}{\text{massa idrogeno}} = 16$$

in quale forma si trovano gli elementi?

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

H_2 N_2 O_2 F_2
*elementi in forma
molecolare,
molecole bi- o tri-
atomiche* Cl_2
 Br_2
 I_2



									13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIII A	
1 IA	Elementi di transizione blocco -d								5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
4 VB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	9 VIII B			10	11 IB	12 IIB	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub							

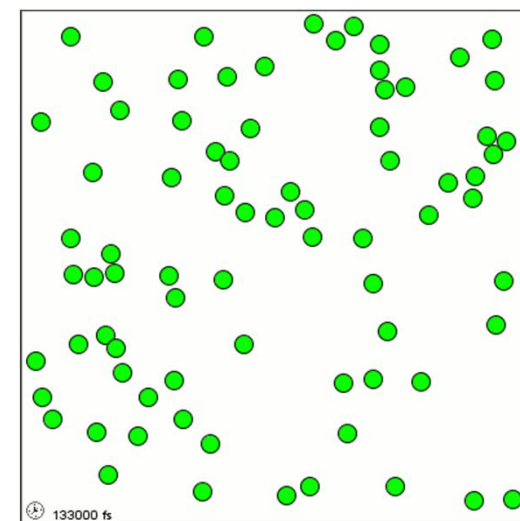
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

in quale **forma** si trovano gli elementi?

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

gas nobili
forma
monoatomica

Elementi di transizione blocco -d									13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIII A	
4 VB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	9 VIII B			10	11 IB	12 IIB	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub							



58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

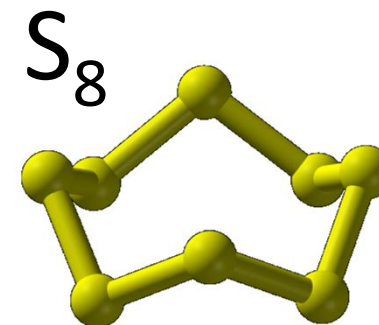
in quale **forma** si trovano gli elementi?

*allotropi
forme allotropiche*

più forme possibili

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

O_2 / O_3 18 VIII A



Elementi di transizione blocco -d									13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIII A	
4 VB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	9 VIII B			10	11 IB	12 IIB	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

opposizione all'ipotesi atomica

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



“Non credo che gli atomi esistano”
(Ernst Mach nel 1897)

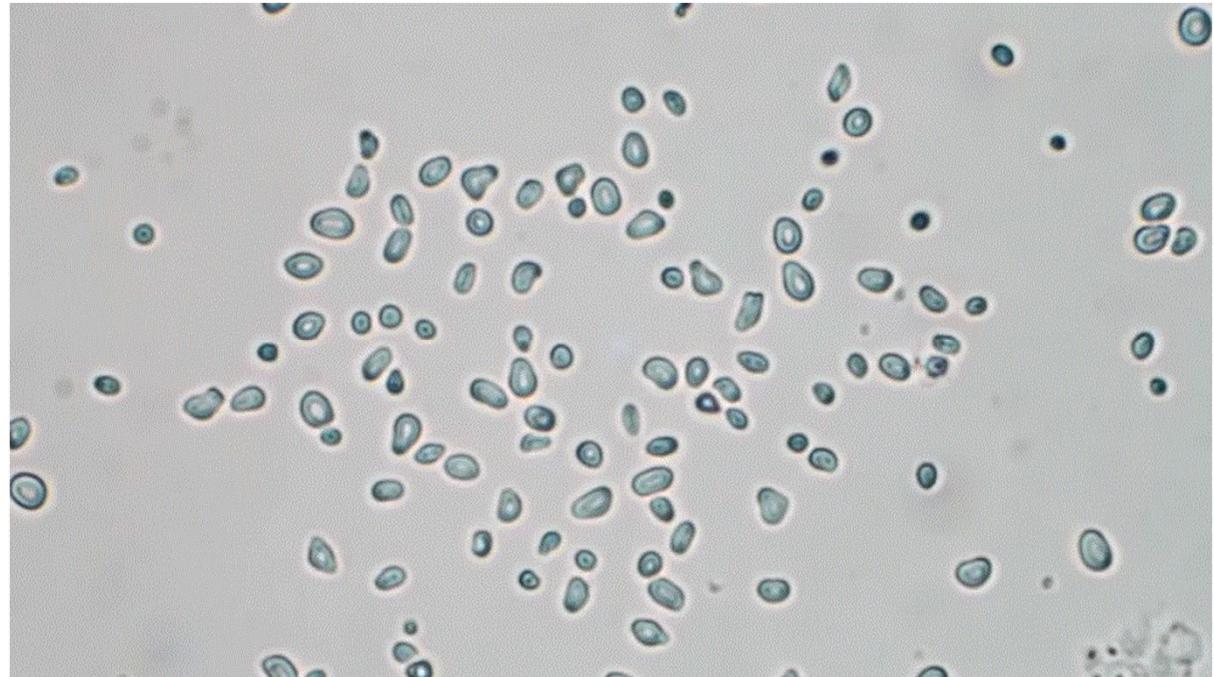
A. A.
2020-21
Università di Trieste

il moto Browniano

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



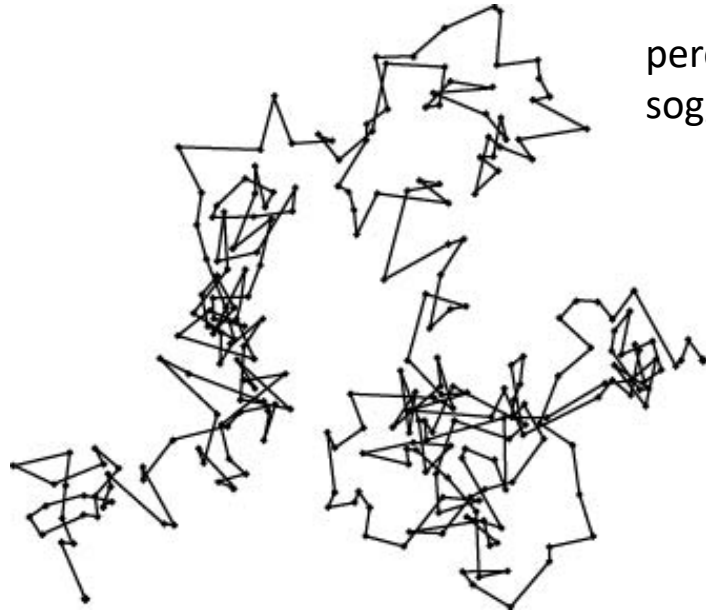
Robert Brown
(1773 – 1858)
Botanico



grani di polline in acqua osservati al microscopio
(<https://www.youtube.com/watch?v=jLQ66ytMa9I>)

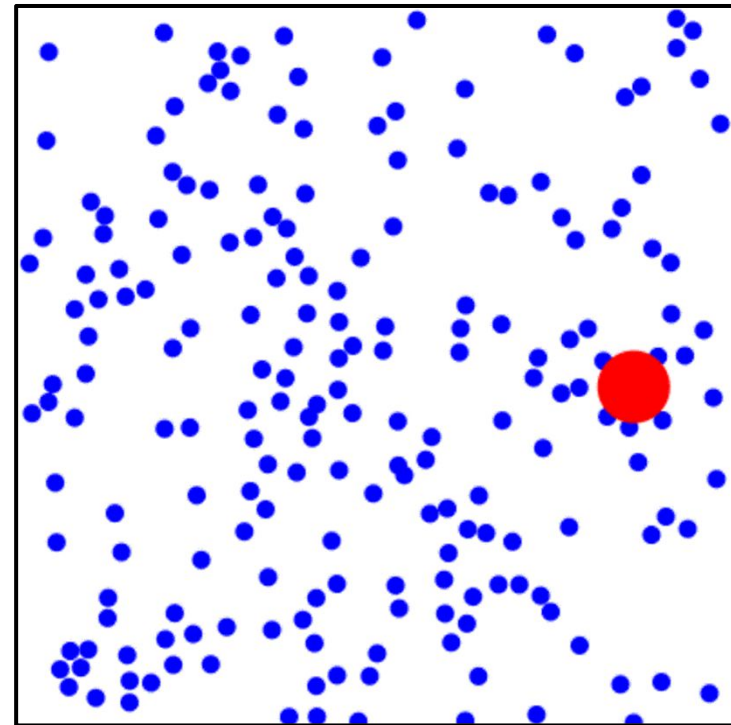
Università di Trieste
2020-21
A. A.

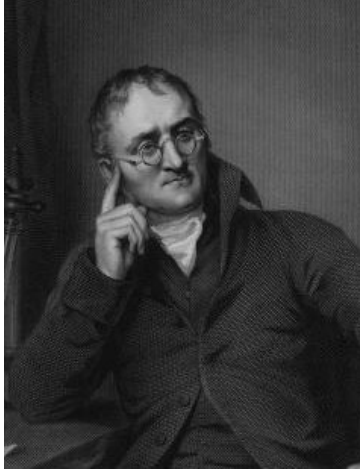
il moto Browniano



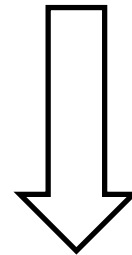
percorso di un granello di polline al microscopio
soggetto a moto Browniano (*Random Walk*)

1905 – spiegazione
teorica del moto
Browniano in termini
di moti atomici





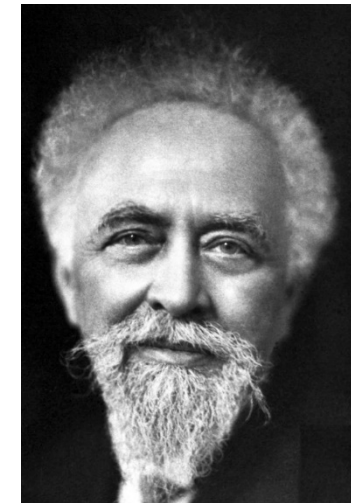
1808 – Dalton pubblica la
teoria atomica



100 anni!

1908 – conferma sperimentale
della teoria di Einstein sul moto
Browniano

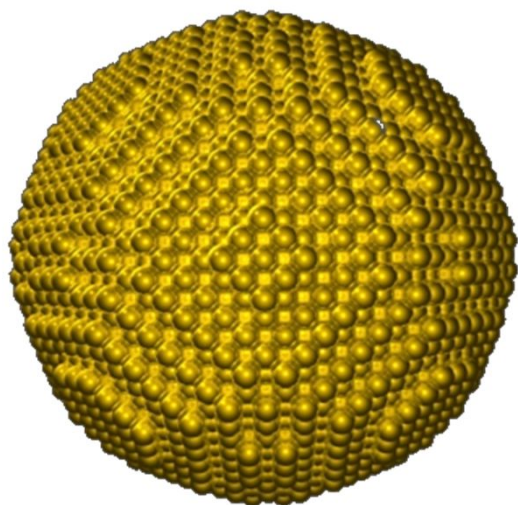
*prima prova indiretta
esistenza degli atomi!*



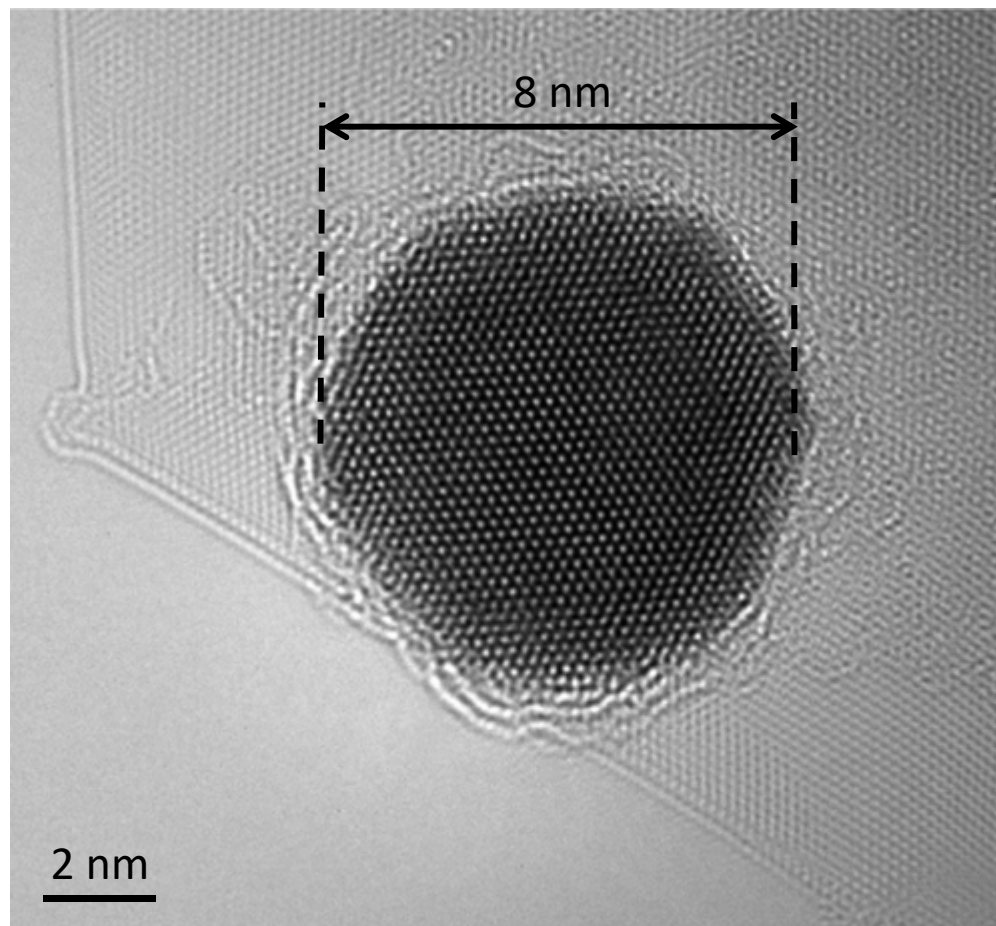
Jean Baptiste Perrin
(1870 – 1942)
Nobel per la Fisica 1926

microscopia elettronica a trasmissione

slides
delle lezioni
A. B. IFFACIO



(da 2000 a 20000 volte più piccola del diametro di un capello)

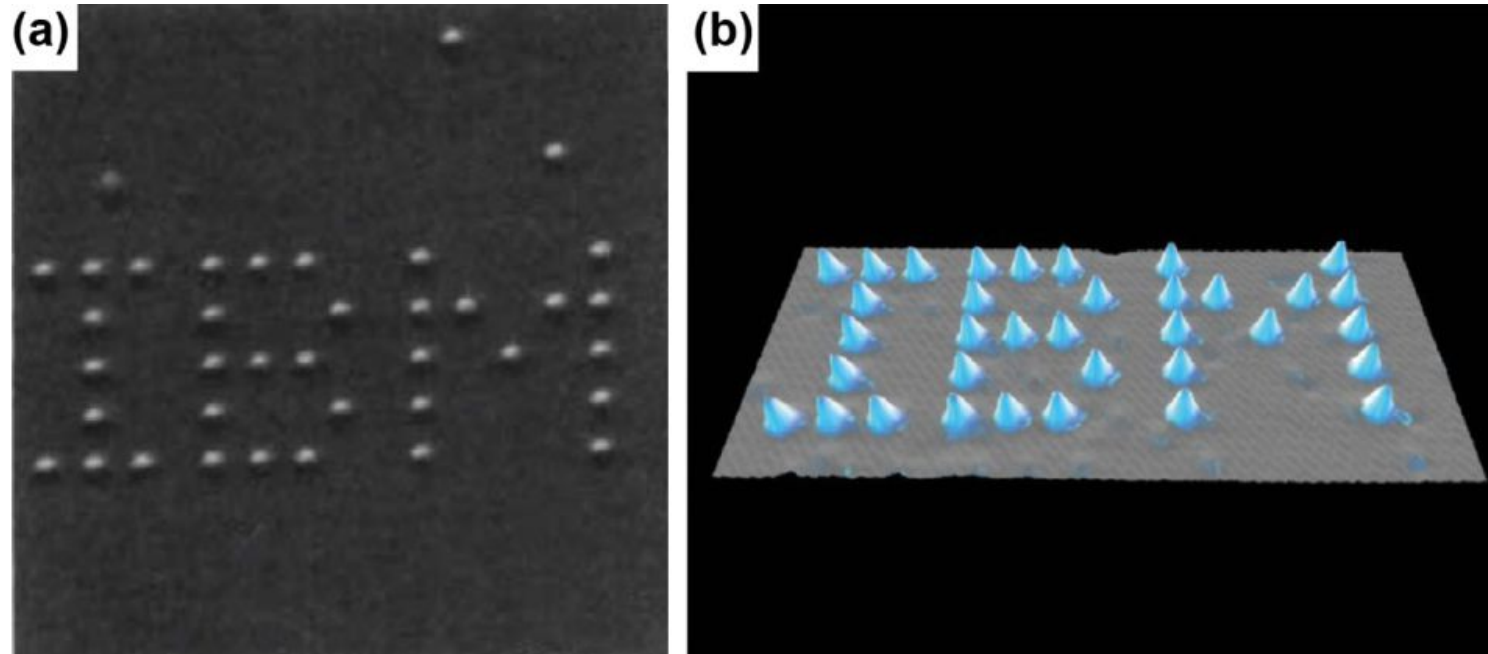


nanoparticella d'oro su strato di grafene

(Lee et al. Nanoletters 2009, 9, 3365-3369)

A. A. IFFACIO
2020-21
Università di Trieste

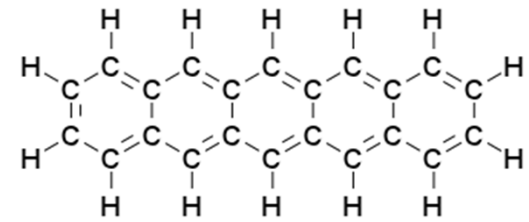
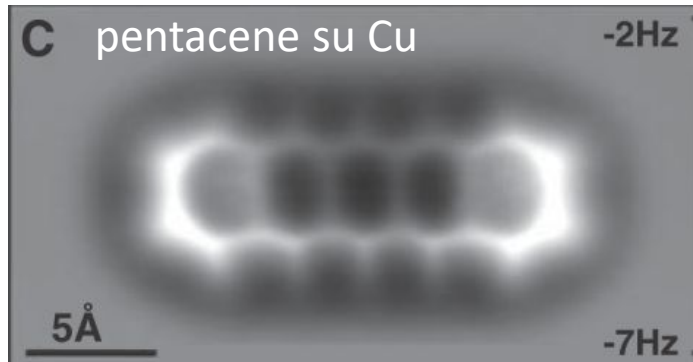
microscopia a effetto tunnel



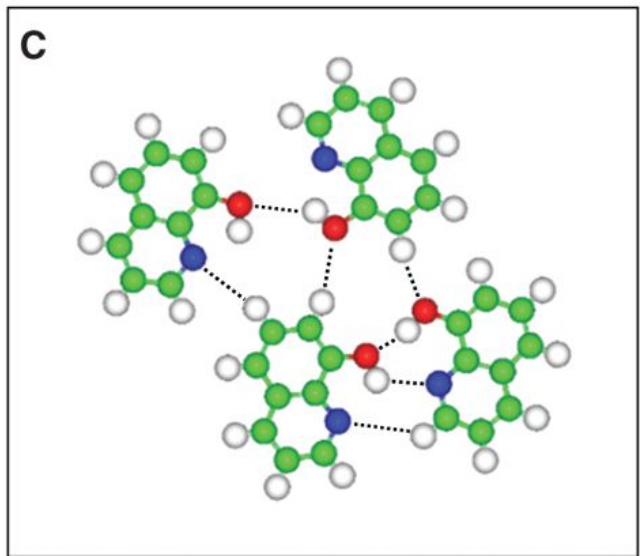
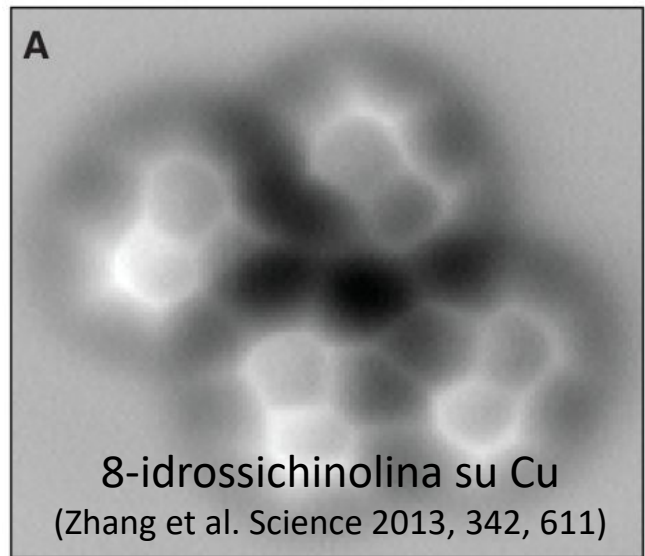
atomi di Xe su superficie Ni
Eigler et al. Nature 1990, 344, 524

microscopia a forza atomica

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



(Gross et al. Science 2009, 325, 1110)

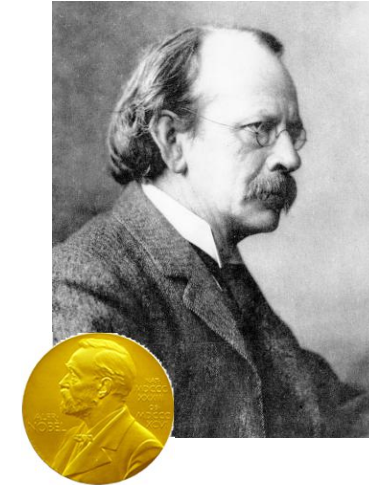
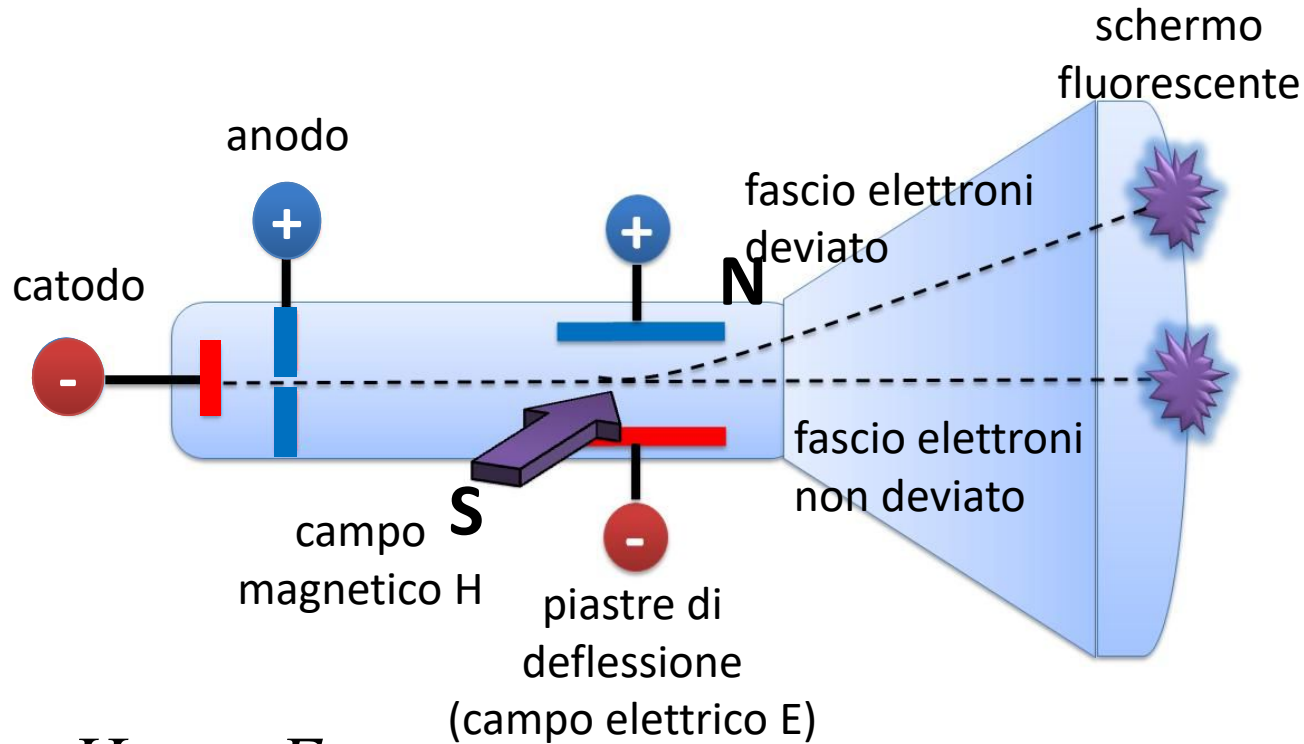


A. A.
2020-21
Università di Trieste

esperimento di Thomson

(scoperta dell'elettrone)

1894
slides
delle lezioni
BENEFICIO



Fisica
1906

*l'atomo non
è "indivisibile"!*

$$Hev = Ee$$

rapporto
carica / massa

$$\frac{e}{m_e} = 1.77882 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$$

A.A. 2020-21
Università di Trieste

notazione scientifica (esponenziale)



$$m \cdot 10^n$$

$$177\ 882\ 000\ 000 \longrightarrow 1,77\ 882 \cdot 10^{11}$$

*1) si risparmia
un po' di spazio*

602 214 076 000 000 000 000 000

(costante di Avogadro)



$$6,02214076 \cdot 10^{23}$$



notazione scientifica (esponenziale)

$$m \cdot 10^n$$

2) si facilitano
i calcoli

proprietà
delle
potenze

$$10^x \cdot 10^y = 10^{x+y}$$

$$10^4 \cdot 10^2 = 10^6$$

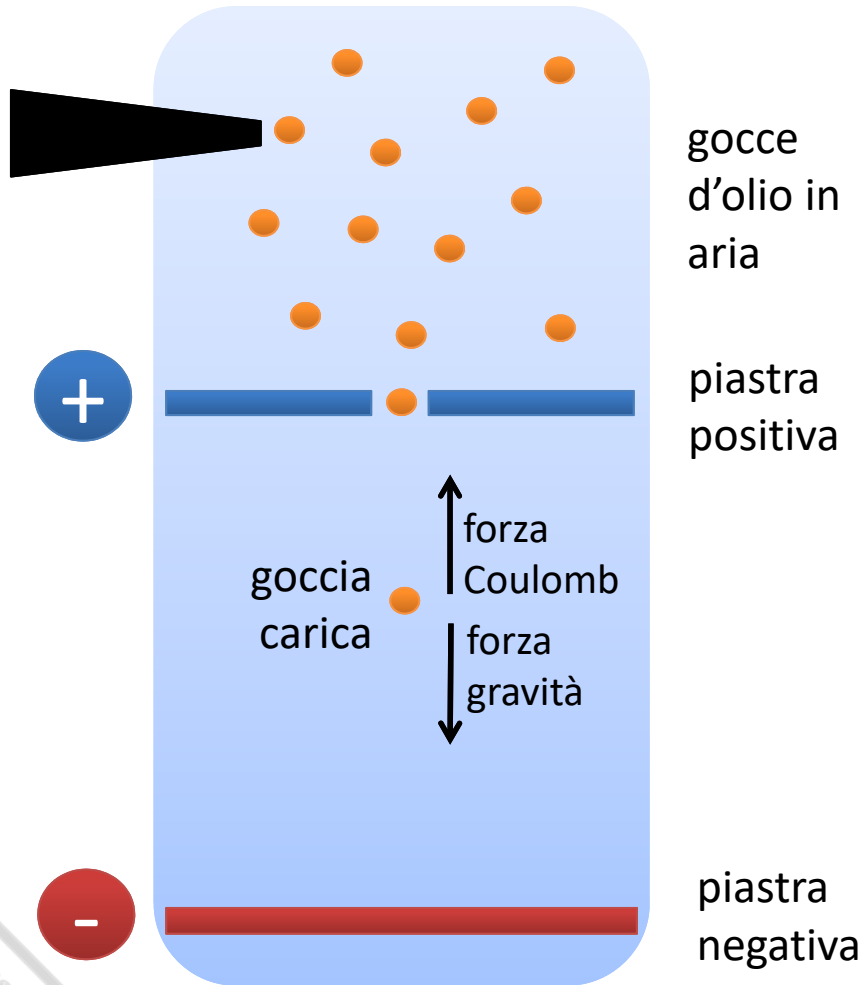
$$\frac{10^x}{10^y} = 10^x \cdot 10^{-y} = 10^{x-y}$$

$$\frac{10^6}{10^4} = 10^6 \cdot 10^{-4} = 10^2$$

esperimento di Millikan

(determinazione carica e massa dell'elettrone)

1906
delle lezioni
ANIFACIO



Fisica
1923

$$e = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\rightarrow m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

A.A.
2020-21
Università di Trieste

esperimento di Millikan

(determinazione carica e massa dell'elettrone)



Goccia	Carica ($\times 10^{-19}$ C)
#1	4.8
#2	8
#3	3.2
#4	6.4
...	



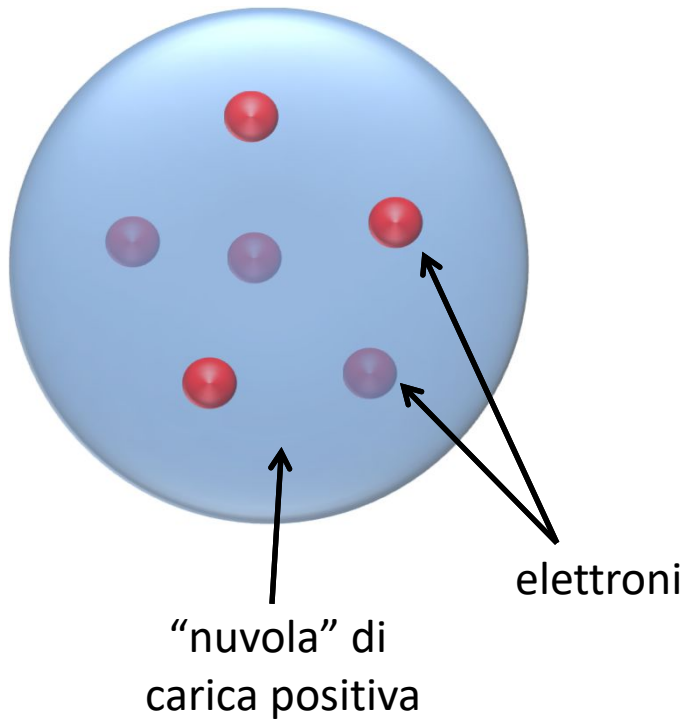
Fisica
1923

differenza di carica sempre
multiplo di $1.60 \cdot 10^{-19}$ C

$$e = 1.60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad \rightarrow \quad m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

modello atomico di Thomson

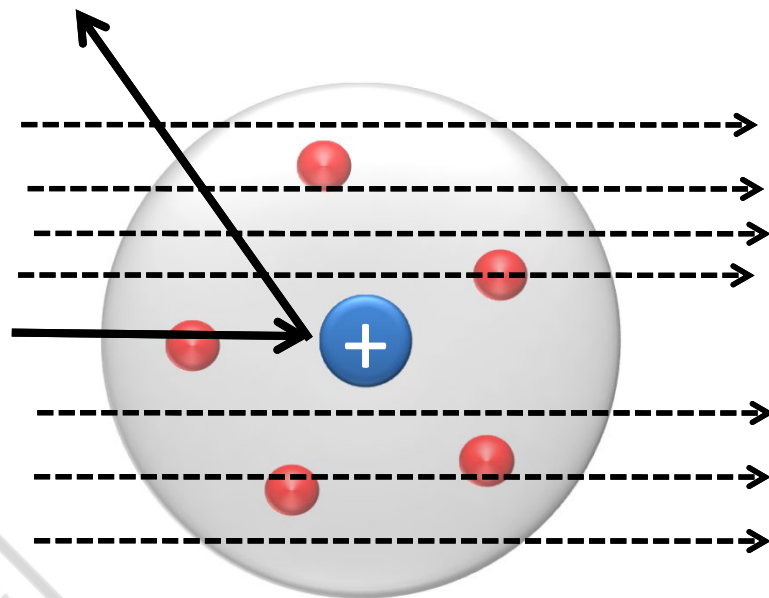
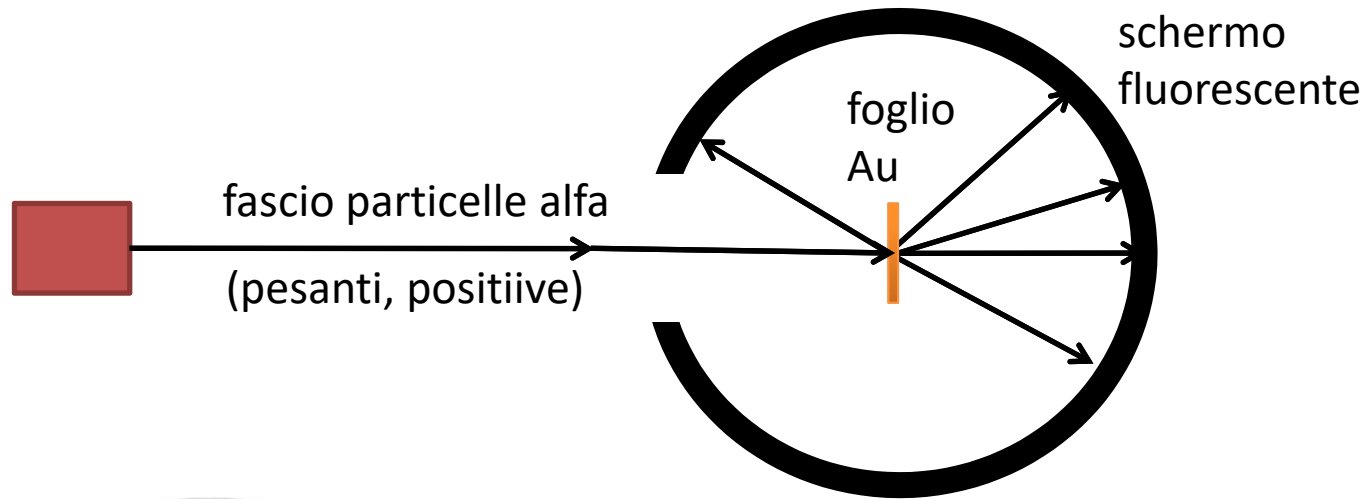
1904
slides
delle lezioni
ANIFACIO



“plum pudding model”

modello atomico di Rutherford

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



dimensioni
(secondo Rutherford)

nucleo: $10^{-14} - 10^{-15}$ m

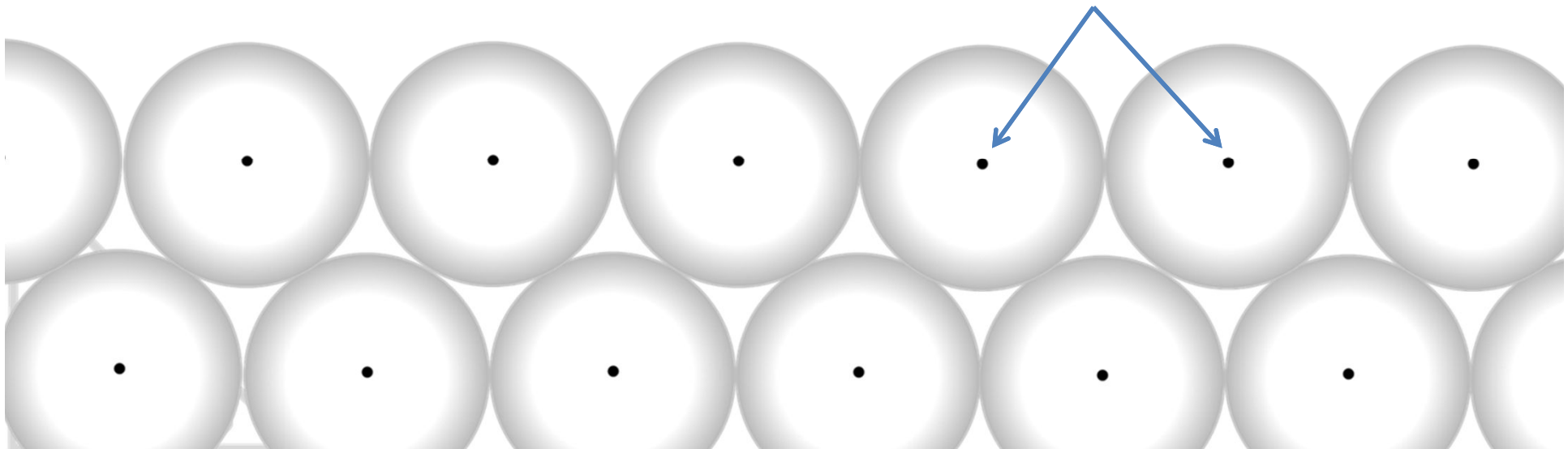
atomo: 10^{-10} m

A.A.
2020-21
Università di Trieste



la materia è un sistema vuoto

tutta la massa è
concentrata nei nuclei



Il nucleo atomico

Particella	Massa		Carica	Simbolo
	Grammi	Unità di massa atomica		
Elettrone	9.109383×10^{-28}	0.0005485799	1^-	${}_{-1}^0\text{e}$ o e^-
Protone	1.672622×10^{-24}	1.007276	1^+	${}_{1}^1\text{p}$ o p^+
Neutrone	1.674927×10^{-24}	1.008665	0	${}_{0}^1\text{n}$ o n

unità di massa atomica
(u o Da)

dodicesima parte della massa di un
atomo di carbonio 12

*A: numero di
protoni + neutroni*

Numero
di massa

A
 Z **E** Simbolo
dell'elemento

Numero
atomico

*Z: numero di
protoni*

(nuclide) ${}_{6}^{12}\text{C}$

$$1 \text{ u} = 1 \text{ Da} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

densità del nucleo

$$R = R_0 A^{1/3}$$

raggio \rightarrow costante $\sim 10^{-15}$ m \rightarrow numero di nucleoni \rightarrow

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 A$$

volume \rightarrow

$$\rho = \frac{m_A}{\frac{4}{3} \pi R_0^3 A} = \frac{A m_N}{\frac{4}{3} \pi R_0^3 A}$$

massa nucleo \rightarrow densità \rightarrow massa nucleone \rightarrow

densità del nucleo

$$\rho = \frac{Am_N}{\frac{4}{3}\pi R_0^3 A} \sim 10^{15} \text{ g/cm}^3$$

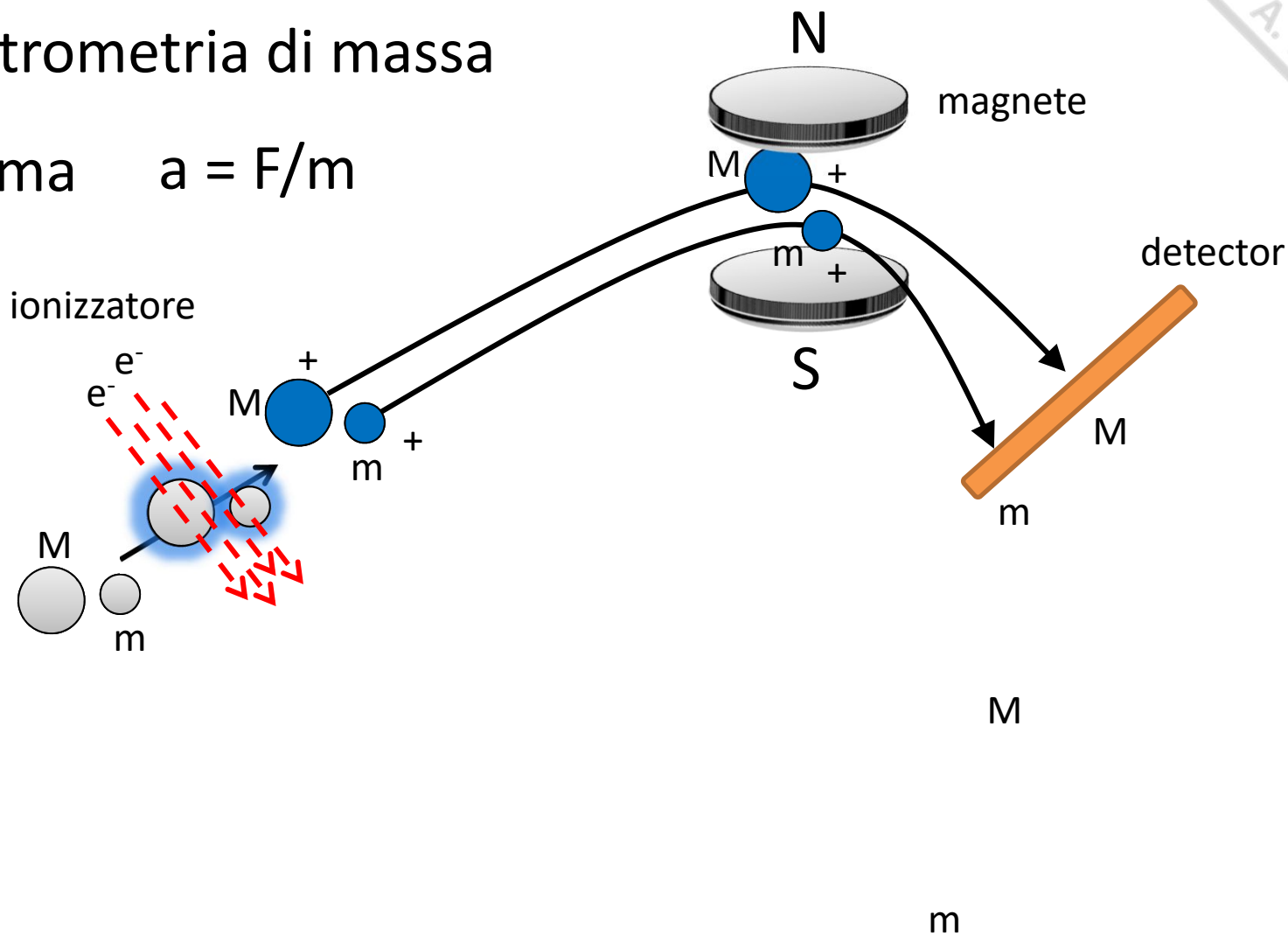
10^{-24} g

$(10^{-15})^3 \text{ m}^3$
 $= 10^{-45} \text{ m}^3$
 $= 10^{-39} \text{ cm}^3$

1.000.000.000 tonnellate / cm^3

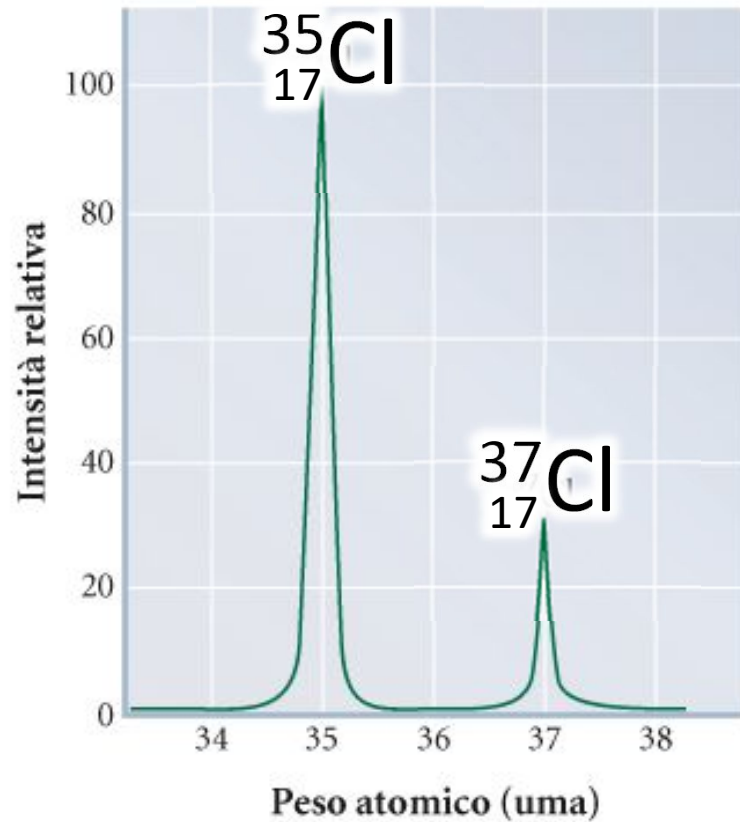
spettrometria di massa

$$F = ma \quad a = F/m$$



slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

A. A.
2020-21
Università di Trieste



isotopo
stesso Z, diverso A
(*stesso n° protoni*
diverso n° neutroni)

ELEMENTO

definizione 1

1) materia costituita da un solo tipo di atomi

definizione 2

2) materia costituita da atomi aventi
lo stesso **numero atomico Z**

*numero di protoni
nel nucleo*

... e perché non di elettroni?

ELEMENTO

definizione 1

1) materia costituita da un solo tipo di atomi

definizione 2

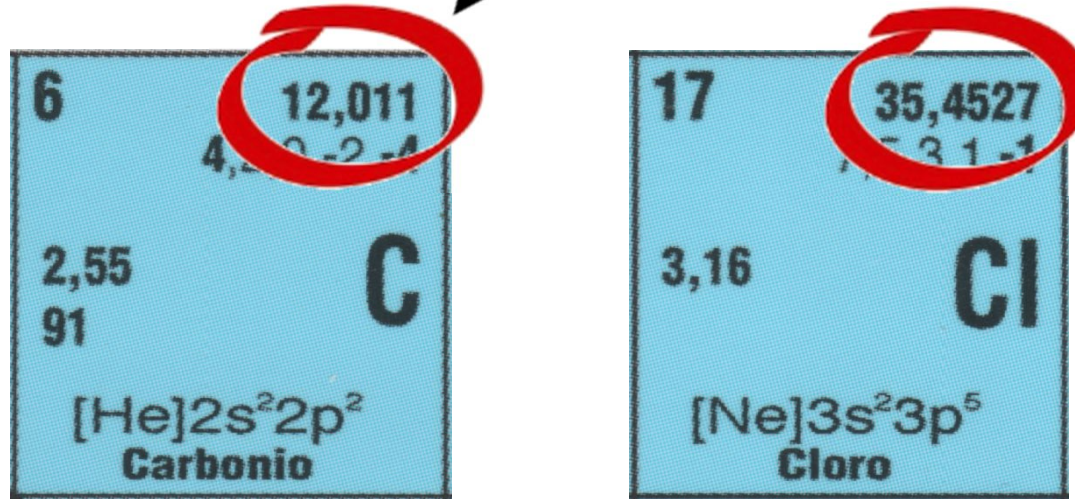
2) materia costituita da atomi aventi
lo stesso **numero atomico Z**

*numero di protoni
nel nucleo*

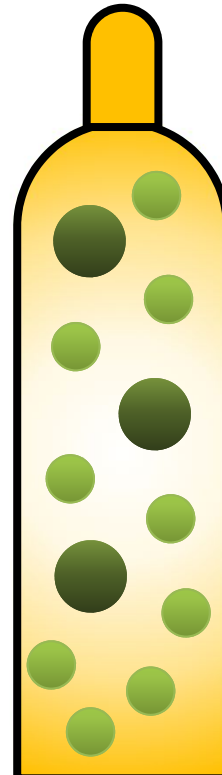
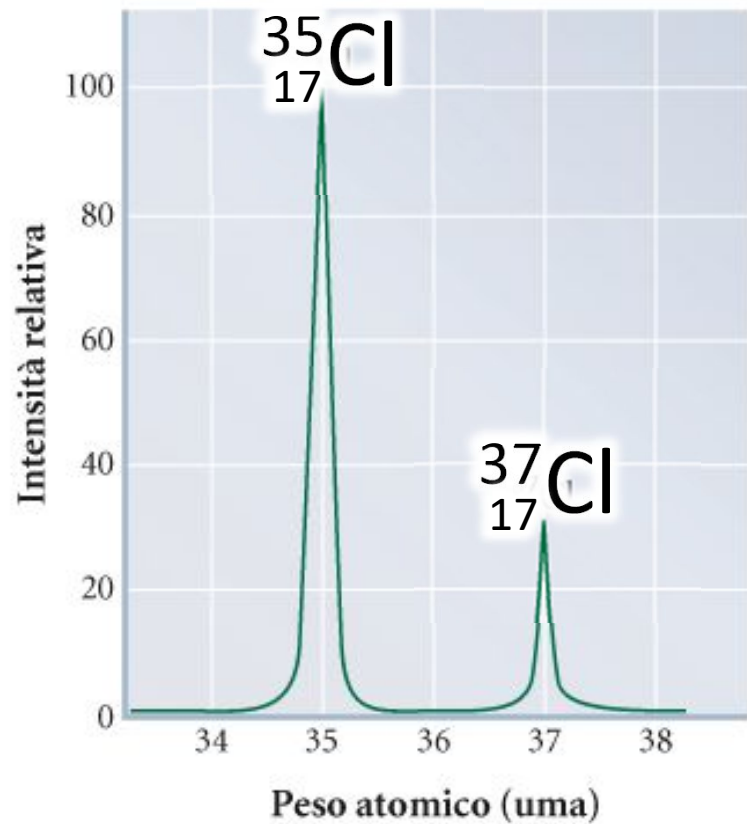
... e perché non di elettroni?

Quanto "pesa" un elemento?

perché non 12?

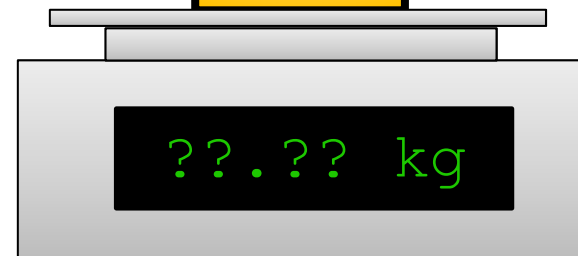


perché numeri non interi?



● ^{35}Cl
● ^{37}Cl

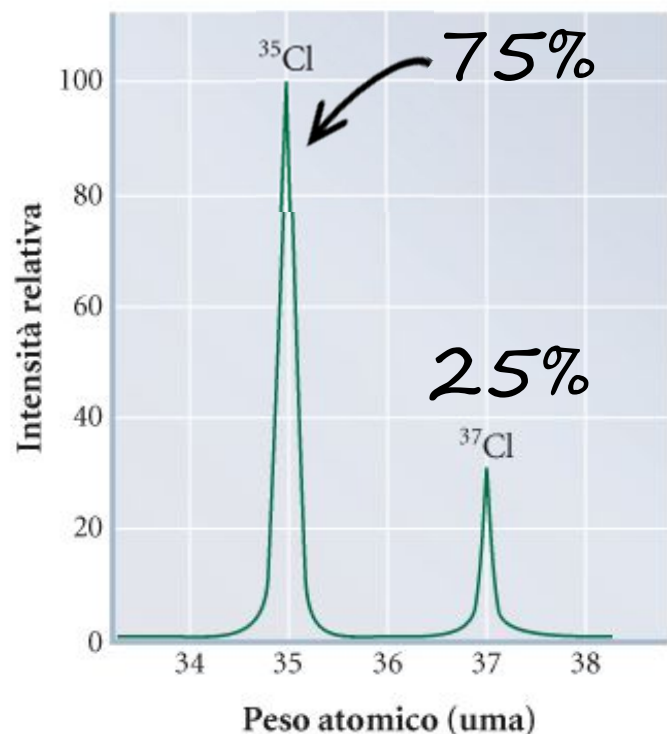
*quanto pesa
"il cloro"?*



Peso atomico (massa atomica relativa)

$$\frac{\%_X m_X + \%_Y m_Y}{100}$$

media *ponderata* delle masse di tutti gli isotopi di un dato elemento



massa nuclide

$$\frac{75 \cdot 35 + 25 \cdot 37}{100} = 35.5$$

abbondanza %

17	35,4527
3,16	Cl

facciamo ordine...



*numero
di
massa*

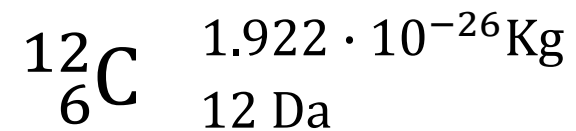
numero di nucleoni (i.e. protoni + neutroni) contenuti in un nucleo di un dato atomo (isotopo)



*referito ad uno
specifico isotopo*

*massa
atomica
(assoluta)*

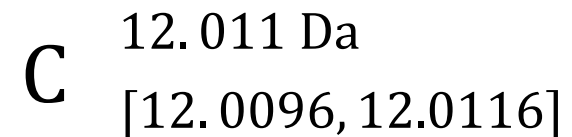
o peso atomico (assoluto): massa di un atomo di un dato elemento (isotopo), si solito espressa in Kg



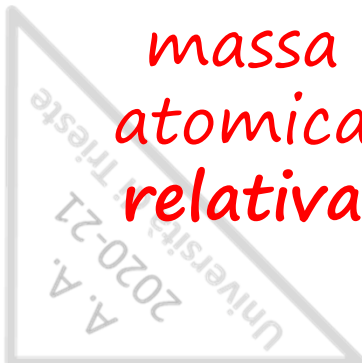
*referita ad uno
specifico isotopo*

*massa
atomica
relativa*

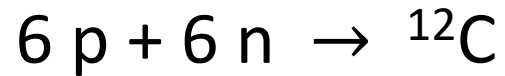
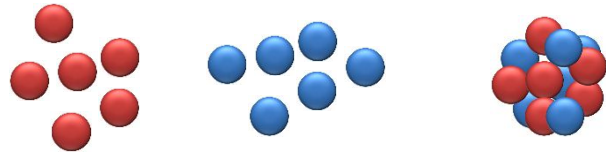
o **peso atomico relativo**: massa di un atomo (media pesata dei diversi isotopi) in rapporto al peso atomico assoluto di un 1/12 di un atomo di ^{12}C – numero adimensionale



*referita ad un
elemento*



difetto di massa



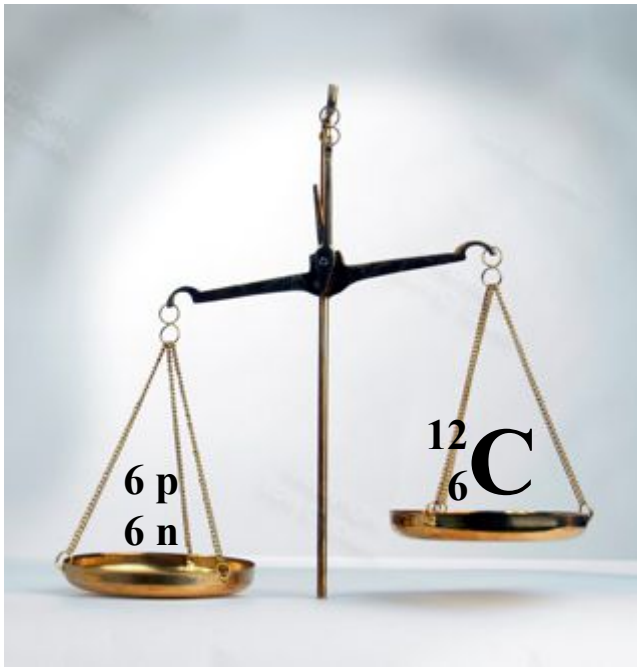
protoni:	$6 \times 1.007276 \text{ u} = 6.04366 \text{ u}$
neutroni:	$6 \times 1.008665 \text{ u} = 6.05199 \text{ u}$
elettroni:	$6 \times 0.000550 \text{ u} = 0.00330 \text{ u}$
	<hr/>
	12.09895 u

$$\Delta m = 0.09895 \text{ u}$$

l'atomo pesa meno
della somma dei
nucleoni!!

$$E \text{ di legame } \textit{nucleare} = \Delta m c^2$$

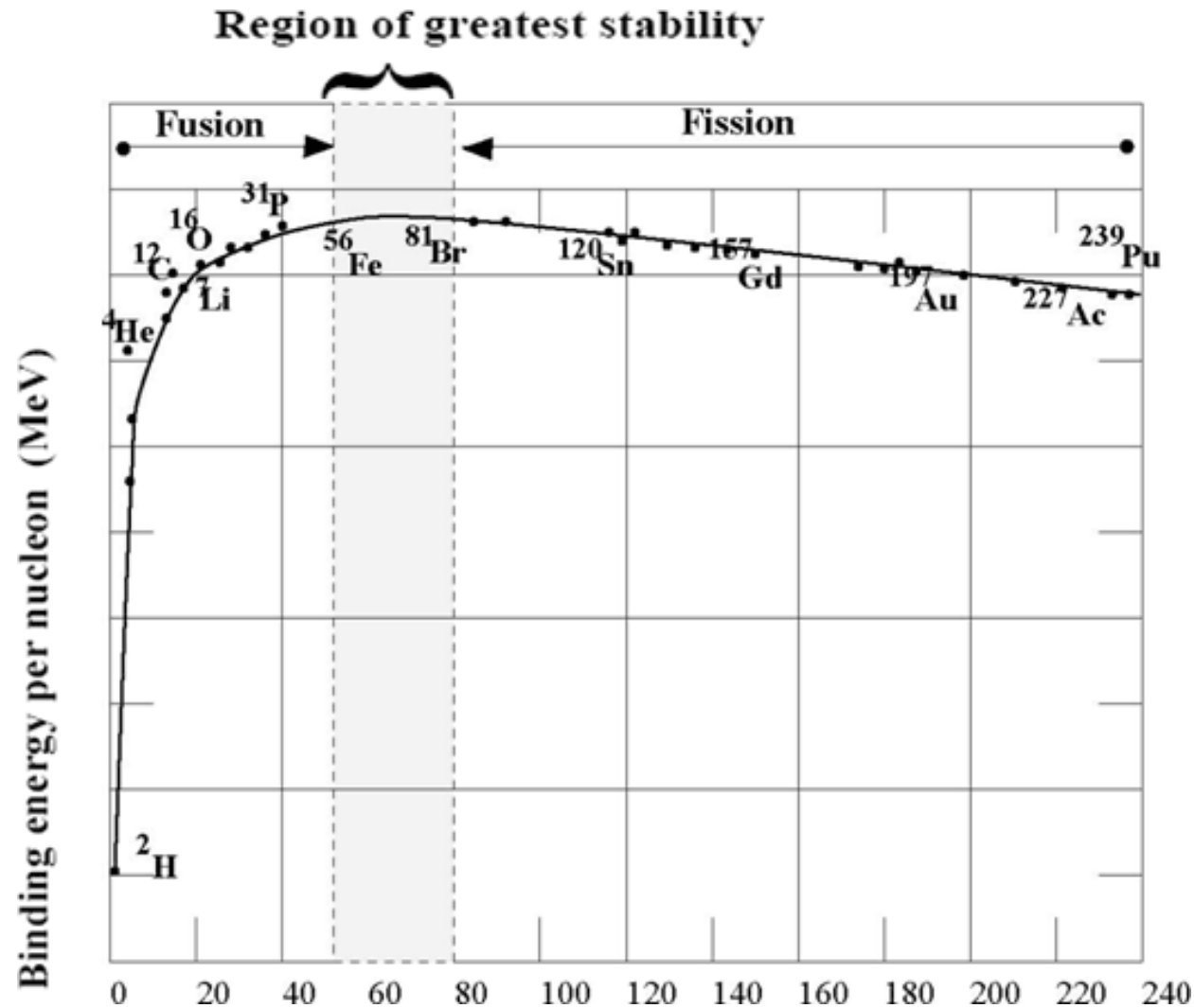
$$92162 \text{ keV}$$



energia di legame per nucleone

energia di
legame nucleare
per nucleone

$$\frac{\Delta mc^2}{A}$$



slides
delle lezioni
A BONIFACIO

A. A.
2020-21
Università di Trieste

dai raggi-x alla radioattività

1895-1898
delle
regioni
BONIFACIO

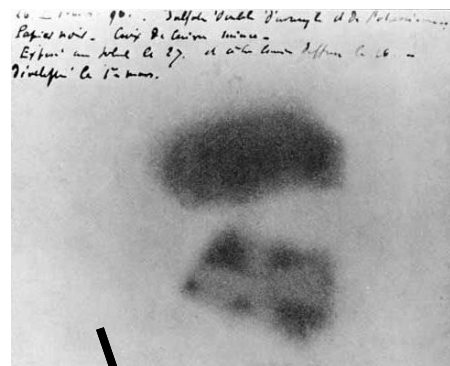
Röntgen



Fisica
1901



raggi x
o
raggi
Röntgen



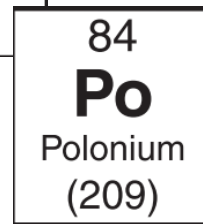
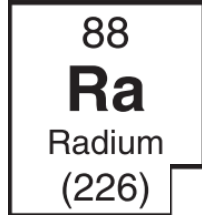
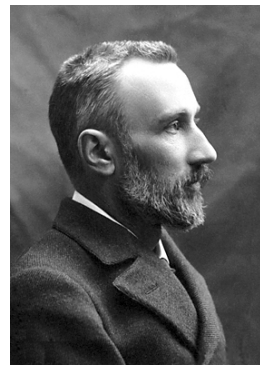
Becquerel



Fisica
1903



P. Curie



M. Curie



Chimica
1911

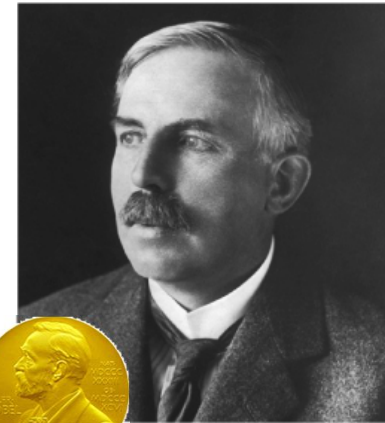
Università di Trieste
2020-21
A.A.

La radioattività è causata
dalla spontanea
disintegrazione degli atomi

*"Nella scienza esiste solo la Fisica; tutto il
resto è collezione di francobolli"*

E. Rutherford

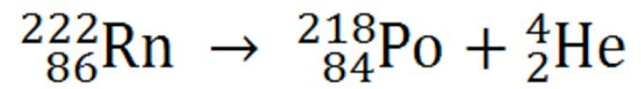
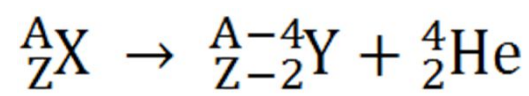
Rutherford



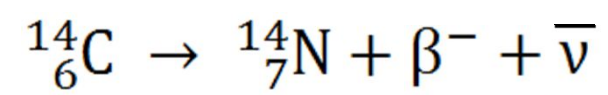
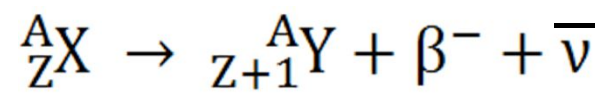
Chimica
1908

tipi comuni di decadimento radioattivo

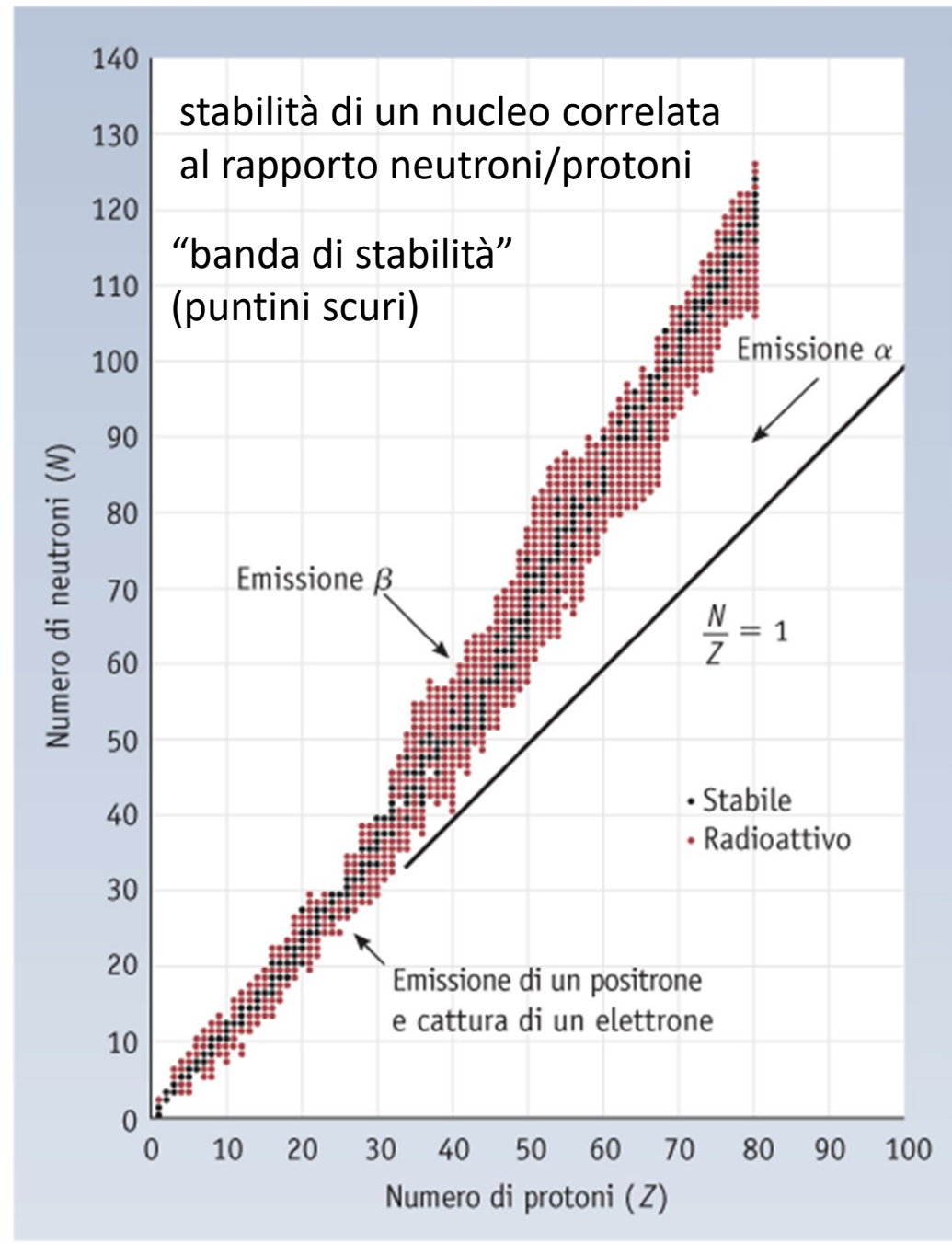
decadimento α



decadimento β

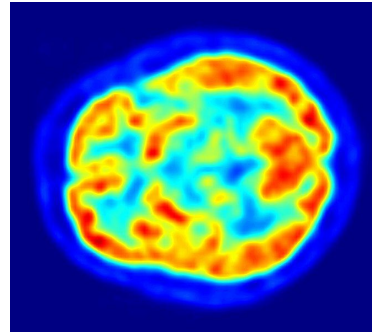
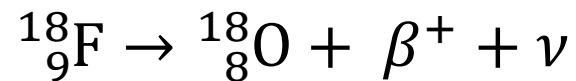
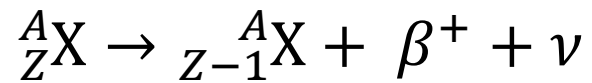


antineutrino 



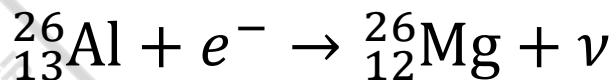
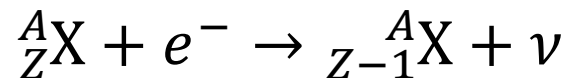
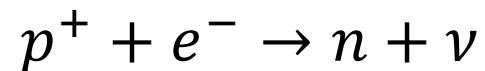
altri processi di trasformazione del nucleo

decadimento beta con
emissione di positroni



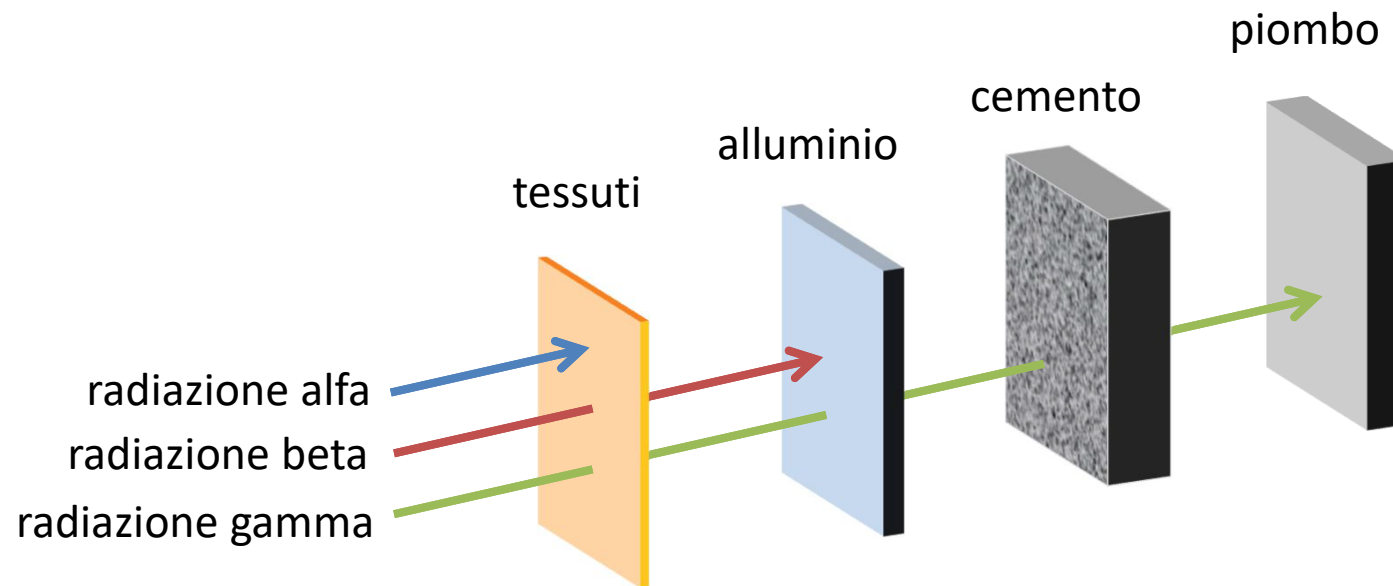
*alla base della tecnica
di imaging Positron
Emission Tomography
(PET)*

cattura elettronica

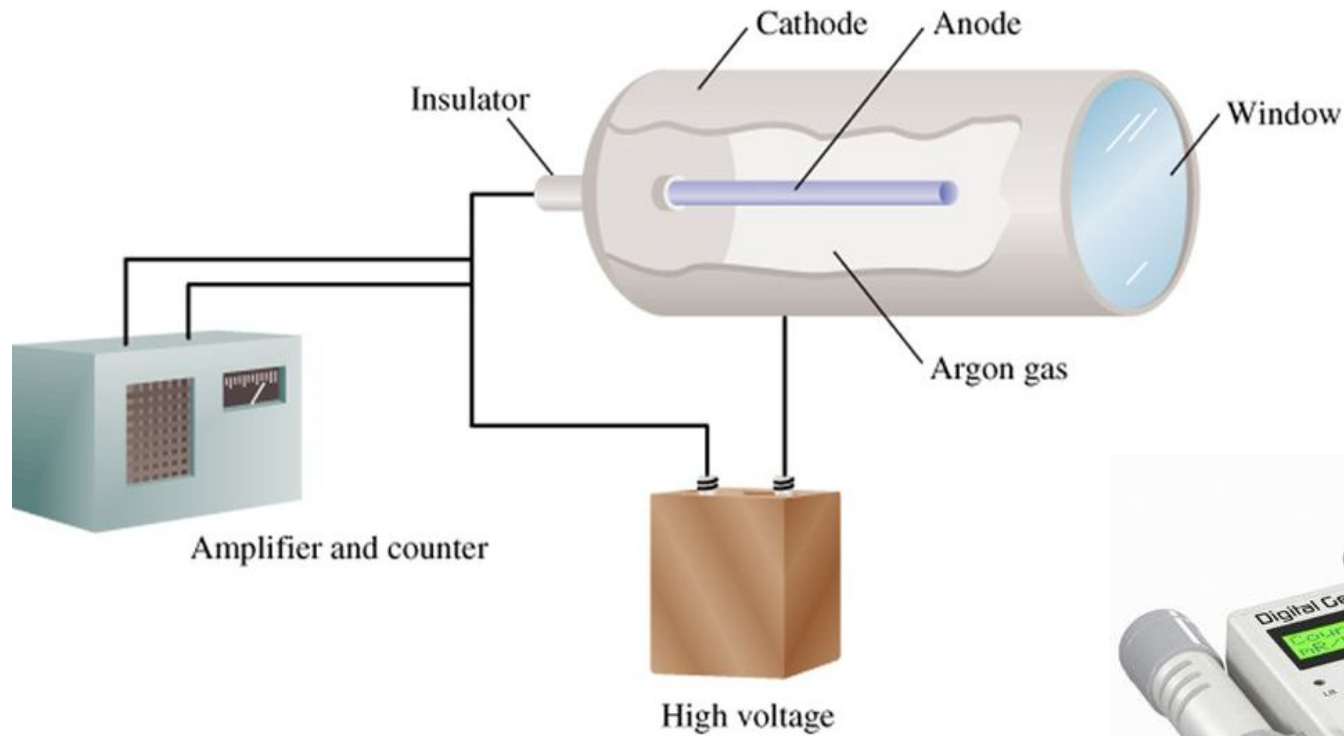


Processi di decadimento radioattivo

Tipo di decadimento	Emissione	Variazione di Z	Variazione di A
Alfa	${}^4_2\text{He}$	-2	-4
Beta	${}^0_{-1}\beta$	+1	0
Gamma	${}^0_0\gamma$	0	0
Positroni	${}^0_{+1}\beta$	-1	0
Cattura elettronica	Raggi X	-1	0



contatore Geiger (1913)

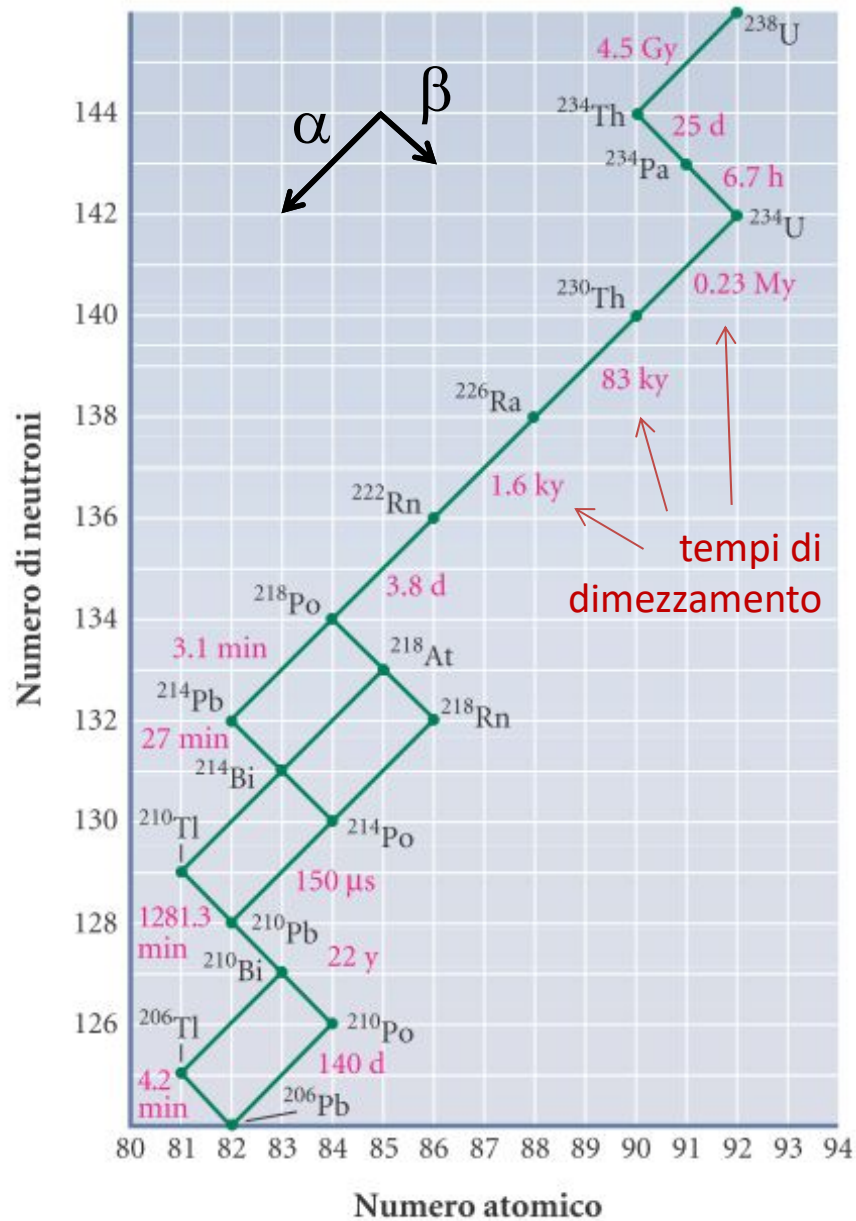


Hans Geiger
(1882 – 1945)



unità di misura Bq (Bequerel)
numero di disintegrazioni
per secondo

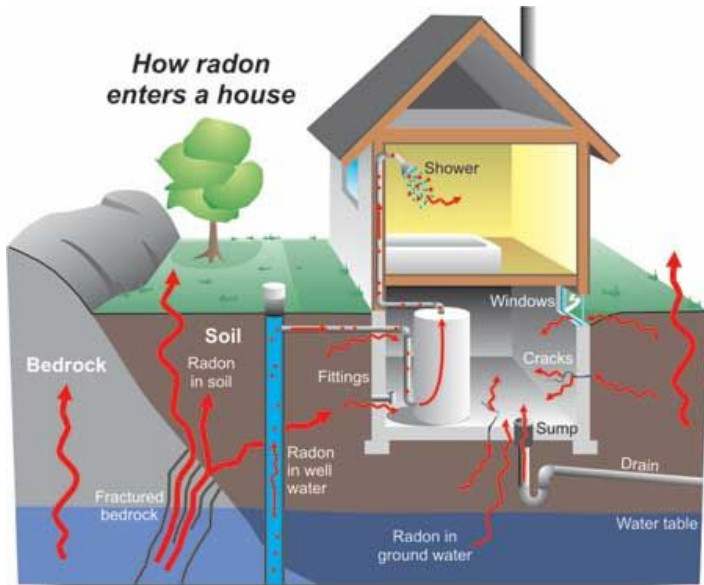
serie di decadimento dell' ^{238}U



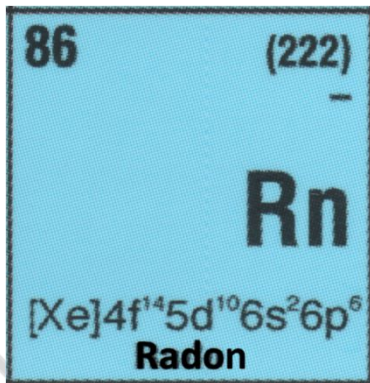
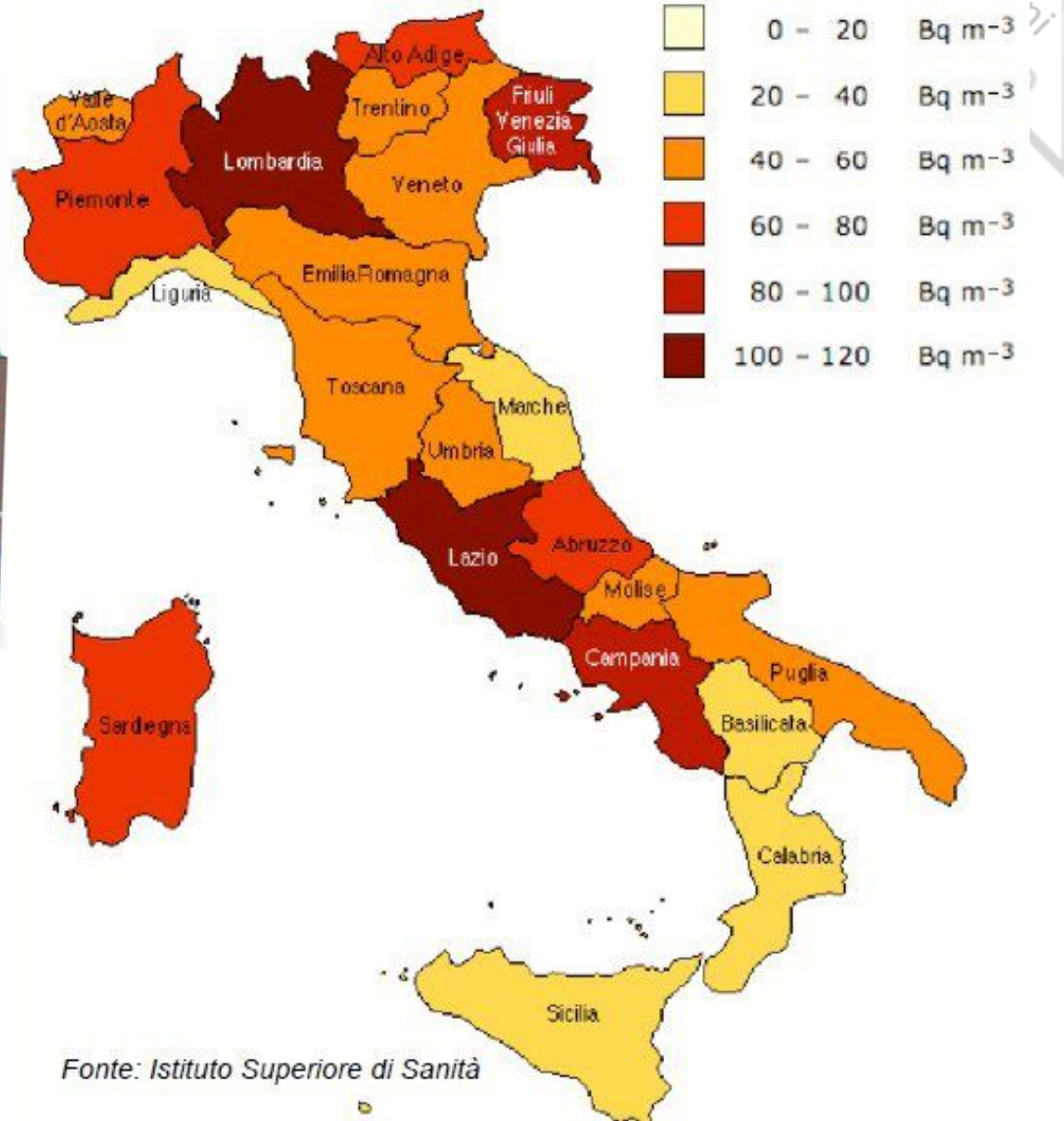
radioattività naturale

tutti gli elementi che hanno $Z > 83$ (Bi) sono radioattivi

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

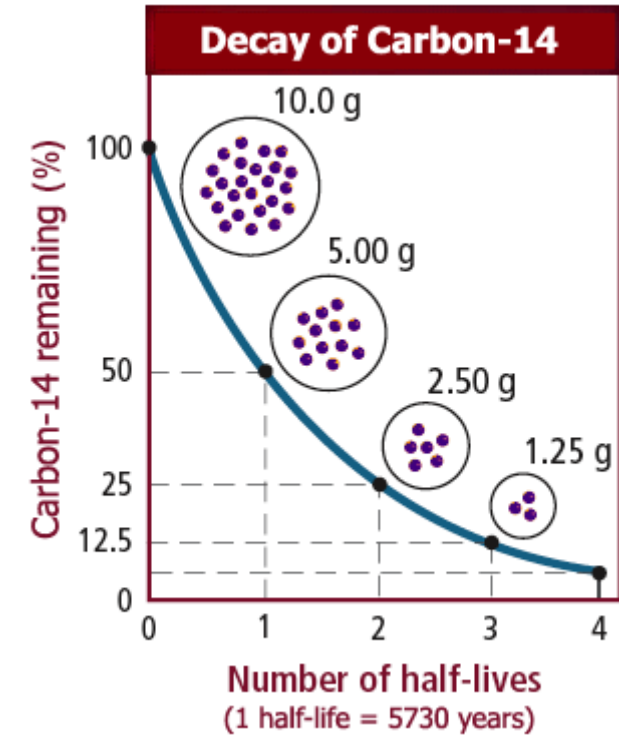
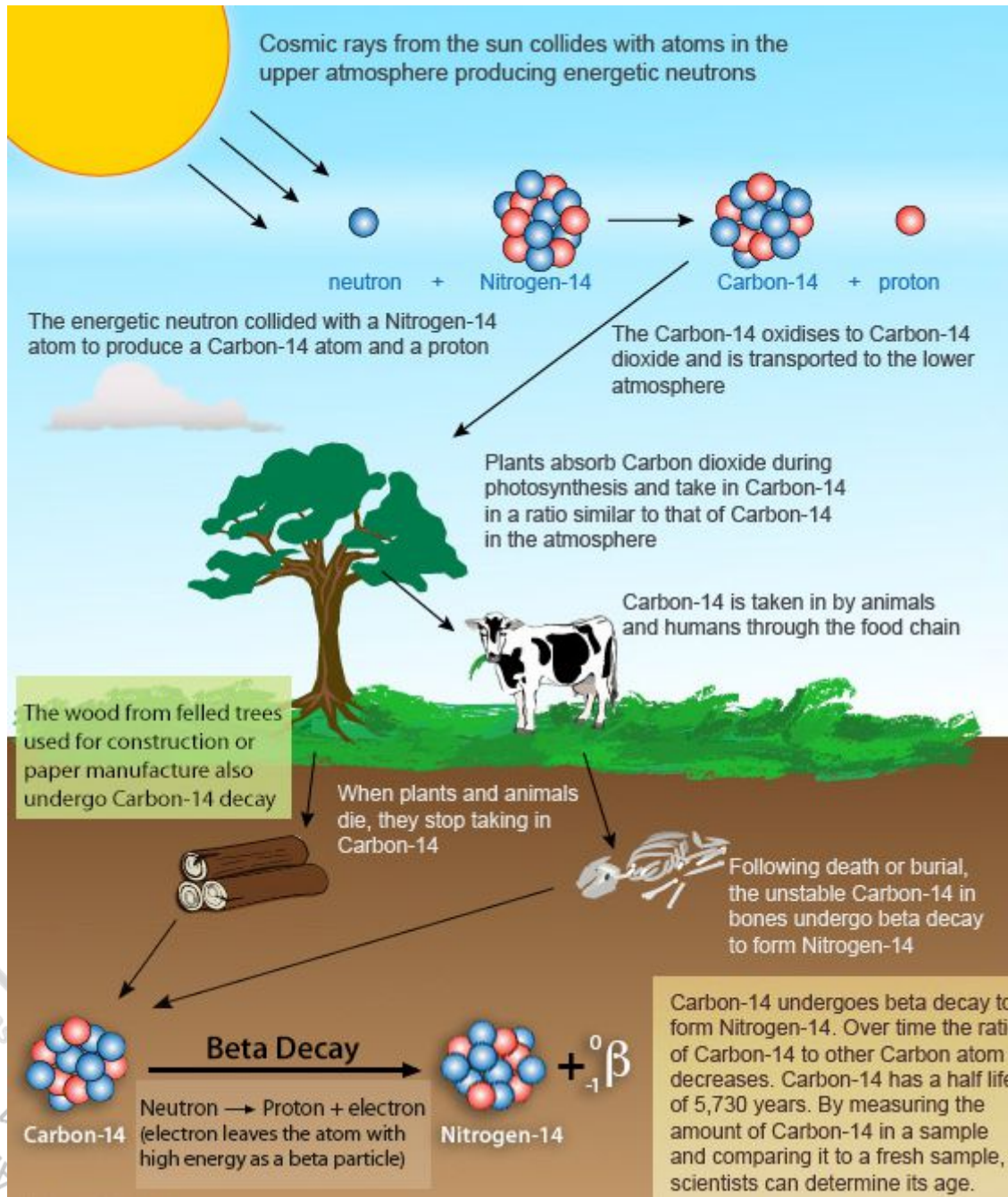
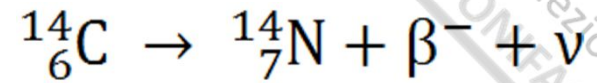


Medie regionali della concentrazione di radon nelle abitazioni



Fonte: Istituto Superiore di Sanità

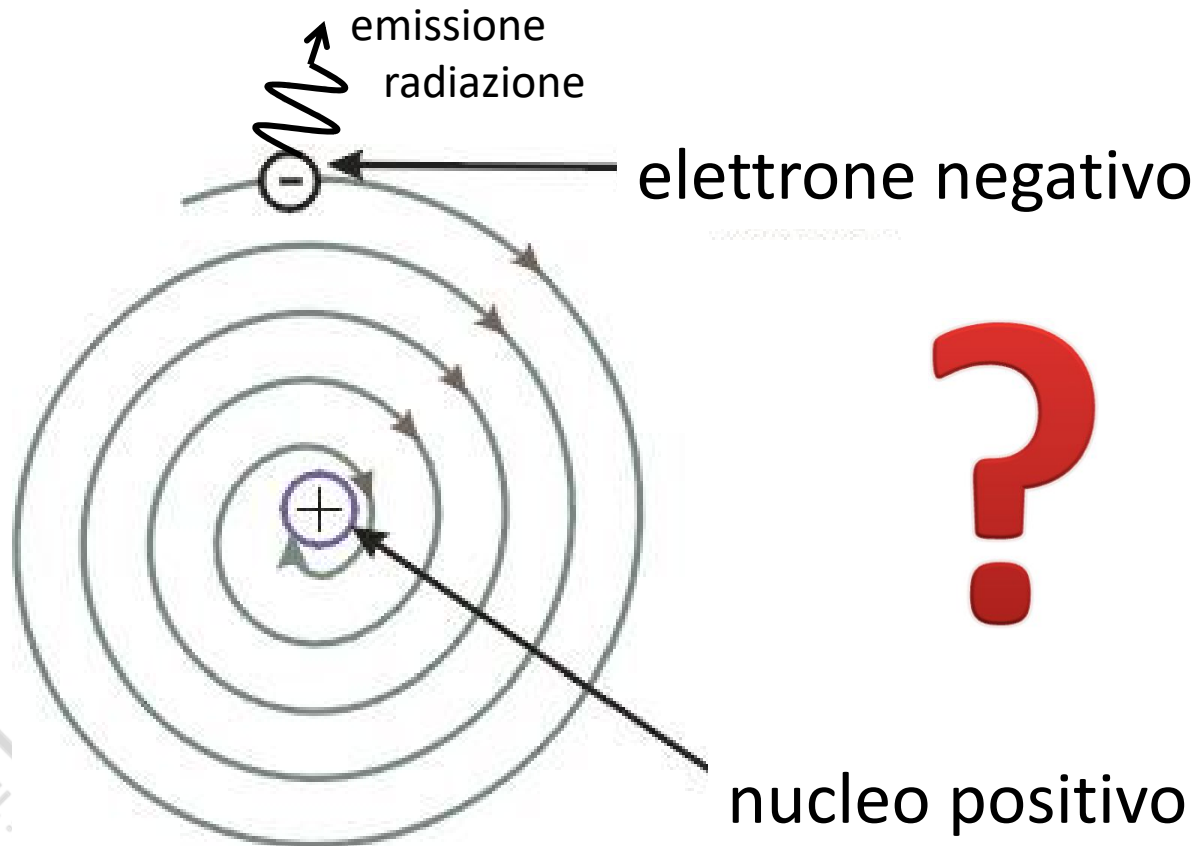
A.A. 2020-21
 Università di Trieste



stabilità della materia: un mistero

→ secondo l'elettrodinamica classica (Maxwell),
l'elettrone collaserebbe sul nucleo in 10^{-8} s

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



Maxwell



$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Universit  Trieste
2020-21
A. A.

onda: variazione periodica di qualche proprietà nello spazio e nel tempo

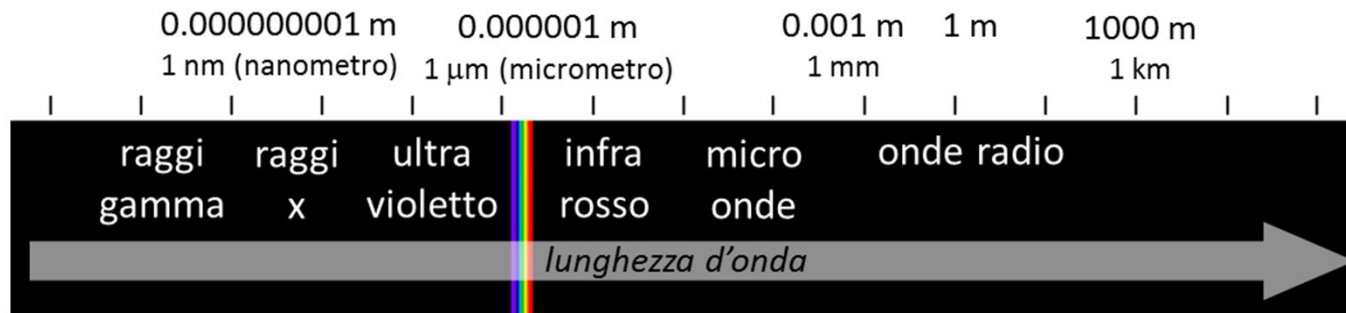


frequenza (Hz)
lunghezza d'onda
ampiezza (intensità)

"Luce" ed energia

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

energia $E = C \cdot \frac{1}{\lambda}$ costante lunghezza d'onda



più energia



meno energia



A.A. 2020-21
Università di Trieste

(radiazione) luce e calore

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



temperatura

colore

1000 °C	Rosso
1200 °C	Rosso tendente al giallo
1700 °C	Giallo arancio
2500 °C	Giallo
3200 °C	Bianco-giallastro
4200 °C	Bianco (tono caldo)
5200 °C	Bianco

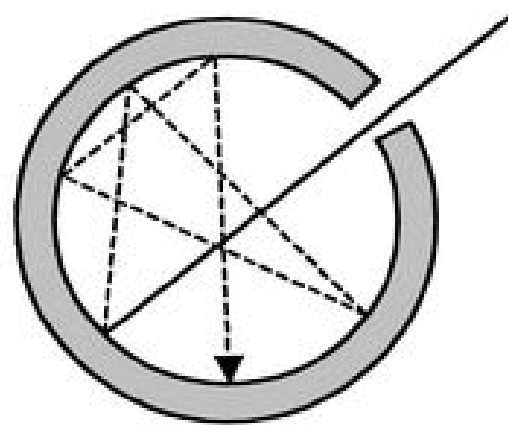
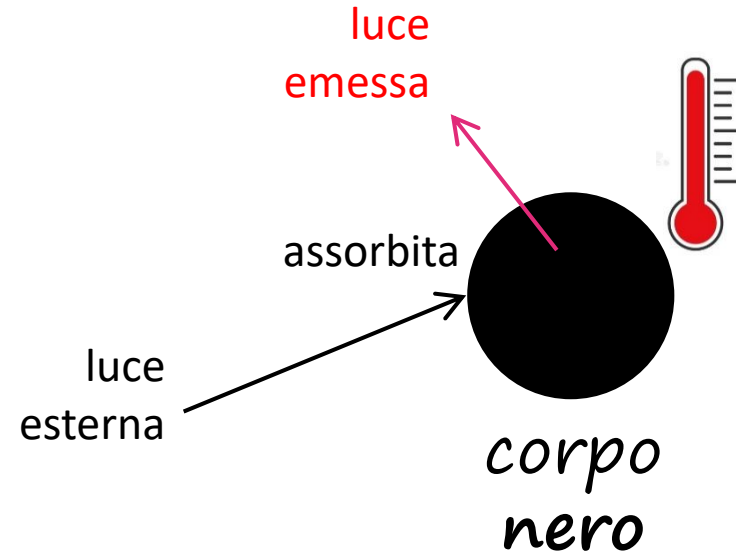
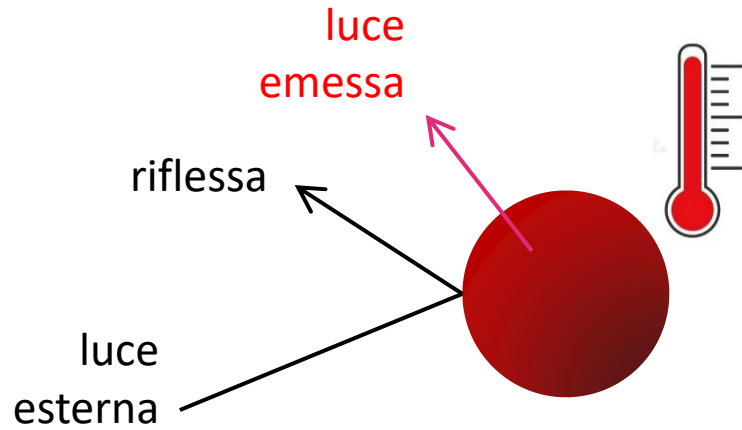


(c) Radiazione del corpo nero emessa da carbone incandescente.

A. A.
2020-21
Università di Trieste

“corpo nero”

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

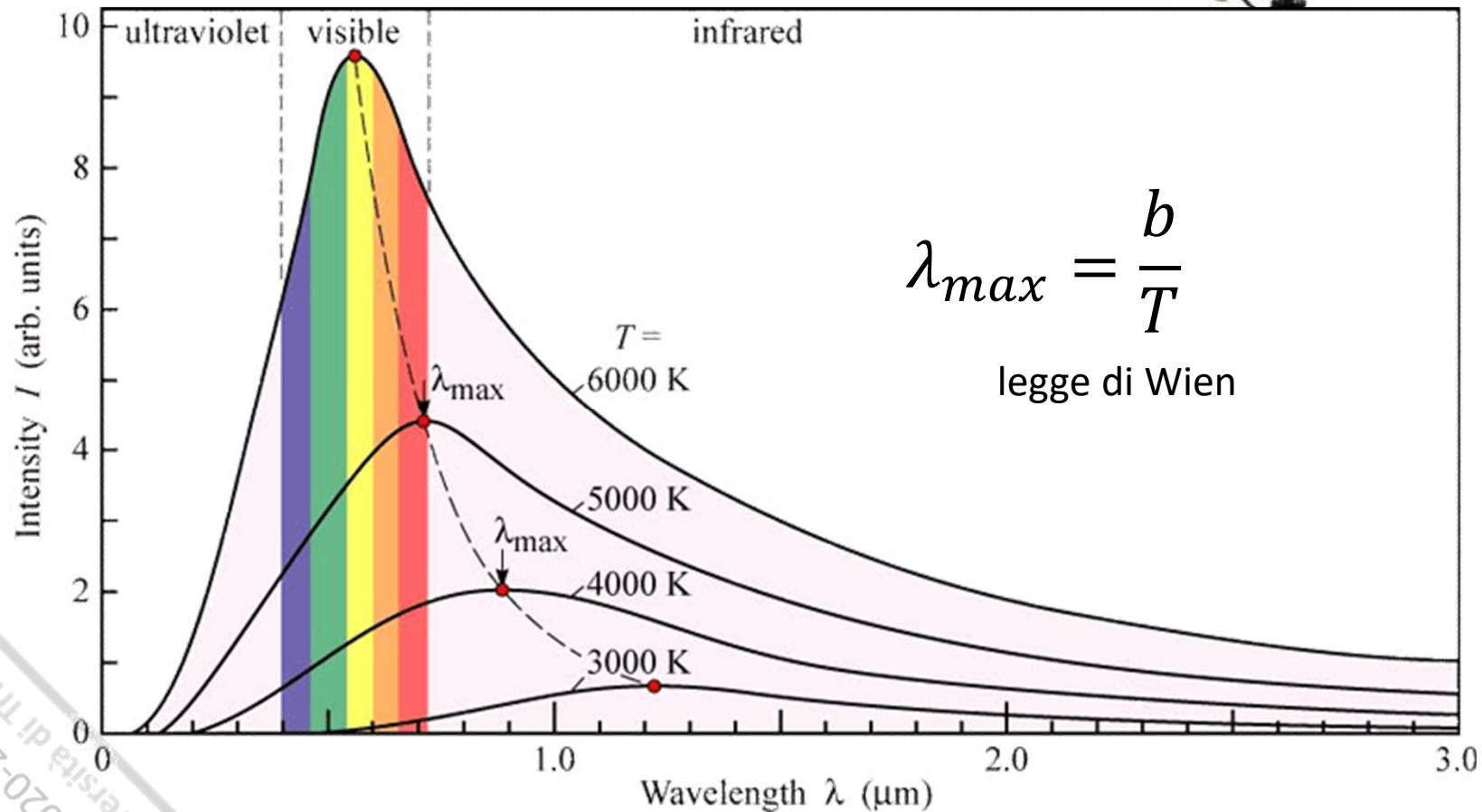


*cavità con pareti
opache come
approssimazione del
corpo nero*

A. A.
2020-21
Università di Trieste

radiazione del corpo nero (emissione)

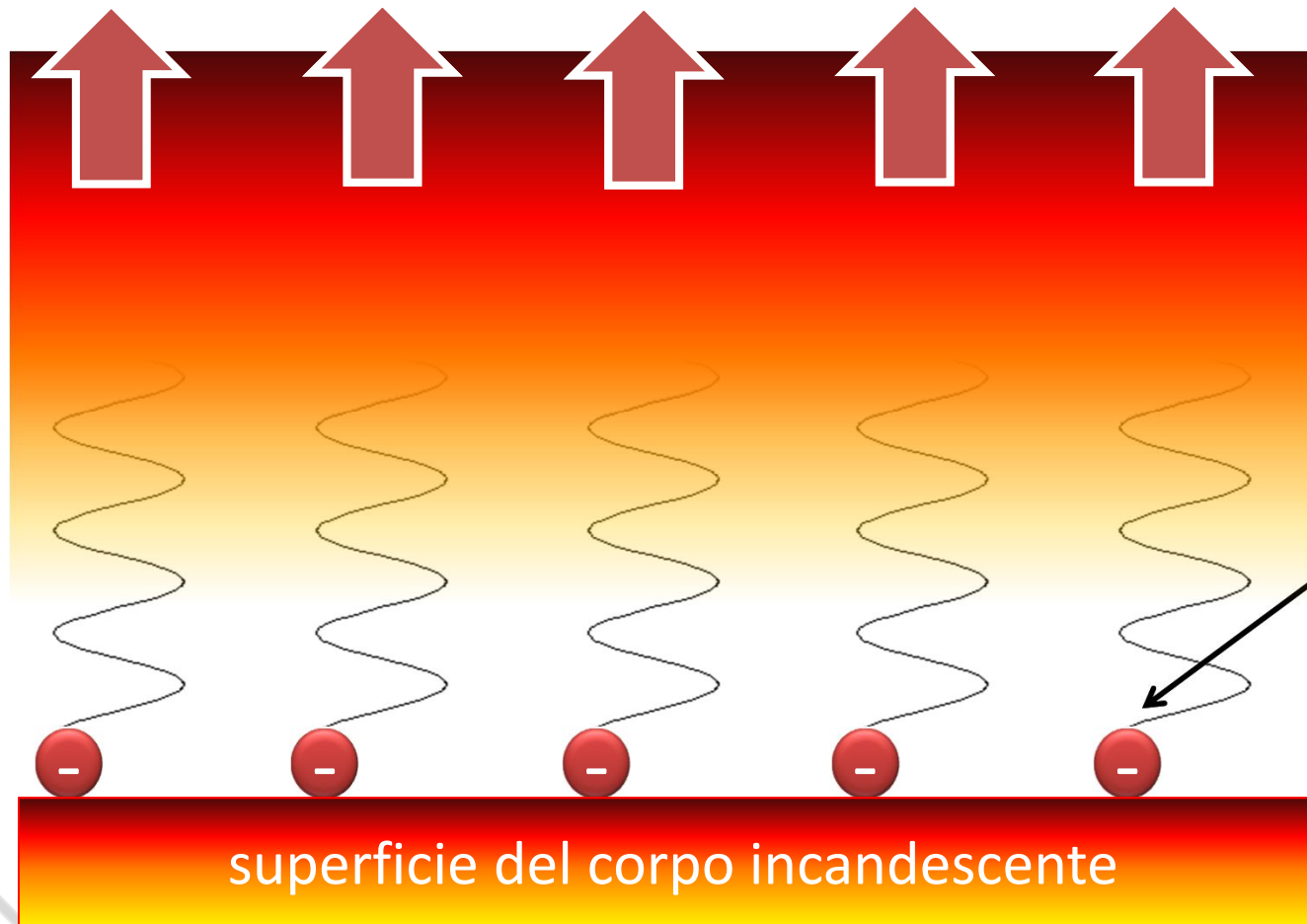
pirometri
ottici



A.A. Università di Trieste
2020-21

slides
lezioni
CLO

radiazione elettromagnetica (luce)



cariche
elettiche
oscillanti

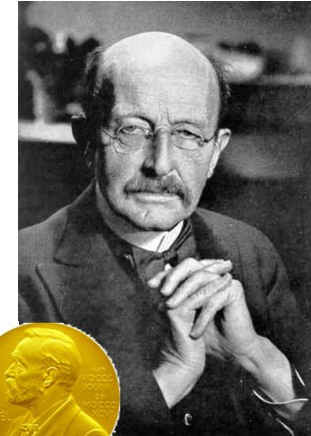
superficie del corpo incandescente

(teoria degli elettroni di Lorentz)

l'ipotesi di Planck



CURVA TEORICA
calcolata da Planck
riproduce bene le curve
sperimentali



Fisica
1918



“oscillatori” sulla superficie
del corpo caldo possono
assumere solo valori di
energia multipli di $h\nu$

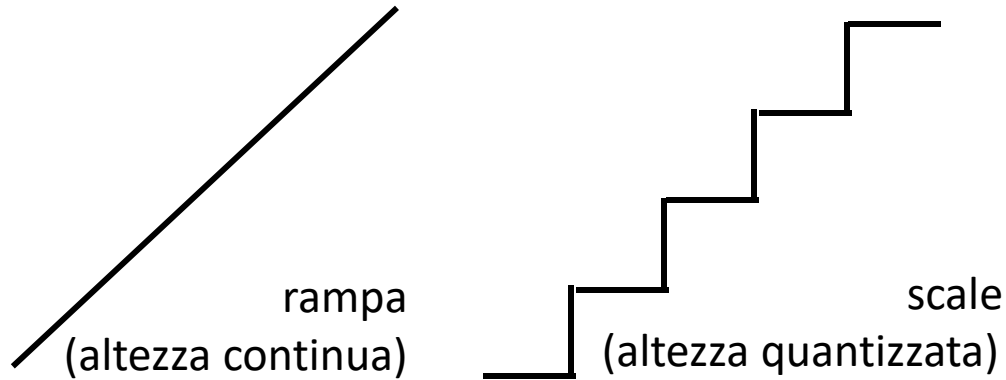
$$E = nh\nu, n: 1, 2, 3, \dots$$

$$h = 6.62608 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

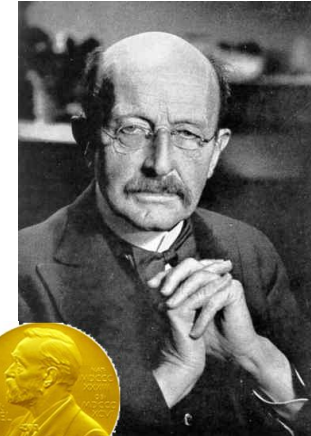
(costante di Planck)



l'ipotesi di Planck



Fisica
1918



un sistema può avere solo
valori DISCRETI di energia
("quanti" di energia)

→ l'energia è
"QUANTIZZATA"

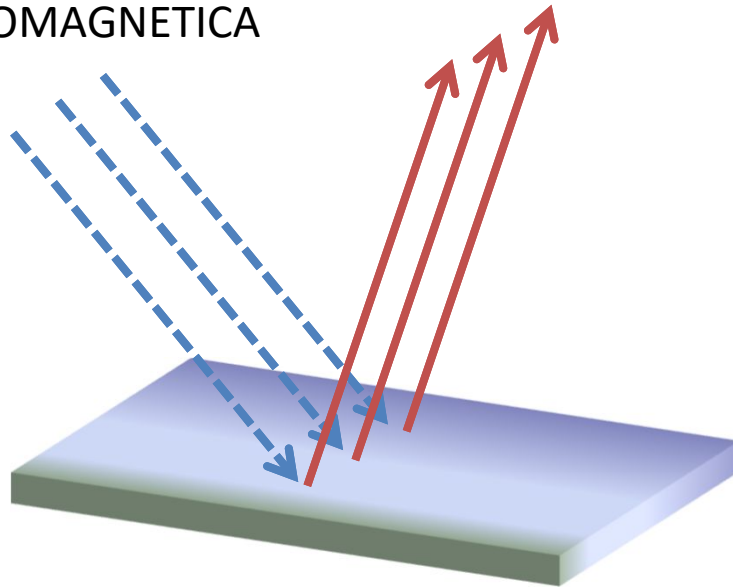
$$h\nu$$

Einstein e l'effetto fotoelettrico



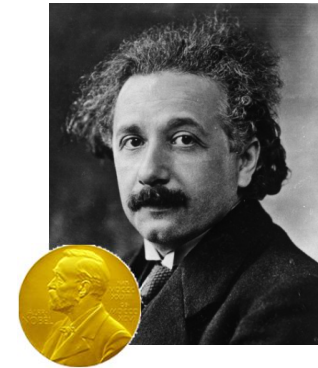
RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA

ELETTRONI EMESSI

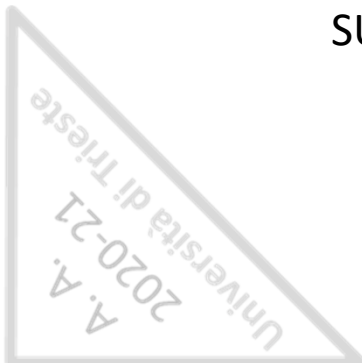


SUPERFICIE METALLICA

fenomeno
scoperto
da *Hertz*
nel 1887

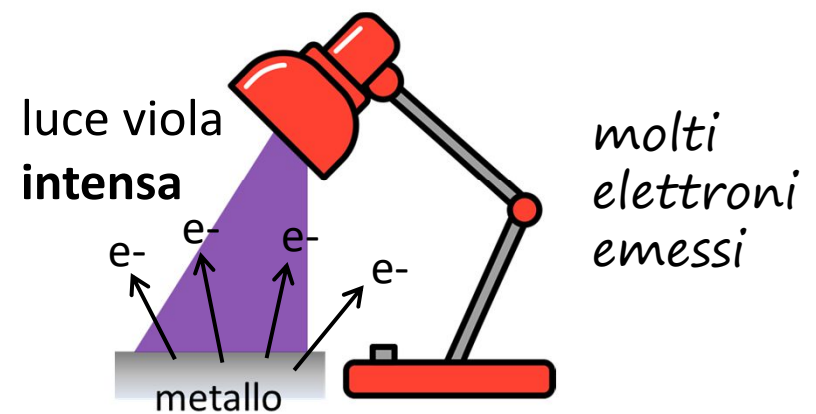
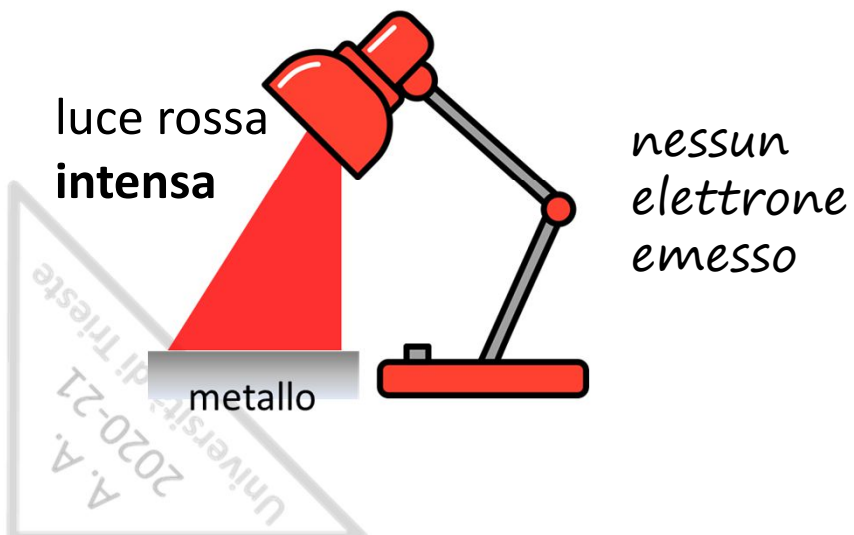
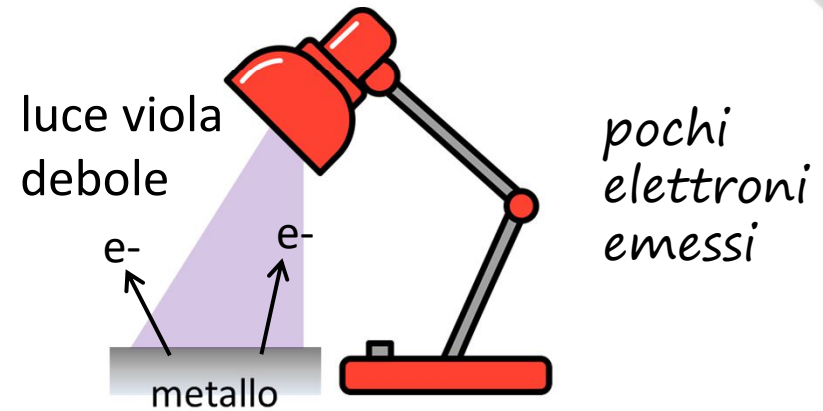
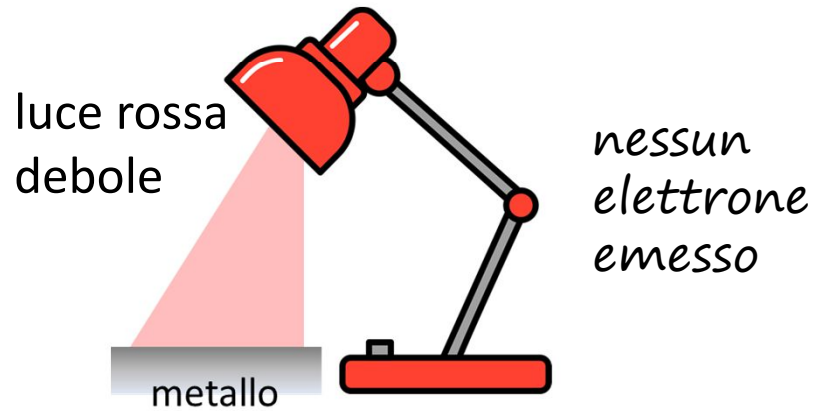


Fisica 1921



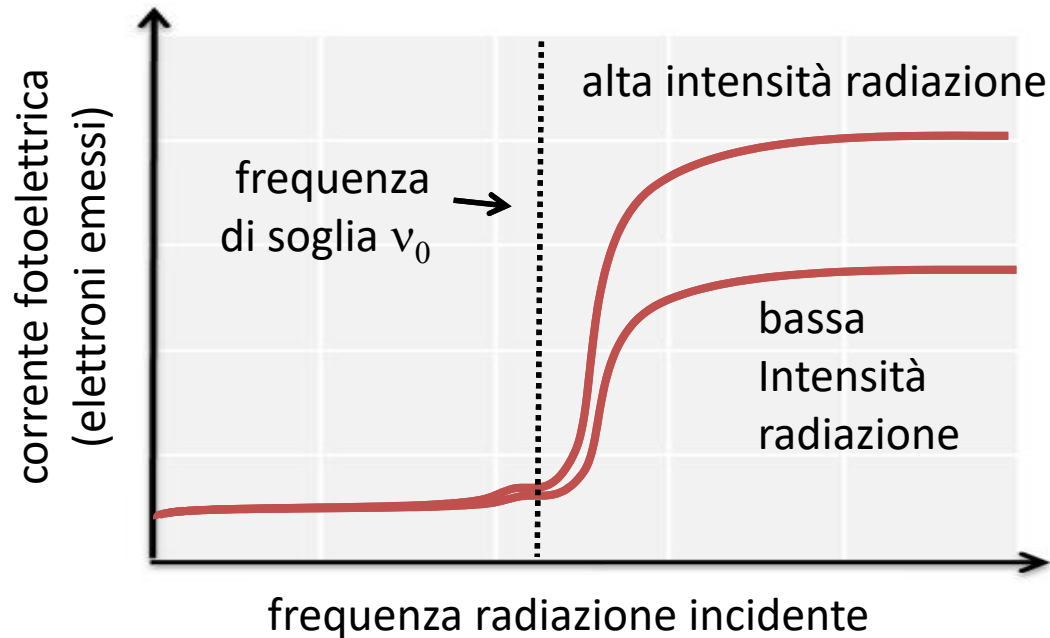
caratteristiche effetto fotoelettrico

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



A. A.
2020-21
Università di Trieste

Einstein e l'effetto fotoelettrico



spiegabile ipotizzando che:

- (i) la luce sia costituita da “quanti di energia radiante” (fotoni*) aventi energia

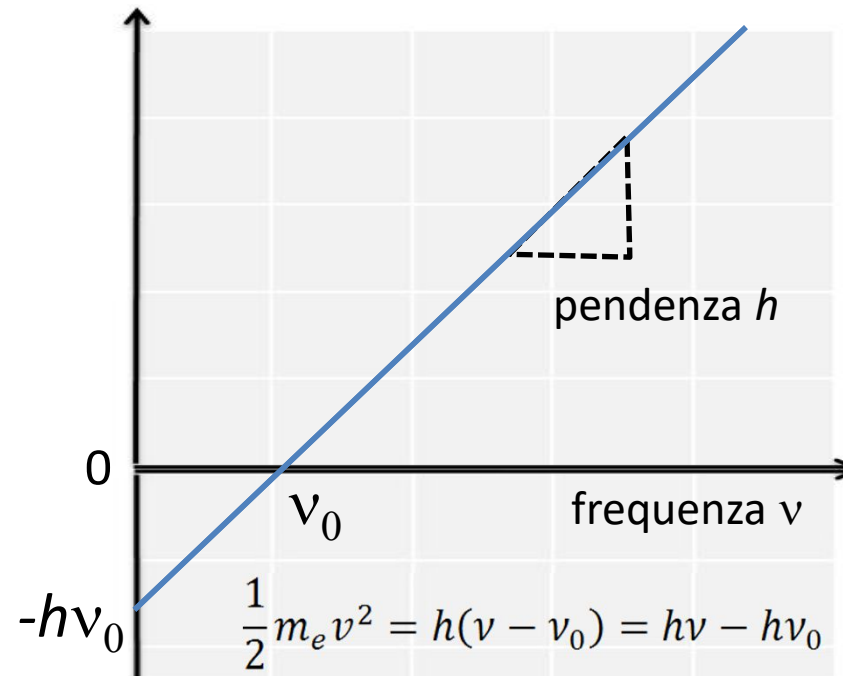
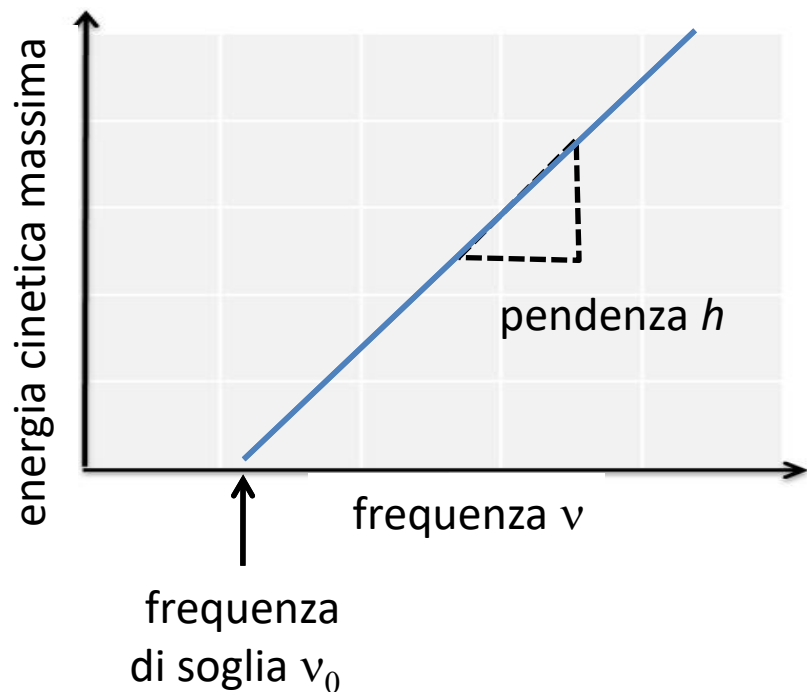
$$E_{\text{fotone}} = h\nu$$

- (ii) solo fotoni che hanno un' energia maggiore di un certo valore riescano a causare l'espulsione di un elettrone dal metallo

* termine coniato da G.Lewis nel 1926

Einstein e l'effetto fotoelettrico

1905
slides
delle lezioni



$$E_{max} = A\nu - B$$

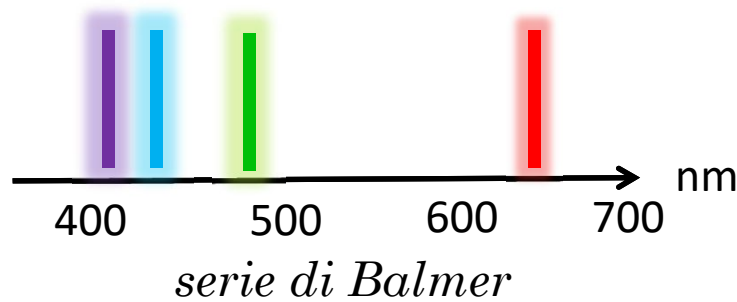
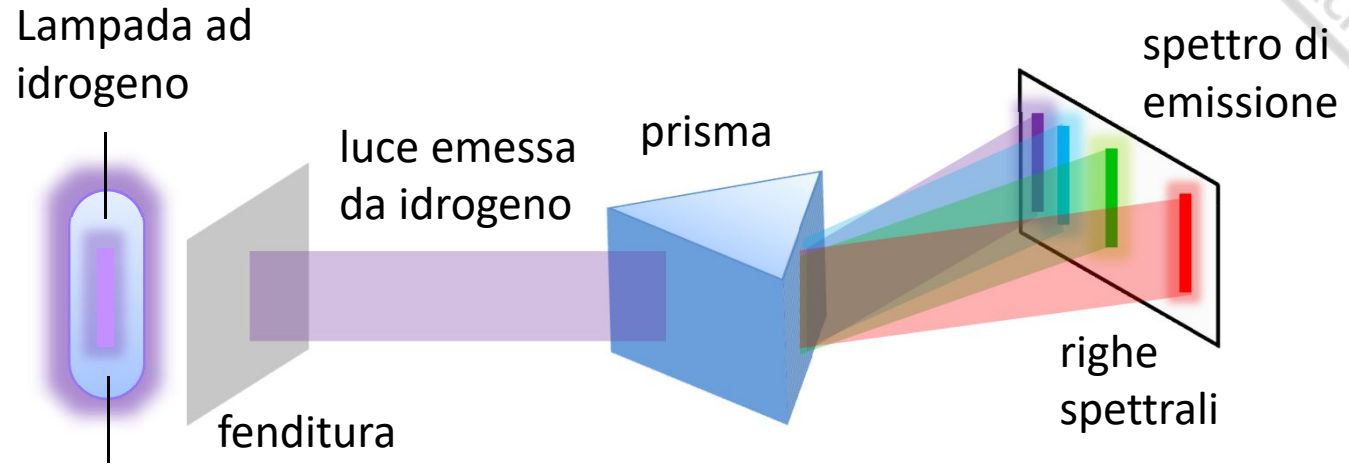
($y = Ax - B$)

$$E_{max} = h\nu - \Phi$$

↑ ↑ ↑

energia dell'elettrone emesso energia della radiazione energia persa per "sfuggire" al metallo

Balmer e lo spettro dell'idrogeno



$$\lambda = B \left(\frac{m^2}{m^2 - 2^2} \right) \quad m = 3, 4, 5 \dots$$

formula di Balmer

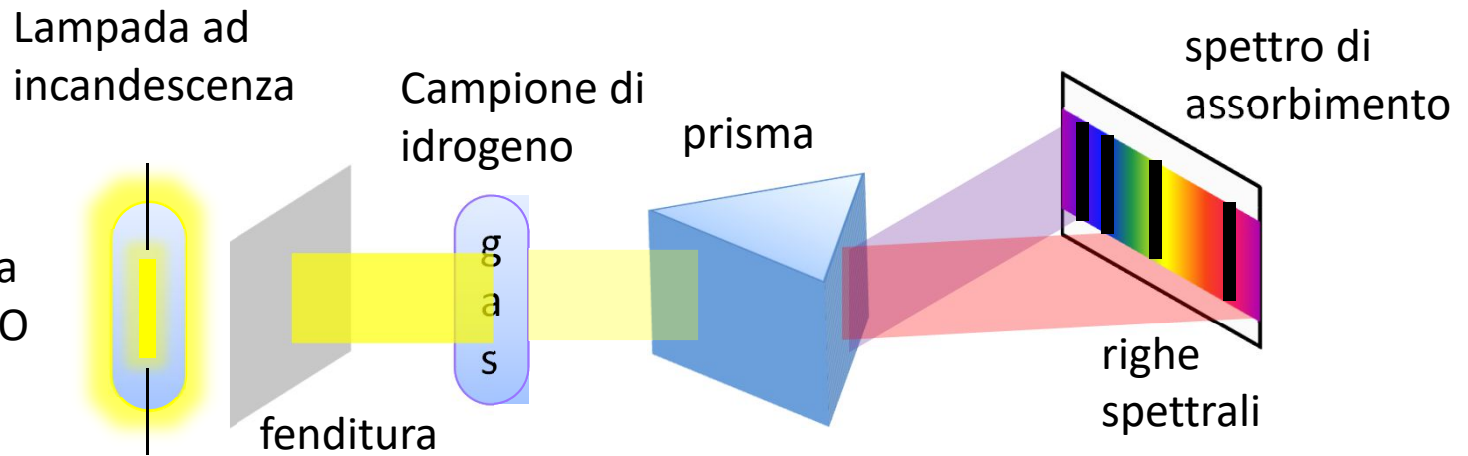
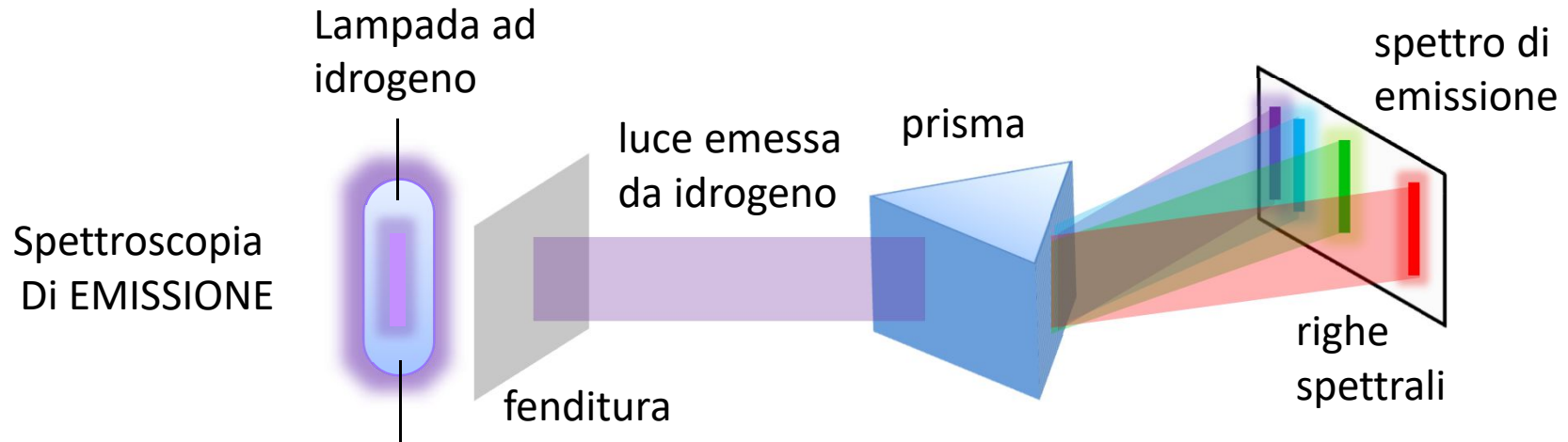
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5 \dots$$

formula di Rydberg

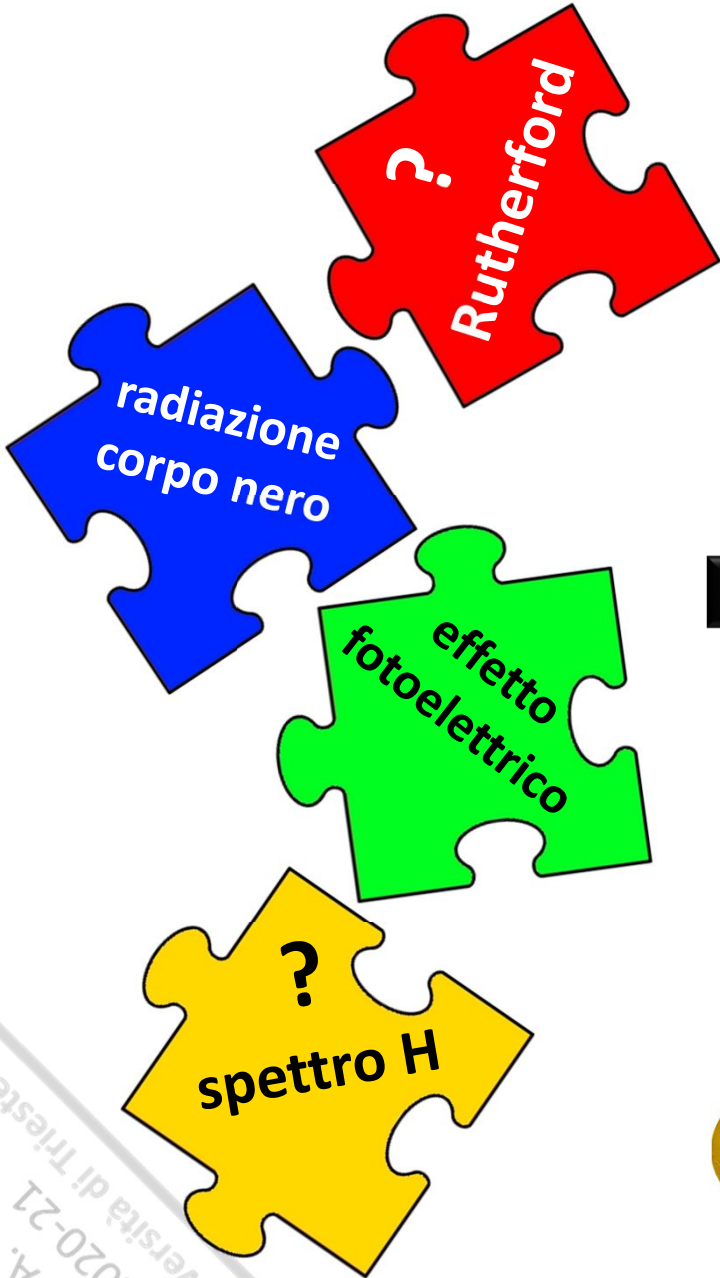
$$R_H = 10978 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

spettroscopia atomica

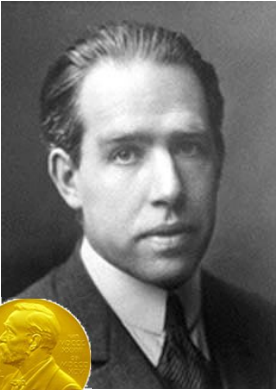
slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



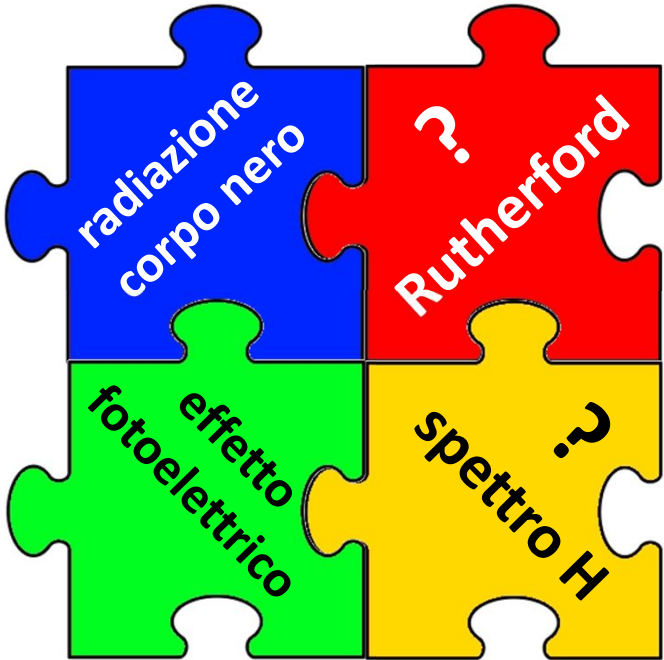
A.A. 2020-21
Università di Trieste



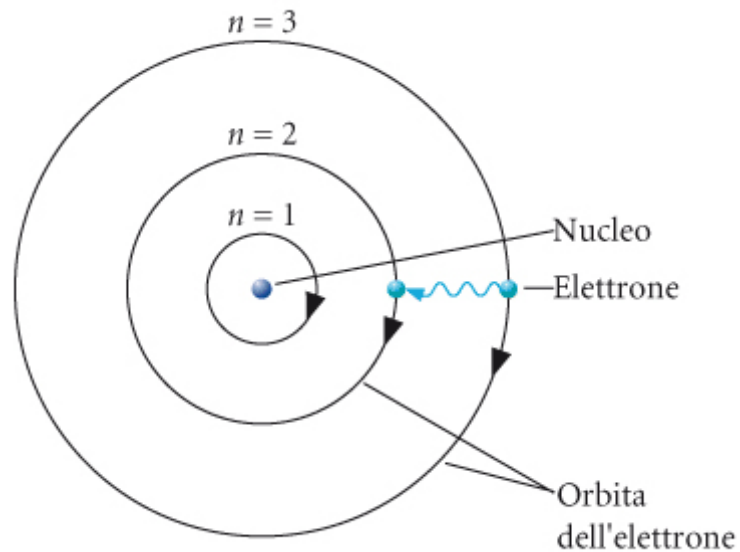
Bohr



Fisica 1922



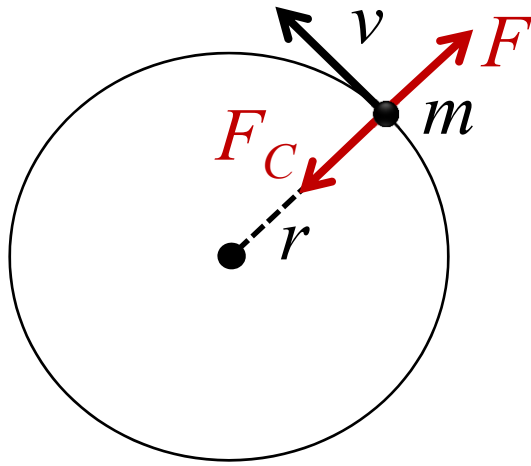
il modello atomico di Bohr



Fisica 1922

si basa su alcuni ***postulati***

1. un elettrone può muoversi soltanto su alcune determinate orbite non-radiative, dette ***stati stazionari***
2. della luce viene emessa od assorbita dall'atomo soltanto quando un elettrone salta con una transizione da uno stato stazionario (orbita) all'altro



momento angolare
(moto circolare uniforme)

$$L = mvr$$

forza "centrifuga"
(moto circolare uniforme)

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

forza di Coulomb

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \rightarrow mv^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

L è "quantizzato"

$$L = mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

***numero
quantico
principale***

$$m^2 v^2 r^2 = \frac{e^2 m r}{4\pi\epsilon_0} = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2}$$

$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi e^2 m} = n^2 a_0$$

***raggio
di Bohr
0.53 Å***

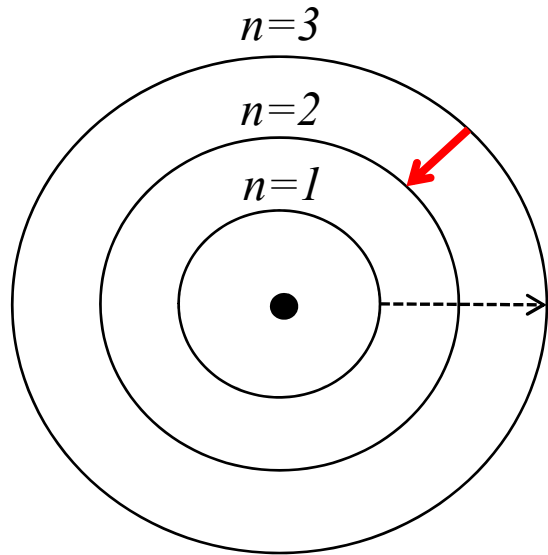
$$\left. \begin{aligned} L = mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad n = 1, 2, 3, \dots \\ r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi e^2 m} = n^2 a_0 \end{aligned} \right\} v = \frac{e^2}{2\epsilon_0 n h} = 2.18 \times 10^6 \text{ ms}^{-1}$$

$$E = K + U = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

E è "quantizzata" $E = -\frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2}$ $n = 1, 2, 3, \dots$

**numero
quantico
principale**

energia del livello
fondamentale $E_1 = -\frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^2} = -2.18 \times 10^{-18} \text{ J} = -13.6 \text{ eV}$



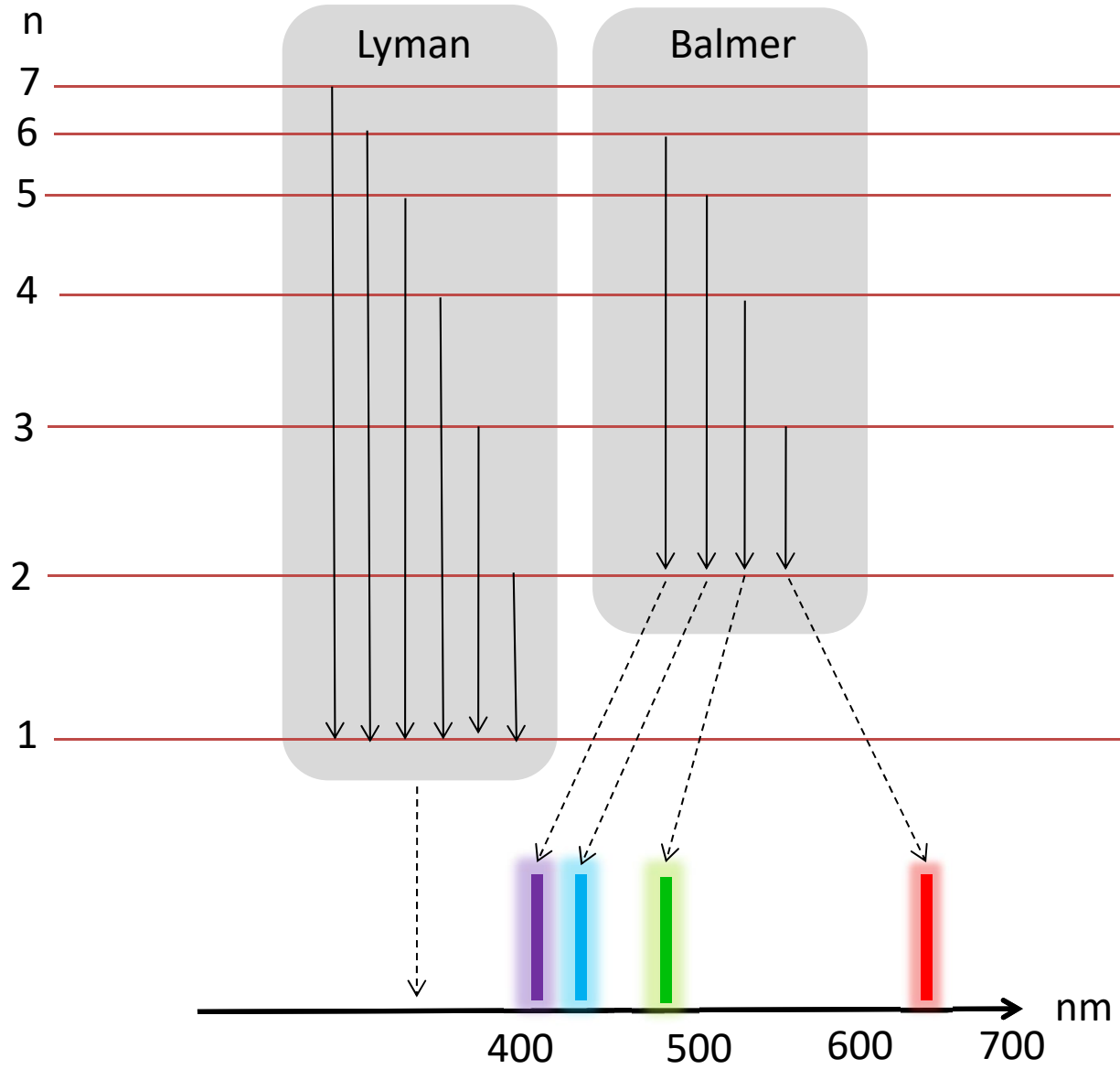
$$E = -\frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2} \quad r = n^2 a_0 \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

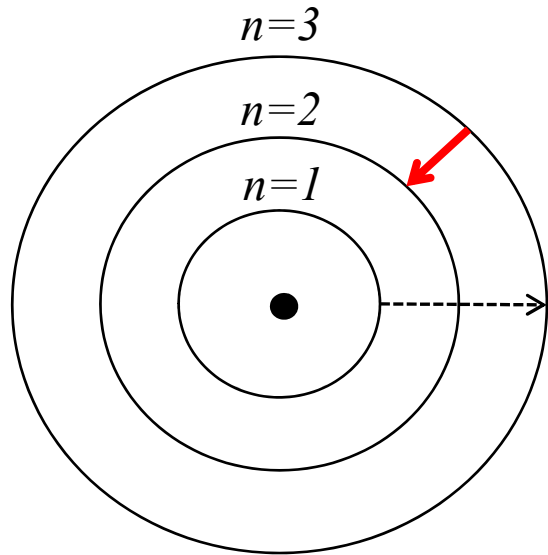
$$\Delta E_{3 \rightarrow 2} = E_{n=3} - E_{n=2} = \frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 h^2} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$$

$$\Delta E = h\nu \quad (\text{Planck ed Einstein})$$

$$\nu_{3 \rightarrow 2} = \frac{e^4 m}{8\varepsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = 0.45731 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_{3 \rightarrow 2} = \frac{c}{\nu_{3 \rightarrow 2}} = \frac{299\,792\,458 \text{ ms}^{-1}}{0.45731 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}} = 6.56 \times 10^{-7} \text{ m}$$





$$r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m_e e^2} \quad E_n = - \left(\frac{1}{n^2} \right) \frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2}$$

il modello di Bohr funziona anche con gli atomi "idrogenoidi" (He^+ , Li^{2+} , Be^{3+})

$$r_n = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{Z \pi m_e e^2} \quad E_n = - \left(\frac{Z}{n^2} \right) \frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2}$$

$$\Delta E = E_{n_f} - E_{n_i} = \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \frac{Z^2 m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} = h\nu$$



Il modello di Bohr prevede correttamente lo spettro di atomi idrogenoidi



il modello di Bohr prevede correttamente l'energia di ionizzazione

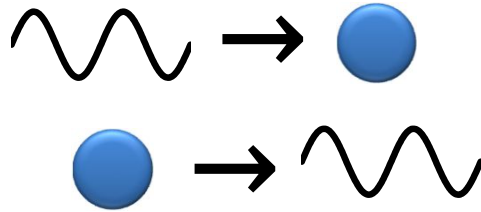


il modello di Bohr non prevede gli spettri degli atomi polielettronici



il modello di Bohr non spiega il perchè della quantizzazione di L

l'ipotesi di de Broglie

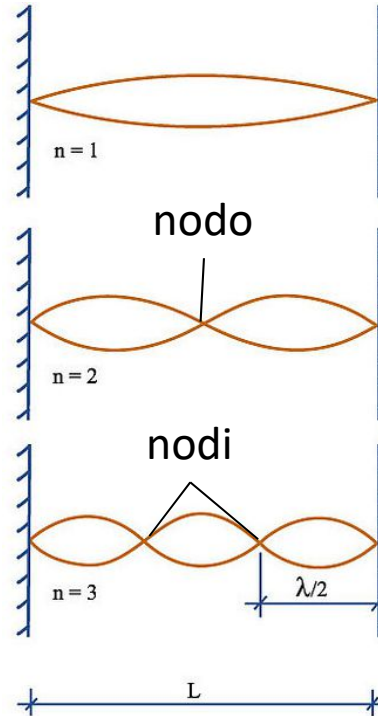


onda \rightarrow particella
? **particella \rightarrow onda ?**

$$E = mc^2 \quad E = h\nu$$

ad ogni **particella** è associata un **onda**

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



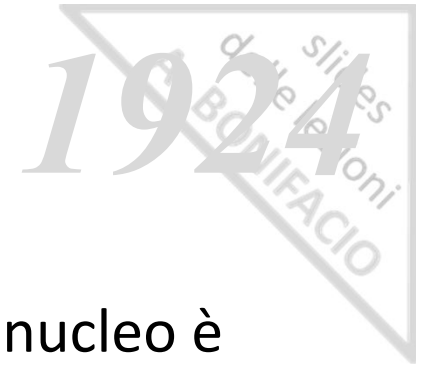
le **onde stazionarie** sono esempi di quantizzazione

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$



Fisica 1929

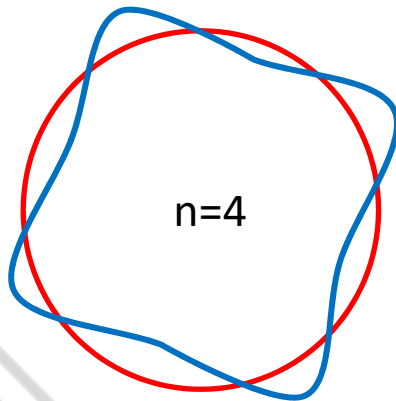
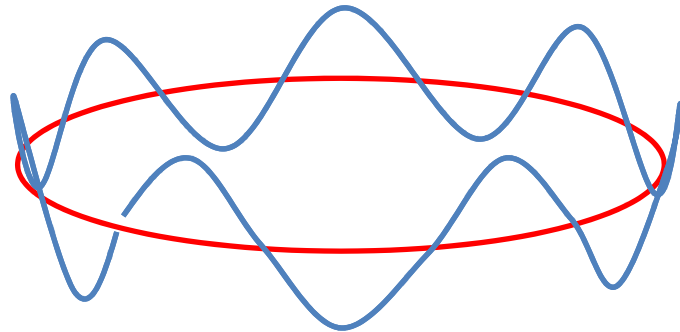
l'ipotesi di de Broglie



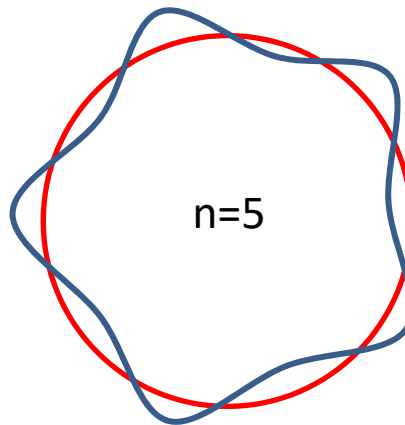
l'elettrone intorno al nucleo è
descrivibile come un

onda stazionaria

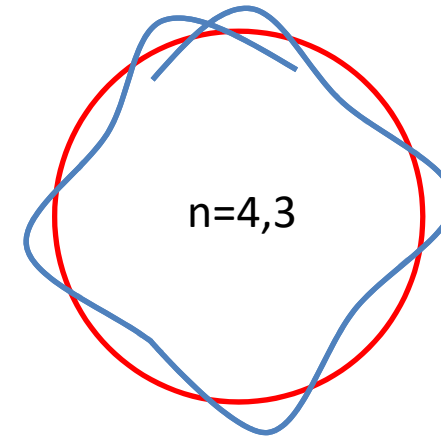
→ giustificazione per
quantizzazione momento angolare



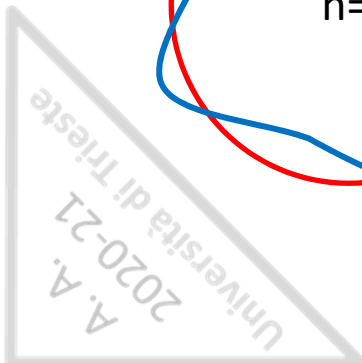
n=4



n=5

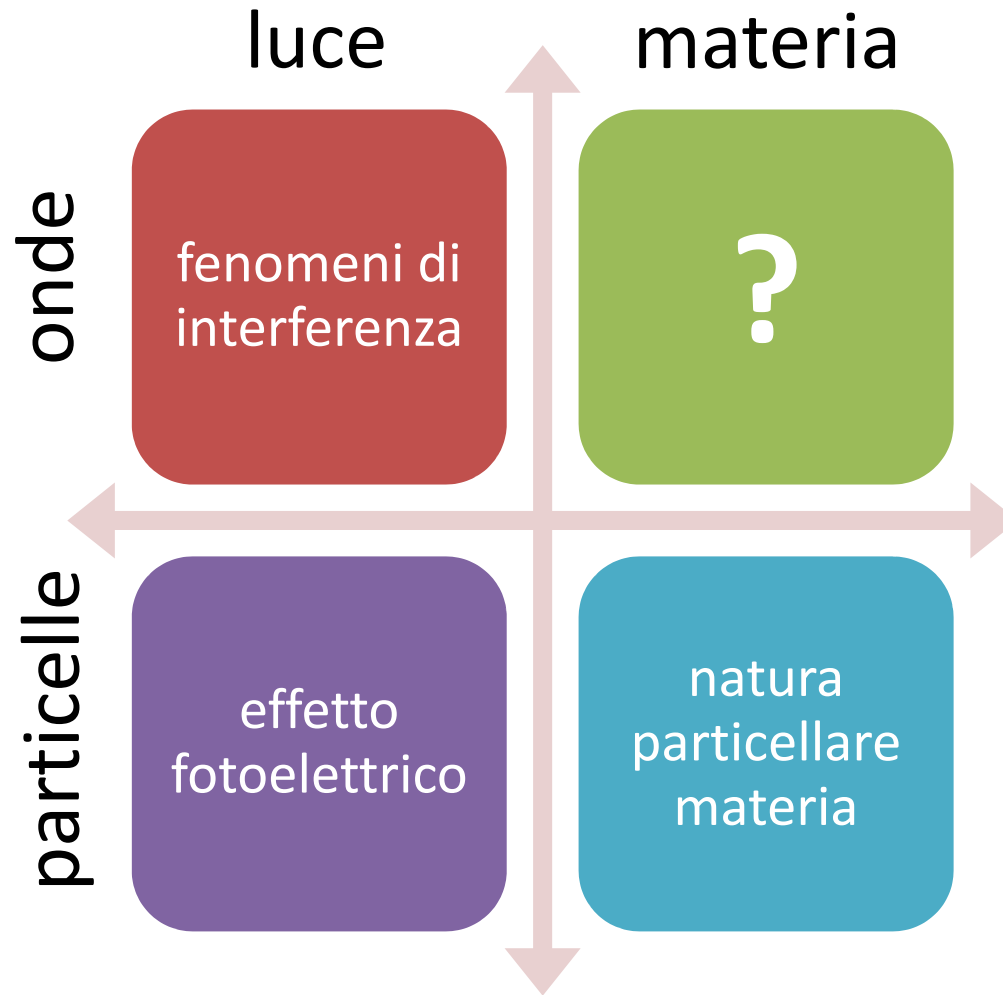


n=4,3



materia: particelle o onde?

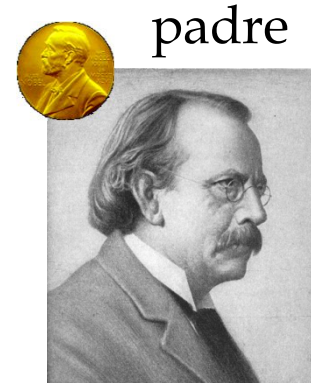
slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



A. A.
2020-21
Università di Trieste

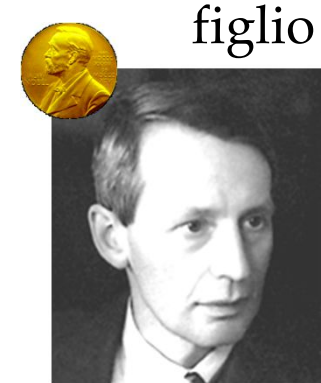
dualismo onda-particella

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



J.J. Thomson
(1856-1940)

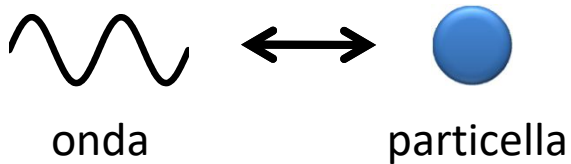
Nobel nel 1906 per
aver dimostrato
l'esistenza di
elettroni come
particelle



G.P. Thomson
(1892-1975)

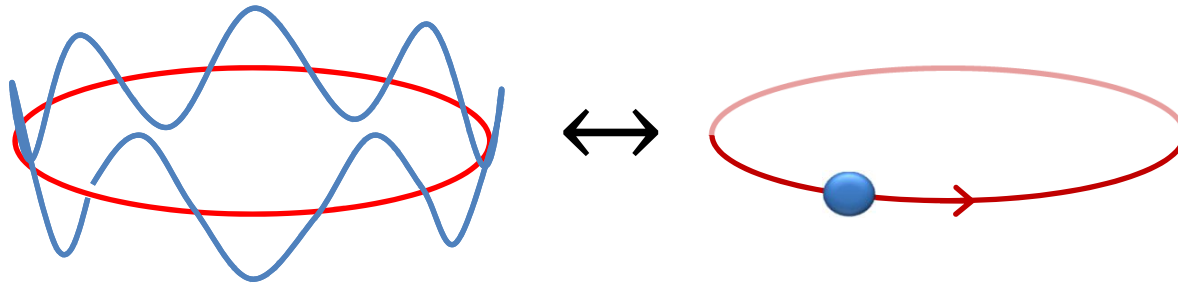
Nobel nel 1937 per
aver dimostrato
l'esistenza di
elettroni come
onde

avevano ragione
entrambi!



A. A.
2020-21
Università di Trieste

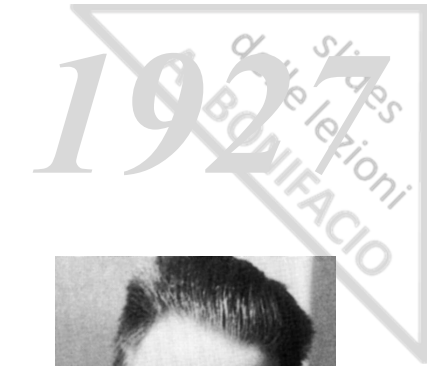
il principio di indeterminazione di Heisenberg



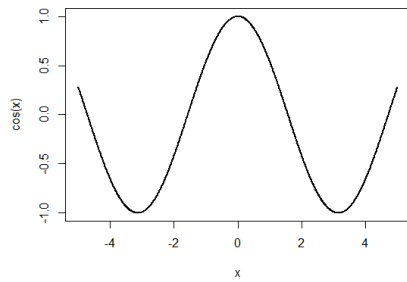
la descrizione dell'elettrone come onda non permette di conoscere con precisione la sua posizione

$$(\Delta x)(\Delta p) \geq \frac{h}{4\pi}$$

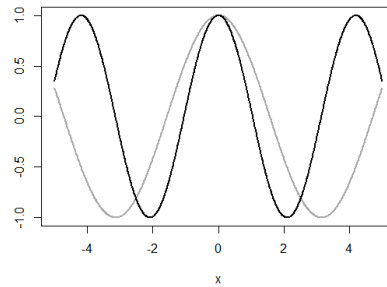
posizione x e velocità v non possono essere conosciuti simultaneamente con precisione infinita



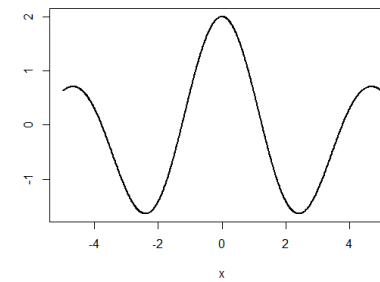
Fisica 1932



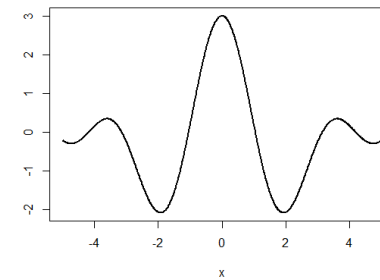
$$y = \cos(x)$$



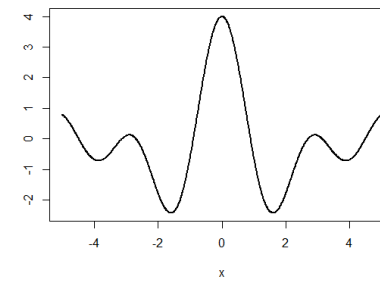
$$y = \cos(x) + \cos(2x)$$



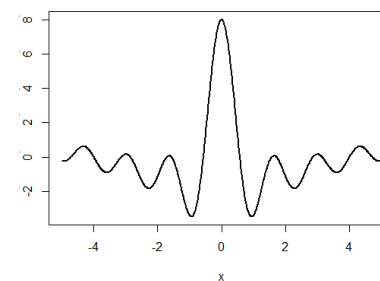
$$y = \cos(x) + \cos(2x) + \cos(3x)$$



$$y = \cos(x) + \cos(2x) + \cos(3x) + \cos(4x)$$

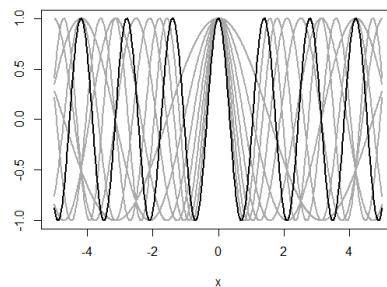
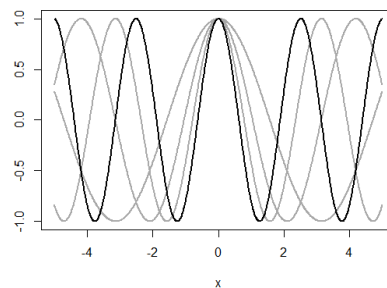
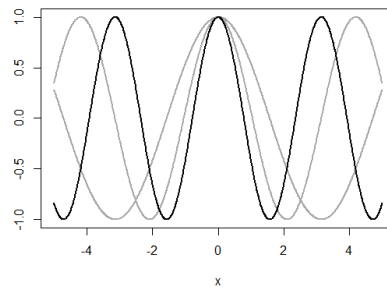


$$y = \cos(x) + \cos(2x) + \dots$$



somma
di onde

$$y = \sum_i \cos(i \cdot x)$$



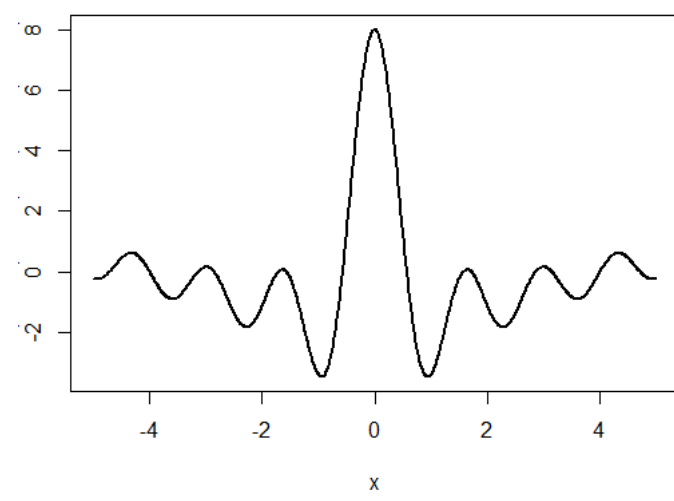
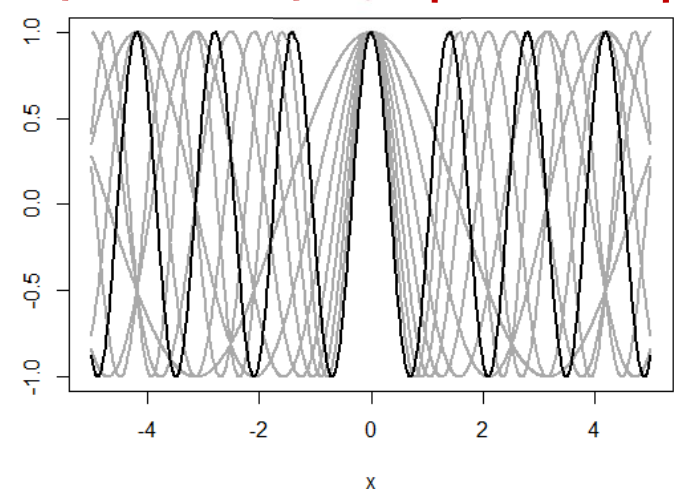
slides
delle lezioni
A. P. ONIFACIO

A. A. 2020-21
Università di Trieste

interferenza
costruttiva

interferenza
distruttiva

interferenza
distruttiva



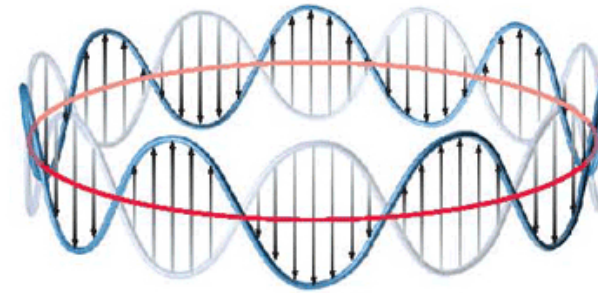
supponiamo onda \leftrightarrow probabilità!

slides
lezioni
FACIO

1 onda



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

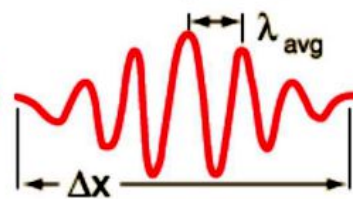
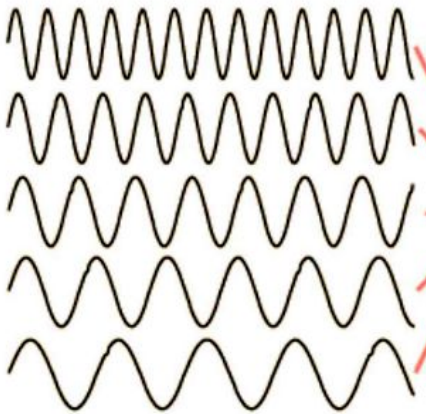


elettrone come 1 onda

$$\Delta x = \infty$$

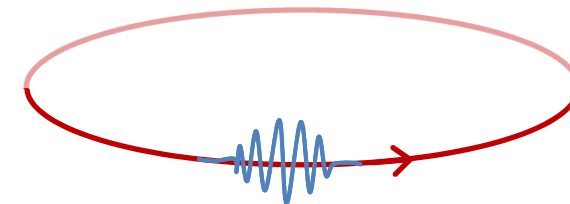
$$\Delta p = 0$$

somma
di più
onde



pacchetto d'onda
localizzato

$$p = ?$$

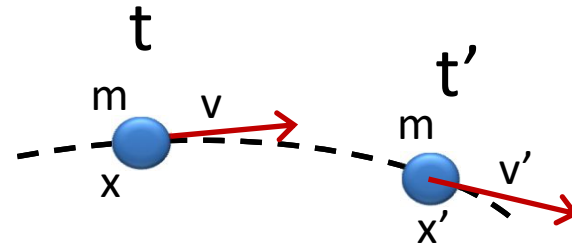


elettrone come somma di
più onde con diversi p

$$\Delta x = 0$$

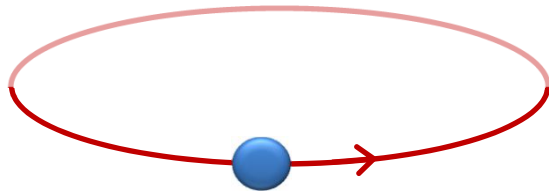
$$\Delta p = \infty$$

A.A.
2020-21
Università di Trieste



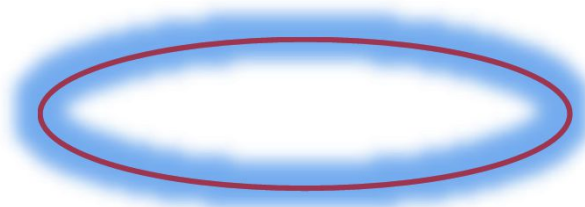
Meccanica Classica
dati m, x, v al tempo t la
traiettoria è nota

*descrizione
deterministica*



Il moto di un elettrone in un atomo
non si può descrivere con una
traiettoria definita (i.e. orbita)

*descrizione
probabilistica*



Il moto di un elettrone in un atomo si
deve descrivere definendo la
probabilità di trovare l'elettrone in
una certa regione dello spazio
attorno al nucleo, al tempo t
(i.e. *orbitale*)

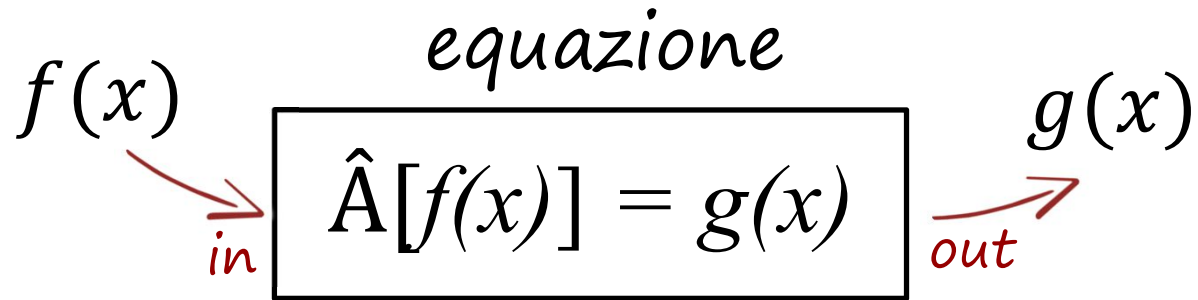
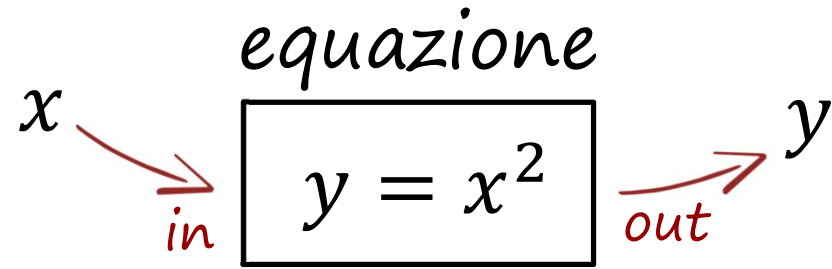
una parentesi matematica: gli operatori

un “**operatore**” è un simbolo che rappresenta una serie di operazioni, che applicate ad una funzione $f(x)$ generano un'altra funzione $g(x)$

$$f(x) \xrightarrow{\hat{A}} g(x)$$

$$\hat{A}: \hat{A}[f(x)] = g(x)$$

operatore	simbolo	definizione	effetto
moltiplicazione per una costante	\hat{C}	$c \cdot$	$\hat{C} [f(x)] = c \cdot f(x)$
elevazione al quadrato	\hat{Q}	$()^2$	$\hat{Q} [f(x)] = f(x)^2$
radice	\hat{R}	$\sqrt{()}$	$\hat{R} [f(x)] = \sqrt{f(x)}$
derivata	\hat{D}	$\frac{d}{dx}$	$\hat{D} [f(x)] = \frac{d f(x)}{dx}$



l'equazione di Schrödinger

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + V(x, y, z)$$

operatore
Hamiltoniano

energia

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

$\Psi(x, y, z)$



Fisica 1933

funzione d'onda

è un'onda associata alla mia particella
descrive completamente
lo **stato** della mia particella

$$|\Psi(x, y, z)|^2$$

significato fisico:
probabilità di trovare
la particella
nel punto (x,y,z)

Interpretazione probabilistica di Ψ

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

funzione
d'onda
di una
particella

NON HA
SENSO
FISICO

→ Ψ

→ $|\Psi|^2$

densità di
probabilità
di trovare
una particella

Max Born
(1882–1970)

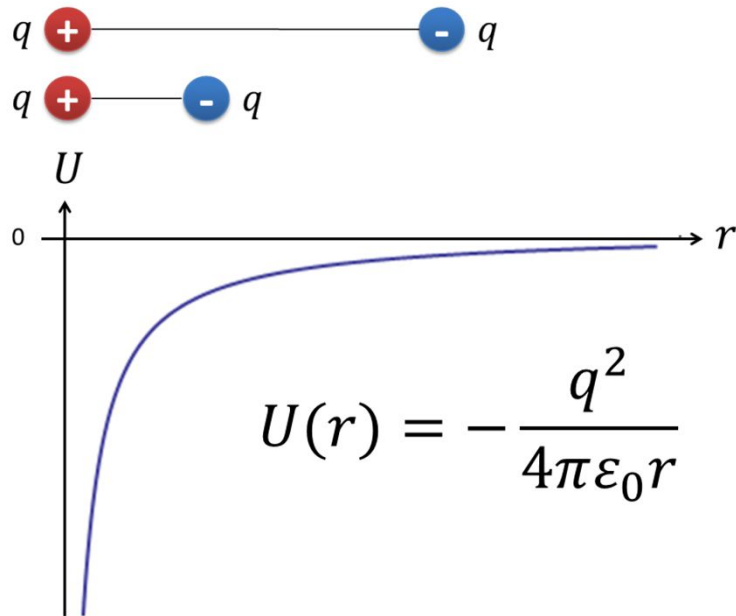


Fisica 1954

A. A.
2020-21
Università di Trieste

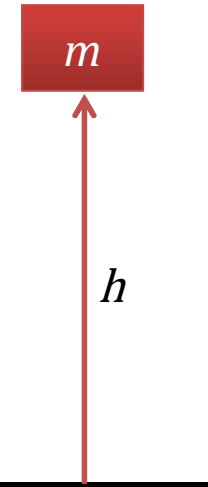
una parentesi fisica: il potenziale

energia potenziale *energia posseduta da un corpo in virtù della sua posizione (o configurazione)*



$$U(r) = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$U(h) = mgh$$



potenziale \longleftrightarrow forze

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = F(x)$$

Equazione di Schrödinger per una particella

 \hat{H}

operatore
Hamiltoniano

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) + V(x, y, z)$$

massa
particella

potenziale
(forze)

↑
informazioni su come
è fatto il sistema
(particella e forze alle
quali è soggetta)

↑
massa
particella

↑
energia
potenziale
particella

Equazione di Schrödinger per una particella

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

\hat{H}
operatore
Hamiltoniano

↑
informazioni su come
è fatto il sistema
(particella e forze alle
quali è soggetta)

↑
massa
particella

↑
energia
potenziale
particella

IN

OUT

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

(black box)

numeri
(energie)

E

Ψ

funzioni
(funzioni
d'onda)

↓
tutte le informazioni
su come si comporta
particella
(probabilità)

A. A. 2020/21
Università di Trieste

“equazione ad autovalori”

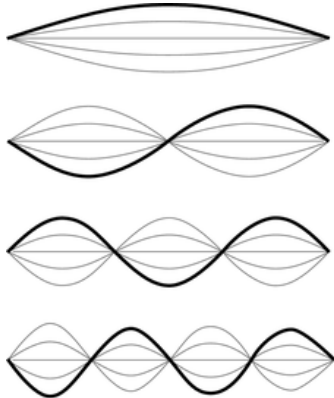
$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

stati stazionari

sono possibili solo
determinate soluzioni
dell’equazione, aventi valori
discreti di energia

quantizzazione

- $\Psi(x, y, z)_1, E_1$
- $\Psi(x, y, z)_2, E_2$
- $\Psi(x, y, z)_3, E_3$
- (...)
- $\Psi(x, y, z)_n, E_n \quad n=1,2,3,\dots$



in analogia con
onde stazionarie

la quantizzazione è una
naturale conseguenza
dell’equazione di Schödinger

Equazioni di Schrödinger

*equazione
generale*

$$\hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi$$

$$\Psi(x, y, z, t)$$

*la funzione d'onda
cambia
nel tempo*

*si può
derivare*

→

*equazione
per
stati stazionari*

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

$$\Psi(x, y, z)$$

*la funzione d'onda
NON cambia
nel tempo*

equazione di Schödinger
dipendente dal tempo

$$\hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi$$



leggi del moto
meccanica classica

$$F = m \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} \quad (F = ma)$$

$$\Psi(x, y, z, t)$$

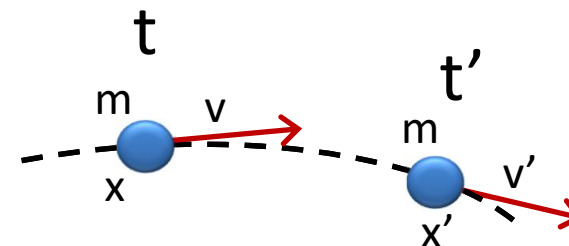
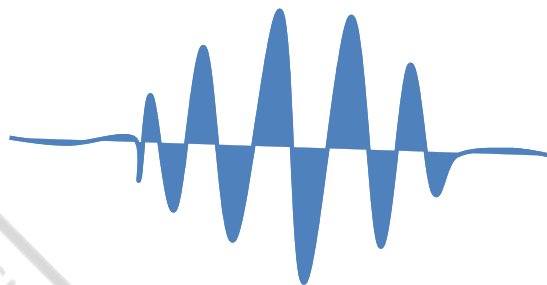
$$q(x, y, z, t)$$

funzione d'onda

descrizione probabilistica
probabilità di trovare la particella
alla posizione (x,y,z)
conosciuta ad ogni tempo t

traiettoria

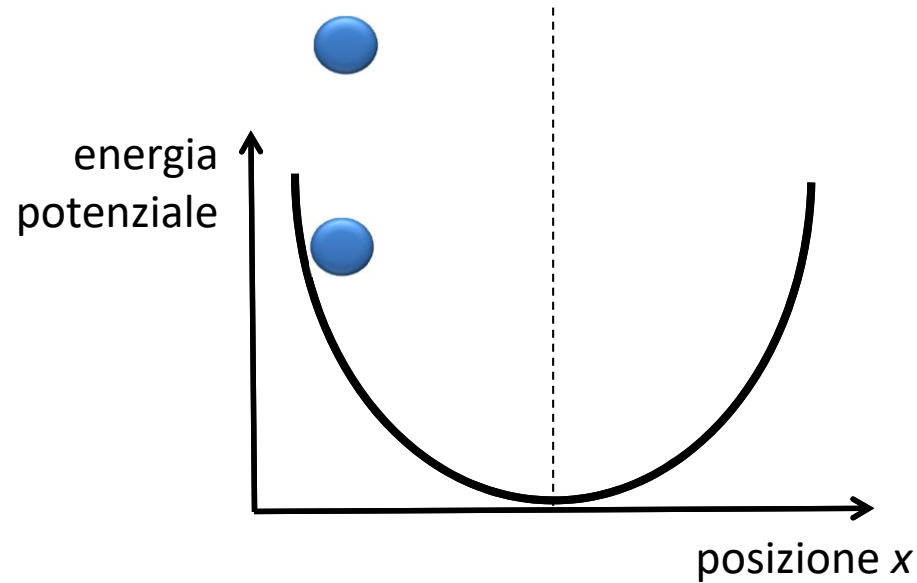
descrizione deterministica
posizione (x,y,z)
conosciuta ad ogni tempo t



**meccanica
classica**

$$F = m \frac{\partial^2 q}{\partial t^2}$$

$$q(x, y, z, t)$$



slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

**meccanica
quantistica**

$$\hat{H}\Psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi$$

$$\Psi(x, y, z, t)$$



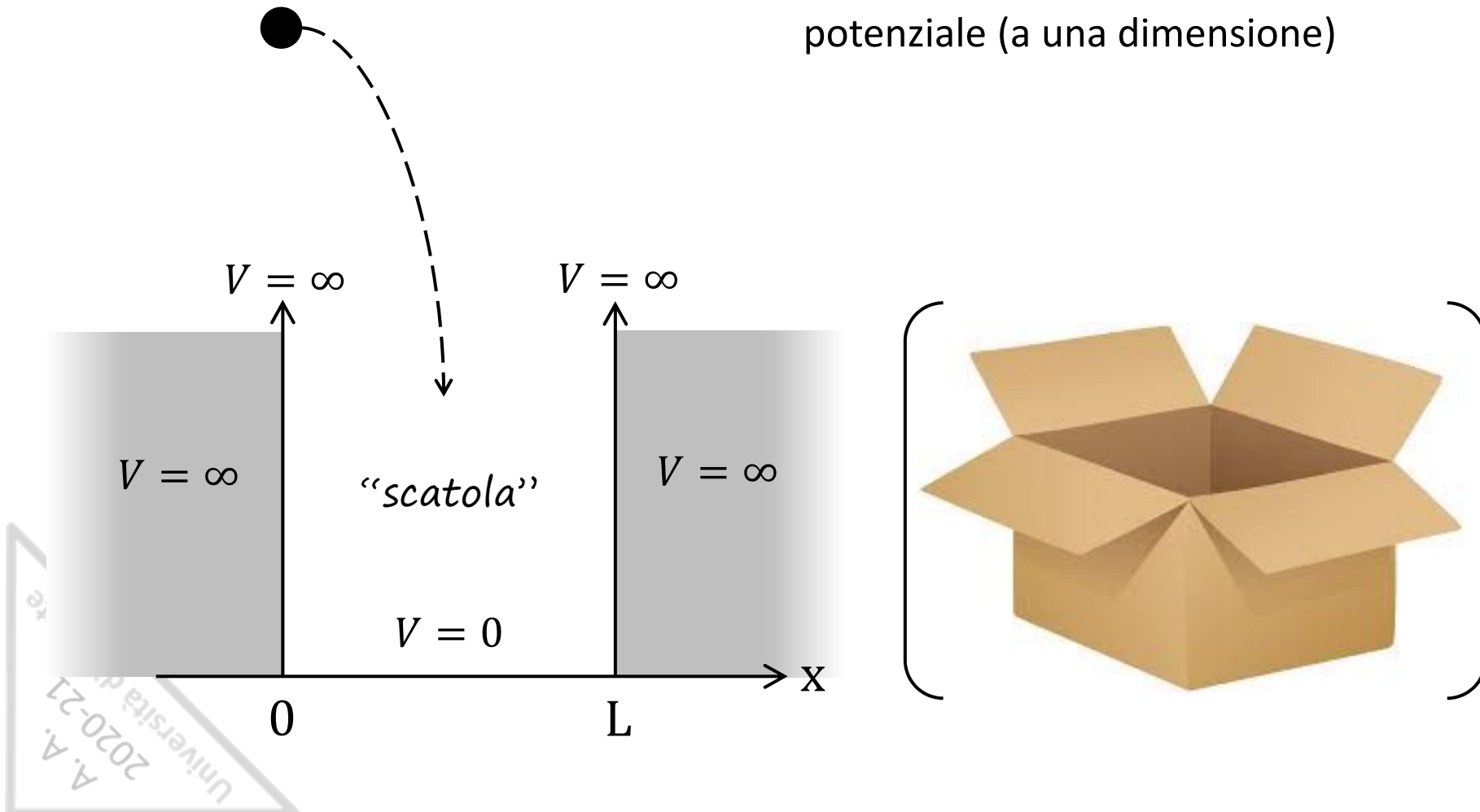
corrispettivo meccanica
quantistica

A. A.
2020-21
Università di Trieste

un esempio: una particella in una "scatola"

particella
(es. elettrone)

descrizione di una particella
confinata in una "scatola" di
potenziale (a una dimensione)



un esempio: una particella in una "scatola"

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

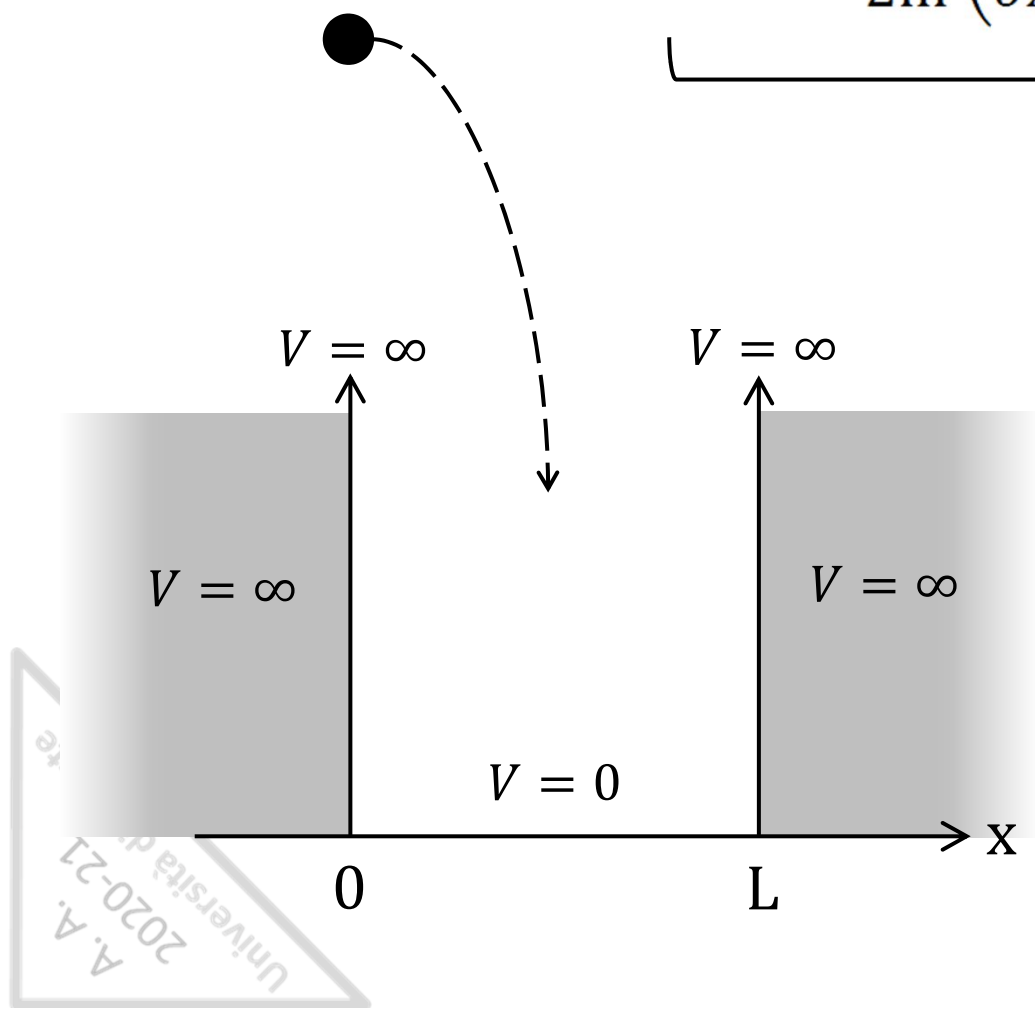
$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \cancel{\frac{\partial^2}{\partial y^2}} + \cancel{\frac{\partial^2}{\partial z^2}} \right) + V(x, y, z)$$

$\left(\hbar = \frac{h}{2\pi} \right)$

$V = 0$
 \downarrow

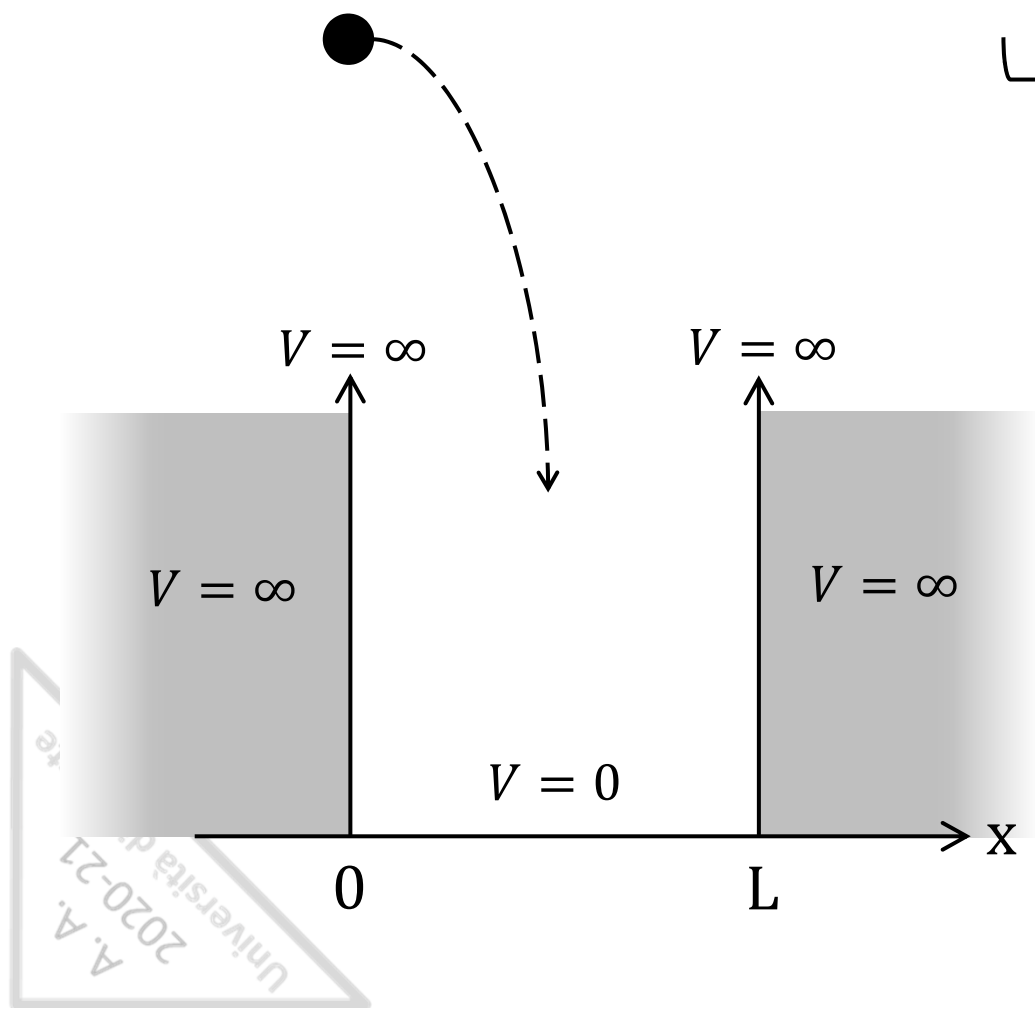
$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

\uparrow \uparrow
 $\Psi(x)$ $\Psi(x)$



A.A. 2020-21
Università di...

un esempio: una particella in una “scatola”



$$\underbrace{\frac{h^2}{8\pi^2 m} \frac{d^2}{dx^2}}$$

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$



$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = E\psi(x)$$

equazione di
Schrödinger per una
particella in una scatola
(molto più semplice!)

un esempio: una particella in una “scatola”

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = E \psi(x)$$

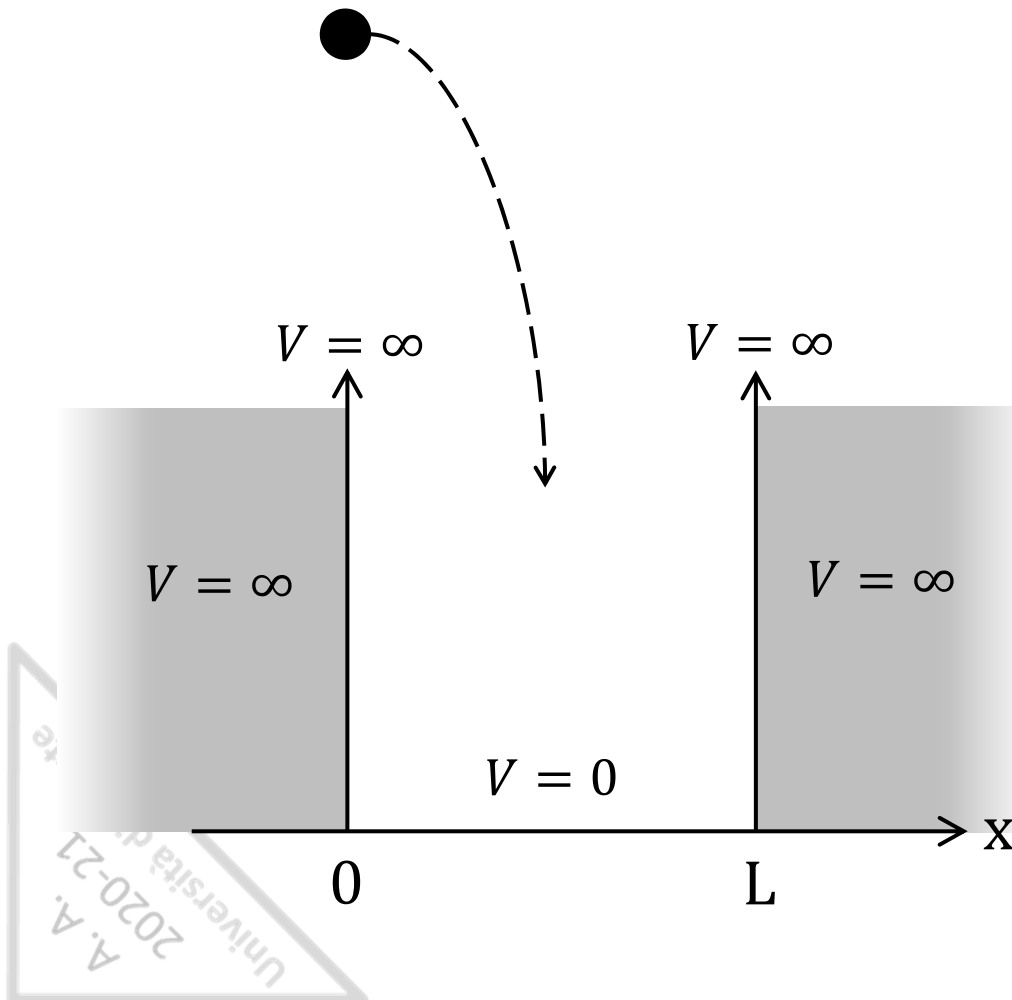


$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2 m E}{h^2} \psi(x)$$

*equazione differenziale del
secondo ordine a una
variabile*

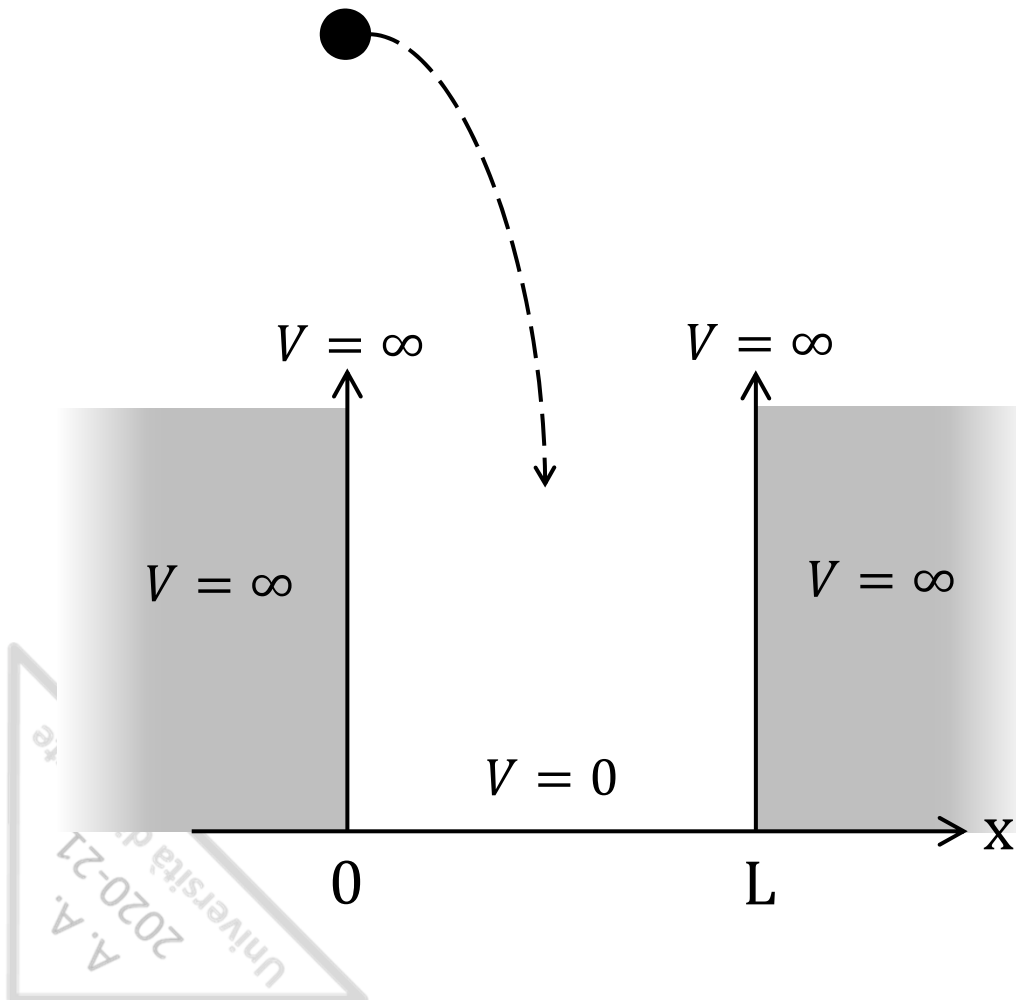
*quali funzioni
sono soluzioni?*

$$\psi(x) = A \sin(kx)$$
$$\psi(x) = B \cos(kx)$$



un esempio: una particella in una "scatola"

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2mE}{h^2} \psi(x)$$



$$\psi(x) = A \sin(kx)$$

$$\downarrow \frac{d}{dx}$$

$$\frac{d\psi(x)}{dx} = A k \cos(kx)$$

$$\downarrow \frac{d}{dx}$$

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -A k^2 \sin(kx)$$

||

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -k^2 \psi(x)$$

vale anche per
A cos(kx)

un esempio: una particella in una "scatola"

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2mE}{h^2} \psi(x)$$

$$\psi(x) = A \sin(kx)$$

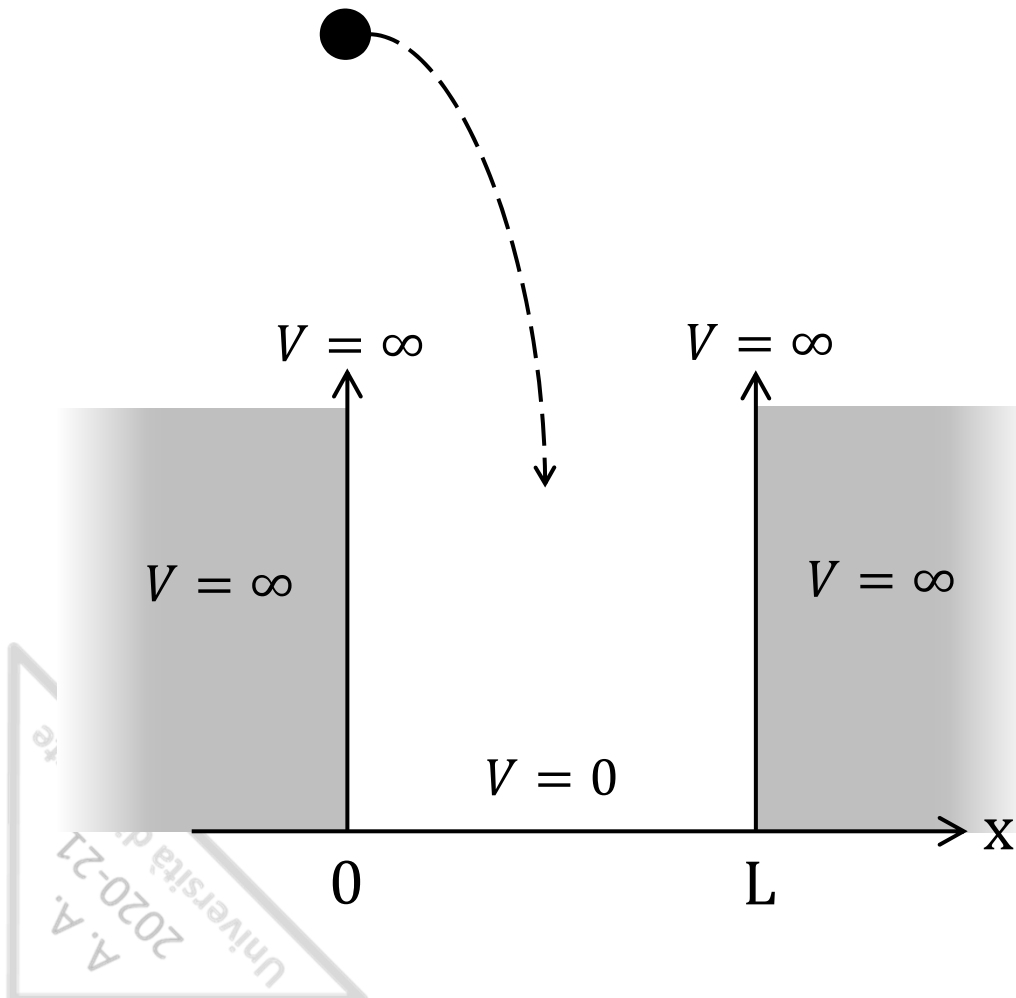
$$\psi(x) = B \cos(kx)$$

*possibili soluzioni
(infinite)*

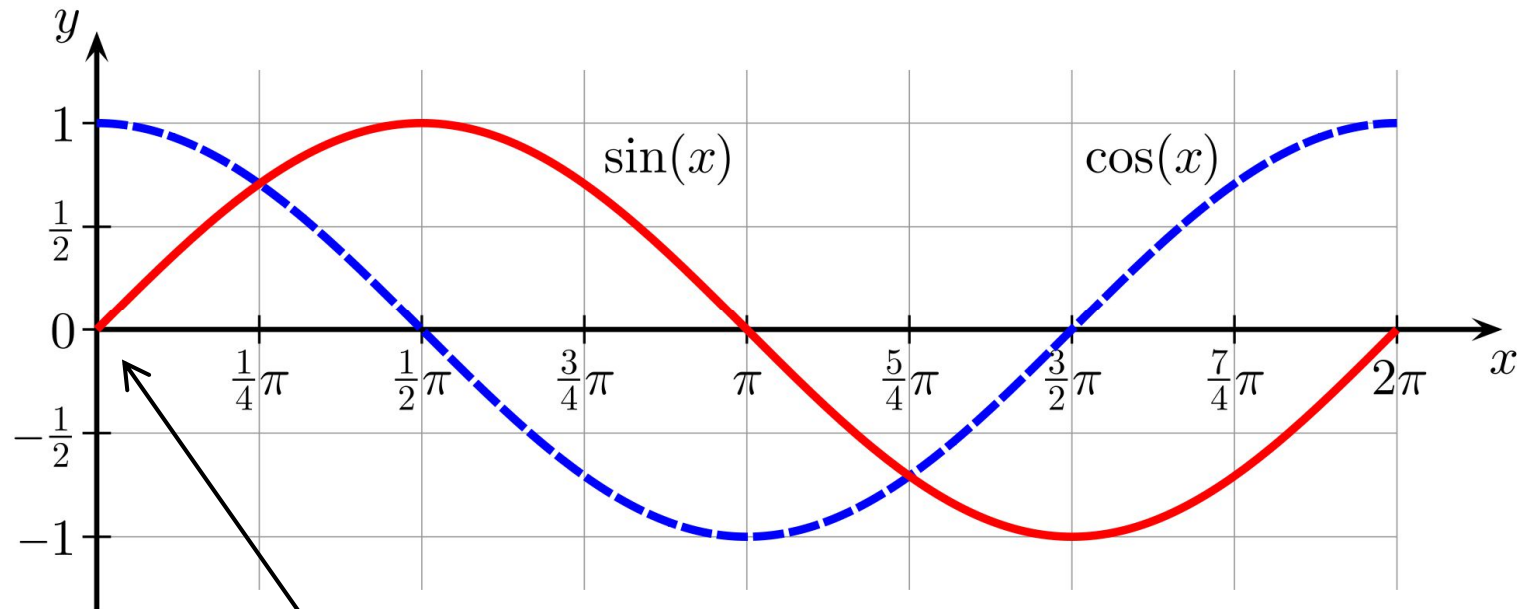
*condizione
al contorno*

$$\psi(0) = 0$$

?



funzioni seno e coseno



*solo funzione
seno soddisfa la
condizione*

$$\psi(0) = 0$$

un esempio: una particella in una "scatola"

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2mE}{h^2} \psi(x)$$

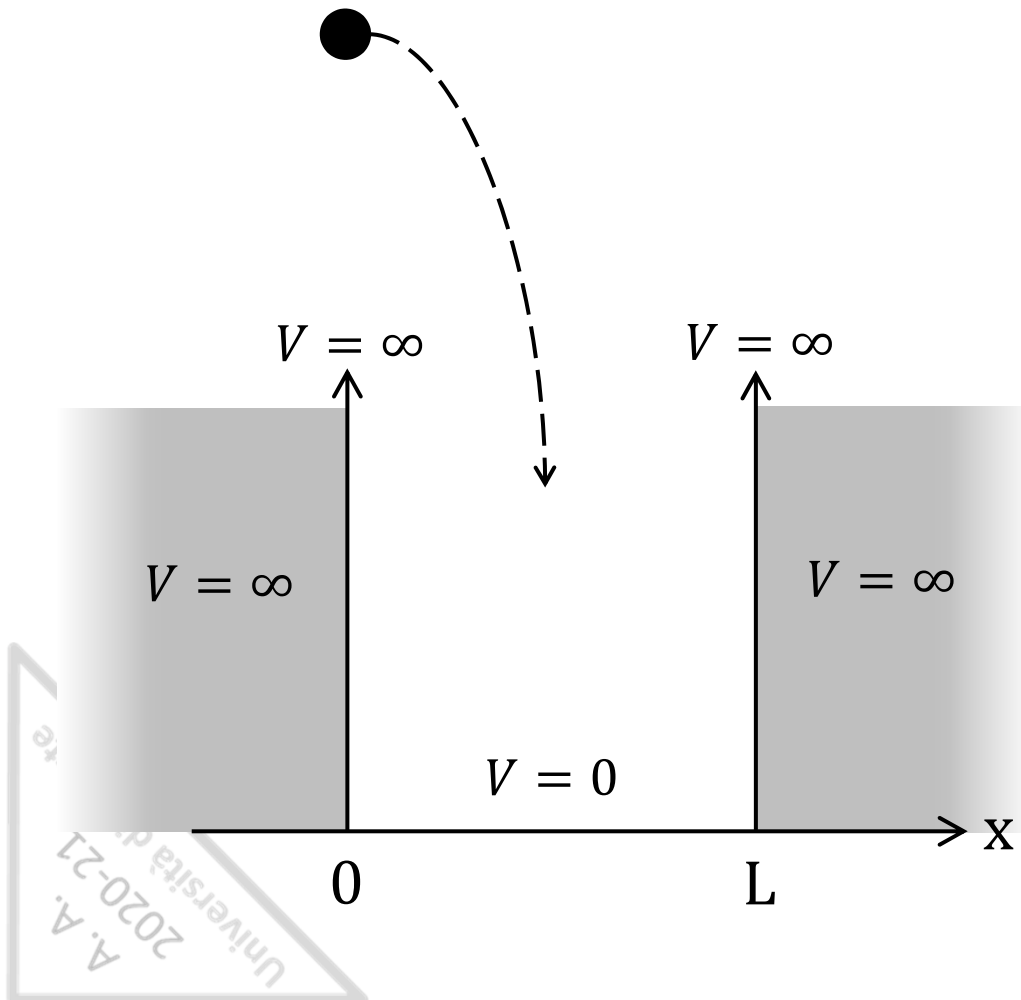
$$\psi(x) = A \sin(kx)$$

$$\psi(x) = B \cos(kx)$$

*possibili soluzioni
(infinite)*

*condizione
al contorno* \downarrow $\psi(0) = 0$

$$\psi(x) = A \sin(kx)$$



un esempio: una particella in una "scatola"

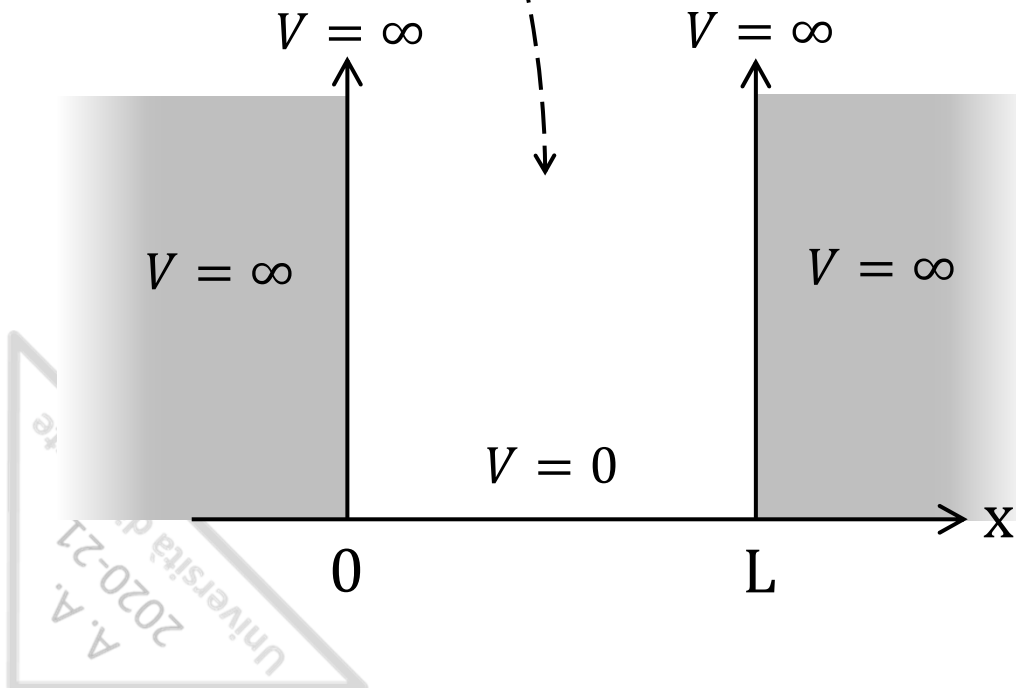
$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2mE}{h^2} \psi(x)$$

$$\psi(x) = A \sin(kx)$$

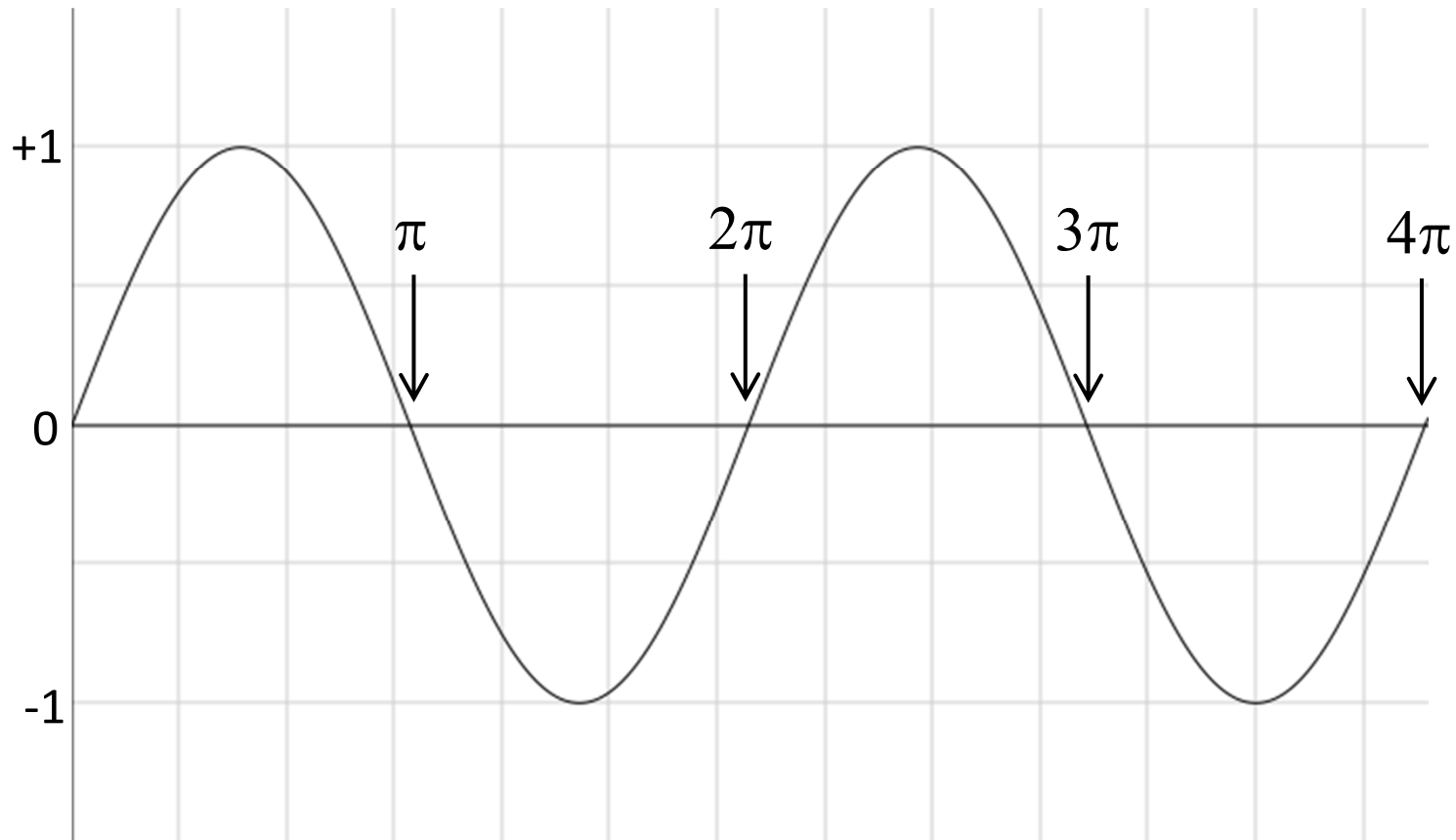
*possibili soluzioni
(infinite)*

*condizione
al contorno*

$$\psi(L) = 0$$



la funzione seno



$A \sin(kL) = 0$ *vero per* $kL = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$

ossia

$$kL = n\pi \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

un esempio: una particella in una "scatola"

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2mE}{h^2} \psi(x)$$

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

$$\psi(x) = A \sin(kx)$$

*possibili soluzioni
(infinite)*

*condizione
al contorno*

$$\psi(L) = 0$$

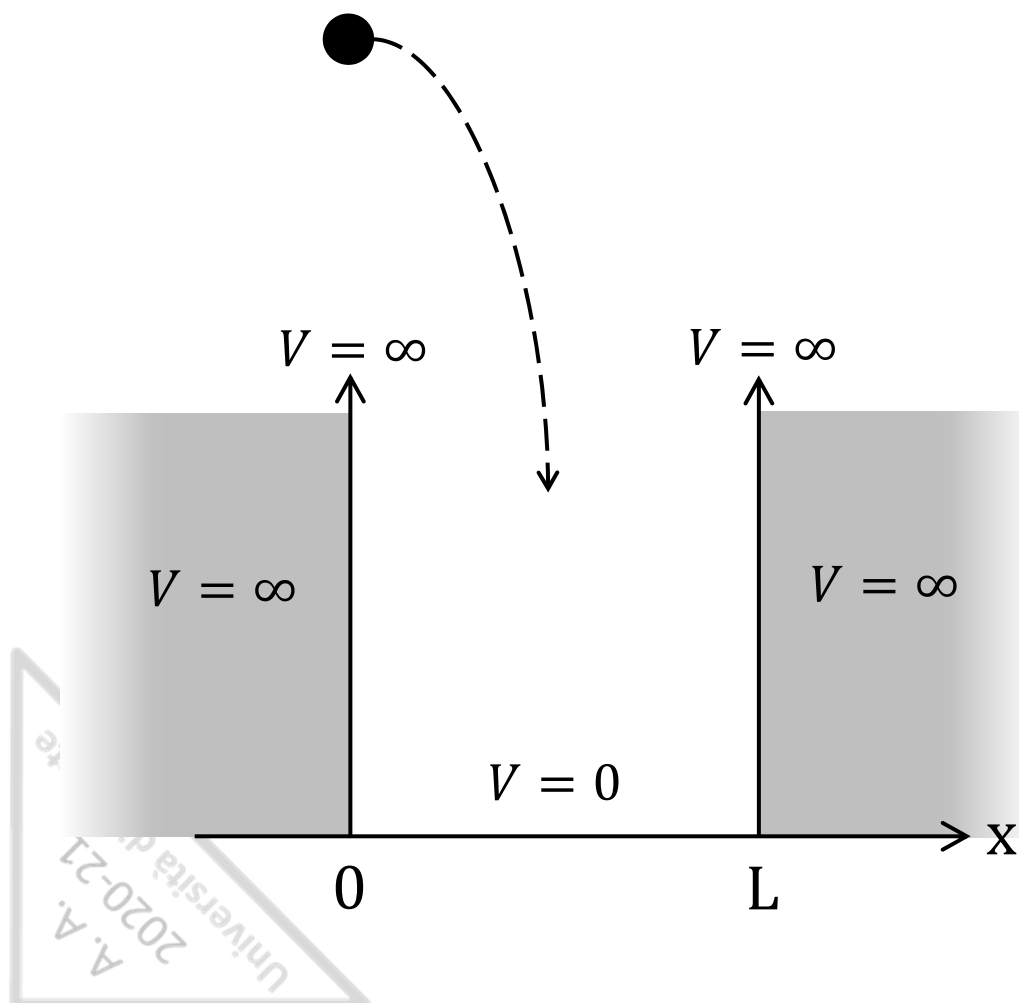
$$A \sin(kL) = 0$$

$$kL = n\pi$$

$$\psi(x) = A \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

quantizzazione!!!



A. A. Università di
2020-21

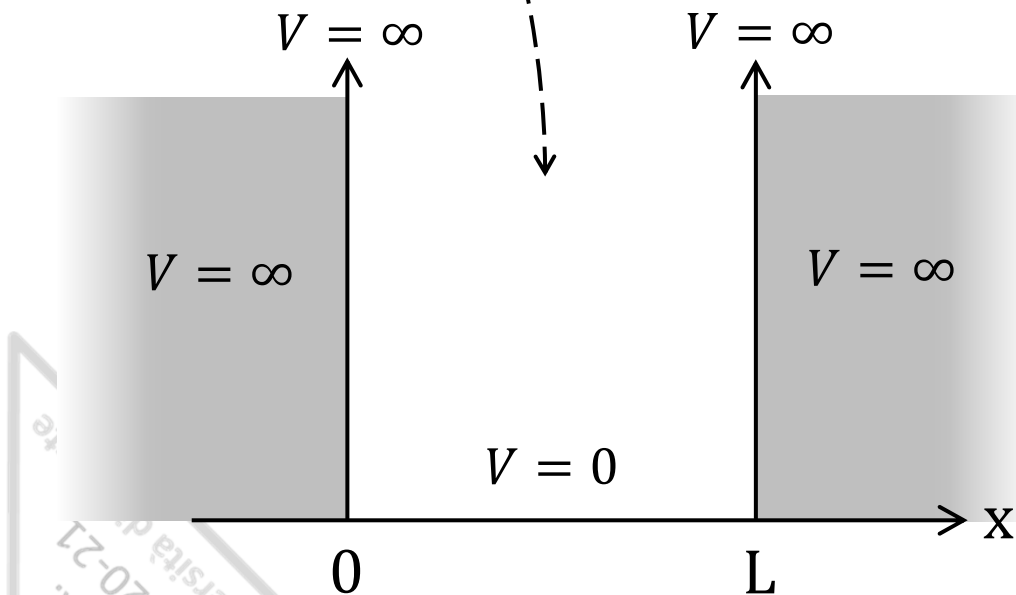
un esempio: una particella in una "scatola"

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2mE}{h^2} \psi(x)$$

$$\psi(x) = A \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

*condizione
al contorno*

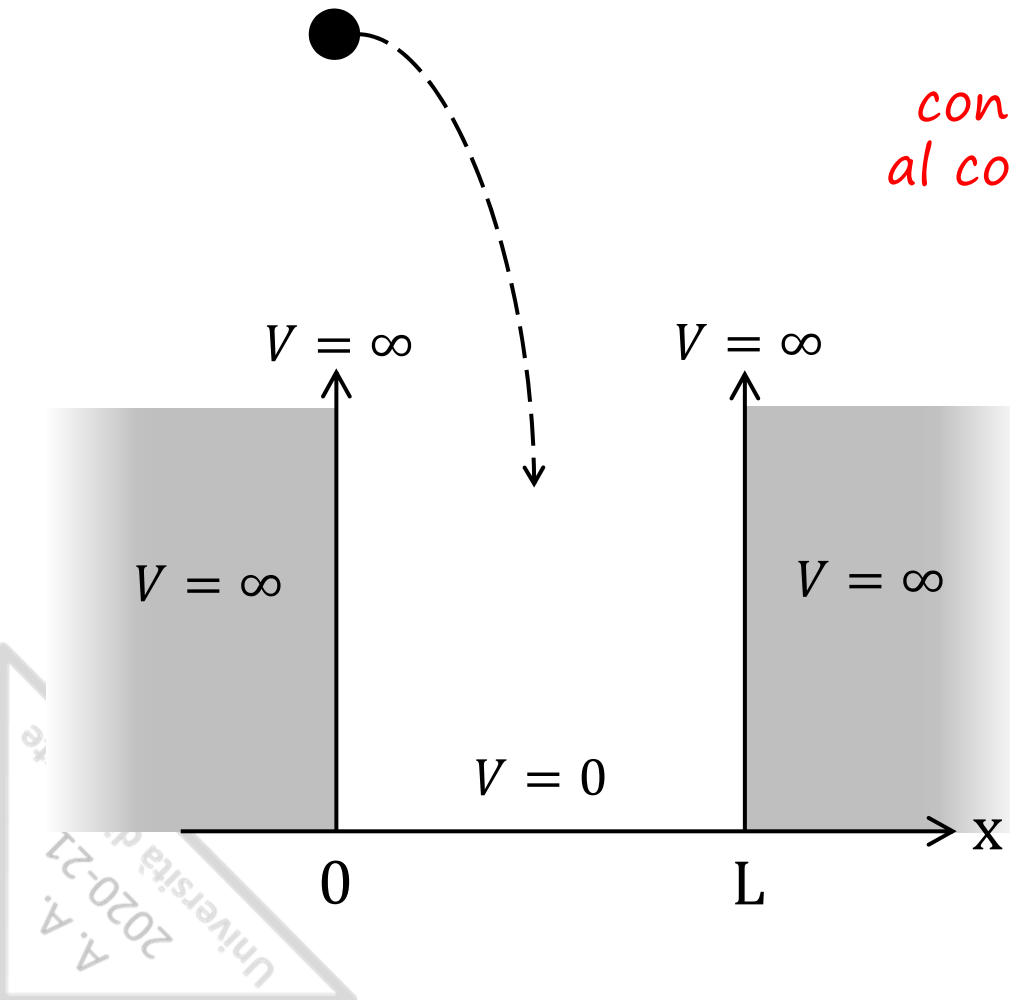
*certezza di trovare la
particella tra 0 ed L*



un esempio: una particella in una "scatola"

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2mE}{h^2} \psi(x)$$

$$\psi(x) = A \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$



*condizione
al contorno*

$$\int_0^L |\psi(x)|^2 dx = 1$$

$$A^2 \int_0^L \sin^2\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx = 1$$

$$\frac{L}{2} A^2 \frac{L}{2} = 1$$

$$A = \sqrt{\frac{2}{L}}$$

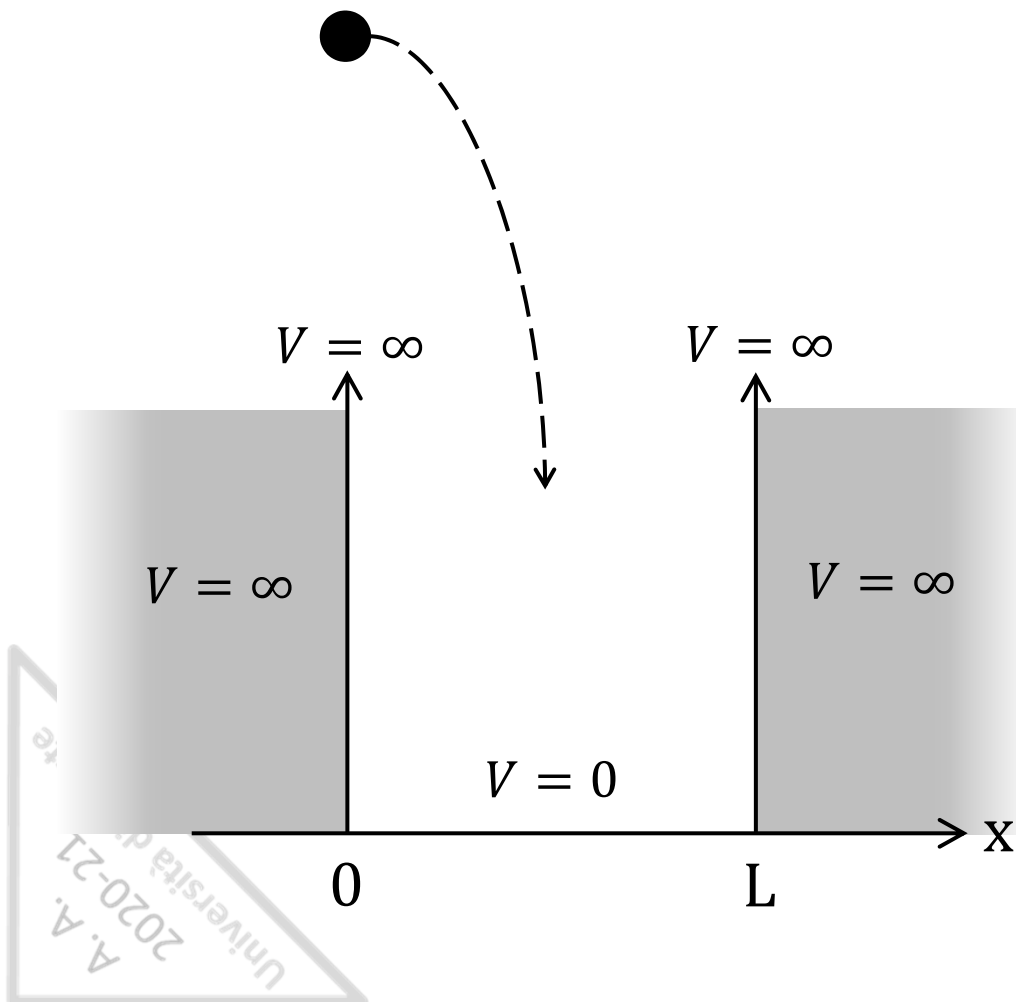
$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

un esempio: una particella in una "scatola"

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2mE}{h^2} \psi(x)$$

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

*funzioni d'onda per la
particella
(che soddisfano le
condizioni al contorno)*



un esempio: una particella in una "scatola"

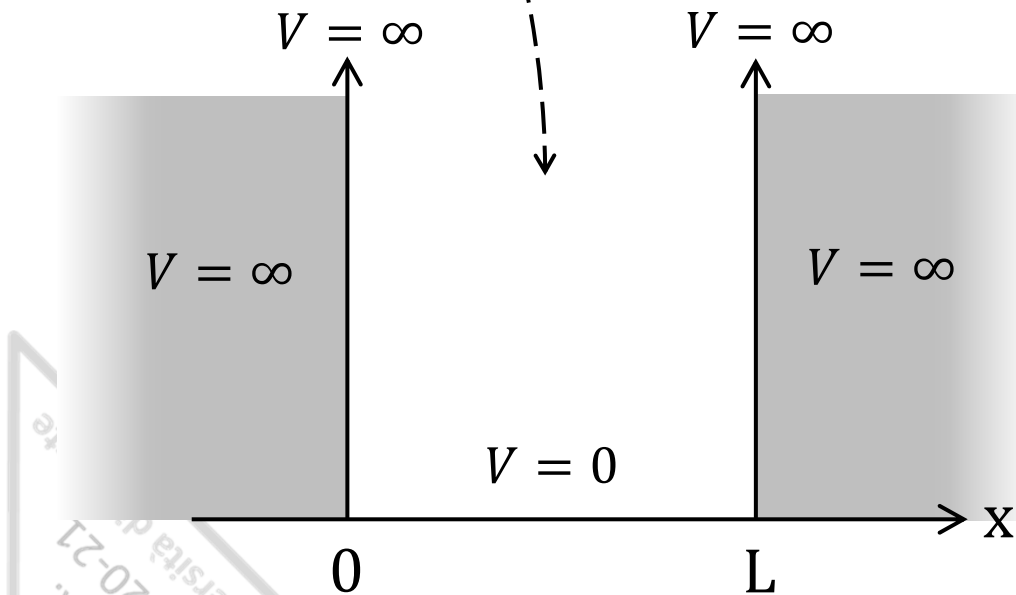
$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2mE}{h^2} \psi(x)$$

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

$$\hat{H}\psi = E\psi$$



...e l' energia?



un esempio: una particella in una "scatola"

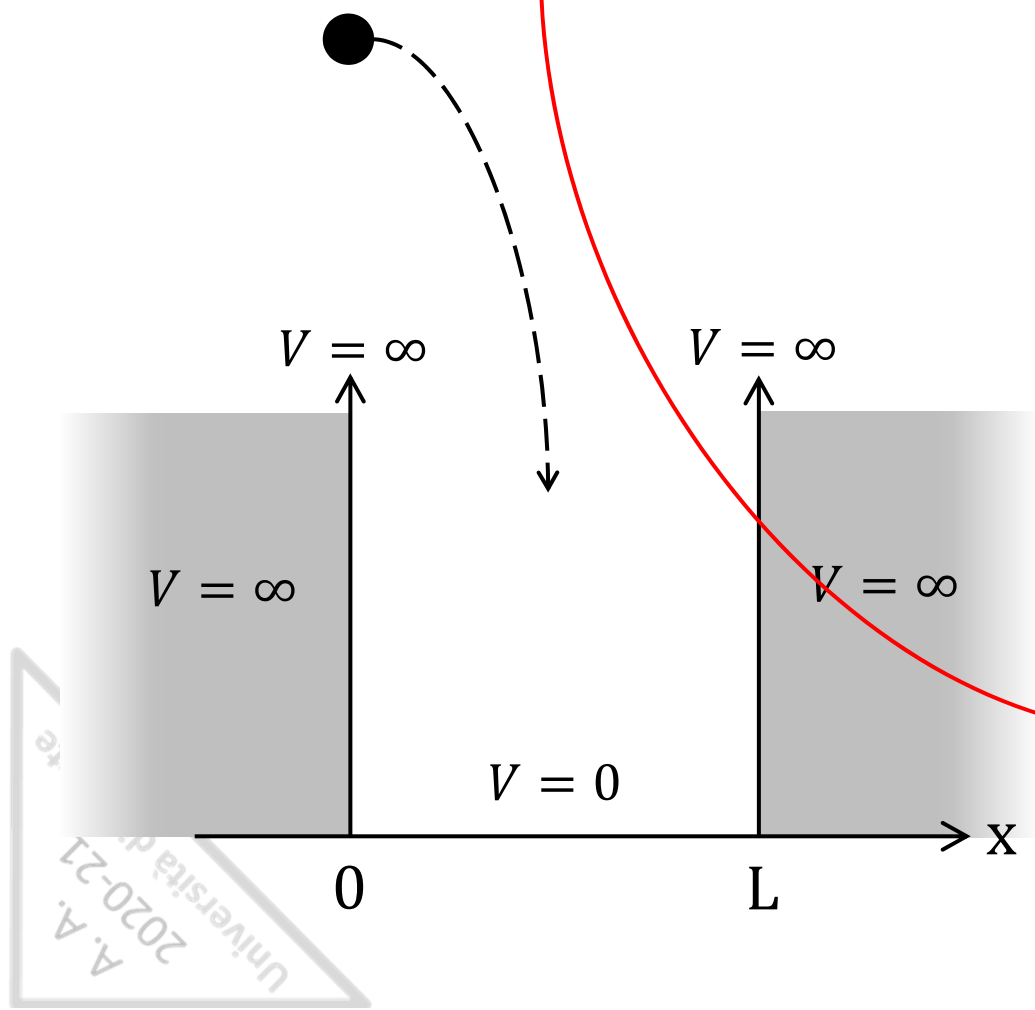
$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2mE}{h^2} \psi(x)$$

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = \frac{d^2}{dx^2} \left[\sqrt{\frac{2}{L}} \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \right]$$

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \left[\sqrt{\frac{2}{L}} \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \right]$$

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \psi(x)$$



un esempio: una particella in una "scatola"

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

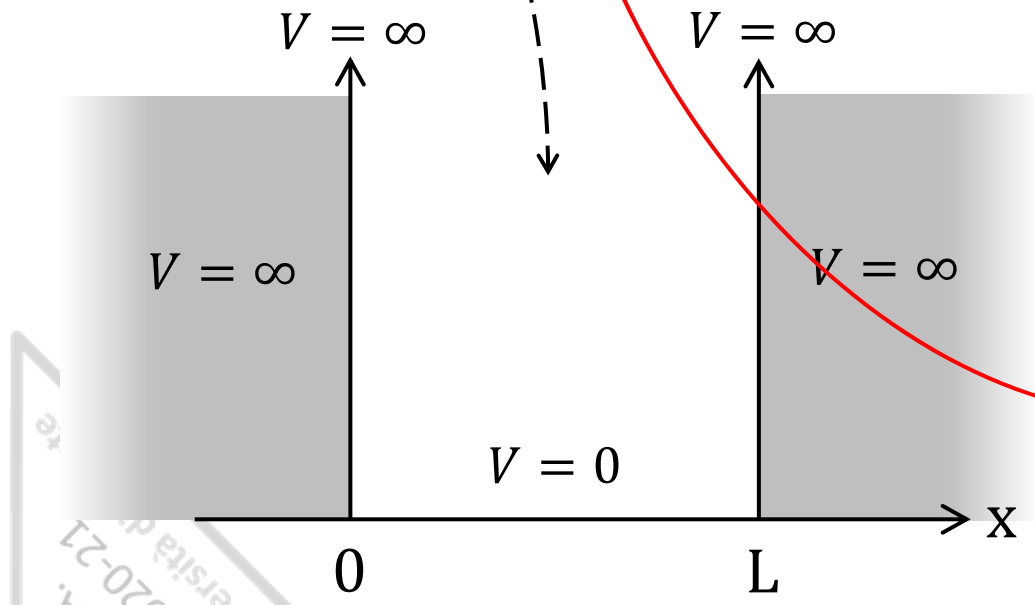
$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{8\pi^2 m E}{h^2} \psi(x)$$

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \text{sen}\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

*anche energia
è quantizzata*

$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

$n = 1, 2, 3, \dots$



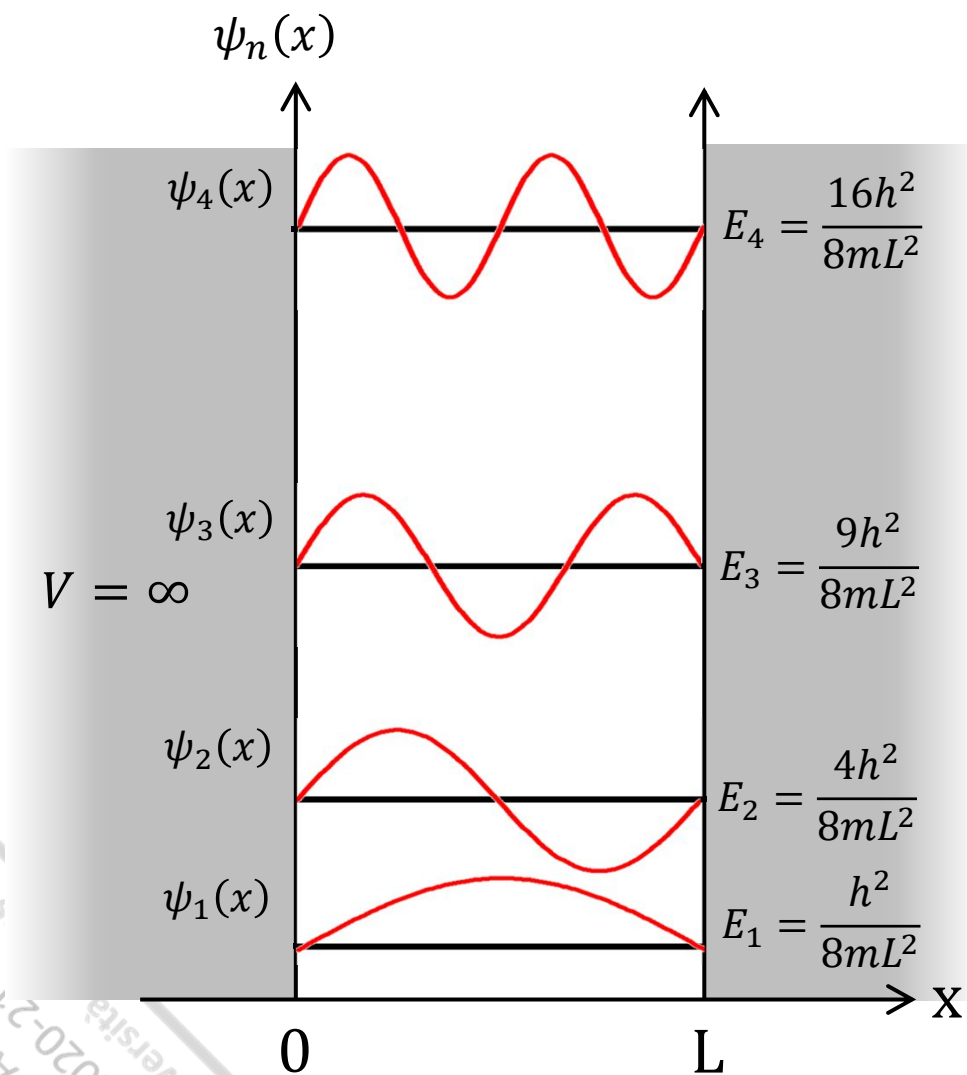
$$\frac{8\pi^2 m E}{h^2} = \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2$$

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \psi(x)$$

A.A. Università di
2020-21

un esempio: una particella in una "scatola"

valore della
funzione d'onda

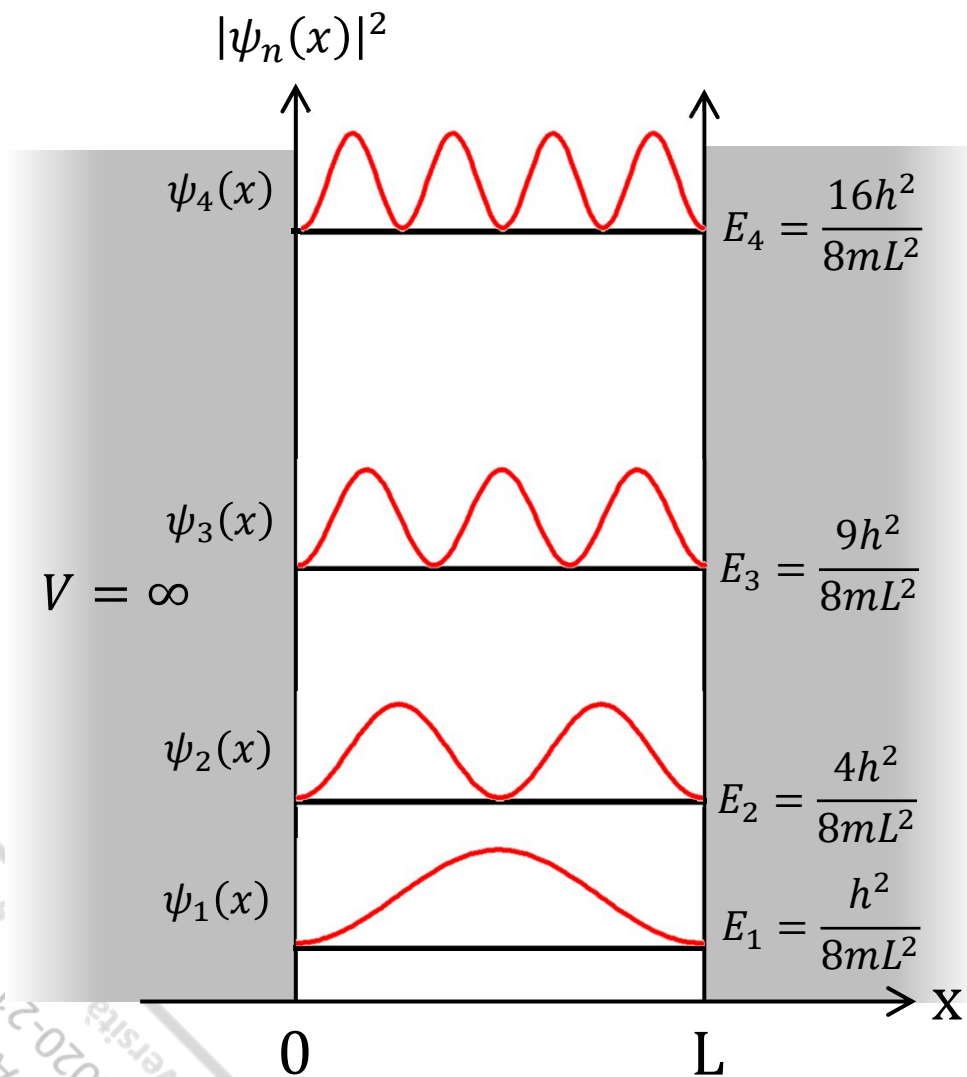


$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \text{sen} \left(\frac{n\pi x}{L} \right)$$

$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

un esempio: una particella in una "scatola"

probabilità di osservare la particella

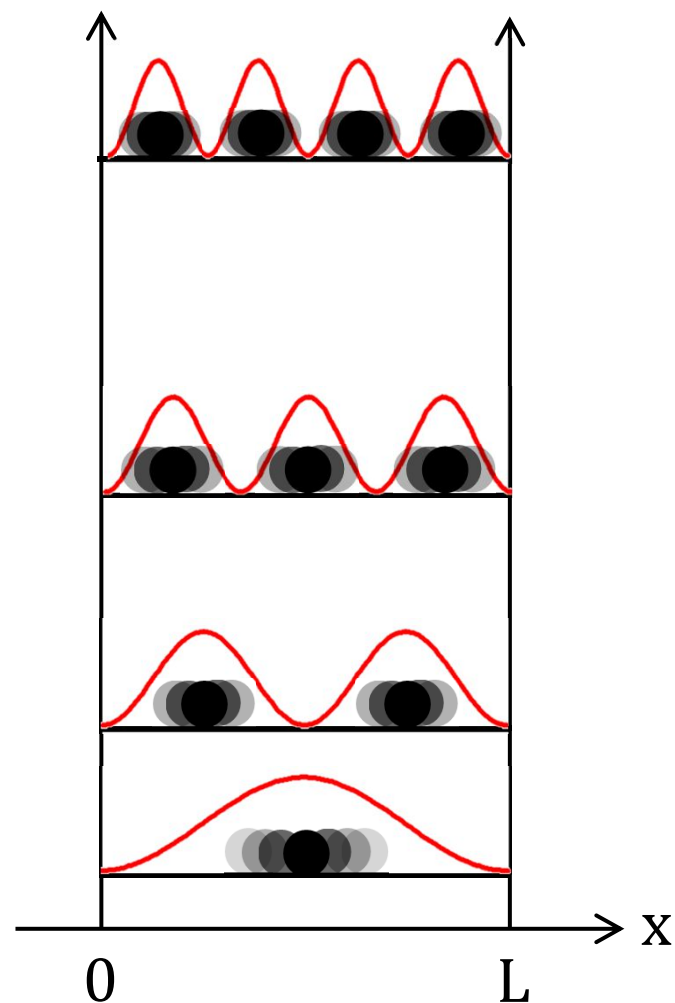
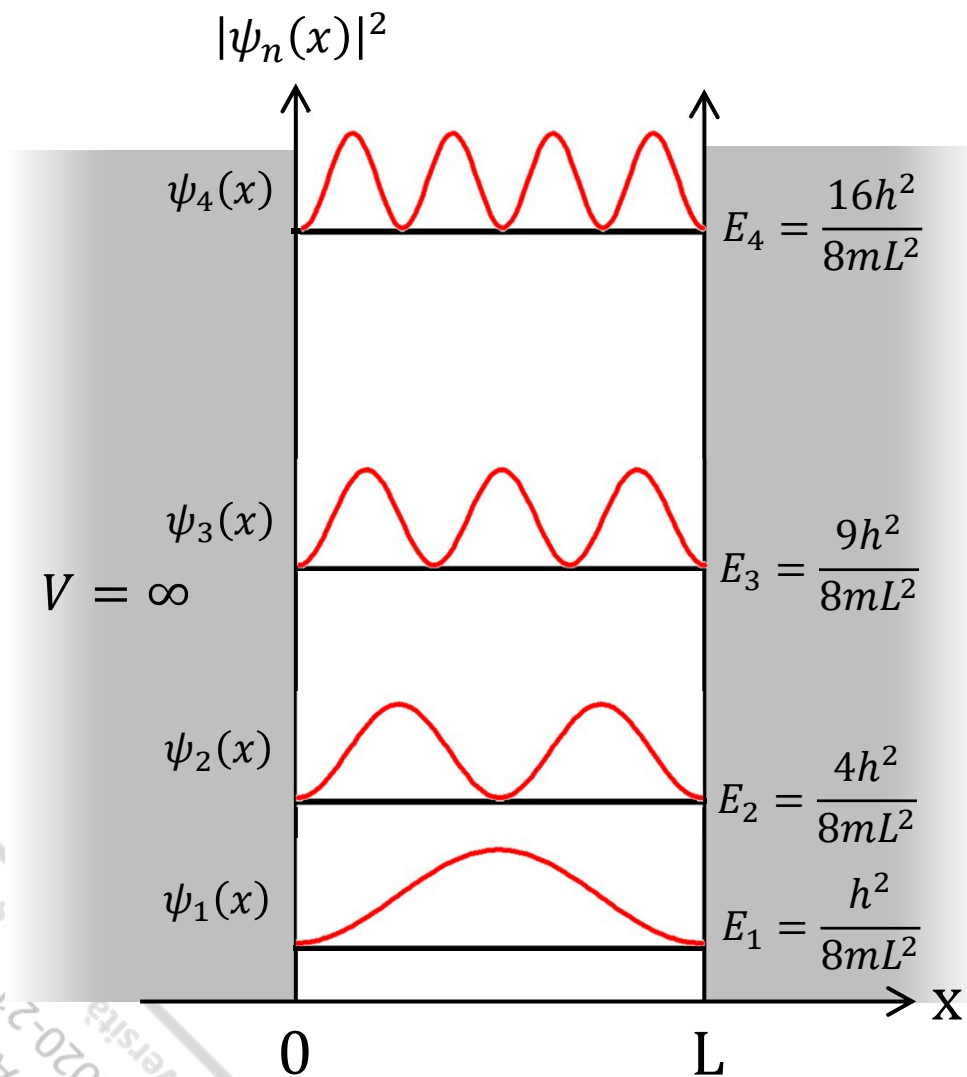


$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \text{sen} \left(\frac{n\pi x}{L} \right)$$

$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8mL^2}$$

un esempio: una particella in una "scatola"

probabilità di osservare la particella



slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

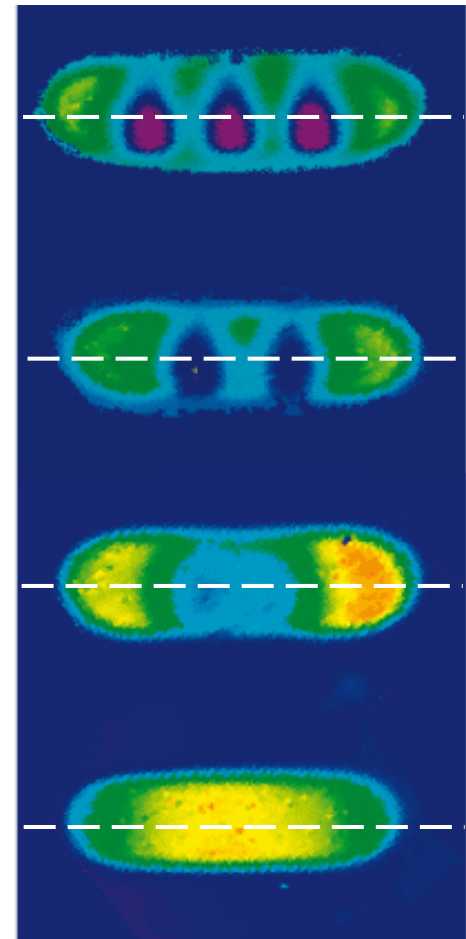
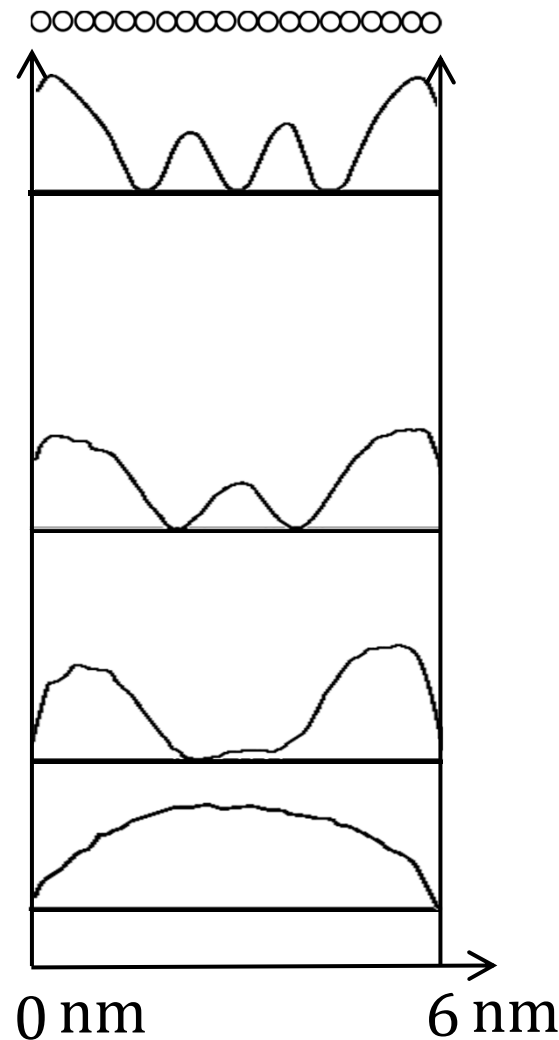
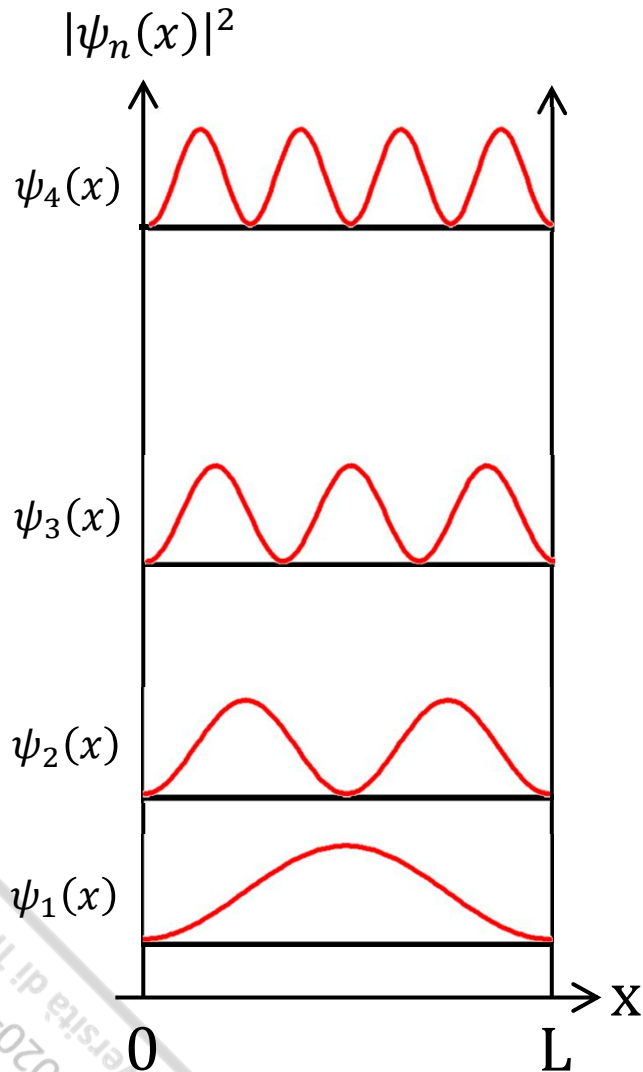
A.A. 2020-21
Università
ste

un esempio: una particella in una "scatola"

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

probabilità di
osservare la particella

probabilità misurata con STM su stati
elettronici di una catena lineare Pd₂₀



(Niluis, Wallis, Ho,
J.Phys.Chem B 2005, 109, 20657)

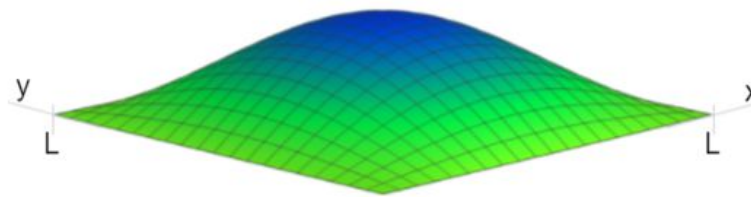
A.A. Università di Trieste
2020-21

la particella nella scatola in 2 dimensioni

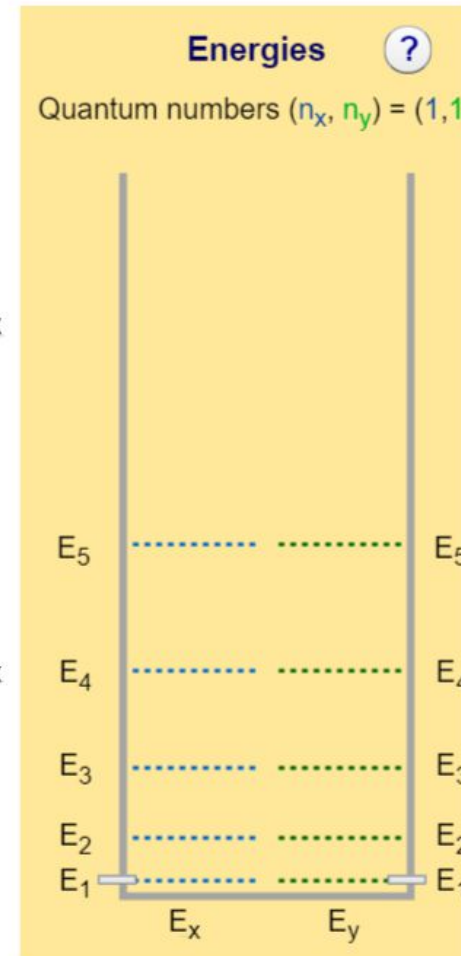
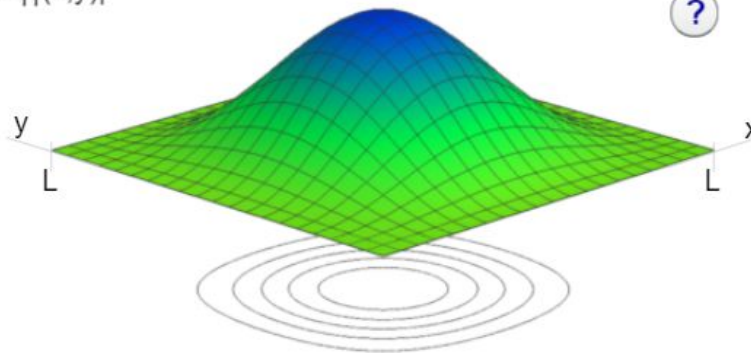
$$\psi_{n_x n_y}(x, y) = \psi_{n_x}(x)\psi_{n_y}(y) = \frac{2}{L} \text{sen} \left(\frac{n_x \pi x}{L} \right) \text{sen} \left(\frac{n_y \pi y}{L} \right)$$

2 numeri
quantici

$\Psi_{11}(x,y)$



$|\Psi_{11}(x,y)|^2$



slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

A.A. 2020-21
Università di Trieste

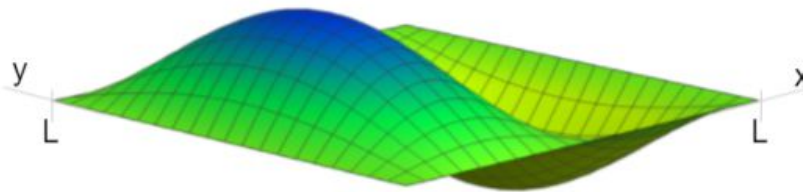
la particella nella scatola in 2 dimensioni

$$\psi_{n_x n_y}(x, y) = \psi_{n_x}(x)\psi_{n_y}(y) = \frac{2}{L} \text{sen} \left(\frac{n_x \pi x}{L} \right) \text{sen} \left(\frac{n_y \pi y}{L} \right)$$

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

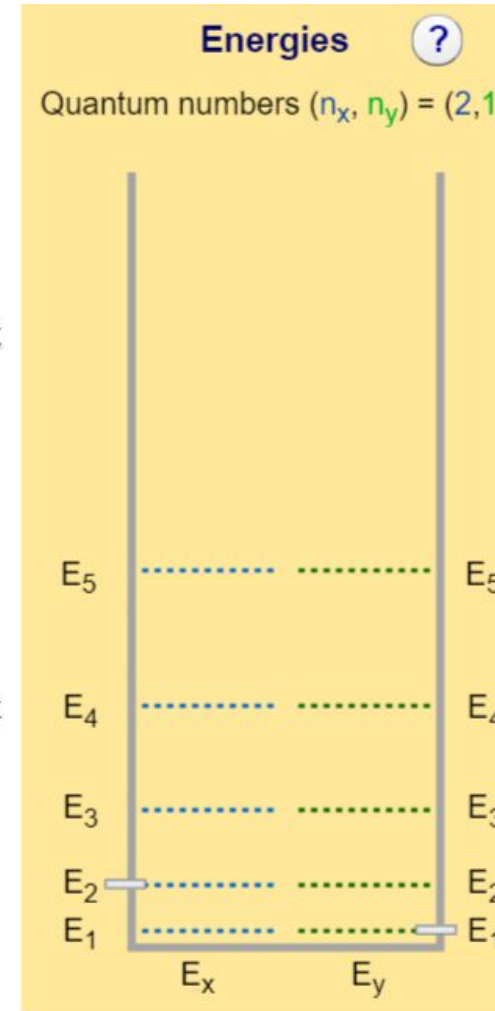
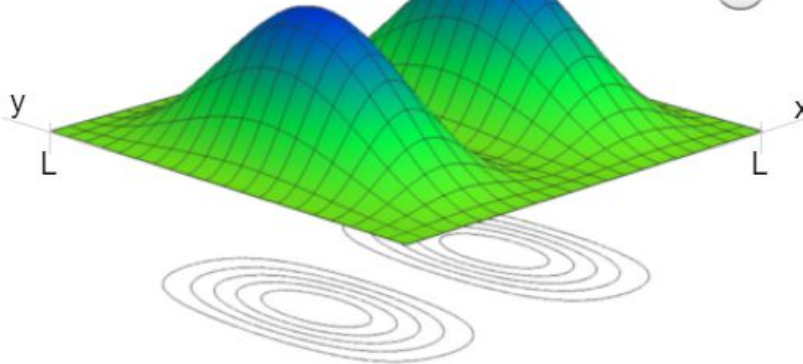
$\Psi_{21}(x,y)$

?



$|\Psi_{21}(x,y)|^2$

?



A.A.
2020-21
Università di Trieste

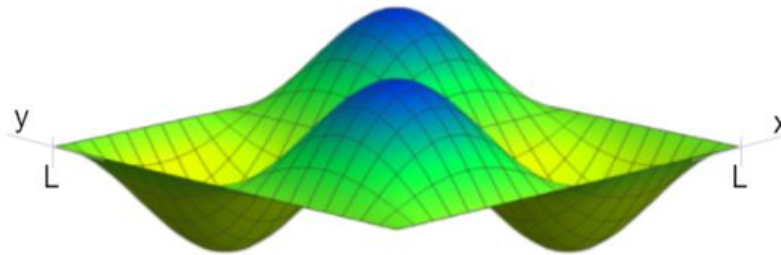
la particella nella scatola in 2 dimensioni

$$\psi_{n_x n_y}(x, y) = \psi_{n_x}(x)\psi_{n_y}(y) = \frac{2}{L} \text{sen} \left(\frac{n_x \pi x}{L} \right) \text{sen} \left(\frac{n_y \pi y}{L} \right)$$

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

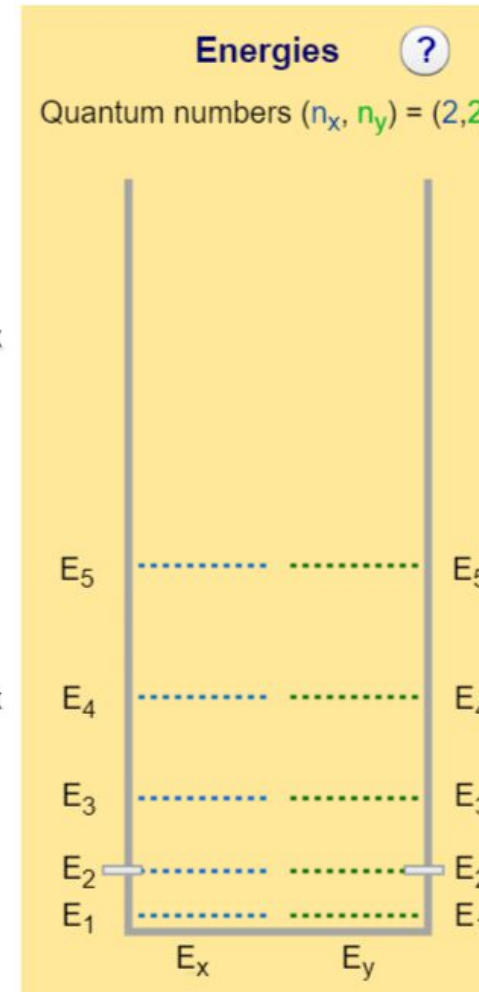
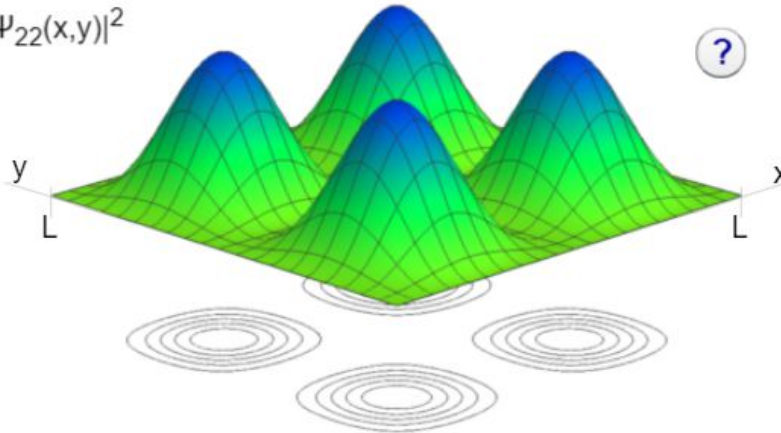
$\Psi_{22}(x,y)$

?



$|\Psi_{22}(x,y)|^2$

?



A.A. 2020-21
Università di Trieste

E e Ψ per l'atomo di idrogeno

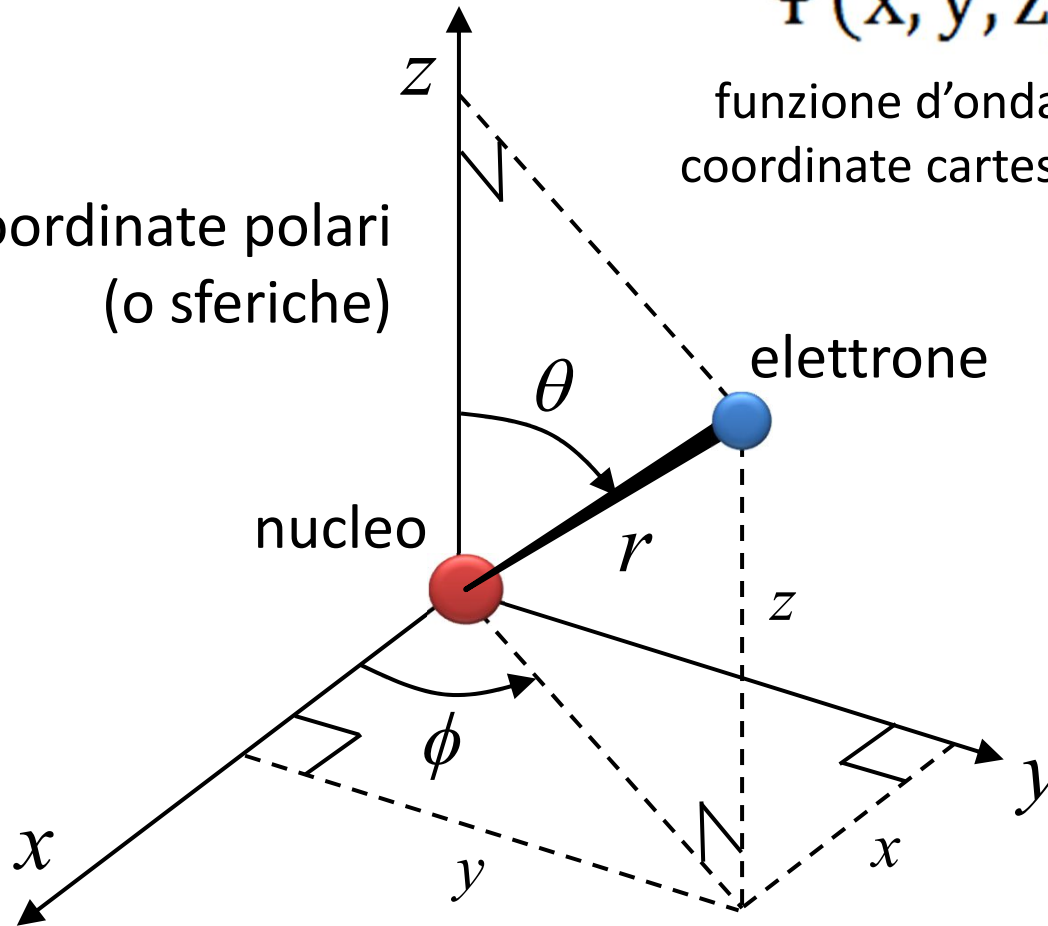
slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

$$\Psi(x, y, z) \rightarrow \Psi(r, \theta, \phi)$$

funzione d'onda in
coordinate cartesiane

funzione d'onda in
coordinate polari

coordinate polari
(o sferiche)



$$\begin{aligned}x &= r \sin\theta \cos\phi \\y &= r \sin\theta \sin\phi \\z &= r \cos\theta \\r^2 &= x^2 + y^2 + z^2\end{aligned}$$

Impostazione dell'equazione di Schrödinger per l'H

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right) + U(r) \quad U(r) = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

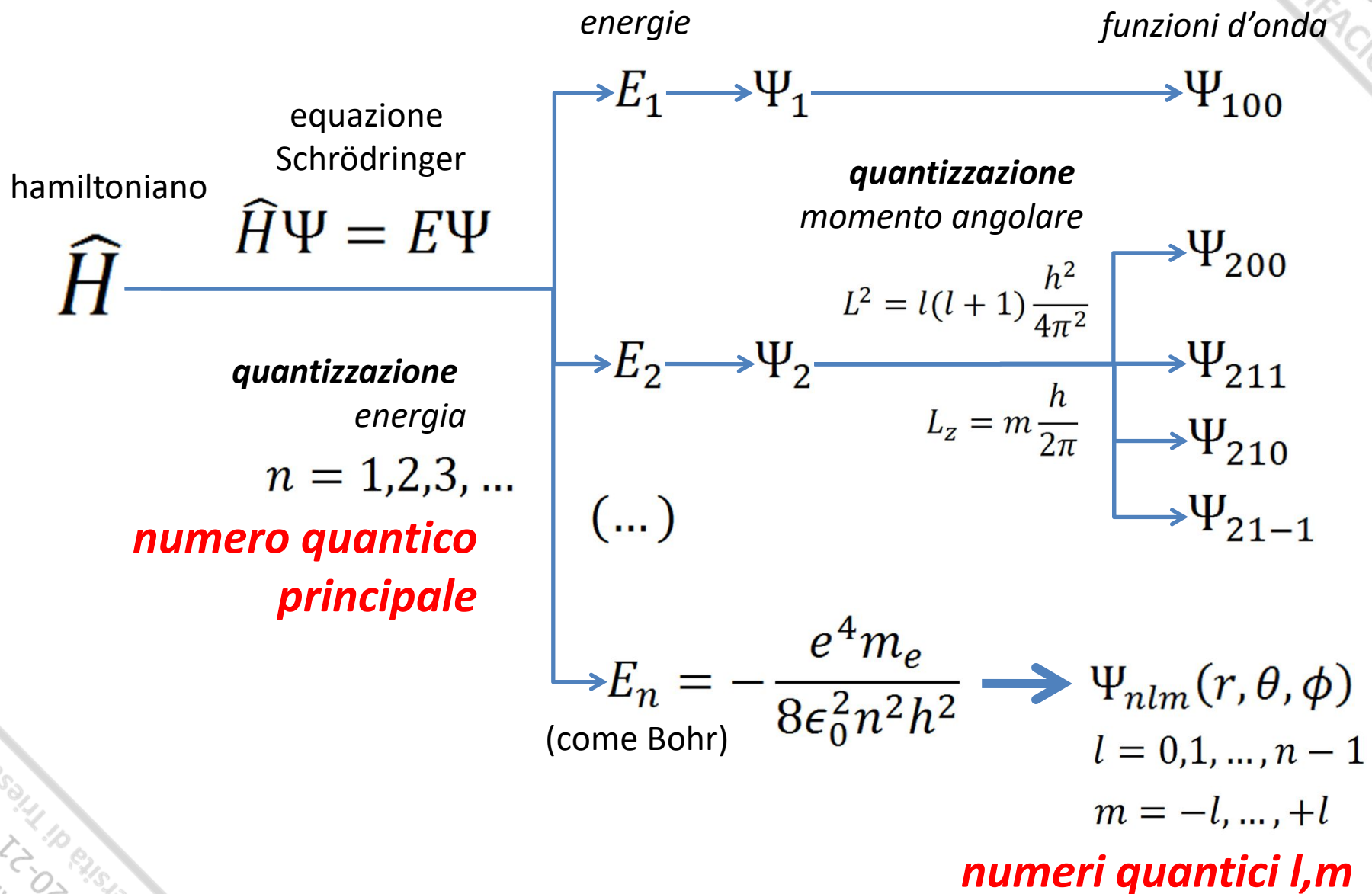
$$\Psi = \Psi(r, \theta, \phi)$$

$$\hat{H}\Psi(r, \theta, \phi) = E\Psi(r, \theta, \phi)$$

$$\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{1}{r^2 \sin\theta} \left[\sin\theta \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin\theta \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \phi^2} \right] - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \Psi(r, \theta, \phi)$$

E e Ψ per l'atomo di idrogeno

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



A.A. 2020-21
Università di Trieste

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \longrightarrow E_n \Psi_{nlm}(r, \theta, \phi)$$

la quantizzazione è una **naturale conseguenza** dell'equazione di Schödinger

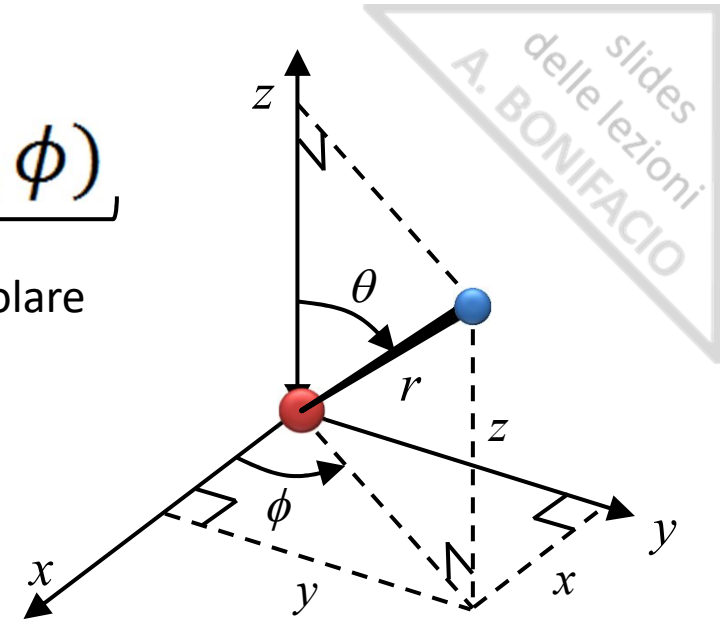
(o n.q. momento angolare)

numero quantico principale	numero quantico secondario	numero quantico magnetico
valori = 1,2,3,...	valori = 0 ... n-1	valori = +l ... 0 ... -l
1	0	0
2	0	0
	1	1, 0, -1
3	0	0
	1	1, 0, -1
	2	2, 1, 0, -1, -2
4	0	0
	1	1, 0, -1
	2	2, 1, 0, -1, -2
	3	3, 2, 1, 0, -1, -2, -3

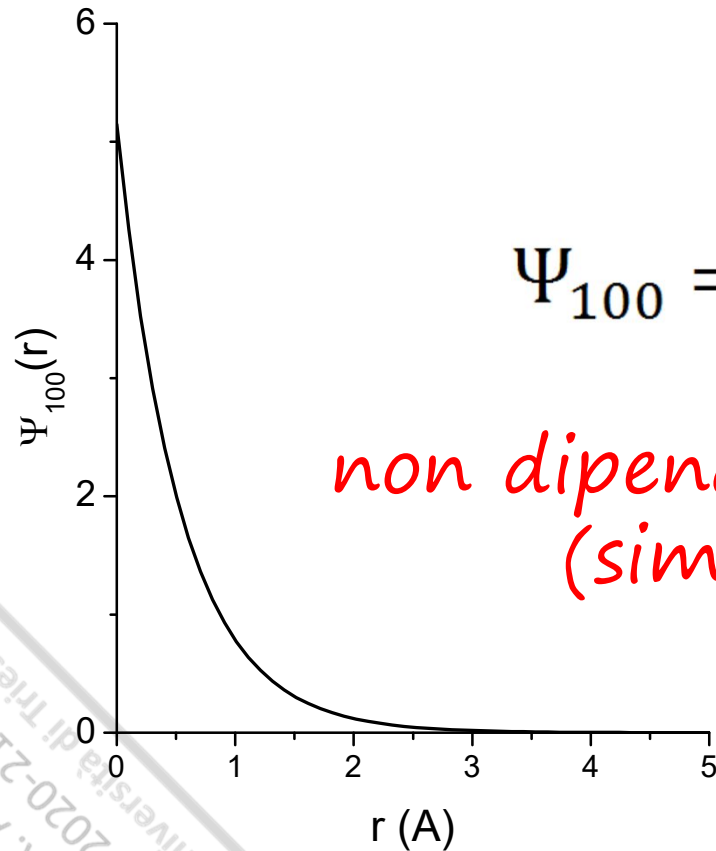
$$\Psi_{nlm}(r, \theta, \phi) = \underbrace{R_{n,l}(r)}_{\text{parte radiale}} \underbrace{Y_{l,m}(\theta, \phi)}_{\text{parte angolare}}$$

funzione d'onda
elettronica:

“orbitale”



slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



$$\Psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a_0} \right)^{3/2} e^{-\frac{r}{a_0}}$$

*non dipende da parte angolare
(simmetria sferica)*

A.A. 2020-21
Università di Trieste

Interpretazione probabilistica di Ψ

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

funzione
d'onda
di una
particella

NON HA
SENSO
FISICO

→ Ψ

→ $|\Psi|^2$

densità di
probabilità
di trovare
una particella

Max Born
(1882–1970)

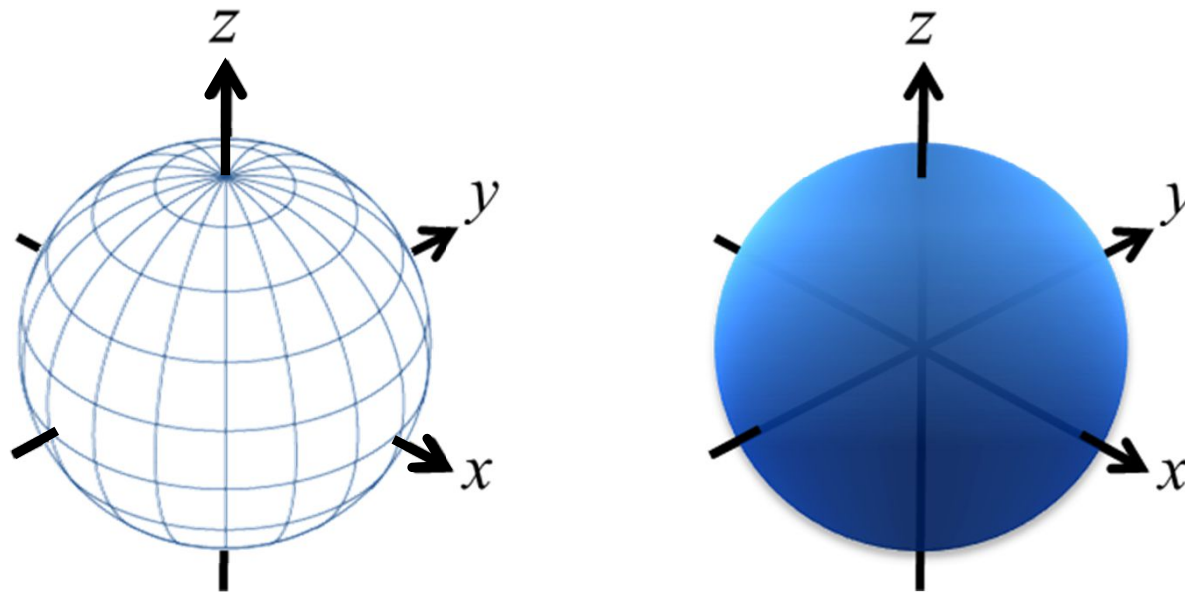


Fisica 1954

A. A.
2020-21
Università di Trieste

Rappresentazioni di orbitali (intesi come funzioni d'onda)

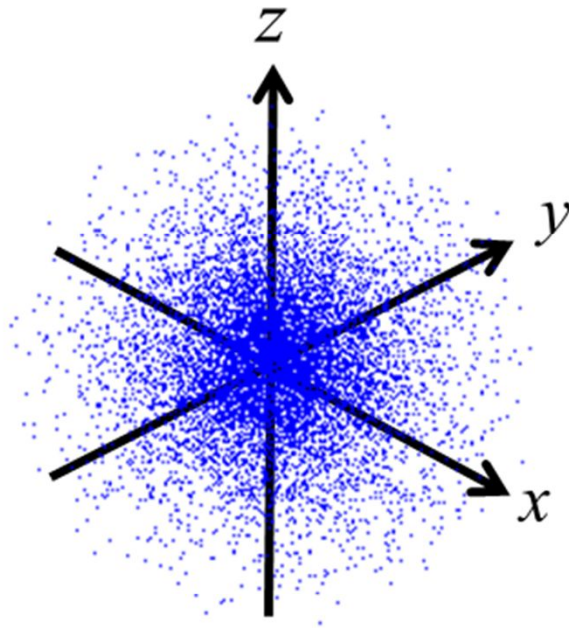
$$\Psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a_0} \right)^{3/2} e^{-\frac{r}{a_0}}$$



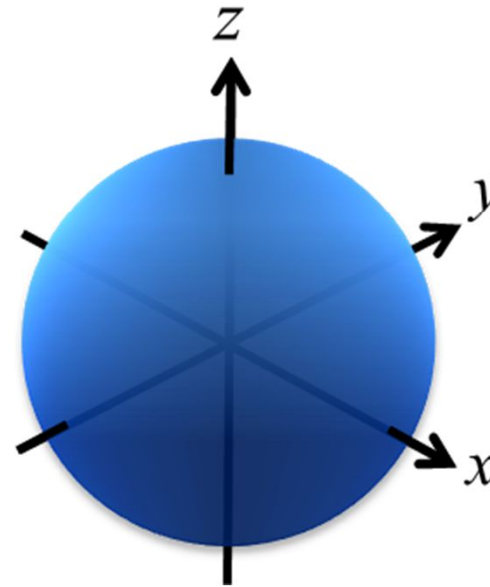
superficie su cui tutti i punti della funzione d'onda Ψ hanno uno stesso valore costante
(isosuperficie)

Rappresentazioni di orbitali (intesi come probabilità)

$$|\Psi_{100}|^2$$



posizioni elettrone in
 n osservazioni

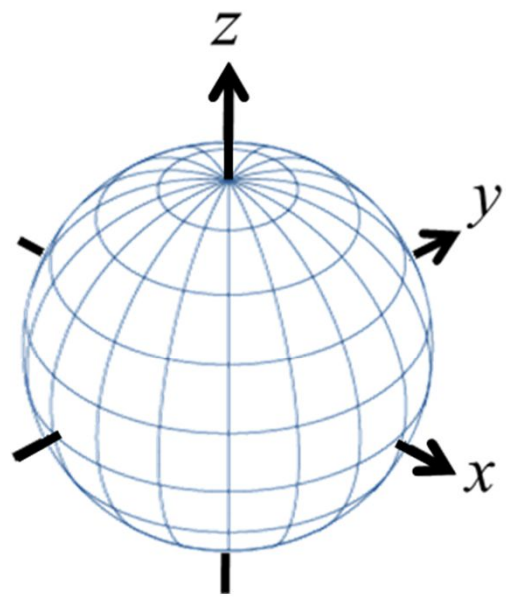


superficie al 90%
di probabilità

Rappresentazioni di orbitali

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

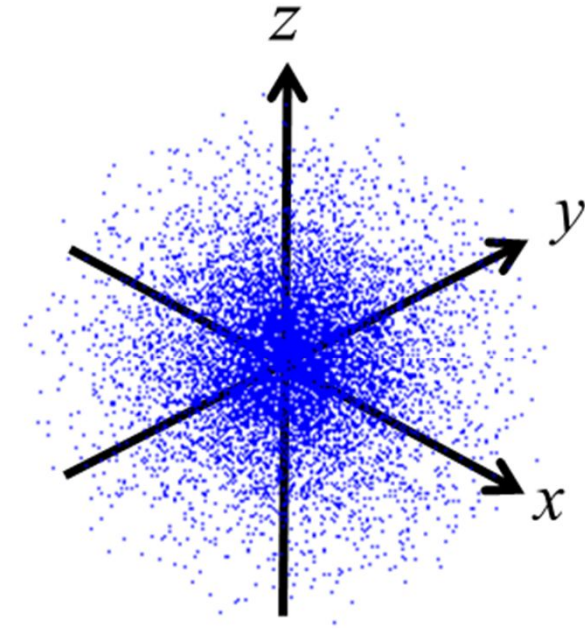
$$\Psi_{100}$$



*funzione
d'onda
isosuperficie*

$$|\Psi_{100}|^2$$

\neq



*densità di
probabilità
n osservazioni
("nube elettronica")*

A. A.
2020-21
Università di Trieste

notazione orbitali atomici

n	l	m_l	sotto-livello	numero di orbitali nel sottolivello
1	0	0	1s	1
2	0	0	2s	1
2	1	1, 0, -1	2p	3
3	0	0	3s	1
3	1	1, 0, -1	3p	3
3	2	2, 1, 0, -1, -2	3d	5
4	0	0	4s	1
4	1	1, 0, -1	4p	3
4	2	2, 1, 0, -1, -2	4d	5
4	3	3, 2, 1, 0, -1, -2, -3	4f	7

numero quantico momento angolare l

- s- "sharp"
- p- "principal"
- d- "diffuse"
- f- "fundamental"

esempi:

$$\Psi_{100} = \Psi_{1s}$$

$$\Psi_{210} = \Psi_{2p}$$

Distribuzione di probabilità radiale (funzione di distribuzione radiale)

ψ $|\psi|^2$
 funzione d'onda densità di probabilità

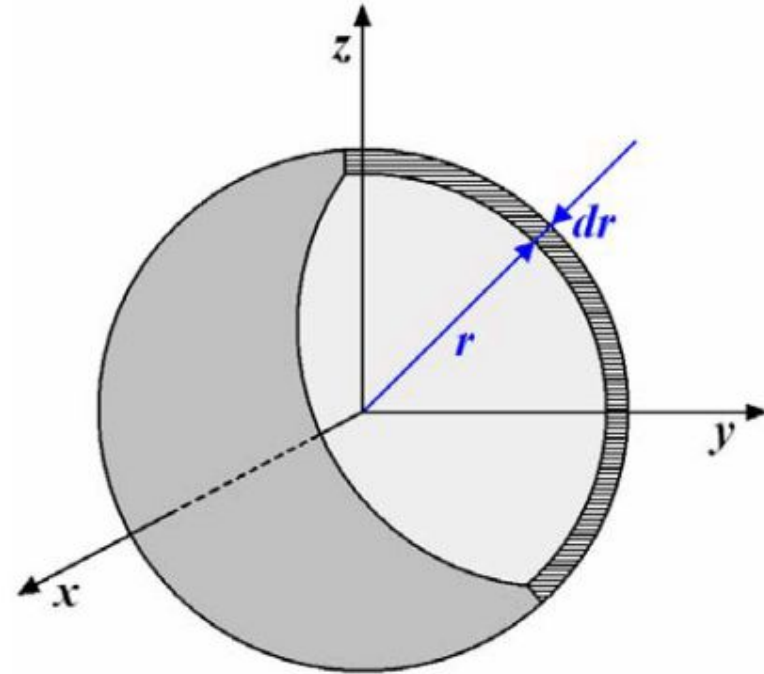
$$P = |\psi|^2 \cdot V$$

probabilità densità di probabilità per volume

$$dP = |\psi|^2 \cdot dV$$

$$dP = |\psi|^2 \cdot 4\pi r^2 dr$$

$$dV = 4\pi r^2 dr$$



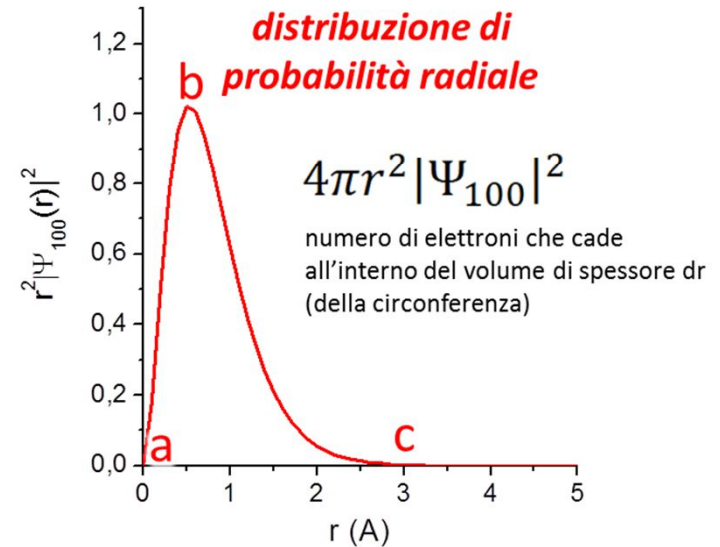
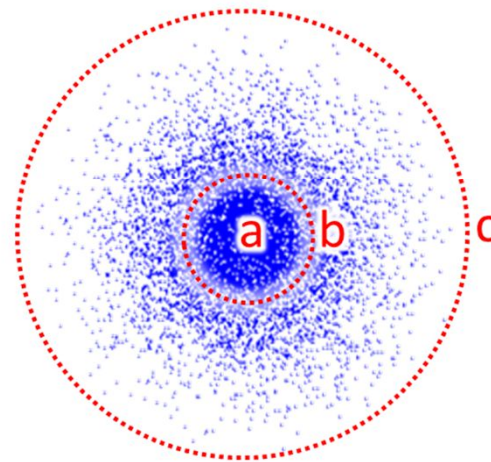
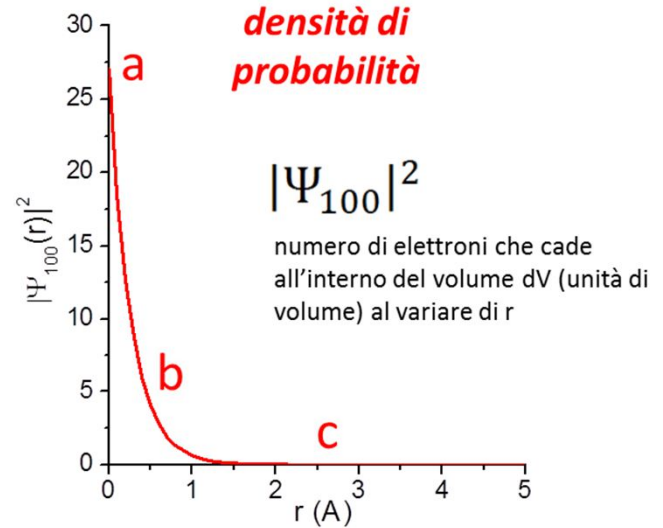
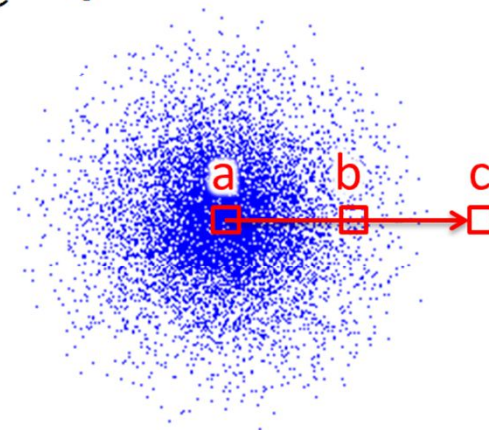
$$\frac{dP}{dr} = P_r = \underbrace{|\psi|^2 \cdot 4\pi r^2}_{\text{funzione di distribuzione radiale}} \quad \text{probabilità di trovare l'elettrone nel guscio sferico di spessore } dr$$

Distribuzione di probabilità radiale (funzione di distribuzione radiale)

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

$$\Psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{3/2} e^{-\frac{r}{a_0}}$$

(1s)



A. A.
2020-21
Università di Trieste

Distribuzione di probabilità radiale (funzione di distribuzione radiale)

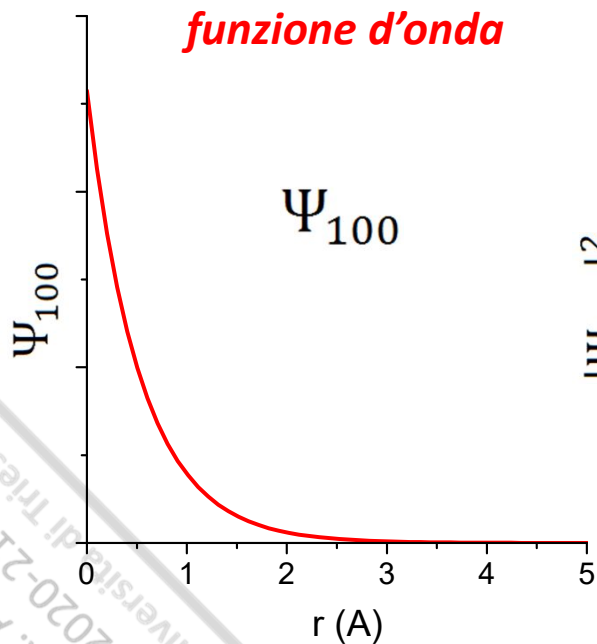
slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

$$\Psi_{100} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a_0} \right)^{3/2} e^{-\frac{r}{a_0}}$$

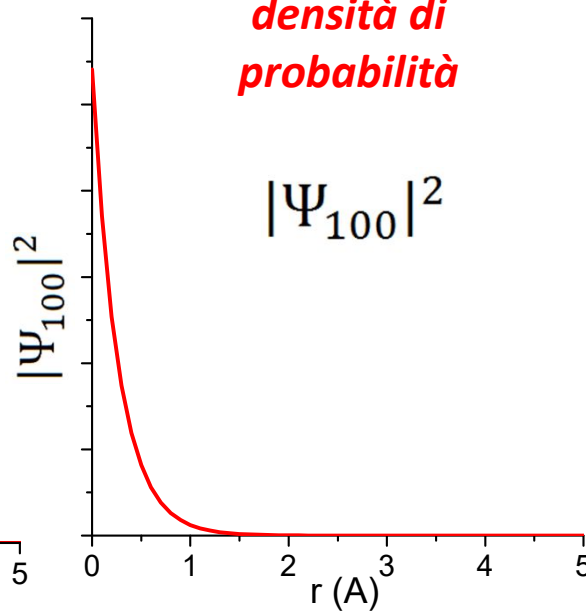
raggio
di Bohr

0.53 Å

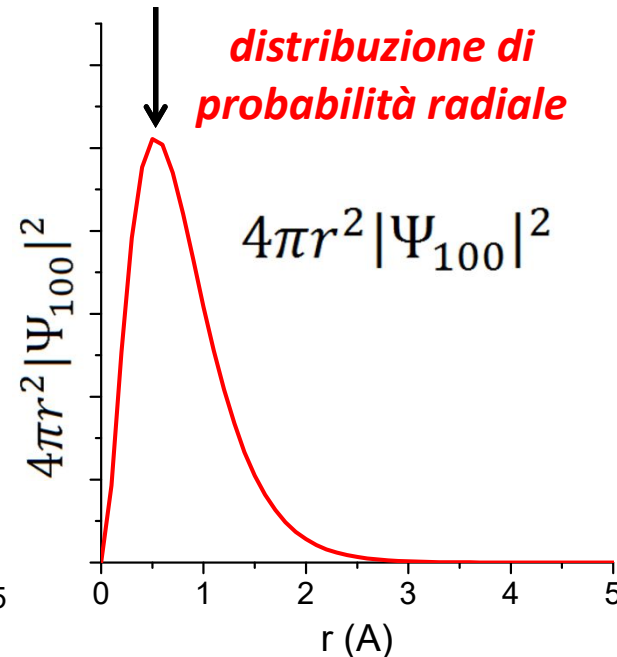
funzione d'onda



densità di
probabilità



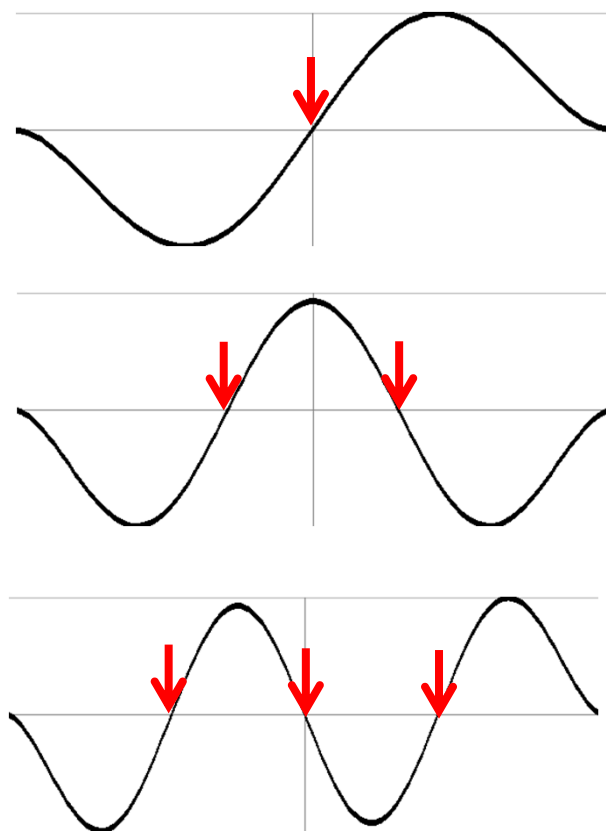
distribuzione di
probabilità radiale



A. A.
2020-21
Università di Trieste

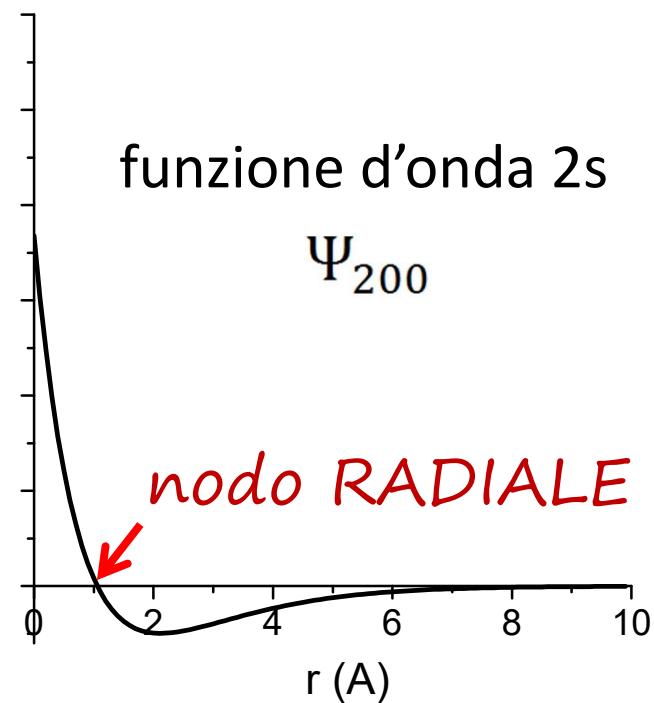
concetto di nodo

per onde stazionarie



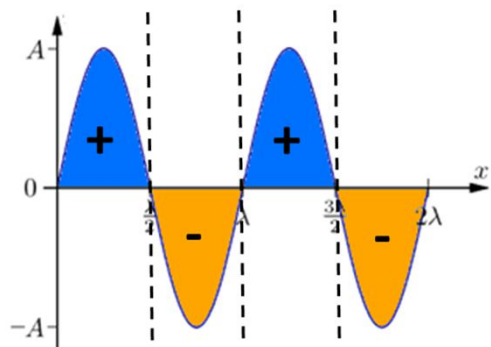
punti in cui l'onda è nulla

per funzioni d'onda

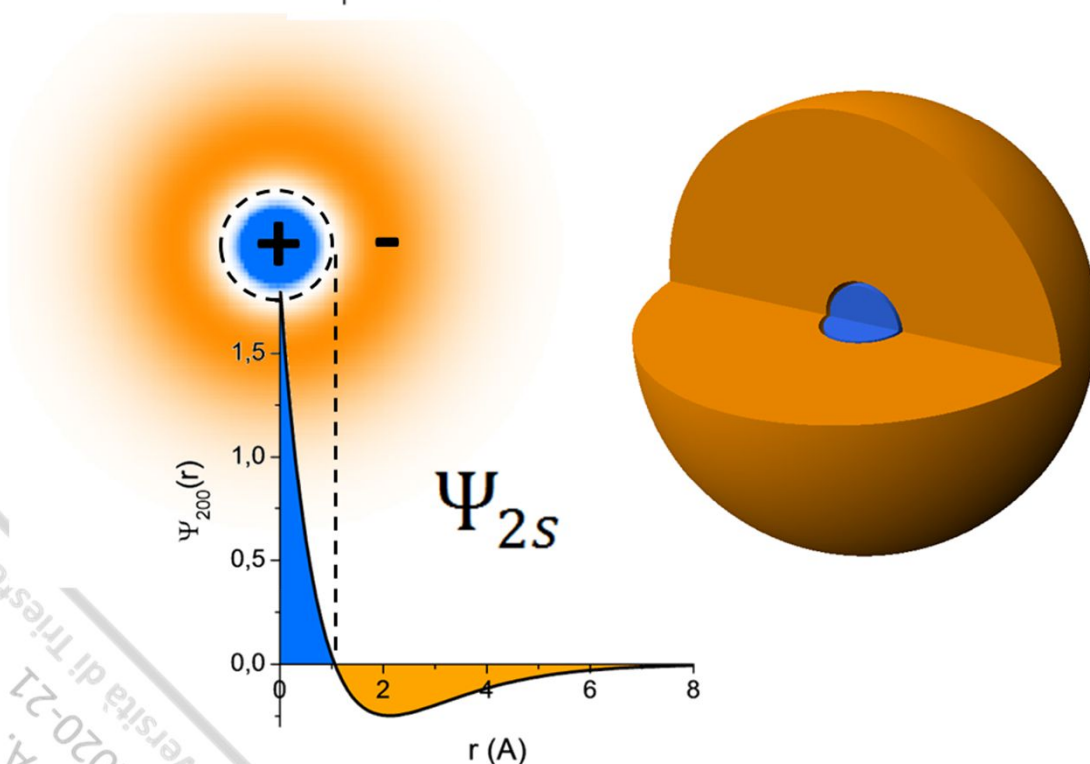


punti in cui la
funzione d'onda è nulla

concetto di nodo e di fase



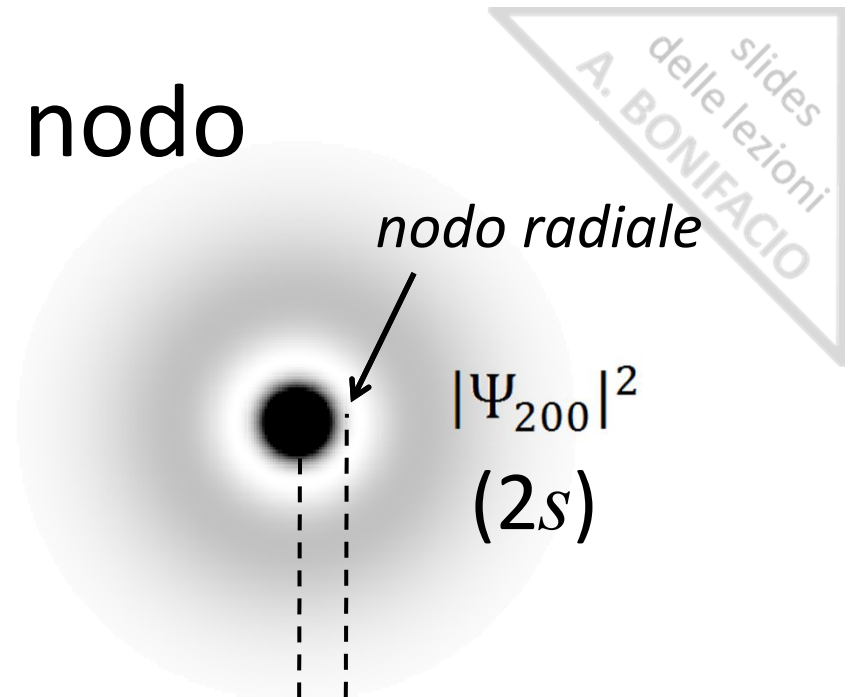
l'ampiezza di un onda ha valori positivi e negativi, cambiando segno ad ogni nodo



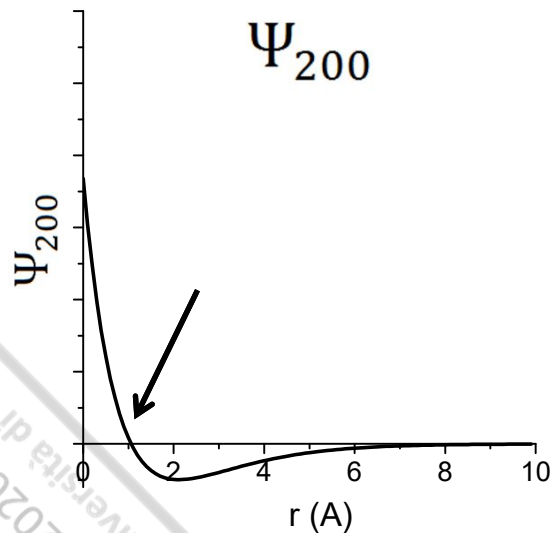
anche le funzioni d'onda hanno un segno, che viene chiamato "fase" e cambia ai nodi

concetto di nodo

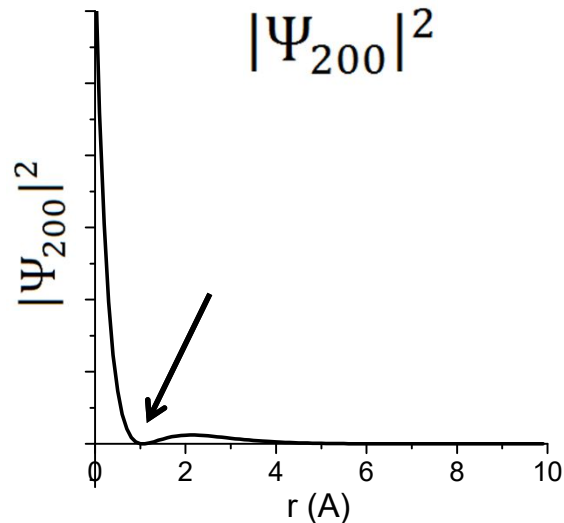
nodo: regione di spazio nel quale la probabilità di trovare l'elettrone è nulla (sempre)



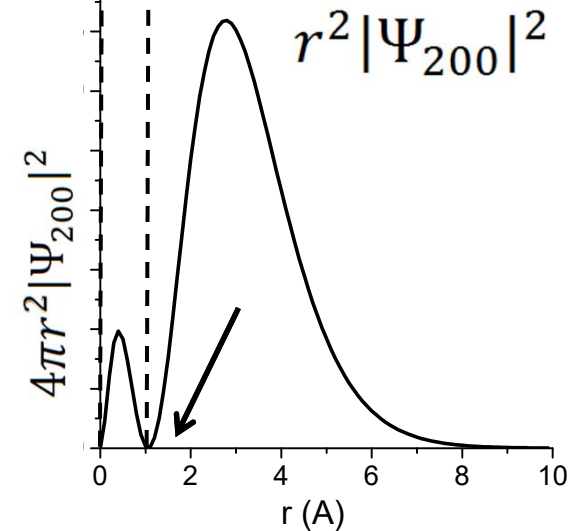
funzione d'onda



densità di probabilità



distribuzione di probabilità radiale



1

le dimensioni degli orbitali
aumentano con n

2

il numero di *nodi radiali* negli
orbitali di tipo “s” aumenta con
 n ($=n-1$)

3

la distanza di massima
probabilità aumenta con n
(ma per gli orbitali “s”, anche
per n alti c’è una probabilità
finita vicino al nucleo)

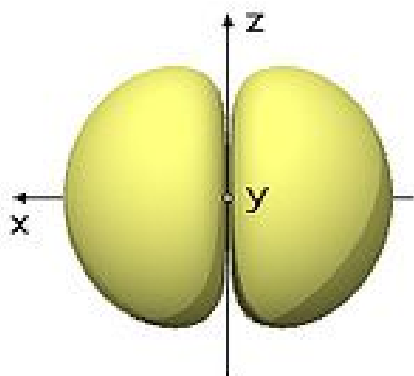
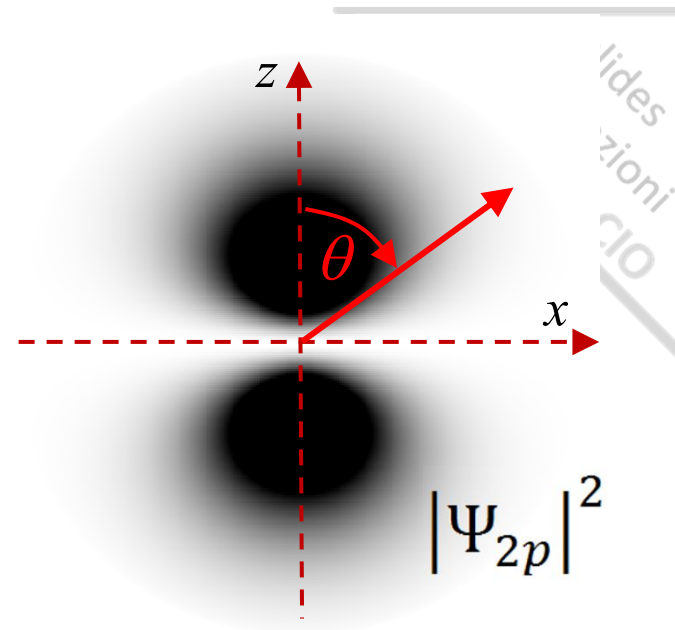


$$\Psi_{2p} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{3/2} \frac{r}{a_0} e^{-\frac{r}{2a_0}} \cos\theta$$

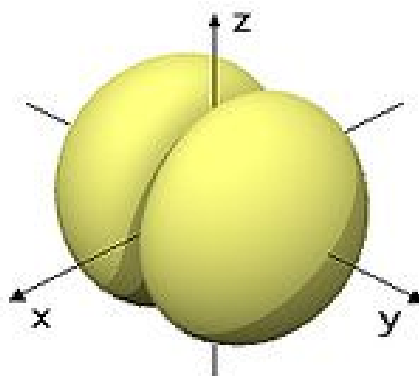
(Ψ_{210})

orbitali p

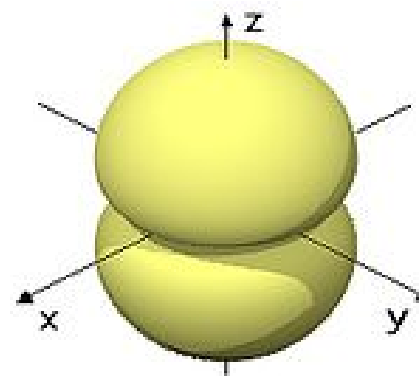
parte angolare non nulla, non c'è più simmetria sferica



Orbital p_x



Orbital p_y



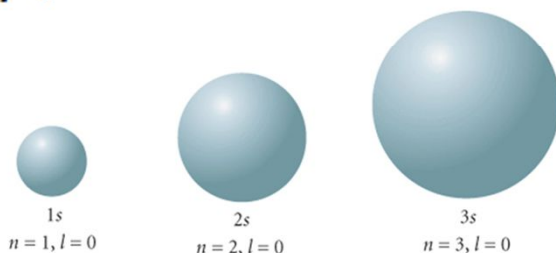
Orbital p_z

numeri quantici ed orbitali (riepilogo)

$$\Psi_{nlm}(r, \theta, \phi)$$

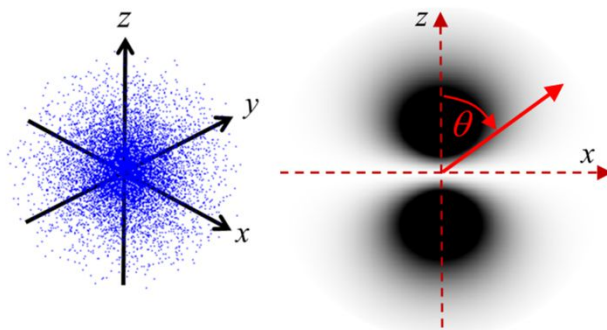
slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

n



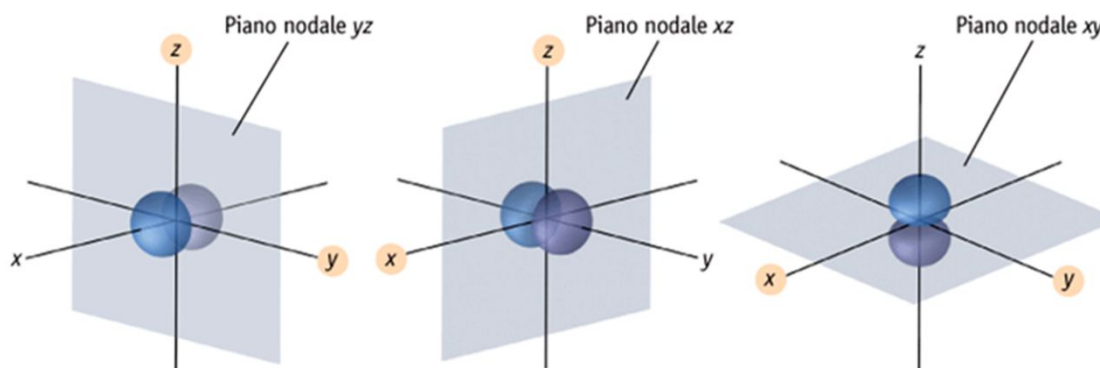
energia, dimensioni e
nodi radiali

l



forma tridimensionale
e nodi angolari
(piani nodali)

m



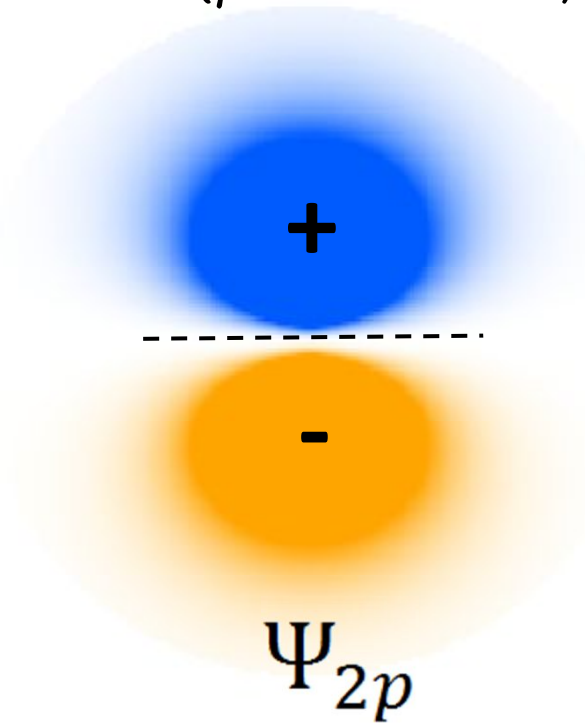
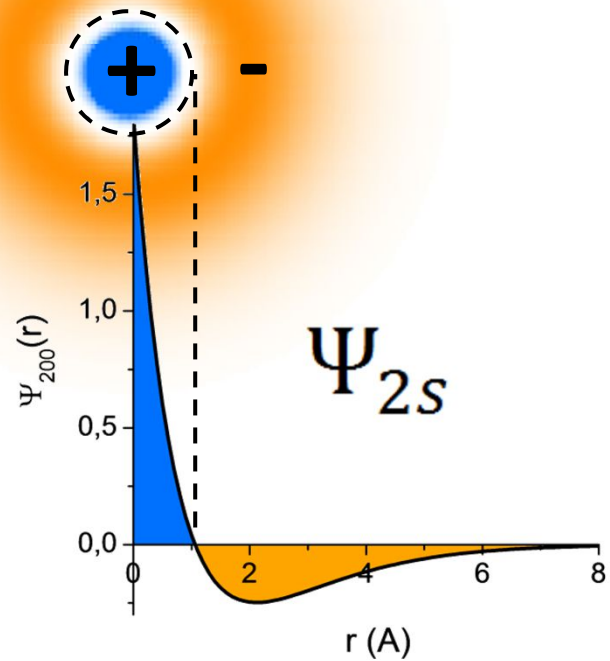
orientazione
nello spazio

A. A.
2020-21
Università di Trieste

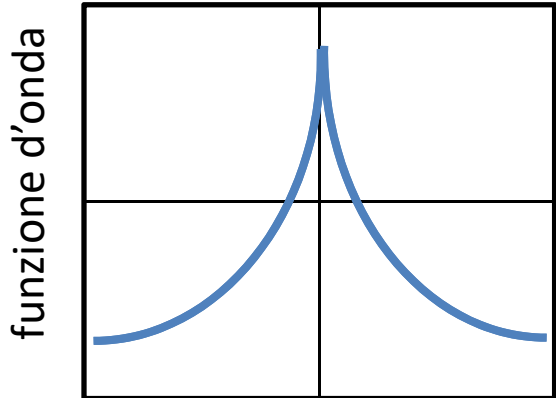
fasi ed orbitali p

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

anche per gli orbitali
p la fase cambia al
nodo (piano nodale)

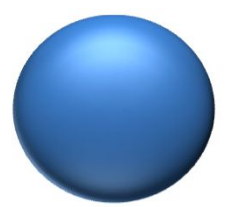


A. A.
2020-21
Università di Trieste

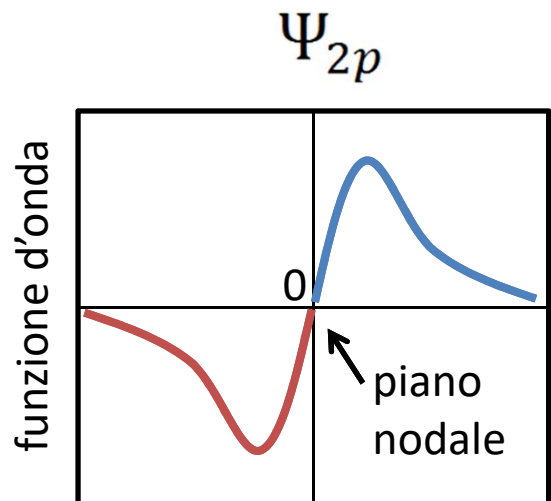


z (Angstrom)

orbitale 1s

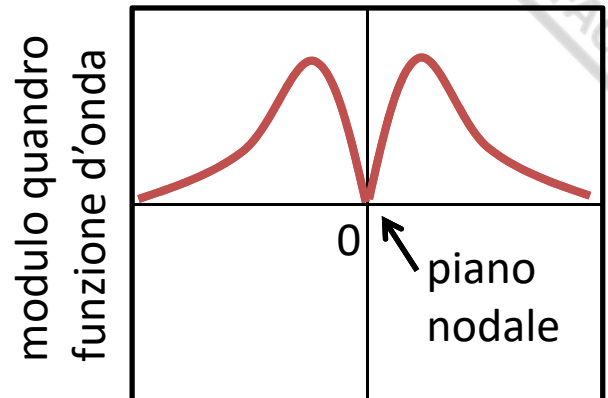
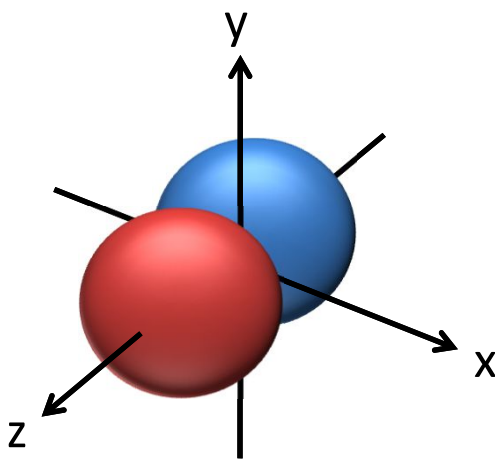


orbitale 1s



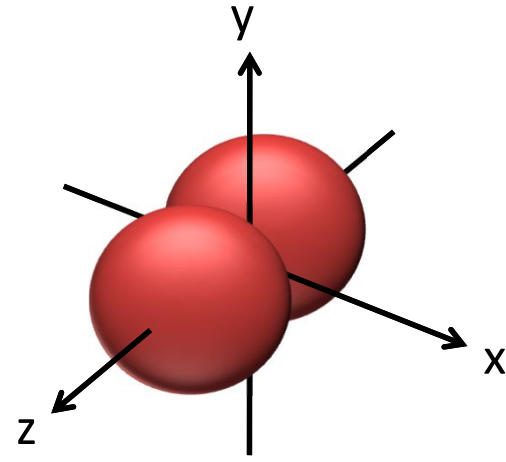
z (Angstrom)

orbitale 2p_z



z (Angstrom)

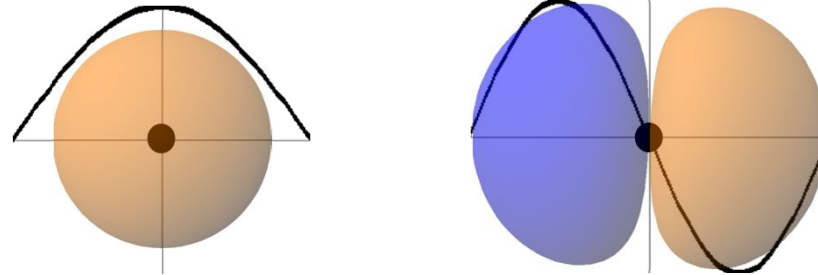
orbitale 2p_z



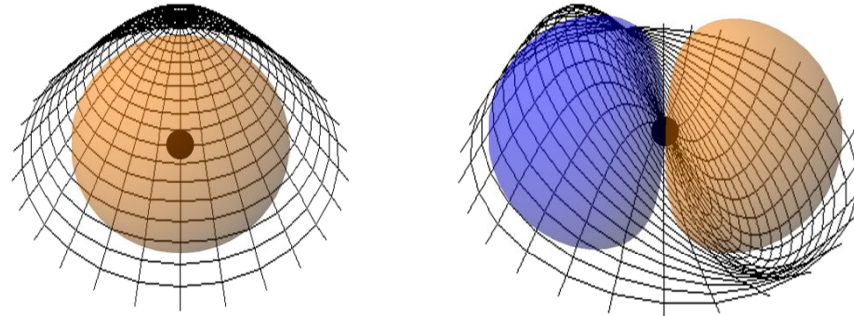
funzioni d'onda come onde stazionarie (una analogia)

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

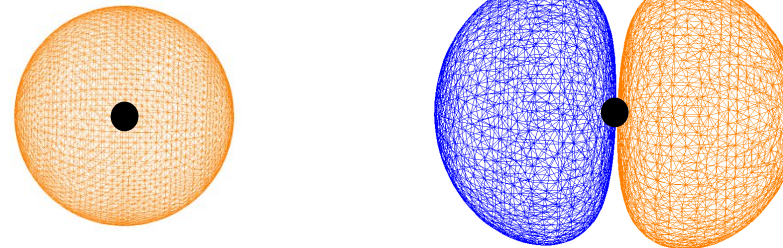
onde stazionarie 1D



onde stazionarie 2D



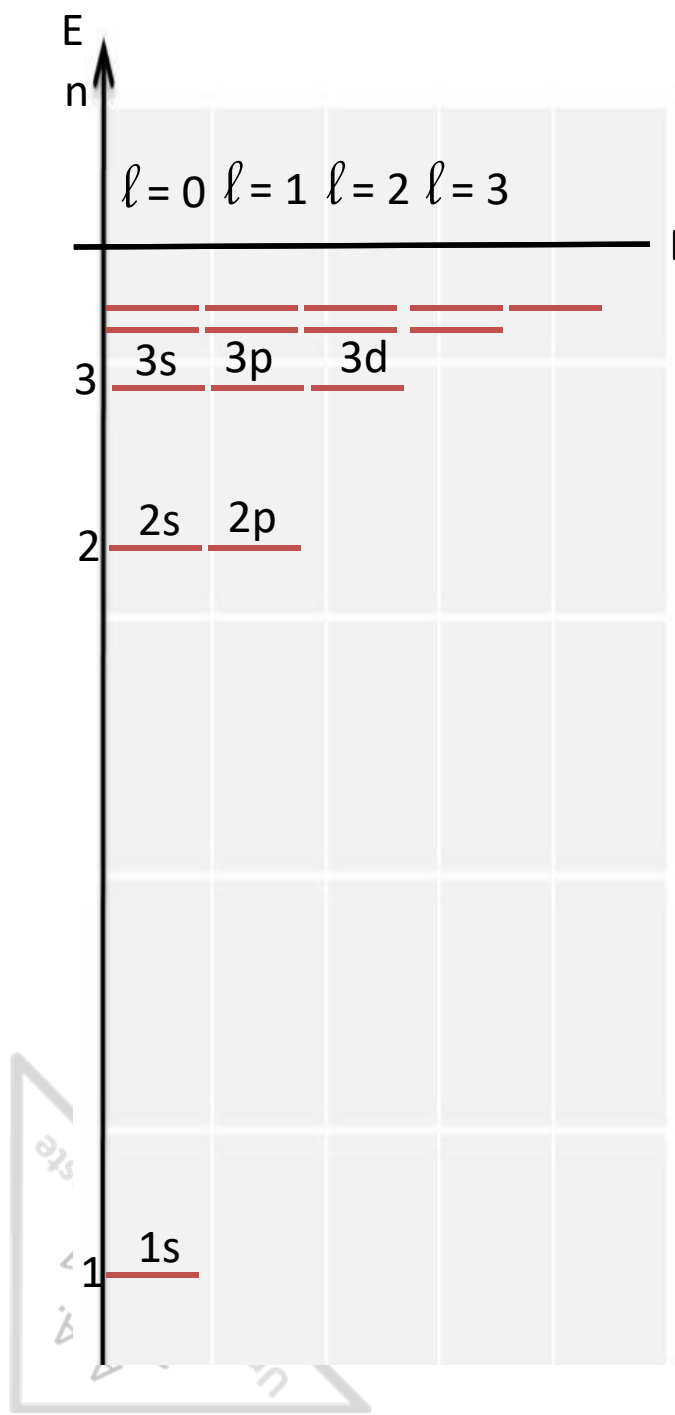
funzioni d'onda come
onde stazionarie 3D
attorno al nucleo



A. A.
2020-21
Università di Trieste

energie degli orbitali

per l'atomo di H



$n \rightarrow n^2$ orbitali

3 \rightarrow 9 orbitali

2 \rightarrow 4 orbitali

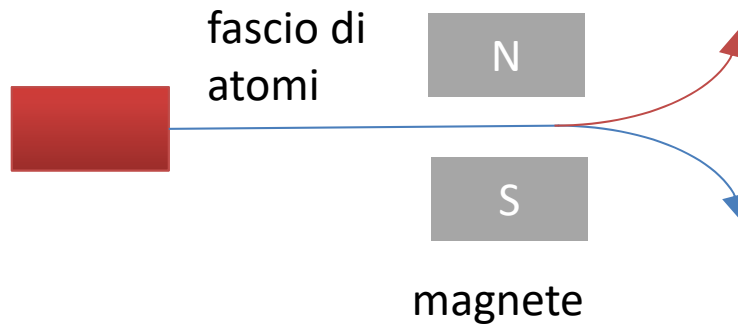
1 \rightarrow 1 orbitale

orbitali aventi la
stessa energia si
dicono "**degeneri**"

l'energia di un orbitale E_n
dipende solo dal numero
quantico principale n

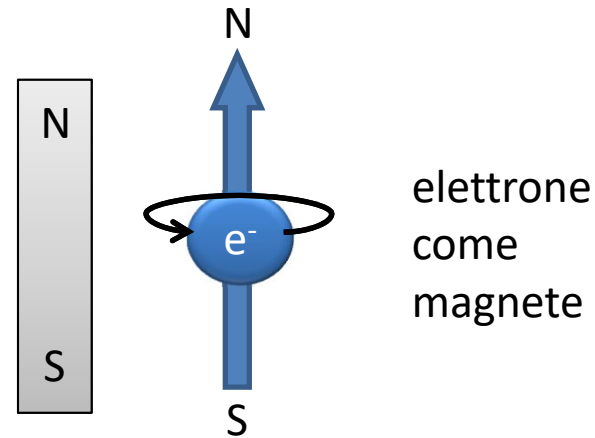
lo spin elettronico

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



esperimento
Stern-Gerlach (1921)

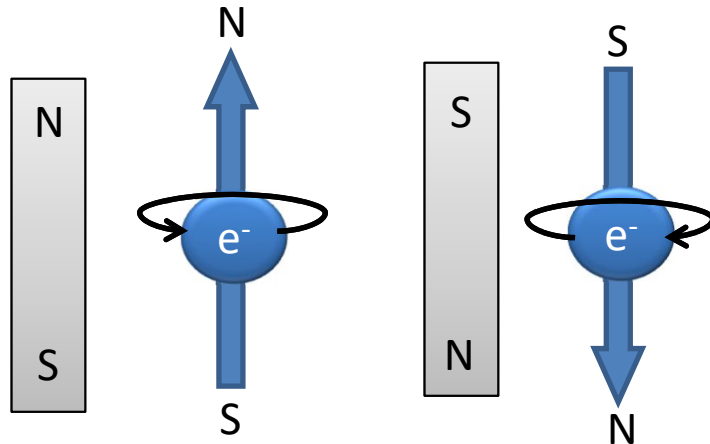
scoperta dello
spin elettronico
Uhlenbeck-Goudsmit (1925)



Università di Trieste
2020-21
A. A.

il numero quantico di spin m_s

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



lo spin elettronico è
quantizzato
può assumere solo **2 possibili orientazioni** del dipolo magnetico
(due versi di rotazione)

si introduce un
numero quantico di spin
può assumere solo due valori,
corrispondenti a **2 possibili orientazioni**
del dipolo magnetico

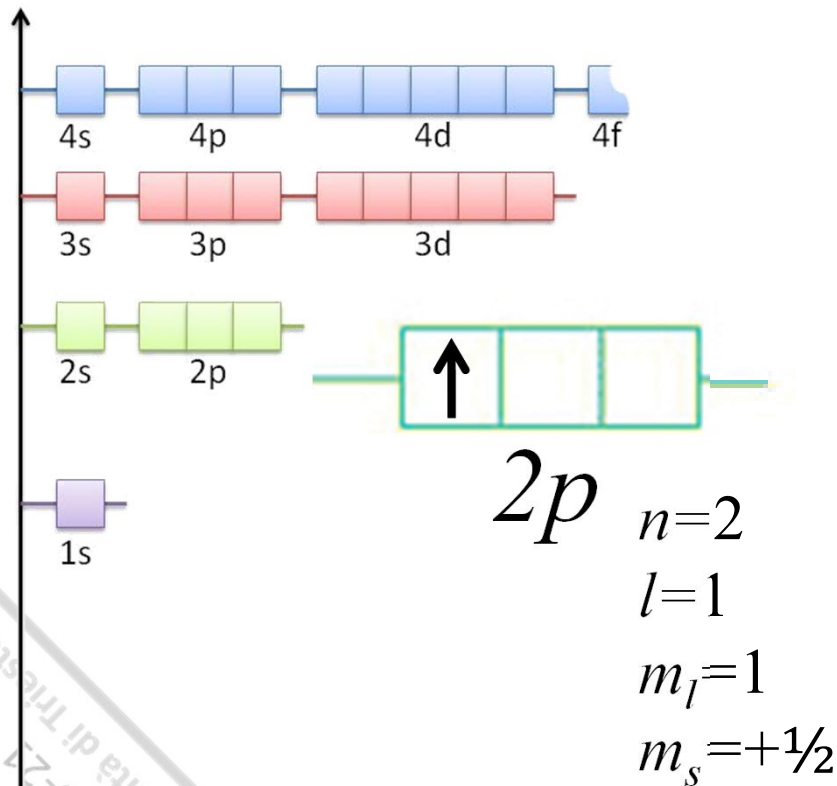
$$m_s$$
$$+\frac{1}{2} (\uparrow) \quad -\frac{1}{2} (\downarrow)$$

spin "up" spin "down"

A. A.
2020-21
Università di Trieste

I numeri quantici

n = numero quantico principale	indica in quale livello o guscio energetico si trova un elettrone.
l = numero quantico momento angolare	indica la forma dell'orbitale e a quale tipo di sottolivello elettronico appartiene l'orbitale
m_l = numero quantico magnetico	indica l'orientazione nello spazio dell'orbitale
m_s = numero quantico di spin	indica l'orientazione nello spazio dello spin



un elettrone in un atomo di H è completamente caratterizzato da un insieme di **QUATTRO** numeri quantici

$$n, l, m_l, m_s$$

atomi polielettronici

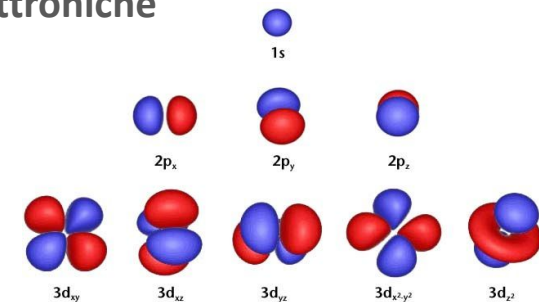
gli elettroni interagiscono tra loro

→ equazione di Schrödinger non risolvibile esattamente,
ma solo in modo approssimato

una funzione d'onda **POLI-ELETTRONICA** è approssimata come un
prodotto di funzioni d'onda **MONO-ELETTRONICHE**

$$\underbrace{\Psi(r_1, \theta_1, \phi_1, r_2, \theta_2, \phi_2)}_{\substack{\text{elettrone 1} \quad \text{elettrone 2} \\ \text{funzione d'onda} \\ \text{poli-elettronica}}} \cong \underbrace{\Psi(r_1, \theta_1, \phi_1)}_{\text{funzioni d'onda}} \cdot \underbrace{\Psi(r_2, \theta_2, \phi_2)}_{\text{mono-elettroniche}}$$

uso funzioni simili a
quelle trovate per H
(1s, 2s, 2p, 3s ...)

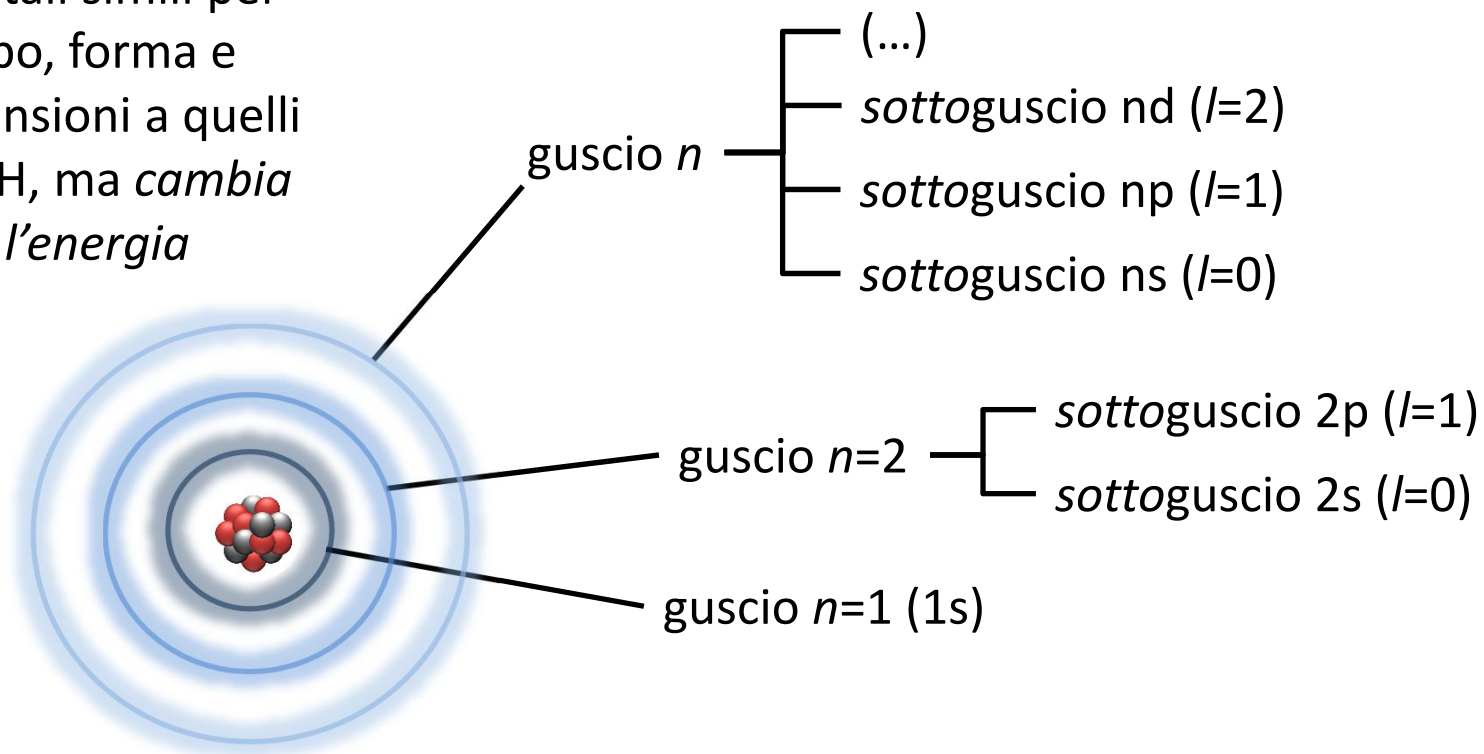


atomi polielettronici

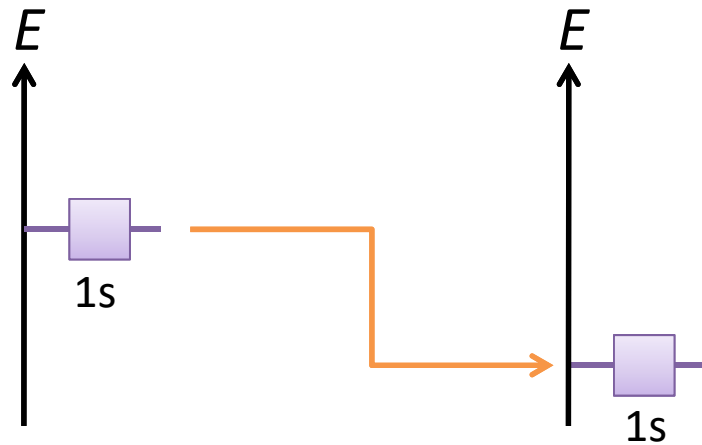
gli elettroni interagiscono tra loro

→ equazione di Schrödinger non risolvibile esattamente,
ma solo in modo approssimato

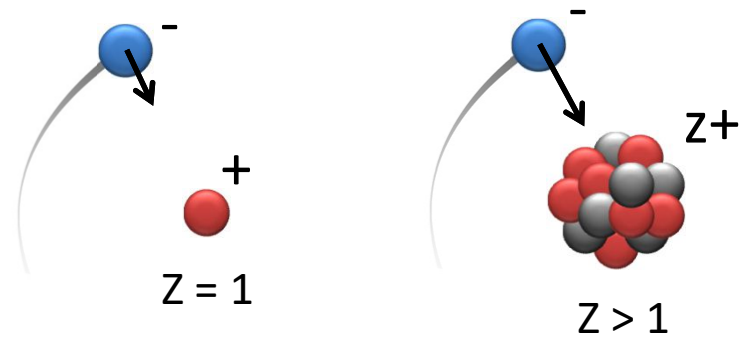
orbitali simili per
tipo, forma e
dimensioni a quelli
dell'H, ma *cambia*
l'energia



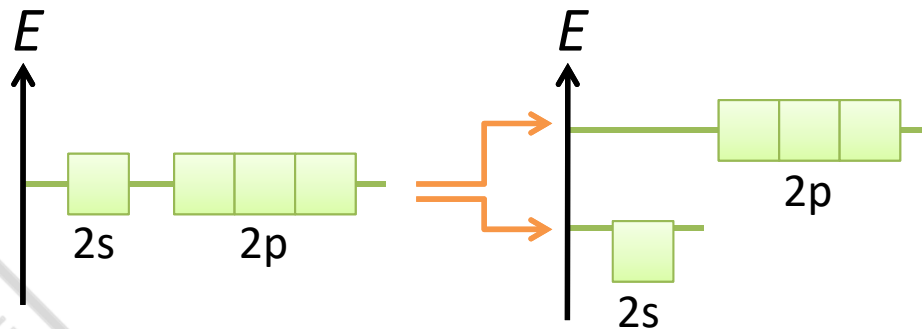
abbassamento energia



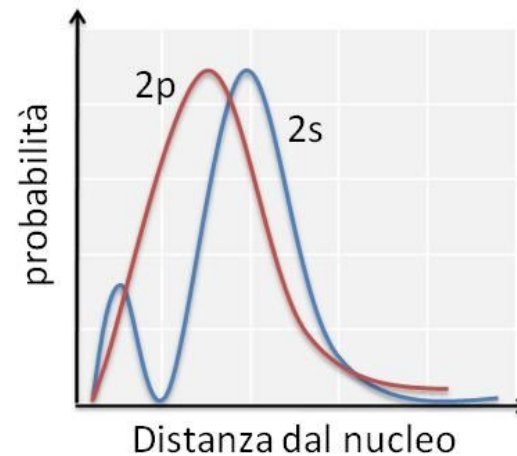
maggiore carica nucleare $Z > 1$
maggiore forza attrattiva
esercitata dai nuclei

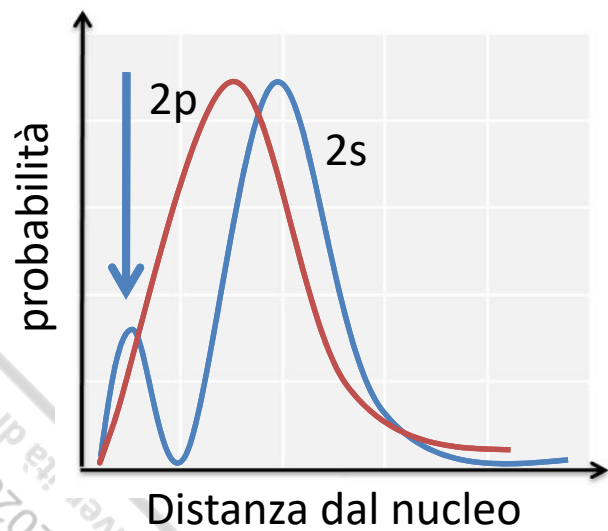
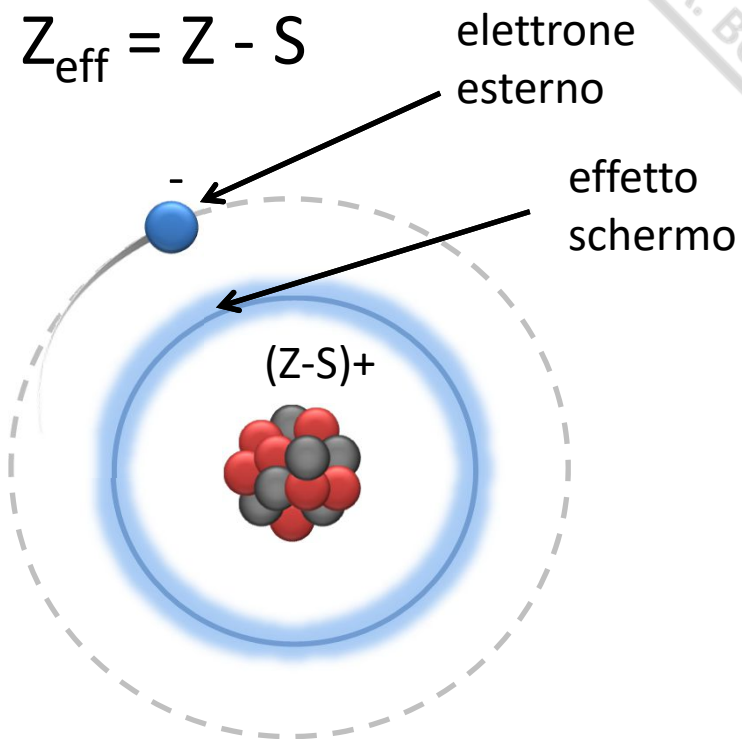
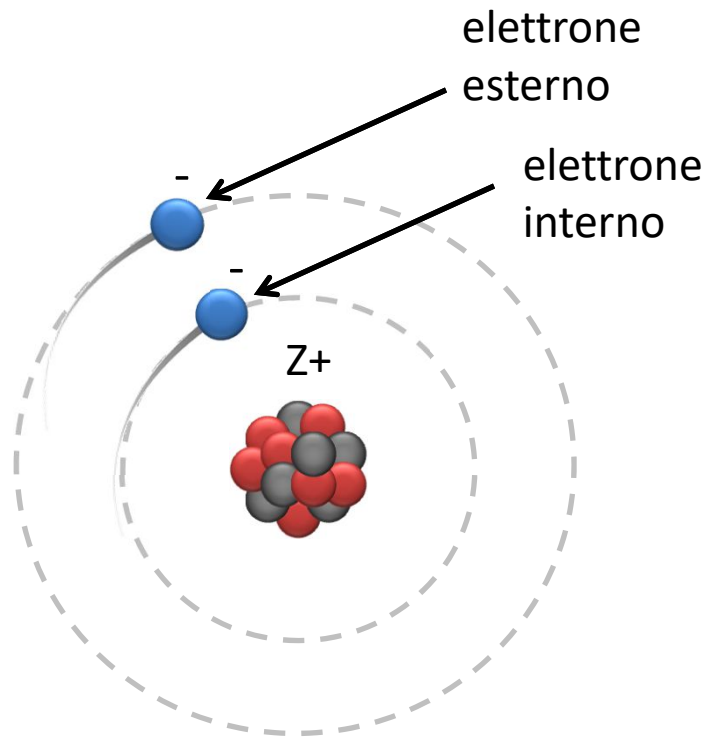


perdita degenerazione



diverso effetto schermo
per diversi orbitali

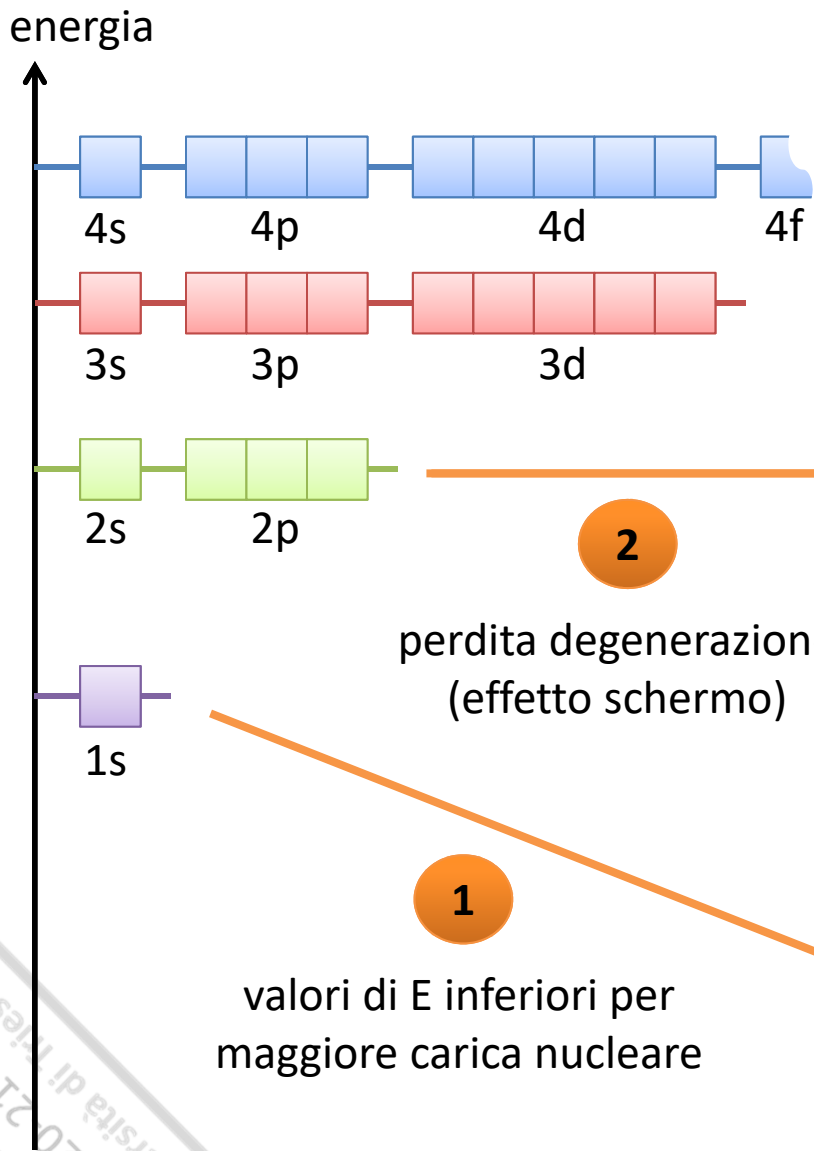




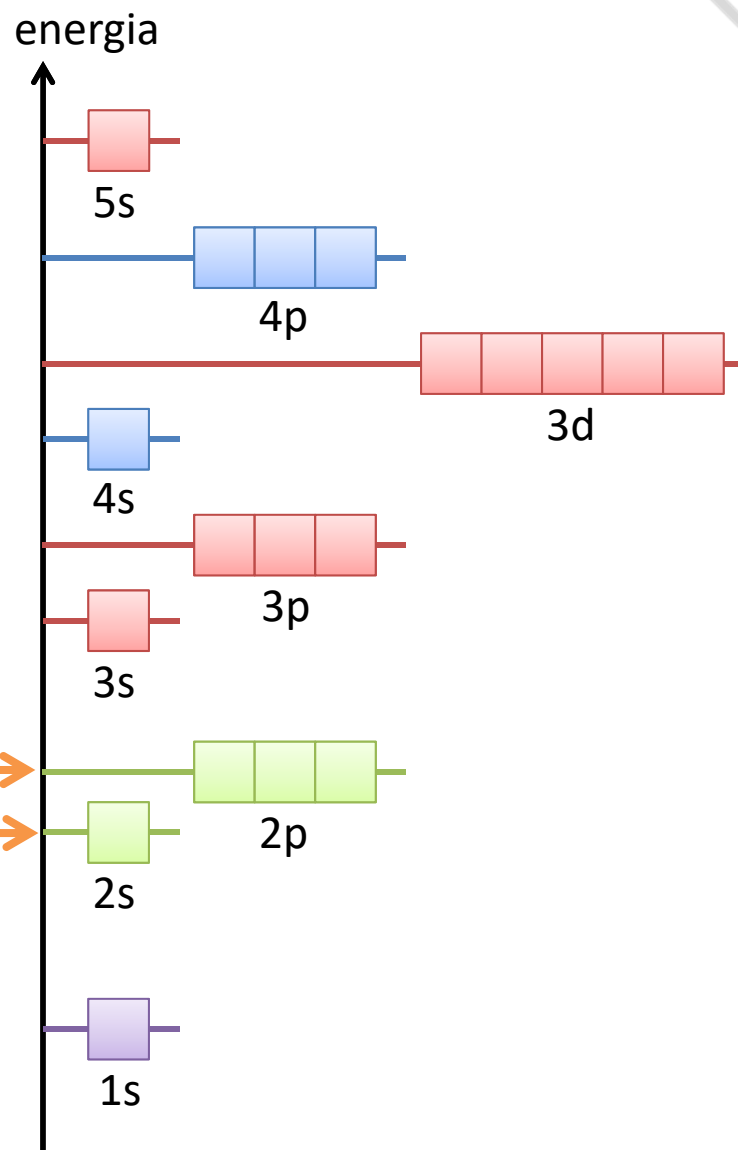
slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

A.A. 2020-21
Università di Trieste

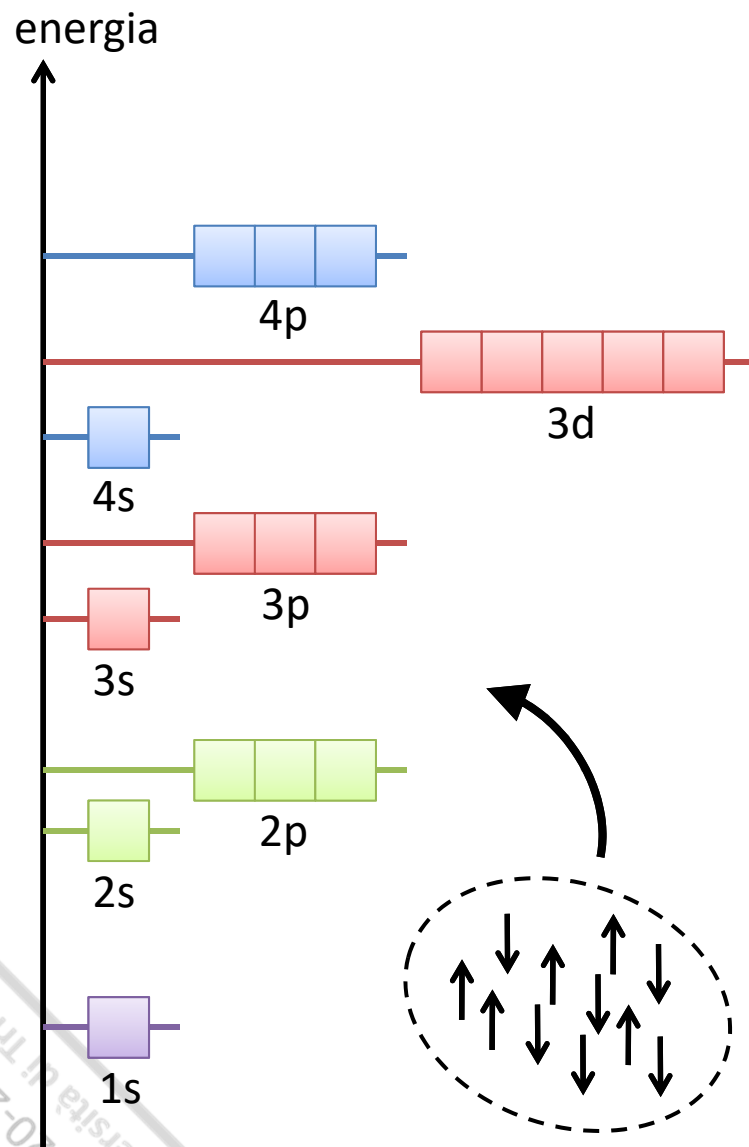
idrogeno / idrogenoidi



atomi polielettronici



“aufbau” e configurazione elettronica



1. Principio di Esclusione di Pauli
due elettroni dello stesso atomo non possono avere quattro numeri quantici identici (i.e. un orbitale può “contenere” al massimo due elettroni con spin opposto)

2. Regola di Hund

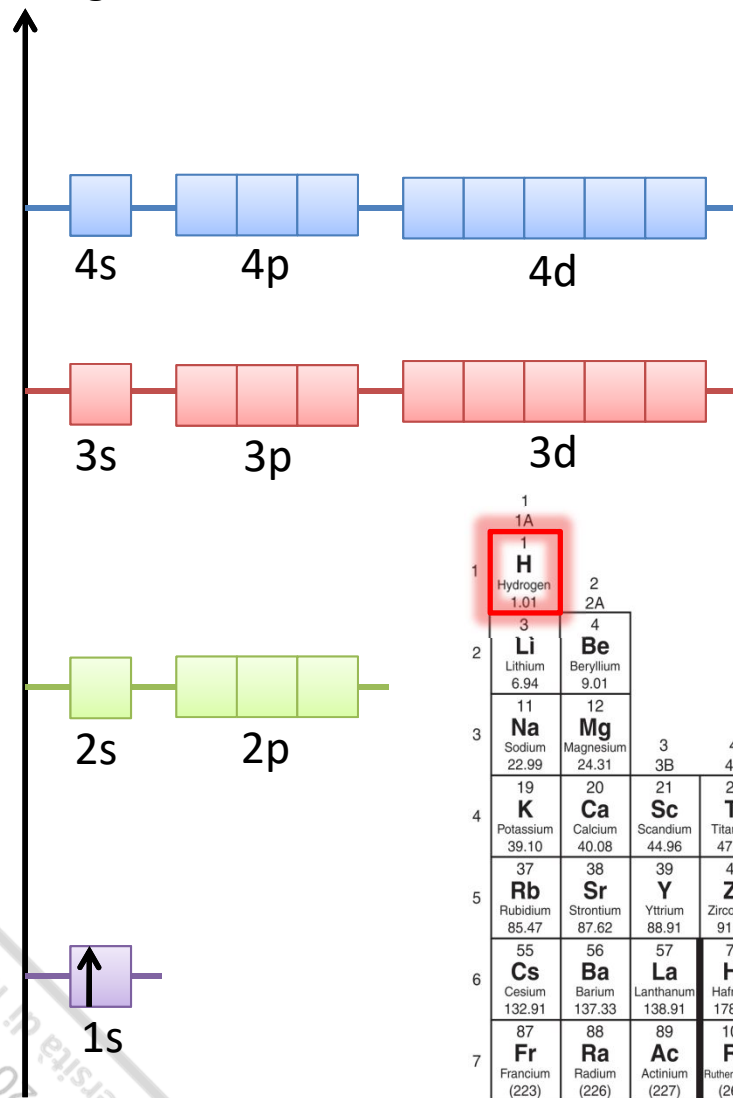
il riempimento progressivo di orbitali degeneri avviene collocando prima, fin quando possibile, un solo elettrone per orbitale, mantenendo gli spin paralleli

3. gli orbitali vengono riempiti in ordine di energia crescente, a cominciare da quelli ad energia più bassa

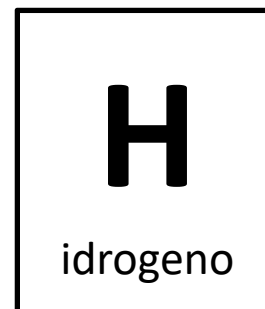
aufbau e configurazione elettronica

slides delle lezioni
ANIFACIO

energia



configurazione elettronica
stato fondamentale



$1s^1$

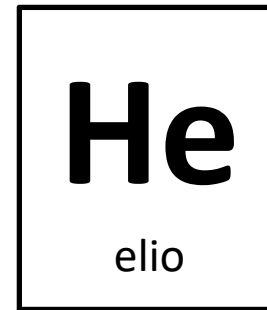
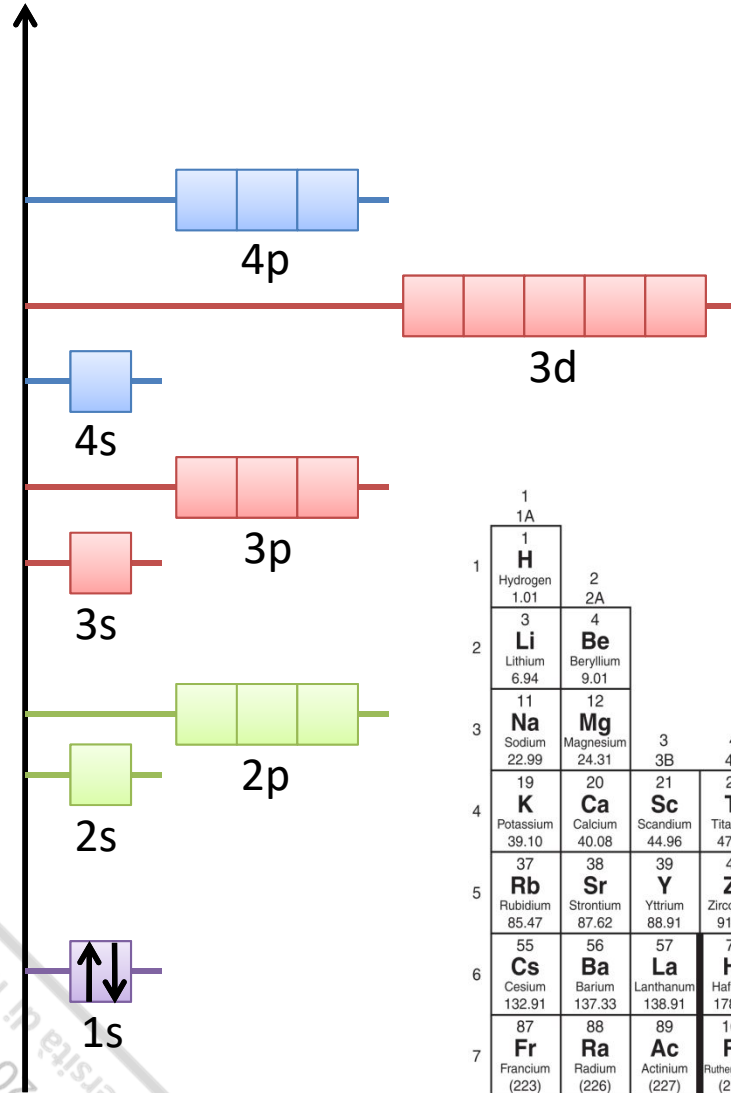
	1 1A																	2 8A						
1	1 H Hydrogen 1.01																	2 Helium 4.00						
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01																	5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18
3	11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31	3	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8	9	10	11 1B	12 2B	13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95						
4	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80						
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29						
6	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)						
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)															

A.A. Università di Trieste
2020-21

aufbau e configurazione elettronica

slides delle lezioni
ANIFACIO

energia



configurazione elettronica
stato fondamentale

$1s^2$
(=[He])

“guscio” $n=1$
completo

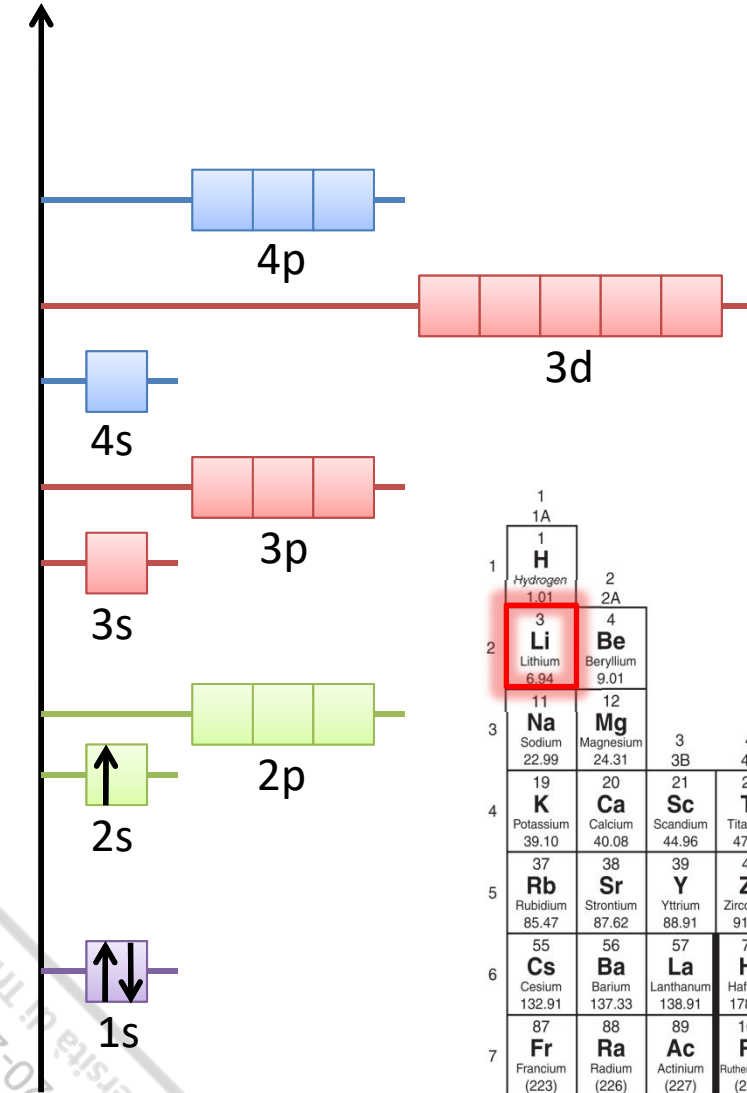
	1 1A	2 2A																		13 3A	14 4A	15 5A	16 6A	17 7A	18 8A								
1	1 H Hydrogen 1.01	2 He Helium 4.00																		5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18								
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01																		11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31												
3	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80															
4	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29															
5	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.91	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.96	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.93	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93	70 Yb Ytterbium 173.05	71 Lu Lutetium 174.97	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)	
6	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)																								
7																																	

A.A. Università di Trieste
2020-21

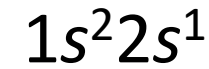
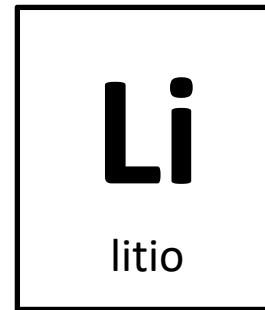
aufbau e configurazione elettronica

slides delle lezioni
ANIMACIO

energia



configurazione elettronica
stato fondamentale



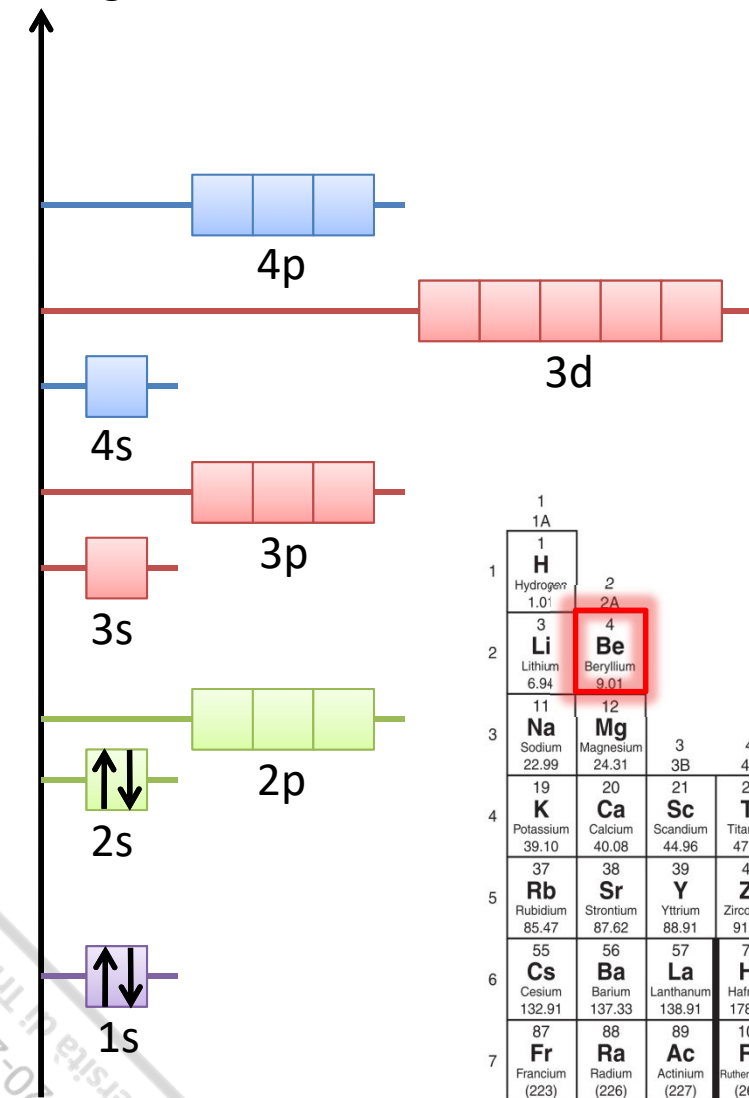
	1 1A		2 2A																18 8A	
1	1 H Hydrogen 1.01		2 Be Beryllium 9.01																	10 Ne Neon 20.18
2	3 Li Lithium 6.94		4 B Boron 10.81										5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95	
3	11 Na Sodium 22.99		12 Mg Magnesium 24.31										13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95		
4	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80		
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29		
6	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)		
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)											

A.A. Università di Trieste
2020-21

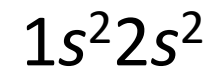
aufbau e configurazione elettronica

slides delle lezioni
ANIMACIO

energia



configurazione elettronica
stato fondamentale



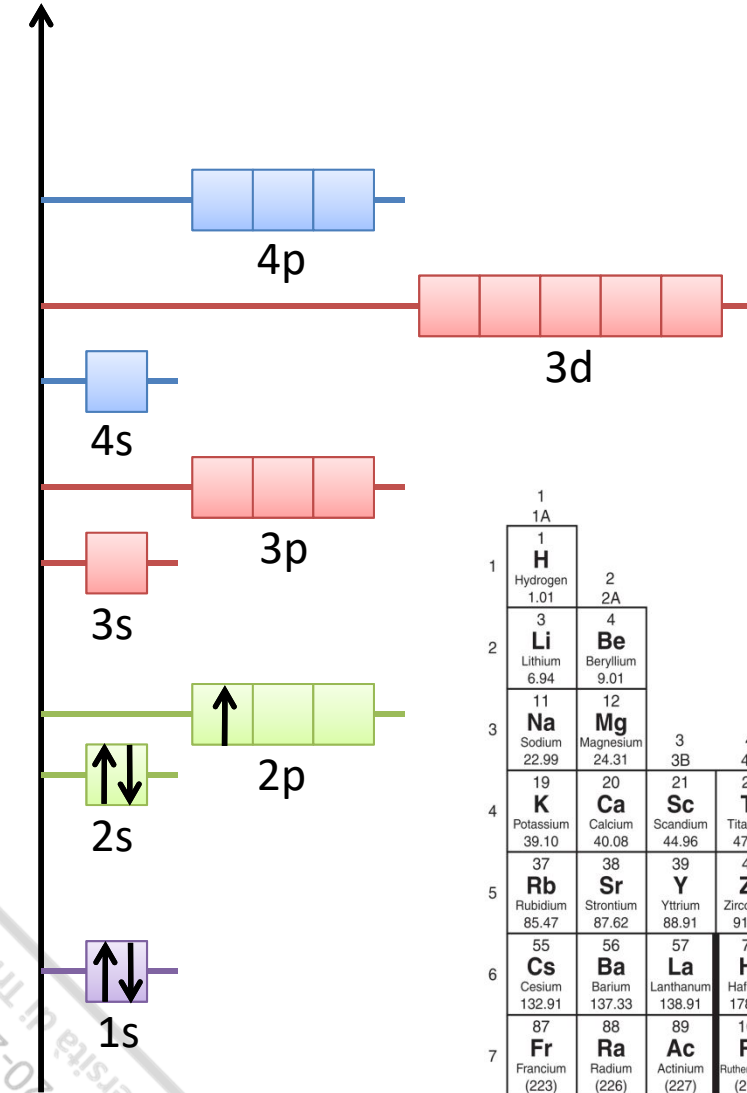
	1 1A	2 2A																	18 8A	
1	1 H Hydrogen 1.01	2 He Helium 4.00																		
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01										5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18			
3	11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31	3 3B	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8 8B	9 9B	10 10B	11 11B	12 12B	13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95		
4	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80		
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29		
6	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)		
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)											

A.A. Università di Trieste
2020-21

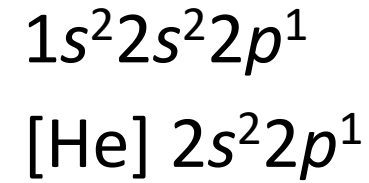
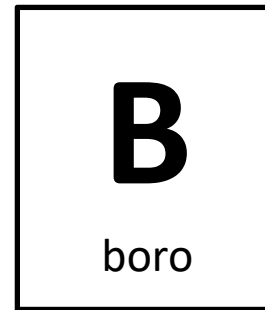
aufbau e configurazione elettronica

slides delle lezioni
ANIMACIO

energia



configurazione elettronica
stato fondamentale



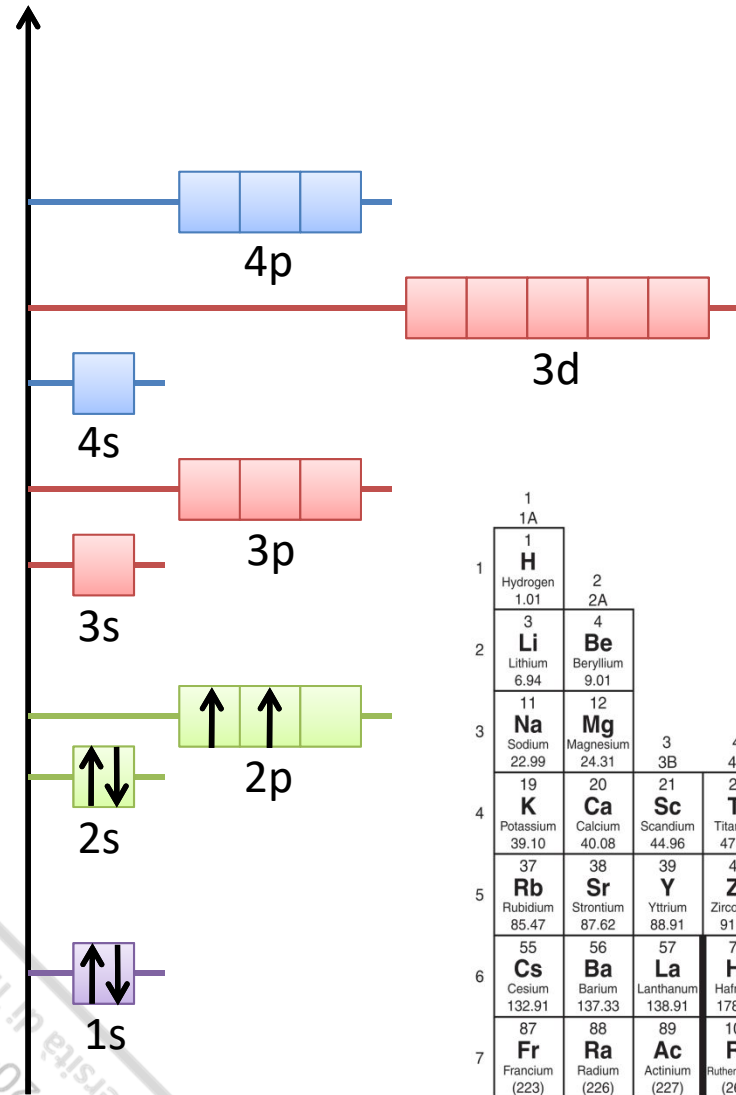
	1 1A	2 2A																	18 8A	
1	1 H Hydrogen 1.01	2 He Helium 4.00																		
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01										5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18			
3	11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31	3 3B	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8 8B	9 9B	10 10B	11 11B	12 12B	13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95		
4	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80		
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29		
6	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)		
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)											

A.A. Università di Trieste
2020-21

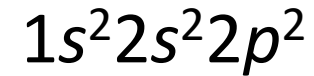
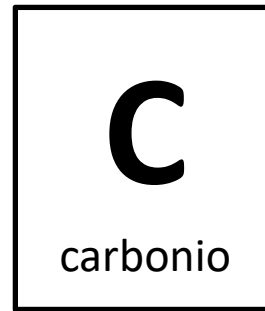
aufbau e configurazione elettronica

slides delle lezioni
ANIMACIO

energia



configurazione elettronica
stato fondamentale



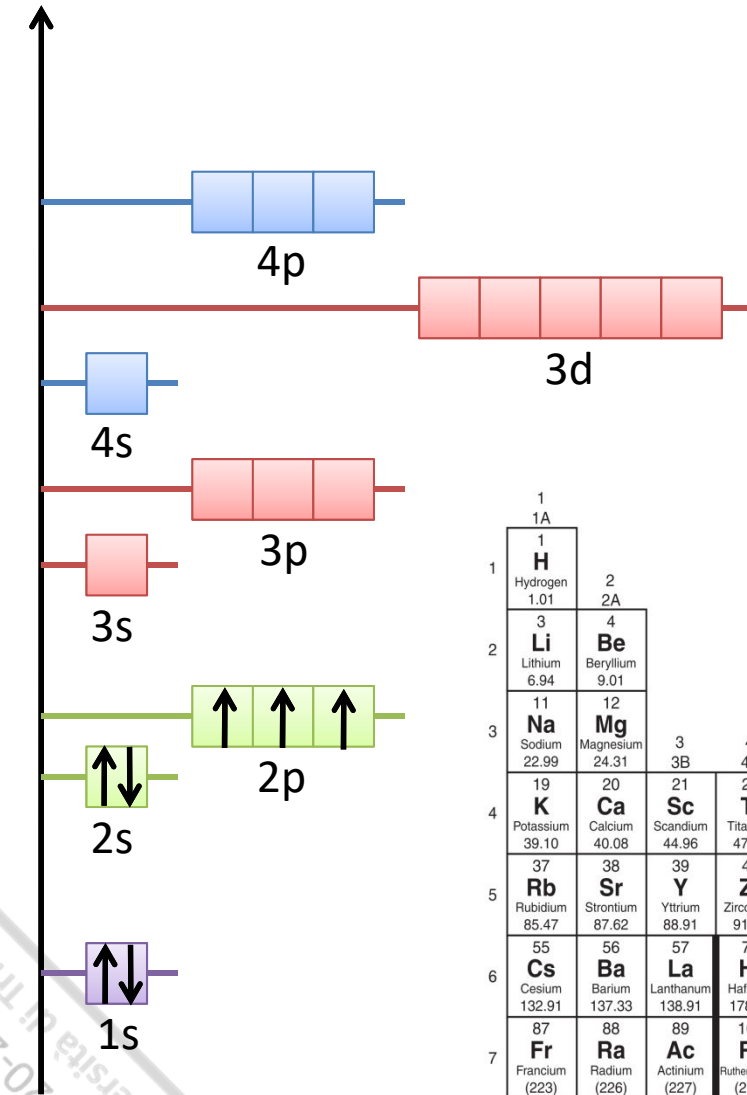
	1 1A	2 2A																18 8A	
1	1 H Hydrogen 1.01	2 He Helium 4.00																	
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01																	
3	11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31	3	4 Ti Titanium 47.87	5 V Vanadium 50.94	6 Cr Chromium 52.00	7 Mn Manganese 54.94	8	9	10	11 Cu Copper 63.55	12 Zn Zinc 65.39							
4	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80	
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29	
6	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)	
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)										

A.A. Università di Trieste
2020-21

aufbau e configurazione elettronica

slides delle lezioni
ANIMACIO

energia



configurazione elettronica
stato fondamentale



N

azoto

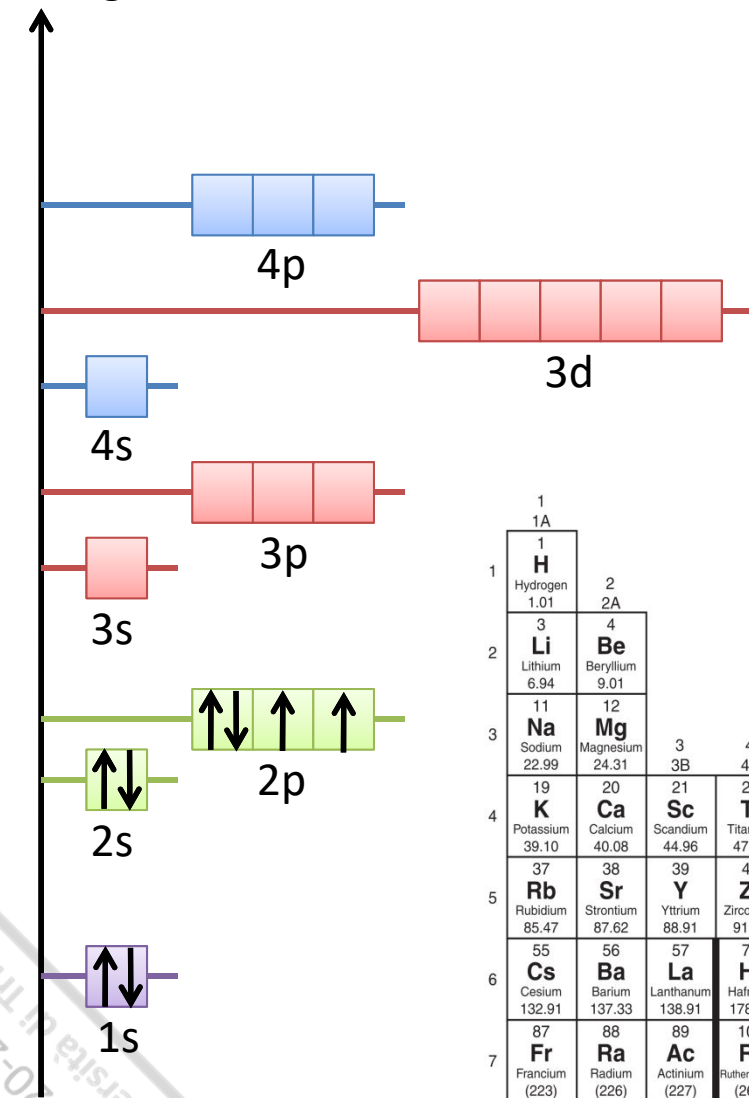
	1 1A																	18 8A	
1	1 H Hydrogen 1.01	2 2A												13 3A	14 4A	15 5A	16 6A	17 7A	18 8A
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01												5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18
3	11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31	3 3B	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8 8B	9 9B	10 10B	11 11B	12 12B		13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95
4	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39		31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41		49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29
6	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59		81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)										

A.A. Università di Trieste
2020-21

aufbau e configurazione elettronica

slides delle lezioni
ANIMACIO

energia



configurazione elettronica
stato fondamentale



O

ossigeno

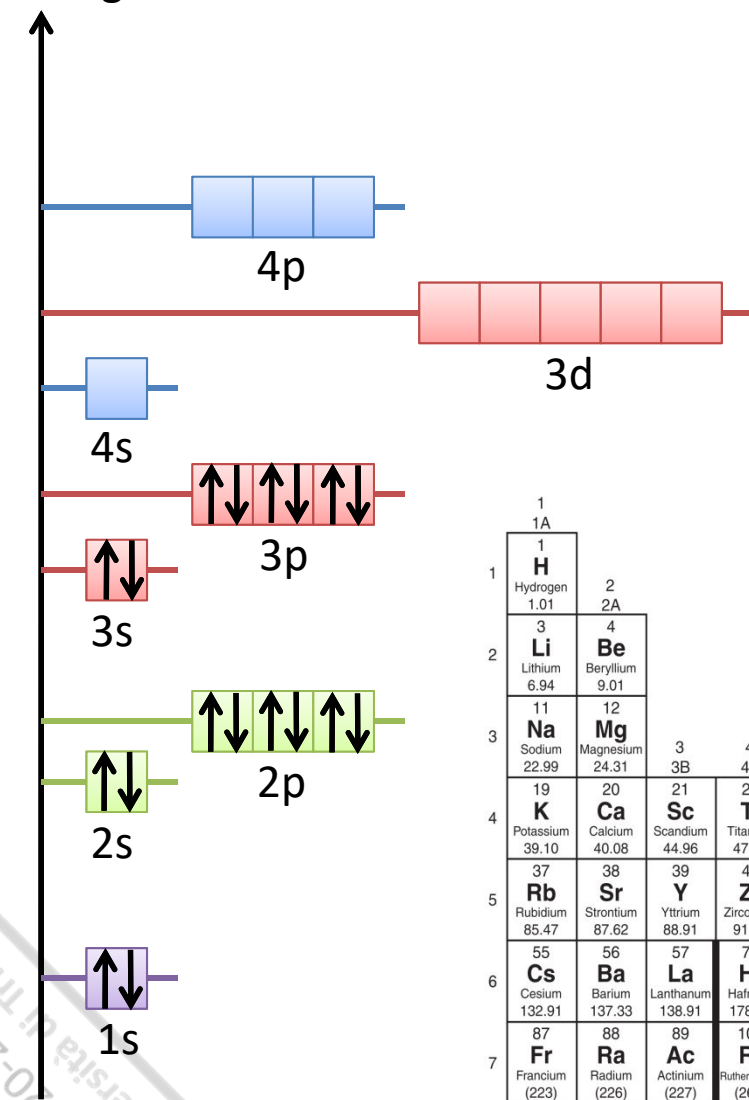
	1 1A	2 2A																	18 8A	
1	1 H Hydrogen 1.01	2 He Helium 4.00																		
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01										5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18			
3	11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31	3 3B	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8 8B	9 9B	10 10B	11 11B	12 12B	13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95		
4	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80		
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29		
6	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)		
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)											

A.A. Università di Trieste
2020-21

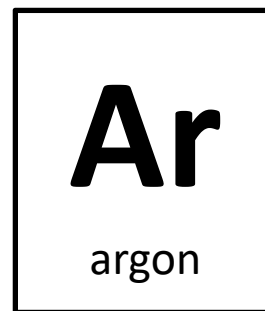
aufbau e configurazione elettronica

slides delle lezioni
ANIFACIO

energia



configurazione elettronica
stato fondamentale



[Ar]

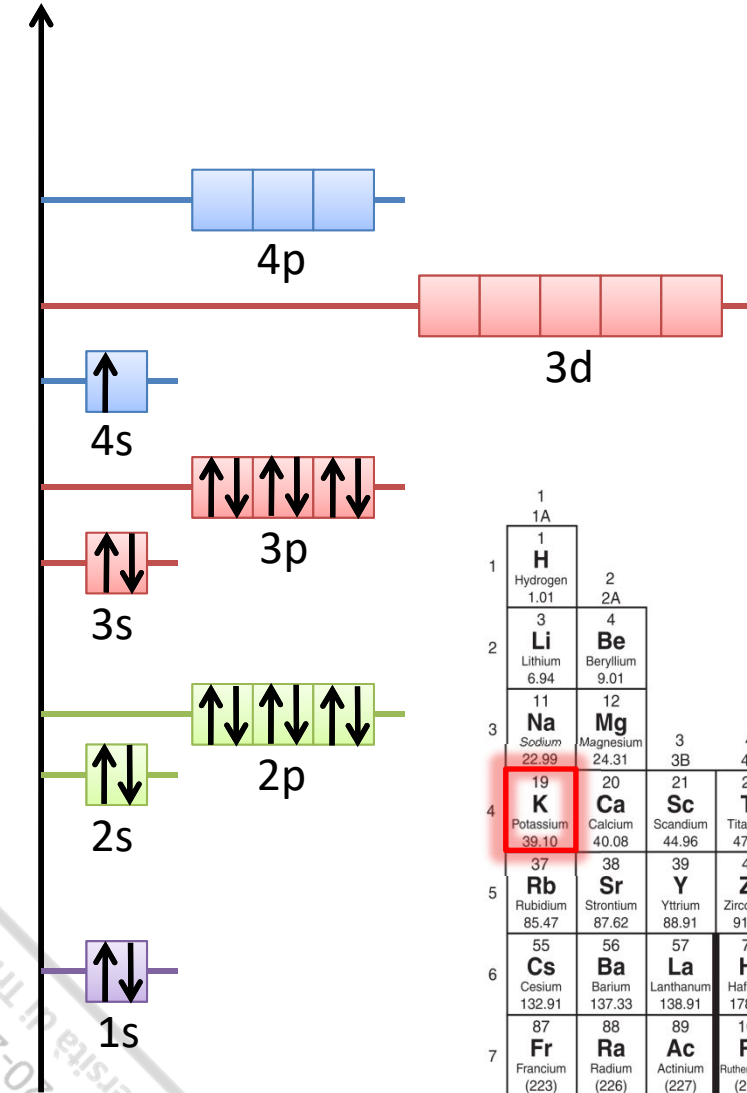
	1 1A																		2 8A		
1	1 H Hydrogen 1.01	2 2A																		2 He Helium 4.00	
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01										5 3A	6 4A	7 5A	8 6A	9 7A	10 8A				
												5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18				
3	11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31	3 3B	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8 8B	9 9B	10 10B	11 11B	12 12B	13 3A	14 4A	15 5A	16 6A	17 7A	18 8A			
													13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95			
4	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80			
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29			
6	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)			
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)												

A.A. Università di Trieste
2020-21

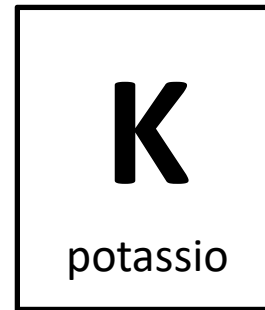
aufbau e configurazione elettronica

slides delle lezioni
ANIMACIO

energia



configurazione elettronica
stato fondamentale



$[\text{Ar}] 4s^1$

!! 4s e non 3d !!

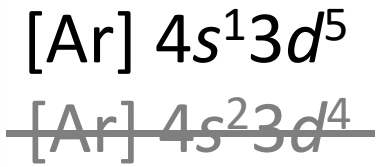
	1 1A	2 2A																	18 8A	
1	1 H Hydrogen 1.01	2 He Helium 4.00																		
2	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01										5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18			
3	11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31	3 Sc Scandium 44.96	4 Ti Titanium 47.87	5 V Vanadium 50.94	6 Cr Chromium 52.00	7 Mn Manganese 54.94	8 Fe Iron 55.85	9 Co Cobalt 58.93	10 Ni Nickel 58.69	11 Cu Copper 63.55	12 Zn Zinc 65.39	13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95		
4	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80		
5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29		
6	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)		
7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)											

A.A. Università di Trieste
2020-21

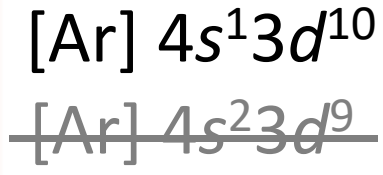
eccezioni

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

Cr
cromo



Cu
rame



1	1A																	18	8A
1	H Hydrogen 1.01	2	2A																He Helium 4.00
2	Li Lithium 6.94	Be Beryllium 9.01																	10 Ne Neon 20.18
3	Na Sodium 22.99	Mg Magnesium 24.31	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
			3B	4B	5B	6B	7B	8B			1B	2B	3A	4A	5A	6A	7A		
4	K Potassium 39.10	Ca Calcium 40.08	Sc Scandium 44.96	Ti Titanium 47.87	V Vanadium 50.94	Cr Chromium 52.00	Mn Manganese 54.94	Fe Iron 55.85	Co Cobalt 58.93	Ni Nickel 58.69	Cu Copper 63.55	Zn Zinc 65.39	Ga Gallium 69.72	Ge Germanium 72.61	As Arsenic 74.92	Se Selenium 78.96	Br Bromine 79.90	Kr Krypton 83.80	
5	Rb Rubidium 85.47	Sr Strontium 87.62	Y Yttrium 88.91	Zr Zirconium 91.22	Nb Niobium 92.91	Mo Molybdenum 95.94	Tc Technetium (98)	Ru Ruthenium 101.07	Rh Rhodium 102.91	Pd Palladium 106.42	Ag Silver 107.87	Cd Cadmium 112.41	In Indium 114.82	Sn Tin 118.71	Sb Antimony 121.76	Te Tellurium 127.60	I Iodine 126.90	Xe Xenon 131.29	
6	Cs Cesium 132.91	Ba Barium 137.33	La Lanthanum 138.91	Hf Hafnium 178.49	Ta Tantalum 180.95	W Tungsten 183.84	Re Rhenium 186.21	Os Osmium 190.23	Ir Iridium 192.22	Pt Platinum 195.08	Au Gold 196.97	Hg Mercury 200.59	Tl Thallium 204.38	Pb Lead 207.2	Bi Bismuth 208.98	Po Polonium (209)	At Astatine (210)	Rn Radon (222)	
7	Fr Francium (223)	Ra Radium (226)	Ac Actinium (227)	Rf Rutherfordium (261)	Db Dubnium (262)	Sg Seaborgium (266)	Bh Bohrium (264)	Hs Hassium (269)	Mt Meitnerium (268)										

Univ
202
A.A. 2021-22

stesso
guscio
esterno
gruppo

guscio esterno
"elettroni di valenza"

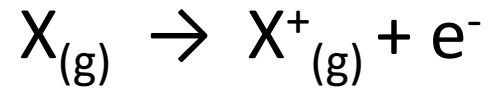
1	1A	1 H Hydrogen 1.01	2 He Helium 4.00	18 8A															
2	2A	3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01	5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18										
3	3A	11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31	13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95										
4	4A	19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80
5	5A	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29
6	6A	55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)
7	7A	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)									

periodo
guscio esterno
con lo stesso n

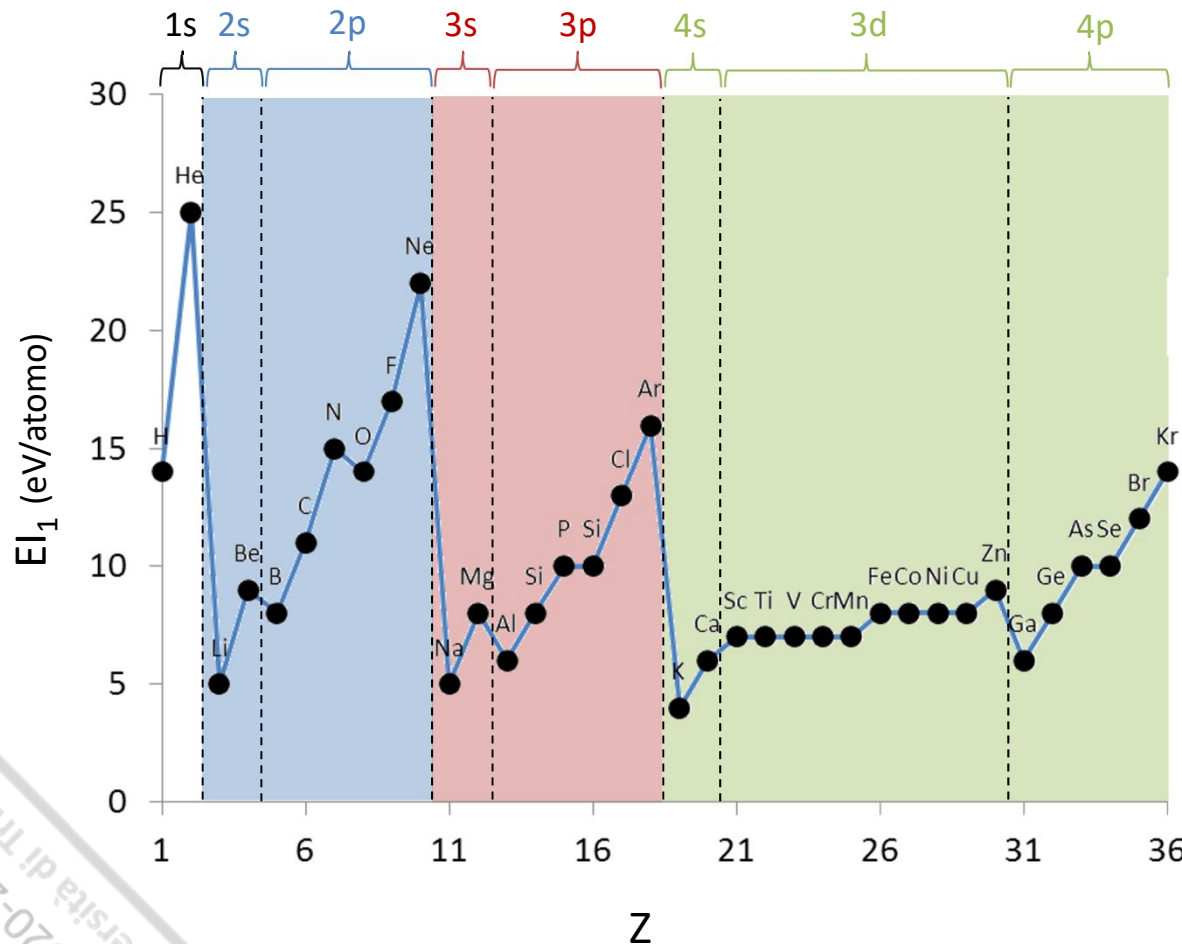
58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.91	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.96	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.93	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.97
90 Th Thorium 232.04	91 Pa Protactinium 231.04	92 U Uranium 238.03	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

Energie di Prima Ionizzazione

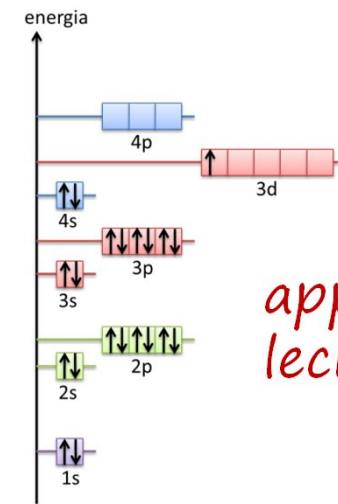
energia minima necessaria per
rimuovere un elettrone
dall'atomo neutro gassoso



slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



evidenza sperimentale
struttura elettronica a
gusci per atomi poli-
elettronici

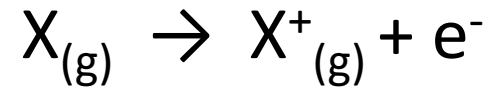


*approx.
lecita!*

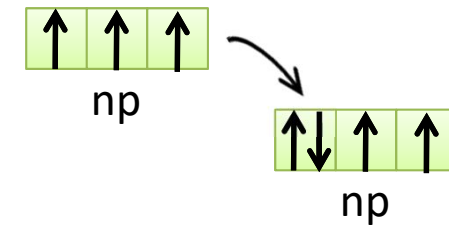
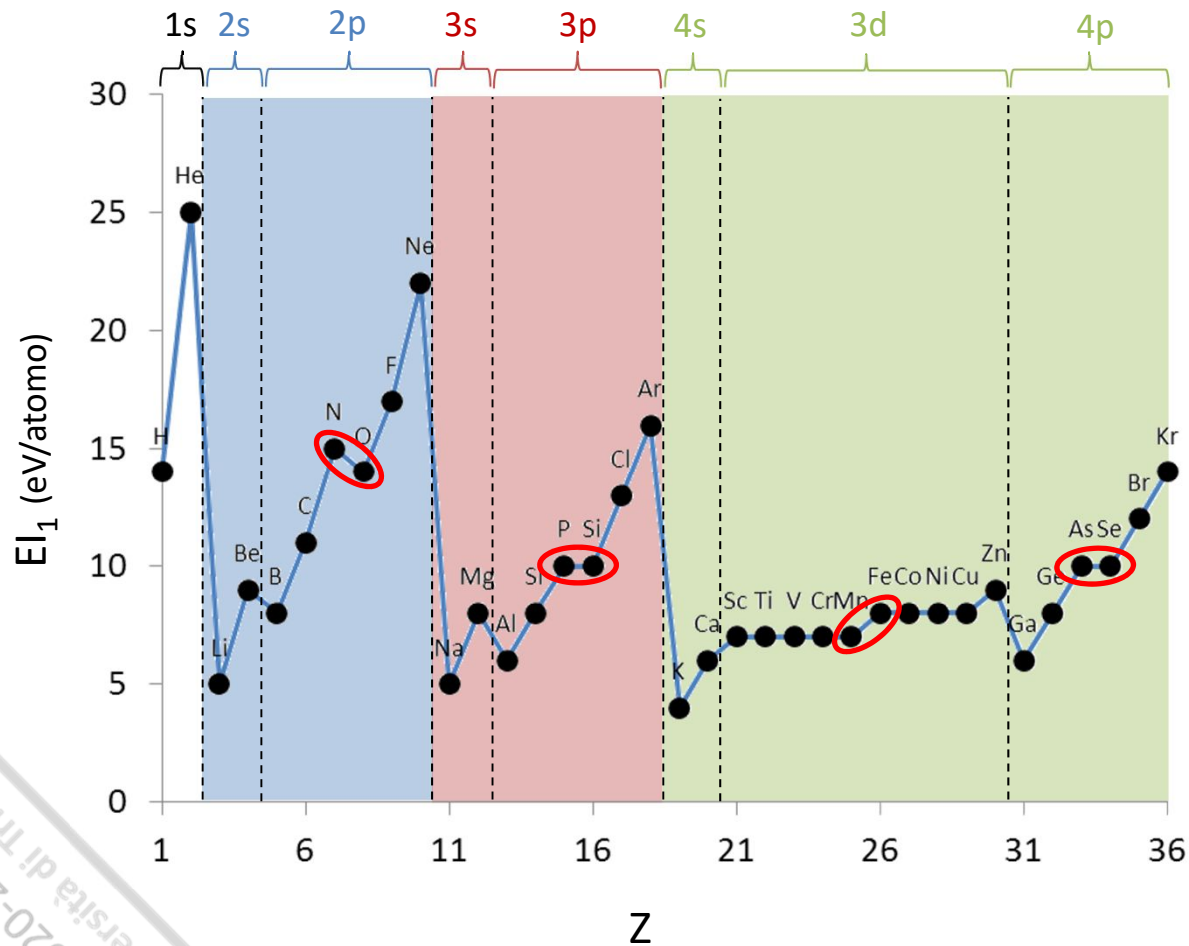
A.A. Università di Trieste
2020-21

Energie di Prima Ionizzazione

energia minima necessaria per
rimuovere un elettrone
dall'atomo neutro gassoso



slides
delle lezioni
A. BONIFACIO



*andamento
non monotono*

A. A.
2020-21
Università di Trieste

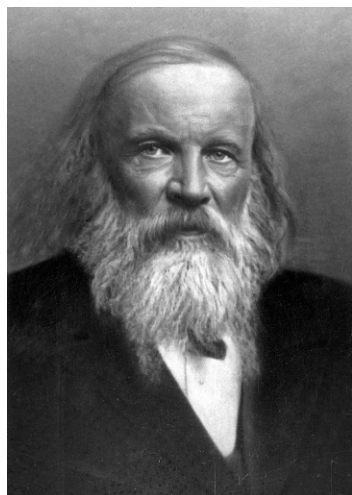
1 1A 1 H Hydrogen 1.01	2 2A 4 Be Beryllium 9.01											13 3A 13 Al Aluminum 26.98	14 4A 14 Si Silicon 28.09	15 5A 15 P Phosphorus 30.97	16 6A 16 S Zolfo 32.07	17 7A 17 Cl Clorina 35.45	18 8A 2 He Elio 4.00																
3 Li Lithium 6.94	11 Na Sodio 22.99	19 K Potassio 39.10	20 Ca Calcio 40.08	21 Sc Scandio 44.96											22 Ti Titanio 47.87	23 V Vanadio 50.94	24 Cr Cromio 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Ferro 55.85	27 Co Cobalto 58.93	28 Ni Nichel 58.69	29 Cu Rame 63.55	30 Zn Zinco 65.39	31 Ga Gallio 69.72	32 Ge Germanio 72.61	33 As Arsenico 74.92	34 Se Selenio 78.96	35 Br Bromo 79.90	36 Kr Kripton 83.80				
5 Rb Rubidio 85.47	37 Sr Stronzio 87.62	55 Cs Cesio 132.91	56 Ba Bario 137.33	57 La Lantanio 138.91	58 Ce Cerio 140.12	59 Pr Praseodimio 140.91	60 Nd Neodimio 144.24	61 Pm Prometio (145)	62 Sm Samario 150.36	63 Eu Eurio 151.96	64 Gd Gadolino 157.25	65 Tb Terbio 158.93	66 Dy Diospro 162.50	67 Ho Holmio 164.93	68 Er Erbio 167.26	69 Tm Tulio 168.93	70 Yb Ytterbio 173.04	71 Lu Lutetio 174.97	72 Hf Hafnio 178.49	73 Ta Tantalo 180.95	74 W Wolframio 183.84	75 Re Renio 186.21	76 Os Osmio 190.23	77 Ir Iridio 192.22	78 Pt Platino 195.08	79 Au Oro 196.97	80 Hg Mercurio 200.59	81 Tl Tallio 204.38	82 Pb Piombo 207.2	83 Bi Bismuto 208.98	84 Po Polonio (209)	85 At Astatina (210)	86 Rn Radone (222)
7 Fr Francio (223)	87 Rf Rutherfordio (261)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinio (227)	90 Th Torio 232.04	91 Pa Protattinio 231.04	92 U Uranio 238.03	93 Np Neptunio (237)	94 Pu Plutonio (244)	95 Am Americio (243)	96 Cm Curcio (247)	97 Bk Berkeleyo (247)	98 Cf Californio (251)	99 Es Einsteinio (252)	100 Fm Fermio (257)	101 Md Mendelevio (258)	102 No Nobelio (259)	103 Lr Lawrencio (262)	104 Rf Rutherfordio (261)	105 Db Dubnio (262)	106 Sg Seaborgio (266)	107 Bh Bohrlio (264)	108 Hs Hassio (269)	109 Mt Meitnerio (268)										

lantanidi ed attinidi (terre rare)

1 1A 1 H Hydrogen 1.01	2 2A 4 Be Beryllium 9.01											13 3A 13 Al Aluminum 26.98	14 4A 14 Si Silicon 28.09	15 5A 15 P Phosphorus 30.97	16 6A 16 S Zolfo 32.07	17 7A 17 Cl Clorina 35.45	18 8A 2 He Elio 4.00																
3 Li Lithium 6.94	11 Na Sodio 22.99	19 K Potassio 39.10	20 Ca Calcio 40.08	21 Sc Scandio 44.96	22 Ti Titanio 47.87	23 V Vanadio 50.94	24 Cr Cromio 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Ferro 55.85	27 Co Cobalto 58.93	28 Ni Nichel 58.69	29 Cu Rame 63.55	30 Zn Zinco 65.39	31 Ga Gallio 69.72	32 Ge Germanio 72.61	33 As Arsenico 74.92	34 Se Selenio 78.96	35 Br Bromo 79.90	36 Kr Kripton 83.80														
5 Rb Rubidio 85.47	37 Sr Stronzio 87.62	55 Cs Cesio 132.91	56 Ba Bario 137.33	57 La Lantanio 138.91	58 Ce Cerio 140.12	59 Pr Praseodimio 140.91	60 Nd Neodimio 144.24	61 Pm Prometio (145)	62 Sm Samario 150.36	63 Eu Eurio 151.96	64 Gd Gadolino 157.25	65 Tb Terbio 158.93	66 Dy Diospro 162.50	67 Ho Holmio 164.93	68 Er Erbio 167.26	69 Tm Tulio 168.93	70 Yb Ytterbio 173.04	71 Lu Lutetio 174.97	72 Hf Hafnio 178.49	73 Ta Tantalo 180.95	74 W Wolframio 183.84	75 Re Renio 186.21	76 Os Osmio 190.23	77 Ir Iridio 192.22	78 Pt Platino 195.08	79 Au Oro 196.97	80 Hg Mercurio 200.59	81 Tl Tallio 204.38	82 Pb Piombo 207.2	83 Bi Bismuto 208.98	84 Po Polonio (209)	85 At Astatina (210)	86 Rn Radone (222)
7 Fr Francio (223)	87 Rf Rutherfordio (261)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinio (227)	90 Th Torio 232.04	91 Pa Protattinio 231.04	92 U Uranio 238.03	93 Np Neptunio (237)	94 Pu Plutonio (244)	95 Am Americio (243)	96 Cm Curcio (247)	97 Bk Berkeleyo (247)	98 Cf Californio (251)	99 Es Einsteinio (252)	100 Fm Fermio (257)	101 Md Mendelevio (258)	102 No Nobelio (259)	103 Lr Lawrencio (262)	104 Rf Rutherfordio (261)	105 Db Dubnio (262)	106 Sg Seaborgio (266)	107 Bh Bohrlio (264)	108 Hs Hassio (269)	109 Mt Meitnerio (268)										

A.A. Università di Trieste
2020-21

1869



Dmitrij I. Mendeleev

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

		Ti = 50	Zr = 90	? = 180.	
		V = 51	Nb = 94	Ta = 182.	
		Cr = 52	Mo = 96	W = 186.	
		Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4.	
		Fe = 56	Rn = 104,4	Ir = 198.	
		Ni = 59	Co = 59	Pt = 106,8	O = 199.
		Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200.	
H = 1	Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
	B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Lu = 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.
				Ba = 137	Pb = 207.
				Ce = 92	
				? = 45	
				?Er = 56	La = 94
				?Yt = 60	Di = 95
				?In = 75,6	Th = 118?

Д. Менделѣевъ

slides
delle lezioni
A. BONIFACIO

Università di Trieste
2020-21
A. A.

proprietà periodiche e struttura elettronica

1 1A																	18 8A
1 H Hydrogen 1.01																	2 He Helium 4.00
2 3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.01											5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.01	8 O Oxygen 16.00	9 F Fluorine 19.00	10 Ne Neon 20.18
3 11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31	3 3B	4 4B	5 5B	6 6B	7 7B	8 8B	9 8B	10 8B	11 1B	12 2B	13 Al Aluminum 26.98	14 Si Silicon 28.09	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulfur 32.07	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.95
4 19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.96	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 52.00	25 Mn Manganese 54.94	26 Fe Iron 55.85	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.55	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80
5 37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.91	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.91	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.41	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.76	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.29
6 55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.33	57 La Lanthanum 138.91	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.95	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.21	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.97	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)

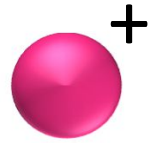
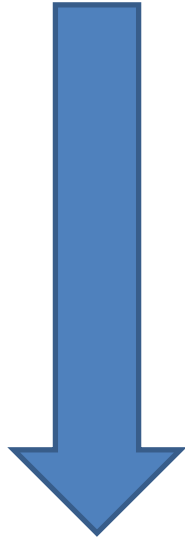
raggio atomico

Aumenta scendendo lungo un gruppo

Diminuisce andando da sinistra a destra lungo un periodo

dimensioni di cationi ed anioni

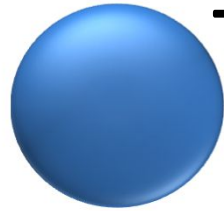
dimensioni
atomiche



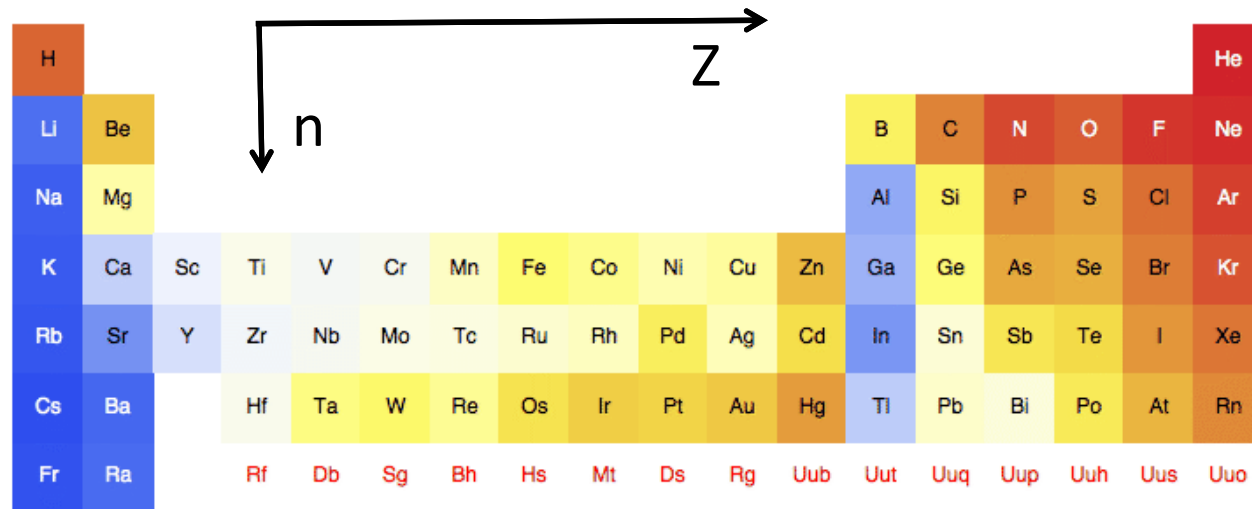
cationi



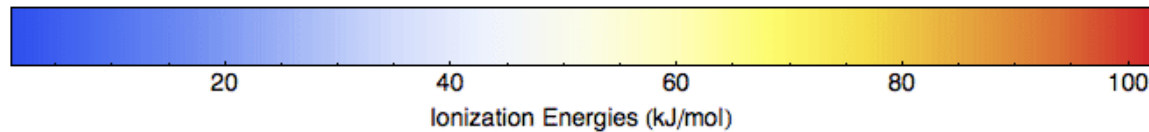
atomi
neutri



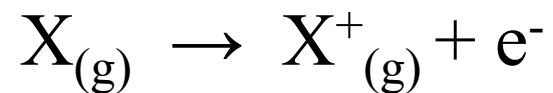
anioni



La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr



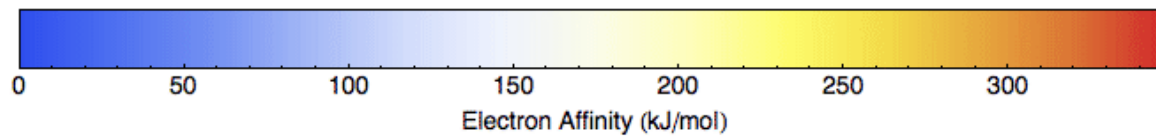
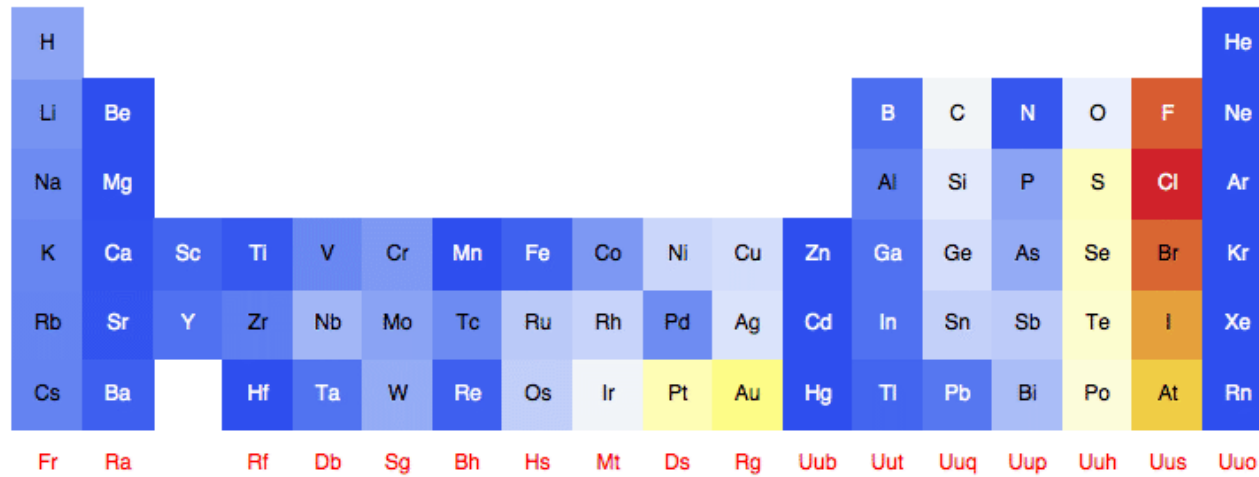
energia di prima ionizzazione



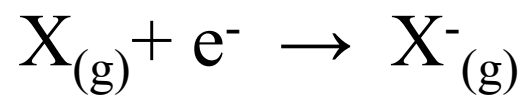
energia minima necessaria per rimuovere
un elettrone dall'atomo neutro gassoso

$$E_{1a \text{ ionizzazione}} < E_{2a \text{ ionizzazione}} < E_{3a \text{ ionizzazione}}$$

diventa sempre più difficile (costoso) strappare un elettrone



affinità elettronica



energia emessa quando un elettrone si
lega ad un atomo neutro gassoso