

APPUNTI
DI
MECCANICA
QUANTISTICA



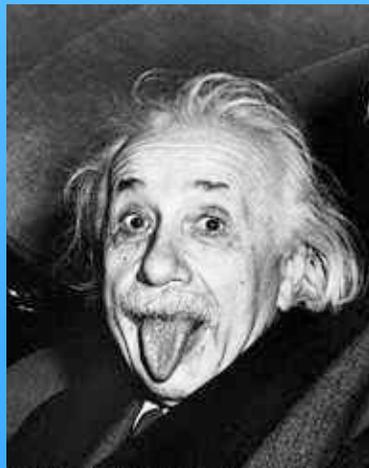
by Andrea Grieco



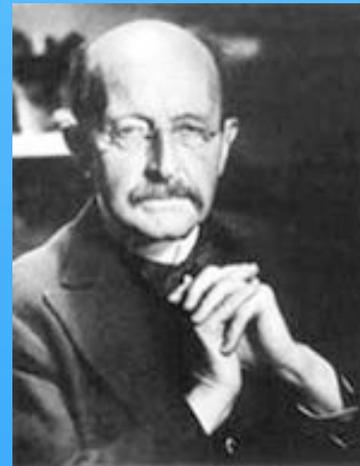
PROBLEMI DI FINE SECOLO

ALCUNI PROBLEMI APERTI DELLA FISICA CLASSICA ALLA FINE DEL XIX SECOLO

- ESISTENZA DELL'ETERE
- STRUTTURA ATOMICA
- EFFETTO FOTOELETTRICO
- SPETTRO DEL CORPO NERO



ALBERT EINSTEIN

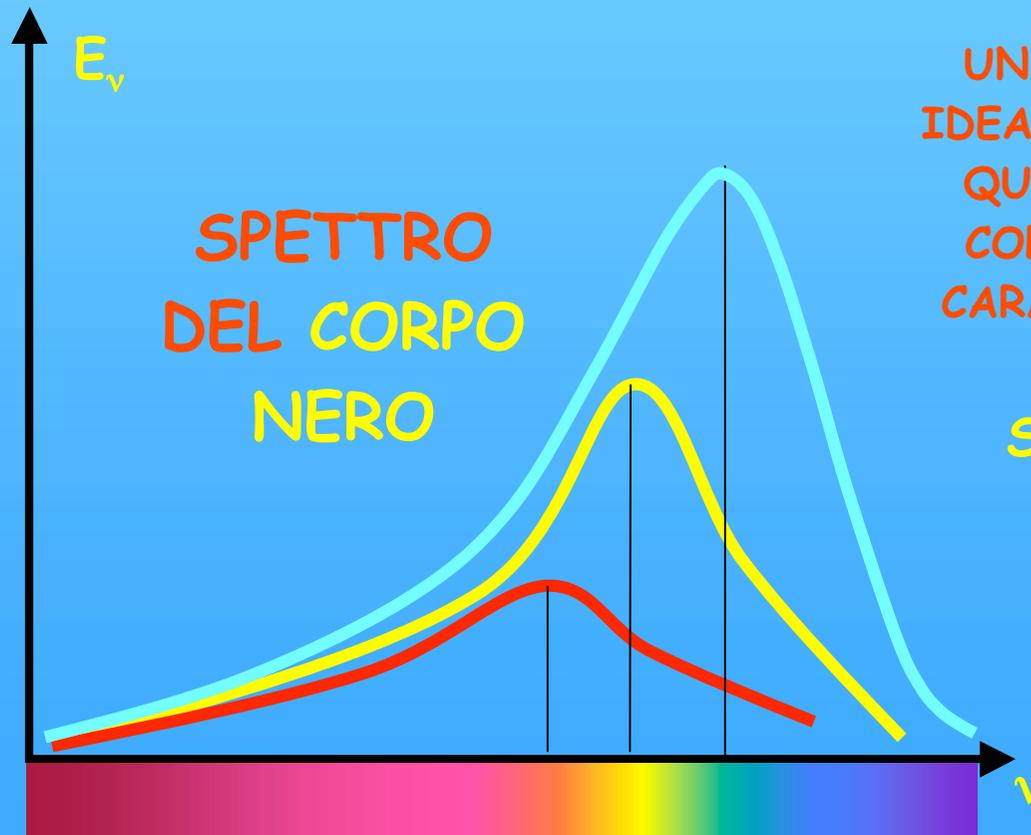


MAX PLANCK



IL CORPO NERO

ALL'AUMENTARE DELLA TEMPERATURA UN CORPO EMETTE LUCE CHE PASSA DAL
ROSSO CUPO AL BIANCO



UN CORPO NERO E' UN CORPO
IDEALE IN GRADO DI ASSORBIRE
QUALUNQUE RADIAZIONE LO
COLPISCA IL SUO SPETTRO E'
CARATTERISTICO UNICAMENTE
DALLA TEMPERATURA

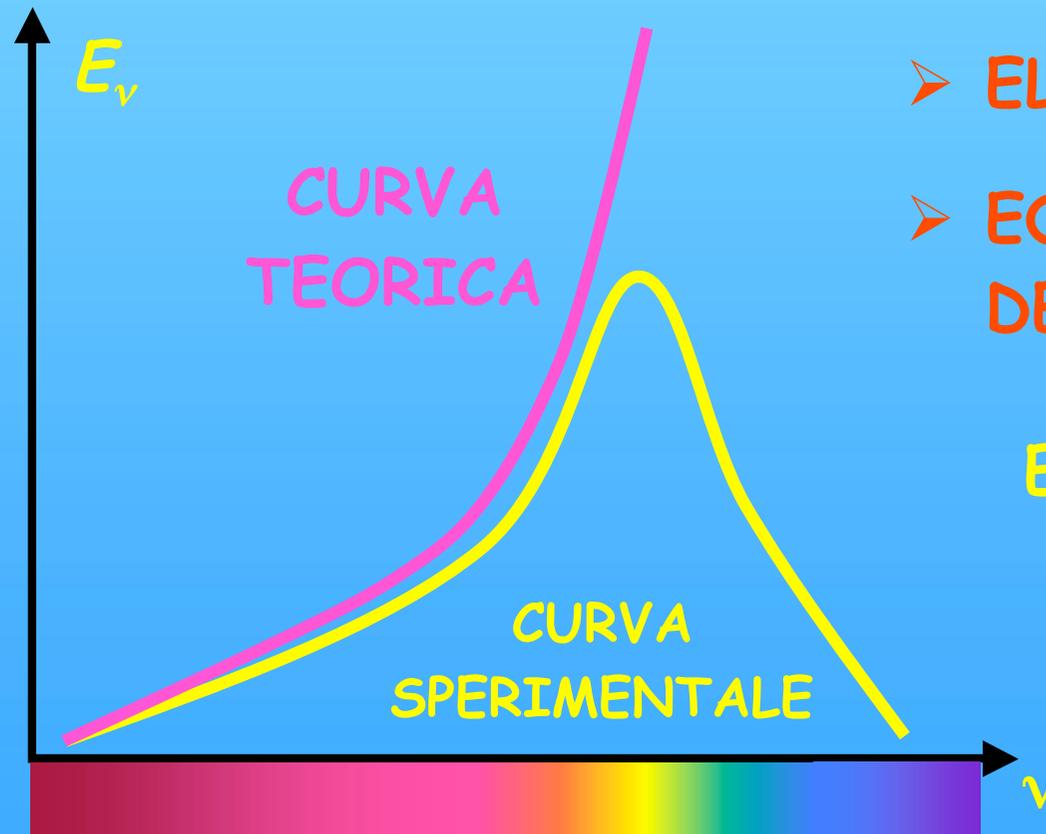
$$\text{STEFAN-BOLTZMANN } E = \sigma T^4$$

$$\text{WIEN } \lambda_{\text{MAX}} T = \text{COST.}$$



LA CATASTROFE ULTRAVIOLETTA

1900-05 RAYLEIGH E JEANS RICAVANO UNA CURVA TEORICA PER LO SPETTRO DEL CORPO NERO



➤ ELETTROMAGNETISMO

➤ EQUIPARTIZIONE
DELL'ENERGIA

EMISSIONE DI
ENERGIA INFINITA!!!

RAYLEIGH-JEANS

$$E_{\nu} = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 kT$$



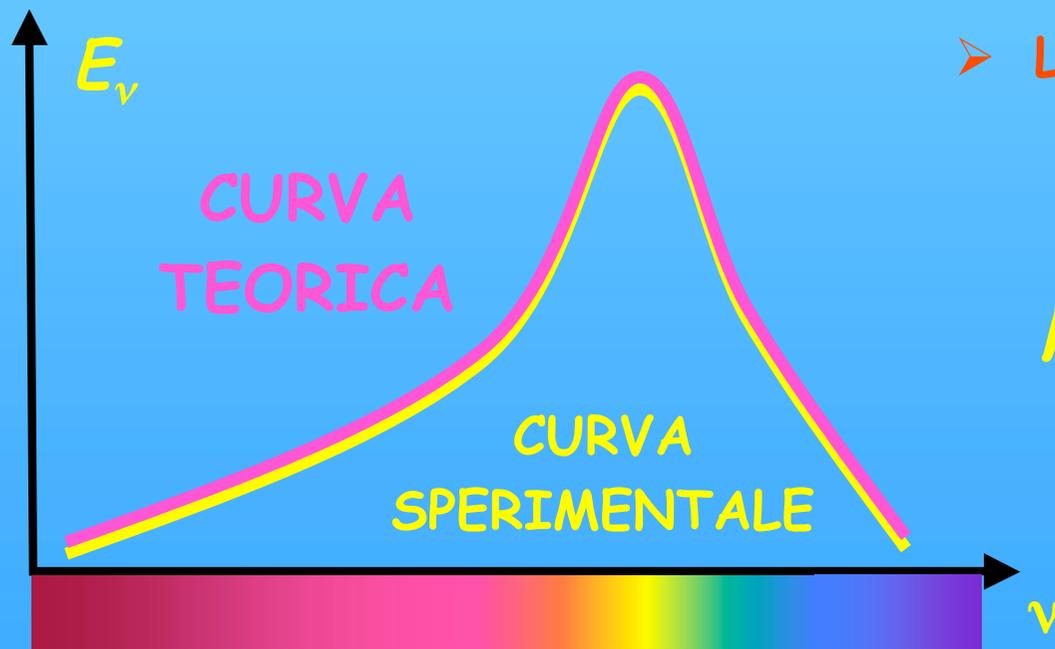
"...UN ATTO DI DISPERAZIONE..."

1900-01 PLANCK CURVA TEORICA SPETTRO DEL CORPO NERO

"...l'elemento di energia ε deve essere proporzionale alla frequenza ν ..."

M. Planck "On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum" - Annalen der Physik, 1901

- CONSERVAZIONE ENERGIA
- LEGGE DELL'ENTROPIA



$$\varepsilon = h\nu$$

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

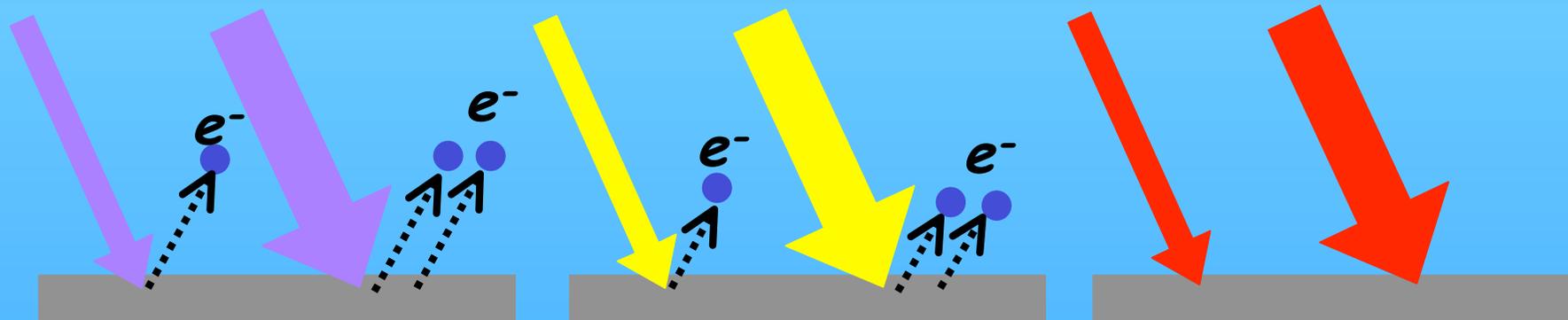
$$E_{\nu} = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



L'EFFETTO FOTOELETTRICO

EFFETTO FOTOELETTRICO: EMISSIONE DI ELETTRONI DA PARTE DI METALLI COLPITI DA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA

1839 BEQUEREL 1887 HERTZ 1899 JJ THOMSON 1902 VON LENARD

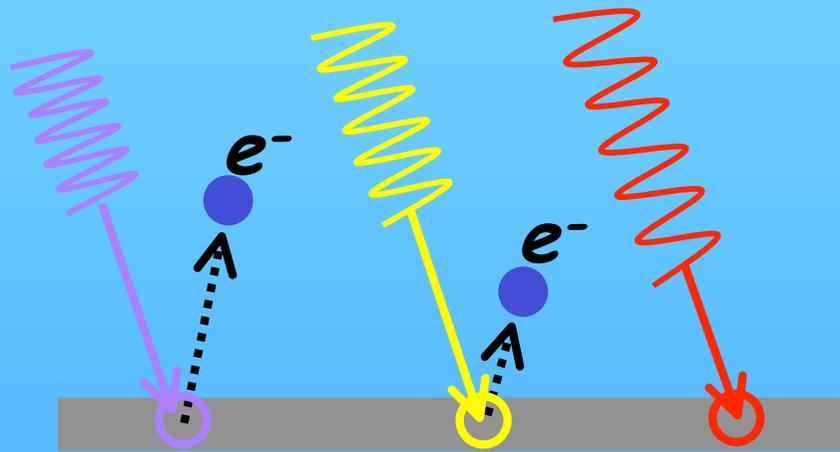


- **IL NUMERO DI ELETTRONI EMESSI E' PROPORZIONALE ALL'INTENSITA' DELLA RADIAZIONE**
- **LA VELOCITA' DEGLI ELETTRONI EMESSI E' PROPORZIONALE ALLA FREQUENZA**
- **AL DI SOTTO DI UNA CERTA FREQUENZA DI SOGLIA NON VI E' EMISSIONE DI ELETTRONI**



I QUANTI DI LUCE

1905 A. EINSTEIN "On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light" AdP



$$E = h\nu$$

$$h\nu - W = E_c$$

- LA LUCE E' EMESSA E ASSORBITA IN PACCHETTI DI ENERGIA DISCRETA DETTI QUANTI DI LUCE
- L'ENERGIA DI UN QUANTO E' PROPORZIONALE ALLA FREQUENZA
- PER ESTRARRE UN ELETTRONE DAL METALLO OCCORRE FORNIRE UN'ENERGIA MINIMA (LAVORO DI ESTRAZIONE)
- L'INTENSITA' DELLA LUCE E' PROPORZIONALE AL NUMERO DI QUANTI



LE IMPRONTI DEGLI ATOMI

RAGGIO
DI LUCE

SPETTRO

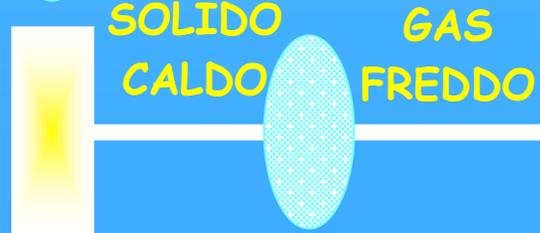
PRISMA



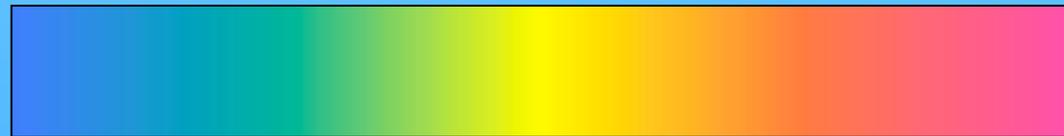
SOLIDO
CALDO



GAS
CALDO



SOLIDO
CALDO GAS
FREDDO



CONTINUO EMISIONE



RIGHE EMISIONE



RIGHE ASSORBIMENTO



SPETTRI

ESEMPI DI SPETTRI



H



He

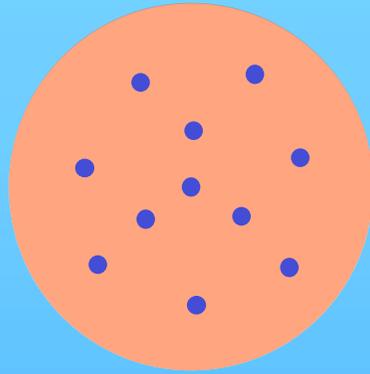


O



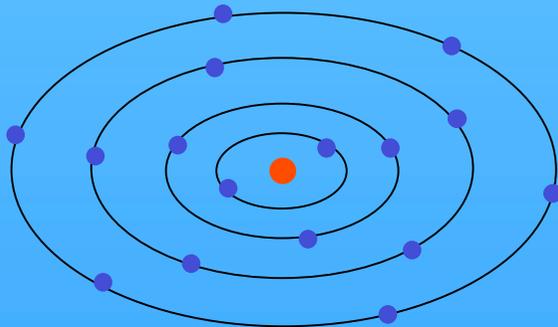
SOLE

MODELLI ATOMICI



1904 THOMSON
MODELLO A PANETTONE

- IN CONTRASTO CON L'ESPERIMENTO DI RUTHERFORD



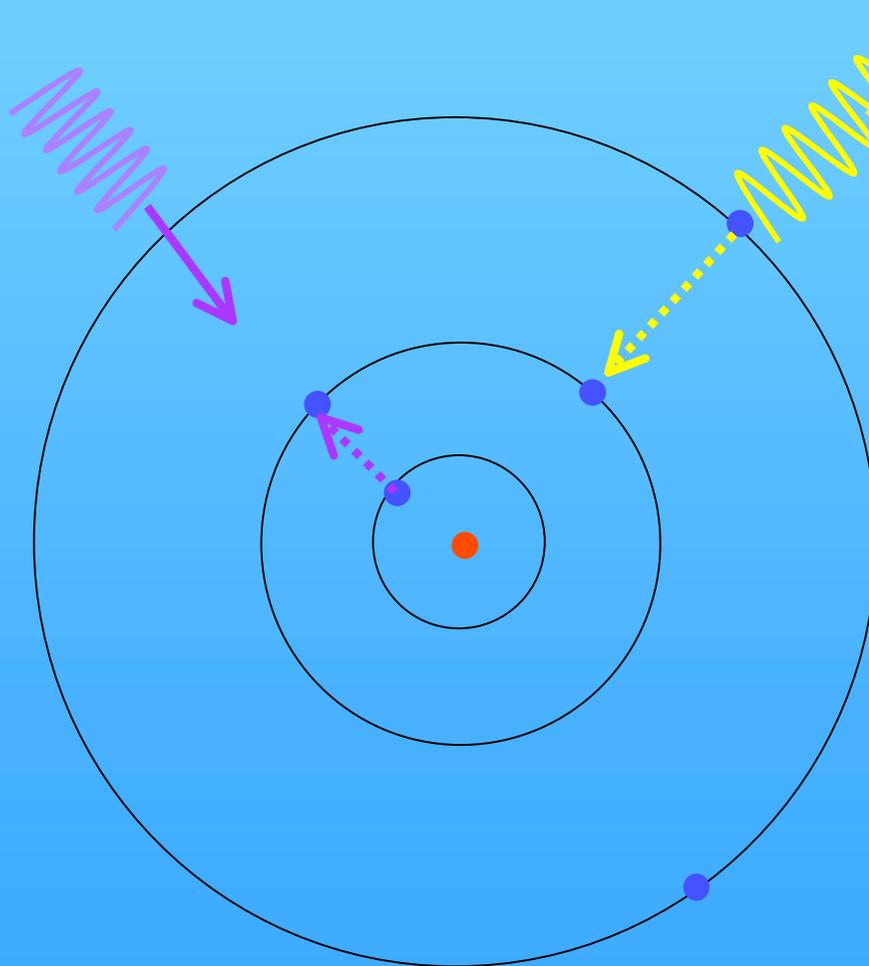
1908-11 RUTHERFORD
MODELLO PLANETARIO

- IN CONTRASTO CON GLI SPETTRI A RIGHE
- TEORICAMENTE INSTABILE $\sim 10^{-8}$ s



SI QUANTIZZA L'ATOMO

1913 N. BOHR "On the Constitution of Atoms and Molecu^{ls}", Phil Mag



- ORBITALI DI ENERGIA QUANTIZZATA
- ELETTRONI STABILI SUGLI ORBITALI
- ASSORBIMENTO O IRRAGGIAMENTO NEL SALTO TRA UN ORBITALE E L'ALTRO

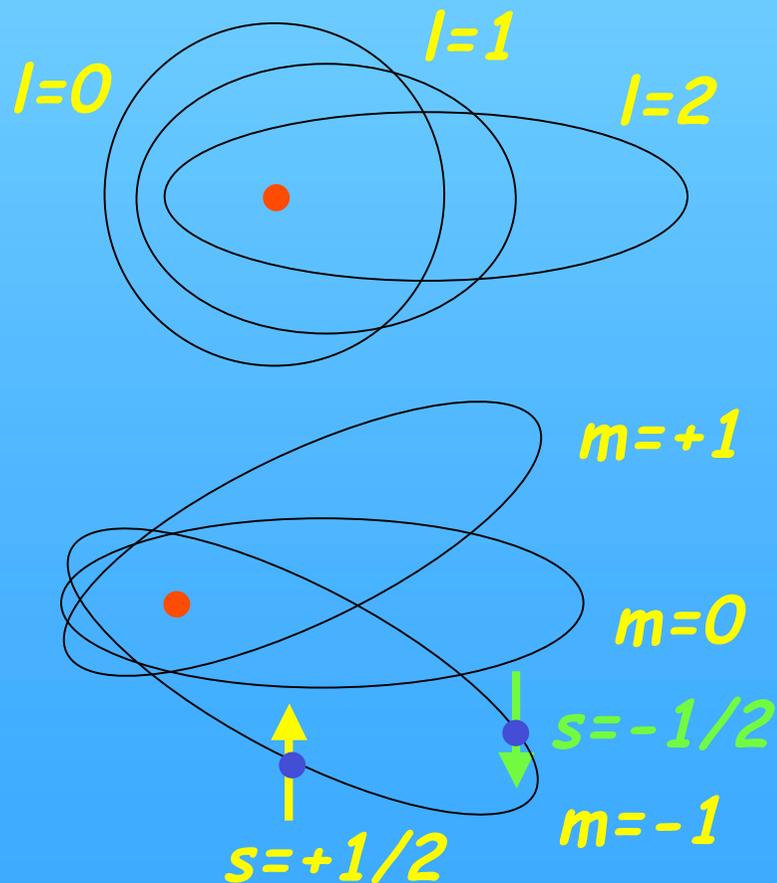
$$E_f - E_i = h\nu$$

- STABILITA' ATOMO
- SPETTRO IDROGENO
- NESSUNA GIUSTIFICAZIONE PER LA QUANTIZZAZIONE

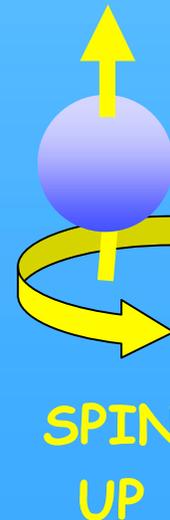


PERFEZIONAMENTI

1913-26 BOHR E SOMMERFELD PERFEZIONANO IL MODELLO INTRODUCENDO ORBITALI ELLITTICI E LO SPIN DELL'ELETTRONE



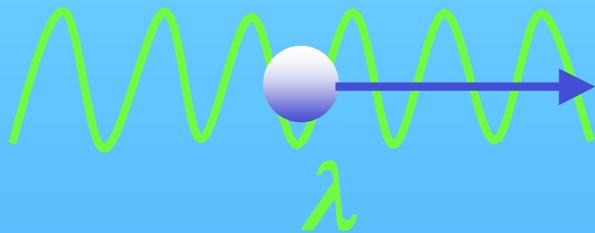
- ENERGIA ORBITALI n
- ORBITALI ELLITTICI l
- ORIENTAMENTO m
- SPIN ELETTRONE s





ONDE DI MATERIA

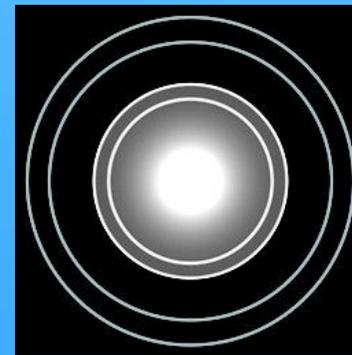
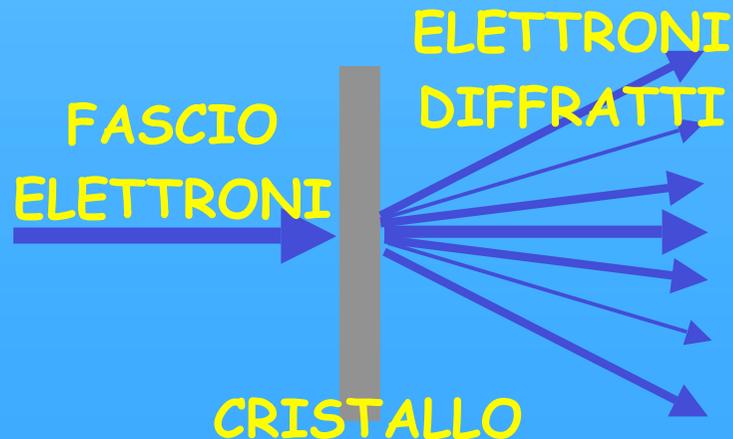
1924 L. DE BROGLIE "RECHERCHES SUR LA THEORIE DES QUANTA"
AD OGNI PARTICELLA IN MOTO E' ASSOCIATA UN'ONDA



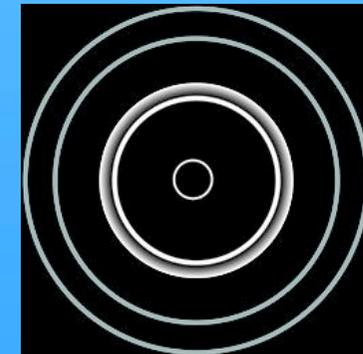
$$p = mv$$

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

1927 DAVISSON, GERMER, THOMSON DIFFRAZIONE ELETTRONI



ELETTRONI

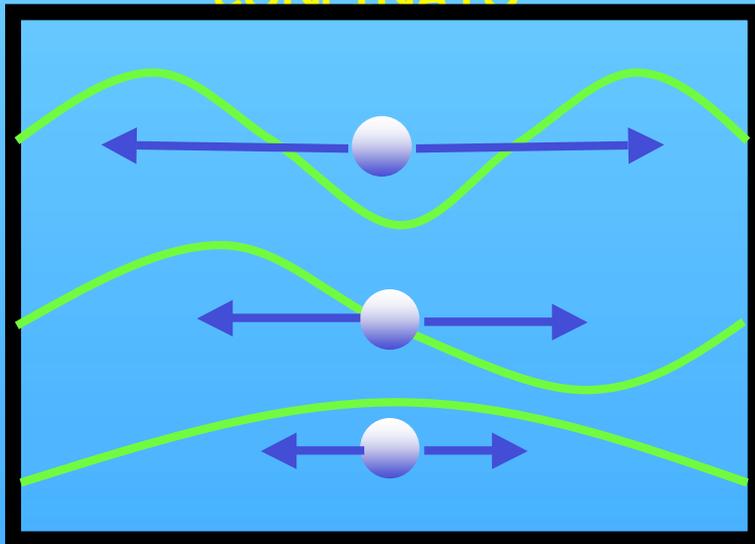


RAGGI X



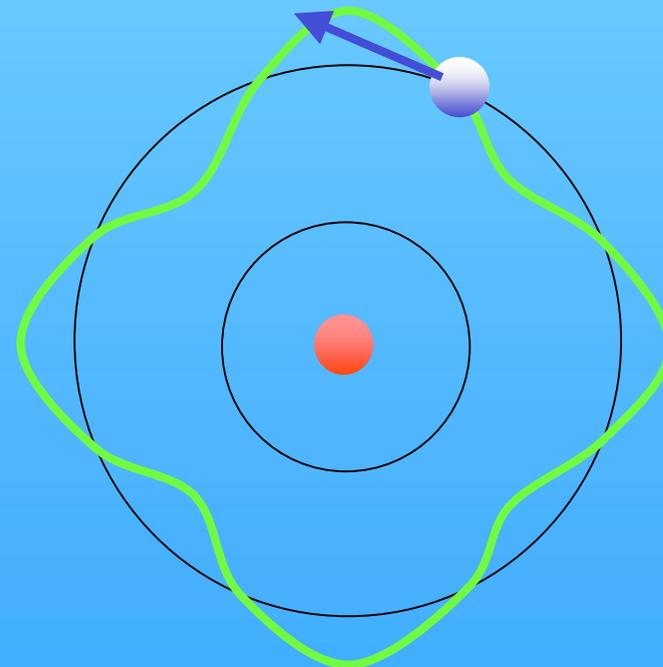
ONDE STAZIONARIE

NUMERO INTERO DI MEZZE
LUNGHEZZE D'ONDA DI DE
BROGLIE PER OGNI ELETTRONE
CONFINATO



ENERGIA E QUANTITA' DI MOTO
QUANTIZZATE

NUMERO INTERO DI
LUNGHEZZE D'ONDA DI DE
BROGLIE PER OGNI ORBITALE



ENERGIA E QUANTITA' DI
MOTO QUANTIZZATE



L'EQUAZIONE D'ONDA

1926 E. SCHRÖDINGER "Quantisierung als Eigenwertproblem" An. Ph.

AD OGNI PARTICELLA E' ASSOCIATA UN'ONDA
DESCRITTA DA UNA FUNZIONE

I VALORI CHE ASSUME LA FUNZIONE SONO LEGATI ALLA
PROBABILITA' DI RILEVARE LA PARTICELLA IN UN CERTO PUNTO
DELLO SPAZIO-TEMPO

L'EVOLUZIONE DELLA FUNZIONE D'ONDA ψ E' DETERMINATA
DALL'EQUAZIONE DI SCRÖDINGER

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = H \psi$$

EQUAZIONE DI
SCHRÖDINGER

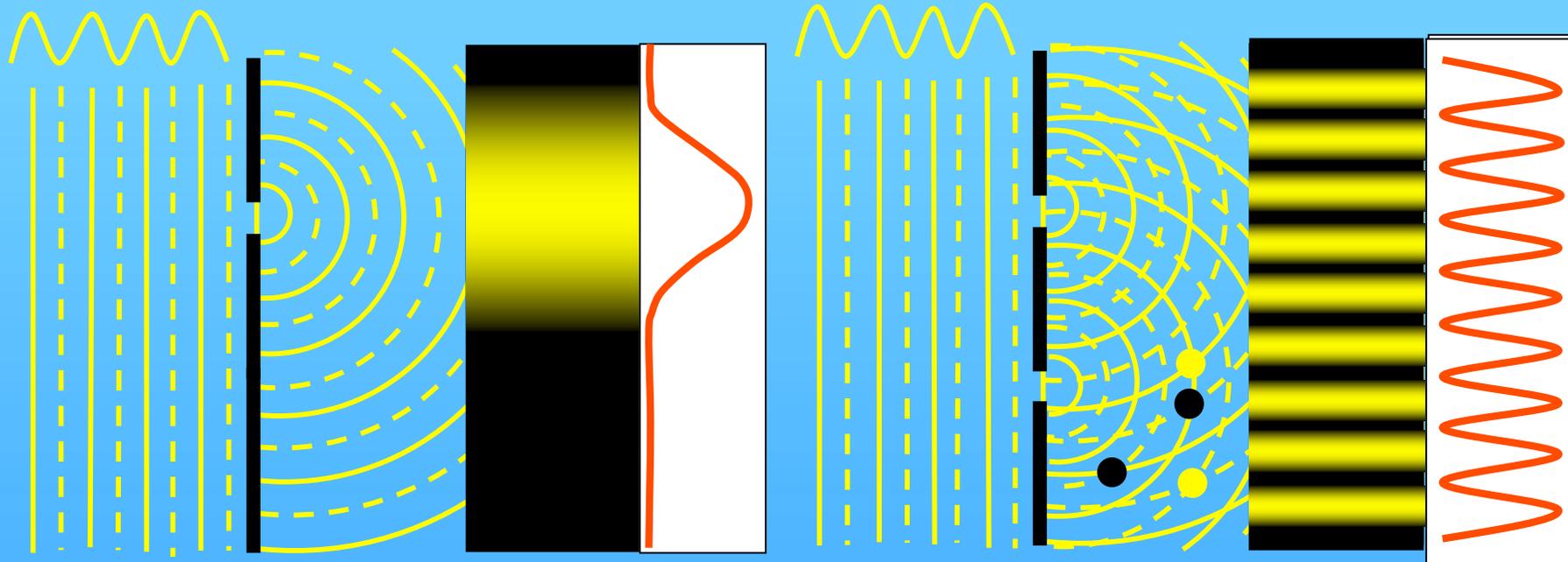
$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi + V(x)$$

OPERATORE
HAMILTONIANO

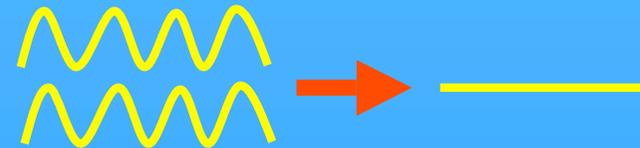


$$1+1=0$$

ESPERIMENTO DELLE DUE FENDITURE CON LA LUCE



INTERFERENZA
COSTRUTTIVA

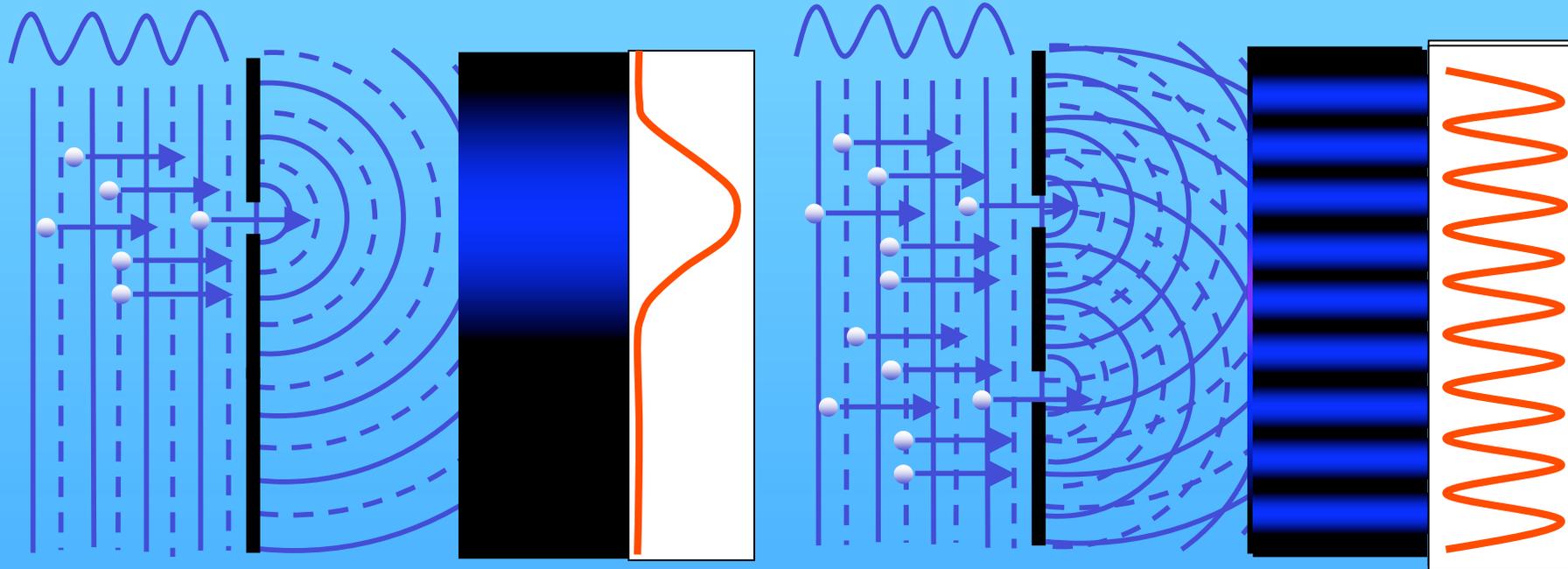


INTERFERENZA
DISTRUTTIVA



BIGLIE ED ELETTRONI

ESPERIMENTO DELLE DUE FENDITURE CON ELETTRONI



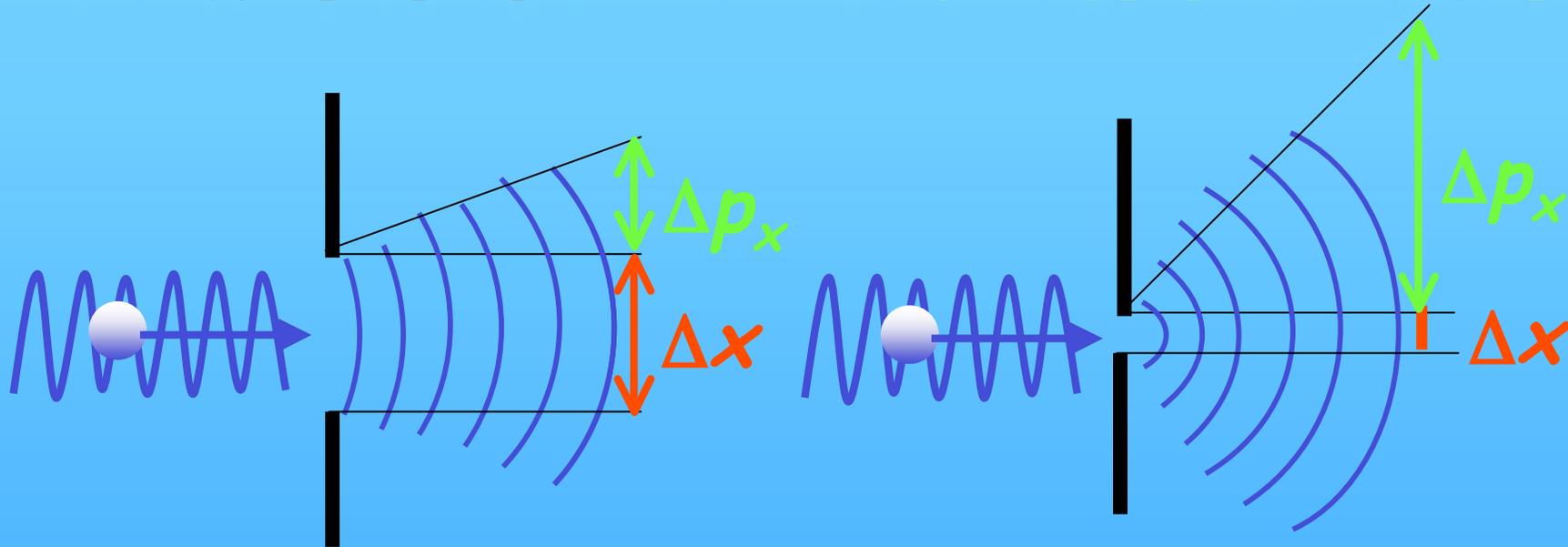
INTERFERENZA DEGLI ELETTRONI E DI QUALUNQUE PARTICELLA

ANCHE LANCIANDO UN ELETTRONE ALLA VOLTA
SI PRODUCE INTERFERENZA!!!



INDETERMINAZIONE

1927 W. HEISENBERG: PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE



QUANTO MAGGIORE E' LA PRECISIONE CON CUI CONOSCIAMO LA POSIZIONE TANTO MINORE E' LA PRECISIONE CON CUI CONOSCIAMO LA QUANTITA' DI MOTO AD UN CERTO ISTANTE

RELAZIONI
D'INDETERMINAZIONE
DI HEISENBERG

$$\Delta p_x \Delta x \geq h/4\pi$$

$$\Delta E \Delta t \geq h/4\pi$$



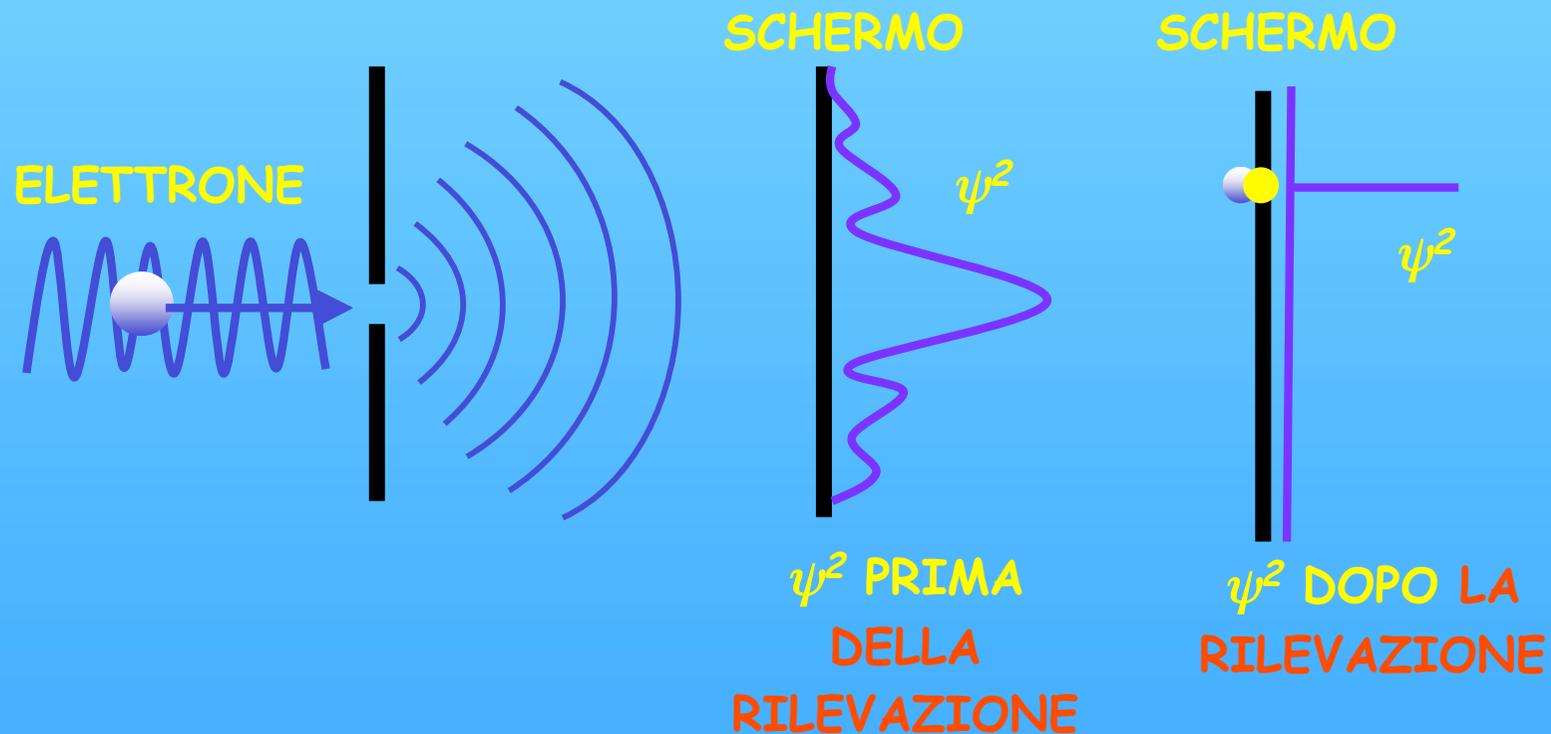
UNO SVILUPPO TRAVOLGENTE

- 1926 MECCANICA ONDULATORIA DE BROGLIE, SCHRÖDINGER
- 1925-26 MECCANICA MATRICIALE HEISENBERG, HEISENBERG, JORDAN, PAULI
- 1927 EQUAZIONE DI DIRAC SPIN DELL'ELETTRONE E POSITRONE
 - INTERPRETAZIONE DEGLI SPETTRI ATOMICI
 - DESCRIZIONE DEI LEGAMI MOLECOLARI
- COMPrensione DELLE PROPRIETA' MICROSCOPICHE E MACROSCOPICHE DEI SOLIDI
 - PRIME INTERPRETAZIONI SUL NUCLEO ATOMICO
 - INTERAZIONI TRA PARTICELLE
- APPLICAZIONI NEL CAMPO DELL'INGEGNERIA ELETTRONICA



IL COLLASSO DELLA FUNZIONE D'ONDA

OSSERVARE ELETTRONI

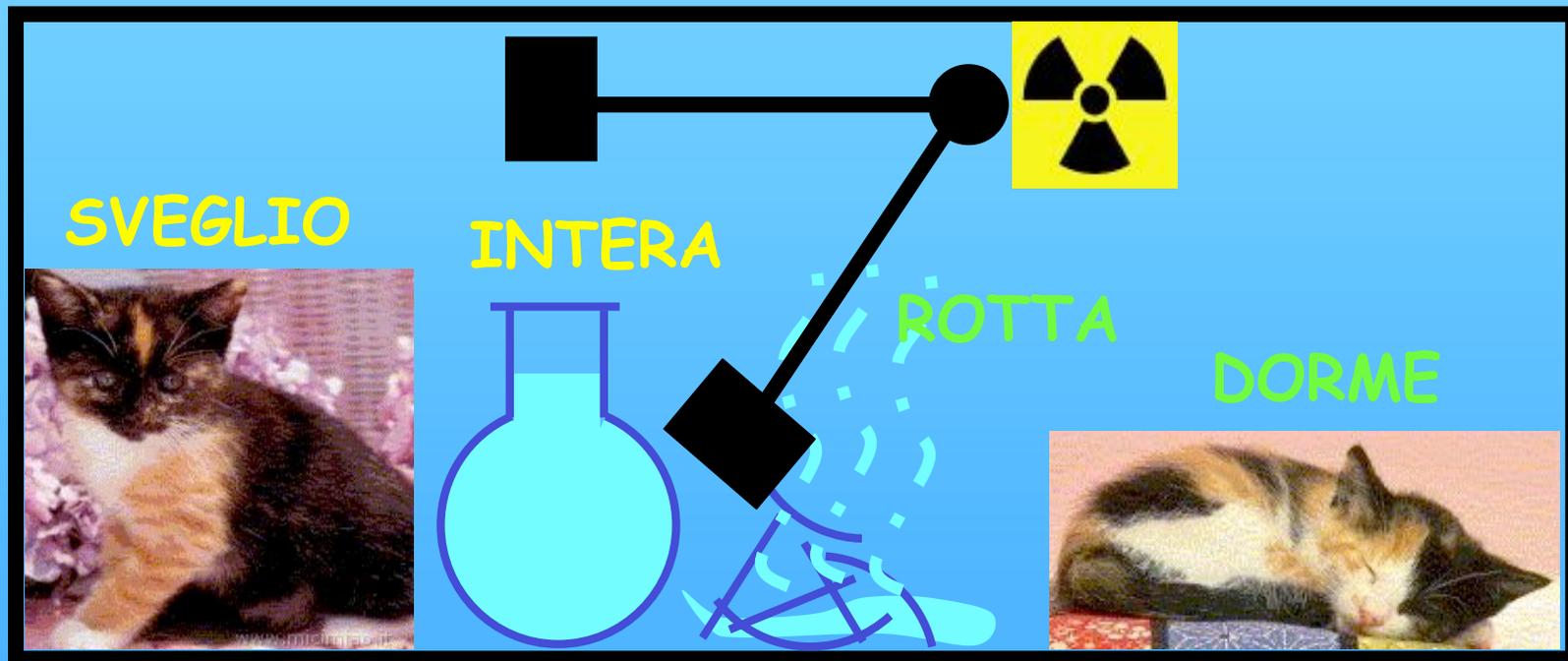


L'OSSERVAZIONE DI UNA GRANDEZZA FORNISCE SEMPRE UN VALORE PRECISO SEBBENE ESSA SIA DESCRITTA DA UNA FUNZIONE DI PROBABILITA'



IL GATTO DI SCHRÖDINGER

SOVRAPPOSIZIONE DI STATI QUANTICI



$$\Psi_{\text{GATTO}} = \Psi_{\text{SVGLIO}} + \Psi_{\text{DORME}}$$

OSSERVAZIONE \rightarrow Ψ_{SVGLIO} OPPURE Ψ_{DORME}



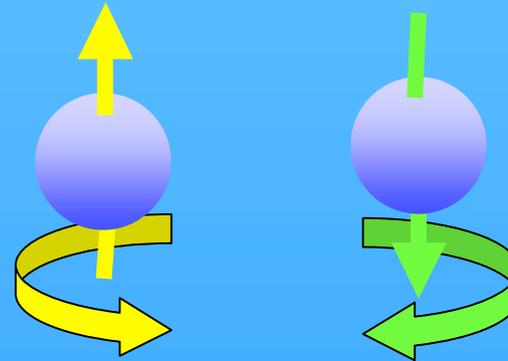
ONDE DI PROBABILITA'

INTERPRETAZIONE DI COPENHAGEN

- **PROBABILITA' INTRINSECA DELLA NATURA**
- **NON HA SENSO CHIEDERSI COSA FA UN SISTEMA QUANDO NON E' OSSERVATO**
- **Ψ E' UNA DESCRIZIONE COMPLETA DEL SISTEMA**
- **L'OSSERVAZIONE DETERMINA IL COLLASSO DELLA FUNZIONE D'ONDA**



**CONOSCENZA INCOMPLETA
→ PROBABILITA'**



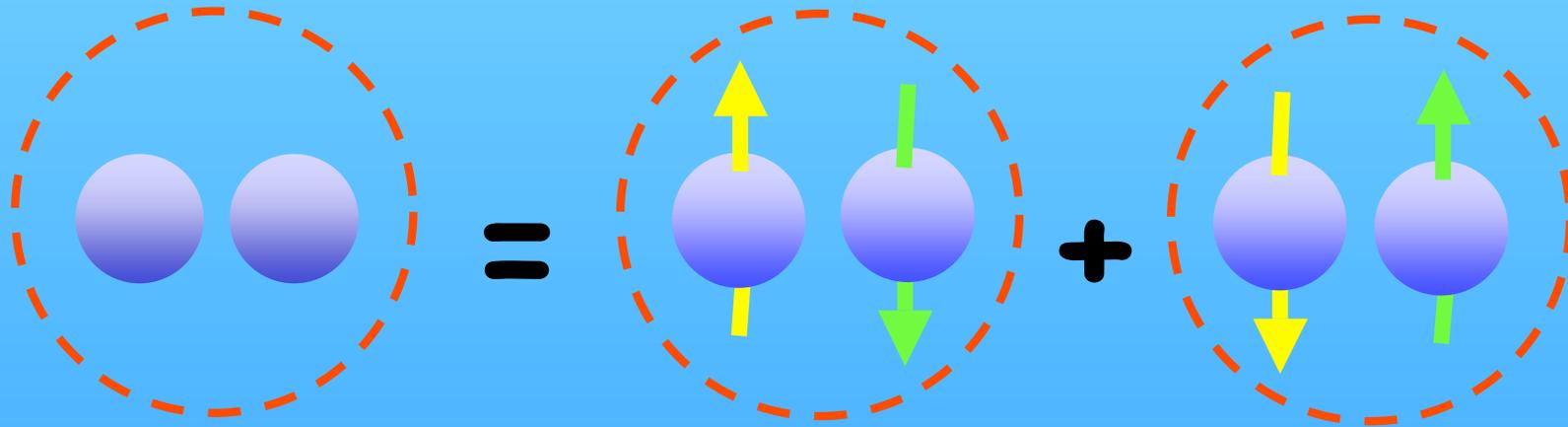
**CONOSCENZA
COMPLETA →
PROBABILITA'**



ENTANGLEMENT

ENTANGLEMENT: STATO IN CUI DUE O PIU' PARTICELLE SONO DESCRITTE DA UN'UNICA FUNZIONE D'ONDA NON SEPARABILE

DUE ELETTRONI ENTANGLED CON SPIN TOTALE NULLO



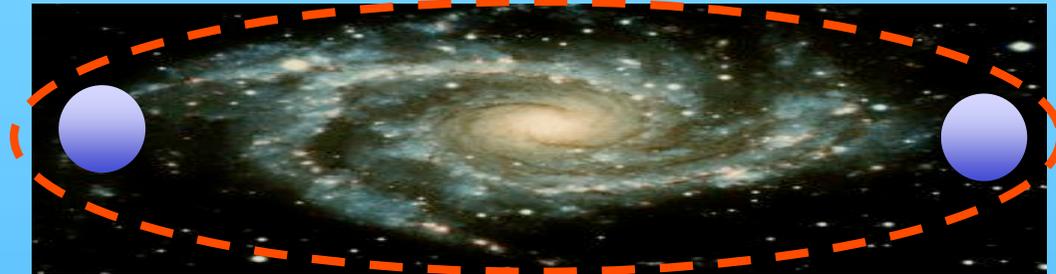
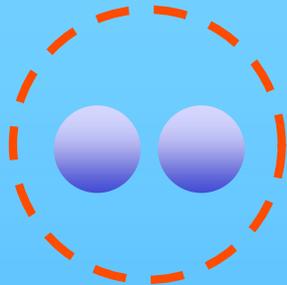
$$\psi_{s=0} = \psi_{\uparrow} \psi_{\downarrow} + \psi_{\downarrow} \psi_{\uparrow}$$

LO STATO DEGLI ELETTRONI NON E' SEPARABILE



PIU' VELOCE DELLA LUCE?

PARTICELLE ENTANGLED: DUE ELETTRONI CON SPIN TOTALE NULLO

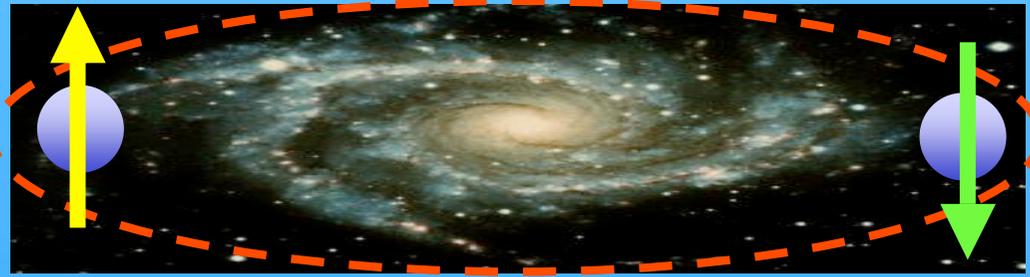


ELETTRONI ENTANGLED

ELETTRONI ALLONTANATI ANCORA ENTANGLED



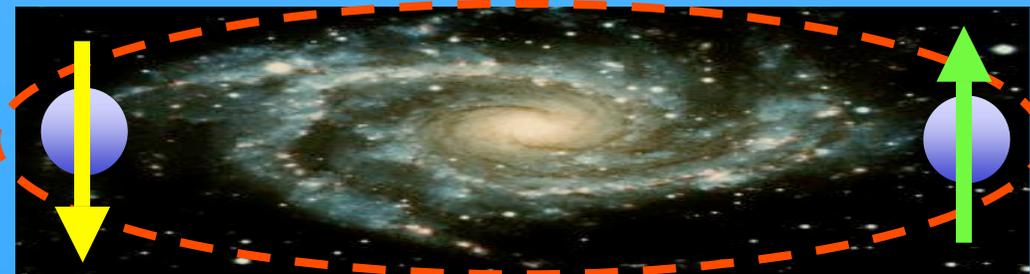
ψ_{\uparrow}



ψ_{\downarrow}



ψ_{\downarrow}



ψ_{\uparrow}

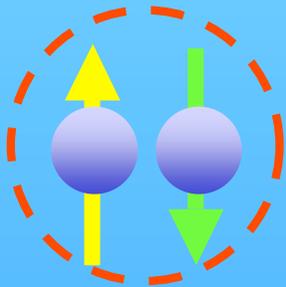




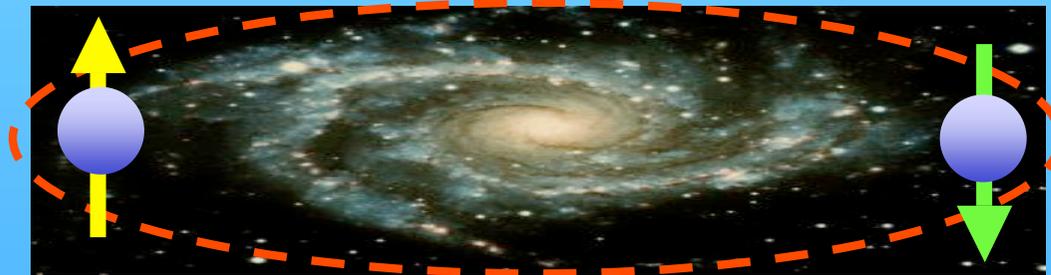
"DIO NON GIOCA AI DADI" ...O FORSE SI'

1935 EINSTEIN, PODOLSKI, ROSEN: PARADOSSO EPR

LA MECCANICA QUANTISTICA E' INCOMPLETA, LO STATO DI UN SISTEMA E' DETERMINATO DA VARIABILI NASCOSTE



**ELETTRONI
ENTANGLED CON
VARIABILI NASCOSTE**



**ELETTRONI ALLONTANATI ANCORA ENTANGLED
CON VARIABILI NASCOSTE**

1964 J. BELL: DISUGUAGLIANZE PER TESTARE L'IPOTESI EPR

**'70-'80: GLI ESPERIMENTI ESCLUDONO L'IPOTESI DI EINSTEIN
NON DIRE A DIO CIO' CHE DEVE FARE! BOHR**



QFT

1925-35 MECCANICA QUANTISTICA + RELATIVITA' RISTRETTA =
TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI

LE PARTICELLE E LE FORZE SONO DESCRITTE IN TERMINI DI
CAMPI QUANTISTICI

CAMPO
ELETTROMAGNETICO



FOTONE

ENERGIA DEL
CAMPO

$$E = (n + 1/2) h\nu$$



IL MODELLO STANDARD

FERMIONI

PARTICELLA	SIMBOLO	CARICA
NEUTRINO e	ν_e	0
ELETTRONE	e	-1
UP	u	2/3
DOWN	d	-1/3
NEUTRINO μ	ν_μ	0
MUONE	μ	-1
CHARM	c	2/3
STRANGE	s	-1/3
NEUTRINO τ	ν_τ	0
TAUONE	τ	-1
TOP	t	2/3
BOTTOM	b	-1/3

BOSONI

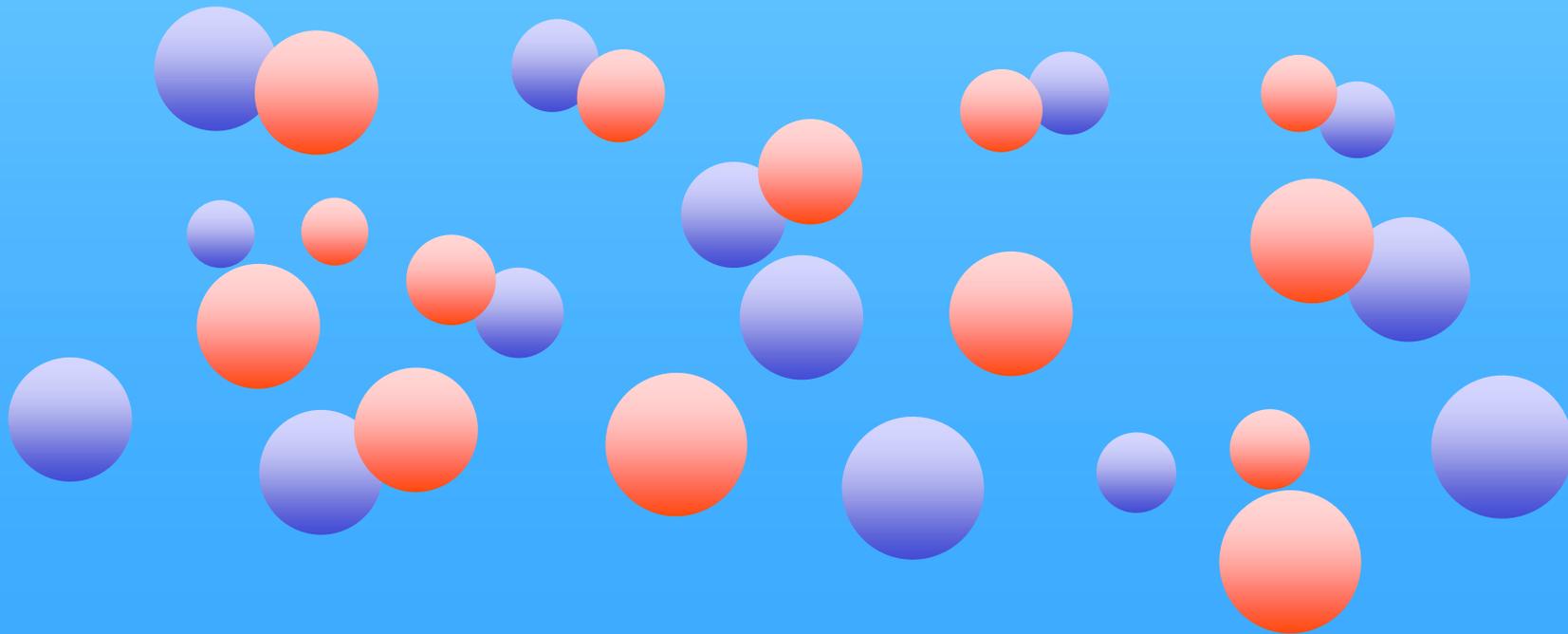
PARTICELLA	SIMBOLO	CARICA
FOTONE	γ	0
	W^-	-1
	W^+	+1
	Z_0	0
GLUONI	g	0
GRAVITONE	G	0



IL VUOTO SI RIEMPIE

PER IL PRINCIPIO D'INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG
NEL VUOTO SI CREANO CONTINUAMENTE COPPIE
PARTICELLA-ANTIPARTICELLA

LE PARTICELLE PRODOTTE DALLE FLUTTUAZIONI QUANTISTICHE
DEL VUOTO SONO DETTE PARTICELLE VIRTUALI

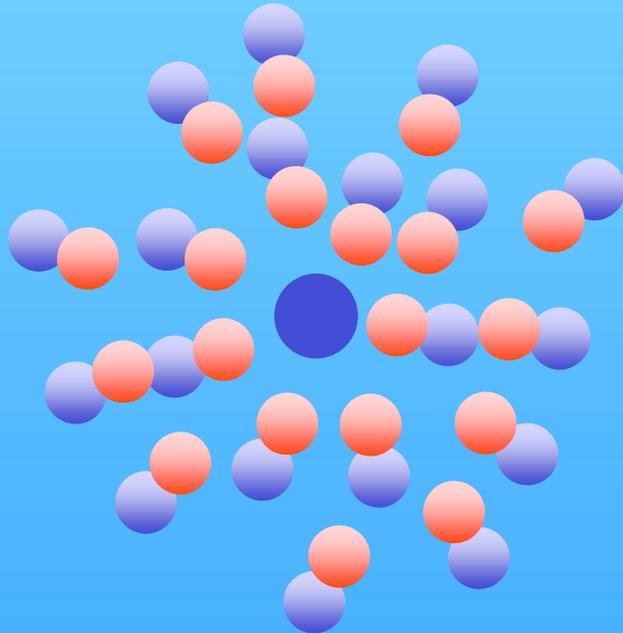




L'ELETTRONE NON E' NUDO

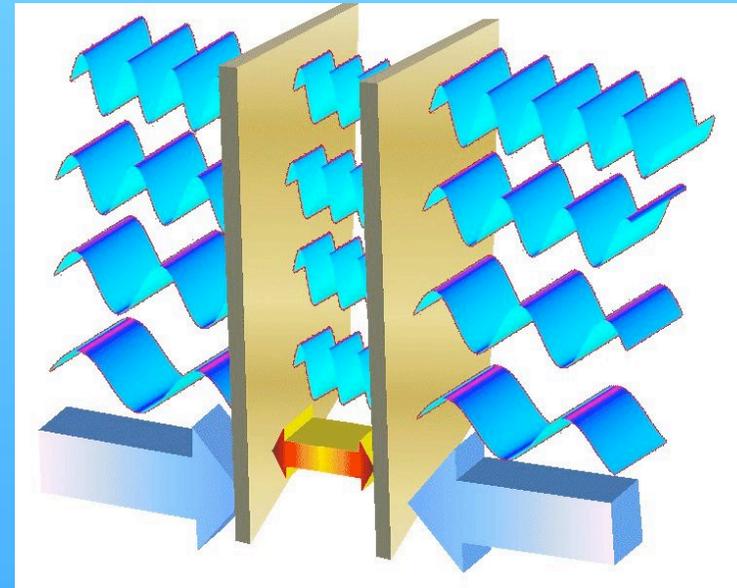
DUE EFFETTI DELLE FLUTTUAZIONI DEL VUOTO

CARICA ELETTRONE



LA CARICA NUDA INFINITA
E' SCHERMATA DA UNA NUBE
DI PARTICELLE VIRTUALI

EFFETTO CASIMIR 1948

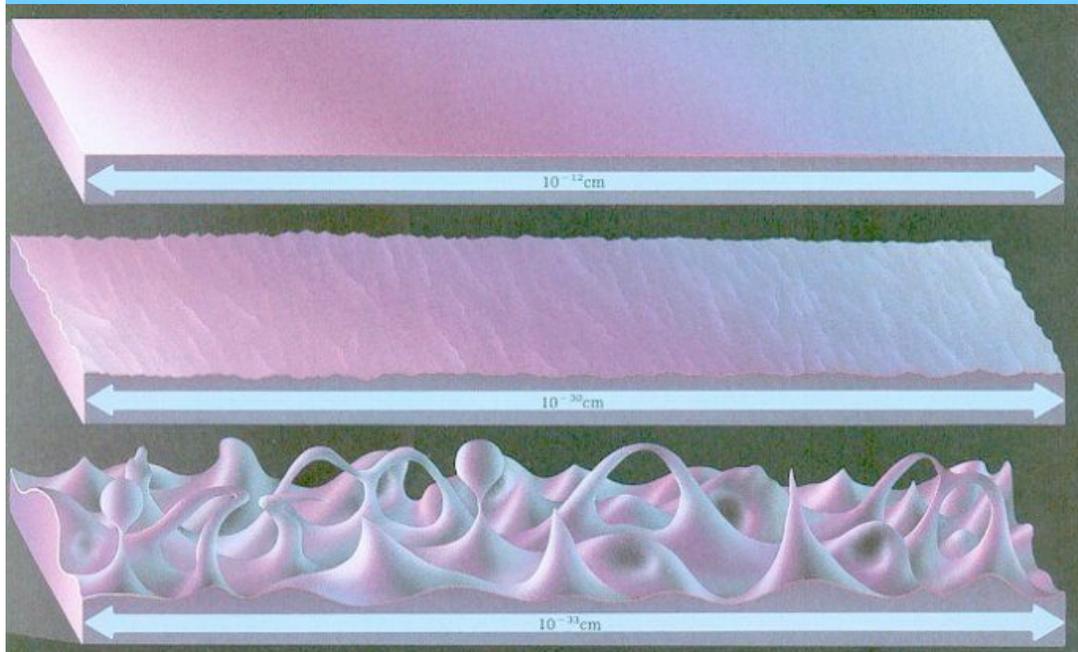


SULLE PIASTRE AGISCE UNA
PRESSIONE DOVUTA ALLE
FLUTTUAZIONI DEL VUOTO



FLUTTUAZIONI DELLO SPAZIO-TEMPO

LE FLUTTUAZIONI DEL VUOTO HANNO EFFETTO ANCHE SULLO SPAZIO-TEMPO SU SCALE SUFFICIENTEMENTE PICCOLE



COMBINANDO G_0 , c E h SI OTTENGONO LE UNITA' DI PLANCK

$$l_p = 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$t_p = 5,4 \times 10^{-44} \text{ s}$$

ALLE SCALE DI PLANCK LO SPAZIO TEMPO DIVENTA DISCONTINUO E' NECESSARIA UNA TEORIA QUANTISTICA DELLA GRAVITAZIONE



QUANTUM GRAVITY?

MECCANICA QUANTISTICA + RELATIVITA' GENERALE



ALCUNE PROPOSTE

- SUPERSTRING THEORY (M THEORY)
 - SUPERGRAVITY
 - LOOP QUANTUM GRAVITY
 - TWISTOR THEORY
- NONCOMMUTATIVE GEOMETRY



A.C.A. - GRUPPO TEORICO

***GRAZIE PER
L'ATTENZIONE!!!
DOMANDE?***