

La forza acceleratrice, dunque, sta alla forza motrice come l'accelerazione al movimento. Infatti la quantità di moto nasce dal prodotto della celerità per la quantità di materia, e la forza motrice dal prodotto della forza acceleratrice per la medesima quantità di materia. Infatti la somma delle azioni della forza acceleratrice nelle singole particelle del corpo è la forza motrice dell'intero. Pertanto vicino alla superficie della Terra, dove la gravità acceleratrice o forza di gravitazione è la medesima in tutti i corpi, la gravità motrice o peso è proporzionale al corpo: e se si salisse in regioni dove la gravità acceleratrice è minore, il peso diminuirebbe in uguale misura, e sarebbe sempre come il prodotto del corpo per la gravità acceleratrice. Così, in regioni in cui la gravità acceleratrice fosse minore di due volte, il peso di un corpo due o tre volte minore, sarebbe inferiore di quattro o sei volte.

Per il futuro chiamerò le attrazioni, così come gli impulsi, acceleratrici e motrici essendo identico il significato. In verità userò le parole attrazione, impulso, o propensione di qualcosa verso un centro indifferentemente e promiscuamente l'una per l'altra; visto che queste forze sono considerate non fisicamente ma matematicamente. Per cui, il lettore si guardi dal credere che io con queste parole abbia voluto definire una specie o un modo d'azione o una causa o una

ricerca e indica principi e cause prime. Per aver chiaramente l'idea di che differenza esistesse nel '600 tra il sostenere qualcosa matematicamente e il sostenerla fisicamente, si pensi che l'editore di Copernico, Osiander, aveva stampato il *De revolutionibus* con un'introduzione in cui la teoria eliocentrica veniva presentata come un'ipotesi matematica, e quindi innocente e inoffensiva. Circa ottanta anni dopo la Chiesa condannerà l'accettazione del sistema copernicano in sede fisica, in quanto contrario alla lettera della Bibbia, ma non vieterà di studiarlo in sede matematica, proprio per la persuasione che una trattazione in questa sede non è fisicamente attendibile e al massimo può passare per un'ipotesi ingegnosa. La matematica, pertanto, per un verso veniva considerata dai vecchi fisici come un gioco intelligente e colto, ma staccato dalla realtà e come tale senza presa su di essa, per l'altro, dai nuovi fisici come Newton, veniva considerata come lo strumento linguistico più adeguato per trattare i problemi di fisica. Per il problema delle cause si rinvia in particolare alle regole del filosofare con cui si apre il terzo libro e allo Scolio Generale.

ragione fisica, o che io, se per caso parlerò di centri che attirano o di centri muniti di forza, attribuisca le forze, in un senso reale e fisico, a centri (che sono soltanto punti matematici).

SCOLIO.

Fin qui è stato indicato in quale senso siano da intendere, nel seguito, parole non comunemente note. Non definisco, invece, tempo, spazio, luogo e moto, in quanto notissimi a tutti. Va notato tuttavia, come comunemente non si concepiscano queste quantità che in relazione a cose sensibili. Di qui nascono i vari pregiudizi, per eliminare i quali conviene distinguere le medesime quantità in assolute e relative, vere e apparenti, matematiche e volgari.

I. Il tempo assoluto <sup>7</sup>, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uni-

<sup>7</sup> L'assolutezza dello spazio e del tempo sono fondamentali nella meccanica newtoniana e perciò in tutta la fisica classica fino alla relatività einsteiniana. Per quanto attiene all'assolutezza del tempo, la sua fundamentalità è data dal fatto che costituisce il supporto della prima legge del moto. Un moto rettilineo uniforme, infatti, è possibile solo in assenza di accelerazioni, ossia di variazioni temporali della velocità. Ecco che il concetto di uniformità richiede quello dell'assolutezza del tempo, e questa a sua volta consente l'uniformità del moto. Il fatto che questo concetto sia stato sottoposto ad analisi critica soltanto alla fine del secolo scorso da Ernst Mach, dimostra quanto ampiamente fosse entrato nel tessuto della fisica classica; né i fatti cambiano se si obietta che dopo una certa data il tempo assoluto newtoniano dalle colorazioni teologiche è stato sostituito presso i fisici dalla corrispondente nozione kantiana. Entrambi, sostanzialmente, non erano altro – secondo la critica di Mach – che la comprensione rispettivamente trascendente e trascendentale del processo astrattivo che ci porta alla costituzione di una scala temporale.

È, tuttavia, osservazione immediata che esiste un contrasto tra la base della simmetria convenzionale e ideale del tempo e la nozione di tempo assoluto, considerato come flusso uniforme. Nell'uso che in concreto Newton fa del tempo, non troviamo affatto il carattere di unicità del tempo assoluto, e, tuttavia, in quanto il tempo meccanico è una variabile indipendente (che non dipende, cioè, da alcun'altra grandezza), esso presuppone il tempo assoluto, anche se, poi, questo non incide direttamente nel sistema matematico newtoniano. Come si vede, la base di questa complessa problematica rinvia a quanto si diceva all'inizio: essere il tempo

formemente, e con altro nome è chiamato durata; quello relativo, apparente e volgare, è una misura (esatta o inesatta) sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo: tali sono l'ora, il giorno, il mese, l'anno.

II. Lo spazio assoluto<sup>8</sup>, per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, rimane sempre uguale e immobile;

assoluto la giustificazione teoretica del concetto di inerzia. Ossia ancora: la natura di questo problema è filosofica. Più esattamente, si inquadra nell'ambiente e nel clima filosofico della scuola di Cambridge. È caratteristico, infatti, che Newton parli dello spazio e del tempo assoluti come di nozioni comuni e chiare a tutti e non ne fornisca spiegazione alcuna, limitandosi a descriverli. Ciò significa che, in Inghilterra come sul continente europeo, la nozione di tempo assoluto era divenuta familiare o attraverso la diffusione della teoresi dei pensatori della scuola di Cambridge, o attraverso la lezione meno diretta, ma non meno efficace, del neoplatonismo italiano; significa, inoltre, che non esisteva nessuna teoria concorrente capace di giustificare altrettanto bene la nozione di moto uniforme.

Per quanto riguarda Newton, la fonte diretta della sua ispirazione filosofico-teologica è Isaac Barrow, il quale nelle *Lectiones geometricae*, di cui nel 1669 proprio Newton era stato l'editore, dedica alcune pagine alla trattazione della nozione in oggetto. Una frase, però, è particolarmente illuminante: «... sia che le cose si muovano, sia che giacciono in riposo, sia che dormiamo, sia che siamo svegli, il tempo scorre uniformemente». Solo un tempo così fatto poteva, evidentemente, sostenere senza contraddizioni apparenti il peso di una nozione difficile e delicata come quella di moto uniforme.

<sup>8</sup> Vi sono due fondamentali vedute sul concetto di spazio. Secondo l'una, tale concetto trae origine dalla necessità di considerare un luogo attraverso cui si possa dire che il movimento avviene, e nel quale possano essere posti i corpi (concezione posizionale dello spazio). A questa concezione si contrappone l'interpretazione relazionale dello spazio: lo spazio deriva da una rete di oggetti senza i quali esso non esisterebbe. Questa seconda concezione si affianca alla prima fin dall'origine del pensiero filosofico e scientifico. Lo spazio degli atomisti greci riflette in sé, manifestamente, la prima concezione. Essa è pure sostenuta da Platone, il quale afferma con una stupenda metafora che lo spazio è il grembo in cui nacque il mondo. Di natura relazionale è invece lo spazio di Aristotele; e anche la concezione dello spazio ideata da Leibniz sarà relazionale. Al contrario, lo spazio di cui fa parola il sistema newtoniano è uno spazio posizionale. La concezione posizionale prevalse nel Sette e Ottocento sull'altra proprio per il successo della fisica newtoniana.

Il concetto di spazio come recipiente vuoto di materia era stato ritenuto privo di senso da Cartesio. Il filosofo e matematico francese aveva

lo spazio relativo è una dimensione mobile o misura dello spazio assoluto, che i nostri sensi definiscono in relazione alla sua posizione rispetto ai corpi, ed è comunemente preso al posto dello spazio immobile; così la dimensione di uno spazio sotterraneo o aereo o celeste viene determinata dalla sua posizione rispetto alla Terra. Lo spazio assoluto e lo spazio relativo sono identici per grandezza e specie, ma non sempre

ragionato in questi termini: il corpo è l'estensione e l'estensione è il corpo. Dove vi è spazio, vi è estensione; ma l'estensione è tutto ciò che noi possiamo conoscere dei corpi, dunque dove vi è spazio vi sono corpi: assoluta esclusione del vuoto in natura e identificazione della materia con lo spazio geometrico. Contrariamente però a quanto taluno ha ritenuto, Cartesio non ha negato l'assolutezza dello spazio, anche se inteso come pieno di materia, e conseguentemente ha affermato l'assolutezza del movimento, al pari di Newton; l'universo, secondo Cartesio, non ha confini perché possiamo sempre immaginare e concepire spazi indefinitamente estesi; in tal modo l'universo contiene un corpo indefinitamente esteso. A sua volta il movimento è sempre presente nel mobile perché esso è una proprietà ricevuta da Dio durante la creazione. Risulta dunque chiara la possibilità, secondo Cartesio, di concepire un movimento dei corpi indipendentemente da ogni sistema di riferimento (*Principia*, parte II). Troviamo perciò in Cartesio, entro una diversa prospettiva, i concetti di spazio assoluto e di moto assoluto, così come in Newton.

L'argomento di Cartesio fu severamente giudicato da Leibniz: coloro che affermano che l'estensione sia una sostanza rovesciano l'ordine delle parole come quello dei pensieri... Perché l'estensione non significa che una ripetizione, o una molteplicità continua di ciò che è esteso, una pluralità, una continuità e coesistenza di parti: perciò essa non basta a spiegare la natura della sostanza estesa, la cui nozione è anteriore a quella della sua ripetizione (*Scritti filosofici*). Le cose conservano la loro estensione ma non conservano sempre il loro spazio; ciascuna cosa può cambiare di spazio, ma essa non può abbandonare mai la sua estensione. Lo spazio, ben lontano dall'essere una sostanza, non è nemmeno un essere: è un ordine come il tempo, un ordine di coesistenza, come il tempo è un ordine tra le esistenze che non stanno insieme (*Scritti filosofici*).

Leibniz contrappone dunque agli spazi assoluti di Cartesio e di Newton, uno spazio relazionale, che non ha affatto un'esistenza autonoma, ma che è una funzione dei corpi coesistenti.

Tuttavia il concetto di spazio come recipiente della materia prevalse, per i motivi che abbiamo detto, sul concetto di spazio relazionale.

Lo spazio di Newton incorporò in séguito l'esistenza del campo elettromagnetico. Tale concetto appariva, verso la seconda metà del secolo scorso, accompagnato a quello di etere. Quest'ultimo assolveva ad un compito ben specifico, sin da quando era stato introdotto nella fisica: era un mezzo imponderabile, quasi metafisico, che riempiva lo spazio-recipiente

permangono identici quanto al numero. Infatti se la Terra, per esempio, si muove, lo spazio che contiene la nostra aria, e che, relativamente alla Terra, rimane sempre identico, ora sarà una data parte dello spazio assoluto attraverso cui l'aria passa, ora un'altra parte di esso; e così, senza dubbio, muterà incessantemente.

III. Il luogo è la parte dello spazio occupata dal corpo, e, a seconda dello spazio, può essere assoluto o relativo. Dico parte dello spazio, non posizione del corpo o superficie che lo circonda. Infatti i luoghi di solidi eguali sono sempre eguali; invece le superfici, a causa della dissomiglianza delle figure, sono molto spesso ineguali; le posizioni, a rigore, non hanno quantità, e non sono tanto luoghi quanto proprietà dei luoghi. Il movimento dell'insieme è identico alla somma del movimento delle parti, ossia, la traslazione del tutto dal proprio luogo è identica alla somma della traslazione delle parti dai propri luoghi; quindi il luogo dell'intero è identico alla somma dei luoghi parziali e pertanto è interno ed in tutto il corpo.

IV. Il moto assoluto è la traslazione di un corpo da un luogo assoluto in un luogo assoluto, il relativo da un luogo relativo in un luogo relativo. Così in una nave spinta dalle vele, il luogo relativo di un corpo è quella parte della nave in cui il corpo giace, ossia quella parte dell'intera cavità che il corpo riempie e che dunque si muove insieme alla nave: e la quiete relativa è la permanenza del corpo in quella medesima parte della nave o parte della cavità. Ma la quiete vera è la permanenza del corpo nella medesima

di Newton e serviva come mezzo di trasmissione delle onde luminose (Teoria di Huygens). In questo modo possiamo dire che si giungeva nuovamente, anche se per altra via e per altri fini, al 'pieno' di Cartesio: l'etere cosmico prendeva infatti il posto del pieno di materia, ed era un espediente concettuale che permetteva di sostituire l'azione a distanza con una contiguità spaziale. L'etere divenne poi, come abbiamo detto, il portatore del campo elettromagnetico, di Faraday e Maxwell. Il risultato degli studi condotti dai due grandi fisici fu l'identificazione, riconosciuta da Maxwell, delle onde luminose con un certo tipo di radiazioni del campo elettromagnetico, caratterizzate da una determinata frequenza.

parte di quello spazio immobile nella quale la stessa nave si muove insieme alla propria cavità e all'intero suo contenuto. Di conseguenza, se la Terra è realmente in quiete, il corpo che era in quiete relativa sulla nave, si muoverà di moto reale ed assoluto con la stessa velocità con la quale la nave si muove sulla Terra. Se invece si muove anche la Terra, il moto vero ed assoluto del corpo nascerà in parte dal moto vero della Terra nello spazio immobile, in parte dal movimento relativo della nave sulla Terra: e se anche il corpo si muove di moto relativo sulla nave, il suo moto vero nascerà in parte dal moto vero della Terra nello spazio immobile, in parte dai moti relativi sia della nave sulla Terra, sia del corpo sulla nave; da questi movimenti relativi nascerà il movimento relativo del corpo sulla Terra. Se quella parte della Terra, che la nave occupa, si muove verso oriente con una velocità di 10010 parti, e la nave viene trasportata dalle vele e dal vento verso occidente con una velocità di dieci parti; se, inoltre, un marinaio si muove verso oriente, sulla nave, con una velocità pari ad una parte: allora il marinaio si muoverà di moto vero e assoluto nello spazio immobile, verso oriente, con 10001 parti di velocità, e sulla Terra si muoverà di moto relativo, verso occidente, con nove parti di velocità.

Comunemente in astronomia si distingue il tempo assoluto dal relativo per mezzo dell'equazione del tempo<sup>9</sup>. Infatti i giorni naturali, che di consueto sono ritenuti uguali, e sono usati come misura del tempo, sono ineguali. Gli astronomi correggono questa ineguaglianza affinché, con un tempo più vero, possano misurare i moti celesti. È possibile che non vi sia movimento talmente uniforme per mezzo del quale si possa misurare accuratamente il tempo. Tutti i

<sup>9</sup> Differenza tra il tempo solare medio e il tempo solare apparente. È considerata positiva e segnata + se il tempo apparente è maggiore del tempo medio, altrimenti è considerata come negativa e segnata —. Tale differenza è uguale per tutti i luoghi, ma varia dal + al — e viceversa perché il Sole sul piano dell'eclittica non ha un moto uniforme e la stessa eclittica è inclinata sull'equatore. Probabilmente Ipparco conosceva già questa equazione.

# LE RIVOLUZIONI SCIENTIFICHE: RELATIVITÀ E QUANTI

## FISICA CLASSICA (FINE '800)

- MECCANICA NEWTONIANA
- TERMODINAMICA
- ELETTROMAGNETISMO DI MAXWELL

## FISICA MODERNA (INIZI '900)

- RELATIVITÀ (RISTRETTA E GENERALE)
- MECCANICA QUANTISTICA

## TEORIA CLASSICA DELLA LUCE

LUCE = parte dello spettro della radiazione elettromagnetica

Compresa tra le lunghezze d'onda di 380 nm e 750 nm

↑  
NANOMETRI ( $10^{-9}$  m)

cioè ONDA ELETTROMAGNETICA

La luce è quindi una particolare onda elettromagnetica

## CHE COS'È, IN GENERALE, UN'ONDA?

È una perturbazione che si propaga attraverso lo spazio trasportando energia, ma NON materia.

ESEMPI: onde del mare, onde sonore, onde su una corda

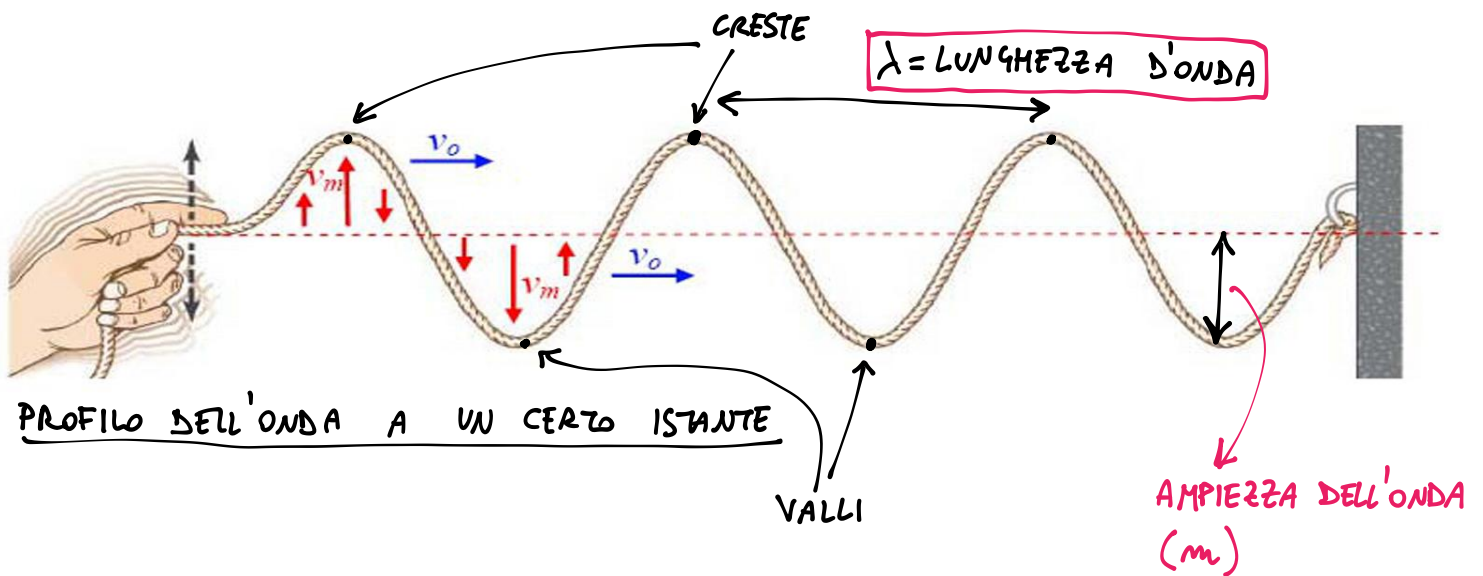
L'onda è un FENOMENO, che si può descrivere matematicamente

ONDE MECCANICHE: hanno bisogno di un mezzo per propagarsi  
(es. onde sonore si propagano nell'aria)

Le onde elettromagnetiche si propagano anche nel vuoto

ESEMPIO: ONDA LUNGO UNA CORDA: la perturbazione (OSCILLAZIONE) prodotta dalle mani su un estremo si propaga lungo la corda. Tutti i punti della corda, raggiunti dalla perturbazione, oscillano. Non c'è trasporto di materia, ma solo di energia.

$v_0$  è la VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DELL'ONDA

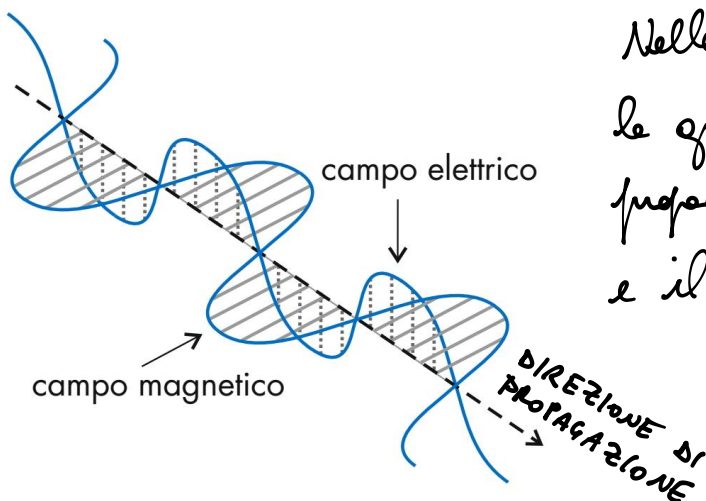


La distanza tra 2 creste (o tra 2 valli) si chiama LUNGHEZZA D'ONDA e si indica con  $\lambda$  (LAMBDA). Si misura in metri (m).

Se  $v$  è la velocità di propagazione dell'onda, la grandezza

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

si chiama FREQUENZA DELL'ONDA, si misura in hertz (Hz, cioè  $s^{-1}$ ) e corrisponde al numero di oscillazioni in 1 secondo.



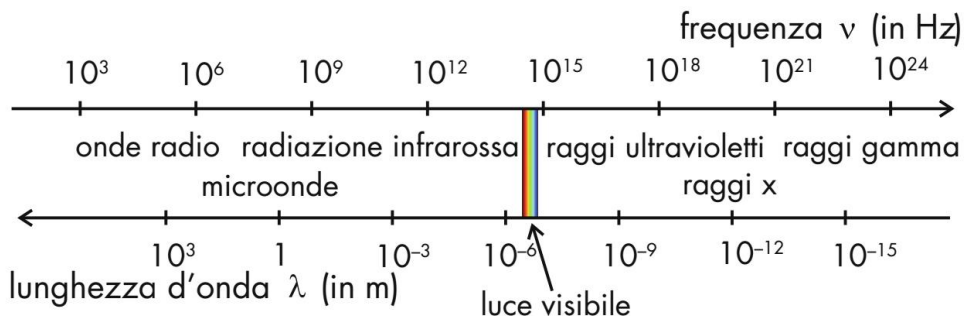
Nelle onde elettromagnetiche, le grandezze che oscillano (e si propagano) sono il CAMPO ELETTRICO e il CAMPO MAGNETICO.

Nel vuoto la velocità di un'onda elettromagnetica è  $c = 3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}$  (VEL. LUCE)

Per le onde elettromagnetiche si ha

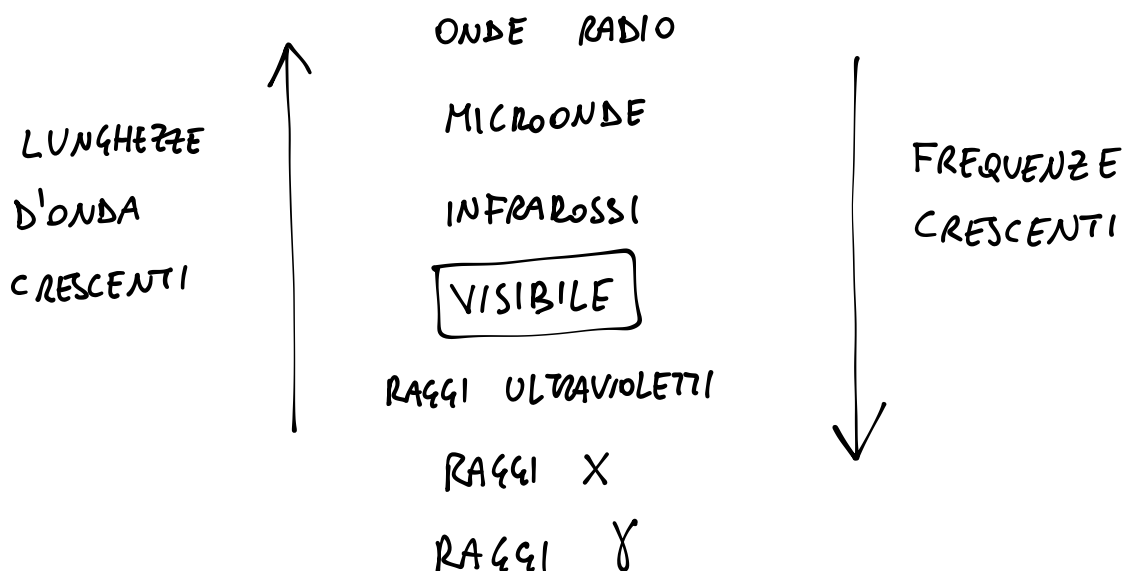
$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$f$  → FREQUENZA (Hz)  
 $c$  ← VEL. LUCE ( $3,00 \times 10^8 \frac{m}{s}$ )  
 $\lambda$  ← LUNGHEZZA D'ONDA (m)



**Fig. 1.3.** Lo spettro della radiazione elettromagnetica, ordinato rispetto ai valori della frequenza  $\nu$  e della lunghezza d'onda  $\lambda$

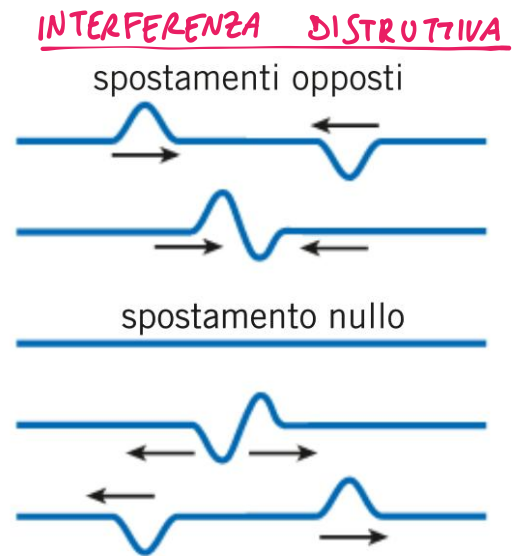
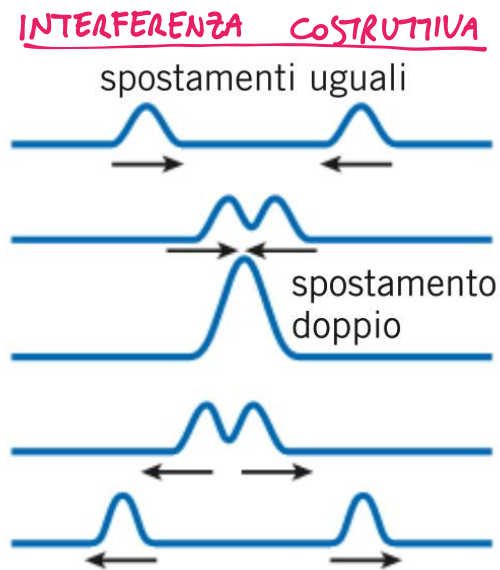
SPETTRO ELETTROMAGNETICO = insieme delle frequenze (e delle lunghezze d'onda) delle onde elettromagnetiche. È suddiviso in BANDE (non con confini netti)



Spettro elettromagnetico (Caterina Vozzi)

<https://www.youtube.com/watch?v=QCUaNjpJtSg>

Quando un punto dello spazio viene investito simultaneamente da due perturbazioni ondulatorie, le due onde si SOMMANO. Si dice che si ha INTERFERENZA, che può essere costruttiva o distruttiva



Si ha interferenza costruttiva quando gli effetti di due o più onde si rafforzano a vicenda; si ha interferenza distruttiva quando i loro effetti si indeboliscono.

Dal punto di vista classico, se un fenomeno fisico manifesta INTERFERENZA, viene classificato come FENOMENO DI TIPO ONDULATORIO: la presenza dell'interferenza rappresenta quindi, classicamente, un indizio per identificare un fenomeno come ONDA.

## ESPERIMENTO DELLA DOPPIA

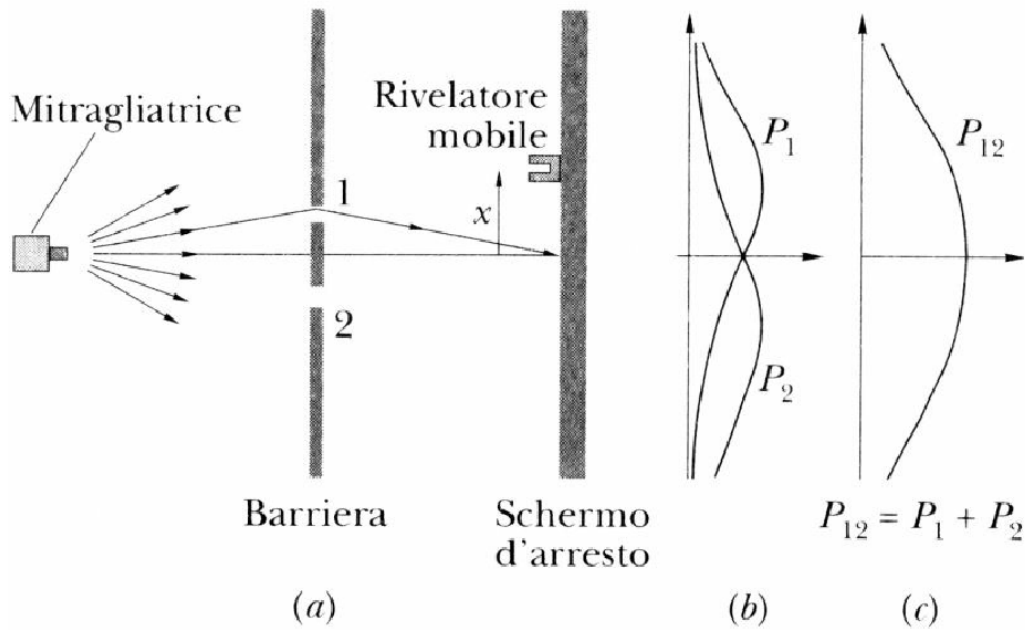
### FENDITURA



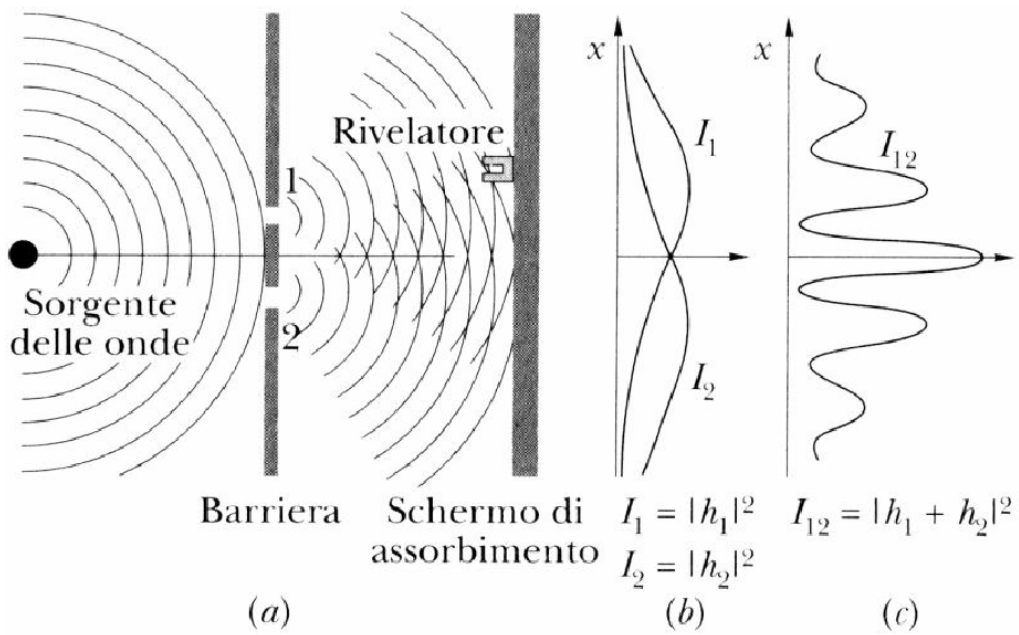
Dr. Quantum e l'esperimento della doppia fenditura

<https://www.youtube.com/watch?v=nqHDy8Y2ho4>

## Esperimento di interferenza con pallottole

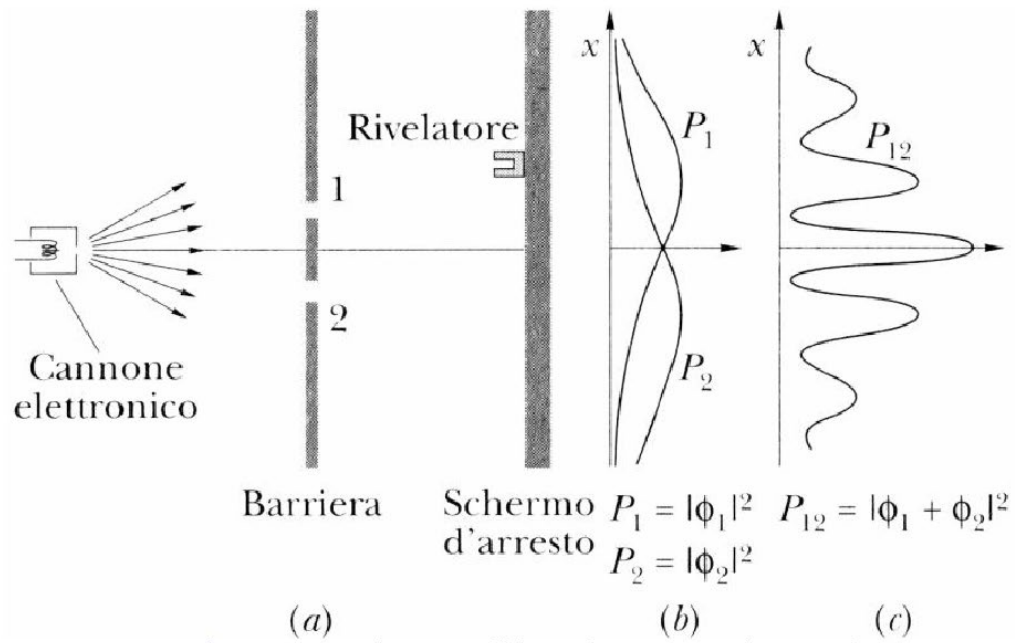


## Esperimento di interferenza con onde

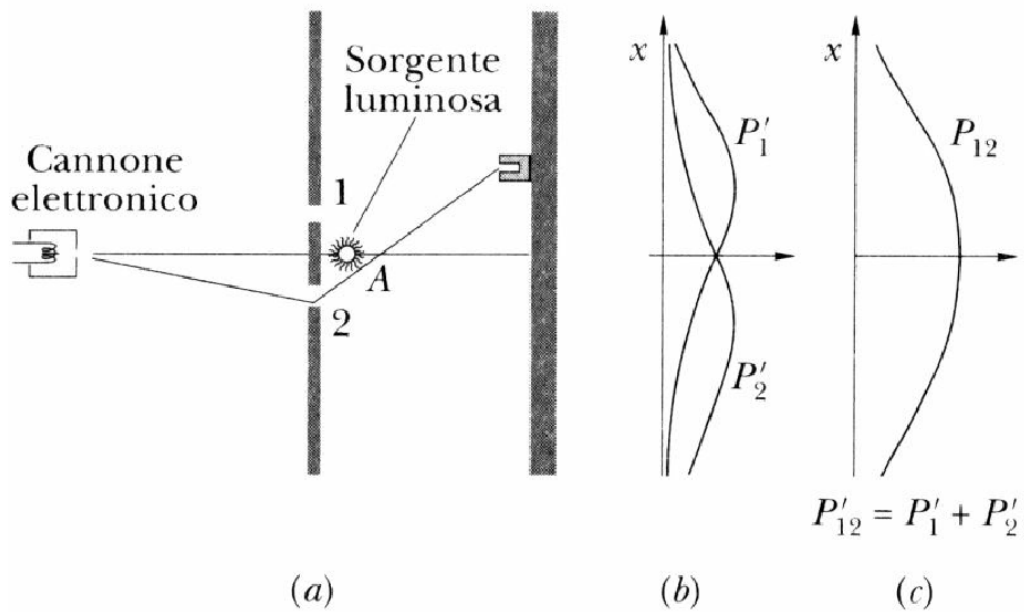




## Esperimento di interferenza con elettroni



## Un diverso esperimento con elettroni



# OSSERVAZIONI SULL'ESPERIMENTO DELLA DOPPIA FENDITURA

Gli elettroni vengono sperimentalmente rilevati sempre in un punto, e questo li caratterizza come PARTICELLE (e non come onde)

Secondo la FISICA CLASSICA sono concetti contrapposti

- PARTICELLA → deve necessariamente passare da una delle 2 fenditure
- ONDA → è un fenomeno "distribuito" nello spazio e attraverso nello stesso tempo entrambe le fenditure

FISICA QUANTISTICA (MECCANICA QUANTISTICA) → Le PARTICELLE (elettroni) producono una FIGURA DI INTERFERENZA tipica delle ONDE.

Ma all'ATTO DELLA MISURA esse vengono rilevate in un punto, mostrando comportamenti non ondulatori, ma corpuscolari. Si parla così di

DUALISMO ONDA-CORPUSCOLO

per indicare questa "doppia natura" dell'elettrone (ma anche della luce - V. EFFETTO FOTOELETTRICO), che in alcune circostanze si comporta come onda e in altre come particella (corpuscolo).

DE BROGLIE (1924) → si può assegnare all'elettrone una lunghezza d'onda  $\lambda = \frac{h}{p}$

$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$   
CONSTANTE DI PLANCK

$q = m \cdot v$  QUANTITÀ DI MOTO DELL'ELETTRONE  
← MASSA DELL'ELETTRONE  
← VELOCITÀ DELL'ELETTRONE

Nell'ESPERIMENTO DELLA DOPPIA FENDITURA, non possiamo affermare che gli elettroni seguano traiettorie continue nello spazio tra sorgente e rivelatore: se così fosse, avremmo il 50% degli elettroni che passerebbero dalla fenditura 1 e l'altro 50% dalla fenditura 2, senza che ci sia sullo schermo una figura di interferenza.

Si dice che l'elettrone si trova in uno STATO DI SOVRAPPOSIZIONE

Tutto ciò che possiamo sapere è la PROBABILITÀ che la particella si trovi, qualora la misurassimo, in uno stato invece che in un altro.

SITUAZIONE  
NUOVA! NON CI  
SONO CORRISPONDENTI  
IN FISICA CLASSICA!!



- 1- l'elettrone non passa dalla fenditura 1 o dalla 2
- 2- l'elettrone non passa né dalla fendit. 1 né dalla 2
- 3- l'elettrone non passa sia dalla fend. 1 che dalla 2

Ben si ha una SOVRAPPOSIZIONE di queste possibilità

DIFFICILE DA  
IMMAGINARE E  
ACCETTARE, MA LA NATURA, NEL MONDO  
MICROSCOPICO, SI  
COMPORTE COSÌ!!!

La probabilità è INTRINSECA nella teoria quantistica, non è dovuta a manca di informazione, come in fisica classica (se non riusciamo a prevedere esattamente il comportamento di un oggetto è perché non conosciamo tutte le variabili in gioco).

Grado la visione CLASSICA e DETERMINISTICA del mondo



ogni stato dell'universo è univocamente determinato da ogni altro, passato o presente che sia.

ES. nel moto di una pallina, ogni stato (cioè ogni coppia POSIZIONE-VELOCITÀ in un certo istante) può essere dedotto, in modo univoco e necessario, dagli altri stati della pallina, in modo da individuarne l'esatta traiettoria.

Inoltre ogni evento è non solo determinato, ma anche necessariamente CAUSATO da un evento antecedente, mediante le leggi della natura

FISICA QUANTISTICA → il comportamento della natura è INTRINSECAMENTE CASUALE, e prescindere dalle informazioni che abbiamo



Nell'esperimento della doppia fenditura, il punto di impatto degli elettroni sullo schermo è DISTRIBUITO CASUALMENTE secondo un'assegnata LEGGE PROBABILISTICA.

“Vogliamo ora sottolineare una differenza molto importante tra meccanica classica e meccanica quantistica. Abbiamo parlato della probabilità che un elettrone arrivi in un certo punto in una data circostanza, e abbiamo dato per scontato che nel nostro apparato sperimentale (o perfino nel migliore apparato possibile) sarebbe impossibile prevedere esattamente cosa succede: possiamo solo calcolare la probabilità. Ma se questo è vero, significa che la fisica si è arresa, nella sfida di prevedere esattamente cosa succederà in una data circostanza. Ebbene sì. La fisica ha gettato la spugna. Non sappiamo prevedere cosa succederà in una data circostanza, e siamo anche convinti che sia impossibile, e che l’unica cosa prevedibile sia la probabilità dei diversi eventi. Bisogna riconoscere che questa è una seria limitazione, rispetto al nostro ideale originario di capire la natura. È un passo indietro, ma nessuno riesce a vedere il modo di evitarlo.

Quindi ora come ora dobbiamo limitarci a calcolare probabilità. Diciamo «ora come ora», ma è forte il sospetto che questa limitazione ci perseguiterà per sempre, che è impossibile risolvere il rompicapo, e che la natura è proprio così.”

### **Il principio di indeterminazione di Heisenberg (1927)**

Se si effettua una misura su un oggetto, indicando con  $\Delta x$  l’incertezza (indeterminazione) sulla posizione e con  $\Delta p$  l’incertezza sulla quantità di moto, si ha

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

dove  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$  e  $h$  è la costante di Planck.

“Questo è un caso particolare del principio di indeterminazione [. . .] L’enunciato più generale è che non si può progettare un’apparecchiatura in modo che determini quale alternativa si verifica, senza allo stesso tempo distruggere la figura di interferenza.”

Feynman, P.R., *Sei pezzi facili*, Adelphi, 2000