

**Liceo Scientifico Statale “Leonardo Da Vinci”**

**Fisica: Spazio e Tempo**

**La Studentessa:  
Rachele Caracciolo V H**

## **“Lo spazio - il tempo” secondo Einstein. Il nuovo modo di leggere la natura: i Paradossi.**

### **La relatività.**

Il fisico tedesco Max Karl Ernst Ludwig Planck avanzò

l'ipotesi che la radiazione fosse fatta di piccole unità, o

pacchetti, così come la materia è fatta di atomi, e

chiamò l'unità di radiazioni *quanto*. Egli pensò che la

radiazione potesse essere assorbita solo in numeri

interi di quanti, e in più ipotizzò che l'energia di un

quanto dipendesse dalla lunghezza d'onda della

radiazione. Ora il quanto poteva essere messo in

relazione con la frequenza di una data radiazione.

Come il contenuto di energia di un quanto anche la

frequenza è inversa mente proporzionale alla

lunghezza d'onda della radiazione: più corte sono le

onde, maggiore è il numero che ne può essere messo in un secondo. Ma se tanto la frequenza che il contenuto di energia del quanto erano inversamente proporzionali alla lunghezza d'onda, essi dovevano essere direttamente proporzionali tra di loro. Planck espresse questa relazione per mezzo della sua equazione divenuta famosa:

$$e=hf.$$

La teoria dei quanti di Planck non suscitò grande scalpore quando fu proposta, lo stesso Planck sembrava sgomento di quanto aveva fatto ma 5 anni dopo il fisico svizzero che portava il nome di Albert Einstein, verificò l'esistenza dei quanti di Planck. Per l'effetto fotoelettrico si sapeva che la luce colpendo certi metalli provocava emissione di

elettroni dalla loro superficie. Ma quando i fisici cominciarono a fare esperimenti su questo fenomeno, scoprirono, con grande sorpresa, che se si aumentava l'intensità della luce, l'energia degli elettroni emessi non aumentava: ciò che li influenzava, erano invece i diversi colori della lunghezza d'onda della luce usata.

Einstein trovò la risposta nella teoria dei quanti di Planck. Per assorbire abbastanza energia da abbandonare la superficie del metallo, un elettrone doveva essere colpito da un quanto di energia superiore a un valore minimo. Nel caso di un elettrone legato solo debolmente al suo atomo (come accade nel cesio), anche un quanto di luce di frequenza bassa, come per esempio, rossa poteva bastare; ma, se un

atomo tratteneva i suoi elettroni con maggiore forza,  
occorreva luce gialla, o blu, o addirittura ultravioletta.

In ogni caso maggiore era l'energia del quanto,  
maggiore era anche la velocità dell'elettrone espulso  
dal metallo.

Nella sua teoria della relatività ristretta, Einstein  
formulò una concezione fundamentalmente nuova  
dell'universo, basata su un'estensione della teoria  
dei quanti. Egli avanzò l'ipotesi che la luce  
viaggiasse nello spazio sotto forma di quanti  
(fotoni), riesumando così l'idea che la luce avesse  
natura corpuscolare. Si trattava, però, di un nuovo  
tipo di particella, che aveva tanto le proprietà di un  
onda che quelle di corpuscolo, esibiva in momenti

diversi un gruppo di proprietà o l'altro,

alternativamente.

Analogamente, la radiazione ha proprietà tanto

corpuscolari che ondulatorie: in determinate

situazioni sono salienti le prime, in altre le seconde.

Verso il 1930 Niels Bohr sostenne che qualsiasi

esperimento destinato a studiare le proprietà

ondulatorie della luce non avrebbe potuto rivelare le

sue proprietà corpuscolari, e viceversa. Si poteva

studiare un gruppo di proprietà alla volta mai

entrambe contemporaneamente. E' questo il

***Principio di complementarità.*** Tale duplice insieme

di proprietà riesce a descrivere la radiazione meglio di

quanto non possa fare ciascuno dei due insiemi da

solo.

Einstein introdusse una seconda idea importante nella teoria delle relatività: quella che la velocità della luce nel vuoto non vari mai, indipendentemente dal moto della sua sorgente. Secondo la concezione newtoniana dell'universo, un raggio luminoso proveniente da una sorgente che si sta avvicinando deve apparire più veloce di un raggio proveniente da una sorgente che si muove in qualsiasi altra direzione; nella concezione einsteiniana, questo viceversa non si verifica.

Da tale postulato Einstein fu in grado di dedurre le equazioni di Lorentz-FitzGerald, mostrando che l'aumento della massa con velocità, che Lorentz aveva attribuito solo alla particella cariche, si verificava per oggetti qualsiasi Einstein inoltre giunse alla conclusione che un aumento di velocità,

oltre a causare le contrazioni delle lunghezze e  
l'aumento della massa, doveva anche rallentare il  
tempo: in altre parole mentre il metro si sarebbe  
accorciato gli orologi avrebbero scandito il tempo  
più lentamente.

## La teoria della relatività.

L'aspetto più fondamentale della teoria di Einstein era la negazione dell'esistenza dello spazio assoluto e del tempo assoluto. Questo potrebbe apparire senza senso: come può la mente umana apprendere qualcosa sull'universo senza alcun punto di partenza? Einstein rispondeva che tutto quanto occorre è un *sistema di riferimento* a cui rapportare gli eventi dell'universo. Qualsiasi sistema di riferimento sarà ugualmente valido: la terra considerata immobile, il sole considerato immobile, o noi stessi considerati immobili. Possiamo, semplicemente, scegliere il sistema che più è conveniente. È più comodo calcolare i moti dei pianeti in un sistema di riferimento in cui il sole è immobile che in uno in cui lo è la terra –ma il

primo sistema non è per questo più vero.

Così, le misurazioni dello spazio e del tempo sono

<<relative>> a un sistema di riferimento

arbitrariamente scelto ed è questa la ragione per cui

la teoria di Einstein si chiama *teoria della relatività*.

Facciamo un esempio: supponiamo di osservare,

stando qui sulla terra, uno strano pianeta (Pianeta X),

esattamente uguale al nostro per massa e dimensioni,

che ci sfrecciasse vicino alla velocità, rispetto a noi, di

262.000 chilometri al secondo. Se potessimo misurare

le sue dimensioni mentre ci sfiora, troveremmo che si

è contratto del 50 per cento nella direzione del suo

moto. Sarebbe un ellissoide anziché una sfera; inoltre

in un'ulteriore misurazione la sua massa risulterebbe

doppia di quella della terra.

Eppure, a un uomo sul Pianeta X sembrerebbe di essere fermi su un pianeta immobile; egli inoltre riterrebbe che fosse la terra a sfiorarlo, alla velocità di 262.000 chilometri al secondo, e la terra gli apparirebbe di forma ellissoidale e di massa doppia di quella del proprio pianeta. Si sarebbe tentati di chiedere quale pianeta si sia *realmente* contratto nella direzione del moto e abbia *realmente* raddoppiato la propria massa; ma l'unica risposta possibile dipende dal sistema di riferimento. Se trovate frustante l'idea, pensate al fatto che l'uomo è piccolo in confronto a una balena grande in confronto a un insetto. Che senso ha dunque chiedersi se l'uomo sia *in realtà* grande o piccolo? Nonostante tutte le sue insolite implicazioni, la

relatività spiega tutti i fenomeni noti dell'universo  
almeno altrettanto bene quanto le teorie  
prerelativistiche, esse, però, va oltre, spiegando in  
modo semplice alcuni fenomeni che la concezione  
newtoniana spiegava in modo insoddisfacente o non  
spiegava affatto. Di conseguenza, quella di Einstein  
è stata accettata, rispetto a quella di newton, non già  
come una teoria sostitutiva, ma come una più  
perfezionata. Si può ancora utilizzare la concezione  
newtoniana dell'universo come un'approssimazione  
semplificata che funziona abbastanza bene nella vita  
ordinaria e anche nell'astronomia comune, perfino  
per mettere in orbita dei satelliti; quando però si  
tratta, per esempio, di accelerare delle particelle in  
un sincrotrone, si deve tener conto dell'aumento

einsteiniano della massa con la velocità, se si vuole  
che la macchina funzioni.

### **Lo spazio-tempo e il paradosso degli orologi.**

La concezione einsteiniana dell'universo intreccia tra  
loro spazio e tempo in modo tale che non ha più senso  
parlare dell'uno e dell'altro separatamente. L'universo  
è quadrimensionale, e il tempo è una delle sue  
dimensioni (che però non si comporta esattamente  
come le ordinarie dimensioni spaziali, lunghezza,  
larghezza e altezza. Se fino ad ora le equazioni della  
relatività galileiana ci hanno insegnato l'invariabilità  
delle coordinate spaziali, e del tempo secondo le  
equazioni:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z'=z$$

$$t'=t$$

Einstein mutò nella forma e nella sostanziale

relazioni galileiane appuntando una critica su quei

concetti di spazio e di tempo che Newton non volle

definire perchè “notissimi” e che Kant aveva elevato

al rango di strutture “a priori” del pensiero

razionale. Ecco dunque le nuove relazioni della

relatività di Einstein comunemente ricordate con la

denominazione di Lorentz-Einstein:

$$x' =$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' =$$

Spazio e tempo giocano strani scherzi nella relatività: uno degli aspetti della teoria che suscita ancora discussioni tra i fisici è l'idea di Einstein del rallentamento degli orologi. Un orologio in moto, diceva Einstein, segna il tempo più lentamente di un orologio in quiete. In effetti, tutti i fenomeni variabili nel tempo variano più lentamente in moto che in quiete, il che equivale a dire che il tempo stesso rallenta. A velocità ordinarie, l'effetto è trascurabile, ma a 262.000 chilometri al secondo un orologio sembrerebbe ( a un osservatore che lo guardasse passare) impiegare due secondi per batterne uno. Alla velocità della luce, poi, l'orologio sembrerebbe fermo.

La dilatazione del tempo è più sconcertante degli

effetti che implicano lunghezza e massa. Se un oggetto si riduce alla metà della propria lunghezza e poi ritorna alla lunghezza normale, o se raddoppia il proprio peso e poi riprende quello normale, non resta alcuna traccia che indichi tale cambiamento transitorio, e non vi sono due punti di vista opposti che entrano in conflitto.

Il tempo, invece, è cumulativo. Se un orologio sul Pianeta X, a causa della sua grande velocità, sembra marciare a ritmo dimezzato per un'ora, e se poi ritorna in quiete, esse pur riprendendo il suo ritmo di marcia normale, conserverà traccia di quanto avvenuto nel fatto di essere indietro di mezz'ora!

Allora, consideriamo due navi spaziali che si passino accanto, ciascuna ritenendo che l'altra si

muova alla velocità di 262.000 chilometri al

secondo, con un tempo rallentato della metà:

quando le due astronavi poi si riincontreranno, gli

osservatori situati su ciascuna si aspetteranno che

l'orologio dell'altra astronave sia rimasto indietro di

mezz'ora rispetto al proprio. Ma non è possibile che

ciascuno dei due orologi sia indietro rispetto

all'altro. Cosa sarà accaduto allora?

Questo problema prende il nome di *paradosso degli*

*orologi*. In realtà, non c'è nessun paradosso. Anche

se una delle due astronavi passasse come una saetta

vicino all'altra e ciascuno dei due equipaggi giurasse

che l'orologio dell'altra astronave era più lento, non

avrebbe alcuna importanza stabilire quale orologio

fosse <<realmete>> più lento; le due astronavi si

allontanerebbero infatti per sempre e i due orologi non verrebbero mai più portati nello stesso posto allo stesso momento per essere confrontati: il paradosso degli orologi non si presenterebbe mai. In effetti la teoria della relatività ristretta di Einstein è valida solo per il moto rettilineo ed uniforme, così che all'interno di tale teoria si può parlare solo di separazioni definitive.

Supponiamo, invece, che le due navi spaziali si rincontrino dopo il rapido passaggio dell'una accanto all'altra, in modo che si possano confrontare i due orologi. Perché ciò accada, deve verificarsi un fatto nuovo. Almeno una delle due navi spaziali deve accelerare. Supponiamo che sia l'astronave B a farlo –cioè che essa rallenti,

descrive un'ampia curva e poi accelera finché  
raggiunge l'astronave A. Naturalmente B potrebbe  
scegliere di considerarsi in quiete; secondo tale  
scelta del sistema di riferimento sarà A che  
effettua tutte le variazioni di velocità, in modo da  
accostarsi a B. Se nell'universo non esistessero che  
queste due astronavi, allora si che, in virtù di questa  
situazione simmetrica, insorgerebbe il paradosso  
degli orologi.

Tuttavia, A e B non sono tutto ciò che esiste  
nell'universo -il che distrugge la simmetria. Quando  
B accelera, lo fa non solo rispetto ad A, ma anche  
rispetto a tutto il resto dell'universo. Se B sceglie di  
considerarsi in quiete, deve considerare non solo A,  
ma tutte le galassie, senza alcuna eccezione, come

accelerate rispetto a se stessa. In breve, è B contro l'universo intero. In tale situazione, è l'orologio di B che resta indietro di mezz'ora, non quello di A.

Questo fenomeno comporta delle conseguenze per i viaggi spaziali. Se gli astronauti che si allontanano dalla terra accelerano fino a raggiungere quasi la velocità della luce, il tempo per loro passerebbe molto più lentamente che per noi. Essi potrebbero raggiungere una destinazione molto lontana e far ritorno nel giro di quelle che per loro sembrerebbero settimane, mentre nel frattempo sarebbero passati sulla terra molti secoli. Secondo quest'ipotesi della dilatazione del tempo con il moto, si potrebbe addirittura fare un viaggio fino a una stella lontana durante l'arco di una vita lontana; ma naturalmente

chi intraprendesse tale viaggio dovrebbe dire addio  
per sempre alla propria generazione e al mondo che  
conosce, perché ritornerebbe nel mondo del futuro.

## **La gravità e la teoria della relatività generale di Einstein.**

Nella teoria della relatività ristretta; Einstein non si occupò del moto accelerato né della gravitazione.

Trattò invece questi temi nella teoria della relatività generale. Quest'ultima presentava una concezione completamente nuova della gravitazione, considerandola come una proprietà dello spazio anziché come una forza che si esercita tra i corpi.

Come per effetto della presenza della materia, lo spazio si incurva, e i corpi, per così dire, seguono la linea di minore resistenza tra tutte le curve. Per strana che potesse apparire questa concezione di Einstein, essa riusciva a spiegare qualcosa che la teoria newtoniana della gravitazione non era riuscita a spiegare. La teoria della relatività generale

di Einstein mostrò che il perielio di qualsiasi corpo animato da un moto di rivoluzione doveva avere un altro movimento oltre a quello previsto dalla legge di Newton.

Ancora più impressione fecero le scoperte di nuovi fenomeni inaspettati, che erano stati previsti solo dalla teoria di Einstein. Innanzitutto Einstein aveva previsto che un intenso campo gravitazionale avrebbe dovuto rallentare le vibrazioni di un atomo; tale rallentamento sarebbe stato messo in evidenza da uno spostamento verso il rosso delle righe spettrali (*spostamenti di Einstein*).

La verifica della seconda previsione di Einstein fu molto sensazionale. La sua teoria prevedeva che un

campo gravitazionale avrebbe dovuto incurvare i raggi luminosi; Einstein aveva calcolato che un raggio di luce che sfiorasse la superficie del sole sarebbe stato incurvato rispetto a una linea retta di 1,75 secondi di arco. Come si poteva verificare questo asserto se fosse stato possibile osservare le stelle lontane ma molto prossime al bordo del disco solare, durante un'eclissi di sole, e confrontare le loro posizioni con quelle che esse stesse avevano quando il sole non si trovava in prossimità del percorso dei loro raggi di luce, qualsiasi spostamento dovuto alla curvatura della luce avrebbe dovuto essere visibile. Assistendo a un'eclissi totale le stelle mostrarono effettivamente un cambiamento di posizione.