

**A. I. F.**  
**SEZIONE DI PAVIA**  
Via Bassi n. 6 - Tel. 31341

VI Corso di Aggiornamento in Fisica - Anno 1981

"Alcuni argomenti di fisica moderna. L'uso dell'oscilloscopio per esperienze didattiche".

A. Piassoli

"Relatività ristretta e generale"

Nota divulgativa pubblicata sul quotidiano "Il Tempo"

Il Tempo è qualcosa di inafferrabile, di indefinibile e di affascinante. Artisti e filosofi hanno cercato di penetrarne il significato o di descriverne l'insondabile mistero. Ci sono farfalle che campano una sola giornata e rocce che esistono da miliardi di anni, particelle subnucleari con vita media di un centomillesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo e altre con vita media di mille miliardi di miliardi di miliardi di anni.

L'intero universo, che esiste da circa 15 miliardi di anni, passa attraverso una successione infinita di istanti, ognuno dei quali è unico e irripetibile. Questo trascorrere ineluttabile del tempo provoca quasi uno sbigottimento psicologico.

Newton pensava che esistesse un tempo unico in tutto l'Universo, scandito da un non meglio definito orologio universale. Quando è trascorso un minuto all'aeroporto di Londra, è trascorso un minuto anche in un sottoscala di Milano, è trascorso un minuto anche in luoghi dove non c'è nessuno a percepire il trascorrere del tempo; nel deserto del Sahara, in un cratere lunare, sulla costellazione di Andromeda o agli estremi confini dell'Universo.

Newton fu un grande scienziato, ma questa sua concezione del tempo è più filosofica che scientifica.

In seguito la scienza si è occupata a fondo del tempo: forse non ne ha ancora compreso il significato ultimo, ma ci ha fatto compiere progressi fondamentali verso questo traguardo. Progressi che si conseguono solo quando un dato problema diventa oggetto di indagine scientifica.

L'autore pressochè unico di questi fondamentali progressi fu A. Einstein e la sua logica è così ferrea e ben fondata su alcuni indiscutibili dati di fatto sperimentali, che chiunque dev'è condividere la concezione einsteiniana del tempo, anche se apparentemente paradossale.

La storia ha inizio verso il 1860 quando J.C. Maxwell portò a termine una poderosa sintesi teorica dell'elettromagnetismo: tutti i fenomeni elettromagnetici noti discendevano da quattro lapidarie e quazioni. Le equazioni di Maxwell prevedevano anche l'esistenza di onde elettromagnetiche e la luce doveva essere un'onda di questo tipo con particolari valori della lunghezza d'onda.

Qualche anno dopo Hertz dimostrò sperimentalmente l'esistenza di onde elettromagnetiche non luminose, esattamente come previsto da Maxwell. Il successo fu clamoroso e indiscutibile: magnetismo, elettricità e ottica furono da quel momento unificati in un'unica disciplina governata da pochi e sintetici principi: l'elettromagnetismo.

Sorse subito però una grave difficoltà: le equazioni di Maxwell prevedevano che la velocità della luce nel vuoto, come quella di tutte le onde elettromagnetiche, dipendesse solamente dal valore di costanti universali e perciò non poteva dipendere dal sistema di riferimento in cui tale velocità viene misurata.

Una velocità con una simile caratteristica non si era mai vista e sembrava anzi inconcepibile. Come è possibile che un raggio luminoso si propaghi, diciamo, tra una parete e l'altra di un vagone ferroviario, con la stessa velocità, sia se misurata da un osservatore sul treno sia da uno sul marciapiede? I fisici, non osando dichiarare che le equazioni di Maxwell erano sbagliate, trovarono una scappatoia: la velocità della luce aveva quel valore previsto da Maxwell (300.000 Km al secondo), valore simbolicamente indicato con  $c$ , solo rispetto a una sorta di fluido immobile e impalpabile che doveva riempire tutto l'universo, compreso l'interno della materia. Tale fluido, così poco credibile fin dal momento in cui fu ipotizzato, fu chiamato "etere". A questo punto il problema era di avere il conforto sperimentale che la velocità di un raggio luminoso nell'interno di una scatola in moto rispetto all'etere nella stessa direzione del raggio, non è più  $c$ , ma  $c$  più la velocità



della scatola rispetto all'etere.

La terra si muove con una velocità di circa 27 Km al secondo attorno al sole e quindi rispetto all'etere, se questo esiste.

Il problema sembrava però disperato, perchè ventisette costituisce una piccolissima percentuale rispetto a trecentomila.

Ciò nonostante nel 1882, due fisici americani, Michelson e Morley, contro il parere dello stesso Maxwell, eseguirono l'impossibile esperimento e il risultato fu desolante: la velocità della luce nel vuoto è sempre  $c$ , in qualunque direzione si propaghi rispetto al moto della terra.

Seguì un periodo di confusione in cui i fisici pensarono e pubblicarono cose .... poco dignitose.

Fu persino proposto che il risultato dell'esperimento fosse dovuto a effetti compensativi o mascheranti, dovuti a una sorta di "pudicizia" della natura che non avrebbe voluto mostrare l'etere agli uomini!

Finalmente nel 1905 arrivò un impiegato dell'Ufficio Brevetti di Berna. Ventiseienne e di nazionalità tedesca, aveva un'ingloriosa carriera scolastica: i suoi professori di liceo l'avevano sconsigliato di proseguire gli studi, perchè poco dotato, soprattutto in matematica e fisica. Quest'uomo si chiamava Albert Einstein.

La sua proposta, di una geniale semplicità, si articolava in due punti. Primo: l'etere non esiste e quindi la velocità della luce nel vuoto è sempre  $c$ , in tutti i sistemi di riferimento "inerziali" cioè in quiete o in moto rettilineo uniforme rispetto al cielo delle cosiddette stelle fisse. Secondo: tutti i sistemi di riferimento inerziali sono del tutto equivalenti per descrivere qualunque fenomeno fisico, meccanico o elettromagnetico che sia.

Questo secondo punto, detto "principio di relatività di Galileo" era per la verità già noto, ma nel periodo della questione dell'etere era stato fortemente sospettato di non essere valido per i fenomeni elettromagnetici. Einstein ne riafferma la validità. Da queste due semplici affermazioni derivano conseguenze sconvolgen-



ti, e non poteva essere altrimenti, perchè devono comunque farci ingoiare un grosso rospo: una velocità indipendente dal moto dell'osservatore che la misura. Sarebbe come dire che rincorrendo un raggio luminoso questo si allontana dall'inseguitore sempre con la stessa velocità, qualunque sia la velocità dell'inseguitore. Si immagini un uomo che dal centro di un vagone in moto rettilineo e uniforme, spari contemporaneamente due colpi di pistola verso le pareti.)

(I proiettili raggiungono le due pareti contemporaneamente sia se osservati dallo sparatore che da un uomo che stesse sul marciapiede. Infatti, è ben vero che l'uomo sul marciapiede somma la velocità del treno a quella del proiettile sparato nella stessa direzione e la sottrae all'altro, ma il primo proiettile deve compiere un tragitto maggiore, in quanto durante il suo viaggio, la parete si allontana; viceversa avviene per l'altro proiettile. Allora l'arrivo dei proiettili sulle pareti sono due eventi simultanei sia per chi sta sul treno, sia per chi sta sul marciapiede. Immaginiamo ora di sostituire le pistole con due pile tascabili: alla velocità dei raggi luminosi non si somma e non si sottrae un bel niente, come Michelson e Morley hanno dimostrato. L'arrivo dei raggi sulle pareti sono due eventi simultanei per chi sta sul treno, ma non per chi sta sul marciapiede. Chi ha ragione? Qui entra in gioco il secondo punto di Einstein: hanno ragione tutti e due, trattandosi di due osservatori inerziali. La conclusione è piuttosto pesante perchè l'affermazione: "l'evento A è simultaneo all'evento B" ha perduto di significato.

Ma le sorprese non sono finite, perchè Einstein convinse il mondo scientifico, e nessuno ebbe dubbi in proposito, che una qualunque misura di tempo implica un giudizio di simultaneità: l'accadere di un certo evento con l'arrivo della lancetta di un orologio in una certa posizione.

La crisi della simultaneità equivale quindi a una crisi ... del tempo. In altre parole, il tempo trascorre in modo diverso sul tre

no e sul marciapiede.

Un'analisi dettagliata mostrerebbe che dal marciapiede si vedono ritardare gli orologi posti sul treno e viceversa.

Questo fenomeno è denominato "dilatazione del tempo" e nel 1940 Rossi e Hall, in un celebre esperimento sul decadimento dei muoni cosmici, dimostrarono la piena validità di questa sorprendente previsione di Einstein. Una conseguenza diretta e inevitabile della dilatazione del tempo è la così detta "contrazione delle lunghezze". Si consideri un regolo lungo esattamente un metro e in moto con velocità costante nella direzione della sua lunghezza rispetto a un osservatore fermo.

Come fa quest'ultimo a misurare la lunghezza del regolo? deve determinare la posizione degli estremi a un dato istante e poi misurare la distanza tra le due posizioni. Ma, "a un dato istante" rispetto a chi? Ciò che è simultaneo per l'osservatore fermo non è simultaneo per un osservatore che si muovesse solidalmente con il regolo: per l'osservatore fermo il regolo è più corto di 1 metro!

Se il regolo si muovesse perpendicolarmente alla sua lunghezza non ci sarebbe problema: non vi è contrazione delle dimensioni trasversali alla direzione di moto.

E' ora possibile comprendere il significato del tempo come quarta dimensione.

Anche prima di Einstein, i matematici avevano pensato a una formale introduzione del tempo come quarta dimensione accanto alle tre usuali dimensioni spaziali.

La difficoltà di immaginare visivamente dove diavolo fosse questo quarto asse perpendicolare a tutti e tre gli altri assi è del tutto inessenziale. Infatti i matematici avevano introdotto spazi con un numero di dimensioni anche maggiore e un certo Hilbert persino uno spazio a infinite dimensioni!

Dato un astratto spazio-tempo a quattro dimensioni, è possibile tornare con i .... piedi per terra, cioè in uno spazio a tre dimen



sioni, immaginando di operare un'intersezione nello spazio-tempo al desiderato istante prefissato.

Fin qui Einstein non c'entra nulla. Dopo la sua analisi però, è venuto in chiaro che non è possibile operare intersezioni nello spazio-tempo a "un dato istante prefissato". Non è possibile perchè osservatori diversi farebbero tagli diversi, perchè il tempo trascorre in un modo diverso. Allora lo spazio e il tempo sono indissolubilmente legati, incastrati uno nell'altro e lo spazio-tempo non è più un concetto astratto da matematico, ma un concetto reale ..... da fisico.

Noi non viviamo nello spazio e nel tempo, ma nello spazio-tempo. L'orologio universale di Newton non esiste!

Fin qui l'impiegato dell'Ufficio Brevetti di Berna si occupò solo di sistemi di riferimento inerziali e la sua teoria è denominata "Teoria della Relatività Ristretta".

E se un sistema di riferimento fosse accelerato rispetto a un altro? sembrerebbe proprio impossibile affermare l'equivalenza di questi due sistemi, perchè è chiaramente individuabile quale è accelerato e quale no. Su un treno in frenata cadono le valigie dalla reticelle, su uno a velocità costante le valigie non cadono. Questo è buon senso, ma Einstein ebbe a dire che ciò che chiamiamo "buon senso" non è che l'insieme dei pregiudizi che ci siamo fatti prima dei sedici anni!

Einstein pensò undici anni a questo problema e lo risolse solo nel 1916 con la pubblicazione della "Teoria della Relatività Generale". Egli partì da una ben nota osservazione, dovuta a Galileo, che la velocità di caduta libera di un corpo è indipendente dalla sua massa.

Due palle delle stesse dimensioni, una di ferro e l'altra di legno, lasciate cadere contemporaneamente dalla torre di Pisa, arrivarono contemporaneamente al suolo. Se non fosse per la presenza dell'aria,



anche una palla di ferro e una piuma si comporterebbero nello stesso modo. Questo esperimento fu spettacolarmente eseguito dal primo uomo sulla luna, ripreso dalle telecamere di tutto il mondo, anche se scientificamente non più necessario.

Sarebbe stata molto più interessante una inaspettata smentita e tutti i fisici che vi hanno assistito l'hanno segretamente sperato: la scienza non santifica i suoi grandi uomini.

Cosa significa questa indipendenza della velocità di caduta dalla massa? Solo Einstein si pose questa domanda e ne diede una risposta. Supponiamo di essere chiusi in un ascensore in caduta libera, a causa della rottura della fune di sostentamento e che nella cabina ci sia anche il vuoto. La caduta libera è un moto accelerato con un'accelerazione costante che sulla terra, a quote prossime al livello del mare, vale circa 9,8 metri al secondo per secondo. In questa cabina, un libro, una piuma, noi stessi e la cabina, cadremmo con la stessa velocità. Chiaramente, se avessimo una bilancia e ci pesassimo, il nostro peso apparirebbe nullo. Cosa penseremmo? di essere in una cabina in caduta libera o di essere in una cabina ferma ma in un luogo dove non esiste alcuna forza di gravità? Ebbene non esiste alcun modo per distinguere tra queste due possibilità senza avere informazioni provenienti dall'esterno della cabina. Questa indistinguibilità di principio fu chiamata da Einstein "Principio di equivalenza".

Se uno stato di moto accelerato è equivalente a uno stato di quiete purchè si aggiunga un'opportuna forza di gravità, allora diventa possibile estendere il principio di relatività di Galileo anche ai sistemi di riferimento accelerati, cioè non inerziali.

Si consideri per esempio un disco ruotante con velocità angolare costante. Tale moto è accelerato, perchè la velocità di ogni punto del disco cambia continuamente direzione. La velocità di ogni punto è proporzionale alla sua distanza dal centro del disco. In particolare il centro è fermo, mentre i punti più veloci sono quelli all'estrema periferia.

Sul disco sono state disegnate varie circonferenze con raggi diversi e su ogni circonferenza sono state tracciate delle tacche distanziate esattamente di un metro. Vicino a ogni tacca è anche stato posto un orologio. Ora immaginiamo un fisico che si ponga al centro del disco, che rimane in quiete. Il fisico sia munito di un proprio orologio oltre che di cannocchiali e di telemetri per misurare le distanze tra le tacche e i raggi delle circonferenze mentre il disco è in rotazione.

La Relatività Ristretta ci assicura che il fisico vede la distanza tra le tacche minore di un metro e tanto minore quanto maggiore è il raggio della circonferenza su cui sono state tracciate. I raggi delle circonferenze invece, non appaiono affatto accorciati perchè non vi è contrazione delle dimensioni trasversali alla direzione di moto.

Brutto affare davvero per il nostro fisico! ha scoperto che la circonferenza non è uguale al raggio moltiplicato per 6,28! Dopo un attimo di perplessità però, il nostro fisico trova una via d'uscita.

La circonferenza è data dal raggio per 6,28 solo per circonferenze disegnate su un piano. Su una superficie sferica per esempio, questo non è più vero. Osserviamo la Figura (vedi pag. 11).

#### F I G U R A

La circonferenza  $C$  è data da  $R$  per 6,28, ma è minore di  $R_s$  per 6,28. e  $R_s$  non  $R$ , giace sulla sfera (vedi Figura). Il nostro fisico conclude allora che un disco ruotante è equivalente a un disco fermo, ma "curvo", come se fosse una calotta sferica. Equivalente a tutti gli effetti, perchè se riflettiamo un momento, per stabilire se siamo su una superficie piana o sferica, senza lasciare la superficie o tentarne la circumnavigazione, è proprio necessario determinare esattamente il rapporto tra circonferenze e raggi disegnati su quel



la superficie.

Il responso è inappellabile: siamo su un piano solamente se tale rapporto è esattamente 6,28. Il fisico è strabigliato dalle sue stesse scoperte, ma le sorprese per lui non sono finite.

Infatti conosce la Relatività Ristretta e sa benissimo che spazio e tempo sono intimamente legati a formare lo spazio-tempo. Se la rotazione ha incurvato lo spazio, cosa è successo al tempo? si è "incurvato" anche il tempo?

Allora il fisico controlla gli orologi posti vicino a ogni tacca e trova un risultato previsto dalla Relatività Ristretta: tutti gli orologi ritardano rispetto al suo e il ritardo aumenta all'aumentare della distanza dell'orologio dal centro del disco, cioè all'aumentare della velocità dell'orologio. Su ogni circonferenza gli orologi sono tra loro sincronizzati.

Il fisico ha un brivido di emozione: è proprio curvo anche il tempo, cioè la rotazione ha provocato l'incurvamento dello spazio-tempo.

Ora facciamo scattare il principio di equivalenza. Il disco ruotante è del tutto equivalente a un disco fermo, purchè esistano delle forze di gravità tali che in tutti i punti di una data circonferenza tracciata sul disco l'accelerazione di gravità sia pari a quella che quei punti effettivamente hanno a causa della rotazione del disco. Allora lo spazio-tempo viene incurvato anche dalla presenza di materia e il tempo passa sempre più lentamente quanto più intensa è la forza di gravità da essa creata. La traiettoria di un raggio luminoso in presenza di forze di gravità deve essere curva. L'accelerazione di gravità è un poco più piccola in montagna che a livello del mare a causa della diversa distanza dal centro della terra. Allora in montagna il tempo trascorre un poco più velocemente? Certamente! E se qualcuno pensasse che tutto ciò è soltanto una bella e strampalata filosofia, è bene dire subito che questo fatto è stato sperimentalmente verificato con estrema precisione e con una differenza di quota di soli venti metri. Si faccia bene attenzione che il



diverso trascorrere del tempo si manifesta solo con il confronto tra intervalli di tempo misurati da orologi posti in luoghi a diversa accelerazione di gravità. Tanto per essere chiari, non ha proprio nessun senso andare al mare per ..... vivere più a lungo. Tutti sanno cosa sia un "buco nero".

Nell'interno di un buco nero l'accelerazione di gravità è infinitamente grande e quindi il tempo, come misurato dall'esterno, è infinitamente lento, cioè non trascorre affatto, si è fermato, è in un perpetuo presente. E' troppo nota la teoria della nascita dell'Universo, detta del "big -bang", per doverla illustrare. Mai come con questa teoria, anche se ancora carente di prove sicure (e per questo non molto simpatica al prof. A. Zichichi), la scienza è arrivata vicina a Dio. Nasce anche spontaneo un interrogativo teologico: cosa ha fatto Dio per infinito tempo fino all'istante del big-bang che la teoria colloca a circa 15 miliardi di anni fa?

Prima di quell'istante il tempo non esisteva e non esisteva neppure lo spazio, l'Universo stava tutto in un punto, nel senso che l'esterno di quel punto non esisteva. Tutto lo spazio-tempo era racchiuso in quel punto in un eterno presente.

Forse il punto era Dio: "In principio era il punto e il punto era presso Dio e il punto era Dio".

Il big-bang è stata un'immane esplosione, ma un'esplosione dello spazio-tempo che ha incominciato a sgorgare da questo punto e a espandersi (l'espansione dell'Universo è sperimentalmente provata). Se questa espansione continuerà all'infinito, oppure un bel giorno cesserà e l'Universo ritornerà al punto di partenza, ancora non lo sappiamo.

Sarebbero ancora molte le conseguenze da trarre da questa affascinante e diabolica teoria che è la Relatività Generale, ma il tema era il Tempo ed è meglio fermarsi qui.

Forse la scienza non ha ancora compreso cosa sia il tempo, ma il suo intervento è stato decisivo, come sempre del resto. Un indubbio pro

gresso, anche sul piano filosofico, può essere la seguente affermazione: chi non comprende cosa sia il tempo, non può nemmeno comprendere cosa sia lo spazio.

Esistono forme di conoscenza diverse dalla conoscenza scientifica?

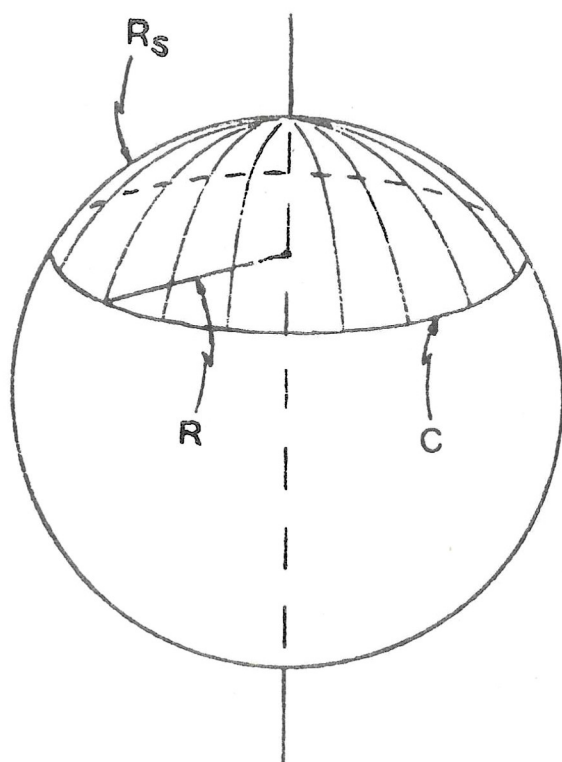


Figura di pag. 8

VI Corso di Aggiornamento in Fisica - Anno 1981

"Alcuni argomenti di fisica moderna. L'uso dell'oscilloscopio per esperienze didattiche".

A. Piassoli

"Relatività ristretta e generale"

Bibliografia

- 1) A. Piassoli - Appunti di relatività ristretta  
La Goliardica Pavese - 1974

Esposizione elementare, ma non divulgativa, dei principali aspetti della teoria della relatività ristretta. Si limita sostanzialmente alle trasformazioni di Lorentz, alla dilatazione dei tempi, alla contrazione delle lunghezze e al "paradosso dei gemelli". L'aspetto matematico formale è ridotto al minimo. Il testo è arricchito da qualche gustoso aneddoto di storia della fisica.

- 2) A. Piassoli - Il tempo  
serie di articoli apparsa su un quotidiano nazionale



Trattazione estremamente divulgativa del:  
l'argomento, ma ricca di spunti trasferibili  
direttamente a studenti di scuola media  
superiore.

3) P. Marasini - Cenni di relatività ristretta

I.T.I.S. "E. Molinari" - Milano

Testo utilizzabile direttamente dagli studenti;  
adatto soprattutto a un lavoro di ricerca. Ricco  
di bibliografia consultabile anche da studenti.

4) G.C. Mantovani - Nozioni di relatività ristretta

Trattazione rivolta a studenti universitari  
del primo biennio: succinta e chiara

5) M. Pavan - Elementi di relatività

Madis Navara-1975

Ottimo esempio di approccio didattico alla  
teoria della relatività ristretta che offre un  
quadro semplice e chiaro (senza l'uso del  
calcolo infinitesimale e tensoriale) dei fondamen-  
ti su cui questa teoria si basa.

6) Autori vari - Iniziativa relatività

Quaderni del Giornale di Fisica vol. VI - 1981

Rapporto, ricchissimo di bibliografia, sull'esperimen-  
to con il quale ci si è proposti di verificare la  
possibilità di ottenere l'apprendimento della teoria  
della relatività da parte di studenti della Scuola  
Media Superiore.