

I fondamenti della teoria della relatività generale

Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, Annalen der Physik, **49**, 769-822 (1916)

A. Einstein

La teoria esposta nel seguito costituisce l'estensione più vasta pensabile della teoria indicata in generale al giorno d'oggi come "teoria della relatività"; quest'ultima la chiamo nel seguito "relatività speciale" per distinguerla dalla prima, e la assumo per nota.

La teoria della relatività speciale si fonda sul seguente postulato, soddisfatto anche dalla meccanica di Galilei-Newton: *se un sistema di coordinate K è scelto in modo tale che relativamente ad esso le leggi fisiche valgono nella loro forma più semplice, le stesse leggi valgono anche relativamente ad ogni altro sistema di coordinate K' , assunto in moto di traslazione uniforme rispetto a K* . Chiamiamo questo postulato "principio di relatività speciale". Attraverso la parola "speciale" si allude al fatto che il principio è ristretto al caso che K' compia un *moto di traslazione uniforme* rispetto a K , ma che l'equivalenza di K' e di K non si estende al caso di moto *non uniforme* di K' rispetto a K .

La teoria della relatività speciale si discosta quindi dalla meccanica classica non per il postulato di relatività, ma soltanto per il postulato della costanza della velocità della luce nel vuoto, dal quale, in congiunzione con il principio della relatività speciale, discendono in modo noto la relatività della simultaneità, come pure la trasformazione di Lorentz e le leggi con questa associate sul comportamento in moto dei corpi rigidi e degli orologi.

La modificazione che la teoria dello spazio e del tempo ha subito a causa della teoria della relatività speciale è veramente profonda; ma **un** punto importante rimane intatto...

A due punti materiali prefissati di un corpo (rigido) a riposo corrisponde perciò sempre un segmento di lunghezza completamente determinata, indipendente dalla posizione e dall'orientamento del corpo, come pure dal tempo; a due prefissate posizioni delle lancette di un orologio a riposo rispetto ad un sistema di riferimento (consentito) corrisponde sempre un intervallo temporale di lunghezza determinata, indipendente dalla posizione e dal tempo. **Si mostrerà subito che la teoria della relatività generale non può attenersi a questa semplice interpretazione fisica dello spazio e del tempo.**

Le leggi della fisica devono essere di natura tale da valere rispetto ad un sistema di riferimento in moto arbitrario.

Giungiamo per questa via ad un allargamento del postulato della relatività

Ma oltre a questo grave argomento epistemologico anche un ben noto fatto fisico parla a favore di un'estensione della teoria della relatività..

Da queste riflessioni si vede che l'introduzione della relatività generale deve condurre parimenti ad una teoria della gravitazione; si può infatti "generare" un campo di gravitazione con il puro cambiamento del sistema di coordinate. E si vede anche immediatamente che il principio della costanza della velocità della luce nel vuoto deve subire una modificazione. Si riconosce infatti facilmente che il cammino di un raggio di luce rispetto a K' in generale deve essere curvo, mentre la luce si propaga rispetto a K in linea retta e con velocità costante determinata.

Nella meccanica classica e anche nella teoria della relatività speciale le coordinate dello spazio e del tempo hanno un significato fisico immediato....

Quest'idea dello spazio e del tempo è sempre presente ai fisici, anche se per lo più in modo inconscio, com'è riconoscibile chiaramente dal ruolo che questi concetti giocano nella fisica sperimentale; quest'idea il lettore la deve porre a fondamento anche della seconda considerazione dell'ultimo paragrafo, affinché si possa associare un senso a queste argomentazioni. ***Ma mostreremo ora che bisogna abbandonarla e sostituirla con una più generale ...***

... Arriviamo quindi alla conclusione: **nella teoria della relatività generale le quantità spaziali e temporali non sono definite in modo tale che le differenze di coordinate spaziali possano essere misurate immediatamente con il regolo campione unitario, e quelle temporali con l'orologio standard.**

Non resta quindi altra possibilità che assumere tutti i sistemi di coordinate pensabili come in linea di principio ugualmente legittimi per la descrizione della natura. Si arriva così al postulato:

Le leggi generali della natura sono da esprimersi con equazioni che valgano per tutti i sistemi di coordinate, ciò che siano covarianti rispetto alle sostituzioni arbitrarie (generalmente covarianti).

[Alcuni effetti, N.d.T.]:

Per la presenza del campo gravitazionale il regolo campione appare quindi accorciato dell'ammontare trovato rispetto al sistema di coordinate, quando esso sia disposto radialmente.

Per giacitura tangenziale il campo gravitazionale del punto materiale non ha quindi influenza sulla lunghezza del regolo.

Pertanto la geometria euclidea non vale neppure in prima approssimazione, se si assume un certo regolo come realizzazione dello stesso intervallo indipendentemente dalla sua posizione e dal suo orientamento.

Studiamo poi la velocità di avanzamento rispetto alla coordinata temporale di un orologio campione, che sia posto a riposo in un campo statico:

L'orologio cammina più lentamente quando è posto in prossimità di masse ponderabili. Ne consegue che le righe spettrali della luce che ci arriva dalla superficie di stelle grandi ci devono apparire spostate verso l'estremo rosso dello spettro.

Studiamo inoltre il cammino dei raggi luminosi in un campo gravitazionale statico.

Si riconosce facilmente che i raggi di luce devono procedere curvi rispetto al sistema di coordinate nel caso che le $g_{\mu\nu}$ non siano costanti.

Studiamo la curvatura che subisce un raggio che passi alla distanza Δ da una massa M :

...Un raggio di luce che passi rasente al sole subisce quindi una deflessione di $1,7''$, uno rasente al pianeta Giove una deflessione di $0,02''$.

Se si calcola il campo gravitazionale con approssimazione superiore di un ordine, e quindi con la precisione corrispondente il moto orbitale di un punto materiale di massa infinitesima, si ottiene rispetto alle leggi di Keplero-Newton del moto dei pianeti una deviazione del tipo seguente: l'ellisse dell'orbita di un pianeta subisce nel verso del moto orbitale una lenta rotazione che ammonta a:

$$\varepsilon = 24 \pi^3 \frac{a^2}{T^2 c^2 (1-e^2)} \quad \text{per rivoluzione.}$$

Il calcolo dà per il pianeta Mercurio una rotazione dell'orbita di $43''$ per secolo, che corrisponde esattamente alla constatazione degli astronomi (Leverrier); essi trovano infatti nel moto del perielio di questo pianeta un residuo della suddetta entità non spiegabile con le perturbazioni dovute agli altri pianeti.

(Ricevuto il 20 marzo 1916.)