**<u>EINSTEIN</u>**
**LA RELATIVITA' DELLA SIMULTANEITA'**

Il fulmine ha colpito le rotaie di una linea ferroviaria in due punti A e B, molto lontani l'uno dall'altro. Affermo che i due colpi di fulmine hanno avuto luogo simultaneamente. Ove ponessi al lettore la domanda se tale mia affermazione è sensata, la risposta sarebbe un reciso "sì". Se ora però gli chiedessi di spiegarini in maniera più precisa il senso di quell' affermazione, egli, dopo un po' di riflessione, troverebbe che la risposta a tale domanda non è così facile come sembra a prima vista. […]Ci imbattiamo nella stessa difficoltà in tutti gli enunciati fisici ove entra in gioco il concetto di "simultaneità". Questo concetto non esiste per il fisico fino a quando egli non ha la possibilità di scoprire nel caso concreto se esso risulti fondato oppure no. Abbiamo perciò bisogno di una definizione di simultaneità capace di fornirci il metodo per mezzo del quale decidere sperimentalmente, nel caso attuale, se entrambi i colpi di fulmine hanno avuto luogo simultaneamente o no. [...] Dopo una certa riflessione, il lettore farà la seguente proposta, per verificare la simultaneità. Con una misurazione effettuata lungo le rotaie, verrà calcolato l'intervallo che collega i punti A e B, e verrà messo un osservatore nel punto di mezzo M dell'intervallo AB. Quest'osservatore verrà fornito di un dispositivo (per esempio due specchi inclinati a 90 gradi) che gli permetta di osservare visualmente i due punti A e B contemporaneamente. Se l'osservatore percepisce i due bagliori del fulmine nel medesimo istante, essi saranno allora simultanei […].
Supponiamo che un treno molto lungo viaggi sulle rotaie con la velocità costante *v* e nella direzione indicata dalla figura 1. Le persone che viaggiano su questo treno useranno vantaggiosamente il treno come corpo rigido di riferimento (sistema di coordinate); esse considerano tutti gli eventi in riferimento al treno. Ogni evento, poi, che ha luogo lungo la linea ferroviaria ha pure luogo in un determinato punto del treno. Anche la definizione di simultaneità può venir data rispetto al treno nello stesso preciso modo in cui venne data rispetto alla banchina. Ora però si presenta, come conseguenza naturale, la seguente domanda: due eventi (per esempio i due colpi di fulmine A e B che sono simultanei rispetto alla banchina ferroviaria saranno tali anche rispetto al treno? […]Allorché diciamo che i colpi di fulmine A e B sono simultanei rispetto alla banchina intendiamo: i raggi di luce provenienti dai punti A e B dove cade il fulmine si incontrano l'uno con l'altro nel punto medio M dell'intervallo AB della banchina. Ma gli eventi A e B corrispondono anche alle posizioni A e B sul treno. Sia M' il punto medio dell'intervallo AB sul treno in moto. Proprio quando si verificano i bagliori del fulmine, questo punto M' coincide naturalmente con il punto M, ma esso si muove verso la destra del disegno con la velocità *v* del treno. Se un osservatore seduto in treno nella posizione M' non possedesse questa velocità, allora egli rimarrebbe permanentemente in M e i raggi di luce emessi dai bagliori del fulmine in A e B lo raggiungerebbero simultaneamente, vale a dire si incontrerebbero proprio dove egli è situato. Tuttavia nella realtà (considerata; con riferimento alla banchina ferroviaria),

FIG 1


egli si muove rapidamente verso il raggio di luce che proviene da B, mentre corre avanti al raggio di luce che proviene da A. Pertanto l'osservatore vedrà il raggio di luce emesso da B prima di vedere quello emesso da A. Gli osservatori che assumono il treno come loro punto di riferimento debbono perciò giungere alla conclusione che il lampo di luce B ha avuto luogo prima del lampo di luce A. Perveniamo così al seguente importante risultato: gli eventi che sono simultanei rispetto alla banchina non sono simultanei rispetto al treno e viceversa (relatività della simultaneità); ogni corpo di riferimento (sistema di coordinate) ha il suo proprio tempo particolare: un'attribuzione di tempo è fornita di significato solo quando ci venga detto a quale corpo di riferimento tale attribuzione si riferisce.

[A. Einstein, *Relatività: esposizione divulgativa* (1917), tr. it. in A. Einstein, *Opere scelte*, Boringhieri, Torino 1988.]

## LA TEORIA RELATIVISTICA DELLA GRAVITAZIONE

La teoria della relatività di Einstein può considerarsi una geniale estensione delle tesi di Galileo riguardanti alcuni esperimenti di meccanica eseguiti all'interno della cabina di una nave che navighi dolcemente. L'estensione di quella teoria al caso di un moto non uniforme, spesso indicata col nome di "teoria generale della relatività", ma meglio descritta col nome di "teoria relativistica della gravitazione", trae le sue origini dall'esperimento eseguito da Galileo, nel corso del quale un corpo pesante e uno leggero furono lasciati cadere dalla cima della torre pendente di Pisa. Il fatto empirico che i corpi pesanti e quelli leggeri cadessero con la stessa accelerazione restò per molti anni misterioso, finché, nel 1914, fu pubblicato l'articolo di Einstein sulla relazione esistente tra i moti accelerati e la forza di gravità.

In quell'articolo Einstein descrisse una serie di esperimenti ideali da eseguirsi all'interno di una cabina abbandonata nello spazio interstellare: a causa dell'assenza di gravità nessun oggetto all'interno della cabina avrà la minima tendenza a muoversi in una qualsiasi direzione; se però la cabina viene accelerata da due razzi di coda la situazione all'interno di essa sarà un po' diversa: tutti gli oggetti verranno compressi sul fondo come se esistesse una forza di gravità che li trascini verso il basso. Consideriamo un uomo che si trovi sul fondo di un siffatto laboratorio spaziale mobile con accelerazione costante $a$ e che tenga in mano due sfere, una leggera e una pesante; a causa dell'accelerazione cui tutto il sistema è sottoposto, il piede dell'uomo è saldamente tenuto a contatto del fondo del laboratorio e le sfere si manterranno fortemente aderenti alle palme delle sue mani. Che cosa accadrà se egli lascia cadere le due sfere contemporaneamente? Essendo staccate dal corpo del razzo, esse si muoveranno con la stessa velocità che avevano al momento in cui sono state lasciate cadere; d'altra parte, essendo il moto del razzo accelerato, esso acquisterà una velocità sempre crescente e il pavimento della cabina finirà col raggiungere presto le due sfere colpendole contemporaneamente: da quell'istante in poi tutte le due sfere resteranno schiacciate sul fondo, essendo accelerate con tutto il sistema. L'osservatore posto all'interno della cabina vedrà invece cadere le due sfere con la stessa accelerazione e le vedrà giungere sul pavimento della cabina nello stesso istante. Questa è l'equivalenza tra la gravità e l'accelerazione, concetto ormai familiare nell'epoca spaziale in cui viviamo.

Ma questa analogia tra i fenomeni meccanici che si registrano all'interno di una nave spaziale accelerata e nel campo gravitazionale prodotto dall'enorme massa della Terra è puramente casuale o ha una più profonda connessione con la natura delle forze gravitazionali? Einstein era sicuro che si trattasse piuttosto della seconda ipotesi e si domandò come si sarebbe comportato un raggio di luce entro una cabina accelerata. Supponiamo che un riflettore sia appeso alla parete della cabina e invii un fascio di luce attraverso il locale. Per osservare il passaggio del fascio disponiamo sul percorso un gran numero di lastra di vetro fluorescente tra di loro equidistanti. Se la cabina non è accelerata i punti nei quali il fascio di luce attraverserà le lastre di vetro saranno allineati e sarà pressoché impossibile stabilire se il razzo sia fermo oppure si stia muovendo rispetto alle stelle fisse. La situazione sarà invece molto diversa nel caso in cui la cabina si muova con accelerazione uniforme $a$. Il tempo necessario perché la luce raggiunga la prima, la seconda, la terza… lastra di vetro aumenterà infatti in progressione geometrica 1,4, 9,… Le tracce che il fascio di luce lascerà dunque sulle lastre fluorescenti formeranno una parabola, cioè la stessa linea che è la traiettoria di un sasso lanciato orizzontalmente.

Se l'equivalenza tra l'accelerazione e la gravità si estende ai fenomeni elettromagnetici i raggi luminosi devono dunque venire deviati dal campo gravitazionale. Purtroppo, a causa della elevata velocità della luce, la deviazione del campo gravitazionale terrestre di un raggio luminoso è troppo piccola per essere osservata: infatti un fascio di luce che percorresse 30m prima di cadere sullo schermo fluorescente impiegherebbe $(3x10^3)/(3x10^{10}) = 10^{-7}$ s coprire tale distanza. Essendo l'accelerazione di gravità sulla superficie terrestre circa 1000 cm /$s^2$, lo spostamento verticale del fascio di luce sarebbe:

$1/2x1000x(10^{-7})^2 = 5x10^{-12}$ cm, cioè dell'ordine di grandezza del diametro di un nucleo atomico!

Secondo Einstein ci si deve aspettare una deflessione notevole dei raggi luminosi in prossimità della superficie solare. Diamo qui sotto un breve calcolo della deflessione prevista: l'accelerazione di gravità vicino alla superficie del Sole è il prodotto della costante di gravitazione ($6,7x10^{-8}$) e della massa del Sole ($2x10^{33}$cm) diviso per il quadrato del raggio del Sole ($7x10^{10}$ cm) cioè:

$$\frac{6,7 \times 10^{-8} \times 2 \times 10^{33}}{49 \times 10^{20}} \simeq 3 \times 10^4 \text{ cm/ s}^2.$$

La distanza percorsa nel campo gravitazionale solare dal raggio luminoso è circa uguale al diametro del Sole ($1{,}4 \times 10^{11}$ cm) e il tempo impiegato a percorrerla è

$$\frac{1{,}4 \times 10^{11}}{3 \times 10^{10}} \sim 3{,}5 \times 10^{5}$$

s e durante questo tempo il fascio di luce cadrà di $\frac{1}{2} \times 3 \times 10^{4} \times 25 \sim 3{,}5 \times 10^{5}$ cm,

mentre l'angolo di deflessione sarà:

$$\frac{3{,}5 \times 10^{5}}{7 \times 10^{10}} \simeq 5 \times 10^{-6} \text{ radianti,}$$

cioè dell'ordine di 1 secondo angolare.

Calcoli più precisi per la deflessione del fascio di luce radente il disco solare danno il valore 1,75 secondi angolari. Poiché le stelle vicine al Sole possono essere osservate solo durante un'eclissi totale di Sole, una spedizione astronomica inglese si recò nel 1919 in Africa, in una striscia di terra dove l'eclisse aveva luogo totalmente (gli astronomi tedeschi non poterono recarvisi per motivi bellici). I risultati confermarono pienamente le previsioni di Einstein e, quando gli vennero comunicati, egli sorridendo disse che sarebbe rimasto molto sorpreso se i risultati fossero stati negativi. Questa e altre conferme sperimentali fecero cadere qualsiasi dubbio sull'esistenza della correlazione tra i fenomeni che hanno luogo nei campi gravitazionali e nei sistemi accelerati, prevista dalla teoria di Einstein.

## LA GRAVITAZIONE E LA CURVATURA DELLO SPAZIO

La nozione di linea o superficie curva è familiare a tutti, ma è necessaria una certa fantasia per comprendere invece il significato di spazio curvo a tre dimensioni. La difficoltà nel concepire uno spazio curvo risiede principalmente nel fatto che, mentre noi possiamo guardare una superficie dall'esterno e dire se è piatta o curva con una certa facilità, non ci è altrettanto facile uscire dallo spazio per osservarne l'eventuale curvatura. Il modo migliore per discutere la proprietà dello spazio curvo è di rifarci ad un'analogia con esseri immaginari a due dimensioni che vivono su una superficie e ignorano l'esistenza di una direzione perpendicolare a quella superficiale. Come potrebbero essi dire se la superficie sulla quale vivono è piana, sferica o di qualsiasi altra forma, senza uscirne? La risposta è, all'ingrosso, che potrebbero studiarsi un po' di geometria sulla loro superficie, disegnando varie figure, misurando angoli, ecc. Nella figura 1 è rappresentato un triangolo disegnato rispettivamente su un piano, su una sfera e su una superficie a sella.

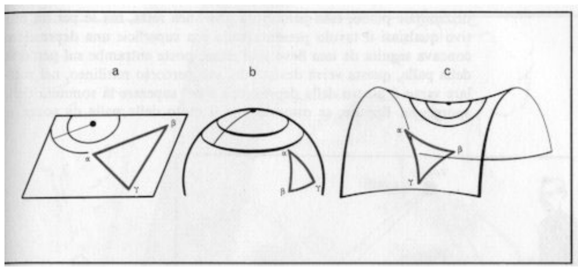

Fig.1

Se la superficie è piana (a) le regole della geometria piana euclidea andranno bene e risulterà che la somma dei tre angoli del triangolo è di 180°. Su una superficie sferica (b) tale somma risulterà sempre maggiore di 180°, come si può facilmente verificare disegnando su un globo il triangolo dato da due semi-meridiani e dal tratto di equatore tra essi compreso; infatti, poiché i meridiani intersecano l'equatore sotto un angolo retto, la somma dei due soli angoli alla base del nostro triangolo sferico è già uguale a 180° e a questa somma si dovrebbe ancora aggiungere l'angolo al polo, che potrebbe risultare molto grande. Per triangoli sferici più piccoli la somma dei tre angoli si approssima sempre più a 180° e diventerà praticamente uguale a 180° quando il triangolo è infinitamente piccolo in confronto alla superficie della sfera sulla quale è disegnato. Sulla superficie a sella (*c*) la situazione è ancora diversa e la somma dei tre angoli è sempre minore di 180°. Si suole attribuire ad una superficie sferica una curvatura positiva e ad una superficie a sella una curvatura negativa. Possiamo ora estendere queste considerazioni allo spazio a tre dimensioni e dire che tale spazio è piano o che possiede una curvatura positiva o negativa, secondo che la somma degli angoli dei triangoli aventi per vertici tre qualsiasi punti di tale spazio sia uguale, maggiore o minore di 180°.

Analizziamo ora un esperimento di triangolazione su vasta scala concepito press'a poco così: tre astronomi muntiti di teodoliti si sistemano uno sulla Terra, uno su Venere e uno su Marte e misurano glia angoli del triangolo TVM. Poiché, come si è detto nel paragrafo precedente, i raggi luminosi sono deflessi dal campo gravitazionale del Sole (e sono curvati *verso* il centro di tale campo) i tre raggi che formano il triangolo appariranno come nella fig. 2 e la somma dei tre angoli sarà *maggiore* di 180°: gli astronomi potranno dunque affermare che lo spazio attorno al Sole ha una curvatura positiva. Ripetendo le stesse misure per il triangolo avente per vertici i pianeti Giove, Saturno e Urano, posti a maggior distanza dal Sole dei precedenti tre pianeti, la deflessione dei raggi luminosi per effetto del campo gravitazionale del Sole sarà molto minore e la somma degli angoli del triangolo sarà molto prossima a 180°, indicando che la curvatura dello spazio attorno al Sole decresce man mano che ci si allontana da esso. Qualcuno potrebbe obiettare che la suddetta interpretazione di tale misura non è molto convincente poiché gli astronomi non hanno misurato un triangolo regolare, non essendo i suoi lati delle linee rette. Ma che cosa è una linea retta?

La definizione più ragionevole di essa è "la linea di vista", ma la linea di vista *è* la linea secondo la quale la luce si propaga nel vuoto! La linea retta si potrebbe anche definire come la "minima distanza tra due punti", ma tutta l'ottica è basata proprio sul postulato che la luce nella sua propagazione segue il più breve cammino possibile. Se si medita dunque seriamente su questo concetto si vede che non esiste nessun altro modo razionale per definire una linea retta; le linee curve della fig. 2 devono quindi considerarsi rette, mentre le linee rette sottili non hanno il minimo significato fisico. Per evitare una facile confusione di terminologia, il termine "linea retta" viene oggi usato solo per indicare le distanze minime tra due punti in questioni di geometria piana, mentre su superfici che nello spazio curvi si parla di "linee geodetiche". Così, sulla superficie di una sfera gli equivalenti delle linee rette sono archi di cerchio massimo e li useremo per disegnare i triangoli sferici; notiamo che, nella geometria sferica, il vecchio principio della geometria euclidea secondo il quale «2 rette parallele non si incontrano mai» non vale più, poiché *qualsiasi* coppia di cerchi massimi in una sfera si interseca in 2 punti e 2 aerei che decollano in 2 punti dall'equatore in direzione perpendicolare ad esso e si dirigono al polo si incontreranno quando giungeranno al polo.

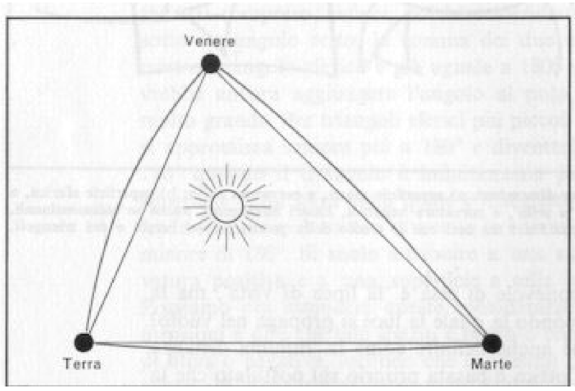

Fig.2

L'equivalenza tra il campo gravitazionale e la curvatura dello spazio può essere ulteriormente chiarita dal seguente esempio a due dimensioni. Se facciamo roteare una palla da biliardo su un tavolo orizzontale piano, essa percorrerà una linea retta, ma se per un motivo qualsiasi il tavolo presenta sulla superficie una depressione concava seguita da una lieve sporgenza, poste entrambe sul percorso della palla, questa verrà deviata dal suo percorso rettilineo, nel rotolare verso il centro della depressione e nel superare la sommità della sporgenza. Eppure, se osservassimo il moto della palla da sopra al tavolo (per esempio da un buco nel soffitto) non ci accorgeremo del difetto del piano del tavolo e penseremmo piuttosto all'esistenza di una forza che attira o respinge la palla, localizzata in un punto della superficie del tavolo. Allo stesso modo la deflessione dei raggi luminosi e dei corpi in movimento in prossimità del Sole può essere interpretata o come l'effetto di una forza agente su di essi o come il risultato della curvatura dello spazio in prossimità di enormi masse.

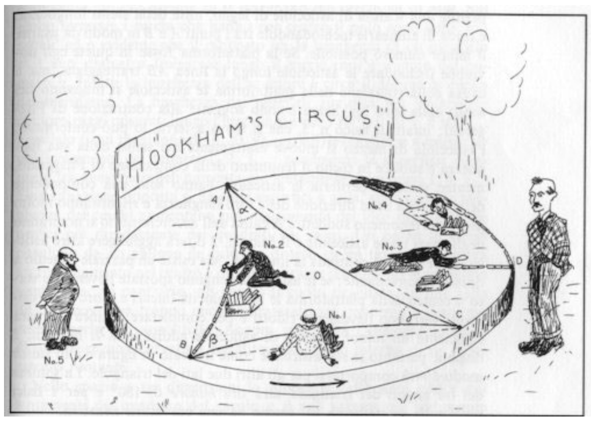

Fig.3

Affrontiamo ora lo stesso problema da un altro punto di vista e consideriamo i fenomeni fisici come appaiono ad un osservatore in moto su una grande piattaforma ruotante (fig.3). Questo esperimento ideale è molto simile a quello della cabina spaziale di Einstein, descritto nel paragrafo precedente, con la differenza che in questo caso, anziché una accelerazione lineare (variazione del valore numerico della velocità senza cambio di direzione) ci troviamo di fronte ad una accelerazione tangenziale (cambio di direzione della velocità senza variazione del valore numerico). Copriamo la piattaforma con una cupola emisferica solidale con essa allo scopo di togliere alle persone all'interno la visione degli alberi e delle altre cose attorno. Come è ben noto, colui che si trova su una piattaforma ruotante subirà l'azione di una forza centrifuga che tende ad allontanarlo dal centro e interpreterà questo effetto come una particolare forza di gravità repulsiva anziché attrattiva. L'analogia con la forza di gravità è sostenuta dal fatto che, se uno degli uomini della piattaforma, fissandosi saldamente ad essa, appoggia due sfere, una pesante e una leggera, sulla stessa, le vedrà rotolare affiancate allo stesso modo in cui aveva visto cadere due oggetti di diverso peso da una torre.

Poiché gli uomini sulla piattaforma sono dei fisici e quindi conoscono perfettamente tutti gli argomenti discussi finora, possono tentare di collegare questo campo pseudogravitazionale con la geometria dello spazio e tentare di effettuare qualche misura geometrica. Dapprima essi possono costruire un triangolo di vertici A, B, C e misurarne la somma degli angoli. Secondo la definizione di linea retta come la minima distanza tra due punti il fisico n.2 (il fisico n.1 è la mente del gruppo e funge da supervisore) prende una scatola di asticciole di legno, tutte della stessa lunghezza, e cerca di allinearle inchiodandole tra i punti A e B in modo da usarne il minor numero possibile. Se la piattaforma fosse in quiete egli dovrebbe inchiodare le asticciole lungo la linea AB tratteggiata, ma a causa della rotazione della piattaforma le asticciole si muovono nel senso della loro lunghezza e sono soggette alla contrazione di Fitzgerald; infatti, il fisico n., che si trova a terra lo può confermare: l'asticciola di mezzo si muove esattamente nel senso della sua lunghezza e subisce in pieno il fenomeno della contrazione di Fitzgerald, mentre verso la periferia le asticciole hanno solo una componente della velocità nella direzione della loro lunghezza e risentiranno molto meno del fenomeno suddetto. A causa dell'accorciamento si noteranno degli spazi tra le asticciole e il fisico n.2 dovrà aggiungere altre asticciole per rendere continua la linea AB. Ma esiste un parziale rimedio a questo inconveniente: se le asticciole vengono spostate lievemente verso il centro della piattaforma le loro velocità lineari e i loro accorciamenti verranno lievemente ridotti e per completare la linea AB sarà sufficiente un minor numero di asticelle addizionali. Il fisico n. 2 dispone pertanto le sue asticciole come indicato in figura e allo stesso modo dovrà comportarsi per gli altri due lati del triangolo. La somma degli angoli del triangolo sarà ora *minore* di 180° e per i fisici posti sulla piattaforma lo spazio ha una curvatura negativa.

Se ora gli stessi fisici volessero confermare quanto hanno scoperto con metodi ottici, perverrebbero allo stesso risultato. Infatti, essendo il campo delle forze centrifughe simile in tutti gli aspetti ad un campo gravitazionale repulsivo, i raggi luminosi che congiungono i tre vertici A, B, C saranno deflessi *lontano* dalla piattaforma e seguiranno proprio il percorso indicato dalle asticciole di legno.

Sulla stessa piattaforma vi sono anche il fisico n.3 e il fisico n.4 che cercano di misurare quel rapporto tra la circonferenza e il diametro che nella geometria piana è indicato con la lettera π dell'alfabeto greco; ma anche in questo caso la rotazione della piattaforma provocherà un guaio: infatti, mentre il fisico n.3 può disporre tranquillamente le sue asticciole, in quanto esse si muovono perpendicolarmente alla loro lunghezza e diverranno quindi più sottili, ma non più corte, le asticciole del fisico n. 4 saranno sottoposte alla massima contrazione di Fitzgerald ed egli sarà costretto a usarne un gran numero per misurare la circonferenza della piattaforma. Il rapporto tra la circonferenza e il diametro della piattaforma risulterà quindi molto maggiore del numero 3,141592… usato nella geometria piana, risultato che riconferma la curvatura negativa dello spazio.

Ritorniamo ora per un istante alle superfici curve a due dimensioni e vediamo ciò che accade se si disegnano dei cerchi su di esse. Sul globo terrestre i cerchi che hanno per centro il polo sono detti "paralleli" ed è evidente che il rapporto tra la lunghezza di un parallelo ed il suo diametro ( misurato lungo il meridiano) è minore del numero π . Infatti la lunghezza dell'equatore è circa il doppio di quella del meridiano. La lunghezza dei paralleli aumenta più lentamente dei loro raggi misurati lungo i meridiani e per l'80mo, il 70mo, il 60mo, … parallelo ( i cui raggi sono di 10, 20, 30, …, gradi) le lunghezze aumentano più lentamente dei numeri 1, 2, 3, …; similmente la superficie compresa tra questi paralleli aumenta più lentamente dei numeri 1, 4, 9, … Una situazione opposta si ha sulle superfici a sella, sulle quali le lunghezze dei cerchi aumentano più *rapidamente* dei loro raggi e le superfici più rapidamente dei quadrati dei raggi. Un pezzo di cuoio ritagliato da un pallone da calcio e disteso su un tavolo presenterà un rigonfiamento nel centro e dovremo tirarne il contorno se vogliamo appiattirlo. Al contrario, un pezzo di cuoio ritagliato da una sella da cow-boy avrà troppo cuoio ammassato sul contorno e dovremo comprimerlo per appiattirlo. Ancora una volta l'analogia consente di attribuire una curvatura negativa allo spazio interno di un laboratorio ruotante.

Nello spazio a tre dimensioni la superficie della sfera cresce più lentamente del quadrato del raggio e il suo volume più lentamente del cubo del raggio nel caso di curvatura positiva, mentre si verifica esattamente l'opposto se la curvatura è negativa. Questi risultati matematici hanno fornito la base per un'interessante ricerca nel campo dell'astronomia iniziata un certo numero di anni fa da Edwin Hubble dell'Osservatorio di Monte Wilson. Hubble, esperto di galassie stellari, sparse a miliardi nello spazio entro il campo visivo dei telescopi giganti, decise di controllare se il numero delle galassie stellari entro un certo numero di distanze dalla Terra aumentava in proporzione diretta oppure più lentamente o più rapidamente dei cubi delle distanze. Nel primo caso si sarebbe dovuto concludere che lo spazio dell'universo è euclideo; nel secondo lo spazio avrebbe dovuto avere una curvatura positiva ed essere chiuso su sé stesso; infine, nell'ipotesi che si fosse verificato il terzo caso, lo spazio avrebbe dovuto possedere una curvatura negativa ed essere infinitamente esteso in tutte le direzioni. Sfortunatamente la tecnica di osservazione usata per misurare le distanze intergalattiche non era a quel tempo sufficientemente progredita e i risultati ottenuti da Hubble furono contraddittori e inconcludenti. Si spera che la ripetizione dei conteggi galattici di Hubble effettuata con mezzi di osservazione più adeguati possa dare una risposta a questo importantissimo problema cosmologico

Sulla base delle precedenti considerazioni Einstein formulò una teoria secondo la quale tutte le interazioni gravitazionali potrebbero essere interpretate come il risultato della curvatura dello spazio. Einstein ebbe la fortuna di disporre di una teoria degli spazi curvi a qualsiasi numero di dimensioni già completamente elaborata molti decenni prima del matematico tedesco Bernhard Riemann, così non ebbe che da applicare le formule matematiche già pronte alla realtà fisica dello spazio curvo. Si trattava naturalmente di uno spazio a quattro dimensioni, di coordinate *x, y, z* e *ict.* Correlando il cosiddetto "tensore di curvatura" del continuo spazio- tempo con la distribuzione dei movimenti e delle masse Einstein ricavò come prima approssimazione i risultati della teoria gravitazionale di Newton.

Un'analisi più attenta dimostrò tuttavia l'esistenza di qualche piccola discrepanza con la teoria originale di Newton sulla gravità e queste piccole diversità dovrebbero dimostrare la superiorità delle vedute di Albert su quelle di Isaac. Una delle conseguenze della teoria della gravitazione di Einstein, la deviazione dei raggi luminosi in un campo gravitazionale, è stata già discussa. Un altro importante punto riguarda il moto dei pianeti attorno al Sole. Newton aveva dimostrato che, secondo la sua legge di gravità, i pianeti devono percorrere orbite ellittiche attorno al Sole, in pieno accordo con le leggi empiriche scoperte da Keplero. Nella teoria di Einstein tutti i movimenti vanno studiati in uno spazio quadridimensionale ( *x, y, z* e *ict*) che, se sono presenti campi gravitazionali, è uno spazio curvo. Le linee che rappresentano la "storia del movimento" di un corpo materiale qualsiasi nel mondo a quattro dimensioni, note col nome di "linee universali" di quel corpo, devono essere le *geodetiche*, cioè le più brevi, e possono essere calcolate sulla base della teoria relativistica del campo gravitazionale.

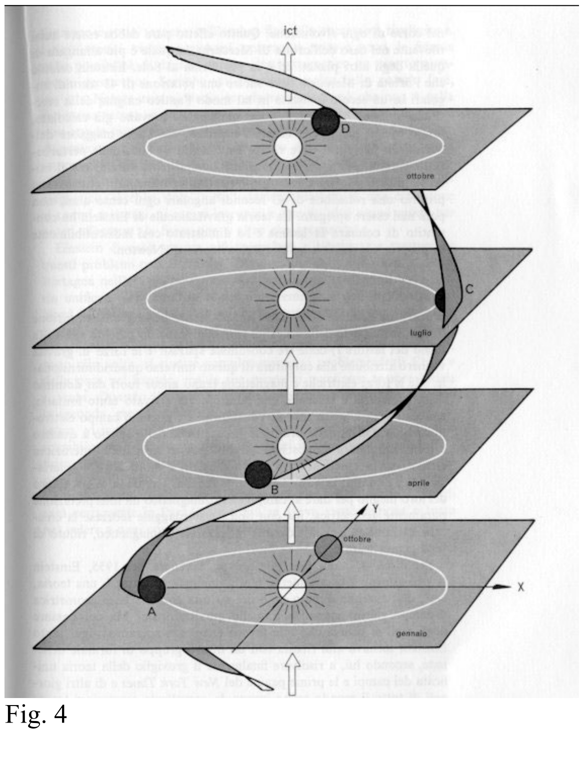

Fig. 4

Nella fig. 4 sono rappresentate graficamente le linee universali della Terra nel suo moto attorno al Sole: le due coordinate spaziali *x* e *y* sono assunte nel piano dell'eclittica, mentre la terza è la coordinata temporale *ict.* Il continuo spazio-tempo nelle vicinanze del Sole è curvato e la linea universale della Terra corrisponde alla linea che ha le stesse proprietà della retta (cioè la geodetica) nello spazio curvo. Così la linea *ABCD* rappresenta la minima distanza tra due punti (venti) A e D nel continuo spazio-tempo a tre dimensioni e la sua proiezione sul piano (x, y) è l'orbita della Terra attorno al Sole.

Un esame rigoroso ha però rivelato che questa ellisse non resta stazionaria nello spazio, come vorrebbe la teoria di Newton, ma ruota lentamente spostando il suo asse maggiore di un piccolissimo angolo nel corso di ogni rivoluzione. Questo effetto pare debba essere assai rilevante nel caso dell'orbita di Mercurio, la quale è più allungata di quella degli altri pianeti ed è la più vicina al Sole. Einstein calcolò che l'orbita di Mercurio deve subire una rotazione di 43 secondi angolari in un secolo e risolse in tal modo l'antico enigma della meccanica celeste. Alcuni astronomi matematici avevano già calcolato, molto tempo prima che Einstein nascesse, che l'asse maggiore dell'orbita di Mercurio deve roteare lentamente a causa delle perturbazioni gravitazionali degli altri pianeti del sistema solare, ma il notevole disaccordo tra i calcoli e i risultati sperimentali, che davano proprio una rotazione di 43 secondi angolari ogni cento anni, non poté mai essere spiegato. La teoria gravitazionale di Einstein ha consentito di colmare la lacuna e ha dimostrato così indiscutibilmente la propria supremazia sulla vecchia teoria di Newton.