La candela

Ricordate? Erano sei anni fa: Ministro dell'Istruzione (non più pubblica) era Letizia Moratti. Uscirono le "indicazioni nazionali" per la scuola primaria e secondaria di primo grado, e ci furono grandi proteste per l'assenza dell'evoluzione dai programmi di scienze. Lettere a giornali, interviste, la nomina di una Commissione per rivedere il problema... Non sto a ripetervi tutta la storia, che ho già trattata in una puntata nel n. 2/2004 di questa rivista. Richiamo solo che il prof. Bertagna ebbe a dichiarare, in un'intervista:

[...]*Per i primi otto anni è necessario riflettere sull'esperienza, perché la scienza non è immaginazione, ma verifica delle teorie. E solo dopo i primi otto anni è possibile affrontare in modo adeguato le teorie sull'evoluzione della specie umana, solo allora i giovani sono in grado di apprendere con una complessità e comparazione diverse.* [...]"

Bene. Ora sono apparse le indicazioni nazionali per la scuola secondaria di secondo grado. Ministro, come tutti sappiamo, è Maria Stella Gelmini; non so chi abbia preso il posto di Bertagna, ma mi sono preso la briga di andare a controllare se quelle dichiarazioni programmatiche fossero state attuate, riviste, o che altro. Risultato: zero. L'evoluzione è totalmente assente dall'insegnamento scientifico nella scuola che risulterà dalla riforma "epocale."

O meglio, per essere assolutamente precisi, ecco tutto quello che c'è. Negli "obiettivi specifici" *del primo biennio* del Liceo Scientifico si legge: "La varietà dei viventi e la complessità delle loro strutture e funzioni introducono allo studio dell'evoluzione e della sistematica, della genetica mendeliana e dei rapporti organismi-ambiente, nella prospettiva della valorizzazione e del mantenimento della biodiversità." Dopo questo minestrone, più niente: l'evoluzione esce di scena.

La cosa non mi meraviglia affatto; se ne parlo è solo per farvi notare che — a differenza di sei anni fa — stavolta non c'è stata la più piccola reazione. Distrazione? indifferenza? rassegnazione? Scegliete voi... Secondo me è un segno del generale decadimento culturale e politico del Paese.

* * *

Dopo questa premessa, che mi sembrava ineludibile, torniamo a "più spirabil aere," riprendendo il discorso sulla relatività, ristretta e generale, che avevo iniziato la volta scorsa.

La periodicità di questa rivista mi rende impossibile sperare che chi legge abbia sulla punta delle dita ciò che ho scritto la volta passata; ma d'altra parte un tentativo di riassunto mi ruberebbe spazio prezioso, e quindi debbo fidare sulla vostra buona volontà: prima di continuare, andate a rileggere la puntata precedente. Alla fine della puntata scrivevo che per completare la descrizione della relatività ristretta manca ancora un'altra idea di Minkowski: quella di una "metrica" dello spazio-tempo. Vediamo di che si tratta.

Il concetto di metrica esiste già nella geometria euclidea dello spazio ordinario: si tratta semplicemente del fatto che per ogni coppia di punti è definita una grandezza *distanza*, con ben precise proprietà matematiche, la più significativa delle quali è la cosiddetta "disuguaglianza triangolare." È quella che si può enunciare dicendo che *in ogni triangolo un lato è sempre minore della somma degli altri due*. Per quanto possa sembrare ovvia, è una proprietà da sottolineare perché nel caso dello spazio-tempo verrà modificata in modo importante.

Sulla distanza aggiungo ancora che una delle prime cose che s'imparano studiando geometria analitica è proprio la formula della distanza tra due punti nel piano cartesiano:

$$s^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \tag{1}$$

dove (x_1, y_1) e (x_2, y_2) sono le coordinate cartesiane dei due punti. Questa formula, che discende dal teorema di Pitagora, definisce appunto la *metrica* nel piano euclideo in termini delle coordinate cartesiane. Anche se non si studia nella scuola secondaria, esiste una formula analoga per lo spazio tridimensionale:

$$s^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2. \tag{2}$$

Ora le coordinate dei due punti sono (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2).

Un'ultima osservazione: si dice comunemente che la distanza euclidea tra due punti è *invariante*. Con ciò s'intendono due cose:

– La distanza è una proprietà *intrinseca* del piano (o dello spazio): essa è definita e ha un preciso valore *a prescindere* dall'aver definito delle coordinate. Del resto, la distanza era nota a Euclide, 2000 anni prima di Cartesio...
– Se si cambia sistema di coordinate, spostando l'origine e anche ruotando gli assi, le formule scritte sopra rimangono valide in ogni caso, e forniscono lo stesso valore per la distanza.

Questa proprietà d'invarianza è per noi importante, perché tra un momento la ritroveremo nello spazio-tempo, dove assume un significato ben più profondo.

Posso ora enunciare la scoperta di Minkowski: egli s'accorge che tutta l'essenza della relatività (ristretta) si può riassumere nell'asserzione che lo spazio-tempo è dotato di una metrica, la cui espressione in termini delle coordinate (x, y, z, t) è

$$S = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 - c^2(t_1 - t_2)^2. \tag{3}$$

(In realtà questa non è la formula come la scrive Minkowski: è un'espressione equivalente ormai in uso universale da almeno mezzo secolo.) Spieghiamo meglio: stiamo supponendo di avere due eventi, E_1 ed E_2, che in un dato riferimento inerziale abbiano rispettivamente le coordinate (x_1, y_1, z_1, t_1) e (x_2, y_2, z_2, t_2).

Come si vede, la formula (3) somiglia a quella (2) della distanza euclidea, ma è più complicata e presenta anche delle differenze. È più complicata prima di tutto perché lo spazio-tempo ha 4 coordinate contro le tre dello spazio euclideo. Ma sono più interessanti le differenze, la prima delle quali sta nella comparsa del coefficiente c^2.

Un fisico dirà subito che quel coefficiente c'era da aspettarselo, visto che x, y, z sono *lunghezze* mentre t è un *tempo*: c^2 è necessario per mettere a posto le *dimensioni*, ossia per far sì che l'ultimo termine sia omogeneo agli altri. Possiamo anche vedere la cosa in un altro modo: la relatività realizza un'integrazione tra spazio e tempo, che non sono più assoluti e del tutto distinti l'uno dall'altro. Sfortunatamente la fisica si è venuta costruendo sulle basi newtoniane, con spazio e tempo assoluti e distinti, e quindi per le due grandezze si sono affermate unità di misura indipendenti: nel SI sono il metro e il secondo. Allo spazio-tempo della relatività si addicono meglio unità comuni, che tengano conto del carattere speciale della velocità della luce: si potrebbe ad es. adottare come unità di lunghezza il secondo-luce al posto del metro, ossia lo spazio (circa 300 000 km) che la luce percorre in un secondo; oppure adottare come unità di tempo quello che occorre alla luce per percorrere un metro (non conosco un nome per questa unità, che varrebbe circa 3.3 ns).

La seconda differenza sta nell'innocente segno meno che compare davanti all'ultimo termine della (3). Ci sono due cose da chiedersi:

a) perché c'è il segno meno?

b) che conseguenze ha?

La risposta alla prima domanda si ottiene andando a vedere se e quando accade che $S = 0$. Tenendo presente l'espressione (2) della distanza euclidea, si vede che $S = 0$ significa $s = c\,|t_2 - t_1|$, la cui interpretazione è immediata: ci dice che s è lo spazio percorso dalla luce nell'intervallo di tempo fra i due eventi. In altre parole, un impulso luminoso emesso all'evento E_1 viene ricevuto all'evento E_2. Perciò richiedere che l'espressione S rappresenti la metrica invariante equivale a postulare l'invarianza della velocità della luce.

Rispondere alla seconda domanda ci ruberebbe troppo spazio, e mi debbo limitare a pochissime considerazioni. La prima è che l'espressione della metrica può essere positiva, nulla o negativa, a seconda degli eventi scelti. Sul fatto che possa essere nulla abbiamo già detto; sarà positiva per es. se i due eventi sono *simultanei*, ossia se $t_1 = t_2$. Infine potrà essere negativa, e questo accade di certo se i due eventi avvengono nello stesso punto dello spazio ma a tempi diversi: infatti allora i primi tre termini si annullano perché $x_1 = x_2$, $y_1 = y_2$, $z_1 = z_2$, e rimane solo l'ultimo che è negativo. È per questa proprietà di poter avere segni diversi, che l'espressione della metrica non può essere direttamente interpretata come "quadrato di una distanza," ed è per questo che l'ho indicata con S e non con s^2.

Ma vediamo invece da un esempio che cosa segue dal postulare che la metrica sia *invariante*. Riprendiamo l'esempio della bottiglia della volta scorsa. Nel riferimento (inerziale) del treno, posso scegliere le coordinate in modo che l'apertura della bottiglia (evento A) abbia coordinate tutte nulle; allora l'evento B (chiusura della bottiglia) avrà ancora nulle le coordinate spaziali, ma il suo tempo t_2 non sarà nullo: $t_2 = 20\,\mathrm{s}$.

Nel riferimento della stazione, posso ancora scegliere coordinate tali che esse siano tutte nulle per l'evento A, ma per B non sarà diverso da zero soltanto il tempo, che indico con t'_2: anche una coordinata spaziale (almeno) sarà diversa da 0, visto che il treno cammina. Se prendo l'asse x in direzione del moto del treno, sarà $x'_2 = v\,t'_2$, con $v = 30\,\mathrm{m/s}$. Calcoliamo ora S nei due riferimenti:

a) nel rif. del treno $S = -c^2 t_2^2$

b) nel rif. della stazione $S = v^2 (t'_2)^2 - c^2 (t'_2)^2$.

Se S deve essere invariante, uguagliando le due espressioni posso ricavare t'_2:

$$t'_2 = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}\, t_2.$$

Si vede subito che $t'_2 > t_2$, e mettendo i numeri si ottiene il valore che avevo scritto la volta scorsa: $t'_2 = 20.0000000000001\,\mathrm{s}$.

Perché vi ho afflitto con questi calcoli? Volevo mostrare che davvero l'espressione della metrica e il suo carattere invariante permettono di ricavare i fatti importanti della relatività: in particolare il carattere *non assoluto* del tempo. E con questo la mia esposizione della relatività ristretta è terminata, anche se ci sarebbero tante altre cose da dire, in primo luogo la famosa "equivalenza massa-energia." Ma è ora di passare al nostro vero tema, ossia la "relatività generale."

* * *

Neanche due anni dopo la nascita della relatività ristretta, Einstein è alle prese con un nuovo problema: estendere il principio di relatività ai *riferimenti accelerati*. Infatti non lo soddisfa, nel principio di relatività, il ruolo privilegiato dei riferimenti inerziali. Ma la meccanica newtoniana insegna che in un riferimento accelerato si sentono delle *forze apparenti*, ossia senza causa materiale accertabile, la cui espressione generale è $-ma$, se m è la massa del corpo che risente la forza e a l'accelerazione del riferimento. La cosa interessante in questa formuletta è che la forza apparente è *proporzionale alla massa* del corpo: fatto ovvio a una lettura superficiale, ma che per Einstein acquista un significato profondo, non appena riflette che la stessa proprietà (proporzionalità alla massa) vale per un altro di tipo di forza, quella *gravitazionale*.

Che la forza di gravità sia proporzionale alla massa è la ragione per cui in un dato campo gravitazionale tutti i corpi cadono *con la stessa accelerazione*: fatto scoperto da Galileo tre secoli prima. Ma Einstein fa un altro passo: se il riferimento accelerato di cui si diceva è in *caduta libera* in un campo gravitazionale (quello che da allora è noto come "ascensore di Einstein") in questo riferimento la forza apparente *cancellerà* la forza di gravità. Ne segue un'ardita ipotesi: che si tratti di un fatto di portata universale, che Einstein enuncia col suo *principio di equivalenza*:

la forza di gravità equivale a tutti gli effetti fisici alla forza apparente di un riferimento accelerato

e di conseguenza:

un riferimento in caduta libera in un campo gravitazionale è fisicamente indistinguibile da un riferimento inerziale in assenza di campo.

Spieghiamo le due asserzioni con un esempio che Einstein non avrebbe potuto concepire, ma che oggi ci riesce familiare. Pensate a un'astronave in due diverse situazioni:

a) ferma sulla rampa di lancio

b) in volo lontana da qualsiasi corpo celeste, ma coi razzi accesi che le danno un'accelerazione g.

Nel caso *a*) in un laboratorio dentro l'astronave si sente la forza di gravità, i gravi cadono con accelerazione g verso il basso, e tutti gli altri possibili effetti della gravità saranno rivelabili. Nel caso *b*) su ogni corpo nel laboratorio agisce la forza apparente $-mg$: Einstein afferma che nelle due situazioni *tutti gli esperimenti* in quel laboratorio *daranno gli stessi risultati.*

Per es. Einstein sfrutta il principio di equivalenza per predire il cosiddetto "redshift gravitazionale": l'aumento nella lunghezza d'onda di una radiazione e.m. che si propaghi dal basso verso l'alto in un campo gravitazionale. La previsione, causa la piccolezza dell'effetto, verrà verificata solo 50 anni dopo.

La seconda osservazione mostra invece il carattere *relativo* della forza di gravità: essa è osservabile o no a seconda del sistema di riferimento: scompare in un riferimento in caduta libera.

Ma la scoperta del ruolo della gravità e del principio di equivalenza *sposta il programma di ricerca* di Einstein: partito dall'idea di generalizzare la relatività ai riferimenti accelerati, ora capisce che dovrà fare i conti con la gravità. La generalizzazione che sta cercando è in effetti una *teoria relativistica della gravità*, che sostituirà quella di Newton.

* * *

Il lavoro di Einstein sulla generalizzazione della relatività prosegue per diversi anni, passando per vari tentativi infruttuosi. Un progresso decisivo Einstein lo fa quando scopre che in presenza di gravità lo spazio-tempo *deve essere curvo.* Purtroppo non posso descrivere la linea del ragionamento, non perché sia troppo complicata, ma perché sarebbe troppo lunga; debbo però spendere qualche parola (si fa per dire ... saranno un bel po' di parole ...) su che cosa significa uno spazio-tempo curvo.

Essendo esclusa una trattazione matematica, l'unica è far ricorso ad analogie (però analogie serie, non quelle della divulgazione). Si dice correntemente che la superficie della Terra è curva: che cosa vuol dire? Una risposta ovvia è che guardando la Terra da fuori si vede che è una palla; ma purtroppo questa risposta non ci è di nessuna utilità, perché non possiamo "guardare da fuori" lo spazio-tempo. Occorre trovare un criterio *intrinseco*, che si possa applicare senza uscire dalla superficie terrestre, così come non possiamo uscire dallo spazio-tempo.

Un tale criterio ci è fornito dalle carte geografiche (guarda caso: ritorniamo al tema meridiani/paralleli, di cui ci eravamo interessati per tutt'altra ragione non molto tempo fa). Le carte geografiche sono rappresentazioni *approssimate* della superficie terrestre: a seconda dello scopo che ci si propone possiamo usare varie proiezioni cartografiche, ma hanno tutte in comune questo fatto, di non essere rappresentazioni *fedeli*, ossia di alterare in qualche misura le proporzioni delle forme geografiche, falsare più o meno le distanze, ecc. Per es. una proiezione in cui meridiani e paralleli sono rette tra loro ortogonali, per quanto facile da capire, falsa la realtà perché i meridiani vi appaiono mantenere distanza costante, invece di avvicinarsi quando si va verso i poli, come accade ai meridiani veri.

Il fatto centrale è che una rappresentazione fedele della superficie terrestre su un piano *non è possibile*, proprio perché la Terra è curva: in gergo matematico si dice che non si può *sviluppare* la superficie di una sfera (la Terra, all'incirca) su di un piano. È però sempre possibile uno sviluppo *approssimato*, con approssimazione tanto migliore quanto più la porzione di superficie interessata è piccola. Per esempio, nessuno si preoccupa della curvatura terrestre quando disegna la pianta di una città...

Passiamo allo spazio-tempo: il discorso è del tutto simile salvo il solito problema delle 4 dimensioni. Dire che lo spazio-tempo è curvo significa che non è possibile darne una rappresentazione fedele sullo spazio-tempo della relatività ristretta, quello con la metrica di Minkowski. Di conseguenza una carta dello spazio-tempo, anche realizzata con le semplificazioni di cui abbiamo parlato la volta scorsa (riduzione a due o tre dimensioni) potrà essere soltanto approssimata.

Cerchiamo di capire un po' meglio in che cosa consiste l'approssimazione. A questo scopo dobbiamo richiamare il principio di equivalenza, o meglio il corollario che se ne deduce e che avevo scritto sopra. Per vostra comodità lo ripeto:

un riferimento in caduta libera in un campo gravitazionale è fisicamente indistinguibile da un riferimento inerziale in assenza di campo.

Se questa proposizione è vera, ossia se descrive correttamente la realtà fisica, sembra ci sia modo di disegnare una carta fedele dello spazio-tempo con la metrica di Minkowski: basterebbe mettersi in un riferimento in caduta libera e usare le normali coordinate spazio-temporali della relatività ristretta.

Allora in che consiste l'approssimazione? Risposta: nel fatto che in realtà è proprio la proposizione qui scritta in corsivo ad essere *approssimata*. Ci vuol poco a capirlo, basta mettersi nell'ascensore di Einstein ed eseguire un semplicissimo esperimento. Disponiamo due palline, dentro l'ascensore, una vicino al soffitto della cabina e l'altra vicino al pavimento, ferme. Mentre l'ascensore cade, lasciamo libere le palline: che cosa ci aspettiamo di vedere?

Possiamo capirlo subito se guardiamo l'esperimento da un riferimento solidale al terreno. L'ascensore cade con accelerazione g: e le palline? Quella più in alto una volta lasciata libera cade anch'essa, ma trovandosi un po' più lontana dal centro della Terra del centro dell'ascensore, cadrà con accelerazione leggermente minore, dato che il campo gravitazionale della Terra decresce con la quota. Per la stessa ragione la pallina posta in basso cadrà con accelerazione leggermente maggiore.

Di conseguenza la distanza tra le due palline andrà crescendo nel tempo, e questo fatto potrà essere osservato anche all'interno dell'ascensore. Le due palline non resteranno ferme: quella in alto tenderà a salire e quella in basso a scendere. Sta di fatto che pur essendo state lasciate libere con velocità nulla non resteranno ferme. Ma ciò è quanto dire che nel riferimento dell'ascensore (che è in caduta libera) *non vale il principio d'inerzia*, ossia non si tratta di un riferimento inerziale, come dovevasi dimostrare.

Anche senza calcoli è facile intuire che in condizioni reali (ascensore di dimensioni ragionevoli) il discorso è puramente teorico: nessuno strumento oggi disponibile potrebbe mettere in evidenza questa leggerissima deviazione dal principio d'inerzia, quindi il riferimento dell'ascensore *è inerziale a tutti gli effetti*. La stessa cosa capiterebbe con una pianta di Pisa: a stretto rigore dovremmo tener conto della curvatura della Terra, ma nessuna misura praticamente eseguibile sarebbe in grado di rivelare tale curvatura. E la bontà dell'approssimazione è tanto maggiore quanto più piccola la regione che interessa: lo stesso nello spazio-tempo, dove le deviazioni dal principio d'inerzia possono essere rese piccole a piacere restringendo l'estensione spazio-temporale in cui si eseguono le misure.

Riassumendo: lo spazio-tempo è curvo perché non si può cancellare esattamente la forza di gravità anche mettendosi in un riferimento in caduta libera, ma l'effetto della curvatura può essere reso piccolo a piacere su regioni limitate, mentre può diventare importante su regioni di spazio-tempo estese.

* * *

La curvatura — della superficie terrestre o dello spazio-tempo — ha una conseguenza matematica importante. Pensiamo alla Terra: se fosse possibile sviluppare la superficie su un piano, su questo piano potremmo introdurre coordinate cartesiane (x, y) e la distanza sarebbe data dalla formula (1). Dato che la rappresentazione della superficie terrestre è fedele, quella formula rappresenterà (al più con un fattore di scala) anche le vere distanze sulla Terra, il che è quanto dire che esistono coordinate cartesiane con la metrica (1) sulla superficie terrestre. Invece le cose non stanno così: lo sviluppo non è possibile, e perciò *non è possibile usare coordinate cartesiane* con la metrica (1) sulla superficie della Terra.

Tuttavia non c'è dubbio che un qualche sistema di coordinate si può usare: tutti conoscono le coordinate geografiche (longitudine e latitudine). E dal momento che in una piccola regione si può approssimare la superficie con un piano, si potranno anche calcolare le distanze con una formula simile alla (1): solo che non si potrà usare la stessa formula su tutta la superficie, ma bisognerà adottare dei fattori correttivi, variabili da un punto all'altro. Dunque si potrà ancora parlare di metrica, ma a condizione di apportare due modifiche alla (1):

– scriverla non per punti qualsiasi, ma solo per punti "infinitamente vicini"
– inserire dei coefficienti correttivi variabili col punto.

Se per es. le coordinate sono quelle geografiche, o piuttosto le coordinate polari (colatitudine ϑ e azimut φ) di uso più comune in fisica, la metrica si scriverà

$$ds^2 = R^2 d\vartheta^2 + R^2 \sin^2\!\vartheta\, d\varphi^2. \tag{4}$$

Come si vede, la (4) differisce dalla (1) per vari aspetti:

1) Invece di s^2 appare ds^2, il quadrato del *differenziale* ds.
2) Allo stesso modo invece delle differenze delle coordinate di due punti, appaiono i *differenziali* $d\vartheta$, $d\varphi$ delle coordinate. La notazione con la d, dovuta a Leibniz, sta appunto a indicare una "differenza infinitesima" (oggigiorno i matematici ripudiano un tal modo di esprimersi, ma i fisici ci sono ancora piuttosto attaccati).
3) Ci sono i coefficienti, R^2 e $R^2 \sin^2\!\vartheta$. Se si trattasse solo di R^2, sarebbe un fattore di scala costante, con poco significato: ma c'è anche il $\sin^2\!\vartheta$, che cambia con la colatitudine. Questo ci informa che la lunghezza dei paralleli è variabile, ossia che i meridiani si avvicinano andando verso i poli.

Un'espressione simile alla (4), eventualmente più complicata, si può scrivere per un sistema di coordinate arbitrarie, e per qualsiasi superficie: questa è la scoperta di Gauss (anni '20 del 19-mo secolo). Meno di 30 anni dopo Riemann generalizza l'idea a spazi a un numero qualsiasi di dimensioni (oggi noti come "varietà riemanniane") preparando così lo sviluppo degli strumenti matematici di cui si servirà Einstein per la relatività generale.

In generale abbiamo sempre una *metrica*, in cui figurano sempre i differenziali della coordinate moltiplicati per certi coefficienti. Per essere più precisi, abiamo una *forma quadratica*, i cui coefficienti si chiamano globalmente "coefficienti della metrica" o anche "tensore metrico." In 4 dimensioni questi coefficienti sono in numero di 10; evito di spiegare perché. Determinare la geometria dello spazio-tempo significa trovare l'espressione (in funzione delle coordinate) di questi 10 coefficienti.

Ecco il problema che Einstein ha davanti: trovare le condizioni che determinano la geometria dello spazio-tempo. Ma che significa questo come problema fisico? Abbiamo già visto che lo spazio-tempo sarà curvo, e ciò a causa della materia presente, che produce campi gravitazionali non esattamente eliminabili, neppure mettendosi in un riferimento in caduta libera. Dunque il problema fisico, tradotto in termini matematici, è: data la natura e distribuzione della materia presente, determinare la geometria (la metrica) dello spazio-tempo.

Qui va ricordato un aspetto dello sviluppo della teoria di Einstein. Come ho già detto, quello sviluppo dura diversi anni, e per un certo tempo, anche dopo aver capito che lo spazio-tempo deve essere curvo, Einstein non possiede gli strumenti matematici necessari per arrivare alle sue equazioni. È il matematico Marcel Grossman, suo amico, che lo convince a studiare il recentissimo "calcolo differenziale assoluto," come allora si chiamava, al quale avevano dato contributi fondamentali, tra gli altri, Gregorio Ricci Curbastro e Tullio Levi-Civita. C'è una lettera del 1912 di Einstein a Sommerfeld in cui egli scrive:

[...] *l'animo mi si è riempito di un grande rispetto per la matematica, la parte più sottile della quale avevo finora considerato, nella mia dabbenaggine, un puro lusso.*

Questo serve a ricordarci come Einstein fosse un genuino fisico, che della matematica faceva uso solo quando e in quanto gli appariva uno strumento necessario. Tutt'altro dalla *vulgata* popolare, dove non di rado è definito addirittura "matematico"...

* * *

Dopo un periodo di lavoro intensissimo, nel novembre 1915 Einstein arriva a una prima versione (ancora imperfetta) delle sue famose "equazioni." Dovrei ora dire qualcosa di queste equazioni, del loro significato; ma non potrei farlo in poche parole, per cui preferisco concludere la puntata, che temo sia riuscita pesantissima, con un'anticipazione a un altro aspetto dello stile di lavoro di Einstein.

In tutta la sua attività di ricerca, che pure ha sempre avuto carattere profondamente teorico, Einstein si preoccupò di suggerire possibili verifiche sperimentali delle nuove leggi che andava scoprendo. Il lavoro sulla relatività generale non fa eccezione. Ho già accennato al redshift gravitazionale, la cui verifica avrebbe dovuto attendere 50 anni; in quella fine del 1915 Einstein propone altre due di quelle che poi avrebbero preso il nome di "prove classiche" della relatività generale: classiche nello stesso senso in cui l'aggettivo viene usato in ambito artistico, per indicare qualcosa destinato a restare nel tempo. Una di queste prove è la *deflessione gravitazionale della luce*: purtroppo la necessità di limitarmi nell'esposizione mi obbliga a ricordarvi soltanto il nome senza approfondire, almeno per ora.

Alla terza prova classica, ossia la *precessione del perielio* di Mercurio voglio invece dedicare un po' di spazio, ma non posso farlo ora: rimando a una prossima puntata. Ricordo solo che in questo caso non si trattava di una previsione, ma della *spiegazione* di un fatto astronomico già noto da circa 60 anni, e che nessuno aveva saputo interpretare nell'ambito della meccanica celeste newtoniana. Vedere che la sua teoria rendeva ragione di questo fatto misterioso produsse su Einstein un'impressione profondissima: in una lettera a Ehrenfest scriveva "Per alcuni giorni sono rimasto fuori di me per l'eccitazione e la gioia."