

La legge di gravità

La legge della gravitazione universale di Newton ci dice che la forza di gravità (F) fra due oggetti di massa m e M è data da

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

dove r è la distanza fra i due oggetti e G è la costante detta di Newton. G è molto piccola, dunque la gravità è molto debole. Questa legge di gravità ha almeno due implicazioni...



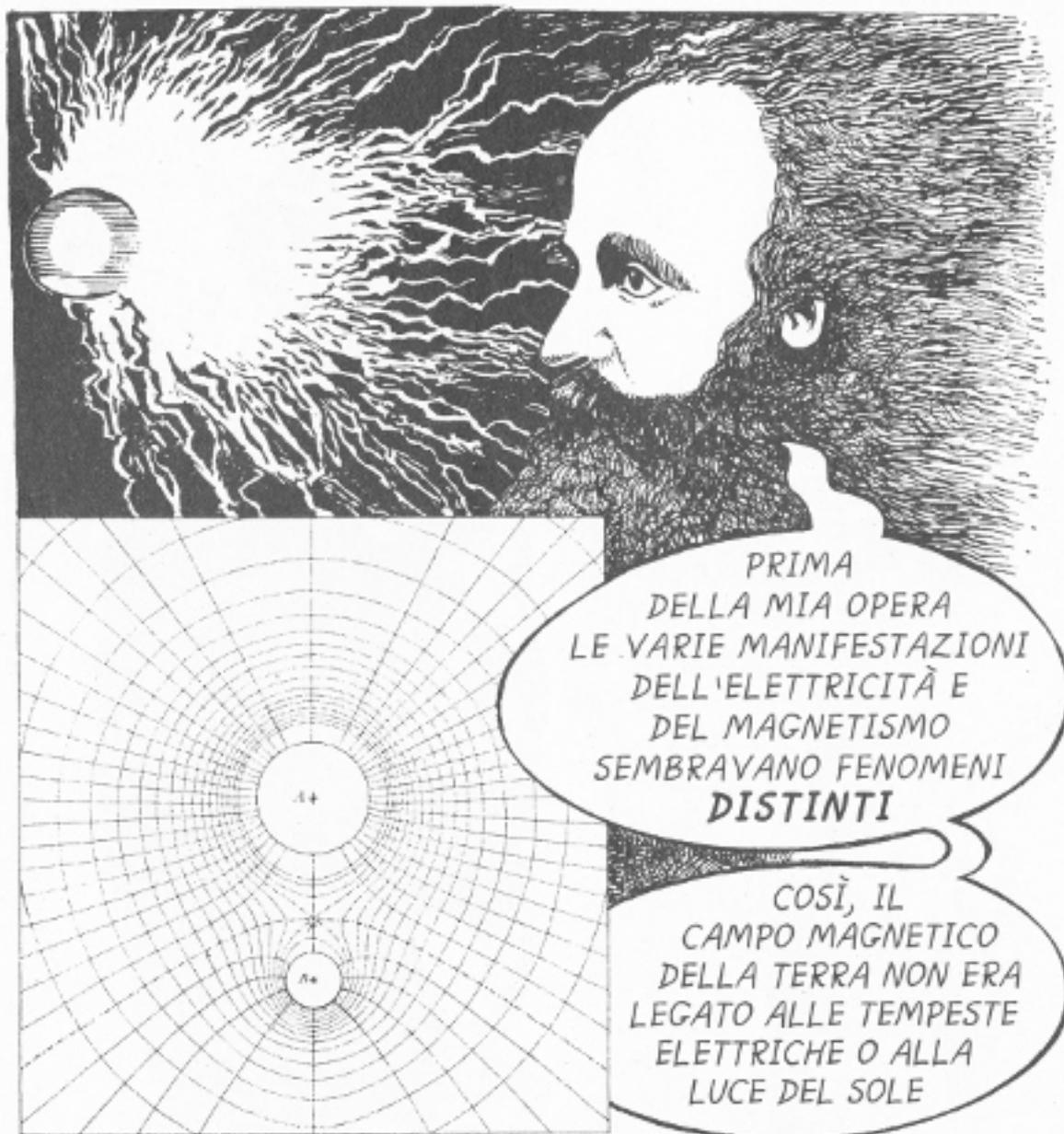
Nella sua teoria Newton diede per scontate diverse cose. Mentre la Terra non era più al centro dell'universo – come già pensavano molti “filosofi della natura” fin dal tempo di **Nicolò Copernico** (1473-1543) –, presupponeva che spazio e tempo fossero cose fondamentalmente **differenti** e che entrambi fossero **assoluti**, come scolpiti sul marmo.



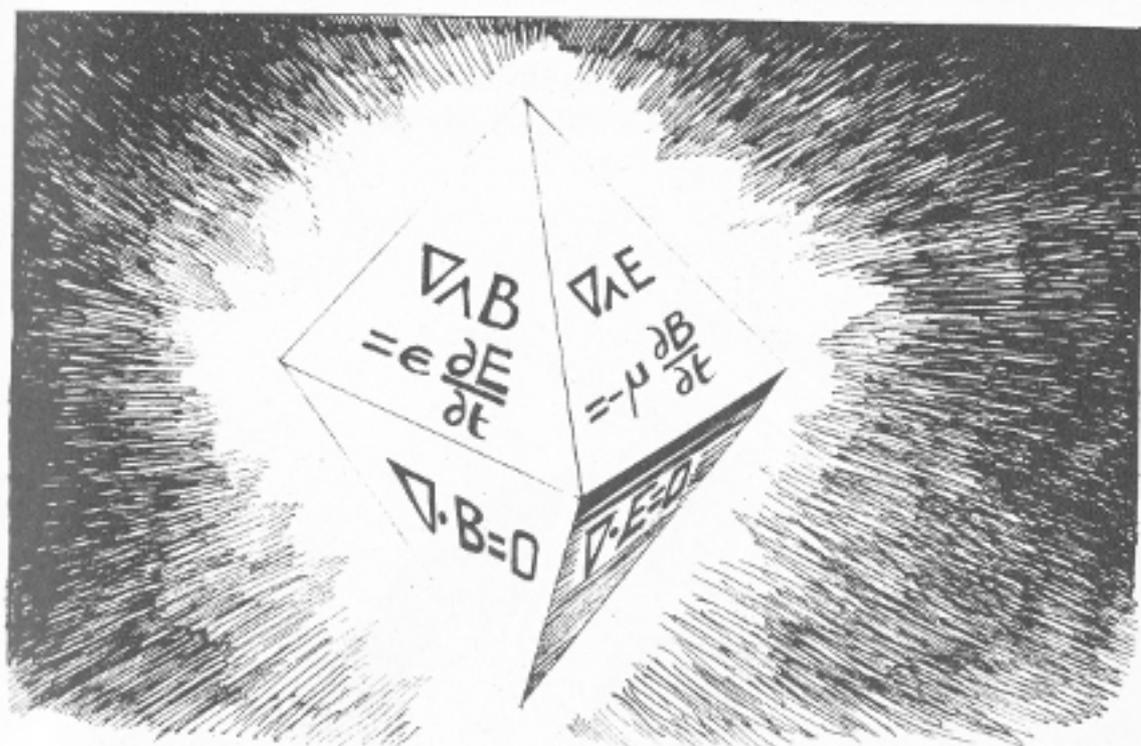
L'idea di unificare i due concetti, apparentemente distinti, di spazio e tempo verrà a Einstein, come vedremo più avanti.

La teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell

La fisica teorica aveva fatto significativi progressi prima di Einstein. In particolare, **James Clerk Maxwell** (1831-1879) aveva unificato il magnetismo con l'elettricità nell'**elettromagnetismo**.



Con quattro equazioni Maxwell spiegò tutte le differenti manifestazioni di elettricità e magnetismo, dall'emissione di luce alle correnti elettriche fino al campo magnetico terrestre. Le equazioni di Maxwell collegarono l'uno all'altro il campo elettrico e quello magnetico, mostrando che le loro diverse manifestazioni rappresentavano casi particolari di una **teoria generale**.

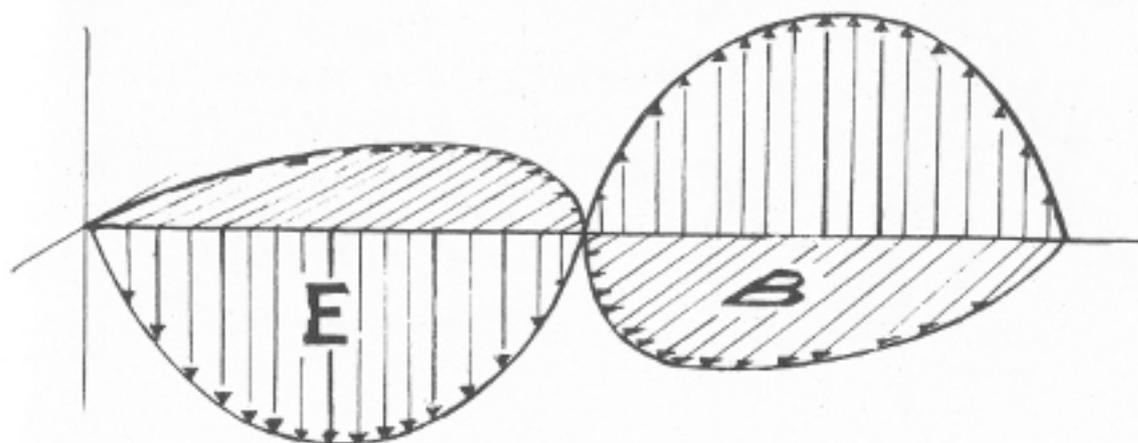


Ci possono essere campi magnetici anche in assenza di campo elettrico (e viceversa).

Ma, in generale, se l'intensità di un campo elettrico varia nel tempo, genererà dei campi magnetici... e viceversa.

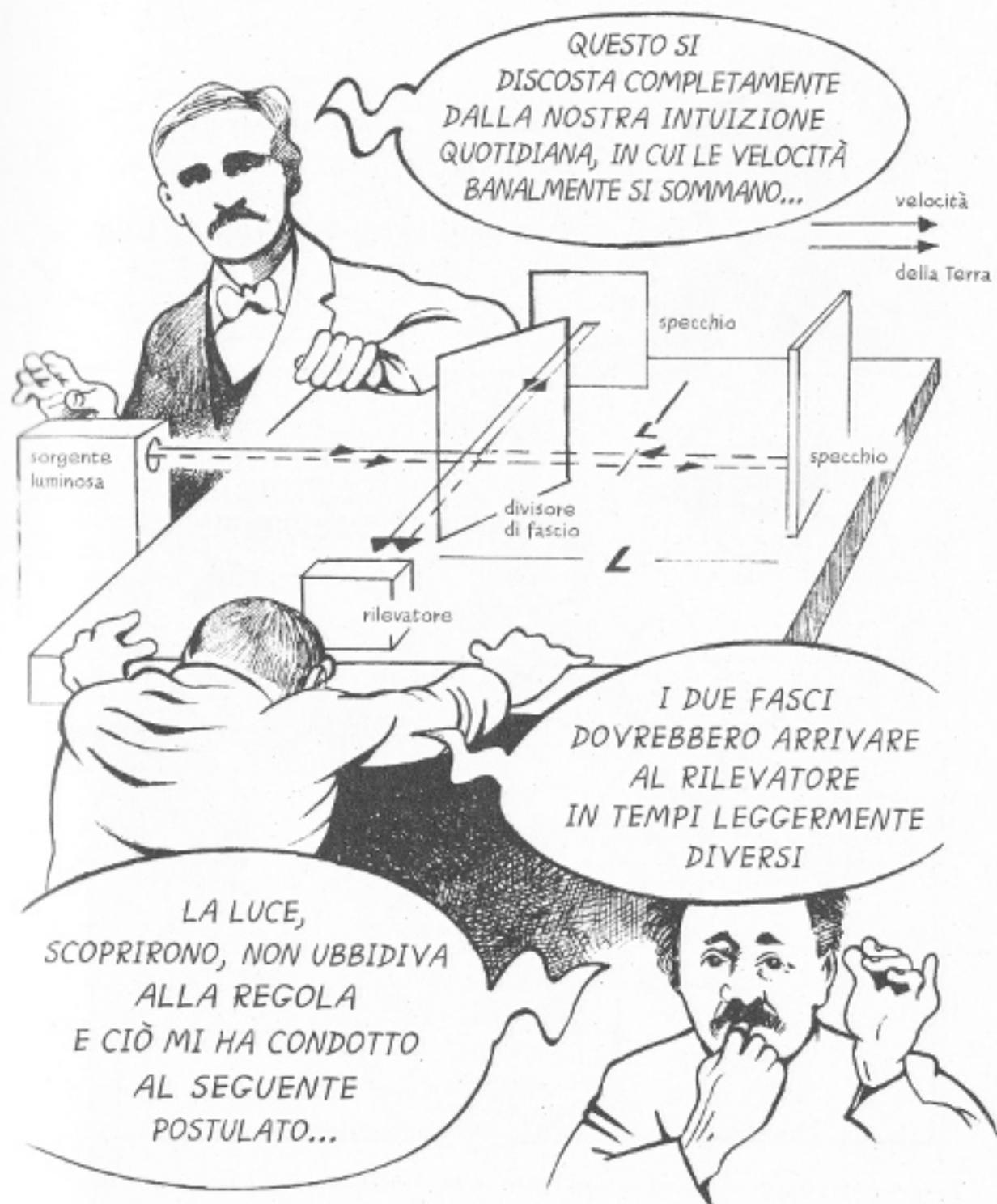
È ciò che avviene nel caso della luce, che consiste di campi elettrici e magnetici oscillanti che si propagano nello spazio e nel tempo alla velocità, appunto, della luce.

L'unificazione ottenuta da Maxwell è dunque concettualmente simile a quella di Newton, quando questi aveva intuito che la forza che agisce sulla mela è la stessa che mantiene la Terra nella sua orbita attorno al Sole.



L'esperimento di Michelson-Morley

Nel 1881 **Albert Michelson** (1852-1931) progettò un dispositivo per controllare se il moto della Terra influisse sulla velocità della luce. Nel 1887 Michelson e **Edward W. Morley** (1838-1923) condussero l'esperimento con grande accuratezza, trovando che la velocità della luce non variava sia che la luce viaggiasse con la Terra o contro di essa.



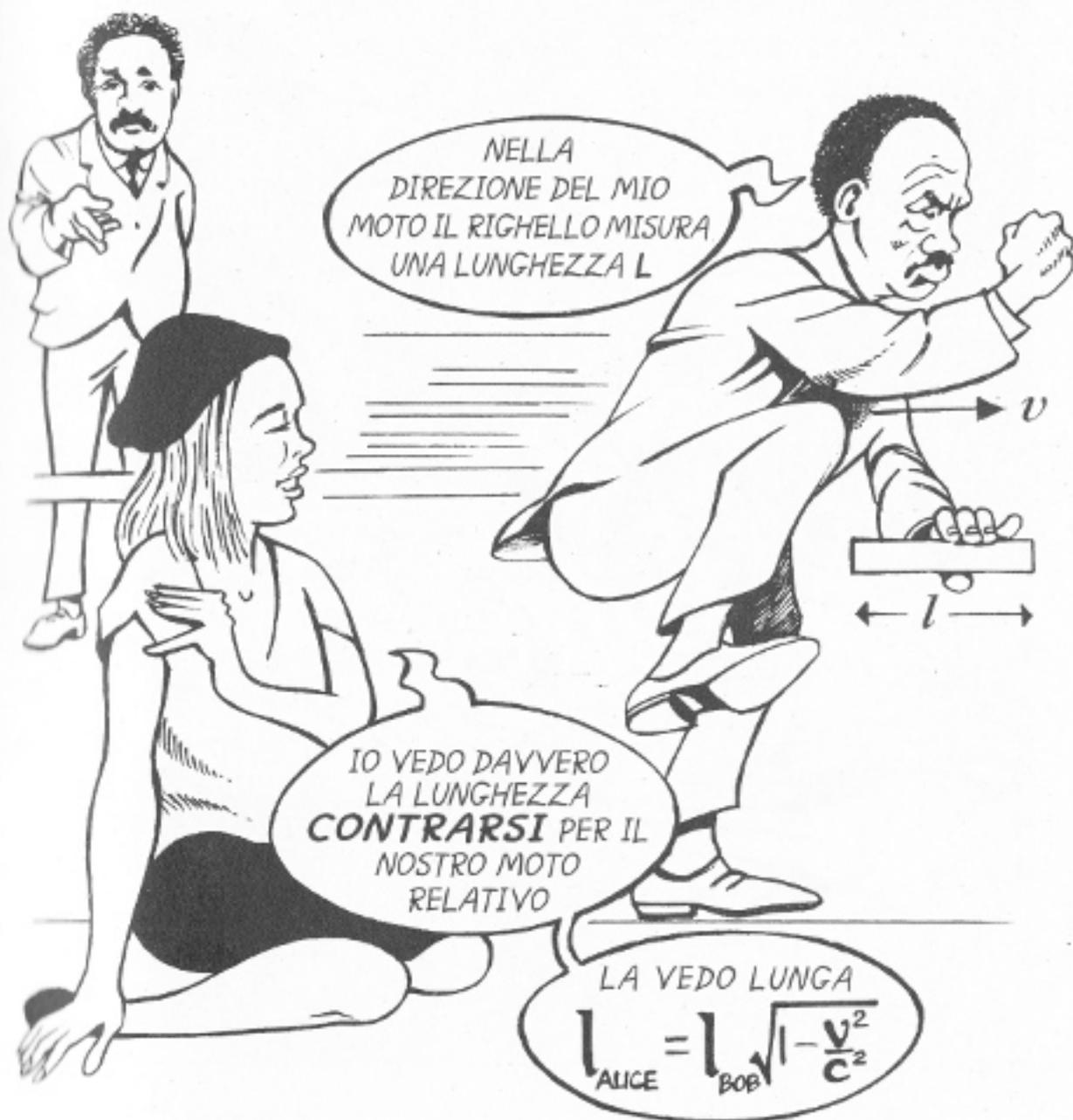
La costanza della velocità della luce

Uno dei più importanti principi della relatività speciale è il postulato che nel vuoto la velocità della luce c **non** dipende dall'osservatore. Il postulato di Einstein sostituisce allo spazio e al tempo assoluti di Newton una velocità della luce assoluta.



L'effetto di contrazione della lunghezza

Alice e Bob si stanno muovendo uno rispetto all'altro a velocità costante v . Alice come vede Bob?



La lunghezza vista da Alice è più corta di quella che vede Bob.

Dilatazione temporale

Analogamente, lo scorrere del tempo è differente per osservatori che si muovano uno rispetto all'altro. Ma il tempo rallenta o accelera quando ci si muove più velocemente?



Perché il tempo di Bob scorra a metà della "velocità" di quello di Alice, Bob deve però muoversi all'86% della velocità della luce. Non c'è dunque alcun problema per la vita sulla Terra. Tuttavia, la dilatazione è stata effettivamente osservata, come vedremo subito.

Osservando i muoni

I raggi cosmici provengono dallo spazio esterno e colpiscono l'atmosfera quasi alla velocità della luce. La collisione crea **muoni** (strane particelle simili a elettroni pesanti) che viaggiano anch'essi quasi alla velocità della luce.

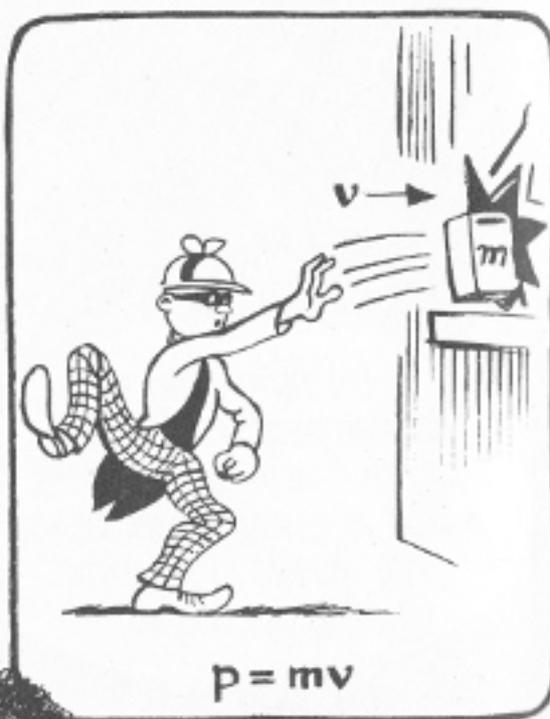


Ciò avviene perché, se teniamo conto della dilatazione del tempo dovuta al rapidissimo moto dei muoni, troviamo che essi vivono circa venti volte più a lungo e hanno quindi tutto il tempo di raggiungere il livello del mare nel numero osservato.

L'energia è massa, la massa è energia

Nella famosa equazione di Einstein $E = mc^2$, m è la "massa a riposo", ossia la massa che possiede un corpo quando è fermo. L'equazione mostra che la massa può essere convertita in una enorme quantità di energia. Ma che cosa succede se un corpo si muove rapidamente? Esso possiede allora anche un'energia **cinetica** (o di movimento). In effetti, la formula completa di Einstein è...

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

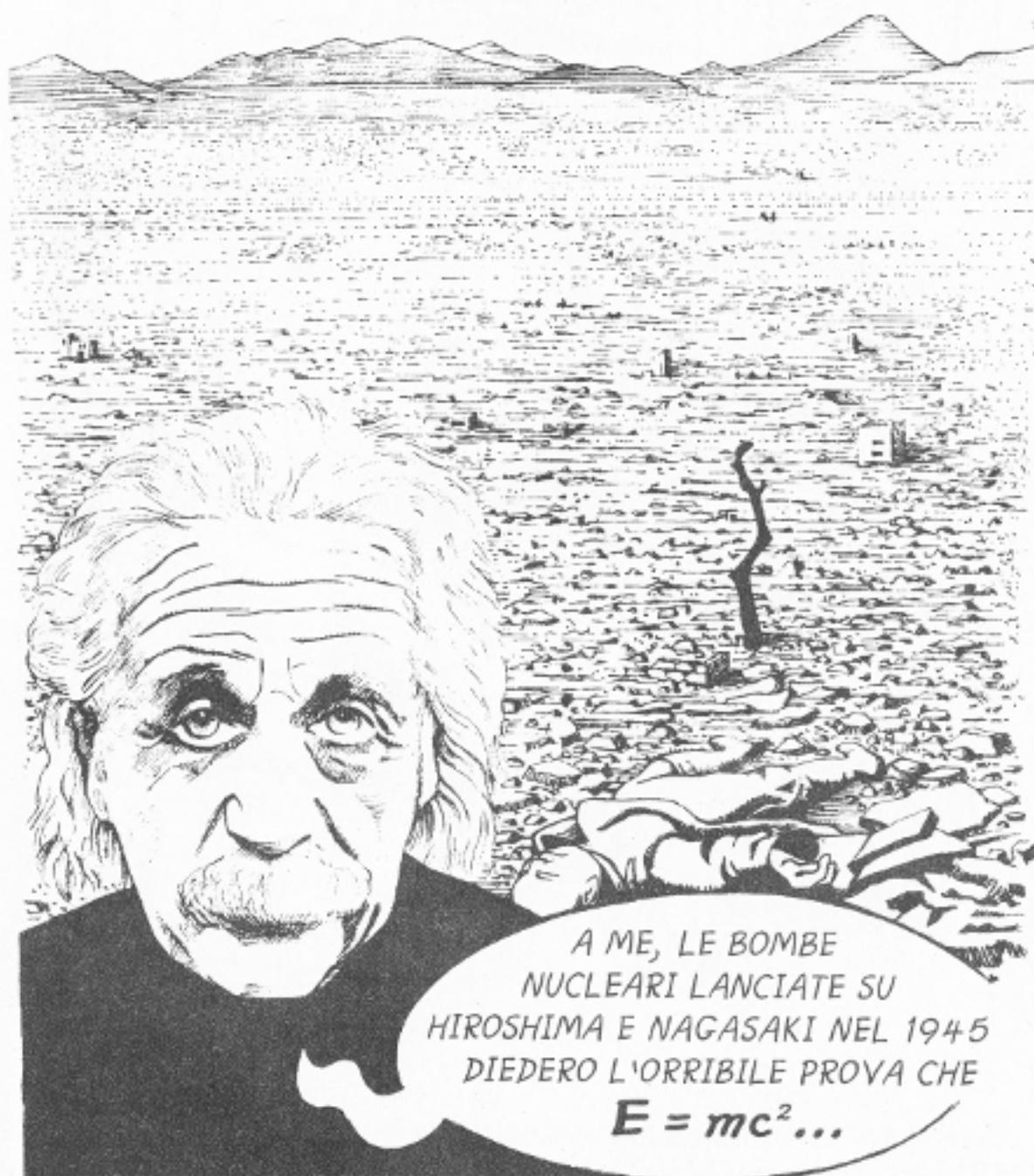


E È L'ENERGIA
DI UNA PARTICELLA
DI MOMENTO p

RICORDIAMO
CHE CLASSICAMENTE
IL MOMENTO, O QUANTITÀ
DI MOTO, È $p = mv$
DOVE v È LA VELOCITÀ
DEL CORPO

Quando una particella non ha energia cinetica ed è immobile, abbiamo $E^2 = m^2 c^4$ o, più familiarmente, $E = mc^2$. **L'energia è massa, e la massa è energia.**

Il secondo evento decisivo fu la Rivoluzione di Ottobre del 1917 in Russia, che portò alla costituzione dell'Unione Sovietica comunista. Il comunismo e l'opposizione a esso da parte degli Stati Uniti e dell'Europa occidentale furono lo scenario della politica della "Guerra fredda" che dominò il mondo nella seconda metà del XX secolo.



L'idea di antimateria di Dirac

Torniamo all'equazione di Einstein $E^2 = m^2c^4$. C'è qualche caso in cui è importante avere E^2 al posto di E ? Sì. **Paul Dirac** (1902-1984) osservò che se estraiamo la radice quadrata per trovare E , matematicamente ci sono **due** soluzioni. È facile da capire: $2 \times 2 = 4$ e $-2 \times -2 = 4$. Se prendiamo la radice quadrata con il segno negativo, abbiamo un'energia **negativa**. Su questa base (ma con un'analisi molto più rigorosa), Dirac avanzò l'ipotesi dell'esistenza di un'**antimateria** dotata di energia negativa.



Serve la relatività generale

Possiamo ora discutere uno dei più celebri paradossi della relatività speciale che ci condurrà alla teoria generale della relatività. Consideriamo due gemelli, anzi due gemelle, una delle quali lascia la Terra a bordo di un razzo mentre l'altra resta sul nostro pianeta. Il razzo accelera quasi fino alla velocità della luce nel suo viaggio verso una stella che dista dieci anni luce. Un anno luce è la distanza che la luce percorre in un anno, una distanza enorme! Supponiamo che $v = 0,995c$. In accordo con la formula di dilatazione del tempo, sul razzo il tempo stesso scorre 10 volte **più lentamente** che sulla Terra.



Per la gemella sul razzo il viaggio verso la stella e ritorno è durato solo due anni, mentre per quella rimasta sulla Terra avrebbe richiesto un po' più di vent'anni.

Un altro punto di vista

Dov'è il paradosso? La gemella sulla Terra avrebbe ben diritto di reclamare che il razzo è **immobile** e che in realtà è la Terra (con tutto il Sistema solare) a muoversi a una velocità prossima a quella della luce. In tal caso dovrebbe essere la gemella terrestre a veder ticchettare lentamente il tempo, e quella sul razzo a vederlo fluire normalmente. Dopotutto, è proprio questo che significa relatività!



Fuori dall'impasse

Il paradosso delle gemelle sembra portarci in una impasse. Sembra esserci una simmetria nel problema. La fisica appare la stessa anche se scambiamo gli argomenti delle due gemelle e, tuttavia, per quanto riguarda la quantità di tempo necessaria alla gemella sul razzo per tornare, il risultato cambia completamente.

Una piccola riflessione mostrerà dove sta il problema. Le situazioni e gli argomenti sono **realmente** scambiabili?

Una volta che il razzo viaggia alla velocità **costante** $v = 0,995c$, sono scambiabili.



L'accelerazione risolutrice

Questo rompe la simmetria fra le due gemelle, mostrando che non è possibile scambiare gli argomenti. Abbiamo già chiarito che la relatività speciale non si applica a sistemi che subiscono **un'accelerazione**.



Questo problema condurrà Einstein alla relatività generale, che completò nel 1916. Si può affermare che si è trattato di uno dei massimi contributi intellettuali di un singolo individuo all'umanità.

Se cadete da una finestra, che cosa provate prima dell'impatto (a parte l'impetuoso scorrere dell'aria)? Accelerate verso il suolo, ma vi sentite *senza peso*. È per questo che gli astronauti si allenano allo spazio su aerei che per un paio di minuti volano in caduta libera.



Ciò suggerì a Einstein che per breve tempo e su piccole distanze gli effetti della gravità potessero venir fatti magicamente sparire per l'osservatore – in questo caso voi che cadete con il martello.

Il principio di equivalenza

Seguiamo ancora questa idea. Immaginiamo ora che siate bendati e che vi troviate vicino al pavimento di una stanza senza finestre che sta viaggiando nello spazio senza che alcuna forza agisca su di essa. Siete completamente senza peso. Improvvisamente piombate "a terra" e vi restate inchiodati.





Forse un'intuizione, simile a quella di Einstein, vi porta a sospettare che non potete scoprire la differenza: queste due osservazioni apparentemente elementari sono oggi conosciute come differenti aspetti del **principio di equivalenza**, una perla della fisica teorica. Con questo semplice esperimento mentale Einstein arrivò dritto al cuore di ciò che gli serviva per ampliare la relatività speciale includendo accelerazione e gravità.

Estendere la prima legge di Newton

Abbiamo visto che se cadete in un campo gravitazionale vi sentite senza peso, come se nessuna forza agisse su di voi. Questa osservazione doveva condurre Einstein all'idea che la gravità non sia una forza come le altre! Ma come conciliamo questo fatto con la più basilare delle leggi imparate a scuola – la prima legge di Newton – che, sulla base del lavoro di **Galileo** (1564-1642), ci dice che



La soluzione è di un'eleganza così stupefacente da essere una delle più belle modificazioni di una teoria di tutta la storia della fisica.

La Terra non è piatta e neppure lo spazio!

Einstein modificò la prima legge di Newton così...



Il problema è che solitamente ci limitiamo a spazi "piatti", e questa è un'eredità della geometria formulata da **Euclide** (300 a.C. circa). Ma sappiamo tutti che la Terra non è piatta: perché dovremmo dunque limitarci a pensare che lo spaziotempo debba essere piatto? In fondo, Newton lo presupponeva, ed era un genio... All'epoca sembrava, dunque, un'assunzione ragionevole!

Di fatto, quando uno spazio è curvo, la linea più breve fra due punti che si trovi **completamente in quello spazio non è** una retta. Consideriamo un esempio molto semplice: la Terra.



Esempi di cerchi massimi sono l'equatore e i meridiani. Di fatto, **non** esistono linee rette che giacciono sulla superficie terrestre!

La coda del drago

Molte affascinanti e radicali estensioni della gravità newtoniana sono dunque implicate dal nostro passaggio dalla prima legge di Newton alla modificazione proposta da Einstein. Ci è bastato cambiare un paio di parole. Fu proprio la stupefacente potenza ed economicità della RG a indurre il celebre fisico russo **Lev Landau** (1908-1968) a dichiarare che una profonda, ammirata comprensione della RG è un prerequisito per essere un fisico teorico.

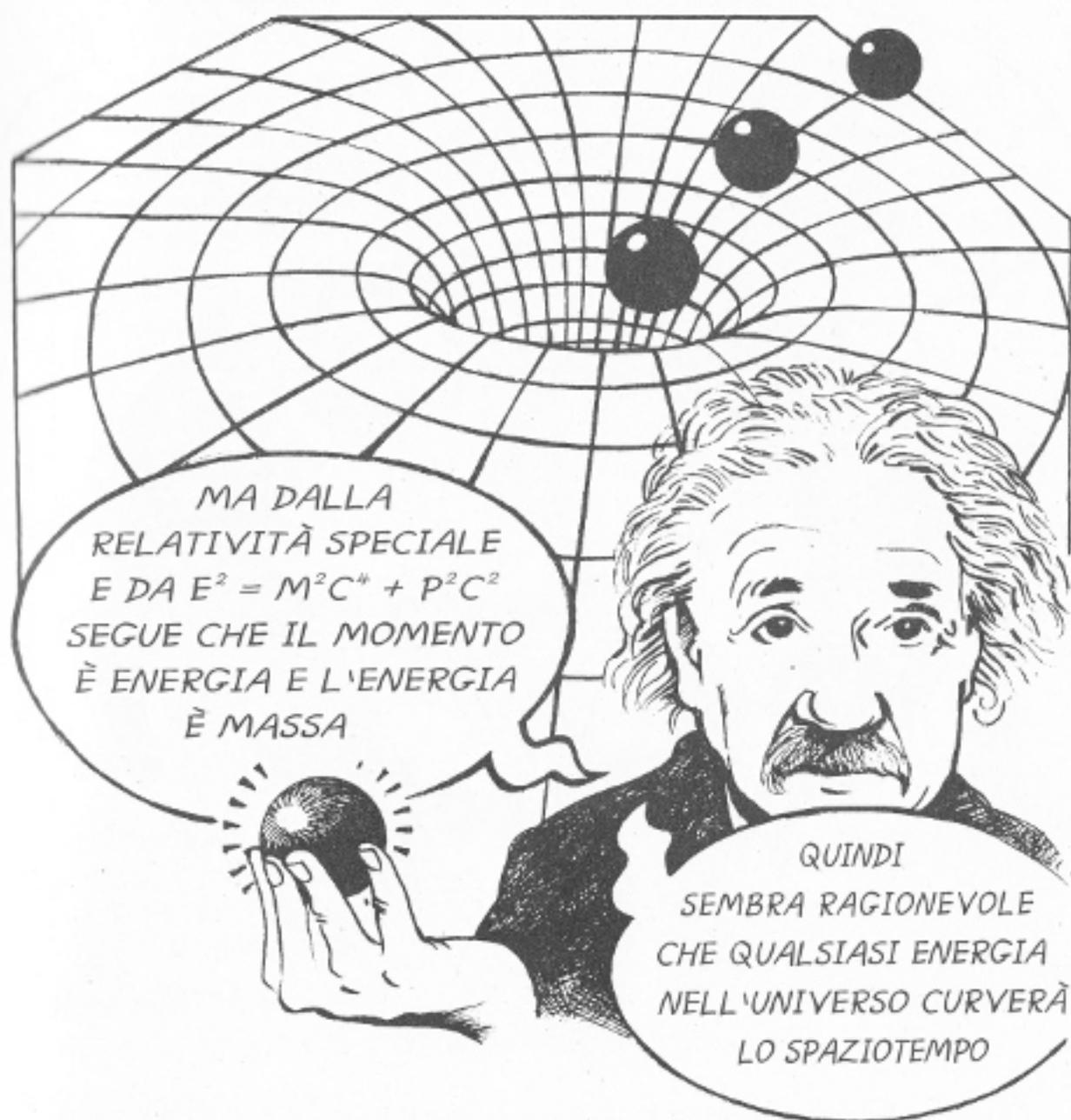


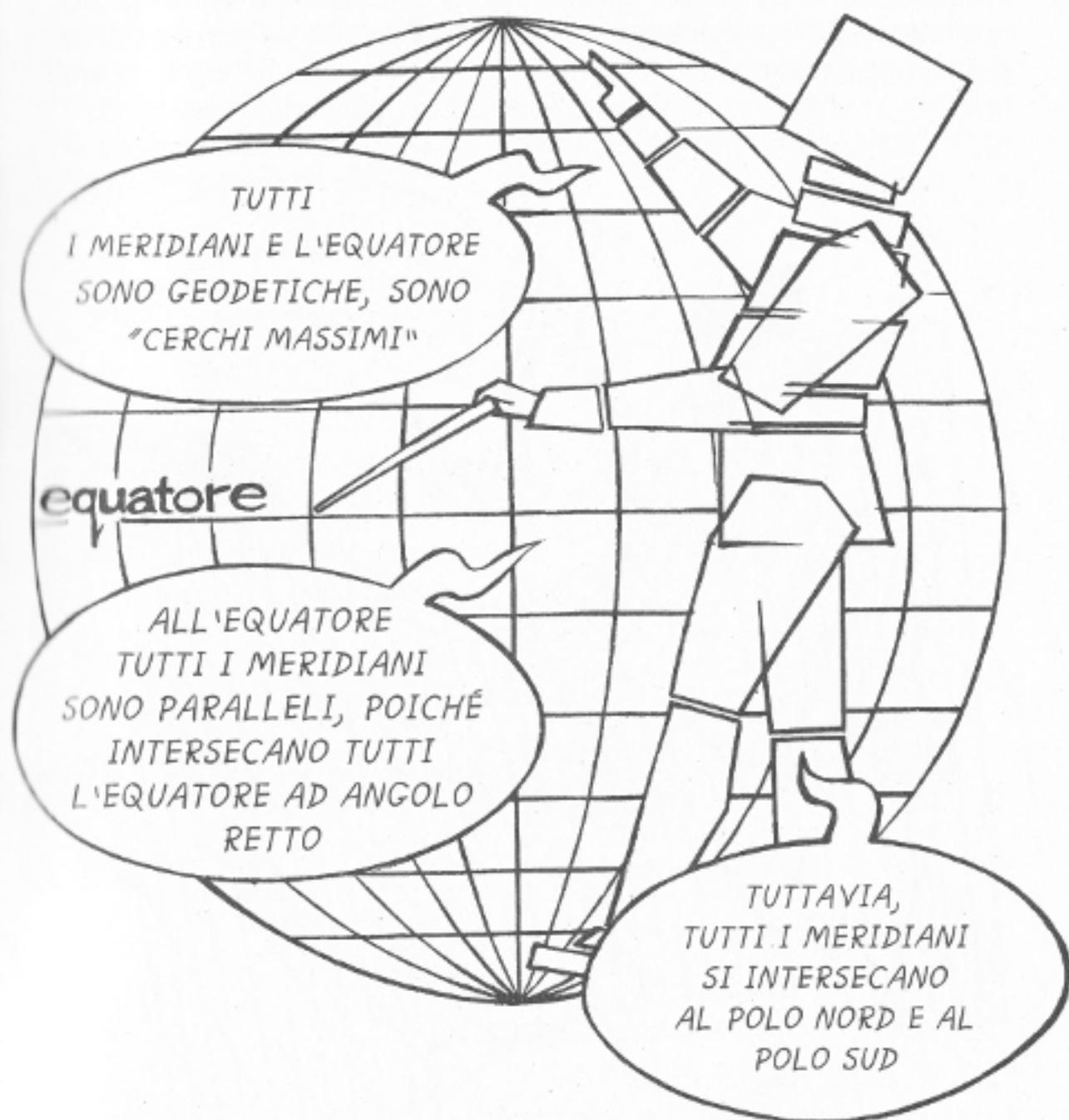
Se ci pensate un attimo, vi accorgete che manca un ingrediente fondamentale per portare a compimento la nostra aspirazione a un sostituto relativistico coerente della teoria della gravità di Newton.

L'ingrediente mancante

L'ingrediente mancante è contenuto nella domanda: "In che modo lo spaziotempo sa come curvarsi per dare la corretta geodetica che fa viaggiare la Luna lungo una ellissi attorno alla Terra?".

Poiché è la gravità terrestre che induce la Luna a girare attorno a essa, sappiamo che deve essere la massa a incaricarsi di incurvare lo spaziotempo.





Le linee parallele possono dunque incontrarsi! In questo caso si dice che lo spazio ha curvatura **positiva**.

Curvatura negativa

È anche possibile costruire spazi nei quali le geodetiche parallele non si intersecano mai, ma la mutua distanza aumenta via via che procedete lungo di esse.



Infine, abbiamo gli spazi piatti di Euclide, nei quali le linee parallele restano equidistanti e non si incontrano mai.

A curvatura positiva...



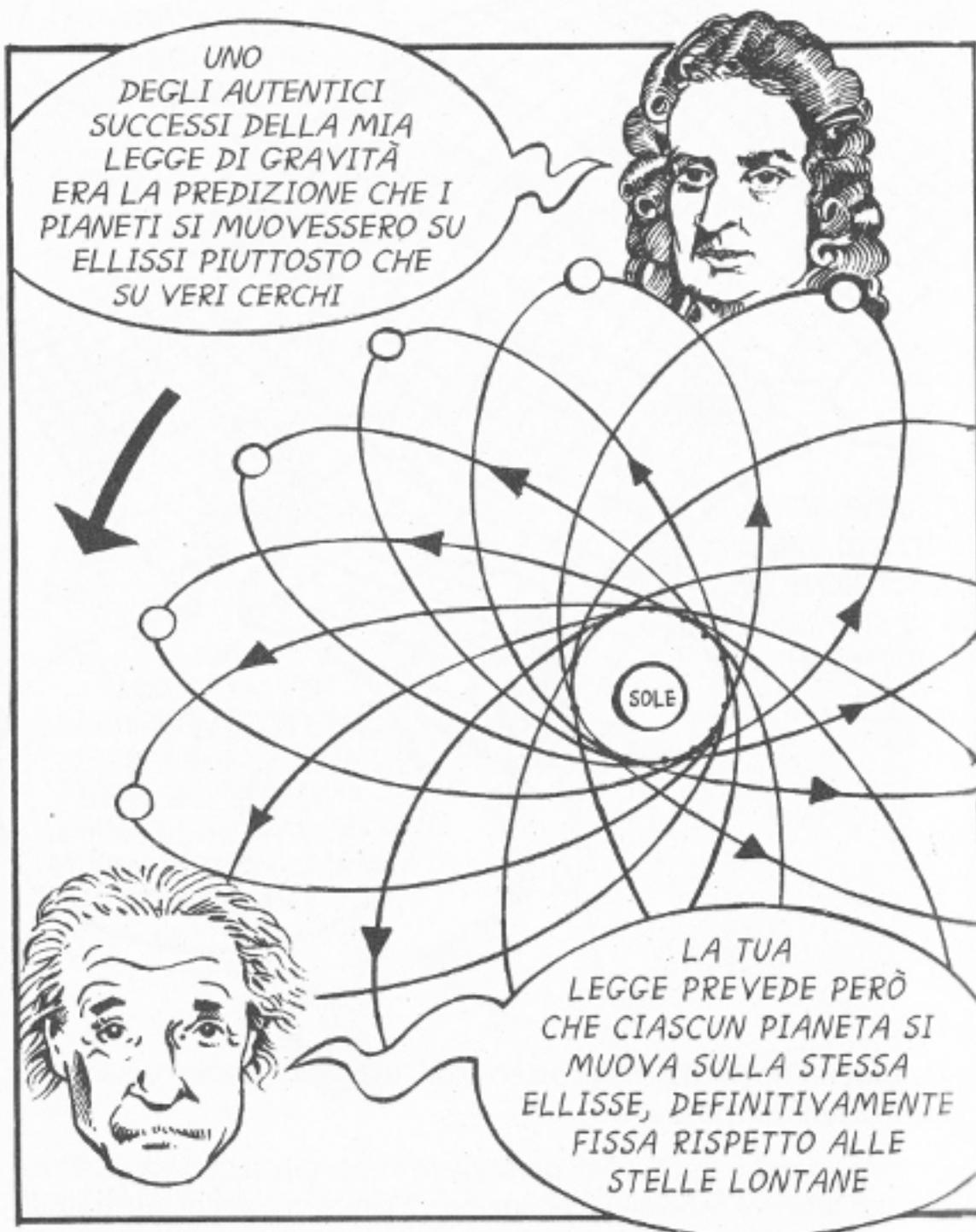
Questa è una caratteristica generale degli spazi a curvatura positiva: la somma degli angoli dei triangoli formati dalle loro geodetiche è **maggiore** di 180 gradi.

A curvatura negativa...



Controllare la RG in natura

Le equazioni di Einstein soddisfano la richiesta di base che avevamo posto. Ma il giudice finale, dopo aver concepito una nuova teoria, è sempre la Natura. A quali controlli è stata sottoposta la relatività generale? Quali sue predizioni sono state verificate? Abbiamo già discusso quello che per la gravità newtoniana era un problema: lo spostamento del perielio di Mercurio.



Ci fu un notevole imbarazzo quando le osservazioni dell'orbita di Mercurio mostrarono che il punto più vicino al Sole, il perielio, a ogni orbita si trovava in un punto leggermente diverso.



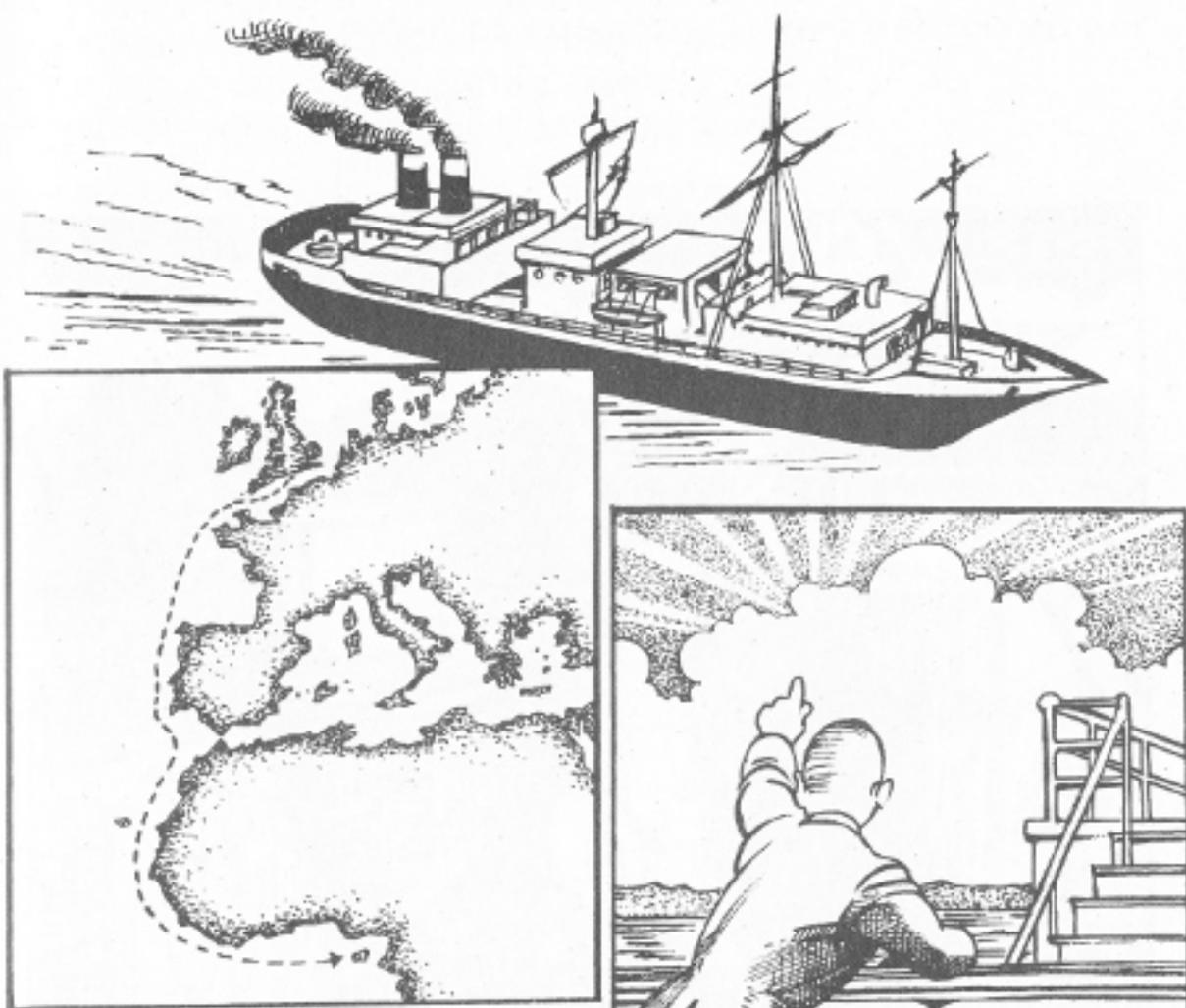
La luce si piega

La predizione circa il perielio di Mercurio non era sufficiente a convincere tutti della realtà e dell'utilità della RG. Einstein vinse il Nobel per il cosiddetto effetto fotoelettrico e il suo contributo alla fisica teorica, ma non per la RG.

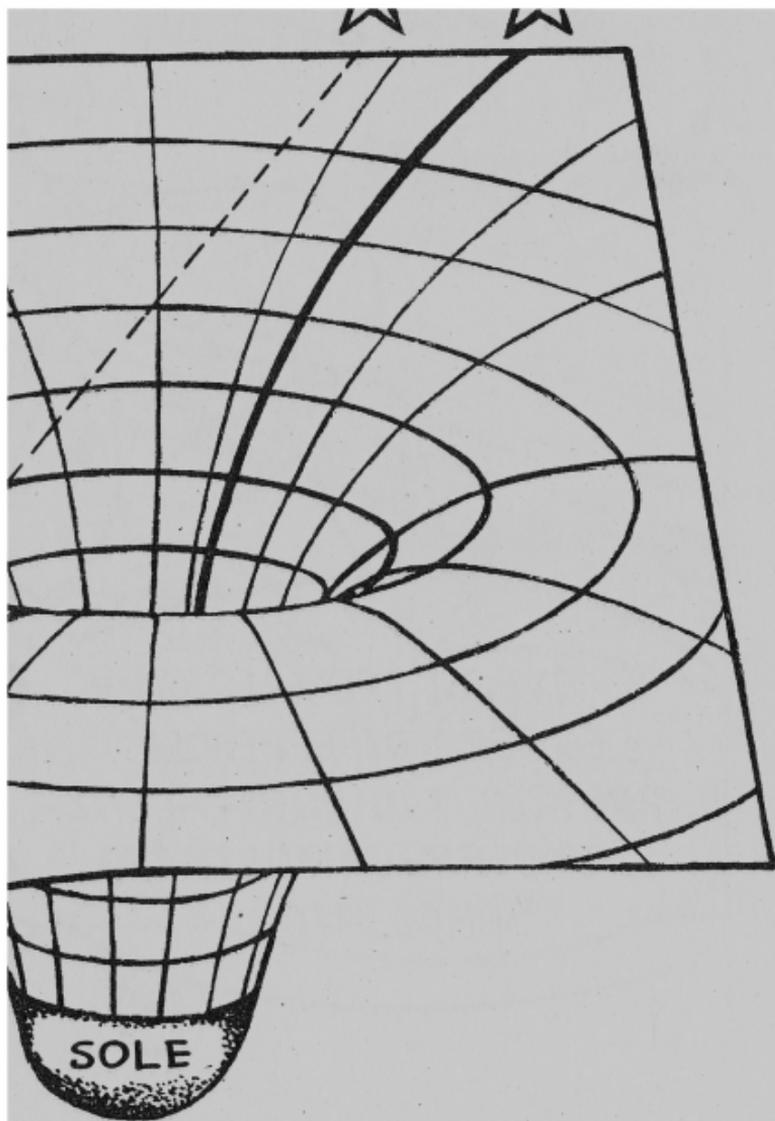


Questo venne verificato nel 1919...

... grazie al famoso controllo eseguito dall'astronomo **Sir Arthur Eddington** (1882-1944). Nel marzo del 1919 la sua spedizione salpò dall'Inghilterra alla volta dell'isola di Principe, al largo della costa occidentale dell'Africa, per studiare un'eclissi di Sole.

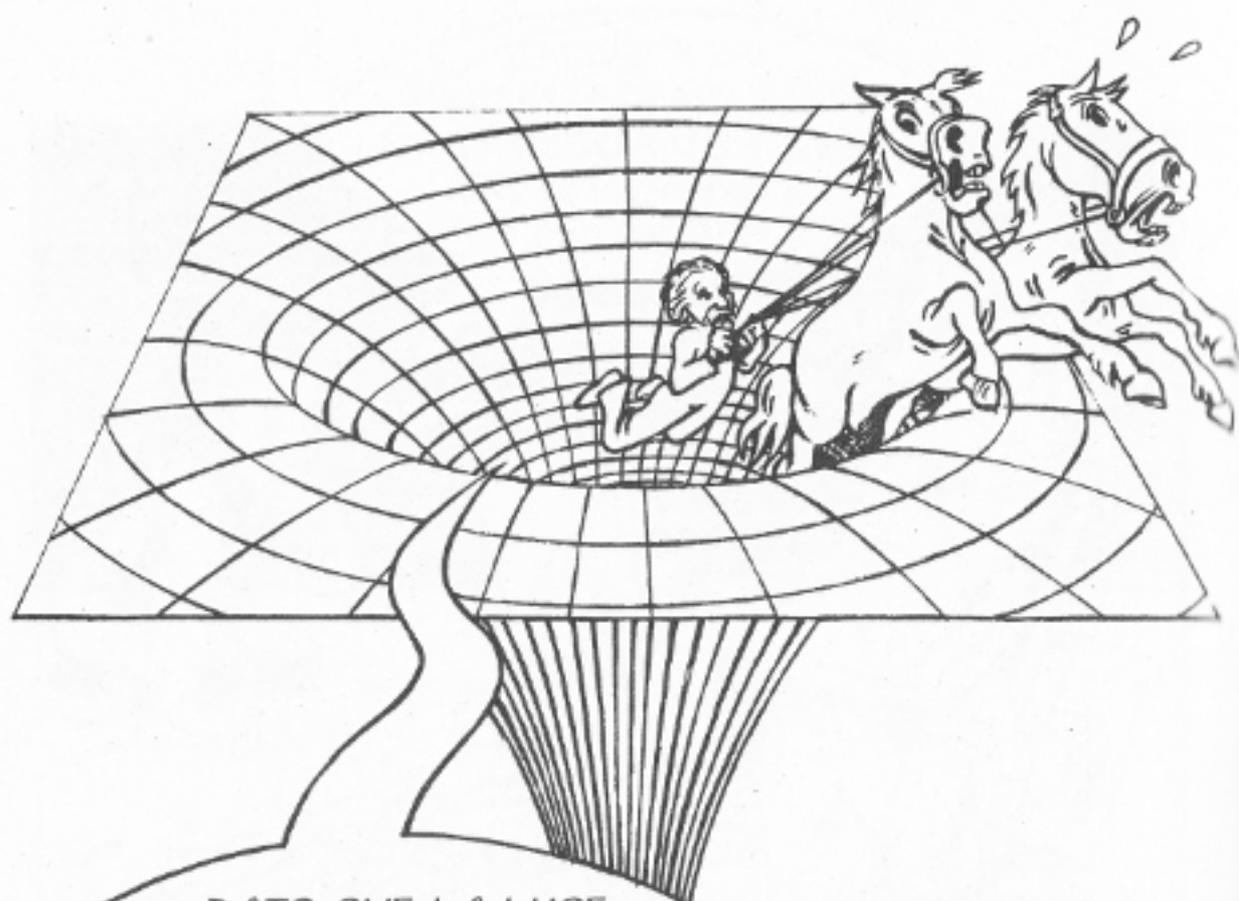


L'eclissi doveva verificarsi alle due del pomeriggio del 29 maggio, ma al mattino cadeva una fitta pioggia. Eddington scrisse: "La pioggia è cessata verso mezzogiorno, e verso l'una e trenta... abbiamo iniziato a intravedere il Sole. Dovevamo scattare le nostre fotografie sperando..."



Buchi neri

Per esprimerci in modo semplice, le equazioni di Einstein ci dicono che quanta più materia c'è in una certa regione, tanto più in quella regione lo spaziotempo si **incurva**. Quindi, quanta più materia c'è in quella regione, tanto più difficile sarà per un corpo abbandonarla.



DATO CHE LA LUCE
TRASPORTA ENERGIA,
È RAGIONEVOLE SUPPORRE CHE
POSSA ESISTERE UNA CURVATURA
COSÌ FORTE DA IMPEDIRE
ANCHE ALLA LUCE DI
SCAPPARE...

... QUESTO È UN
BUCO NERO

La prima soluzione a buco nero fu trovata dal matematico tedesco **Karl Schwarzschild** (1873-1916) nel 1916.



Si ritiene che al centro di alcune galassie, inclusa la nostra, vi siano buchi neri incredibilmente massivi, con massa un milione di volte quella del Sole.

L'analogia del telo di gomma

Un modo più semplice di pensare alle onde gravitazionali è paragonarle a un telo di gomma tirato.



Allo stesso modo, le onde gravitazionali si diffonderanno in tutte le direzioni attorno alla massa scossa.



La debolezza della gravità

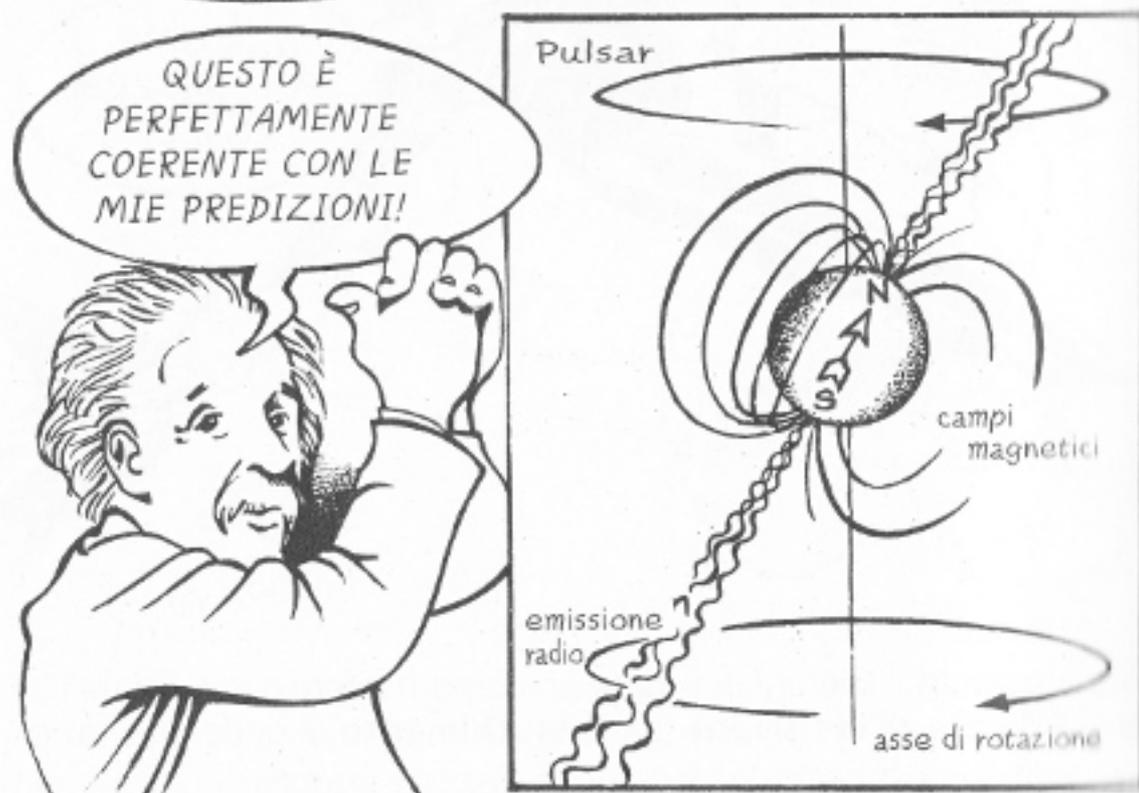
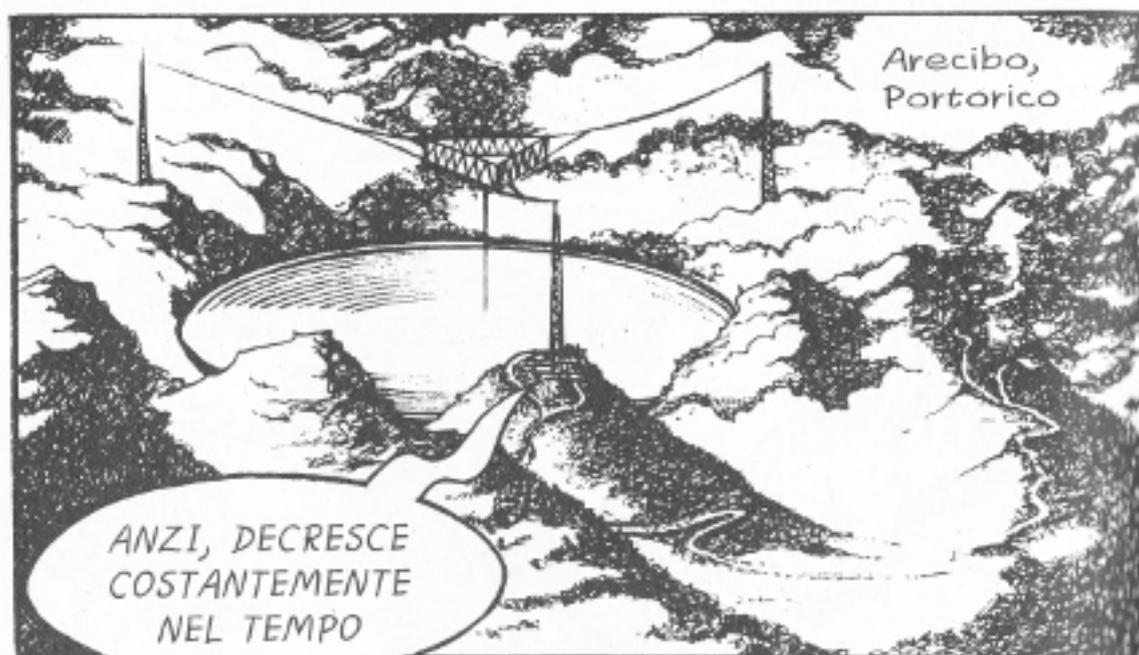
Poiché però la costante di Newton G è così modesta, queste onde gravitazionali sono incredibilmente deboli, pur esistendo.

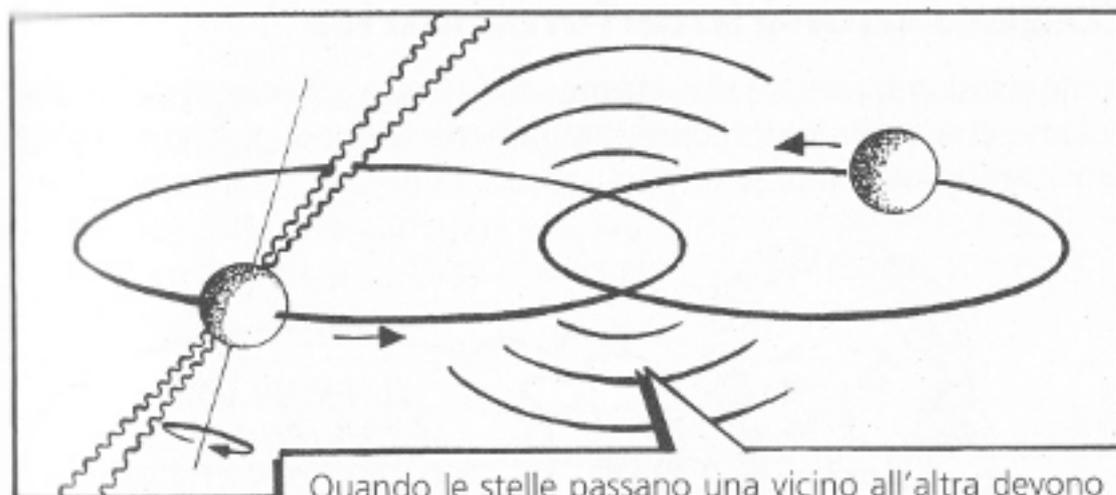


Bene, la luce trasporta energia; infatti, sulla spiaggia ci si scotta!

A caccia di stelle

La migliore evidenza che oggi possediamo delle onde gravitazionali viene dall'osservazione di una coppia di stelle, divenute ormai celebri, che orbitano una attorno all'altra: il sistema binario chiamato PSR 1913+16. Accurate osservazioni condotte per oltre 25 anni hanno mostrato che il periodo dell'orbita non è costante, proprio come il perielio di Mercurio.





Quando le stelle passano una vicino all'altra devono emettere una gran quantità di radiazione gravitazionale, rallentando così l'orbita.

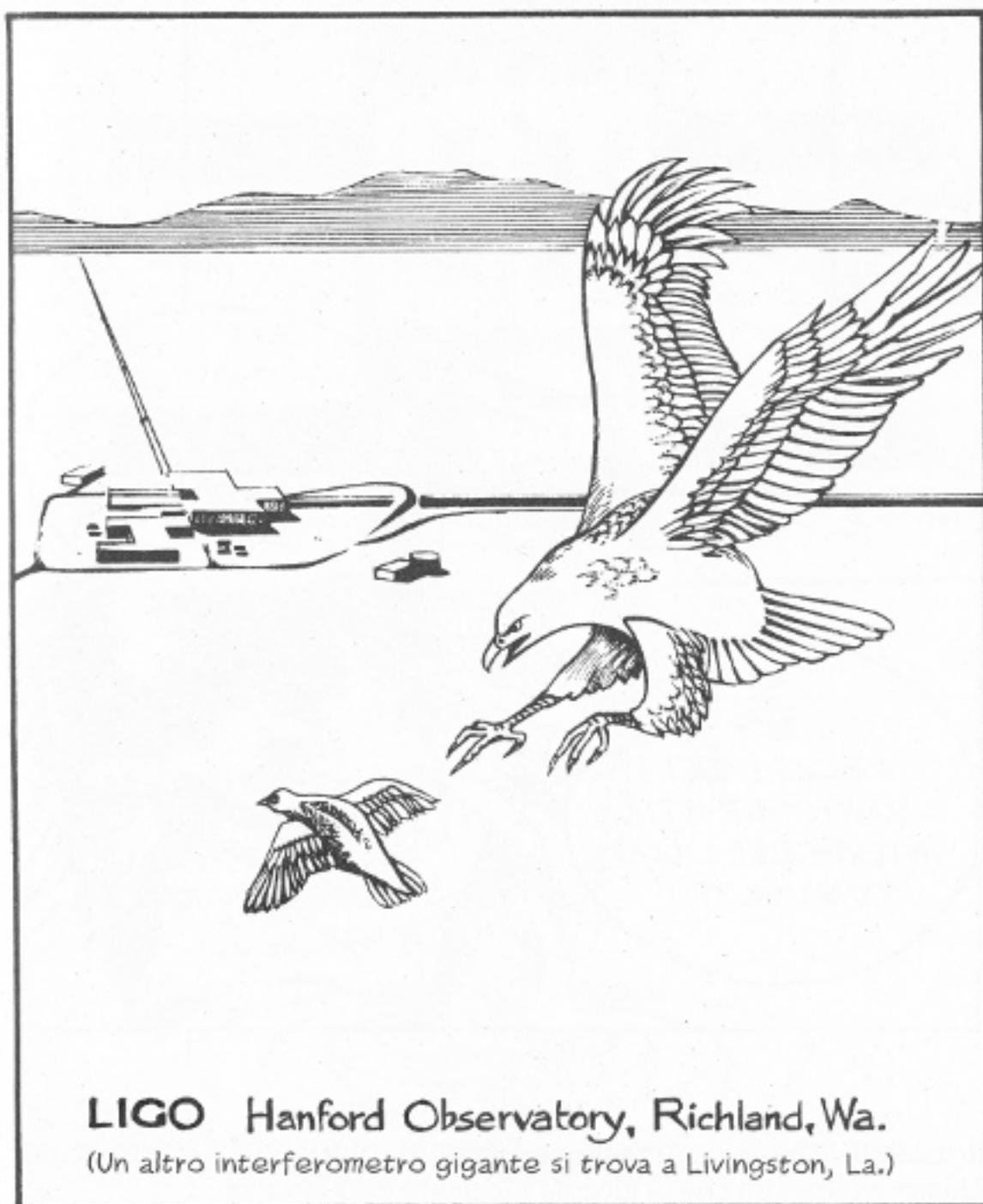
Per il loro lavoro **Russell A. Hulse** e **Joseph H. Taylor** vinsero nel 1993 il Nobel per la fisica, avendo fornito un elegante controllo osservativo della RG.

Il rallentamento del periodo dell'orbita del sistema binario potrebbe comunque essere dovuto a qualcos'altro, anche se si ritiene che ciò sia improbabile. Ma l'osservanza del tipico spirito scientifico induce gli scienziati a concordare sul fatto che la prova definitiva dell'esistenza delle onde gravitazionali richieda la loro rilevazione diretta.



L'inizio del XXI secolo dovrebbe portare, se le onde gravitazionali esistono, a un risultato positivo, sfruttando direttamente il fatto che tali onde dovrebbero stirare e comprimere lo spaziotempo.

Una nuova generazione di telescopi gravitazionali è stata appena completata e presto darà dei risultati. Negli Stati Uniti c'è LIGO (Laser Interferometric Gravitational Observatory). La Gran Bretagna (in collaborazione con la Germania) ha GEO600. C'è poi l'italo-francese VIRGO. Il Giappone ha TAMA. Tutti questi sistemi, molto costosi, si basano su interferometri laser.

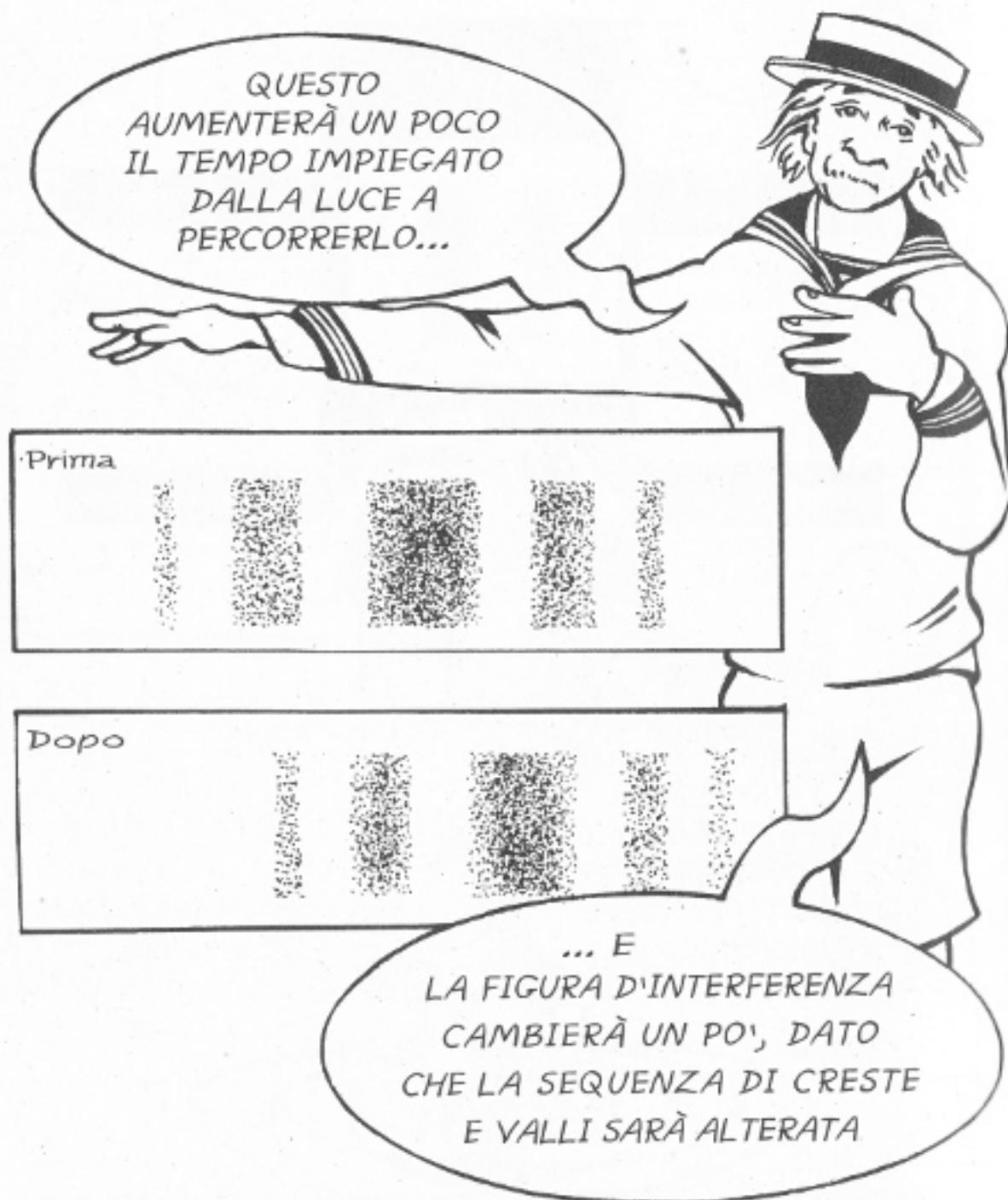


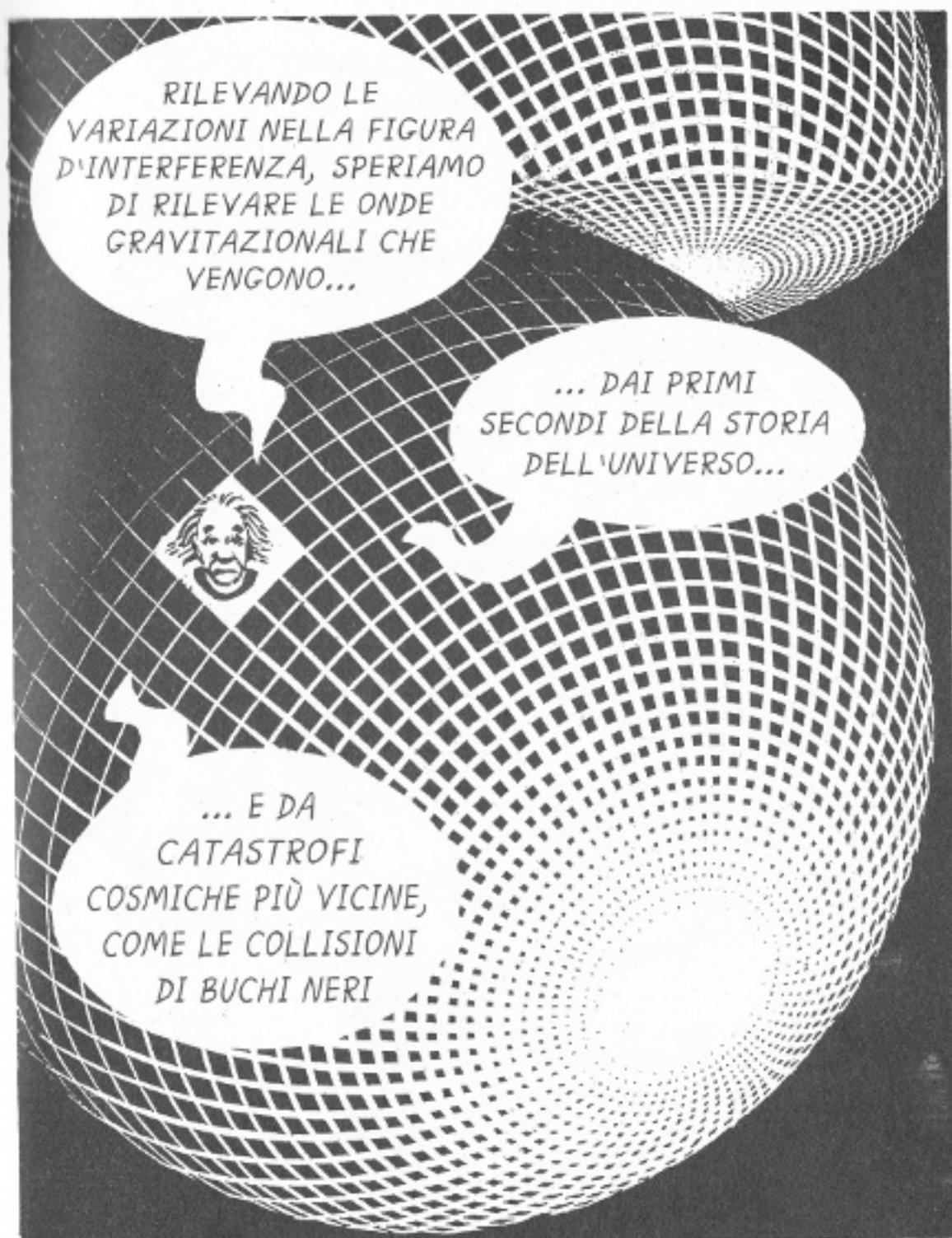
LIGO Hanford Observatory, Richland, Wa.

(Un altro interferometro gigante si trova a Livingston, La.)

Figure d'interferenza

Quale idea c'è dietro l'uso di un interferometro? Quando passa un'onda gravitazionale che stira un braccio dell'interferometro, il cammino della luce che viaggia lungo di esso prima di essere riflesso dallo specchio è **aumentato**.





RILEVANDO LE
VARIAZIONI NELLA FIGURA
D'INTERFERENZA, SPERIAMO
DI RILEVARE LE ONDE
GRAVITAZIONALI CHE
VENGONO...

... DAI PRIMI
SECONDI DELLA STORIA
DELL'UNIVERSO...

... E DA
CATASTROFI
COSMICHE PIÙ VICINE,
COME LE COLLISIONI
DI BUCHI NERI

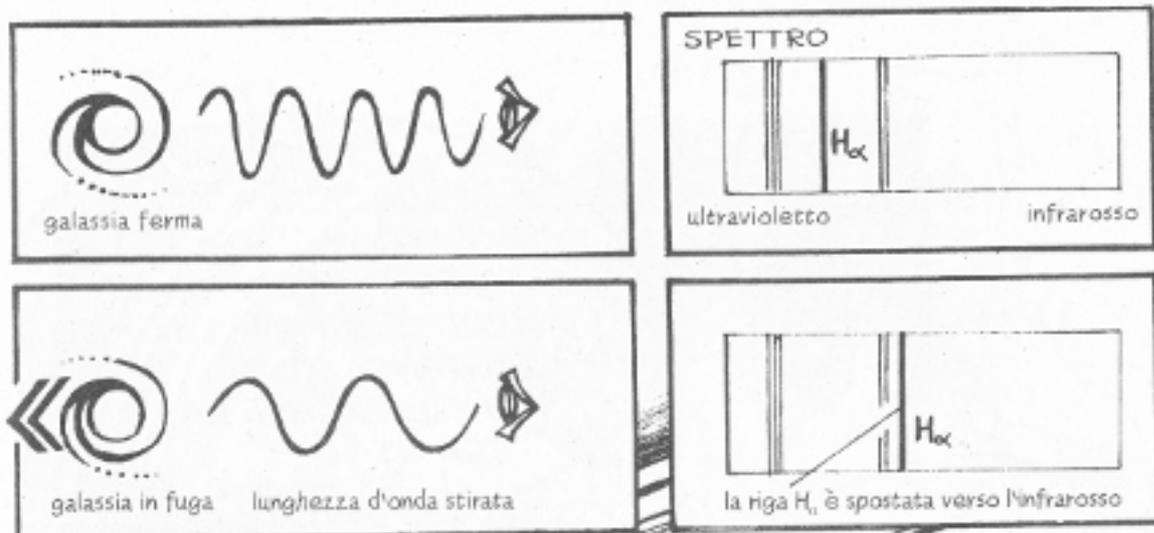
Buchi neri e onde gravitazionali sono predizioni esaltanti che si controllano a scale relativamente piccole. Ma ora soffermiamoci su che cosa avviene a grande scala, quando consideriamo l'universo come un singolo oggetto: cerchiamo, in altri termini, di capire **da dove viene** e **dove va** usando le equazioni di Einstein.

Lo spostamento verso il rosso

Nel 1929 l'astronomo **Edwin Hubble** (1889-1953) scoprì sperimentalmente l'espansione dell'universo osservando che quanto più la luce emessa da una galassia era fioca, tanto più la sua luce virava verso il rosso (*redshift*), verso lunghezze d'onda più lunghe.



Nella luce visibile le frequenze più alte appaiono blu, mentre quelle più basse appaiono rosse. Se un oggetto emette luce mentre si allontana rapidamente dall'osservatore, la luce sembrerà più rossa di quella di un oggetto che non si stia allontanando.



L'universo statico di Einstein

L'osservazione di Hubble rappresentò un punto di svolta cruciale. Einstein capì di aver perso l'occasione di predire che l'universo è in espansione, avendo invece assunto che l'universo **dovesse** essere statico.

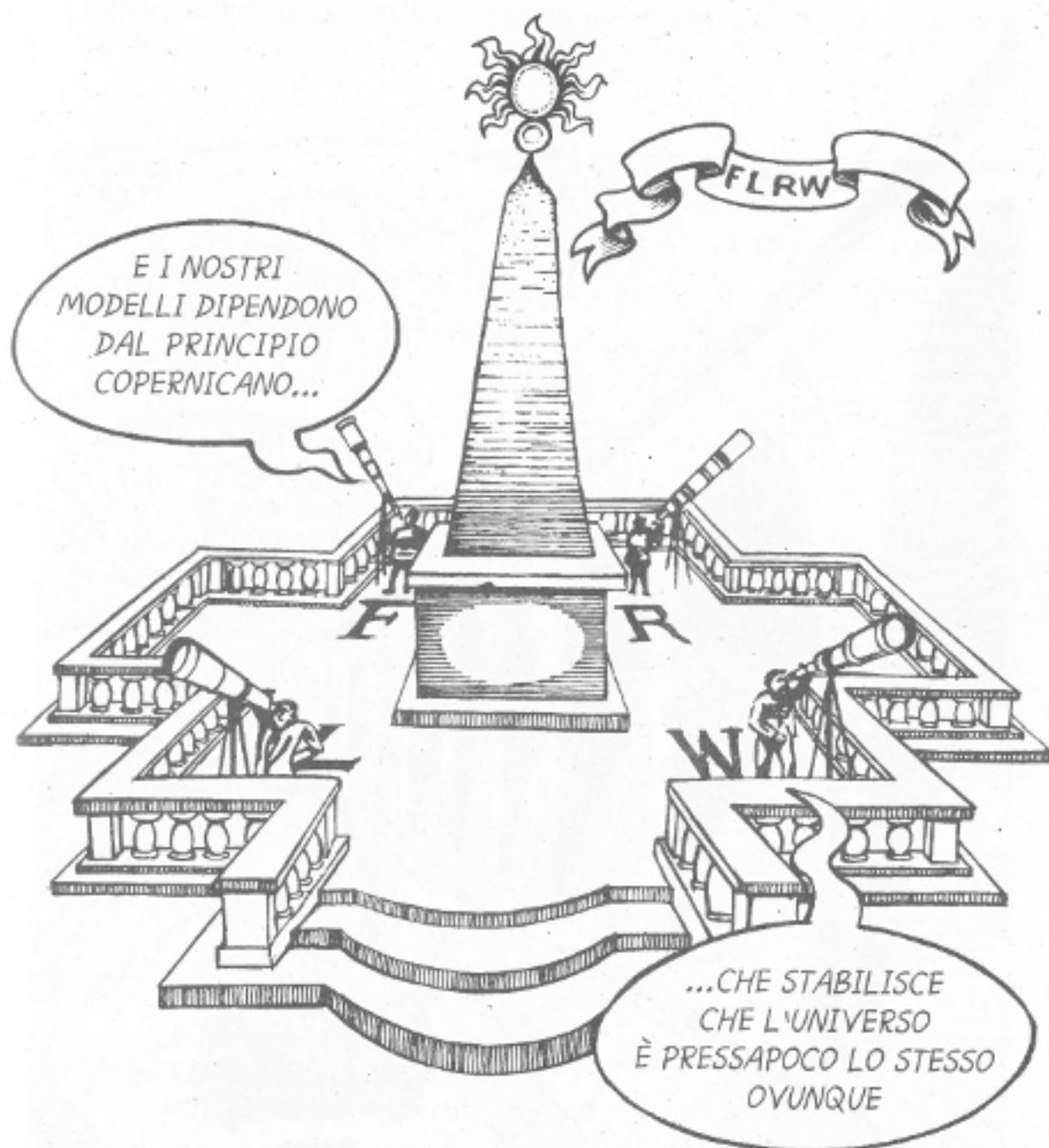


"FLRW"

Poco dopo la sua comparsa, alcuni cosmologi avevano stabilito che la RG obbediva al principio copernicano. Queste "semplificazioni" furono opera di quattro scienziati noti con l'acronimo "FLRW": il russo **Alexandr Fridman** (1888-1925), il sacerdote belga **Georges Lemaitre** (1894-1966), il nordamericano **Howard Percy Robertson** (1903-1961) e il matematico inglese **Arthur G. Walker** (1909-2001).



I modelli FLRW, come sono chiamati, costituiscono oggi la spina dorsale della cosmologia. Tutto quello che potete aver sentito, a livello divulgativo, sulla cosmologia è quasi certamente basato su di essi.



Il principio copernicano è rimasto estremamente difficile da provare, o da confutare, anche se significativi progressi in questo ambito di ricerche potranno essere compiuti nei prossimi anni.

Il destino dell'universo

L'eleganza dei modelli FLRW dipende, in parte, dal fatto che sostanzialmente sono solo tre. Vale a dire, ci sono solo **tre** differenti tipi di soluzioni FLRW alle equazioni di campo di Einstein, tipi identificati dalla loro **curvatura**, che può essere positiva, negativa o nulla. Tutti i modelli iniziano con un "Big Bang"; l'espressione è stata coniata polemicamente dal cosmologo **Sir Fred Hoyle** (1915-2001).



Ma l'evoluzione successiva di ciascun modello FLRW è radicalmente differente, e così pure il destino dell'universo!

La densità critica: primo modello

In questi modelli esiste una "densità critica" di 10^{-29} grammi circa per centimetro cubo, che fa riferimento alla densità di tutti i tipi di materia e di radiazione presi assieme, ossia idrogeno, luce, materia oscura, costante cosmologica, tutto. Al di sopra di questa densità l'universo è finito, i suoi spazi sono sfere tridimensionali o, in altre parole, **hanno curvatura positiva**.



Secondo modello

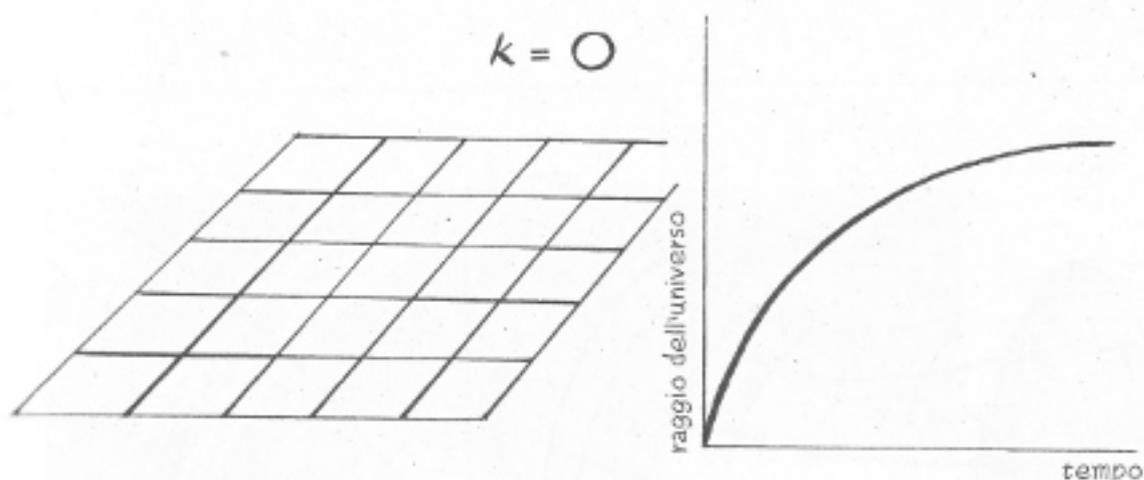
Al di sotto di questa densità critica, l'universo ha, per dirla in modo semplice, più energia cinetica di quella che la forza di gravità può tenere a freno.



In questo caso, l'universo è infinito sia nello spazio sia nel tempo (poiché si allarga per sempre) e gli spazi hanno **curvatura negativa**.

Terzo modello

Esattamente alla densità critica, lo spazio tridimensionale è proprio piatto; è l'analogo di un foglio di carta bidimensionale.



ANCHE SE LA DENSITÀ
CRITICA DI 10^{-29} È
INCREDIBILMENTE PICCOLA,
IL NOSTRO UNIVERSO,
IN MEDIA, VI È MOLTO
VICINO



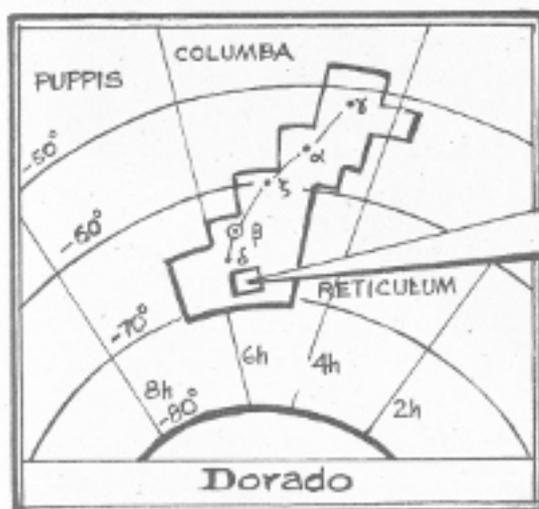
DOVE SIAMO
ESATTAMENTE - SOPRA,
SOTTO O ALLA DENSITÀ
CRITICA - È ANCORA
IGNOTO...

L'universo in accelerazione

Poiché la costante cosmologica può essere repulsiva, essa può agire come materia a pressione negativa, spingendo attivamente le galassie le une via dalle altre. Per contro, quanto più le galassie si allontanano fra loro, tanto più debolmente risentono della gravità delle altre.



Recenti osservazioni di lontane supernove (immani esplosioni cosmiche) sembrano mostrare che esse sono più fioche di quanto ci si aspetterebbe in un universo che non stesse accelerando. Se l'universo ha avuto un'accelerazione, gli oggetti con un certo spostamento verso il rosso sono ancora più lontani rispetto a un universo che non accelera, e quindi appaiono più fiochi.

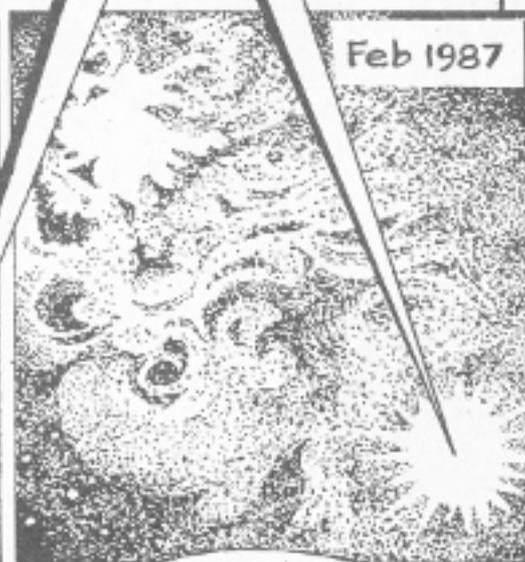


Tarantula Nebula 2070

Supernova 1987A



1987



Feb 1987

CERTO,
È POSSIBILE
CHE LE SUPERNOVE
SIANO PIÙ FIOCHE E CON
UN ELEVATO REDSHIFT
PER QUALCHE RAGIONE
IGNOTA...

... O FORSE
C'È SOLO DELLA POLVERE
CHE NON CONOSCIAMO
CHE LE FA APPARIRE
MENO LUMINOSE



La pressione negativa

In ogni caso, i dati sulle supernove combinati con le osservazioni del fondo cosmico a microonde (CMB), di cui parleremo più avanti, sembrano rendere quasi certa l'esistenza di una grande quantità di "materia" dotata di pressione negativa, tanto da raggiungere probabilmente almeno il 60% della densità di energia totale dell'universo. Si noti che questa energia *non* è la stessa cosa dell'antimateria di Dirac.



Questa grande quantità di energia negativa non è l'unico importante "mistero" circa il materiale cosmico. Da diversi decenni sappiamo pure che le galassie appaiono ruotare in modo scorretto.

NGC 2997

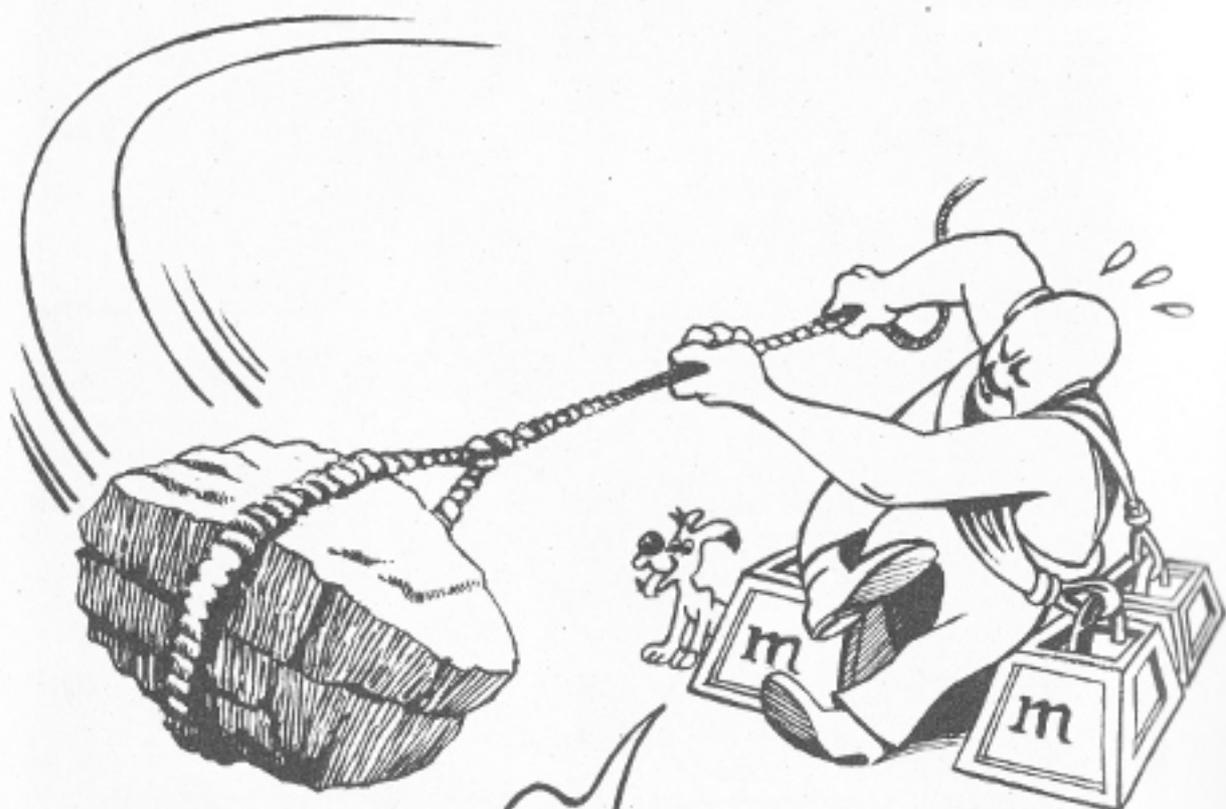


SE
SI GUARDA
LA VELOCITÀ
DI ROTAZIONE DELLE
GALASSIE RISPETTO
ALLA DISTANZA
DALL'ASSE
CENTRALE...

... LE STELLE
E I GAS MOLTO LONTANI
DAL CENTRO RUOTANO
MOLTO PIÙ RAPIDAMENTE
DI QUEL CHE CI SI
ASPETTEREBBE

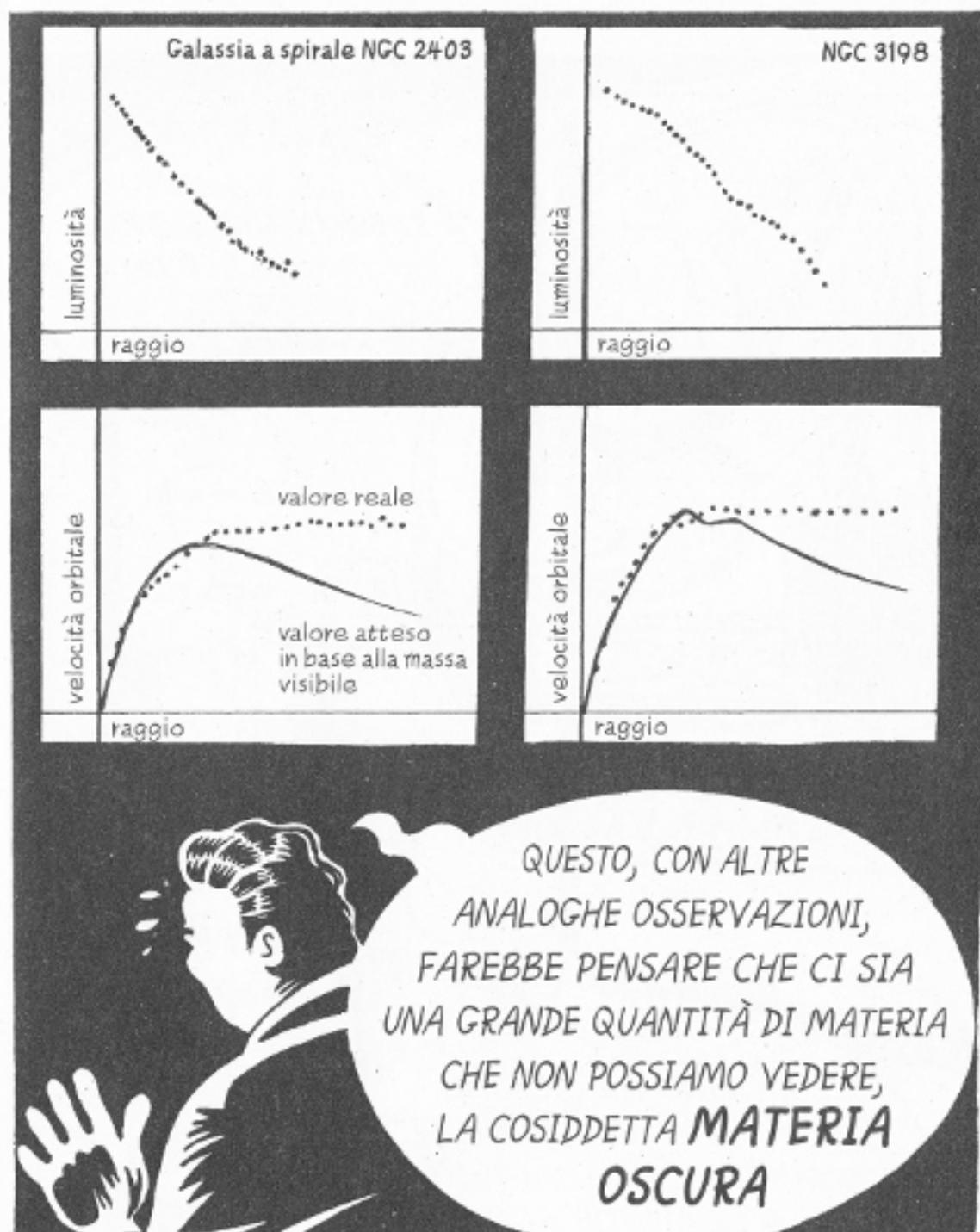
La materia oscura

Possiamo raffigurarci il problema pensando alla gravità come alla forza che mantiene le stelle in un'orbita circolare, come una fune che trattiene una pietra che ruota in cerchio.



BENE,
SE AUMENTI LA VELOCITÀ
DELLE STELLE, TI SERVE UNA
MASSA MAGGIORE NELLA
GALASSIA PER TENERLE
IN QUELL'ORBITA CIRCOLARE
ED EVITARE CHE SFUGGANO
NELLO SPAZIO

Se però stimiamo la massa della galassia in base alla quantità di materia che possiamo vedere, non ce n'è abbastanza per trattenere le stelle sull'orbita circolare alla velocità osservata. Questo è il problema della "curva di rotazione".



Anzi, sembra che almeno il 25% dell'energia dell'universo sia formata da materia oscura, che non è mai stata osservata direttamente!

Ci sono tre possibili candidature che vengono indicate dalla fisica delle particelle, la fisica del molto piccolo.

