

LEDO STEFANINI

UN PARTICOLARE RICORDO DI BRUNO BERTOTTI

- In occasione del ciclo di conferenze L'ECLISSI CHE ILLUMINÒ EINSTEIN, A.A. 2019

LEDO STEFANINI

UN PARTICOLARE RICORDO DI BRUNO BERTOTTI

1. CENNI BIOGRAFICI

Bruno Bertotti fu uno degli artefici della rinascita della Relatività Generale negli anni '60. Dopo la laurea, grazie ad una borsa di studio, negli anni 1958-59, trascorse un periodo all'*Institute for Advanced Studies* di Princeton, dove fino al '55 aveva lavorato Einstein. Negli anni '60 Bertotti studiò a Dublino, dove fu allievo di Erwin Schrödinger. Risale a quegli anni la sua dedizione agli studi di cosmologia e relatività generale, che lo condusse a produrre importanti contributi sia sul piano teorico che sperimentale.¹

Il suo contributo più noto è una particolare soluzione delle equazioni di Einstein, detta *metrica di Bertotti-Robinson*. Ha inoltre sviluppato con Julian Barbour la *tecnica di best matching* per derivare le equazioni gravitazionali direttamente da misure astronomiche. Negli anni '70 fu invitato a contribuire al primo volume della «Encyclopaedia of Ignorance» sui misteri irrisolti della cosmologia (Pergamon Press, 1977), con un capitolo su «The Riddles of Gravitation», ossia gli enigmi della gravitazione.

Nel 1978, in occasione del centenario della nascita di Einstein, fu chiamato da Mario Pantaleo a contribuire ad una grandiosa opera collettanea sulla fisica moderna a cui contribuirono Peter G. Bergmann, Christian Moller, Hermann Bondi, Pascual Jordan, Dimitri Ivanenko, Irwin Shapiro, Edoardo Amaldi, che appartenevano ai livelli più alti della fisica mondiale.²

Nel 1990 e 2003, assieme a Paolo Farinella e David Vokrouhlicky, fu autore di un compendio fondamentale sui problemi connessi all'equilibrio del sistema solare e dell'universo.³

Bertotti ebbe un ruolo di primo piano nelle esplorazioni planetarie e in particolare nell'esperimento effettuato con la sonda Cassini nel 2002, che rappresenta tuttora la verifica sperimentale più accurata della teoria della relatività generale.⁴

2. ALCUNE CONSIDERAZIONI SU «THE RIDDLES OF GRAVITATION»

Che Bruno Bertotti sia stato anche un attento lettore dell'opera di Kuhn *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, uscita in prima edizione nel 1962, lo rivela l'*incipit* dell'articolo: «Il catalogo della nostra ignoranza ha due porte», degno di un raffinato romanziere. Un'osservazione particolarmente calzante nel caso della teoria della gravitazione, che gode del singolare privilegio di essere stata ipotizzata e risolta nello stesso tempo. Due secoli di successi della teoria della gravitazione di Newton ne hanno fatto un edificio nel quale è molto difficile trovare una porta

¹ B. BERTOTTI, D.R. BRILL and R. KROTKOV, *Experiments on gravitation*, in *Gravitation: An Introduction to Current Research*, a cura di L. Witten, New York, London, Wiley 1962, pp. 1-48. *Experimental Gravitation* in *Proceedings of Course 56 of the International School of Physics 'Enrico Fermi'*, a cura di B. Bertotti, London-New York, Academic Press 1974, *Proceedings of the International Meeting on Experimental Gravitation*, a cura di B. Bertotti, Roma, Accademia Nazionale dei Lincei 1977.

² *Astrofisica e cosmologia, gravitazione, quanti e relatività negli sviluppi del pensiero scientifico di Albert Einstein*, a cura di M. Pantaleo, Giunti-Barbera 1979.

³ B. BERTOTTI, P. FARINELLA, D. VOKROUHLICKY, *Physics of the Solar System: Dynamics and Evolution, Space Physics and Spacetime Structure*, Netherland, Springer 2003.

⁴ B. BERTOTTI, L. IESS, P. TORTORA, *A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft*, «Nature», 425, 2003, pp. 374-376.

d'ingresso attraverso la quale andare alla ricerca di 'nuovi enigmi'. Di grande interesse è la porta d'ingresso dell'ignoranza che porta alla formazione della consapevolezza di una nuova 'area di ignoranza', dai confini precisi e definiti, che Bertotti assimila alla nascita di un bambino in una famiglia. In questo senso fa appello ad una sorta di socratica maieutica l'attività dello scienziato, sia teorico che sperimentale, che si ostina a ricercare crepe nella ferrea solidità delle teorie affermate. Tra gli enigmi del passato cita quello risolto dalla fisica aristotelica che pone in relazione il su e il giù con l'impossibilità del vuoto. Con la legge di gravitazione universale di Newton, fa il suo ingresso un nuovo enigma: quello dell'azione istantanea a distanza, che tanto ha influenzato anche la strutturazione teorica dell'elettromagnetismo. Alla fine ne emerse la moderna teoria dei campi: un corpo genera nello spazio una grandezza astratta non direttamente osservabile, che determina la forza agente su una particella esploratrice. Pertanto l'elettromagnetismo rappresenta il riempimento dell'area di ignoranza aperta dall'enigma dell'azione a distanza.

La Teoria della Relatività Generale di Einstein consisteva nella riduzione della teoria della gravitazione a geometria: il mondo come varietà quadridimensionale di Riemann e la forza di gravità è una manifestazione della curvatura della varietà stessa. Di grande successo della teoria di Einstein è derivato quello che Bertotti chiama «l'enigma della semplicità». Da quel grande ha avuto inizio un filone di ricerca che consiste nella ricerca di nuove strutture matematiche astratte alle quali, solamente a posteriori, si cerca di attribuire un'interpretazione fisica. Al tempo in cui Bertotti scriveva – e ancora oggi – l'enigma della semplicità geometrica è un grande stimolatore dell'ingegnosità dei fisici teorici.

La teoria di Einstein è anche vettore di un nuovo, fondamentale, enigma: quello del «tempo proprio», che definisce la separazione tra due eventi. È definito come la grandezza che si misura con un «buon orologio», un concetto dietro il quale si nasconde una profonda contraddizione già indicata da Mach nella sua *La Meccanica nel suo sviluppo storico-critico*; il fatto che anche il funzionamento dell'orologio dipende dal valore delle costanti universali. A questo proposito cita le ricerche dell'astronomo Van Flandern che, a metà degli anni '70, asseriva di aver trovato evidenze sperimentali di variazioni nel valore della costante di gravitazione universale. Comunque, alcuni anni dopo, Van Flander stesso, sulla base di più accurate misure, dovette riconoscere l'inesattezza delle sue conclusioni.

Il problema dei problemi circa la gravitazione era già stato sollevato da Mach nell'opera citata. Le equazioni della dinamica valgono solo in una particolare classe di sistemi di riferimento; i sistemi inerziali, immuni dalle forze apparenti: centrifuga e di Coriolis. È quindi necessario poter definire ed essere in grado di misurare l'accelerazione e la rotazione 'assoluta' del sistema di riferimento nel quale ambientiamo i fenomeni. La definizione di accelerazione e rotazione assoluta è tuttora un fondamentale problema connesso con quello che è noto come "Principio di Mach", in base al quale l'inerzia di un corpo è il risultato dell'interazione con il resto dell'universo. Nel 1995 Bertotti riprese la questione della determinazione della velocità angolare 'assoluta' della Terra in un contributo scritto per un convegno di fisici tenutosi a Mantova.⁵ In questo indicava due maniere indipendenti per la determinazione di tale grandezza: il metodo cinematico, basato sull'osservazione diretta delle quasar; e il metodo dinamico, basato sulla misura del comportamento dinamico dei corpi prossimi alla Terra, come, ad esempio, la Luna. A distanza di un quarto di secolo da quelle previsioni, il problema posto da Mach non è ancora stato risolto.

⁵ B. BERTOTTI, L. STEFANINI, *Accelerazione e rotazione in Le grandezze fisiche e la loro misura*, a cura di G. Giuliani, La Goliardica Pavese 1995, pp. 179-196.

ENCICLOPEDIA DELL'IGNORANZA (1978)

THE ENCYCLOPAEDIA OF IGNORANCE Vol. 1, Physical Sciences
Edited by Ronald Duncan and Miranda Weston-Smith, Pergamon Press, 1977.

GLI ENIGMI DELLA GRAVITAZIONE

BRUNO BERTOTTI, Professore di Meccanica Quantistica presso l'Università di Pavia.

Ha lavorato sotto la supervisione di E. Schrödinger nell'«Institute for Advanced Studies» di Dublino. È stato a lungo attivo circa il contributo che la scienza e gli scienziati possono dare al disarmo e membro della «Pugwash Conference on Science and World Affairs».

I suoi interessi scientifici coprono la teoria della gravitazione, la fisica dei plasmi e la fisica spaziale. Negli ultimi anni ha sviluppato un particolare interesse nella rilevazione delle onde gravitazionali e nell'uso delle missioni spaziali per la misura del campo gravitazionale del Sole.

1. PECULIARITÀ DELLA GRAVITAZIONE NELLA STORIA DELLA SCIENZA

Il catalogo della nostra ignoranza ha due porte, e non una sola: vi è ovviamente la porta di uscita, attraverso la quale le domande che hanno ricevuto risposta e hanno ricevuto sistemazione dagli sviluppi sperimentali e teorici escono e scompaiono dentro i manuali e le applicazioni; ma vi è anche una più importante, sebbene meno evidente, 'porta di ingresso', attraverso la quale 'nuovi' enigmi entrano nella vita del mondo scientifico. Infatti, è un'importante componente della storia della scienza (sottolineata, per esempio, nel libro di T.S. Kuhn, *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*): che molto spesso i problemi posti ad una comunità scientifica in un dato tempo siano stati considerati dapprima risolti o irrilevanti; e questo processo di crescente ignoranza di solito si accompagna ad una grande resistenza, in quanto richiede l'abbandono di ben radicate certezze e di metodi formali efficaci.

Dopo che una nuova area di ignoranza è stata accettata e definita, il suo graduale riempimento costituisce quasi un processo normale, nel quale la solita interazione fra teoria ed esperimenti, fra ipotesi e verifica, impegna una fiorente comunità scientifica; ma la comparsa di un nuovo enigma è un passo molto delicato e imprevedibile, come la nascita di un bambino in una famiglia: genera confusione e smarrimento nei suoi progetti ed apre la strada a sviluppi interamente nuovi. Questa fase merita particolare attenzione: è importante sapere perché alcuni luoghi più di altri nel modello stabilito di conoscenza scientifica è opportuno rompere per aprire una faglia all'interno di un nuovo enigma: e perché ciò richieda talvolta tanto tempo prima che l'enigma divenga realmente fecondo.

Desidero sostenere che lo studio della gravitazione è stato utile nel passato, ed è probabile che lo sarà in futuro, come 'ostetrica' per la nascita di nuovi enigmi nelle scienze fisiche. Possiamo riportare almeno tre esempi del passato di una caratteristica della gravitazione che ha dato il via ad uno sviluppo di finalità molto più ampie e di conseguenze in altre discipline. Se questo più avanzato livello del nostro campo porterà simili frutti in futuro, non sappiamo con certezza; ma è importante mettere in evidenza quei problemi irrisolti della gravitazione che possono dare origine a possibili nuove prospettive. Vedremo che, nonostante la precisa struttura formale e il presente eccellente accordo con gli esperimenti, la teoria della gravitazione propone domande così profonde da giustificare la denominazione di «enigmi».

2. GLI ENIGMI GRAVITAZIONALI DEL PASSATO

Il primo tentativo di una teoria dinamica risale ad Aristotele, che distingue due tipi di moto, quello che non ha una causa intrinseca (non-naturale), come il lancio di una freccia, e quello che si

può comprendere dalla natura dei corpi (moto naturale). Ciascun corpo tende ad andare nel suo luogo naturale e ci andrà se non ne è impedito. Esempio base di moto naturale è la caduta sotto l'azione della gravità: i corpi pesanti, come le pietre, appartengono alla terra e hanno tendenza a raggiungerla; l'aria e le fiamme appartengono al cielo e tendono ad andare in su. Il concetto di moto naturale viene esteso ai corpi celesti, quantunque non abbiano niente a che fare, nella sua concezione, con la gravitazione. L'esperienza ristretta e basilare di caduta libera ha suggerito il concetto che si assume essere una proprietà universale dei corpi e si applica all'intera filosofia della natura: ciascun corpo ha uno stato 'naturale' e tende ad evolvere verso di esso. Questa interpretazione della caduta libera è all'origine di un profondo enigma: che cosa sono 'su' e 'giù', dopo tutto? Il conflitto cui diede origine fu molto fecondo. Per esempio, Aristotele nella sua Fisica osserva che nel vuoto non ci può essere nessuna direzione privilegiata del moto ('su' e 'giù' si possono definire solo in relazione ad un corpo di riferimento); quindi conclude che lo spazio non può essere vuoto, poiché non consentirebbe il moto naturale.

Dobbiamo a Newton l'idea di una legge comune che governa sia la caduta dei corpi che i moti celesti (1687) ed è basata su una «forza di attrazione gravitazionale» fra due masse puntiformi, inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Ebbe un enorme successo ed anche oggi costituisce la base delle previsioni straordinariamente accurate della meccanica celeste e per la progettazione della navigazione spaziale dei satelliti artificiali; ma ha proposto l'imbarazzante enigma dell'«azione a distanza» (in più precisi termini latini *actio in distans*). Lo stesso Newton era molto perplesso su questo problema e scrisse: «Che un corpo possa agire su un altro a distanza, attraverso il vuoto, senza la mediazione di nient'altro [...] è per me un'assurdità tanto grande che credo che nessun uomo, dotato di facoltà di pensiero filosofico, possa prestarvi fede.» A dispetto di questo enigma, nel diciottesimo secolo il cattivo esempio della gravitazione di diffuse ed altri importanti esempi di *actio in distans* vennero trovati nell'elettrologia e nel magnetismo. Gli scienziati cercarono a lungo di salvare ogni cosa con l'introduzione di complessi e inosservabili mezzi eterei, che avrebbero trasmesso l'azione da un punto all'altro con velocità finita; ma alla fine emerse la moderna teoria dei campi, secondo la quale un corpo genera nello spazio circostante una grandezza astratta, matematicamente definita per ogni evento; questa grandezza – uno scalare, un vettore, un tensore, ecc. – non è direttamente osservabile, ma determina la forza agente su una particella di prova. L'enigma ha svolto la sua funzione: l'area di ignoranza aperta alla ricerca è stata essenzialmente riempita dall'elettromagnetismo e le teorie connesse.

3. L'ENIGMA DELLA SEMPLICITÀ GEOMETRICA

Il successivo, fondamentale avanzamento fu opera di Einstein (*Teoria della Relatività Generale*, 1915) e consisteva nella riduzione della teoria della gravitazione a geometria: il mondo è una varietà quadridimensionale di Riemann, nella quale la separazione fra due eventi vicini si può misurare con orologi precisi.

Nella varietà vengono definite linee privilegiate, come quelle che collegano due eventi con il cammino più breve (o più lungo); queste linee sono le possibili traiettorie delle particelle esploratrici. La forza di gravità è nascosta nella struttura geometrica della varietà ed è descritta quantitativamente dalla sua curvatura. Come la teoria di Newton, quella di Einstein ebbe un grande e inaspettato successo: piccole deviazioni dalla legge del moto di Newton furono previste e verificate con buona accuratezza (pochi percento) in un grande numero di esperimenti. La sua semplicità e bellezza concettuale hanno stabilito un termine di confronto che non è mai stato raggiunto da altre teorie fisiche, come si potrà vedere qui nel seguito. Tutte le grandezze fisiche hanno un significato geometrico e si possono misurare indipendentemente con orologi precisi. Le leggi dinamiche per il moto dei corpi non richiedono di essere postulate separatamente dalle equazioni di campo che determinano la struttura geometrica della varietà, ma sono conseguenza di questa; un sistema di postulati molto più semplici che, per esempio, nella teoria dell'elettromagnetismo, dove si può, in linea di principio, cambiare la legge del moto senza cambiare il campo. La grande libertà nella costruzione delle possibili equazioni dell'ordinaria teoria

dei campi contrasta con la quasi unicità delle equazioni del campo per la gravità, strettamente limitata da vincoli geometrici. Infine, le proprietà topologiche dell'Universo sono, in linea di principio, già incluse nelle leggi fisiche fondamentali: per esempio, che si ritorni nello stesso luogo oppure no, muovendosi sempre in linea retta senza mai deviare, deriva dalla teoria.

Il successo della teoria di Einstein ha prodotto l'«enigma della semplicità»; in particolare, l'enigma della semplicità geometrica: costituisce meraviglia il fatto che l'esiguità del numero di postulati e l'uso di coerenti strutture matematiche costituiscano una chiave universale per l'interpretazione e la modellizzazione dei dati sperimentali. Una diffusa tendenza della ricerca scientifica è iniziata e ha preso forma da questa speranza e consiste nello studio di nuove strutture matematiche astratte e nel tentativo di rivestirle di interpretazioni fisiche, poggiate sull'esperienza solo in quanto legate a proprietà fondamentali. Per citare C. Misner e J. Wheeler (*Annals of Physics*, 2, 525, 1957):

Due visioni della natura della fisica stanno in netto contrasto: (1) Il continuo spazio-temporale serve solo come *arena* per le battaglie di campi e particelle. (2) Non vi è nulla nel mondo se non il vuoto spazio curvo. Materia, carica, elettromagnetismo ed altri campi sono solo manifestazioni della curvatura dello spazio. La fisica è geometria.

Questi tentativi sono stati particolarmente intensi negli anni '40 e '50; uno di questi, guidato dallo stesso Einstein e da E. Schrödinger, condusse alla formulazione di una nuova teoria geometrica, che include sia l'elettromagnetismo che la gravitazione. Così, gli scienziati pensarono che l'elettromagnetismo classico fosse inferiore alla teoria della gravitazione, in quanto raggiungeva un livello più superficiale di 'realtà'. La maggior parte di questi tentativi sono miseramente falliti e molti fisici furono indotti a fare maggiore affidamento sugli indizi sperimentali che sul valore estetico nella costruzione di nuove teorie. L'enigma della semplicità geometrica – la speranza di comprendere su base matematiche perché il mondo è com'è – è ancora lontano dal compimento e svolge la sua funzione di stimolare l'ingegnosità dei fisici teorici.

4. L' ENIGMA DEL TEMPO PROPRIO

La teoria della gravitazione di Einstein è basata su un concetto matematico – il tempo proprio – che viene usato per definire la separazione invariante tra due eventi. Ogni altro concetto fisico nella teoria si può derivare da questo: gli intervalli spaziali, la geodetica caratteristica delle linee d'universo dei corpi in moto libero, il campo gravitazionale descritto dalla curvatura della varietà di Riemann, e così via. Allo scopo di misurarlo si usa un 'buon orologio', di solito inteso come il migliore disponibile sul mercato per quanto concerne accuratezza e stabilità; ma questo nasconde una profonda contraddizione, già indicata da E. Mach (*La Meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Boringhieri, 1968, pp. 241-42.):

È completamente oltre il nostro potere misurare i cambiamenti dei corpi nel tempo. Al contrario, il tempo è un'astrazione, alla quale arriviamo proprio attraverso la constatazione del mutamento delle cose [...]. Un moto può essere uniforme solo in rapporto ad un altro. Il problema se un moto sia uniforme in sé è privo di significato. Allo stesso modo non si può parlare di "tempo assoluto" (indipendente da ogni mutamento). Questo tempo assoluto non si può misurare per confronto con nessun moto, e perciò non ha alcun valore né pratico né scientifico. Nessuno può pretendere di sapere alcunché al riguardo. Si tratta di un inutile concetto metafisico.

Il circolo vizioso risulta evidente nella teoria di Einstein: ci vuole un orologio per studiare la caduta libera, quindi anche le leggi della dinamica sulle quali è basato il suo funzionamento. Per le più avanzate applicazioni gli scienziati oggi usano orologi atomici basati sulla 'struttura iperfina' delle linee spettrali: il loro 'ticchettare' è dato dalla frequenza di interazione fra uno spin elettronico ed uno spin nucleare in un atomo di cesio o di idrogeno.

Questa frequenza è espressa in termini di costanti fondamentali da

$$\frac{m_p e^4}{h^3} \frac{m_e}{m_p} \left(\frac{e^2}{hc} \right)^2,$$

dove h è la costante di Planck, e la carica dell'elettrone, c la velocità della luce, m_e ed m_p le masse dell'elettrone e del protone, rispettivamente. Il buon funzionamento di un orologio atomico è basato sulla validità dell'elettromagnetismo e della teoria dei quanti in un piccolo dominio; in particolare, quando l'orologio è usato per misurare i campi gravitazionali, si deve assumere che le leggi della dinamica in una piccola regione spaziale non siano influenzate dalla gravità. Questo assunto, noto come 'Principio Forte di Equivalenza' (SEP) ha effetti osservabili ed è stato sottoposto a test sperimentale di buona accuratezza, fornendo così una solida base pratica per la definizione di tempo proprio; ma ci potrebbero essere delle violazioni e, infatti, una importante potrebbe venire dall'analisi del moto lunare condotta da T. Van Flandern (vedi *Scientific American*, Febbraio 1976). Lasciando da parte i dettagli tecnici, sostiene di aver scoperto che la 'costante' gravitazionale G diminuisce rispetto al tempo atomico, con una scala dei tempi paragonabile all'età dell'Universo. Se questo risultato venisse confermato, dovremmo cambiare la teoria di Einstein (per la quale G è rigorosamente costante), oppure dovremmo assumere che una o più costanti fondamentali che compaiono nella formula che abbiamo riportato vadano soggette ad un mutamento cosmologico, forse connesso con l'espansione dell'Universo. In questa alternativa, le leggi della fisica microscopica devono cambiare nel tempo (e probabilmente anche con lo spazio, dato che il cosmo non è uniforme) e non danno più origine ad un buon orologio proprio.

La posizione di Van Flandern si può esprimere anche dicendo semplicemente che il tempo atomico non concorda con il 'tempo gravitazionale', che è come dire, con il tempo misurato dalla rivoluzione di due corpi legati dalla forza di gravità, come la Luna e la Terra; la connessione di questo con l'argomentazione di Mach è chiara, e induce a pensare che il concetto di tempo proprio – un'entità assoluta che sa di metafisica – sia essenzialmente inadatto ad attaccare questi importantissimi aspetti della nostra esperienza. Si dovrebbe cercare una teoria nella quale «tutti gli orologi vengono trattati sullo stesso piede» e viene attribuito significato fisico solo alle loro velocità relative: ci sono 'tempi' diversi ed equivalenti, ciascuno dei quali sia legato a meccanismi di interazione diversi. In condizioni normali, naturalmente, tutti gli orologi (ben funzionanti) concordano con un alto grado di accuratezza e condurrebbero al tempo proprio. La difficoltà è, naturalmente, che siamo capaci di descrivere un'interazione dinamica solo rispetto ad una variabile tempo data 'a priori'. È chiaro che una tale teoria dev'essere molto differente dalla relatività generale; potrebbe essere basata, forse, sul concetto di «invarianza conforme», in base alla quale tutte le varietà di Riemann, differenti solo per un cambio arbitrario della separazione fra due eventi vicini, sono da considerare fisicamente identiche.

A questo punto dovremmo menzionare la profonda relazione fra gli ultimi due 'enigmi': la riduzione della fisica gravitazionale alla geometria e il principio di equivalenza forte (SEP). In una teoria geometrica il moto di quei corpi tanto piccoli e leggeri da non influire sulla struttura dello spazio-tempo, è dato una volta per tutte e non può dipendere dalla loro natura e dalla loro massa: conseguenza della geometria. Questo assunto è chiamato Principio di Equivalenza Debole (WEP). Possiamo dimostrare che una violazione del SEP può implicare una violazione del WEP. Si consideri, per esempio, un corpo esploratore composto di due parti, tenute insieme e molto vicine da una forza che dipende da un potenziale gravitazionale, in contraddizione con il SEP. La sua energia di legame W – l'energia necessaria a separare le due componenti – è perciò anche dipendente dall'energia gravitazionale e cambia da luogo a luogo. La teoria della relatività speciale ci dice che l'energia di legame W contribuisce alla massa m del corpo con il termine $\frac{W}{c^2}$; quindi il lavoro necessario a sollevare il corpo in un campo gravitazionale ha un contributo addizionale dovuto al cambiamento della massa m , più grande per i corpi più fortemente legati. Il moto del corpo dipende allora dal rapporto $\frac{W}{m}$ e non è determinato dalle sole proprietà geometriche.

Il WEP è stato sperimentalmente verificato con un'accuratezza straordinariamente elevata; il che implica un (meno accurato) test del SEP per quelle forze che contribuiscono all'energia di legame.

L'enigma del tempo proprio e quello della semplicità geometrica richiedono altri e migliori esperimenti che forniscano ai teorici indizi e limitazioni. Un importante recente risultato, collegato a questo, è stato ottenuto mediante specchi speciali collocati da astronauti americani sulla Luna: inviando verso di loro un impulso laser di brevissima durata e misurando il tempo intercorso fra andata e ritorno, è possibile ricavare la distanza fra la stazione a Terra e la Luna con la sorprendente accuratezza di meno di 10 cm. Ciò rende possibile controllare sperimentalmente diverse teorie sul moto della Luna e, in particolare, per vedere se un grande corpo celeste soddisfa al WEP, come assunto dalla teoria di Einstein. Il test non ha, finora, rivelato alcuna discrepanza.

5. L' ENIGMA DELL'INERZIA

Nel saggio di Mach *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico* viene sollevata un'altra critica alla dinamica newtoniana che ha gravi conseguenze sulla fisica della gravitazione. Quando nella seconda legge si uguaglia il prodotto della massa per l'accelerazione alla forza, si devono fare precise ipotesi riguardo al sistema di riferimento: la legge è di solito basata sulla base empirica che le lontane galassie siano, in media, a riposo. Tutto ciò funziona molto bene in pratica: determina lo zero della rotazione angolare del nostro sistema di riferimento con un'accuratezza di circa 1" al secolo. Ma solleva il problema teorico, come si potrebbe determinare il sistema di riferimento se le galassie lontane ruotassero in maniera diversa in diverse direzioni e perché influenzano in modo tanto essenziale la dinamica locale?

Questa connessione era infatti acutamente presente nella mente di Einstein quando costruiva la teoria generale della relatività. Vi è una sola entità – il campo metrico – che determina la dinamica e le misure di spazio e di tempo, in particolare il sistema di riferimento; la metrica, a sua volta, dipende dalla distribuzione di materia nell'universo. Nella teoria di Einstein ci si aspetta, per esempio, che la rotazione di uno strato di materia produca al suo interno un mutamento dinamico simile al mutamento prodotto da una rotazione del sistema di riferimento. Questo tipico effetto machiano è infatti conseguenza della teoria della relatività generale (Effetto di trascinamento o *Lense-Thirring effect*). Una grande quantità di lavoro è stata fatta su questa linea; relativamente alla quale dovremmo citare i lavori di D. Sciama, D. Lynden Bell e altri che hanno riformulato le equazioni di campo di Einstein in un modo tale che la distribuzione di materia determini in modo «univoco» la metrica. Nella teoria della relatività generale convenzionale è necessario aggiungere alla distribuzione di materia la prescrizione delle condizioni alle quali la metrica deve soddisfare all'infinito. Queste equivalgono a condizioni arbitrariamente imposte nel sistema di riferimento e costituiscono una caratteristica chiaramente non-machiana della relatività generale.

È stato notato da MacCrea (*Nature* **230**, 95, 1971) che l'adozione della relatività speciale (e *a fortiori*, della generale) riduce drasticamente il problema di Mach. Nella relatività speciale nessun corpo materiale può avere una velocità maggiore di c ; pertanto se l'Universo ha raggio R , la sua massima velocità di rotazione è $\frac{c}{R}$, una quantità straordinariamente piccola. Analogamente, la massima accelerazione che possiamo ammettere è dell'ordine di $\frac{c}{T}$, dove T è l'età dell'Universo. Pertanto, l'assunto che la materia lontana ubbidisca alla relatività speciale implica di assegnare con grande accuratezza il sistema inerziale di riferimento. (In relatività generale la conclusione non è così stringente, ma piuttosto elaborata e sono necessarie alcune ipotesi *ad hoc* per evitarla: per esempio, un campo gravitazionale potrebbe piegare i raggi di luce in modo tale che la materia lontana a riposo appaia in rotazione ad un osservatore locale).

L'accettazione della teoria della relatività, pertanto, significa escludere a priori una spiegazione razionale del più sorprendente ed accurato accordo fra i sistemi di riferimento inerziali "in cui non vi sono forze centrifughe" e lo standard del riposo delle galassie lontane.

Forse questa era una delle ragioni per le quali Mach era riluttante ad accettare la teoria della relatività di Einstein; in questo caso si dovrebbe considerare solo come una (buona) approssimazione che si raggiunge quando si tiene conto del comportamento dinamico dell'Universo e di conseguenza è determinato il sistema di riferimento. L'usuale sequenza di teorie

1. di Newton
2. Relatività Speciale
3. Relatività Generale
4. Relatività Generale machiana

Dovrà forse essere sostituita da

1. di Newton
2. Teoria machiana della gravitazione
3. Relatività Speciale come approssimazione
4. Relatività Generale.

Considerando l'immenso successo della Relatività Speciale e l'assenza di ogni seria sfida durante più di 70 anni, ci vuole un bel coraggio per chiunque voglia percorrere il cammino non ortodosso. Un tentativo rudimentale, ma interessante in questa direzione è stato compiuto di recente da J. Barbour e B. Bertotti (*Nuovo Cimento*, **38B**, 1, 1977). Essi hanno formulato una teoria dinamica di N masse puntiformi nella quale compaiono solo osservabili: una variabile tempo arbitraria e le $\frac{N(N+1)}{2}$ distanze tra di loro; quando le masse sono divise in due gruppi, uno lontano e l'altro di corpi tra loro vicini, si recuperano le equazioni del moto di Newton per corpi gravitanti. Così, da un'opportuna cosmologia segue l'invarianza galileiana.

In un'*Enciclopedia dell'Ignoranza* è certamente appropriato correre il rischio di menzionare un tale inusuale e non convenzionale punto di vista; solo il (lungo) tempo mostrerà la reale profondità di quest'ultimo enigma della gravitazione, posto che lo sia.



Accademia Nazionale Virgiliana
Via dell'Accademia 47, 46100 Mantova
Tel. 0376 320314
info@accademianazionalevirgiliana.org
<http://www.accademianazionalevirgiliana.org>
<https://www.facebook.com/scienzeletterearti/>