
BOLLETTINO UNIONE MATEMATICA ITALIANA

Sezione A – La Matematica nella Società e nella Cultura

SILVIO BERGIA

Il contributo italiano alla relatività

Bollettino dell'Unione Matematica Italiana, Serie 8, Vol. 8-A—La Matematica nella Società e nella Cultura (2005), n.2, p. 261–287.

Unione Matematica Italiana

http://www.bdim.eu/item?id=BUMI_2005_8_8A_2_261_0

L'utilizzo e la stampa di questo documento digitale è consentito liberamente per motivi di ricerca e studio. Non è consentito l'utilizzo dello stesso per motivi commerciali. Tutte le copie di questo documento devono riportare questo avvertimento.

*Articolo digitalizzato nel quadro del programma
bdim (Biblioteca Digitale Italiana di Matematica)
SIMAI & UMI*

<http://www.bdim.eu/>

Il contributo italiano alla relatività.

SILVIO BERGIA

1. – Introduzione.

Numerosi scritti hanno analizzato le reazioni dell'ambiente scientifico italiano al nuovo modo di far fisica che caratterizzava i lavori sulla relatività di Albert Einstein e di autori a lui vicini⁽¹⁾. Non sono certamente mancati studi specifici su contributi di autori italiani alla relatività ristretta (RR)⁽²⁾ e alla costruzione dell'edificio cui si dà il nome di teoria della relatività generale (RG)⁽³⁾, ma globalmente il piatto della bilancia tende a pendere dalla parte del primo tipo di scritti. Qui l'accento cadrà piuttosto sui contenuti di quei contributi. A proposito dei quali sarà il caso di ricordare subito come la scuola matematica italiana dei Ricci Curbastro, Bianchi e Levi Civita, per non ricordare qui che i nomi di coloro che hanno dato l'apporto maggiore, prima dell'edificazione della RG come teoria fisica ne avevano già creato buona parte dei presupposti matematici.

Una seconda osservazione iniziale: si dovrà tener conto della circostanza che non siamo qui *solo* in presenza di una teoria fisica, come codificata in un apparato formale, o magari, come si accennava, di due: le teorie fisiche interagiscono con gli esperimenti; ne costituiscono a volte una sorta di distillato; altre volte si collocano a monte di una linea di sviluppo che alimenta fasi di una sperimentazione di verifica o

⁽¹⁾ Si veda, per la presentazione più completa, il bel libro di Maiocchi [1985].

⁽²⁾ V., in particolare, Cap 2 di Marazzini [1996], Caparrini e Pastrone [1998].

⁽³⁾ Cattani e De Maria [1989a e b], Bertotti [2002].

controllo. E, come risultato di queste interazioni, specie a distanza di un secolo dalla loro formulazione, non si è più in presenza solo di *teorie fisiche*, ma di *capitoli della fisica*, ai quali hanno finito per contribuire in maniera rilevante, non solo sul terreno sperimentale ma anche su quello fisico-matematico, autori spazio-temporalmente anche molto distanti da chi quelle teorie ha inizialmente formulato. Sembra dunque congruo occuparsi qui di questi sviluppi, e quindi di contributi italiani anche parecchio recenti. Si spera, circa questi sviluppi, di poter portare elementi di informazione relativamente nuovi, mentre necessariamente, data la dovizia di studi esistenti, sarà molto più raro che se ne possano portare molti relativamente ad eventi svoltisi nel primo quarto del secolo scorso, rispetto ai quali questo scritto non andrà molto oltre la proposizione di una bibliografia ragionata.

2. – La relatività ristretta nell'articolo di Einstein del 1905, con un cenno agli sviluppi immediatamente successivi.

Non è questa la sede per diffondersi sulle vicende storiche sullo sfondo delle quali si colloca il contributo einsteiniano cui si accenna nel titolo del paragrafo. Sarà sufficiente ricordare il quadro problematico che la fisica si trovava ad affrontare come conseguenza dell'esito negativo degli esperimenti tesi a porre in luce il moto della Terra attraverso l'etere — fondamentale, fra di essi, quello di Michelson e Morley —, cui vari autori, Hendrik Anton Lorentz e Henri Poincaré in primo piano, avevano elaborato una risposta negli anni che vanno, grosso modo, dal 1890 al 1904. In sintesi, si doveva prendere atto che in fisica appare valere, rispetto a ogni classe di fenomeni, un *Principio di relatività*, che, in una visione in cui l'etere conserva ancora la sua ragion d'essere, ne elimina di fatto la posizione di privilegio. Occorreva allora mostrare che la forma delle equazioni di Maxwell, in termini delle quali si deve dar atto di quell'esito, rimane invariata nel passaggio dal sistema di riferimento dell'etere ad un sistema in moto rettilineo uniforme rispetto ad esso. Lorentz si rese conto gradualmente che, se si voleva garantire questo risultato, le regole di trasformazione delle coordinate spazio-temporali non potevano allora rimanere quelle che chiamiamo galileiane. Egli pervenne, nel 1904, alle regole di tra-

sformazione che portano il suo nome, che comportano, in particolare, una specifica trasformazione per la coordinata temporale.

Col suo articolo del 1905 Einstein impresso una svolta all'intera vicenda: come è stato felicemente detto ⁽⁴⁾, egli trasformò un problema (la mancata rivelazione del moto attraverso l'etere) in un postulato — la luce si propaga nel vuoto in ogni sistema inerziale con la stessa velocità c , indipendentemente dalla velocità della sorgente — mentre poi il principio di relatività, un distillato dell'esperienza, per così dire, presso gli autori precedenti, diventava a sua volta un postulato. Su queste basi egli forniva una spiegazione soddisfacente del quadro sperimentale esistente. Non solo, perché quello che presso quegli autori era un punto d'arrivo diventava per lui un punto da cui ripartire, dato che dai postulati, e da alcuni assiomi di carattere generale, la matematica permetteva di ricavare conseguenze espresse in termini di relazioni tra grandezze fisiche verificabili mediante nuovi esperimenti. Fra queste — ricordiamolo — la dilatazione delle durate dei processi, rispetto a quelle riscontrate a riposo, come effetto del moto dello sperimentatore rispetto al sistema di riferimento in cui ha luogo il processo, e una specifica dipendenza della massa dell'elettrone dalla velocità. Un successivo breve articolo di Einstein dello stesso anno recava l'affermazione che «se un corpo emette l'energia E sotto forma di radiazione, la sua massa decresce di E/c^2 » (c è la velocità della luce nel vuoto). Il significato pieno della $E = mc^2$ fu discusso in un suo articolo del 1907. Di grande rilevanza sarebbe risultata la formulazione quadri-dimensionale della teoria, che Hermann Minkowski (1908) elaborò sulla base dell'impostazione che ne aveva dato Henri Poincaré in uno scritto pubblicato nei Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo in quello stesso 1905 in cui era apparso il primo articolo einsteiniano.

Una svolta metodologica, la sostituzione di una metodologia induttiva con una ipotetico-deduttiva, si sarebbe dimostrata feconda. Ma risultava totalmente estranea alla mentalità, al credo epistemologico,

⁽⁴⁾ Ha scritto Antonio Sparzani [2003]: «Egli [Einstein] semplicemente rovesciò la struttura logica della problematica esistente, ponendo assiomaticamente a fondamento della nuova teoria quanto prima andava invece spiegato» [corsivi nel testo]. V. anche Dorato [2004].

di buona parte dei fisici europei e alla quasi totalità degli italiani. È doverosa, a questo proposito, una precisazione: non stiamo qui includendo nella categoria i fisici-matematici. E questo su base sociologica: della fisica matematica si occupavano essenzialmente, se non proprio esclusivamente, i matematici. Ebbene, la formazione dei fisici, nel senso stretto che si è cercato di precisare, era di stampo positivistico. E questa formazione non permetteva di conferire un ruolo legittimo alle «ipotesi», circa le quali essi si attenevano mentalmente volentieri alla ben nota frase di Newton «*hypotheses non fingo*».

3. – I fisici italiani e la relatività (1905-1934)

Buona parte della comunità dei fisici italiani fu quindi pregiudizionalmente ostile alla teoria einsteiniana. Ma mentre i più si limitarono a un giudizio negativo aprioristico, vi fu chi, proprio dall'atteggiamento di base efficacemente analizzato nelle opere citate, fu portato a formulare critiche che risultarono costruttive e che avrebbero messo in moto qualche sviluppo; e, in qualche caso, a condurre esperimenti che, concepiti per confutare ipotesi einsteiniane, ne fornirono in effetti una corroborazione. Ci occuperemo in modo particolare dell'attività di due autori molto noti, Augusto Righi (Bologna 1850 — ivi 1920) e Quirino Majorana⁽⁵⁾ (Catania 1871 — Rieti 1957). Il primo, a parte periodi trascorsi all'Università di Palermo (1850-1855) e a Padova (1885-1889), svolse a Bologna la maggior parte della sua attività; il secondo fu chiamato alla cattedra di fisica a Bologna, vacante dopo la morte di Righi, nel 1921, e vi proseguì la sua attività di ricerca fino al 1954. Non appare questa la sede opportuna per ricordare le loro figure e il ruolo che con la loro opera complessiva hanno avuto nell'ambito della fisica italiana e mondiale⁽⁶⁾, e ci limiteremo dunque a tratteggiarne i contributi specifici al campo qui d'interesse⁽⁷⁾.

⁽⁵⁾ Varrà la pena di ricordare che Ettore Majorana, il notissimo fisico teorico, era figlio di un fratello minore di Quirino.

⁽⁶⁾ Si veda, a proposito di Righi, Dragoni [1990a], Dragoni *et al.* [2004], e, per quanto riguarda Majorana, Dragoni [1990b], Atti *et al.* [1992].

⁽⁷⁾ V., al proposito, Dragoni [1992].

Nel 1918, Righi condusse un'analisi dell'esperimento di Michelson e Morley applicando il principio di Huygens per determinare l'angolo di deviazione prodotto dallo specchio che funge da separatore d'onda nell'interferometro considerato in movimento rispetto all'etere. Il calcolo mostrava allora che ruotando l'apparato di 90 gradi — come si fa nel corso dell'esperimento in vista di osservare uno spostamento delle frange d'interferenza dovuto unicamente alla diversa velocità di propagazione lungo i due bracci dell'apparato — non si dovrebbe produrre alcun effetto. Ritenne così di aver spiegato l'esito nullo dell'esperimento senza dover far ricorso alla contrazione ipotizzata da Lorentz né tanto meno ai principi della teoria einsteiniana. Il risultato dipendeva tuttavia strettamente dall'assunzione che gli specchi riflettenti usati nell'interferometro fossero rigorosamente orientati a 90° l'uno rispetto all'altro. Come egli d'altra parte sapeva, chi opera con un interferometro di Michelson è obbligato — se vuole osservare il fenomeno — a ruotare, sia pure di pochissimo, uno specchio rispetto all'altro. In una memoria dell'anno seguente Righi adeguò i suoi calcoli a questa situazione realistica. Il calcolo mostrava allora che l'effetto di spostamento di frange previsto dalla teoria dell'etere di Fresnel doveva sussistere nella misura prevista: per spiegare l'esito nullo dell'esperimento bisognava dunque «adottare la moderna teoria della Relatività, o l'ipotesi della contrazione longitudinale dei corpi che si muovono attraverso l'etere, o ricorrere a qualche altra ipotesi più o meno artificiosa». Con questi studi Righi aggiungeva una tessera al mosaico di studi rilevanti condotti a seguito dell'esperimento ⁽⁸⁾.

Majorana — come del resto, lo si è detto, buona parte dei fisici italiani dell'epoca — era notoriamente ostile alla relatività, in particolare al secondo postulato einsteiniano. Concepì quindi per tempo l'idea di sottoporlo a controllo sperimentale, o per lo meno sottoporre a controllo l'implicazione che esso contiene dell'indipendenza della velocità della luce nel vuoto da quella della sorgente. In questo senso, al postulato einsteiniano si contrapponeva drasticamente l'ipotesi bali-

⁽⁸⁾ Per questa rapida analisi mi sono basato su Marazzini [1996], p. 84 segg., e su Dragoni [1992].

stica, avanzata nel 1908 dal fisico svizzero W. Ritz, secondo la quale la velocità della luce sarebbe fissata rispetto alla sorgente. Uno specchio in movimento sul quale far riflettere un raggio luminoso costituirebbe una tale sorgente rispetto al sistema del laboratorio. Per il primo esperimento, eseguito in aria e non nel vuoto, i cui risultati furono pubblicati nel 1916, Majorana utilizzò specchi disposti a raggiera su un dispositivo rotante (vedi fig. 1⁽⁹⁾).

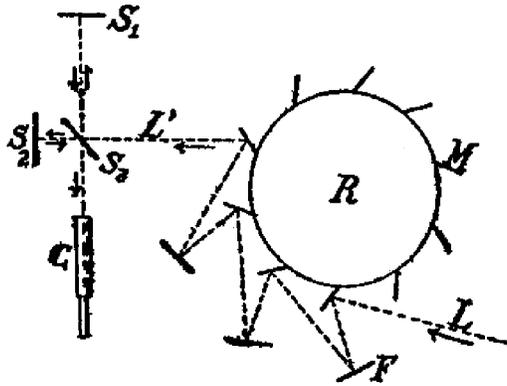


Fig. 1. – Apparato per la dimostrazione della costanza della velocità della luce riflessa da uno specchio in moto: sistema ruotante con specchi, interferometro. Disegno originale. Il dispositivo originale è conservato presso il Museo di Fisica dell'Università di Bologna.

La sua conclusione fu che la riflessione su uno specchio mobile non alterava la velocità di propagazione della luce «in aria e quindi con grande probabilità, anche nel vuoto». Nel secondo esperimento, i cui risultati, ugualmente negativi, furono pubblicati due anni dopo, Majorana volle e seppe realizzare un dispositivo in cui la sorgente luminosa era posta direttamente in moto nel laboratorio. Egli ritornò sull'argomento parecchi anni dopo, nel 1934, con un esperimento eseguito nel vuoto (vedi fig. 2). Per questo esperimento, egli ricorse ad un metodo

⁽⁹⁾ Questa figura, come la successiva, sono tratte da Atti *et al.* [1992] (pagine 129 e 139).

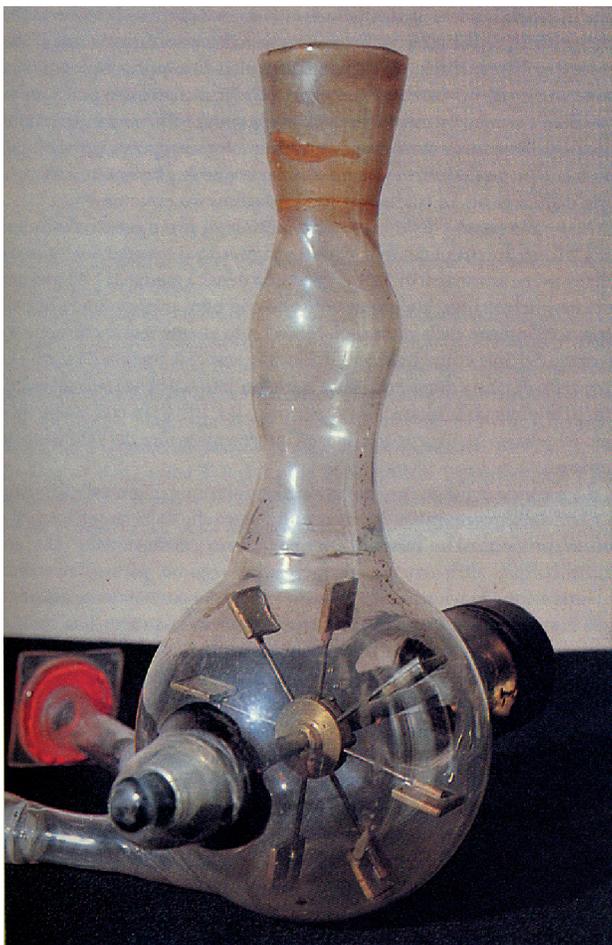


Fig. 2. – Immagine dell'apparato per la dimostrazione sperimentale nel vuoto della costanza della velocità della luce riflessa da uno specchio in movimento (Foto del Museo di Fisica, Università di Bologna, eseguita da A. Grilli).

interferometrico, teso ad osservare frange d'interferenza fra un fascio proveniente dalla sorgente mobile — di nuovo uno specchio — ed un secondo fascio proveniente dallo stesso specchio che però avesse subito rifrazione da parte di un prisma in quiete⁽¹⁰⁾. L'esito negativo anche di

⁽¹⁰⁾ Si veda, in particolare, il resoconto di Marazzini [1996], p. 78 segg., Dragoni [1992].

quest'ultimo esperimento costituì una prima obiettiva confutazione con esperimenti di laboratorio della teoria balistica della luce, corroborando invece un aspetto cruciale della concezione einsteiniana.

Non ci soffermeremo qui sugli esperimenti, altrettanto delicati, che Majorana condusse fra il 1918 e il 1923 per verificare la sua ipotesi che la forza di gravità potrebbe affievolirsi nell'attraversare la materia; ipotesi apparentemente al limite dell'eresia, che tuttavia lo stesso Majorana seppe collocare nell'ambito di una serie di studi maturati già nel corso dell'Ottocento, e che, probabilmente con sorpresa di molti, risulta essere stata perseguita a lungo anche nel corso avanzato del secolo scorso⁽¹¹⁾. Ci limiteremo a ricordare che i risultati di Majorana, che apparivano indicare un sia pur piccolissimo effetto, destarono l'attenzione, fra gli altri, di Arthur Eddington, in quanto potevano, da un punto di vista qualitativo, essere interpretati in termini di un aspetto della teoria einsteiniana. Come Eddington sottolineava, negli esperimenti di Majorana l'effetto di schermo era determinato da masse cospicue sottostanti il corpo sul quale si voleva verificare l'effetto. Ebbene, a quelle masse si impediva, ovviamente, la caduta libera nel campo gravitazionale terrestre. Ora, la teoria einsteiniana comporta che la parte del tensore degli sforzi responsabile dell'impedimento eserciti a sua volta un campo gravitazionale, che, sovrapposto a quello ordinario dovuto alle masse, modifica il gradiente del campo in termini che possono essere interpretati come assorbimento. Eddington aggiungeva tuttavia che le cose non tornavano dal punto di vista quantitativo, poiché l'effetto relativistico-generale era di gran lunga più piccolo di quello riscontrato da Majorana.

Con il secondo postulato einsteiniano e la teoria balistica si confrontarono anche altri autori italiani: Michele La Rosa (Palermo 1880 — ivi 1933) e Gleb Wataghin, nato in Russia nel 1899, ma italiano a tutti gli effetti, e titolare della cattedra di Fisica Sperimentale a Torino dal 1939. Fino dal 1910, l'ipotesi balistica di Ritz era apparsa suffragata da osservazioni compiute su stelle doppie. L'astronomo e fisico matema-

⁽¹¹⁾ All'argomento è stata dedicata una serie di studi da Giorgio Dragoni e Giulio Maltese: si veda, in particolare, Dragoni e Maltese [1997].

tico olandese Willem de Sitter aveva ritenuto di poter concludere che la possibilità di determinare — come avveniva — le orbite delle stelle doppie era in contraddizione con quanto previsto secondo l'ipotesi ⁽¹²⁾. In un articolo del 1912, La Rosa ritenne di aver confutato la conclusione di de Sitter, non solo, ma anche di poter affermare che l'ipotesi balistica permetteva di interpretare il fenomeno della variazione d'intensità di certe stelle variabili ⁽¹³⁾. Per più di un decennio La Rosa si batté a favore dell'ipotesi di Ritz contro quel «funesto flagello di distruzione» che era per lui la teoria einsteiniana ⁽¹⁴⁾. Ma, in scritti del 1925 e 1926 Wataghin dimostrò in modo persuasivo, sulla base di un esperimento di laboratorio indipendente da quelli di Majorana, l'inattendibilità della teoria balistica. Si può dunque legittimamente affermare che, quali che ne fossero le motivazioni psicologiche, la scuola fisica italiana apportò un contributo fattivo allo scioglimento della disputa fra ipotesi balistica e teoria einsteiniana.

4. – La scuola matematica italiana e la relatività generale.

Gli anni dal 1907 al 1915 assistettero alla graduale, faticosa elaborazione da parte di Einstein della sua teoria della gravitazione universalmente nota come teoria della relatività generale. Verso il 1912, il nucleo fisico essenziale era stato individuato. Le idee chiave, se non vogliamo addentrarci in un'analisi, qui improponibile, della complessa e non sempre limpida visione complessiva einsteiniana, si possono così riassumere: la gravitazione non è una forza in senso proprio: essa si esplica in termini di una modifica della geometria del continuo spazio-temporale determinata dalla distribuzione della materia; i moti dei corpi di prova (corpi di massa sufficientemente piccola da non produrre a loro volta una modifica sensibile della geometria) seguono le rette della geometria modificata (geodetiche). La traduzione di queste idee qualitative in una teoria definita richiedeva l'individua-

⁽¹²⁾ Per questa vicenda si vedano Marazzini [1996], p. 91 segg. e Maiocchi [1985], p. 127 segg.

⁽¹³⁾ Marazzini, *op. cit.*, p. 94.

⁽¹⁴⁾ Maiocchi, *op. cit.*, p. 128.

zione delle equazioni del moto (moto dei corpi di prova nella geometria modificata) e di quelle cosiddette del campo (equazioni che determinano il campo gravitazionale — espresso, per quanto si è detto, in termini di quantità geometriche — in funzione della distribuzione della materia).

L'uno e l'altro compito richiedevano la padronanza della geometria riemanniana — la geometria degli spazi, o delle varietà spazio-temporali, curvi — e del calcolo infinitesimale esteso a questi spazi. Questi capitoli della matematica non facevano parte del bagaglio culturale di Einstein, che si rivolse al matematico Marcel Grossmann, che era stato suo compagno di studi a Zurigo, perché lo introducesse all'argomento. Grossmann, d'altra parte, poteva contare — per quanto riguarda il calcolo — su un prodotto compiutamente confezionato, e pronto per l'uso, elaborato dai matematici italiani, e in particolare da Gregorio Ricci-Curbastro (Lugo 1853 — Bologna 1925) e Tullio Levi-Civita (Padova 1873 — Roma 1941) sul finire del secolo precedente. Primo e fondamentale contributo italiano alla relatività si deve dunque considerare quello dato — *in primis*⁽¹⁵⁾ — da questi autori: rispetto alla teoria fisica nella quale quanto da loro elaborato ha trovato la più importante applicazione, il loro ruolo può essere paragonato a quello che autori come Hilbert e Banach avrebbero avuto rispetto alla formulazione generale della meccanica quantistica.

I risultati fondamentali di Ricci, ottenuti fra il 1887 e il 1888, si collocano nell'alveo della teoria degli invarianti differenziali, in particolare delle forme quadratiche, sviluppata da R.O.S. Lipschitz e E.B. Christoffel. L'interesse precipuamente geometrico di questi studi nasce in virtù del fatto che su una varietà riemanniana il quadrato dell'elemento di linea, $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$, è appunto una forma differenziale quadratica. Ricci si rese conto della possibilità e della rilevanza di considerare forme di ordine e tipo generici, che egli chiamò sistemi. Si tratta in effetti di *tensori* espressi in termini delle loro componenti e specificati dalle proprietà di trasformazione di queste ultime. La nozione di tensore si era sviluppata indipendentemente in

(15) Un contributo specifico di Luigi Bianchi sarà ricordato a tempo debito.

fisica matematica in riferimento, in particolare, a stati di tensione di un corpo (W. Voigt), donde la denominazione; sotto l'aspetto di omografie vettoriali i tensori erano stati considerati da H.G. Grassmann e W.R. Hamilton. Ricci individuò la possibilità di costruire, a partire da un «sistema», un sistema di ordine superiore mediante una derivazione che egli chiamò *derivazione covariante*. Tale derivata risulta esprimibile in termini delle quantità (simboli di Christoffel) introdotti da quest'ultimo nella teoria delle forme differenziali quadratiche. Soltanto molto più tardi, da Hermann Weyl e proprio da Levi Civita, ne sarebbe stato illustrato il carattere eminentemente geometrico. Ricci aveva così posto le basi per l'analisi, o il calcolo (nel senso di calcolo infinitesimale) tensoriale su una varietà riemanniana, che egli, sottolineandone il carattere di indipendenza dalla coordinate, chiamò *calcolo differenziale assoluto*. Egli individuò il tensore doppio simmetrico, ottenuto per contrazione del tensore di Riemann $R_{\lambda\mu\nu\kappa}$, che avrebbe poi avuto un ruolo centrale in relatività generale (*tensore di Ricci*), e scoprì le identità

$$R_{\lambda\mu\nu\kappa;\eta} + R_{\lambda\mu\eta\nu;\kappa} + R_{\lambda\mu\kappa\eta;\nu} = 0$$

(il punto e virgola indica la derivata covariante), note come *identità di Bianchi*, che sarebbero state riscoperte indipendentemente da Luigi Bianchi (Parma 1856 — Pisa 1928), al quale Ricci riconobbe la priorità come a colui il quale si rese conto della loro reale importanza.

Ricci si rese ben conto del significato e della rilevanza che il suo calcolo poteva avere per la fisica; e ne cercò possibili applicazioni nei campi della fisica matematica allora praticati, dalla teoria dell'elasticità alla meccanica analitica e alla teoria del calore. In questi campi, peraltro, appariva come un metodo nuovo, e forse ridondante, per ritrovare risultati già noti. Ricci concorse due volte senza successo al premio reale di matematica, il massimo riconoscimento cui potesse aspirare un matematico italiano a quell'epoca. Nelle motivazioni negative espresse da Eugenio Beltrami (1887) e da Bianchi (1901) trapasce da un lato il mancato riconoscimento dell'importanza dei risultati, dall'altro la sensazione che si trattò di qualcosa che non ha ancora individuato un'applicazione veramente rilevante. Tuttavia per qualche tempo a Padova si coagulò attorno a Ricci un piccolo gruppo di

ricerca, formato da Ernesto Padova (Livorno 1845 - Padova 1896), titolare della cattedra di Meccanica razionale, che di Ricci era stato insegnante appunto di Meccanica alla Normale di Pisa, e Levi-Civita. Ricci e Levi-Civita pubblicarono congiuntamente, nel 1900, sui *Mathematische Annalen*, su espresso invito di Felix Klein, l'articolo *Méthodes de Calcul différentiel absolu et leurs applications*, in effetti un trattato esauriente sul calcolo differenziale assoluto che in seguito sarebbe stato di larga consultazione. Dato lo scarso interesse destato sul momento, i due autori abbandonarono dopo questo episodio il campo di studi.

L'opera di Ricci⁽¹⁶⁾ avrebbe avuto meritati seppur tardivi riconoscimenti con l'avvento della relatività generale, ma, a differenza di Levi-Civita, egli non si confrontò più con questi sviluppi. Prima di passare ad una breve disamina degli apporti specifici di quest'ultimo, che, come vedremo, andranno ben oltre i sia pur importanti contributi generali appena ricordati, converrà soffermarsi sullo stato dell'elaborazione einsteiniana intorno al 1913. Einstein e Grossmann pubblicarono congiuntamente, in quell'anno, un articolo intitolato «Abbozzo (*Entwurf*) di una teoria della relatività generalizzata e di una teoria della gravitazione», articolo del quale firmarono separatamente rispettivamente la parte fisica e quella matematica. La scrittura delle equazioni del moto non presentava particolari problemi; non così quella delle equazioni del campo. Esse non ricevettero, nell'*Entwurf*, la forma che si sarebbe poi rivelata corretta. Sembra il caso, a questo proposito, di aprire una piccola parentesi formale. Nel linguaggio delle componenti, questa forma — quella definitiva — è la seguente:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = kT_{\mu\nu},$$

dove le $R_{\mu\nu}$, $g_{\mu\nu}$, $T_{\mu\nu}$ sono rispettivamente le componenti del tensore di Ricci, del tensore metrico e del tensore densità di energia-impulso del fluido materiale in termini del quale si descrivono le sorgenti della

⁽¹⁶⁾ Per un'analisi complessiva della figura e dell'opera di Ricci si veda, in particolare, Toscano [2004].

gravitazione, R (scalare di curvatura o curvatura scalare) è l'ulteriore contrazione (traccia) del tensore di Ricci, k è una costante di proporzionalità il cui valore è calibrato sulla costante G della gravitazione considerando il limite newtoniano delle equazioni stesse. Il secondo termine a primo membro è essenziale per la ragione seguente: la quadridivergenza covariante del tensore a secondo membro deve annullarsi, come espressione delle leggi (locali) di conservazione della densità dell'energia e delle tre componenti della quantità di moto della materia. La quadridivergenza covariante del primo membro, che ha carattere geometrico, dovrà dunque annullarsi a sua volta *identicamente*, dunque in virtù di proprietà del tensore che vi figura. Ora, la quadridivergenza covariante del tensore di Ricci *non* si annulla identicamente. Valgono peraltro le cosiddette identità di Bianchi contratte, che sono derivabili dalle identità di Bianchi scritte sopra con una paginetta di calcoli — ammesso che si sospetti che devono valere e ci si ingegni a provarlo! Il punto sembra essere che nessuno, a quanto pare, aveva, fino ad allora, nutrito quel sospetto. Esse mostrano che l'oggetto la cui quadridivergenza covariante si annulla identicamente è quello che figura a primo membro della formula scritta sopra. Nell'ignoranza della validità delle identità di Bianchi contratte la ricerca della forma corretta delle equazioni del campo si rivelò estenuante.

Tutto questo era stato sufficientemente indagato dagli storici della fisica a partire dagli anni '70. Più recentemente, due storici della fisica tedeschi, Jürgen Renn e Tilman Sauer [1996], da un'analisi accurata di un quaderno di appunti redatto da Einstein durante il 1912, sono giunti alla conclusione che egli era pervenuto già in quell'anno a un passo dalle equazioni corrette, e che voltò loro le spalle quando gli parve che esse non contemplassero il caso limite newtoniano. Ma non è tanto questo che ci interesserà qui, quanto la fase successiva. Per una ragione che sarà presto chiarita, è il caso di richiamare brevemente l'attenzione su una figura che ebbe un certo ruolo nelle vicende italiane: quella di Max Abraham (Danzica 1875 - Monaco di Baviera 1922)⁽¹⁷⁾. Che all'ambiente italiano appartenne, posto che divenne

⁽¹⁷⁾ Su Abraham, in riferimento alle vicende qui affrontate, si veda Cattani e De Maria [1989a].

professore straordinario di Meccanica Razionale al Politecnico di Milano, grazie proprio anche all'interessamento di Levi Civita, nel 1909. Fisico matematico, Abraham fu anche fisico teorico nel senso che questo termine andrà gradualmente assumendo: come nel caso di Einstein, non si tratta più solo di porre in forma matematica generale ed elegante e di riformulare in forma deduttiva teorie esistenti, bensì di elaborare ipotesi nuove quando non anche di impostare veri e propri programmi di ricerca sulla base di idee e presupposti generali. Abraham, in particolare, perseguiva quello di ridurre la totalità dei fenomeni, inclusi quelli meccanici, a effetti puramente elettromagnetici: così doveva essere di origine elettromagnetica la stessa massa inerte dell'elettrone. Per il suo «elettrone rigido» prevedeva una dipendenza della massa dalla velocità diversa da quella prevista — indipendentemente — da Lorentz e Einstein. La questione fu affrontata in quegli anni da due sperimentatori tedeschi, Walther Kauffmann e Alfred Bucherer, e a lungo rimase in bilico, prima che il secondo la risolvesse in senso favorevole a Lorentz ed Einstein. Abraham era un acceso antirelativista, e negli anni fra il 1912 e il 1914 polemizzò con Einstein (usando toni spesso sopra le righe), alla cui teoria — in fieri — della gravitazione contrapponeva la sua propria. Nel febbraio del 1915, Abraham scrisse a Levi Civita, esprimendogli le sue critiche relative ad aspetti dell'*Entwurf*. Entro pochi giorni fu lo stesso Levi Civita a scrivere ad Einstein per sottoporgli, a sua volta, alcune considerazioni critiche. Ciò diede inizio a un vivace e fitto scambio di corrispondenza, che si protrasse fino al maggio del 1915, all'entrata in guerra dell'Italia⁽¹⁸⁾. Vale la pena di riportare quanto Einstein scrisse a Levi Civita in risposta alla sua prima lettera:

Stimatissimo collega, interessandosi in modo così puntuale al mio lavoro Lei mi procura una gran gioia. Può immaginare quanto sia raro che qualcuno si occupi approfonditamente di questo argomento affrontandolo con atteggiamento autonomo e critico. Non posso poi fare a meno di ammirare la rara sicurezza con la quale Lei si avvale di una lingua straniera.

⁽¹⁸⁾ Sullo scambio epistolare fra Einstein e Levi Civita si veda, in particolare, Cattani e De Maria [1989b].

Quando ho visto che Lei dirigeva il Suo attacco contro la più importante dimostrazione della mia teoria, ottenuta con fiumi di sudore, mi sono allarmato non poco, particolarmente perché so che Lei padroneggia queste faccende matematiche molto meglio di me⁽¹⁹⁾.

Il testo proseguiva con la dichiarazione di Einstein che, ciononostante, riteneva di poter ancora giustificare la sua dimostrazione. Questa fiducia vacillò al termine dello scambio epistolare, cosicché, secondo Cattani e De Maria, si può affermare che fu proprio la corrispondenza con Levi Civita che fece crescere in Einstein un crescente senso di insoddisfazione nei confronti della teoria esposta nell'*Entwurf*, e lo orientò nuovamente verso una ricerca di equazioni covarianti in senso generale.

Einstein fu in più occasioni esplicito nel riconoscere il ruolo fondamentale avuto dall'opera dei fisici matematici italiani, da Levi Civita in particolare, oltre che da Ricci, per la costruzione della sua teoria. Nell'articolo del 1916 nel quale presentò in modo organico la sua costruzione, egli scriveva:

I mezzi matematici necessari per la teoria della relatività generale erano già pronti nel «calcolo differenziale assoluto», il quale si basa sulle ricerche di Gauss, Riemann e Christoffel sulle varietà non euclidee, ed è stato eretto a sistema da Ricci e Levi Civita e da essi applicato a problemi della fisica teorica⁽²⁰⁾.

L'apporto specifico di Levi Civita a questi capitoli della fisica matematica e della stessa matematica sottostante non si limitò solo a questa funzione critica e di stimolo. A differenza di Ricci, egli ri-

⁽¹⁹⁾ Einstein a Levi Civita, 5 marzo 1915, in: *The Collected Papers of Albert Einstein*, Vol. 8, Part A, *The Berlin Years: Correspondence 1914-1917*, Princeton University Press, 1998, Robert Schulman, A.J. Kox, Michel Janssen, and József Illy Editors; doc. 60, p. 95. testo originale in tedesco; traduzione mia.

⁽²⁰⁾ A. Einstein, "Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik* (4) 49, 769-822, 1916; traduzione italiana: "I fondamenti della teoria della relatività generale", in Albert Einstein, *Come io vedo il mondo. La teoria della relatività*, Newton Compton, Roma, 1988, p. 113.

prese, dopo il 1915, a occuparsi sia dello sviluppo del calcolo differenziale assoluto, che avrebbe inquadrato, per primo, in una visione geometrica, sia della relatività generale in sé e per sé. Circa il primo aspetto, si deve ricordare che Ricci non aveva individuato uno specifico significato geometrico della derivazione covariante. In un articolo del 1917, con la sua definizione di trasporto parallelo di un vettore lungo una curva, mutuata da una visione geometrico-intuitiva del trasporto su una varietà bidimensionale immersa in uno spazio euclideo tridimensionale, Levi Civita individuava quel significato, ponendo al tempo stesso le basi per la teoria delle connessioni, che sarebbe stata in seguito sviluppata ulteriormente da H. Weyl e E. Cartan (la connessione di Levi Civita risulta poi l'unica connessione metrica e simmetrica, e come tale quella che deve essere scelta in relatività generale come esprime il campo gravitazionale). In un lavoro dello stesso anno, Levi Civita riderivò le identità di Bianchi, ponendole nella versione oggi consueta, e mostrò come esse, nella forma contratta, permettessero di individuare, a partire dal tensore di Ricci, il tensore di Einstein come candidato naturale a costituire il primo membro delle equazioni del campo gravitazionale in quanto a quadridivergenza covariante nulla. Il suo trattato del 1928, *Fondamenti di meccanica relativistica*, svolse un ruolo di grande rilievo per la diffusione delle conoscenze in materia nell'ambiente italiano, ed è sorprendentemente moderno nel modo di affrontare diversi punti basilari.

Strettamente legata a quella di Levi Civita è l'opera, nel campo qui discusso, di Attilio Palatini (Treviso 1889 — Roma 1949). Laureatosi a Padova appunto sotto la guida di Levi Civita, fu da quest'ultimo incoraggiato a formulare in termini nuovi un principio variazionale a partire dal quale derivare le equazioni del campo. Egli considerò sia il tensore metrico sia la connessione affine (simmetrica) come variabili indipendenti (metodo di Palatini), e derivò così, insieme con le equazioni del campo, anche un insieme di condizioni sulla connessione affine che di fatto la riducevano alla connessione di Levi Civita⁽²¹⁾. Nel

(21) La mia sommaria ricostruzione è tratta da Cattani [1993].

PUBLICACIONS DE L'INSTITUT DE CIÈNCIES
COL·LECCIÓ DE CURSOS DE FÍSICA I MATEMÀTICA
Dirigida per E. TERRADAS

QÜESTIONS DE MECÀNICA CLÀSSICA I RELATIVISTA

CONFERÈNCIES DONADES EL GENER DE 1921

PER

T. LEVI CIVITA

Professor de la Universitat de Roma

DONO
DEL
PROF. C. PINCHERLE

R. UNIVERSITÀ' DI BOLOGNA

ISTITUTO MATEMATICO

INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS
PALAU DE LA DIPUTACIÓ
BARCELONA

Fig. 3. – Frontespizio del testo di un ciclo di conferenze tenute da Levi Civita a Barcellona nel 1921. Il testo è in lingua catalana. (Per cortesia della Biblioteca del Dipartimento di Matematica dell'Università di Bologna).

complesso, Palatini pubblicò, fra il 1917 e il 1919, ben sette memorie sulla teoria einsteiniana⁽²²⁾.

Fra gli altri matematici italiani che hanno apportato contributi di qualche rilievo alla relatività, vanno ricordati Enea Bortolotti, Guido Castelnuovo, Roberto Marcolongo e Giuseppe Gianfranceschi. Enea Bortolotti (Roma 1896 — Firenze 1942), figlio del matematico e storico della matematica Ettore, si laureò nel 1920 a Pisa, dove subì soprattutto l'influenza di Bianchi. Studioso degli spazi a connessione affine, è ricordato in questo campo per un saggio specifico sull'argomento; a Castelnuovo si deve, in particolare, un articolo su relatività e fenomeni ottici; Marcolongo (Roma 1862 — ivi 1943) è ricordato in quanto autore del primo manuale italiano di relatività; Gianfranceschi (Arceria, Ancona 1875 — Roma 1934), come autore di una decina di saggi critici e del trattato *Teoria della relatività* (Milano, 1922).

Una menzione particolare merita Federigo Enriques. Laureatosi a Pisa, divenne titolare della cattedra di geometria proiettiva a Bologna nel 1894; vi sarebbe rimasto fino al 1922, quando si trasferì all'Università di Roma. Oltre che per i suoi contributi specifici in ambito geometrico, lo si ricorda anche per la sua difesa del valore culturale delle scienze messo in discussione dalla scuola neoidealista italiana⁽²³⁾. Membro dell'Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna dal 1902, promosse la nomina di Einstein a membro corrispondente dell'Accademia. Einstein vi avrebbe tenuto tre conferenze il 22, 24 e 26 ottobre del 1921. Lo stesso Enriques presentò l'oratore nell'occasione della prima di esse. L'evento destò un'eco notevole, e contribuì alla diffusione delle tematiche relativistiche nell'ambiente culturale italiano (vedi fig. 4).

Alla quale contribuì anche un'altra figura di rilievo nel panorama scientifico italiano dell'epoca: Luigi Donati (Fossombrone 1846 — Bologna 1932)⁽²⁴⁾. Chiamato a Bologna nel 1877 presso la scuola d'applicazione d'ingegneria, come professore straordinario di fisica

⁽²²⁾ In Maiocchi 1985, p.234 .

⁽²³⁾ Una raccolta di saggi critici di Enriques è stata curata da Raffaella Simili [Enriques, 2000].

⁽²⁴⁾ Su Donati, v. Dragoni e Brunelli [1992].

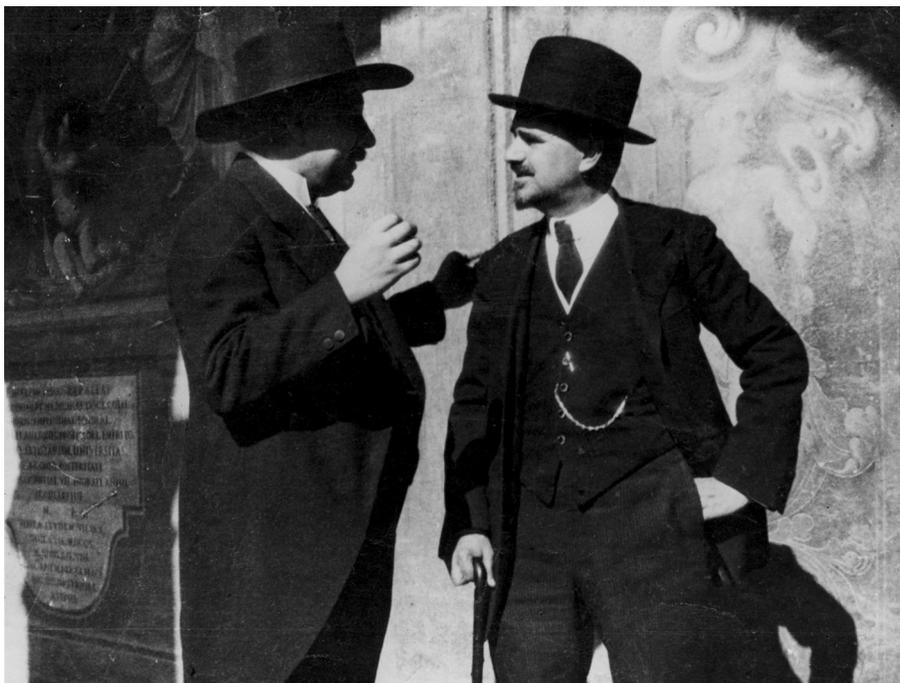


Fig. 4. – A. Einstein e F. Enriques in conversazione in occasione delle giornate bolognesi del 1921. (Per cortesia della famiglia Enriques).

tecnica, Donati vi divenne ordinario nel 1879. Egli può a buon diritto essere considerato il fondatore della scuola bolognese di elettrotecnica. Ma seguì con attenzione e competenza anche gli sviluppi delle concezioni relativistiche, e se ne fece diffusore. Proprio a seguito della discesa a Bologna di Einstein, egli tenne a sua volta, fra il dicembre del 1921 e il gennaio seguente, tre conferenze presso l'Accademia delle Scienze, tese a introdurre in modo organico e in termini matematici a livello dei corsi del primo biennio di una facoltà di scienze o d'ingegneria i temi trattati da Einstein nelle sue conferenze⁽²⁵⁾.

Un'opera che finì per fare i conti con la lunga e articolata vicenda delle posizioni e degli interessi di autori italiani per le teorie relativistiche è

⁽²⁵⁾ Ringrazio Giorgio Dragoni per avermi informato dell'evento e per avermi passato i testi.

Cinquant'anni di Relatività (Pantaleo [1955]). Concepita appunto per il giubileo dell'articolo basilare di Einstein sulla relatività ristretta, si trovò a dovere, al tempo stesso, commemorare il suo autore, che scomparve mentre il volume era in bozze. Einstein aveva fatto in tempo, su sollecitazione dei curatori, a scrivere una breve Prefazione, nel quale egli esprimeva loro la sua gratitudine, poiché il libro era «nato dagli amichevoli sentimenti dei *suoi* colleghi italiani». Egli aggiungeva che il volume aveva «un significato che *andava* molto oltre al suo particolare scopo», poiché esponeva «diffusamente e chiaramente lo sviluppo del pensiero fisico-relativistico dai suoi primissimi tempi nel quadro della formazione dei concetti dell'intera fisica (Straneo) e anche i loro fondamenti e le loro formulazioni matematiche (Finzi)». Accanto ai saggi di Paolo Straneo, allora professore emerito di fisica matematica all'Università di Genova, e di Bruno Finzi, ordinario di meccanica razionale al Politecnico di Milano, citati direttamente da Einstein, il volume, oltre alla prima versione italiana degli articoli basilari di Einstein su RR, RG, cosmologia e teorie unitarie, per complessivi sette titoli, conteneva saggi di Antonio Aliotta, professore emerito di filosofia teoretica a Napoli, Giuseppe Armellini, direttore dell'Osservatorio di Monte Mario, Giovanni Polvani, presidente della Società Italiana di Fisica, e Francesco Severi, presidente dell'Istituto nazionale di Alta Matematica. L'intero arco delle aree interessate, dalla matematica e dalla fisica all'astronomia e alla filosofia, erano così rappresentate; non solo, perché i contributi mostravano globalmente un superamento di alcune radicate pregiudiziali e il raggiungimento di una competenza ormai capace di spaziare sull'intera materia.

Levi Civita svolse un ruolo importante nel diffondere la conoscenza delle teorie relativistiche in Italia anche fra i fisici in senso stretto. Fra i suoi lettori va molto probabilmente annoverato Enrico Fermi. Affermare che la fisica teorica nasce in Italia con Fermi non è poi tanto una sovrasemplificazione: è infatti con lui e con la sua scuola che nasce e si afferma la figura del fisico teorico⁽²⁶⁾ come si è cercato di trat-

⁽²⁶⁾ Fermi sarà, beninteso, anche un grande fisico sperimentale, ma questo capitolo della sua vita di ricerca ci interesserà meno in questo contesto.

teggiarla sopra. E non è un caso che è solo con l'avvento di questa figura di studioso la fisica italiana cominci a confrontarsi seriamente con le grandi novità venute in primo piano con gli sviluppi di inizio secolo. Può giungere per molti come una sorpresa che il primo dei temi portati alla ribalta da quegli sviluppi col quale si confronterà un Fermi giovanissimo fu proprio la relatività generale. Nel 1922 Fermi, appena ventunenne, inviò ai Rendiconti dell'Accademia dei Lincei una nota che fu pubblicata in tre parti, dal titolo «Sopra i fenomeni che avvengono in vicinanza di una linea oraria». In essa egli mostrò come introdurre un'opportuna quaterna di versori di base, ortogonale nel senso di Minkowski, lungo una geodetica descritta da un punto materiale. L'estensione a una generica linea d'universo sarebbe stata poi ottenuta da A.G. Walker nel 1932 (coordinate di Fermi-Walker)⁽²⁷⁾. L'argomento è divenuto parte costitutiva della trattazione organica della materia⁽²⁸⁾.

5. – Relatività ristretta e generale: sviluppi nel corso del secolo e cenno ad alcuni contributi italiani.

Salvo per la dipendenza della massa dell'elettrone dalla velocità, cui si è accennato, la relatività ristretta rimase a lungo senza conferme sperimentali dirette. Le ragioni sono facilmente comprensibili: gli effetti relativistici diventano notevoli solo quando le velocità in gioco sono confrontabili con quella della velocità della luce nel vuoto. Riscontri della dinamica relativistica dovettero attendere l'avvento delle macchine acceleratrici, capaci di portare fasci di particelle a tali velocità. Per quanto riguarda gli effetti cinematici, come quello della dilatazione del tempo, oggi giorno gli orologi atomici, per la loro straordinaria sensibilità, permettono di rivellarli anche per velocità ordinarie, ma per decenni, come orologi in moto con altissime velocità rispetto ai nostri laboratori si è potuto far conto solo su «orologi che battono un solo colpo», fornito dalle particelle instabili rivelate nella radiazione

⁽²⁷⁾ La mia sommaria ricostruzione è tratta da Bertotti [2003].

⁽²⁸⁾ V., per esempio, Misner *et al.* [1973].

cosmica secondaria. Date queste circostanze, non è un caso che il Premio Nobel del 1921 sia stato assegnato ad Einstein essenzialmente per la sua legge dell'effetto fotoelettrico.

L'effetto di dilatazione del tempo, appunto su muoni della radiazione cosmica secondaria, come dilatazione della vita media in volo rispetto a quella misurata a riposo, fu riscontrato per la prima volta nel 1941 da Bruno Rossi (Venezia 1905 — Boston 1993), uno dei massimi esponenti della scuola italiana dei raggi cosmici che affiancò quella di Fermi nel corso degli anni di guerra, con la collaborazione di D.B. Hall. Va ricordato che Rossi aveva lasciato l'Italia per le leggi razziali nel 1938; l'esperimento fu dunque condotto negli Stati Uniti. In seguito esperimenti del genere sono diventati di *routine*, e furono eseguiti anche utilizzando fasci di muoni prodotti in laboratorio. Un esperimento del genere fu eseguito al CERN come sottoprodotto delle attività di ricerca consuete per quel centro di ricerca: lo ricordiamo qui perché l'effetto fu riscontrato su muoni immessi in un anello di accumulazione, dunque soggetti ad una forte accelerazione centripeta, e mostrò che il moto accelerato non aveva affetti aggiuntivi; e anche perché uno degli autori era Emilio Picasso, fisico italiano che avrebbe in seguito diretto il grande collisionatore LEP del CERN durante la fase di costruzione e la fase iniziale di funzionamento. Questo non è che un esempio fra innumerevoli altri: la fisica delle particelle elementari è stato infatti il teatro in cui, per decenni, si sono sistematicamente applicate cinematica e dinamica relativistiche. E questo a partire dalla stessa realizzazione degli strumenti base di questo capitolo della fisica, gli acceleratori di particelle e i collisionatori, che, per funzionare correttamente, devono essere progettati in termini relativistici. Così, quando l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare costruì, nel 1958, l'elettrosincrotrone di Frascati, che portava gli elettroni a un'energia di 1100 MeV, alla quale sono pienamente relativistici, i fisici e gli ingegneri che lo realizzarono stavano contribuendo al capitolo delle verifiche della RR a livello tecnologico. Lo stesso si dica per Adone, il collisionatore elettrone-positrone da 1500 MeV, ispirato dall'opera del fisico austriaco Bruno Touschek, al quale Edoardo Amaldi aveva offerto una posizione di professore straordinario all'Università di Roma, e realizzato, fra il

1961 e il 1963 sotto la guida di Fernando Amman⁽²⁹⁾. Né va dimenticata l'attività dei gruppi che, negli Istituti di Fisica delle varie Università, compivano l'oscuro lavoro di analisi dei dati relativi alle collisioni fra particelle di fasci prodotti negli acceleratori e particelle bersaglio raccolti in laboratori italiani e più spesso stranieri: ogni singolo evento di collisione era infatti analizzato sulla base delle leggi relativistiche di conservazione dell'energia e della quantità di moto, cosicché si può dire, in analogia a quanto appena ricordato per gli acceleratori, che essi contribuirono alla verifica sperimentale della dinamica relativistica, rimasta così a lungo in predicato.

Se cinematica e dinamica dovevano essere relativistiche, dovevano essere costruite sulla base dei dettami relativistici anche le teorie specifiche in termini delle quali interpretare la fisica delle particelle elementari: le teorie quanto-relativistiche dei campi. Non mancarono contributi italiani anche in questa direzione: a titolo d'esempio, basterà accennare che nella fase di studio del primo collisionatore, AdA, progenitrice di Adone, Raoul Gatto e Nicola Cabibbo analizzarono, sulla base del prototipo di quelle teorie, l'elettrodinamica quantistica, le possibili reazioni elettrone-positrone, e ne calcolarono le sezioni d'urto.

La RG conobbe un successo clamoroso nel 1919 quando Eddington, che aveva guidato una spedizione per osservare nelle migliori condizioni un'eclisse di Sole, ritornò affermando di aver riscontrato l'effetto di spostamento apparente di stelle collocate sulla volta celeste in prossimità del Sole stesso in conformità a quanto previsto dalla teoria einsteiniana. L'episodio contribuì alla stessa parziale affermazione della RR in assenza di corroborazioni sperimentali. Ma in seguito la teoria conobbe una lunghissima fase di stanca: troppo pochi gli effetti previsti: all'effetto ricordato si aggiungeva quello riguardante la precessione del perielio delle orbite planetarie, che a lungo parve riguardare la sola precessione anomala di Mercurio, nota da decenni, e quello del *redshift* gravitazionale, che peraltro risultò a lungo difficile da riscontrare in termini decisivi; e troppo piccoli gli scarti dalla teoria newtoniana. Tale fase durò addirittura alcuni decenni. La data della

⁽²⁹⁾ Si veda, su questi argomenti, Bernardini [2004].

sua fine si potrebbe indicare come quella (1960) in cui R.V. Pound e G.A. Rebka, alla Harvard University, misurarono il *redshift* in laboratorio. Da allora si sono succeduti osservazioni e veri e propri esperimenti in misura sempre crescente e con risultati sempre più precisi.

Recentissimamente si sono avuto ulteriori importanti conferme sperimentali della relatività generale ad opera di ricercatori italiani. In primo luogo, in riferimento al cosiddetto quarto effetto della RG — un effetto di ritardo di segnali radar inviati verso pianeti interni o veicoli spaziali e riflessi a terra — la sonda Cassini ha permesso di incrementare la precisione del controllo dell'effetto di quasi due ordini di grandezza. I dati relativi all'effetto sono analizzati in termini di un parametro solitamente indicato con la lettera greca γ . Per γ la RG prevede il valore 1. Particolarmente significativa è la scrittura di γ nella forma

$$\gamma = \frac{\omega + 1}{\omega + 2},$$

dove l'ulteriore parametro ω misura il rapporto fra il contributo all'azione gravitazionale da parte del potenziale tensoriale einsteiniano e un campo scalare aggiuntivo. Al tendere a zero del contributo del campo scalare γ tende dunque in effetti a 1. In presenza di un solo campo scalare, cosa che, in qualche modo, riproporrebbe — sia pure in un contesto formale ben diverso — la teoria newtoniana, γ tende invece al valore $\frac{1}{2}$. Ebbene, Bruno Bertotti e collaboratori (Bertotti *et al.* [2003]), usando appunto come terminale del segnale la sonda in questione, hanno determinato il valore

$$\gamma = 1 + (2, 1 \pm 2, 3) \cdot 10^{-5},$$

che migliora di un fattore 50 i limiti precedenti di precisione dei controlli della RG.

Un altro effetto previsto dalla teoria è il cosiddetto effetto Lense-Thirring, dal nome degli autori che lo calcolarono esplicitamente nel 1928: come conseguenza della rotazione terrestre, l'asse di un giroscopio che orbitasse intorno alla Terra (nella versione qui discussa l'asse dell'orbita di un satellite artificiale) dovrebbe compiere un moto di precessione. L'effetto previsto è di circa 0,05 secondi d'arco per anno. Un esperimento allo scopo di controllarlo fu proposto da Ignazio

Ciufolini nel 1989. Utilizzando satelliti LAGEOS (*LASER GEOdynamics Satellites*), egli ha recentemente condotto a termine l'esperimento [Ciufolini e Pavlis, 2004] misurando l'effetto cumulativo su 11 anni e trovando conferma della previsione al $(99 \pm 5)\%$.

Un cenno, necessariamente rapidissimo, merita la cosmologia relativistica. Il suo inizio, come disciplina fisico-matematica, si deve far risalire a un articolo di Einstein del 1917. Molti altri autori, a partire dall'opera pionieristica di Alexander Fridman, si sono succeduti per dar corpo all'attuale teoria dell'universo in espansione ed in evoluzione (teoria cosiddetta del *big bang* caldo). Questi sviluppi sono stati preceduti, accompagnati e seguiti da quelli osservativi. Ebbene, se si deve constatare che il contributo di studiosi italiani all'uno e all'altro campo è stato a lungo relativamente assai scarso, si deve prendere atto con soddisfazione che negli anni recenti esso è diventato estremamente fattivo soprattutto sotto il secondo aspetto. Basterà ricordare che l'esperimento Boomerang⁽³⁰⁾, che, sulla base di un'analisi delle fluttuazioni della radiazione di fondo a microonde, ha fornito il primo fondamentale segnale circa la piattezza spaziale dell'universo, ha avuto come uno dei due portavoce Claudio De Bernardis, dell'Università di Roma La Sapienza.

6. – Ringraziamenti

Desidero ringraziare vivamente Giorgio Dragoni per la segnalazione di alcuni eventi, come, in particolare, quella relativa alle conferenze di Luigi Donati, indicazioni bibliografiche e informazioni biografiche su alcuni autori, nonché per avermi autorizzato alla riproduzione delle due figure relative agli esperimenti di Quirino Majorana; e Fabio Toscano, per avermi reso possibile la lettura del dattiloscritto relativo a parti del suo libro prima della pubblicazione e per alcune informazioni biografiche su matematici italiani.

⁽³⁰⁾ L'acronimo sta per *Balloon Observation of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics* (De Bernardis *et al.* [2000]).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ATTI L. - DRAGONI G. - MALTESE G., «Quirino Majorana, fisico sperimentale», *Alma Mater Studiorum*, V. 1, 123-169, 1992.
- BERNARDINI C., «AdA: The first Electron-Positron Collider», *Physics in Perspective*, 6, 2004, p. 156-183.
- BERTOTTI B., «Le coordinate di Fermi e il principio d'equivalenza», in: *Conoscere Fermi*, a cura di Carlo Bernardini e Luisa Bonolis, Pubblicazioni Società Italiana di Fisica, Bologna, 2002.
- BERTOTTI B. - IESS I. - TORTORA P., «A New Test of General Relativity with the Cassini Space Mission», *Nature* 425, 374, September 2003.
- CAPARRINI S. - PASTRONE F., «La Relatività», cap. IV di «Fisica Matematica e Meccanica razionale» (di F. Pastrone), in *La Matematica italiana dopo l'Unità. Gli anni tra le due guerre mondiali* (a cura di S. di Sieno, A. Guerreggio, P. Nastasi), Marcos y Marcos, Milano, 1998, pp. 453-483.
- CATTANI C., «Levi-Civita's Influence on Palatini's Contribution to General Relativity», in: *The Attraction of Gravitation - New Studies in the History of General Relativity*, Edited by J. Earman, M. Janssen, J.D. Norton, Birkhäuser, Boston, 1993, pp. 206-224.
- CATTANI C. - DE MARIA M., «Max Abraham and the Reception of Relativity in Italy: His 1912 and 1914 Controversies with Einstein», in: *Einstein and the History of General Relativity*, D. Howard and J. Stachel, eds., Birkhäuser, Boston, 1989a, pp. 161-174.
- CATTANI C. - DE MARIA M., «The 1915 Epistolary Controversy between Einstein and Tullio Levi Civita»; *ibidem*, 1989b, pp. 175-200.
- CIUFOLINI I. - E.C. PAVLIS E.C., «A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense Thirring effect», *Nature*, 431, 21 Oct. 2004, p. 958.
- DE BERNARDIS P., *et al.*, «A flat Universe from high resolution maps of the cosmic microwave background radiation», *Nature* 404, 955, April 2000.
- DORATO M., «Filosofia dello spazio e del tempo», in Allori, V., Dorato, M., Laudisa, F., Zanghì, N., *Introduzione ai fondamenti della fisica*, Carocci, 2004.
- DRAGONI G., «Augusto Righi (1850-1920)», estratto da *Figure di Maestri che hanno operato nel corso del IX Centenario dell'Università di Bologna*, Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna, Classe di Scienze Fisiche, pp.189-224, 1990a.
- DRAGONI G., «Quirino Majorana (1871-1957)», estratto da *Figure di Maestri che hanno operato nel corso del IX Centenario dell'Università di Bologna*, Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna, Classe di Scienze Fisiche, pp. 225-237, 1990b.
- DRAGONI G., «Albert Einstein nei lavori di Augusto Righi e Quirino Majorana», relazione tenuta all'Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna, 11.01.1992.
- DRAGONI G. - BRUNELLI B., Luigi Donati, in: *Dizionario Biografico degli Italiani*, Vol. 41, Enciclopedia Italiana, Roma, 1992, pp. 45-47.

- DRAGONI G. - MALTESE G., «Quirino Majorana's Research on Gravitational Absorption: A Case Study in the Misinterpreted Experiment Tradition», *Centaurus* **39**, 141-186, 1997.
- DRAGONI G. - GOTTARDI G. - MANFERRARI, *L'epistolario di Righi*, 2004, in corso di stampa.
- EINSTEIN A., *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, *Ann. der Phys.* (4) **17**, pp. 891-921.
- EINSTEIN A., *Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*, *Ann. der Phys.* (4) **49**, pp. 769-822.
- ENRIQUES F., *Per la scienza*, Scritti editi e inediti a cura di Raffaella Simili, Bibliopolis, 2000.
- MAIOCCHI R., *Einstein in Italia — La scienza e la filosofia italiane di fronte alla relatività*, Franco Angeli, Milano, 1985.
- MARAZZINI P., *Nuove radiazioni, quanti e relatività in Italia, 1896-1925*, Percorsi della Fisica, La Goliardica Pavese, 1996.
- MISNER C.W., THORNE K.S., WHEELER J.A., *Gravitation*, Freeman, Chicago, 1973.
- PANTALEO M. (direttore dell'opera), *Cinquant'anni di relatività*, Editrice Universitaria, Firenze, 1955.
- RENN J. - SAUER T., «Einstein's Züricher Notizbuch — Die Entdeckung der Feldgleichungen im Jahre 1912», Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte, pr. n. 28, 1996; mia versione in italiano: «Il quaderno di appunti zurighese di Einstein e la scoperta delle equazioni di campo nell'anno 1912», in: *La Fisica nella Scuola*, Anno XXXI, n. 1, 1998, pp. 8-19.
- SPARZANI A., *Relatività, quante storie . Un percorso scientifico-letterario tra relativo e assoluto*, Bollati Boringhieri, 2003.
- TOSCANO F., *Il genio e il gentiluomo — Einstein e il matematico italiano che salvò la teoria della relatività generale*, Sironi Editore, 2004.

Silvio Bergia, Dipartimento di Fisica, Università di Bologna
INFN, Sezione di Bologna
e-mail: bergia@bo.infn.it