

EDOARDO AMALDI (*)

**Verifiche della Relatività Generale e dell'ipotesi
cosmogonica di Dirac a mezzo di misure passive
ed attive di segnali elettromagnetici (**)**

Mentre l'importanza delle più svariate applicazioni della scoperta di Guglielmo Marconi ebbe un riconoscimento universale immediato, solo nella seconda metà del nostro secolo i segnali radio di alta frequenza hanno cominciato a trovare impieghi di grande importanza sia per la soluzione di problemi scientifici di natura fondamentale che per lo studio delle scienze ambientali e l'esplorazione dell'Universo.

Questo terzo tema, che negli ultimi quarant'anni è diventato uno dei più importanti capitoli dell'astrofisica moderna, verrà trattato da Giancarlo Setti, che, essendo egli stesso radioastronomo, è certamente la persona più indicata per inquadrare lo stato attuale delle conoscenze in questo settore.

Io mi limiterò a presentare una serie di esperimenti eseguiti con onde radio e miranti a verificare, con buona precisione, varie previsioni della teoria della Relatività Generale (RG), creata da Einstein nel 1915, e l'ipotesi cosmogonica avanzata da Dirac, nel 1938, di una possibile variazione secolare della costante G che figura nella legge di gravitazione universale di Newton.

L'impiego di radio-onde, accanto alle onde acustiche, infrarosse, ottiche e gamma, per il telerilevamento di numerosi parametri fisici relativi alla superficie e agli strati superficiali della crosta terrestre, all'oceano e all'atmosfera a servizio delle scienze ambientali, è anche una tematica di grande attualità, con riflessi pratici di una importanza che probabilmente andrà molto al di là di quanto si possa oggi prevedere. Per ovvie ragioni di tempo sono costretto a non addentrarmi in questa seconda tematica estremamente affascinante e che oggi è solo ai primi passi.

(*) Uno del XI. Dipartimento di Fisica, Università di Roma «La Sapienza».

(**) Relazione presentata in occasione della commemorazione del cinquantesimo anniversario della morte di Guglielmo Marconi a Villa Griffone, Pontecchio Marconi, il 20 luglio 1987.

La deflessione subita dai raggi luminosi che passano nel campo gravitazionale del Sole, costituisce, come è ben noto, una delle tre verifiche sperimentali classiche della teoria della RG ⁽¹⁾.

La osservazione e misura di questo fenomeno furono tentate per la prima volta, e con successo, da Eddington, in occasione dell'eclissi solare del 1922 e da allora gli astrofisici di tutto il mondo hanno ripetuto osservazioni di questo tipo, sempre più accurate, in occasione di tutte le eclissi solari che si sono verificate. L'ultimo e più accurato studio ottico di questo tipo è stato fatto nel 1974 da un gruppo di ricercatori delle Università del Texas e di Princeton. Il risultato fu ancora una volta in accordo con le previsioni della teoria della RG con una precisione del 10% ⁽²⁾.

Un passo avanti notevole fu fatto nel 1967 con la proposta avanzata da Irwin I. Shapiro del M.I.T. di usare onde radio invece della luce ⁽³⁾. Con la tecnica degli interferometri radio a base molto lunga (VLBI = Very Long Baseline Interferometer) l'accuratezza angolare raggiungibile può essere molto superiore a quella che può essere ottenuta con tecniche ottiche sulla Terra.

Il primo esperimento di deflessione di buona precisione fu fatto nel 1972, usando quattro antenne, due in una stazione a Green Bank (West Virginia) e due in una stazione nel Massachusetts, posta a 845 km dalla prima ⁽⁴⁾.

Due radiosorgenti extragalattiche compatte (3C279 e 3C273B) venivano osservate, ciascuna da una antenna di ciascuna delle due stazioni. Una di queste radiosorgenti è situata a circa 10° a Nord-Ovest dall'altra, la quale veniva occultata dal Sole per prima, cosicché i suoi segnali venivano deflessi prima che quelli dell'altra subissero l'azione del campo gravitazionale del Sole. L'interferometro veniva fatto funzionare a 8 GHz e aveva una risoluzione angolare di 1 centesimo di secondo di arco. Il risultato ottenuto da Shapiro e collaboratori è in accordo con la RG entro il 6%. Combinando questo risultato con quello ottenuto da un altro gruppo ⁽⁵⁾ che ha eseguito misure qualche tempo dopo con una tecnica molto simile, si può oggi affermare che la deflessione che subiscono i segnali elettromagnetici che passano vicino al bordo del Sole sono in pieno accordo con la RG entro il 2%.

⁽¹⁾ Come è noto le tre verifiche sperimentali « classiche » della RG sono: (a) il principio di equivalenza nella sua forma debole (cioè la rigorosa proporzionalità fra la massa inerziale e la massa gravitazionale di ogni corpo); (b) la deflessione subita dai raggi luminosi quando passano nel campo gravitazionale del Sole, e (c) la precessione del periastrio di un pianeta, in particolare del perielio di Mercurio.

⁽²⁾ TEXAS MAURITANIAN ECLIPSE TEAM, « Astron. J. », 81, 452 (1976).

⁽³⁾ SHAPIRO I.I., *New Method for the Detection of Light Deflection by Solar Gravity*, « Science », 157, 806-806 (1967).

⁽⁴⁾ COUSINSMAN III C.C., KENT S.M., KNIGHT C.A., SHAPIRO I.I., CLARK T.A., HINTENBERGER H.F., ROGERS A.E. and WHITNEY A.R., *Solar Gravitational Deflection of Radio Waves Measured by Very-Long-Baseline Interferometers*, « Phys. Rev. Lett. », 33, 1621-1623 (1974).

⁽⁵⁾ FOREMANNOT E.F., and SRAMEK R.A., *Measurements of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves in Agreement with General Relativity*, « Phys. Rev. Lett. », 36, 1475-1478 (1976).

Il ritardo subito dai segnali elettromagnetici che passano vicino al bordo del Sole nel loro viaggio di andata e ritorno dalla Terra a un altro corpo celeste (naturale o artificiale) è un fenomeno che, come fu mostrato da I.I. Shapiro nel 1964^(*), può costituire una verifica diversa e indipendente dalle tre verifiche classiche della RG. Tale ritardo infatti è dovuto prevalentemente alla diminuzione subita dalla velocità del segnale c.m. quando passa in una regione di potenziale gravitazionale crescente. Tale ritardo ha il valore massimo di 250 ms per raggi che rasentano il disco solare. Le atmosfere e le ionosfere della Terra e del pianeta alterano il ritardo in maniera non significativa e comunque misurabile con l'impiego contemporaneo di segnali di due frequenze diverse.

Dopo due lavori sperimentali di Shapiro *et al.*, uno del 1968^(†) riguardante i sistemi Terra-Mercurio e Terra-Venere nelle vicinanze della congiunzione superiore, e un altro del 1971^(‡), relativo a ritardi da Mercurio, Venere e Marte, comincia ad emergere il fatto che le maggiori incertezze di queste misure derivano dalla topografia della superficie del pianeta e che queste possono venir eliminate sostituendo le osservazioni dei pianeti naturali con l'inseguimento radio (tracking) di un satellite.

Le prime misure di questo tipo sono state fatte nel 1975 da J.D. Anderson *et al.*^(§) con Mariner 6 e 7 in orbite eliocentriche e da J.D. Anderson *et al.* nel 1976^(¶) e Reissenberg e I.I. Shapiro, nel 1977 con Mariner 7 in orbita attorno a Marte^(||).

L'ulteriore passo che permise di aumentare la precisione di questo tipo di esperienze di un fattore 20, come previsto e messo in luce da Shapiro, fu realizzato con l'impiego, nel 1977, dei quattro satelliti « Viking » attorno a Marte: due di questi sono unità appodanti (lander) ben piazzati su Marte, e due sono orbitanti (orbiter) dotati di trasponderi per l'inseguimento, i primi

(*) SHAPIRO I.I., *Fourth Test of General Relativity*. « Phys. Rev. Lett. », 13, 789-791 (1964).

(†) SHAPIRO I.I., PITTENILLA G.H., ASH M.E., STONE M.L., SMITH W.B., INGALLS R.P. and BROCKELMANN R.A., *Fourth Test of General Relativity: Preliminary Results*. « Phys. Rev. Lett. », 20, 1265-1269 (1968).

(‡) SHAPIRO I.I., ASH M.E., INGALLS R.P. and SMITH W.B., *Fourth Test of General Relativity*. « Phys. Rev. Lett. », 26, 1132-1135 (1971).

(§) ANDERSON J.D., ESPOSITO P.B., MARTIN W., THORNTON C.L. and MICHELSON D.O., *Experimental Test of General Relativity Using Time Delay data from Mariner 6 and Mariner 7*. « Astrophys. J. », 200, 221-233 (1975).

(¶) ANDERSON J.D., KEESY M.S.W., LAU E.L., STANBISH jr. E.M. and NEWHALL X.X., *Tests of General Relativity Using Astronomical and Radiometric Observations of the Planets*. Third Intern. Space Relativity Symposium, Int. Astronaut. Fed., Anaheim, CA, 1976.

(||) REISENBERG R.D. and SHAPIRO I.I., *Solar System Tests of General Relativity*, pp. 143-160 degli Atti del Convegno su « Gravitazione Sperimentale », Pavia 17-20 settembre 1976, Atti dei Convegni Lincoi, Roma (1976). SHAPIRO I.I., *Verifiche Sperimentali della Teoria della Relatività Generale*, pp. 221-248 di « Astrofisica e Cosmologia, Gravitazione, Quanti e Relatività », a cura di F. De Finis e M. Pantaleo nel « Centenario della nascita di Einstein (1879-1979) », Giunti-Barbèra, Firenze (1979).

nella banda di frequenza S (circa 2,2 GHz), i secondi nella banda di frequenza X (circa 8 GHz).

Dall'analisi di 14 mesi di dati ottenuti con questo sistema I.I. Shapiro *et al.* hanno ottenuto, nel 1979, un valore in accordo con le previsioni della RG entro un errore del 2‰⁽¹²⁾.

La *precessione del periastro* fu determinata per 200 anni in base a osservazioni ottiche nel caso del pianeta Mercurio che descrive la sua orbita attorno al Sole. Tutte queste misure danno complessivamente un valore della deflessione in accordo con la previsione basata sulla RG: $1''.75 \times R_0/d$, dove R_0 è il raggio del Sole e d la distanza minima dal centro del Sole a cui passano i raggi: $d \geq R_0$, con un errore di circa 0''.4 (~23%)⁽¹³⁾.

Una analisi approfondita delle caratteristiche dei pianeti interni, degli asteroidi e dei satelliti dei pianeti esterni, eseguita nel 1979, mostrò che l'orbita di Mercurio rimane ancor oggi il miglior campo di prova delle previsioni della RG per ciò che riguarda la precessione del perielio.

I risultati pubblicati da Shapiro nel 1972⁽¹⁴⁾ riguardano cinque anni di osservazioni radar di Mercurio e Venere, fatte fra il 1966 e il 1971, agli osservatori di Haystack nel Massachusetts e di Arecibo a Porto Rico.

Gli autori fecero uso di 150 misure del tempo di ritardo Arecibo-Mercurio e di 200 misure del tempo di ritardo Haystack-Mercurio. La frequenza del radar era di 430 MHz per le prime e 7840 MHz per le seconde. L'errore delle singole misure era nella maggior parte dei casi fra 5 e 20 ns.

Il risultato di un procedimento di ottimizzazione di un modello matematico che contiene circa venti parametri aggiustabili fra i quali, naturalmente, figurano la precessione del perielio di Mercurio dovuto alla RG, le masse dei pianeti, i loro parametri orbitali, e così via, è risultato in pieno accordo con la RG entro un errore di $\pm 2\%$.

Una *precessione del periastro* circa 35000 volte più grande di quella di Mercurio è stata osservata nel caso della stella binaria PSR15+16 scoperta nel 1974 da Hulse e Taylor del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università del Massachusetts, Amherst⁽¹⁵⁾. Nella ricerca sistematica di nuove pulsar, effettuata con il radiotelescopio di 305 m di diametro dell'Osservatorio di Arecibo (Porto Rico) funzionante a 430 MHz, questi autori riuscivano a mettere in

⁽¹²⁾ SHAPIRO I.I., REASENBERG R.D., MACNEIL P.E., GOLDSTEIN R.B., BRINKLE J.P., CAIN D.L., KOMAREK T., ZYGIELBAUM A.I., CUDDY WF. and MICHAEL W.H., *The Viking Relativity Experiment*, « Journ. Geophys. Research », 82, 4329-4334 (1977). REASENBERG R.D., SHAPIRO I.I., MACNEIL P.E., GOLDSTEIN R.B., BREIDENTHAL J.C., BRINKLE J.P., CAIN D.L., KAUFMAN T.M., KOMAREK T.A. and ZYGIELBAUM A.I., *Viking Relativity Experiment: Verification of Signal Retardation by Solar Gravity*, « Astrophys. Lett. », 334, 1217 (1979).

⁽¹³⁾ SHAPIRO I.I., PAYTENGL G.H., ASH M.A., INGALLS R.P., CAMPBELL D.B. and DYCK R.B., *Mercury's Perihelion Advance: Determination by Radar*, « Phys. Rev. Lett. », 28, 1394-1397 (1972).

⁽¹⁴⁾ HULSE R.A. and TAYLOR J.H., *Discovery of a Pulsar in a Binary System*, « Astrophys. J. (Letters), 193, L51-L53 (1975).

evidenza una nuova pulsar di 59 ms di periodo, facente parte di un sistema binario la cui orbita ellittica, fortemente eccentrica, viene percorsa con un periodo di poco meno di 8 h.

Uno studio sistematico di questa binaria che si è esteso per oltre 12 anni dal 1974 ad oggi, ha permesso a Taylor e collaboratori di stabilire quanto segue ⁽¹⁵⁾:

a) la massa della pulsar è pari $1,42 M_{\odot}$ ($\pm 4\%$) e quella del suo compagno $1,41 M_{\odot}$ ($\pm 4\%$);

b) l'asse maggiore dell'orbita è dell'ordine del raggio solare, e le due stelle, con ogni probabilità, sono due stelle di neutroni;

c) la precessione del periastro è di

$$4,2261 \text{ gradi/anno}$$

con un errore relativo di circa 2 parti su 10.000 in perfetto accordo con il valore calcolato a mezzo della RG partendo dai valori misurati a) e b);

d) il periodo P_b del moto orbitale della binaria non è costante ma varia in funzione del tempo, mostrando così che il sistema subisce una lenta perdita di energia. Il valore misurato della derivata rispetto al tempo di P_b ,

$$\dot{P}_b = - 2,30 \times 10^{-12} (\pm 10\%),$$

è in accordo con la perdita di energia calcolata con la formula data nel 1916 da Einstein per l'irraggiamento di onde gravitazionali da parte di un sistema di masse in moto.

La binaria scoperta e studiata a fondo da Taylor e collaboratori è dunque il primo laboratorio trovato dall'uomo per lo studio osservativo e la verifica della RG in condizioni tali che le previsioni di questa teoria si scostano in maniera sostanziale da quelle della teoria newtoniana.

Per concludere vorrei infine accennare alla *verifica osservativa della possibilità*, suggerita nel 1938 da P.A.M. Dirac ⁽¹⁶⁾, *che la costante G della legge di Newton possa subire una lentissima variazione* (in realtà secondo Dirac una diminuzione) *con il passare del tempo alla scala, ben inteso, di epoche confrontabili con l'età del sistema solare o addirittura dell'Universo (15-20 miliardi di anni).*

Una lenta deriva del valore della costante G, per esempio di tipo lineare,

$$G = G_0 + \dot{G}_0 (t - t_0),$$

potrebbe essere determinata da un campo cosmico addizionale che desse luogo ad una graduale alterazione del tensore metrico che nella RG descrive lo spazio

⁽¹⁵⁾ TAYLOR J.H. and WEISSBERG J.M., *A New Test of General Relativity: Gravitational Radiation and the Binary Pulsar* 1913+16. « *Astrophys. J.* », 253, 908-920 (1982).

⁽¹⁶⁾ DIRAC P.A.M., *A New Basis for Cosmology*. « *Proc. Roy. Soc.* », A 165, 199-208 (1938).

tempo. Un esempio di teoria di questo tipo è la teoria di Brans e Dicke, in cui un lento cambiamento dei periodi orbitali trae origine da una rinormalizzazione dipendente dal tempo della costante gravitazionale, dovuta al lento cambiamento dei valori del campo cosmico.

Anche questo problema fu affrontato per la prima volta da Shapiro nel 1970, il quale si servì del confronto di misure fatte con orologi atomici — il cui tempo si mantiene accurato entro 1 parte su almeno 10^{11} anche su lunghi intervalli di tempo — del periodo orbitale dei vari pianeti e di misure radar interplanetarie dei loro parametri orbitali eseguite su di un periodo di 6 anni.

Una rielaborazione degli stessi dati con un metodo più raffinato ha permesso a Reasenberg e Shapiro di concludere nel 1979 ⁽¹⁾, che

$$\dot{G}_0/G_0 < 1,5 \times 10^{-10} \text{ anni}^{-1}.$$

Un risultato circa dieci volte più accurato è stato ottenuto da una collaborazione fra il Jet Propulsion Laboratory (P.J. Adams, R.W. Hellings *et al.*) e il NASA Goddard Institute for Space Study (V.M. Canuto *et al.*) ⁽²⁾ che, in una serie di pubblicazioni apparse fra il 1981 e il 1983, ha presentato i risultati di una analisi globale dei seguenti dati astronomici relativi al sistema solare: (1) 1136 misure di distanza dei veicoli Viking appodanti (lander) su Marte (luglio 1976-luglio 1982); (2) 845 misure di distanza del veicolo spaziale Mariner 9 in orbita attorno a Marte (novembre 1971-ottobre 1972); (3) 1305 misure di eché radar dalla superficie di Mercurio e Venere (1964-1977); (4) 2954 misure di distanza della Luna fatte con laser (1969-1980); (5) 44755 misure ottiche della posizione (ascensione retta e declinazione) del Sole e dei pianeti (1911-1979). Il risultato è

$$\dot{G}_0/G_0 = 0,2 \times 10^{-10} \text{ anno}^{-1} (\pm 200\%)$$

il che significa che, anche prendendo 3 volte l'errore, \dot{G}_0/G_0 non supera $0,2 + 3 \times 0,4 = 1,4$ parti su 10^{11} cioè 1,4 parti su 100 miliardi di anni. Si può dunque concludere che la costante della legge di Newton ha subito una variazione non grande dall'origine dell'Universo a oggi.

Dato che misure di questo tipo, ma assai più accurate, verranno ripetute fra uno o più decenni, diventa naturale attendersi che questo limite superiore possa venir notevolmente abbassato in un avvenire relativamente vicino.

Questo è il primo caso in cui l'uomo è riuscito a stabilire un limite superiore per la variabilità di una *costante universale* e a fare così un primo passo verso una giustificazione basata su misure di spazio e di tempo a mezzo di *segnali elettromagnetici* del principio cosmogonico, essenziale per poter cercare

⁽¹⁾ ADAMS P.J., ANDERSON J.D., CANUTO V.M., GOLDMAN I., HELTINGS R.W., KEESBY M.S., LAU E.L. and STANDISH E.M., *Experimental Test of the Variability of G Using Viking Lander Ranging Data.* « Phys. Rev. Lett. », 51, 1609-1612 (1983).

di ricostruire la storia passata dell'Universo: Esso afferma che a parità di tutte le condizioni le leggi della fisica che vengono osservate qui e in questo istante sono valide in qualsiasi altro punto e in qualsiasi altro istante, e cioè che esse valgono ovunque e sempre.

FRANCESCO TRONCI

La propagazione della onda radio

a 30 anni dalla morte di Guglielmo Marconi¹⁾

Desidero prima di tutto rivolgere i saluti di questa rivista ai cari familiari di mio padre, Guglielmo Marconi, ma anche soprattutto ai suoi amici, i suoi colleghi, i suoi collaboratori, i suoi discepoli, in quanto alla loro vita e al loro lavoro gli ho dedicato una delle mie opere.

Ciò che ho voluto dire è che, dopo la morte del grande inventore, le tecniche di sviluppo tecniche della radio radio si sono diffuse in tutto il mondo per i suoi discepoli e per gli altri suoi amici, per i suoi collaboratori.

La prima ragione di questa diffusione è la grande simpatia che i suoi discepoli e i suoi amici hanno avuta per il suo lavoro e per il suo lavoro. La seconda ragione è la grande simpatia che i suoi discepoli e i suoi amici hanno avuta per il suo lavoro e per il suo lavoro.

La terza ragione di questa diffusione è la grande simpatia che i suoi discepoli e i suoi amici hanno avuta per il suo lavoro e per il suo lavoro. La quarta ragione è la grande simpatia che i suoi discepoli e i suoi amici hanno avuta per il suo lavoro e per il suo lavoro.

La quinta ragione di questa diffusione è la grande simpatia che i suoi discepoli e i suoi amici hanno avuta per il suo lavoro e per il suo lavoro. La sesta ragione è la grande simpatia che i suoi discepoli e i suoi amici hanno avuta per il suo lavoro e per il suo lavoro.

La settima ragione di questa diffusione è la grande simpatia che i suoi discepoli e i suoi amici hanno avuta per il suo lavoro e per il suo lavoro. L'ottava ragione è la grande simpatia che i suoi discepoli e i suoi amici hanno avuta per il suo lavoro e per il suo lavoro.

La nona ragione di questa diffusione è la grande simpatia che i suoi discepoli e i suoi amici hanno avuta per il suo lavoro e per il suo lavoro.

¹⁾ *Trattato di fisica delle onde radio*, Zanichelli, Roma.

²⁾ *Trattato di fisica delle onde radio*, Zanichelli, Roma.