

Verifiche della Relatività Generale di Einstein nello Spazio

Anna Nobili, Università di Pisa & INFN

I Mercoledì della scienza, Piacenza 14 Marzo 2007

George Bernard Shaw, 1930: discorso in onore di Einstein....

Nato a Dublino nel 1856, morto nel 1950

Premio Nobel 1925: “Per il suo lavoro intriso di idealismo ed umanità, la cui satira stimolante è spesso infusa di una poetica di singolare bellezza”

“...Napoleon, and other great men of his type, they were makers of empire.. but there is an order of men who get beyond that, they are not makers of empire but they are makers of Universe ... their hands are not stained by the blood of any human being on Earth.....Ptolomy made a Universe which lasted 14 hundred years ... Newton also made a Universe which has lasted 3 hundred years ...Einstein made a Universe and I can't tell you how long that will last....”

G.B. Shaw, 1930

La gravità è la più debole di tutte le forze della natura, ma non si satura e perciò è quella che determina la struttura dell'Universo....

Il punto di vista di Einstein sulla Relatività Generale....

- “Non credo che il significato più importante della Relatività Generale sia di predire piccoli effetti osservabili, **quanto piuttosto la semplicità delle sue basi e la sua consistenza interna**”

A. Einstein

...tuttavia, come ogni altra teoria, la Relatività Generale è destinata a restare valida solo fintanto che sarà in accordo con le misure sperimentali...

Nel 1915 Einstein calcolò la velocità di avanzamento del perielio dell'orbita di Mercurio secondo la sua teoria, **e trovò che differiva da quella prevista da Newton di 42.9 "/secolo**, che era esattamente quanto mancava ai meccanici celesti per mettere in accordo le proprie predizioni teoriche con le osservazioni astronomiche....

- **“Per alcuni giorni, non riesco a stare in me dalla gioia...”**

A. Einstein

L'avanzamento del perielio di Mercurio (I)

- **Osservato:** 574 "/secolo
- **Predetto dalla meccanica celeste secondo la teoria newtoniana della gravitazione:**

278 "/secolo dovuto a **Venere**

153 "/secolo dovuto a **Giove**

90 "/secolo dovuto alla **Terra**

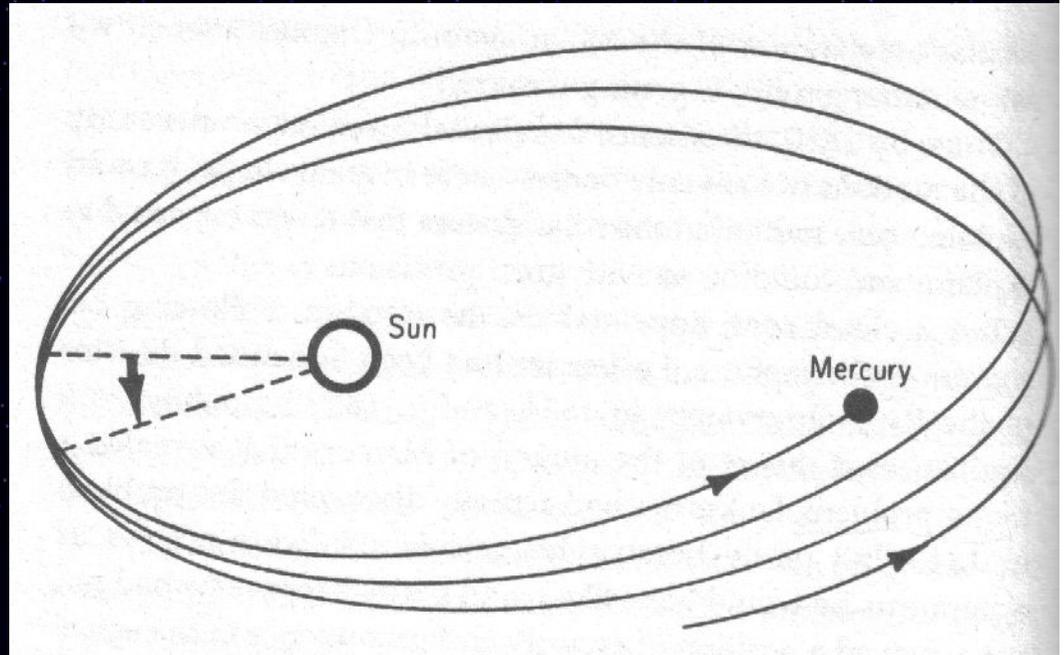
10 "/secolo dovuto a **tutti gli altri pianeti**

totale: 531 "/secolo ...

...mancano circa 43 "/secolo rispetto al valore predetto dalla meccanica celeste !!!!!

- "Vulcano" tra Sole e Mercurio? Un anello di piccole masse?

$1/r^{2.0000001574}$? **NO**



L'avanzamento del perielio di Mercurio (II)

- Velocità di avanzamento del perielio di un pianeta secondo la Relatività Generale:

$$\dot{\omega}_{GR} = \frac{6\pi GM_{\odot}}{Pa(1-e^2)c^2}$$

G, c, M_{\odot} : costante di gravitazione universale, velocità della luce, massa del Sole

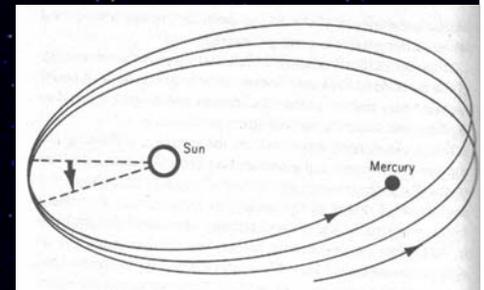
a, e, P : semiasse maggiore, eccentricità e periodo dell'orbita del pianeta

- Il suo valore numerico dipende dai valori misurati dell'unità astronomica A (raggio medio dell'orbita della Terra attorno al Sole) e dalla velocità della luce c

$$A_{1976} = 1.4959787 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$c_{1976} = 299,792,458 \text{ ms}^{-1}$$

$$\dot{\omega}_{GR} = 42.98 (A / A_{1976})^2 (c / c_{1976})^{-2} \text{ ''/100yr}$$



L'avanzamento del perielio di Mercurio (III)

- Attenzione ai facili entusiasmi.... se il Sole non è una sfera perfetta, ma è un pò schiacciato (perché ruota...), anche questo schiacciamento produce un avanzamento del perielio di Mercurio (newtoniano) senza bisogno di scomodare la Relatività Generale...

$$\dot{\omega} = -\frac{3}{4}nJ_2 \frac{R_e^2}{a^2} \frac{1 - 5\cos^2 i}{(1 - e^2)^2}$$

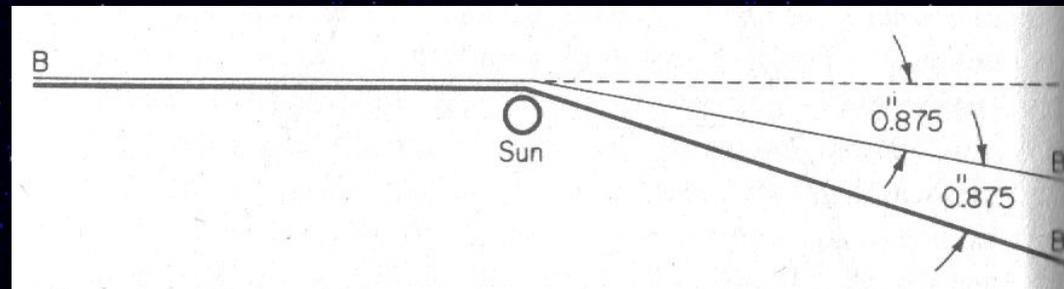
Per affermare che è trascurabile rispetto ai 43 "/secolo della Relatività Generale dobbiamo misurare il raggio del Sole e il suo schiacciamento... Le prime misure sono del 1966 (si usava un disco occultatore per produrre una eclissi artificiale...), poi ancora negli anni '70. Sono poco precise, e danno stime in eccesso, che non permettono di decidere chiaramente in favore della Relatività Generale....

- Solo negli anni '80 misure precise di oscillazioni del sole ("eliosismologia"), che dipendono dallo schiacciamento del corpo, hanno permesso di concludere che il contributo all'avanzamento del perielio di Mercurio dovuto allo schiacciamento del Sole è trascurabile

La deflessione dei raggi luminosi (I)

“Revolution in science. New theory of the Universe, Newtonian ideas
overthrown”

London Times, November 7 1919



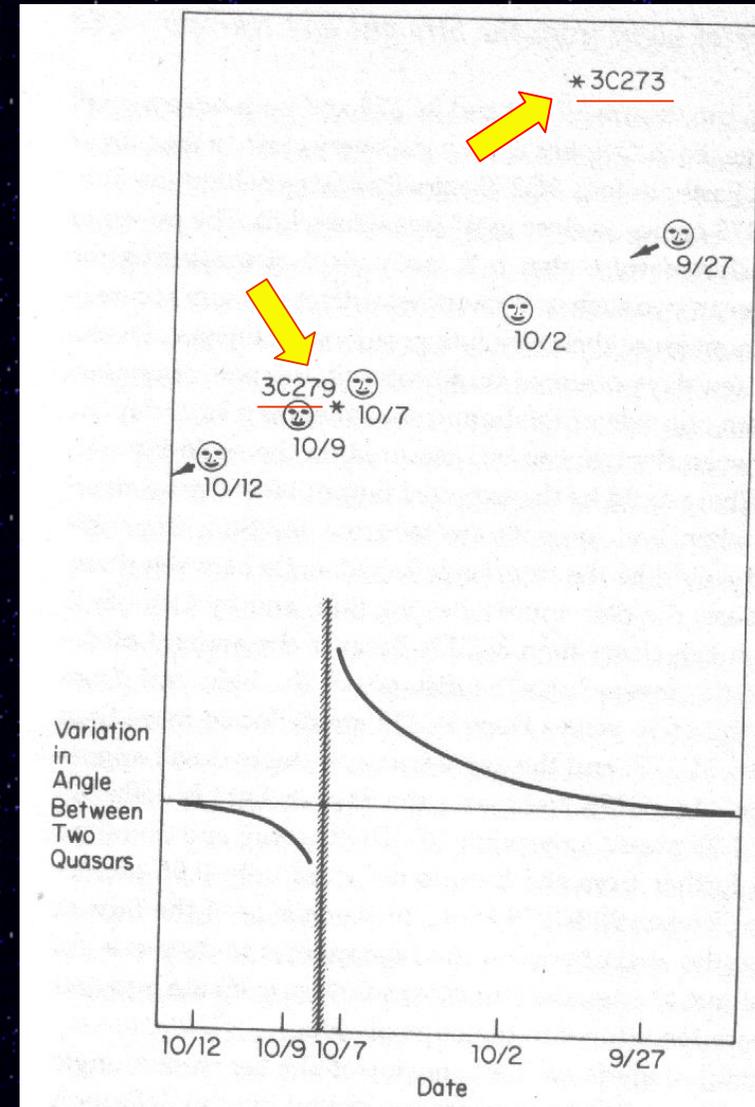
Un raggio di luce che passa rasente al Sole
viene deflesso di 0.875'' secondo Newton e di
due volte tanto secondo Einstein

L'articolo del “London Times” riporta le misure fatte da Eddington della deflessione della luce di una stella lontana che si trovava quasi dietro al Sole durante una eclissi totale di Sole (Eddington fece una spedizione in Africa, dove l'eclisse era meglio visibile...) secondo le quali il valore misurato è risultato essere doppio di quello predetto da Newton, in accordo quindi con la predizione di Einstein...

La deflessione dei raggi luminosi (II)

- Di nuovo, attenzione ai facili entusiasmi.... la misura di Eddington era tutt'altro che facile e priva di incertezze....

Solo negli anni '70 la radiointerferometria di due QUASAR, per le quali accadeva che il Sole passasse vicino ad una delle due nel suo moto annuale lungo l'eclittica, ha permesso di fare una misura accurata (la prima quasar **3C48** fu scoperta nel 1960...). In questo caso il fattore limitante si riduceva alla corona solare..



Il “redshift” gravitazionale (I)

- Il campo gravitazionale “influenza” gli orologi e i segnali elettromagnetici

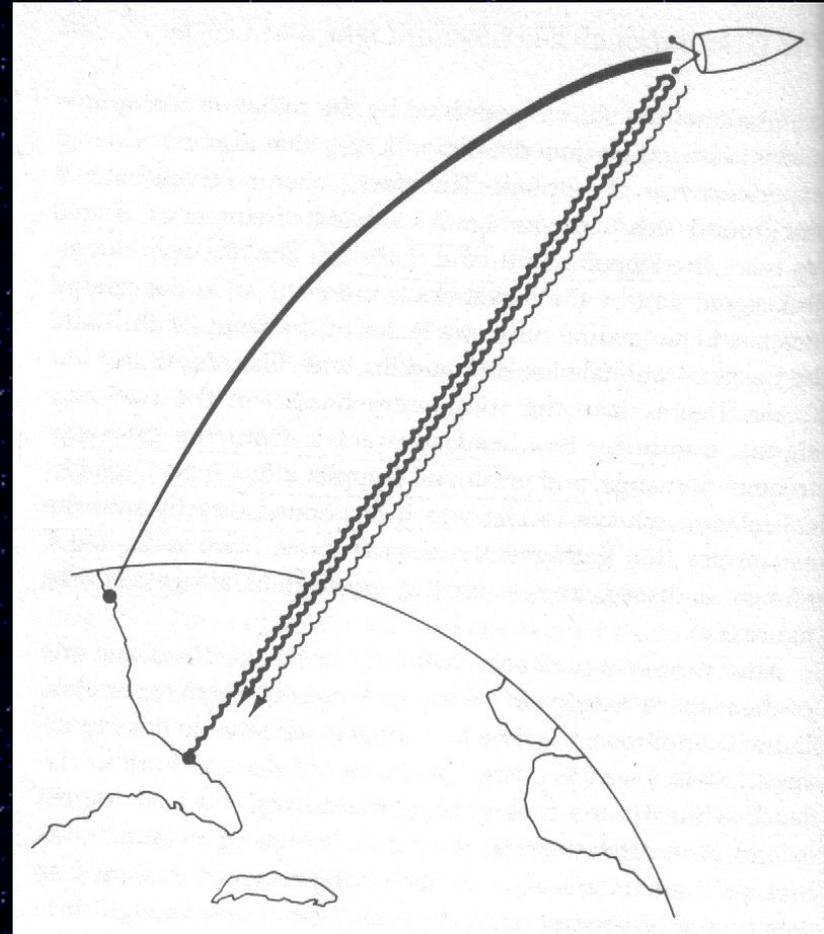
Un orologio è un “aggeggio” (meccanico, biologico, atomico...) che esegue una qualche attività “fisica” in modo ripetitivo con un periodo (frequenza, lunghezza d’onda...) il più possibile ben definito e costante nel tempo...

- 1976: la missione suborbitale GP-A permette di misurare il peso “apparente” dei fotoni usando un orologio atomico “H maser” (in cui il fenomeno periodico ha una lunghezza d’onda di 21 cm) a bordo del razzo Scout D lanciato fino ad una altezza di 10000 km

Il “redshift” gravitazionale (II)

Un orologio (maser all'idrogeno) viene lanciato insieme al razzo SCAUT D (fino a 10000 km di altezza); un segnale da un orologio identico a terra viene mandato da terra verso lo SCOUT; quando questo viene ricevuto dal razzo, esso viene rimandato indietro dal razzo (segnale a 2-vie), insieme ad un altro segnale dall'orologio di bordo (segnale a 1-via).

..prendi la variazione di frequenza del segnale a 2-vie, dividila per 2 e sottrai il valore ottenuto dalla variazione di frequenza del segnale a 1-via: otterrai la misura della variazione di frequenza (“redshift”) dovuta al fatto che i fotoni del segnale hanno viaggiato per una altezza di 10000 km nel campo gravitazionale della Terra ... con una accuratezza di 70 parti per milione!!!



(Servono il segnale a 2 vie + quello a 1 via per poter sottrarre l'effetto doppler classico)

Al di là dei test classici.... (I)

Tutte le tecnologie innovative e le scoperte cruciali per verificare la Relatività Generale avvengono verso la fine degli anni '50, inizio degli anni '60. Da allora, la Relatività Generale è stata sottoposta in modo sistematico a test estremamente stringenti, ad un livello che non era neppure pensabile durante la vita di Eistein (muore nel 1955..)

- 1957: viene lanciato lo Sputnik, comincia l'era spaziale, l'intero Sistema Solare diventa un laboratorio per la verifica della RG
- 1959-1961: per la prima volta si riceve indietro (da Venere) l'eco di un segnale radar, e si può quindi migliorare l'unità di misura delle distanze nel Sistema Solare (l'Unità Astronomica)
- 1960: viene scoperta la prima quasar (3C48)
- fine anni '50s: viene scoperto l'effetto Mossbauer (premio Nobel; viene usato nel 1960 per misurare il redshift gravitazionale a terra, poi migliorato molto con GP-A)
- 1964: Shapiro "time delay" (noto come il 4° test della RG; Shapiro usa le sonde Mariner, Viking e i Viking atterrati su Marte...)
- fine anni '60-inizio '70: effetto Nordtvedt, pannelli di retro riflettori laser depositati sulla superficie lunare, inizio del "Lunar Laser Ranging", verifica del principio di equivalenza tra la Terra e la Luna nel campo gravitazionale del Sole...

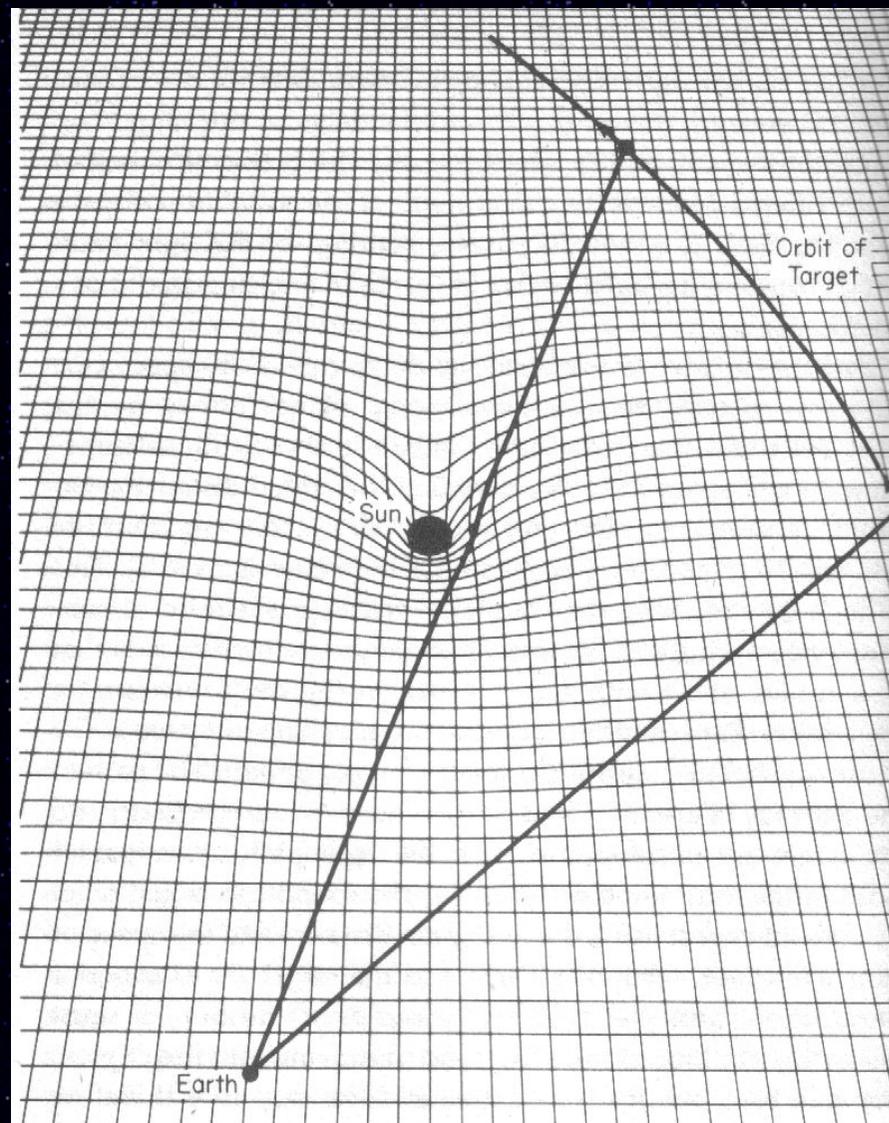
Al di là dei test classici.... (II)

- 1967: scoperta la prima pulsar; 1971 scoperta la prima sorgente a raggi X con buco nero
- 1970s: orologio H Maser su razzo Scout D (10000 km) per la misura accurata del redshift gravitazionale (missione GP-A)
- 1974: pulsar binaria ed evidenza indiretta della esistenza delle onde gravitazionali predette dalla RG in approssimazione lineare
- 2003: misura del parametro γ della RG con la sonda Cassini
$$\gamma - 1 \simeq 2.3 \cdot 10^{-5}$$
-precessione di De Sitter e effetto Lense-Thirring (missione spaziale GP-B e satelliti Lageos)
-verifiche della RG con la sonda "BepiColombo" di ESA
-verifica del Principio di Equivalenza (meglio se in orbita bassa attorno alla terra..)

Misura dello “Shapiro time delay” (I)

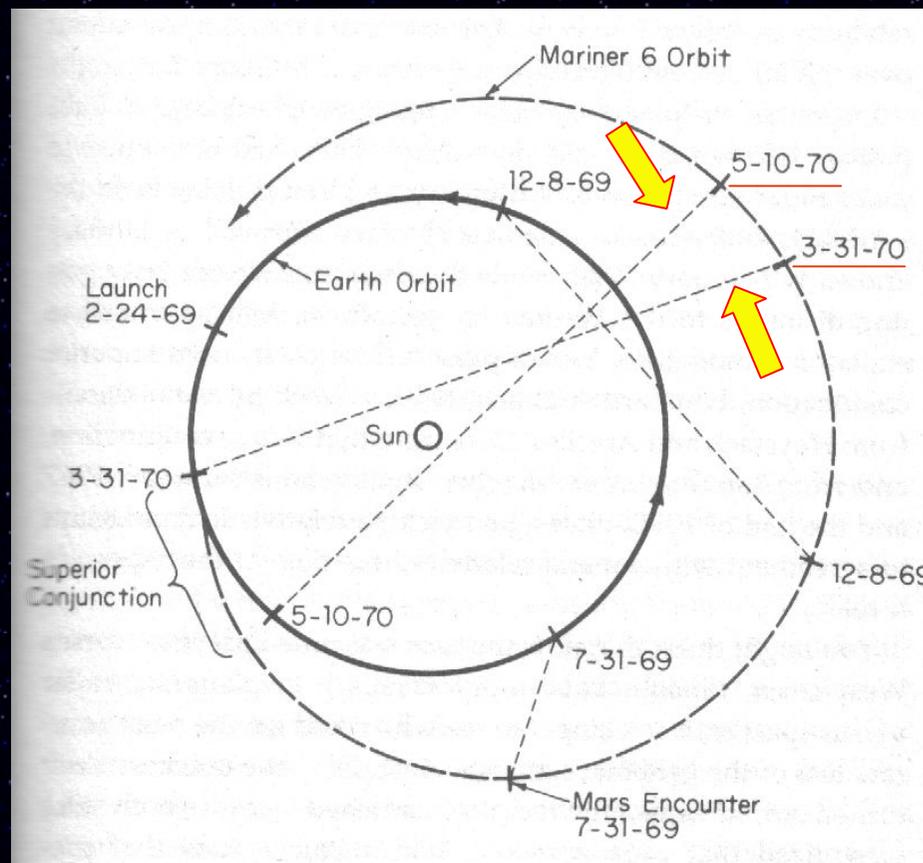
Secondo la Relatività Generale lo spazio-tempo viene “curvato” dalla massa del Sole, tanto più nelle zone vicine. Quindi, un segnale che passi vicino al Sole dovrà percorrere una distanza più lunga dando luogo al famoso ritardo (“Shapiro time delay”) calcolato da Irwin Shapiro all’inizio degli anni '60.

Se si manda un segnale radar ad un pianeta (o ad una sonda artificiale) che passi vicino al Sole, e lo si riceve indietro, si può misurare questo ritardo ...



Misura dello “Shapiro time delay” (II)

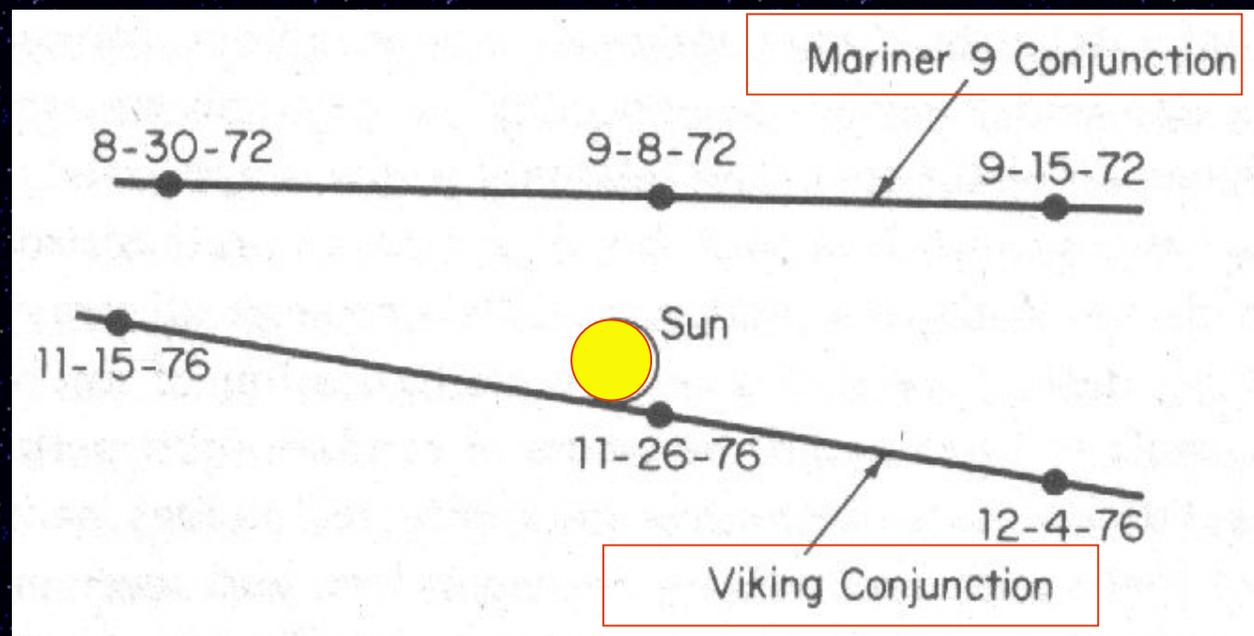
Le migliori misure dello “Shapiro time delay” sono state fatte usando la sonda Mariner 6 (inviata verso Marte) durante 2 congiunzioni superiori con la Terra che ebbero luogo il 31 Marzo 1970 e 10 Maggio 1970. **La NASA approvò questi esperimenti solo l’8 dicembre 1969, pochi mesi prima che le 2 congiunzioni si verificassero !!!**



Disporre di una sonda artificiale è importante perché ha a bordo un “transponder”, però i disturbi dovuti ai razzetti usati per controllare il suo assetto degradano la qualità della misura. I pianeti non hanno questi disturbi, ma non dispongono di “transponder”, allora...

Misura dello “Shapiro time delay” (III)

...allora la cosa migliore è di “ancorare” la sonda al pianeta, in modo da avere il transponder senza i disturbi... quindi... usare un “orbiter” (attorno a Marte) o meglio ancora un “lander” (sulla superficie di Marte). E infatti Shapiro ripeté l’esperimento nel 1972 con il Mariner 9 e nel 1976 con il Viking Lander



Le traiettorie di Marte nel cielo, vicino al Sole, durante la congiunzione superiore con Mariner 9 (dal 30 Agosto al 15 Settembre 1972) e quella con il Viking (dal 15 Novembre al 4 Dicembre 1976)

Verifiche delle Relatività generale G con la sonda “BepiColombo” di ESA

La missione “**BepiColombo**” della Agenzia Spaziale Europea (ESA), **intitolata allo scienziato italiano Giuseppe Colombo** (che è stato il mio maestro), esplorerà il pianeta Mercurio con degli strumenti a bordo che permetteranno misure di “tracking” molto molto accurate. Con tale strumentazione sarà possibile non soltanto misurare molto accuratamente l’orbita della sonda attorno a Mercurio, ma anche osservare indirettamente il moto del suo centro di massa con una accuratezza migliore di diversi ordini di grandezza rispetto a quanto è stato possibile realizzare finora per mezzo di misure radar di distanza dalla superficie di questo pianeta.

Con questa sonda sarà possibile eseguire esperimenti di verifica della Relatività Generale che costituiranno una versione moderna dei tradizionali test di Relatività Generale condotti nel secolo scorso.

GALILEO e il Principio di Equivalenza

- Il Principio di Equivalenza, secondo il quale tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione indipendentemente dalla loro massa e/o composizione (**Universalità della caduta libera**), è alla base sia della Teoria della Gravitazione Universale di Newton che della Relatività Generale di Einstein. La prima verifica sperimentale rigorosa risale a Galileo....

Galileo: “e finalmente ho preso due palle, una di piombo ed una di sughero, quella ben più di cento volte più grave di questa, e ciascheduna di loro ho attaccata a due sottili spaghetti eguali, lunghi quattro o cinque braccia, legati ad alto; allontanata poi l'una e l'altra palla dallo stato perpendicolare, gli ho dato l'andare nell'istesso momento, ed esse, scendendo per le circonferenze de' cerchi descritti da gli spaghetti eguali, lor semidiametri, passate oltre al perpendicolo, son poi per le medesime strade ritornate indietro; **e reiterando ben cento volte per lor medesime le andate e le tornate, hanno sensatamente mostrato come la grave va talmente sotto il passo della leggiera, che né in ben cento vibrazioni, né in mille, anticipa il tempo d'un minimo momento, ma camminano con passo equalissimo.** Scorgesi anche l'operazione del mezzo, il quale, arrecando qualche impedimento al moto, assai più diminuisce le vibrazioni del sughero che quelle del piombo, ma non però che le renda più o meno frequenti; anzi quando gli archi passati dal sughero non fusser più che di cinque o sei gradi, e quei del piombo di cinquanta o sessanta, son eglin passati sotto i medesimi tempi.”

[Galileo; Le Opere, Vol. VIII p. 128]

Il piccolo satellite "Galileo Galilei-GG"

