



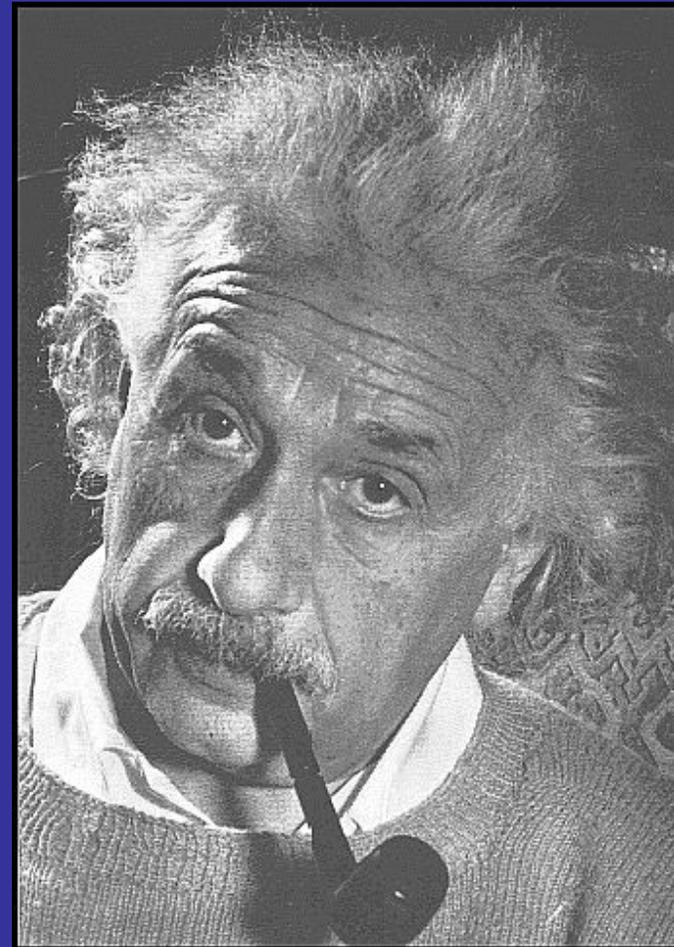
**BUCHI NERI**  
**EFFETTO LENSE-THIRING**  
**&**  
**RELATIVITA' GENERALE**

**Roberto Santoru**  
**Liceo Scientifico "G. Spano"**  
**Sassari**

# La Teoria della Relatività Generale

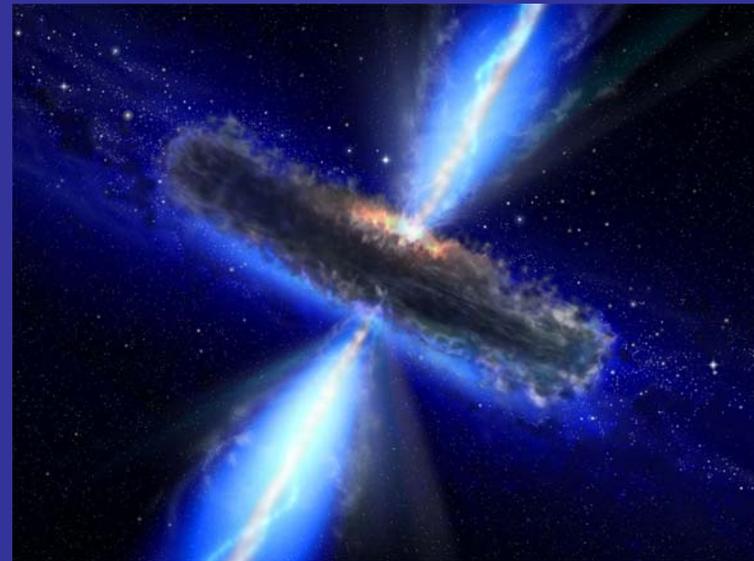
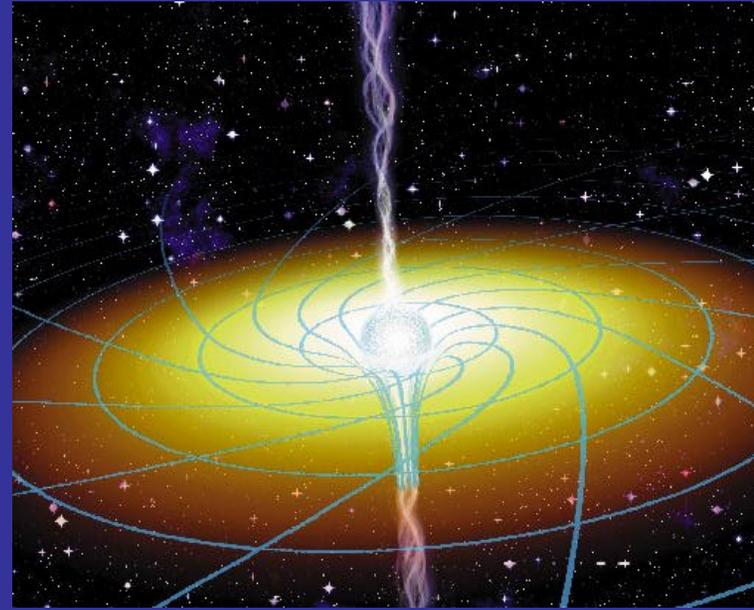
La Teoria della Relatività Generale fu formulata nel 1916, tuttavia per circa 50 anni essa non ricevette l'attenzione che le era dovuta, poiché non si avevano i mezzi e le conoscenze per verificarne la validità. Benché spiegasse compiutamente le anomalie dell'orbita di Mercurio, essa rimase una pura speculazione astratta fino agli anni '60, cioè fino alla scoperta di fenomeni che potevano essere spiegati solo con il contributo di tale teoria. I quasar furono scoperti infatti tra il 1960 (scoperta di 3C48 da parte di Matthews e Sandage) e il 1963 (scoperta della natura cosmologica del red-shift da parte di Schmidt); la scoperta della radiazione cosmica di fondo è del 1965 (Penzias e Wilson); le pulsar furono invece scoperte nel 1967 (A. Hewish).

Se in precedenza la Meccanica newtoniana si era rivelata sufficiente a descrivere la totalità dei fenomeni astronomici, ora si entrava in una nuova era dell'astrofisica, fondata sulla Relatività e sulla Meccanica quantistica.



# L'effetto Lense-Thirring

La teoria della Relatività prevede che un corpo dotato di massa produca una distorsione dello spaziotempo dovuta al proprio campo gravitazionale (come nel classico esempio della palla da bowling su un telo elastico); se il corpo è in rotazione su un proprio asse lo spaziotempo subisce una ulteriore curvatura, deformandosi in maniera particolare, come se il corpo rotante trascini con se il tessuto spaziotemporale. Tale effetto (detto di Lense-Thirring o “trascinamento dei sistemi di riferimento” o “frame dragging”) fu teorizzato dai ricercatori Lense e Thirring nel 1918, sulla base delle equazioni di Einstein.



# L'effetto Lense-Thirring

L'effetto Lense-Thirring è noto da oltre 85 anni, tuttavia solo in tempi recenti si è riusciti a misurare tale effetto, grazie alle ricerche condotte da un gruppo di ricerca internazionale guidato dall'italiano Ciufolini e dall'americano Pavlis.

L'effetto è stato misurato per la prima volta (con un margine d'errore del 30%) sui satelliti artificiali LAGEOS I e II, delle "semplici" sfere in rame e alluminio dotate di retroriflettori. Ma sia il gruppo di ricerca di Ciufolini sia la NASA si propongono di raggiungere una maggiore accuratezza col lancio di due nuovi satelliti: il Weber-Sat ed il Gravity Probe B.

Il primo, sotto la supervisione del team italo-americano, è una evoluzione dei LAGEOS, dei quali conserva oltretutto il basso costo produttivo; il secondo è un progetto della NASA, si tratta di un costosissimo satellite (circa 700 milioni di dollari) dotato di un sistema di 4 giroscopi puntati su una lontanissima stella in Pegaso pronti a rivelare la minima distorsione.

# Gravity Probe B



**Il satellite Gravity Probe B è stato lanciato (dopo un rinvio di 24 ore) il 20 aprile 2004 alle ore 12:57 con un razzo Boeing Delta II dalla base di Vandenberg, in California.**

# Gravity Probe B

Il Gravity Probe B è l'esperimento più costoso che la NASA abbia mai sostenuto, circa 700 milioni di dollari.

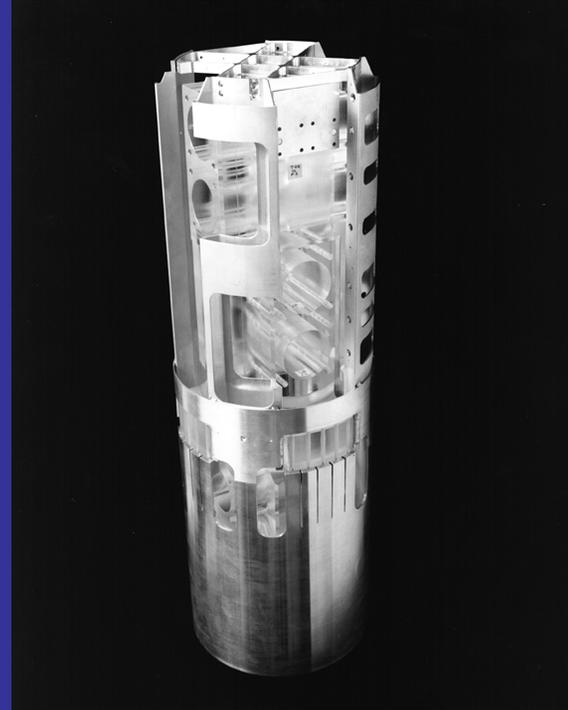
Il Gravity Probe B, in orbita da oltre un anno, ha impiegato i primi quattro mesi nello spazio per assettare la strumentazione, in particolare i quattro precisissimi giroscopi che sono stati puntati in direzione della lontanissima stella IM Pegasi/HR8703.

La conclusione dell'esperimento è prevista per l'estate del 2006, quando verrà raccolta una quantità di dati sufficiente alla verifica della validità delle previsioni teoriche ricavate dalle equazioni di Einstein.



# Gravity Probe B

L'elemento più costoso del Gravity Probe B è indubbiamente il sistema di 4 giroscopi, costituito da 4 sfere di quarzo fuso.

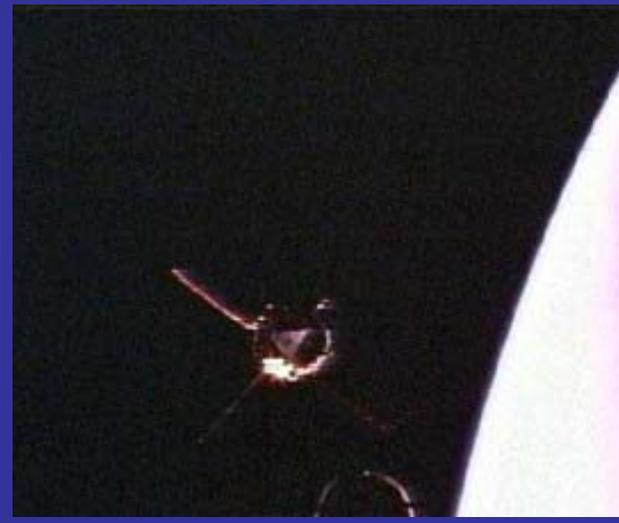
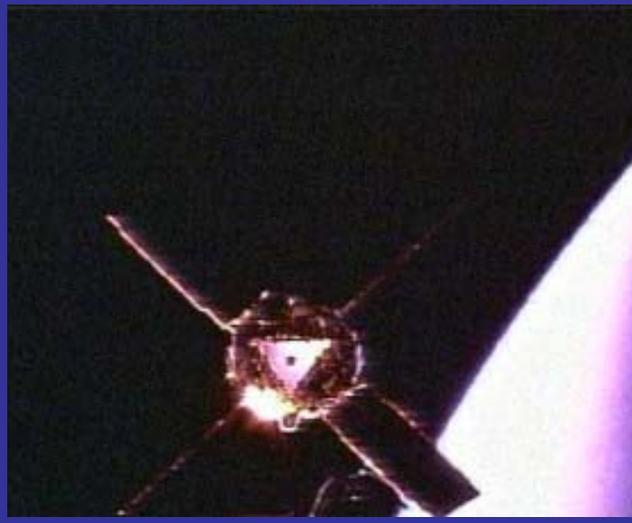


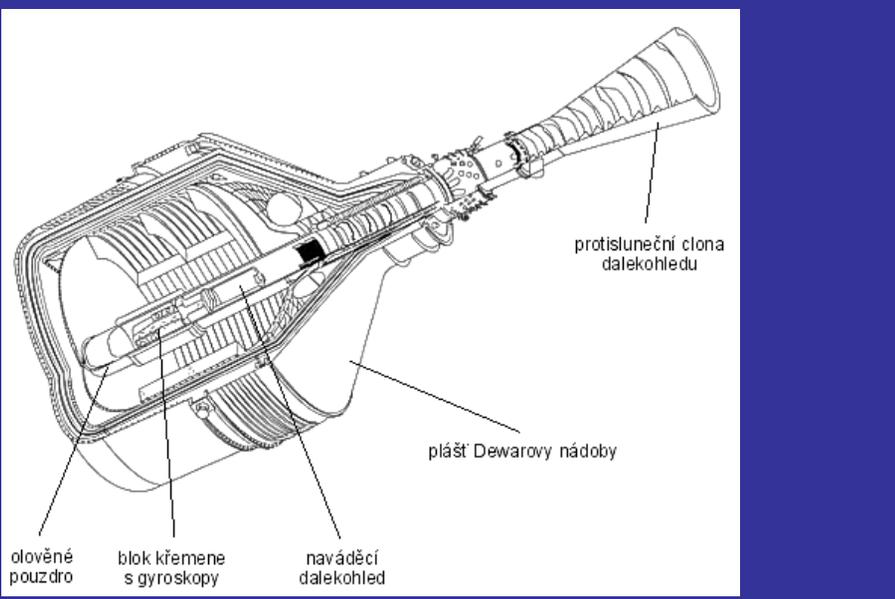
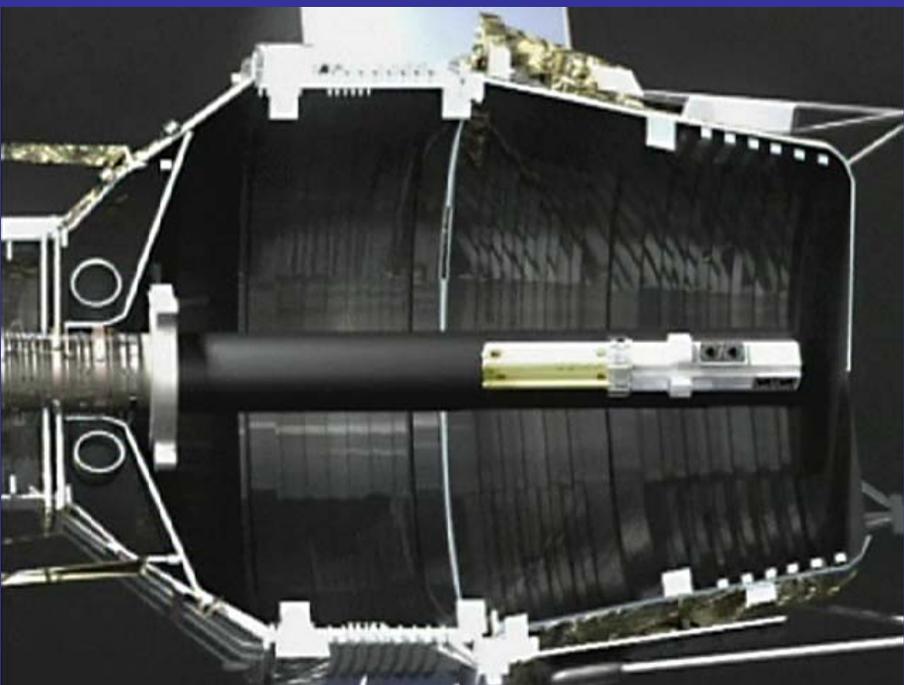
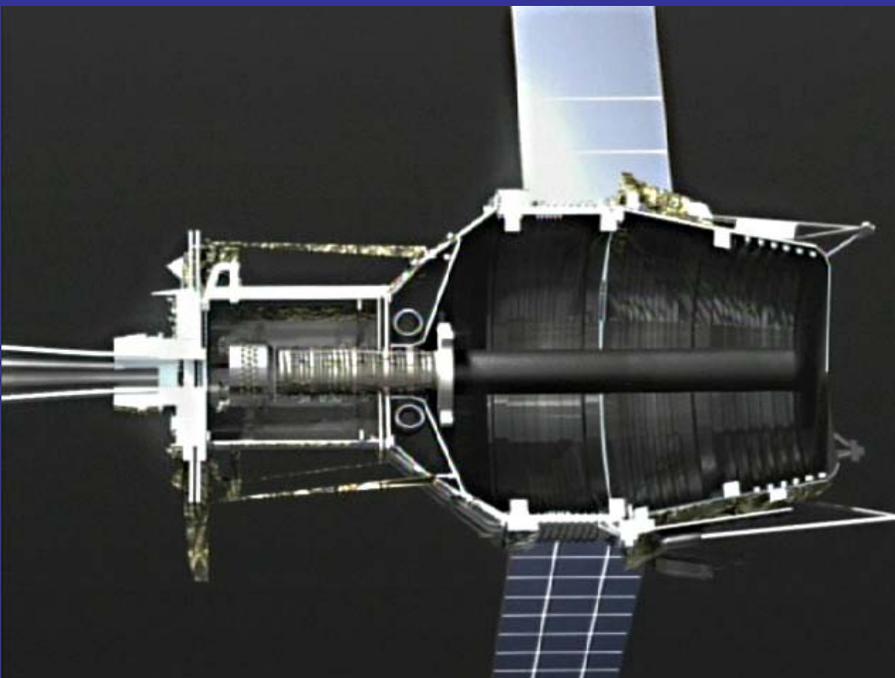
Le sfere, dalle dimensioni di una pallina da ping-pong, sono di una perfezione mai raggiunta prima (30 milioni di volte più precise di qualsiasi sfera sia mai stata costruita): la loro forma è perfettamente sferica con una approssimazione di circa 40 strati di atomi.



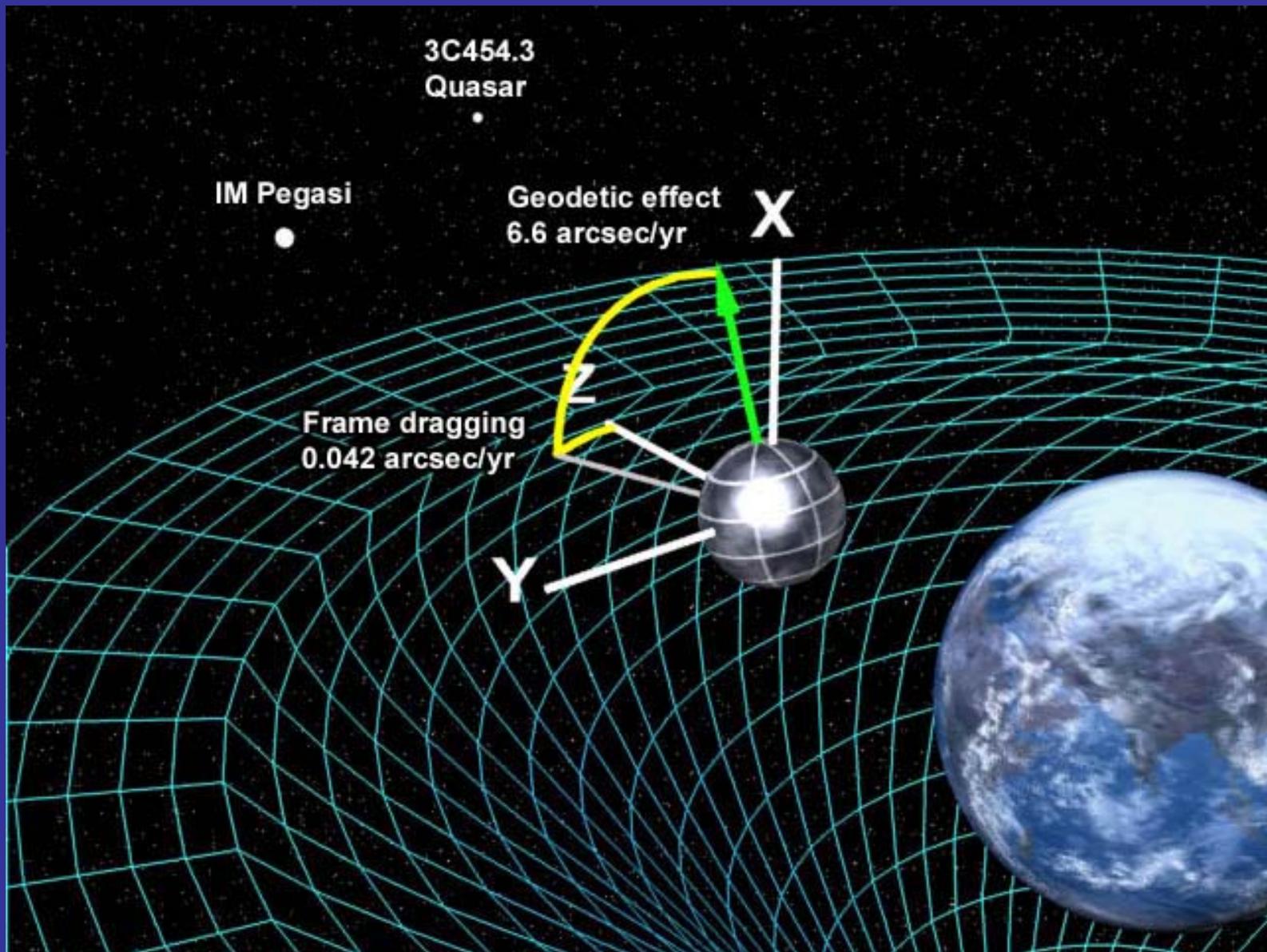
*Sopra.* I preparativi ed il lancio del Gravity Probe B.

*Sotto.* Il distacco del satellite dal vettore.





La struttura del Gravity Probe B.



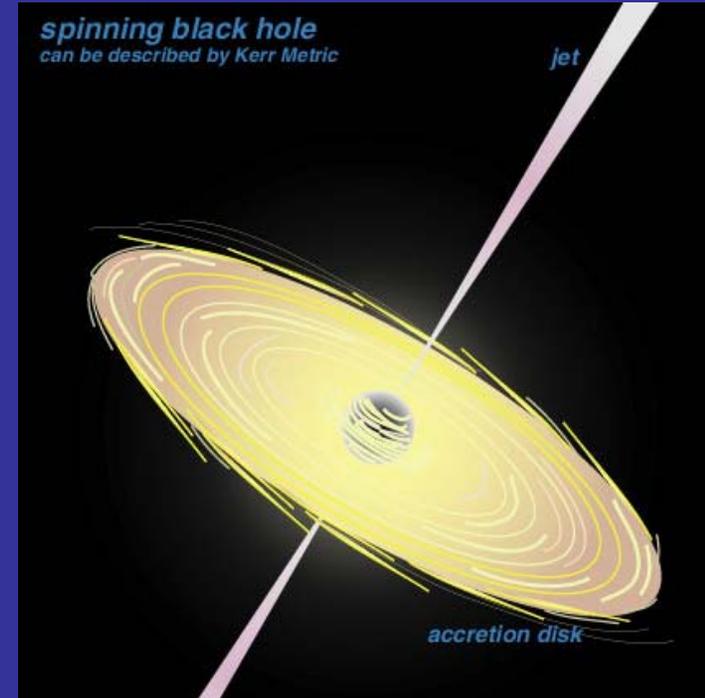
L'effetto di frame dragging prodotto dalla rotazione terrestre.

# L'effetto Lense-Thirring

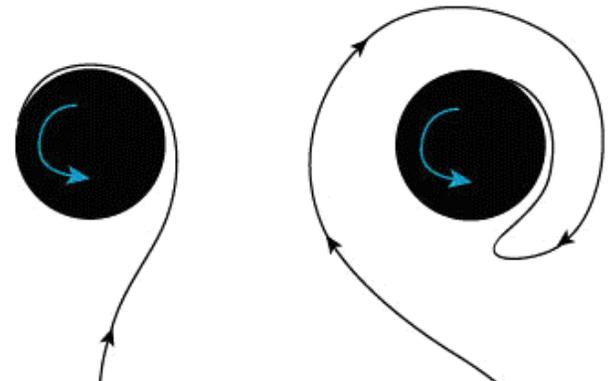
Recentemente due fisici italiani, Stella e Vietri, hanno osservato una variabilità nell'emissione X di 3 stelle di neutroni, che può ritenersi una prova indiretta dell'effetto Lense-Thirring;

a tale conclusione, alcuni mesi dopo, è giunto anche un gruppo di ricercatori americani compiendo analoghe osservazioni su diversi buchi neri.

Sono appunto i buchi neri di Kerr, ovvero i buchi neri rotanti, gli oggetti che produrrebbero un effetto Lense-Thirring di enorme portata, tale da invertire il momento angolare di qualsiasi particella orbitante intorno ad esso in senso opposto.

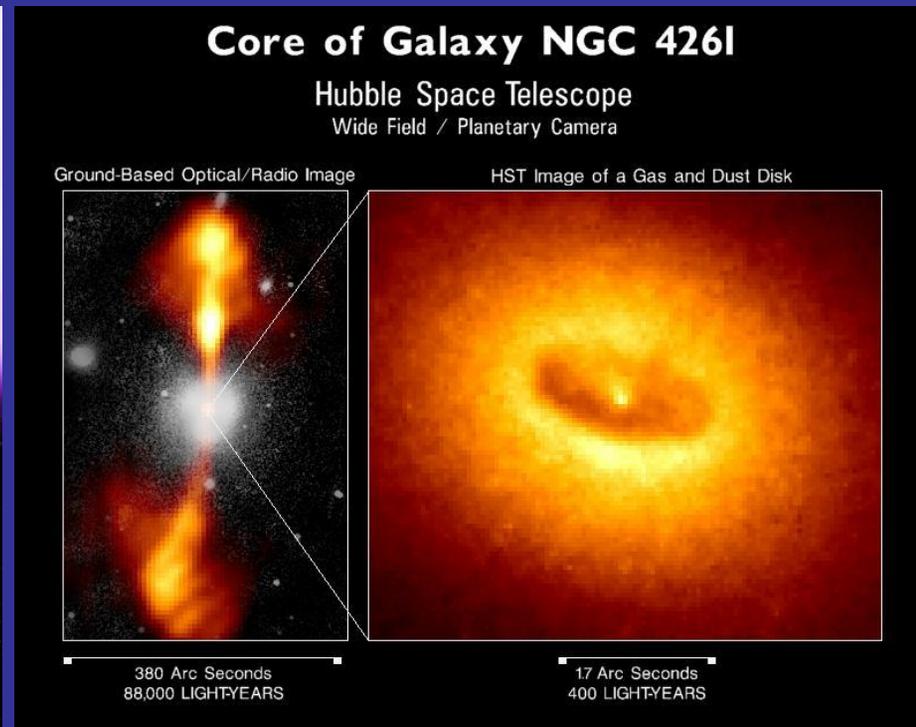
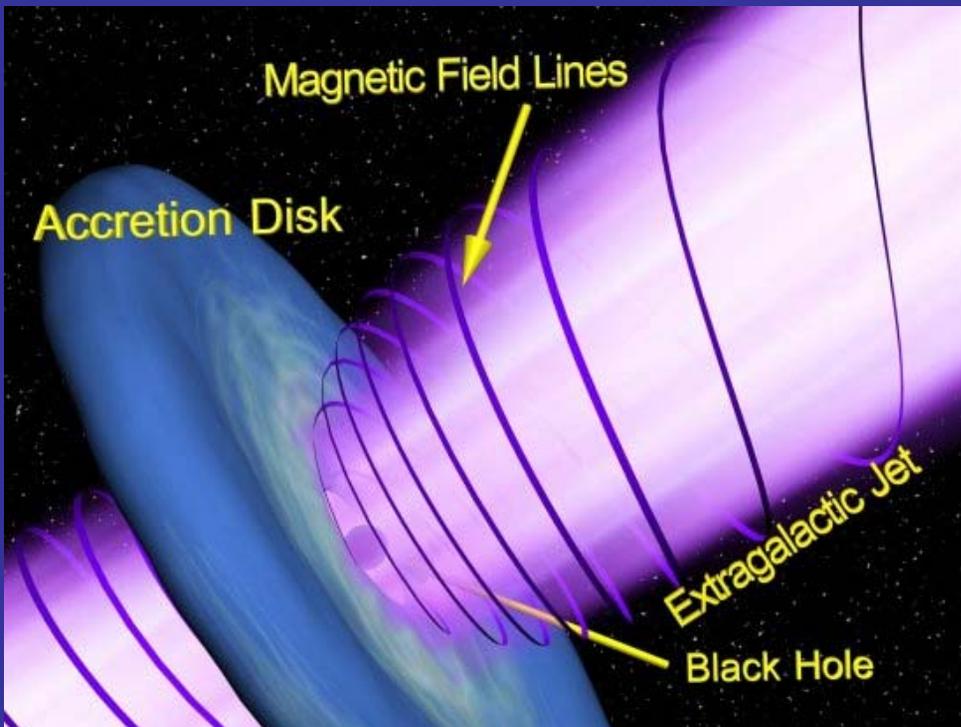


## Effetto Lense-Thirring



# I getti extragalattici

L'effetto Lense-Thirring è una manifestazione della forza gravitomagnetica, cosiddetta per l'affinità con la forza elettromagnetica. La forza gravitomagnetica è una forza teorizzata da Einstein, che viene generata appunto da una massa in movimento od in rotazione. Tale forza è implicata anche in un altro fenomeno proprio dei buchi neri di Kerr: l'emissione di getti di plasma dai poli magnetici, le cui dimensioni giungono fino ai milioni di anni luce e la cui velocità è molto prossima a  $c$  (velocità della luce) e, in diversi casi, paradossalmente superiore a  $c$ : si tratta dei cosiddetti **getti superluminali**. Ma sono davvero superluminali?



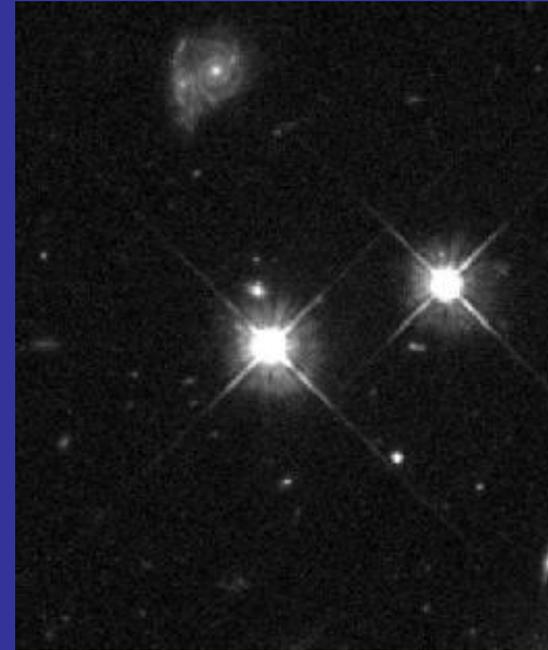


# IL QUASAR SUPERLUMINALE

Calcolo della velocità  
"apparentemente superluminale"  
di un getto di plasma espulso  
da un quasar

# I Quasar

Il termine quasar (dall'acronimo imperfetto QUAsi Stellar Astronomical Radiosources) designa una categoria di oggetti celesti dall'aspetto stellare ma con una emissione energetica enorme in diverse gamme elettromagnetiche (stimata in circa 1 milione di volte quella di una galassia come la nostra). Tali oggetti, scoperti nel 1960, sono caratterizzati da una enorme distanza e da un elevatissimo bilancio energetico in rapporto alle dimensioni relativamente ridotte. Gli studi più recenti hanno chiarito in parte la loro natura ancora per molti versi misteriosa: il motore dei quasar sarebbe un buco nero massiccio, nel quale precipitano gas e polveri che si suppone provenire da collisioni galattiche che interessano le galassie nelle quali si trovano i quasar, dette appunto "galassie ospiti". Diversi quasar sono inoltre studiati poiché in essi si osservano dei getti di materia allo stato di plasma, sicuramente relazionabili alla conformazione del campo magnetico.



# Quasar 3C273

Il quasar 3C273 fu tra i primi ad essere scoperto, la sua scoperta nel 1962 coincise tra l'altro con l'inaugurazione del metodo di Hazard. Negli anni '60 la radioastronomia disponeva di strumenti i cui limiti non consentivano la determinazione esatta della posizione della sorgente radio, perciò il radioastronomo britannico Cyril Hazard ideò un metodo che sfruttava l'occultazione dell'oggetto osservato da parte della Luna, che consentiva di determinare la posizione della controparte ottica con una precisione di un secondo d'arco. Trovandosi presso l'Università di Sidney per sperimentare per la prima volta il suo metodo scelse il Parkes Radio Telescope, sito nell'entroterra australiano, tuttavia nel recarvisi prese il treno sbagliato, non poté quindi giungere in tempo per l'osservazione. Fortunatamente fu validamente sostituito da John Bolton, direttore dell'osservatorio, che con un gruppo di altri scienziati compì l'osservazione, non senza incontrare qualche imprevisto: si rese infatti necessario abbattere degli alberi e rimuovere alcuni bulloni di sicurezza del radiotelescopio per seguire il fenomeno per l'intera durata. L'immagine ottica della sorgente 3C273 sembrava quella di una stella con un curioso ciuffo, l'immagine radio mostrava invece una emissione di enorme entità.



*Immagine di 3C273 al radiotelescopio*



*Immagine di 3C273 al telescopio ottico*

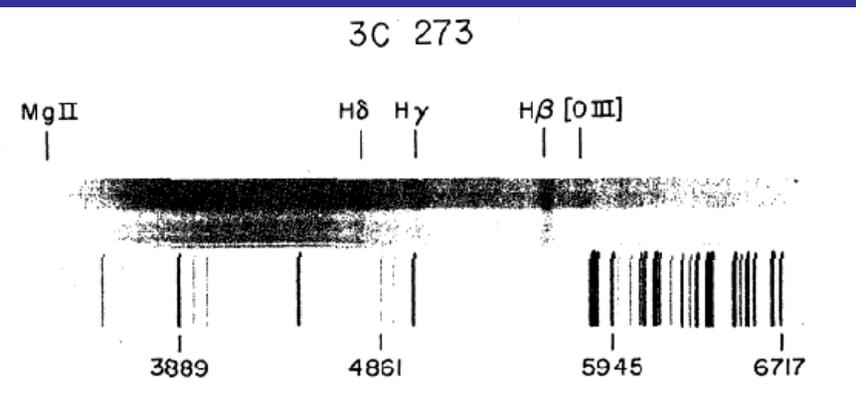
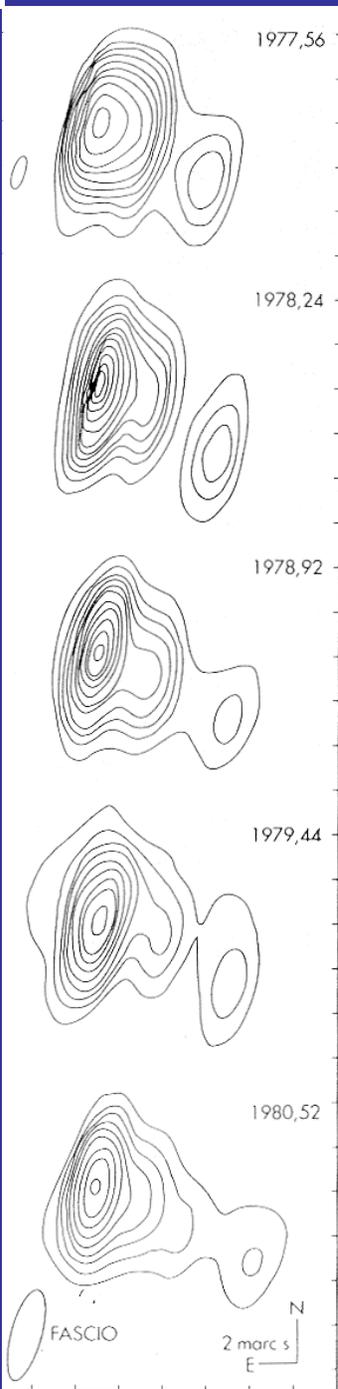


FIG. 2.—Spectrum of the quasi-stellar object 3C 273B, 400 Å/mm original, 103a-F, January 23, 1963. The comparison spectrum is H + He - Ne. Exposure over the upper half of slit was three times that over the lower half. Redshifted emission lines of H and [O III] are indicated; also the barely visible line of Mg II, confirmed on denser exposures.

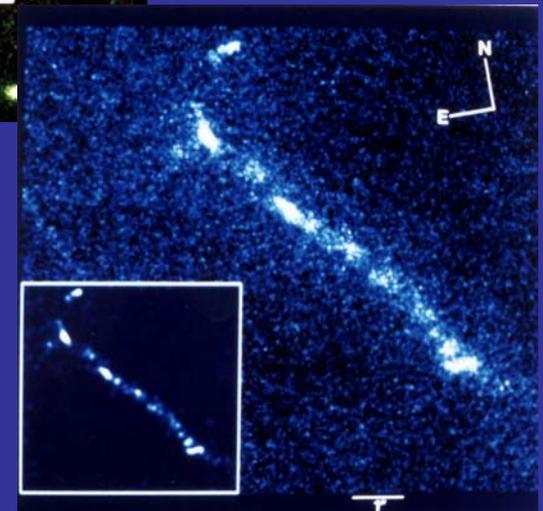
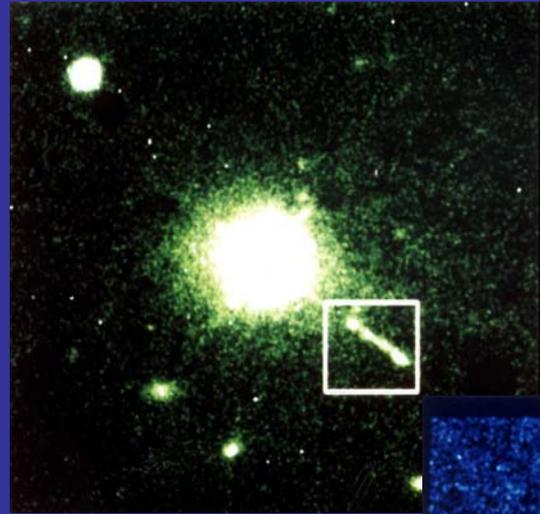
*Lo spettro di 3C273, caratterizzato da un forte red shift.*

# Quasar 3C273

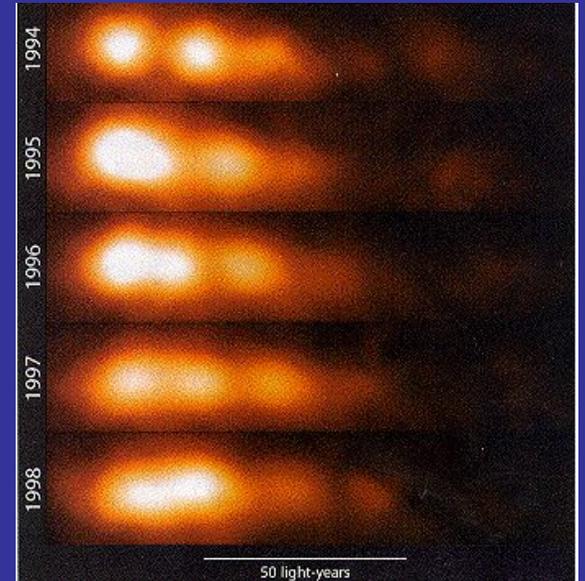
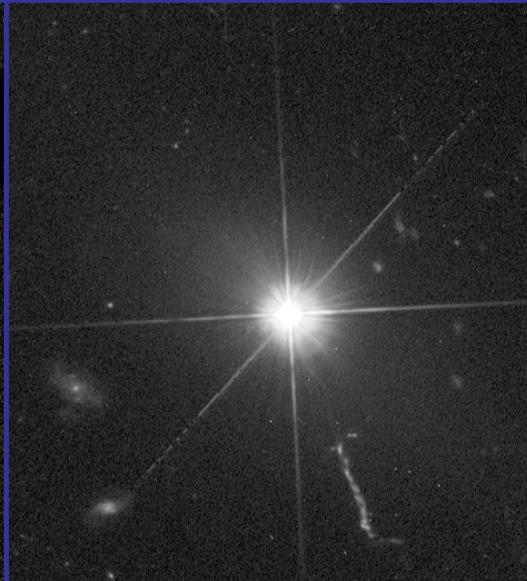
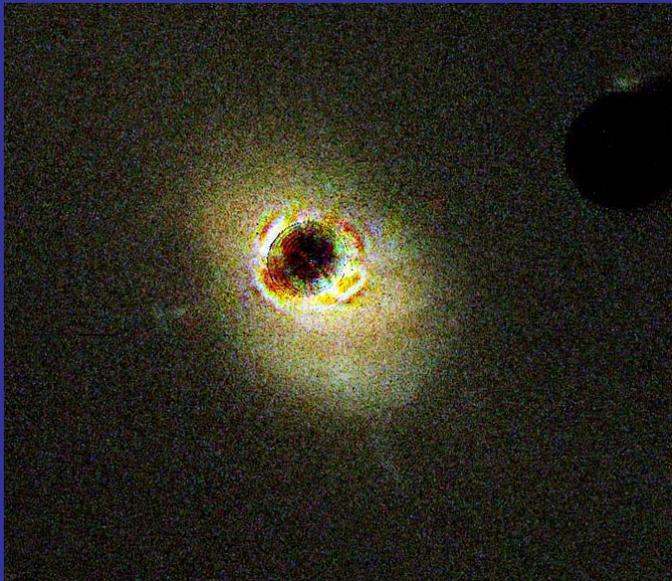
Le linee di contorno dell'emissione radio proveniente dal quasar 3C273 mostrano un getto di plasma che si allontana da esso con una velocità apparentemente maggiore di quella della luce.

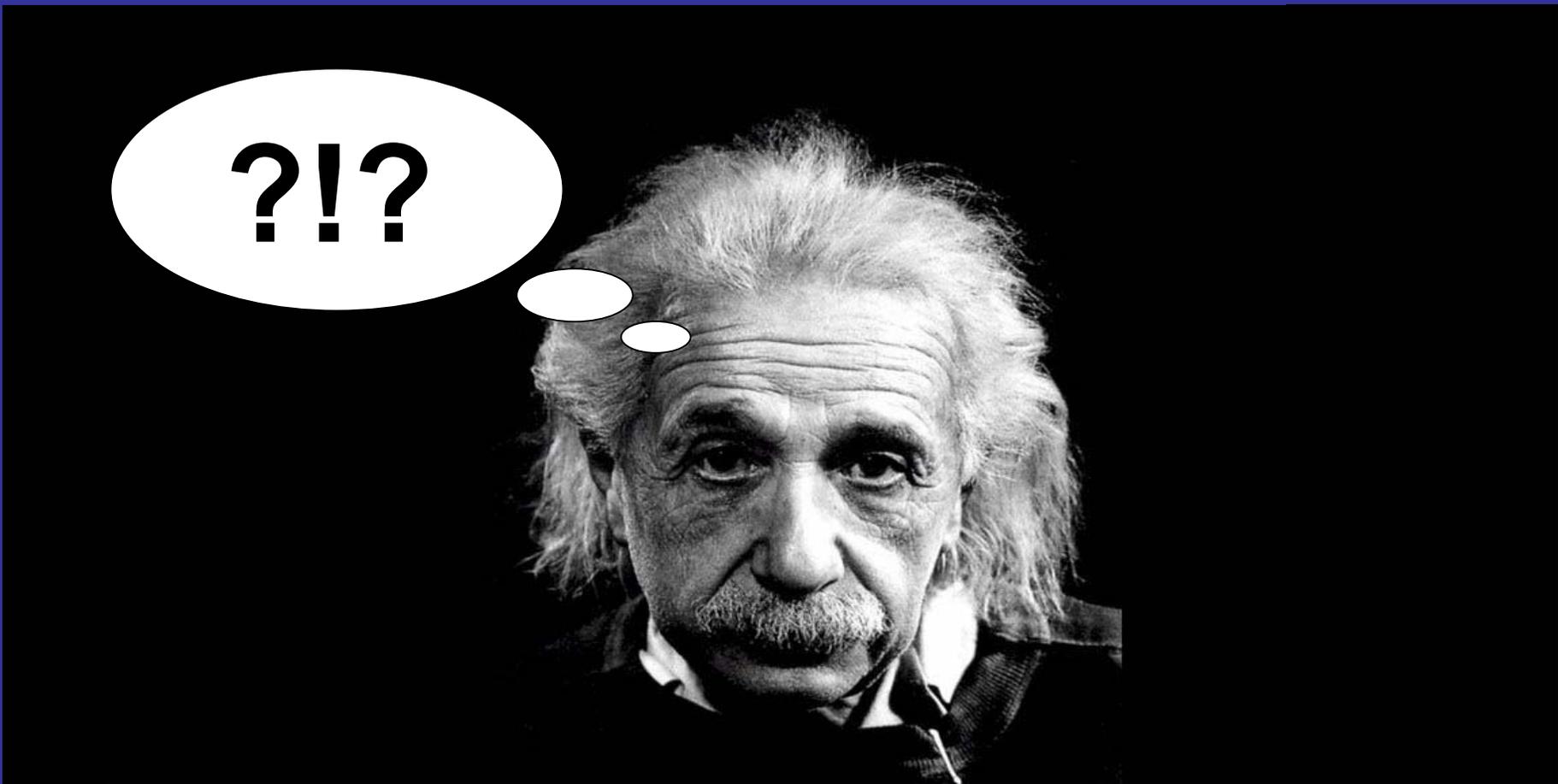


L'istante in cui è stata ottenuta ciascuna immagine è dato in anni solari e frazioni decimali di essi. Le divisioni orizzontali nella scala sono in unità di due millesimi di secondo d'arco.



Gli eventi “superluminali”, come il quasar 3C273 vennero talvolta citati come prove contro la teoria della Relatività, in particolare contro l’assioma della Relatività ristretta che afferma la costanza della velocità della luce. Tuttavia con alcuni calcoli si può validamente confutare l’esistenza di oggetti che si spostano a “velocità superluminale”, è sufficiente applicare correttamente la cinematica e l’analisi matematica.





**“La velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali, indipendentemente sia dal moto del sistema che da quello della sorgente da cui la luce è emessa.”**

HST WFPC2 / MERLIN

3c273

MERLIN

3C273

10 arcseconds  
18 kiloparsecs

CHANDRA

HST

MERLIN

3C273

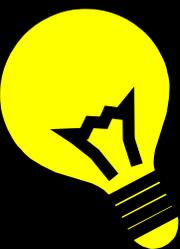
JD 1995.2

86 GHz

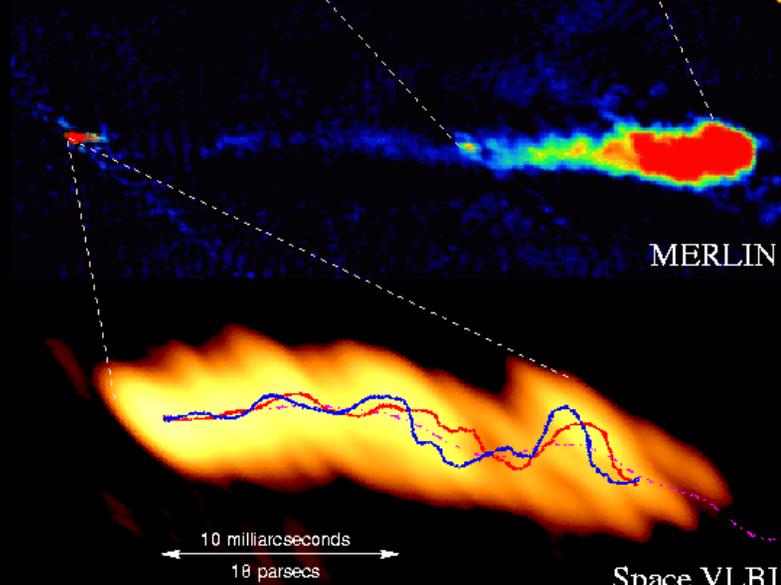
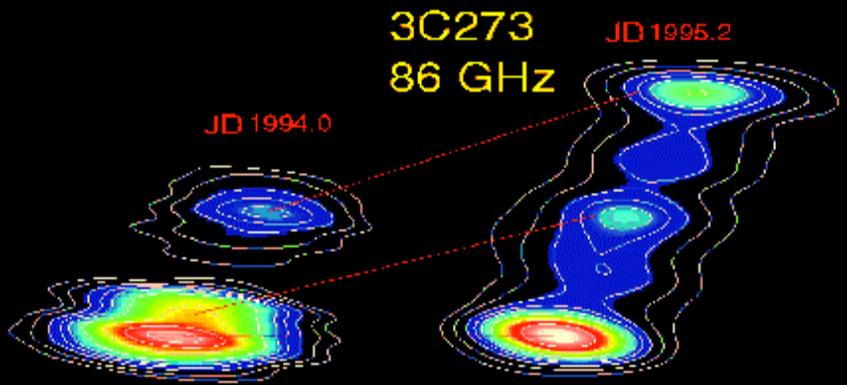
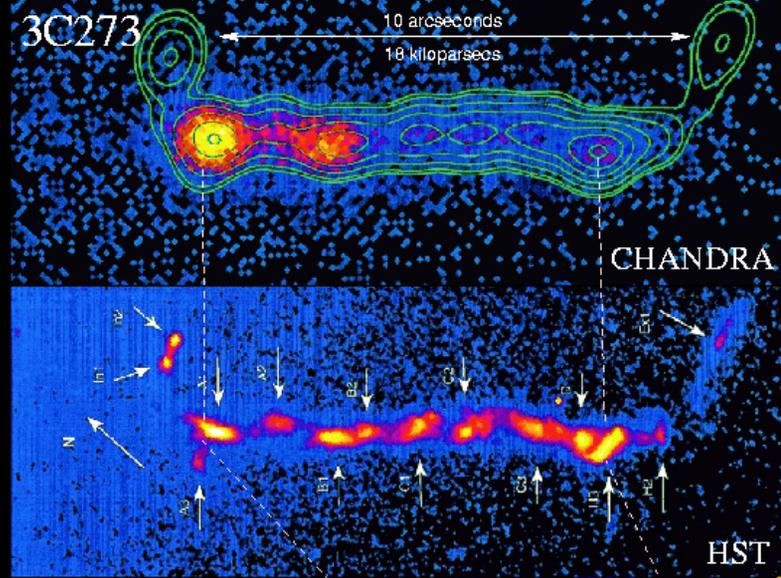
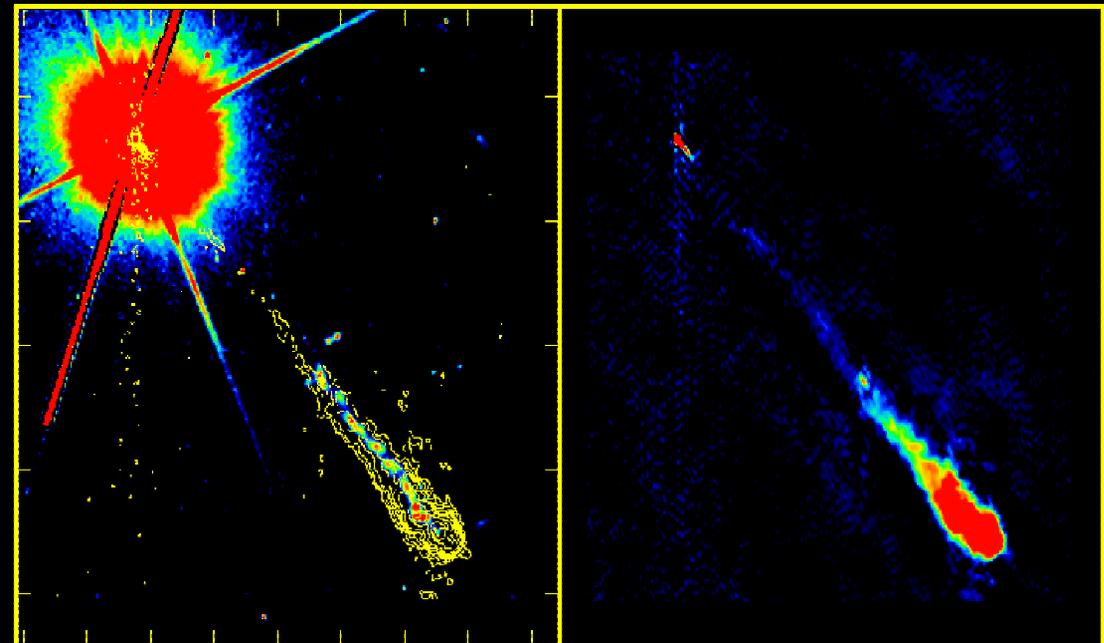
JD 1994.0

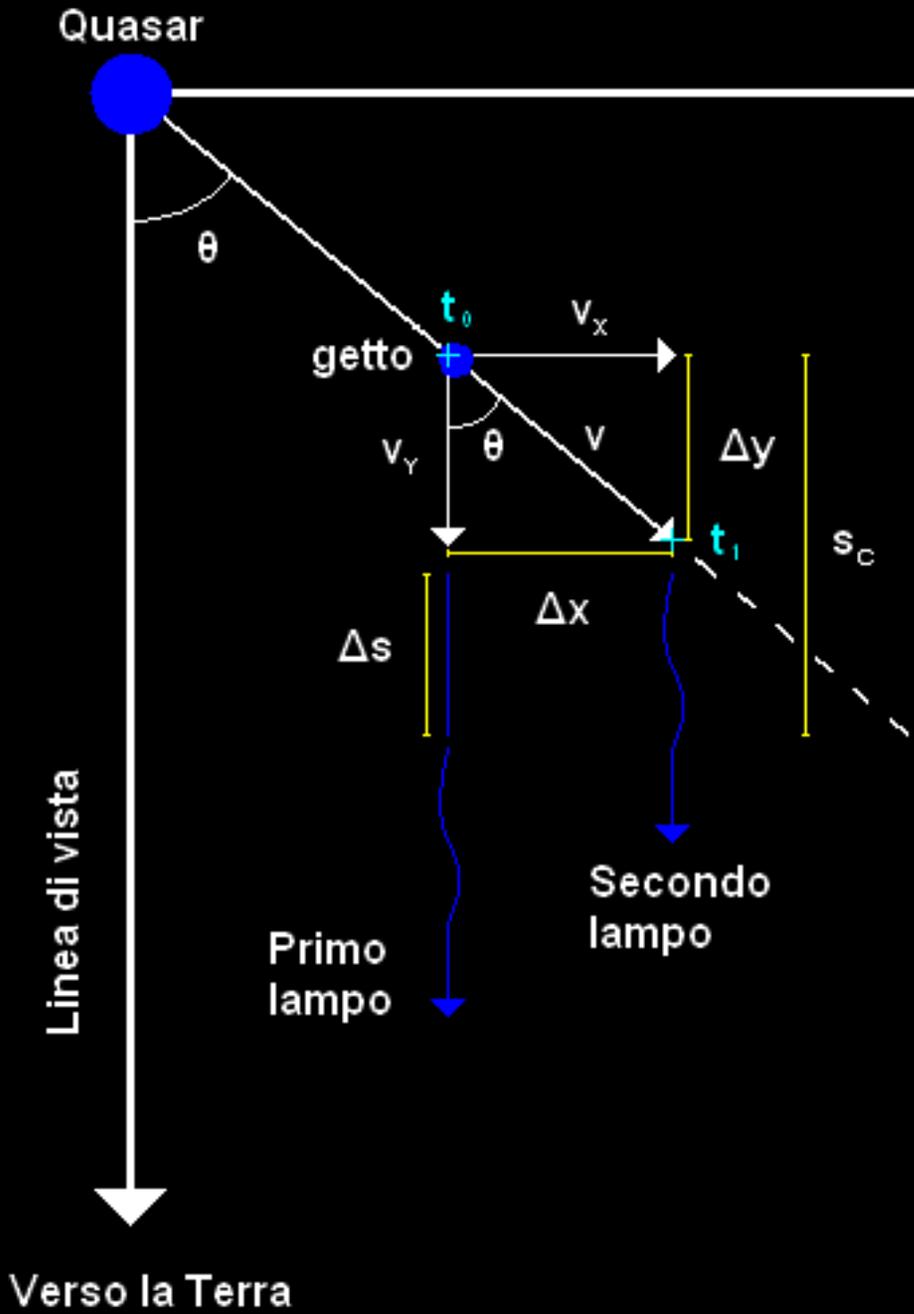
10 milliarcseconds  
18 parsecs

Space VLBI



Data l'enorme complessità di uno studio direttamente applicato al fenomeno procediamo ad una schematizzazione semplificata del problema.





$v$  = velocità del getto

$\Delta t = t_1 - t_0$  = l'intervallo di tempo tra l'emissione di due lampi di luce o fotoni in direzione della Terra

$\theta$  = angolo tra il vettore  $v$  (direzione del lampo) e la linea di vista

$c$  = velocità della luce

$\Delta s$  = spazio percorso dal primo lampo di luce rispetto al secondo nel tempo  $\Delta t$

$s_c = c \cdot \Delta t$  = spazio percorso dal primo lampo in direzione della Terra nel tempo  $\Delta t$

La velocità reale del getto è rappresentata dal vettore  $v$ ; tuttavia a noi appare che lo spostamento  $\Delta x$  avvenga nel tempo  $\Delta t_r$ , questa velocità è  $v_x$  apparente (in realtà  $v_x = v \cdot \text{sen } \theta$ ). Vediamo quindi di calcolare  $v_x$  apparente come rapporto  $\Delta x / \Delta t_r$ , dove  $\Delta t_r$  è l'intervallo di tempo che misuriamo tra i due lampi dalla Terra.

$$s_c = c \cdot \Delta t$$

$$\Delta y = v \cdot \cos \theta \cdot \Delta t$$

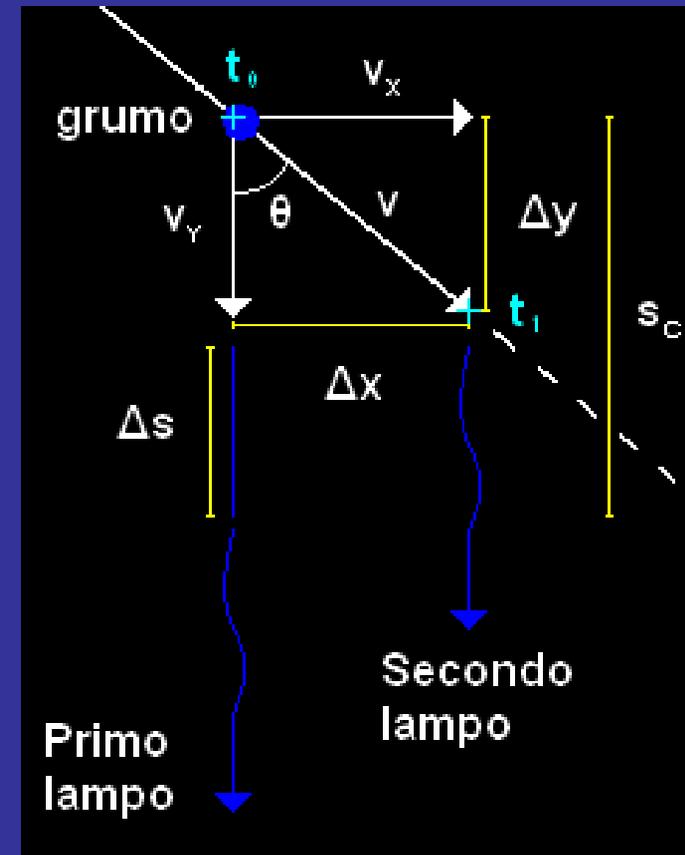
$$\Delta s = s_c - \Delta y = c \cdot \Delta t - v \cdot \cos \theta \cdot \Delta t$$

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t_r}$$

$$\Delta x = v \cdot \text{sen } \theta \cdot \Delta t$$

$$\Delta t_r = \Delta s \cdot c^{-1} = (c \cdot \Delta t - v \cdot \cos \theta \cdot \Delta t) \cdot c^{-1}$$

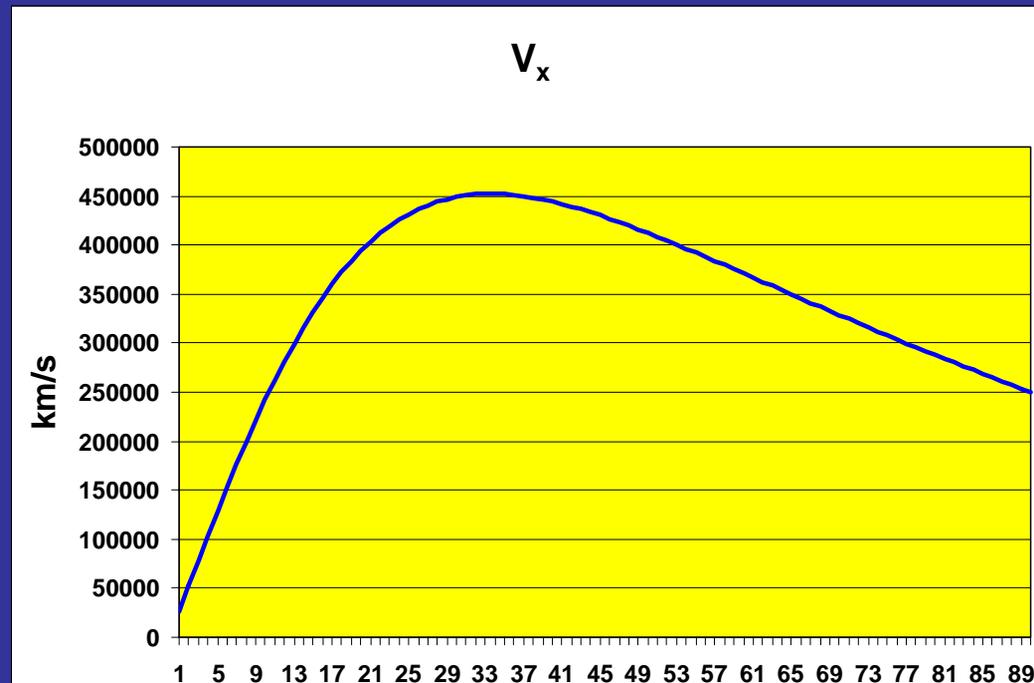
$$v_x = \frac{v \cdot \text{sen } \theta \cdot \Delta t}{(c \cdot \Delta t - v \cdot \cos \theta \cdot \Delta t) \cdot c^{-1}} = \frac{v \cdot \text{sen } \theta \cdot c}{c - v \cdot \cos \theta}$$



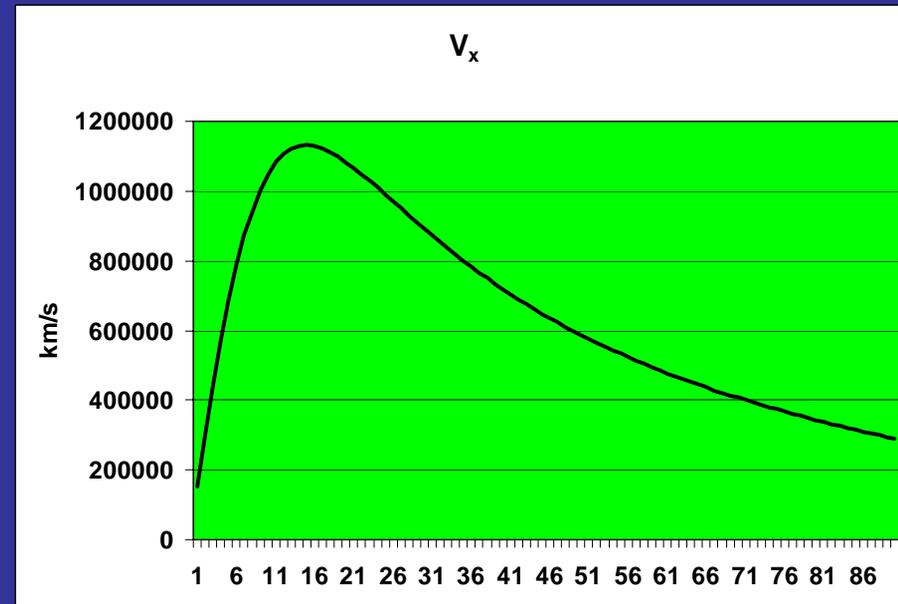
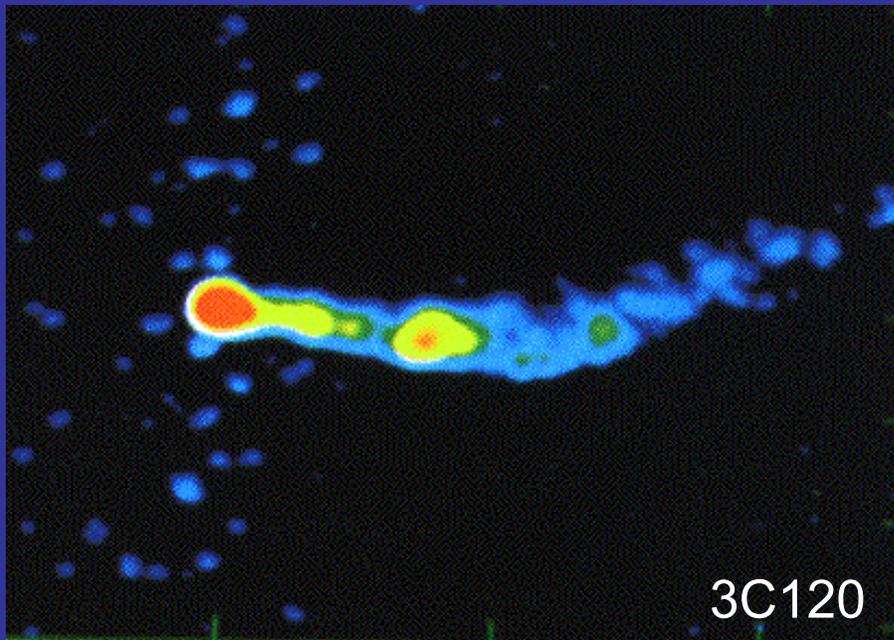
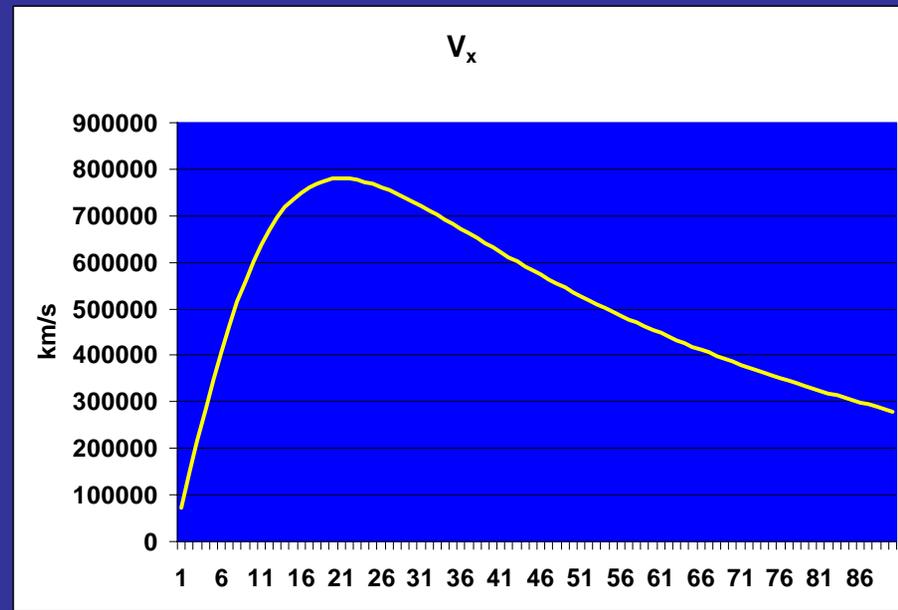
Supponendo una velocità reale del getto di 250000 km/s (anche se è molto probabile che tali getti di plasma raggiungano velocità superiori) ed un angolo  $\theta$  di  $35^\circ$  otteniamo una velocità 452223 km/s, molto maggiore della velocità della luce.

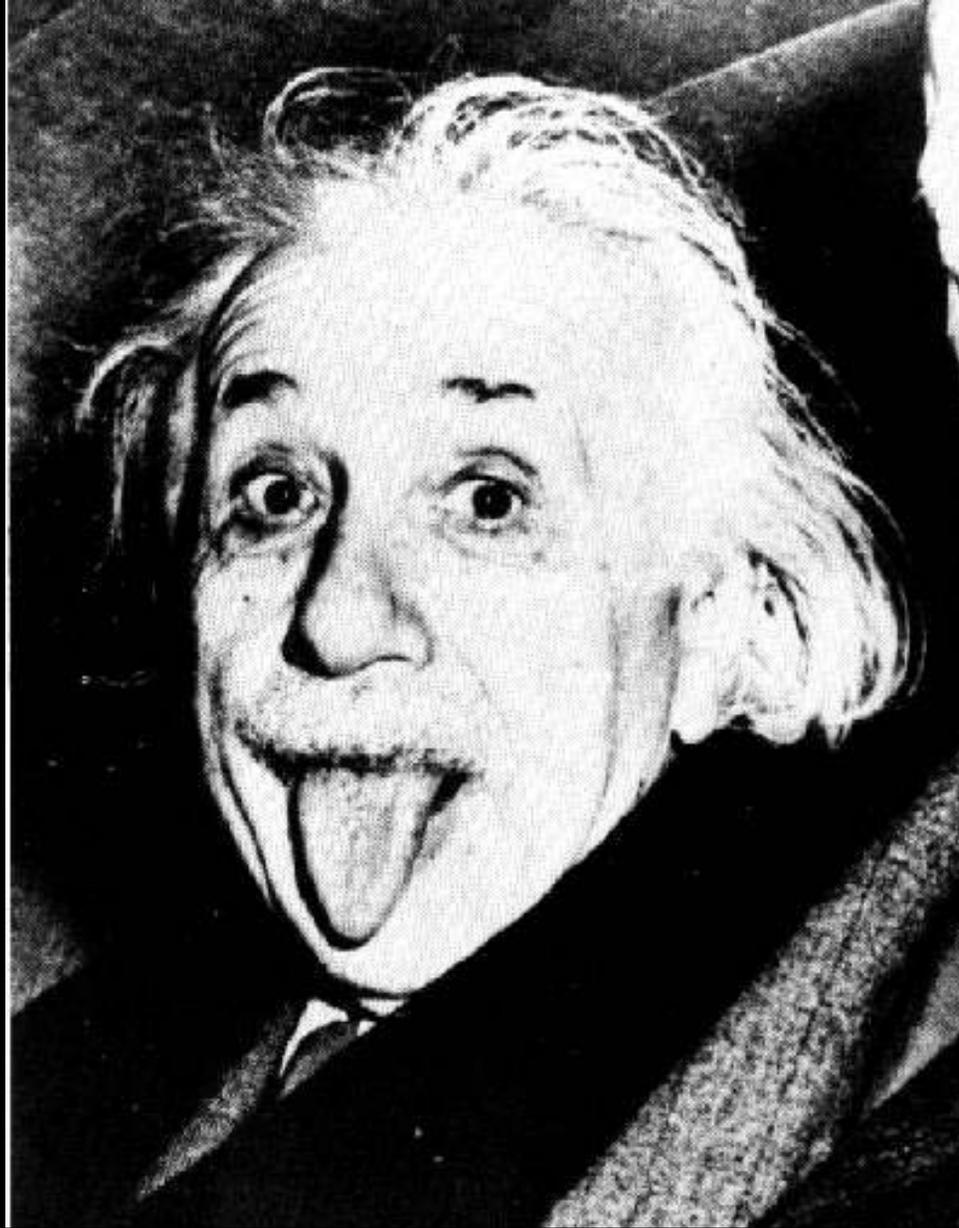
$$v_x = \frac{v \cdot \sin \theta \cdot c}{c - v \cdot \cos \theta} = \frac{2,5 \cdot \sin 35 \cdot 3 \cdot 10^{10}}{3 \cdot 10^5 - 2,5 \cdot 10^5 \cdot \cos 35} = 452223 \text{ km/s}$$

Studiando  $v_x$  apparente come funzione di  $\theta$  ci si rende conto che la funzione ha un massimo per  $\cos \theta = v/c$ . Per  $v = 250000$  il massimo è circa  $\cos 35$ , come mostrato dal grafico.



I grafici a destra mostrano la medesima funzione assumendo per "v" i valori 280000 e 290000, si può facilmente notare come per angoli di vista molto ridotti la velocità  $v_x$  apparente assuma valori molto alti. Questa dimostrazione è alla portata di chiunque, malgrado ciò sulla stampa pseudo-scientifica si continuano ad indicare eventi superluminali come prove contro la Relatività Generale.





**Possiamo concludere affermando che la teoria della Relatività non è minimamente messa in dubbio dagli eventi superluminali.**