



*Da Galileo a Newton ad Einstein,
un esperimento ancora oggi cruciale
per lo sviluppo della fisica*

Anna M Nobili

Dipartimento di Fisica "E. Fermi", Università di Pisa & INFN, Pisa, Italia

"Pianeta Galileo 2013"

Prato, Liceo Scientifico Copernico, 11 Novembre

Pontedera, Liceo Classico Andrea da Pontedera, 26 Novembre

Firenze, Liceo Machiavelli Capponi, 13 Dicembre



La gravità

- La gravità è la forza più antica scoperta dall'uomo:

$$F_g = -G \frac{M_g m_g}{r^2}$$

sempre attrattiva e diretta lungo la congiungente i centri di massa

- La stessa legge vale per tutti gli oggetti e gli esseri sulla Terra, per gli asteroidi, le comete, i pianeti, il Sole, le stelle, le galassie e l'universo intero (*G è una costante universale che si misura sperimentalmente*)
- La gravità non si satura: più aumenta la massa, più aumenta la forza gravitazionale, per questo domina l'universo

*1687: Teoria di Newton della gravitazione universale
 ...fino ad allora, e da circa 15 secoli, Tolomeo – greco di Egitto – aveva
 costruito un modello del sistema solare allora conosciuto che si accordava
 con le osservazioni entro soli 8 minuti d'arco!!*



Inerzia e peso: concetti antichi...(I)

- Massa inerziale (*Träge Masse*=massa pigra, massa inerte): è l'inerzia che un corpo oppone all'azione di ogni forza. Secondo la legge fondamentale della dinamica di Newton è il fattore di proporzionalità tra forza applicata (qualunque forza) e accelerazione acquisita:

$$F = m_i a$$

A parità di forza applicata, il corpo accelera con una accelerazione inversamente proporzionale alla sua massa inerziale $a = F/m_i$.

Un elettrone è 1000 volte meno massiccio di un protone e perciò acquista, sotto l'azione della stessa forza elettrica, una accelerazione 1000 volte maggiore, in modulo, di quella del protone.



Inerzia e peso: concetti antichi... (II)

- Massa gravitazionale m_g : è la “carica” gravitazionale con la quale un corpo attrae e viene attratto da un altro (anch’esso dotato di una massa/“carica”) secondo la legge della gravitazione universale di Newton. E siccome vale anche la legge della dinamica di Newton, l’accelerazione a che esso acquista è inversamente proporzionale alla sua massa inerziale m_i :

$$a = \frac{1}{m_i} F_g = \frac{1}{m_i} \left(-\frac{GM_g m_g}{r^2} \right) .$$

Ma a differenza di tutte le altre forze si osserva sperimentalmente un fatto: non importa quanto i corpi siano massicci, né di quale materiale siano fatti, in risposta alla stessa forza gravitazionale essi acquistano tutti la stessa accelerazione:

$$a = -\frac{GM_g}{r^2} .$$

Se si osserva questo, vuol dire per tutti i corpi massa inerziale e massa/“carica” gravitazionale sono la stessa cosa:

“Principio di equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale”

$$m_i = m_g$$



L'universalità della caduta libera

Sulla superficie della Terra, lungo la verticale locale, tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione:

$$m_i g = -\frac{GM_{\oplus} m_g}{R_{\oplus}^2} \quad m_i = m_g \Rightarrow$$

$$g = -\frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} \simeq -9.8 \text{ m/s}^2$$

Sulla Luna cadremmo con una accelerazione 6 volte più piccola, ma sempre la stessa per tutti:

$$g_{luna} = -\frac{GM_{luna}}{R_{luna}^2} \simeq -1.6 \text{ m/s}^2$$

(Nota: la nostra massa inerziale e gravitazionale sono sempre le stesse e sempre uguali tra loro, ma l'accelerazione di caduta non dipende da esse)



Prima di Newton: Galileo contesta Aristotele

Secondo Aristotele (384 AC-322 AC) quando i corpi vengono lasciati cadere i più pesanti arrivano a terra prima di quelli più leggeri



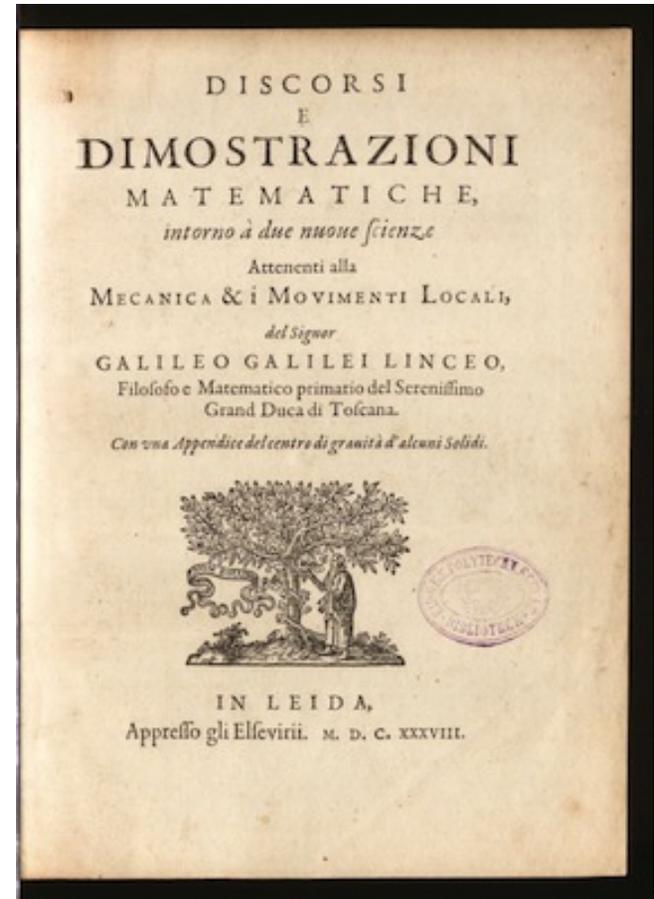
Galileo fu il primo, verso la fine del 1500, a contestare Aristotele, sia teoricamente che sperimentalmente. Erano passati più di 1800 anni..



Galileo Galilei

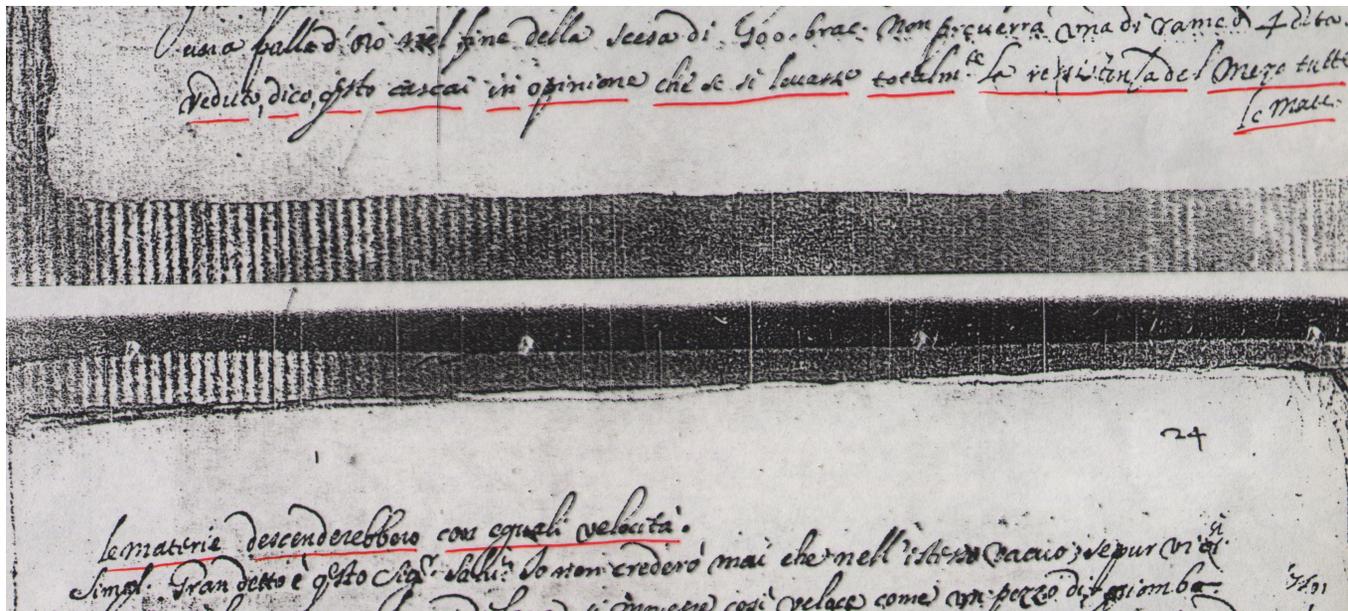
I “Discorsi...” di Galileo

Nel 1638 quando Galileo era ormai agli arresti nella sua casa di Arcetri per ordine del Papa e gli era proibito pubblicare, escono a Leida, in Olanda, i “Discorsi...” dove appare, per la prima volta l’enunciato della *Universalità della caduta libera* che riprende il suo lavoro di molti anni prima





Galileo enuncia l'universalità della caduta libera



“...veduto, dico, questo cascai in opinione che se si leuasse totalmente la resistenza del mezzo tutte le sostanze descenderebbero con eguali velocità.”

Dal testo manoscritto dei “Discorsi...” di Galileo fatto arrivare a Leida illegalmente, cioè contro l'ordine di Papa Urbano VIII (della potente famiglia Barberini) di non pubblicare



L'argomentazione teorica di Galileo che smonta la tesi di Aristotele



Salu. Quando dunque noi haueſſimo due mobili, le naturali
velo-

64 DIALOGO PRIMO
velocità de i quelli fuſſero ineguali, è manifeſto che ſe noi congiu-
gneſſimo il più tardo col più veloce, queſto del più tardo ſarebbe in
parte ritardato, & il tardo in parte velocitato dall' altro più veloce.
Non concorrete voi meco in queſt' opinione?

Simp. Parmi che così debba indubitabilmente ſeguire.

Salu. Mà ſe queſto è, & è inſieme vero, che vna pietra grande
ſi muoua per eſempio con otto gradi di velocità, & vna minore con
quattro, adunque congiugnendole amendue inſieme il compoſto di
loro ſi mouerà con velocità minore di otto gradi; mà le due pietre
congiunte inſieme fanno vna pietra maggiore, che quella prima
che ſi moueua con otto gradi di velocità, adunque queſta maggiore
ſi muoue men velocemente, che la minore; che è contro alla voſtra
ſuppoſizione. Vedete dunque come dal ſuppor che'l mobile più graue
ſi muoua più velocemente del men graue, io vi concludo il più graue
muouerſi men velocemente.



... ma per Galileo ci vuole una prova sperimentale!

Salu. Le cose da me sin quì prodotte, & in particolare questa, che la differenza di grauità ben che grandissima non habbia parte veruna nel diuersificare le velocità de i Mobili, si che per quanto da quella dipende, tutti si mouerebbero con egual celerità, è tanto nuoua, e nella prima apprensione remota dal verisimile, che quando non si hauessi modo di dilucidarla, e renderla più chiara che'l Sole, meglio sarebbe il tacerla, che'l pronunziarla; però già che me la sono lasciata scappar di bocca, conuien ch'io non lasci indietro esperienza, ò ragione, che possa corroborarla.

Galileo descrive i suoi esperimenti

Salv. L'esperienza fatta con due mobili quanto più si possa differenti di peso, col fargli scendere da un'altezza per osservar se la velocità loro sia eguale, patisce qualche difficoltà: imperò che se l'altezza sarà grande, il mezzo, che dall'impeto del cadente deve esser aperto e lateralmente spinto, di molto maggior pregiudizio sarà al piccol momento del mobile leggerissimo che alla violenza del gravissimo, per lo che per lungo spazio il leggero rimarrà indietro; e nell'altezza piccola si potrebbe dubitare se veramente non vi fusse differenza, o pur se ve ne fusse, ma inosservabile. E però sono andato pensando di reiterar tante volte la scesa da piccole altezze, ed accumulare insieme tante di quelle minime differenze di tempo, che potessero intercedere tra l'arrivo al termine del grave e l'arrivo del leggero, che così congiunte facessero un tempo non solo osservabile, ma grandemente osservabile. In oltre, per potermi prevaler di moti quanto si possa tardi, ne i quali manco lavora la resistenza del mezzo in alterar l'effetto che dipende dalla semplice gravità, sono andato pensando di fare scendere i mobili sopra un piano declive, non molto elevato sopra l'orizontale; ché sopra questo, non meno che nel perpendicolo, potrà scorgersi quello che facciamo i gravi differenti di peso; e passando più avanti, ho anco voluto liberarmi da qualche impedimento che potesse nascer dal contatto di essi mobili su 'l detto piano declive: 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 tempo della leggiera, che né in ben cento vibrazioni, né in mille, anticipa il tempo d'un minimo momento, ma camminano con passo egualissimo. Scorgesi

anco 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 men 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.





1907: Einstein e la gravità

“Nel 1907 Johannes Stark mi chiese di scrivere una monografia sulla teoria della relatività ristretta. Nello scriverla mi resi conto che tutte le leggi della natura potevano essere descritte nell’ambito della teoria della relatività ristretta tranne la gravità. A lungo ho cercato di capire perché, ma non ci sono riuscito.

... Un giorno, mentre ero seduto nel mio ufficio dei brevetti a Berna, un pensiero mi ha colpito: un uomo in caduta libera sulla superficie della Terra (soggetto alla forza di attrazione gravitazionale della Terra) non sente il suo peso, e questo succede a causa della universalità della caduta libera.

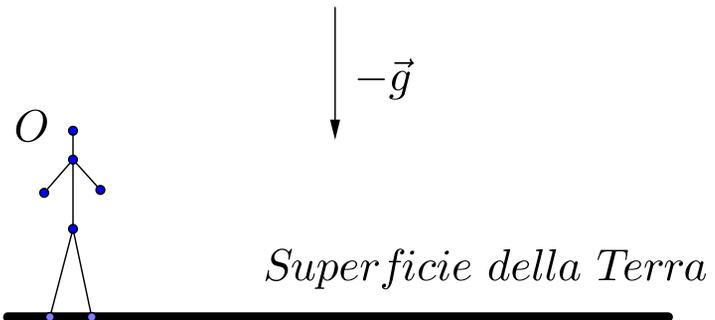
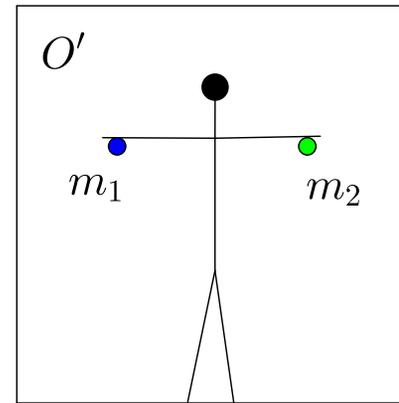
... Ho continuato il mio pensiero: un uomo che cade è in moto accelerato; quindi tutto quello che sente ed osserva accade in un sistema di riferimento accelerato. Ho deciso di estendere la teoria della relatività ai riferimenti accelerati e ho pensato che in questo modo avrei potuto includere la gravità.”
(l’attrazione gravitazionale della Terra può essere sostituita da un riferimento accelerato...)

(Einstein 1922)

L'ascensore di Einstein

“L'ascensore di Einstein”

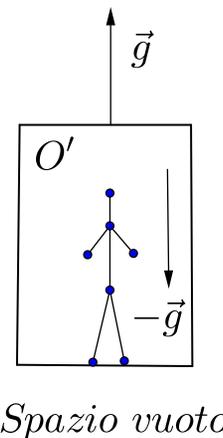
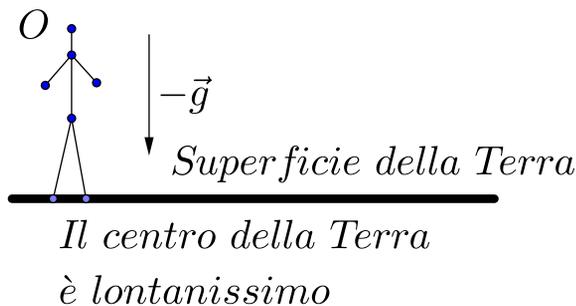
Dentro l'ascensore in caduta libera sulla superficie della Terra la gravità non produce alcun effetto. Se l'omino e le due masse sono partiti da fermi, resteranno fermi l'uno rispetto all'altro (finché l'ascensore non si schianta a terra. . .) perché stanno cadendo tutti con la stessa accelerazione dato che vale l'universalità della caduta libera.



Il centro della Terra è lontanissimo



Il principio di equivalenza secondo Einstein

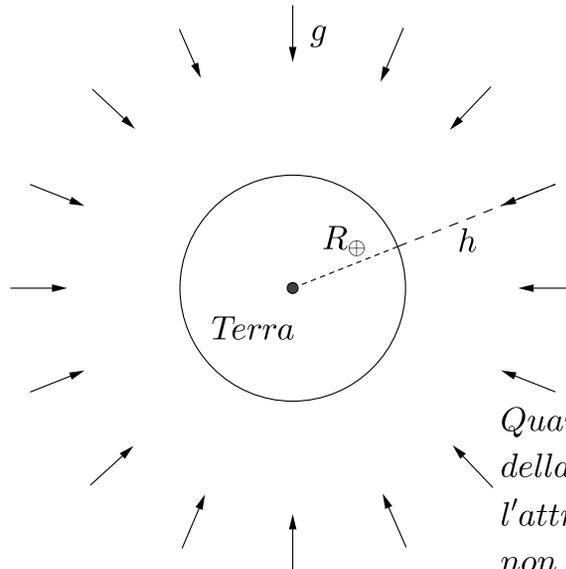


L'omino O fermo sulla superficie della Terra sente l'accelerazione $-\vec{g}$.
L'omino O' dentro l'astronave che si muove con accelerazione uguale ed opposta \vec{g} nello spazio vuoto sente una accelerazione uguale ed opposta a quella con cui si muove l'astronave (es: quando l'autobus accelera tutti i passeggeri sono spinti all'indietro; quando frena sono spinti tutti in avanti). Quindi O ed O' sentono la stessa accelerazione.

Un campo gravitazionale uniforme e un riferimento accelerato sono fisicamente indistinguibili (equivalenti).

Ma non è così semplice...

Einstein vorrebbe sostituire la gravità con un sistema di riferimento accelerato, ma il campo gravitazionale è uniforme solo “*localmente*” (es. vicino alla superficie della Terra, ma non lontano da essa...)



Quando l'altezza h sulla superficie della Terra è paragonabile al raggio R_{\oplus} l'attrazione gravitazionale della Terra non è più uniforme



La geometria Euclidea non basta più...

La gravità può essere sostituita da un riferimento accelerato solo se è uniforme, quindi solo localmente; da luogo a luogo, diversi sistemi di riferimento accelerati devono essere usati per sostituire la gravità e pertanto globalmente non ci può essere un solo tale sistema

Non solo il tempo non è più assoluto (come aveva scoperto nel 1905 con la Relatività ristretta...); lo spazio-tempo non è più piatto ma curvo: la massa-energia determina la curvatura dello spazio-tempo, che quindi si evolve con essa e a sua volta determina il moto dei corpi...

Ma una geometria ci vuole:

“Describing the physical laws without reference to geometry is similar to describing our thought without words. We need words in order to express ourselves” (Einstein 1922)



1916: la teoria della relatività generale

... ma per fortuna c'era la geometria non euclidea di grandi come Gauss, Riemann, Ricci e altri...

Dopo 8 anni e innumerevoli lavori intermedi, nel 1916, Einstein pubblicò: ***“The foundation of the general theory of relativity”***

Da allora, e soprattutto nello spazio, le verifiche sperimentali e osservative hanno confermato la teoria della relatività generale...

Tuttavia:

- *La dinamica delle galassie non torna e “manca” circa un 25% della massa dell’universo (dark matter)*
- *Le misure dell’espansione dell’universo non tornano e occorre ipotizzare circa un 70% di energia negativa (dark energy)*
- *La teoria della relatività generale è inconciliabile con la migliore teoria delle altre forze fondamentali (il “Modello Standard” delle particelle elementari)*



Modello standard e relatività generale

Anni '70 del secolo scorso: nasce il Modello Standard delle particelle elementari. È la migliore teoria della fisica del microcosmo. Si fonda sulla meccanica quantistica e sulla relatività ristretta, i campi delle particelle sono definiti in uno spazio-tempo piatto... È verificata dagli esperimenti con notevole successo..

In relatività generale lo spazio-tempo è curvo. Vicino alle singolarità (i buchi neri), la relatività generale diventa inconsistente con la meccanica quantistica...

Modello standard e relatività generale sono inconciliabili

Ci vuole un esperimento “tipo” quello di Michelson-Morley alla fine dell'800 (per il quale Michelson prese il Nobel nel 1907):

- *che testi un elemento cruciale della teoria*
- *che sia di altissima precisione*
- *che l'interpretazione della misura non lasci dubbi*
- *... e che possibilmente sia abbastanza “piccolo”*



Verifica della universalità della caduta libera

La teoria della relatività generale si fonda sulla universalità della caduta libera (detta anche “principio” di equivalenza debole): nel campo di una massa sorgente tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione qualunque sia la loro massa e/o composizione

Un esperimento di UFF:

- *testa un elemento cruciale della teoria*
- *può raggiungere altissima precisione perché è un esperimento “nullo” (gli esperimenti nulli sono tra i più precisi della fisica...)*
- *la segnatura del segnale atteso è nota e l’interpretazione dei dati (con la dovuta cura) assolutamente solida*
- *si fa con un piccolo apparato ... anche se per raggiungere altissime precisioni bisogna metterlo in orbita bassa attorno alla Terra*



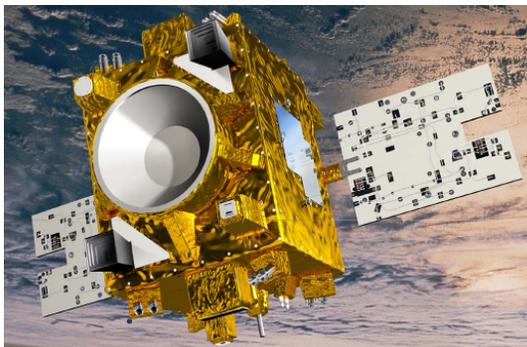
Stato dell'arte e prospettive

L' universalità della caduta libera è verificata sperimentalmente (con bilance di torsione in rotazione lenta) al livello di 10^{-13} . Sulla terra la bilancia di torsione è il migliore strumento ma si pensa che sia molto difficile migliorare ancora

Un esperimento simile in orbita bassa attorno alla Terra avrebbe un segnale circa 500 volte più intenso; potrebbe sfruttare l'assenza di peso per sospensioni di migliore qualità e l'isolamento del laboratorio (il satellite che racchiude lo strumento) per ridurre i disturbi locali (microsismicità, masse vicine).



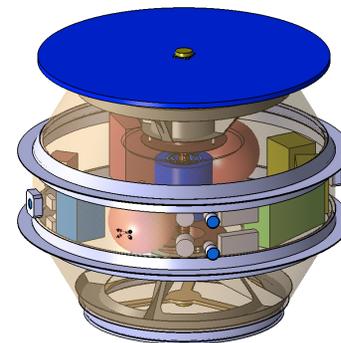
Microscope e GG (“Galileo Galilei”)



Microscope: Obiettivo 10^{-15}

In costruzione dal CNES (Agenzia Spaziale Francese) con contributo ESA (Agenzia Spaziale Europea) per volo nel 2015

Temperatura ambiente, orbita terrestre bassa, dimensioni comparabili, tecnologie comparabili, durata missione comparabile, costi comparabili. Perché GG può puntare ad una precisione 100 volte migliore? Per il design del sensore (l’idea): se Microscope volesse raggiungere la precisione di GG dovrebbe prendere dati per 39 anni per ridurre il rumore!!!



GG: Obiettivo 10^{-17}

Studiato da ASI (Agenzia Spaziale Italiana), prototipo di laboratorio INFN, collaborazione JPL

“GG on the Ground”: il prototipo in laboratorio dello strumento progettato per il satellite GG

