

# "GALILEO GALILEI" (GG)

UNA PICCOLA MISSIONE DI FISICA FONDAMENTALE, GEODESIA SPAZIALE, AERONOMIA E  
TECNOLOGIE AVANZATE DI COMPENSAZIONE DEL DRAG

SOTTOPOSTA DA ANNA M NOBILI, UNIVERSITÀ DI PISA, ITALIA

- Co-Investigatori per applicazioni nel campo delle scienze della Terra: Fernando Sansò (Politecnico di Milano), Andrea Milani (Università di Pisa), Alessandro Rossi (CNUCE-CNR), Giovanni Laneve (Università di Roma "La Sapienza"), Marco Fermi (TELESPAZIO)
- Team Internazionale: Vedi Proposta GG ad ESA per la competizione F2&F3, 31 Gennaio 2001 (42 scienziati di 9 diversi Paesi)  
[http://tycho.dm.unipi.it/nobili/ESA\\_F2&F3](http://tycho.dm.unipi.it/nobili/ESA_F2&F3)
- Team Italiano: Vedi Studio di Fase A di GG, ASI, Novembre. 1998 (12 scienziati di 4 Istituzioni Scientifiche, 1 responsabile ASI, 17 Ingegneri di ALENIA SPAZIO (Torino), LABEN (Milano, Firenze) e Centrosazio (Pisa), 4 laureandi)  
<http://tycho.dm.unipi.it/nobili/ggweb/phaseA>

## INDICE

1.	OBIETTIVI SCIENTIFICI E TECNOLOGICI DELLA PICCOLA MISSIONE GG .....	1
2.	IL SATELLITE E L'ORBITA .....	1
3.	L'ESPERIMENTO E IL "PAYLOAD" .....	2
4.	STATO DEL PROTOTIPO GGG A TERRA ("GG on the Ground").....	3
5.	CONTROLLO DELLA MISSIONE, DATI SCIENTIFICI, IMPATTO SUI MEZZI DI COMUNICAZIONE E SUL VASTO PUBBLICO .....	5
6.	QUADRO INTERNAZIONALE, PROGRAMMA DI SVILUPPO, COSTI E SITUAZIONE PROGRAMMATICA.....	5

## 1. OBIETTIVI SCIENTIFICI E TECNOLOGICI DELLA PICCOLA MISSIONE GG

"GALILEO GALILEI" (GG)<sup>1,2</sup> è una proposta di piccola missione il cui obiettivo principale è la verifica del Principio di Equivalenza di Galileo, Newton ed Einstein al livello di 1 parte su  $10^{17}$ , che costituirebbe un miglioramento di 4 ordini di grandezza rispetto ai più recenti test a terra (migliorati pochi mesi fa) e un contributo molto importante alla Fisica moderna. Per questo obiettivo sono impegnate, a diversi livelli, quattro agenzie spaziali: NASA, ESA, ASI e CNES.

L'esperimento richiede di sviluppare un accelerometro sensibile a piccolissimi effetti, sia in modo differenziale (cioè tra due masse di prova l'una rispetto all'altra) sia in modo comune (cioè su entrambe le masse di prova), e di farlo volare in orbita bassa attorno alla Terra. Il legame con esperimenti di misura del campo gravitazionale terrestre è quindi del tutto naturale. Basti ricordare che la verifica per lungo tempo più accurata del Principio di Equivalenza fu fatta tra la fine dell'800 e gli inizi del '900 da Eötvös mentre era impegnato in misure del campo gravitazionale terrestre. In campo spaziale, la proposta STEP, dedicata al Principio di Equivalenza, è stata studiata a lungo anche come missione geodetica, e questo utilizzo era stato previsto dai suoi proponenti americani. L'uso di GG per scopi geodetici richiede di installare a bordo del satellite lo strumento LAGRANGE<sup>TM</sup>, un ricevitore GPS/GLONASS capace di fornire una determinazione orbitale di precisione. LAGRANGE<sup>TM</sup> è in corso di sviluppo presso LABEN; il suo utilizzo per missioni geodetiche è stato previsto e studiato per la proposta di piccolo satellite geodetico SAGE<sup>3</sup> e per la missione geodetica GOCE<sup>4</sup> recentemente approvata da ESA per il volo. Per facilitare la verifica del Principio di Equivalenza GG è dotato di mini propulsori elettrici FEED che permettono di compensare molto accuratamente il drag (e tutti gli effetti non gravitazionali) ad alcune frequenze rilevanti per questo esperimento, soprattutto alla frequenza orbitale. Tuttavia, il sistema GG è comunque in grado di misurare gli effetti non gravitazionali anche alle frequenze alle quali essi non vengono compensati. Da questi dati è possibile ricavare i soli effetti gravitazionali agenti sul satellite, purché esso sia anche dotato di un sistema di determinazione orbitale di precisione. L'accomodamento aggiuntivo di LAGRANGE<sup>TM</sup> su GG permette di usare l'accelerometro in modo comune per determinare quei coefficienti del campo gravitazionale della Terra cui l'orbita di GG (quasi equatoriale e quasi circolare, a circa 500 km di quota) è particolarmente sensibile. Ciò fornirebbe una verifica del tutto indipendente di alcuni risultati di GOCE, rafforzando quindi il contributo europeo alla conoscenza del campo gravitazionale terrestre. L'aumento di massa e di potenza richiesti per l'accomodamento di LAGRANGE<sup>TM</sup> sono di circa 5 kg e 20-25 W rispettivamente, a fronte di una massa di 263 kg (inclusi i margini di sistema) e di una potenza di 112 W finora previste per la sola verifica del Principio di Equivalenza. La massa totale sarebbe comunque inferiore al limite di 300 kg individuato nel bando ASI.

Di interesse per le scienze della Terra è anche l'uso dei dati del sistema drag-free di GG per l'aeronomia. Questi dati forniscono infatti (senza alcun hardware aggiuntivo) una misura diretta della densità atmosferica lungo l'orbita del satellite e della sua evoluzione stagionale nel corso dei 2 anni di vita operativa previsti dal bando ASI. Lo stesso uso dei dati del sistema drag-free era previsto per STEP, essendo però limitato in quel caso dalla grande quantità di propellente (He) immessa nell'ambiente (non separabile, senza strumenti aggiuntivi, dalla atmosfera locale), oltre che dalla breve durata della missione (6 mesi, un limite imposto dalla quantità di propellente richiesto).

Il sistema drag-free di GG si basa sull'uso dei mini propulsori elettrici FEED, una nuova tecnologia nata in ESA e sviluppata attualmente in Italia. L'alto impulso specifico di questi propulsori permette di controllare il satellite con pochissimo propellente (circa 20 g di Cesio nel caso di GG per una vita operativa di 2 anni, invece di molti kg di He). La spinta può essere regolata molto finemente (per via elettrica invece che meccanica). GG sarebbe un esempio di satellite drag-free molto accurato, a livelli mai realizzati prima, di grande interesse –nel test specifico dei FEED– per future missioni di Fisica Fondamentale, e in generale per la geodesia spaziale.

## 2. IL SATELLITE E L'ORBITA

La missione GG è stata studiata in ambito ASI a livello di Pre-Fase A nel 1996 e di Fase A nel 1998<sup>1</sup>. Questi studi hanno mostrato che lo spacecraft adatto alla missione, pur essendo basato su tecnologie ben note (a parte i FEED il cui uso per un sistema drag-free molto accurato sarebbe una assoluta novità, interessante in quanto tale come obiettivo tecnologico) è tuttavia uno spacecraft ad hoc che non rientra in quanto tale vari tipi di "piattaforme" piccole cosiddette "standard" sviluppate in Italia allo scopo

di essere riutilizzabili (MITA e PRIMA) delle quali può però utilizzare i vari sottosistemi. Un disegno del satellite GG è mostrato in Fig. 1. Si tratta di un piccolo satellite compatto a simmetria cilindrica, stabilizzato passivamente per rotazione (a 2 Hz, i.e. 120 rpm) attorno all'asse di simmetria che è anche l'asse di massimo momento di inerzia. La massa e le dimensioni previste senza il ricevitore LAGRANGE<sup>TM</sup> sono di 232 kg (263 kg se si tiene conto dei margini di sistema), 1 m di diametro e 1.3 m di altezza. L'aggiunta del ricevitore (5 kg e circa 20-25 W di potenza aggiuntiva) richiederà di aumentare le dimensioni (per aumentare la superficie disponibile per le celle solari) restando però entro il limite dei 300 kg. L'antenna del ricevitore può essere combinata con una delle 2 antenne in banda S già previste lungo l'asse di rotazione.

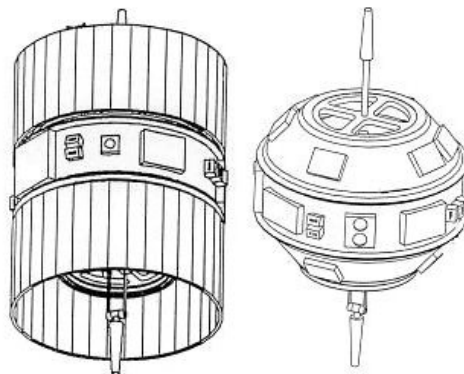


Figura 1. Il satellite GG completo di celle solari (a sinistra) e senza celle solari (a destra). La struttura compatta interna (tipo "trottola") si prevede che sia realizzata in fibra di carbonio. Sulla sua fascia centrale sono localizzate diverse "scatole" di elettronica, i sensori Terra/Sole (delle Officine Galileo, Firenze) e i propulsori elettrici FEEP (di Centrospazio, Pisa). Le antenne sono disposte lungo l'asse (una è ripiegabile per guadagnare spazio nel lancio).

Il satellite viene immesso in orbita terrestre equatoriale, circolare a 520 km di quota con asse di spin perpendicolare al piano orbitale, e viene portato alla velocità di rotazione nominale di 2 Hz. Non ci sono vincoli stringenti sui valori dei parametri orbitali e di assetto. È disponibile uno studio dettagliato del satellite<sup>1, Cap. 5</sup> fatta eccezione per l'accomodamento del ricevitore LAGRANGE<sup>TM</sup>.

### 3. L'ESPERIMENTO E IL "PAYLOAD"

Il payload di GG è disegnato per misurare gli effetti di piccolissime accelerazioni. La sua caratteristica peculiare, che lo distingue dagli accelerometri previsti per altre missioni, è quella di modulare il segnale aspettato ad alta frequenza (la frequenza di rotazione di tutto il satellite) in modo da ridurre il ben noto rumore "1/f" (sia elettronico che meccanico). Inoltre, GG usa sospensioni meccaniche molto deboli (che evitano in modo del tutto passivo l'insorgere di pericolosi effetti elettrostatici) e corpi di prova di grande massa (10 kg), in modo da ridurre il rumore termico pur operando a temperatura ambiente, ed evitare così le complicazioni di un esperimento criogenico nello spazio. Il sistema di misura è di tipo capacitivo ed è ben collaudato in laboratorio. La Fig. 2 mostra, in una sezione lungo l'asse di spin, le celle solari, la struttura a "trottola" dello spacecraft e, al suo interno, in una configurazione a "scatole cinesi" (tutte a simmetria cilindrica), la PGB (Pico Gravity Box, indicata in verde scuro nella figura) debolmente sospesa allo spacecraft e le masse test dedicate alla verifica del Principio di Equivalenza debolmente sospese alla PGB e debolmente accoppiate tra di loro. Per questo esperimento e il relativo budget degli errori si veda<sup>1, Cap. 2</sup>.

Tutti gli effetti non gravitazionali (soprattutto drag atmosferico e pressione di radiazione solare) che agiscono sulla superficie del satellite e non sulla PGB sospesa al suo interno, producono spostamenti relativi tra la PGB e lo spacecraft i quali vengono misurati da opportuni sensori capacitivi fornendo il relativo segnale ai propulsori FEEP affinché questi rispondano, opportunamente controllati, in modo da annullare tale spostamento compensando il drag e costringendo lo spacecraft a "seguire" la PGB. Tale controllo viene eseguito alla frequenza orbitale (dove si ha il massimo dell'effetto di drag) e ad alcune altre frequenze basse, ma non in modo continuo (per la simulazione numerica del controllo di drag si veda<sup>1, Cap. 6</sup>). Tuttavia, i sensori capacitivi tra la PGB e lo spacecraft sono in grado di misurare molto

accuratamente gli spostamenti relativi anche alle alte frequenze; da queste misure e dalle caratteristiche della PGB (massa, elasticità e dissipazione delle sospensioni) è possibile ricostruire l'accelerazione non gravitazionale che li ha prodotti. Questa conoscenza, insieme alla conoscenza dell'orbita del satellite fornita dal ricevitore LAGRANGE™ permette di determinare quelle armoniche del campo gravitazionale terrestre che ne influenzano il moto. Più alta è la frequenza per la quale è possibile misurare (e quindi sottrarre) l'effetto del drag, più alto è il grado delle armoniche (in effetti la combinazione di armoniche) che è possibile determinare; essendo alla fine limitati dalla quota cui orbita il satellite.

Dai dati del drag-free (particolarmente alle basse frequenze) è possibile ricavare inoltre una misura della densità atmosferica lungo l'orbita del satellite, ad una quota e con una inclinazione che non sono visitate troppo frequentemente. Tale misura, e ancor più e sue variazioni stagionali, costituiscono un contributo alla conoscenza della atmosfera del nostro pianeta.

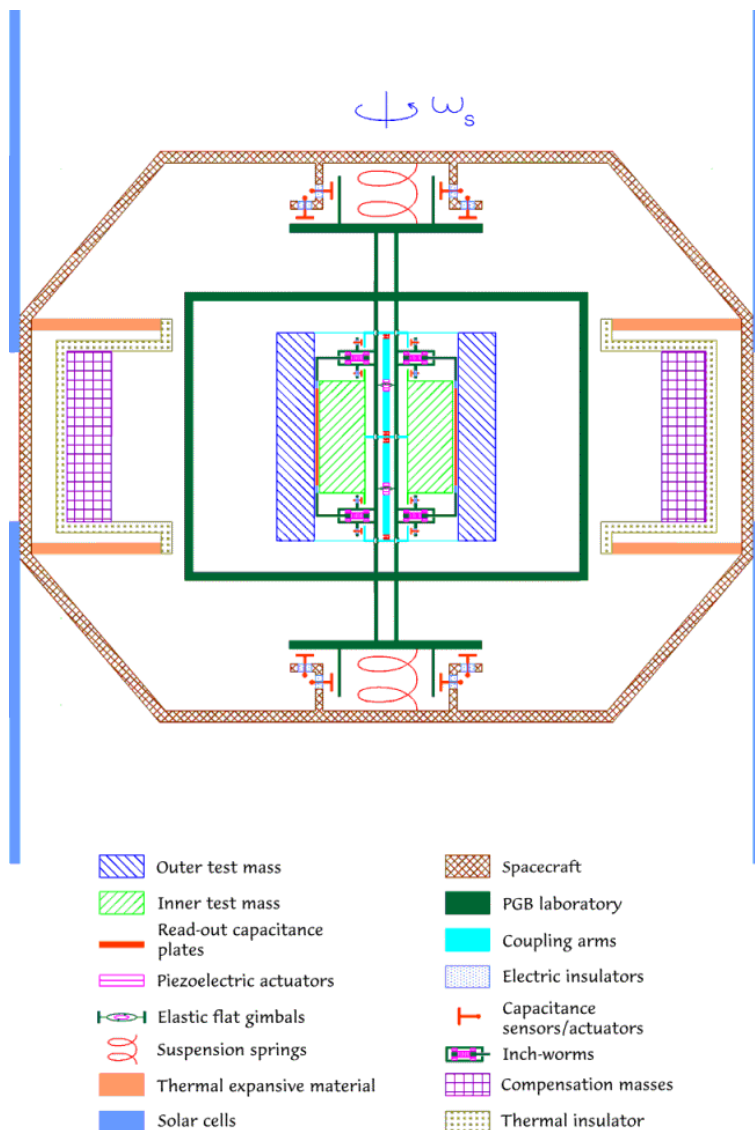


Figura 2. Sezione del satellite GG lungo il suo asse di rotazione. All'interno sono visibili la PGB, con le sue sospensioni elicoidali e i suoi sensori capacitivi, e le masse test (10 kg ciascuna) per la verifica del Principio di Equivalenza

#### 4. STATO DEL PROTOTIPO GGG A TERRA ("GG on the Ground")

L'esperimento GG è concepito per l'ambiente spaziale. Tuttavia, è stata progettata una versione "terrestre" del payload che permette di acquisire in laboratorio importanti elementi di conoscenza, e quindi di diminuire i rischi dell'esperimento spaziale. L'esperimento GGG (GG on the Ground) è in corso

di sviluppo, da parte degli scienziati proponenti di GG, presso i laboratori di LABEN, divisione PROEL in Firenze dove, oltre a realizzare singole componenti del payload per misurarne direttamente le caratteristiche (e.g. il fattore di qualità Q delle varie sospensioni e la sensibilità del sistema di lettura capacitivo), è stato progettato e realizzato un vero e proprio prototipo del payload per la misura di piccole accelerazioni differenziali tra le masse di prova. Ad esempio, la sensibilità del "read-out" capacitivo non si misura soltanto sul banco di prova, ma nel sistema completo in cui è integrato con le masse di prova e ruota insieme ad esse (è stato raggiunto uno stato di rotazione stabile fino alla frequenza di 6 Hz).



Figura 3. Il sistema GGG come appare all'interno della camera a vuoto (del diametro utile di 1 m). Il sistema di lettura capacitivo è nascosto dal cilindro di prova esterno; l'elettronica è localizzata sui due anelli attorno al tubo di sospensione. Il segnale dei ponti capacitivi viene demodulato, digitalizzato, trasferito otticamente all'esterno della camera e acquisito al computer. Il braccio di accoppiamento, le sospensioni laminari e il motore non sono visibili; i cilindri di prova pesano 10 kg ciascuno, come in GG.

La Fig. 3 mostra il sistema GGG all'interno della camera a vuoto. Dal gennaio 2000 la camera e tutto il sistema sono stati spostati nel basamento dei laboratori LABEN<sup>3, Cap. 3</sup> dove il livello di rumore sismico è più ridotto e dove è stato installato anche uno strumento ISA<sup>3, Cap. 3</sup> (Italian Spring Accelerometer, costruito da V. Iafolla e colleghi del CNR-IFSI) allo scopo di individuare correlazioni tra le misure di spostamenti differenziali delle masse di prova effettuate col sistema GGG (che sono influenzate dai "tilt" del terreno) con le misure degli effetti del rumore sismico sull'accelerometro ISA (che funziona come un clinometro). GGG risulta essere sensibile ad accelerazioni di circa  $10^{-9} \text{ m s}^{-2}/\sqrt{\text{Hz}}$  (su frequenze di qualche  $10^{-3} \text{ Hz}$ ). Si tratta della stessa sensibilità raggiunta dall'accelerometro di ONERA<sup>5</sup> (previsto per la missione GOCE e per il microsatellite francese Microscope) sia in prove di laboratorio che durante alcuni voli sullo Space Shuttle. La differenza importante è che il risultato di GGG può essere migliorato in laboratorio, dapprima raggiungendo i limiti imposti dai disturbi sismici locali (attraverso un miglioramento del bilanciamento e della centratura del sistema) e successivamente riducendo gli effetti dei "tilt" sismici sul moto differenziale delle masse di prova (mediante una sospensione cardanica). GGG può raggiungere a terra elevate sensibilità perché è stato progettato specificatamente per la rivelazione di effetti differenziali (si veda<sup>2, Cap. 5</sup>)

## 5. CONTROLLO DELLA MISSIONE, DATI SCIENTIFICI, IMPATTO SUI MEZZI DI COMUNICAZIONE E SUL VASTO PUBBLICO

Data l'orbita equatoriale del satellite, la stazione italiana di Malindi, in Kenya, è ideale per eseguire il controllo della missione, la quale peraltro ha un elevato grado di autonomia (non ci sono manovre, né orbitali né di assetto, nel corso della missione scientifica). Dopo BEPPoSAX e AGILE, anch'esse su orbite equatoriali e controllate da Malindi, questa stazione potrebbe continuare in modo del tutto naturale (con evidenti economie di costi) la propria attività con la missione GG. Il fatto che il bando ASI preveda una durata della missione di 2 anni è molto positivo, sia –come è ovvio– per l'uso geodetico di GG, ma anche per l'esperimento di verifica del Principio di Equivalenza che si avvantaggia di una presa dati più lunga. La quantità di propellente richiesta è comunque molto piccola (circa 20 g di Cesio, con piccole variazioni a seconda della fase del ciclo solare). Ci saranno un centro operativo di controllo (OCC) e un centro operativo scientifico (OSC) che opererà in remoto da una sede universitaria in quanto non è richiesto che esso interagisca in tempo reale con il payload a bordo. Tutta l'analisi dei dati scientifici, il loro utilizzo, distribuzione e archiviazione saranno eseguiti in ambito universitario. (Si veda<sup>1, Cap. 7</sup>)

Il Principio di Equivalenza, e il suo evidente legame con tre grandi padri della Scienza moderna (Galileo, Newton ed Einstein) costituiscono elementi sicuri di impatto della piccola missione GG nei confronti dei media e del vasto pubblico. GG ha già avuto l'attenzione di RAI3, RAI1 e di alcuni settori della stampa. Tale impatto non può che essere accresciuto grazie agli obiettivi di misura della terra dallo spazio e di contributo alla conoscenza della atmosfera vicina, e dal fatto che tutto questo sia possibile con un piccolo satellite molto "ingegnoso" ideato in Italia e basato su alcune tecnologie avanzate anch'esse sviluppate in Italia. Di certo la piccola missione GG non passerebbe inosservata e sarebbe un avvenimento importante per ASI e per la scienza e la tecnologia spaziale Italiana.

## 6. QUADRO INTERNAZIONALE, PROGRAMMA DI SVILUPPO, COSTI E SITUAZIONE PROGRAMMATICA

La verifica del Principio di Equivalenza nello spazio è stata dominata per 25 anni dalla proposta STEP, avanzata da scienziati dell'Università di Stanford. Nel 1996 ESA ha inserito l'obiettivo di una verifica il Principio di Equivalenza ad alto livello di accuratezza tra le priorità scientifiche dell'Agenzia, e ha allocato sue specifiche risorse (21.7 Meuro c.e.c) per partecipare alla missione STEP qualora questa fosse approvata dalla NASA per il volo; decisione che verrà presa al più tardi nell'Aprile del 2001 a completamento della competizione SMEX. Le applicazioni nel campo delle scienze della Terra non sono una novità, dato che proprio gli studi ESA di STEP (1993 e 1996) le hanno approfondite e ne hanno sottolineato l'importanza. L'approvazione di GOCE delimita, ma allo stesso tempo rafforza, l'importanza di un uso geodetico della missione GG. L'interesse del CNES per una missione sul Principio di Equivalenza (prima con GEOSTEP e ora Microscope, entrambe basate sull'accelerometro di ONERA riproposto per GOCE) rende chiaro che se STEP non supererà la competizione SMEX, si aprirà una competizione in Europa per realizzare l'obiettivo fissato da ESA con una piccola missione di una paese membro. I costi di GG secondo stime industriali recenti<sup>2, Annex I & II</sup> fatte a completamento di uno studio di Fase A ammontano a 19 Meuro per lo spacecraft e 11 Meuro per il payload (36 mesi in tutto, consegna a 30 mesi dalla data di inizio) e 1 Meuro per le operazioni a terra. Esiste un impegno del Presidente di ASI<sup>2, Annex IV</sup> a fare ogni sforzo per fornire le risorse necessarie per il payload e le operazioni a terra, e a ricercare collaborazioni ed accordi per un lanciatore che immetta GG nell'orbita richiesta<sup>2, Annex IV & VI</sup> qualora ESA fornisca le risorse per lo spacecraft (19 Meuro). L'aggiunta del ricevitore LAGRANGE<sup>TM</sup> non cambia la sostanza di questa analisi, che è quella di una straordinaria opportunità che potrebbe aprirsi per ASI nei confronti di ESA in tempi brevi e perfettamente sincronizzati con i tempi del Bando ASI per la prossima piccola missione italiana.

1. "GALILEO GALILEI" (GG) Phase A Report, ASI 1<sup>st</sup> Edition November 1998, 2<sup>nd</sup> Edition January 2000, <http://tycho.dm.unipi.it/nobili>
2. "GALILEO GALILEI" (GG): Proposal to ESA for the F2&F3 competition, January 2000, [http://tycho.dm.unipi.it/nobili/ESA\\_F2&F3](http://tycho.dm.unipi.it/nobili/ESA_F2&F3)
3. SAGE: Phase A Report, ASI, November 1998
4. GOCE: Phase A Summary Report, Alenia GOC-RP-AI-0005, July 1999
5. E. Willemenot & P. Touboul: Rev. Sci. Instr., **71**, 302-309, 2000