

LNF-08/06 (IR)

21 Febbraio, 2008

Versione V2.0

FISICA FONDAMENTALE CON LA MISSIONE LUNARE MAGIA

S. Dell’Agnello¹, R. Vittori², G. O. Delle Monache¹, D. G. Currie³,
G. Bellettini⁴, R. March⁵, R. Tauraso⁴, C. Prosperi¹, C. Cantone¹, M. Garattini¹, A. Boni¹,
M. Martini¹, C. Lops¹, N. Intaglietta¹, M. Maiello¹

¹Laboratori Nazionali di Frascati dell’INFN, Frascati, ITALY

²Aeronautica Militare Italiana

³University of Maryland at College Park (MD), USA

⁴Università di Tor Vergata, Roma, ITALIA

⁵CNR-IAC, Roma, ITALIA

Abstract

Il Consiglio di Amministrazione dell’ASI, nella sua seduta del 7/2/2008, ha individuato le cinque proposte, nell’ambito del Bando Piccole Missioni, di cui verrà finanziato lo studio di Fase A, ovvero lo studio di fattibilità preliminare alla scelta delle due missioni che verranno lanciate entro il 2014. Una di queste cinque missioni è MAGIA (Missione Altimetrica Gravimetrica geochimica Italiana lunAre), di cui il Principal Investigator è la Prof. A. Coradini (INAF-IFSI) e il Prime Industriale è Rheinmetall Italia S.p.A.

La missione si propone di rispondere ad alcune delle questioni di maggiore importanza per lo studio della Luna quali la struttura interna, elemento necessario per comprendere l’origine e la formazione, la ricerca di evidenze di processi di differenziazione che devono aver caratterizzato la parte iniziale della formazione e la correlazione con la successiva fase dominata dalla craterizzazione della superficie. Al momento, i dati geochimici e mineralogici da telerilevamento lunare, utili per raccordare le analisi dei campioni di rocce prelevate in-situ ad aree del satellite più vaste, sono disponibili solo per la “near side”. Inoltre anche le missioni più recenti (Clementine, SMART-1, Lunar Prospector) non avevano a bordo strumenti in grado di effettuare un’analisi mineralogica accurata. MAGIA si propone inoltre una precisa caratterizzazione del campo gravitazionale lunare, ed ad un’accurata misura del suo stato rotazionale. Questi temi sono tutti strettamente legati tra loro concorrendo, infatti, a migliorare la comprensione dell’origine ed evoluzione della Luna.

Inoltre, MAGIA mostrerà come si possa utilizzare una piattaforma in orbita circumlunare al fine di ottenere misure di fisica fondamentale, quali un miglioramento delle misura del redshift gravitazionale, una “precursor mission” per la proposta di Lunar Laser Ranging di seconda generazione, MoonLIGHT, ed un potenziale ulteriore miglioramento dei test delle Relatività Generale grazie ad una misura indipendente della posizione del selenocentro rispetto a Terra.

Questo Report descrive il pacchetto di Fisica Fondamentale della proposta MAGIA

INTRODUZIONE

Il volo translunare della missione MAGIA e il periodo che il satellite principale di MAGIA passerà in orbita attorno alla Luna offrono la possibilità di compiere importanti misure di fisica della gravitazione e test della Relatività Generale:

1. Miglioramento della misura del **redshift gravitazionale** (GRS, fatta nel 1976 dal satellite Gravity Probe A, GP-A [1]), grazie alla misura simultanea del tempo e della distanza del payload VESPUCCI¹, composto da orologi di precisione e retro-riflettori (cube corner retro-reflectors, CCRs), paragonata con orologi a Terra di posizione nota rispetto all'ITRF/ICRF². Questo è un test importante della Relatività Generale (RG) e Teorie della Gravitazione oltre la RG (come per esempio i modelli EHS in [2]).
2. Una “**precursor mission**” per MoonLIGHT³, una proposta di LLR di seconda generazione per misure di precisione di Relatività Generale e test di Teorie Unificate [3]. La versione basata su installazione da parte di astronauti, MoonLIGHT-M [4], è stata presentata nel 2006 in risposta al bando NASA “Suitecase science to the Moon” ed è stata approvata nel 2007. L'INFN-LNF e l'astronauta R. Vittori vi partecipano a costo zero per la NASA. La proposta con installazione robotica, MoonLIGHT-R [5], è stata presentata allo studio lunare ASI nello stesso periodo.
3. Potenziale miglioramento dei test della RG fatti con il laser ranging lunare (LLR) grazie alla **misura diretta** della posizione del selenocentro (il centro di massa della Luna) rispetto all'ITRF/ICRF. La misura sarà effettuata col retro-riflettore di MoonLIGHT a bordo del satellite orbitante principale di MAGIA. Poiché i test della RG (vedi Tabella 1) utilizzano il selenocentro determinato dagli stessi dati LLR, una misura indipendente del selenocentro per il periodo di durata della missione rafforzerà i test suddetti.

MISURA DEL REDSHIFT GRAVITAZIONALE CON VESPUCCI

L'acronimo del P/L è dovuto all'assunzione, emersa dagli studi lunari ASI, che il vettore delle prossime missioni lunari potrebbero essere VEGA modificato o SOYUZ.

Gli orologi e retro-riflettori a bordo del veicolo di trasferimento di MAGIA permetteranno di studiare il GRS in allontanamento dalla Terra. Questa è un'opportunità unica, dato che GP-A raggiunse un'altezza massima di 10000 Km e prese dati per 1 hr e 50 min. È da notare che per GP-A l'effetto del GRS è $dv/v \sim 4.3 \times 10^{-10}$, mentre a 20000 Km si ha $dv/v \sim 5.3 \times 10^{-10}$ (e sulla Stazione Spaziale Internazionale a 350 Km si ha $dv/v \sim 0.36 \times 10^{-10}$). Un altro punto di forza di VESPUCCI è che la misura della distanza fatta coi CCR avrà un'accuratezza ≤ 1 centimetro, molto migliore di quella di GP-A, basata su posizionamento con onde radio e la tecnologia degli anni '70.

¹ VESPUCCI: VEGA or Soyuz Payload for Unified Clock vs Ccr Investigation.

² ITRF/ICRF: International Terrestrial/Celestial Reference Frame.

³ MoonLIGHT: Moon Laser Instrumentation for Gravitation High-Accuracy Tests.

Il P/L comprenderà due orologi a bordo, una matrice di retro-riflettori ed un sistema di trasferimento del tempo e di sincronizzazione delle misure di tempo (frequenza) e distanza tra MAGIA e Terra. Durante la Fase A si studierà la misura del GRS:

- Entro le altitudini dove si riceve il segnale del GNSS (20000-24000 Km).
- Nell'orbita di trasferimento Terra-Luna.
- In orbita lunare.
- Si valuterà anche l'opzione di usare retro-riflettori metallici e cavi ("hollow"), di peso e dimensioni minori di quelli pieni di fused silica. La stabilità strutturale dei retro-riflettori cavi in ambiente spaziale è oggetto di studio congiunto della NASA-GSFC ed INFN-LNF.
- Diversi tipi di rivelatori del segnale di laser ranging per la sincronizzazione della misura di distanza vs quella del tempo (per esempio i Compensated Single Photoelectron Avalanche Photodiode, C-SPAD).

Per gli orologi si studieranno le seguenti ipotesi:

- Orologi H-masers, che rappresentano lo stato dell'arte e forniscono la migliore stabilità di tempo e frequenza. Tale stabilità relativa per H-maser attivi è dell'ordine di 10^{-14} per un giorno, mentre per periodi più lunghi la stabilità diminuisce a causa di deriva in frequenza di $\sim 10^{-15}$ al giorno. Per eliminare questo deriva si usa il metodo del "cavity auto tuning" che limita la deriva della frequenza a 10^{-18} al giorno. Per tempi dell'ordine di 1500 sec, la stabilità relativa dv/v è tipicamente di 10^{-15} .
- Orologi al Cesio, che offrono stabilità tra 10^{-14} e 10^{-12} .

I maser sono la scelta più sicura (ma più costosa). Tuttavia, i modelli d'orologio al Cesio con prestazioni particolarmente ottimizzate potrebbero bastare comunque a migliorare la misura di GP-A.

Il trasferimento del tempo e la sincronizzazione della misura di distanza con quella del tempo sono molto critici. Lo stato dell'arte per il trasferimento del tempo su orbite basse è l'esperimento T2L2 (Time Transfer by Laser Link) del CNES sulla missione Jason-2 (h = 1336 Km) nel 2008. Orologi maser presso le stazioni laser ranging (come CGS-ASI a Matera) permetteranno una sincronizzazione precisa dei tempi con il laser link su MAGIA (da studiare nella Fase A) e con altri laboratori nel mondo, come USNO negli USA e il Borowiec Time Service Laboratory (AOS) in Polonia.

MOONLIGHT, LLR DI SECONDA GENERAZIONE

Il singolo CCR "base" di MoonLIGHT ($\varnothing = 10$ cm) sarà montato accanto all'antenna di telecomunicazioni di MAGIA, che sarà rivolta verso Terra.

L'idea innovativa di una array "sparso" di singoli CCR sulla superficie lunare per rimuovere la perturbazione delle librazioni geometriche della Luna sulla misura della distanza e gli obiettivi scientifici sono descritti in dettaglio nelle referenze [4,5].

L'obiettivo finale è di migliorare almeno di un fattore 100 l'errore dovuto alle librazioni geometriche sulle matrici di retro-riflettori di Apollo e Lunakhod, passando da ~1cm fino a 100 μm . La bontà del nuovo approccio è stata studiata nel 2006/07 dall'INFN-LNF con simulazioni termiche, ottiche ed orbitali [4,5]. Nell'ambito dello studio NASA nel 2008-09 si qualificheranno con la "Space Climatic Facility" dei LNF [6,7] le prestazioni termiche ed ottiche di un prototipo di MoonLIGHT acquistato dai partner americani coi fondi NASA. Il deployment su MAGIA permetterebbe di testare nel modo più completo e realistico il CCR base di MoonLIGHT alle distanze lunari.

Di seguito si riporta una tabella (vedi [5]) con i risultati scientifici attesi.

Tabella 1: Risultati di fisica attesi con MoonLIGHT sulla superficie lunare.

Fenomeno	Limite con precisione attuale LLR	Limite con precisione LLR a 1 mm	Limite con precisione LLR a 100 μm	Scala Temporale
WEP ($\Delta a/a$)	10^{-13}	$\sim 10^{-14}$	$\sim 10^{-15}$	2 yr
SEP (Nordvedt param.)	4×10^{-4}	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-6}$	2 yr
Gdot/G	$10^{-12}/\text{yr}$	$\sim 10^{-13}/\text{yr}$	$\sim 10^{-14}/\text{yr}$	4 yr
Precessione Geodetica (PPN param. β)	$\sim 5 \times 10^{-3}$	5×10^{-4}	$\sim 5 \times 10^{-5}$	6-10 yr
Deviazioni da $1/r^2$ (Yukawa param. α)	10^{-10}	$\sim 10^{-11}$	$\sim 10^{-12}$	6-10 yr

MISURA DELLA POSIZIONE DEL SELENOCENTRO

Il CCR di MoonLIGHT sarà montato accanto all'antenna per le telecomunicazioni con la Terra. Le orbite senza eclissi di MAGIA faciliteranno la misura del selenocentro.

Rispetto al laser ranging sulla superficie della Luna, la mobilità del satellite porrebbe difficoltà aggiuntive, che saranno studiate e quantificate durante lo studio di Fase A assieme alle 4 stazioni di lunar ranging (CGS-ASI a Matera, MacDonald ed APOLLO negli USA e la OCR francese) quando il satellite non è eclissato dalla Luna.

REFERENZE

- [1] Test of Relativistic Gravitation with a Space borne Hydrogen Maser, Vessot, et al., Phys. Rev. Lett. 45, 2081-2084 (1980)
- [2] Constraining Torsion with Gravity Probe B, Y. Mao, M. Tegmark, A. Guth, S. Cabi, Phys. Rev. D 76, 104029 (2007). Vedi inoltre:
Can Gravity Probe B Usefully Constrain Torsion Gravity Theories?, E. E. Flanagan, E. Rosenthal, Phys. Rev. D 76, 104029 (2007);
Constraints on Spacetime Torsion from the LAGEOS and LARES Measurement of the Lense-Thirring Effect, G. Bellettini, I. Ciufolini, R. March, R. Tauraso, S. Dell’Agnello, in preparazione.
- [3] The Accelerated Universe and the Moon, G. Dvali, A. Gruzinov, M. Zaldarriaga, Phys. Rev. D 68 024012, 2003.
- [4] MoonLIGHT-M, G. Bellettini, D. G. Currie, S. Dell’Agnello, C. Cantone, G. O. Delle Monache, M. Garattini, N. Intaglietta, R. Vittori, INFN-LNF Report LNF-06-28(IR), [http://www.lnf.infn.it/sis/preprint/pdf/getfile.php?filename=LNF-06-28\(IR\).pdf](http://www.lnf.infn.it/sis/preprint/pdf/getfile.php?filename=LNF-06-28(IR).pdf).
- [5] MoonLIGHT-R, G. Bellettini, D. G. Currie, S. Dell’Agnello, C. Cantone, G. O. Delle Monache, M. Garattini, N. Intaglietta, R. Vittori, INFN-LNF Report LNF-06-28(IR), [http://www.lnf.infn.it/sis/preprint/pdf/getfile.php?filename=LNF-07-2\(IR\).pdf](http://www.lnf.infn.it/sis/preprint/pdf/getfile.php?filename=LNF-07-2(IR).pdf).
- [6] Applicazioni Tecnologiche della Camera Spaziale Climatica dei Laboratori Nazionali di Frascati, A. Bosco et al, INFN-LNF Report LNF-06-26(IR), [http://www.lnf.infn.it/sis/preprint/pdf/getfile.php?filename=LNF-06-26\(IR\).pdf](http://www.lnf.infn.it/sis/preprint/pdf/getfile.php?filename=LNF-06-26(IR).pdf).
- [7] Probing Gravity in NEOs with High-Accuracy Laser-Ranged Test Masses, A. Bosco, C. Cantone, S. Dell’agnello, G. O. Delle Monache, M. A. Franceschi, M. Garattini, T. Napolitano, I. Ciufolini, S. Negri, A. Agneni, F. Graziani, P. Ialongo, A. Lucantoni, A. Paolozzi, I. Peroni, G. Sindoni, G. Bellettini, R. Tauraso, E. C. Pavlis, D. G. Currie, D. P. Rubincam, D. A. Arnold, R. Matzner, V. J. Slabinski, Int. Jou. Mod. Phys. D, Vol. 16, No. 11 (2007), 1-15.
- [8] The T2L2 experiment on Jason-2, Guillement P., Gasc K., Petitbon I., Samain E., Vrancken P., Weick J., Albanese D., Para F., Torre J.M., (2006). Vedi anche: Time Transfer by Laser Link, <http://www.obsazur.fr/gemini/projets/t2l2/fr/publis/pdf/T2L2%20on%20Jason%202%20IFCS%2006.pdf>