

**LNF-06/ 06 (IR)**  
**20 Febbraio 2006**

**APPLICAZIONI TECNOLOGICHE DELLA CAMERA SPAZIALE  
CLIMATICA DEI LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI**

G. Belletini<sup>1</sup>, A. Bosco<sup>1</sup>, C. Cantone<sup>2</sup>, I. Ciufolini<sup>4</sup>, D. Currie<sup>5</sup>, S. Dell’Agnello<sup>2</sup>, G. Delle Monache<sup>2</sup>,  
M. A. Franceschi<sup>2</sup>, M. Garattini<sup>1</sup>, T. Napolitano<sup>2</sup>, A. Paolozzi<sup>3</sup>, E. C. Pavlis<sup>6</sup>, D. P. Rubincam<sup>7</sup>,  
V.J. Slabinski<sup>8</sup>, R. Tauraso<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Roma 2

<sup>2</sup> LNF

<sup>3</sup> Univ. Roma 1

<sup>4</sup> Univ. e INFN-Lecce

<sup>5</sup> Univ. Maryland at College Park

<sup>6</sup> Univ. of Maryland Baltimore County & ILRS/NASA-Goddard

<sup>7</sup> NASA-Goddard

<sup>8</sup> US Naval Obs. WDC

**ABSTRACT**

La Camera Spaziale Climatica (CSC) in allestimento ai LNF è un progetto integrato con applicazioni di fisica fondamentale e di ricaduta e trasferimento tecnologico per usi civili ed industriali<sup>9</sup>. Nella CSC, infatti, si intendono studiare sperimentalmente le caratteristiche ottiche e termiche delle componenti dei satelliti LAGEOS I e II (già operativi) e la loro evoluzione LARES (in via di realizzazione ai LNF). Lo scopo è quello di migliorare l’accuratezza della misura del trascinamento dei sistemi inerziali in Relatività Generale sulle orbite (effetto Lense-Thirring [1] [2]) e delle applicazioni di Geodesia. Gli elementi orbitali vengono determinati con inseguimento via laser da Terra dei satelliti (Satellite Laser Ranging, SLR). L’applicazione tecnologica piu’ importante è il contributo fondamentale alla definizione del sistema internazionale di riferimento di posizione terrestre (ITRF, Intern. Terrestrial Reference Frame), emesso dallo IERS (Intern. Earth Reference Service), lo standard assoluto per tutte le attività civili, industriali e scientifiche, a Terra e nello spazio, che necessitano di un sistema di riferimento assoluto.

Le misure effettuate nella CSC saranno, inoltre, estremamente utili allo sviluppo di una integrazione tra il GNSS (Global Navigation Satellite System) [6] ed SLR, che avrà compimento su GALILEO e GPS-3.

---

<sup>9</sup> Contributo alla fiera “InnovAction” (Udine, 9-11/Feb/2006), sul tema del trasferimento di conoscenza dalla scienza fondamentale del CERN e dell’INFN all’industria.

Presentato ad Innovaction da M. Garattini

## Introduzione

L'attività di ricerca presso la camera spaziale climatica (CSC) in allestimento ai LNF è un progetto integrato, con applicazioni di fisica fondamentale e di ricaduta e trasferimento tecnologico per usi civili ed industriali.

Queste applicazioni sfruttano il concetto di ricreare in laboratorio, in un criostato di dimensioni moderate (diametro 1 m, lunghezza 2 m) il “clima spaziale”, cioè le condizioni di temperatura, pressione e radiazione (elettromagnetica ed ionizzante) in cui operano i satelliti artificiali che orbitano attorno alla Terra. In questa fase, si studiano satelliti di due categorie specifiche:

1. LAGEOS I (1976), LAGEOS II (1992) e la loro evoluzione moderna, LARES
2. Il sotto-sistema per il tracciamento via Laser da Terra delle future ed imminenti costellazioni di GNSS (Global Navigation Satellite System).

Lo stato della CSC dei LNF è il seguente: il disegno della camera climatica è completo; la strumentazione hardware (simulatore solare, simulatore infrarosso terrestre, Lasers, camera digitale infrarossa) è in via di consegna o di installazione; la progettazione e la simulazione termica dei prototipi è ben avviata. Un prototipo (“matrice 3x3”) dei LAGEOS è stato realizzato ed il suo comportamento termico nel clima spaziale è stato simulato con un software dedicato al calcolo termico di satelliti (inclusivo di modellatori FE-FD e di trattamento delle proprietà ottiche separate per Visibile, UV ed IR).

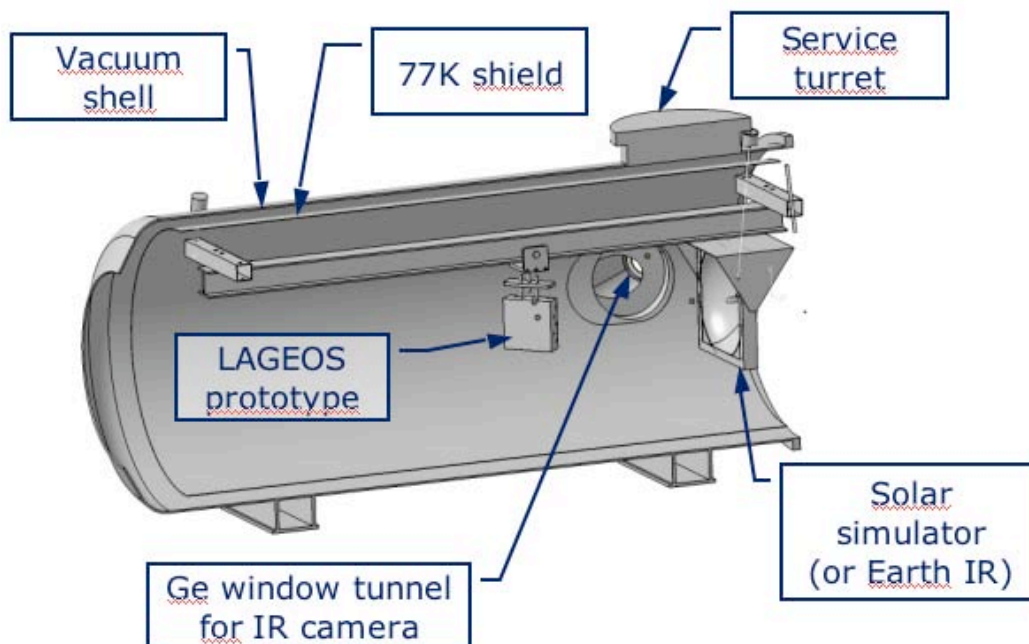


Figura 1: Layout della camera spaziale climatica dei LNF.

## Trasferimento tecnologico della ricerca su LAGEOS e LARES

I LAGEOS (Laser GEOdynamics Satellite) sono delle sfere metalliche di test, equipaggiate con dei retro-riflettori al quarzo (CCR) in orbita a ~ 6000 Km di altitudine, e fungono da “punti materiali” inseguiti da Terra via Laser (grazie ai CCR). Essi sono utilizzati per l'osservazione del trascinarsi dei sistemi inerziali in Relatività

Generale (effetto Lense-Thirring [1] [2]) e per misure molto raffinate di Geodesia [3]. Una delle applicazioni tecnologiche piu' importanti dei LAGEOS è la misura del movimento delle zolle continentali della crosta terrestre, specialmente quelle a medio e lungo termine. L'applicazione tecnologica forse piu' importante dei LAGEOS è il contributo fondamentale alla definizione del sistema internazionale di riferimento di posizione terrestre (ITRF, Intern. Terrestrial Reference Frame) e celeste (ICRF, Intern. Celestial Reference Frame). I sistemi ITRF e ICRF vengono emessi da un organismo internazionale, lo IERS (Intern. Earth Reference Service) ed è lo standard assoluto per tutte le attività civili, industriali e scientifiche, a Terra e nello spazio, che necessitano di un sistema di riferimento assoluto. L'impatto sociale, politico ed economico, sia a livello globale che locale, della disponibilità, correttezza ed affidabilità degli standard ITRF ed ICRF è enorme.

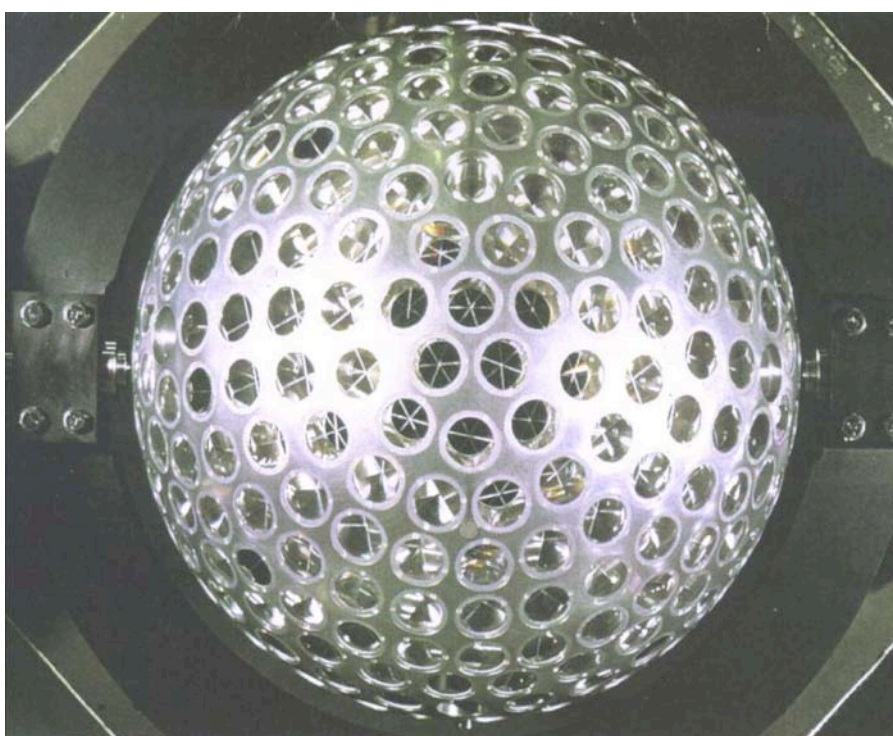


Figura 2: LAGEOS I (1976): diametro 60 cm, peso ~ 400 Kg, equipaggiato con ~ 400 CCR.

Per produrre ITRF e ICRF lo IERS utilizza le orbite dei LAGEOS, quelle dei satelliti GPS, i dati VLBI (Very Long Baseline Interferometry), i sistemi DORIS ed i CCR installati sulla Luna dalle missioni umane Apollo 11, 14 e 15. Tuttavia, la determinazione del centro di massa della Terra (il "geo-centro") e la scala delle distanze (lo standard che definisce il diametro medio terrestre) sono largamente dominate dai LAGEOS, i satelliti costruiti dall'uomo la cui posizione è conosciuta con la precisione migliore. La precisione annuale con cui i LAGEOS forniscono il geo-centro è di pochi mm. L'orientazione degli assi dello ITRF, invece, è dominata in egual misura dai LAGEOS e dai dati VLBI. I LAGEOS sono indispensabili per la determinazione di ITRF e ICRF.

Altre importanti applicazioni civili dei LAGEOS sono:

- 1) La calibrazione assoluta della coordinata verticale misurata dagli altimetri radar usati in meteorologia e nell'osservazione della Terra.

- 2) Le variazioni decennali del campo gravitazionale terrestre, accoppiate con variazioni a lungo termine del clima e dei moti delle masse fluide e delle placche tettoniche.
- 3) Monitoring della variazione del volume dei ghiacci ai poli.
- 4) Tracciamento di satelliti critici il cui sistema radiometrico non sia funzionante.

I LAGEOS sono dei punti materiali nel campo gravitazionale della Terra. L'attuale precisione dei dati dei LAGEOS è limitata dall'influsso delle forze non-gravitazionali e non-conservative sulle loro orbite: le spinte termiche ed il frenamento del loro spin dovuto al campo magnetico terrestre. La radiazione solare e quella infrarossa emessa dalla Terra riscaldano in modo asimmetrico i retro-riflettori dei LAGEOS. Inoltre, questo riscaldamento avviene in un tempo lento, significativo rispetto al loro periodo orbitale ed alla durata delle loro eclissi (rispetto alla luce solare) dietro all'ombra della Terra. La radiazione termica ri-emessa in modo asimmetrico e lento dai CCR genera una spinta non-nulla e variabile nel tempo sul centro di massa del satellite, introducendo una perturbazione dell'orbita che confonde la misura dei puri effetti gravitazionali utili alle applicazioni di scienza e tecnologia. Lo spin dei LAGEOS, introdotto per minimizzare le spinte termiche, purtroppo viene frenato dal campo magnetico, e per questo le misure di LAGEOS I, praticamente fermo, sono più degradate di quelle di LAGEOS II, che conserva ancora circa 1/4 (15 rpm) dello spin iniziale (60 rpm).

Figura 3: vista grafica dell'inseguimento via Laser da parte di due stazioni ILRS del satellite LAGEOS II, realizzato dall'ASI e lanciato dalla NASA nel 1992.



La prima parte della ricerca ai LNF consiste nella caratterizzazione del comportamento termico di prototipi dei LAGEOS con la camera climatica spaziale: misura e simulazione della radiazione termica assorbita e riemessa dai CCR e della costante tempo associata.



Figura 4: il prototipo dei satelliti LAGEOS, la "matrice 3x3".



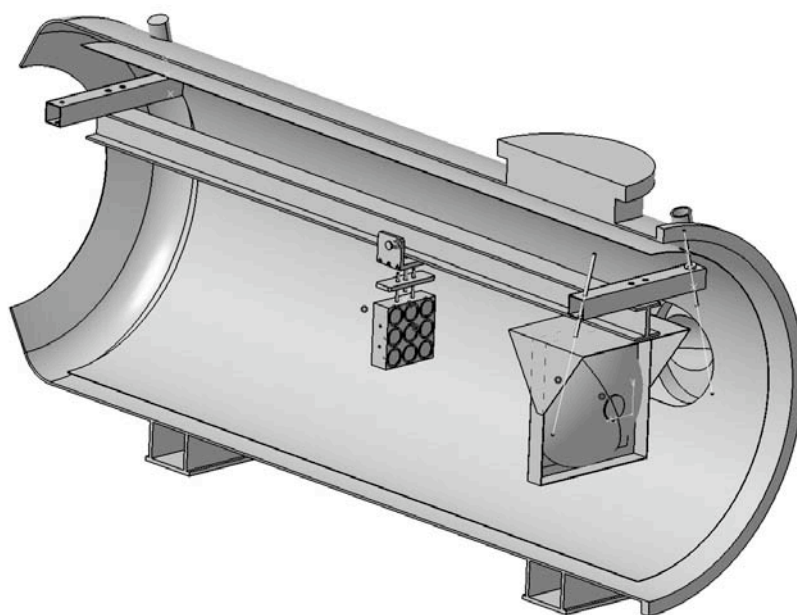


Figura 5: la matrice 3x3 all'interno della camera spaziale climatica.

La costante tempo di riscaldamento dei CCR ( $\tau_{CCR}$ ), mai misurata, è calcolata in letteratura con un errore del 250%. Esso limita la misura dell'effetto Lense-Thirring in RG al 2-3% di accuratezza e peggiora l'emissione dello standard ITRF.  $\tau_{CCR}$  verrà misurata con la CSC con un accuratezza  $\leq 5\%$ , come indicato dalla simulazione in Fig. 7 [4].

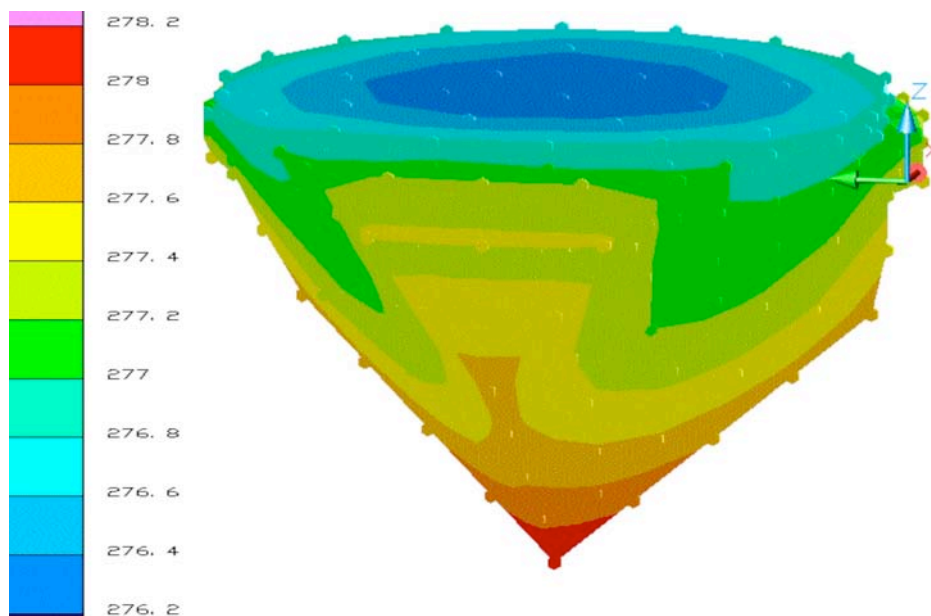


Figura 6: simulazione del profilo termico (in gradi K) dei CCR dei satelliti LAGEOS dopo 2800 sec dall'inizio dell'esposizione alla radiazione solare (lampada solare spenta a  $t=0$ ).

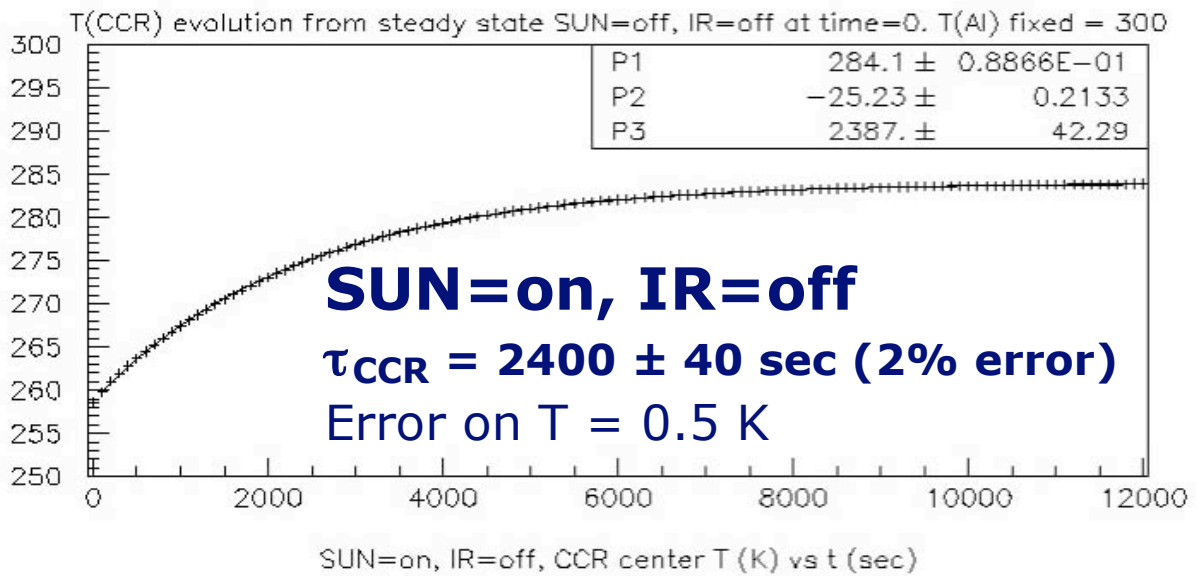


Figure 7: risultati della simulazione del riscaldamento al sole dei CCR dei LAGEOS.

La seconda parte della ricerca ai LNF consiste nel modificare il disegno dei LAGEOS, che risale agli anni '70, per ridurre fortemente le spinte termiche, il frenamento magnetico e controllare in modo affidabile gli effetti residui. Il nuovo disegno promette di risolvere in modo radicale il problema delle forze non-conservative. Questo lavoro è ben avviato, con simulazioni e con la costruzione di prototipi da caratterizzare nella CSC.



Figure 8: nel nuovo progetto del satellite i CCR sono alloggiati in un guscio esterno e pertanto si “vedono” termicamente tra loro in modo piu’ efficiente rispetto a quando erano chiusi in cavità singole, come nei LAGEOS. La sfera interna assorbe/riemette il calore da/verso tutti i CCR, favorendone l’uniformità della temperatura.



Figura 9: uno dei due semi-gusci esterni di alluminio dove sono alloggiati i CCR.

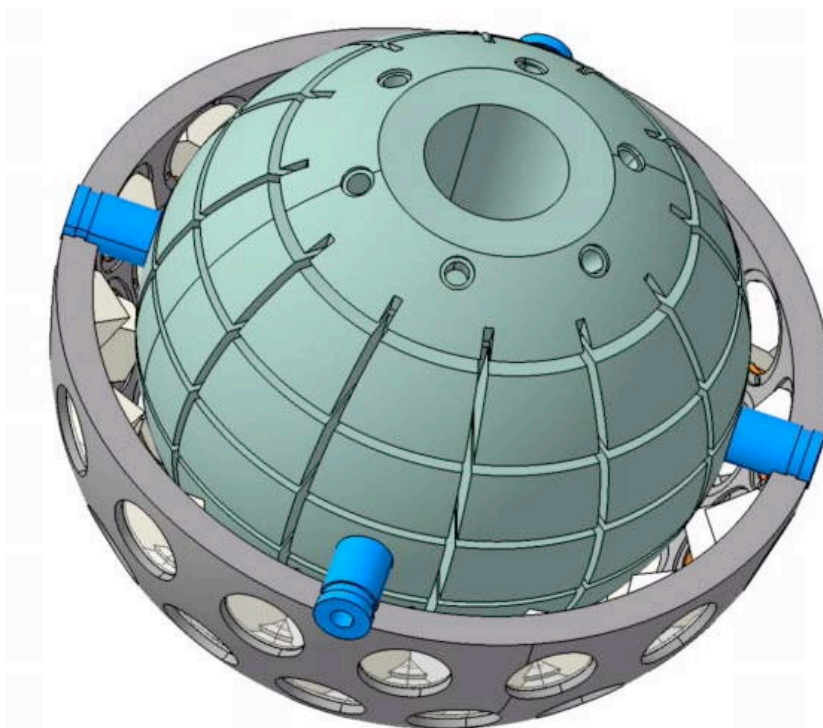


Figura 10: la geometria ed il materiale (lega tungsteno) della sfera interna sono critici per dare al satellite la massa richiesta (le perturbazioni delle forze non-conservative sono proporzionali al rapporto tra l'area del satellite e la sua massa) e per minimizzare le "eddy currents" sollecitate dal campo magnetico terrestre. Una massa sagomata come in figura contribuisce a ridurre i circuiti delle eddy currents, diminuendo il frenamento dello spin. Il buco lungo un asse della sfera può dare un asse preferenziale d'inerzia lungo il quale orientare lo spin iniziale del satellite al momento della messa in orbita.

Per la fisica fondamentale, il nuovo modello di satellite permetterà di migliorare la misura del Lense-Thirring fino ad una precisione  $\leq 1\%$  ed aprirà lo studio di possibili effetti di nuova fisica oltre la RG. Per la ricaduta tecnologica, i dati di LARES (ed altri

satelliti simili) permetteranno di migliorare l'osservazione dei movimenti della crosta terrestre su tempi medio-lunghi (complementari a quelli brevi studiati per esempio col GPS) e di produrre degli standard ITRF e ICRF sempre più affidabili e precisi e, soprattutto, aggiornati più frequentemente. Si noti che su tempi lunghissimi i LAGEOS sono gli unici satelliti in grado di monitorare, per esempio, il geo-centro, poiché la loro orbita ha una vita media di milioni di anni ! Il nuovo disegno di LARES ed i risultati della simulazione dei CCR dei LAGEOS (gli stessi che avrà LARES) sono stati presentati [5] al recente workshop dell'ILRS (Intern. Laser Ranging Service), l'organismo internazionale che calcola le orbite dei satelliti per applicazioni di Geodesia e Fisica Fondamentale. Lo ILRS contribuisce, naturalmente, al lavoro dello IERS. Entrambi sono Servizi internazionali gratuiti, che scambiano molto proficuamente conoscenze, dati e tecnologia con la ricerca fondamentale.

Se il nuovo, promettente progetto di LARES funzionerà come auspicato, i LNF avranno ideato, realizzato e caratterizzato un prototipo innovativo di satellite che potrà essere prodotto in serie dall'industria aerospaziale per gli usi civile e scientifico descritti.

Un altro capitolo di ricerca importante che riguarda i LAGEOS e LARES è la misura della direzione assoluta dello spin del satellite utilizzando i dati del tracciamento Laser e delle riflessioni solari sui CCR. Infatti, le spinte termiche presenti nei LAGEOS, e le piccole spinte residue in LARES, sono dirette preferenzialmente lungo questo asse. Anche questo è oggetto di ricerca in seno al gruppo che gestisce la CSC dei LNF.

Il raffinamento dell'analisi dei dati di LAGEOS e lo studio di un satellite di seconda generazione è l'oggetto della missione spaziale LARES (LAsER RELativity Satellite), che da alcuni anni ha coagulato attorno a sé una Collaborazione Internazionale di ricercatori e tecnologi di Università, Laboratori e membri di Agenzie Spaziali, in cui l'INFN è entrato a far parte alla fine del 2004. È da ricordare che, mentre l'osservazione diretta delle onde gravitazionali è il test più importante della RG al momento il Lense-Thirring è l'unico effetto dinamico misurato (esso è, infatti, proporzionale al momento angolare della Terra).

GNSS (Global Navigation Satellite System) [6]

Le attuali costellazioni per il "global positioning system" sono GPS-block1 (USA, in via di dismissione), GPS-block2 (che sta sostituendo progressivamente il GPS-1) e GLONASS (Russia). Com'è noto, il tracciamento dei satelliti ed il posizionamento dei ricevitori a Terra avviene tramite onde radio. Le orbite dei satelliti GPS sono intrinsecamente molto meno precise di quelle inseguite via Laser (decimetri invece di millimetri). Inoltre, il sistema GNSS deve essere ricalibrato periodicamente e pertanto non ha l'affidabilità e la precisione assoluta su tempi lunghi tipici del sistema di "Satellite Laser Ranging" (SLR) su cui sono basati i LAGEOS. Tuttavia, satelliti e stazioni terrestri di GNSS sono molto più numerosi dello SLR. Il GNSS è, inoltre, molto meno affetto dalle condizioni atmosferiche (i Laser non sono operativi col maltempo).

GNSS ed SLR danno contributi diversi e complementari. SLR può essere molto utile a migliorare la stabilità e la precisione della navigazione satellitare col GNSS se i satelliti delle future costellazioni vengono equipaggiate con CCR. Del GPS-1/2 solo due satelliti



hanno i CCR “tradizionali” al quarzo, simili a quelli dei LAGEOS. GALILEO, la costellazione della Comunità Europea, avrà 100 CCR sul Nadir di ognuno dei suoi 30 satelliti. Anche gli USA sono orientati ad equipaggiare il GPS-3 con CCR tracciati dallo ILRS. Per motivi di spazio, altitudine (tra i 20,000 ed i 30,000 Km) e, soprattutto, di peso (e quindi di costo) i CCR tradizionali al quarzo non sono adatti.

Il gruppo dei LNF che fa ricerca alla CSC, partecipa alla caratterizzazione di CCR di nuova concezione, metallici e cavi per tracciare coi Laser le costellazioni di satelliti del GPS-2 (primi prototipi) e GPS-3. Questo è uno studio di funzionalità complesso ed integrato del comportamento termico, meccanico ed ottico dei retro-riflettori candidati nel clima spaziale simulato in laboratorio.

### **Ringraziamenti**

Gli autori ringraziano il Direttore dei LNF, Prof. M. Calvetti, la Responsabile della Divisione Ricerca LNF (DR), Dr. M. Curatolo, il Responsabile Tecnico della Divisione Acceleratori LNF (DA), Ing. C. Sanelli, per il decisivo supporto dato all’esperimento LARES.

Si ringraziano, inoltre, vivamente R. Ceccarelli del Servizio di Criogenia della DA, N. Intaglietta, G. Bisogni, A. De Polis, E. Iacuessa del Servizio di Meccanica, Metrologia e Progettazione della DR per il professionale supporto tecnico dato alla progettazione e realizzazione dei prototipi di LAGEOS, LARES e della CSC.

### **Referenze**

- [1] “Measurement of the Lense-Thirring drag on high-altitude laser-ranged artificial satellites”, I. Ciufolini, *Physical Review Letters*, 56, 278-281 (1986).
- [2] “A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense-Thirring effect”, I. Ciufolini & E. C. Pavlis, *NATURE*, vol. 431, 21 October, 2004.
- [3] Workshop ILRS a Eastbourne (UK), Ottobre 2005 “*Towards 1 mm accuracy*”:  
<http://nercslr.nmt.ac.uk/workshop2005/program.html>
- [4] Tesi di Laurea in Ingegneria (I Livello), A. Bosco, Università’ di Roma II, Ottobre 2005 (non pubblicata).
- [5] Talk di G. Delle Monache al workshop [3]:  
[http://nercslr.nmt.ac.uk/workshop2005/proceedings/wednesday/sp/Giovanni\\_ILRS05\\_NEW.ppt](http://nercslr.nmt.ac.uk/workshop2005/proceedings/wednesday/sp/Giovanni_ILRS05_NEW.ppt)
- [6] Conferenza GPS a Londra, Novembre 2005, “*Advances in GPS data processing and modelling*”:  
[http://www.ge.ucl.ac.uk/comet\\_advances\\_in\\_gps\\_data\\_processing\\_and\\_modelling\\_for\\_geodynamics](http://www.ge.ucl.ac.uk/comet_advances_in_gps_data_processing_and_modelling_for_geodynamics)