

LNF-06/ 26 (IR)

14 Settembre 2006

Versione Aggiornata

LNF-06/ 6 (IR)

20 Febbraio 2006

APPLICAZIONI TECNOLOGICHE DELLA CAMERA SPAZIALE CLIMATICA DEI LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI¹

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

¹ Univ. Roma Tor Vergata

² Laboratori Nazionali di Frascati (LNF) dell’INFN

³ Univ. Roma la Sapienza, Scuola di Ingegneria Aerospaziale

⁴ Univ. e INFN-Lecce

⁵ Univ. of Maryland at College Park

⁶ Univ. of Maryland Baltimore County & ILRS/NASA-GSFC

⁷ NASA-GSFC

⁸ US Naval Observatory Washington DC

ABSTRACT

La Camera Spaziale Climatica (CSC) dei LNF è un progetto integrato di fisica fondamentale e di trasferimento tecnologico alle attività civili ed industriali. Nella CSC, infatti, si misurano le caratteristiche termiche ed ottiche delle componenti dei satelliti LAGEOS I e II (già operativi) e la loro evoluzione LARES (da realizzare ai LNF). Lo scopo è quello di migliorare l’accuratezza della misura del trascinarsi dello spazio-tempo in Relatività Generale (effetto Lense-Thirring) e delle applicazioni tecnologiche di Geodesia Spaziale, grazie al nuovo satellite LARES ed alla CSC. La traiettoria orbitale viene determinata con la tecnica dell’inseguimento via laser dei satelliti da Terra (“Satellite Laser Ranging”, SLR). L’applicazione tecnologica più importante è il contributo fondamentale alla definizione del sistema internazionale di riferimento e di posizione terrestre (ITRF, Intern. Terrestrial Reference Frame), emesso dallo IERS (Intern. Earth rotation and Reference systems Service). Esso è lo standard 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 all’integrazione tra GNSS (Global Navigation Satellite System) ed SLR, che avrà compimento sulle future costellazioni GALILEO (Europa, ≥ 2008) e GPS-3 (USA, ≥ 2011). SLR fornisce il sistema di riferimento assoluto ed il GNSS permette la navigazione in tempo reale rispetto ad esso: il meglio delle due tecnologie, dallo spazio per la Terra.

¹ Contributo alla Fiera *InnovAction* (Udine, Feb/2006, www.innovactionfair.com), sul trasferimento tecnologico dalla scienza fondamentale del CERN e dell’INFN all’industria. Presentato da M. Garattini.

Introduzione

L'attività di ricerca presso la camera spaziale climatica (CSC) dei LNF è un progetto integrato, con applicazioni di fisica fondamentale e di 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 (e, in un secondo momento, 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 (NASA, 1976), LAGEOS II (NASA-ASI, 1992) e la loro evoluzione moderna, LARES², la cui costruzione è stata proposta all'INFN.
2. Il sotto-sistema di retro-riflettori per il tracciamento via laser da Terra delle future ed imminenti costellazioni di GNSS (Global Navigation Satellite System): GPS-3 (USA) e GALILEO (EU).

La CSC (Fig. 1-3) è stata completata nel luglio 2006. La strumentazione (simulatore solare, simulatore infrarosso terrestre, lasers, camera digitale infrarossa) e le procedure principali sono state testate. Un prototipo dei LAGEOS è stato realizzato ed il suo comportamento termico nel clima spaziale è stato simulato con un software commerciale per lo studio termico di satelliti (inclusivo di modellatori FE-FD e di trattamento delle proprietà ottiche separate per Visibile, UV ed IR). Un prototipo di LARES su scala ridotta 1:2 è stato costruito ed è in via di simulazione.

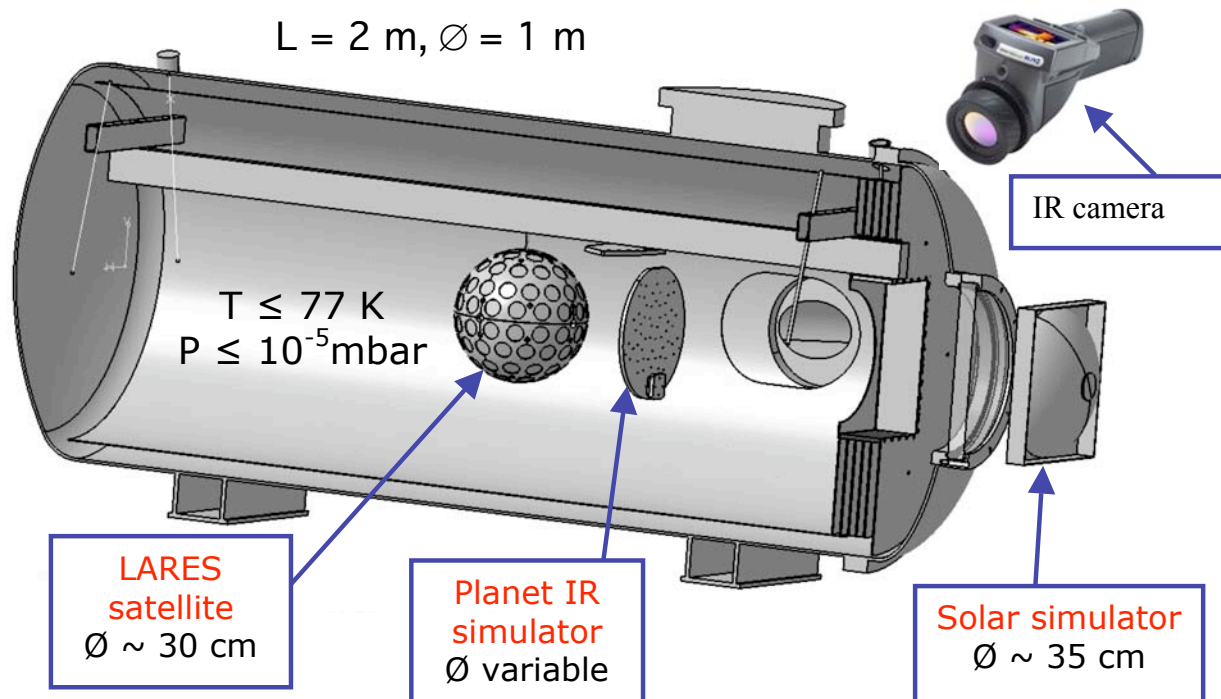


Figura 1: Layout della camera spaziale climatica dei LNF.

² LAGEOS = LAser GEOdynamics Satellite; LARES = LAser RELativity Satellite

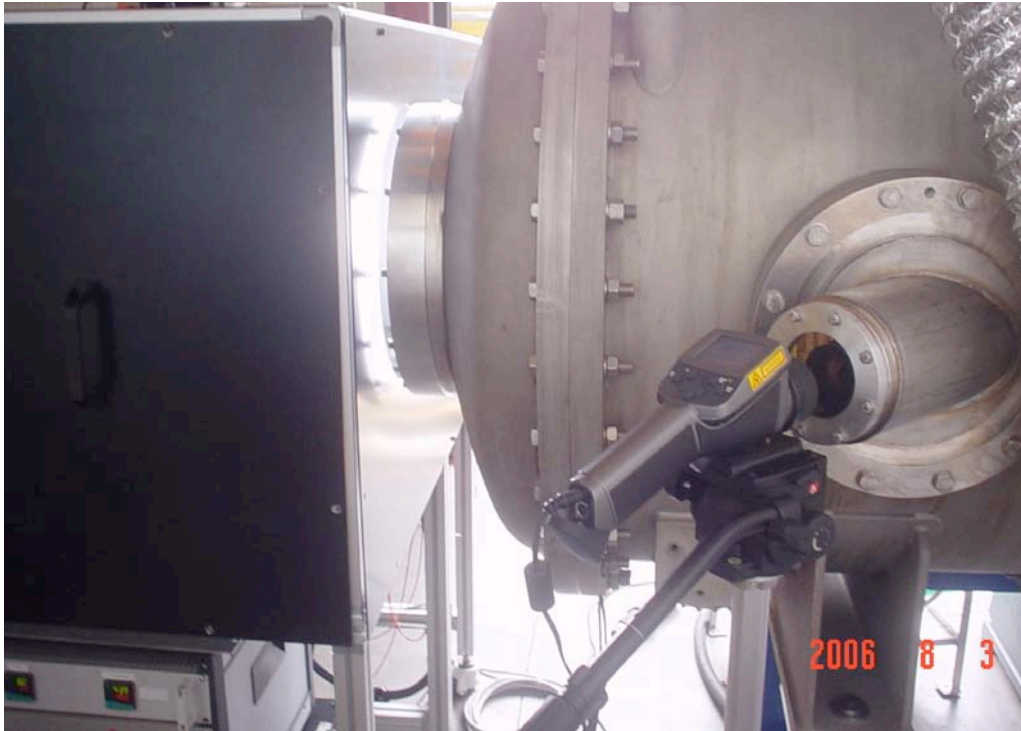


Figura 2: Camera spaziale climatica dei LNF: simulatore solare (sx), criostato (dx), camera digitale infrarossa davanti alla finestra di germanio per misurare i prototipi dei satelliti nel clima spaziale.

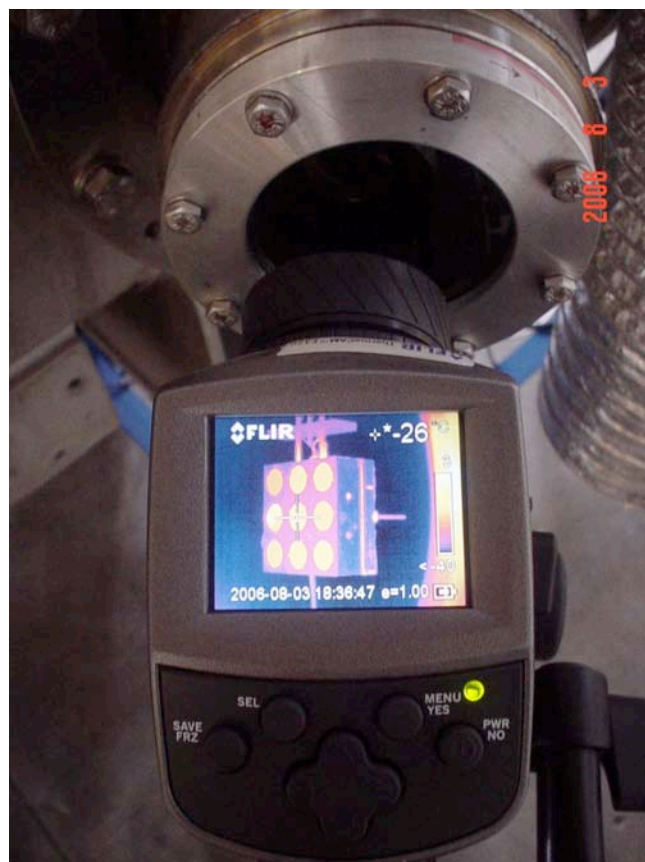


Figura 3: camera infrarossa mentre misura la temperatura del prototipo dei satelliti LAGEOS e LARES (matrice 3x3, vedi in seguito) nel clima spaziale ricreato all'interno della CSC.

Trasferimento Tecnologico della Ricerca su LAGEOS e LARES

I LAGEOS (Fig. 4 e 5) sono delle sfere metalliche di test, la cui superficie è equipaggiata con retro-riflettori al quarzo (CCR), in orbita a ~ 6000 Km di altitudine. Grazie ai CCR, essi fungono da *punti materiali* inseguiti da Terra via laser (Fig. 6) ad opera dell'Intern. Laser Ranging Service (ILRS). Essi sono utilizzati per l'osservazione del trascinamento dello spazio-tempo³ in Relatività Generale (effetto Lense-Thirring [1] [2]) e per misure molto raffinate di Geodesia Spaziale [3]. Tra quest'ultime, particolarmente interessante è lo studio del moto delle zolle continentali della crosta terrestre, specie quello a medio e lungo termine. Tuttavia, l'applicazione tecnologica forse più importante dei LAGEOS è il contributo fondamentale alla definizione del sistema intern. di riferimento e 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 e sono lo standard 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 correttezza ed affidabilità dello ITRF è enorme.

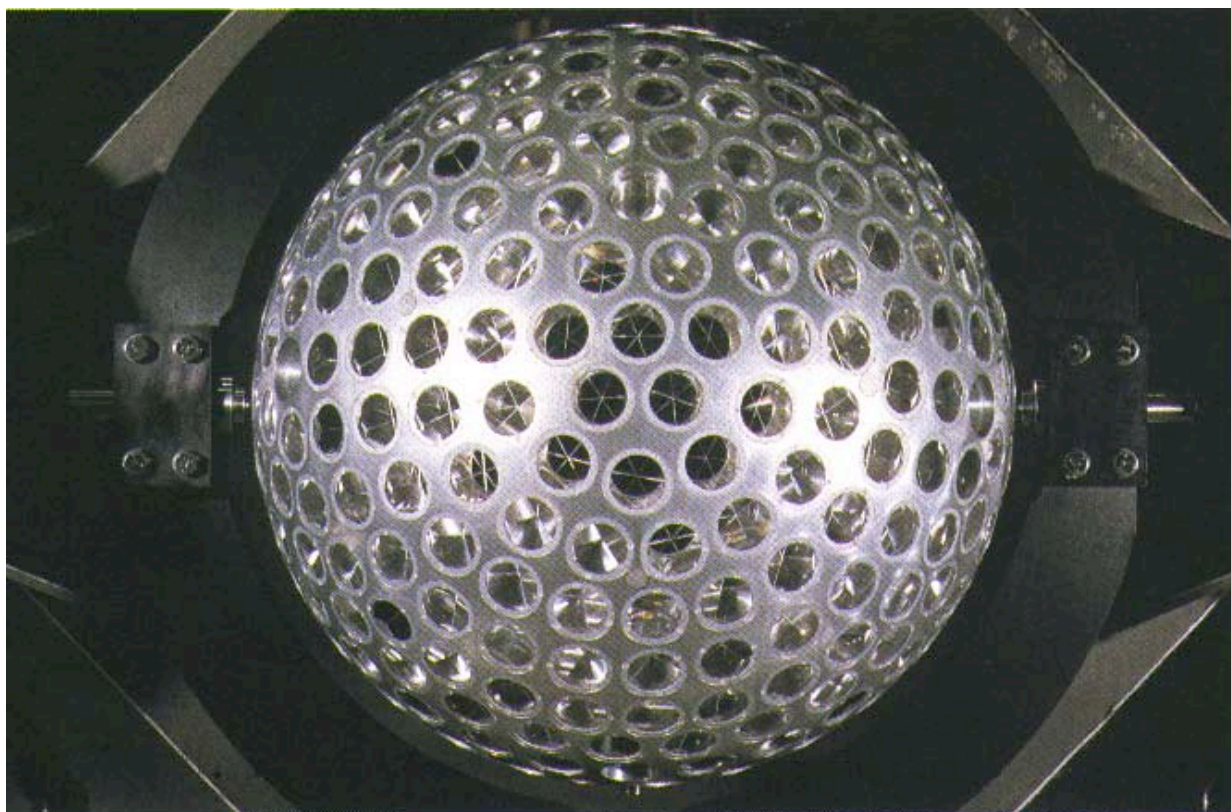


Figura 4: LAGEOS II, lanciato nel 1992 con il volo dello Space Shuttle STS-52 e con gli stadi intermedi italiani IRIS (Italian Research Interim Stage) e LAS (LAGEOS Apogee Stage). I LAGEOS hanno un diametro di 60 cm, peso ~ 400 Kg, e sono equipaggiati con 426 CCR.

³ La Terra, oltre a curvare lo spazio-tempo (a causa della presenza statica della sua grande massa), lo trascina attorno a se in virtù del suo momento angolare di rotazione. Questo è un effetto genuinamente rotatorio, non statico, che fu predetto nel 1918 da Einstein, Lense e Thirring. Einstein lo chiamava “frame dragging”, il trascinamento dei sistemi inerziali di riferimento.

Per produrre ITRF e ICRF lo IERS utilizza: le orbite dei LAGEOS, l'orbita della luna (grazie ai CCR portati dalle missioni umane Apollo 11, 14 e 15), le orbite dei satelliti GPS (onde radio), i dati VLBI (Very Long Baseline Interferometry con antenne radioastronomiche) ed il sistema DORIS (onde radio). Tuttavia, la determinazione del centro di massa della Terra (il *Geo-centro*) e della scala delle distanze (lo standard che definisce il diametro medio terrestre) sono largamente dominate dai LAGEOS, i satelliti artificiali la cui posizione è conosciuta con precisione migliore. La precisione con cui i LAGEOS forniscono il Geo-centro è di pochi mm. L'orientazione assoluta degli assi dello ITRF, invece, è dominata dai dati VLB. Tuttavia, le orbite dei LAGEOS sono comunque necessarie per misurare le variazioni fini della direzione dell'asse di rotazione della Terra legate a fenomeni meteorologici transitori su larga scala (come uno "tsunami"). I LAGEOS sono, quindi, indispensabili per la determinazione di ITRF e ICRF anche se il loro disegno sta diventando obsoleto.

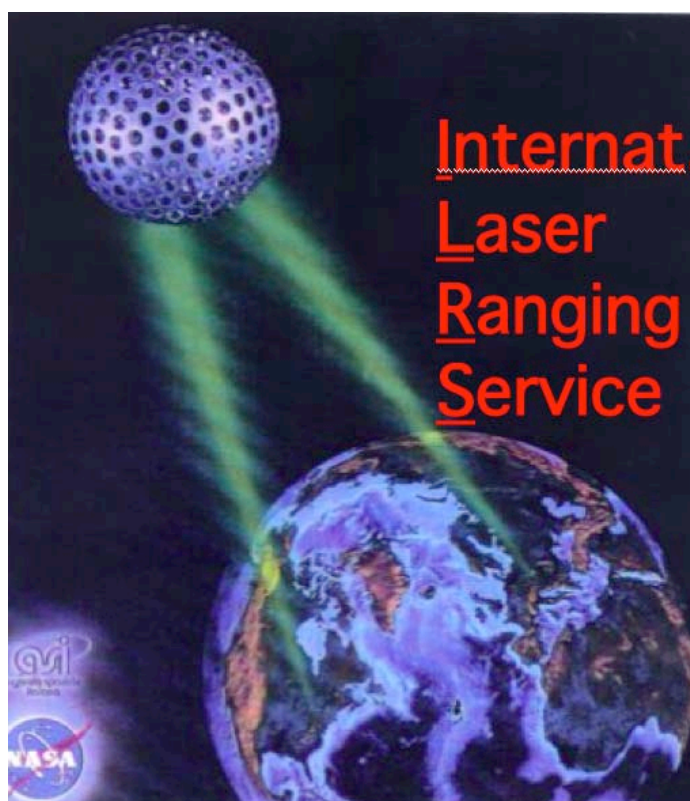


Figura 5: LAGEOS I, lanciato con il razzo vettore Delta 2 nel 1976.

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.
- 3) Monitoring della variazione del volume dei ghiacci ai poli.

Figura 6: vista grafica dell'inseguimento laser da parte di due stazioni ILRS del satellite LAGEOS II, realizzato dall'ASI e lanciato dalla NASA nel 1992 con il volo dello Space Shuttle STS-52



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. Inoltre, questo riscaldamento avviene in un tempo lento, significativo rispetto al loro periodo orbitale ed alla durata delle loro eclissi (rispetto a Sole) 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 introdotto per minimizzare le spinte termiche, purtroppo viene frenato dal campo magnetico. Per questo le misure di LAGEOS I, quasi fermo, sono più degradate di quelle di LAGEOS II, che conserva ancora una frazione dello spin iniziale (60 rpm). Per la prossima decade entrambi i satelliti si muoveranno di moto caotico intorno al loro centro di massa e l'effetto delle perturbazioni termiche sarà massimo. Il frenamento magnetico dello spin è un problema da risolvere con un ridisegno *ad-hoc* di LARES.



Figura 7: il prototipo dei satelliti LAGEOS costruito a Frascati, la *matrice 3x3*.

La prima parte della ricerca ai LNF consiste nella caratterizzazione climatica dei CCR comuni a LAGEOS (Fig. 7) ed a LARES: simulazione, misura nella CSC (Fig. 8) della radiazione termica assorbita/riemessa dai CCR e della costante tempo di riscaldamento.

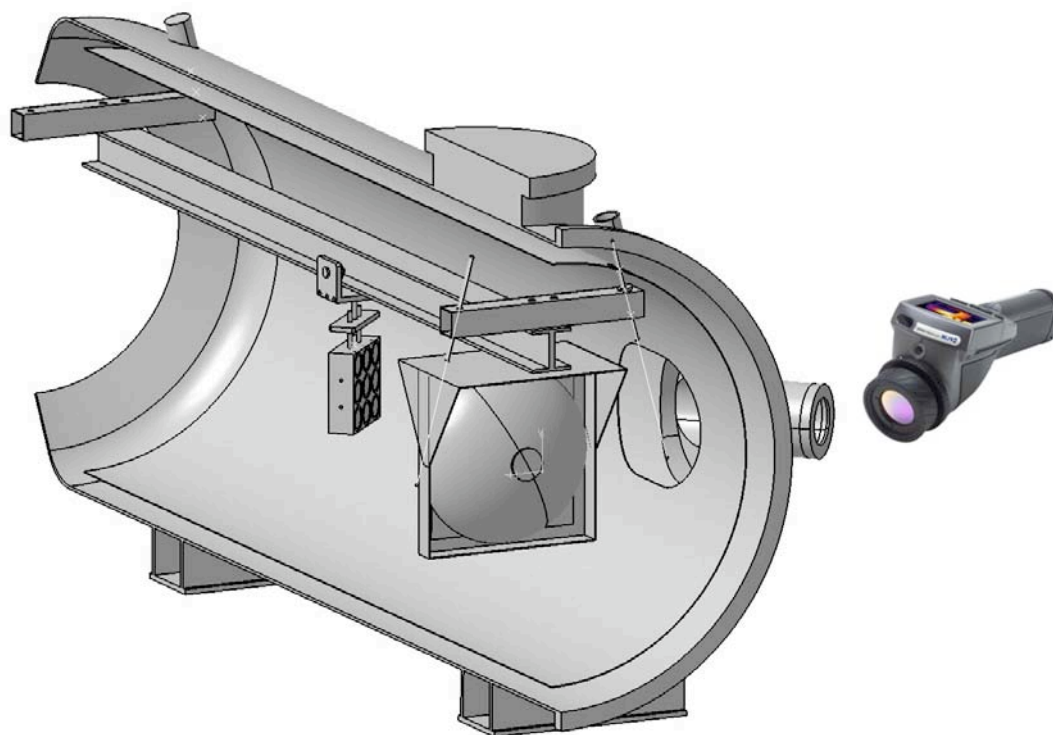


Figura 8: la *matrice 3x3* all'interno della camera spaziale climatica di fronte al simulatore solare.

La costante tempo di riscaldamento dei CCR (τ_{CCR}), mai misurata sperimentalmente, è calcolata in letteratura con un errore del 250%. Esso limita la misura del trascinarsi dello spazio-tempo in Relatività Generale (RG) al 2-3% di accuratezza e peggiora l'emissione dello standard ITRF. τ_{CCR} verrà misurata con la CSC con un errore < 10%, come indicato dalla simulazione nelle Fig. 9 e 10 [4]. La misura di τ_{CCR} , applicata al nuovo satellite LARES conterrà le perturbazioni climatiche entro i livelli voluti.

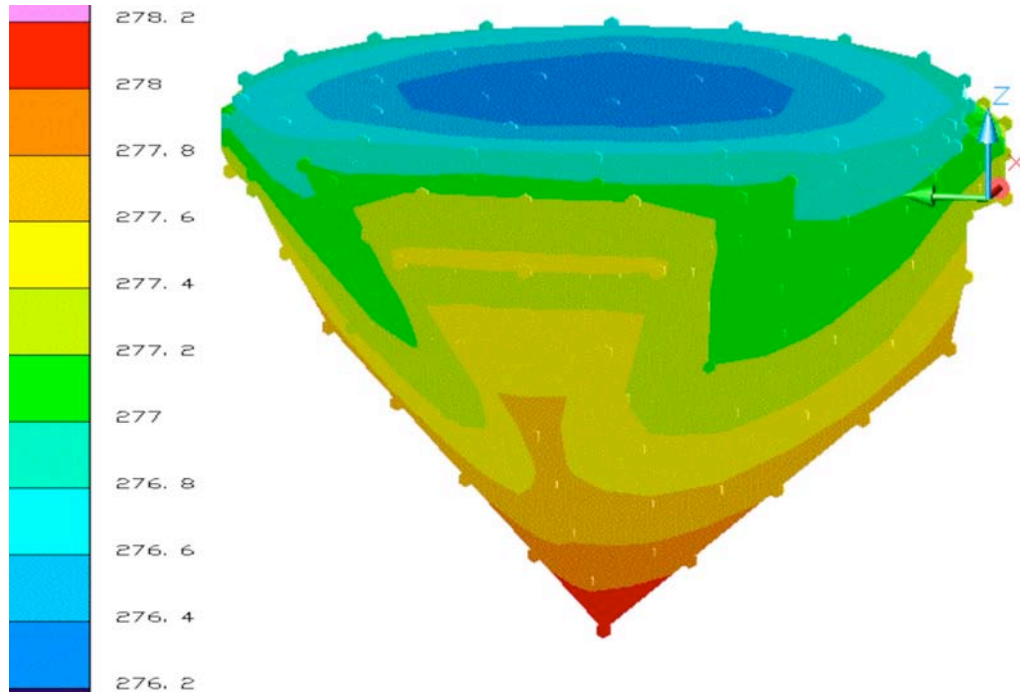


Figura 9: simulazione FEM e del profilo termico (in gradi K) dei CCR dei satelliti LAGEOS e LARES dopo 2800 sec dall'inizio dell'esposizione alla radiazione solare (lampada solare spenta a t=0).

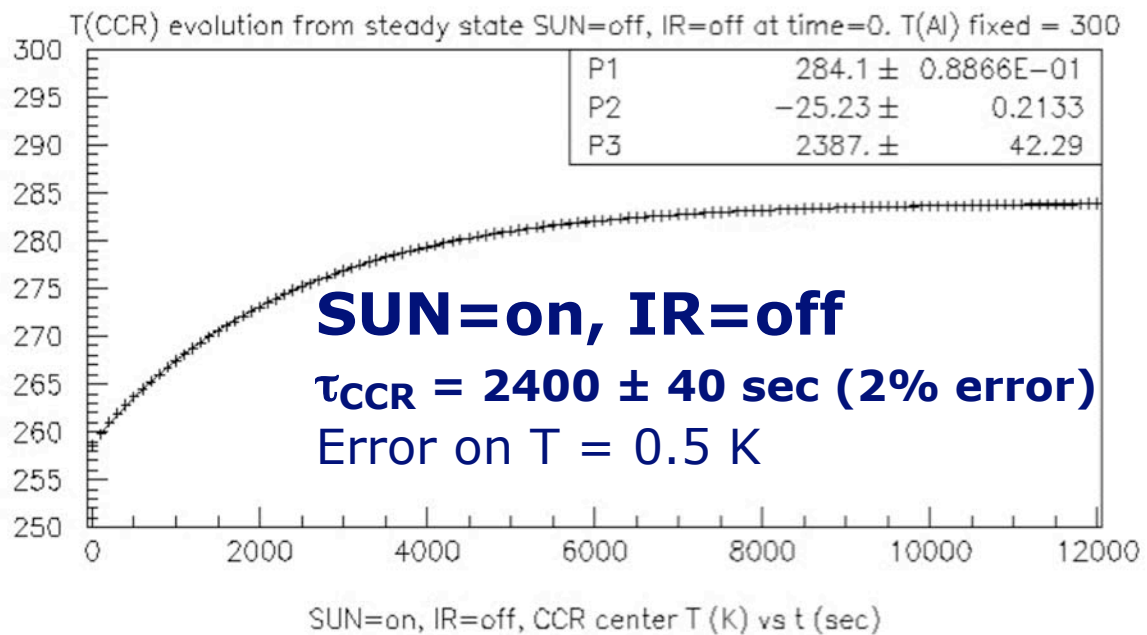


Figure 10: fit esponenziale della simulazione del riscaldamento al Sole dei CCR di LAGEOS e LARES.

Proposta di un Nuovo Disegno del Satellite LARES

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 ha lo scopo di risolvere in modo radicale il problema delle forze non-conservative. Questo lavoro consiste in simulazioni e nella costruzione di prototipi da misurare nella CSC.

Nel nuovo progetto sviluppato ai LNF (Fig. 11) i CCR sono alloggiati nei due semi-gusci esterni (Fig. 12) e si vedono per irraggiamento termico tra loro in modo più efficiente rispetto a quando erano chiusi in cavità singole nei LAGEOS. La sfera interna assorbe/riemette il calore da/verso i CCR. Secondo i risultati preliminari delle simulazioni questa geometria favorisce una buona uniformità della temperatura [5]



Figure 11: Il nuovo disegno meccanico di LARES, denominato *guscio sul nocciolo*.

Inoltre, poiché i CCR sono montati dall'interno, gli anelli di Al che in LAGEOS fissano i CCR alla sfera vengono spostati dall'esterno all'interno dei gusci. Questo rimuoverebbe da LARES $\sim 1/3$ delle perturbazioni termiche che affliggono i LAGEOS !

La geometria ed il materiale della sfera interna (probabile lega di tungsteno) sono critici per dare al satellite la massa richiesta, perché le perturbazioni non-gravitazionali sono proporzionali al rapporto tra l'area di LARES e la sua massa. La Fig. 13 mostra una particolare scelta della geometria interna per minimizzare i circuiti delle correnti indotte sollecitate dal campo magnetico terrestre per diminuire drasticamente il frenamento

dello spin. Il foro assiale nella sfera è un'opzione per creare un asse d'inertia lungo il quale orientare lo spin iniziale del satellite al momento della sua iniezione in orbita.

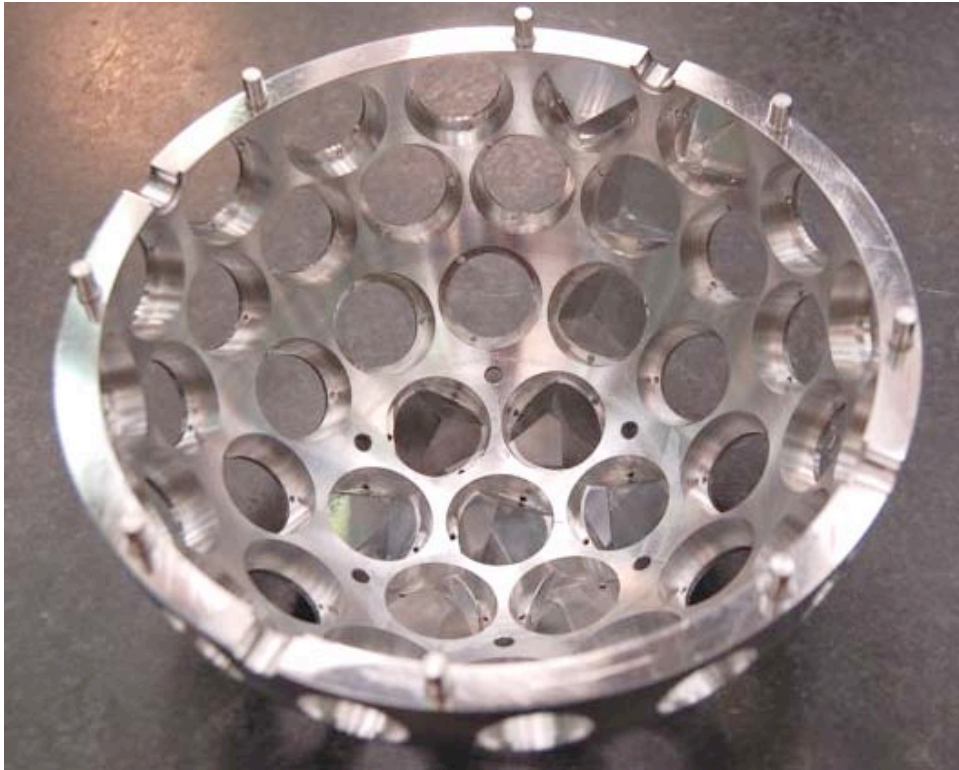


Figura 12: un prototipo dei due semi-gusci esterni d'alluminio dove sono alloggiati i CCR.

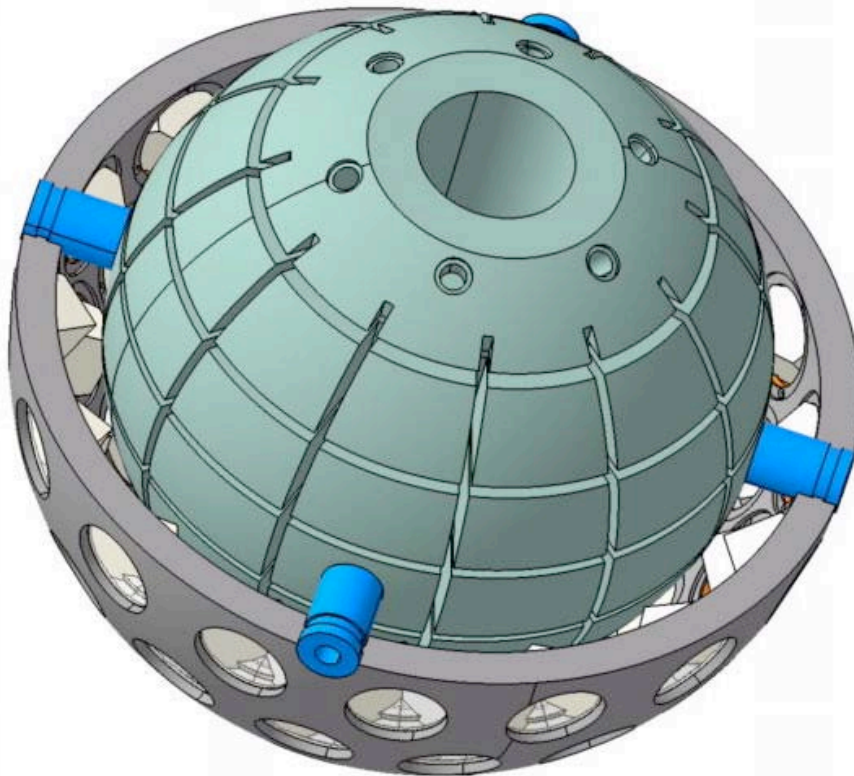


Figura 13: opzione di realizzazione della sfera interna.

Il modello di LARES in scala 1:2 costruito ai LNF è mostrato in Fig. 14.



Figura 14: Prototipo del nuovo disegno di LARES (scala 1:2, diametro 16 cm).

L'imprecisione dei LAGEOS rende vano il miglioramento della tecnica di inseguimento laser, passata da un'accuratezza di 30 cm degli anni '70 (quando LAGEOS fu lanciato) ai pochi mm attuali. La coppia dei LAGEOS sta rapidamente diventando insufficiente per i moderni obiettivi di fisica e di tecnologia *Dallo spazio per la Terra* [6].

Per la fisica fondamentale, il nuovo LARES permetterà di migliorare la misura del fenomeno di trascinamento dello spazio-tempo (come lo chiamava Einstein) 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 medi-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 1 milione di anni ! Lo stato del lavoro alla CSC è stato presentato al Workshop NASA del 2006 [7]. IERS ed ILRS sono servizi internazionali "non-profit", che scambiano conoscenze, dati e tecnologia con gli enti pubblici di ricerca, come l'INFN.

Un altro importante progetto di ricerca su LAGEOS e LARES è la misura della direzione e della velocità della loro rotazione. La tecnica sviluppata si basa sulle riflessioni solari sui CCR (vedi Fig. 15). È da notare che le spinte termiche su LAGEOS II e le piccole spinte residue in LARES sono dirette lungo questo asse, mentre sono mediate praticamente a zero nel piano ortogonale alla direzione dello spin. Poiché LAGEOS I non ruota più, esso soffre spinte termiche massime ed in tutte le direzioni.

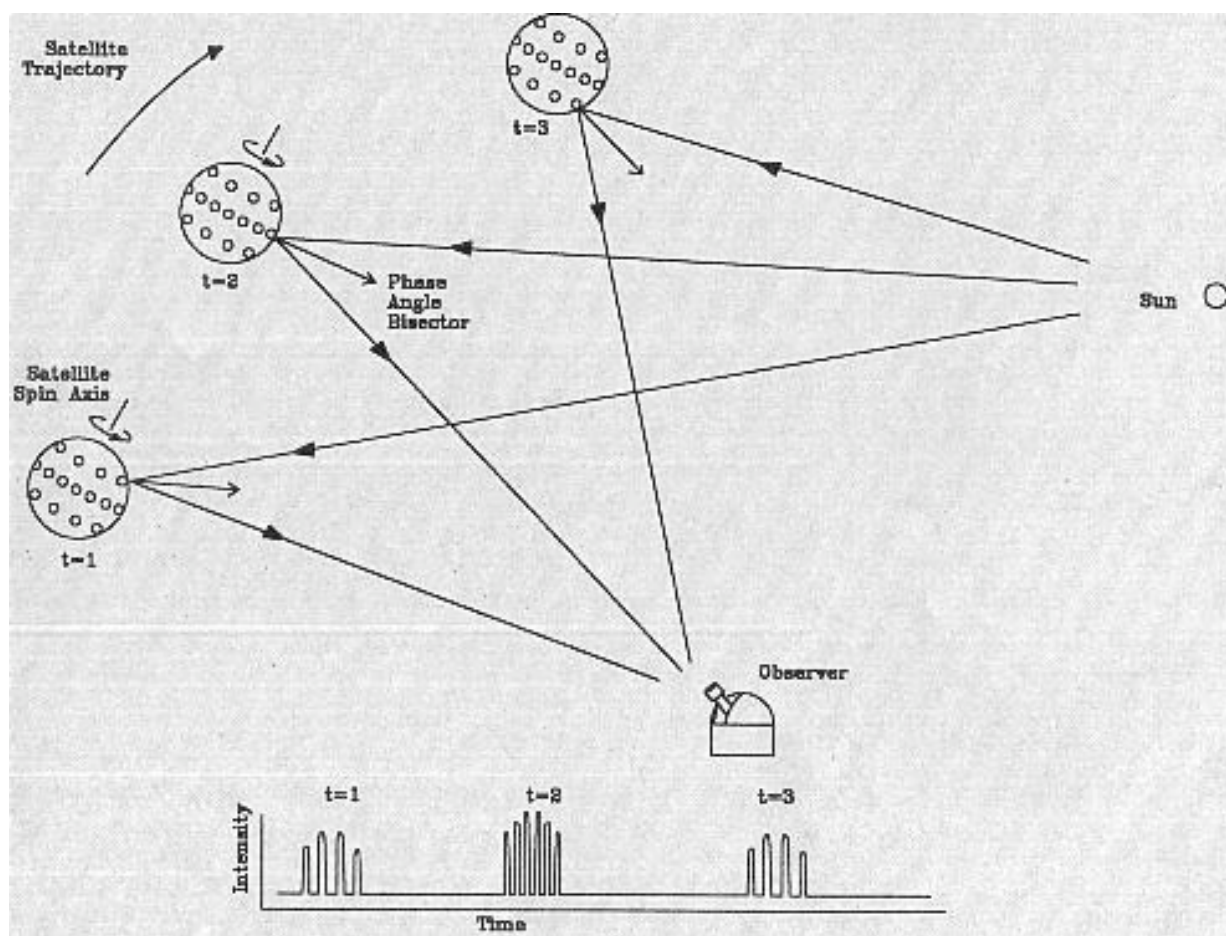


Figura 15: Prototipo del nuovo disegno di LARES (scala 1:2, diametro 16 cm).

I test sperimentali sui CCR di LAGEOS e LARES e lo studio di un satellite di seconda generazione recentemente ha coagulato attorno a se una Collaborazione internazionale di università, enti spaziali internazionali e laboratori, tra cui i LNF. È da ricordare che, mentre l'osservazione diretta delle onde gravitazionali è il test più importante della RG, fino ad oggi il trascinarsi dello spazio-tempo è l'unico effetto dinamico misurato (esso è, infatti, proporzionale al momento angolare della Terra) della teoria di Einstein.

Ricerca e Sviluppo per il GNSS

Le attuali costellazioni per la navigazione satellitare [8] sono il GPS (Global Positioning System, USA) e GLONASS (Russia). GALILEO, la imminente costellazione della Comunità Europea, avrà 100 CCR sul Nadir di ognuno dei suoi 30 satelliti. Com'è noto, il tracciamento dei satelliti ed il posizionamento dei ricevitori a Terra avviene tramite onde radio. Le orbite ricostruite dei satelliti GPS sono intrinsecamente meno precise di quelle determinate via laser (~20 cm invece di pochi millimetri). Inoltre, il sistema GNSS deve essere ricalibrato periodicamente e, pertanto, non ha l'affidabilità e la precisione *assoluta* su *tempi lunghi* del sistema di tracciamento. Di contro, satelliti e stazioni terrestri GNSS sono più numerosi ed il GNSS non è affetto dalle condizioni atmosferiche (i laser non sono operativi col maltempo). In sintesi, GNSS ed SLR danno contributi diversi e complementari e se le future costellazioni GNSS saranno equipaggiate con CCR, SLR migliorerà significativamente la stabilità e la precisione assoluta della navigazione satellitare.

Dei 27 satelliti del GPS-2 attuale, solo due hanno i CCR tradizionali al quarzo, simili a quelli dei LAGEOS. A Terra esiste solo un "array" di questi CCR, di proprietà dell'University of Maryland at College Park (UMCP), destinato ad equipaggiare uno dei prossimi satelliti GPS-2 (vedi Fig. 16). Esso verrà inviato ai LNF per la caratterizzazione termo-ottica con la CSC. Questo studio è necessario perché il funzionamento dei due array in orbita non è ottimale e non ha l'affidabilità che è richiesta per un impiego "mission critical" su larga scala.

Sulla spinta della scelta di GALILEO, la comunità scientifica internazionale (tra cui NASA-GSFC, ILRS ed LNF) propone di equipaggiare con CCR *tutto* il GPS-3. Per motivi di spazio, altitudine (~20,000 Km per GPS e ~29,000 Km per GALILEO), peso (e quindi costo) e competizione si stanno studiando per il GPS-3 dei CCR di nuova concezione, metallici e *cavi*. Essi sono più piccoli e leggeri di quelli tradizionali, *pieni* al quarzo. Questo è uno studio integrato del comportamento termico, meccanico ed ottico dei retro-riflettori candidati (di cui una parte importante verrà effettuata alla CSC), che dovrà dimostrare per la prima volta la loro stabilità e funzionalità su tempi lunghi, alle grandi distanze tipiche del GNSS e nell'estremo clima spaziale. Inoltre, il gruppo LNF proporrà al Consorzio GALILEO di utilizzare la CSC dei LNF per la caratterizzazione dei CCR della costellazione, siano essi pieni al quarzo o metallici cavi.



Figura 16: array di CCR della Univ. of Maryland at College Park da caratterizzare alla CSC. Questo è il terzo array costruito ed il prossimo al lancio con un satellite della costellazione GPS-2 attuale.

Conclusioni

La Camera Spaziale Climatica dei LNF è un apparato sperimentale sviluppato inizialmente per la missione LARES, che per la sua versatilità e completezza si presta (ed è aperta) ad altre applicazioni di fisica e tecnologia dello spazio. Esempio principe di trasferimento tecnologico è il miglioramento dell'International Terrestrial Reference Frame, uno standard emesso dall'International Earth rotation and Reference systems Service (IERS).

Inoltre, la CSC sarà estremamente utile all'integrazione tra Global Navigation Satellite System e Satellite Laser Ranging, che avrà compimento sulle future costellazioni GALILEO (Europa, ≥ 2008) e GPS-3 (USA, ≥ 2011). SLR fornisce in modo predominante il sistema di riferimento assoluto ed il GNSS permette la navigazione in tempo reale rispetto ad esso: il meglio delle due tecnologie, *dallo spazio per la Terra*.

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 ed alla R&D per il GNSS.

Importante è stato anche l'aiuto del Dr. M. Ricci, membro LNF della Commissione Scientifica Nazionale II dell'INFN ("Astroparticle Physics") e l'aiuto del Dr. G. Giordano, che ci ha dato accesso al suo laboratorio di ottica ed ai suoi numerosi accessori.

Si ringraziano, inoltre, vivamente G. Bisogni, R. Ceccarelli, G. Ceccarelli, A. Ceccarelli, A. De Paolis, E. Iacussa, N. Intaglietta, V. Lollo, U. Martini, A. Olivieri per il professionale supporto tecnico dato alla progettazione e realizzazione della CSC e dei prototipi.

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 Ottobre, 2004.
- [3] Workshop ILRS a Eastbourne (UK), Ottobre 2005 "Towards a 1-mm accuracy": <http://nercslr.nmt.ac.uk/workshop2005/program.html>
- [4] Tesi di Laurea di I Livello in Ingegneria Modelli e Sistemi, A. Bosco, Università di Roma Tor Vergata, Ottobre 2005 (non pubblicata).
- [5] G. O. Delle Monache, <http://www.lnf.infn.it/acceleratori/lares/Laresnotes/LARES-2.pdf>.
- [6] "Dallo Spazio per la Terra. Tutte le Applicazioni Utili all'Uomo", G. Caprara, S. Cheli, Editore De Agostini (2003).
- [7] Presented by S. Dell'Agnello, Workshop NASA a Washington DC (USA), Maggio 2006: *From Quantum to Cosmos: Fundamental Physics Research in Space*, <http://physics.jpl.nasa.gov/quantum-to-cosmos/>. To be published in International Journal of Modern Physics D. See also LNF Preprint LNF-06-24(P).
- [8] Vedi, per esempio, la conferenza GPS a Londra (UK), 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.