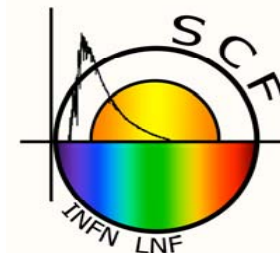


# Probing Gravity in Near Earth Orbits with LAGEOS and LARES



## Caterina Lops (INFN-LNF) for the LARES Collaboration

I.Ciufolini (PI), *Università di Lecce and INFN-Lecce*

A. Boni, C. Cantone, S. Dell'Agnello, G. Delle Monache, M. Franceschi, M. Garattini, N. Intaglietta, C. Lops, M.Martini, M.Maiello, C.Proserpi

*Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN, Frascati, ITALY*

G. Bellettini, R.Tauraso, *University of Rome Tor Vergata, ITALY*

S. Berardi, C. Cerruti, F. Graziani, P. Ialongo, A. Lucantoni, A.Paolozzi, I. Peroni, C. Paris, G. Sindoni, C. Vendittozzi

*University of Rome Sapienza, ITALY*

R. March, *CNR-IAC, Rome, ITALY*

D. G. Currie, *University of Maryland at College Park, MD, USA*

D. Arnold, *NASA-GSFC, Greenbelt, MD, USA*

E.C.Pavlis, *University of Maryland in Baltimore County, USA*

R. Matzner, *University of Texas at Austin, Austin, TX, USA*

D. P. Rubincam, *NASA-GSFC, Greenbelt, MD, USA*

V. J. Slabinski, *US Naval Observatory, Washington DC, USA*

*LNF Spring School, May 2008*

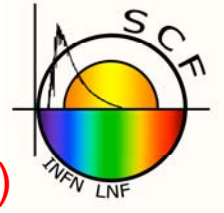
# Outline

---



- Science with Satellite Laser Ranging (SLR)
- LAGEOS physics
- The **LARES**, the **LAser RELativity Satellite**
  - space mission approved by ASI/ESA and experiment approved by INFN
- The LNF SLR Characterization Facility (SCF)
- Testing new physics
- Outlook

# LAGEOS: the LASer GEOdynamics Satellites



LAGEOS I (1976; NASA)

LAGEOS II (1992; NASA - ASI)



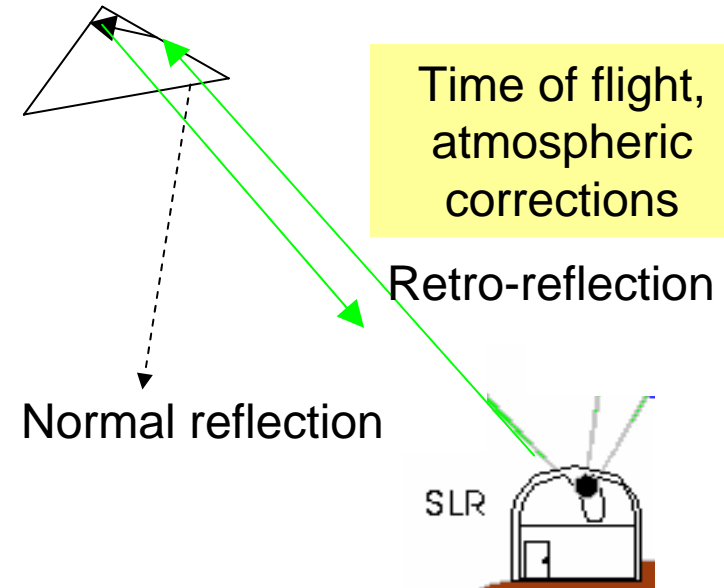
**Laser Geodynamic Satellite Experiment (LAGEOS)**  
LAGEOS satellites reflect laser beams transmitted from ground stations back to sensors on Earth.

$\varnothing = 60$  cm

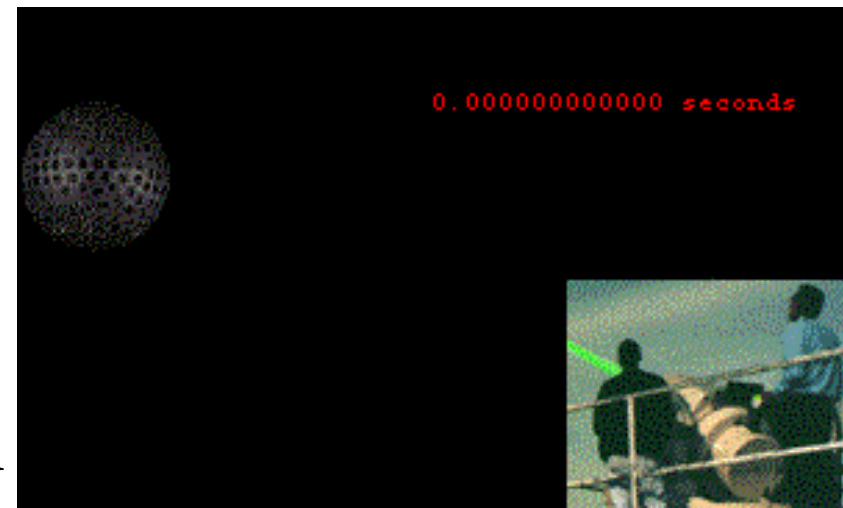
M=400 Kg

N=426 CCRs

Cube corner retro-reflectors (CCRs)



S  
L  
R



# The SLR Constellation in NEOs

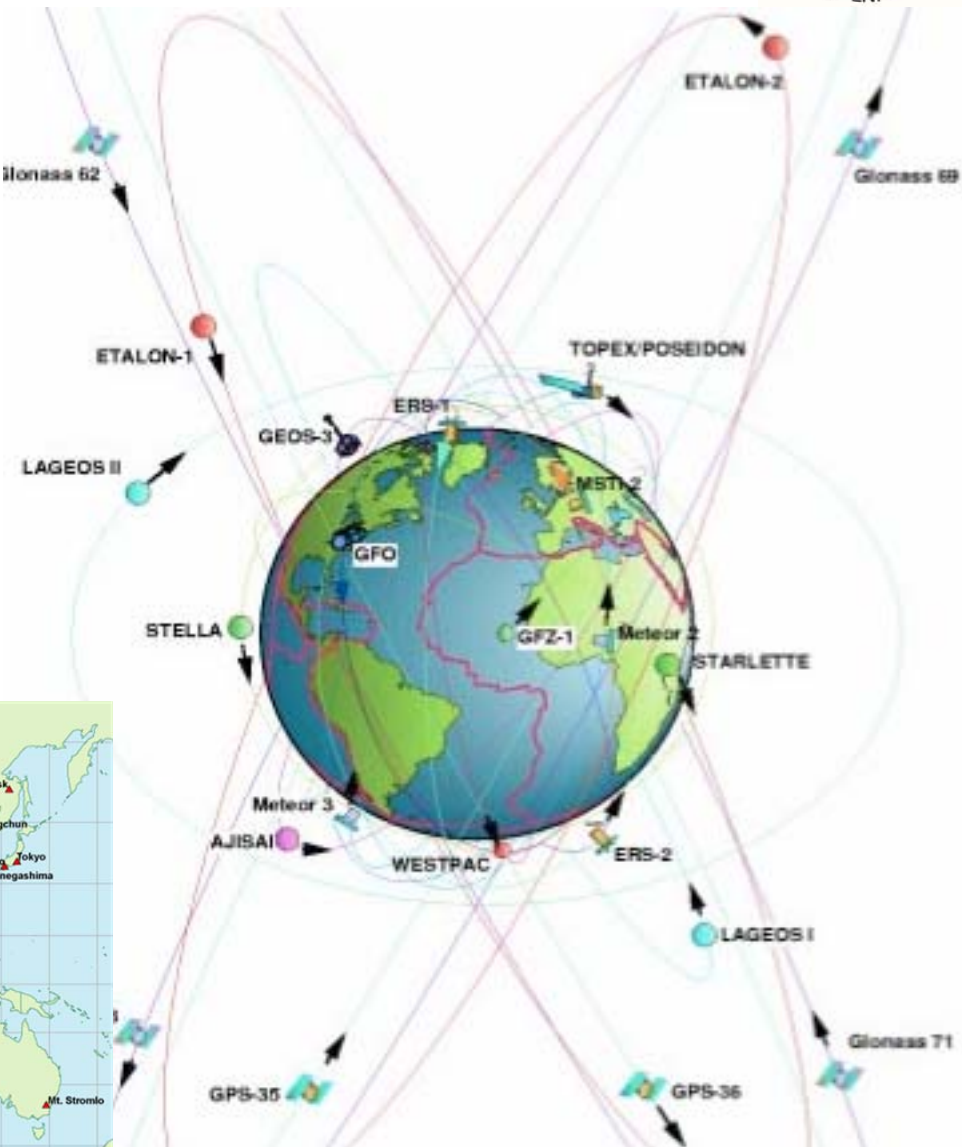


Altitudes from few hundred km (LEOs) to ~20K Km (GNSS), 35K Km (GEO)

Two very important observables

- **Geocenter** of **ITRF**
- **Scale of length** of **ITRF**

are defined uniquely by LAGEOS I & II



# High-accuracy General Relativity (GR) tests

---



- Of course direct observation of Gravitational Waves is “the” most important dynamical test of GR
- **Main theoretical goal: quantum theory of Gravity and Unification of the 4 interactions.** GR is a classic theory
- **Main experimental goal: where does GR fail ?**
  - Frame dragging (LAGEOS, GP-B, LAGEOS+LARES)
  - At what accuracy ? For example, for **frame-dragging**:
    - **LAGEOS: 10%**
    - **GP-B: 300% (April 14, 2007), now 30%, final results in June 08**
    - **LARES: new mission, aims to 1%. Is 1% enough ?**
  - Other tests:
    - Space-time curvature (Cassini, PPN  $\gamma$ )
    - Geodetic/De Sitter precession (Lunar Laser Ranging, PPN  $\beta$ )
    - Redshift/clock dilation (GP-A, VIKINGS/Shapiro time delay)
- **New theories:** see slide # 13



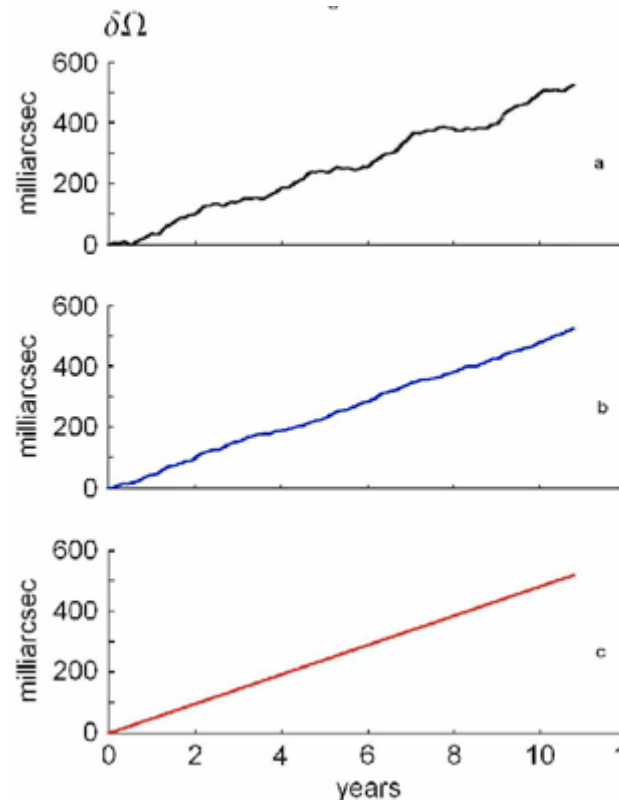
# Measurement of “frame-dragging” w/LAGEOS

Earth angular momentum drags space-time around it. The **node** of LAGEOS satellites (a ~ 12300 Km) is dragged by ~ 2 m/yr

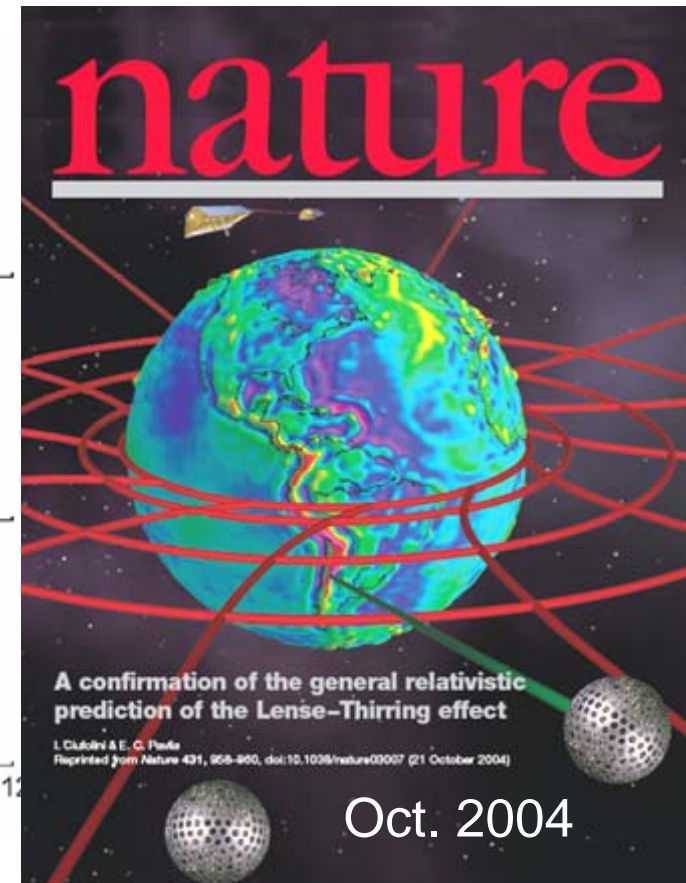
**$\mu = 99\%$  GR**  
**10% error**

$$\dot{\Omega}^{L-T} = \frac{2GJ}{c^2 a^3 (1-e^2)^{3/2}}$$

- Raw observed node residuals combined
- Raw residuals with six periodic signals removed, estimated rate is 47.9 mas/yr
- GR-predicted residuals, rate: 48.2 mas/yr



EIGEN-GRACE02S 2004 data by GFZ  
1993-2003 LAGEOS I and LAGEOS II data



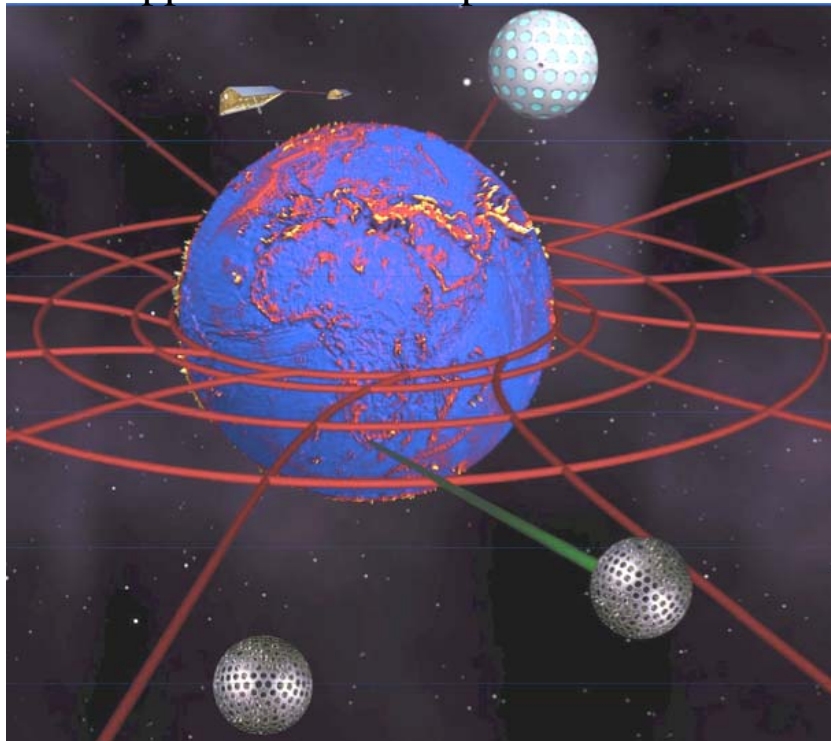
I. Ciufolini, E. C. Pavlis

# LAGEOS+LARES vs Gravity Probe B



-LAGEOS I, LAGEOS II and LARES:  
dragging of angular momentum wrt ILRS  
stations. Passive satellites.

LARES is an approved ASI mission and will  
be launched with the ESA rocket VEGA and  
is an approved INFN experiment

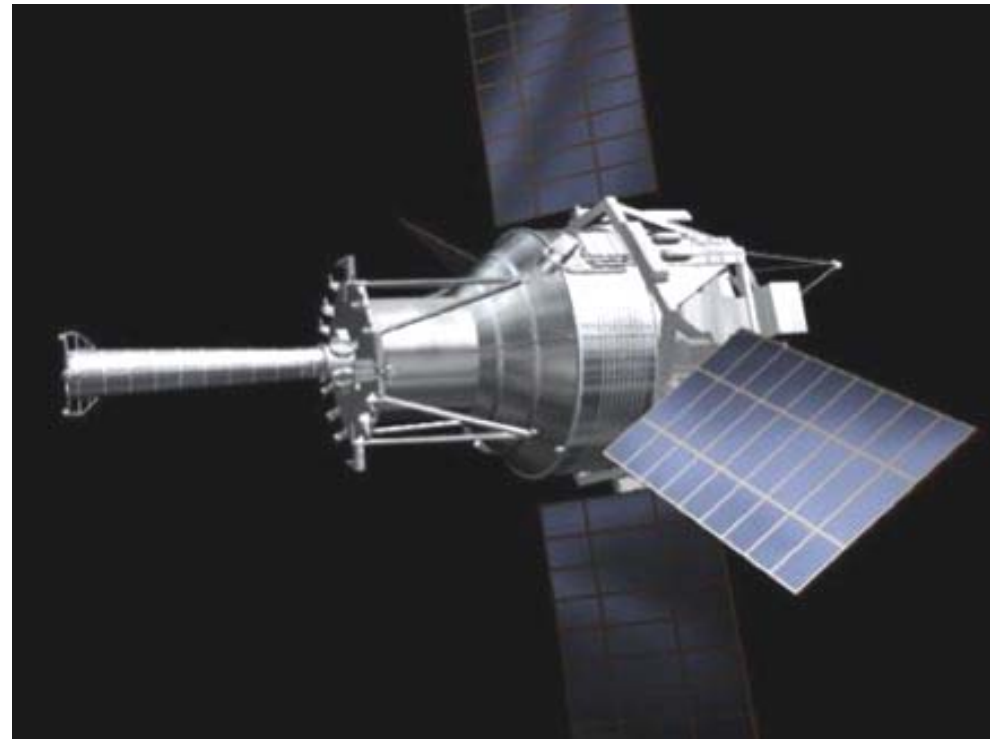


Cost: few M€

Gravity Probe B

(NASA mission ended in 2006):

dragging of drag-free gyroscope inside very  
high-tech spacecraft wrt distant guide star IM  
Pegasi



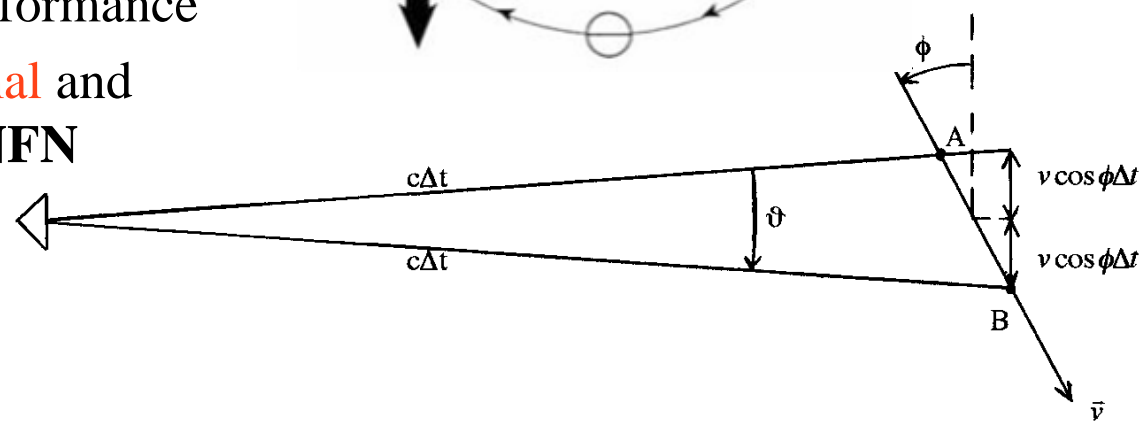
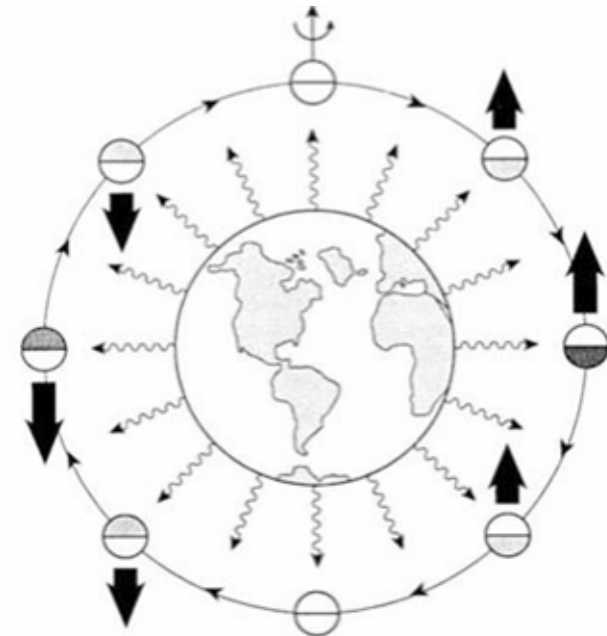
Official cost: 760 M\$

# Critical experimental issues



- **Non Gravitational Perturbations (NGP): asymmetric thermal thrusts** due to Solar constant and Earth IR
  - 2-3% of error on frame dragging
- **Velocity aberration.** Relative station-satellite velocity requires non-zero expensive CCR dihedral angle offsets w/**0.5 arcsec accuracy**
- Design to control **thermal perturbations** on optical performance
- Characterize “as-built” **thermal** and **optical** performance at the **INFN dedicated facility**

## Rubincam/Yarkovsky effect



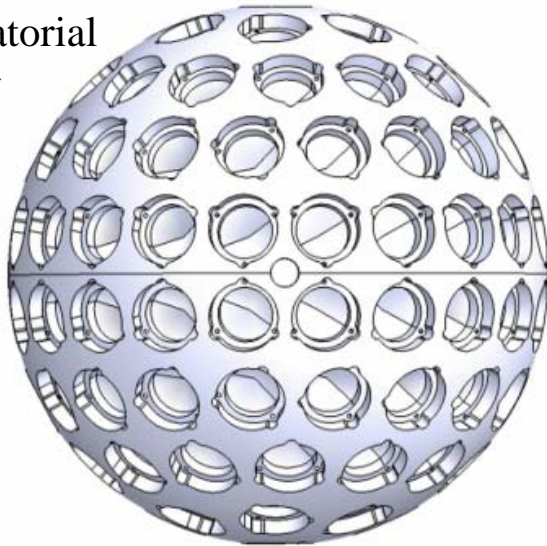
For LARES:  $\theta \sim 2 v/c \cos\phi \sim 40 \text{ mrad} \Rightarrow \sim 50 \text{ m}$



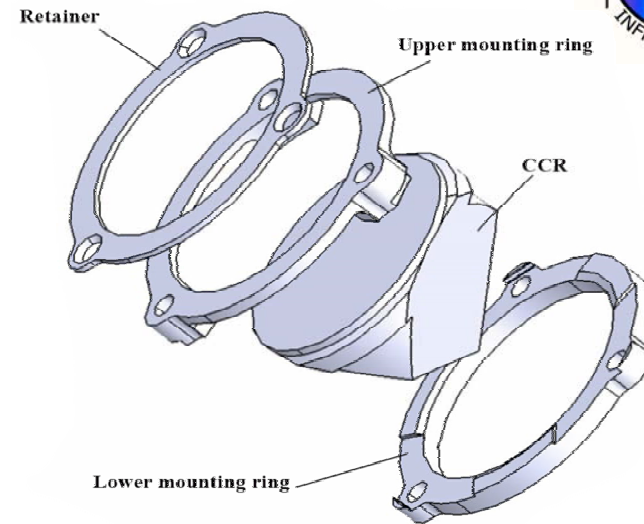
# LARES design



Equatorial view



Single piece of W-alloy  
 $\varnothing \sim 39$  cm  
 92 CCRs

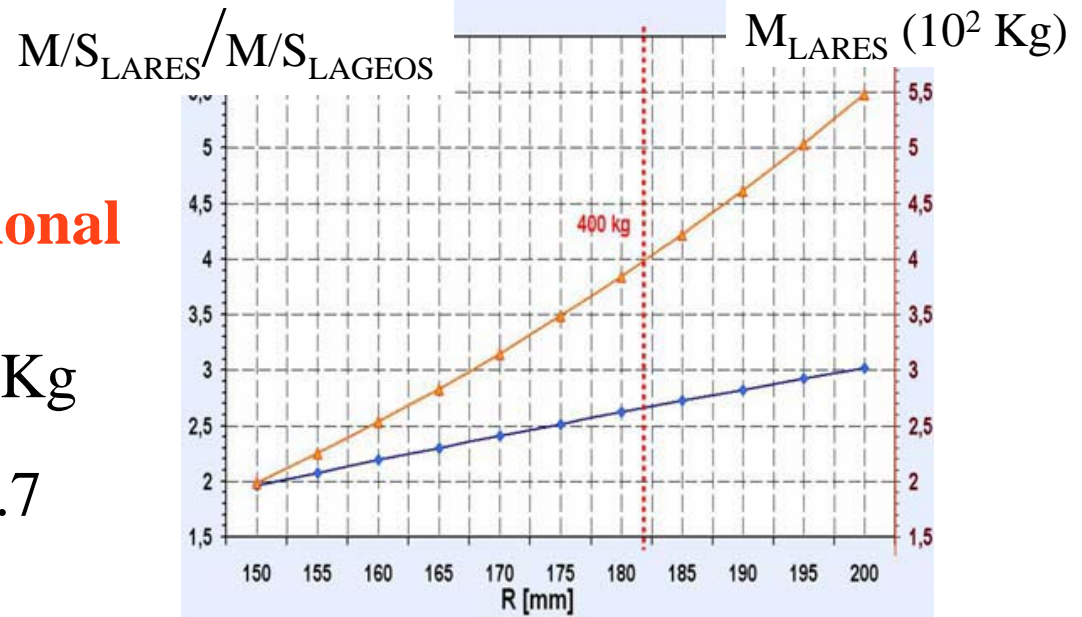


Work by Scuola Ingegneria  
 Aerospaziale, Rome "Sapienza"

**Thermal NGPs proportional to satellite Area/Mass**

$$M_{\text{LARES}} \sim M_{\text{LAGEOS}} \sim 400 \text{ Kg}$$

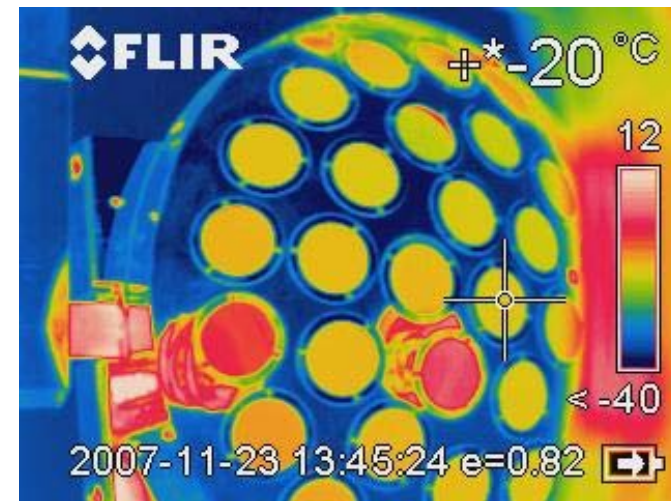
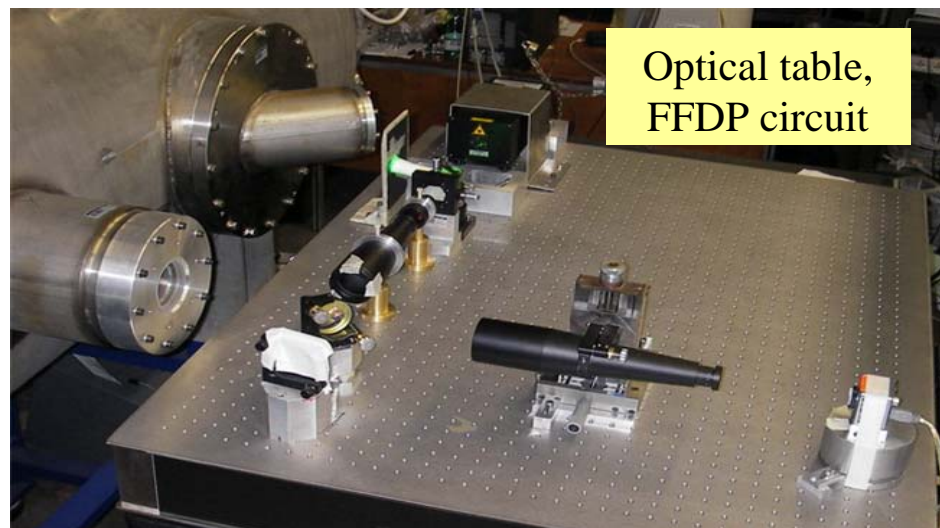
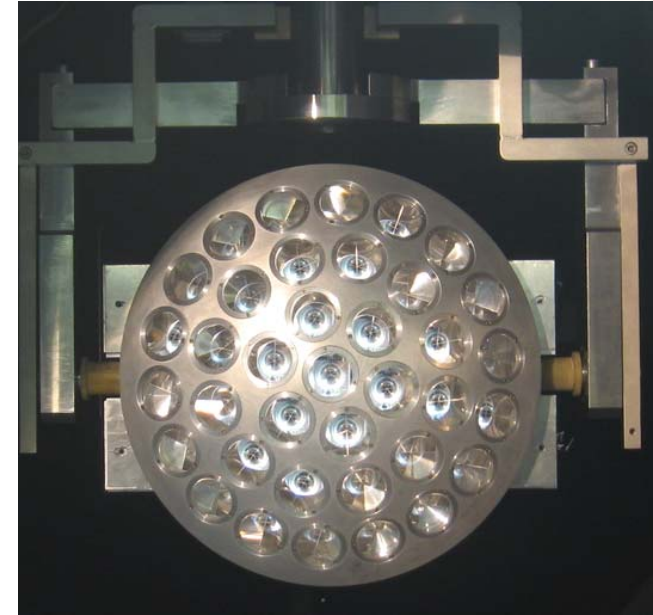
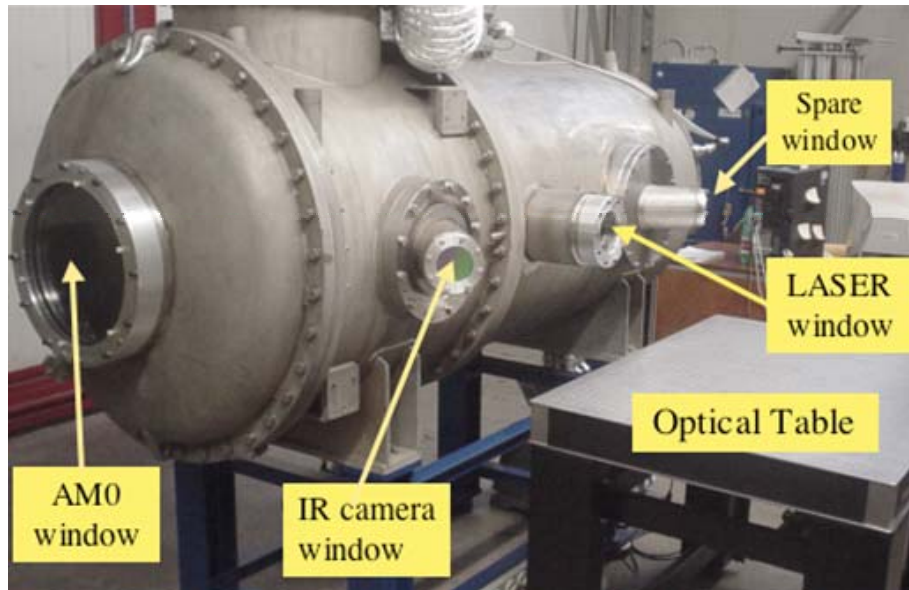
$$M/S_{\text{LARES}}/M/S_{\text{LAGEOS}} \sim 2.7$$



# The INFN-LNF SLR Characterization Facility (SCF)

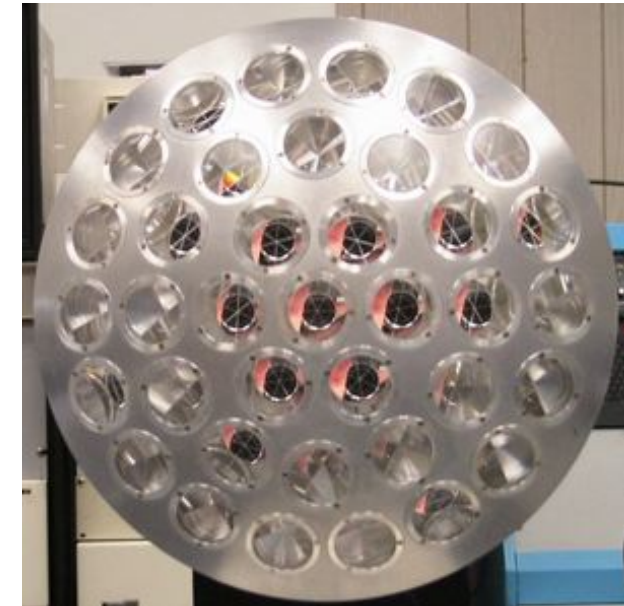
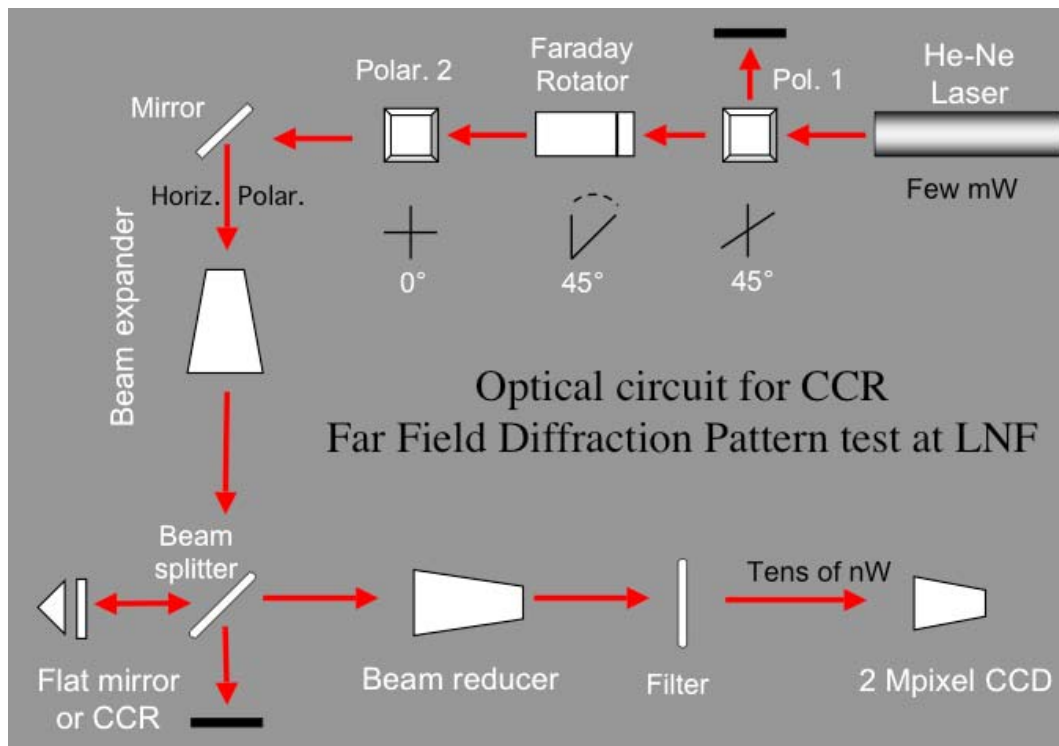


Thermal and laser tests **never performed before in space conditions**





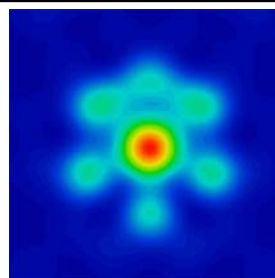
# Measured & simulated optical Far Field Diffraction Pattern (FFDP)



Simulated with CodeV

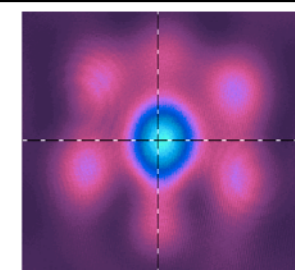
Measured @ LNF

NASA-GSFC proto  
has dihedral angle  
offset =  $0.0 \pm 0.5$  arcsec

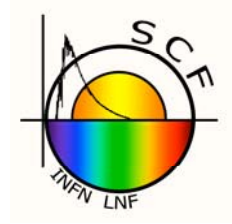


Good agreement

Scale is  $\pm 50 \mu\text{rad}$



# Thermal SCF-Test and simulation (tough job)



T from IR camera

$\tau_{CCR}$  drives NGPs

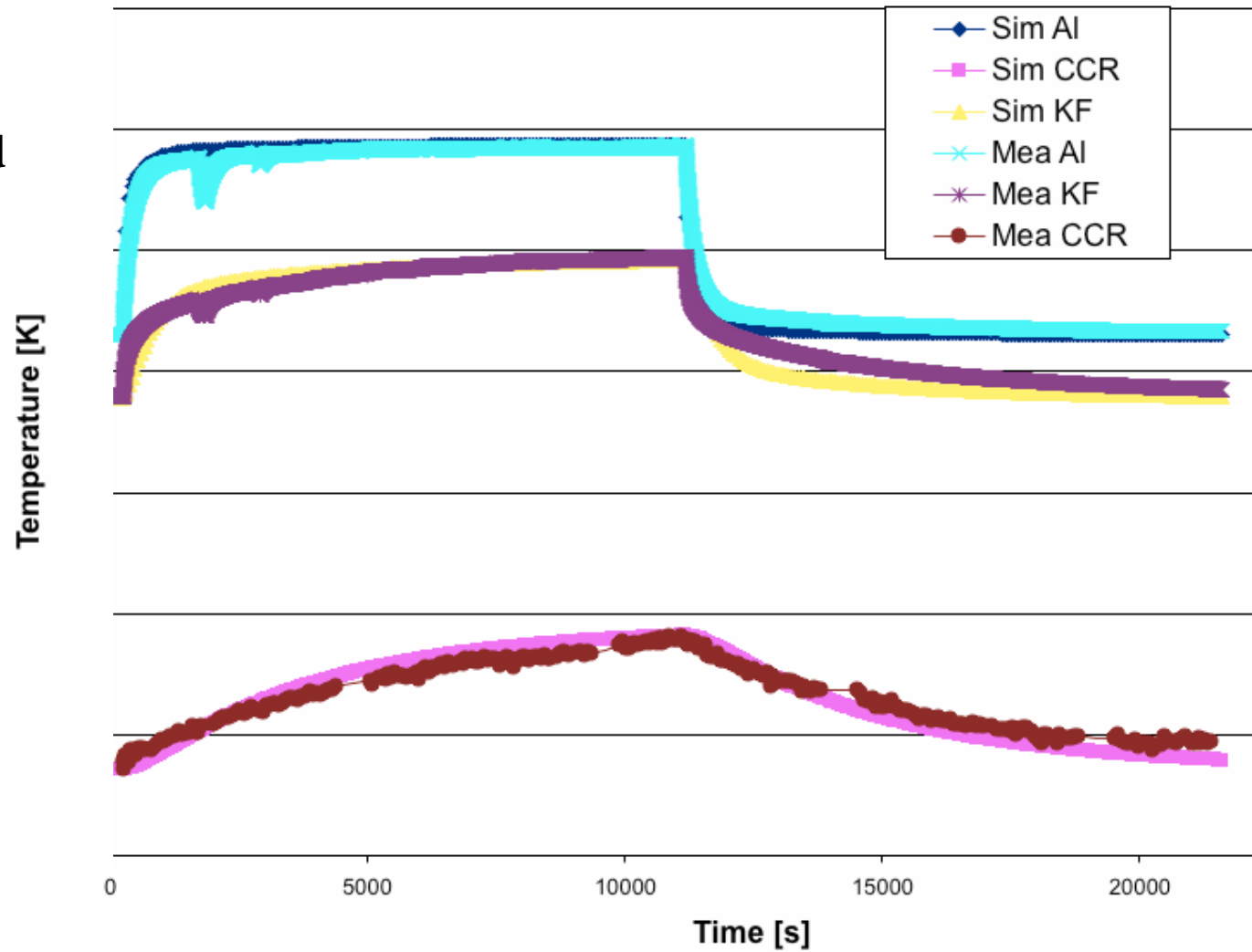
$\tau_{CCR}$  **never measured**

$\tau_{CCR}$  predictions have 300% “error”

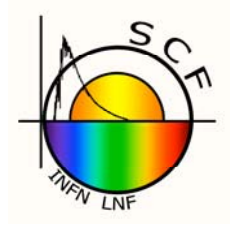
**Our measurement:**

$\sigma(\tau_{CCR}) / \tau_{CCR} \sim 10\%$ ,  
which makes thermal NGPs negligible for LAGEOS & LARES

SCF work led by  
G. O. Delle Monache



# Limits on non-newtonian gravity using the perigee



Current limits on additional Yukawa potential:

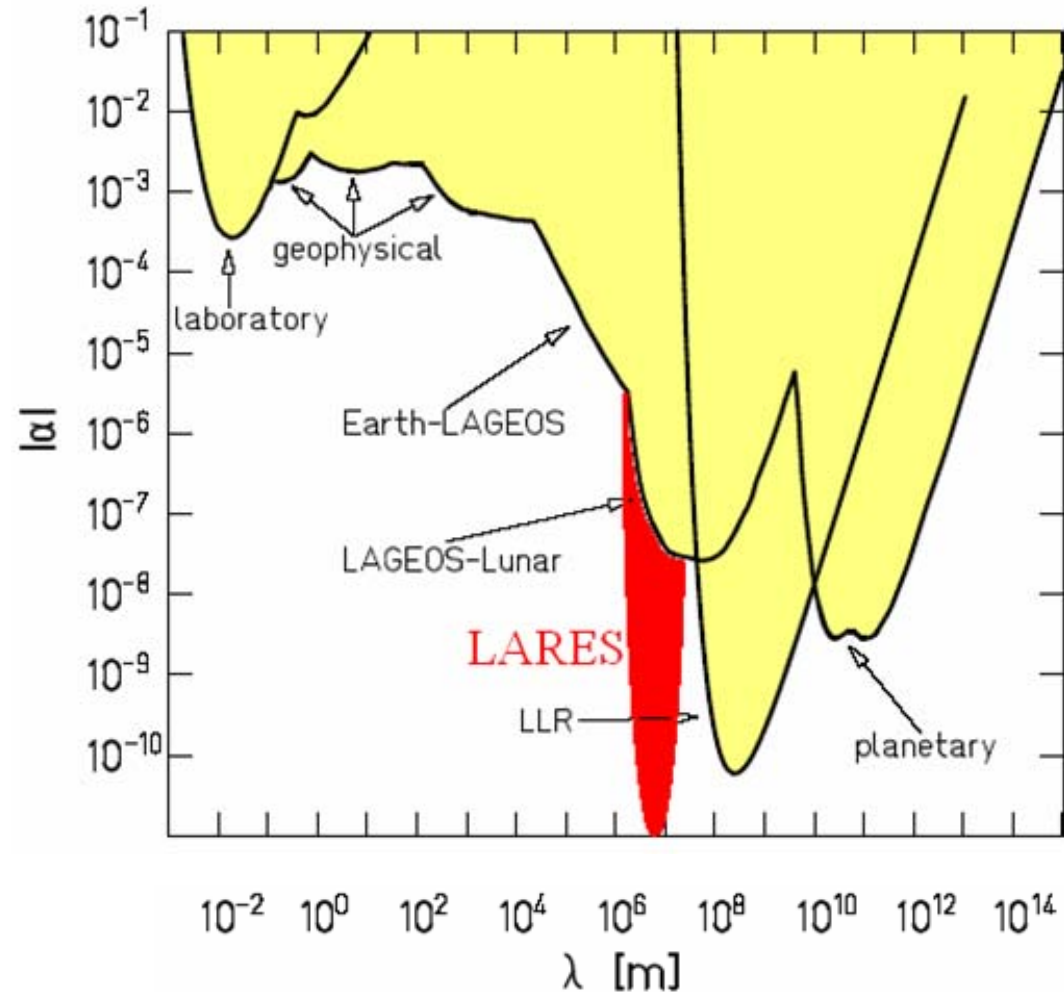
$$\alpha \times (\text{Newt-gravity}) \times e^{-r/\lambda}$$

Expected limit on  $\alpha$  set by the LARES mission at an orbit radius of about 8000 Km.

For a clean perigee measurement

- 1) accurate measurement of thermal perturbations
- 2) high value of Mass/Area

LARES limit by I. Ciufolini



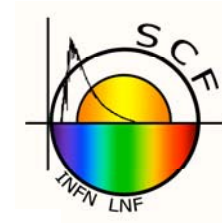


# Conclusions

---



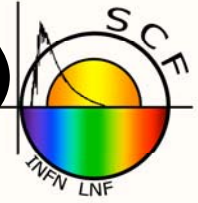
- SLR: the most precise AND cost-effective way to probe gravity in Near Earth Orbits  
**(Millimeters) .AND. (0.1 M€ to M€)**
- Not just physics
  - Space geodesy
  - GALILEO has SLR on all satellites
- Three main contributions to science error budget
  - SLR measurements, Earth grav. models, thermal perturbations
  - **The INFN SCF fills the void of non-existent of space characterization of SLR**
- With SLR/LLR we love to test:
  - General Relativity
  - Yukawa deviations from  $1/r^2$ , Gravity with Torsion (in progress)



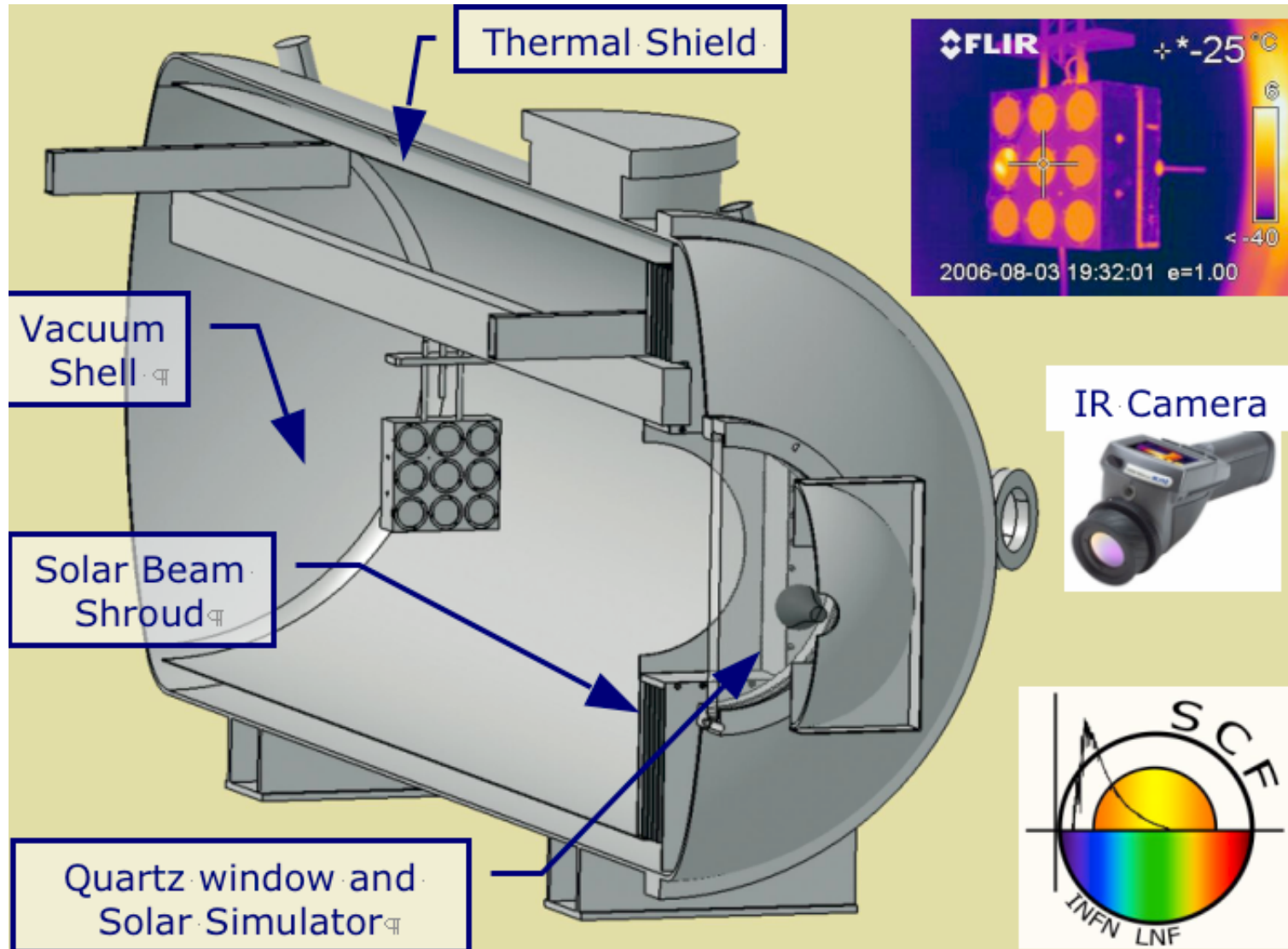
Thank you



# The INFN-LNF SLR Characterization Facility (SCF)



Thermal and laser tests **never performed before in space conditions**



# Science with Satellite Laser Ranging

---



- Consolidated ToF to measure positions in space with passive, long-lasting targets
  - Apollo LLR: oldest physics experiment in space with a man-made payload
  - LAGEOS orbit lifetime is  $O(1)$  million years
- SLR is the most (cost-effective).AND.(precise) orbitography
  - Laser interferometry in space more precise but much more expensive
- Millimeter level precision of SLR is excellent for
  - **Precision tests of Gravity** (GR, Unified Theories)
  - **Space Geodesy** (ITRF/ICRF)
  - **Global Navigation Satellite System** (GALILEO, GPS-3)

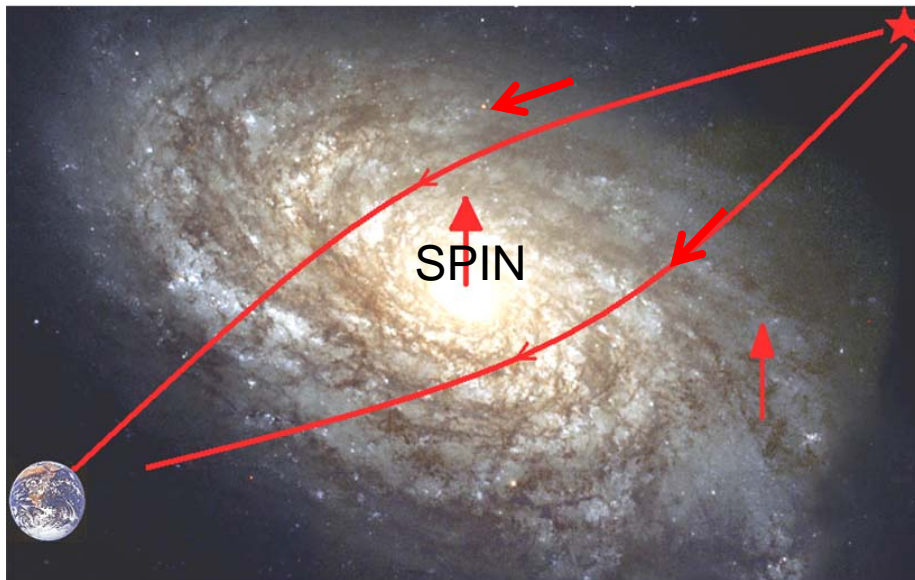
ITRF = International Terrestrial/Celestial Reference Frame



# Other manifestations of frame dragging

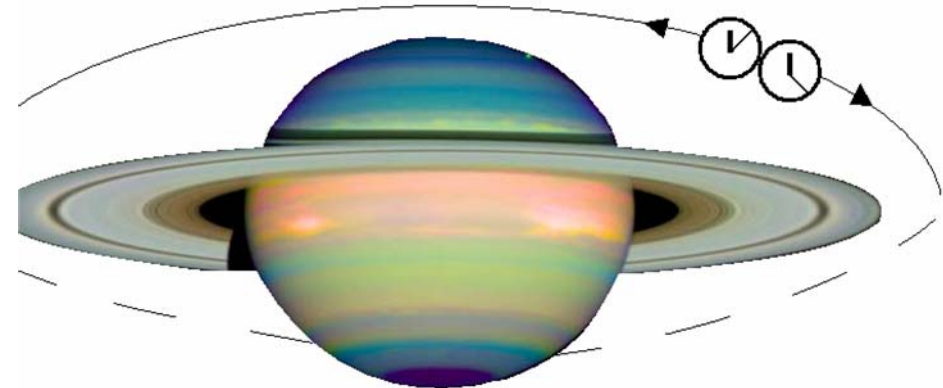


Spin-time delay and gravitational lensing: can be observable on large scale structures (I. Ciufolini)



Gravitomagnetic clock effects near spinning astrophysical objects

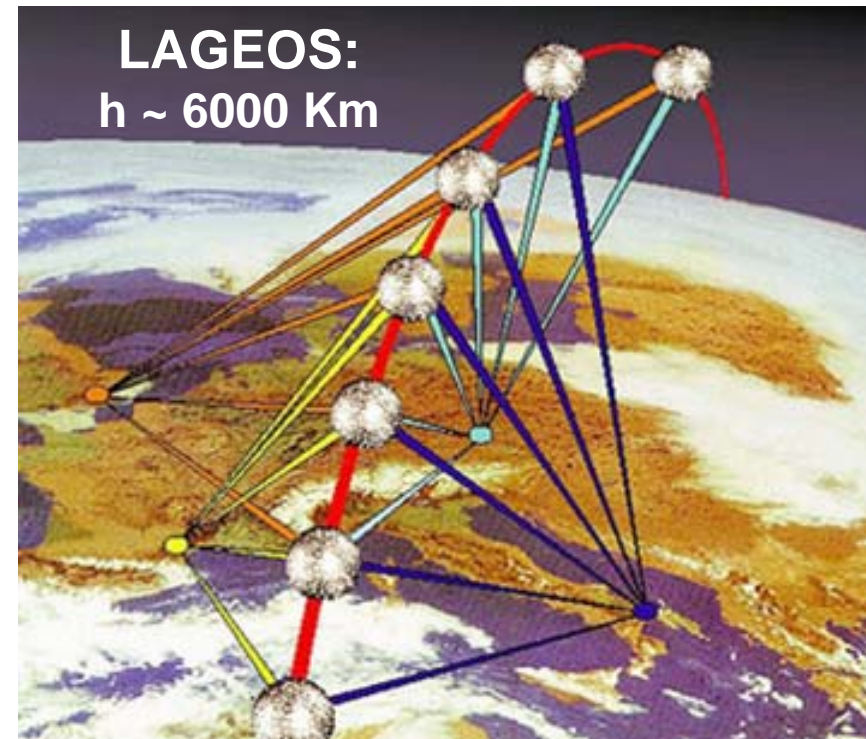
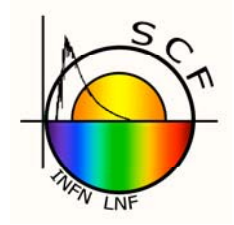
Ciufolini and Ricci - 2001





# Satellite Laser Ranging (SLR)

## Lunar Laser Ranging (LLR)



- The Moon as a test mass (1969+, Alley, Bender, Currie, Faller ...)
- LAGEOS: “cannon-ball”, point-like test-masses covered with laser retro-reflectors (raw orbit accuracy  $< 1$  cm)

# LARES and GP-B: main goals & differences

---



- LARES+LAGEOS: test the gravitomagnetic field at the 1% level. Same goal as GP-B. LARES costs “a few millions” of euros.
- LAGEOS-only error is now 10%
- GP-B: ~300% error at in April 07 at APS
  - Web site declares they are now at ~30% level. Final result in June 08
  - Official cost = 760 M US\$; approval in 1964, launch in 2004
- They are based on two **DIFFERENT equations** for the effect of the gravitomagnetic field, this difference could have profound implications in some **gravitational theories** embedding GR (for example Gravity with Torsion)
- LARES data analysis may be **repeatable** by any laboratory. LARES measurements will **improve** with time, because of longer periods of observations and better modeling of the physical orbital perturbations



# L'inerzia di Einstein misurata nello spazio

di GIOVANNI FABRIZIO BIGNAMI\*

La teoria della relatività generale di Einstein ha finora superato brillantemente tutti i test sperimentali. E per fortuna, perché è alla base della nostra visione fisica del mondo, almeno finora. Tutti viviamo felici pensando di sapere cosa sia l'inerzia e come questa sia collegata alla massa di ogni corpo, ma di rado ci chiediamo se la massa di un corpo possa influenzare il sistema di riferimento inerziale che lo circonda. Andiamo già sul difficile.

molto incoraggianti (per Einstein, che osserva preoccupato) ma non ancora definitivi. L'Italia ha un ruolo speciale: l'Asi possiede il Centro di Geodesia Spaziale «G.Colombo», vicino a Matera, che non solo sa tirare le laserate, ma partecipa anche ad interpretare i dati raccolti. Adesso si apre una nuova possibilità interessante. L'Asi e l'EsA stanno sviluppando un nuovo razzo vettore, il Vega, studiato per portare in orbita piccoli satelliti.



## Luce verde per LARES

**Il CdA dell'ASI approva il finanziamento industriale per il satellite che volerà con VEGA**

Nella seduta dell'7 febbraio 2008, il Consiglio di Amministrazione dell'ASI ha approvato in via definitiva il finanziamento industriale di LARES, il satellite che volerà con il primo lancio del nuovo vettore europeo VEGA, previsto entro la fine del 2008. LARES, che verrà costruito da Carlo Gavazzi Space SpA, è un satellite completamente passivo, in tungsteno, che ospita retroriflettori grazie ai quali il suo spostamento sarà seguito via laser da terra. Il suo obiettivo scientifico è misurare con un'accuratezza dell'ordine dell'1% l'effetto Lense-Thirring, cioè lo spostamento dall'orbita newtoniana che, secondo la Teoria della Relatività Generale, subisce un satellite in orbita a causa della rotazione terrestre. Attualmente l'accuratezza di questa misura è dell'ordine del 10%. LARES è stato progettato in collaborazione con l'INFN e il suo principal investigator è Ignazio Ciufolini, dell'Università di Lecce.

# LARES according to ASI

The ASI President wrote about LARES on Sep. 12, 2007, on an italian newspaper, Corsera

Ciufolini on NATURE, INFN, VEGA, Matera Laser Ranging Observatory, "a few Millions"

Il bell'articolo di Ignazio Ciufolini su Nature diventato la «storia di copertina» riesce a spiegare bene questa in-

fluenza: nel caso della Terra, la rotazione diurna, secondo Einstein e seguaci, «trascina» con sé un satellite in orbita, spostandolo dalla sua orbita newtoniana. E' una correzione piccolissima, eppure si può misurare. Il modo è semplice quanto ingegnoso: si mette in orbita un satellite passivo, una sfera metallica, coperta di specchietti ben riflettenti. Da Terra lo si colpisce con un fascio laser collimato da un telescopio e una parte dei fotoni laser si riflette e torna al punto di partenza. Misurando accuratamente il tempo che i fotoni ci mettono a fare avanti e indietro si misura (con l'errore di qualche millimetro) la posizione dello specchietto rispetto alla Terra. Insomma, il satellite viene usato come una sonda estremamente precisa del campo gravitazionale terrestre e delle sue eventuali correzioni einsteiniane.

**I RISULTATI** — L'idea è brillante, e la Nasa, l'Agenzia Spaziale Italiana e lo Infn hanno già effettuato due missioni spaziali con risultati

**L'OGIVA** — Il suo primo lancio di prova è previsto tra circa un anno dalla base Esa di



La copertina di Nature

Il risultato di Ignazio Ciufolini ottenuto con i Laser della stazione di Matera

Kourou, nella Guyana francese, con della banale zavorra nella ogiva. Nessuno vuole affidare un satellite costoso ad un lancio di qualifica, ma un satellitino passivo (sfera metallica più specchietti) costa poco e in fondo si può rischiare. E così è nata la missione Asi-Lares, in collaborazione con lo Infn (Istituto Nazionale di fisica Nucleare) e l'industria italiana. Anziché peso morto, nell'ogiva del Vega ci mettiamo il Lares e poi sfruttiamo le capacità

della stazione laser geodetica di Matera. Con un po' di lavoro (e di flessibilità mentale) si è arrivati a rendere compatibili le richieste del lancio di prova e del satellite. Insomma, sembra proprio che si possa fare: con pochi milioni (e molta fortuna) potremmo avere un satellite italiano messo in orbita da un vettore italiano.

Il passato successo di Ciufolini nell'analisi dati dei Lageos e, soprattutto, la attuale prestigiosa conferma sulla rivista britannica Nature ci confortano di poter affidare la responsabilità scientifica alla persona giusta. Non resta che fare la missione.

\*Presidente Asi e Iuss-Pavia