

LinkO: una infrastruttura in fibra ottica per confronti remoti di tempo e frequenza ad alta accuratezza

D. Calonico, F. Levi, A. Mura, C. Clivati e A. Godone

INRIM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica - Torino (Italia)

G. A. Costanzo

Politecnico di Torino

Sommario

- Metrologia, INRiM, Tempo&Frequenza
- Orologi atomici
- Utenti
- Confronto di Orologi e Disseminazione
- Un Link Ottico
- Il ruolo di Garr X
- LinkO all'INRiM
- Link Ottici in Europa
- Sviluppi

La metrologia primaria

Per misurare occorre avere un' UNITA' CAMPIONE

questo comporta un processo scientifico (e tecnologico) che chiameremo METROLOGIA PRIMARIA e che sintetizziamo nei seguenti passi:

DEFINIZIONE

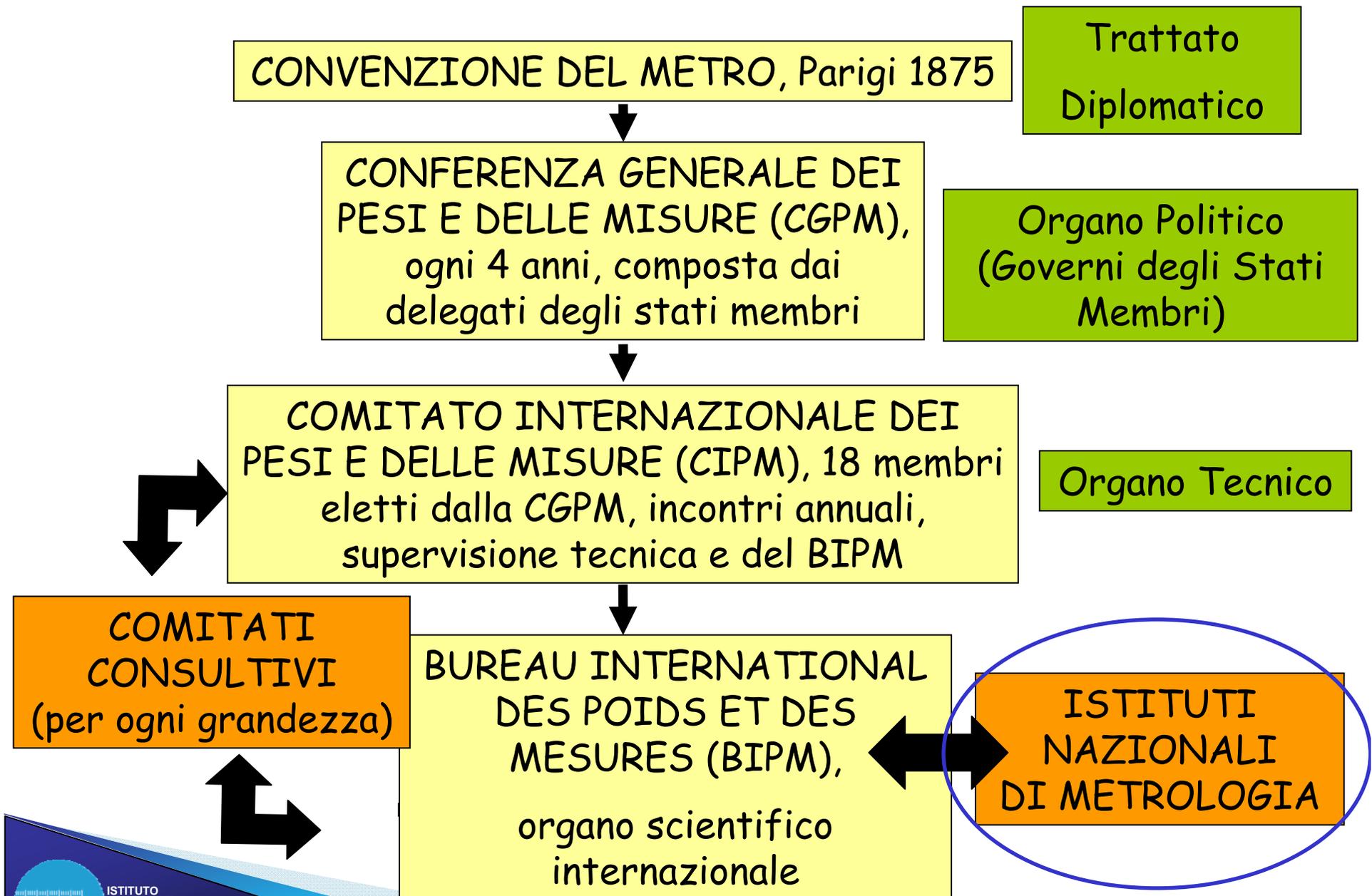
REALIZZAZIONE

MANTENIMENTO

DISSEMINAZIONE

ogni fase porta con sé una propria specifica incertezza, ovviamente da quantificare!

La convenzione del metro



Istituto Metrologico Nazionale in Italia

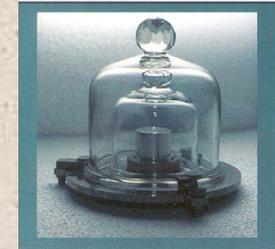


Il Sistema Internazionale delle unità di misura - SI

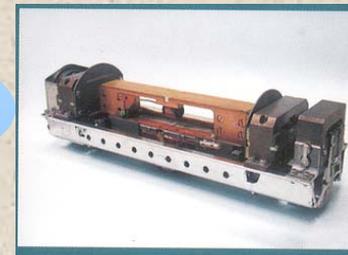
Lunghezza: metro [m]



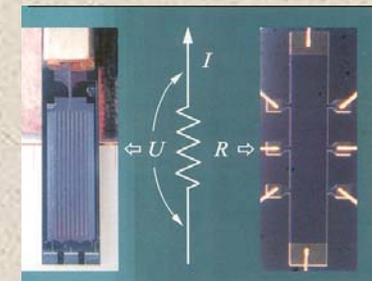
Massa: kilogrammo [kg]



Tempo: secondo [s]



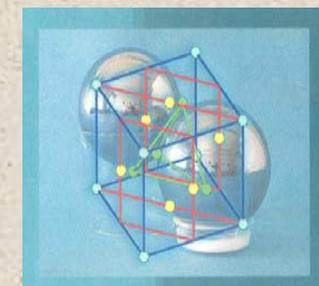
Corrente elettrica ampère [A]



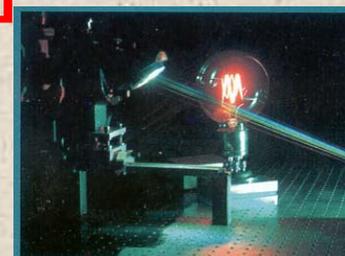
Temperatura t. kelvin [K]



Quantità di sost. mole [mol]



Intensità lum. candela [cd]



Definizione del secondo

(la metrologia si evolve secondo le necessità scientifiche e tecnologiche)

- Tempo solare medio (fino al 1960)

*Il secondo è la frazione $1 / 86\,400$
del giorno solare medio*

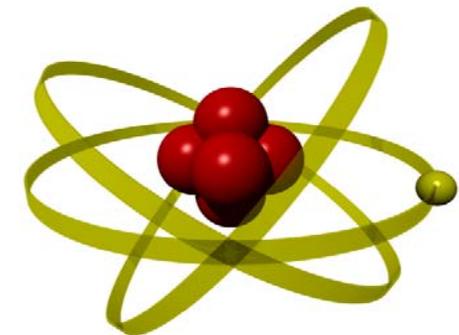


- Tempo delle Effemeridi (dal 1960 al 1967)

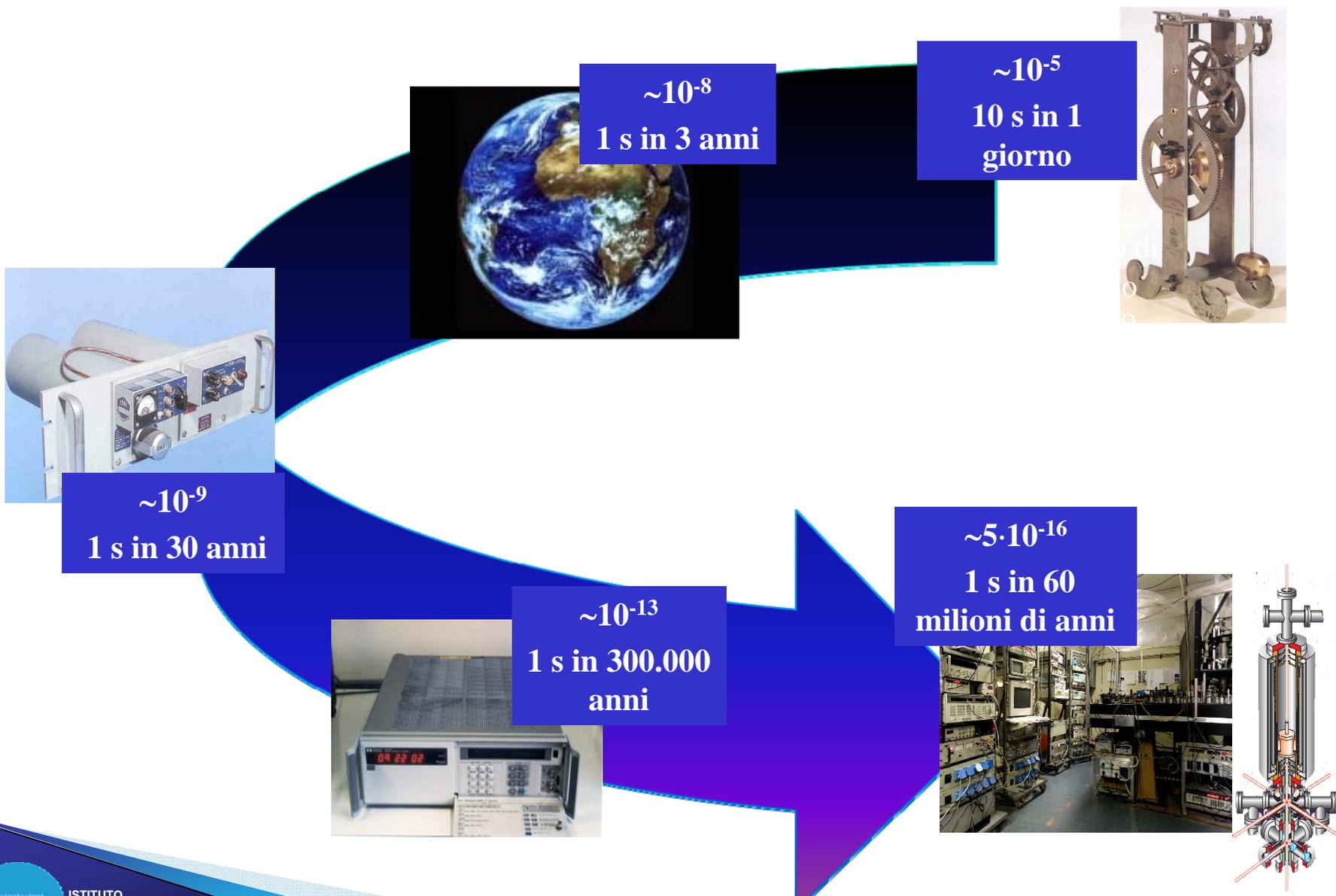
*Il secondo è la frazione $1 / 31\,556\,925,9747$
dell'anno tropico relativo al giorno
1 gennaio 1900 alle ore 12 UT*

- **Tempo atomico (dal 1967)**

*Il secondo è la durata di **9 192 631 770**
periodi della radiazione corrispondente
alla transizione tra i due livelli iperfini
dello stato fondamentale dell'atomo
di cesio 133.*



Evoluzione dell'accuratezza degli orologi



Utilizzatori del tempo e della frequenza



Utilizzatori del tempo e della frequenza



INRIM, Fontana di Cesio ITCsF2 (accuratezza $<5 \times 10^{-16}$)



Disseminazione e confronto



Fontana Criogenica di Cesio ITCsF2

Caesium Fountain ITCsF1

5 Orologi Commerciali al Cesio

Riferimenti Primari al Cesio

Codice Radiotelevisivo RAI



Internet NTP



**UTENTI
Scientifici
Tecnologici
Civili**

3 Maser all'Idrogeno

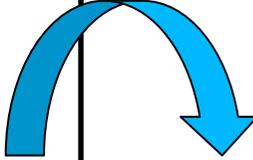


Tecniche Satellitari (es GPS)



Disseminazione di Segnali Tempo&Frequenza ad elevata stabilità/accuratezza

Performance di stabilità delle
Tecniche Satellitari, oggi stato
dell'arte :
 1×10^{-9} @ 1 s
 1×10^{-14} @ 1 day
(valori in frequenza relativa, tratte
continentali e intercontinentali)



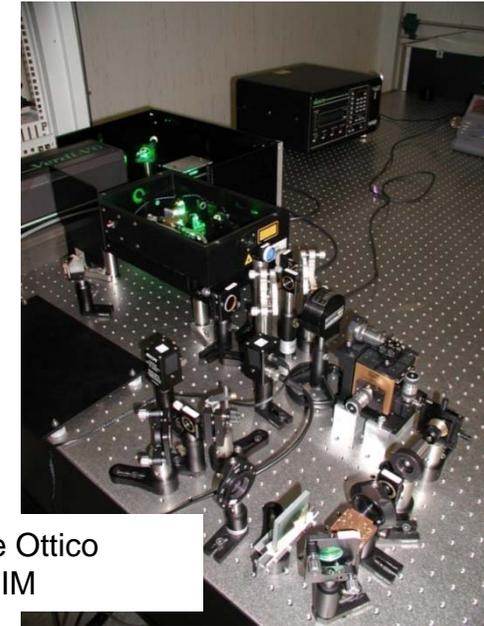
Futuro: Link Ottico
 $< 1 \times 10^{-13}$ @ 1 s
(tratte <1000 km)

Misure $> 10^4$ volte PIU' PRECISE
 $> 10^4$ volte PIU' VELOCI

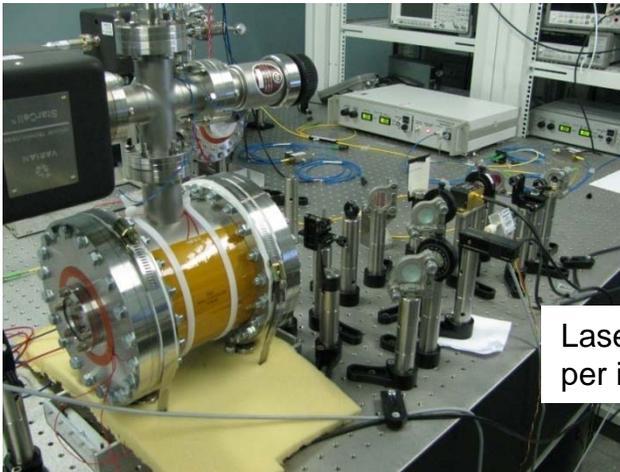
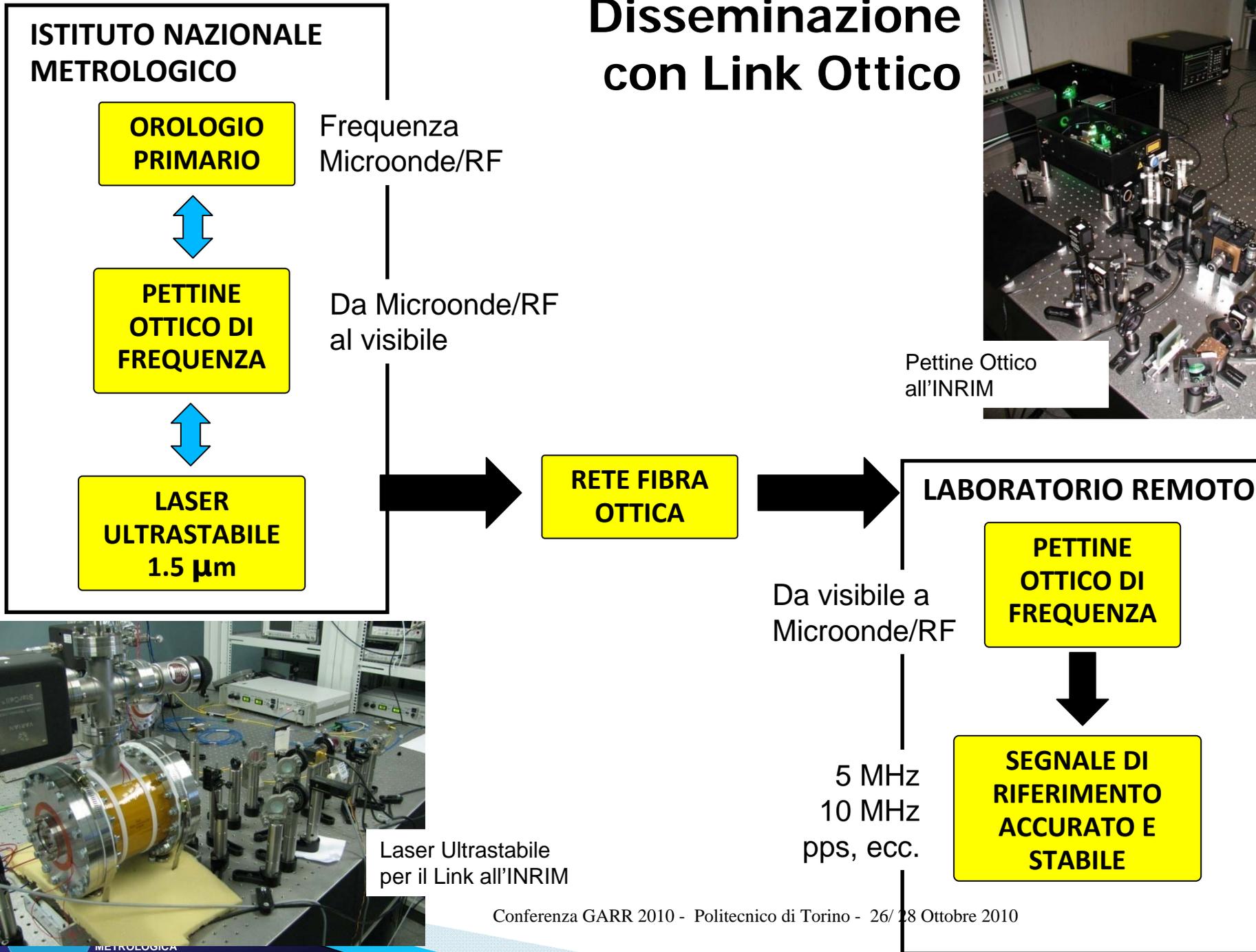


Aumento della competitività per il quadro
tecnologico-industriale europeo, nuove possibilità.

Disseminazione con Link Ottico



Pettine Ottico all'INRIM



Laser Ultrastabile per il Link all'INRIM

Dimostrato in condizioni outdoor reali

SYRTE, 108 km: few $1e-16$ @ 1 s , $< 1e-19$ @ 10000 s

May 15, 2009 / Vol. 34, No. 10 / OPTICS LETTERS 1573

High-resolution optical frequency dissemination on a telecommunications network with data traffic

Fabien Kéfélian,¹ Olivier Lopez,¹ Haifeng Jiang,² Christian Chardonnet,¹
Anne Amy-Klein,^{1,*} and Giorgio Santarelli²

¹Laboratoire de Physique des Lasers, CNRS, Université Paris 13, 99 Avenue J.-B. Clément,
93430 Villetaneuse, France

²LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, CNRS, UPMC, 61 Avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

*Corresponding author: amy@univ-paris13.fr

Received March 18, 2009; accepted March 30, 2009;
posted April 21, 2009 (Doc. ID 108779); published May 13, 2009

We transferred the frequency of an ultrastable laser over a 108-km-long urban fiber link comprising 22 km of an optical communications network fiber simultaneously carrying Internet data traffic. The metrological signal and the digital data signal were transferred over two different frequency channels in a dense wavelength-division multiplexing scheme. The metrological signal was inserted in and extracted from the communication network using bidirectional off-the-shelf optical add-drop multiplexers. The link-induced phase noise was measured and canceled with a round-trip technique using an all-fiber-based interferometer. The compensated link showed an Allan deviation of a few 10^{-16} at 1 s and below 10^{-19} at 10,000 s. This work paves the way to a wide dissemination of ultrastable optical clock signals between distant laboratories via the Internet. © 2009 Optical Society of America

OCIS codes: 060.2360, 120.3930.

PTB, 146 km: 3×10^{-15} @ 1 s , $< 10^{-19}$ @ 30000 s

2270 OPTICS LETTERS / Vol. 34, No. 15 / August 1, 2009

Optical frequency transfer via 146 km fiber link with 10^{-19} relative accuracy

G. Grosche,^{1,*} O. Terra,¹ K. Predehl,^{1,2} R. Holzwarth,² B. Lipphardt,¹ F. Vogt,¹ U. Sterr,¹ and H. Schnatz¹

¹Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig, Germany

²Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Strasse 1, D-85748 Garching, Germany

*Corresponding author: gesine.grosche@ptb.de

Received March 30, 2009; revised June 25, 2009; accepted June 25, 2009;
posted June 30, 2009 (Doc. ID 109337); published July 20, 2009

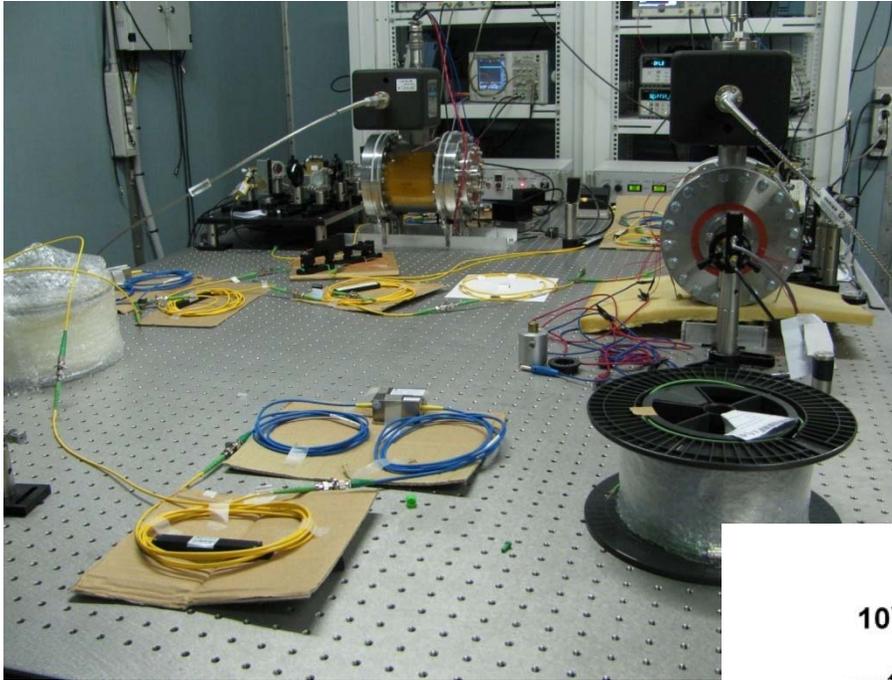
We demonstrate the long-distance transmission of an ultrastable optical frequency derived directly from a state-of-the-art optical frequency standard. Using an active stabilization system we deliver the frequency via a 146-km-long underground fiber link with a fractional instability of 3×10^{-15} at 1 s, which is close to the theoretical limit for our transfer experiment. After 30,000 s, the relative uncertainty for the transfer is at the level of 1×10^{-19} . Tests with a very short fiber show that noise in our stabilization system contributes fluctuations that are 2 orders of magnitude lower, namely, 3×10^{-17} at 1 s, reaching 10^{-20} after 4000 s.

© 2009 Optical Society of America

OCIS codes: 060.2360, 120.0280, 120.4800.

PTB, 2010: Link Braunschweig-Munich 900 km

Link Ottico INRIM

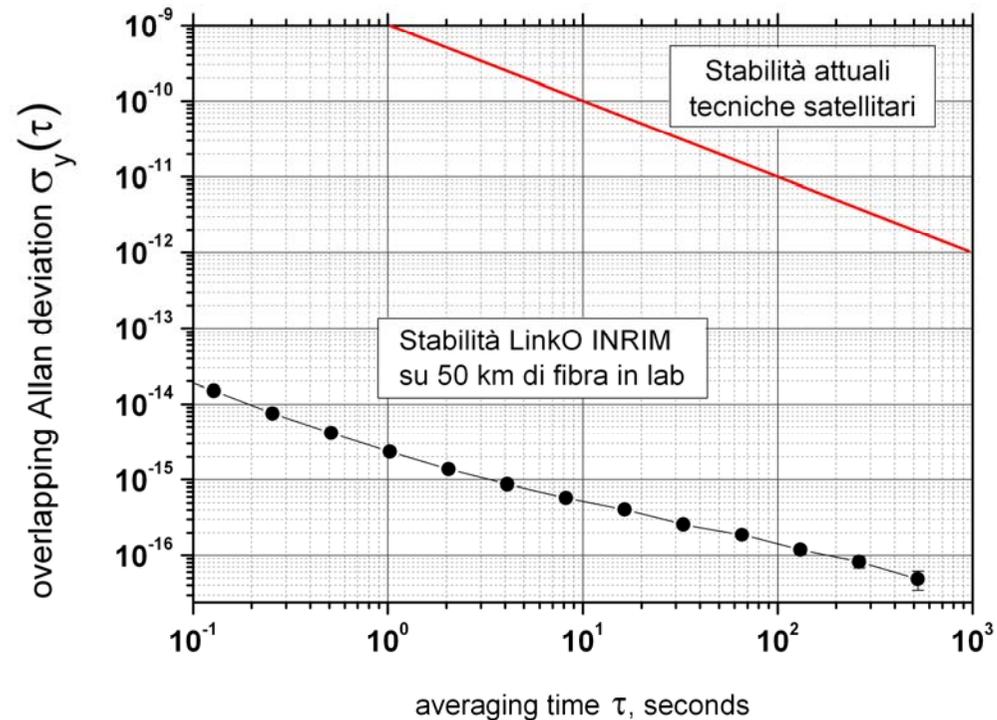


A oggi, in laboratorio:

- Generazione di portanti ottiche a 1.5 μm tramite realizzazione di laser ultrastabili; stabilità $<1\text{e-}14$
- Esperimenti su fiber spools fino a 100 km, stabilità $<1\text{e-}16$ @ 1000 s
- Ricerca di link in fibra reali
(Paris, Florence)

Sviluppi in corso e futuri:

- Stabilizzazione a ca $1\text{e-}15$ del laser
- Implementazione di un Link Ottico Reale, **possibilmente in collaborazione con GARR**



GARR X, un'opportunità fondamentale



- collegamenti di backbone nazionale previsti dal progetto GARR-X
- collegamenti transfrontalieri (Cross Border Fibers)
- collegamenti alle reti GÉANT e EUMEDCONNECT2
- punti di peering con il Global Internet

LinkO è un'ottima applicazione per GARR X, GARR X è una infrastruttura fondamentale per LinkO.

Infatti, LinkO necessita di una rete di fibre "full optical", senza nodi ottico-elettrico-ottico, quale potrà essere GARR X

Inoltre, LinkO trae enormi vantaggi realizzativi dalla architettura Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM)

GARR X, un'opportunità fondamentale

Perché proprio GARR X e non l'esistente?

GARR X è una rete completamente ottica.

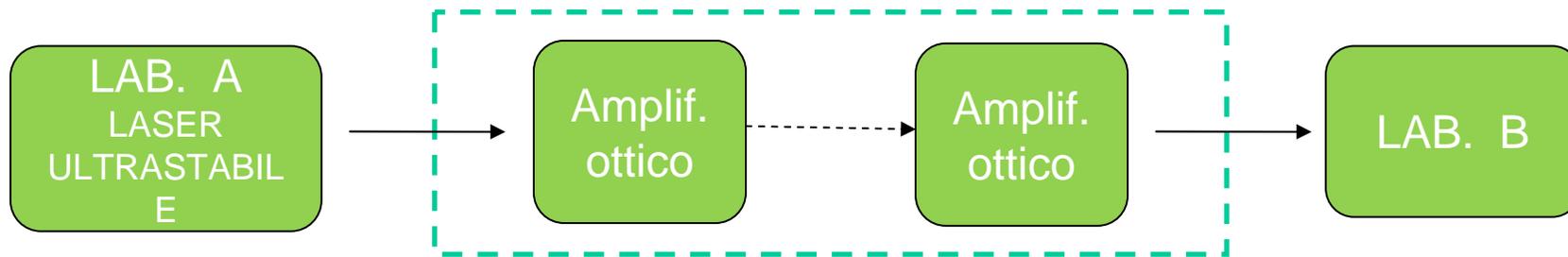
Così, non ha nodi di trasduzione da ottico a elettrico per poi ripassare a ottico.

Questi nodi, presenti sulle altre architetture di rete, impediscono la trasmissione di un segnale ottico ultrastabile che sia anche riferimento di frequenza.

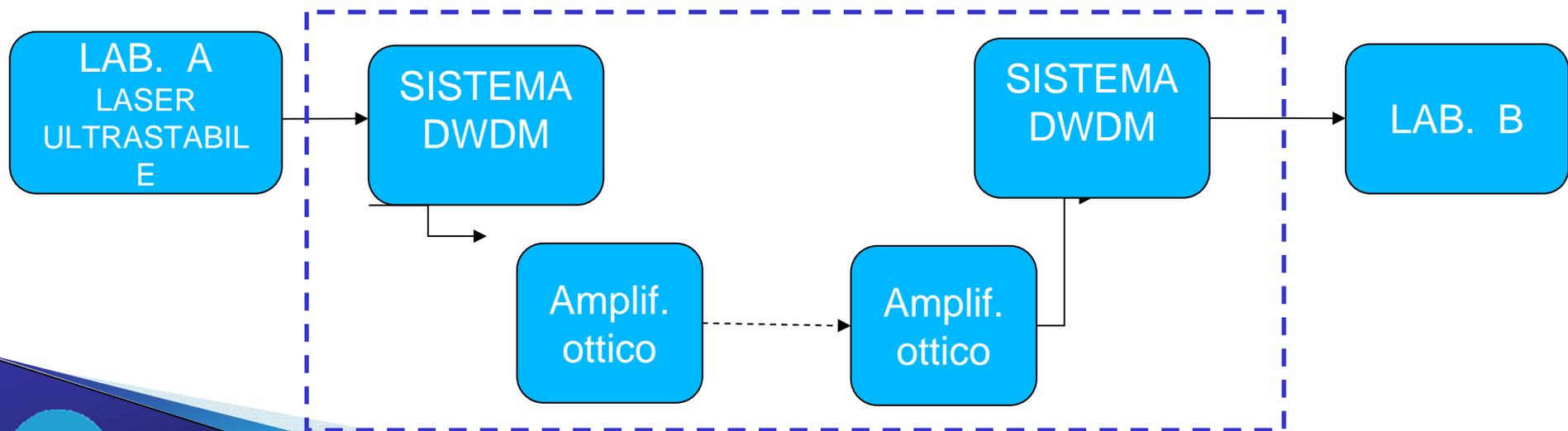
Infatti, quando si passa da ottico a elettrico, il riferimento di frequenza è perso, perché la rigenerazione da elettrico a ottico viene eseguita da laser né ultrastabili né accurati in frequenza (i laser adeguati agli obiettivi finali incertezza ci sono solo in un istituto primario di metrologia).

GARR X, due schemi per LinkO

RETE OTTICA con Fibra Dedicata (Dark Fiber)



RETE OTTICA, Architettura DWDM con Canale di Frequenza Dedicato



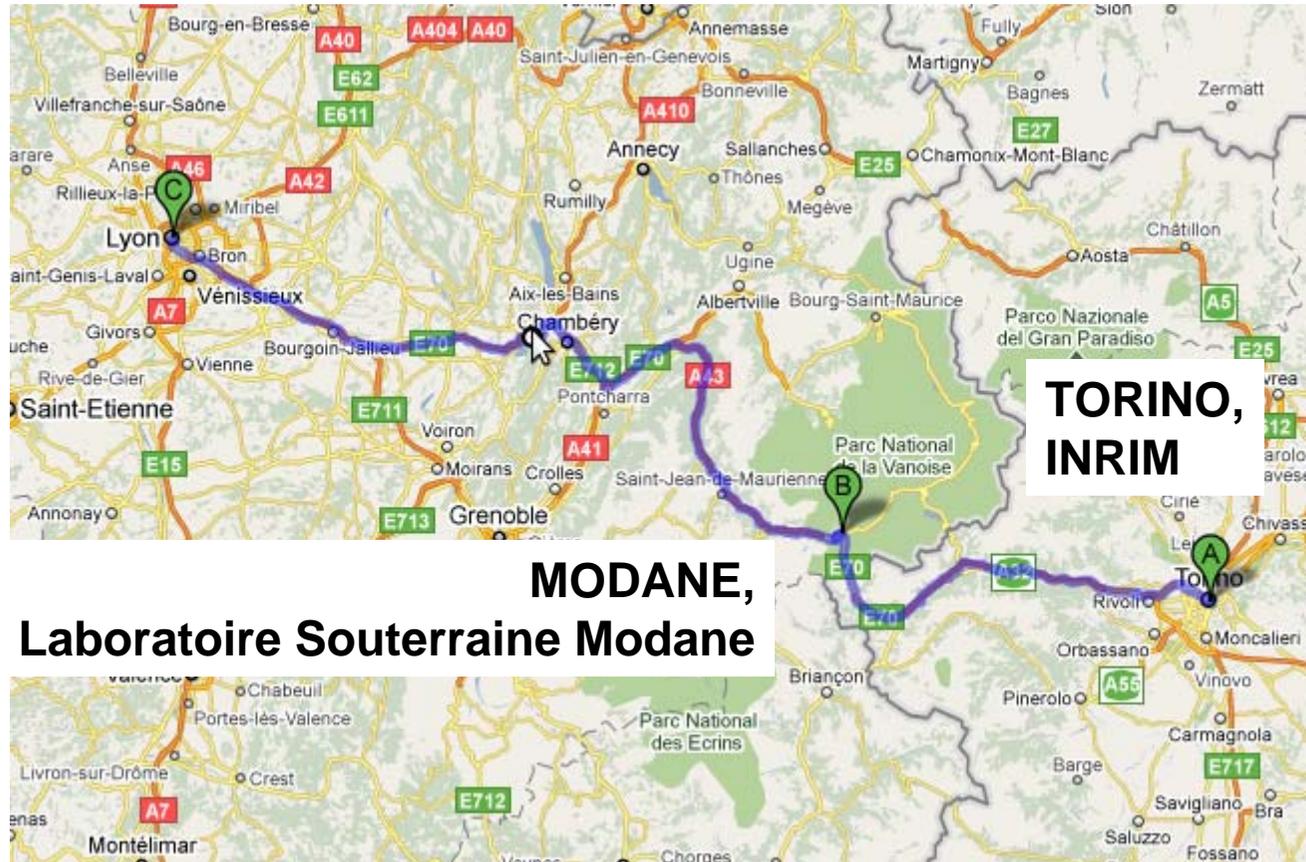
Link Ottici in Europa

- **Link di 86 km** fra Laboratoire National de Métrologie et d'Essais-Systèmes de Référence Temps-Espace (LNE-SYRTE) e Laboratoire de Physique des Lasers (LPL) , Parigi, esteso successivamente su ulteriori 22 km di fibra dedicati a traffico ordinario: **FIBRA OTTICA GESTITA DA RENATER**
- **Link di 146 km** fra Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) a Braunschweig e Università di Hannover
- Dal 2010 un **link di circa 1000 km** sta connettendo Braunschweig e Monaco



Direttrici di interesse per INRIM

Torino–Modane, 90 km come primo passo verso Lione e poi Parigi (Istituto Metrologico Francese LNE-SYRTE)



**TORINO,
INRIM**

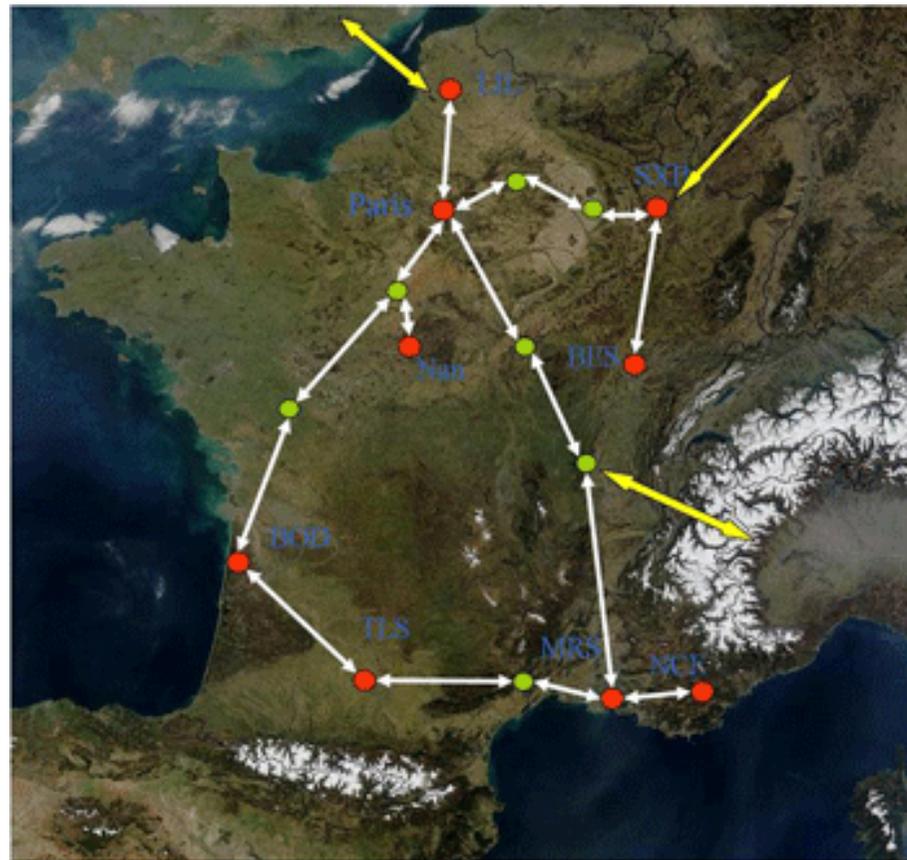
**MODANE,
Laboratoire Souterraine Modane**

Verso un Network in Fibra tra i principali Istituti Metrologici europei



Il progetto francese SYRTE/LPL - RENATER

LNE-SYRTE (Laboratoire National de Métrologie et d'Essais-Systèmes de Référence Temps-Espace), LPL (Laboratoire de Physique des Lasers), e RENATER portano avanti un progetto di link in fibra su tutto il territorio francese:



Fonte <http://www.cnrs.fr/inp/spip.php?article361>

Conclusioni

- INRIM ha individuato la tecnica del link ottico come un'infrastruttura chiave per lo sviluppo della metrologia e dell'industria high-tech in Europa;
- INRIM ha realizzato le sorgenti laser necessarie per il link e ha dimostrato in laboratorio la sua fattibilità;
- Il Link Ottico è una tecnologia matura per l'implementazione, dimostrata anche su circuiti in fibra ottica outdoor;
- La rete GARR X offre l'architettura adatta all'implementazione, e d'altra parte LinkO offre al GARR la possibilità di un'applicazione innovativa per i suoi servizi.
- In un prossimo futuro: Network Ottici tra Istituti Metrologici Europei.

LINKO è realizzato con il cofinanziamento di

