



Osservatorio
Astronomico
di **Brera**

INAF

**Istituto Lombardo
Accademia di Scienze e
Lettere**

I CIELI DI BRERA

CONFERENZE PUBBLICHE 2014

10 dicembre 2014

Parabole e pulsar: come captar i respiri dello spazio-tempo

ANDREA POSSENTI



OAC

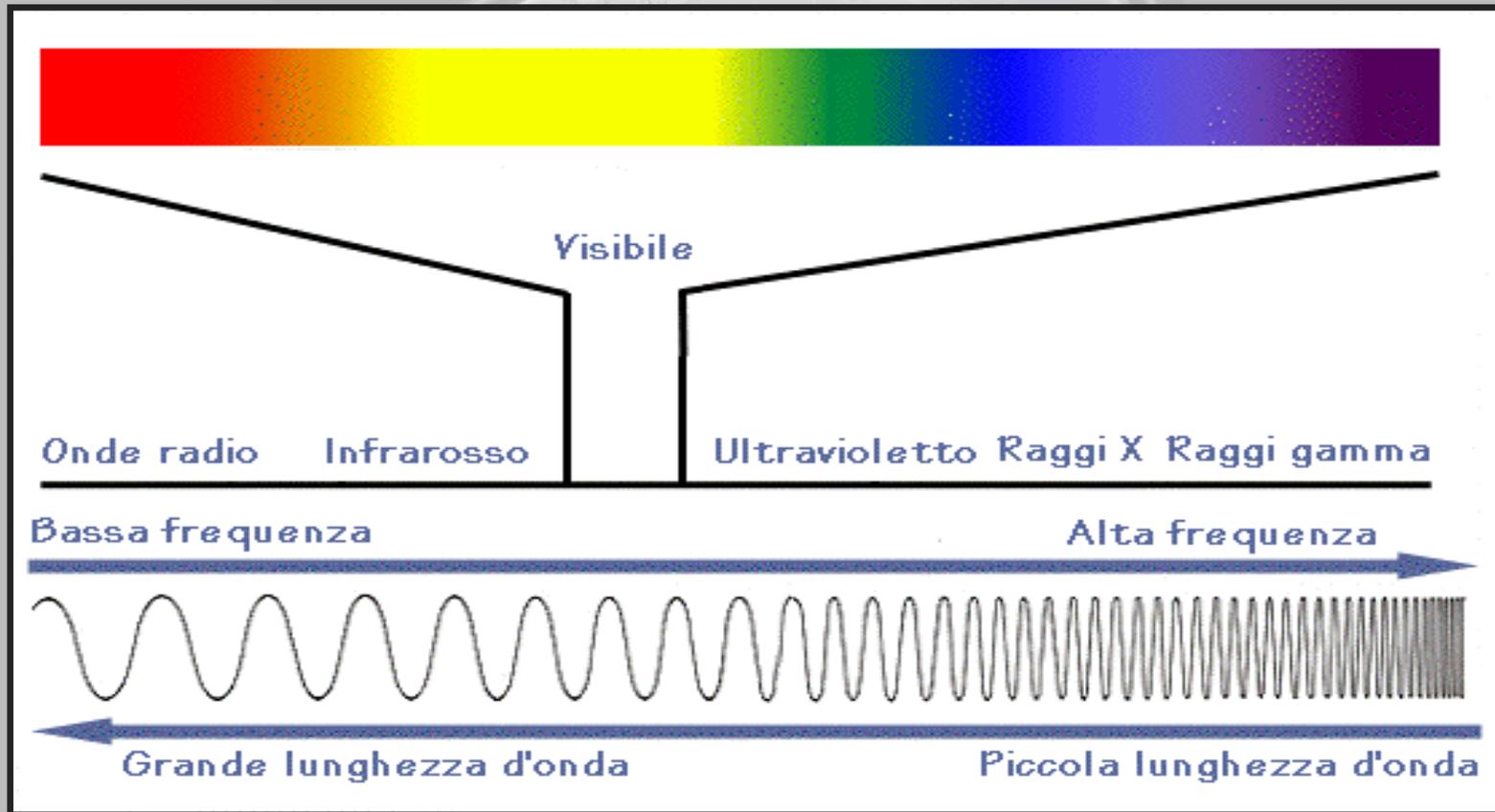
Osservatorio
Astronomico
di Cagliari



Quali sono fino a oggi i messaggeri delle informazioni che giungono dal cosmo ?

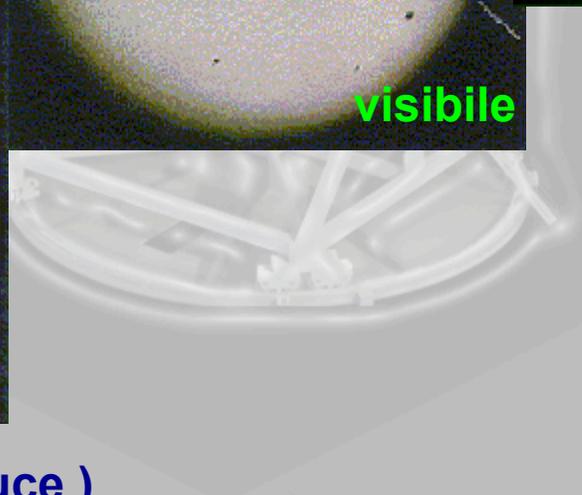
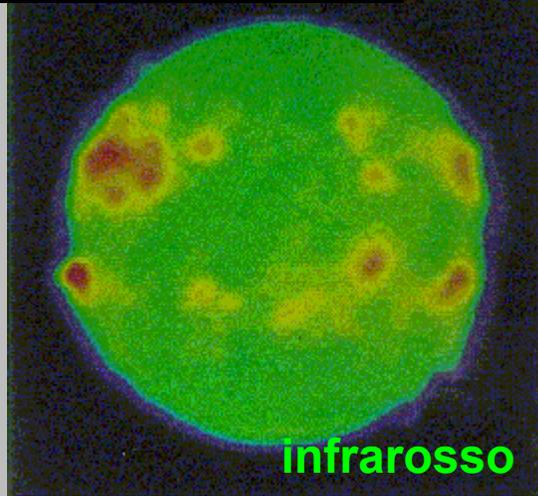
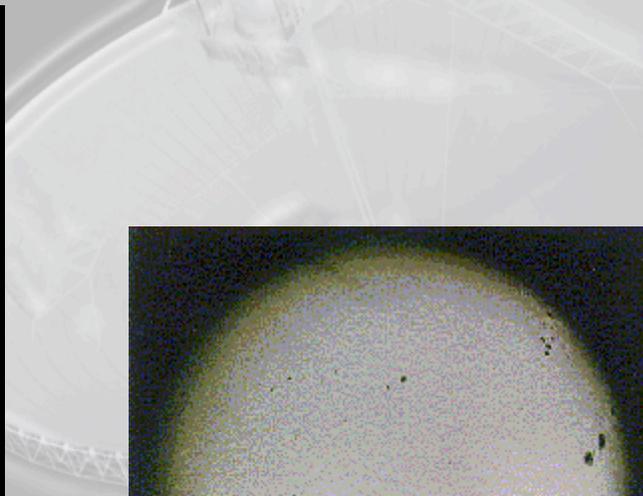
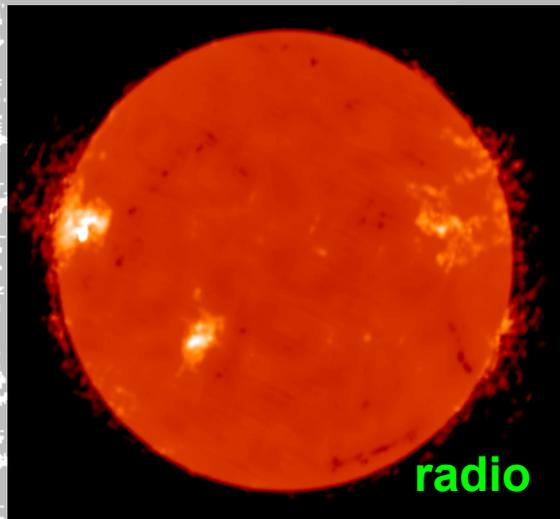
- Onde Elettromagnetiche
- Raggi Cosmici & Neutrini

...la frazione di gran lunga maggiore di informazioni dalle onde elettromagnetiche

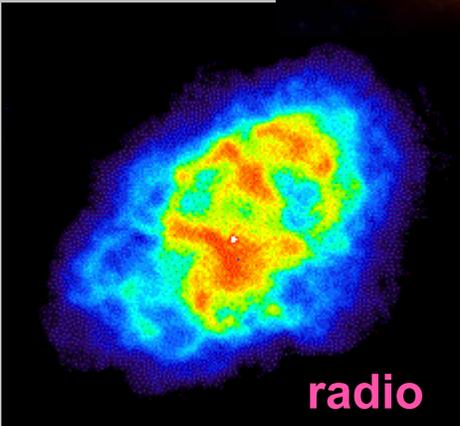
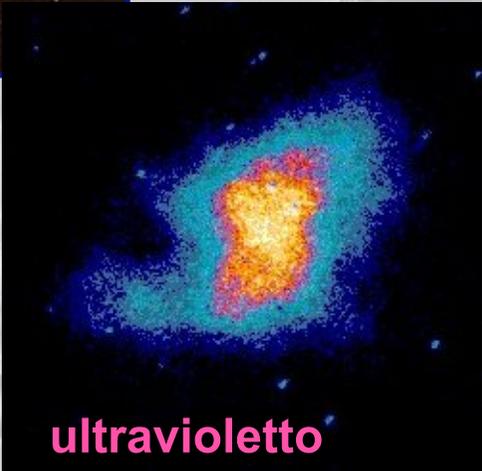
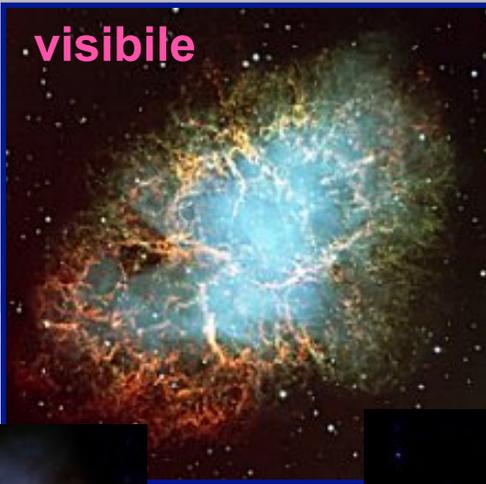


... ciò che le distingue è solo la lunghezza d'onda ...

Uno stesso oggetto ci appare spesso molto diverso a seconda delle porzioni di spettro elettromagnetico attraverso cui lo guardiamo

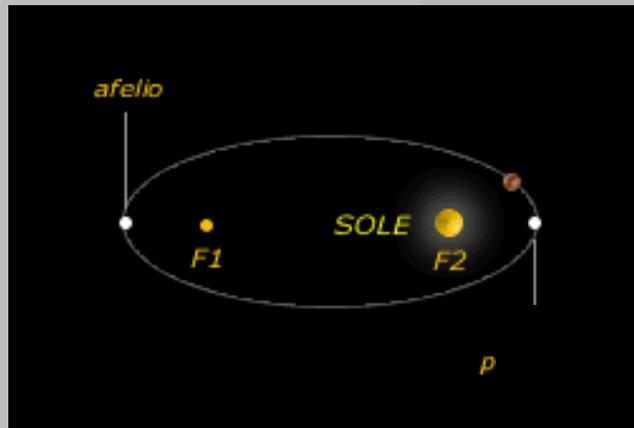


il nostro Sole (a 8 minuti-luce)



la Crab Nebula (nube di gas in espansione a 6300 anni-luce)

Ad es.: dalle Onde Elettromagnetiche della Luce Visibile
la scoperta delle leggi di Keplero sul moto dei pianeti



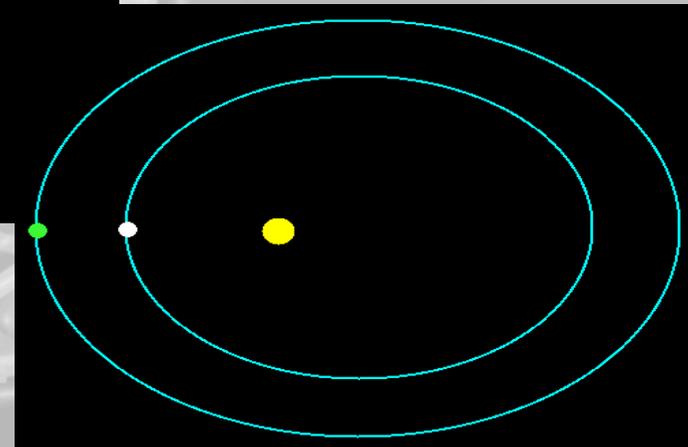
1] Orbite planari e ellittiche

2] Velocità areolari costanti

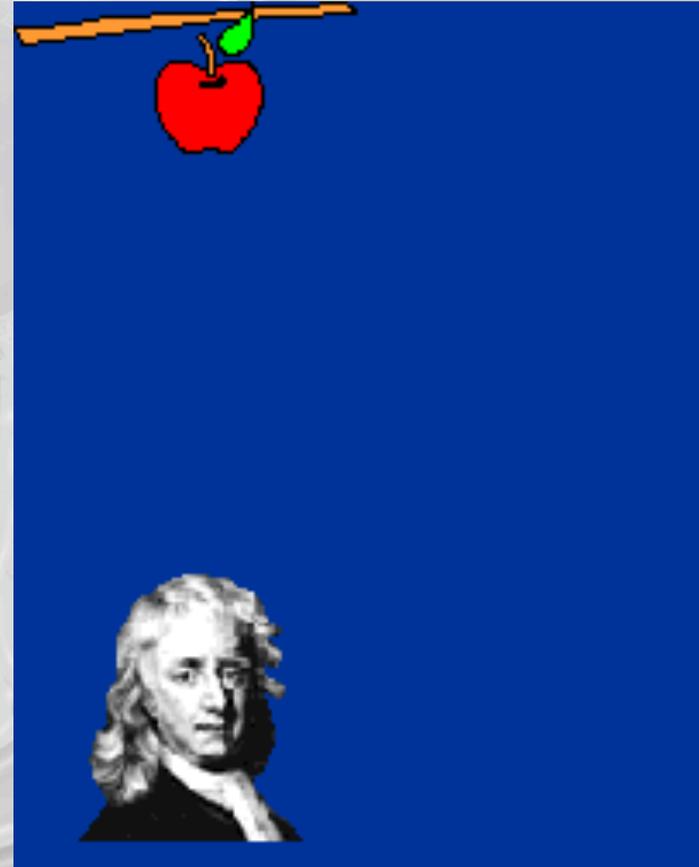
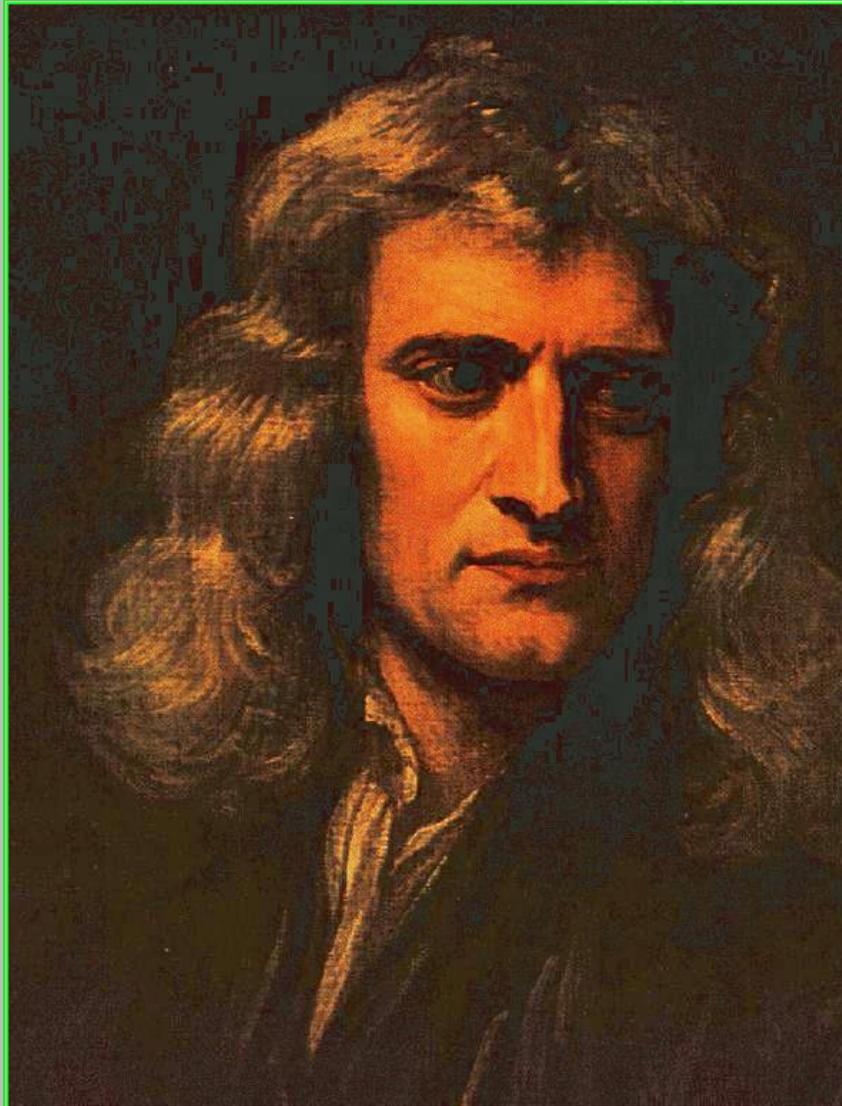


$$3] a^3 = (G/4\pi^2) M_{tot} P^2$$

Keplero (1609, 1609, 1619)



*... queste leggi osservative
stimolarono una spiegazione ...*



Newton (1642-1727)

Secondo Newton, una massa M (la nostra TERRA) esercita su una massa m (la MELA di Newton, posta ad una distanza D dal centro della Terra) una forza F data dalla formula:

$$F = G \frac{M}{D^2} m$$



... inoltre la MELA ha una **velocità iniziale nulla** rispetto alla Terra

Ecco allora perché la mela cade sulla Terra !

Secondo Newton, una massa M (il SOLE) esercita su una massa m (la nostra TERRA, posta ad una distanza D dal Sole) una forza F data dalla formula:

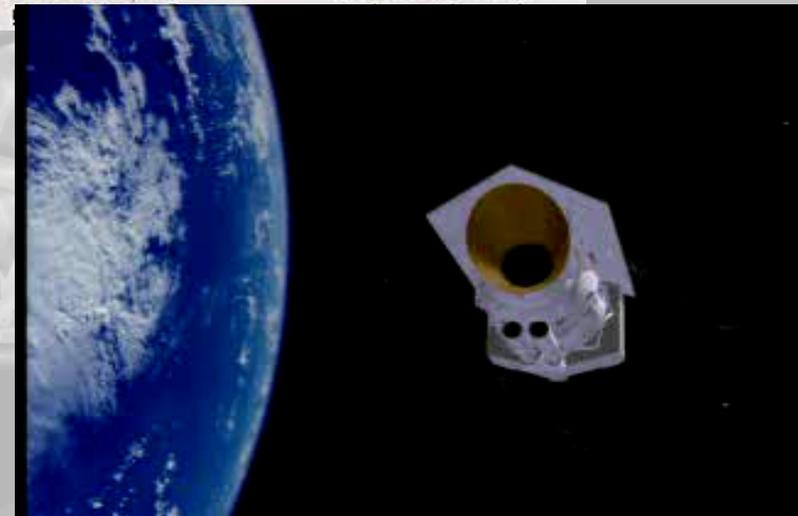
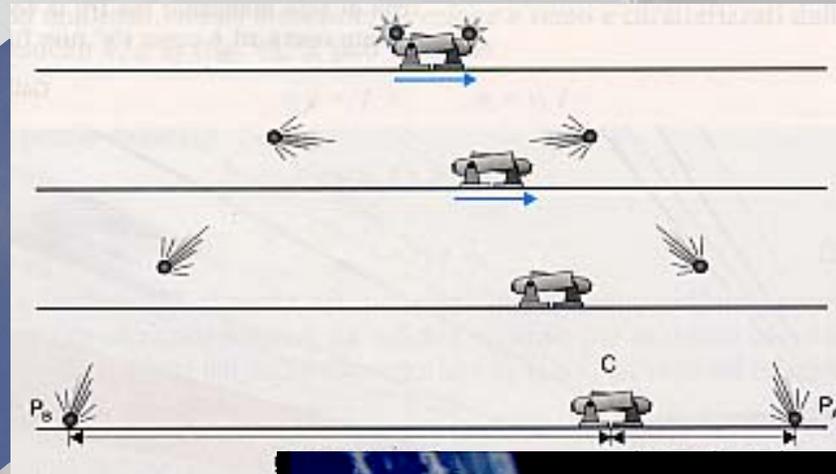
$$F = G \frac{M}{D^2} m$$



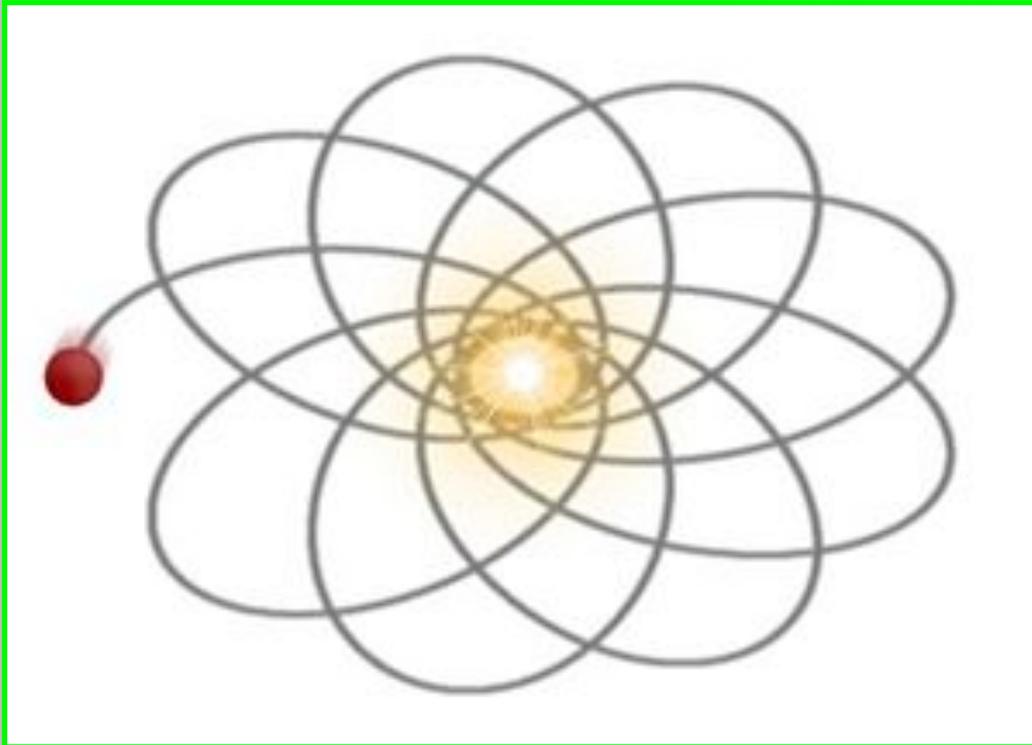
... inoltre la TERRA, al momento della sua formazione, aveva una **velocità iniziale alta** e NON diretta verso il Sole

Ecco perché la Terra orbita attorno al Sole!

Moto dei razzi, dei satelliti artificiali, delle palle di cannone, etc ... permettono la verifica delle leggi di Newton nei laboratori terrestri ...



...non proprio tutto quadra...



I calcoli Newtoniani
predicono un effetto –
dovuto alla presenza degli
altri pianeti - di ampiezza
pari a

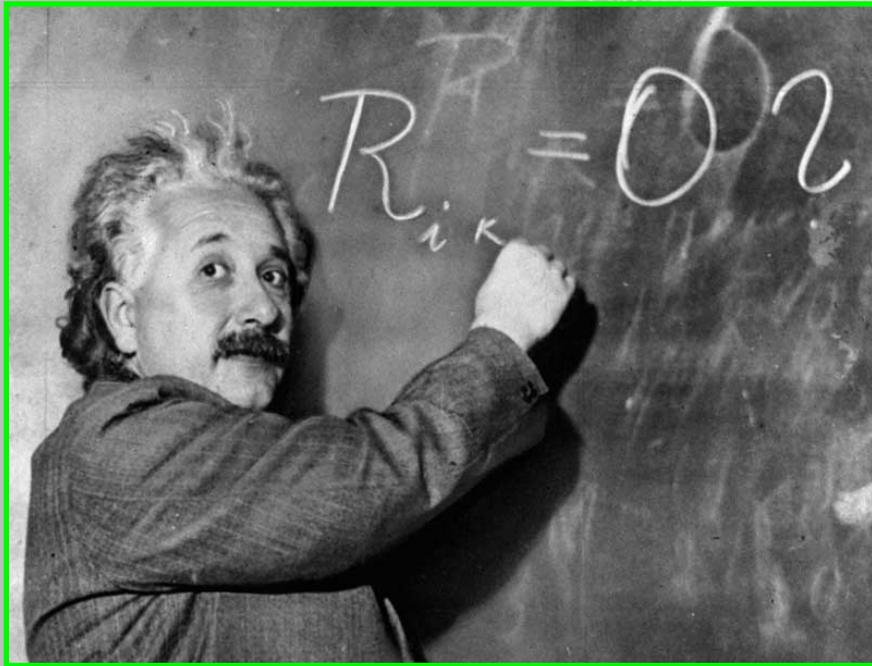
532 arcsec per secolo

La precessione
effettivamente osservata
risulta

42,98 arcsec maggiore

Lo strano moto di Mercurio

...però lo schema interpretativo resta quello introdotto da Newton, finché...



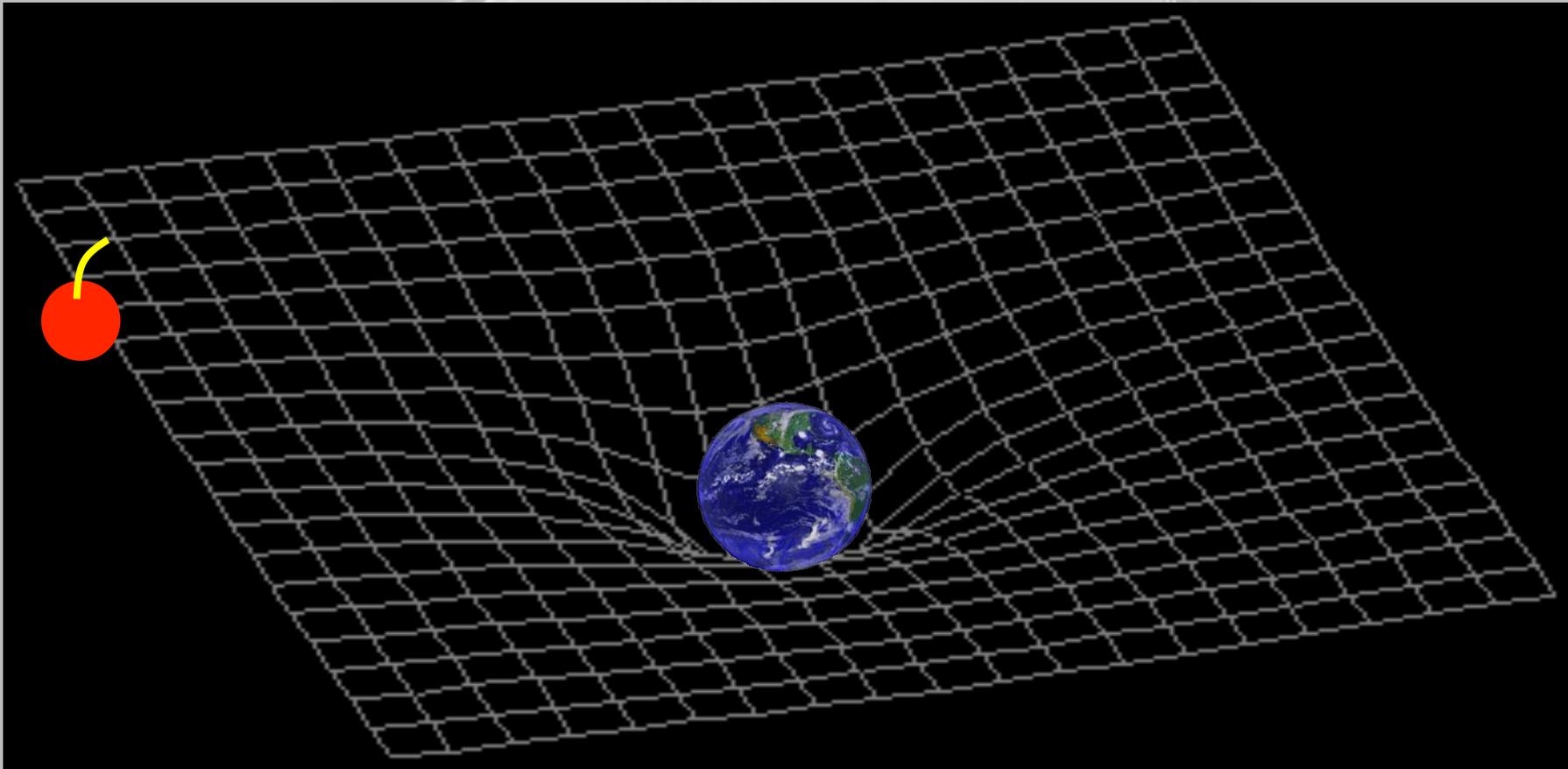
Einstein (1879-1955)

Relatività ristretta (1905)

Relatività generale (1907-1915)

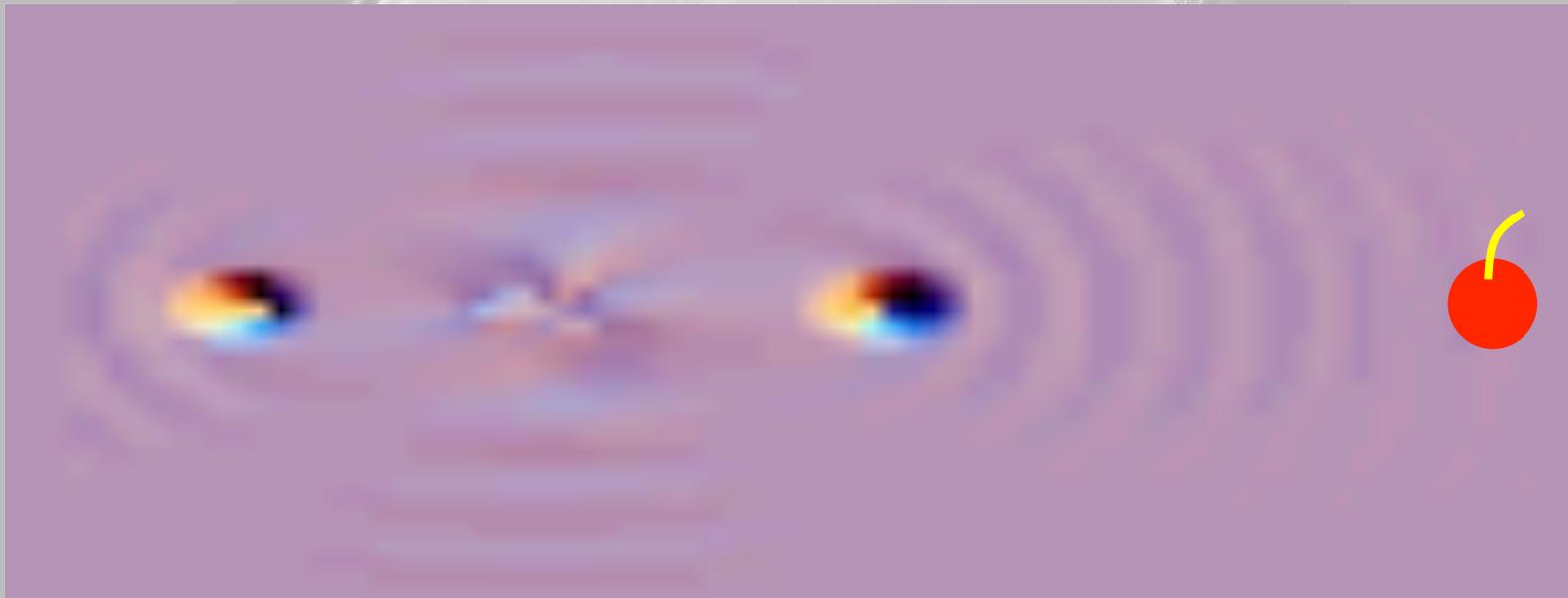
La **gravità** non è una forza (come per Newton), ma è una conseguenza della **curvatura dello spazio-tempo**

Secondo Einstein, una massa M (la nostra TERRA) deforma lo spazio circostante. Una massa m (la MELA), posta ad una distanza D dalla Terra), si muove cadendo liberamente (= scivolando) nelle deformazioni dello spazio-tempo



Ecco perché la mela cade sulla terra !

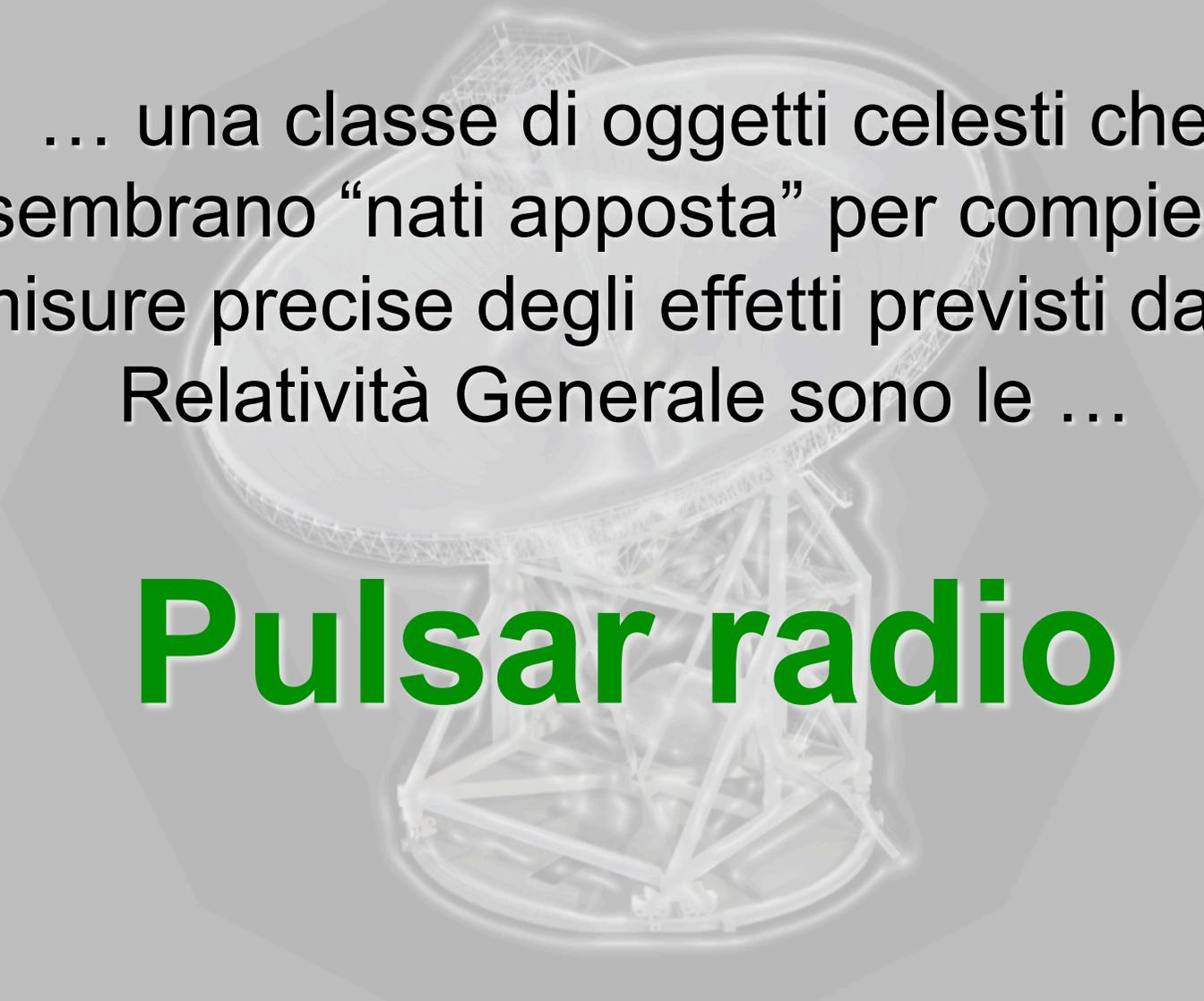
Secondo Einstein (ma NON secondo Newton!) due corpi celesti che orbitano uno intorno all'altro generano le cosiddette onde gravitazionali



Ecco cosa succede alla mela, secondo Einstein

... calcolati gli effetti della nuova
teoria ...

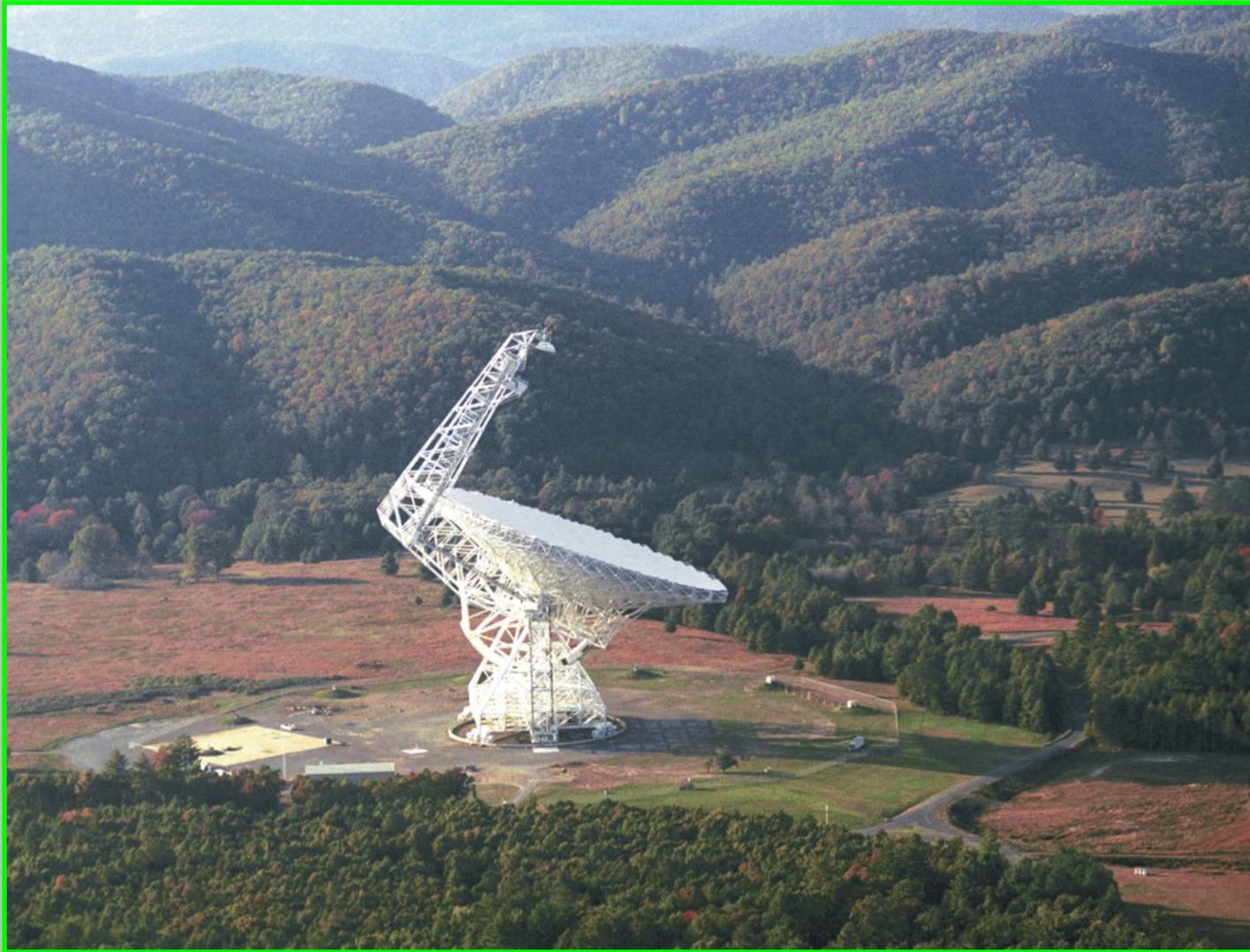
... la Natura si comporta
davvero così ?



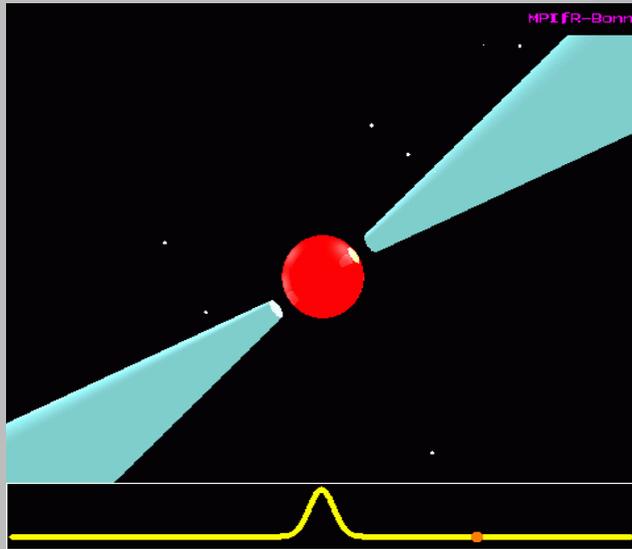
... una classe di oggetti celesti che sembrano “nati apposta” per compiere misure precise degli effetti previsti dalla Relatività Generale sono le ...

Pulsar radio

Il più grande radio telescopio a disco singolo

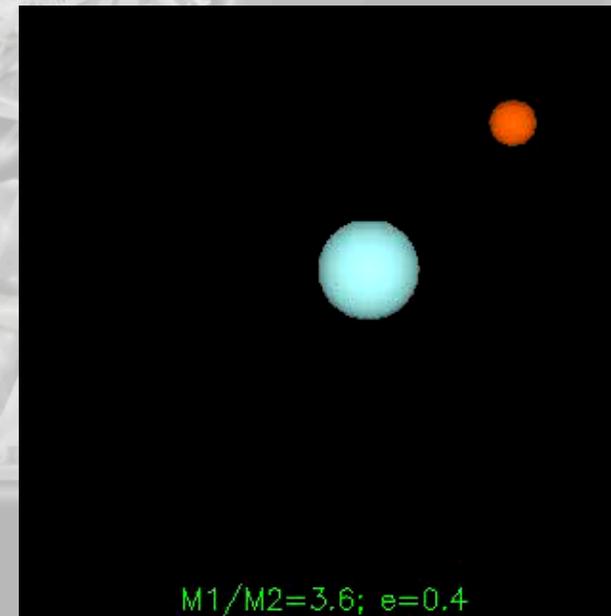


Green Bank - West Virginia – USA
Diametro equivalente = 101 metri



Le PULSAR sono stelle di neutroni rapidamente rotanti e che emettono un fascio radio la cui osservazione, sotto forma di impulsi regolari, può essere usata come orologio

Se una pulsar si trova in un sistema binario, osservare i tempi di ripetizione dei suoi impulsi radio permette di testare le predizioni della teoria della Relatività di Einstein



...perché le pulsar sono straordinari strumenti di indagine della relatività ?

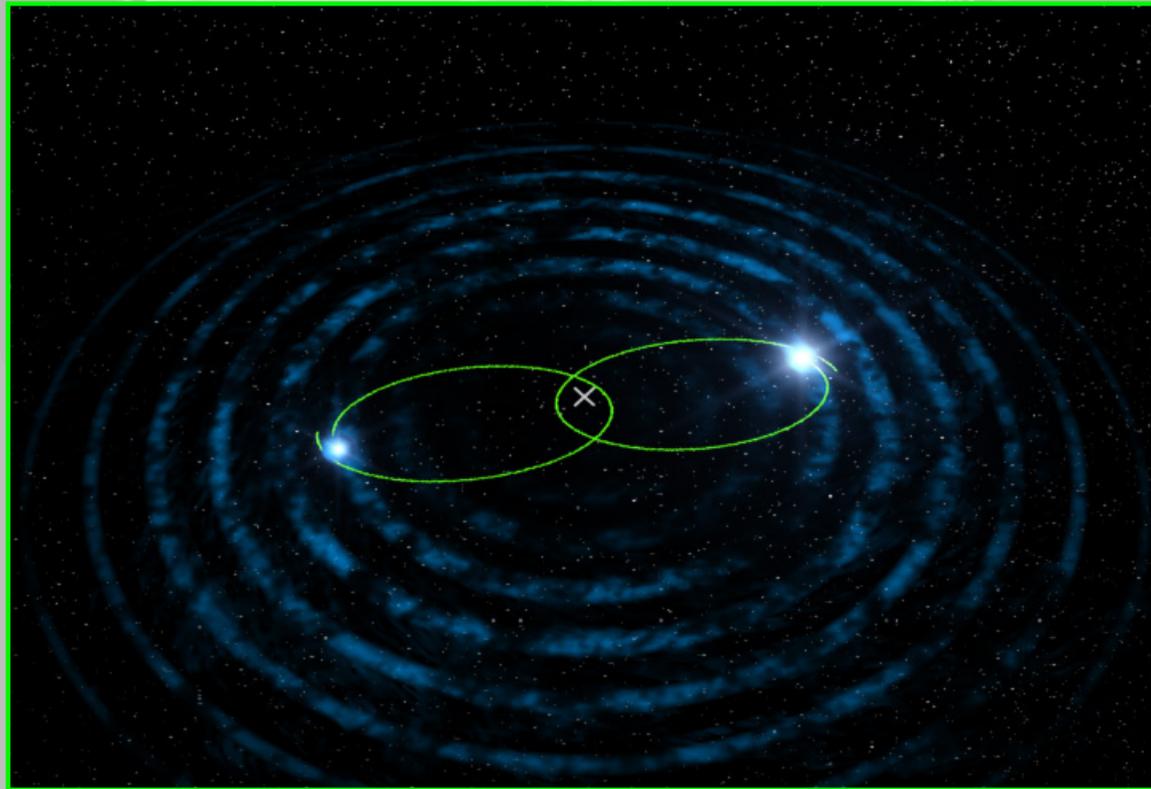
Il periodo di rotazione della pulsar PSR B1937+21 il 10 dicembre 2014 alle 12:00 (ora di Greenwich)

$$P = 0.001557806472448817 \pm 0.00000000000000000003 \text{ sec}$$

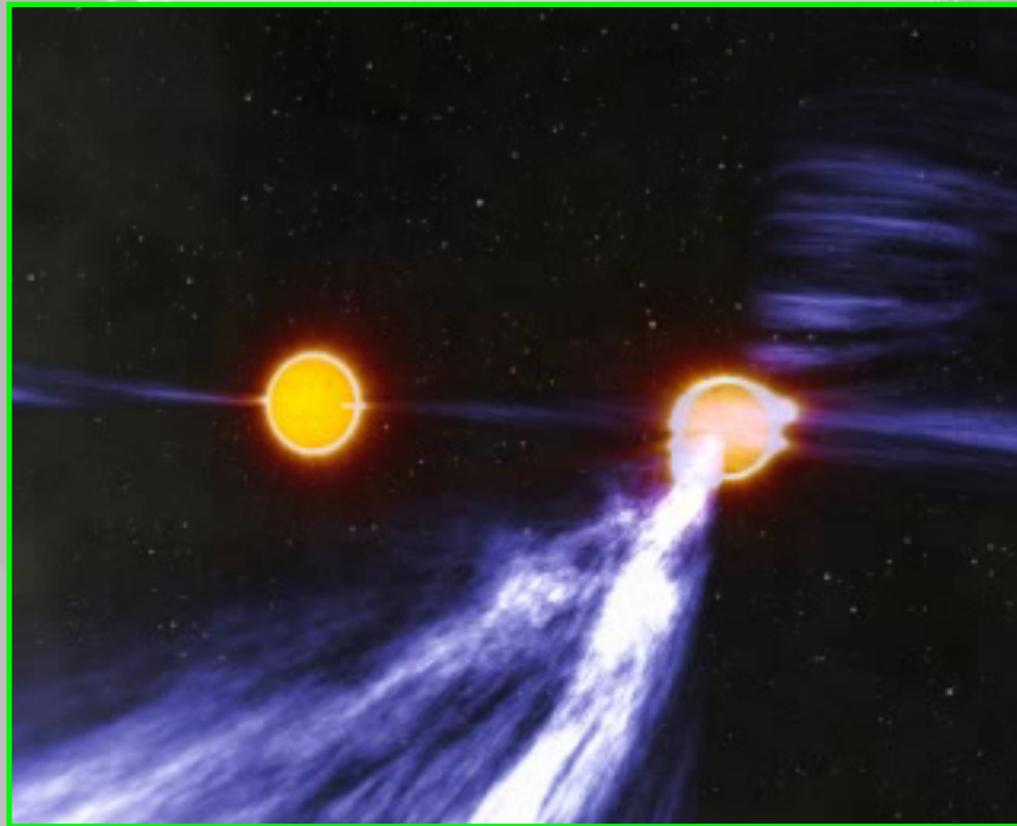
... quindi compie
circa 642 giri ogni secondo,
cioè più di 20 miliardi di giri
all'anno!



...in particolare gli studiosi delle pulsar hanno sfruttato il fatto che **l'emissione di onde gravitazionali comporta un restringimento dell'orbita** percorsa dalle due stelle...



... ad esempio studiando
la **Pulsar Doppia** ...

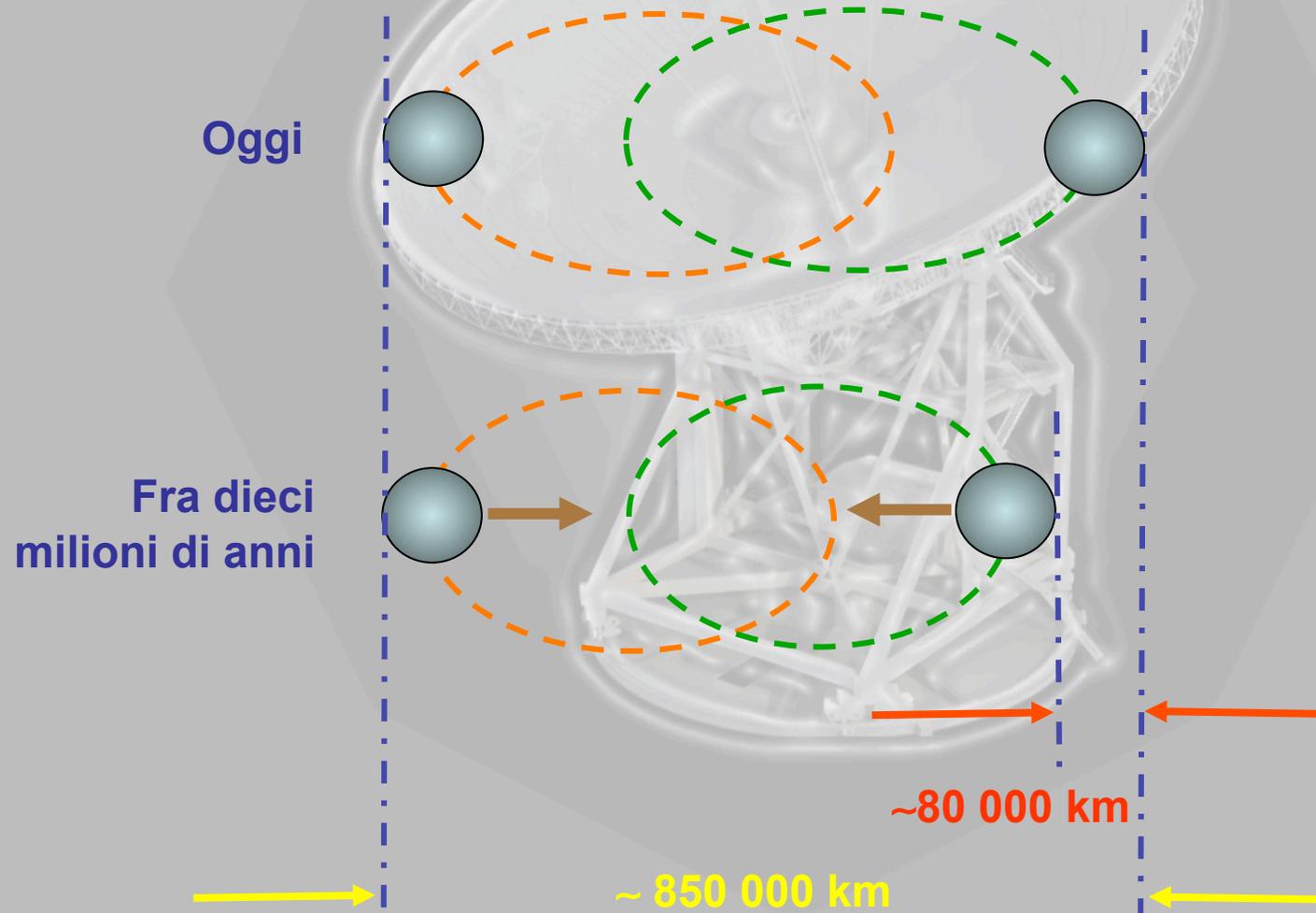


© Howe at ATNF

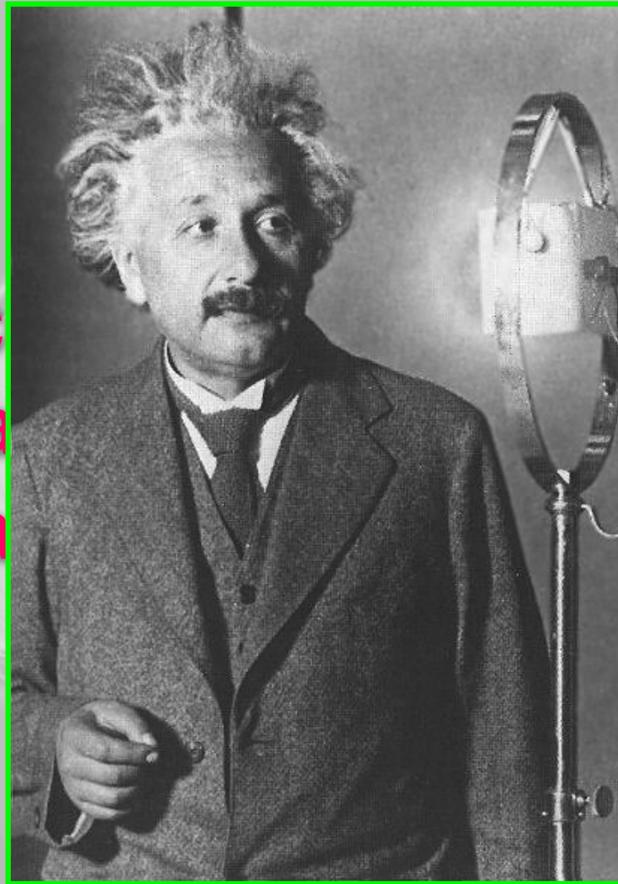
PSR J0737-3039A e PSR J0737-3039B

Già nel 2005 (dopo due soli anni di osservazione) si è misurato il restringimento dell'orbita:

cambia di circa 7 millimetri al giorno !!



... e c
osserva
possia



0 anni di
ar Doppia,
re che...

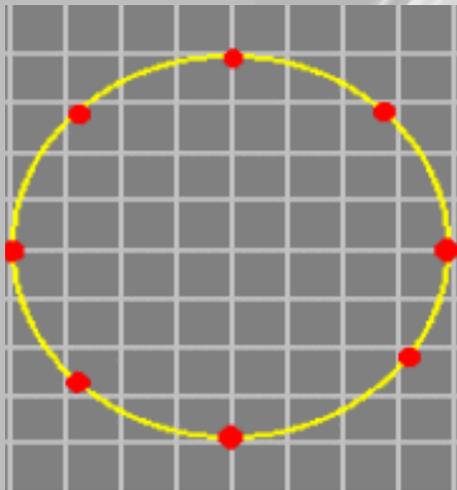
le predizioni di Albert Einstein riflettono il modo di
comportarsi della Natura con un

errore massimo dello **0.02% !!!!**

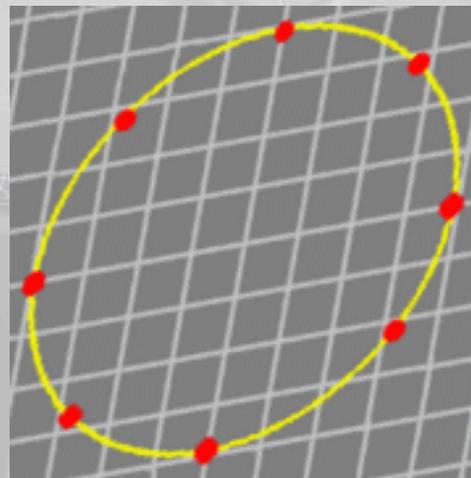
... stabilito dunque che qualche forma di radiazione gravitazionale deve esistere ...

... quando e come si catturerà direttamente un'onda gravitazionale ?

... le onde gravitazionali sono perturbazioni dello spazio-tempo il cui passaggio “deforma” ritmicamente ogni cosa ...

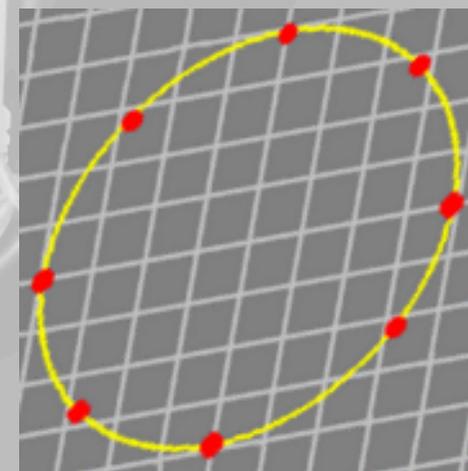


Onda
Gravitazionale
perpendicolare
allo schermo
(pol. +)



Onda
Gravitazionale
(pol. Circolare)

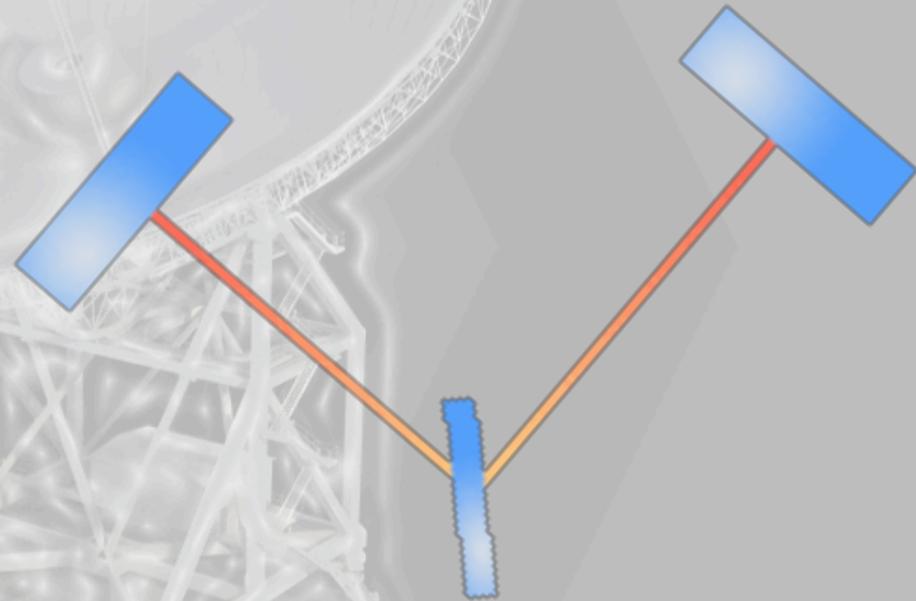
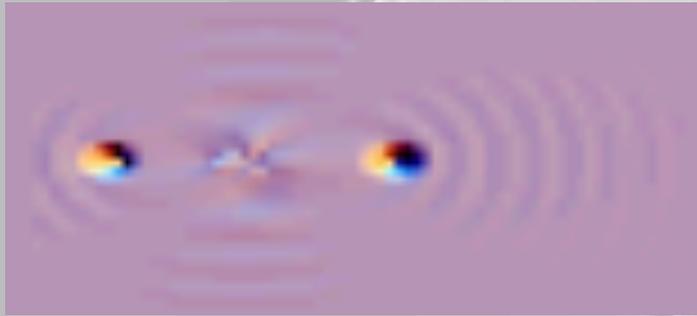
Onda
Gravitazionale
perpendicolare
allo schermo
(pol. x)



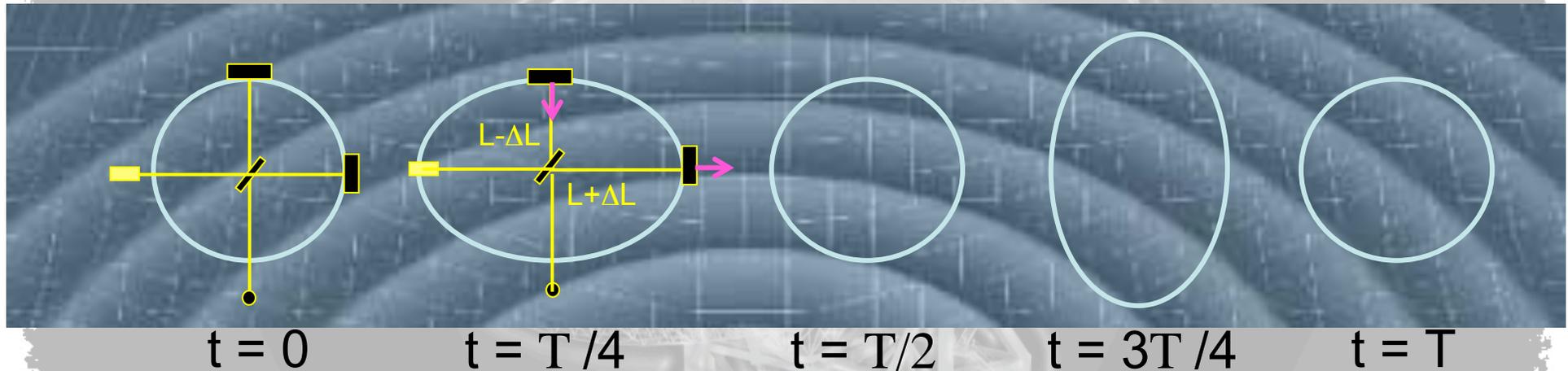


... onde gravitazionali di
frequenza elevata ...
circa 10-1000 Hertz

Principio di Funzionamento degli Interferometri per Onde Gravitazionali

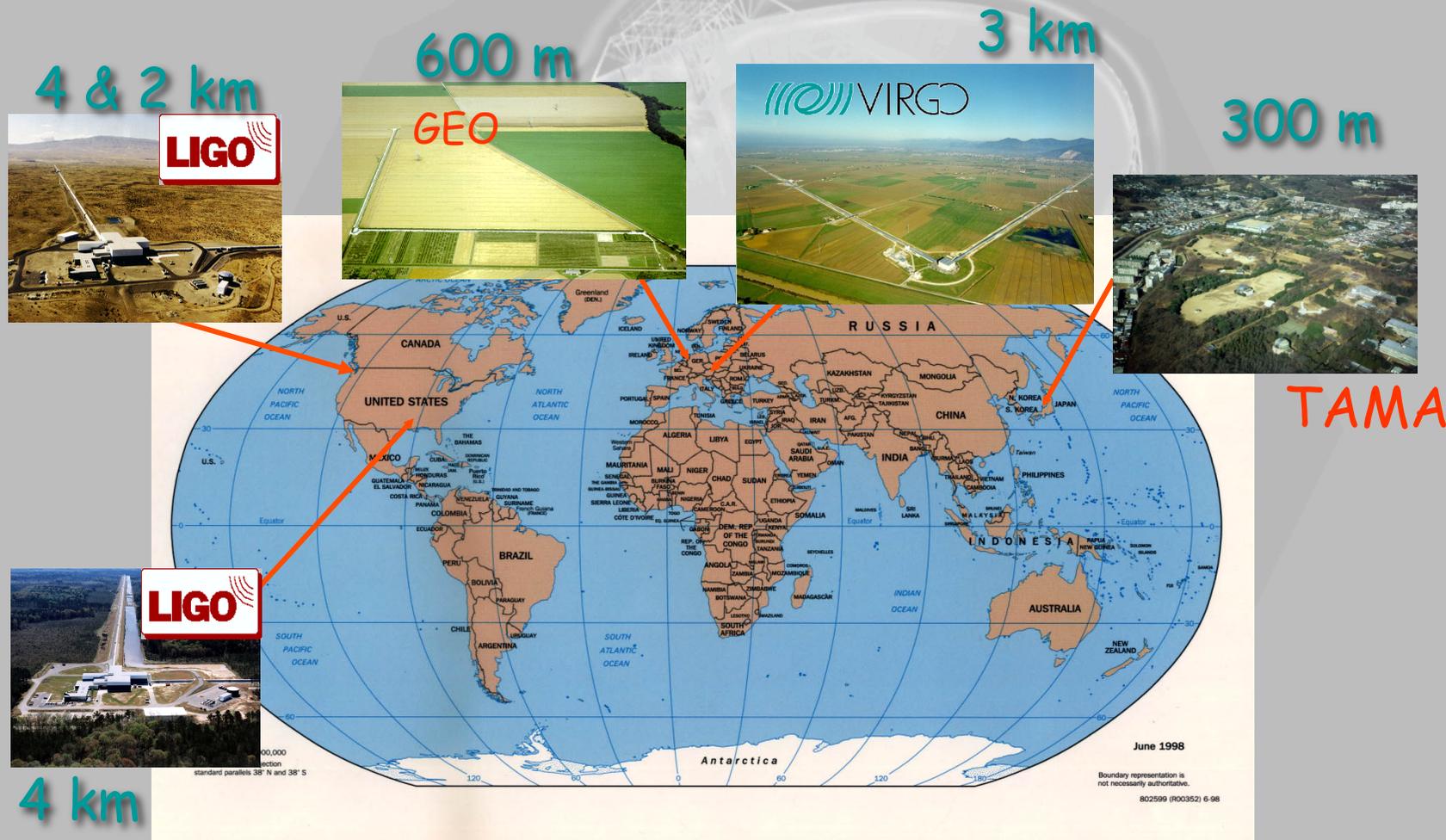


Principio di Funzionamento degli Interferometri



Gli effetti sono minutissimi: su lunghezze di 3 km, le variazioni di lunghezza sono attese dell'ordine di 10^{-15} millimetri: 1/1000 di nucleo atomico !

Rete di Interferometri per Onde Gravitazionali



... per ora nessuna osservazione diretta ... ma
"probabile" con la prossima generazione di strumenti ...

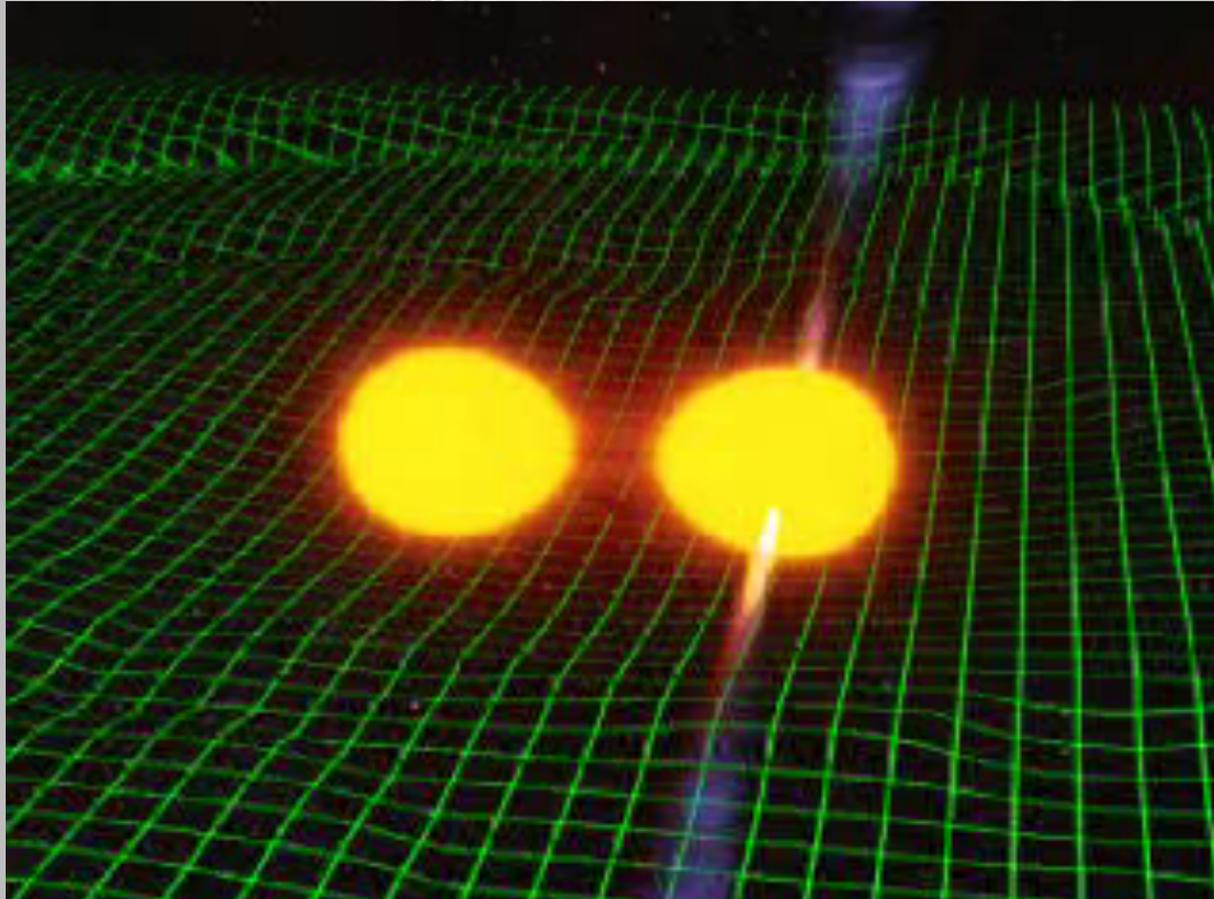
Sistema a Vuoto

**Richiesta per funzionamento: 10^{-9} mbar di pressione
su circa 7000 m^3 di tubo**

Specchi di riflessione del raggio laser



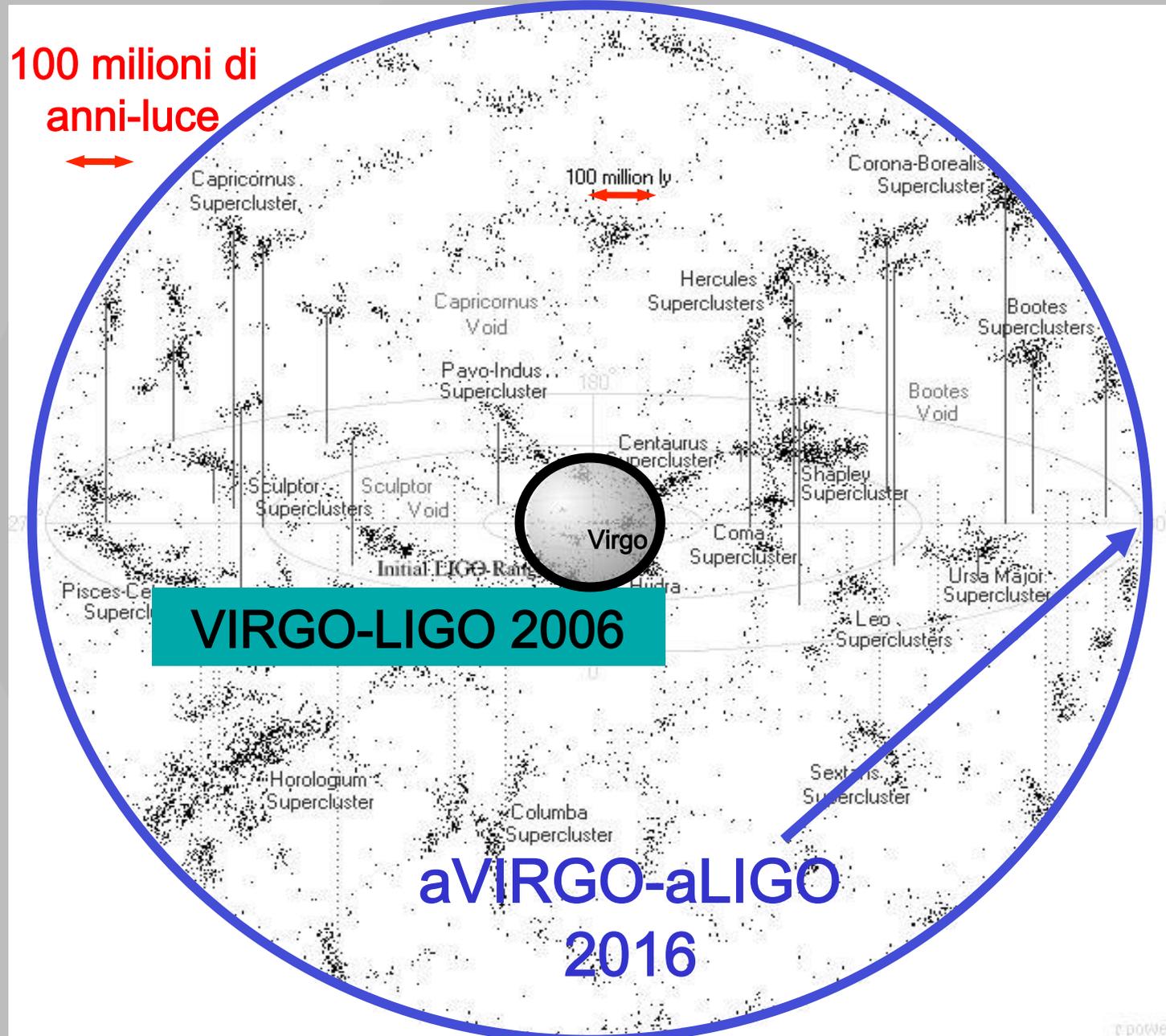
Potenzioli sorgenti celesti per gli Interferometri: coppie di Stelle di Neutroni nella fase di coalescenza



© Howe at ATNF

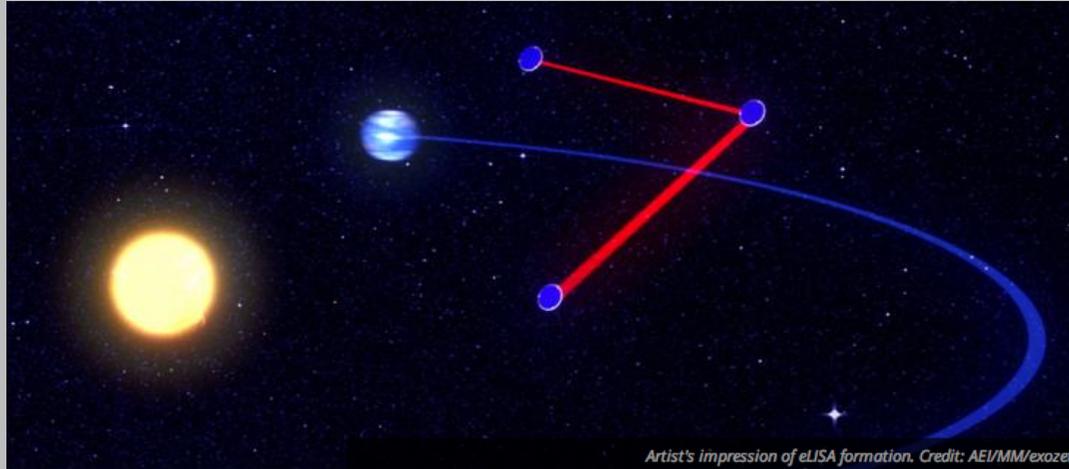
Periodi delle ultime orbite < 20 millisecondi = 50 Hertz

Raggio di rivelabilità di eventi di coalescenza di due Stelle di Neutroni



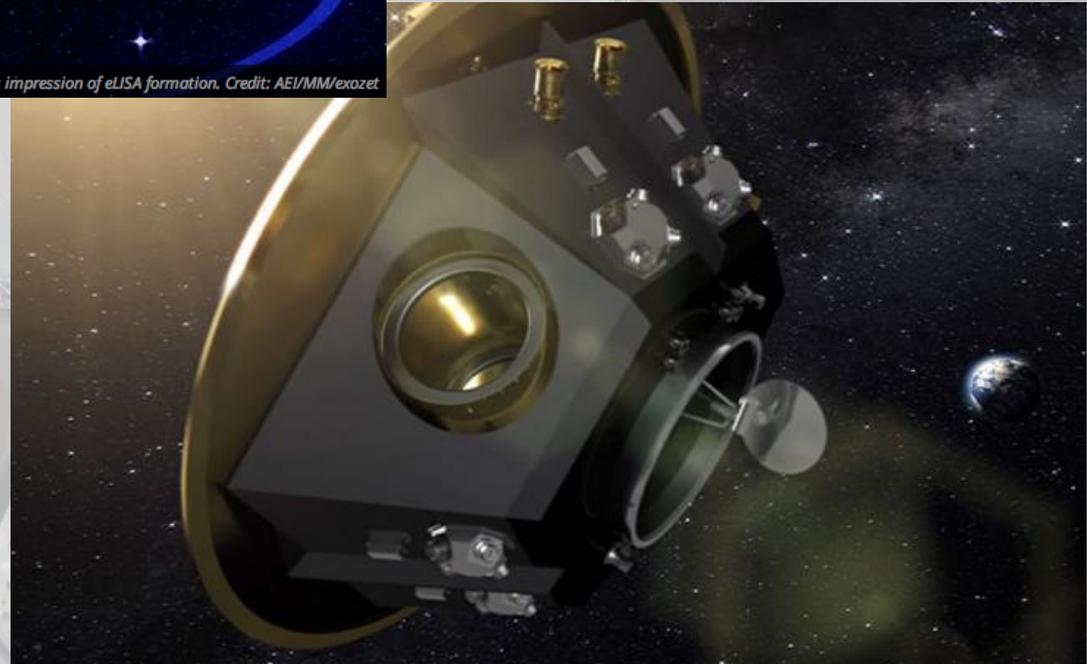


... onde gravitazionali di
frequenza intermedia ...
circa 0.1-10 milliHertz



Artist's impression of eLISA formation. Credit: AEI/MM/exozet

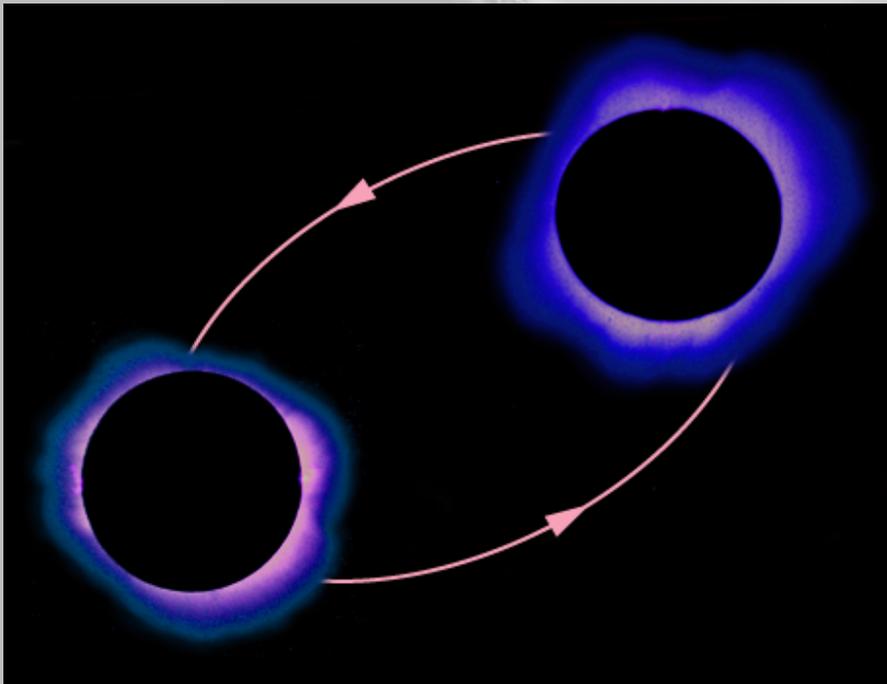
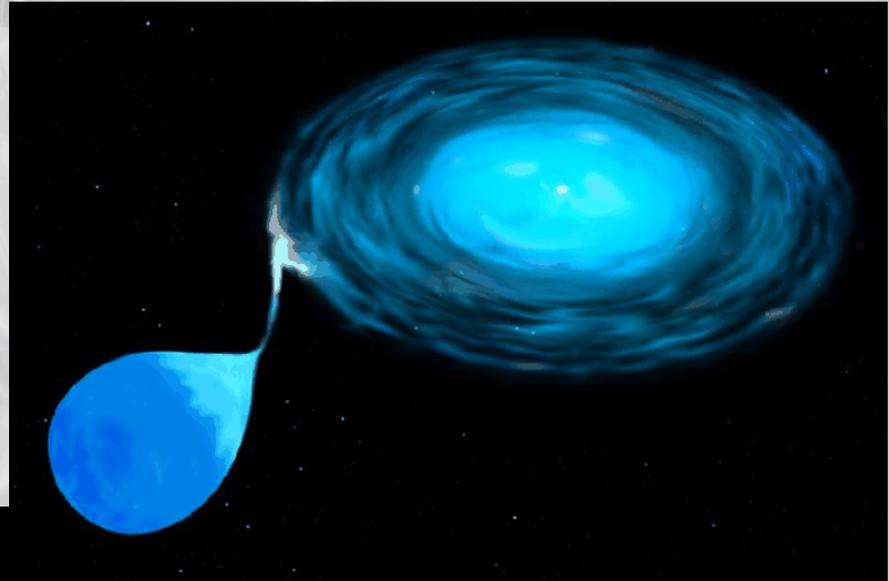
eLISA (2034)



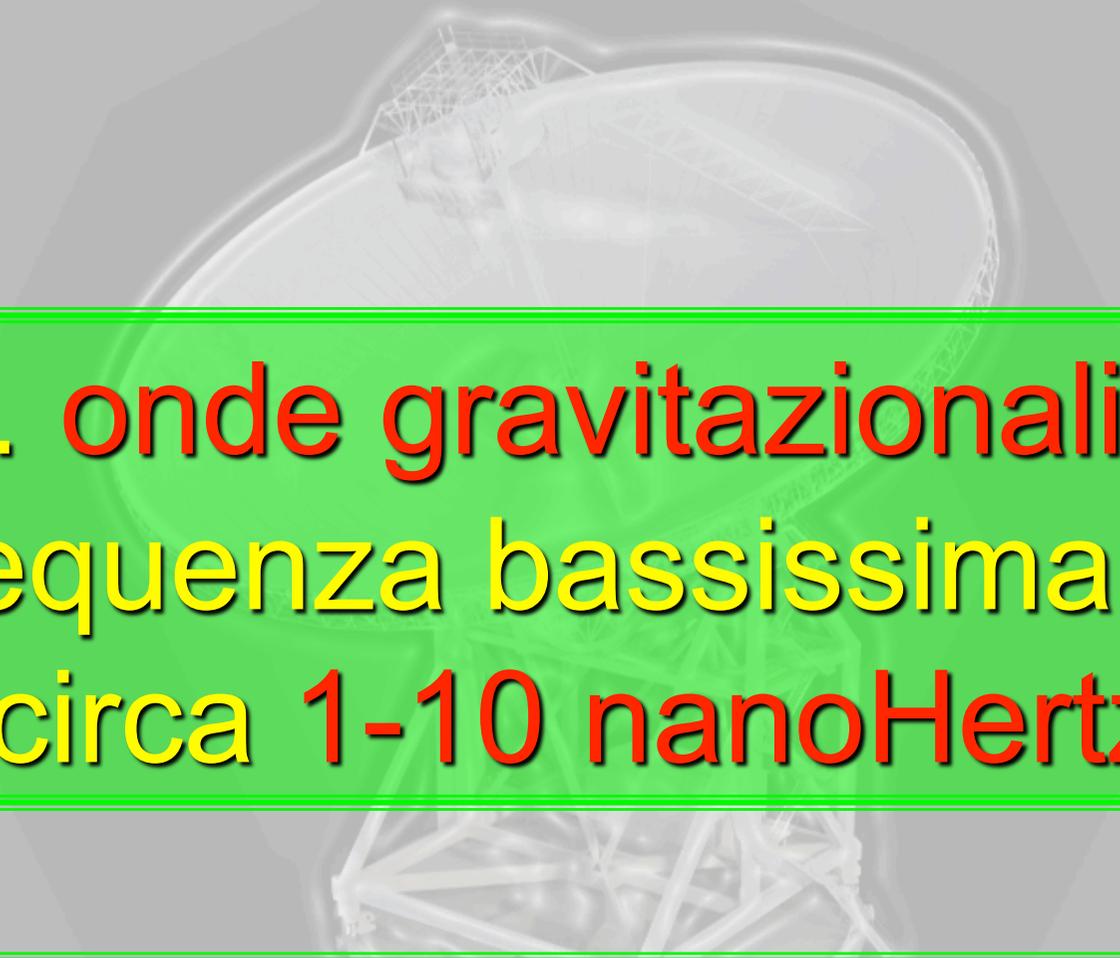
Un interferometro spaziale a forma di triangolo con lati di 1 milione di chilometri

Potenziali sorgenti celesti per LISA

Sistemi binari nella Via
Lattea con periodi orbitali di
ore/giorni



Sistemi binari di buchi neri
massicci al centro di Galassie
in fase di Coalescenza



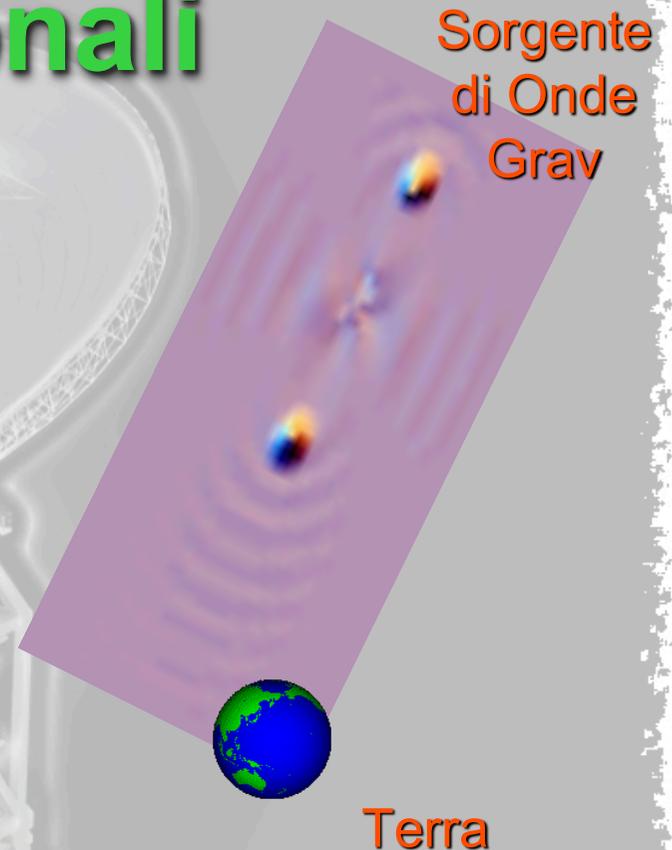
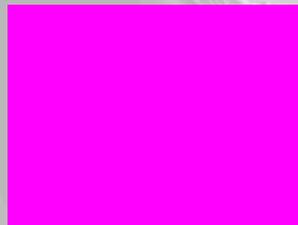
... onde gravitazionali di
frequenza bassissima ...
circa 1-10 nanoHertz

... tornano in gioco le PULSAR ...

Le Pulsar come rivelatori di Onde Gravitazionali

Ogni congiungente la Terra con una Pulsar radio può essere pensato come il braccio di un interferometro

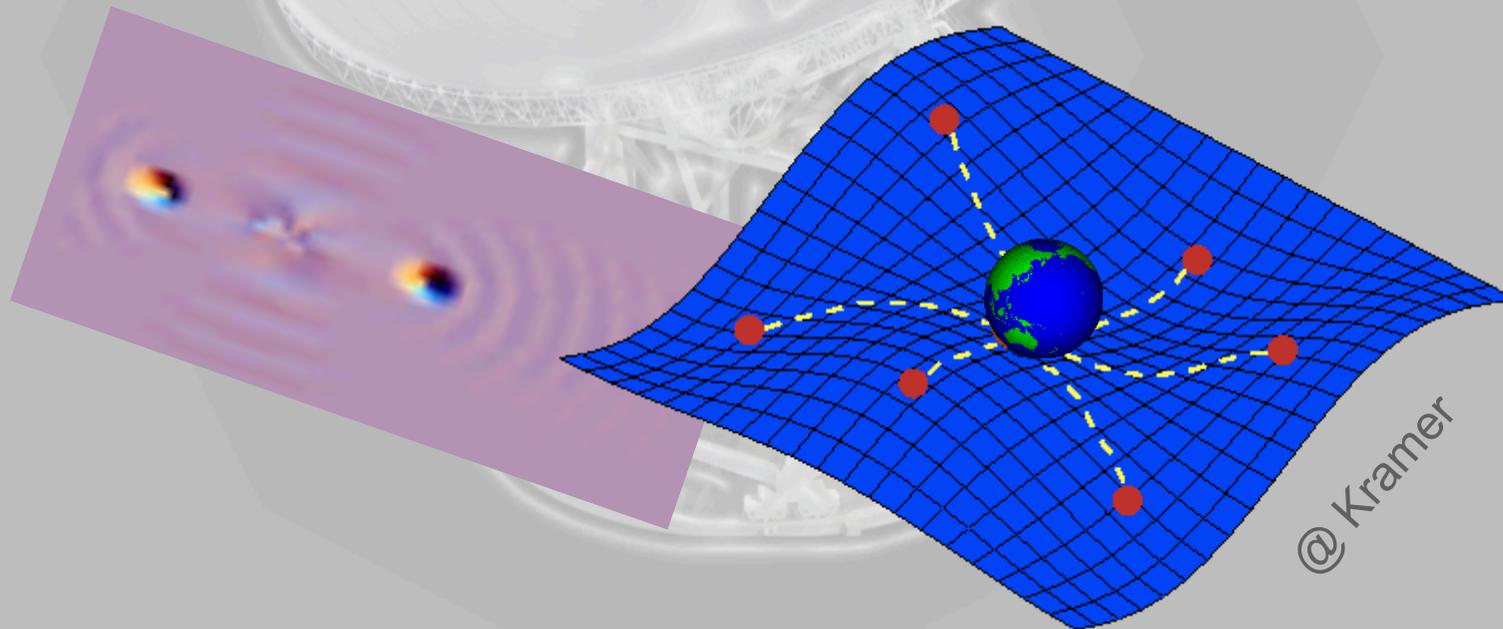
Radio Pulsar



Il passaggio di onde gravitazionali nello spazio-tempo ove si trovano la Terra e la Pulsar influisce sul ritmo dell' "orologio Pulsar" che osserviamo coi RadioTelescopi

Un pulsar timing array (PTA)

L'uso di **svariate radio pulsar** distribuite nel cielo permette di separare gli effetti di irregolarità nei singoli orologi-pulsar dagli effetti dovuti al passaggio di una genuina **ONDA GRAVITAZIONALE** attraverso la Terra.



Potenziali sorgenti celesti per i Pulsar Timing Array: Buchi Neri Supermassicci all'interno di Galassie in coalescenza



© Howe at ATNF

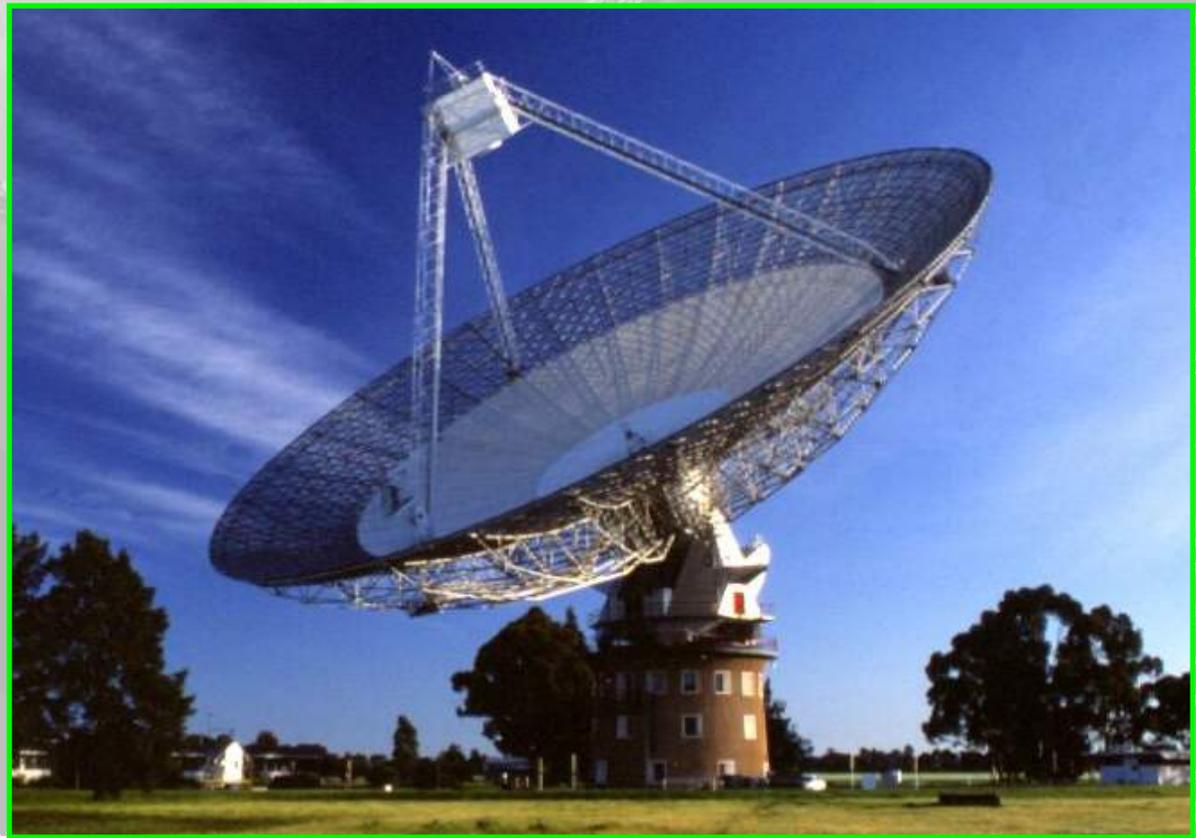
Periodi delle ultime orbite: circa mesi o alcuni anni,
ossia frequenze = 1-10 nanoHertz

I. Progetti attuali: PPTA

Parke Pulsar Timing Array: PPTA

Usa il radiotelescopio di Parkes da 64metri ed è iniziato nel ~ 2003

@ M.Burgay



II. Progetti attuali: nanoGrav

North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves: NANOGrav

E' basato in USA & Canada, e sfrutta gli eccellenti radio telescopi di Arecibo (da 300m) e di Green Bank (da 101m). Opera dal 2009

@ NRAO

@ Cornell



III. Progetti attuali: EPTA+LEAP

European Pulsar Timing Array

+

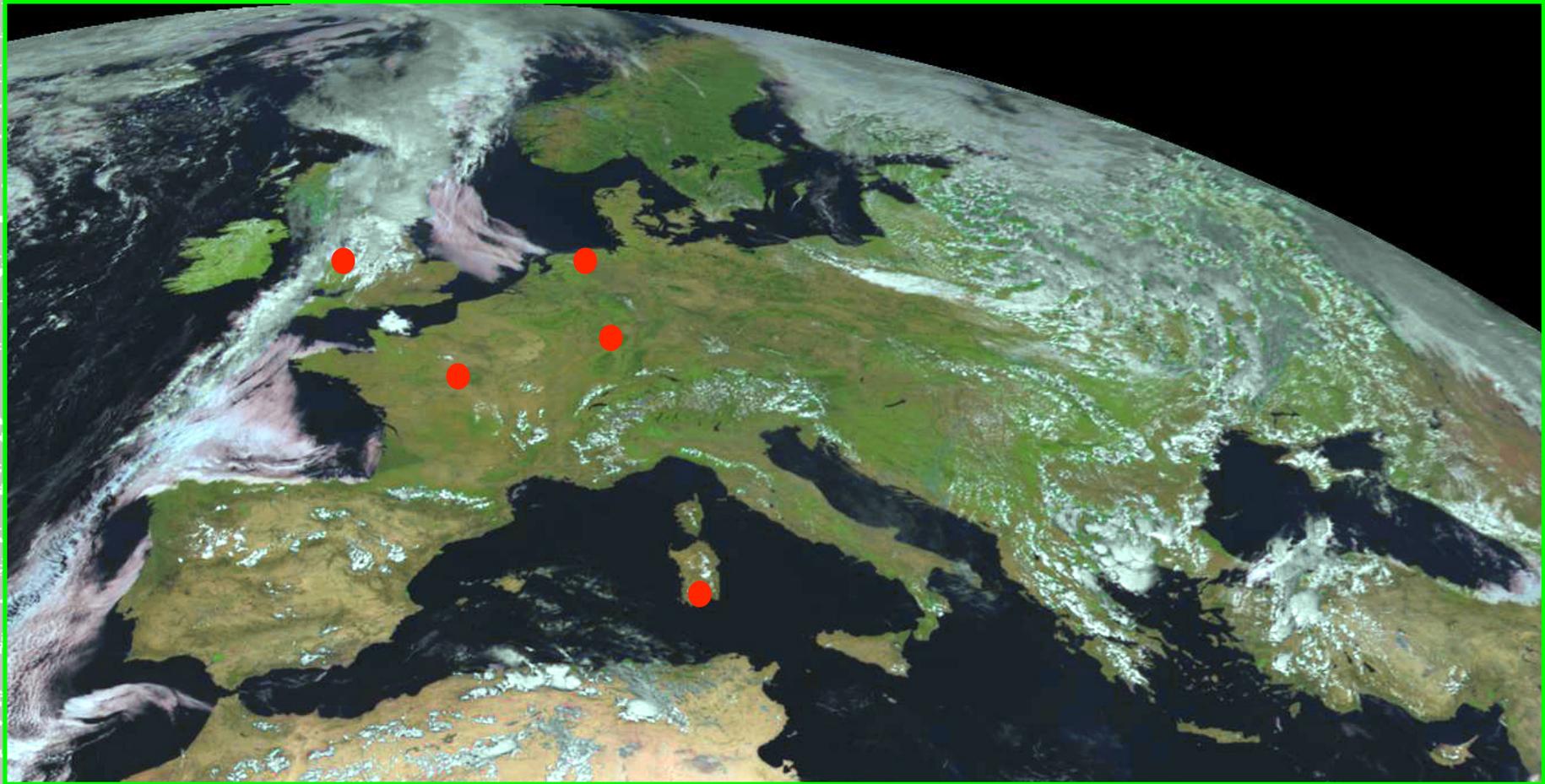
Large European Array for Pulsar

Basato in Europa

Opera dal 2006

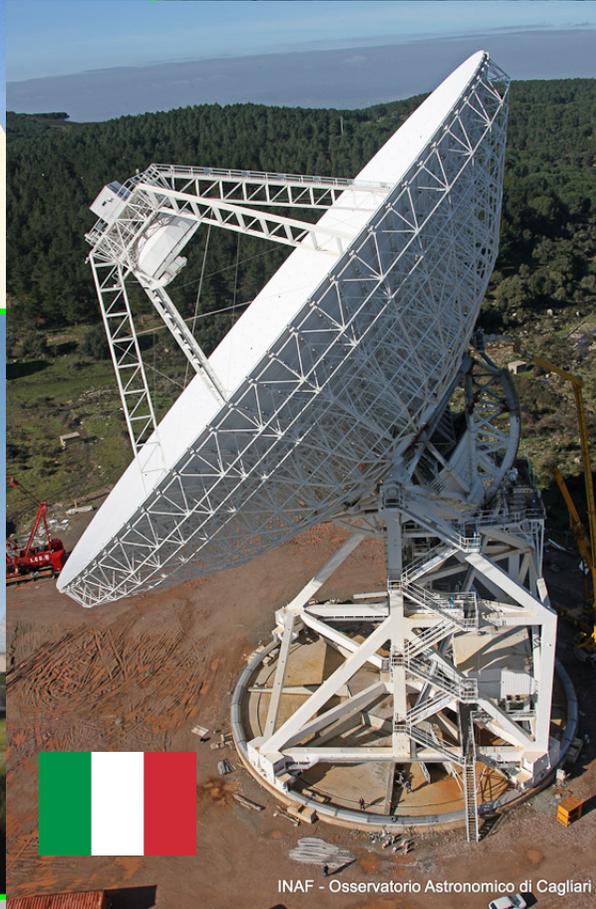


Le istituzioni coinvolte



University of Manchester, JBO, **GB** ASTRON, Un.Leiden, Un.Amsterdam **NL**
INAF Osservatorio Astronomico di Cagliari, **ITA** Nancay Observatory, **FR**
Max-Planck Institut fur Radioastronomie, **GER**

I telescopi utilizzati

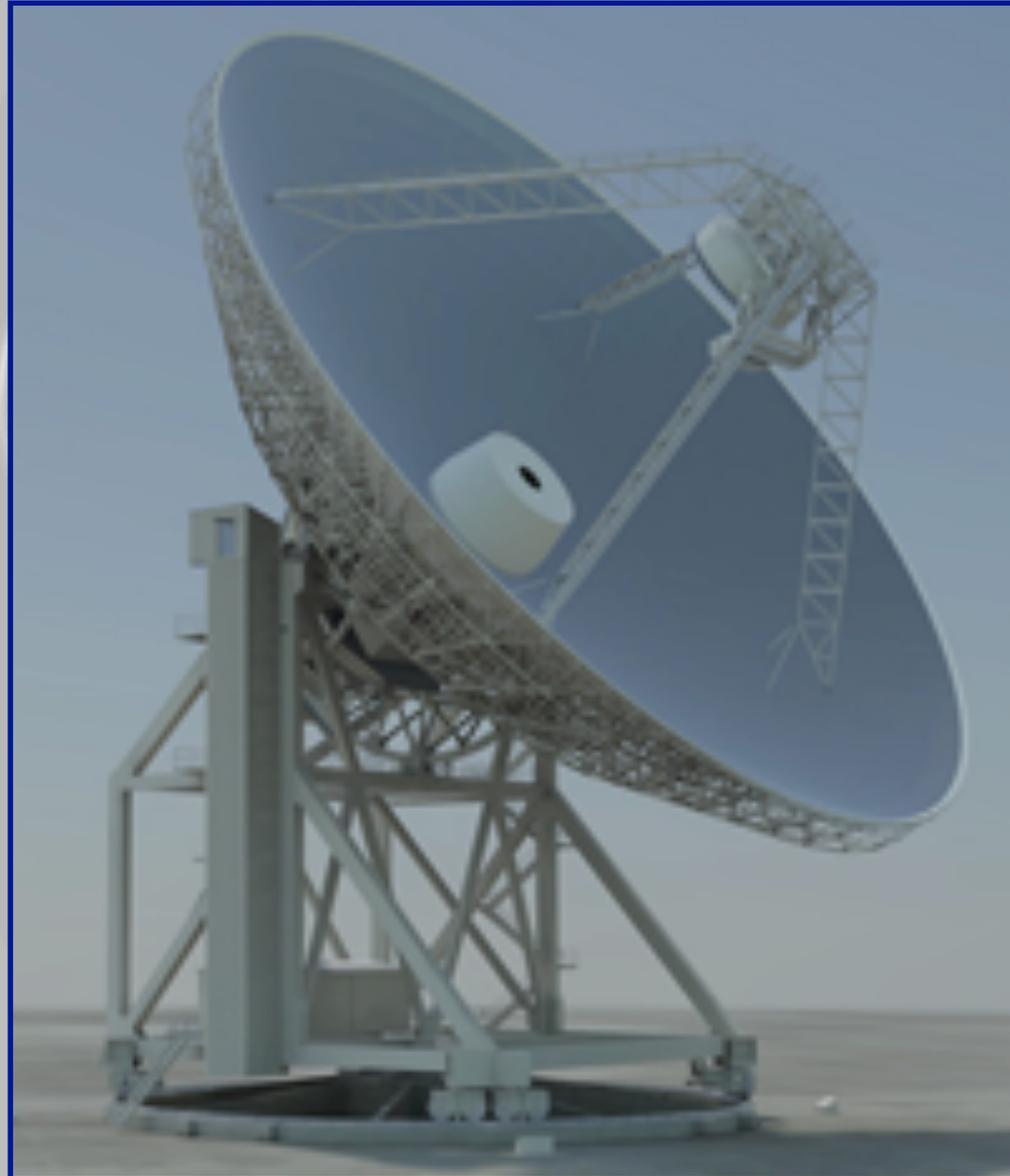


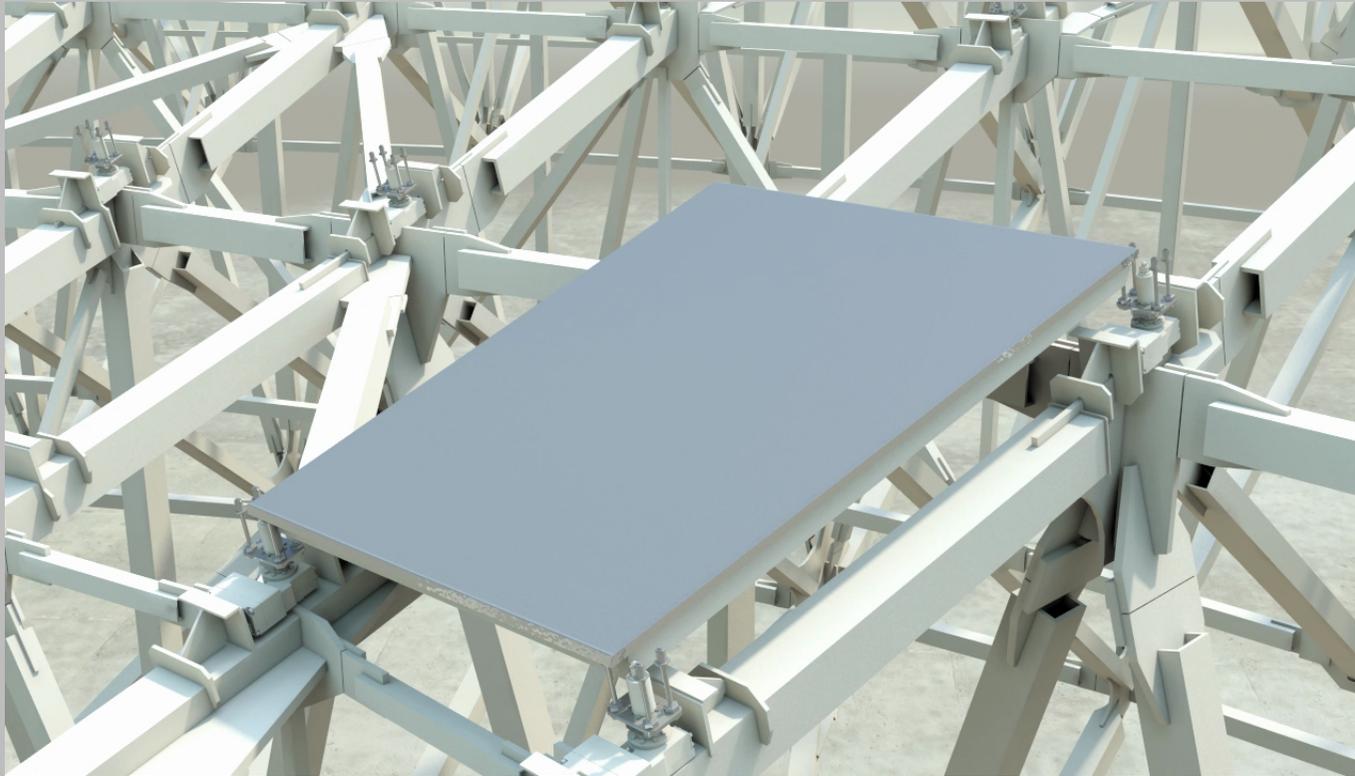
INAF - Osservatorio Astronomico di Cagliari



Effelsberg(100 m)-Westerbork(96 m)-Nancay (92 m)-Lovell(76 m)-Sardinia(64 m)

SARDINIA RADIO TELESCOPE (64 metri)





Superficie attiva : ~1000 pannelli

+

attuatori meccanici

Il luogo: San Basilio, 600 s.l.m. , 35 km a nord di Cagliari



*... nel novembre
2001 ...*

... lo stato dei lavori ...

... nel giugno 2007 ...





...nel Giugno
2008...



...Dicembre 2009...

...Maggio 2010...



dicembre 2010...



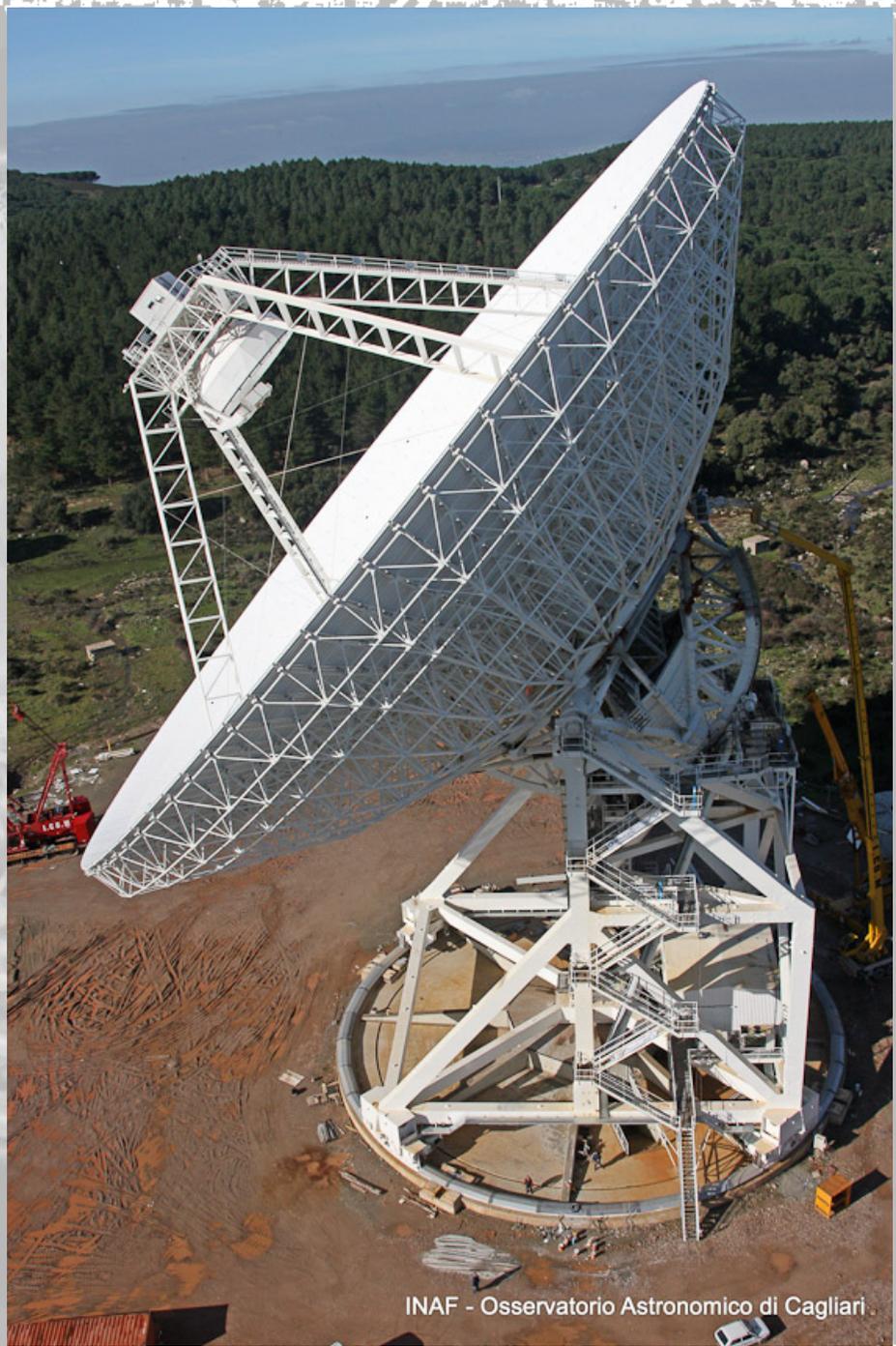
INAF - Osservatorio Astronomico di Cagliari



INAF - Osservatorio Astronomico di Cagliari

gennaio 2011...

maggio 2011...

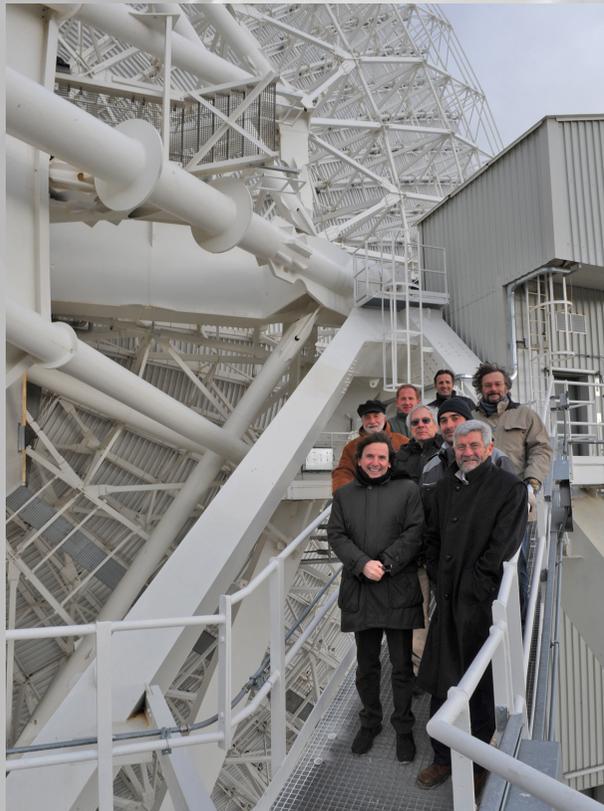


INAF - Osservatorio Astronomico di Cagliari

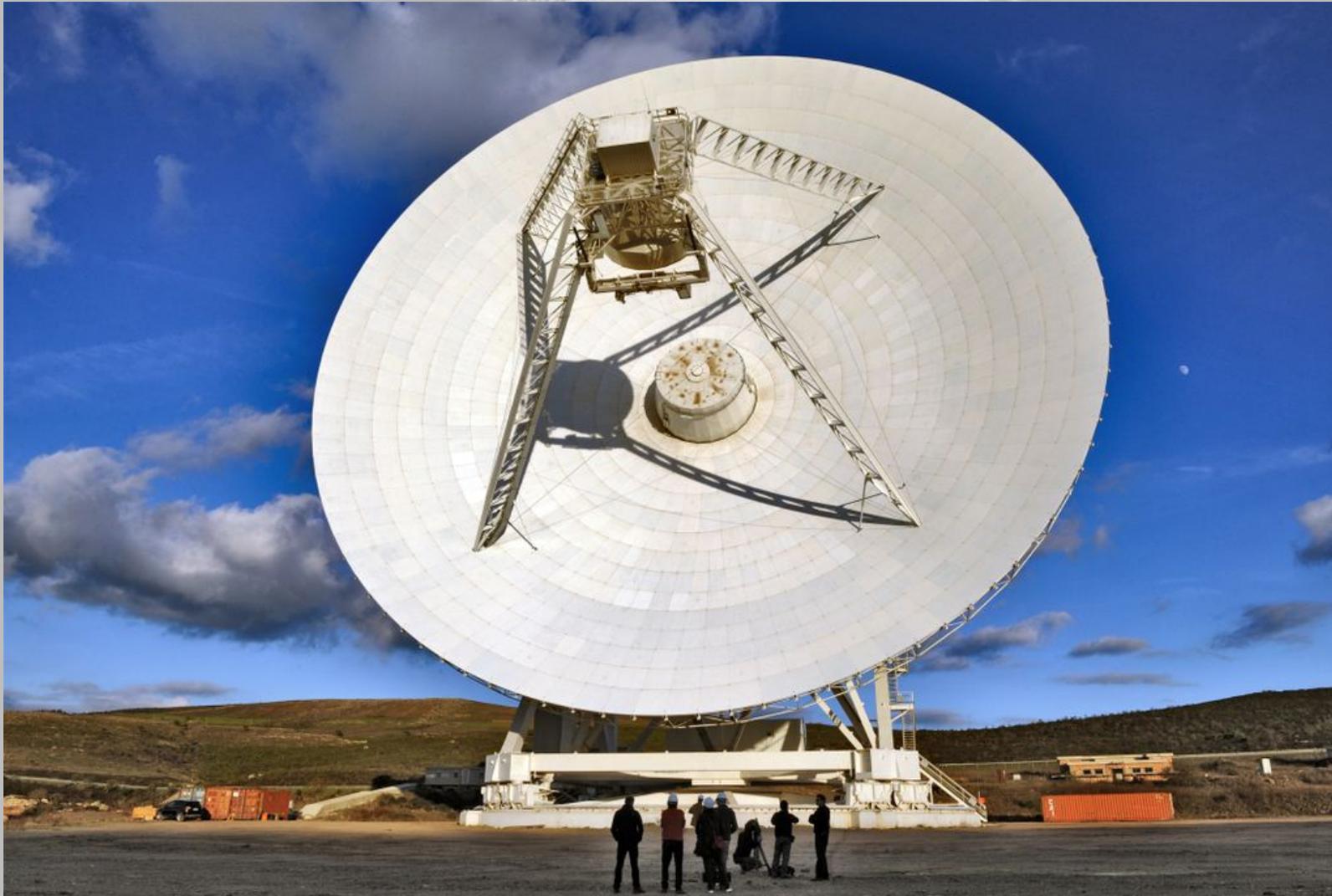
...autunno-inverno 2011/2012... **completamento
dell'allineamento dei pannelli della
superficie attiva**



Termine dei lavori “meccanici” e “elettrici” il 15 Febbraio 2012.
Inizio del commissioning tecnico (installazione e test dei ricevitori e dell’ “elettronica”) il 16 Febbraio 2012.



Inaugurazione il 30 settembre 2013



Oggi in fase finale di validazione scientifica: per la comunità mondiale a inizio 2015

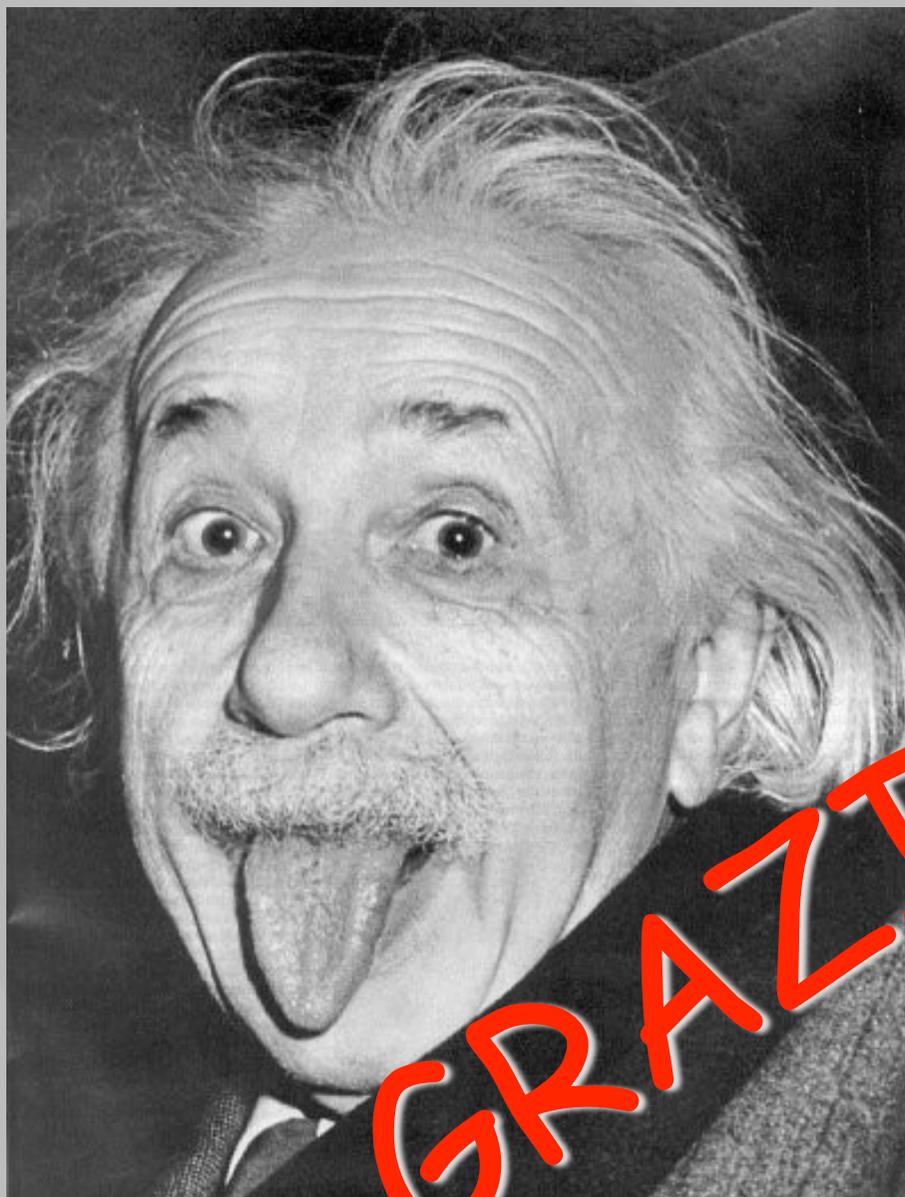


© INAF/OAC - ph G. Alvito

... vi attendiamo in visita a Pranu Sanguni...



© Alessio Putzu



GRAZIE!!