

Onde gravitazionali *prospettive 04/14*

Massimo Cerdonio INFN e Universita' Padova

IFAE GSSI e LNGS 10 aprile 2014

ringrazio vivamente Matt Evans di (LIGO), Giovanni Losurdo (INFN) PI di Advanced VIRGO, Stefano Vitale (INFN) PI di LISA Pathfinder per trasparenze e animazioni
(da loro presentazioni su invito a sessioni plenarie della GR20 -Amaldi10 Varsavia luglio 2013 >>> disponibili sul sito)

Cosa sono le onde gravitazionali ?

Vibrazioni **dello** spazio-tempo

*per contrasto le onde em sono vibrazioni em **nello** spazio-tempo*

Si possono rivelare ?

(se lo spazio mi si accorcia/allunga con l'onda.....)

Sí' per esempio, secondo uno dei metodi rivelazione, producono sfasamenti in un interferometro di Michelson
la fase e' uno scalare e quindi invariante di gauge (eq Einstein linearizzate in campo debole , analoghe a elettromagnetismo)
l'effetto e' misurabile ed e' lo stesso per qualsiasi osservatore

Gia' rivelato qualcosa ?

Sí' (si dice...) indirettamente

pulsars in sistemi binari spiralizzano l'una vs l'altra perche' il sistema perde energia via og secondo la formula di Einstein del 1916

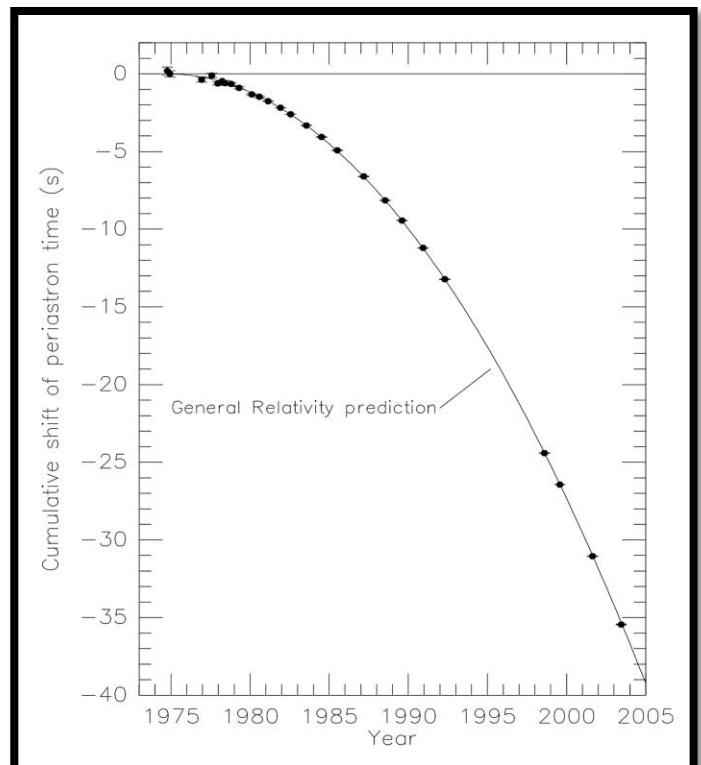
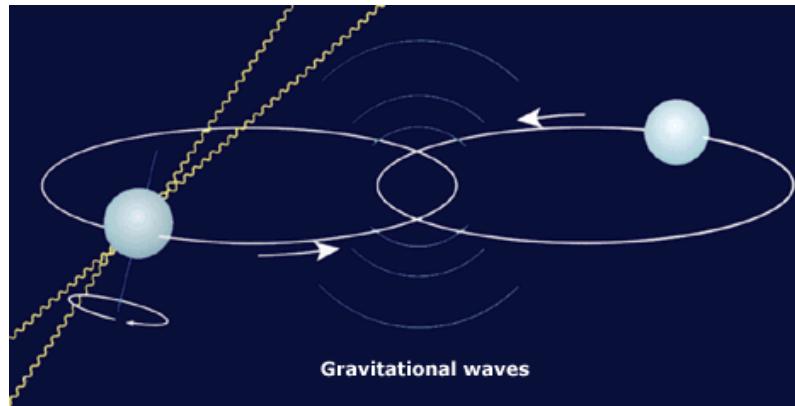
BICEP2 > imprint di og primordiali nella polarizzazione della CMB

GW DO EXIST

Hulse & Taylor Nobel 1993

- PSR1913+16: pulsar bound to a “dark companion”, 7 kpc from Earth
- Relativistic clock: $v_{\max}/c \sim 10^{-3}$
- GR predicts such a system to loose energy via GW emission: orbital period decrease
- Radiative prediction of general relativity verified at 0.2% level [astro-ph/0407149]

$P(d)$	0322997448930(4)
$d\omega/dt$ (deg/yr)	4.226595(5)
M_p	$1.4414 \pm 0.0002 M_\odot$
M_c	$1.3867 \pm 0.0002 M_\odot$



dopo Hulse&Taylor sono stati osservati numerosi sistemi binari compatti
in alcuni addirittura tutte e due le ns sono pulsars

confermano l'emissione di og secondo la formula di quadrupolo di Einstein

aspettiamo la rivelazione da LIGO/Virgo per sapere se ci sono ???
NO

aspettiamo se LIGO/Virgo rivelano per decidere se lanciare LISA ???
NO copertura in frequenza complementare + diversa fisica

e infatti finalmente deciso!!!

"THE GRAVITATIONAL UNIVERSE" has been **selected**
on 28 November 2013 ESA decided on next large missions in the time frame 2028-2034 <https://www.elisascience.org/>

a luglio 2015 volera' il LISA Pathfinder che dimostrera' la tecnologia

rivelatori/osservatori realizzati o in realizzazione

(metodo "diretto": misura del moto relativo tra masse
in caduta libera > *accelerometri differenziali*
in gergo GR "deviazione geodetica")

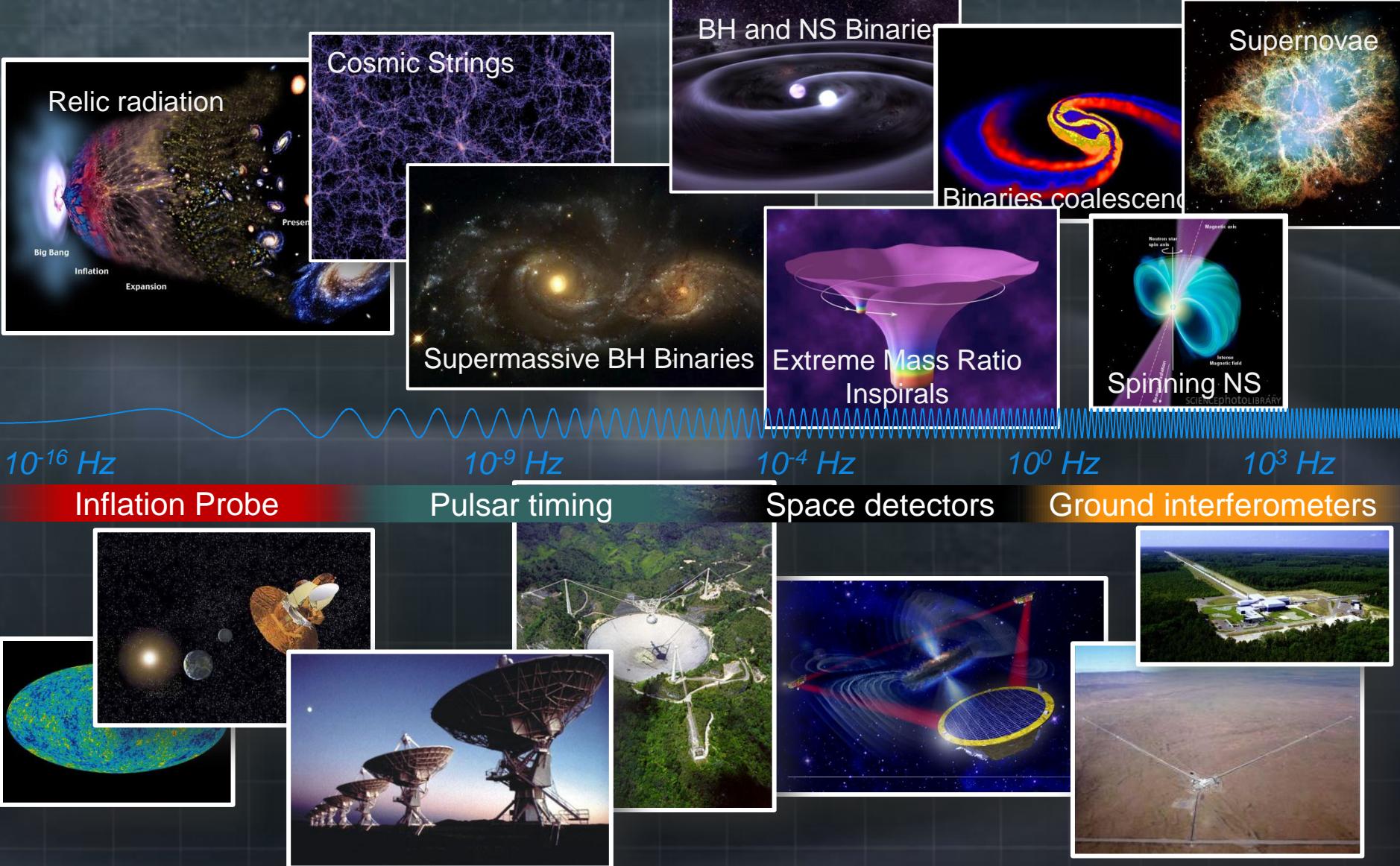
interferometri laser a terra > Michelson a braccia da km,
masse da 10 kg Advanced LIGO/Virgo al limite del
principio di incertezza di Heisenberg

transpoder laser nello spazio > tra masse a 1 milione km

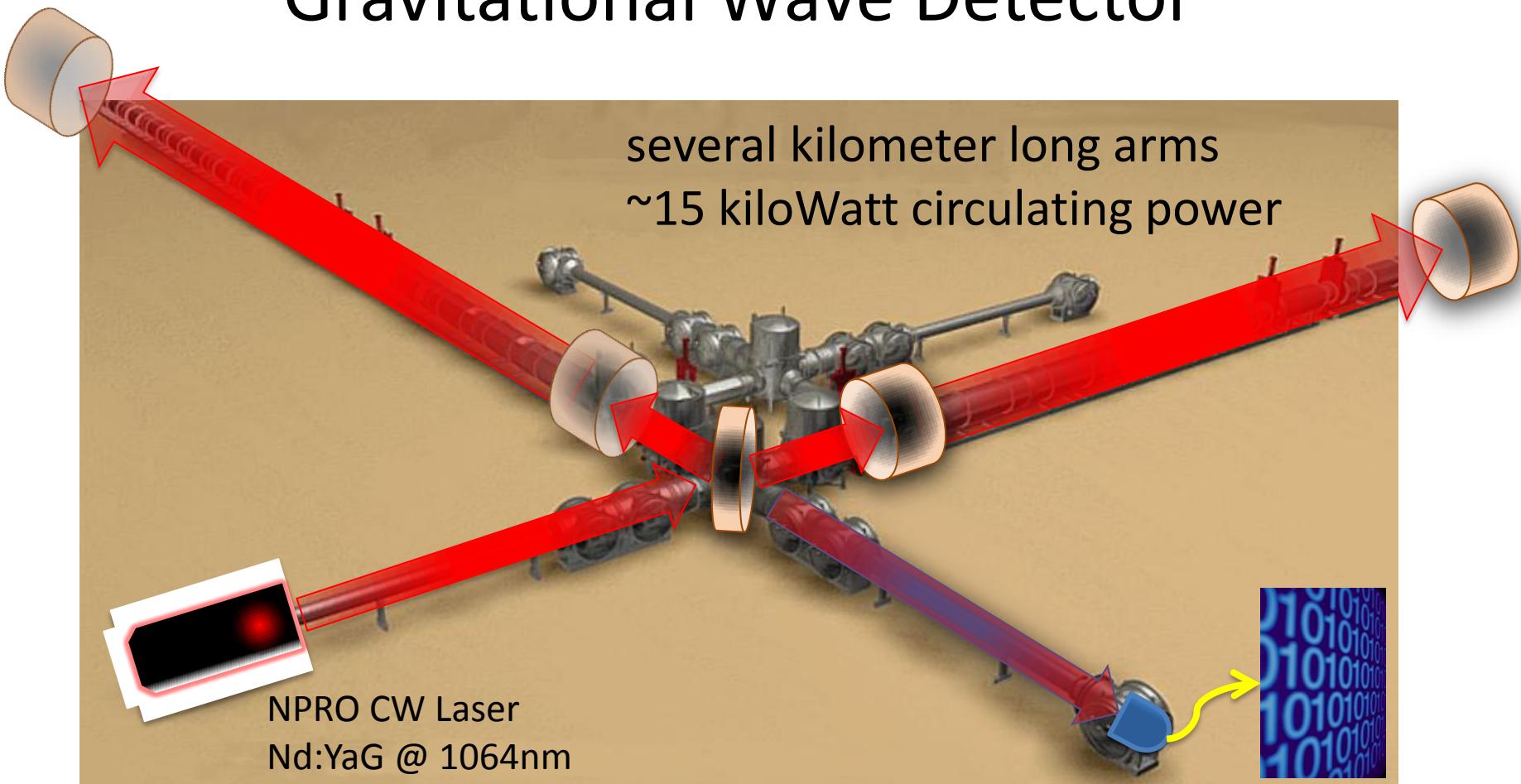
pulsars > decodifica del moto relativo di ~ 30 pulsars

poi (metodo indiretto): dopo BICEP2, in attesa di PLANCK (autunno 2014 ?)

Da cosa nel cosmo, a che frequenze e con che strumenti



Simplified Ground Based Interferometric Gravitational Wave Detector

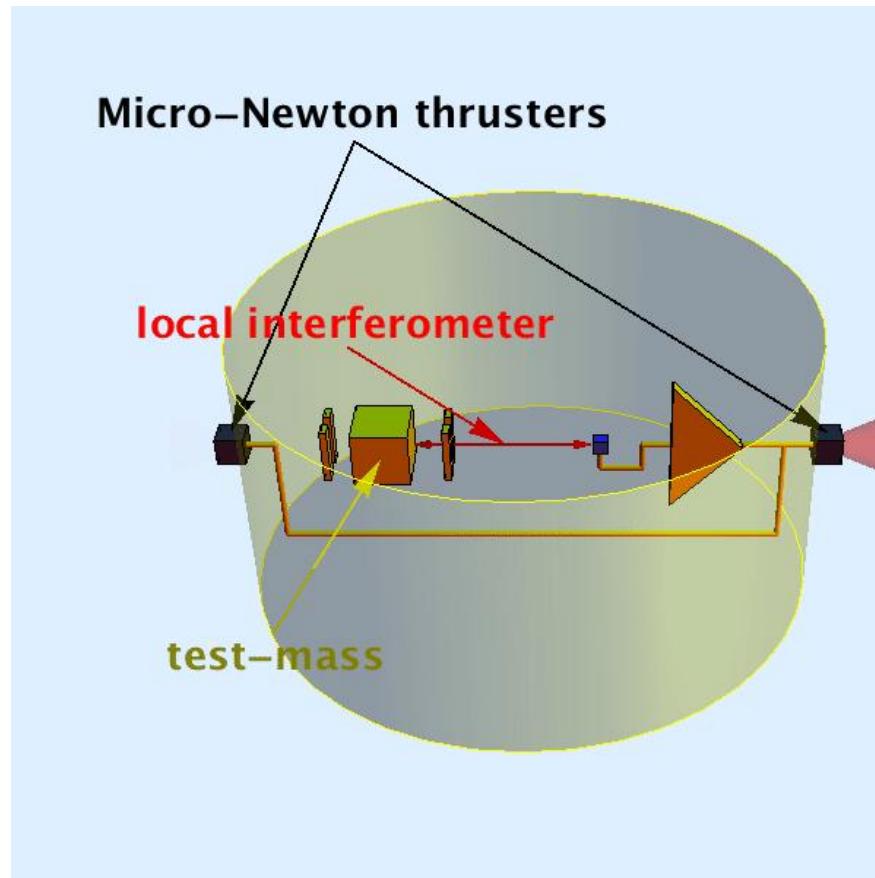


Ground Interferometers Advanced Detectors Network



Basic concept of LISA/eLISA

- Non contacting spacecraft (drag-free)
 - Position of spacecraft relative to test-mass is measured by local interferometer
 - Spacecraft is kept centered on test-mass by acting on micro-Newton thrusters.

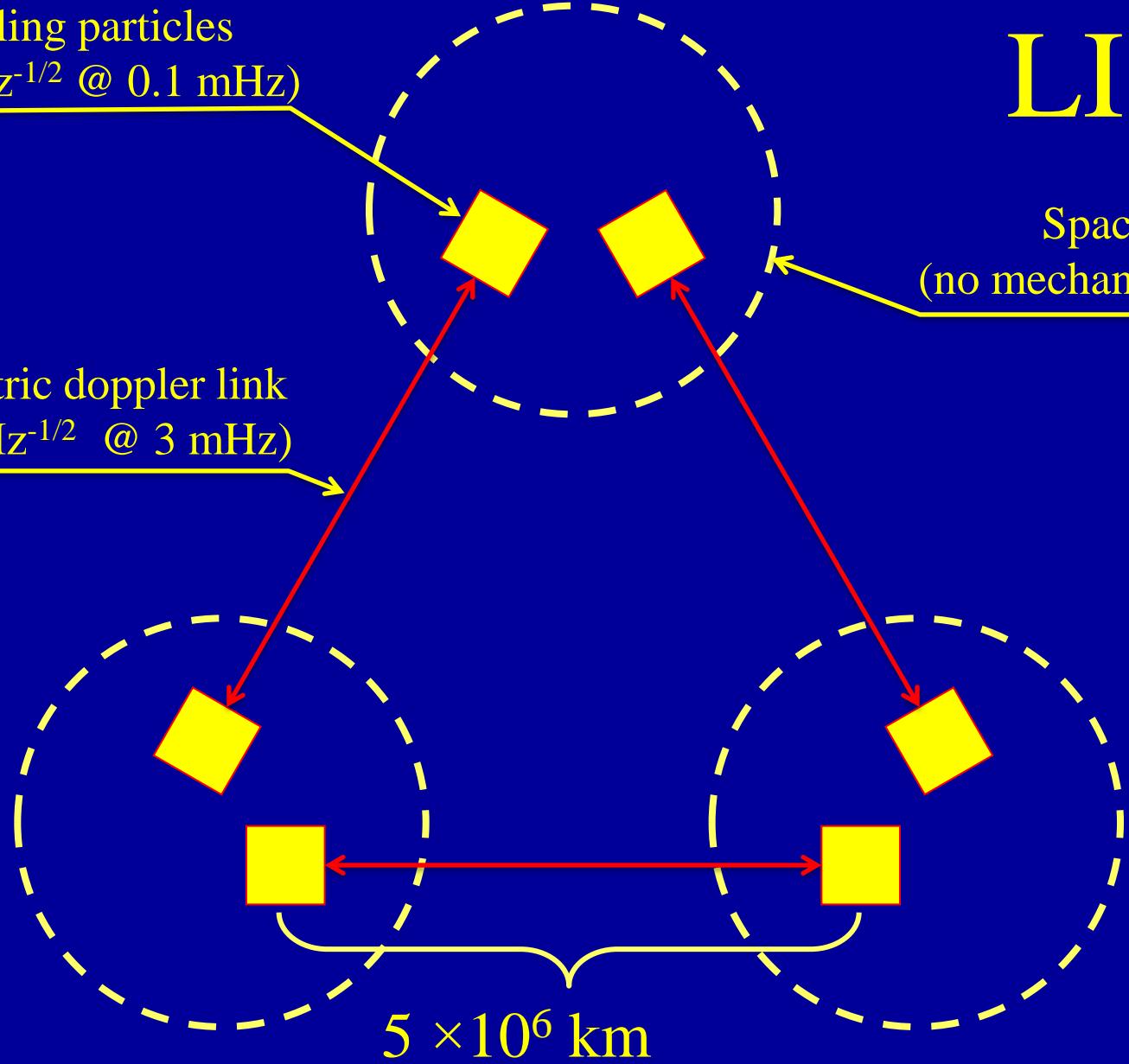


LISA

Free falling particles
($0.3 \text{ fg}/\sqrt{\text{Hz}}^{1/2}$ @ 0.1 mHz)

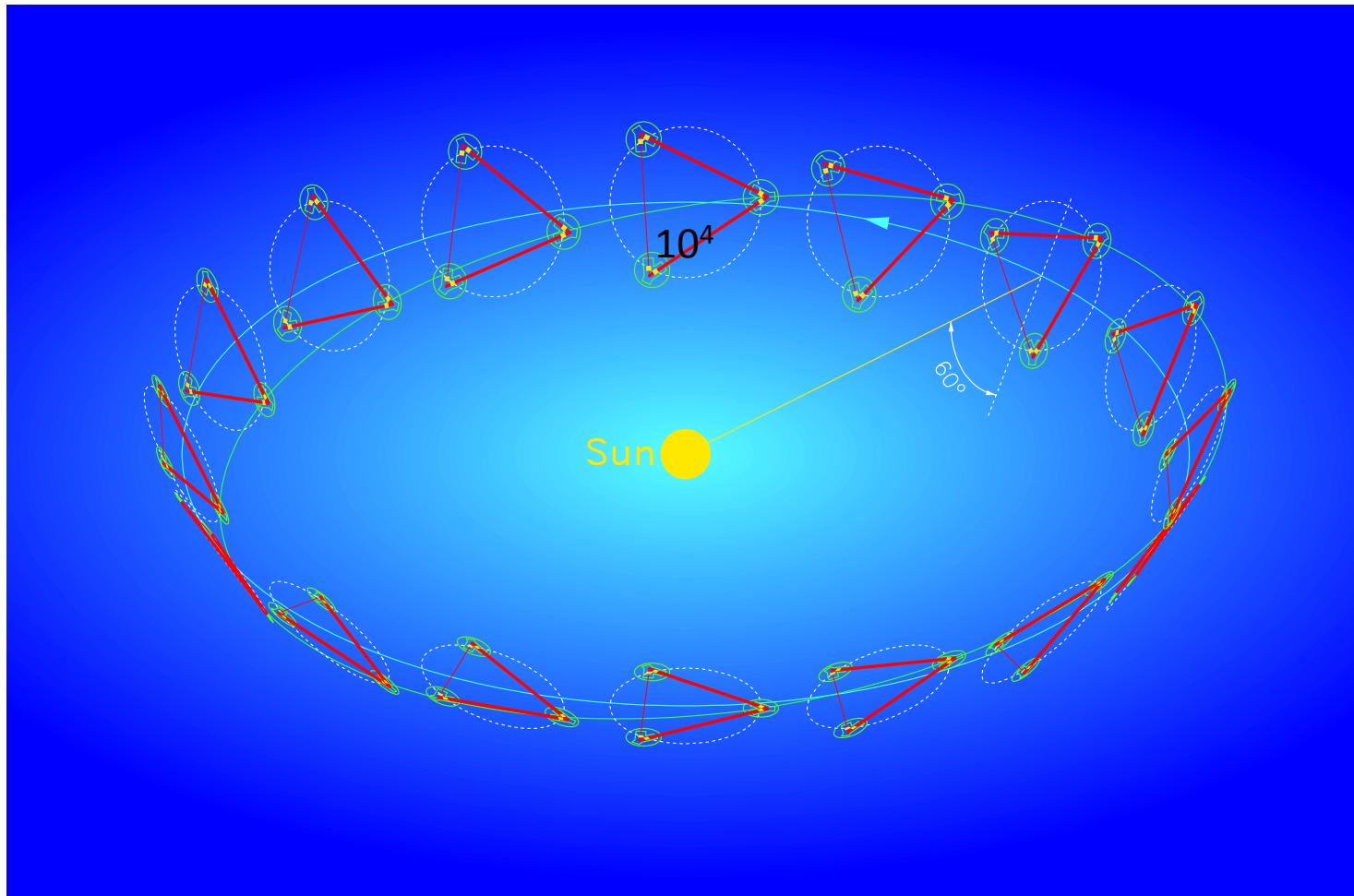
Spacecraft
(no mechanical contact)

Interferometric doppler link
($40 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}^{1/2}$ @ 3 mHz)



Basic concepts of LISA/eLISA

- Orbits:
 - Satellites follow independent heliocentric orbits. No formation keeping needed
 - Constellation rotates within waves and give source location

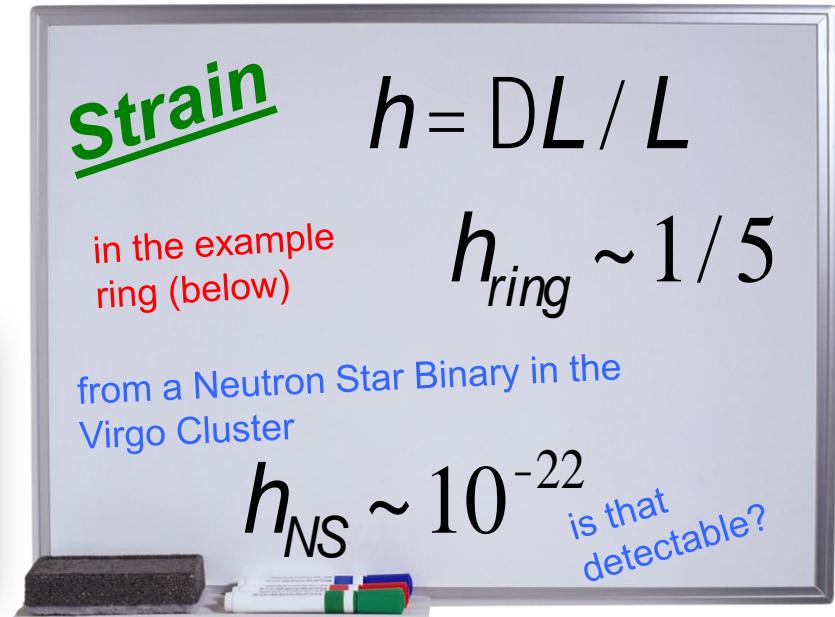
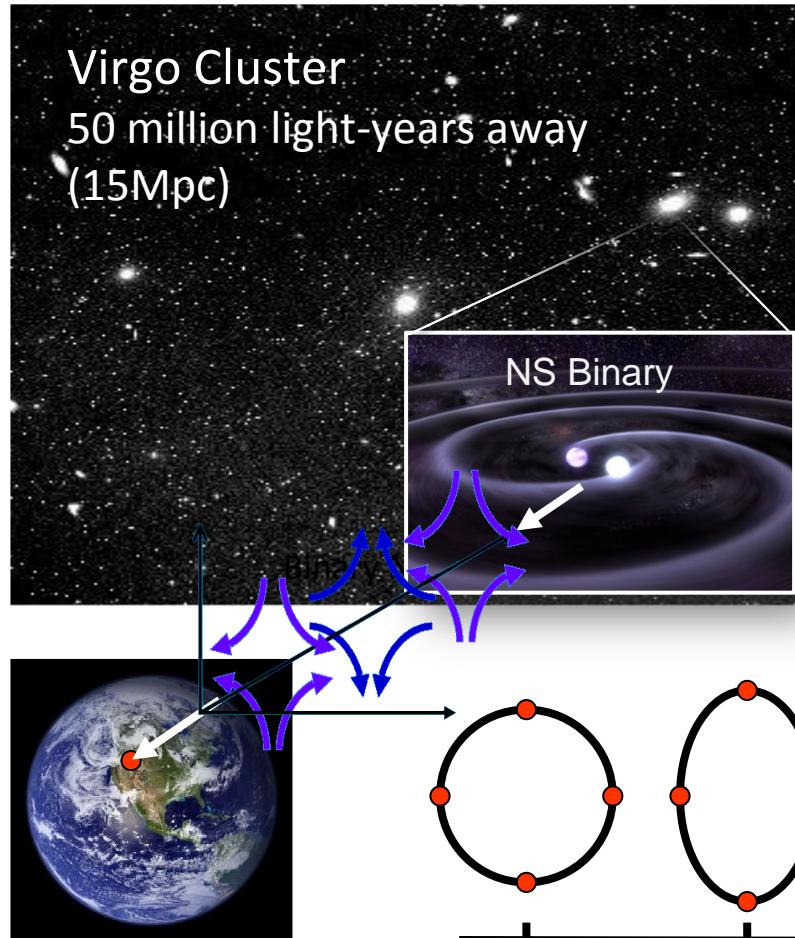


International Pulsar Timing Array (IPTA) > consortium of consortia
European Pulsar Timing Array (EPTA), North American Nanohertz
Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav), Parkes Pulsar Timing
Array (PPTA)

IPTA > gravitational waves using an array of ~ 30 pulsars



Perche' e 'cosi' difficile rivelarle direttamente ?

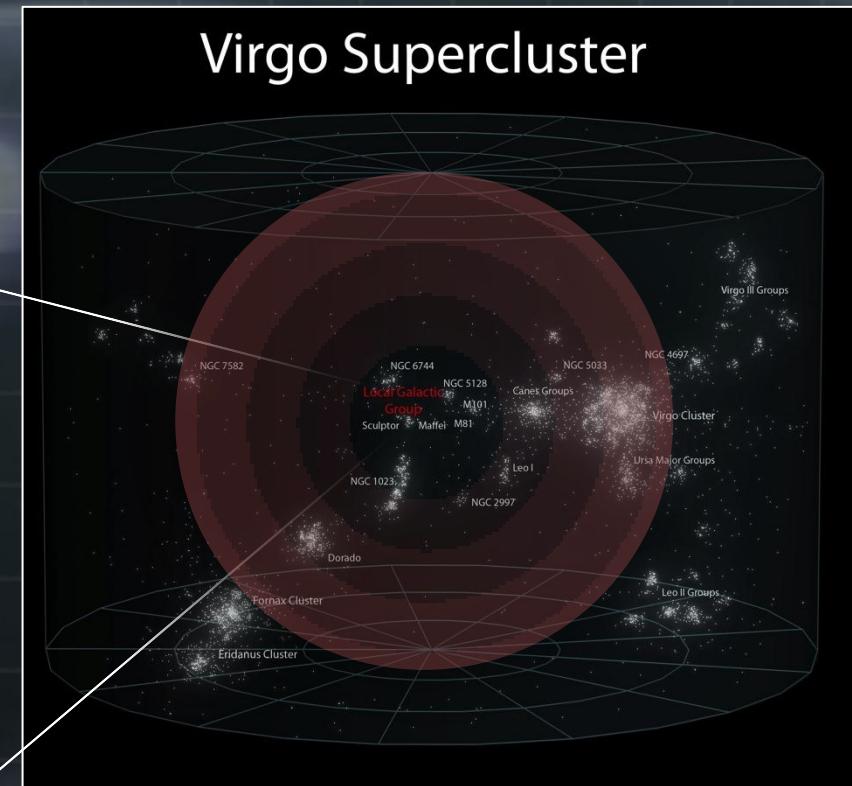
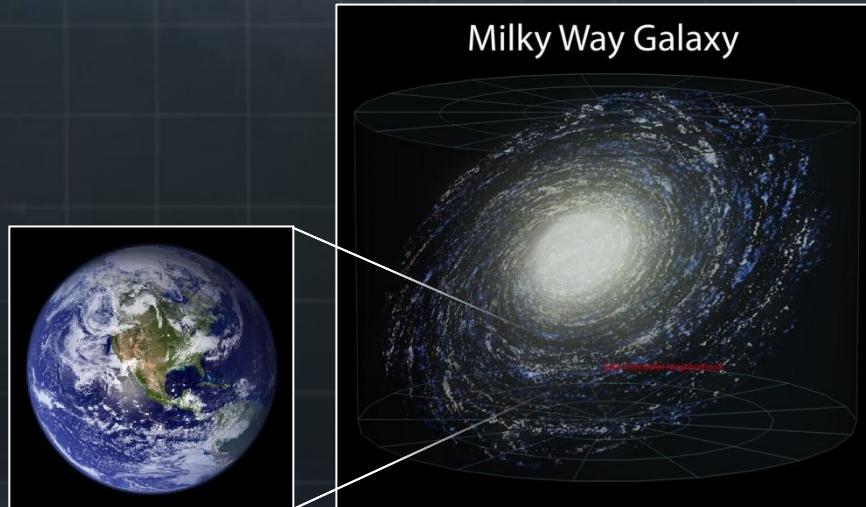


No Detections Yet...

Why not?

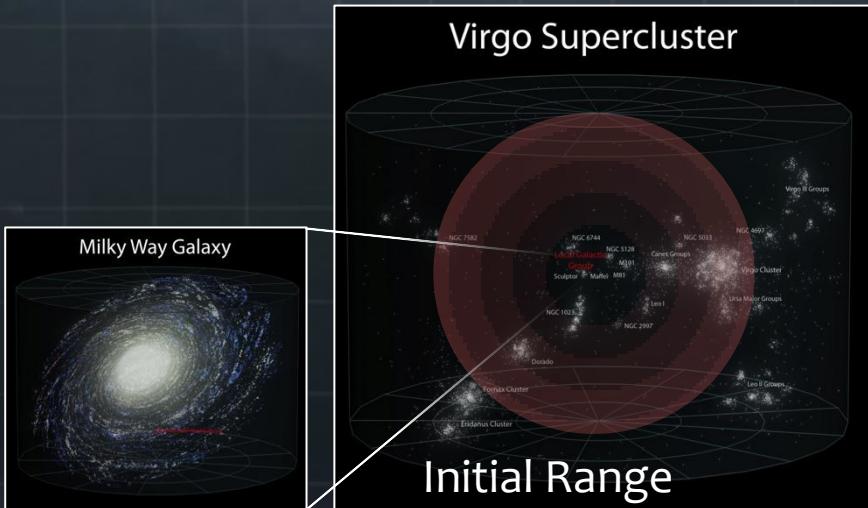
- First generation LIGO/Virgo reached about 100 galaxies
- Events happen once every 10,000 years per galaxy...
- Need better sensitivity!

(considering only NS-NS mergers)

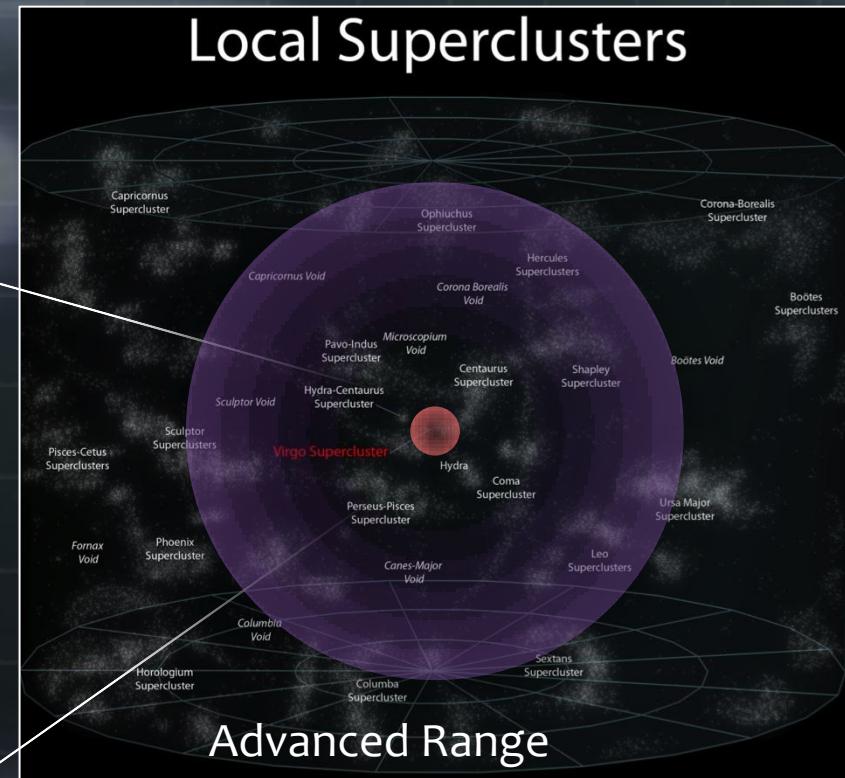


Rivelatori a terra Adv LIGO/Virgo candidati alla prima rivelazione "diretta" (2016 ? giusti cento anni dopo la GR di Einstein?)

- Advanced second generation detectors will reach about 100,000 galaxies
- Events happen once every 10,000 years per galaxy...
- Roughly 1 per month!



considering only NS-NS mergers
"target for first detection"



orizzonte2020 network LIGO/Virgo/KAGRA/Indigo

rivelatori dominati dal rumore

orizzonte 2035 eLISA o simili

rivelatore dominato dal segnale

(calibrazione assoluta con binarie di nane bianche a $\text{SNR} > 100$)

anzi **osservatorio** (ruotando in orbita intorno al Sole funziona in modo analogo ad un telescopio ad apertura di sintesi) coalescenza **bh-bh massicce** ($10^4 < M_{\text{sole}} < 10^7$) da **incontri tra galassie** fino a $z \sim 20$ ($z \sim 7.5$ per la galassia più lontana osservata da Hubble) caduta di **bh stellari in bh galattici** > mappa orizonte eventi **fondo stocastico primordiale**

rivelatori a terra e nello spazio promettono gran menu'

astronomia

nane bianche (progenitori SnIa...) ...

astrofisica

natura GRB, evoluzione stellare e galattica, astrosismologia,....

fisica di materia in condizioni estreme

EOS materia nucleare, collasso e termoinstabilita' e trasporto
nu etc in supernove,...

*qui un mio commento sull'impatto in fisica
delle interazioni fondamentali (e cosmologia)*

la GR e' solidamente provata 'sotto casa' - *sistema solare + pulsar binarie*

il *lensing gravitazionale strong* ci porta alla scala dei *quasar lontani* e il *weak lensing* ci da', alla stessa scala, la *distribuzione di dark matter* (indicazioni forti non test)

pero' per costruire la cosmologia standard bisogna *assumere* la GR valida a tutte le scale (di fatto alla GR20 a Varsavia in luglio 2013 si affermava che il successo della consistenza del corrente modello cosmologico standard *prova* che la GR e' valida su scala cosmologica...fino a $z \sim 10^5$...)

c'e' ancora spazio per teorie alternative
in alcune Dark Matter e/o Dark Energy *svanirebbe(ro) !!!*

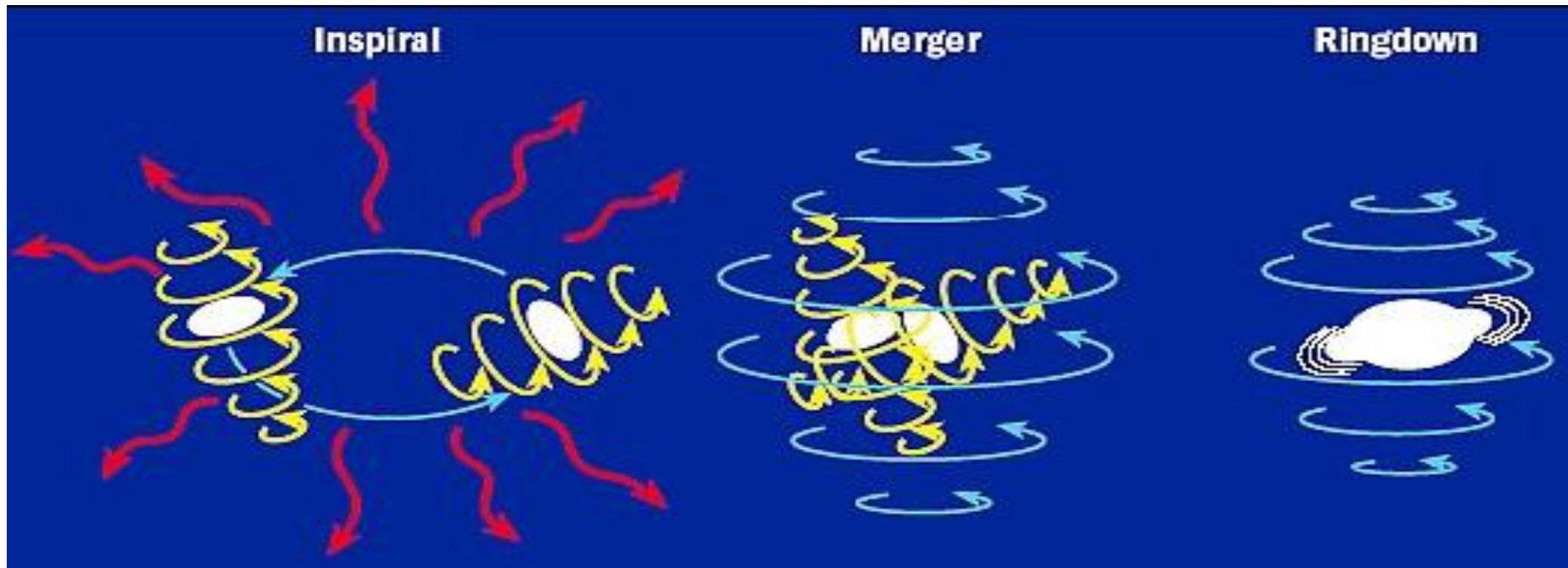
tutto il paradigma e' da solidificare operativamente + progredire verso equazione di stato DE , dipendenza di z dal tempo cosmico, og primordiali >>> GR di bh

coalescenza di *binarie bh-bh* masse e spin diversi le frequenze scalano con la massa, ma tutto va simile per bh stellari e massicce

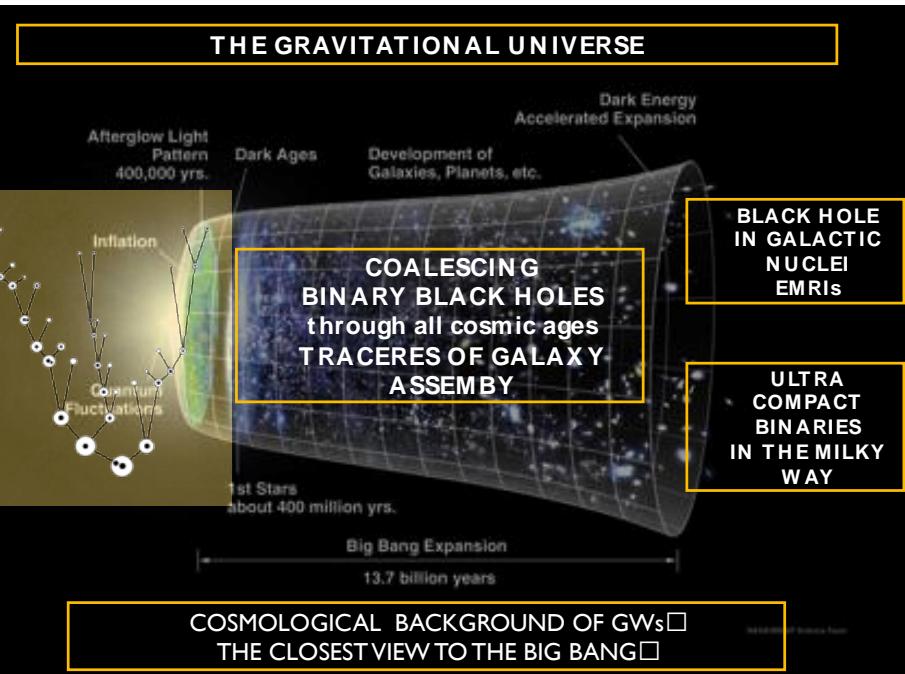
bh stellari spiralizzano in *bh massicce* > anni di segnale ricco di dettagli della distribuzione del campo

cruciale !!! gravita' numerica ci da' le forme d'onda

possibilita' unica di studio *diretto della gravita'* in situazione di campo forte > estremo !



LISA a mission in astrophysics, cosmology and fundamental physics



The Gravitational Laboratory

- Does gravity travel at the speed of light ?
- Does the graviton have mass?
- How does gravitational information propagate: Are there more than two transverse modes of propagation?
- Does gravity couple to other dynamical fields, such as, massless or massive scalars?
- What is the structure of spacetime just outside astrophysical black holes? Do their spacetimes have horizons?
- Are astrophysical black holes fully described by the Kerr metric, as predicted by General Relativity?

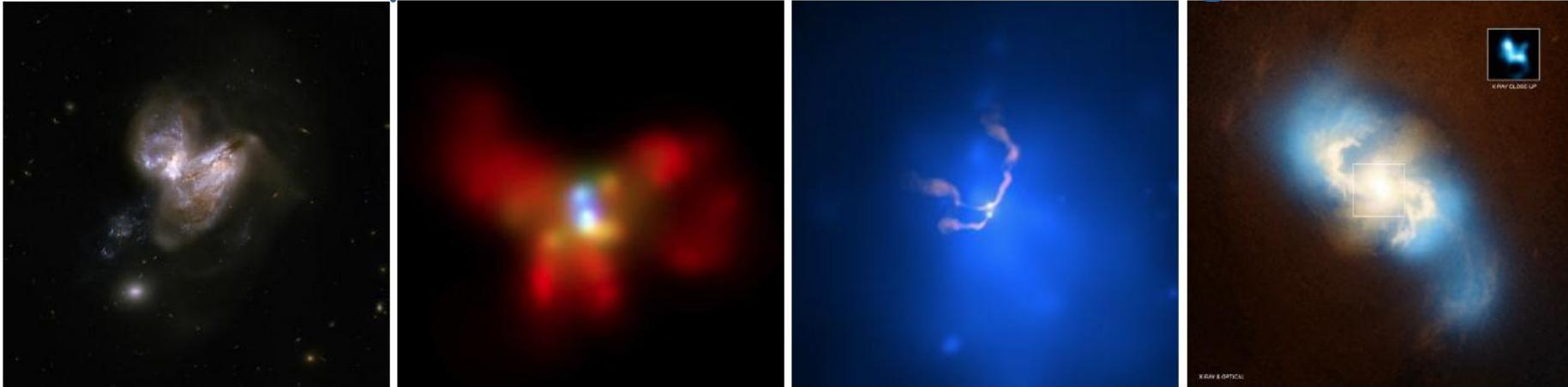
Event Rates and Event Numbers

Frequency band	1×10^{-4} Hz to 1 Hz, (3×10^{-5} Hz to 1 Hz as a goal)
Massive black hole mergers	10 yr^{-1} to 100 yr^{-1}
Extreme mass ratio inspirals	5 yr^{-1} to 50 yr^{-1}
Galactic Binaries	~ 3000 resolvable out of a total of $\sim 30 \times 10^6$ in the <i>eLISA</i> band

operativamente

- test GR > bh sono quelle di Kerr, no-hair theorem, etc., il piu' lontano possibile > LIGO/Virgo a $z \sim 1$, LISA a $z \sim 20$ (notare che Dark Energy si manifesta intorno a $z \sim 1-2$)
- legge di Hubble > *metodo indipendente* usando la coalescenza di bh come "sirene standard"
(nessun "ladder" di "candele standard")
LIGO/Virgo puo' risolvere attuale tensione tra
Planck e Sn circa il valore della costante di Hubble basso z
LISA osservando bh da scontri galattici esplora al meglio la
zona dove si manifesta la DE

Super-massive black-hole mergers

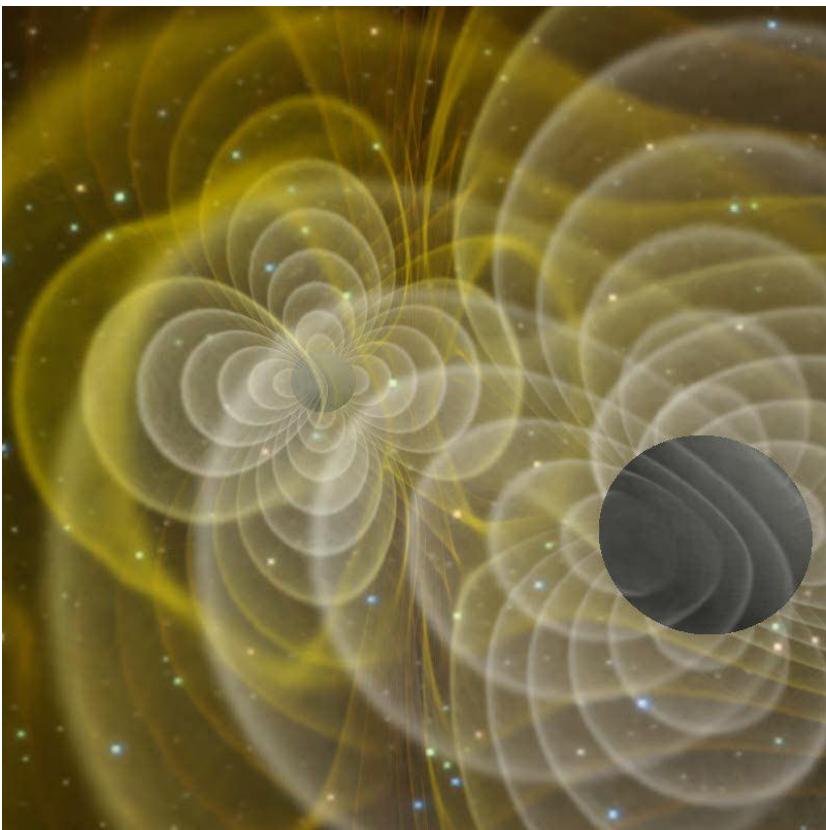
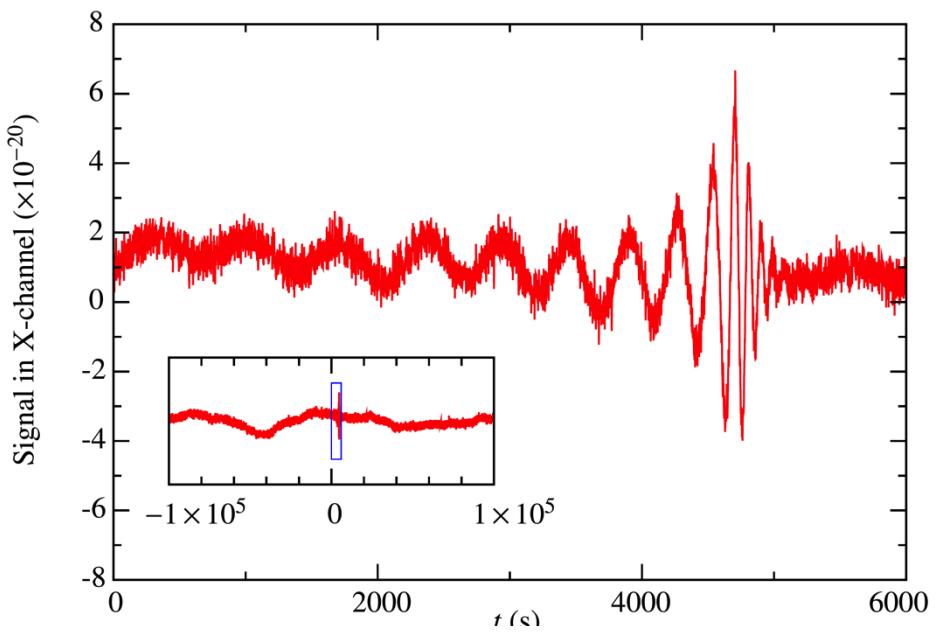


Arp 299

NGC6240

Abell 400

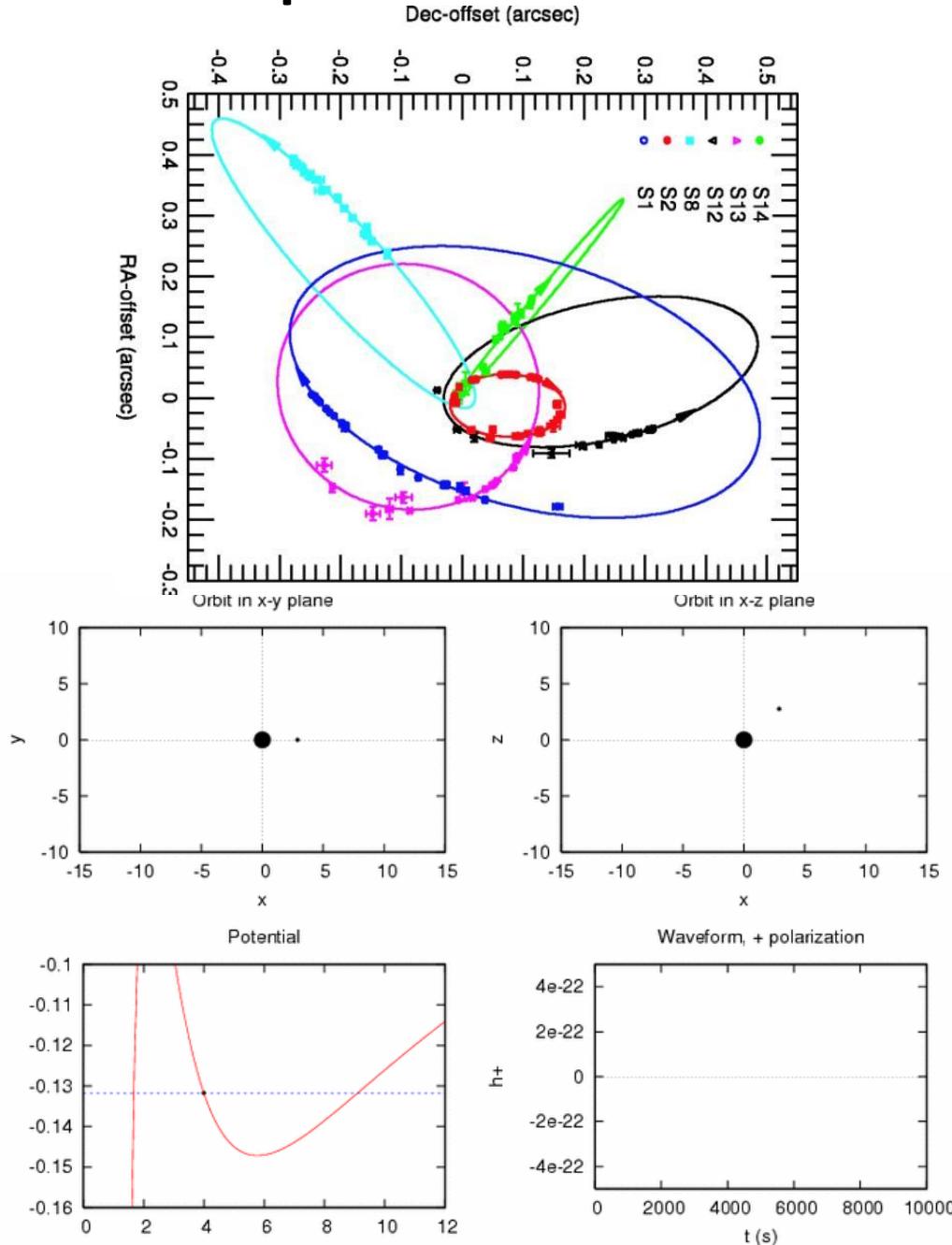
NGC 3393



- Simulated signal for e-LISA ($10^6 M_\odot$)
- No signal processing

Extreme Mass-Ratio Inspirals: EMRIs

- Stellar-mass BH capture by a massive BH: dozens per year to $z \sim 0.7$.
- 10^5 orbits very close to horizon. GRACE/GOCE for massive BHs.
 - Prove horizon exists.
 - Test the no-hair theorem to 1%.
 - Masses of holes to 0.1%
 - Spin of central BH to 0.001.
- Probes environment of central black-hole
 - mass and spin spectrum of stellar mass black holes
 - density and mechanism of formation



Cosmography with GW

*GW from chirping binary systems are standard sirens:
absolute luminosity distances D_L from period P and amplitude h*

$$D_L \propto c P \dot{P} / h$$

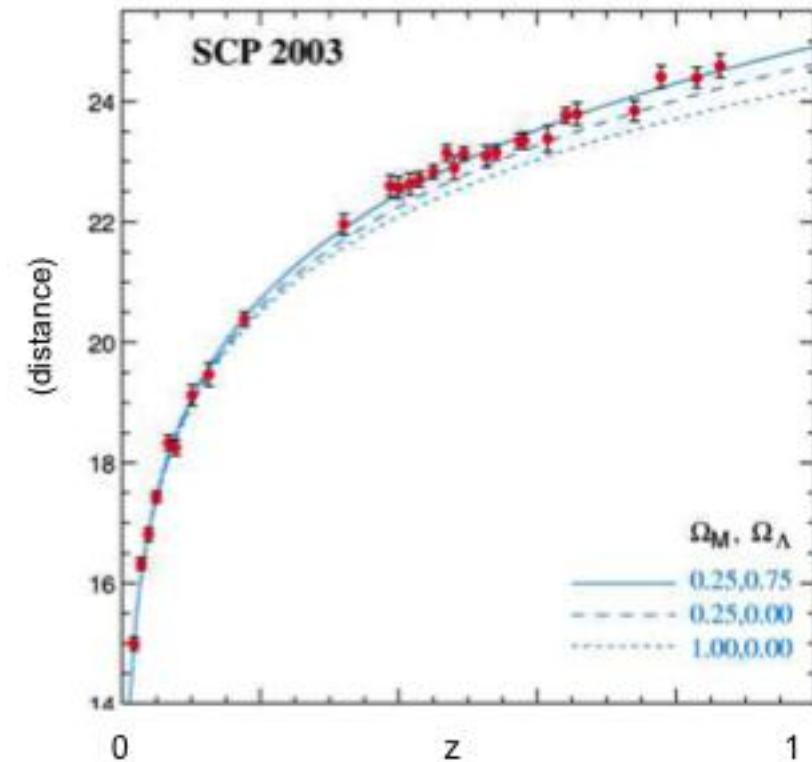
brightest sources at $z = 1-2 \rightarrow 1 \text{ deg}^2$ sufficient in conjunction with planned large surveys (LSST) .

for the strongest sources LISA independently measures $D_L(z)$ with $\sim 1\%$.

LISA \rightarrow dark energy equation of state parameter w to $\pm 2-4\%$ from mergers to $z = 3$, and no e.m. counterparts

Wuhan, February 11, 2014

S. Vitale



stochastic GW background

Assuming wavelength of relic GW set by horizon scale at time of emission (at temperature T) $f \propto 0.1 \text{ mHz} (k_B T / 1 \text{ TeV})$

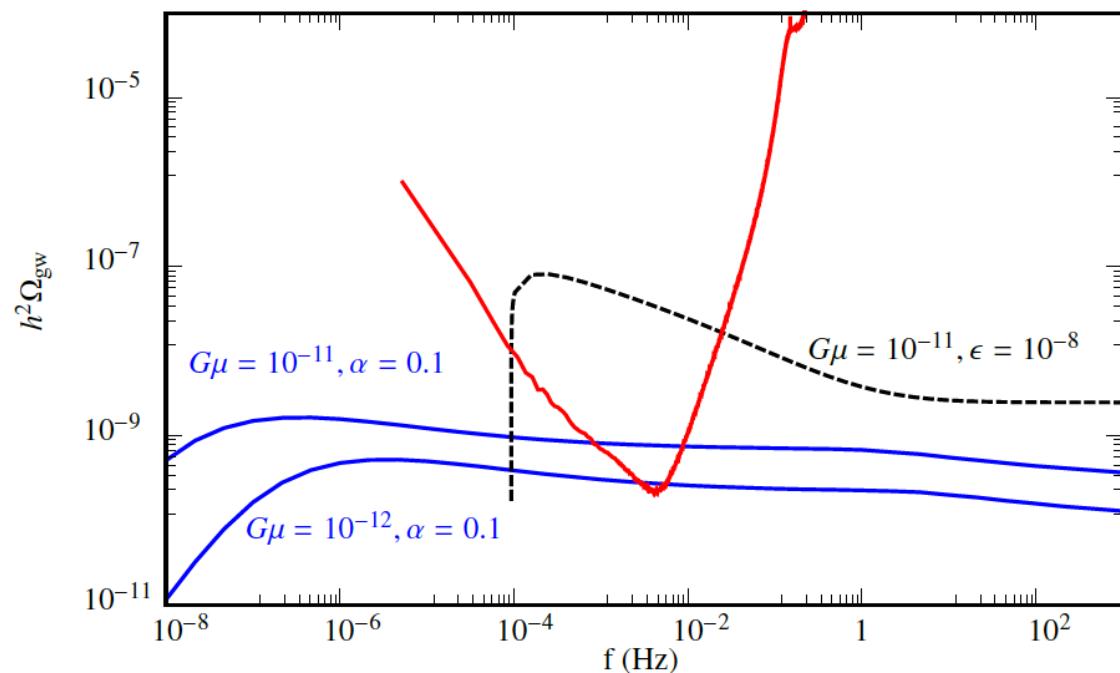
$0.1\text{-}100 \text{ mHz} \Rightarrow 1\text{-}1000 \text{ TeV scale (LHC)}$

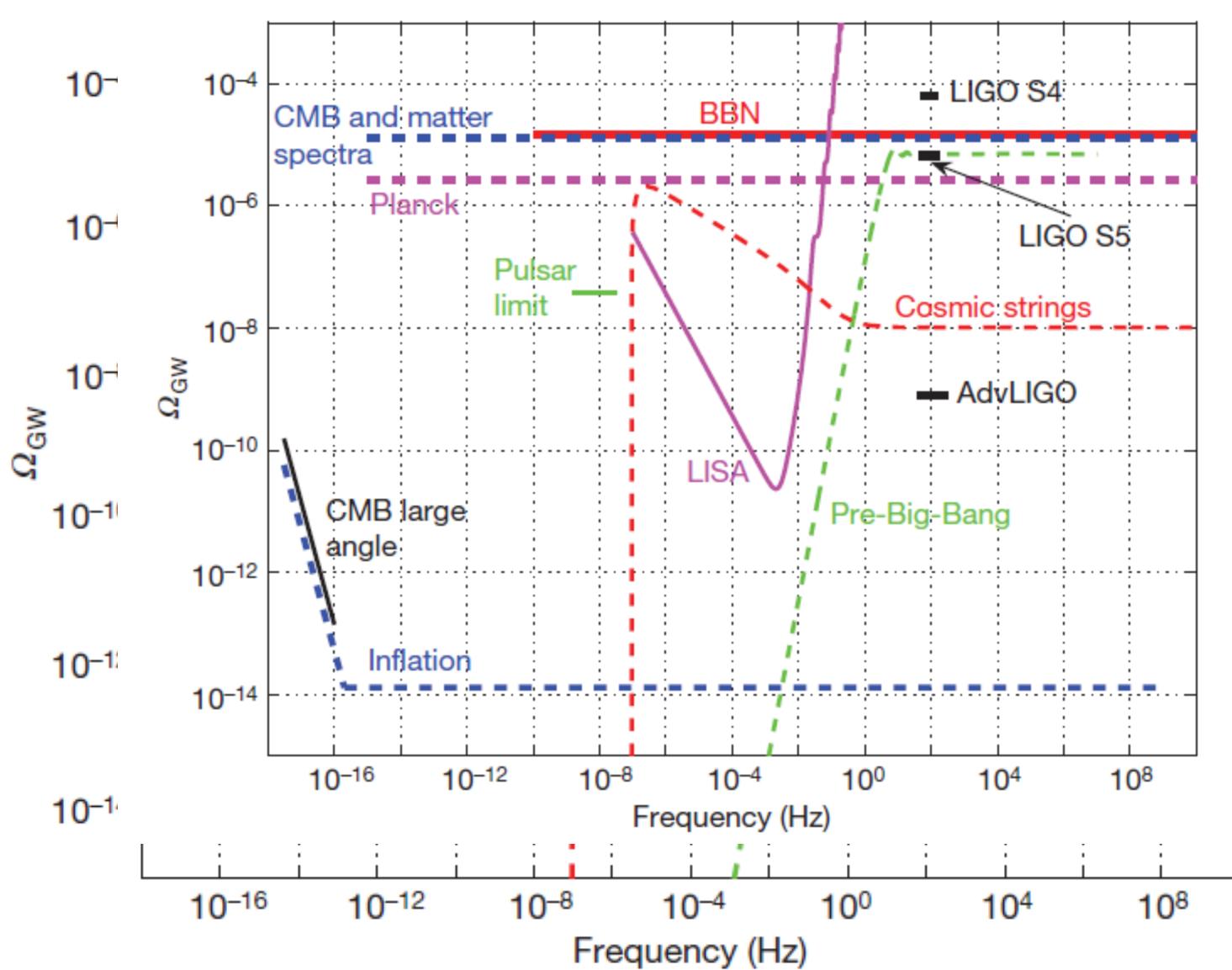
1 mm Horizon scale

$3 \times 10^{-18}\text{-}3 \times 10^{-10} \text{ s after the Big Bang}$

- eLISA sensitivity $\Omega_{\text{GW}} < 10^{-9} \Omega$

- Higgs self couplings and potential
- Supersymmetry
- Conformal dynamics at TeV scales.
- Warped sub-millimetre extra dimensions in some string theory scenarios
- Cosmic strings.....





conclusione

la gravita' muove l'evoluzione del nostro Universo; le og sono il suo messaggero che tutto attraversa e che provengono fin dai primi istanti per la conoscenza dell'umanita' e' un diritto e un *dovere* "sentire" le onde gravitazionali