

---

# Il telescopio Einstein: l'osservatorio di onde gravitazionali di 3<sup>a</sup> generazione. Einstein Telescope: the 3<sup>rd</sup> generation gravitational wave observatory

*In memoria di Adalberto Giazotto, il padre italiano di Virgo*

---

**Michele Punturo** *Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Perugia*

---

**L**e grandiose scoperte ottenute dai rivelatori LIGO e Virgo nel 2015 e nel 2017 hanno confermato le previsioni della Relatività Generale di Einstein circa l'esisten-

**T**he monumental discoveries obtained by the LIGO and Virgo detectors in 2015 and 2017 confirmed Einstein's General Relativity prediction about the existence and

za e la propagazione delle onde gravitazionali (GW) e hanno aperto una nuova era dell'astrofisica e dell'astronomia multi messenger. Come la prima osservazione del 1610 delle lune di Giove aprì la strada dell'astronomia osservativa, che con l'aumentata domanda di telescopi più potenti e più grandi che continua ancora oggi, così le scoperte di LIGO e Virgo hanno creato la necessità di una nuova rete di rivelatori più grandi e più sensibili: la 3<sup>a</sup> generazione di osservatori di GW. Il telescopio Einstein [1], comunemente noto come ET, è il progetto che aprirà la strada al concetto di osservatori di GW di 3<sup>a</sup> generazione (3G) definendo le tecnologie, il progetto e gli obiettivi scientifici che permettono di esplorare l'intero Universo attraverso la nuova sonda gravitazionale.

## Introduzione

Nel periodo dei tre anni 2015–2017 siamo stati testimoni di una vera rivoluzione scientifica segnata da tre grandiose scoperte:

- **GW150914:** è stata la prima osservazione [3], avvenuta nei rivelatori LIGO, delle GW previste dalla Relatività Generale di Einstein. È anche la prima conferma diretta dell'esistenza di buchi neri, della loro possibilità di formare un sistema binario e quella di fondersi in tempi brevi rispetto alla vita dell'Universo. GW150914 segna l'inizio della fisica sperimentale della gravitazione in condizioni di intensità di campo medi e forti.
- **GW170814:** è stata la prima osservazione identificata dai tre rivelatori, i due rivelatori LIGO oltre a Virgo, delle GW emesse dalla fusione di due buchi neri [4]. Grazie alla presenza di tre rivelatori nella rete globale, è stato possibile localizzare la sorgente; per questa ragione GW170814 segna l'inizio dell'astronomia delle GW. In aggiunta, la presenza dei tre rivelatori permette di distinguere le due polarizzazioni delle GW, escludendo delle teorie alternative alla Relatività Generale.

propagation of gravitational waves (GWs) and opened the new era of gravitational wave astrophysics and of the multi-messenger astronomy. Like the first observation in 1610 of the Galilean moons of Jupiter opened the modern era of observational astronomy, with the increasing quest of more powerful and larger telescopes still continuing today, the LIGO and Virgo discoveries pushed the need for a new network of larger and more sensible detectors: the 3<sup>rd</sup> generation (3G) of gravitational wave observatories. The Einstein Telescope [1], colloquially called "ET", is the project that will pioneer the concept of a 3G GW observatory defining the technologies, the design and the science reaches that will allow to explore the whole Universe through the new gravitational messenger.

## Introduction

In the three-year period 2015–2017, we witnessed a true scientific revolution, marked by three monumental discoveries:

- **GW150914:** it has been the first detection [3], occurred in the LIGO detectors, of the GWs as predicted by the Einstein's theory of General Relativity (GR). It is also the first direct confirmation of the existence of Black Holes, of their possibility to form a binary system and to coalesce within the lifetime of the Universe. GW150914 marks the beginning of the experimental physics of gravity under medium and strong field conditions.
- **GW170814:** it has been the first observation, by three detectors – the two LIGO detectors and the Virgo detector, of the GWs emitted by the coalescence of two BHs [4]. Thanks to the presence of three detectors in the global network, it has been possible to localise the source; for this reason, GW170814 marks the beginning of the GW astronomy. In addition, the presence of three detectors allows to disentangle the two GW polarisations, disfavours some gravity theories alternative to the GR.

- **GW170817**: è stata la prima osservazione, da parte dei tre rivelatori, delle GW emesse per fusione di un sistema binario di stelle di neutroni [5]. È probabilmente il risultato più rivoluzionario dell'astronomia negli ultimi decenni; grazie all'osservazione dell'emissione elettromagnetica in molte lunghezze d'onda da parte di una Kilonova e di emissione di GW. GW170817 segna l'inizio dell'astronomia multi-messenger [6] stimolata dalle GW.

Sebbene queste scoperte costituiscano eccezionali conquiste, sono solo l'inizio di un nuovo modo di studiare l'Universo, correntemente con i rivelatori innovativi e nel futuro con una nuova generazione di osservatori. Possiamo fare un confronto con la prima osservazione da parte di Galileo delle lune di Giove; quella fu una scoperta e conquista rivoluzionaria, ma soprattutto l'inaugurazione dell'era della moderna astronomia, le cui nuove scoperte sono state ottenute costruendo rivelatori più grandi, migliori ed innovativi.

Questa prospettiva è ben nota alla comunità degli scienziati di GW e un piano d'azione per i prossimi decenni è stato progettato. Nei prossimi anni il nodo LIGO-Virgo sarà integrato con il rivelatore giapponese KAGRA, lungo 3 km, sotterraneo, criogenico ed innovativo che dovrebbe diventare operativo nel 2019–2020 e dalla realizzazione di un clone di LIGO in India, atteso per il 2025. I rivelatori Advanced LIGO e Advanced Virgo evolveranno nei prossimi dieci anni, per sfruttare completamente il loro potenziale scientifico. Ma la loro evoluzione non può continuare indefinitamente all'interno delle attuali infrastrutture; infatti queste sono state progettate negli anni '80 del secolo scorso e realizzate all'inizio di questo secolo. Presto limiteranno l'evoluzione dei rivelatori in modi differenti: lunghezza, capacità di ospitare grandi attrezzature come cavità criogeniche o di filtraggio, limiti imposti dalle dimensioni del fascio, rumori sismici, ambientali e Newtoniani.

Per avere un miglioramento di un fattore dieci rispetto alla sensibilità nominale dei moderni rivelatori corrispondente, nel gergo della comunità delle GW, al salto di una generazione nella classificazione dei rivelatori, sono richieste nuo-

- **GW170817**: it has been the first observation, by three detectors, of the GWs emitted by the coalescence of a Binary system of Neutron Stars (BNS) [5]. It is probably the most revolutionary achievement in Astronomy in the last decades: thanks to the simultaneous observation of the multi-wavelength electromagnetic emission of the Kilonova explosion and of the GW emission. GW170817 marks the beginning of the multi-messenger astronomy [6] triggered by GWs.

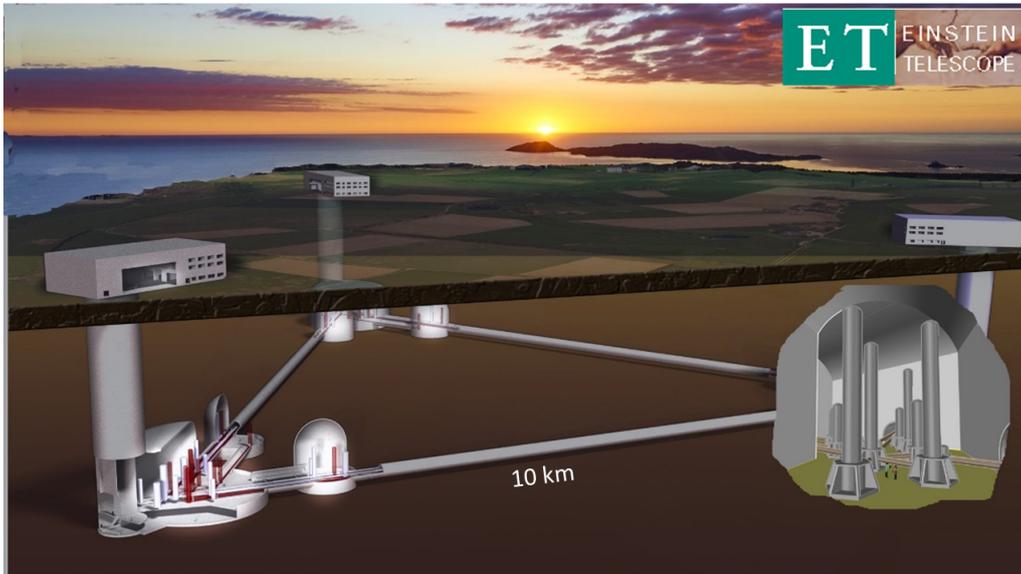
Although these discoveries are awesome achievements, they mainly mark the beginning of a new way to investigate the Universe, currently with the advanced detectors and in future with a new generation of observatories. We could make a comparison with the first observation by Galileo of the Jupiter moons; that was a revolutionary discovery and achievement, but mainly the inauguration of the era of modern Astronomy, whose new discoveries have been achieved building larger, better and innovative telescopes and detectors.

This perspective is well clear to the community of GW scientists and a roadmap for the next decades has been realised. In the coming years the LIGO–Virgo network will be integrated by the Japanese detector KAGRA, a 3 km long, underground and cryogenic innovative detector, that should start operating in 2019–2020 and by the realisation of a clone of the LIGO detectors in India, expected in 2025. The Advanced LIGO and Advanced Virgo detectors will according evolve in the next decade, in order to fully exploit their scientific potential. But this evolution cannot continue indefinitely within the current infrastructures; in fact the infrastructures have been studied in the '80s and completed around the beginning of this century. They will soon limit the evolution of the detectors in several ways: length, capability to host large plants like cryogenics or long filtering cavities, limitations imposed to the beam size, seismic, Newtonian and environmental noises.

In order to have an improvement by a factor of ten with respect to the nominal sensitivity of the advanced detectors, corresponding, in the GW community jargon, to a jump of one generation in the detectors classification, new infrastructures

ve infrastrutture ed il Telescopio Einstein sarà il primo della 3<sup>a</sup> generazione di osservatori di GW (si veda Fig.1 per una rappresentazione artistica dell'osservatorio ET). Quindi, altri osservatori seguiranno; infatti, al momento negli Stati Uniti l'idea di una nuova 3<sup>a</sup> generazione di rivelatori sta crescendo ed il progetto del Cosmic Explorer, questo è il nome della macchina, è stato approvato dalla National Science Foundation.

are requested and the Einstein Telescope will be the first of these 3rd generation GW observatories (see Fig.1 for an artistic representation of the ET observatory). Then, other observatories will follow; in fact, currently in US the idea of new 3rd generation detector is growing and the conceptual design of Cosmic Explorer (CE), this is the name of such machine, has been approved by the National Science Foundation.



**Figure 1:** *Rappresentazione artistica dell'infrastruttura ET: ogni lato del triangolo sotterraneo sarà lungo circa 10 km e le sale agli angoli ospiteranno i sistemi principali delle ottiche e delle sospensioni.*  
*Pictorial representation of the ET infrastructure: each side of the underground triangle will be about 10 km long and the corner halls will host the main optics and suspensions systems.*

## Potenziale scientifico

Le domande scientifiche di ET, e in generale della 3<sup>a</sup> generazione di osservatori di GW si sviluppano su diversi fronti.

- Domande fondamentali sulla gravità:
  - verifiche della Relatività Generale e confronto dei risultati con le previsioni di eventuali teorie alternative.
- Cosmologia e cosmografia con le GW:
  - verifiche del modello cosmologico attraverso rivelazioni simultanee di GW ed emissioni elettromagnetiche.
- Cosa possono dire le GW sulla materia oscura?

## Science Potential

The science questions in ET and in general in the 3rd generation of GW observatories cover several aspects:

- Fundamental questions in Gravity:
  - tests of General Relativity and comparison of the results with the predictions given by eventual alternative theories of Gravity
- Cosmology and Cosmography with GWs:
  - testing the cosmological model through the simultaneous detection of GWs and electromagnetic emissions
- What can GW say about Dark Matter?

- popolazione di buchi neri
  - assioni e bosoni ultraleggeri
  - Equazioni di stato delle stelle di neutroni:
    - come possono le GW porre dei vincoli alle equazioni di stato delle stelle di neutroni?
    - quali sono le implicazioni in termini di fisica nucleare?
  - Qual è il meccanismo di esplosione delle Supernovae?
  - Qual è la storia dei buchi neri supermassivi che troviamo al centro della galassia?
  - Qual è il ruolo del sottofondo stocastico delle GW nel verificare l'evoluzione del Big Bang?
- Black Holes population
  - Axions and ultralight bosons
  - Equation of State (EOS) of Neutron Stars (NS)
    - How can GW further constrain the EOS of NS?
    - What are the implications in terms of nuclear physics?
  - What is the explosion mechanism in Supernovae (SNe)?
  - What is the history of SuperMassive black holes we find at the centre of the galaxies?
  - What is the role of the GW Stochastic Background in probing the big bang evolution?

Questi aspetti sono oggi oggetto di studio da parte di grandi gruppi di fisici ed astronomi ed un aggiornato caso scientifico per la 3<sup>a</sup> generazione sarà presto disponibile. Metteremo in evidenza nel seguito alcune considerazioni.

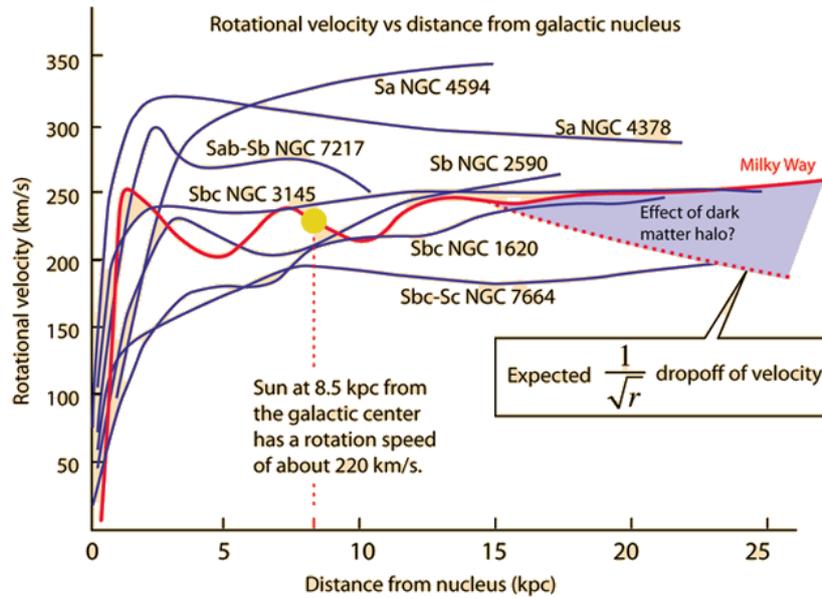
### La parte oscura dell'Universo ed il suo modello cosmologico

Uno dei problemi principali nell'attuale comprensione dell'Universo è il modello cosmologico: osservando la dinamica delle galassie e cercando di modellarlo usando la nostra migliore teoria della gravitazione, la teoria della Relatività Generale, non siamo capaci di riprodurre alcune osservazioni sperimentali. Per esempio, la curva di rotazione che descrive le velocità della materia visibile (gas, stelle, ...) in funzione della distanza dal centro della galassia può essere riprodotta dalle previsioni della Relatività Generale solo se consideriamo una ulteriore distribuzione di materia gravitante che non emette radiazione elettromagnetica, nell'alone della galassia: la materia oscura. L'esistenza della materia oscura fredda è adesso prevista nel modello cosmologico attuale dell'Universo: il modello  $\lambda$ -CDM. Nella Fig. 2 le curve di rotazione misurate in una serie di galassie sono confrontate con l'atteso andamento kepleriano  $1/\sqrt{r}$ , mettendo in evidenza la discrepanza menzionata.

These aspects are currently under investigation by large teams of physicists and astronomers and an updated 3G science case will soon be available. Hereafter few considerations will be highlighted.

### Dark side of the Universe and its cosmological model

One of the main puzzles in the current understanding of the Universe is its effective cosmological model: observing the dynamics of the galaxies and trying to model it using our best theory of gravitation – the Einstein's General Relativity (GR) – we aren't able to reproduce some of the experimental observations. For example, the rotation curve that describes the orbital speed of visible matter (gas, stars, ...) versus the distance from the centre of the galaxy can be matched with the GR predictions only if we consider a distribution of gravitating, but non electromagnetically emitting matter in the halo of the galaxy: the Dark Matter (DM). The existence of the cold Dark Matter (CDM) is now foreseen in the current cosmological model of the Universe: the  $\lambda$ -CDM model. In Fig.2 the measured rotation curve in a series of galaxies are compared with the expected Keplerian  $1/\sqrt{r}$  trend highlighting the mentioned discrepancy.



**Figure 2:** Velocità di rotazione misurate per una serie di galassie confrontate con il previsto andamento kepleriano  $1/\sqrt{r}$ . Measured rotational velocity in a series of galaxies compared with the  $1/\sqrt{r}$  dropoff expected by the Keplerian prediction. (Data from Rubin, Ford, and Thonnard, *Ap. J. Lett.*, 225, L107, 1978, Image from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/velcurv.html>)

La ricerca di GW e l'ampio intervallo di rivelazione di ET può contribuire a risolvere il puzzle della materia oscura. Un modo semplice per chiarire l'introduzione della materia oscura può essere ottenuto partendo dall'equazione di Einstein di campo

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1)$$

L'equazione (1) descrive la relazione tra la curvatura dello spazio-tempo  $G_{\mu\nu}$  e la massa (ed energia)  $T_{\mu\nu}$  del corpo che genera quella curvatura. Allo stesso tempo il moto del corpo (stella, buco nero, galassia, ...) di energia-massa  $T_{\mu\nu}$  è definito dalla curvatura  $G_{\mu\nu}$ . La discrepanza tra le curve di rotazione previste e misurate può essere risolta introducendo un termine addizionale la parte destra dell'Eq. (1):

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} (T_{\mu\nu} + T_{\mu\nu}^{DM}) \quad (2)$$

Il termine  $T_{\mu\nu}^{DM}$  rappresenta il contributo di materia oscura alle equazioni di campo di Einstein e permette di descrivere gli effetti misurati senza modificare la Relatività Generale. Ci sono varie ipotesi sulla natura della materia oscura ed ET può investigare alcune di queste, per esempio buchi neri primordiali, generati dopo il Big Bang,

Gravitational wave research and the extreme detection range of ET can contribute to resolve the Dark Matter puzzle. A simplified way to visualise the introduction of DM can be obtained starting from the Einstein's field equation:

Equation 1 describes the relationship between the space-time curvature  $G_{\mu\nu}$  and the mass (and energy)  $T_{\mu\nu}$  of the body that is generating that curvature. At the same time the motion of the body (star, Black Hole, galaxy, ...) of mass-energy  $T_{\mu\nu}$  is dictated by the curvature  $G_{\mu\nu}$ . The discrepancy between expected and measured rotation curves can be resolved by introducing an additional term on the right-side of Eq.(1):

The term  $T_{\mu\nu}^{DM}$  represents the DM contribution to the Einstein's field equation and allows to describe the measured effects without modifying GR. Several hypothesis exist on the DM nature and ET can investigate some of them, for example primordial black holes, generated after the initial Big Bang, or ultra-light bosons (ax-

o bosoni ultraleggeri (assioni), particelle previste per risolvere alcuni problemi della Cromodinamica Quantistica (QCD). Un'altra maniera per curare la discrepanza nelle curve di rotazione è la modifica della parte sinistra dell'equazione (1) aggiungendo una curvatura aggiuntiva:

$$G_{\mu\nu} + G'_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (3)$$

che corrisponde ad affermare la necessità di una teoria della gravità modificata. L'introduzione di teorie della gravità modificata è anche un modo alternativo per cercare di spiegare altri problemi nel modello cosmologico corrente dell'Universo: l'espansione accelerata dell'Universo, comunemente spiegata attraverso l'introduzione dell'energia oscura, o la tensione sui valori della costante di Hubble  $H_0$  (che misura il tasso medio di espansione dell'Universo) misurati con la radiazione cosmica di fondo e con i segnali di supernova.

ET sarà uno strumento spinto per verificare, confrontare ed escludere teorie alternative alla Relatività Generale. Infatti, mentre in queste teorie la velocità di propagazione delle GW è uguale a quella della luce  $v_{GW} = c$ , teorie gravitazionali alternative prevedono  $v_{GW} < c$  (nel gergo della meccanica quantistica, queste teorie prevedono che il gravitone sia un bosone massivo) o prevedono che le GW abbiano fino a 6 diverse polarizzazioni al posto di due  $+$   $\times$  polarizzazioni tensoriali.

ET, grazie al suo enorme intervallo di rivelazione, il grande tasso di eventi atteso ed il notevole rapporto segnale rumore di una rilevante frazione di eventi, può fornire misure di alta precisione della velocità delle GW e confrontarle con quella della luce emessa nello stesso evento e misurata con telescopi elettromagnetici (la cosiddetta astronomia multi-messenger). Inoltre, grazie alla sua forma triangolare, e alla configurazione di multi-rivelatore, ET può separare le diverse polarizzazioni.

### La storia dei buchi neri

Nella Fig. 3, la distanza di rivelazione degli osservatori della 3<sup>a</sup> generazione di GW è confrontata con l'intervallo di rivelazione di Advanced LIGO nell'attuale configurazione (come indicato dalla sensibilità nominale) e, in caso sia aggiornata,

corrispondendo a state the need of a modified theory of gravity. The introduction of modified theories of gravity is also an alternative way to try to explain other issues in the current cosmological model of the Universe: the accelerated expansion of the Universe, commonly explained through the introduction of the Dark Energy (DE), or the tension on the Hubble constant  $H_0$  (that measures the mean expansion rate of the Universe) values measured through the Cosmic Microwave Background (CMB) and through Supernovae signals.

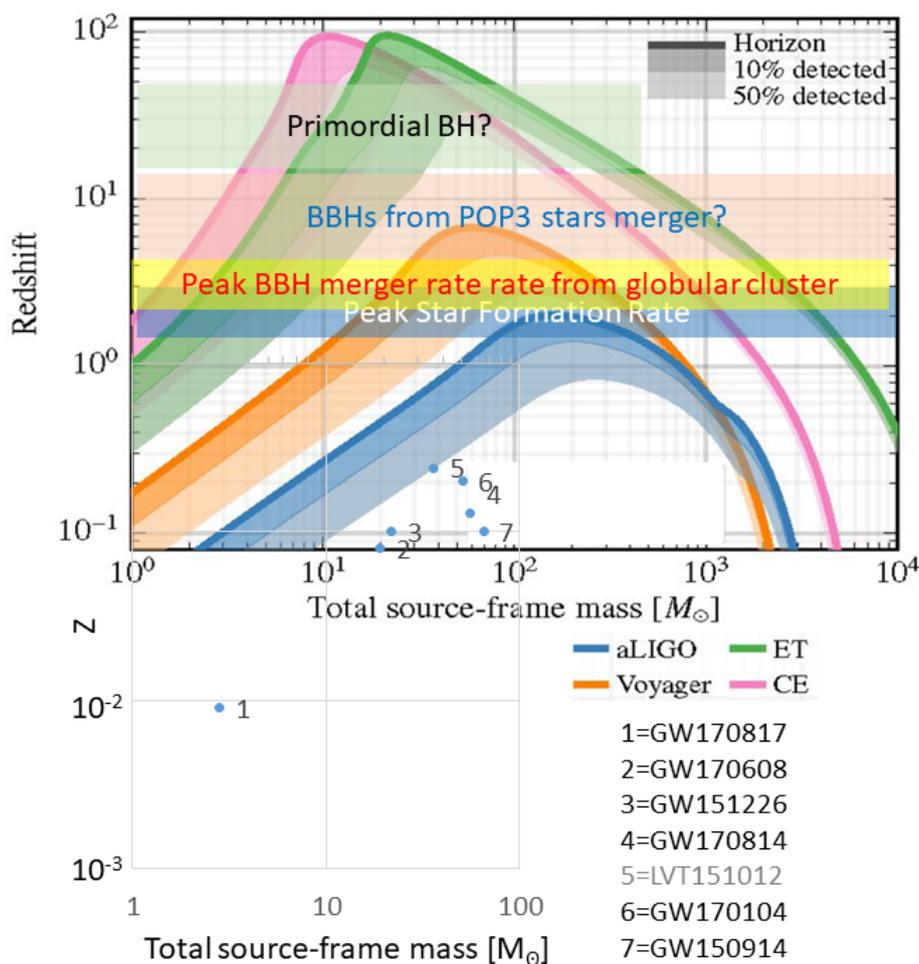
ET will be an extreme tool to verify, compare and exclude alternative theories of gravity versus GR. In fact, whereas in GR the propagation speed of GW is equal to the speed of light ( $v_{GW} = c$ ), alternative theories of gravity could state  $v_{GW} < c$  (in a quantum mechanics jargon, these theories are predicting that the graviton is a massive boson) or are predicting that GWs have up to 6 different polarisations instead of the two  $+$  and  $\times$  tensorial polarisations in GR.

ET, thanks to its huge detection range, the large expected event rate and the impressive signal-to-noise ratio (SNR) of a relevant fraction of events, can provide high precision measurements of the speed of GWs and compare it to the speed of the light emitted in the same event and observed in collaboration with electro-magnetic telescopes (the so-called multi-messenger astronomy). Furthermore, thanks to its triangular shape and multi-detector configuration, ET can disentangle different polarisations.

The history of the Black Holes

### The history of the Black Holes

In Figure 3, the detection distance of 3rd generation GW observatories is compared to the detection range of Advanced LIGO in the current configuration (at its nominal sensitivity) and in case it is updated in the Voyager configuration,



**Figure 3:** Distanze massime di rivelazione per la fusione di due corpi compatti (essenzialmente buchi neri binari) a  $SNR > 8$ . In questa figura gli intervalli di rivelazione di ET e CE sono confrontati con quelli di Advanced LIGO alla sensibilità nominale nella configurazione Voyager. In sovrapposizione è indicato lo spostamento verso il rosso a cui ci si aspetta di trovare importanti sorgenti di segnali. Per confronto con l'attuale capacità di rivelazione, sono mostrati gli eventi identificati durante le prese dati scientifiche di O1 e O2 dai rivelatori LIGO e Virgo. Vale la pena notare che, per includere nella stessa figura la rivelazione BNS GW170817 l'asse verticale è stata prolungata verso uno spostamento verso il rosso molto basso.

*Detection range for coalescence of equal mass compact bodies (essentially binary black holes) at  $SNR > 8$ . In this figure the detection range of ET and CE are compared to the potential of Advanced LIGO at the nominal sensitivity and in the Voyager configuration (Credit Evan Hall, John Miller, Stefan Hild - DAWN IV workshop). Overimpressed is indicated the redshift at which is expected to find relevant sources of signals. For a comparison with the current detection capability, the events detected during the O1 and O2 scientific data taking by the LIGO and Virgo detectors are shown. It is worth to notice that, in order to include in the same figure the BNS detection GW170817 the vertical axis must be extended to very low redshift.*

nella configurazione Voyager, installando grandi specchi di silicio ed operando a 123 K. Nella Fig. 3 è anche indicata la distanza di recessione, ovvero la distanza misurata attraverso il *red-shift*, alla quale sono attese importanti sorgenti di segnali di GW.

La 3<sup>a</sup> generazione di osservatori di GW avrà la capacità di rivelare la fusione di buchi neri binari con grande spostamento verso il rosso, coprendo,

installando large Silicon mirrors and operating at 123 K. In Figure 3, is also indicated the redshift at which relevant sources of GW signals are expected.

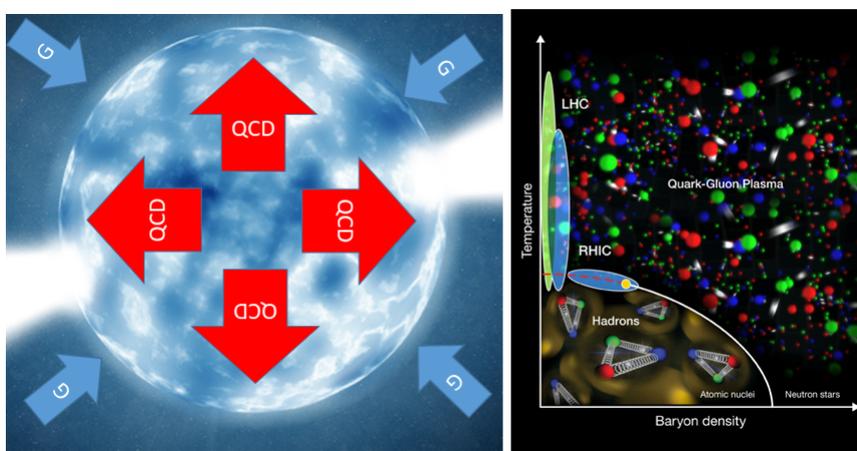
The 3rd generation GW observatories will have the capability to detect a coalescence of massive BH–BH binary at high red shift, covering, essen-

essenzialmente, tutto l'Universo. Questo permetterà, ad esempio, di ricostruire la storia completa della popolazione di buchi neri, ed in particolare di comprendere come si formino i buchi neri supermassivi che sono al centro di molte galassie. Infatti, guardare lontano nell'Universo equivale a guardare sempre più all'indietro nel tempo; avere la possibilità di studiare la popolazione dei buchi neri a diverse distanze è equivalente allo studio dell'evoluzione di questa popolazione nel tempo.

Per comprendere i miglioramenti che ci si aspetta rispetto ai rivelatori attuali, nella Fig. 3 sono sovrapposte le distanze e le masse totali degli eventi rivelati durante l'esecuzione degli esperimenti O1 e O2 di LIGO e Virgo.

tially, the whole Universe. This will allow, for example, to reconstruct the whole history of the BH population and in particular to understand how the supermassive BH, that are at the centre of many galaxies, formed. In fact, looking farther in the Universe corresponds to looking back in time; having the possibility to study the population of BHs at a different distances is equivalent to study the evolution on time of that population.

In order to understand the progress expected with respect to the current detectors, in Figure 3 are also over-impressed the distances and total masses of the events detected during the science run O1 and O2 by LIGO and Virgo.



**Figure 4:** Pannello a destra: una stella di neutroni può essere vista come un sistema in equilibrio tra la forza gravitazionale, che cerca di fare collassare ulteriormente la stella, e la repulsione nucleare tra i neutroni dovuta alla loro interazione. Pannello a sinistra: lo studio dell'equazione di stato della stella di neutroni è utile per conoscere il comportamento della materia in condizioni di densità e temperatura non ottenibili in laboratorio.

*Right panel: a neutron star can be seen as a system in equilibrium between the gravitational force, that tends to further collapse the star, and the nuclear repulsion between the neutrons due to nuclear interactions. Left panel: investigating the EOS of the NS it is possible to study the behaviour of matter in density-temperature conditions not achievable in laboratory.*

### Fisica nucleare nelle stelle di neutroni

Un altro obiettivo scientifico per ET è la comprensione dello stato della materia di una stella di neutroni, la cosiddetta equazione di stato. Una stella di neutroni, che è ciò che rimane dopo l'implosione di una stella massiva, può essere descritta come un sistema in equilibrio tra la forza gravitazionale, che cerca di fare collassare ulteriormente la stella, e la repulsione nucleare tra i neutroni dovuta alla loro interazione. La comprensione

### Nuclear Physics in Neutron Stars

Another science target for ET is the understanding of the state of matter in the core of a neutron star (NS), the so called equation of state (EOS). A NS, a remnant of the implosion of a massive star, can be described as a system in equilibrium between the gravitational force, that tends to further collapse the star, and the nuclear repulsion between the neutrons due to nuclear interactions. The understanding of the NS EOS

dell'equazione di stato di una stella di neutroni è uno strumento formidabile per studiare la materia nucleare a densità maggiori di quella di saturazione, in una regione del diagramma di fase della materia non accessibile in laboratorio (vedi il pannello a destra della Fig.4).

Secondo gli attuali modelli, una stella di neutroni è composta da vari strati dove lo stato della materia varia dalla crosta, composta da un reticolo di nuclei ricchi di neutroni, al nocciolo, composto da un superfluido di neutroni liberi (vedi la Fig. 5). Lo stato della materia nella parte più interna è molto discusso. Al momento una pletora di equazioni di stato vengono proposte per modellare la struttura della stella di neutroni; i moderni rivelatori cominciano a verificare la validità di alcune equazioni di stato analizzando le GW emesse durante le fasi di coalescenza, fusione e spiralizzazione di un sistema binario di stelle di neutroni. Negli ultimi istanti della fase di coalescenza (Fig. 6), le deformazioni di marea dovute agli intensi campi gravitazionali influenzano leggermente le proprietà del segnale di GW emesso, a seconda della rigidità delle stelle, definito dall'equazione di stato. Questo effetto è accessibile in rivelatori evoluti, ma per accedere alle fasi di fusione e spiralizzazione, dove il segnale dell'equazione di stato è anche più evidente, è necessaria la sensibilità di ET come mostrato nella figura 6).

## Il progetto del telescopio Einstein

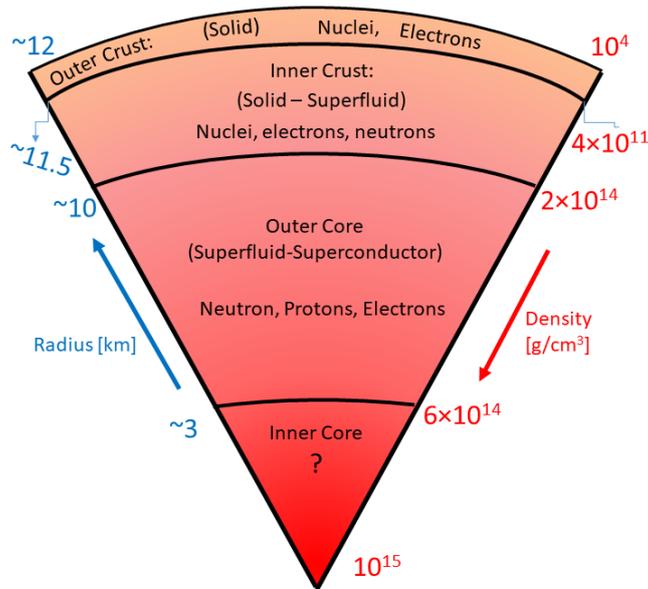
L'idea di una terza generazione di rivelatori di GW nasce nel 2004-2007 con un progetto di integrazione di infrastrutture di ricerca chiamato ILIAS e finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del sesto programma quadro (FP6). La transizione da una generazione di rivelatori di GW alla successiva è stata definita come un miglioramento della sensibilità di un ordine di grandezza in circa tutto l'intervallo di frequenze del rivelatore. Per questa ragione, per definire ET come 3<sup>a</sup> generazione di rivelatori di GW, il primo requisito è quello di superare di un fattore 10 le prestazioni di Advanced LIGO e Virgo (in termini di rumore e quindi di intervallo di rivelazione) nell'intervallo di frequenze tra 10 e 10<sup>4</sup> Hz. Il progetto di ET è stato realizzato da una collaborazione internazionale con un finanziamento europeo

is then a formidable tool to study matter above the nuclear saturation density, in a region of the phase diagram of matter not accessible in the laboratory (see right panel in Fig.4).

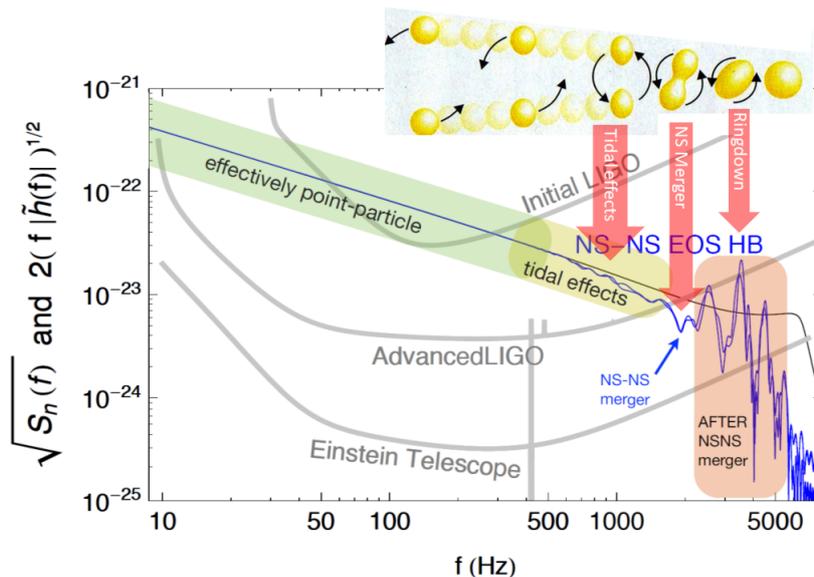
According to the current models, a NS is composed by shells where the status of the matter varies from the crust, composed by a lattice of neutron rich nuclei, to the core composed by a superfluid of free neutrons (see Fig.5). The exact status of the matter in the inner core is strongly debated. Currently a plethora of EOS are proposed to model the structure of the NS; advanced detectors are beginning to verify the solidity of some of these EOS analysing the GWs emitted during the coalescence, merging and ringdown phases of a binary neutron star (BNS) system. In the last instants of the coalescence phase (Fig.6) the tidal deformations due to the intense gravitational fields slightly affect the properties of the GW signal emitted depending on the rigidity of the stars, dictated by the EOS. This effect is accessible to the advanced detectors, but to access the merger and ringdown phases, where the EOS signature is even more evident, the sensitivity of the Einstein Telescope is needed, as shown in Fig.6.

## The Einstein Telescope project

The idea of a third generation GW detector was born in 2004–2007 within a project of integration of research infrastructures named ILIAS and funded by the European Commission (EC) within the sixth Framework Programme (FP6). The transition from a generation of GW detectors to the next one has been defined as an improvement of the sensitivity by an order of magnitude in approximately the whole frequency range of the detector. For this reason, to define ET as a third generation GW detector the first requirement is to over-perform (in terms of noise and then detection range) Advanced LIGO and Advanced Virgo by a factor of 10 in the 10–10<sup>4</sup> Hz frequency range. The conceptual design of ET has been realised by an international collaboration through an European grant (2008–2011) in FP7 and the Concep-

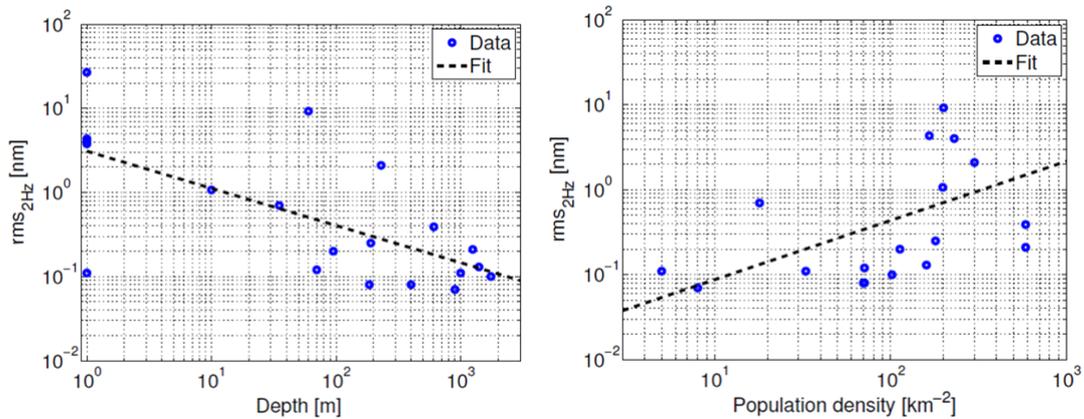


**Figure 5:** Struttura di una stella di neutroni. La densità di materia aumenta dalla crosta esterna al nocciolo interno. Le dimensioni previste per una stella di neutroni sono di circa 10–12 km, e l'intervallo delle masse è tra 1 e 2 masse solari.  
 Structure of a Neutron Star. The density of matter increases from the external crust to the inner core. Expected size of a NS is about 10–12 km, the expected mass ranges between 1 and 2 solar masses.



**Figure 6:** Le GW emesse in diverse fasi della fusione di un sistema binario di stelle di neutroni si estende su un ampio raggio di frequenze. L'effetto delle deformazioni di marea delle stelle, dovuto alla stella compagna, nella fase finale del processo, sono osservabili in interferometri Advanced. Per accedere ai dettagli del segnale nella fase di spiralizzazione è necessaria la sensibilità di ET.  
 The gravitational waves emitted in the different phases of the coalescence of a binary neutron star system span over a wide frequency range (Credits J.Read). The effect of the tidal deformations of the stars, due to the companion, in the final phase of the BNS coalescence, are observable in the GWs detected in advanced interferometers. Instead, to access the details of the signal in the ringdown phase the Einstein Telescope sensitivity is needed.

(2008-2011) in FP7, ed il rapporto del progetto di Initial Design Report [2] (CDR) has been delivered



**Figure 7:** Grafico del rumore sismico (spostamento) a 2 Hz misurato in un insieme di siti in funzione della profondità (disegno a sinistra) e della densità di popolazione (disegno a destra). Si sono sovrapposte delle linee di tendenza per apprezzare i benefici di posizionarsi sottoterra e in una regione scarsamente popolata. Scatter plot of the seismic noise (displacement) at 2 Hz measured in a series of sites versus depth (left plot) or population density (right plot). A trend slope is overlaid to better appreciate the benefits of going underground and in a scarcely populated region. Credits ET Design Study and J. van den Brand.

fattibilità è stato reso pubblico nel 2011 [2]. La concezione di ET è basata su poche ipotesi importanti: ET sarà la **terza** generazione di **osservatori** di GW con un'attenzione particolare alla potenzialità e al tempo di vita dell'**infrastruttura** e alle prestazioni nella regione a **basse frequenze**. In grassetto sono evidenziate le parole chiave:

- **terza** generazione: un fattore 10 di miglioramento rispetto ai rivelatori avanzati,
- **osservatorio**: attenzione all'estrazione dei parametri fisici della sorgente piuttosto che alla rivelazione del segnale; ad esempio la capacità di separare le due polarizzazioni di GW,
- **infrastruttura** il più grande investimento è sull'infrastruttura che deve poter ospitare l'osservatorio ET e le sue evoluzioni per decenni, essendo i suoi limiti (fisici e di rumori ambientali), in generale, molto lontani dalle prestazioni attese nelle fasi iniziali del rivelatore.
- **bassa frequenza**: ET deve essere capace di superare il muro dei 10 Hz sismici e deve poter permettere l'osservazione fino a pochi Hz.

Queste caratteristiche hanno generato un proget-

in 2011. The ET concept has been based on few important assumptions: ET will be a **third** generation GW **observatory** with a special focus on the potential and lifetime of the **infrastructure** and on the performances in the **low frequency** region. In bold are highlighted the keywords:

- **Third** generation: a factor of ten improvement with respect to advanced detectors
- **Observatory**: attention to the extraction of the physical parameters of the source rather than to the detection of the signal; for example the capability to disentangle the two polarisations of the GW.
- **Infrastructure**: the largest initial investment is on the infrastructure, that must be able to host the ET observatory and its evolutions for decades, being its limits (environmental noises and physical constraints) in general quite far from the expected initial performances of the detector.
- **Low frequency**: ET must be able to beat the 10 Hz seismic wall and it must allow GW observation since few Hz.

These characteristics generated an innovative

to innovativo ed impegnativo, sebbene gli elementi chiave del rivelatore ET siano abbastanza tradizionali, preservando lo schema, di interferometria di Michelson con cavità di Fabry–Pèrot inserite nei bracci adottato dai rivelatori di GW più moderni ed avanzati.

### Infrastruttura sotterranea

L'infrastruttura sarà un triangolo equilatero di lato 10 km, posizionato sottoterra, come artisticamente presentata nella Fig.1. La posizione sotterranea è raccomandata per ridurre i disturbi sismici e ambientali su ET; infatti il rumore sismico influenza le prestazioni a bassa frequenza di ET sia attraverso scosse impresse al sistema di sospensioni dell'ottica, che eccitando direttamente gli specchi, attraverso l'accoppiamento legato all'attrazione newtoniana con le masse di prova ed il suolo che vibra.

Grazie all'installazione sotterranea, una grande frazione dell'ampiezza del rumore sismico, composta dalle onde di superficie è ridotta, diminuendo l'ampiezza di vibrazione, come mostrato dal pannello di sinistra della Fig.7 dove è disegnata una elaborazione dei dati acquisiti in una dozzina di siti durante il periodo di studio del progetto di ET. Nel pannello di sinistra della Fig. 7, l'ampiezza del rumore sismico a 2 Hz è riportata in funzione della profondità del sito di misura. È chiaro che posizionandosi sottoterra a circa 100-200 m si ha il vantaggio, in qualche sito di prova, di ridurre l'eccitazione sismica di qualche ordine di grandezza. Il rumore sismico ha origine sia naturale che antropogenica; tipiche sorgenti naturali di rumore sismico sono dominanti sotto i 2 Hz, mentre le vibrazioni prodotte dall'uomo sono dominanti sopra i 2 Hz. Nel pannello di destra della Fig. 7 il livello del rumore è disegnato in funzione della densità di popolazione del sito; regioni scarsamente popolate sono favorite in termini di rumore sismico.

Nella Fig. 8 tre (buoni) siti sotterranei (in Ungheria, Italia e Spagna), che appartengono ad un insieme di siti misurati per il progetto ET, sono confrontati con i siti di Virgo (in superficie, vicino a Pisa, Italia) e a stazioni sismologiche posizionate a 10 m sotto la superficie nei Paesi Bassi: la selezione di un buon sito sotterraneo permette a ET di accedere alla regione di frequenza sotto i 10

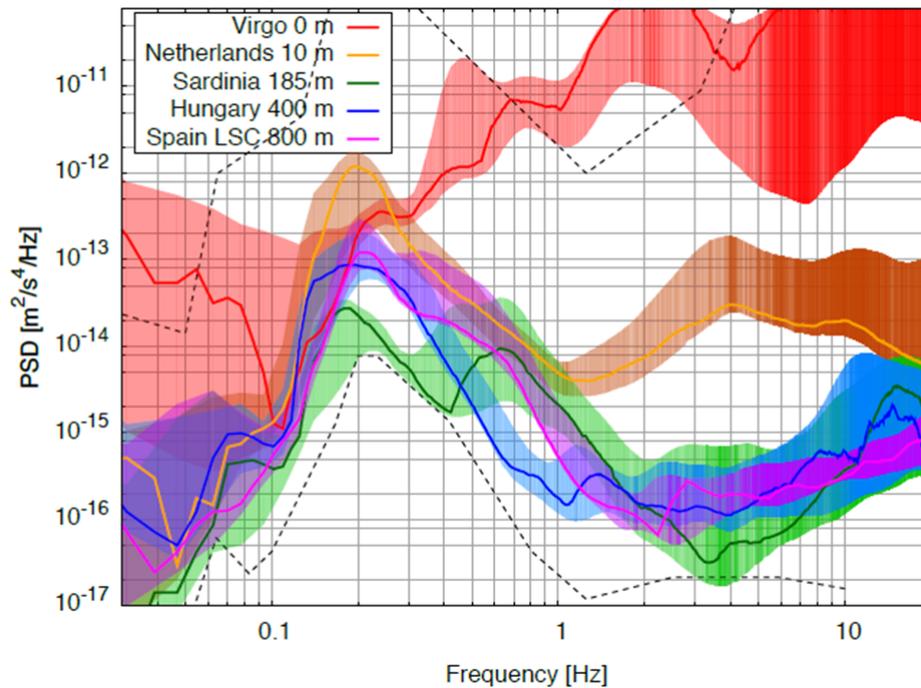
and challenging design, although the key elements of the ET detector are quite conservative, preserving the "Michelson interferometer with Fabry–Perot cavities embedded in the arms" scheme adopted worldwide by the advanced GW detectors.

### Underground triangular infrastructure

The infrastructure will be an equilateral triangle having 10 km long sides, located underground, as artistically depicted in Fig.1. The underground location is recommended to reduce the impact of the seismic and environmental disturbances on ET; in fact the seismic noise affects the low frequency performance of ET both shaking the suspension system of the optics and exciting directly the mirrors, through the Newtonian attraction coupling between the suspended test masses and the vibrating soil.

Going underground, a large fraction of the seismic noise, composed by the surface waves, is reduced, diminishing the amplitude of the vibration, as shown in the left panel of Fig.7 where an elaboration of the data acquired in a dozen of sites during the ET design study period is plotted. In the left panel of Fig.7, the seismic noise amplitude measured at 2 Hz is plotted versus the depth of the measurement site. It is clear that going underground at about 100–200 m allows, in some of the tested sites, to reduce the seismic excitation by a few orders of magnitude. The seismic noise has both natural and anthropogenic origin; typically natural sources of seismic noise are dominant below 2 Hz whereas human generated vibrations are dominant above 2 Hz. In the right panel of Fig.7 the noise level is plotted versus the population density at the site; scarcely populated regions are favourable in terms of seismic noise.

In Fig.8, three (good) underground sites (in Hungary, Italy and Spain), belonging to the set of sites measured for the ET Design Study, are compared to the Virgo site (at the surface, near Pisa, Italy) and to a seismic station located 10 m below the surface in the Netherlands: the selection of a good underground site allows ET to access the frequency region below 10 Hz, but,



**Figure 8:** Misure sismiche ad alcuni dei siti considerati durante il progetto di studio di ET. Il livello di rumore dei migliori siti sotterranei è confrontato con quello di Virgo (Cascina, Italia) in superficie e con quello di Limburg (NL) a -10 m. Le linee tratteggiate rappresentano i limiti inferiori e superiori del rumore sismico di Peterson, uno pseudo spettro costruito come involucro delle misure fatte in migliaia di stazioni sismiche attorno al mondo. Attorno ai 2 Hz, il vantaggio di costruire un rivelatore sotterraneo è di circa 4 ordini di grandezza nello spettro di potenza (circa 3 ordini di grandezza nella densità spettrale).  
*Seismic measurements at some of the sites tested during the ET design study. The best underground sites are compared to the noise level measured on the surface at the Virgo site (Cascina, Italy) and to the noise measured at -10 m in Limburg (NL). The dashed lines represent the Peterson seismic noise lower and upper limits, a pseudo-power spectrum built as envelope of the measurements made in thousands seismic stations around the world. Around 2 Hz, the advantage of building an underground detector is of about 4 orders of magnitude in power spectrum (about 2 orders in spectral density)*

Hz, ma, ovviamente, ET richiede ancora un sistema di filtraggio delle vibrazioni sismiche probabilmente basato sulla tecnologia sviluppata per Virgo.

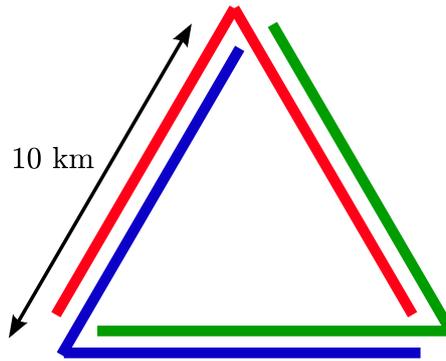
La geometria triangolare dell'infrastruttura dell'osservatorio ET è un'altra novità rispetto ai progetti degli attuali rivelatori di GW, che sono a forma di L. Questa scelta è dovuta ai requisiti iniziali necessari per avere un osservatorio capace di identificare le due polarizzazioni di GW (nell'ambito della Relatività Generale le GW hanno due polarizzazioni). Nella geometria triangolare è possibile inserire tre rivelatori come schematizzato nella Fig.9. Combinando opportunamente l'output dei tre rivelatori è possibile ricostruire le due polarizzazioni, e, inoltre, creare il cosiddetto *null stream*, un output che, per costruzione, non contiene il segnale di GW. Il *null stream* può esse-

obviously, ET still requires an efficient seismic vibration filtering system, probably based on the technology developed for Virgo.

The triangular geometry of the ET observatory infrastructure is another novelty with respect the current GW detectors design (that are L-shaped). This choice is due to the initial requirement to have an observatory capable to disentangle the two polarisations of a GW (in the GR framework the GWs show two polarisations). In the triangular geometry it is possible to fit up to 3 detectors as sketched in Fig.9. Combining opportunely the output of the three detectors it is possible to reconstruct the two polarisations and, furthermore, it is possible to create a so-called *null stream*, an output that, by construction, doesn't contain the GW signal. The null stream can be used to veto

re utile per eliminare disturbi e ridurre il tasso di falsi allarmi.

disturbances and reduce the false alarm rate.



**Figure 9:** La geometria triangolare di ET permette di ospitare tre rivelatori intrecciati l'uno con l'altro che suddividono i tunnel e le sale d'angolo.  
The triangular geometry of ET allows to host three nested detectors that are sharing the tunnels and the corner halls.

### Soppressione delle sorgenti di rumore

Il rumore termico è un'altra sorgente di rumore che limita la sensibilità di un rivelatore di GW. Il rumore termico influenza l'interferometro attraverso diversi meccanismi, ma uno dei modi più semplici per descriverlo è la vibrazione termica (browniana) delle sospensioni e degli specchi dell'interferometro dovuta alla temperatura non nulla delle componenti ottiche e meccaniche. È istruttivo comprendere la logica principale adottata nei rivelatori di GW per mitigare gli effetti del rumore termico.

Le sospensioni e gli specchi di un interferometro possono essere modellizzati come un oscillatore armonico di costante  $k$ . La sua energia meccanica per ogni modo normale è  $E_m = \frac{1}{2}kx^2$  mentre l'energia termica, per ogni grado di libertà, è  $E_T = \frac{1}{2}k_B T$  dove  $k_B$  è la costante di Boltzmann. Approssimativamente, per un cilindro (lo specchio) di raggio  $r$  e altezza  $L$ ,  $k = E\pi r^2/L$ , dove  $E$  è il modulo di Young del materiale che compone il cilindro. Considerando  $E=72$  GPa per la silice fusa che compone uno specchio di diametro  $2r=20$  cm, richiedendo che sia  $E_m = E_T$ , si ottiene  $\langle x \rangle = \sqrt{\frac{k_B}{k}T} \simeq 3 \times 10^{-16}$  da confrontare con l'ampiezza attesa dal passaggio di una GW in un rivelatore di molti km  $x \simeq 10^{-19}$  m.

Perché l'interferometro non è completamente cieco al rumore termico? L'energia che genera

### Fighting against noise sources

Thermal noise is another noise source that limits the sensitivity of a GW detector. The thermal noise affects the interferometer through different mechanisms, but one of the simplest way to describe it is through the thermal (Brownian) vibration of the suspensions and of the mirrors of the interferometer due to the non-null temperature of the mechanical and optical components. It is instructive to understand the main logic adopted in GW detectors to mitigate the effects of thermal noise.

The suspensions, the mirrors of an interferometer can be modelled by an harmonic oscillator of elastic constant  $k$ . Its mechanical energy for each normal mode is  $E_m = \frac{1}{2}kx^2$  whereas the thermal energy, for each degree of freedom is,  $E_T = \frac{1}{2}k_B T$  where  $k_B$  is the Boltzmann constant. Roughly, for a cylinder (the mirror) of radius  $r$  and height  $L$ ,  $k = E\pi r^2/L$ , where  $E$  is the Young modulus of the material composing the cylinder. Considering  $E = 72$  GPa for the fused silica composing a mirror of diameter  $2r = 35$  cm and  $L = 20$  cm ( $k = E\pi r^2/L$ ), requesting  $E_m = E_T$ , it is easy to obtain  $\langle x \rangle = \sqrt{\frac{k_B}{k}T} \simeq 3 \times 10^{-16}$  m to be compared with the amplitude expected by the passage of a GW wave on a multi-km detector  $x \simeq 10^{-19}$  m.

Why the interferometer is not completely blinded by thermal noise? The energy generating

la vibrazione termica delle sospensioni e degli specchi dell'interferometro si accumula, in frequenza, ai modi di risonanza di quelle componenti meccaniche; se il fattore di qualità meccanica  $Q$  di quelle componenti è abbastanza alto, l'interferometro è completamente cieco a quelle frequenze di risonanza, ma l'ampiezza di vibrazione si riduce rapidamente lontano dalla risonanza. La tecnica usata in Advanced Ligo e Advanced Virgo per mitigare il rumore termico è stata, quindi, di selezionare materiali e geometrie che innalzano il fattore di qualità  $Q$  delle loro sospensioni e specchi, riducendo le perdite meccaniche; questo è un evidente effetto del cosiddetto teorema di fluttuazione-dissipazione che lega le dissipazioni alle fluttuazioni in sistemi meccanici.

Per ottenere il miglioramento nell'intervallo delle frequenze medio-basse (fino a poche centinaia di HZ) promesso da ET (si veda ad esempio la curva della sensibilità prevista nella Fig.11) la riduzione delle fluttuazioni termiche attraverso il meccanismo descritto sopra non è sufficiente, ed è necessario raffreddare la temperatura dell'ottica di ET. Ad alte frequenze, sopra le centinaia di Hz, la sensibilità dei moderni rivelatori è limitata dallo *shot noise* legato alle fluttuazioni del numero di fotoni accumulati nei bracci e quindi all'output dell'interferometro. Per ridurre queste fluttuazioni la strada seguita dai rivelatori attuali e, anche con maggior intensità, da ET è quella di aumentare la potenza della luce laser inviata e accumulata nelle cavità dell'interferometro (nei rivelatori Advanced poche centinaia di kW sono accumulate nelle cavità dei bracci, in ET ci si attende circa 3 MW). Questo metodo ha diversi inconvenienti e due di essi sono elencati qui sotto:

- aumento del rumore a basse frequenze legato alle fluttuazioni della pressione di radiazione generata dall'impulso del fotone trasferito agli specchi;
- deposizione del calore sulla superficie e sul corpo dello specchio dovuto all'assorbimento della luce da parte di queste componenti ottiche.
- increase of the noise at low frequency related to the radiation pressure fluctuations generated by the photon momentum transfer to the mirrors;
- deposition of heat in the mirror surface and bulk due to the light absorption in these optical components.

Per descrivere il primo punto, è conveniente notare che ogni fotone riflesso dagli specchi nelle

the thermal vibration of the suspensions and mirrors of the interferometer accumulates, in frequency, at the resonant modes of those mechanical components: if the mechanical quality factor  $Q$  of such components is high enough, the interferometer is completely blind at those resonance frequencies, but the vibration amplitude decreases rapidly far from the resonances. The technique used in Advanced Ligo and Advanced Virgo to mitigate the thermal noise has been, then, to select materials and designs that enhance the mechanical quality factor  $Q$  of its mirrors and suspensions, reducing the mechanical losses; this a clear effect of the so-called fluctuation-dissipation theorem that relates dissipations to fluctuations in mechanical systems.

To achieve the improvement in the low-medium frequency range (up to few hundreds of Hz) promised by ET (see for example the expected sensitivity curve in Fig.11) the reduction of the thermal fluctuations through the above described mechanism is not enough and it is necessary to cool down the temperature of the ET optics. At high frequency (above few hundreds of Hz) the sensitivity of the current detectors is limited by the shot noise related to the fluctuation of the number of photons that are stored in the arms and then collected at the output of the interferometer. In order to reduce such fluctuation the path followed by the current detectors and, with even more intensity, by ET is to increase the laser light power injected and stored in the interferometer cavities (in the advanced detectors few hundreds of kW are stored in the arm cavities, in ET about 3 MW are expected). This method has several drawbacks and two of them are listed hereafter:

In order to describe the first point, it is worth to note that each photon reflected by the mirrors in

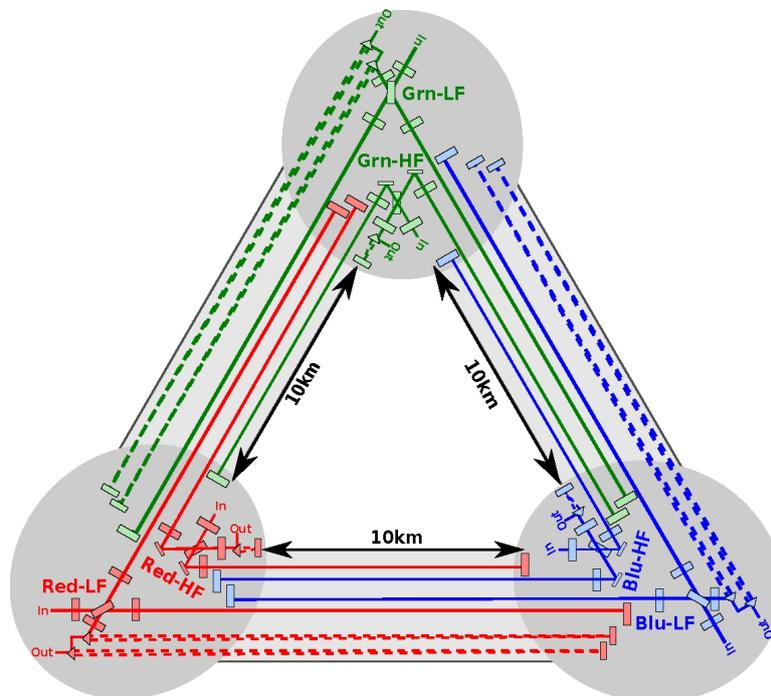
cavità Fabry-Pérot trasferisce ad ogni specchio un impulso  $\|\Delta p\| = 2h/\lambda$  dove  $h$  è la costante di Plank. La fluttuazione del numero di fotoni è immediatamente convertita in una fluttuazione dell'impulso trasferito e, quindi, del rumore di spostamento dello specchio. Questo rumore è rilevante a basse frequenze ed è proporzionale al numero di fotoni, o, equivalentemente, aumenta con la potenza immessa nell'interferometro.

Il secondo punto è dovuto al fatto che i substrati dello specchio e soprattutto l'alta riflettività del rivestimento hanno un'assorbimento residuo ottico di una frazione di una parte per milione; se una potenza di alcuni MW è immagazzinata nelle cavità alcuni Watt sono assorbiti dagli specchi. Questo genera un effetto di lente termica che è curato, nei rivelatori attuali, con un sistema ottico adattante (il cosiddetto sistema di compensazione termica), ma questo in ET entra in conflitto con il raffreddamento necessario per operare a temperature criogeniche. Per questo motivo ET implementa il cosiddetto approccio *xylophone*: ogni rivelatore di ET, identificato con un diverso colore nella Fig. 9, è composto da due interferometri: ET-LF e ET-HF, come indicato nella figura.

the Fabry-Pérot cavities transfers to each mirror a momentum  $\|\Delta p\| = 2h/\lambda$  where, here,  $h$  is the Plank constant. The photon number fluctuation is immediately converted in a fluctuation of the transferred momentum and then in a displacement noise of the mirror. This noise is relevant at low frequency and it is proportional to the number of photons, or, equivalently, it increases with the power injected in the interferometer.

The second point is due to the fact that the mirror substrates and mainly the high reflectivity coatings show a residual optical absorption of a fraction of a part per million (ppm); if a power of few MW is stored in the cavities few watts are absorbed by the mirrors. This generates thermal lensing effects that are cured, in the current detectors, through an adaptive optics logic (the so-called thermal compensation system), but that in ET will conflict also with the cooling needed to operate at cryogenic temperature.

For these reasons, ET implements the so called xylophone approach: each ET detector, scratched with a different colour in Fig.9, is in effect composed by two interferometers: ET-LF and ET-HF, as shown in Fig.10.



**Figure 10:** L'approccio Xylophone in ET: ET è composto da tre rivelatori (rosso, verde e blue); ogni rivelatore è composto da due interferometri (ET-LF, ET-HF).

The Xylophone approach in ET: ET is composed by three detectors (red, green and blue); each detector is composed by two interferometers (ET-LF, ET-HF). Credits: ET design study.

## ET-LF

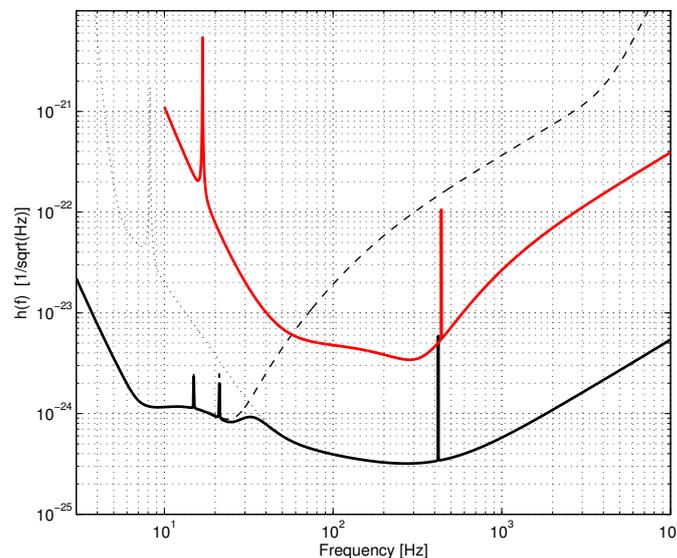
ET-LF è dedicato alle basse frequenze. L'ottica principale e l'ultimo stadio delle sospensioni di ET-LF operano a circa 10 K per ridurre il rumore termico. La silice fusa, usata per i substrati degli specchi degli attuali rivelatori, mostra uno strano comportamento a basse temperature; un aumento della sua dissipazione meccanica ed una bassa conduttività termica.

Al contrario, per essere un buon candidato alla realizzazione di substrati per ET-LF, un materiale dovrebbe mostrare, a temperature criogeniche, una bassa dissipazione meccanica, un'alta conduttività termica (per sopprimere effetti di lente) e un relativamente basso tasso di assorbimento. Il rivelatore giapponese, KAGRA, attualmente in costruzione, adotta specchi di zaffiro. Questo materiale cristallino mostra, a basse temperature, una buona conduttività termica e una bassa dissipazione meccanica; ma lo zaffiro mostra anche un alto, e non ancora ben compreso, assorbimento ottico, maggiore di 20–40 parti per milione per cm di spessore, e al momento non è possibile trovarlo in grandi quantità.

## ET-LF

ET-LF is devoted to low frequency. The main optics and the last stage of the suspensions of ET-LF are operating at about 10 K in order to reduce the thermal noise. Fused silica, used for the substrate of the mirrors in all the current detectors, shows some weird behaviour at low temperature: increase of its mechanical dissipation and low thermal conductivity.

On the contrary, to be a good candidate in the realisation of the substrates for ET-LF, a material should show, at cryogenic temperatures, low mechanical dissipation, high thermal conductivity (to suppress thermal lensing effects) and relatively low optical absorption. The Japanese detector, KAGRA, currently under construction, is adopting sapphire mirrors. This crystalline material shows, at low temperature, a good thermal conductivity and a very low mechanical dissipation; but sapphire shows also high and still not well understood optical absorption (larger than 20–40 ppm per cm of thickness) and it is not currently possible to find it in large samples.



**Figure 11:** Curva di sensibilità di ET (linea nera continua) confrontata con la sensibilità nominale di Advanced Virgo (curva rossa). Le curve punteggiate e tratteggiate indicano i contributi alla sensibilità di ET rispettivamente degli interferometri a bassa (ET-LF) e alta (ET-HF) frequenza.

Sensitivity curve of ET (black continuous line) compared to the nominal sensitivity of Advanced Virgo (red curve). The dotted and dashed lines identify the contributions to the ET sensitivity respectively given by the low frequency (ET-LF) and high frequency (ET-HF) interferometers.

Gli scienziati di ET stanno studiando la possibilità di usare il silicio come materiale per i substrati dello specchio (e per l'ultima parte delle sospensioni); il silicio mostra una dissipazione meccanica molto bassa, una conduttività termica alta, ed è disponibile in grandi quantità. L'idea è di realizzare specchi con una massa di circa 200 kg per ridurre gli effetti della radiazione di pressione. Al momento le prestazioni in termini di assorbimento ottico sono allo studio e misure preliminari indicano un'ottimo assorbimento (poche parti per milione) in campioni di silicio prodotti con un metodo di crescita cristallina detto magnetic-Czochralski. Il silicio è opaco alla lunghezza d'onda della luce usata negli attuali rivelatori ( $\lambda \simeq 1\mu m$ ), quindi, ET-LF userà una lunghezza d'onda maggiore ( $\lambda \simeq 1.55 - 2.0\mu m$ ).

Questo riguarda le tecnologie usate in ET-LF ed è necessaria una impegnativa attività di ricerca e sviluppo per ottenere delle componenti opto-elettroniche da usare nell'interferometro. Per ridurre gli effetti della pressione di radiazione e quelli termici si dovrebbe far circolare nell'interferometro una potenza di pochi watt, facilitando le operazioni criogeniche. Inoltre, per aumentare le prestazioni a bassa frequenza si adotterebbero delle tecniche di compressione ottica dipendente dalla frequenza. Il contributo previsto di ET-LF alla sensibilità di ET è mostrato dalla linea punteggiata nella Fig.11.

## ET-HF

ET-HF avrà un design più tradizionale nell'implementazione di un approccio di forza bruta per ridurre il rumore ad alta frequenza. Utilizzerà laser ad alta potenza e tecniche di compressione ottica per ridurre lo *shot noise* ad alta frequenza, pesanti specchi di silice fusa per sopprimere la pressione di radiazione e schemi di compensazione termica molto spinti per compensare l'effetto di lente termica indotto dall'enorme potenza accumulata nelle cavità Fabry-Pérot. Il contributo di ET-HF alla sensibilità del rivelatore ET è mostrato dalla curva tratteggiata nella Fig. 11.

## Il piano d'azione di ET

ET è un progetto complesso e per ideare, preparare e realizzare l'infrastruttura necessaria sono necessarie decine di anni. Al momento più di

ET scientists are investigating the possibility to use Silicon as material for the mirror substrates (and for the last stage of the suspensions); Silicon shows a very low mechanical dissipation, high thermal conductivity and it is possible to find it in large pieces. The idea is to realise mirrors having a mass of about 200 kg in order to reduce the radiation pressure effects. Currently the performances in terms of optical absorption are under evaluation and preliminary measurements are showing very good absorption (few ppm per cm) in samples of Silicon produced with a crystalline grown method named magnetic-Czochralski. Silicon is opaque to the light wavelength ( $\lambda \simeq 1\mu m$ ) used in the current detectors and, then, ET-LF will use a longer wavelength ( $\lambda \simeq 1.55 - 2.0\mu m$ ).

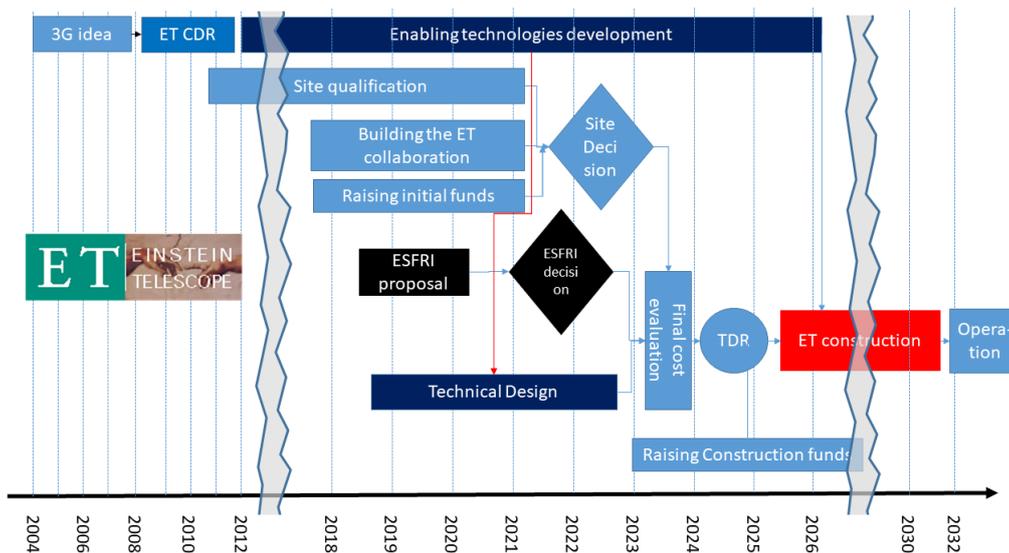
This affects the technologies used in ET-LF and a challenging R&D is needed to develop the opto-electronic components used in the interferometer. To reduce both the radiation pressure effects and the thermal effects, a power of few watt is expected to circulate in the interferometer, facilitating the cryogenic operations. Furthermore, frequency dependent optical squeezing techniques will be adopted to improve the low frequency performances. The expected contribution of ET-LF to the sensitivity of ET is shown by the dotted line in Fig.11.

## ET-HF

ET-HF will have a more traditional design implementing a brute-force approach to the reduction of the noise at high frequency. It will use high power laser and optical squeezing techniques to reduce the shot noise, heavy fused silica mirrors to suppress the radiation pressure and challenging thermal compensation schemes to compensate the thermal lensing induced by the huge power stored in the Fabry-Pérot cavities. The contribution of ET-HF to the sensitivity of the ET detector is shown by the dashed curve in Fig. 11.

## The ET roadmap

ET is a complex project and to ideate, prepare and realise the infrastructure decades are needed. Currently more than a decade has elapsed since



**Figure 12:** Piano d'azione del progetto ET. La comunità scientifica di ET si è oggi trasformata in una vera collaborazione che aggrega una comunità di scienziati attorno ad un obiettivo scientifico. ET ambisce ad entrare nella lista delle più importanti infrastrutture scientifiche d'Europa, il cosiddetto piano d'azione ESFRI (European Strategic Forum for Research Infrastructures) e nei prossimi anni sarà inviata una proposta. In parallelo, sono identificate e sviluppate le tecnologie che rendono attuabile il progetto; i siti che ambiscono ad ospitare l'osservatorio ET sono qualificati da accurate e continue misure. La selezione dei siti verrà effettuata attraverso una valutazione scientifica, tecnica, finanziaria e politica nel 2022. Sulla base di quella decisione e sul progetto tecnico verranno prodotti una valutazione del costo finale e un Rapporto Tecnico del Progetto. Alla fine, se il sostegno finanziario disponibile sarà sufficiente, la costruzione dell'infrastruttura ET inizierà con l'obiettivo che l'osservatorio ET sia operativo nei primi anni '30 di questo secolo.

Roadmap of the ET project. The ET scientific community is transformed nowadays in a true collaboration aggregating a community of scientists around its scientific goals. ET aims to enter in the list of the most important research infrastructures in Europe, the so-called ESFRI (European Strategic Forum for Research Infrastructures) roadmap and in the next years a proposal will be submitted. In parallel, the enabling technologies are identified and developed; the sites, aiming to host the ET observatory, are qualified thorough long standing measurements. The site selection will be realised through scientific, technical, financial and political evaluations in 2022. Based on that decision and on the technical design the final cost evaluation and the Technical Design Report (TDR) are produced. Finally, if enough financial support is available, the ET infrastructure construction will begin, aiming to have the ET observatory operational in the first years of 2030s.

dieci anni sono passati dalle prime idee di un rivelatore di terza generazione ed il progetto sta entrando in una fase dove l'idea di ET si è trasformata in un progetto operativo. I diversi passi che il progetto di ET deve compiere sono mostrati in Fig. 12 e descritti nella didascalia della figura. Uno dei passi fondamentali è la scelta del sito dell'infrastruttura di ET.

Le richieste che un sito deve soddisfare per ospitare ET sono molte, ma i primi requisiti sono un basso rumore sismico naturale e antropogenico, una bassa densità di popolazione, una buona solidità della roccia per costruire delle cavità sotterranee, un appoggio entusiastico da parte delle popolazioni locali e un forte sostegno finanziario

the first ideas about a 3G detector and the project is entering in a crucial phase where the ET concept is transformed in an operative project. The different steps that the ET project has to accomplish are shown in Fig.12 and described in the figure caption. One of the crucial steps is the selection of the site for the ET infrastructure.

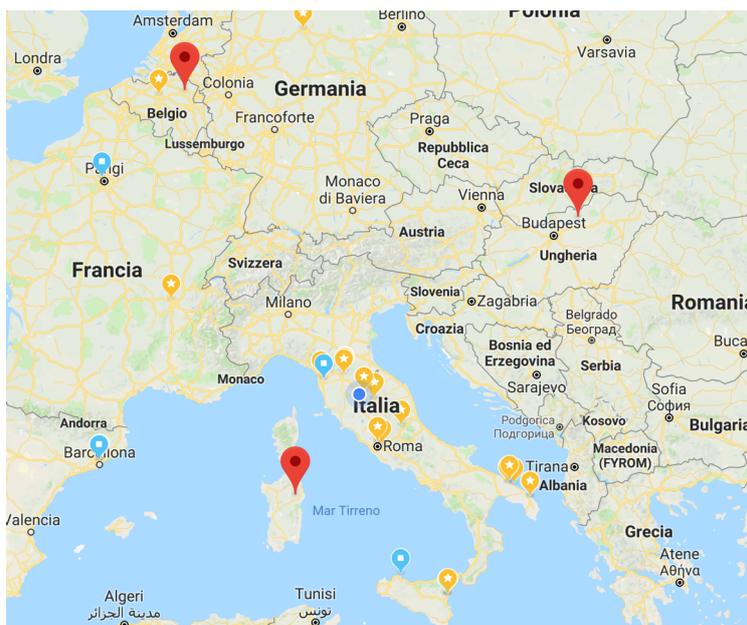
Several are the requirements that a site must respect to host the ET infrastructure, but the first requirements are a low natural and anthropogenic seismic noise level, a low population density, a good solidity of the rock to build large underground cavities, an enthusiastic support by the local populations and a strong financial support

da parte della nazione, o nazioni, ospitanti. Al momento ci sono tre siti candidati ad ospitare ET (Fig. 13) che soddisfano tutte o parte di questi requisiti:

- sotto la montagna Mátra, Ungheria,
- nella regione del Limburg, attraverso i confini di Olanda, Belgio e Germania,
- in Sardegna, Italia.

by the hosting country (or countries). Currently three sites are candidate to host ET (Fig.13), satisfying all or a fraction of these requirements:

- Under the Mátra mountain, Hungary
- In the Limburg region, across the borders between The Netherlands, Belgium and Germany
- In Sardinia, Italy.



**Figure 13:** *I tre siti attualmente candidati ad ospitare ET; in Olanda, in Ungheria e in Italia. Location of the three sites currently candidate to host ET: In The Neterlands, in Hungary and in Italy.*

Il sito italiano è localizzato vicino a Lula (Nu) attorno all'area mineraria di Sos Enattos. All momento, grazie al sostegno della Regione Sardegna, è in costruzione un laboratorio sotterraneo per lo studio di esperimenti di alta precisione, finanziato dall'INFN, sulla gravitazione in condizioni di basso rumore. Queste attività contribuiranno alla qualificazione del sito di Sos Enattos in vista, possibilmente, di una infrastruttura di ET.

Il telescopio Einstein è un progetto enorme, un'avventura scientifica ed umana, che promette di osservare l'emissione di GW in quasi tutto l'Universo, per scoprire i segreti nascosti nel nocciolo delle Stelle di Neutroni, per risolvere il puzzle del modello cosmologico dell'Universo e per studiare, con dettagli mai raggiunti prima,

The Italian site is located near Lula (Nu), around the mining area of Sos Enattos. Currently, thanks to the support of the Sardinia Region, an underground laboratory aiming to host precision experiments is under construction, funded by INFN, on Gravitation in low noise conditions. These activities will also contribute to the qualification of the Sos Enattos site in view (possibly) of the ET infrastructure.

The Einstein Telescope is a huge project, a scientific and human adventure, promising to observe the emission of gravitational waves in almost the whole Universe, to discover the secrets hidden in the core of Neutron Stars, to solve the puzzle of the cosmological model of the Universe and to study, with unprecedented details, the most unknown "interaction": the gravitation.

la meno nota delle interazioni: la gravità.



- [1] M. Punturo et al., *Classical and Quantum Gravity*, Volume 27, Number 19, (2010)
- [2] M. Abernathy et al. (the ET science team), *Einstein gravitational wave Telescope conceptual design study*, ET-0106C-10 (2011), <http://www.et-gw.eu/index.php/etdsdocument>
- [3] B. P. Abbot et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 061102.
- [4] B. P. Abbot et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): “GW170814: A Three-Detector Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Coalescence”, *Phys. Rev. Lett.* **119** (2017) 141101.
- [5] B. P. Abbot et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): “GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral”, *Phys. Rev. Lett.* **119** (2017) 161101.
- [6] B. P. Abbot et al., *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 848, Number 2, (2017)



**Michele Punturo:** è un ricercatore dell’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Ha iniziato la sua carriera scientifica nella Fisica delle Alte Energie, collaborando al CERN agli esperimenti UA2, NA31 e NA48. Nel 1994 è entrato a far parte della collaborazione Virgo collaborando alla sua costruzione nel ruolo di coordinatore del rivelatore e, più recentemente coordinando le attività di calcolo. Nel 2004, con il Prof. Harald Lück del Max Plank institute for Gravitation in Hannover, ha definito l’idea concettuale per la terza generazione dei rivelatori di GW. Ha coordinato lo studio del design di ET ed ora sta guidando le fasi iniziali della collaborazione ET.

**Michele Punturo:** is a researcher of the Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). He began his scientific career in High Energy Physics, collaborating at CERN in the experiments UA2, NA31 and NA48. In 1994 entered in Virgo, collaborating to its construction, having the role of detector coordinator and more recently coordinating the computing activities. In 2004, together with Prof. Harald Lück of the Max Plank institute for Gravitation in Hannover, defined the concepts for the third generation of GW detectors. He coordinated the ET design study and he is now driving the initial phases of the ET collaboration.