

O naturze i odkryciu fal grawitacyjnych.



prof. Mariusz P. Dąbrowski

NCBJ, Świerk, 22.03.2016

**Czym jest grawitacja? Zaczynamy od
“jabłka Newtona” i eksperymentu
Cavendisha, potem przechodzimy do
planet, gwiazd, galaktyk, ewolucji
przestrzeni i fal grawitacyjnych.**

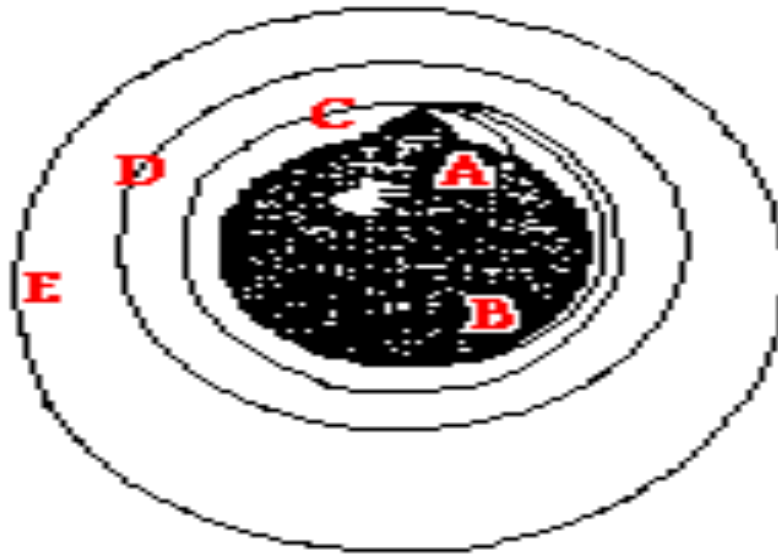
Sir Izaak Newton (1642-1727)



“Jabłko Newtona” – symbol siły ciężenia, czyli grawitacji.



**Cannonballs shot from
"Newton's Mountain"**



**As launch speeds are increased,
the cannonballs travel greater
distances before falling to earth.
Ultimately, the cannonballs will
fall around the earth instead of
into the earth.**

**Newton zrozumiał, że jest to ta sama siła,
która powoduje skośny ruch kuli armatniej,
eliptyczny ruch Księżyca wokół Ziemi oraz
planet wokół Słońca.**

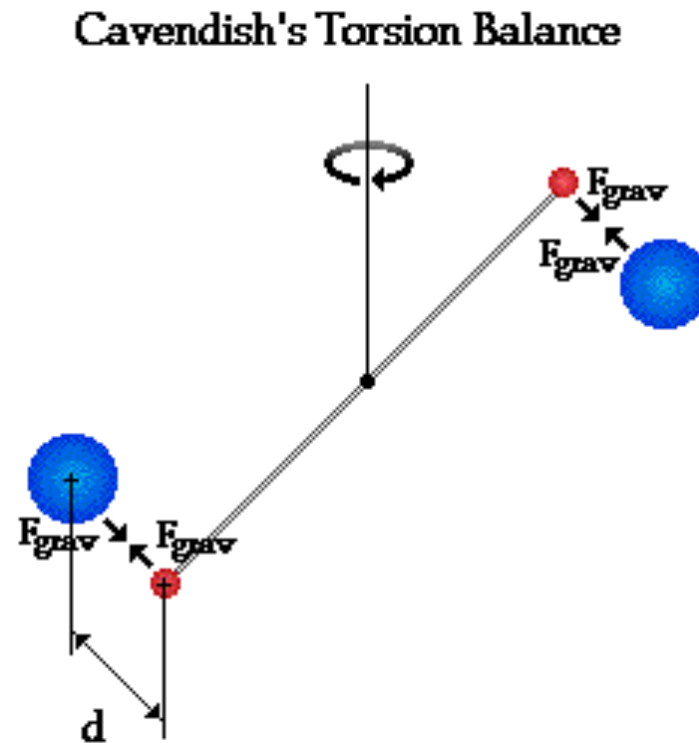
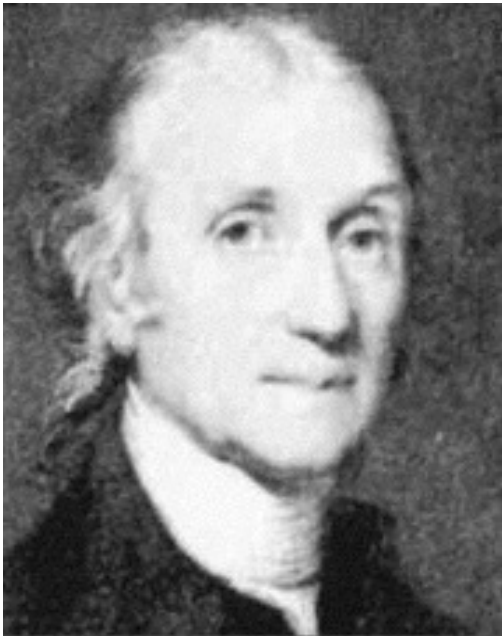


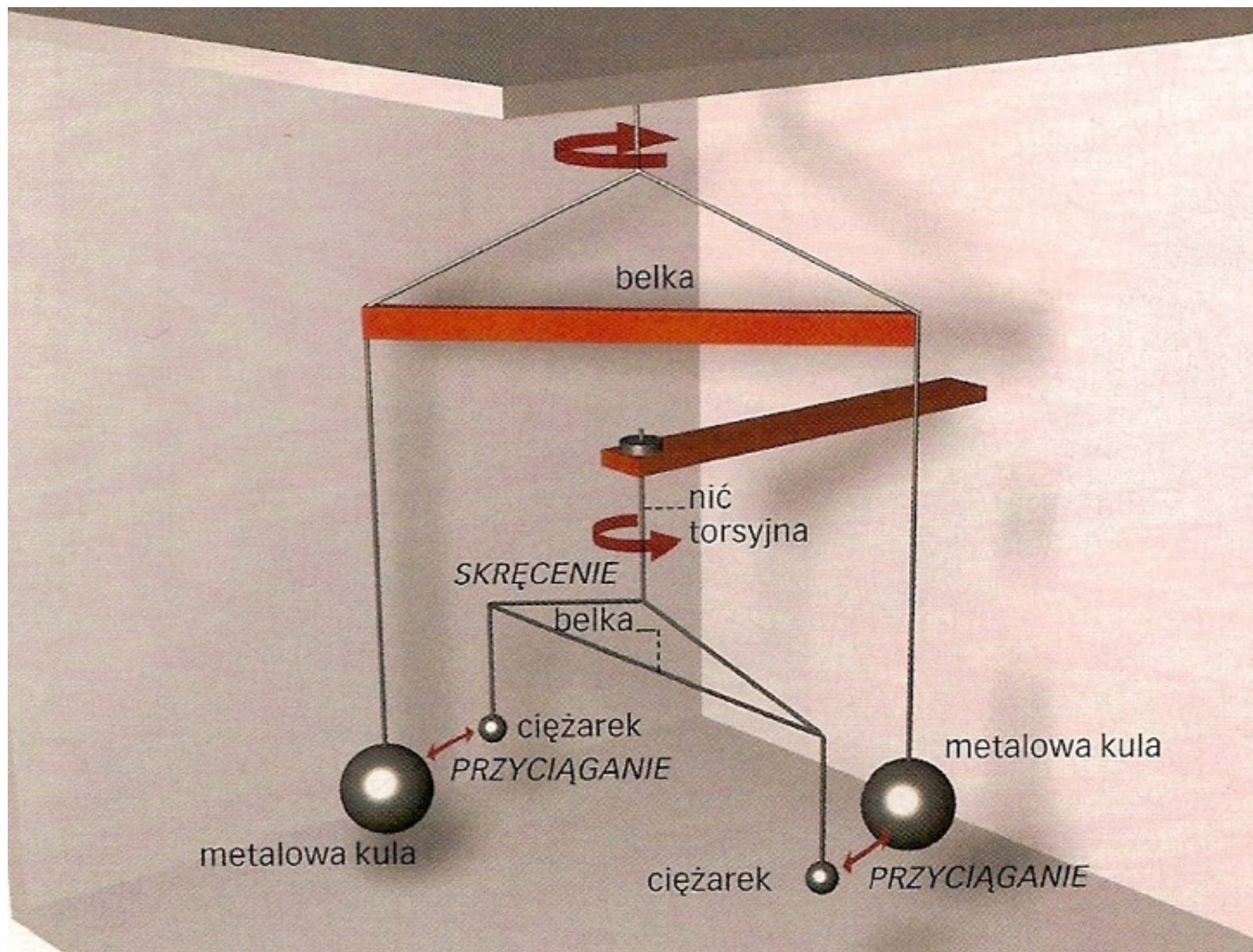
**Trzy zasady dynamiki
oraz**

**Prawo powszechnego
ciężenia
(prawo odwrotnych
kwadratów)**

$$F(r) = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Stałą grawitacji G wyznaczył Sir Henry Cavendish (1731-1810) – okazało się, że jest ona mała i wobec tego grawitacja ujawnia się przede wszystkim dla dużych mas (przyływy oceanów, Układ Słoneczny, kosmos).







Słabość oddziaływania - mały efekt, może być zaburzony przez wiele czynników.

Aby uniknąć wpływu podmuchów powietrza na dokładność pomiarów Cavendish obserwował zachowanie się kul przez lunetkę umieszczoną w ścianie laboratorium.



Doświadczenie Cavendisha

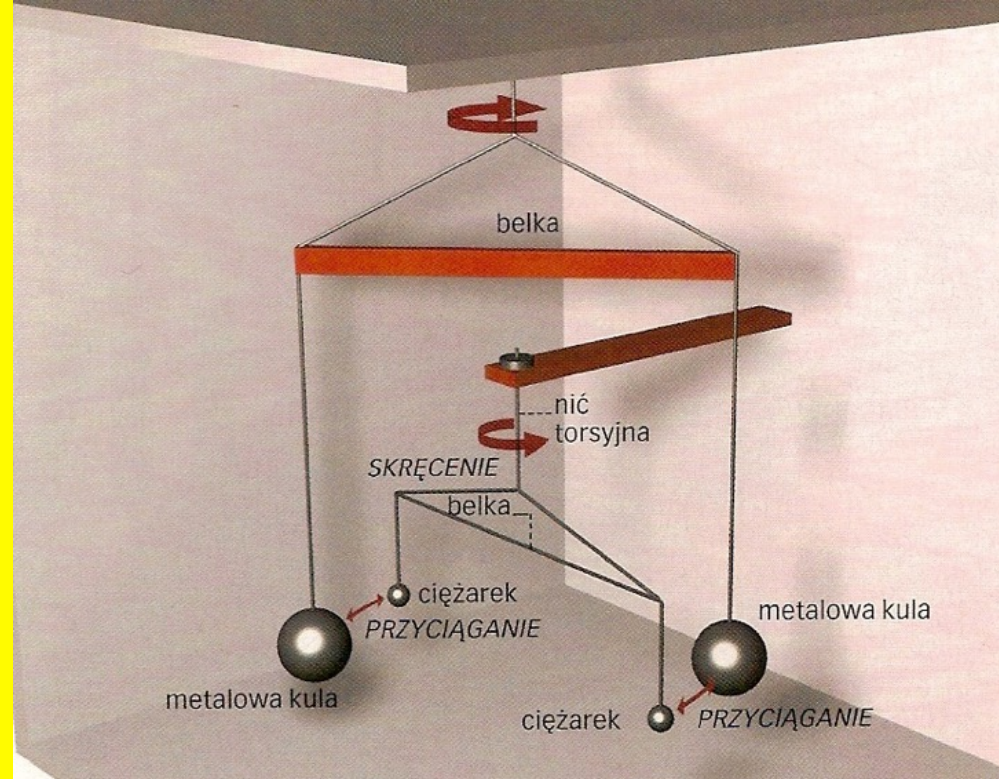
$$F(r) \frac{L}{2} = \kappa \theta \quad \text{Prawo Hooke'a}$$

κ - moment kierujący

$$F(r) = G \frac{Mm}{r^2} \quad \text{siła grawitacji Newtona}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\kappa}} \quad \text{Okres drgań wahadła torsyjnego}$$

I - moment bezwładności wahadła



$$G = \frac{4\pi^2 I r^2 \theta}{MmLT^2}$$

$$G = 6,6742 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$$

**CODATA –
Committee on Data for Science
and Technology**

**Zrozumienie prawa grawitacji
zainspirowało Newtona a potem
Einsteina do konstrukcji
obiektów masywnych i modeli
Wszechświata w oparciu o ich
teorie grawitacji.**

**Pytanie:
Co i jak oddziałuje?**

Oddziaływania fundamentalne - zasięg

Grawitacyjne – zasięg nieskończony

Elektromagnetyczne - nieskończony

Jądrowe silne – zasięg jądra ($1/10^{15}$ m

– jedna tysięczna milionowej milionowej metra)

Jądrowe słabe – zasięg 1000 razy mniejszy

Oddziaływania jądrowe silne są odpowiedzialne za
utrzymanie jąder atomowych w stabilności.

Oddziaływanie elektryczne jest odpowiedzialne za
utrzymanie atomów w stabilności.

Oddziaływanie grawitacyjne jest odpowiedzialne za
utrzymanie układów planetarnych i galaktyk w całości.

Oddziaływanie jądrowe słabe pełni rolę uzupełniającą –
jest **odpowiedzialne za rozpady promieniotwórcze** jąder radioaktywnych.

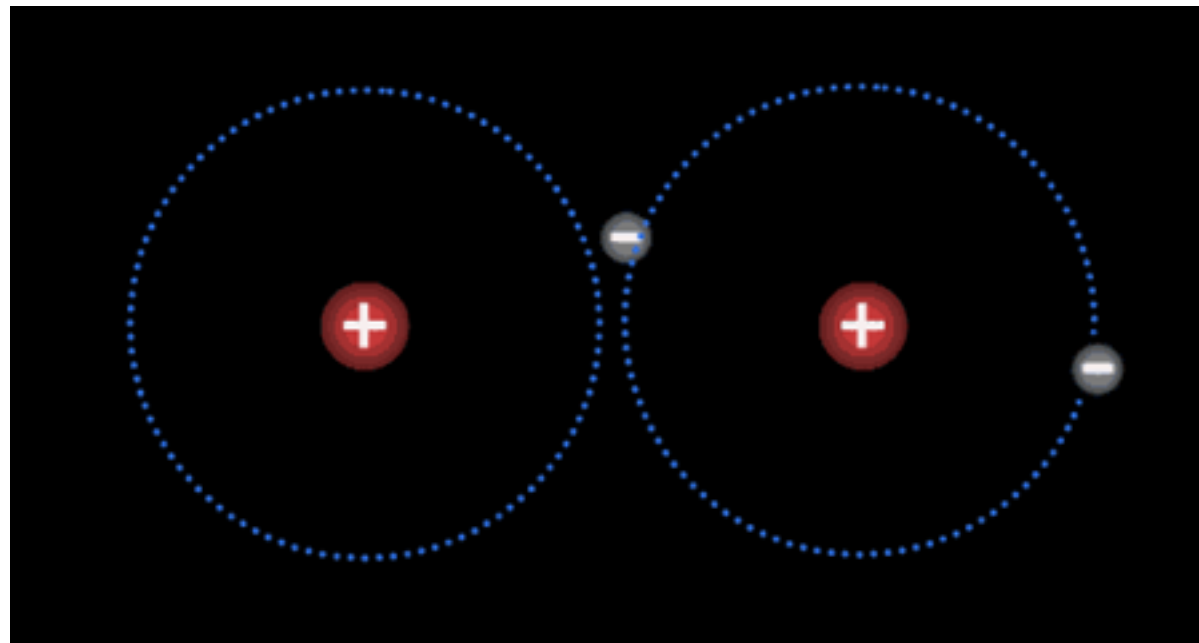
Fenomen oddziaływania

Jak opisać **przyciąganie** się dwóch ładunków elektrycznych?

Nie są połączone **sprężynami** jak dwie kulki metalowe!?

Rolę sprężyn grają **niewidzialne cząstki** wymieniane pomiędzy dwoma ciałami zwane **cząstkami oddziaływania**!

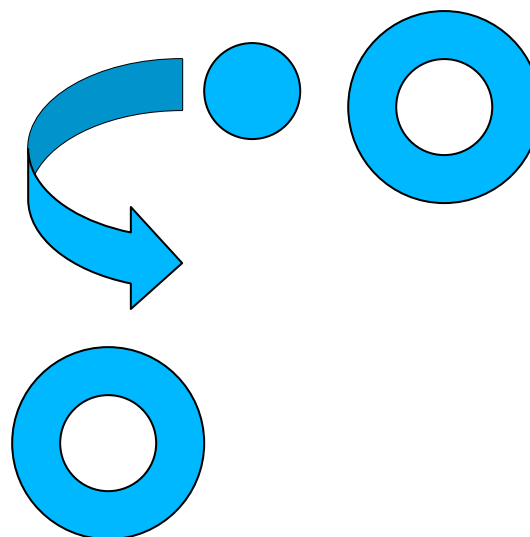
Analogia -
oddziaływanie
wymienne
(elektronów)
w cząsteczce
wodoru H₂





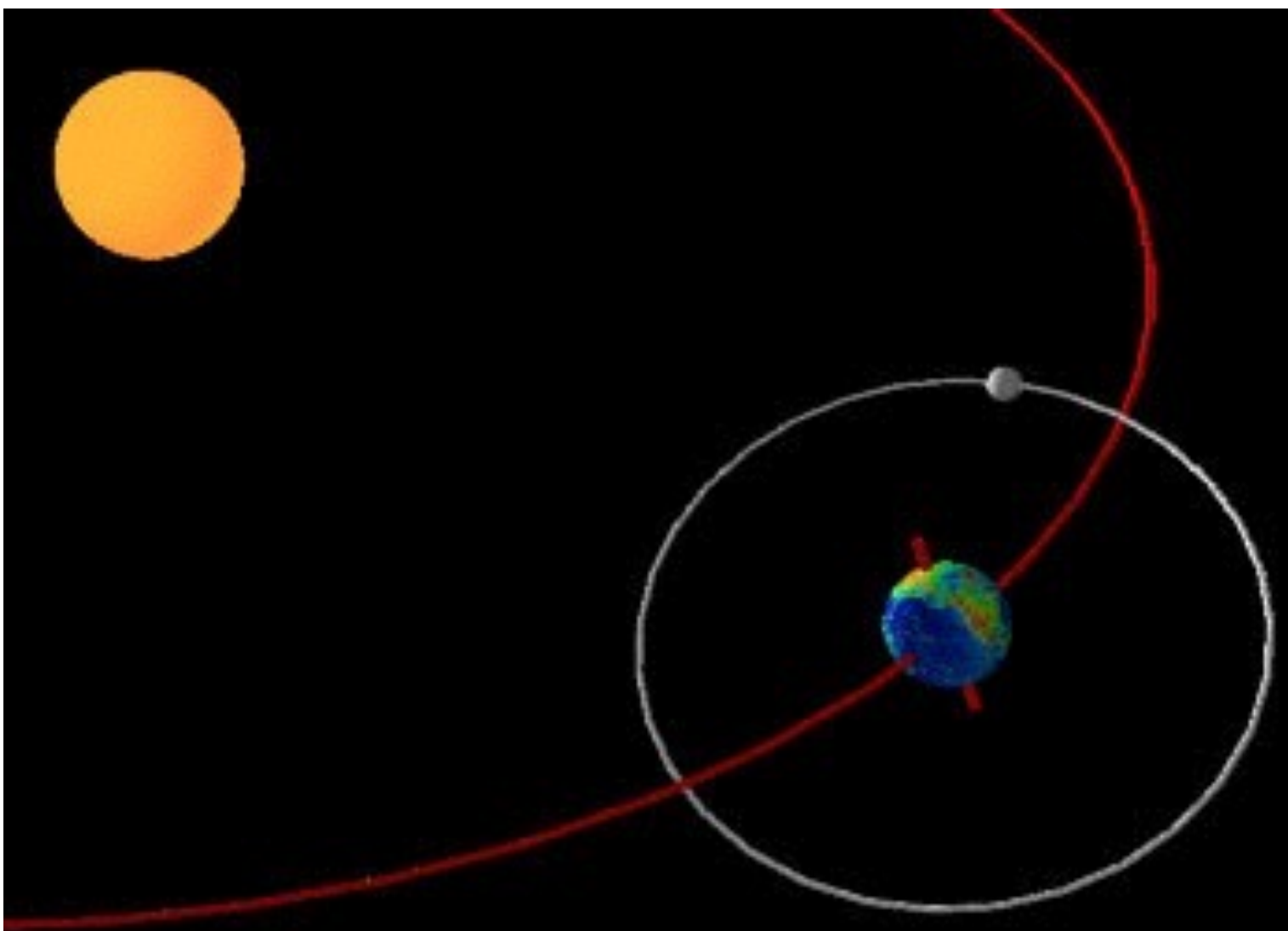
cząstka
wymie-
niana

cząstka 2



cząstka 1

Oddziaływanie ma miejsce dopóki cząstki (piłka) są wymieniane.



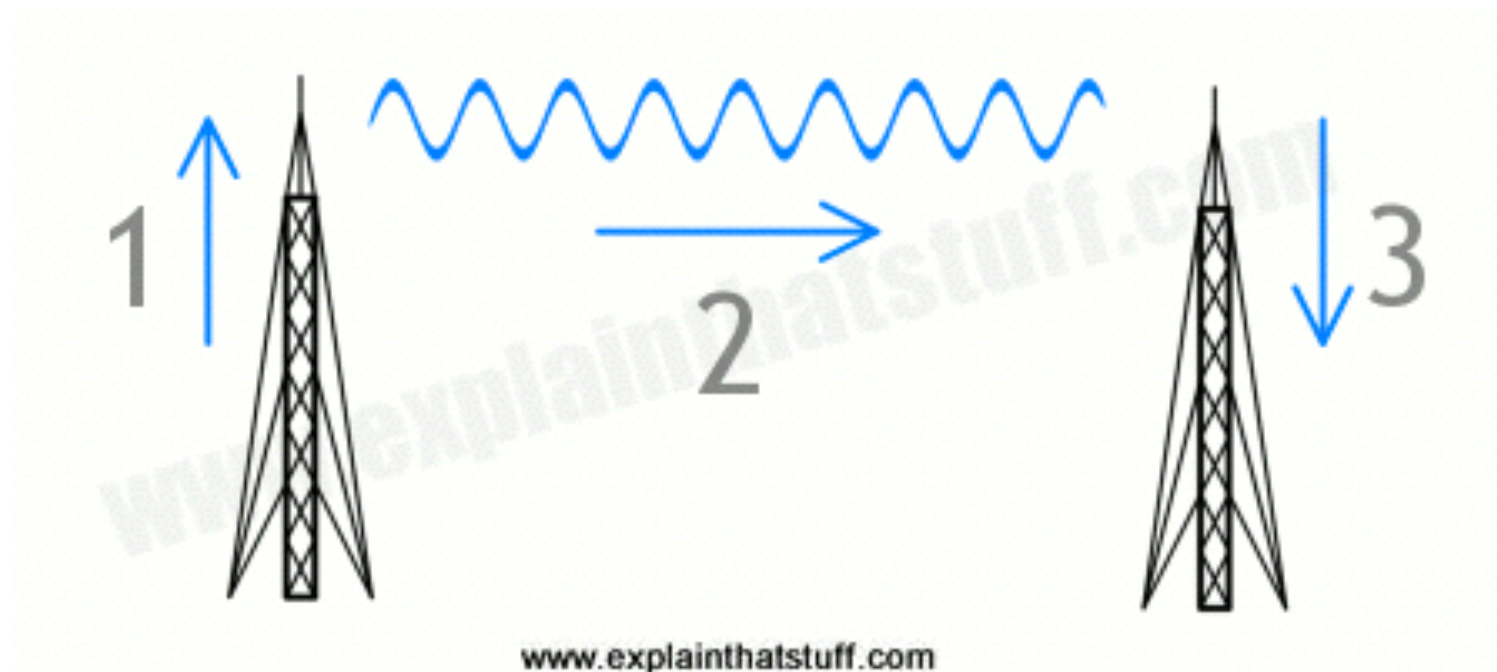
Nie “widzimy” cząstek wymienianych (przynajmniej gołym okiem).

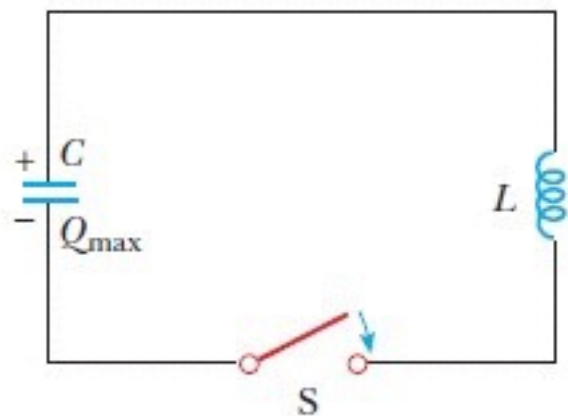
Ale “czujemy” skutek tego oddziaływania - masy i ładunki przyciągają się (lub odpychają) wzajemnie.

Co zatem jest przekazywane z miejsca na miejsce?

Cząstki = fale materii.

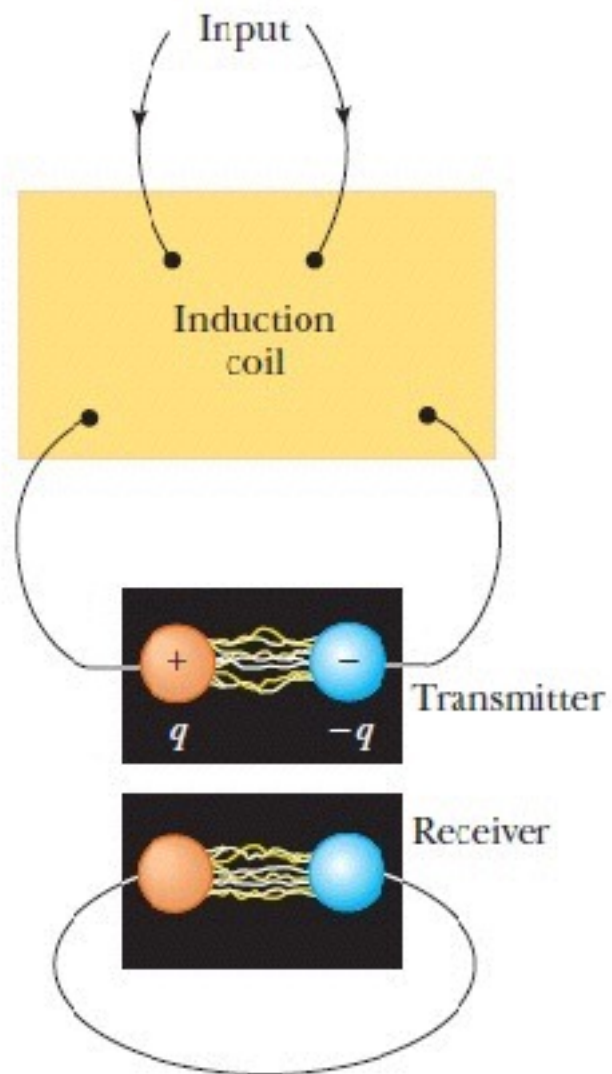
**Najlepiej znany przykład - fale elektromagnetyczne (kwanty światła).
Dzięki nim odbieramy sygnały radiowe i telewizyjne!**

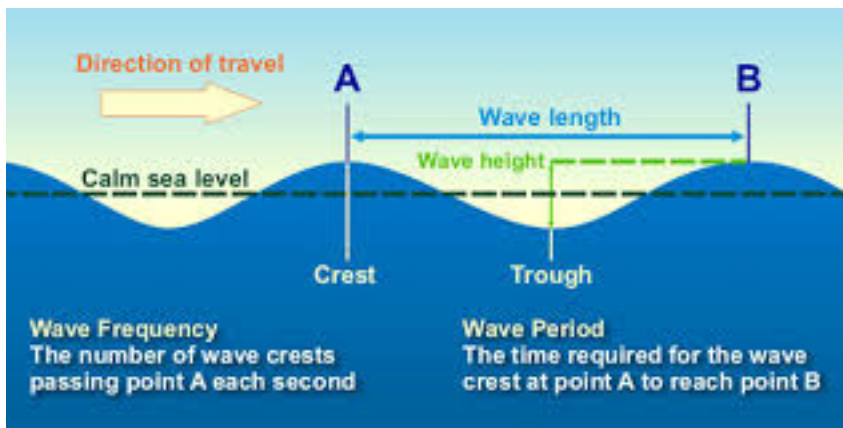




Klasyczny obwód LC

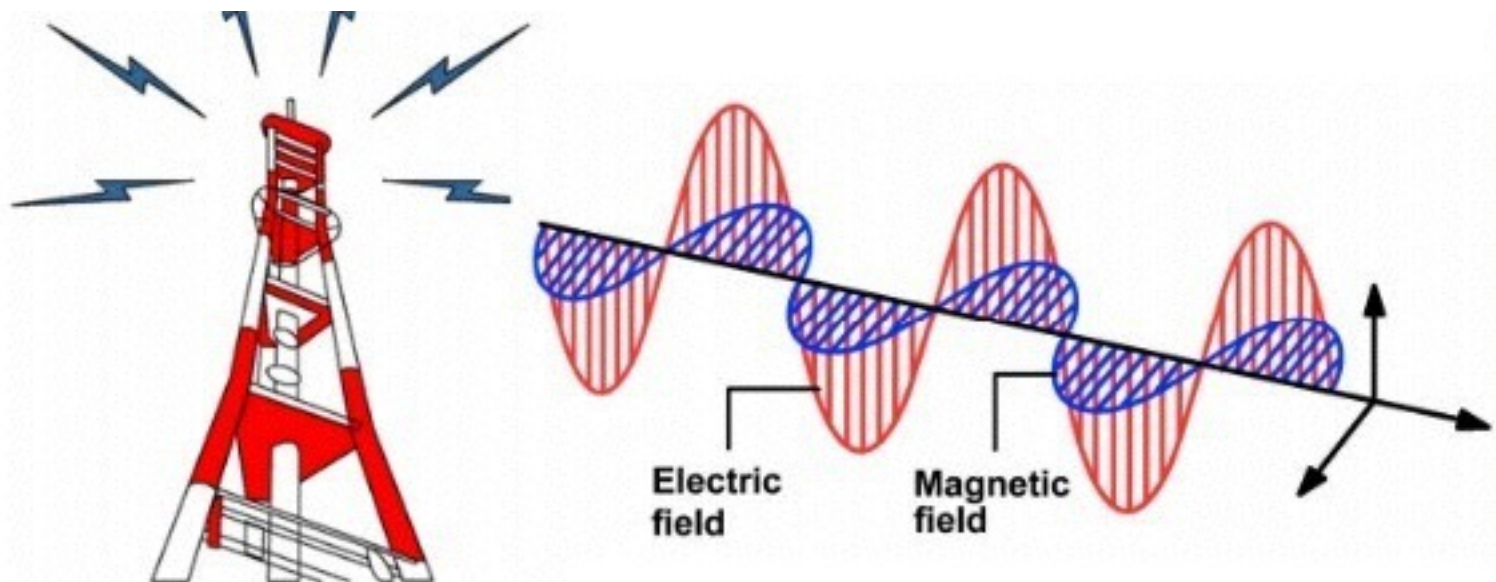
Nadajnik i antena

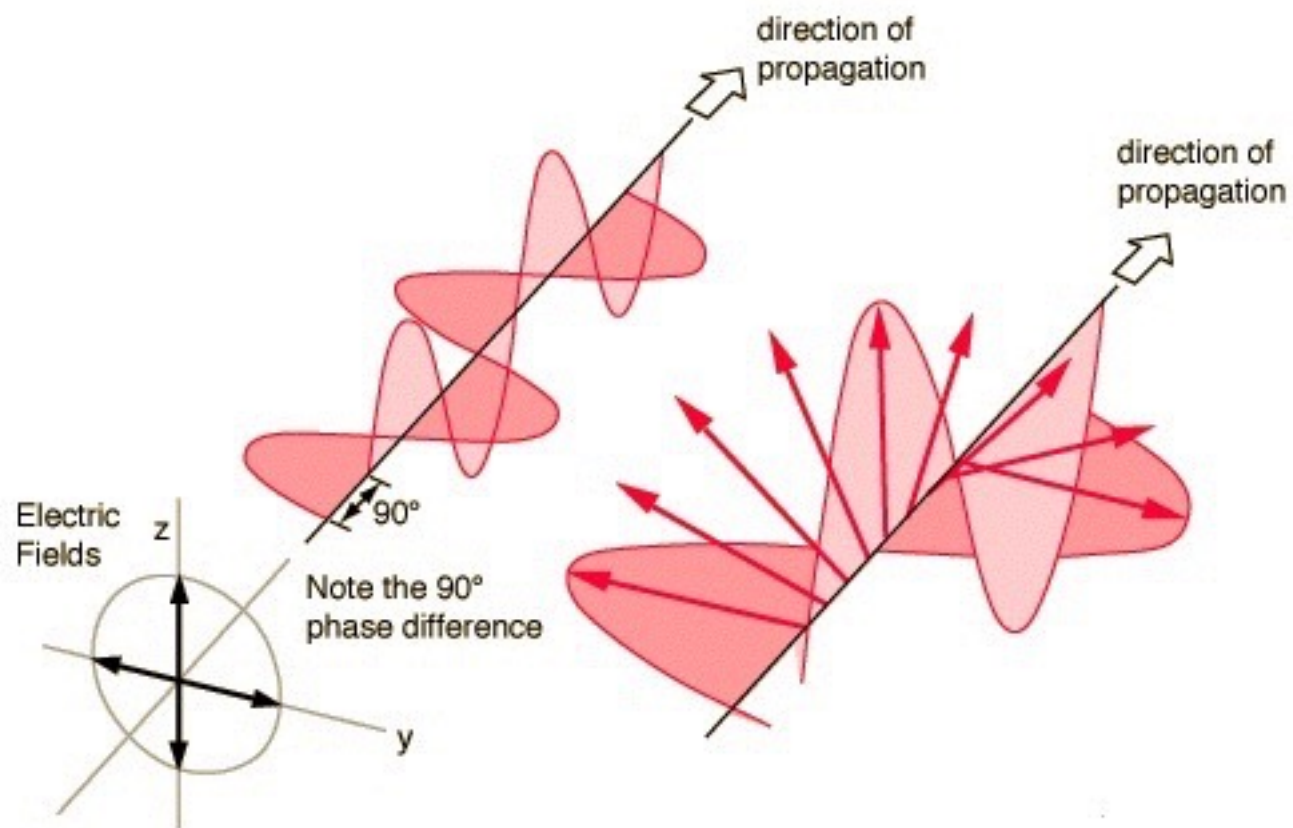




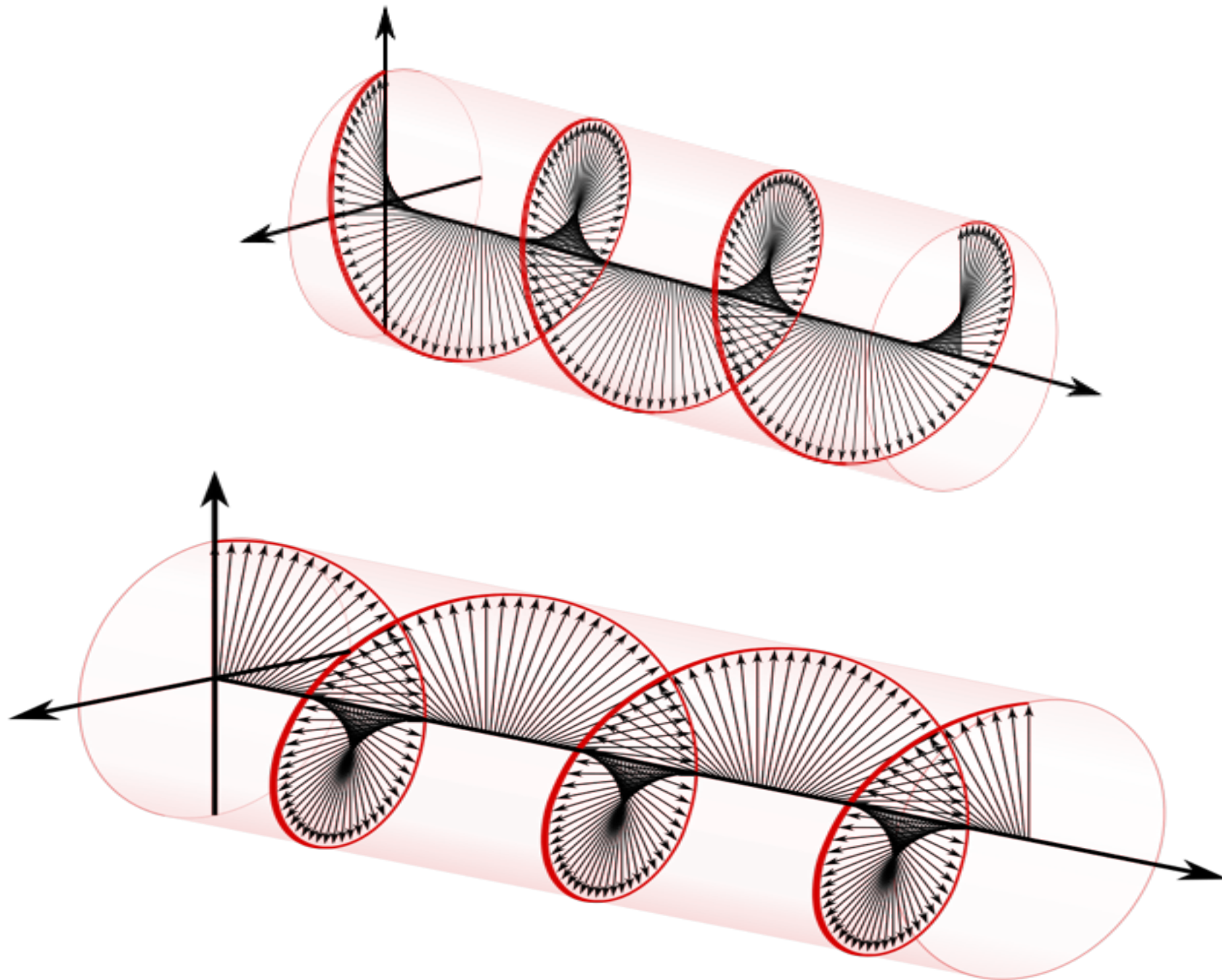
Fala mechaniczna - drgania cząstek ośrodka (np. wody).

Fala elektromagnetyczna - drgania pól elektrycznego i magnetycznego.

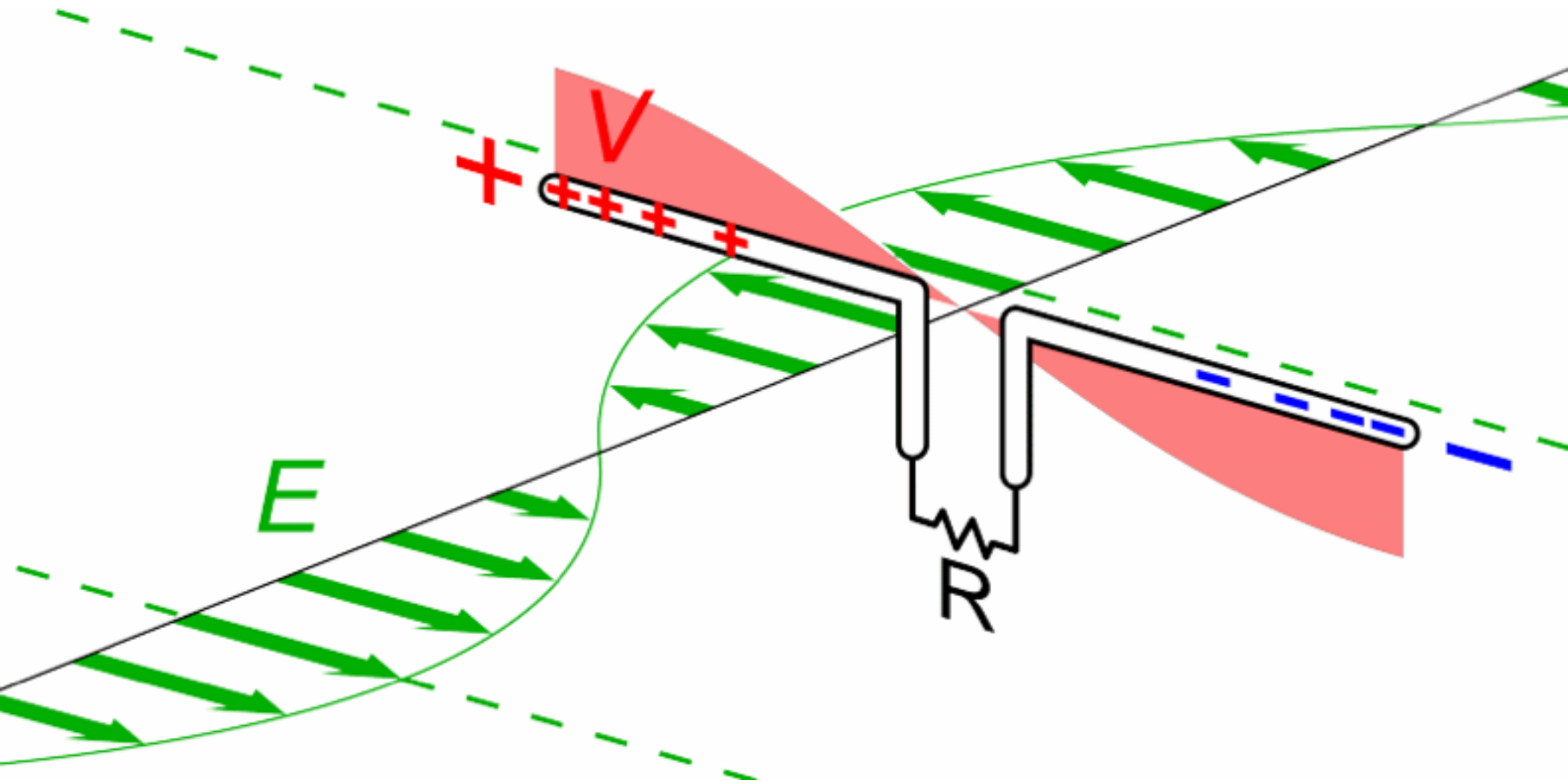




Fale elektromagnetyczne



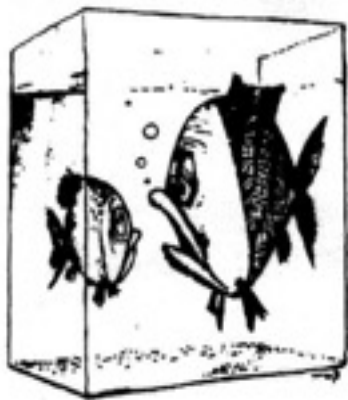
Przechodząca przez antenę fala porusza ładunki elektryczne i wytwarza mini-prądy.



Pojęcie czasoprzestrzeni.

Czym jest czasoprzestrzeń?

Jest **zbiorem** wszystkich możliwych **zdarzeń elementarnych** (punkto-chwil albo inaczej miejsc „tu i teraz”).



Izaak Newton: (czaso)przestrzeń jest „**areną**” dla ruchów materii lub inaczej **pojemnikiem** w którym pojawia się i ewoluuje materia.

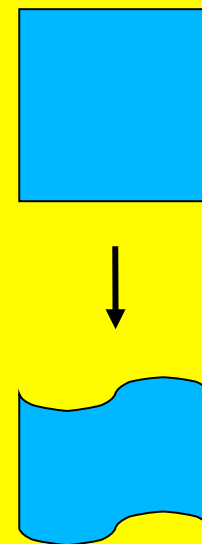
Minkowski – „arena” **bez** materii.

Albert Einstein (1915) – Ogólna Teoria Względności

Czasoprzestrzeń to **zbiór** wszystkich możliwych **zdarzeń elementarnych**, który jest modyfikowany oddziaływaniem z materią.

Według Einsteina **ten zbiór może być odwzorowany na obiekt geometryczny** (linia, płaszczyzna itd.) i dalej ten obiekt geometryczny może być „**odkształcany**” pod wpływem znajdującej się w nim materii.

Zatem czasoprzestrzeń może zachowywać się **jak kartka papieru, którą można dowolnie wyginać**, a odpowiada za to oddziaływanie grawitacyjne.



Ogólna Teoria Względności

Geometria = Materia

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} R = (8\pi G/c^4) T^{\mu\nu}$$



Albert Einstein (1879-1955)

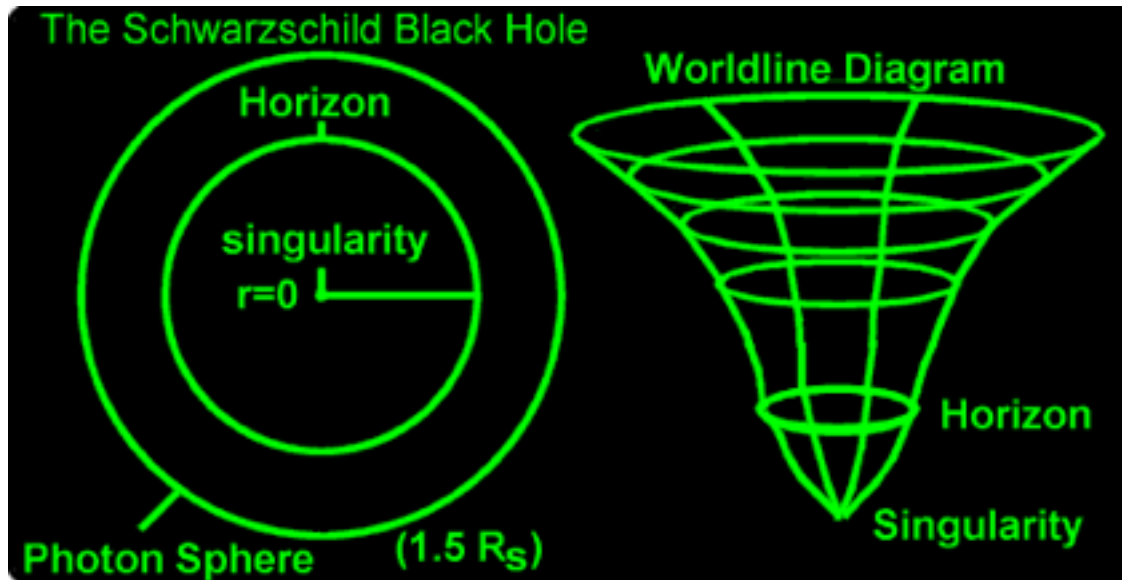
Silna grawitacja w teorii Einsteina dotyczy obiektów, których **nie sposób opisać** za pomocą słabej grawitacji Newtona – nazywamy je obiektami zwartymi.

Są to: **białe karły, gwiazdy neutronowe i czarne dziury.**

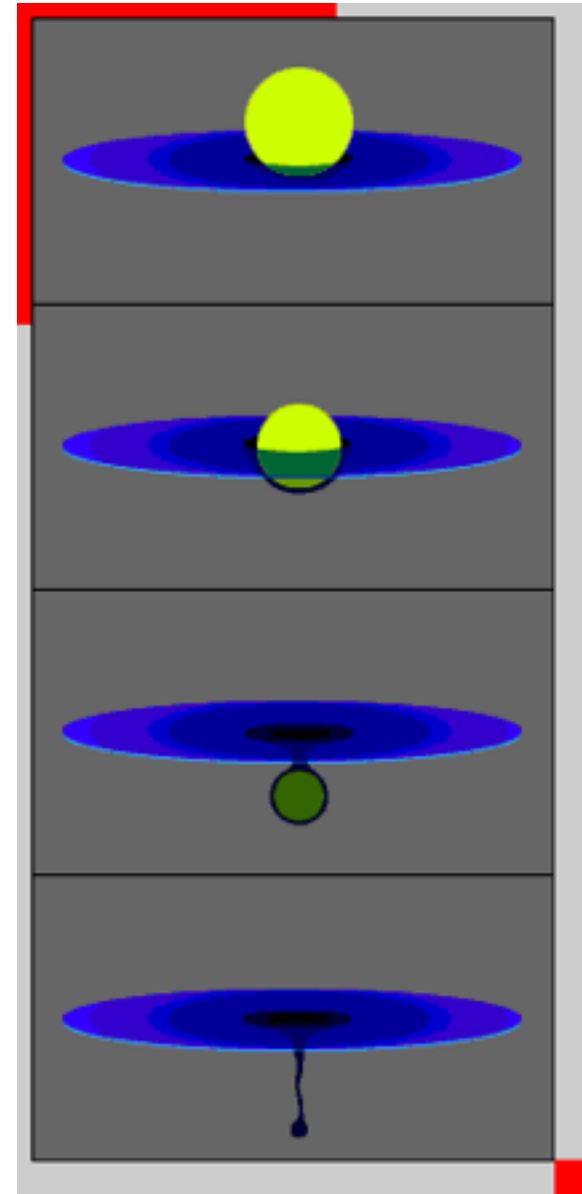
Powstają one w wyniku „**upakowania**” materii (atomy są “prawie puste”).



Statyczna sferycznie symetryczna czarna dziura Schwarzschilda i jej formowanie się



- Otoczona **horyzontem** (tu: sfera Schwarzschilda) $r_s = 2GM/c^2$
- pod horyzontem wszystko spada (nawet światło) na punkt centralny – **osobliwość**.



Czym zatem są fale grawitacyjne?

W teorii Einsteina przestrzeń jest ośrodkiem sprężystym - może transmitować fale.

Równania Einsteina:

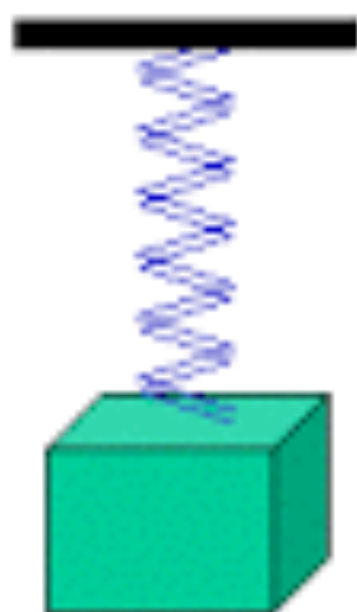
(materia) $T = (c^4/8 \pi G)$ E (geometria)

Jak prawo Hooke'a dla siły sprężystej:

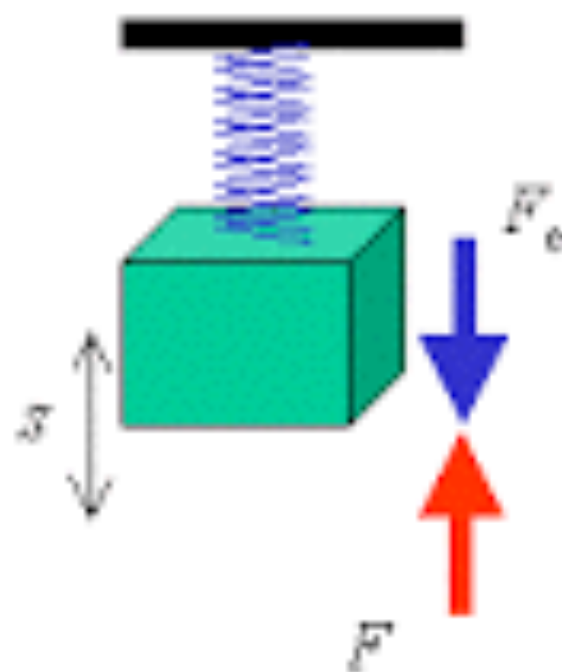
$$F = k x$$

$(c^4/G) \approx 10^{43}$ Newtonów (bardzo sztywna sprężyna)

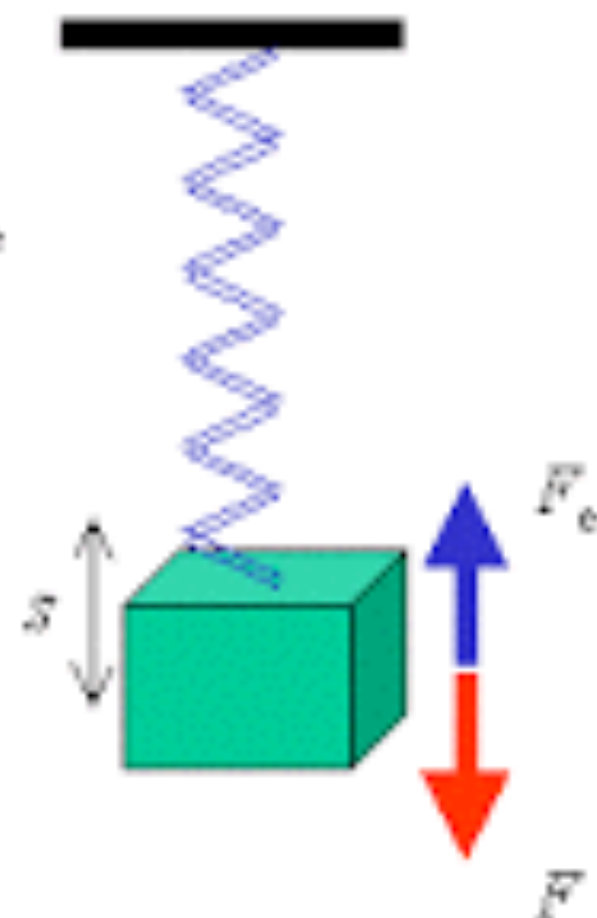
equilibrium



compressed



stretched



$$F = k s$$

Hooke's Law

1. Basic framework.

Gravitational waves were predicted by Einstein as early as his general relativity theory (1915-1918)

Space is not rigid (though extremely rigid) - it is an elastic medium and can sustain waves

Some intuitive theory

Einstein equations relate energy-momentum tensor (matter) T with Einstein tensor (geometry) E :

$$T = \frac{c^4}{8\pi G} E \quad (1)$$

which is an analogue of the Hooke's law for an elastic force F related with displacement x

$$F = kx \quad (2)$$

with k an elastic constant. Alternatively, one can write the relation between an applied pressure p and the dimensionless strain h

$$p = eh,$$

Maximum force

For a standard spring $k \sim 10^2$ N/m while here

$$\frac{c^4}{G} \sim 10^{43} \text{ N.} \quad (4)$$

This is an extremely large number ("rigidity" of space) and at the same time the number which give the value of the maximum force (finite) in relativity.

This is in contrary of what we have in Newton's theory since due to the Newton's gravity law

$$F \propto \frac{1}{r^2} \quad (5)$$

and so can be **infinite**. The reason is that in relativity very strong gravity objects – black holes – are covered by the horizon

$$r_g = \frac{2Gm}{c^2} \quad (6)$$

and one cannot approach their center of mass closer.

Propagation - Newton

In **Newton's** theory the gravitational potential is given as solution of the Poisson equation

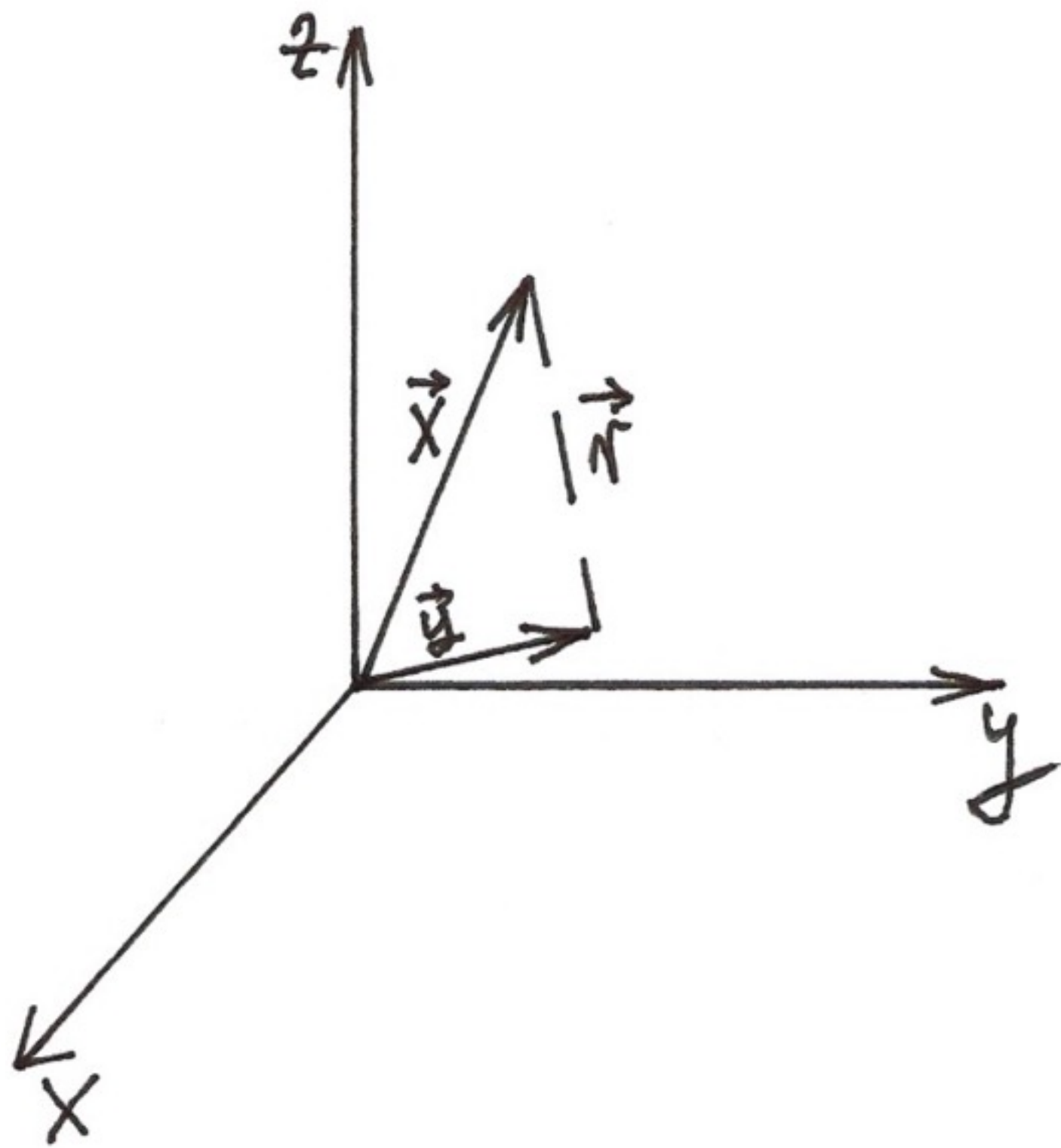
$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho \quad (7)$$

given by

$$\phi_N(\vec{x}, t) = -G \int \rho(\vec{y}, t) \frac{d^3 y}{r}, \quad (8)$$

where $r = |\vec{x} - \vec{y}|$, $\vec{x}$ - distance from the center of a coordinate system to an observer, $\vec{y}$ - distance from the center of a coordinate system to a point of a source body, $\vec{r}$ - the distance between a point of a source body to an observer, and ρ is the mass density of a source.

Hint: a change of ρ causes an **instantaneous** change of ϕ_N (infinite speed of information)!



Propagation - Einstein

In **Einstein's** theory the speed of information is **finite** and so a change of ϕ is delayed in time of r/c so that ϕ is modified into

$$\phi_{rel}(\vec{x}, t) = -G \int \rho \left(\vec{y}, t - \frac{r}{c} \right) \frac{d^3 y}{r}, \quad (9)$$

and it fulfills **the wave equation**

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 4\pi G \rho. \quad (10)$$

Differentiating (9) one has

$$\vec{\nabla} \phi_{rel} = G \int \left(\frac{\rho}{r} - \frac{1}{c} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \frac{\vec{x} - \vec{y}}{r^2} d^3 y. \quad (11)$$

Source characteristic

Assume that the source fulfills the following conditions:

$$\rho \neq 0 \text{ for } |\vec{x}| < R, \quad (12)$$

$$\rho = 0 \text{ for } |\vec{x}| \geq R, \quad (13)$$

where R is the typical size of the source (radius). If $|\vec{x}| \gg R$, then $r \approx |\vec{x}|$, i.e.

$$\frac{\rho}{r^3}(\vec{x} - \vec{y}) \ll \frac{1}{cr^2} \frac{\partial \rho}{\partial t}(\vec{x} - \vec{y}) \quad (14)$$

which means that the **second term in (11) dominates**. Defining a unit vector

$\vec{n} = \vec{x}/(|\vec{x}|)$ one has

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \phi_{rel} \approx -\frac{1}{c} \frac{\partial \phi_{rel}}{\partial t} = -G \int \frac{\partial \rho}{\partial t} \frac{d^3 y}{r}, \quad (15)$$

which means that ϕ_{rel} "forgets" the distance from the source $|\vec{x}|$ and is "sensitive" only to a change of mass density of a source ρ !

Signal

On the other hand, ϕ_N has the dependence which is determined by $|\vec{x}|$ independently of ρ (instantaneous signal transition nullifies the term $\partial\rho/\partial t$). Dimensional analysis from Newton's theory gives (potential of the source has unit of velocity)

$$\phi_{rel} \propto (\text{velocity})^2, \quad (16)$$

which allows to define the **dimensionless AMPLITUDE OF THE WAVE** as

$$h = \frac{(\text{time dependent part of } \phi_{rel})}{c^2}. \quad (17)$$

One needs to find the time-dependent part of ϕ_{rel} in the "far from the source zone" $|\vec{x}| \gg R$:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{|\vec{x}|} + 2 \frac{\vec{y} \cdot \vec{n}}{|\vec{x}|^2} + \dots \quad (18)$$

a slow change of ρ is $t_0 \equiv t - |\vec{x}|/c$, so that

$$t - t_0 = |\vec{x}|/c - |\vec{x} - \vec{y}|/c = -\vec{n} \cdot \vec{y}/c + O(|\vec{x}|^{-1}) \quad (19)$$

Taylor expansion and conserved quantities

One can expand in series the mass density of the source

$$\rho(t) = \rho(t_0) + \dot{\rho}(t)(t - t_0) + \frac{1}{2}\ddot{\rho}(t - t_0)^2 + \dots \quad (20)$$

which gives

$$\begin{aligned} \phi_{rel} &= -\frac{G}{|\vec{x}|} \int \rho\left(\vec{y}, t - \frac{r}{c}\right) d^3y \\ &- \frac{G}{|\vec{x}|} \int \left[\rho(t_0) d^3y - \frac{1}{c} \dot{\rho}(t_0) \vec{n} \cdot \vec{y} d^3y + \frac{1}{2} \ddot{\rho}(t_0) (\vec{n} \cdot \vec{y})^2 d^3y \right] + \dots \end{aligned} \quad (21)$$

It emerges that only the **last term** actually depends on time since:

$$\int \rho(t_0) d^3y = M = \text{const.} \quad (22)$$

is a conserved (constant) mass of a source,

Quadrupole moment

$$\frac{1}{|\vec{n}|} \text{"blue - term"} = \int \dot{\rho}(t_0) y_i d^3 y = \int \rho V_i d^3 y = p_i = \text{const.} \quad (23)$$

where we have used the continuity equation $\dot{\rho}(t_0, \vec{y}) = -(\partial/\partial y_j)(\rho V_j)$. This relation is nothing else like the **conservation of momentum** law which is valid for gravitating systems. Finally,

$$\frac{1}{|\vec{n}|^2} \text{"green - term"} = \int \ddot{\rho}(t_0) y_i y_j d^3 y = \ddot{I}_{ij} \quad (24)$$

which gives the **second derivative of the quadrupole moment!!!**. The nature of gravitational waves is quadrupole!!!

Remind that electromagnetic waves are dipolar:

$$\text{"red - term"} = Q = \text{const.} \quad (25)$$

$$\text{"blue - term"} = \dot{d}_i = \int \dot{\rho} y_i d^3 y = \rho V_i d^3 y \neq \text{const}, \quad (26)$$

where Q is charge and ρ current density.

Traceless quadrupole moment

Using the above formulas one gets that the dimensionless amplitude of the wave

$$h \approx \frac{G}{2c^4} \frac{\ddot{I}_{ij} n_i n_j}{|\vec{x}|} \quad (27)$$

and it is a function of the second derivative of the quadrupole moment. In general relativity I_{ij} is substituted by a traceless quadrupole moment

$$I_{ij}^T = I_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} I \quad (28)$$

since now h is a traceless ($h_{xx} = -h_{yy}$) and a symmetric ($h_{xy} = h_{yx}$) tensor which has 2 independent polarization states known as h_+ and h_x . The gravitational waves alike electromagnetic waves are **transverse**.

Because the only tensor which does not change under rotations is $I_{ij} \propto \delta_{ij}$, and so $I_{ij}^T = 0$, then **the spherically symmetric movements** (e.g. perfect SS gravitational collapses) **do not generate gravitational waves**.

Quadrupole formula

in general relativity is

$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4} \frac{\ddot{I}_{ij}^T}{|\vec{x}|}, \quad (29)$$

where

$$I_{ij}^T = \int \rho t \left[x^j x^k - \frac{1}{3} x^2 \delta^{jk} \right] d^3 x. \quad (30)$$

After an analysis of the energy radiated by a source (the "near-zone" approximation) one gets the quadrupole formula for the **total luminosity of the source** as

$$L = \frac{G}{5c^4} \ddot{I}_{ij}^T \ddot{I}_{ij}^T \propto \dot{h}_{ij}^2 \quad (31)$$

which for any self-gravitating source fulfills the condition

$$L \leq L_0 \left(\frac{\phi_{source}}{c^2} \right)^5 \quad \text{and} \quad L_0 \equiv \frac{c^5}{G} = 3.629 \cdot 10^{52} J/s \quad (32)$$

is the "natural luminosity" which is an upper limit (cf. maximum force c^4/G)

2. Gravitational wave detection

Physical interpretation of h is the relative strain in a system of free particles on distance l (tidal forces):

$$|h_0| = |\delta l_0 / l| \quad (33)$$

and this strain is proportional to a size of a detector - the longer the detector, the stronger the signal.

Dimensionless amplitude is extremely tiny of the order of $h \sim 10^{-20}$ and so its detection is an intriguing technological challenge!

One has two basic techniques:

- bar antennas
- laser interferometer antennas

Dimensionless amplitude of a wave:

$$h = (\text{time-dependent part of the potential})/c^2$$

Fully relativistic picture (Einstein) - h is a tensor

$$g^{\mu\nu} = \eta^{\mu\nu} + h^{\mu\nu}, |h^{\mu\nu}| \ll 1$$

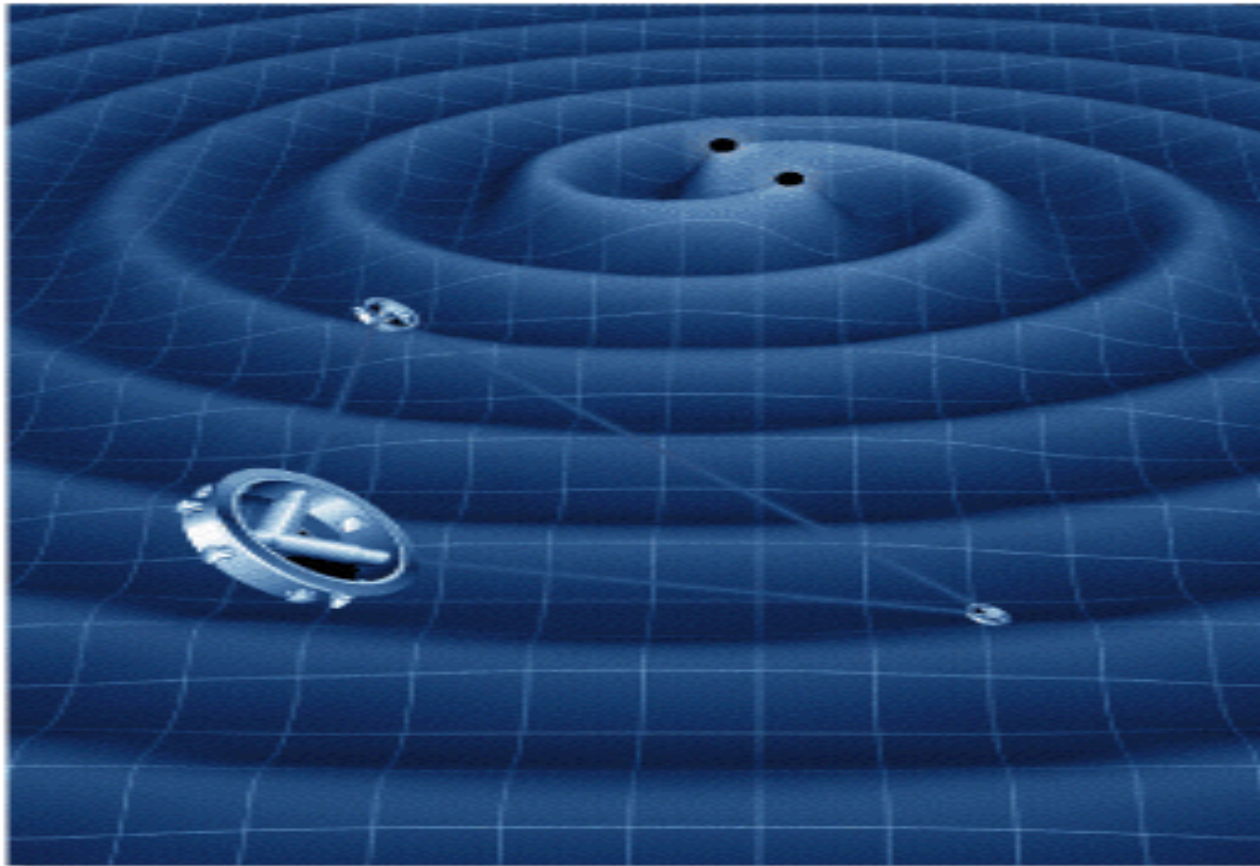
- traceless, symmetric, transverse,

2 independent polarization states h_+ and h_x

**- h is always tiny: one measures the extension of
the arm of a detector**

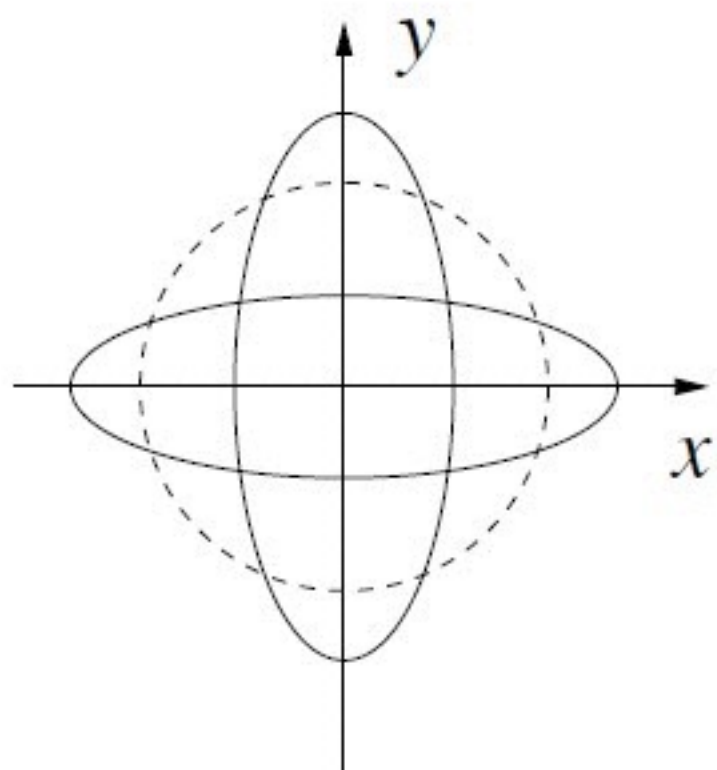
(e.g. $\approx 10^{-21}$ for 10 Mpc supernovae)

**Czasoprzestrzeń może się odkształcić jak fala na wodzie (drgania czasoprzestrzeni).
Efekt niewielki.**

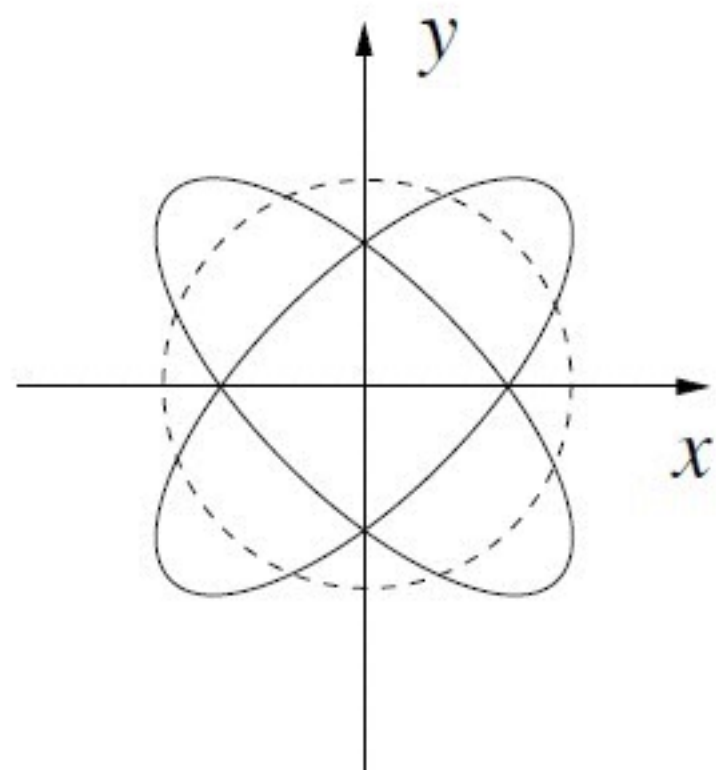


Dwie polaryzacje fali h^+ i h_x - wymagane dwie (najlepiej prostopadłe) “anten” z cząstek.

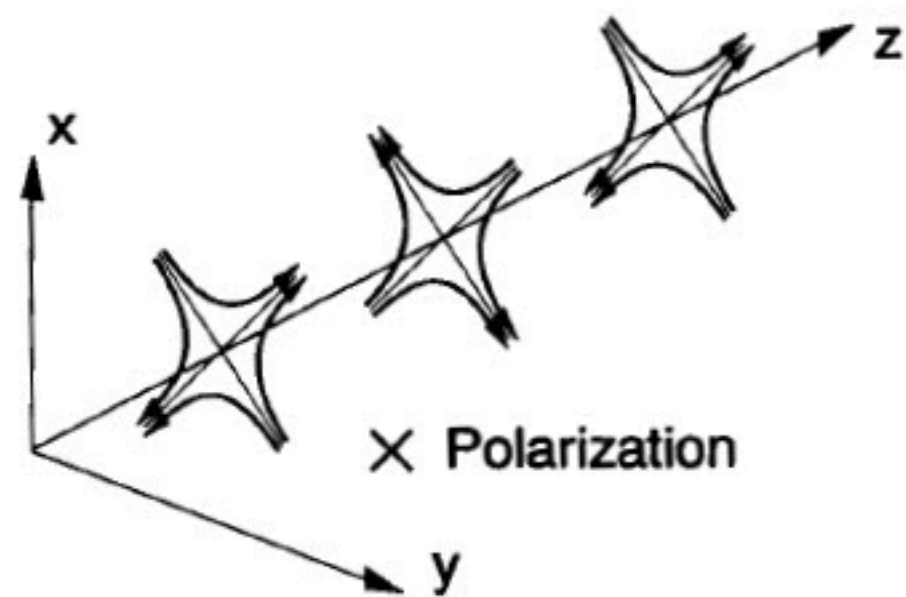
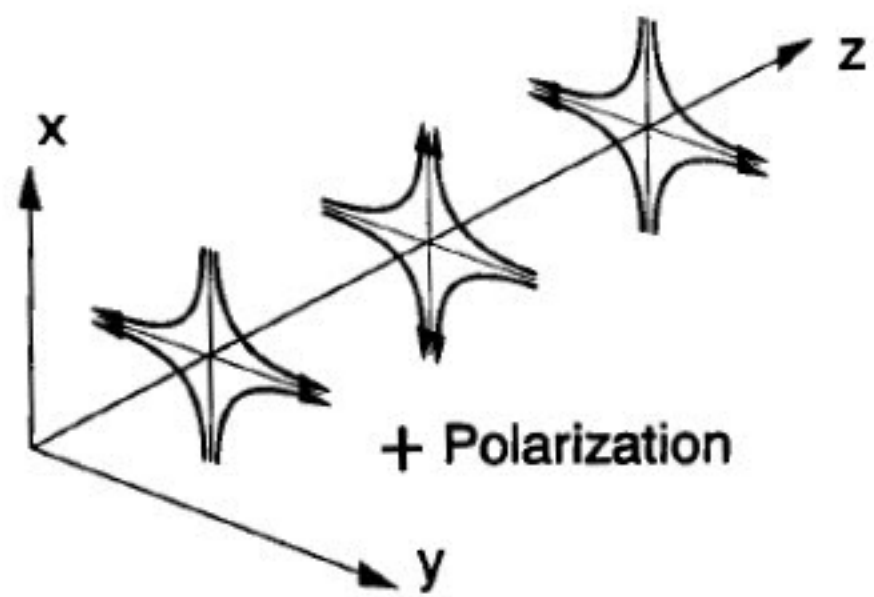


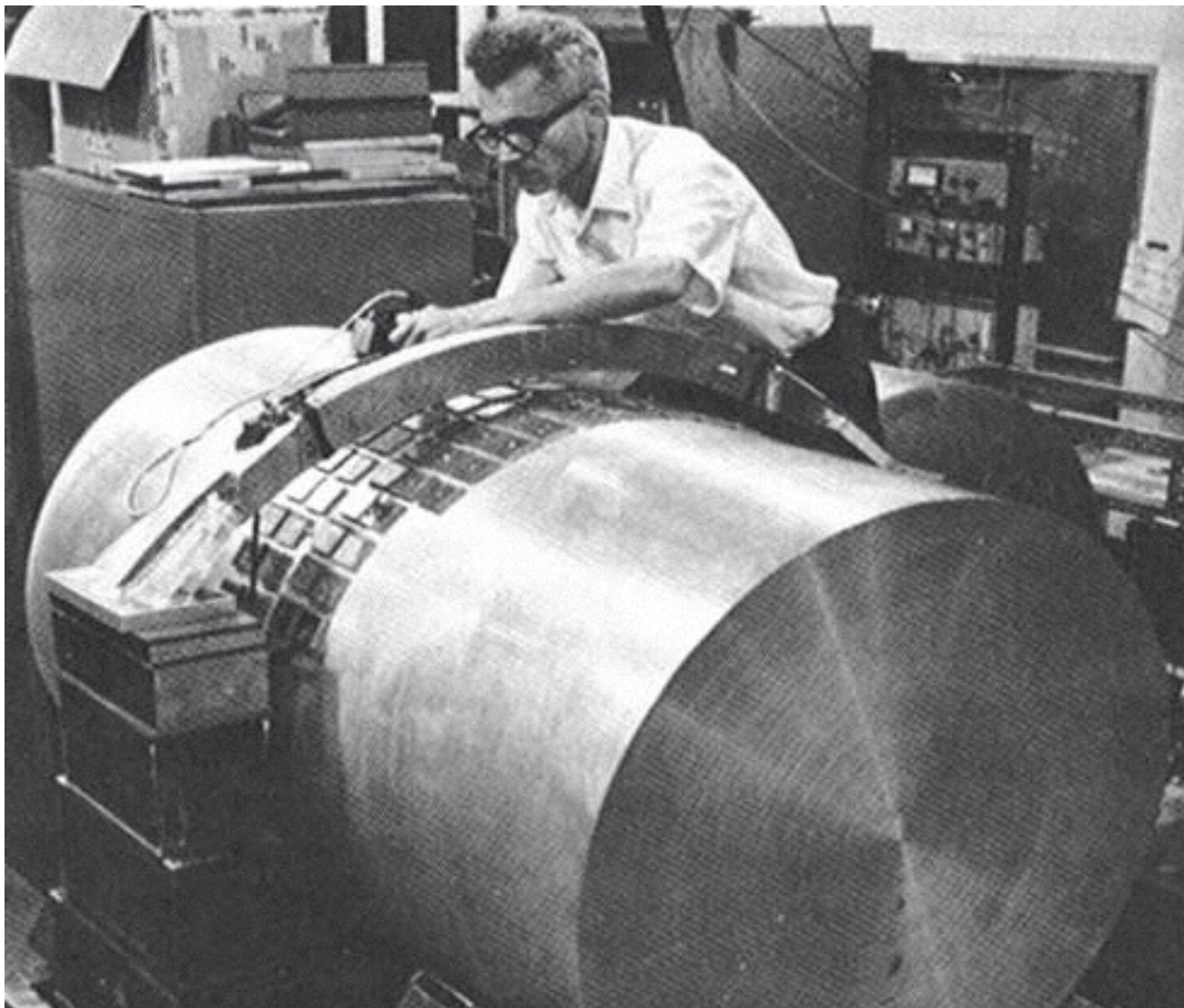


h_+

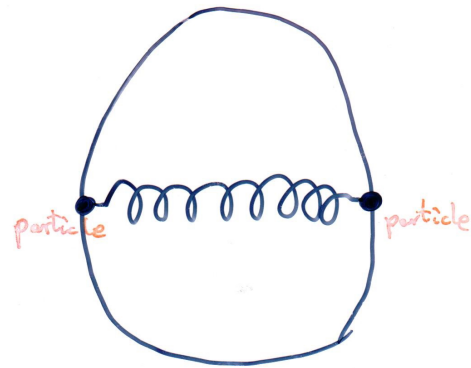


h_x





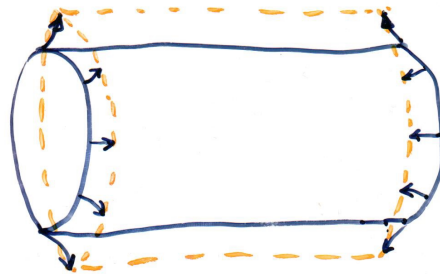
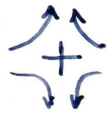
**Detektory prętowe - prof. John Weber przy pionierskiej
antenie, ok. 1965r**



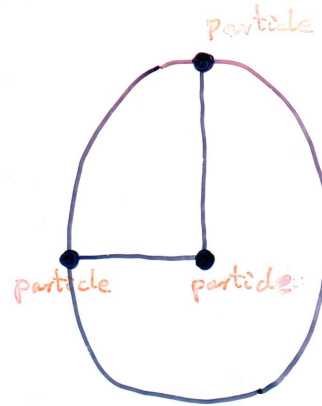
quadrupole harmonic oscillator

(GW does work on oscillator)

↓ replaced by
metal bar
and piezoelectric
material



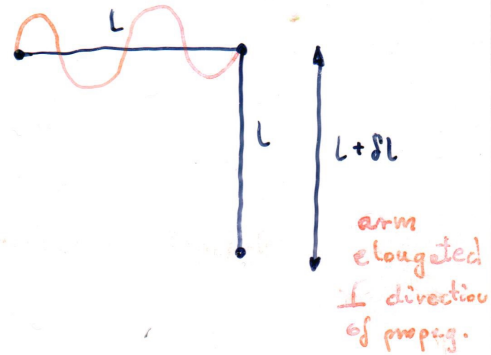
Weber antenna

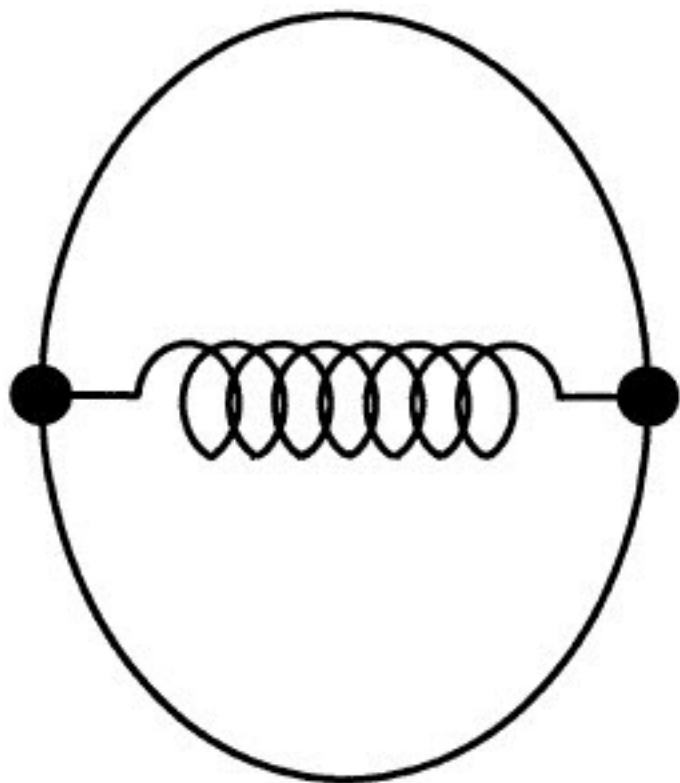


laser interferometer

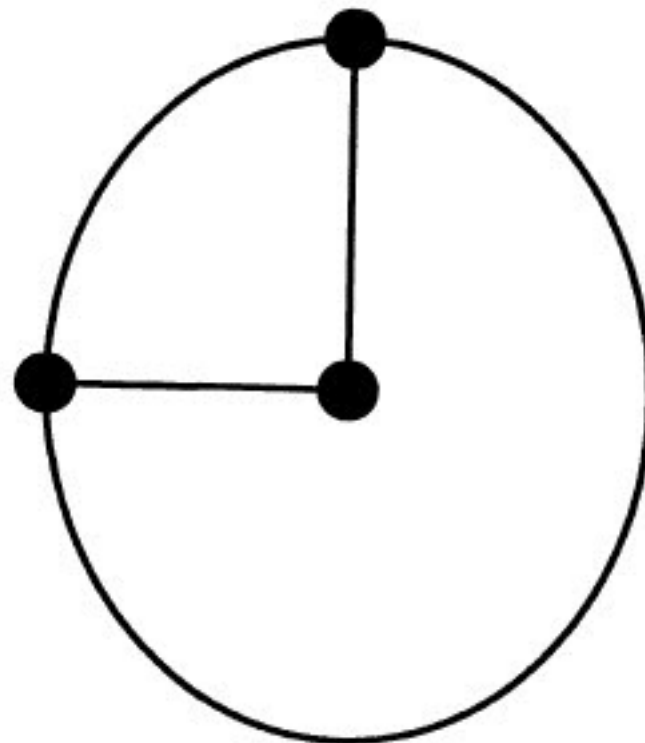
(GW does work on the laser
beam and cause
a small frequency shift)

↓ Michelson
interferometer





(a)



(b)

Detektor prętowy (na lewo - Weber 1960) i interferometr laserowy (na prawo)
kwadрупolowy oscylator harmoniczny - interferometr laserowy

Problems :

bar

- thermal noise (little dumping in fund. freq. of longest oscill.)
- Brownian motion (cooling to few °K)

- quantum limit !

- typical signal ($h \sim 10^{-29}$)

$$E \sim 2 \cdot 10^{-32} \text{ J}$$

- an energy of a phonon

$$E_{ph} \sim \hbar \omega \sim 6 \cdot 10^{-31} \text{ J}$$

(bar cannot be in an eigenstate of energy)
'quantum nondemolition'

laser

suppose $L \sim 100 \text{ m}$

$$h \sim 10^{-28}$$

⇓

$$|SL| \sim |h \cdot L| \sim 10^{-19} \text{ m}$$

(less than the size of nucleus)

visible light wavelength

$$\lambda \sim 2 \cdot 10^{-13} \text{ m}$$

↗
required to get interference pattern

needs longer arm !

- multi-pass interferometer

(1 km x 300 reflections = 300 km)

- "recycling" of light

normally thrown away after interference pattern is read



to get really longer arm
one should place an
interferometer in space !

Źródła fal grawitacyjnych

Najkrótsze fale, czyli takie, które mają **częstość od 1 do 10^4 Hz** (HF) to fale pochodzące od:

- wybuchających gwiazd supernowych,
 - gwiazd neutronowych (pulsarów),
 - zderzających się i zlepiających gwiazd neutronowych,
 - czarnych dziur o masie nie większej niż $1000 M$ (M – masa Słońca),
- obiektów egzotycznych, takich jak:
 - gołe osobliwości (czarne dziury bez horyzontu zdarzeń),
 - gwiazdy bozonowe (gwiazdy tworzone przez cząstki oddziaływania
 - bozony)

Fale o tej częstotliwości są odpowiednie dla eksperymentów na Ziemi.

- Fale o **częstotliwości od 10^{-3} do 1 Hz** (LF) mogą pochodzić od:
- układów podwójnych gwiazd,
 - masywnych czarnych dziur (ponad $1000 M$),
 - zlepiających się czarnych dziur,
 - procesów występujących we Wczesnym Wszechświecie:
 - inflacji (szybkiego „rozdymania” się Wszechświata od chwili 10^{-35} s po Wielkim Wybuchu),
 - przejść fazowych (np. elektroslabych),
 - grawitacyjnego promieniowania Słońca.

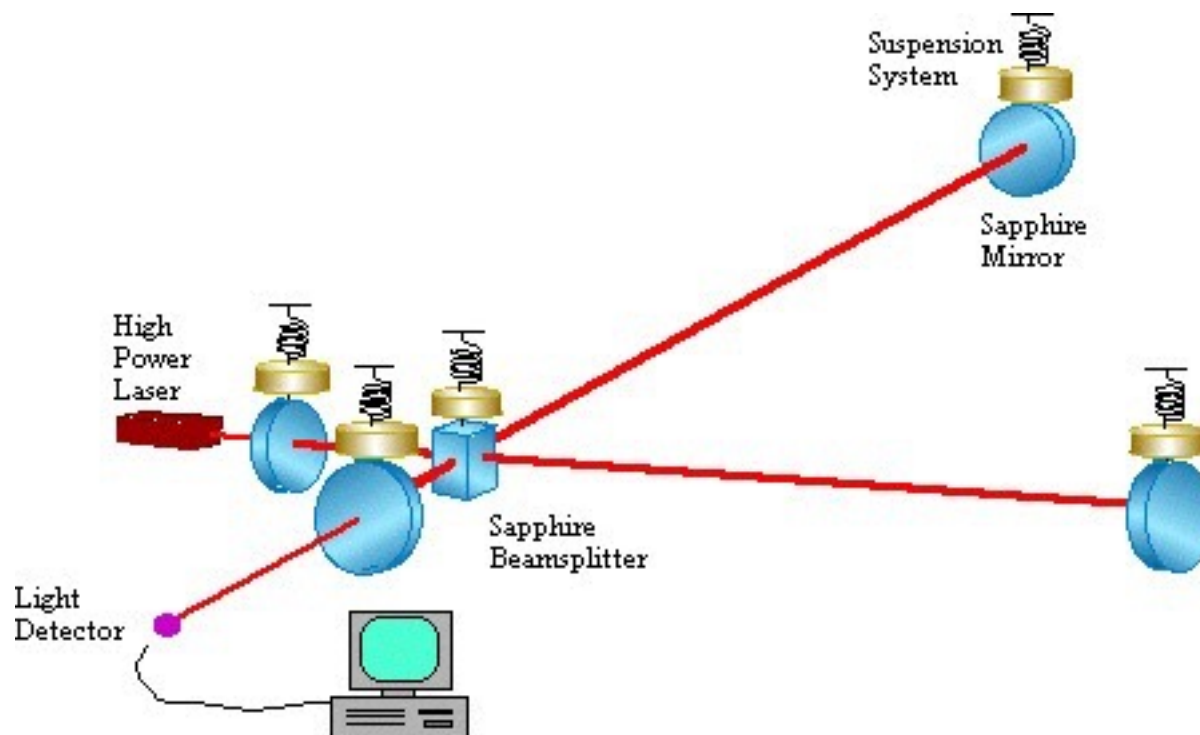
Takie fale mogą być badane jedynie przez eksperymenty kosmiczne ze względu na duże szумы na Ziemi spowodowane falami sejsmicznymi, przejazdami ciężarówek, itp.

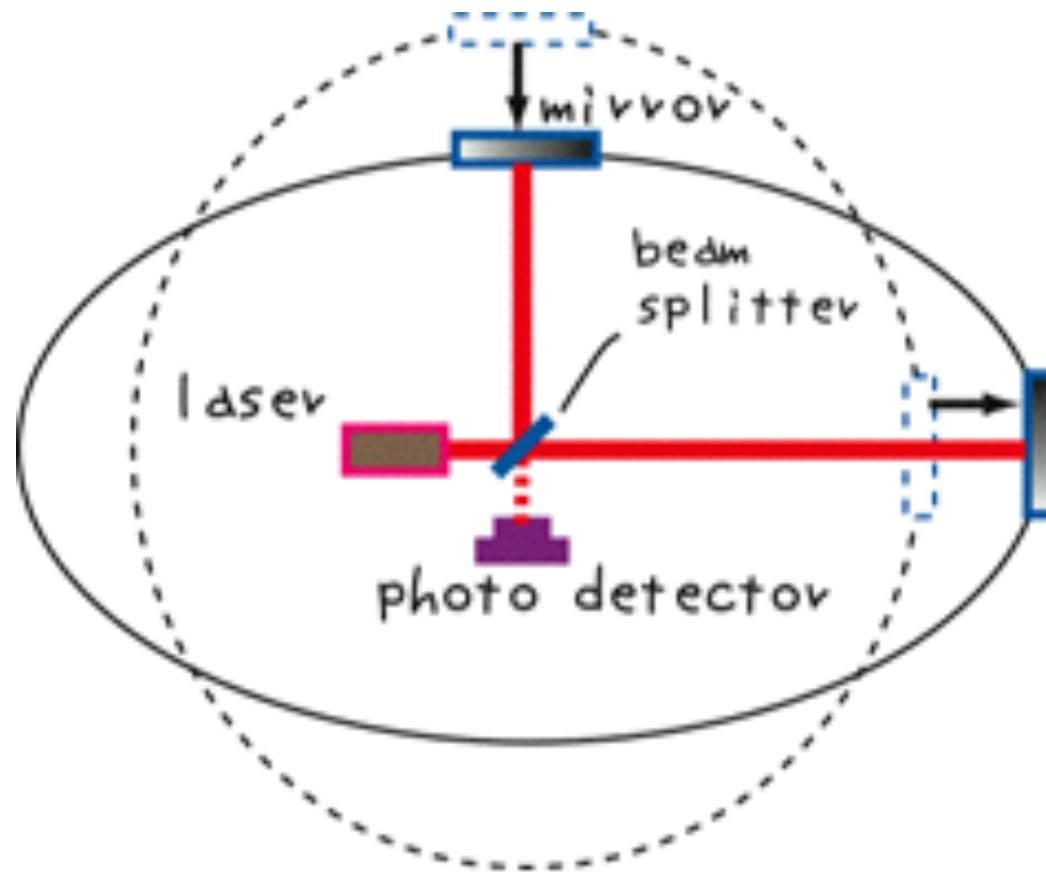
Fale o **częstotliwości od 10^{-7} do 10^{-9} Hz** (VLF) pochodzą tylko od procesów Wczesnego Wszechświata, takich jak:

- efekty przejść fazowych (drgające i oddziałujące ze sobą struny kosmiczne i ściany domen),
- grawitacyjne promieniowanie reliktowe (grawitacyjne promieniowanie tła).

Fale o **częstotliwości od 10^{-15} do 10^{-18} Hz** (ELF) pochodzą wyłącznie od promieniowania grawitacyjnego tła.

**Detektor interferometryczny (laserowy) - bada względne
wydłużenie/skrócenie ramion detektora o wielkość $h = \Delta L/L = 10^{-21}$
(ruch mas zamiast ruchu ładunków)**





$$\Delta L/L = a_+ h_+(t) + a_- h_-(t) \equiv h(t)$$

and $h(t)$ is called the dimensionless amplitude (strain) of the wave.

**Detector 1: Hanford, Washington
(LIGO -
Laser Interferometer
Gravitational-wave Observatory)**



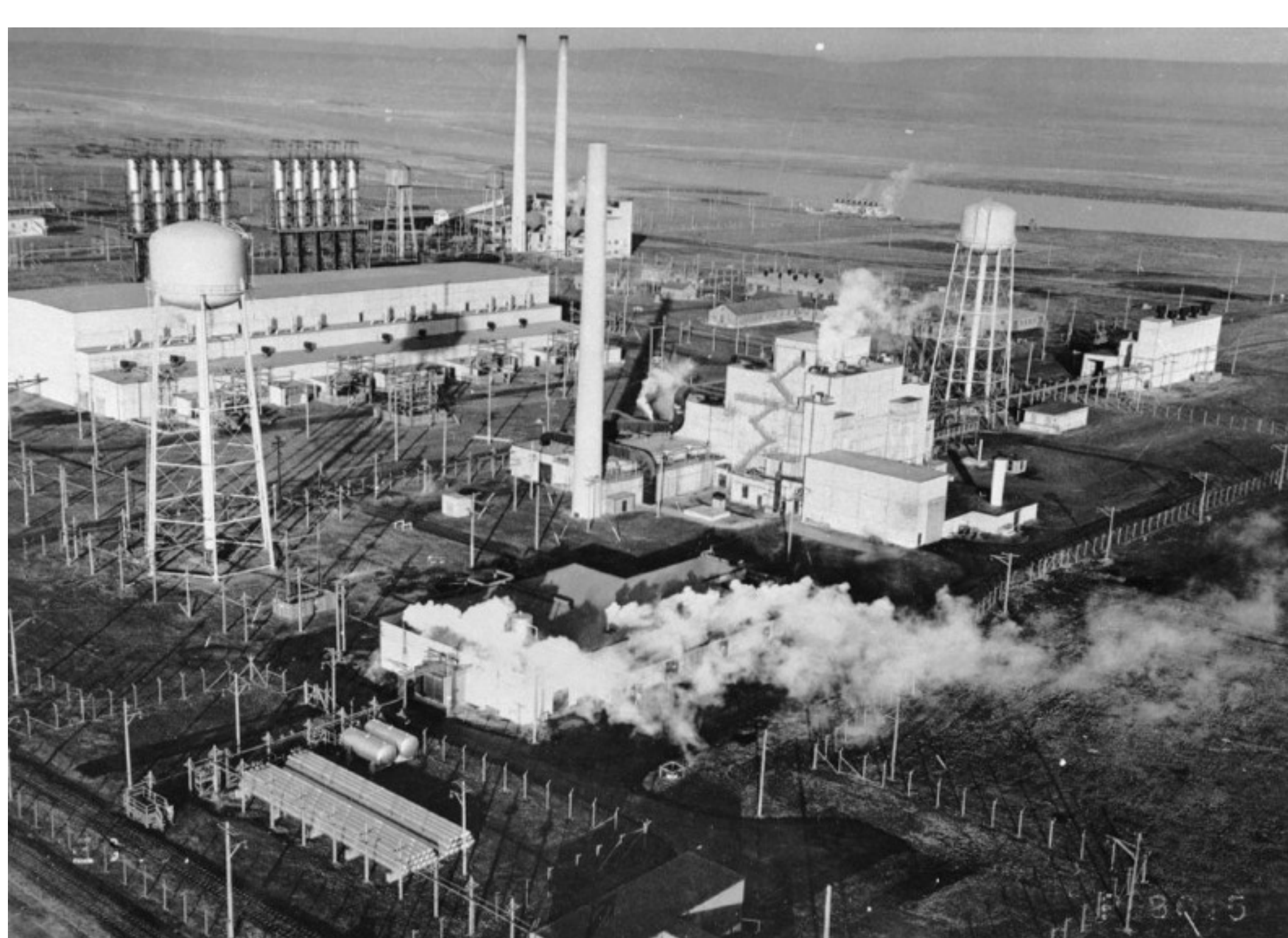
Hanford Site Nuclear - od 1943 główne miejsce produkcji plutonu do bomb atomowych (B-reactor)

Plutonu wyprodukowanego w Hanford Site użyto m.in. do:

- **pierwszej bomby zdetonowanej w Trinity Site**
- **Fat Man'a zrzuconego na Nagasaki**

W czasie zimnej wojny pracowało 5 reaktorów produkujących pluton

Na jego bazie skonstruowano 60.000 bomb atomowych





United States
Department of Energy

Hanford Site

RESTRICTED GOVERNMENT AREA

NATIONAL DEFENSE STATE OF WASHINGTON



UNITED STATES REGULATIONS APPLY

VEHICLES SUBJECT TO SEARCH

PROHIBITED ARTICLES

WEAPONS

FLAMMABLE

EXPLOSIVES

TOXIC

RADIOACTIVE

OTHER

HAZARDOUS

MATERIALS

OR

OTHER

HAZARDOUS

MATERIALS

OR

OTHER

HAZARDOUS

MATERIALS

CONTAMINATED AREA

GROUND SURFACES CONTAMINATED

**STAY ON ROADWAY
TO NEXT JUNCTION**

RADIOLOGICAL SCIENCE DEPT.





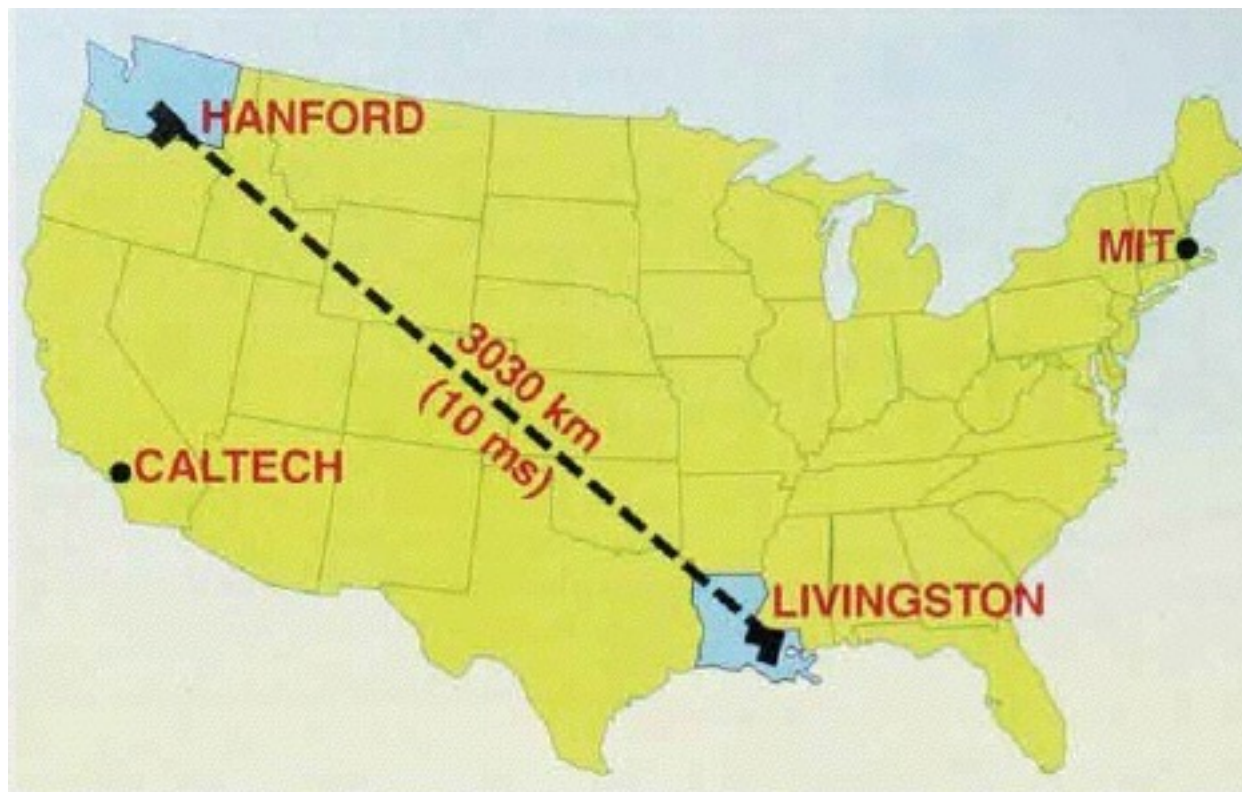
**Detector 2: Livingston, Louisiana
(LIGO -
Laser Interferometer
Gravitational-wave Observatory)**





Livingston

Hanford



Inne detektory:

GEO600 (Hannover)

VIRGO (Pisa, Italy)

KAGRA (Japan)

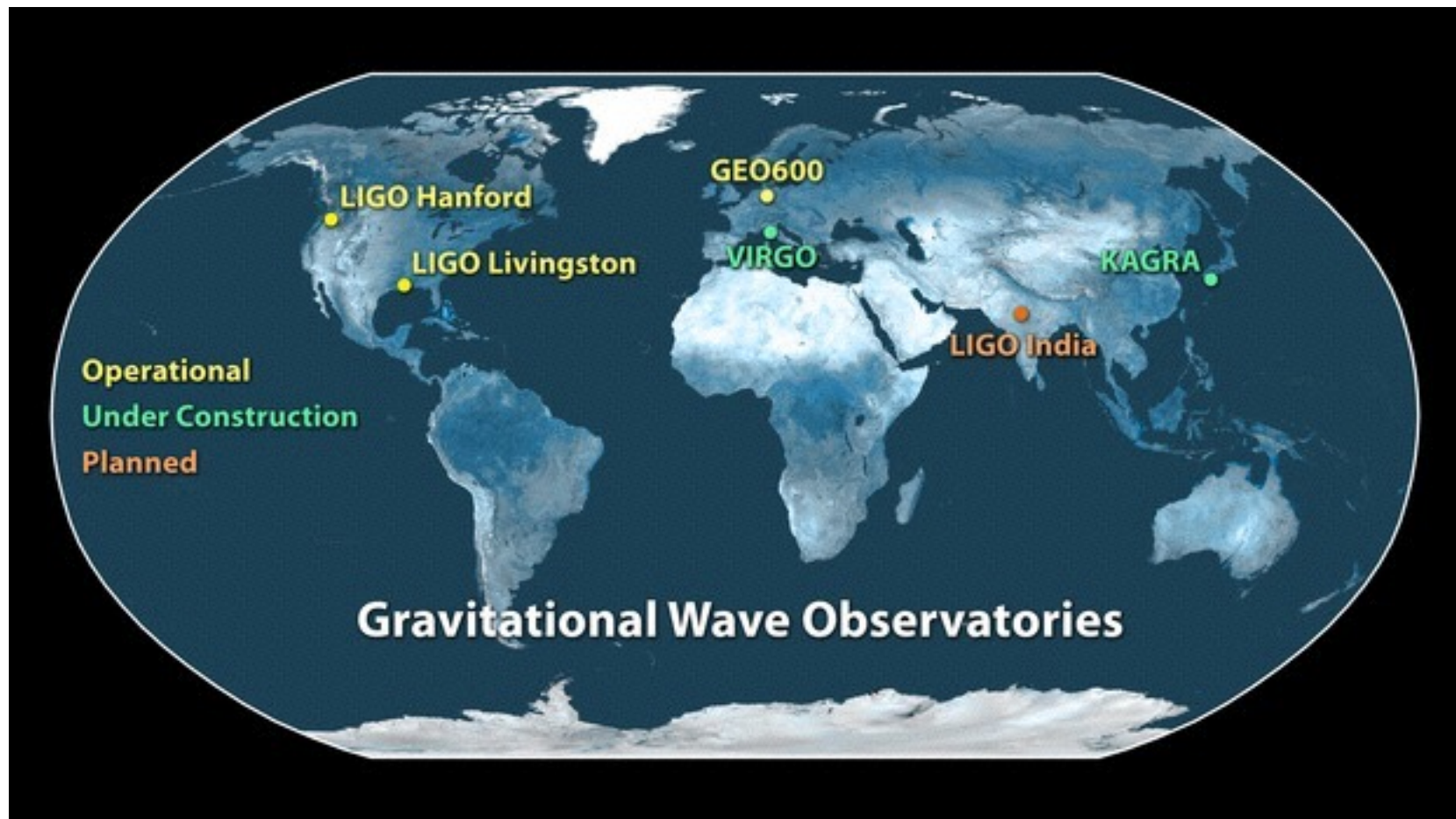
W przestrzeni kosmicznej (planowane):

LISA (Laser Interferometer Satellite Antenna)

**DECIGO (DECI-hertz Gravitational wave
Observatory)**

BBO – Big-Bang Observer

LISA-pathfinder (wystrzelony 12/2015)





N

O

IABG

lisa pathfinder

AIRBUS
DEFENCE & SPACE

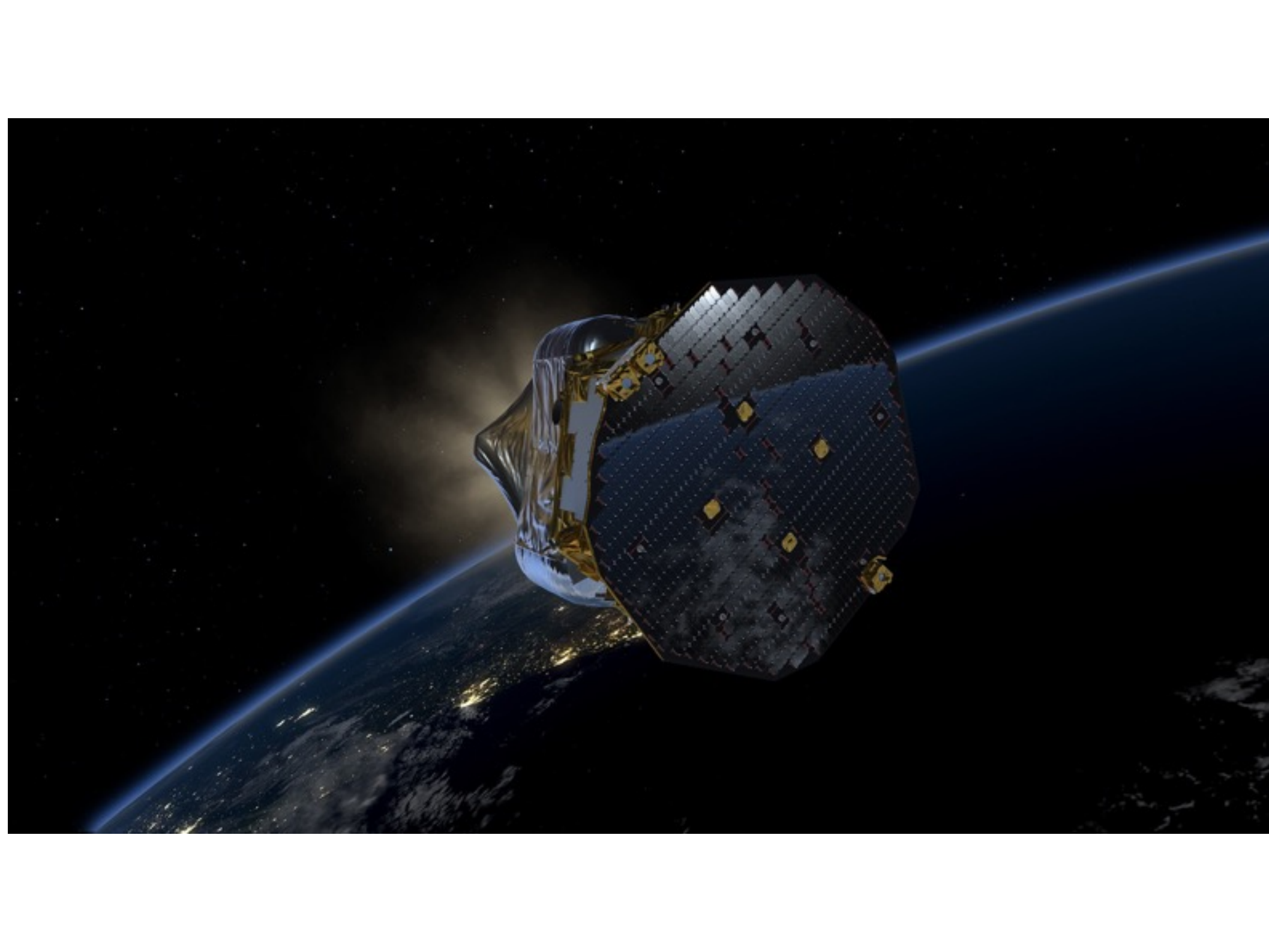
esa

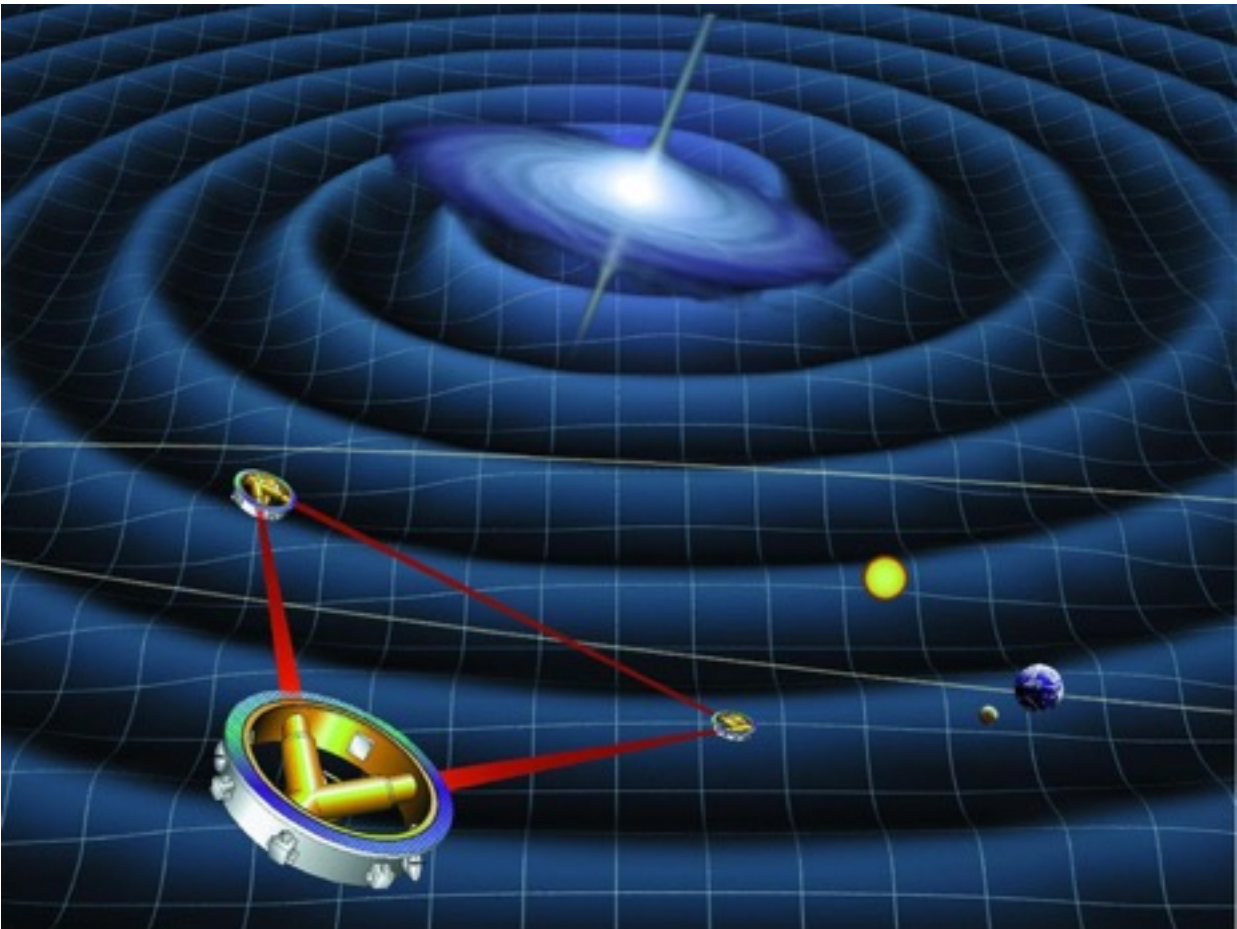


WEIGHT EMPTY 1750 kg
MAXIMUM GROSS WEIGHT 3000 kg DWS 3000 kg
DIMENSIONS: L x W x H: 5487 x 8854 x 3363
1700 x 900 mm
HANDLE WITH CARE

DO NOT DROP
OPEN ONLY IN THE PRESENCE
OF A REPRESENTATIVE OF QUALITY CONTROL
AND IN ACCORDANCE WITH OPERATING INSTRUCTIONS
DO NOT OPEN IN ANY CONDITIONS WHICH MAY CAUSE
DEFORMATION TO OCCUR ON THE PACKAGED EQUIPMENT
* Only handled with LIFT

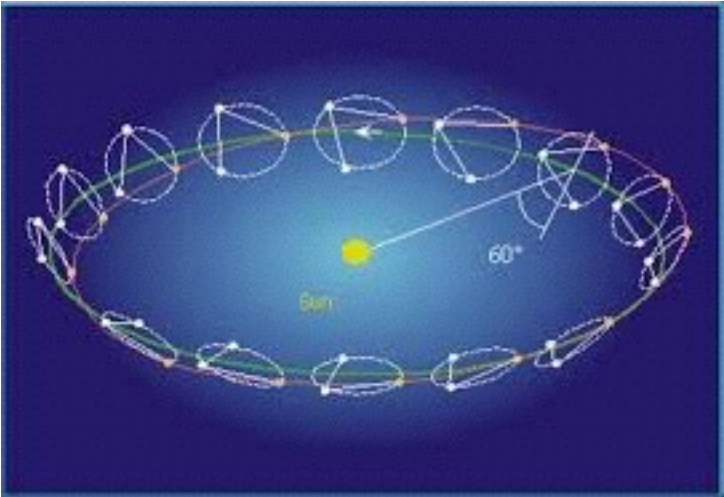


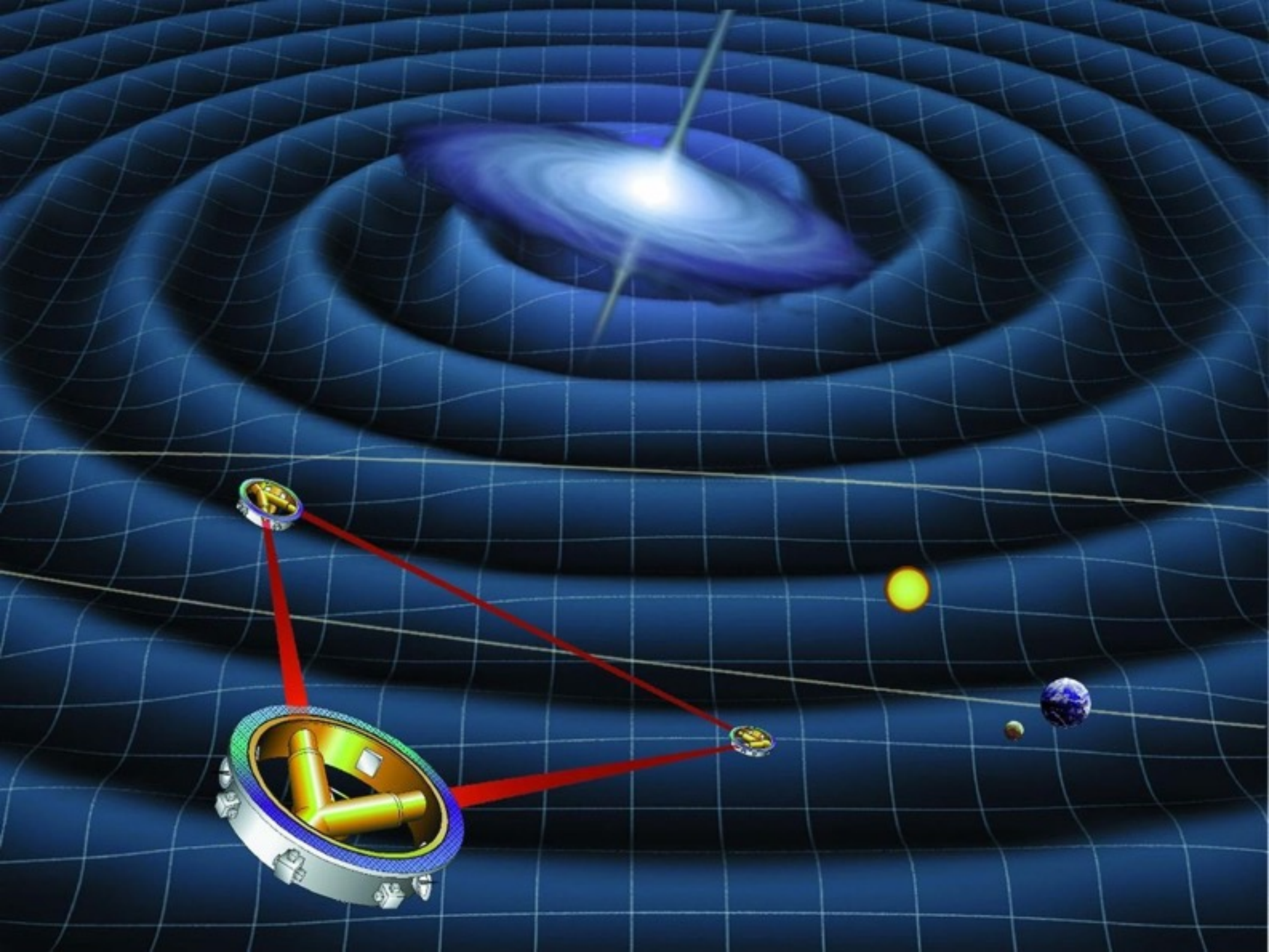


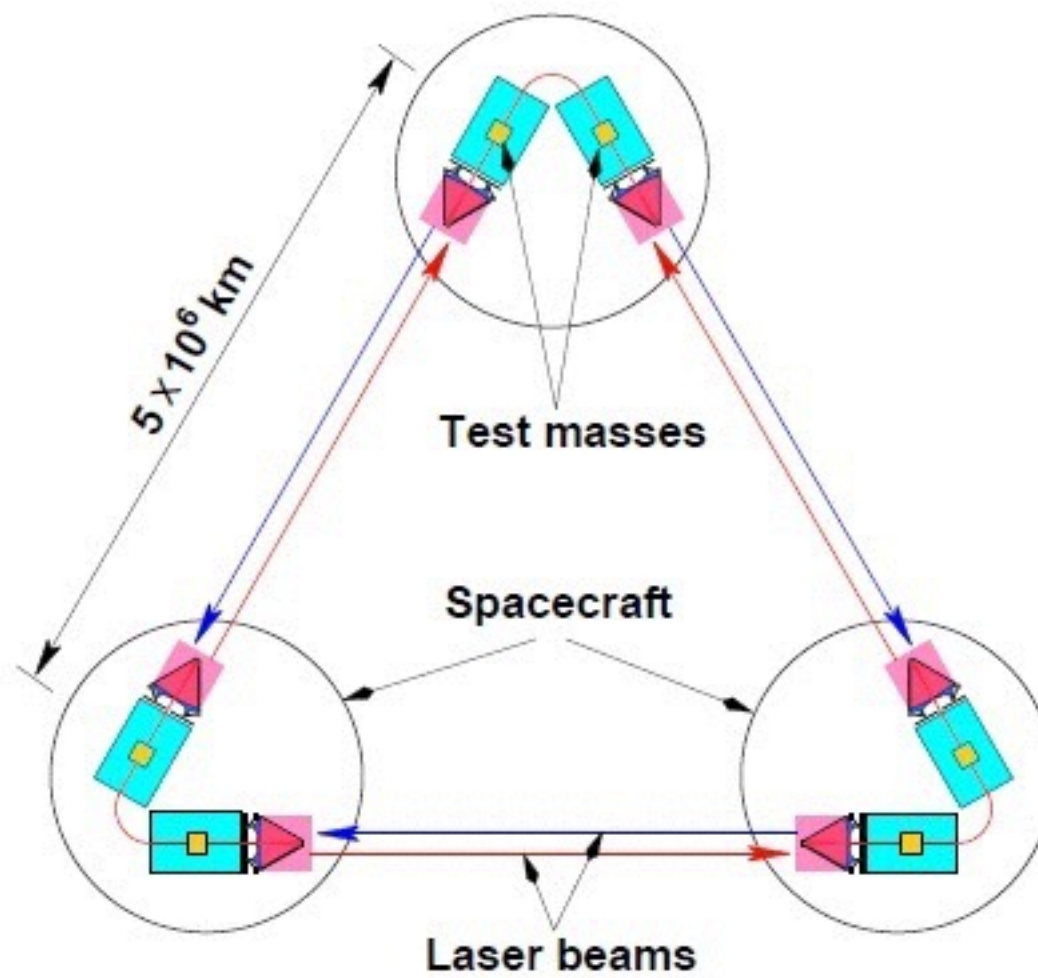


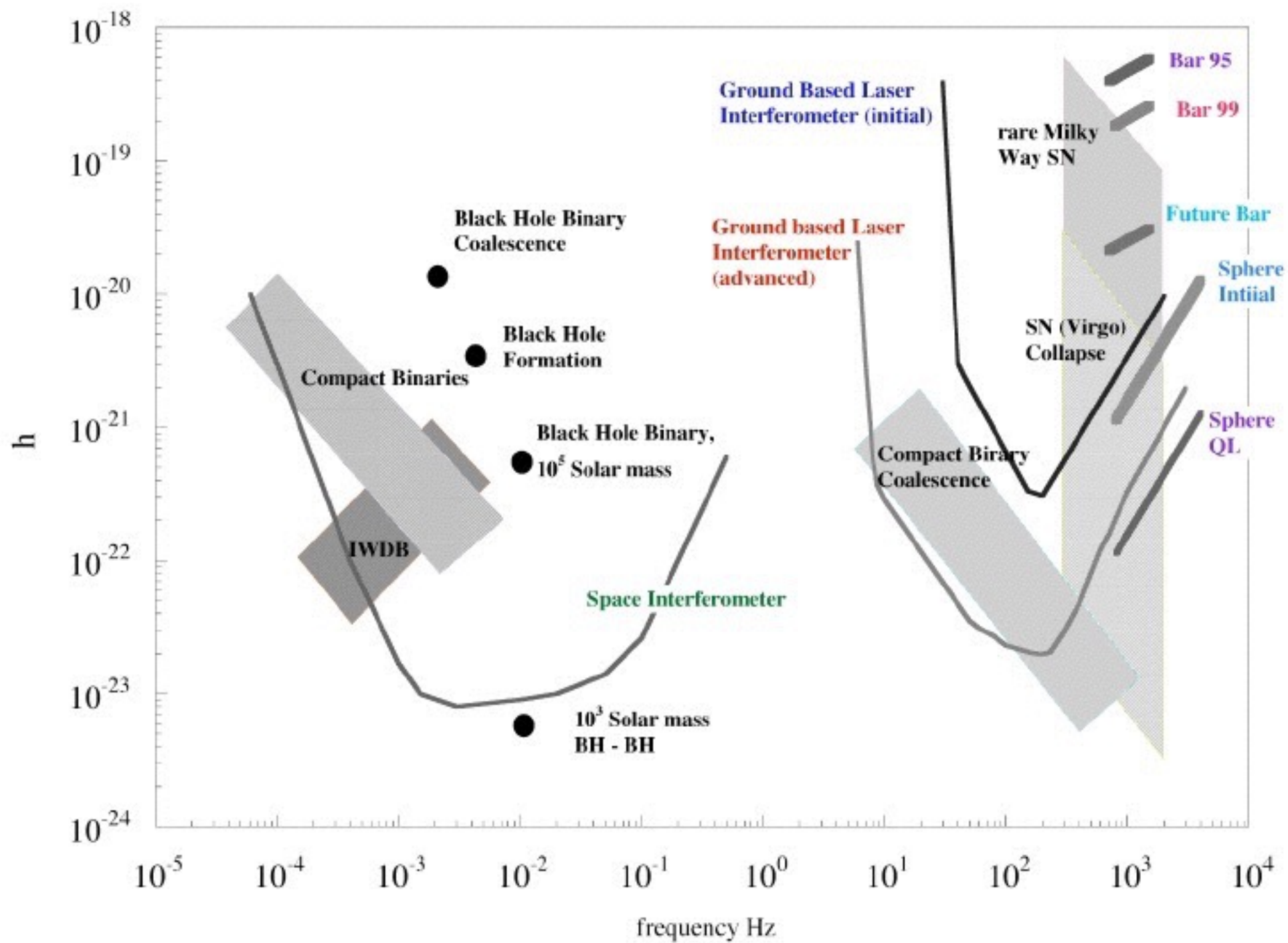
LISA

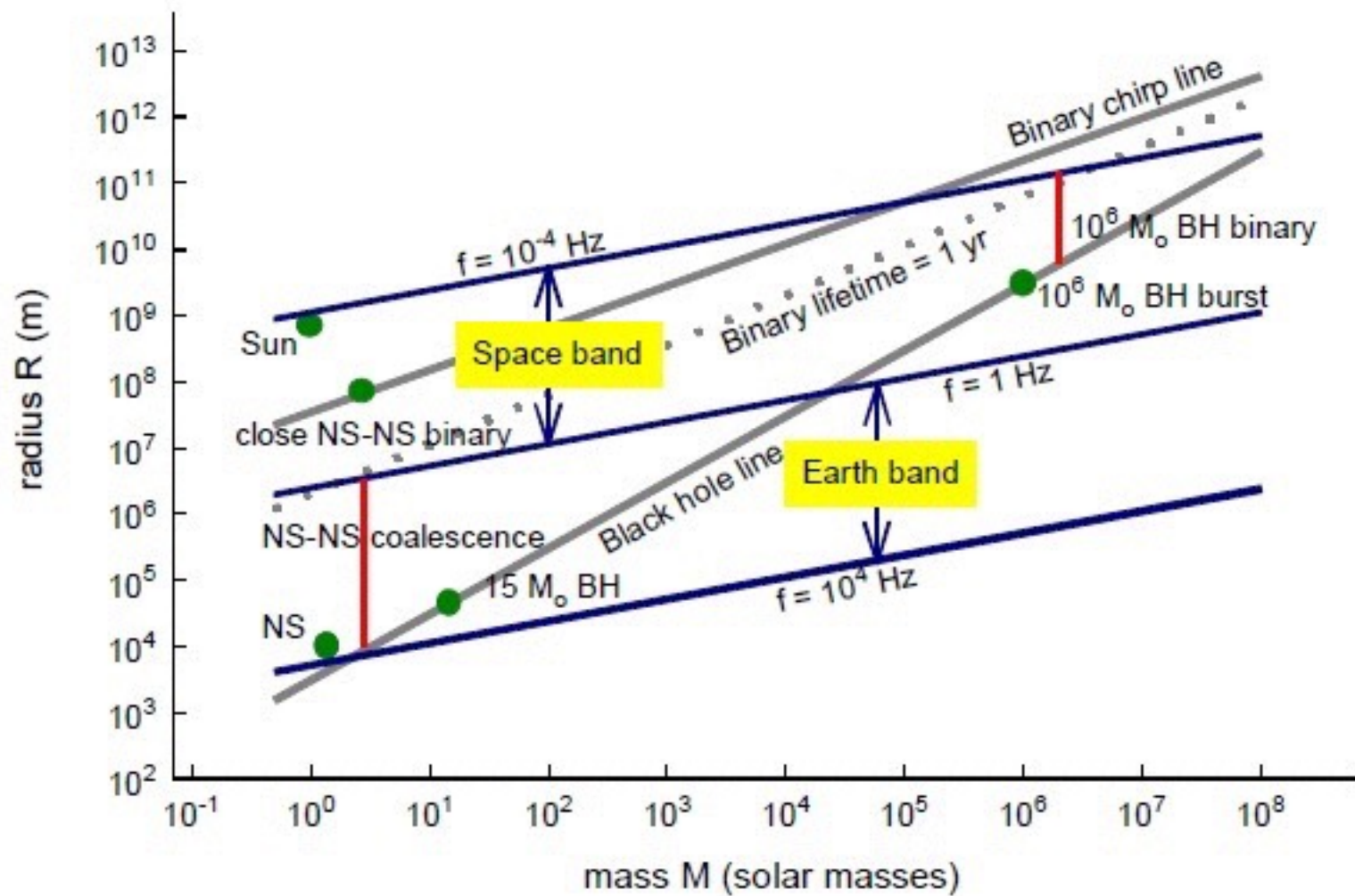
eLISA



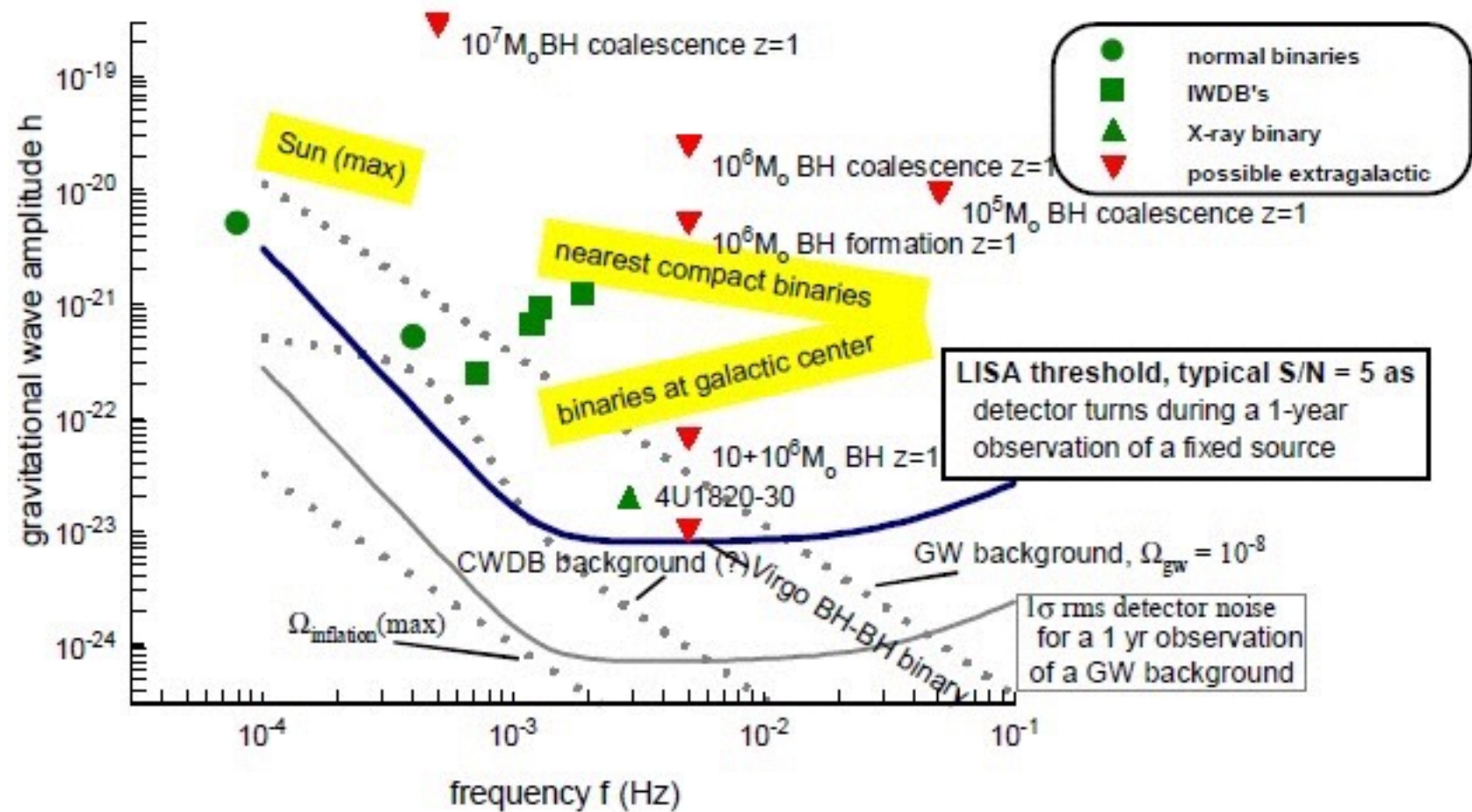


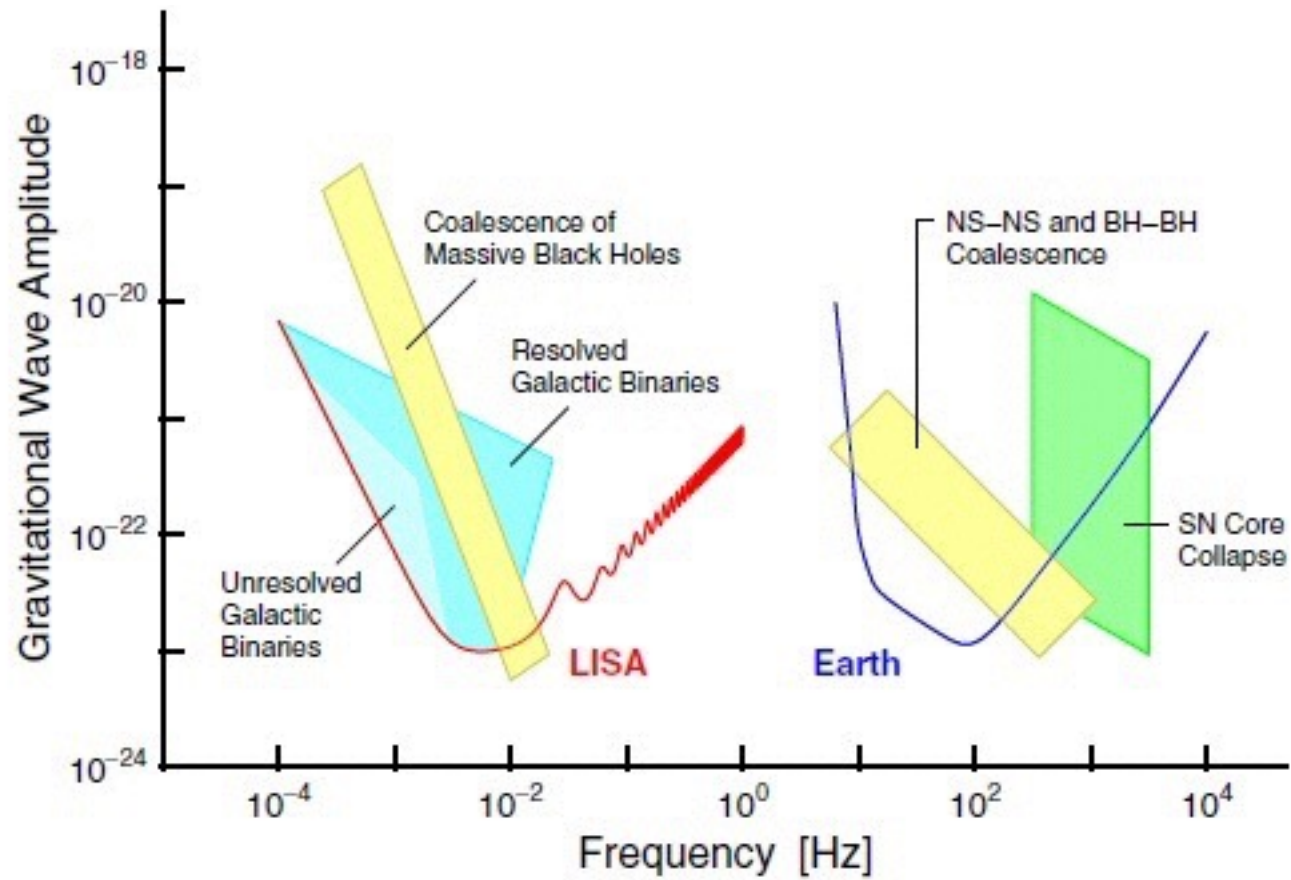




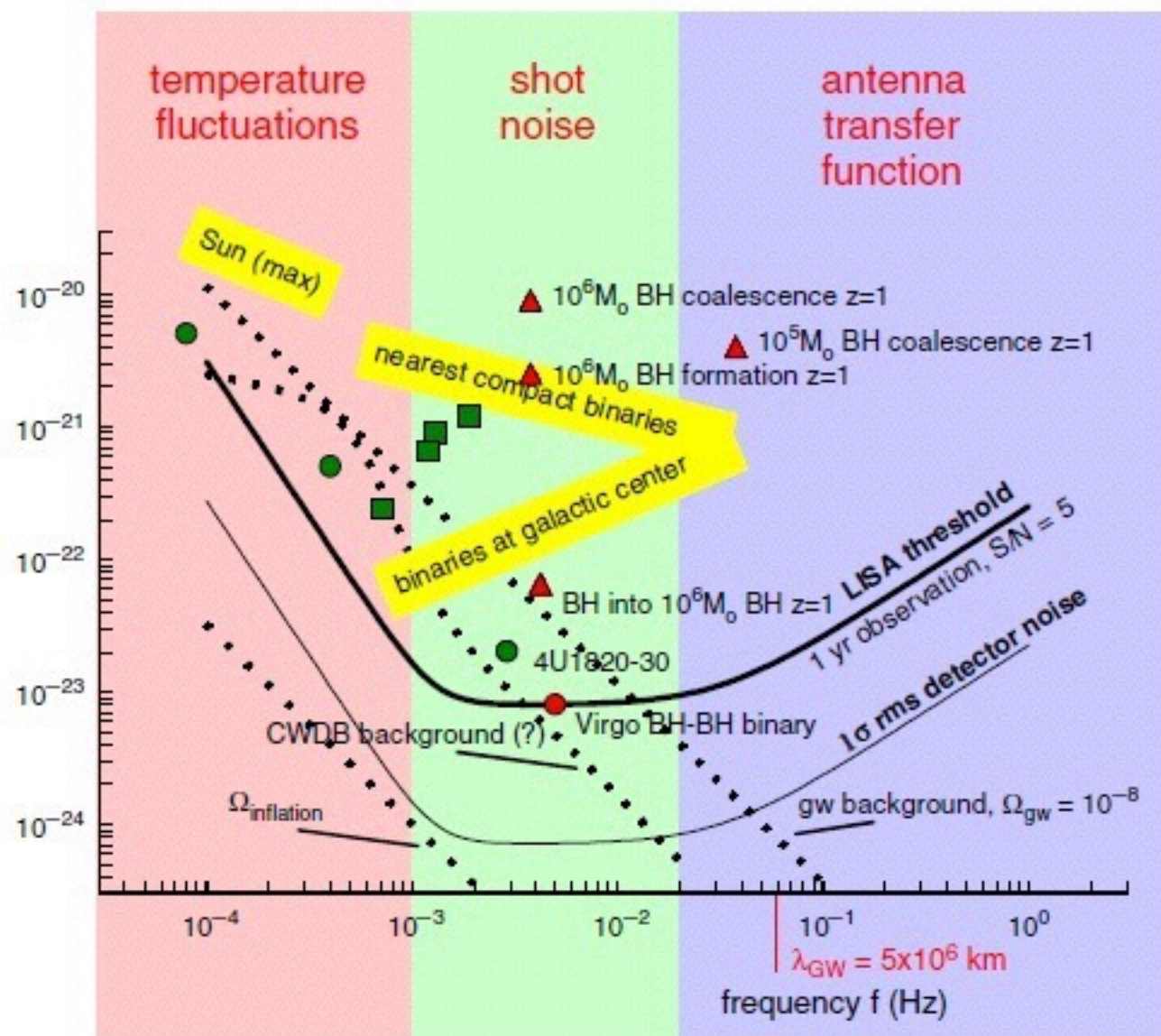


LISA Sensitivity

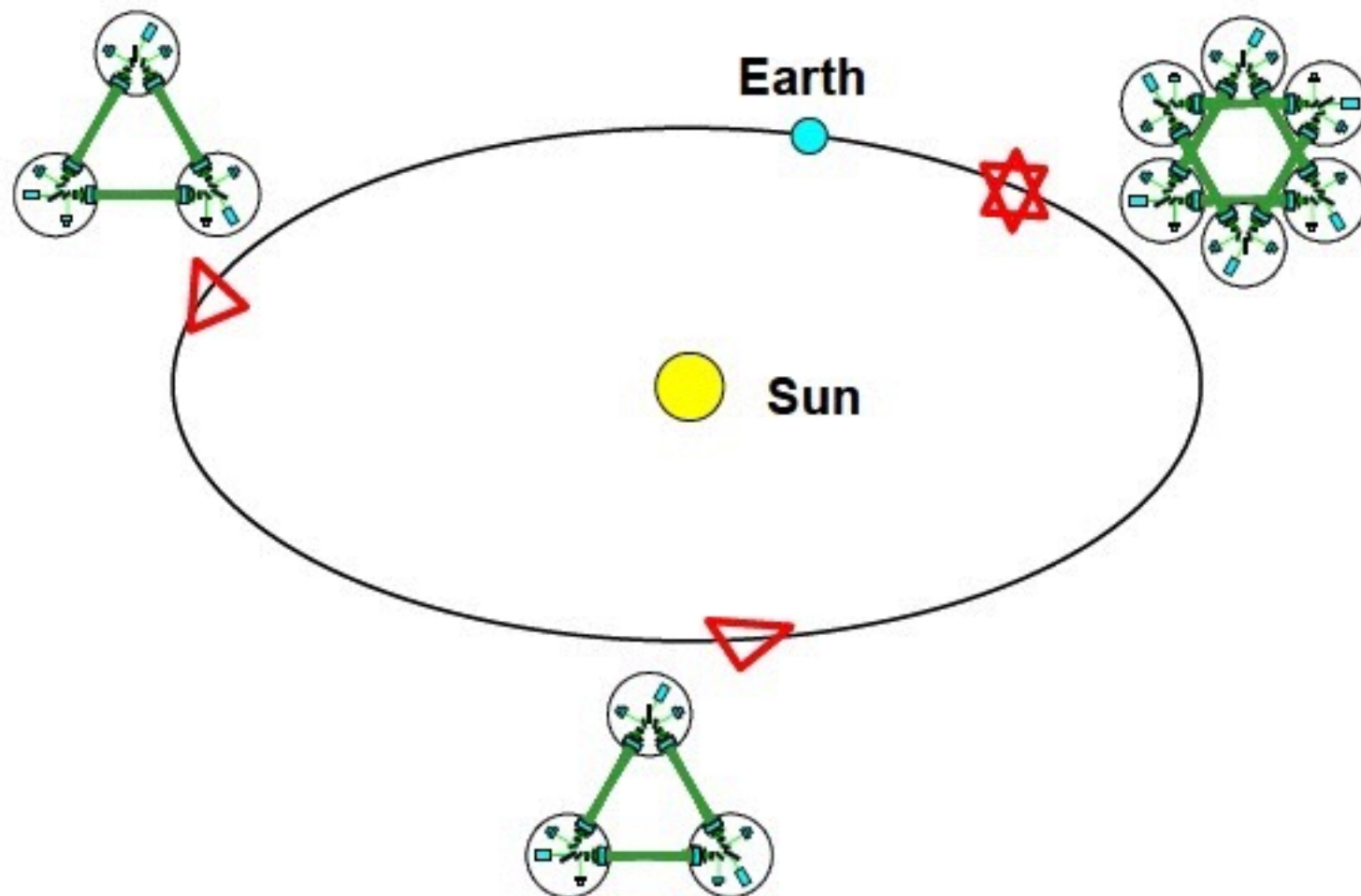




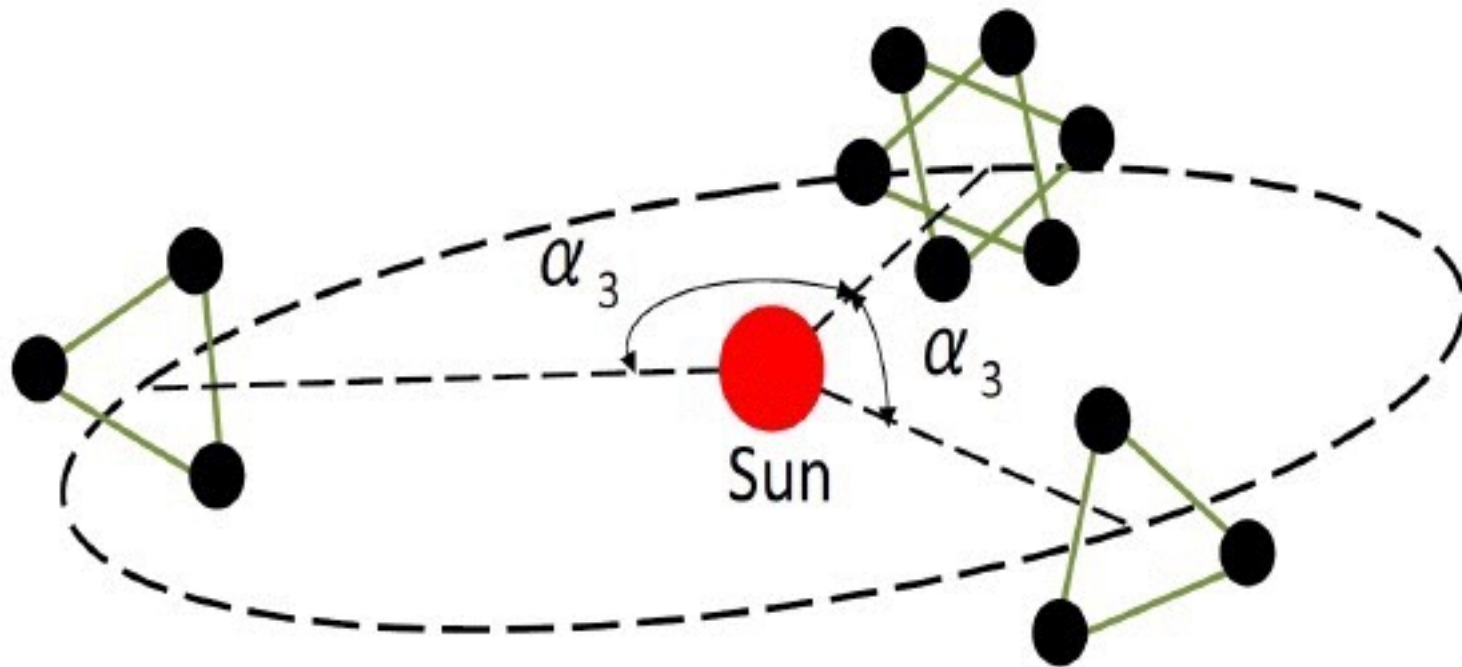
Sensitivity curves for the ground-based interferometers (Earth), and LISA.



Enlarged sensitivity curve for LISA



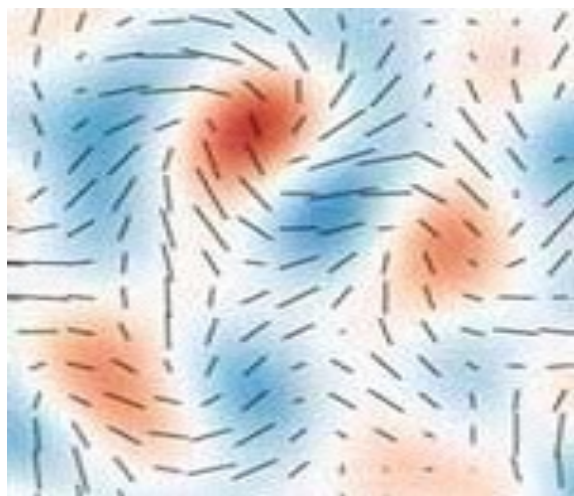
Constellation of DECIGO



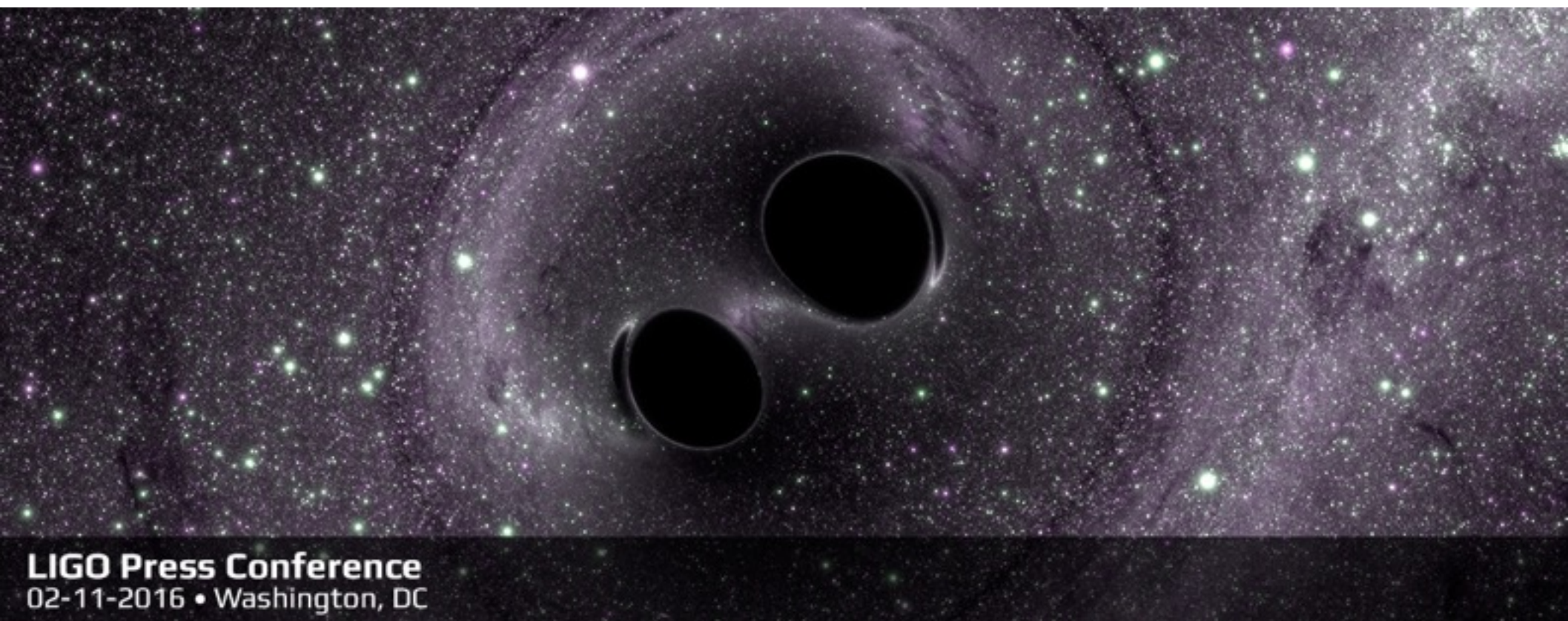
The default configuration of BBO or DECIGO with $\alpha_3 = 120^\circ$

“Anatomia” odkrycia fal grawitacyjnych

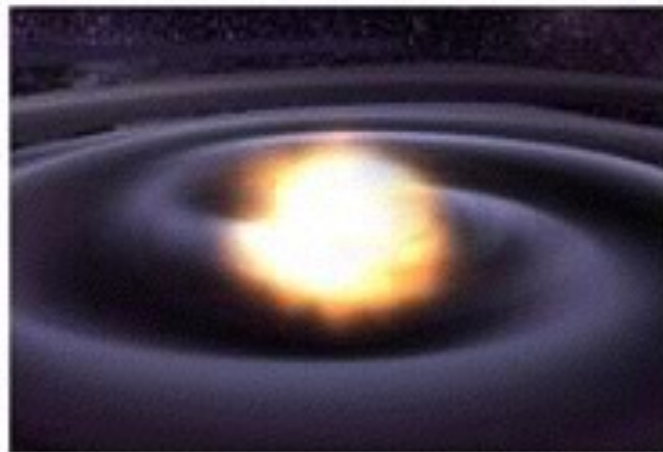
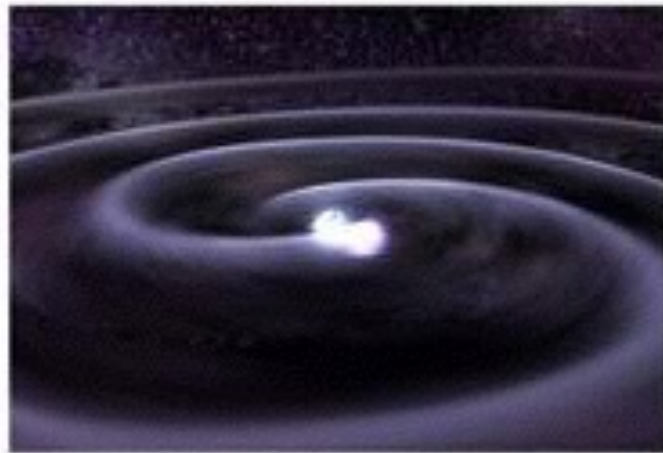
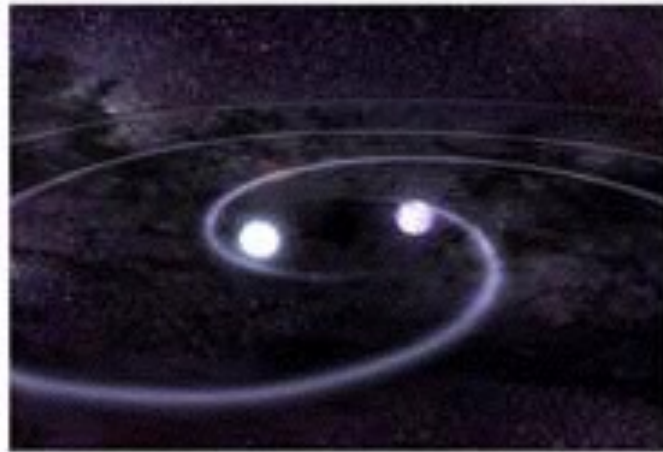
*“Fałszywy alarm” Johna Kovaca z Harvard
17.03.2014 - efekt w promieniowaniu tła (tzw.
mod magnetyczny B) nie pochodził od fal
grawitacyjnych tylko od pyłu galaktycznego.*

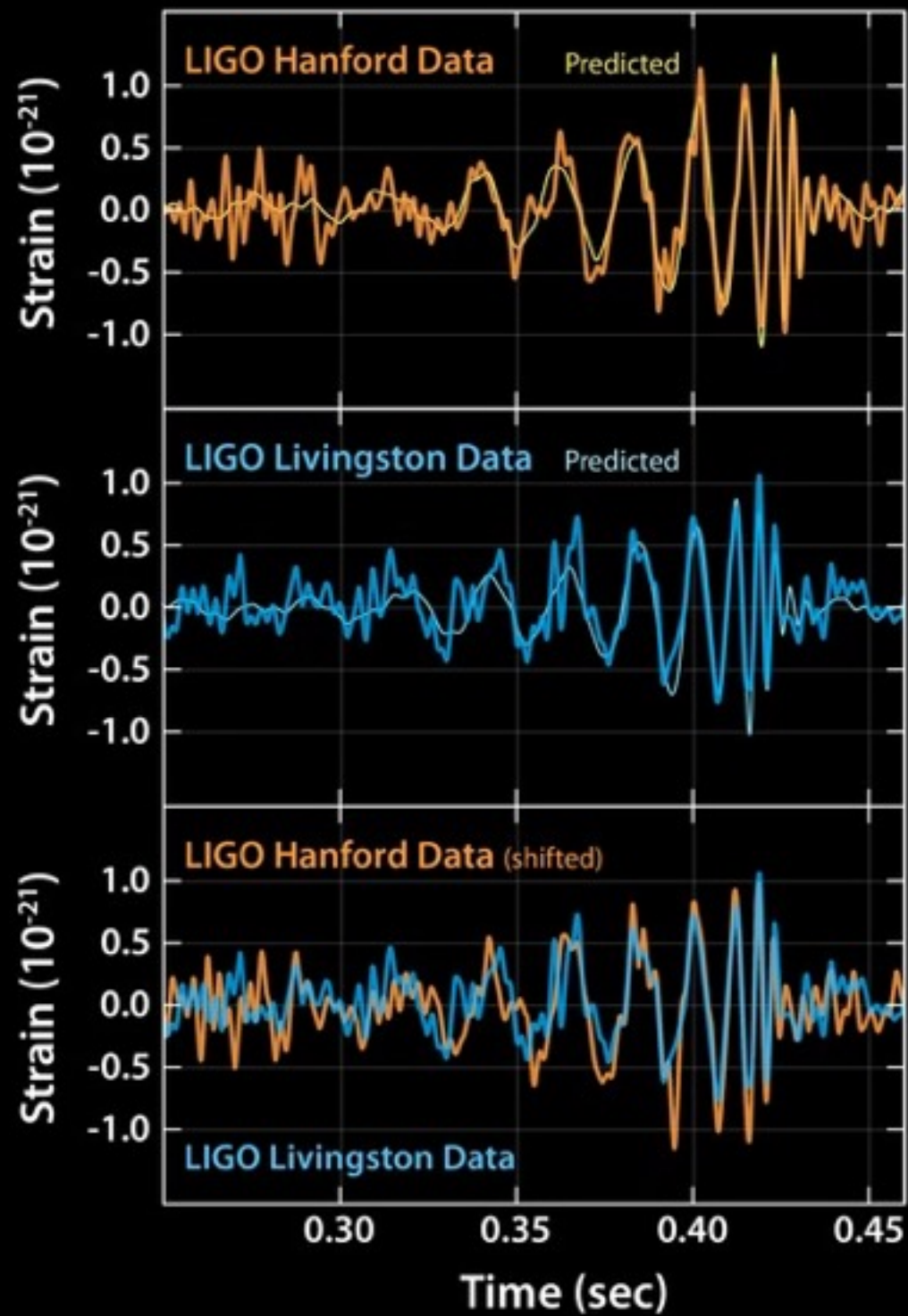


Prawdziwy sygnał z 14.09.2015 - od zlewających się ze sobą dwóch czarnych dziur.



Oficjalnie opublikowany 11 lutego 2016 roku na specjalnej konferencji prasowej.





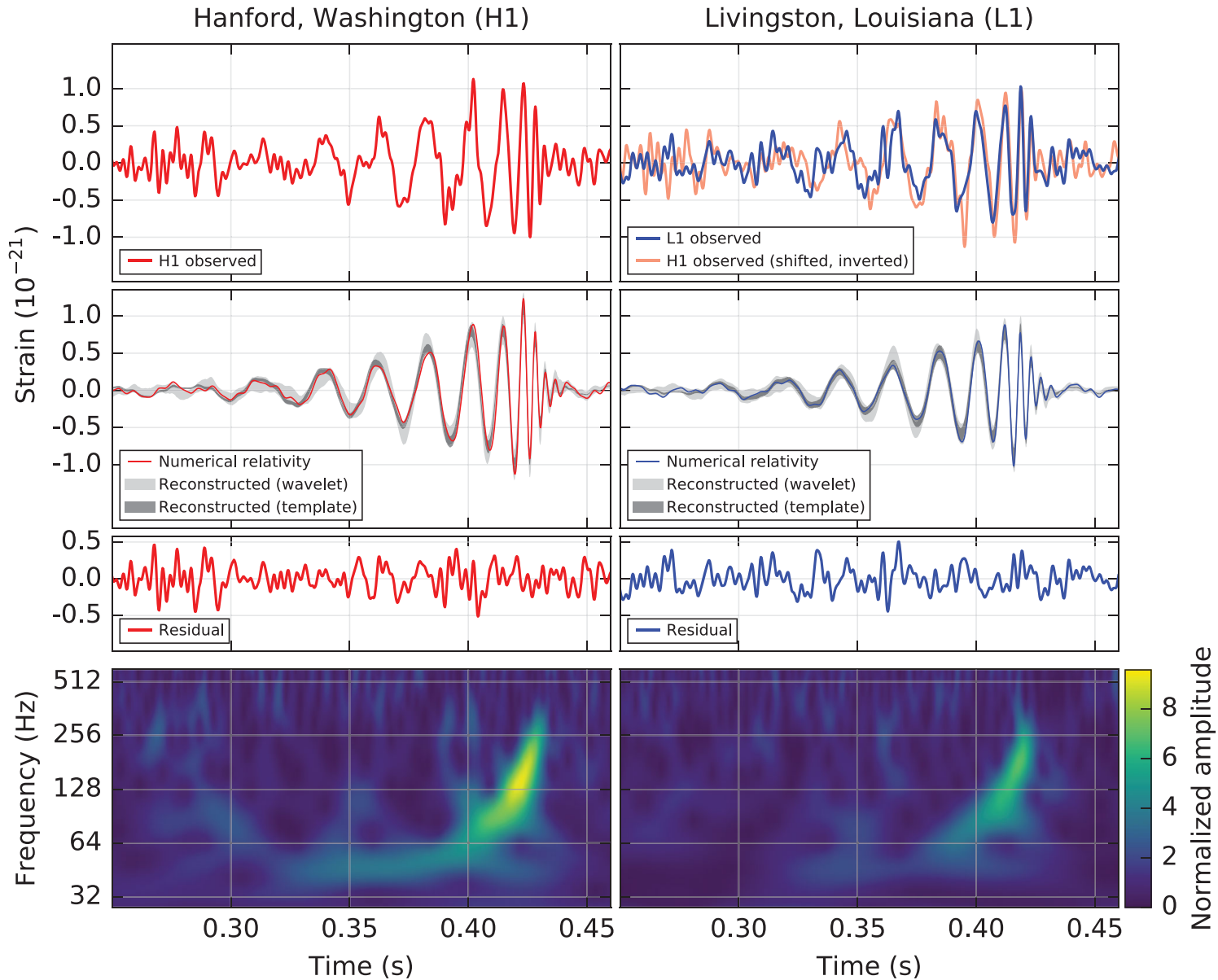
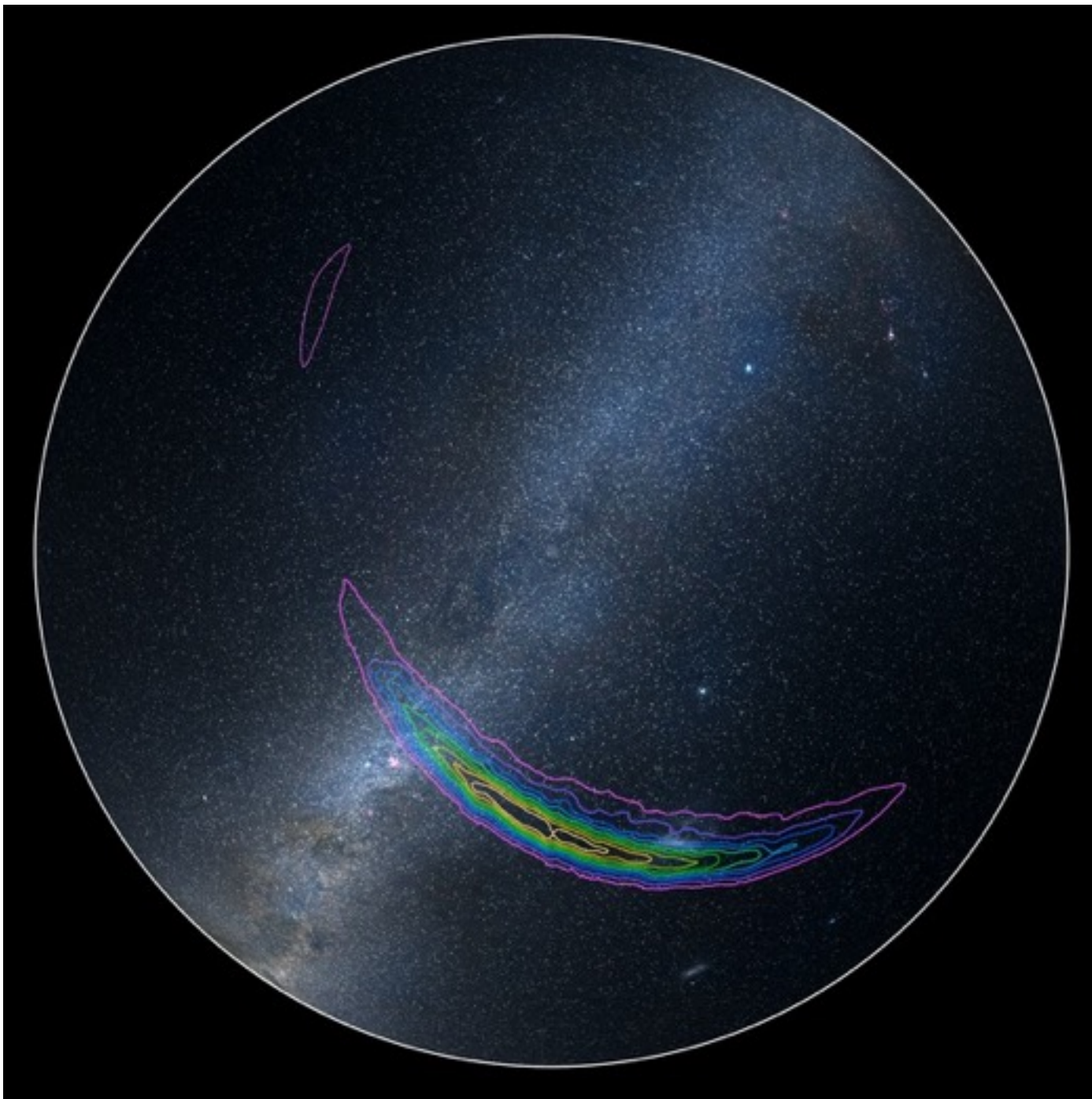


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered with a 35–350 Hz bandpass filter to suppress large fluctuations outside the detectors’ most sensitive frequency band, and band-reject filters to remove the strong instrumental spectral lines seen in the Fig. 3 spectra. *Top row, left:* H1 strain. *Top row, right:* L1 strain. GW150914 arrived first at L1 and $6.9^{+0.5}_{-0.4}$ ms later at H1; for a visual comparison, the H1 data are also shown, shifted in time by this amount and inverted (to account for the detectors’ relative orientations). *Second row:* Gravitational-wave strain projected onto each detector in the 35–350 Hz band. Solid lines show a numerical relativity waveform for a system with parameters consistent with those recovered from GW150914 [37,38] confirmed to 99.9% by an independent calculation based on [15]. Shaded areas show 90% credible

Signal from Southern sky - direction Magellanic Cloud



propagation time, the events have a combined signal-to-noise ratio (SNR) of 24 [45].

Only the LIGO detectors were observing at the time of GW150914. The Virgo detector was being upgraded, and GEO 600, though not sufficiently sensitive to detect this event, was operating but not in observational mode. With only two detectors the source position is primarily determined by the relative arrival time and localized to an area of approximately 600 deg^2 (90% credible region) [39,46].

The basic features of GW150914 point to it being produced by the coalescence of two black holes—i.e., their orbital inspiral and merger, and subsequent final black hole ringdown. Over 0.2 s, the signal increases in frequency and amplitude in about 8 cycles from 35 to 150 Hz, where the amplitude reaches a maximum. The most plausible explanation for this evolution is the inspiral of two orbiting masses, m_1 and m_2 , due to gravitational-wave emission. At the lower frequencies, such evolution is characterized by the chirp mass [11]

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5},$$

where f and $\dot{f}$ are the observed frequency and its time derivative and G and c are the gravitational constant and speed of light. Estimating f and $\dot{f}$ from the data in Fig. 1, we obtain a chirp mass of $\mathcal{M} \approx 30M_\odot$, implying that the total mass $M = m_1 + m_2$ is $\gtrsim 70M_\odot$ in the detector frame. This bounds the sum of the Schwarzschild radii of the binary components to $2GM/c^2 \gtrsim 210 \text{ km}$. To reach an orbital frequency of 75 Hz (half the gravitational-wave

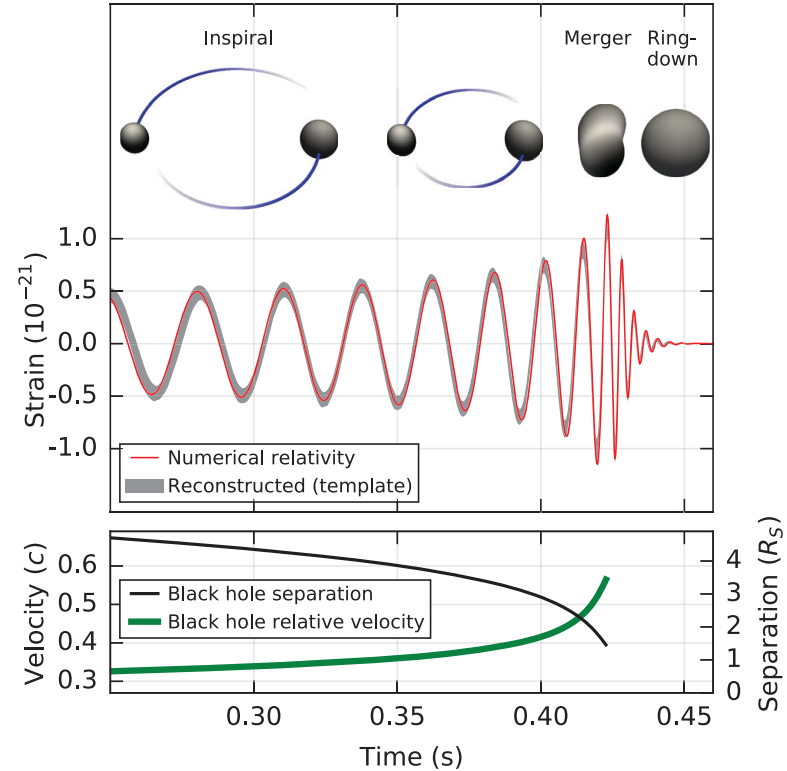


FIG. 2. *Top*: Estimated gravitational-wave strain amplitude from GW150914 projected onto H1. This shows the full bandwidth of the waveforms, without the filtering used for Fig. 1. The inset images show numerical relativity models of the black hole horizons as the black holes coalesce. *Bottom*: The Keplerian effective black hole separation in units of Schwarzschild radii ($R_s = 2GM/c^2$) and the effective relative velocity given by the post-Newtonian parameter $v/c = (GM\pi f/c^3)^{1/3}$, where f is the gravitational-wave frequency calculated with numerical relativity and M is the total mass (value from Table I).

detector [33], a modified Michelson interferometer (see

For robustness and validation, we also use other generic transient search algorithms [41]. A different search [73] and a parameter estimation follow-up [74] detected GW150914 with consistent significance and signal parameters.

B. Binary coalescence search

This search targets gravitational-wave emission from binary systems with individual masses from 1 to $99M_\odot$, total mass less than $100M_\odot$, and dimensionless spins up to 0.99 [44]. To model systems with total mass larger than $4M_\odot$, we use the effective-one-body formalism [75], which combines results from the post-Newtonian approach [11,76] with results from black hole perturbation theory and numerical relativity. The waveform model [77,78] assumes that the spins of the merging objects are aligned with the orbital angular momentum, but the resulting templates can, nonetheless, effectively recover systems with misaligned spins in the parameter region of GW150914 [44]. Approximately 250 000 template waveforms are used to cover this parameter space.

The search calculates the matched-filter signal-to-noise ratio $\rho(t)$ for each template in each detector and identifies maxima of $\rho(t)$ with respect to the time of arrival of the signal [79–81]. For each maximum we calculate a chi-squared statistic χ_r^2 to test whether the data in several different frequency bands are consistent with the matching template [82]. Values of χ_r^2 near unity indicate that the signal is consistent with a coalescence. If χ_r^2 is greater than unity, $\rho(t)$ is reweighted as $\hat{\rho} = \rho / \{[1 + (\chi_r^2)^3]/2\}^{1/6}$ [83,84]. The final step enforces coincidence between detectors by selecting

TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by $(1+z)$ [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

Primary black hole mass	$36_{-4}^{+5} M_\odot$
Secondary black hole mass	$29_{-4}^{+4} M_\odot$
Final black hole mass	$62_{-4}^{+4} M_\odot$
Final black hole spin	$0.67_{-0.07}^{+0.05}$
Luminosity distance	410_{-180}^{+160} Mpc
Source redshift z	$0.09_{-0.04}^{+0.03}$

When an event is confidently identified as a real gravitational-wave signal, as for GW150914, the background used to determine the significance of other events is reestimated without the contribution of this event. This is the background distribution shown as a purple line in the right panel of Fig. 4. Based on this, the second most significant event has a false alarm rate of 1 per 2.3 years and corresponding Poissonian false alarm probability of 0.02. Waveform analysis of this event indicates that if it is astrophysical in origin it is also a binary black hole merger [44].

VI. SOURCE DISCUSSION

The matched-filter search is optimized for detecting

Masy czarnych dziur (rozmiar ok. 150 km):

$M1 = 36 \text{ mas S\loneca} = 36 \text{ m}$

$M2 = 29 \text{ mas S\loneca} = 29 \text{ m}$

**Po złączeniu powstała nowa czarna dziura
o masie $M = 62 \text{ m}$**

(zdarzenie miało miejsce ok. 1 mld lat temu)

**Zatem energia wypromieniowana w postaci fal
grawitacyjnych to: $3 \text{ m} \times c^2 = 18 \times 10^{46} \text{ J}$**

lub moc $1,8 \times 10^{38} \text{ GW}$

Polskie elektrownie - 35 GW

Wszystkie elektrownie na świecie - 3500 GW

WYPROMIENIOWANA MOC KOŁOSALNA!!!

Ciekawostki:

- detektory fal grawitacyjnych obecnie są nazywane po prostu “teleskopami grawitacyjnymi”**
- identyfikacja sygnału od fali grawitacyjnej z sygnałem elektromagnetycznym (m.in. NCBJ “Pi of the sky”)**
- problem: czy prędkość fotonu (fali e-m) jest taka sama jak prędkość grawitonu (fali grawitacyjnej)?**

Podsumowanie:

1. Grawitacja to **najsłabsze** z oddziaływań, ale dominujące we Wszechświecie
2. Jej korzenie sięgają Newtona i Cavendisha, lecz jej **właściwą naturę** opisał Einstein
3. Fakt istnienia fal grawitacyjnych pozwala na jej interpretację jak w fizyce cząstek elementarnych
4. Nośnikiem oddziaływania jest **grawiton (fala grawitacyjna)** - analogia do **fotonu (fala elektromagnetyczna)**

References:

Mateusz Lisaj, Polarization of the microwave background as a signal from gravity waves, M.Sc. thesis (Szczecin, 2010)

Hasanain Hassan Al-Dahlaki, New Generations of Gravitational Wave Detectors in Space, M.Sc. thesis (Szczecin, 2013)

Bernard Schutz, Gravitational waves on the back of an envelope, Am. J. Phys. 52 (5), 412 (1994)

B.P. Abbott et al., Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).

Dziękuję za uwagę!

