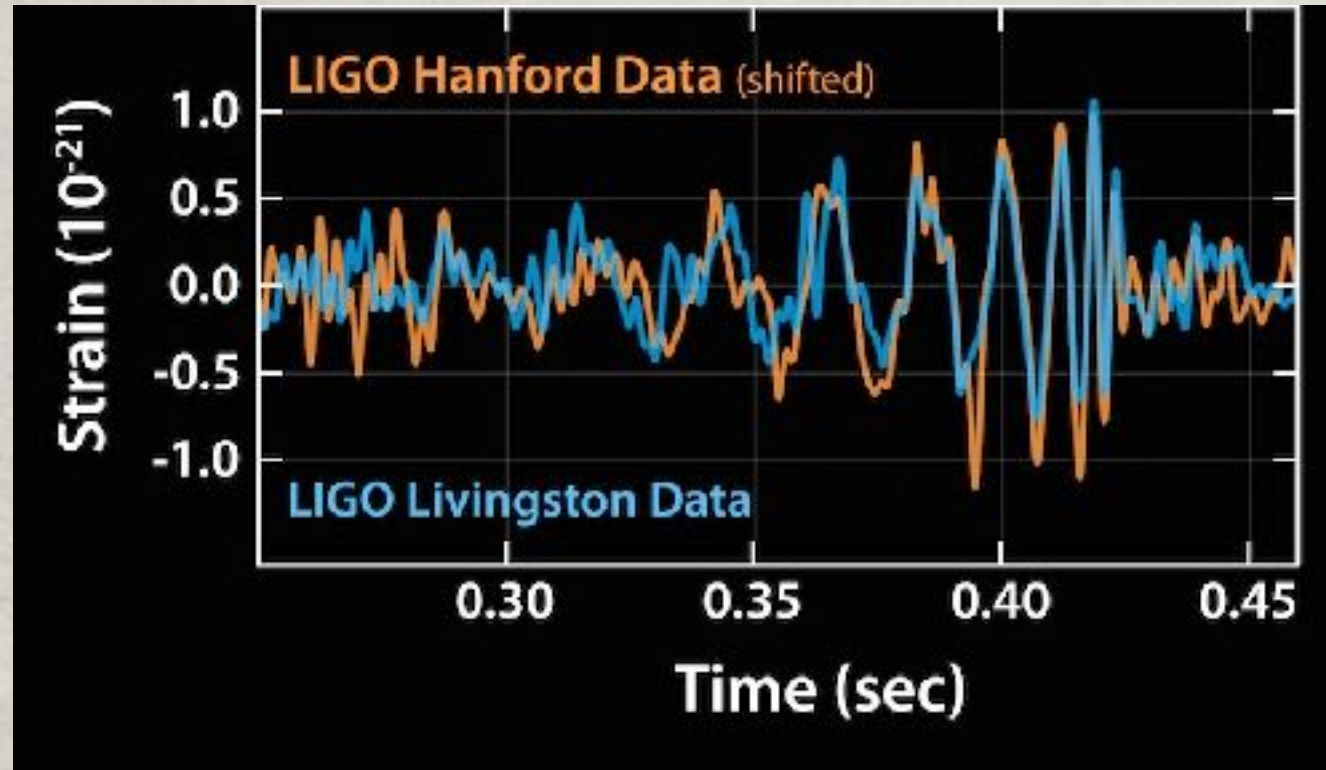
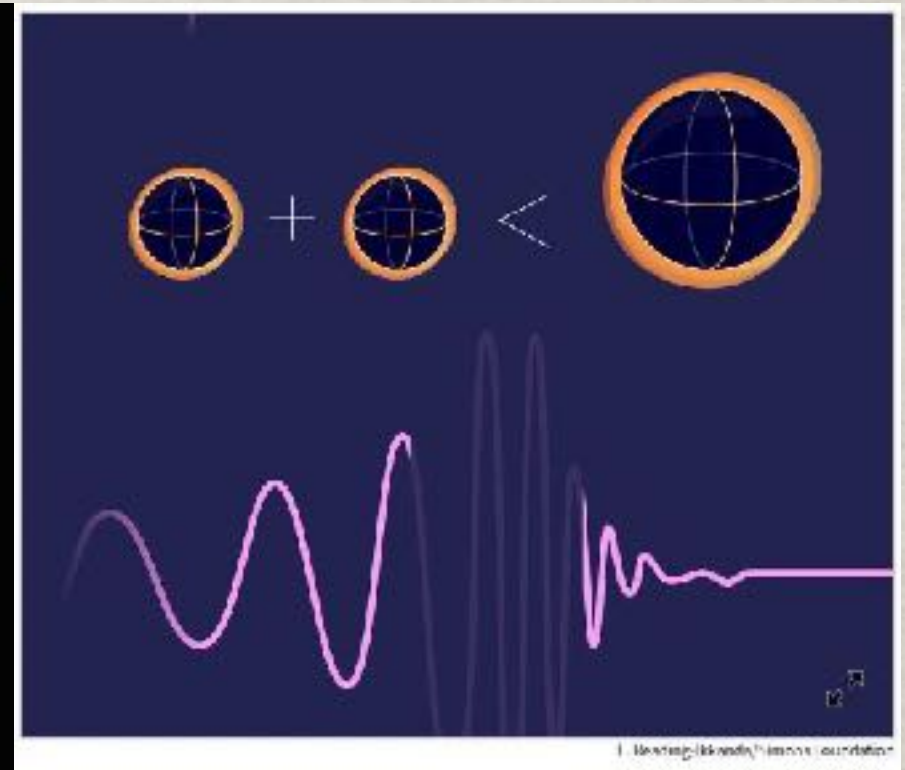


Ondas gravitacionais: a verdadeira música celestial



GW150914
10 years ago



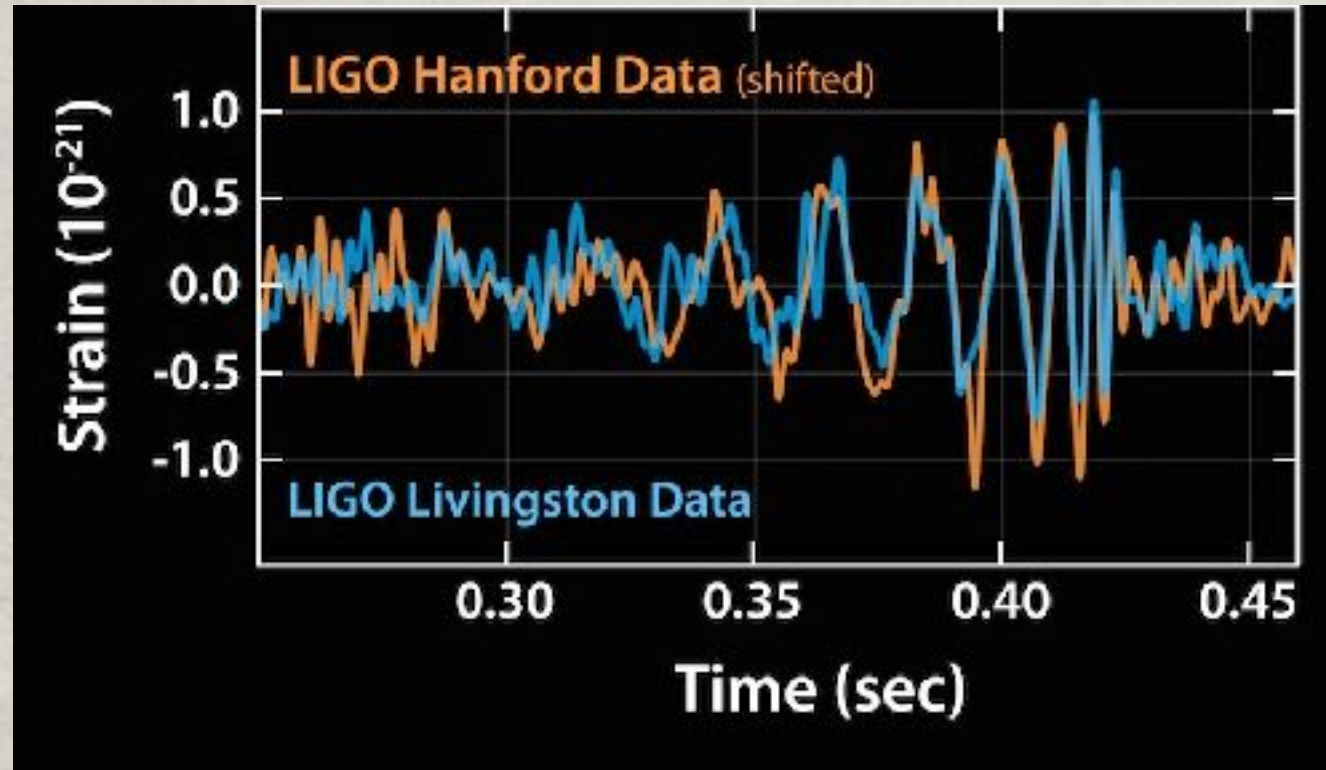
GW250114
8 months ago

Carlos Herdeiro

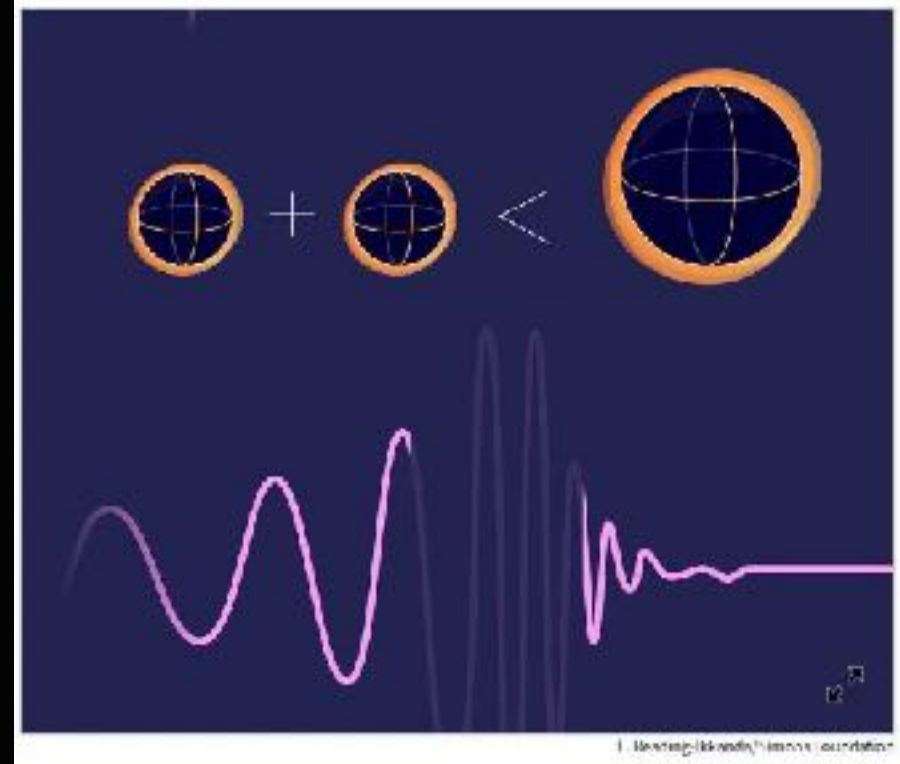
UFPA e Universidade de Aveiro

VII Amazonian Symposium in Physics, Belém, 24 de Setembro de 2025

Ondas gravitacionais: a verdadeira música celestial



GW150914
10 years ago



GW250114
8 months ago

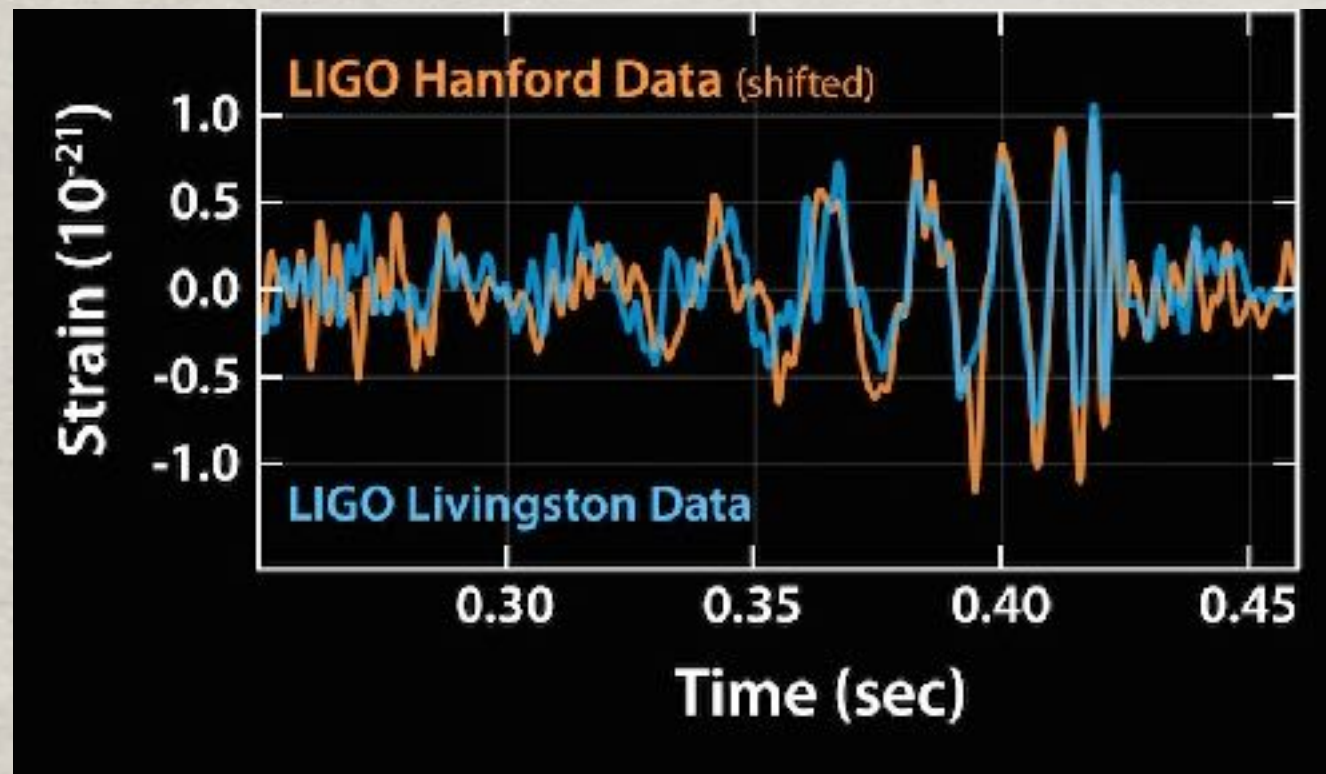
Carlos Herdeiro

UFPA e Universidade de Aveiro

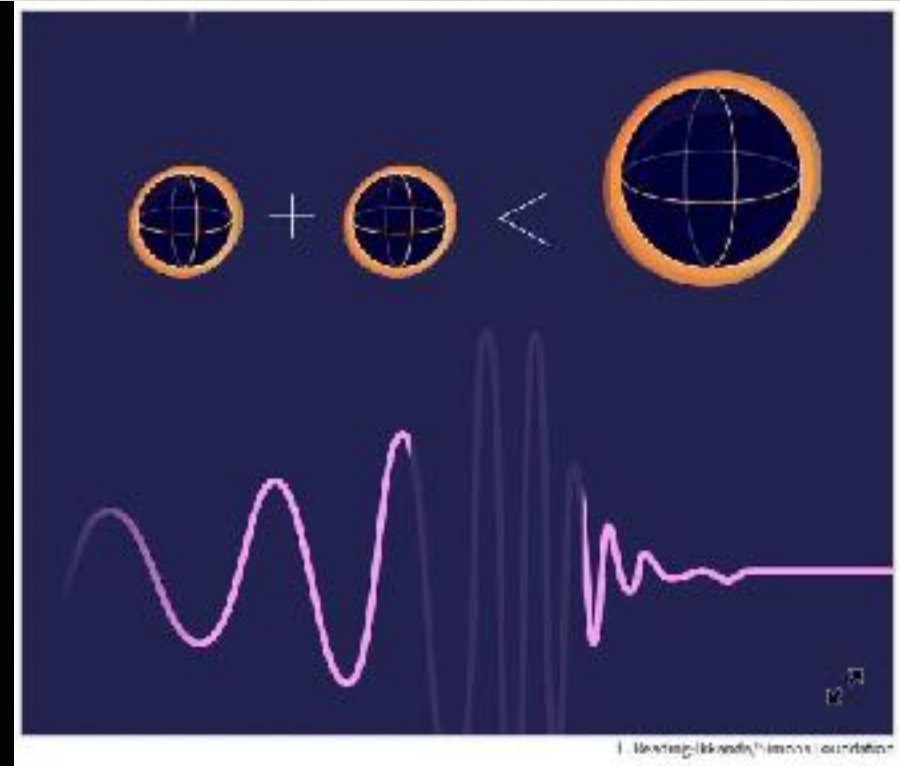
VII Amazonian Symposium in Physics, Belém, 24 de Setembro de 2025

A long time ago in a galaxy far,
far away...

Ondas gravitacionais: a verdadeira música celestial



GW150914
10 years ago



GW250114
8 months ago

Carlos Herdeiro

Gr@v, CIDMA e DMat, Universidade de Aveiro
Fábrica - Centro de Ciência Viva de Aveiro, 14 de Setembro de 2025

Outra efeméride: 1915: A Relatividade Geral de Einstein

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

Conceptualmente nova
formulação
de gravitação
baseado na geometria
pseudo-Riemanniana

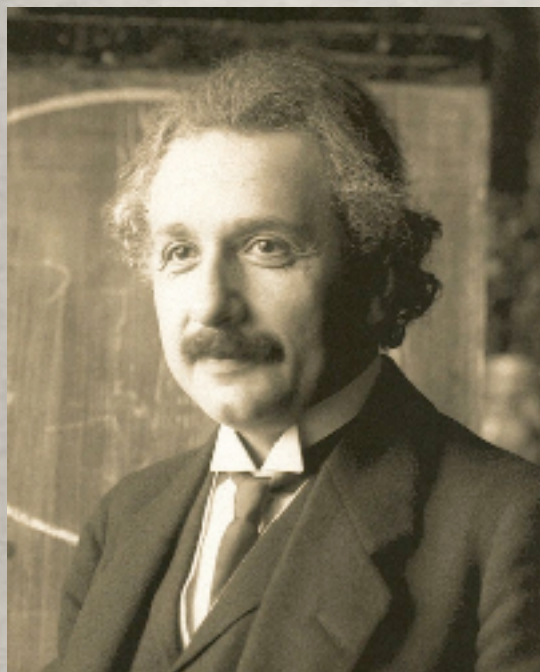
844 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 25. November 1915

Die Feldgleichungen der Gravitation.

Von A. EINSTEIN.

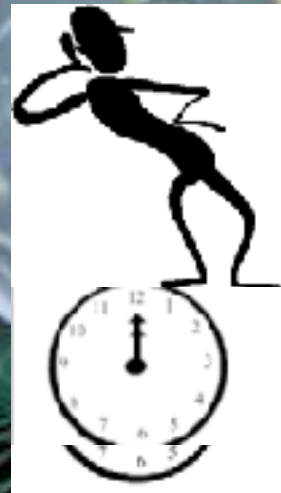
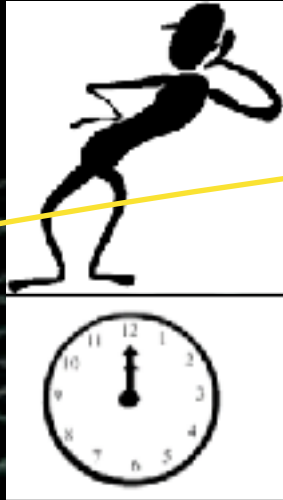
In zwei vor kurzem erschienenen Mitteilungen¹ habe ich gezeigt, wie man zu Feldgleichungen der Gravitation gelangen kann, die dem Postulat allgemeiner Relativität entsprechen, d. h. die in ihrer allgemeinen Fassung beliebigen Substitutionen der Raumzeitvariablen gegenüber kovariant sind.

Der Entwicklungsgang war dabei folgender. Zunächst fand ich Gleichungen, welche die NEWTONSCHE Theorie als Näherung enthalten und beliebigen Substitutionen von der Determinante 1 gegenüber kovariant waren. Hierauf fand ich, daß diesen Gleichungen allgemein kovariante entsprechen, falls der Skalar des Energietensors der »Materie« verschwindet. Das Koordinatensystem war dann nach der einfachen Regel zu spezialisieren, daß $\sqrt{-g}$ zu 1 gemacht wird, wodurch die Gleichungen der Theorie eine eminente Vereinfachung erfahren.



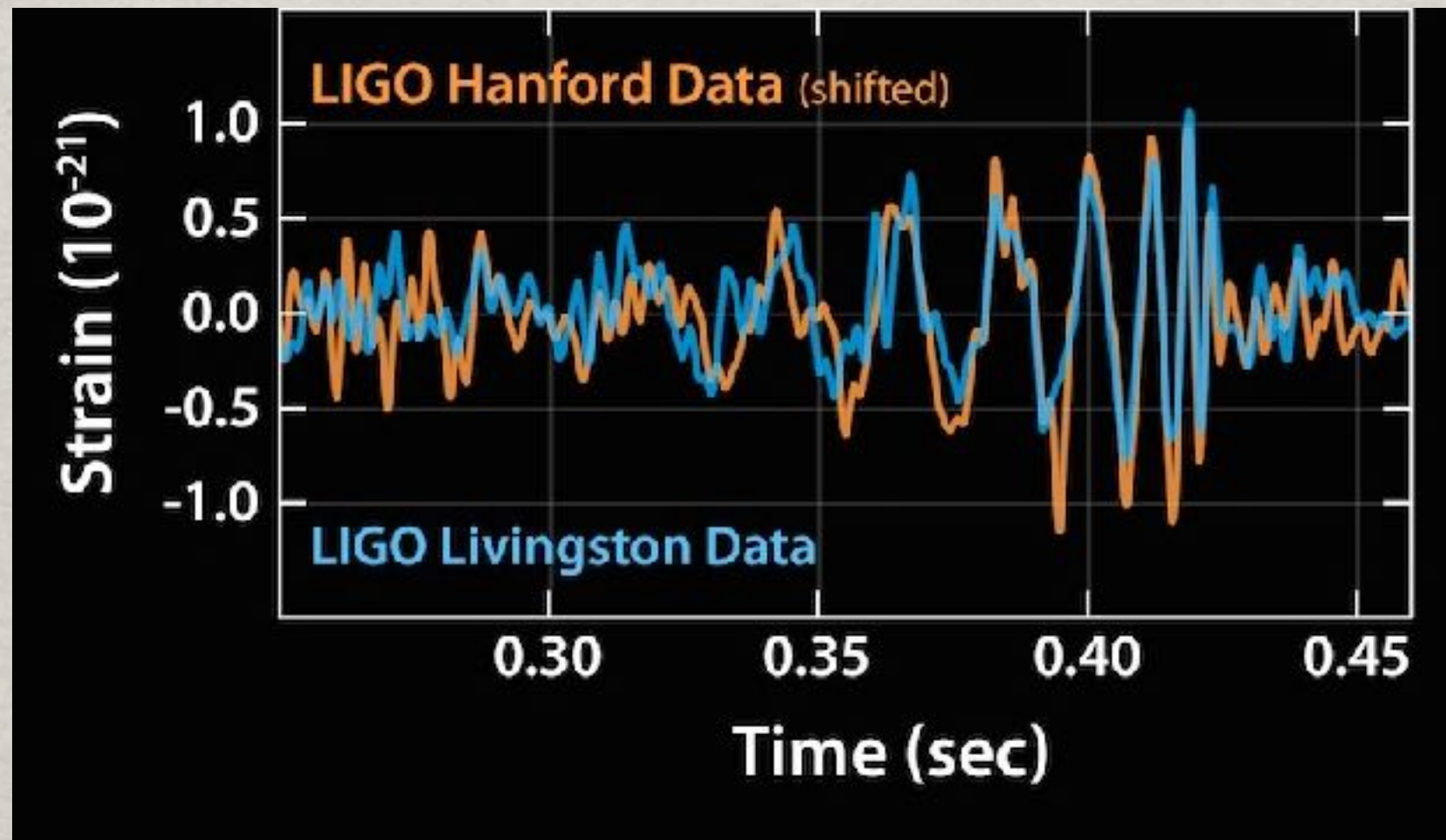
Albert Einstein
(1879-1955)

“A matéria diz ao espaço como se curvar”
“Espaço diz à matéria como se mover”



E mais outra efeméride:

2015: A primeira detecção, um resultado histórico:

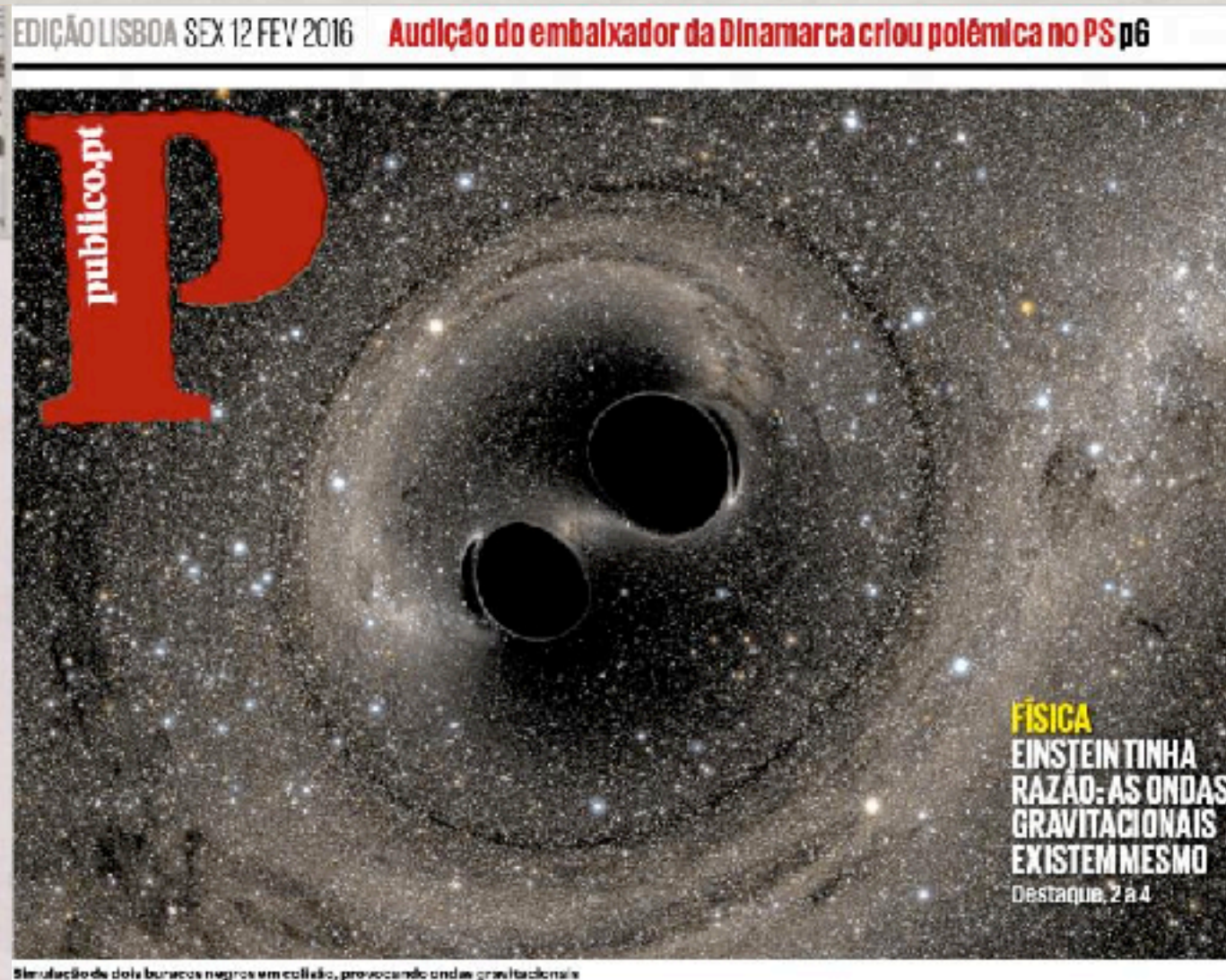
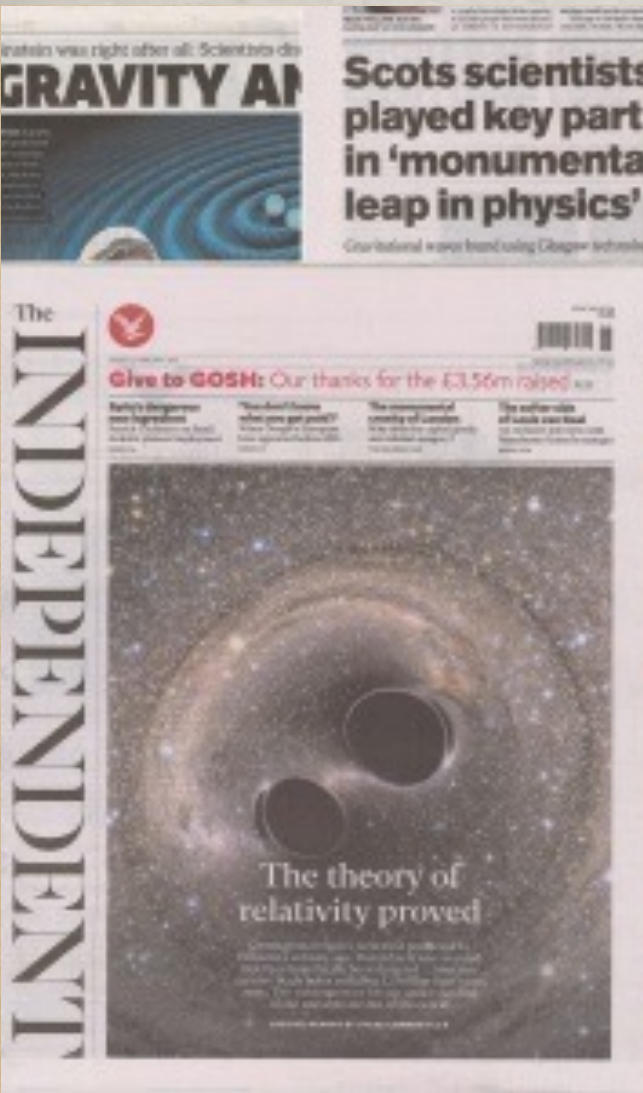


GW150914

Abbot et al., PRL 116 (2016) 061102

11 de Fevereiro de 2016

Um tipo diferente de primeiras páginas (12 Fev 2016)!



Eurogrupo força Portugal a preparar plano B com mais austeridade

O Governo vai elaborar novas medidas de redução do défice, que estejam prontas a usar "quando necessário". Mercados estão a penalizar a dívida pública portuguesa **Economia, 20/21**



"Os exames não aumentaram as retenções", diz Crato

É a primeira vez que o ministro da Educação fala depois de sair do Governo e recusa-se a criticar o seu sucessor **#12**

Rússia dita agora as suas condições na guerra da Síria

Com as forças leais a Assad a fecharem o cerco a Aleppo, EUA acusam Moscovo de querer adiar a guerra **#26**

o

b

co,

el,

1) Como se propaga

Uma previsão teórica de que se propagam repetidamente o seu pr

a e confundiu

2) Como se detecta

Uma experiência “impossível” foi realizada pela Science Foundation de

assumido pela National

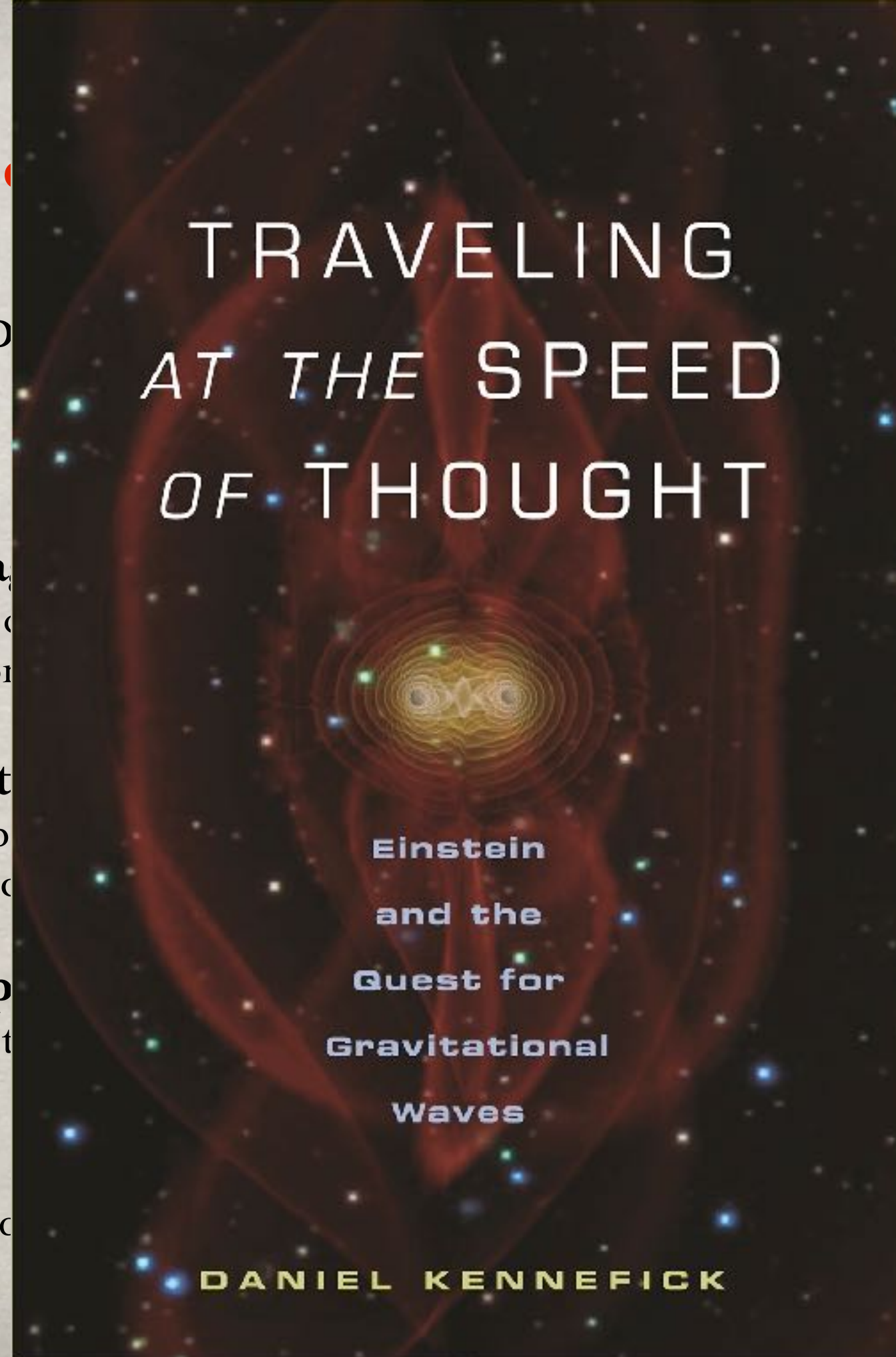
3) Como se interpreta

Os desenvolvimentos teóricos

r resultados;

4) O que estamos

O potencial científico de



1) Uma breve história das ondas gravitacionais

Como se propaga a gravidade?

Lei da gravitação universal (Newtoniana):

$$\vec{F} = -G \frac{Mm}{r^2} \mathbf{e}_r$$

Equação fundamental:

$$\Delta\Phi = 4\pi G\rho$$

Na gravitação Newtoniana, uma alteração da distribuição de massas, reflecte-se instantaneamente numa alteração do campo gravítico em todo o Universo!

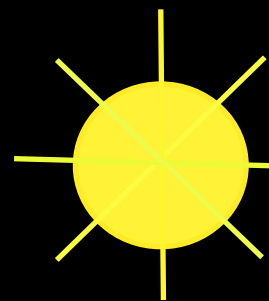
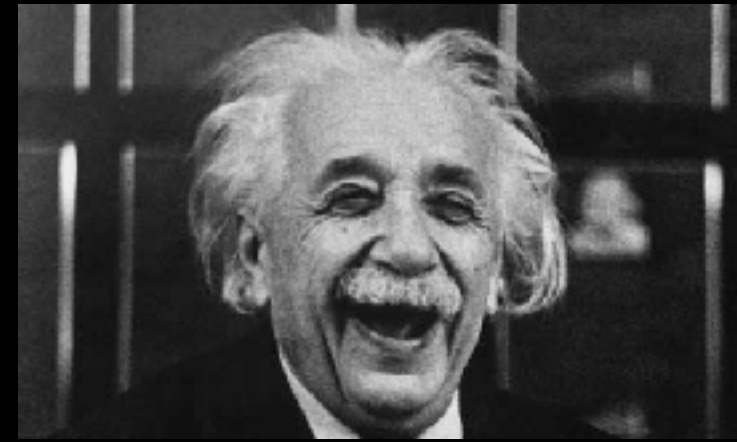


Aplicação a um sistema físico
(ainda que a um problema académico!)



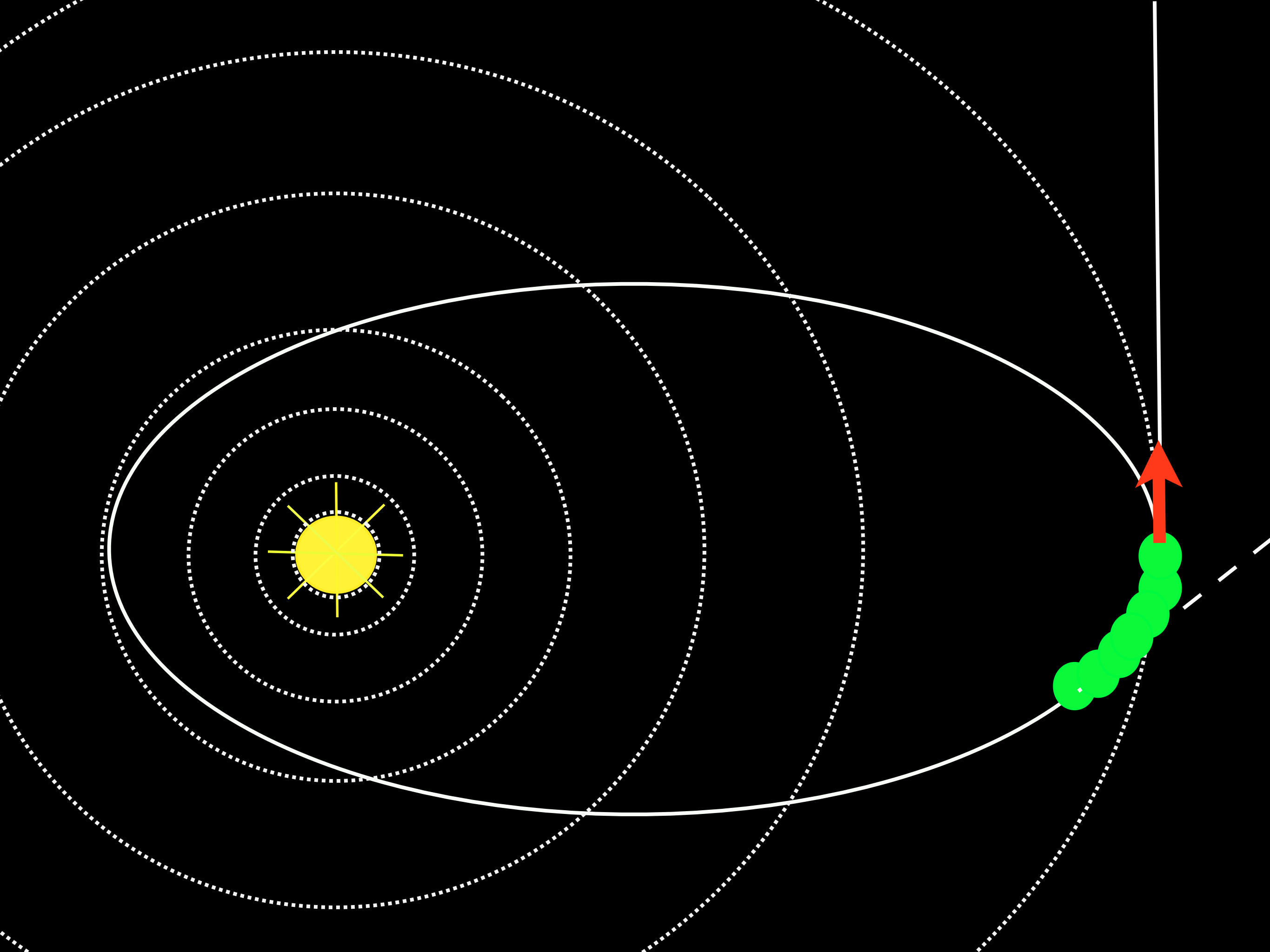


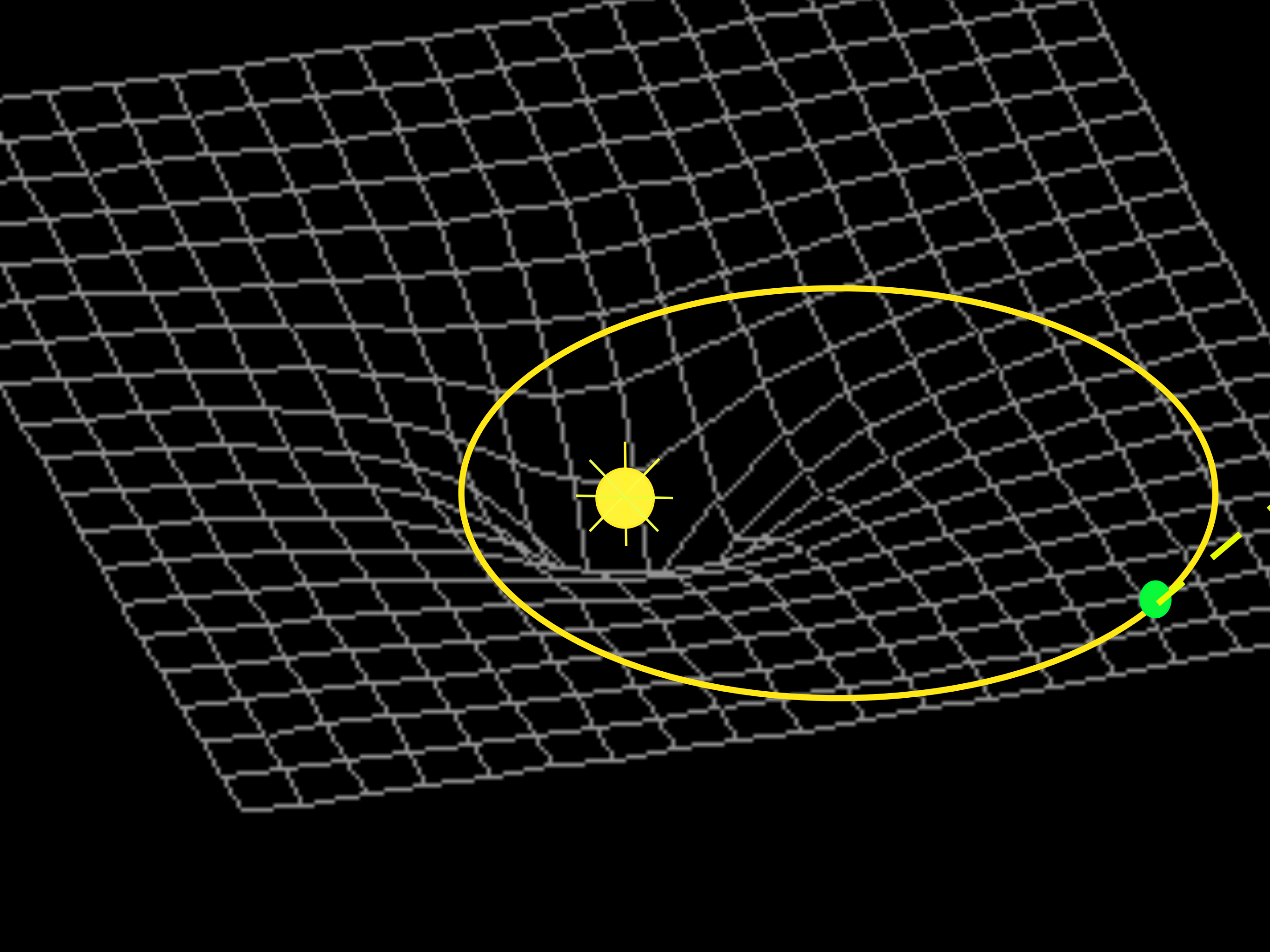
Se o sol “desaparecer”...

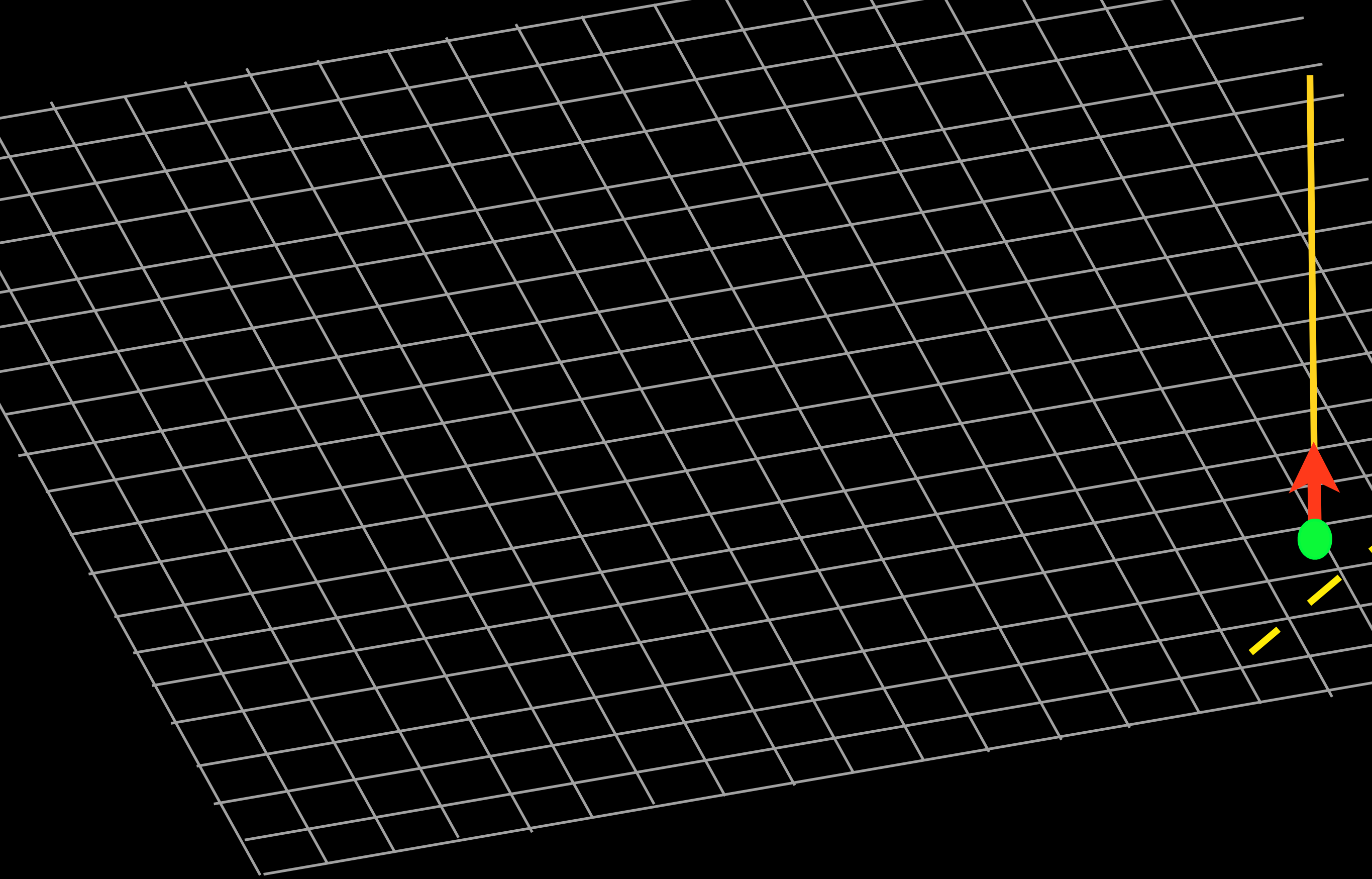


Efeito instantâneo!









Estas são as “ondas gravitacionais”

Einstein e as ondas gravitacionais:

I) Em **22 de Junho de 1916** publica o primeiro artigo sobre ondas gravitacionais (“Integração aproximada das equações de campo da gravitação”):

688 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 22. Juni 1916

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\mu\nu}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter »erster Näherung« ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

- Reconhece a existência de ondas gravitacionais que se propagam à velocidade da luz;
- Identifica três classes de ondas, mas aponta que apenas um tipo transporta energia;

Teoria linearizada (Relatividade Geral):

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

Para uma certa escolha de coordenadas:

$$\bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h$$

$$\partial^\mu \bar{h}_{\mu\nu} = 0$$

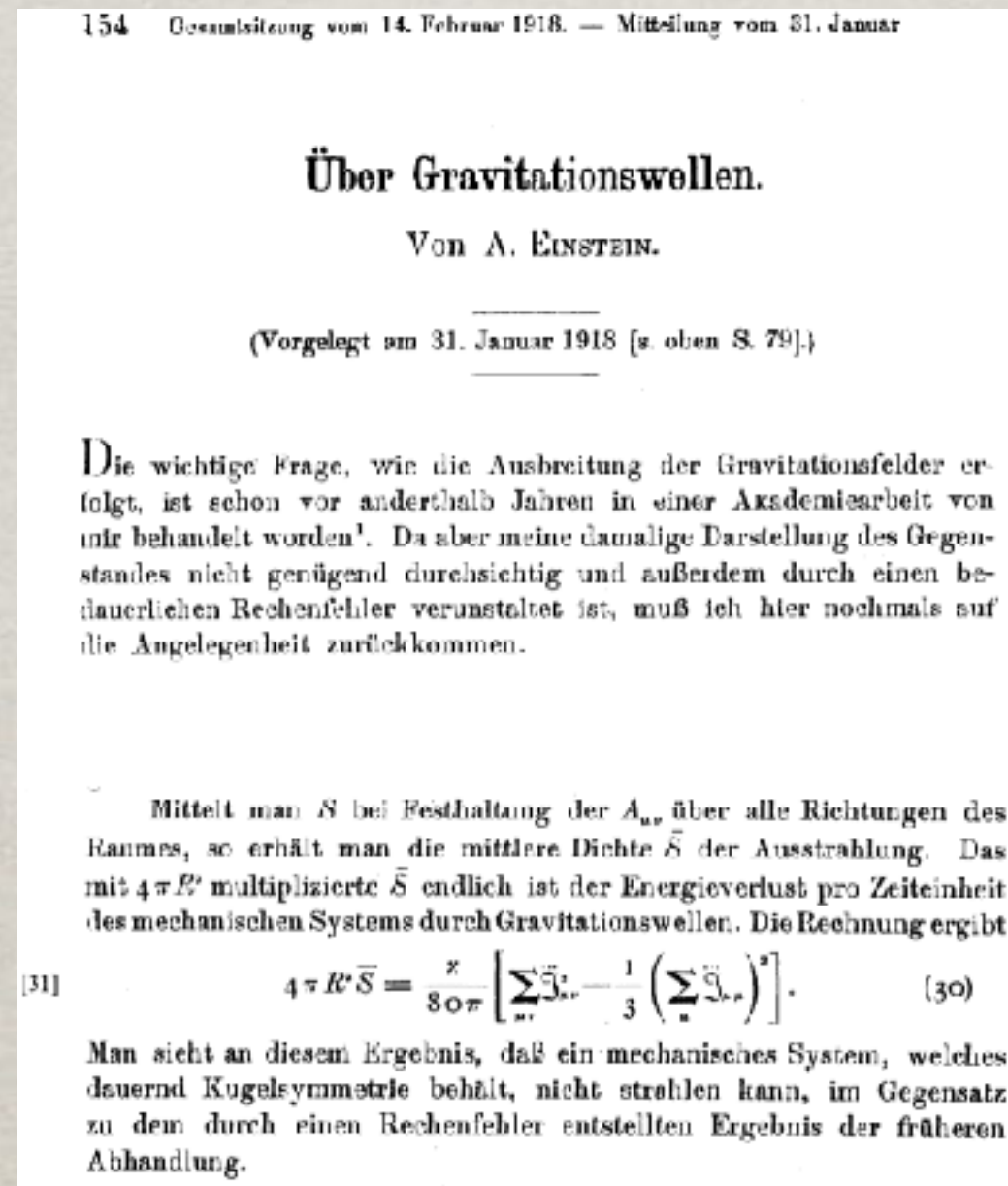
$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi T_{\mu\nu}$$

que é uma equação de onda, para ondas que se propagam com a velocidade da luz (“c”):

$$\square = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \Delta$$

Einstein e as ondas gravitacionais:

II) Em 14 de Fevereiro de 1918 publica o segundo artigo (“Sobre as ondas gravitacionais”):



- Reconhece que as duas classes de ondas que não transportam energias são artefactos coordenados;
- Corrige o erro técnico do primeiro artigo e conclui que apenas há emissão de ondas gravitacionais se houver variação do quadrupolo no tempo;

Três problemas controversos (para as décadas seguintes):

- As ondas gravitacionais existem em relatividade geral, em esquemas de aproximação e até como soluções exactas. Mas transportam ou não energia? (**problema da energia**);
- A emissão destas ondas afecta (e de que forma) a fonte que as origina? (**problema do movimento da fonte**);
- Como é que estas ondas interagem com a matéria? (**problema da detecção**);

Este último problema, no entanto, era pouco mais do que académico, dado que sendo excepcionalmente fracas, não havia qualquer perspectiva de detectar ondas gravitacionais.

Em 1967, Jocelyn Bell Burnell e
Antony Hewish (Nobel 1974)
descobriram o primeiro “pulsar”:
PSR 1919+21
(inicialmente designado LGM-1)

São estrelas de neutrões
em rotação que emitem um
radiação electromagnética
direcionada (vista, por
isso, periodicamente).

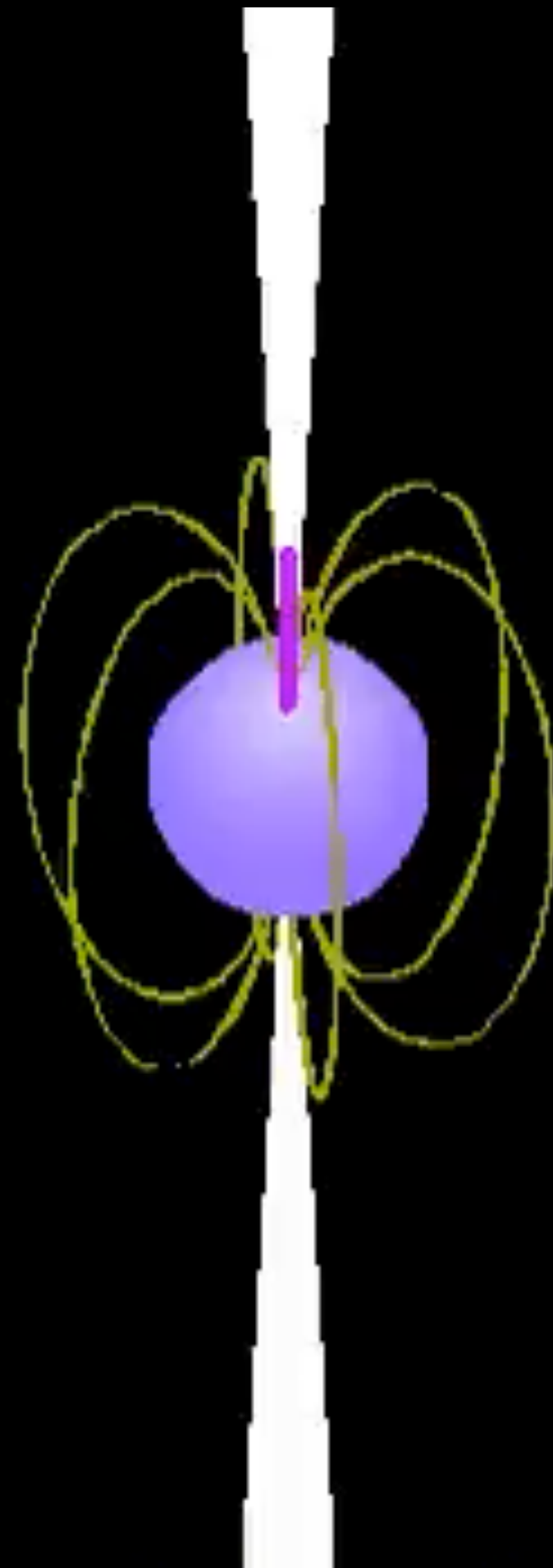
São faróis cósmicos e relógios
extremamente precisos.

“Som” do PSR B0329+54

“Som” do pulsar da nebulosa do caranguejo

“Som” do PSR B1937+21

Audio: Jodrell Bank Centre for Astrophysics



DISCOVERY OF A PULSAR IN A BINARY SYSTEM

R. A. HULSE AND J. H. TAYLOR

Department of Physics and Astronomy, University of Massachusetts, Amherst

Received 1974 October 18

ABSTRACT

We have detected a pulsar with a pulsation period that varies systematically between $0^{\text{s}}058967$ and $0^{\text{s}}059045$ over a cycle of $0^{\text{d}}3230$. Approximately 200 independent observations over 5-minute intervals have yielded a well-sampled velocity curve which implies a binary orbit with projected semimajor axis $a_1 \sin i = 1.0 R_{\odot}$, eccentricity $e = 0.615$, and mass function $f(m) = 0.13 M_{\odot}$. No eclipses are observed. We infer that the unseen companion is a compact object with mass comparable to that of the pulsar. In addition to the obvious potential for determining the masses of the pulsar and its companion, this discovery makes feasible a number of studies involving the physics of compact objects, the astrophysics of close binary systems, and special- and general-relativistic effects.

Subject headings: binaries — black holes — neutron stars — pulsars — relativity

De acordo com a fórmula de Einstein o sistema perde energia por emissão de ondas gravitacionais
primeiro o pulsar emite ondas gravitacionais...
o que faz a órbita contrair e o seu período diminuir...



Measured Orbital Parameters for B1913+16 System

Fitted Parameter	Value
$a_p \sin i$ (s)	2.3417725 (8)
e	0.6171338 (4)
T_0 (MJD)	52144.90097844 (5)
P_b (d)	0.322997448930 (4)
ω_0 (deg)	292.54487 (8)
$\langle \dot{\omega} \rangle$ (deg/yr)	4.226595 (5)
γ (s)	0.0042919 (8)
\dot{P}_b (10^{-12} s/s) . . .	−2.4184 (9)

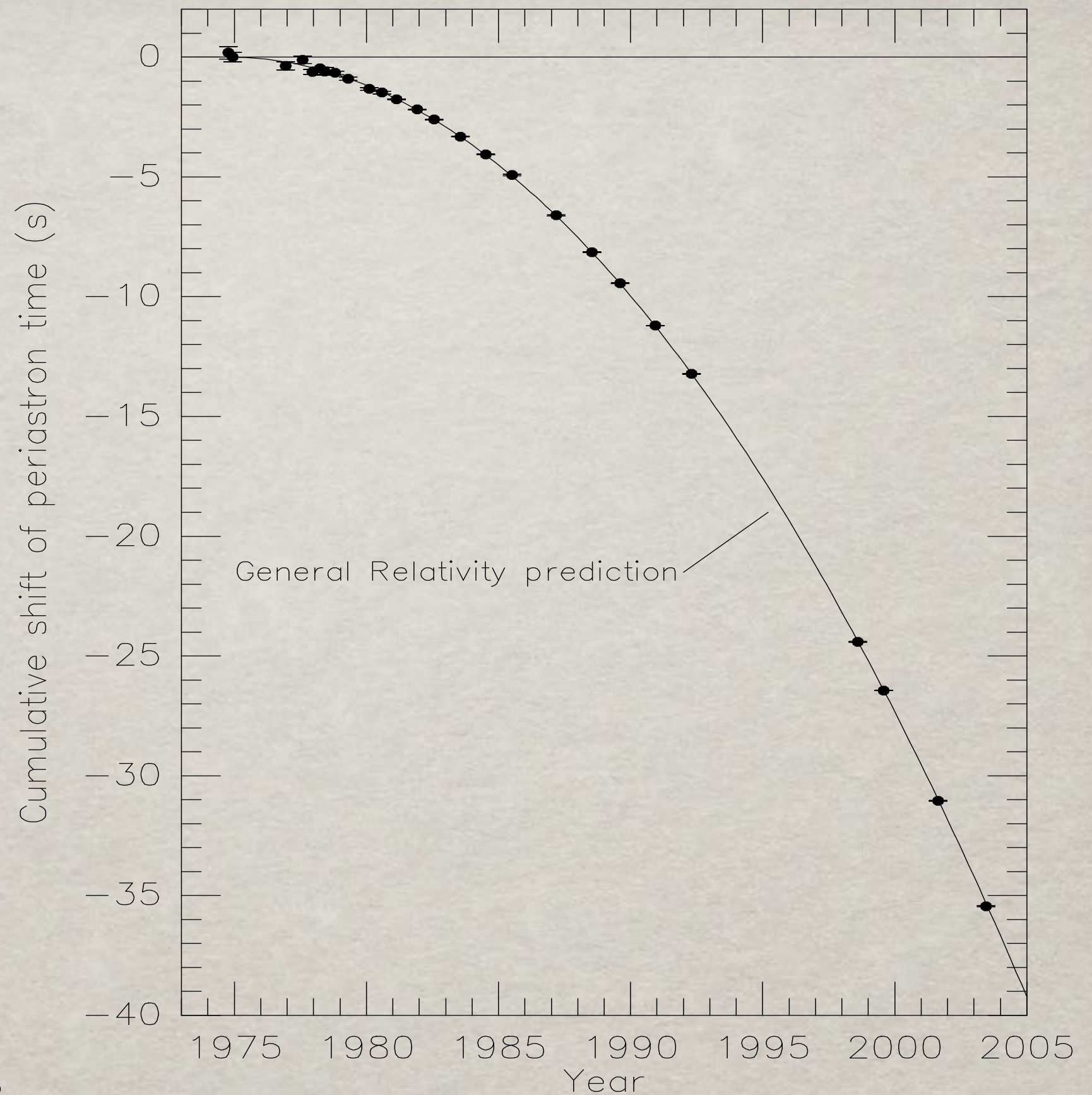
ArXiv: 0407149

$$\dot{P}_{b,GR} = -\frac{192 \pi G^{5/3}}{5 c^5} \left(\frac{P_b}{2\pi}\right)^{-5/3} (1 - e^2)^{-7/2} \times \\ \left(1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4\right) m_p m_c (m_p + m_c)^{-1/3}.$$

Petters and Matthews, 1963

Observações concordam
com a previsão teórica
com erro inferior a 0.2%.

Outros efeitos relativistas
podem também ser
medidos neste sistema.



Weisberg and Taylor, ArXiv: 0407149

articles

Measurements of general relativistic effects in the binary pulsar PSR1913+16

J. H. Taylor, L. A. Fowler & P. M. McCulloch*

Department of Physics and Astronomy, University of Massachusetts, Amherst, Massachusetts 01003

Measurements of second- and third-order relativistic effects in the orbit of binary pulsar PSR1913+16 have yielded self-consistent estimates of the masses of the pulsar and its companion, quantitative confirmation of the existence of gravitational radiation at the level predicted by general relativity, and detection of geodetic precession of the pulsar spin axis.

~1 ms to ~50 μ s. Data have been acquired at intervals not exceeding 7 months, and in spite of the short period of the pulsar ($P = 0.059$ s), there has been no problem in keeping track of the number of elapsed pulse periods.

Our analysis of the timing data follows the formulation of Epstein⁶, and proceeds by the following steps. First, the pulse arrival times are corrected from the location of the observatory to the barycentre of the Solar System, including a relativistic clock correction to account for annual changes in gravitational potential at the Earth. A correction is then made for the



Russell A. Hulse



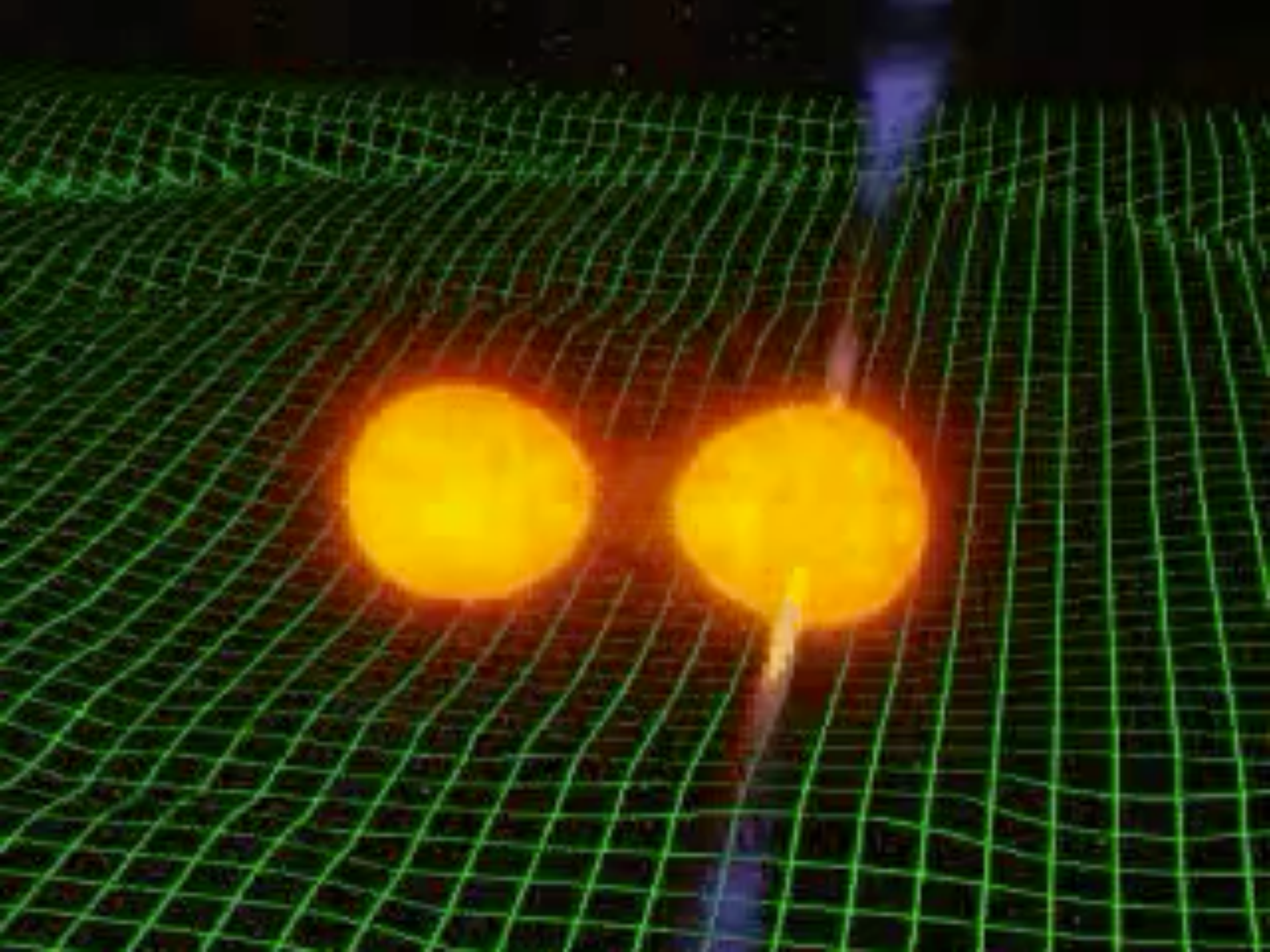
Joseph H. Taylor Jr.

“...pela descoberta de um novo tipo de pulsar, uma descoberta que abriu novas possibilidades de estudos no campo da gravitação...”

Prémio Nobel da Física, 1993.



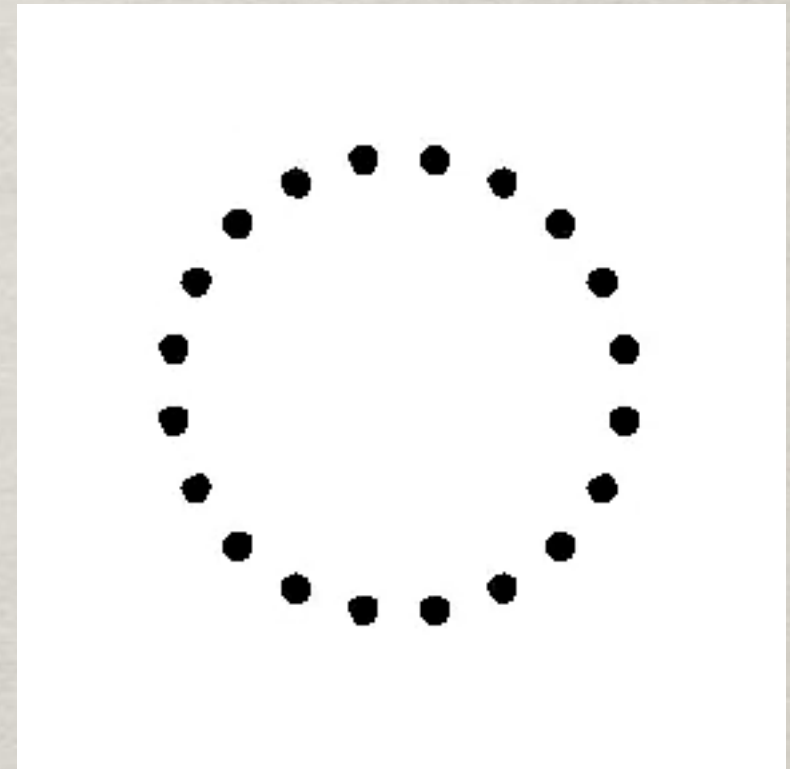
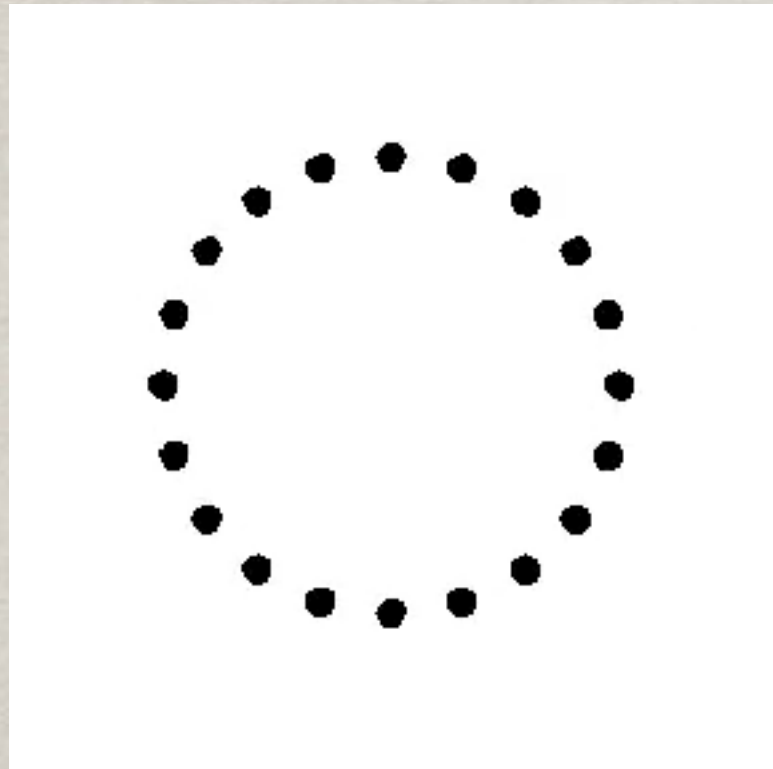
Descoberta do duplo pulsar: J0737-3039A, A. C. Lyne et al.



2) Uma experiência “impossível”

Como se detectam as ondas gravitacionais?

Efeito de uma onda gravitacional num círculo de partículas teste



As deformações (“strains”) são da ordem da perturbação métrica: $\frac{\Delta L}{L} \sim h$

Einstein descobriu (1918) que:
$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4} \frac{1}{r} \frac{d^2 Q_{ij}}{dt^2}$$

Exemplo:
$$h \sim \frac{R_{Schwarzschild}}{r} \sim \frac{100 \text{ km}}{1 \text{ Gpc}} \sim 10^{-21}$$

Uma breve história do LIGO:

(Laser Interferometer Gravitational wave Observatory)

- Entre 1967 e 1972 **Rainer Weiss** (MIT) começou a estudar a possibilidade de detectar ondas gravitacionais com interferómetros de Michelson-Morley. A partir de 1968, **Kip Thorne** (CalTech) iniciou esforços teóricos sobre fontes de ondas gravitacionais e as características do sinal, com vista a esforços para a sua detecção.



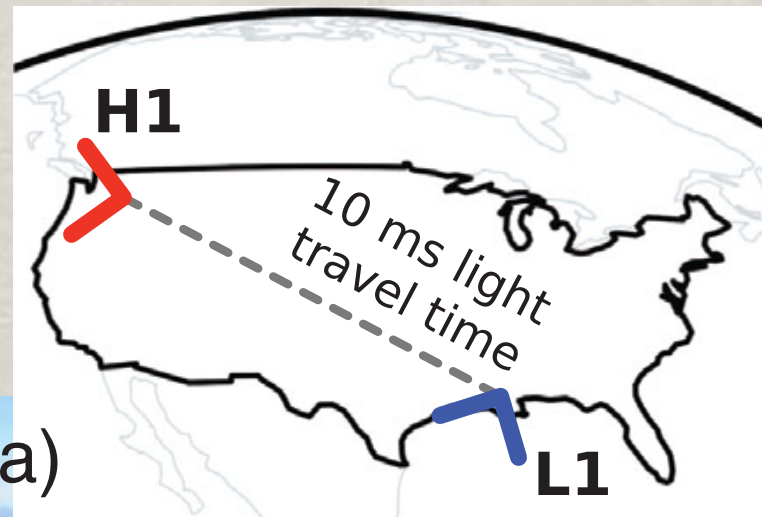
Weiss e Thorne durante o primeiro anúncio da detecção de ondas gravitacionais.

Uma breve história do LIGO:

- Em 1980 a NSF financiou o estudo de um longo interferómetro liderado pelo MIT e no ano seguinte o CalTech construiu um protótipo de 40 metros. Por pressão da NSF, o MIT e o CalTech juntaram os seus esforços formando o LIGO.
- Em 1991, o congresso dos EUA financiou o LIGO em US\$ 23M. Em 1994, com um orçamento de US\$ 395M, o LIGO tornou-se o maior projecto financiado na história da NSF (proposta liderada por **Barry C. Barish**). A construção iniciou-se em Hanford, em 1994 e na Louisiana em 1995. Em Setembro de 2015, o LIGO completou um “upgrade” de 5 anos, com custo de US\$ 200M e colocando o custo do projecto em US\$ 620M.
- O “Initial LIGO” operou entre 2002 e 2010 não tendo detectado ondas gravitacionais. O “Advanced LIGO” teve duas “science runs”:
 - O1, entre 12 de Setembro de 2015 e 19 de Janeiro de 2016;
 - O2, entre 30 de Novembro de 2016 e 25 de Agosto de 2017 (com o Virgo)
 - O3, entre 1 de Abril de 2019 e 27 de Março de 2020 (com o KAGRA)
 - O4, entre 24 de Maio de 2023 e 7 de Outubro de 2025 (com o KAGRA)

O que é o LIGO?

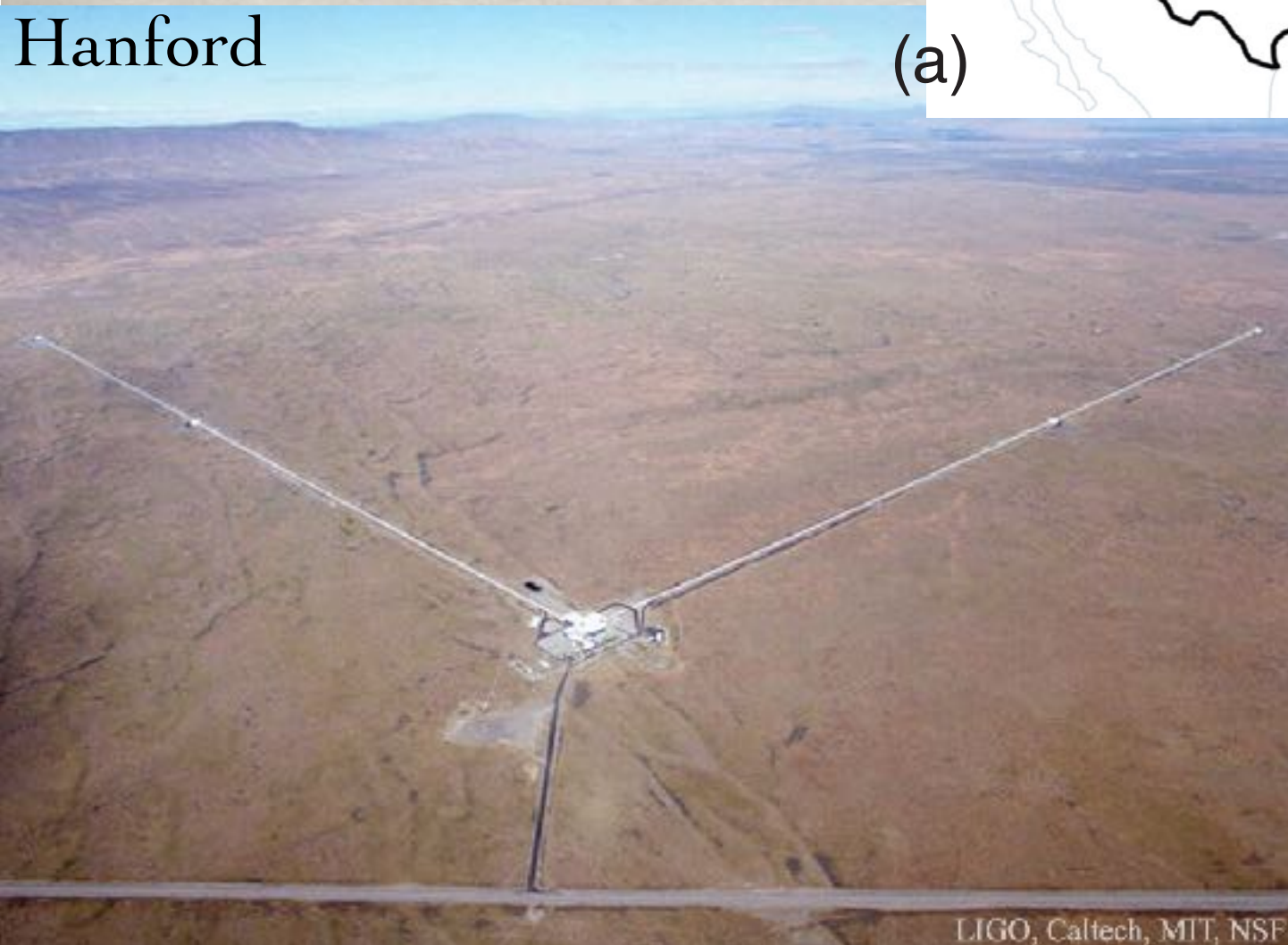
- Dois inteferómetros em forma de L cada um com braços de aproximadamente 4 Kms. Estão localizados em áreas suficientemente isoladas dos EUA, no estado de Washington (LIGO Hanford) e no estado da Louisiana (LIGO Livingston), separados por 3002 Km.



Hanford

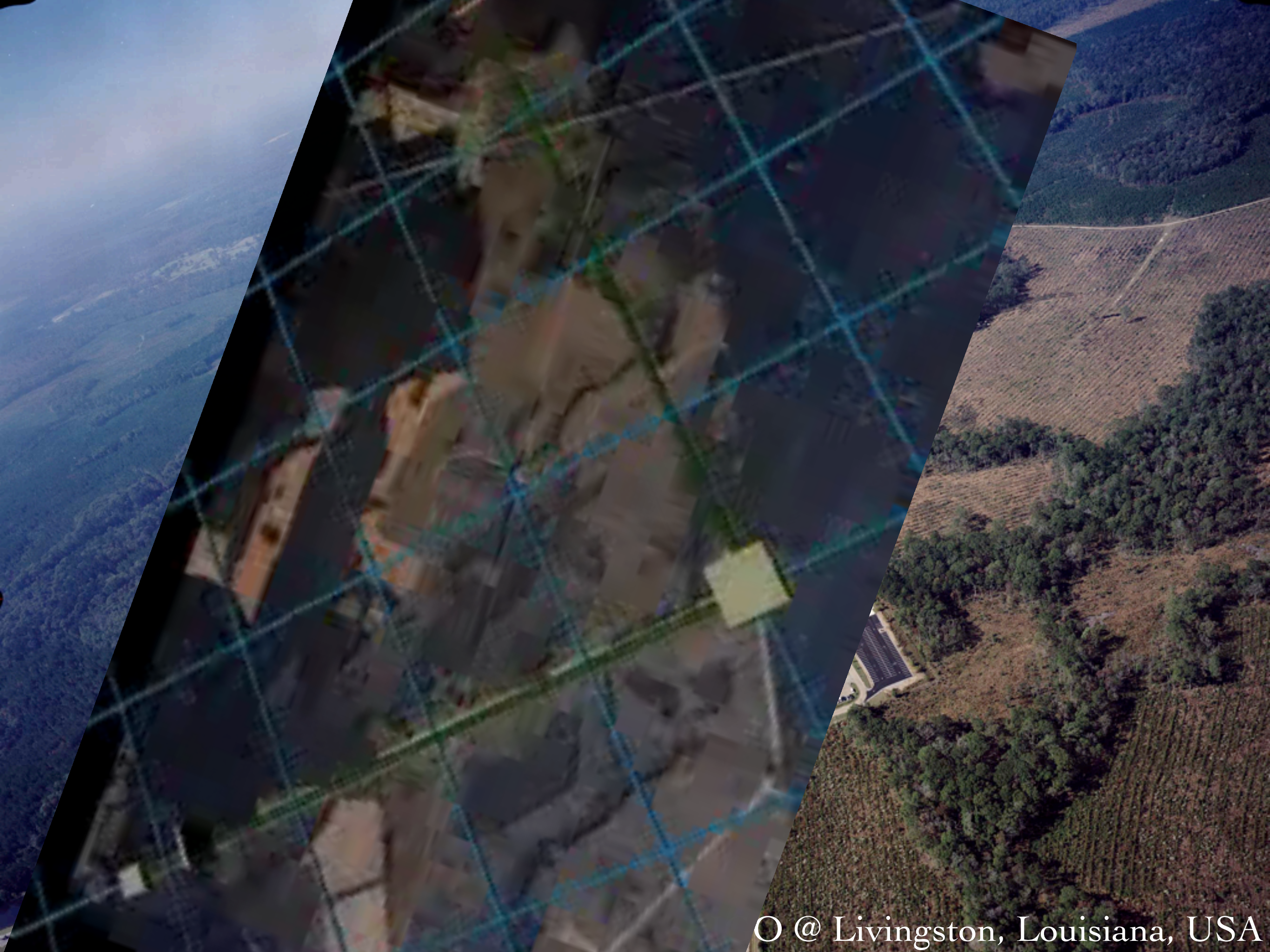
(a)

Livingston





aLIGO @ Livingston, Louisiana, USA



O @ Livingston, Louisiana, USA

Alguns factos sobre o LIGO:

- Os braços do LIGO são suficientemente longos que a curvatura da Terra origina uma diferença vertical de um metro ao longo dos braços. Um preciso processo de deposição de cimento e nivelamento foi necessário para contrabalançar a curvatura da Terra e garantir que os braços dos LIGO são realmente planos. Senão os lasers do LIGO iriam atingir o final do braço 1 metro acima do espelho onde deveriam ser refletidos.



Braço norte do LIGO Hanford

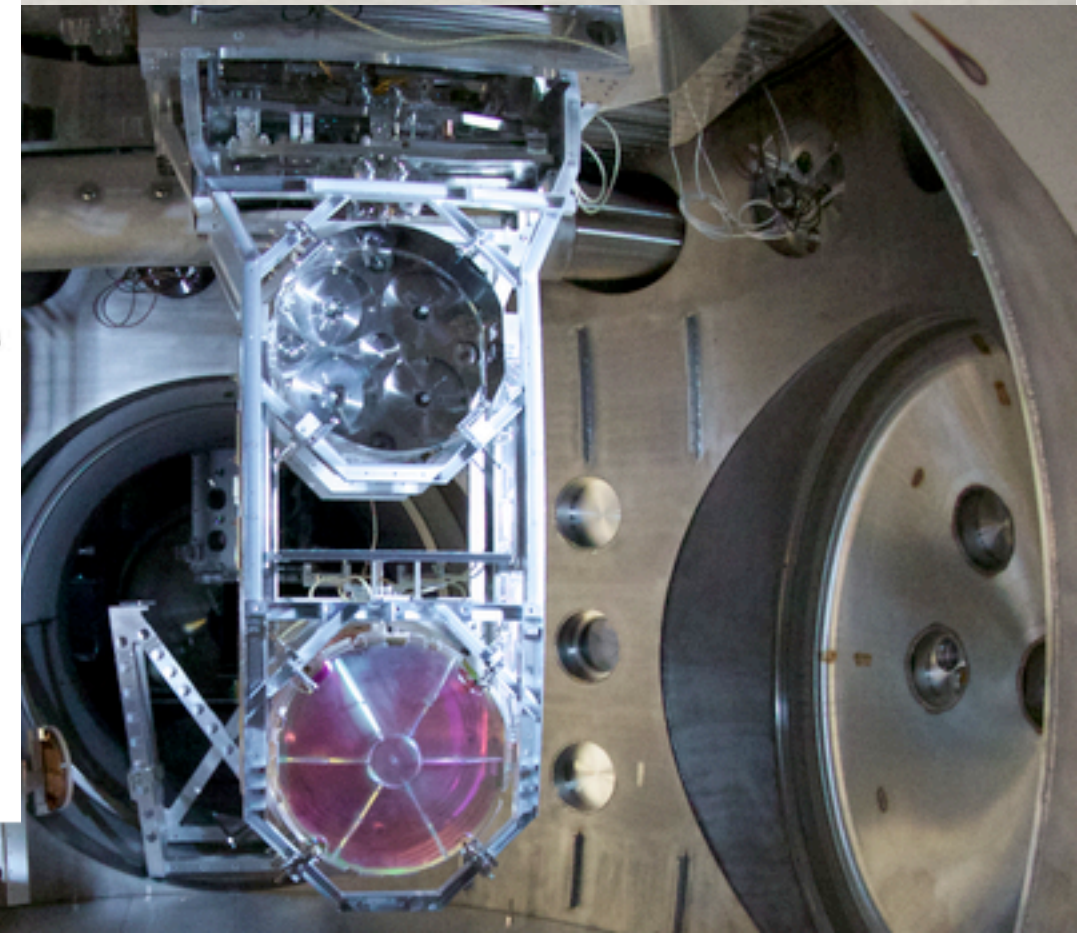
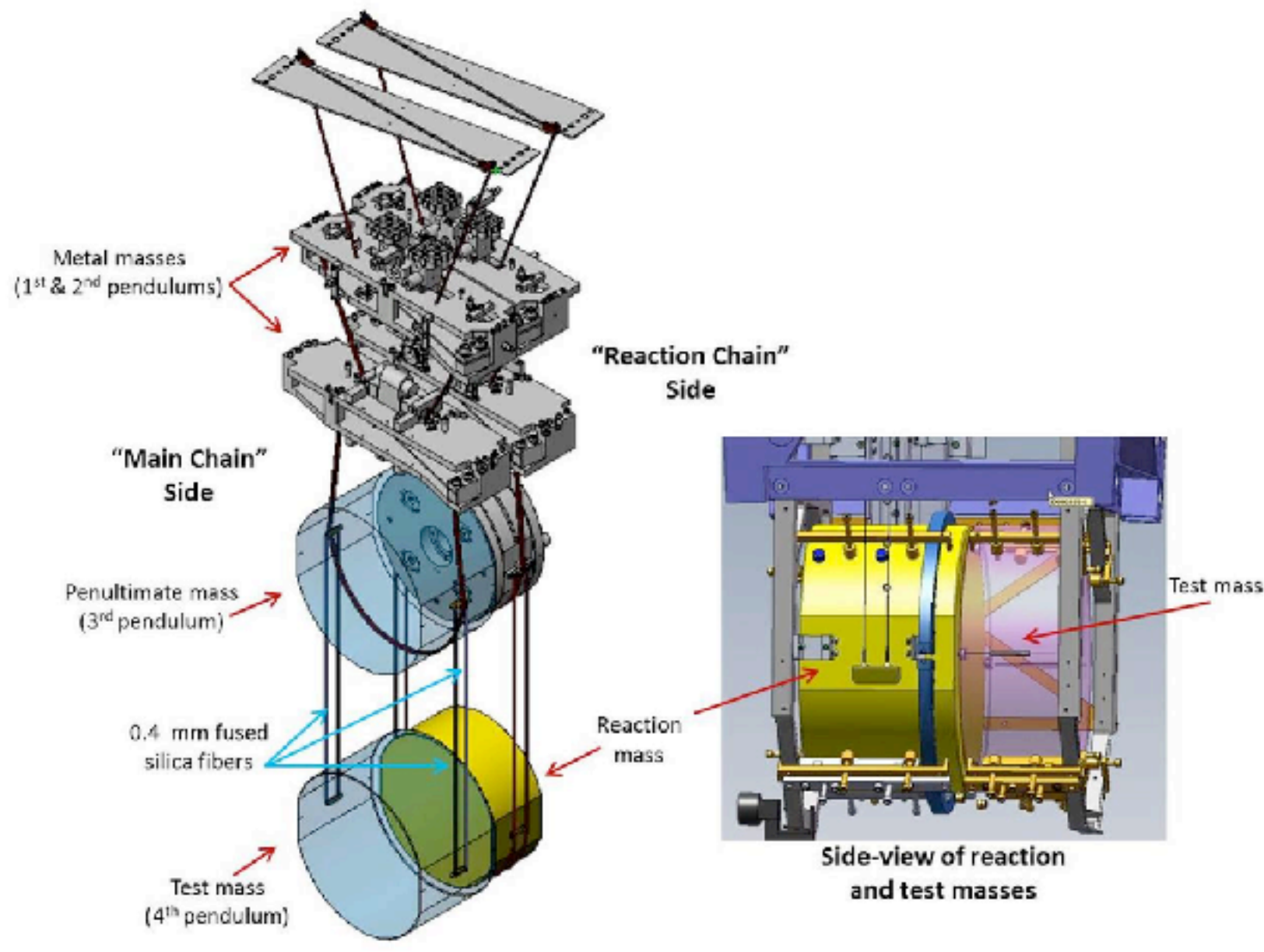


Junção dos braços do LIGO Livingston

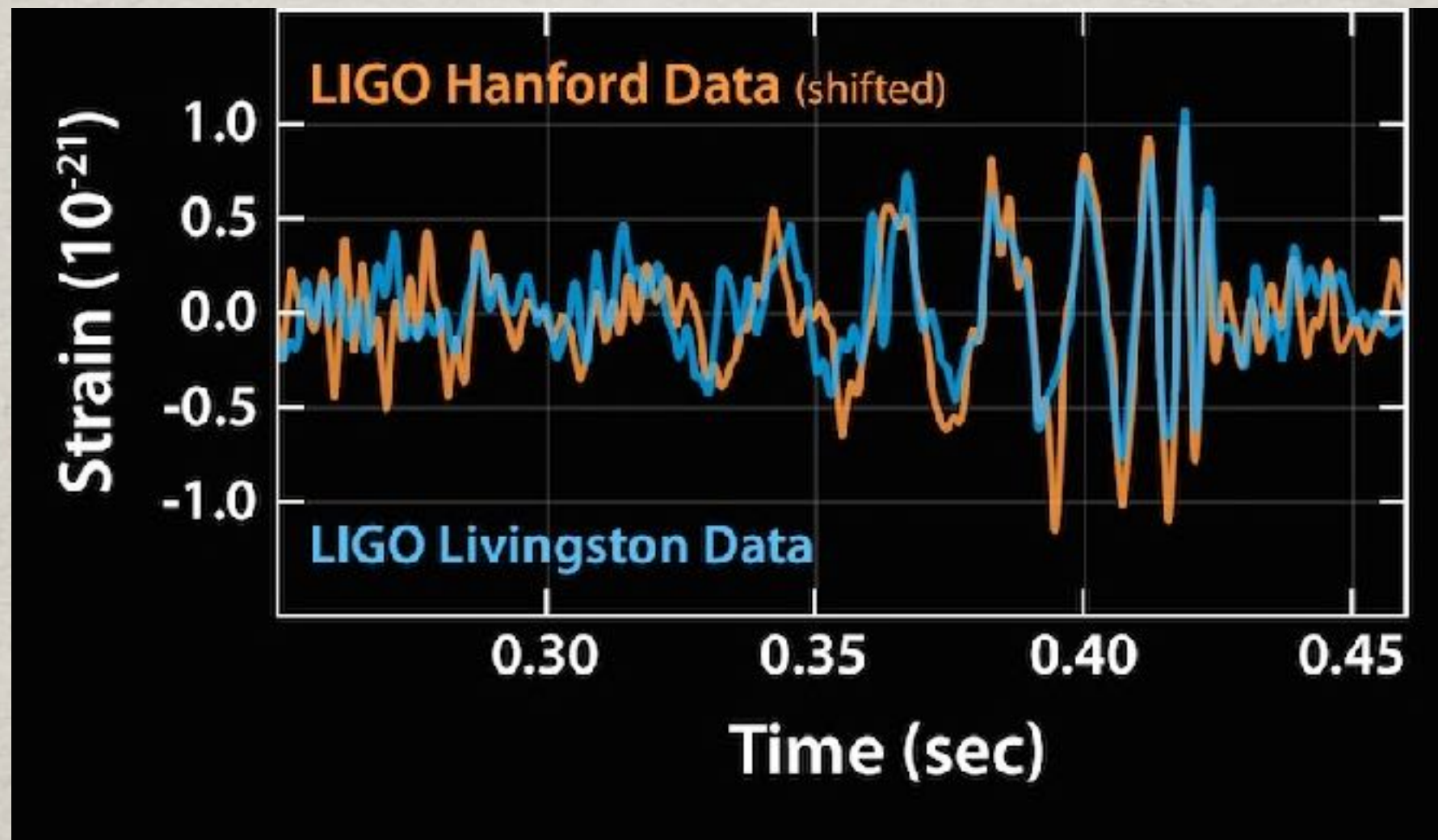


Alguns factos sobre o LIGO:

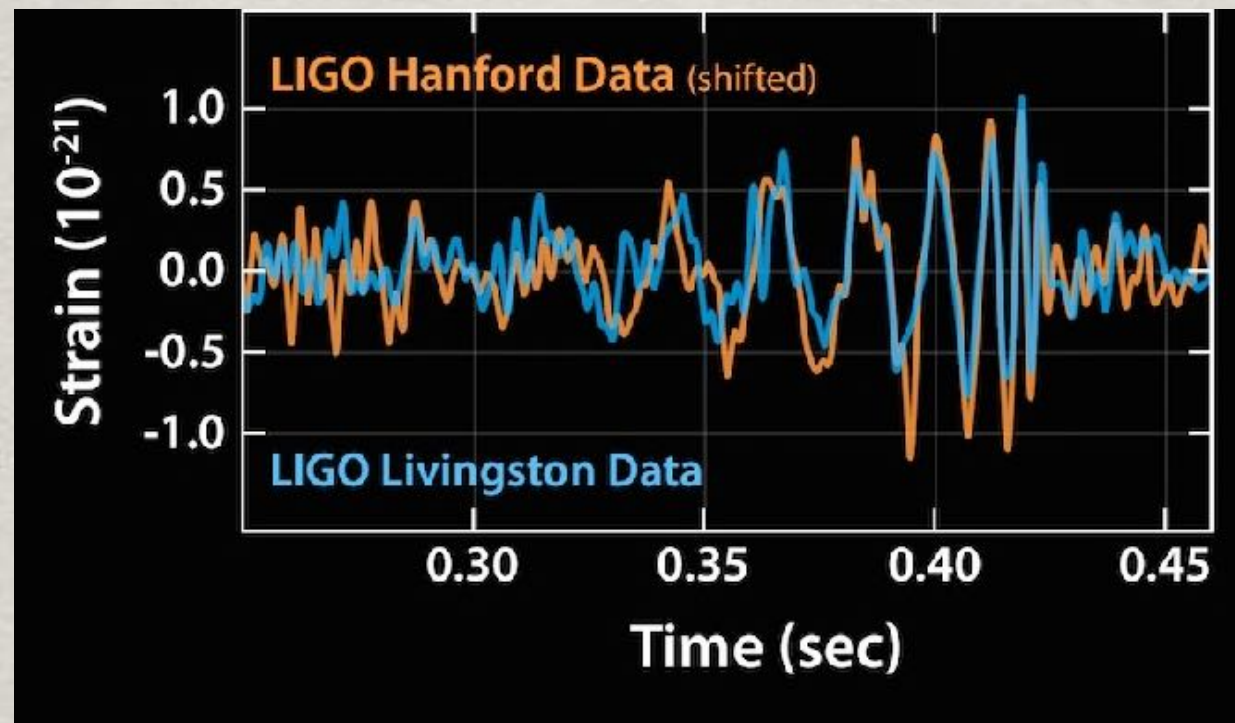
- Estes detectores estão concebidos para medir movimentos 1000 vezes menor do que o núcleo atómico, que são as menores medições alguma vez tentadas em ciência. É o equivalente a medir a distância entre o Sol e a estrela mais próxima (a cerca de quatro anos luz) a menos da espessura de um cabelo humano.



O sinal da primeira detecção:

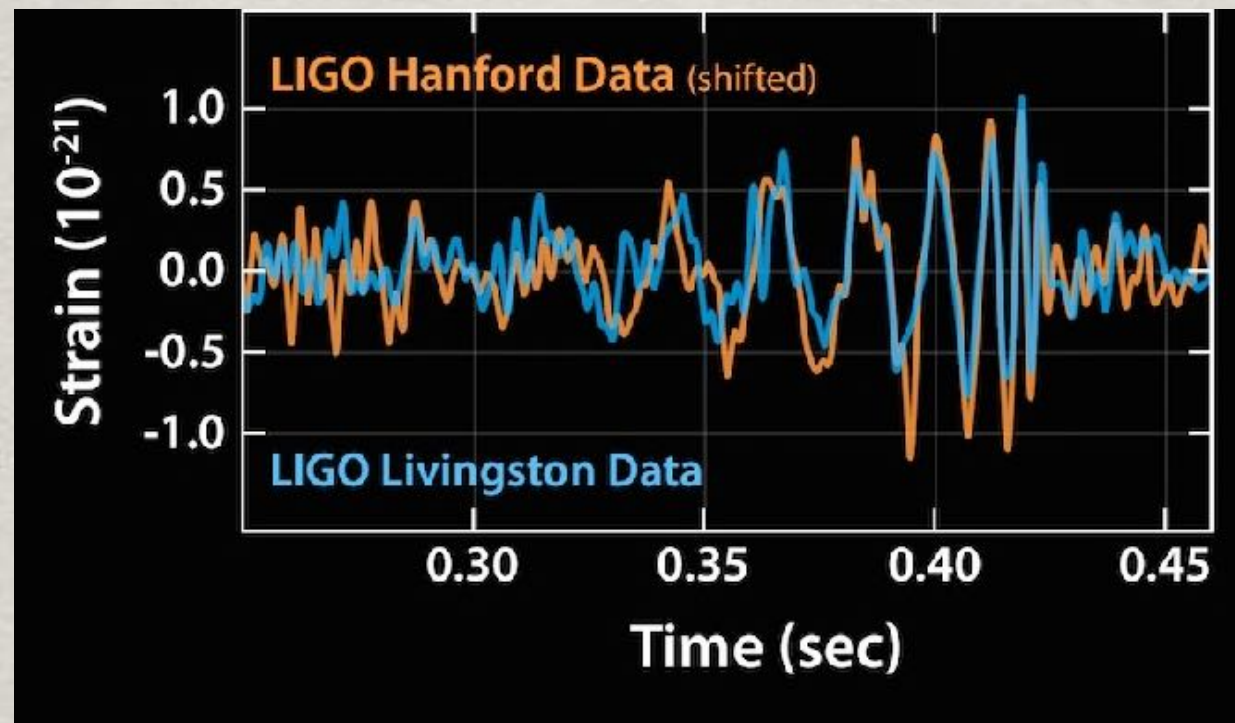


O sinal:



- Pelo menos oito oscilações antes do máximo: a(s) massa(s) oscilaram;
- Num binário, as ondas gravitacionais têm o dobro da frequência orbital; isso sugere que estamos a ver pelo menos quatro órbitas antes da coalescência;

O sinal:



- Assumimos órbitas Keplerianas a variar “lentamente” devido à perda de energia, descrita pela fórmula do quadrupolo;

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^3 = \left(\frac{96}{5}\right)^3 \frac{\omega^{11}}{c^{15}} (G\mathcal{M})^5$$

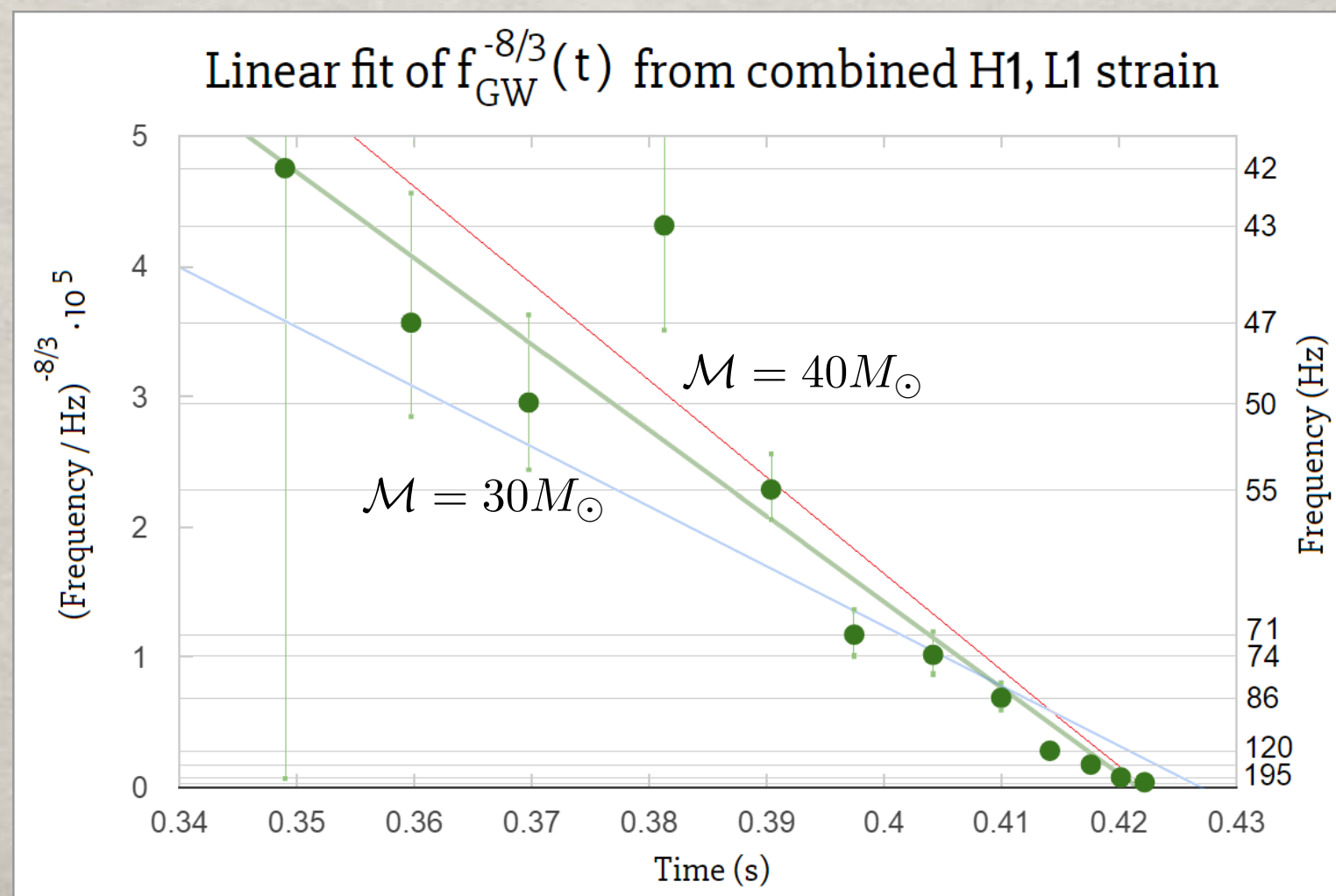
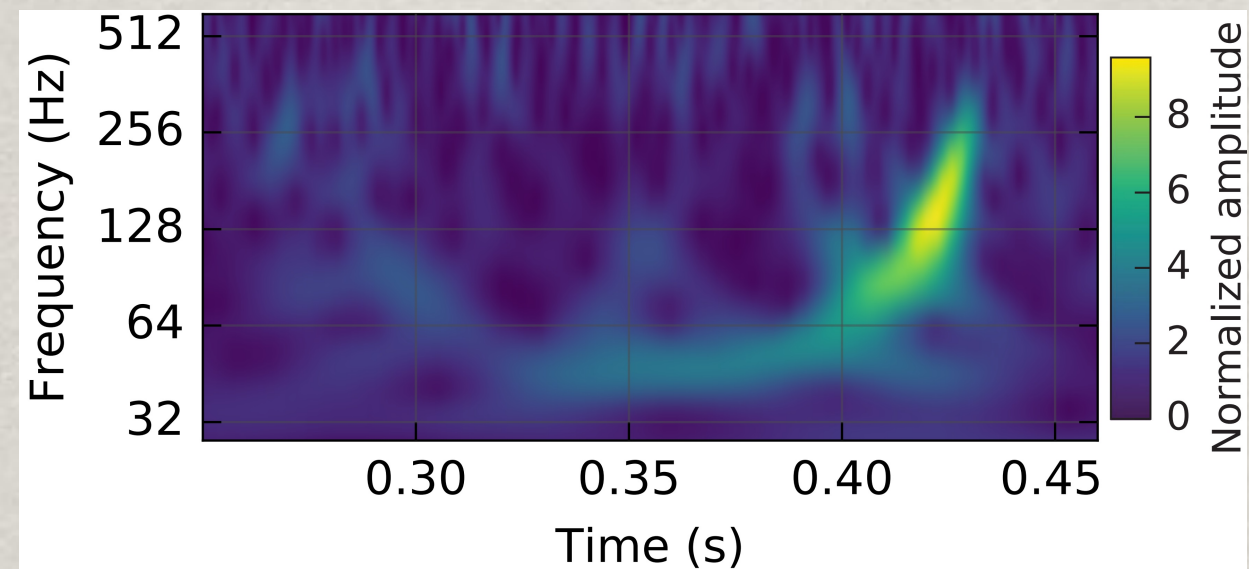
$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

“chirp” mass

$$\frac{\omega}{2\pi} = f = \frac{f_{\text{GW}}}{2}$$

$$f_{\text{GW}}^{-8/3}(t) = \frac{(8\pi)^{8/3}}{5} \left(\frac{G\mathcal{M}}{c^3}\right)^{5/3} (t_c - t)$$

$$f_{\text{GW}}^{-8/3}(t) = \frac{(8\pi)^{8/3}}{5} \left(\frac{G\mathcal{M}}{c^3} \right)^{5/3} (t_c - t)$$

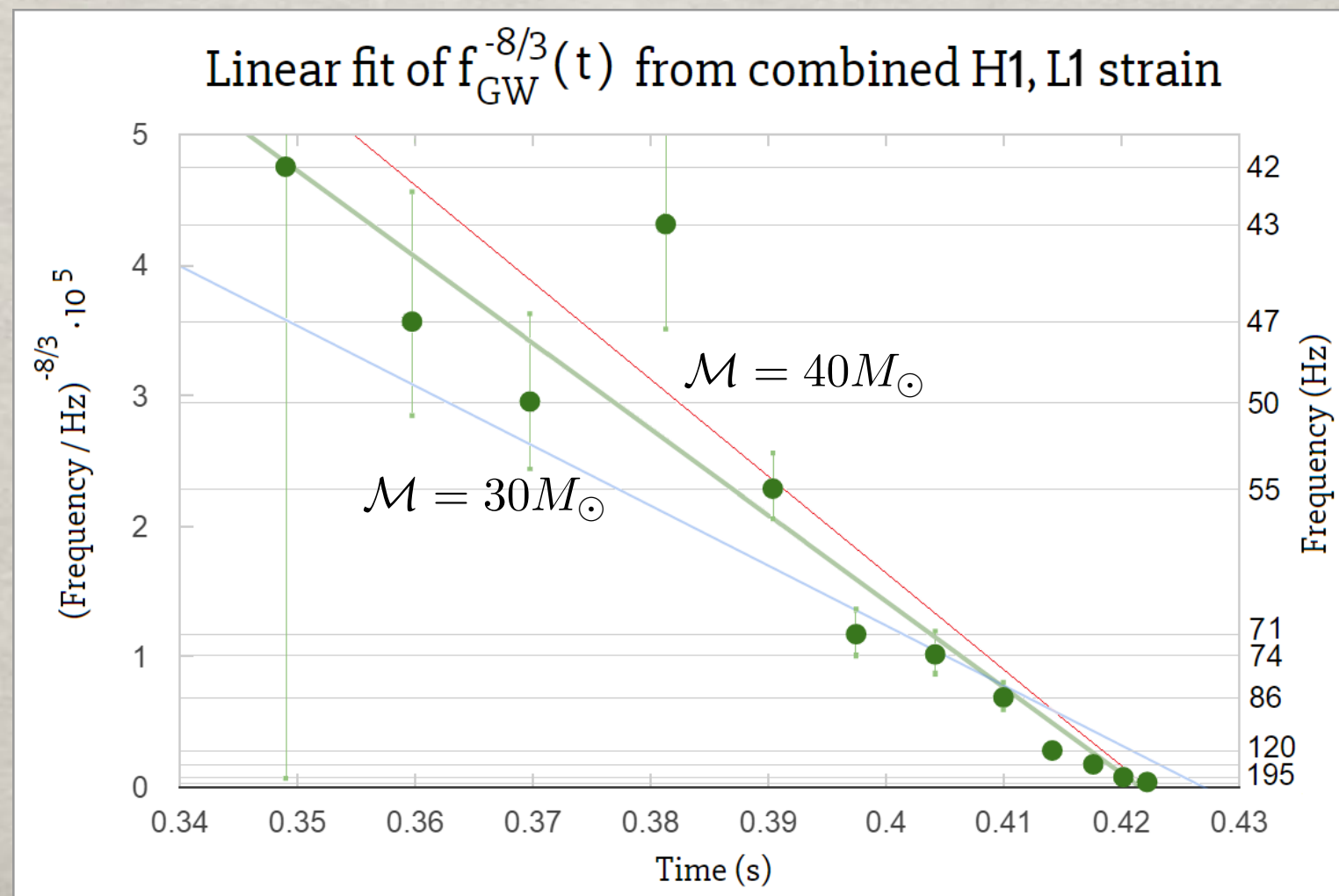


Destes argumentos simples obtemos um estimativa de massas:

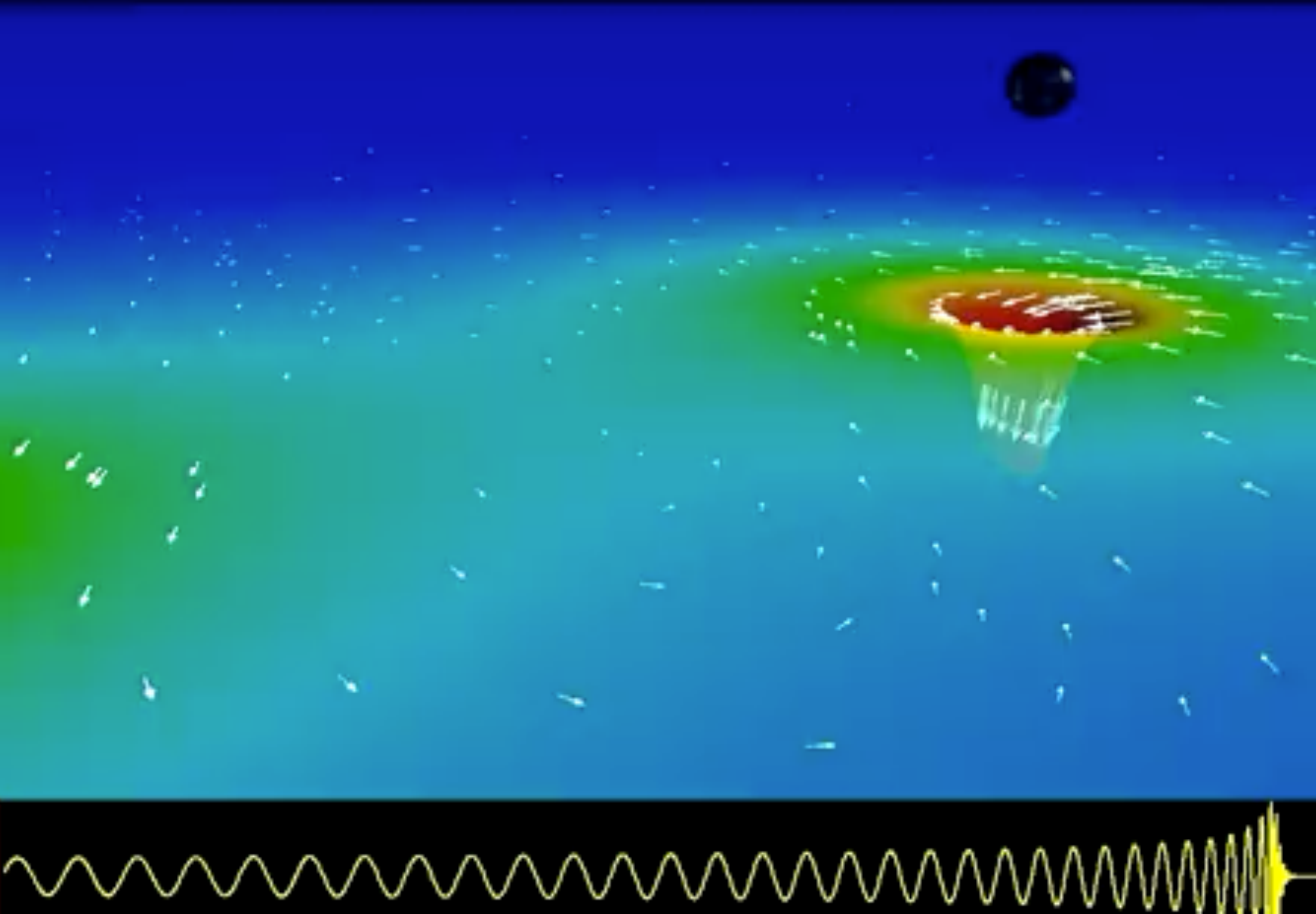
$$\mathcal{M} = (30 - 40)M_{\odot}$$

e uma estimativa de distância:

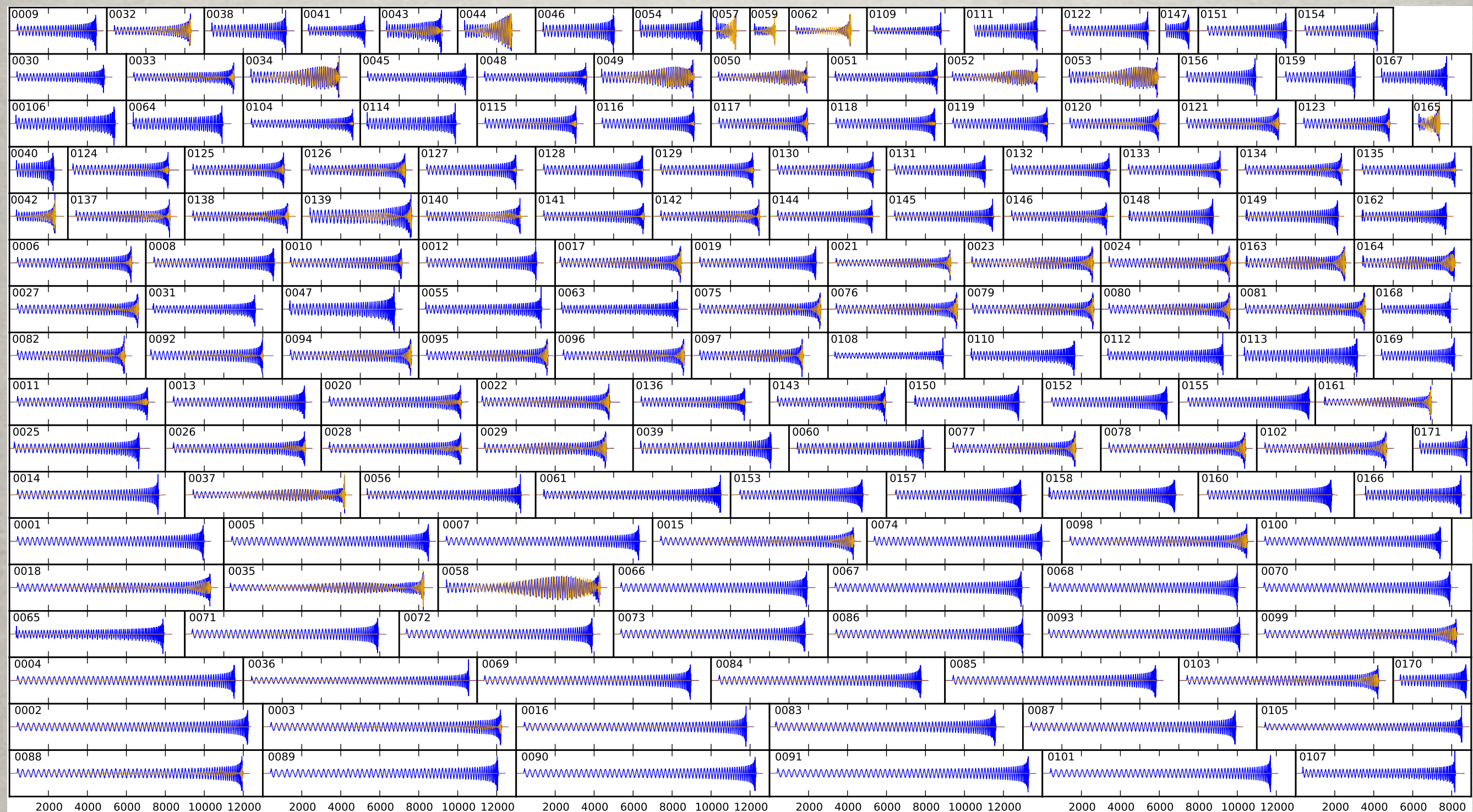
$$r \sim \frac{R_{Schwarzschild}(\mathcal{M})}{h} \lesssim 10^{21} \times 100 \text{ km} \sim 3 \text{ Gpc}$$



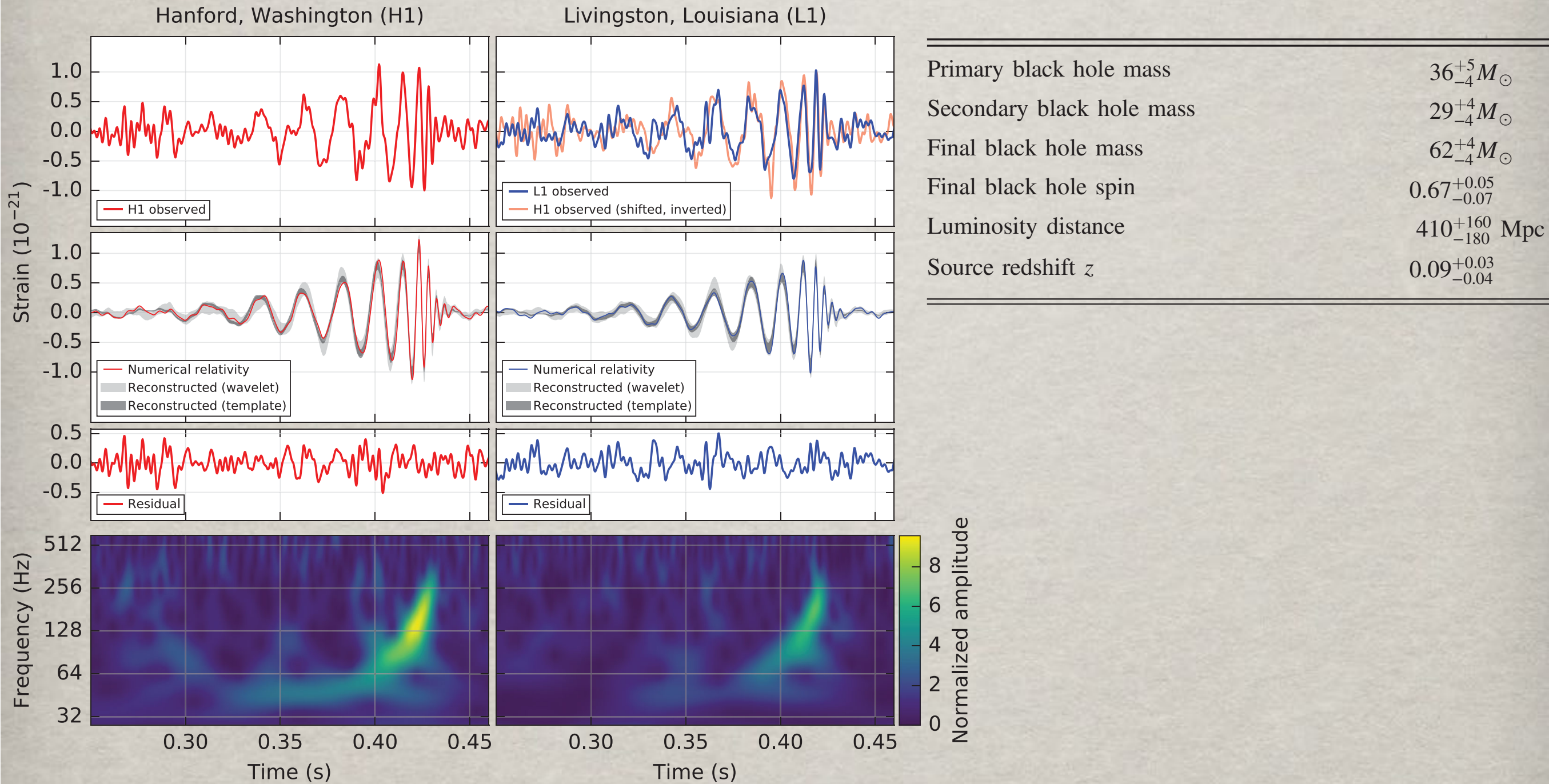
3) Colidindo buracos negros... no computador



Construindo bibliotecas com as “formas de onda”...



Primeiro evento (GW150914):

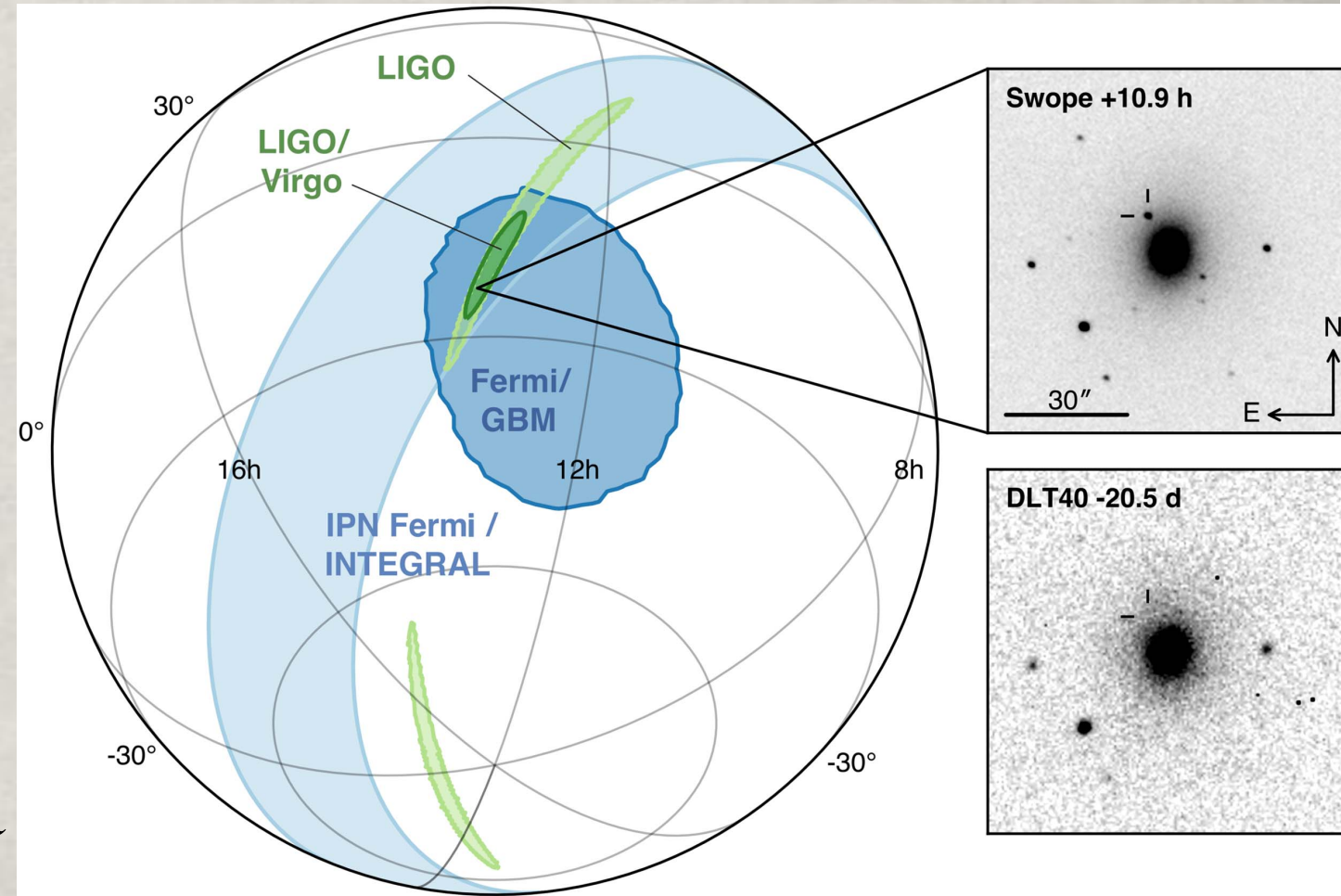


O melhor ajuste aos “templates” computacionais (cerca de 250 000) determina os parâmetros.

O1+O2 (Sep/15 - Aug/17) 11 detecções

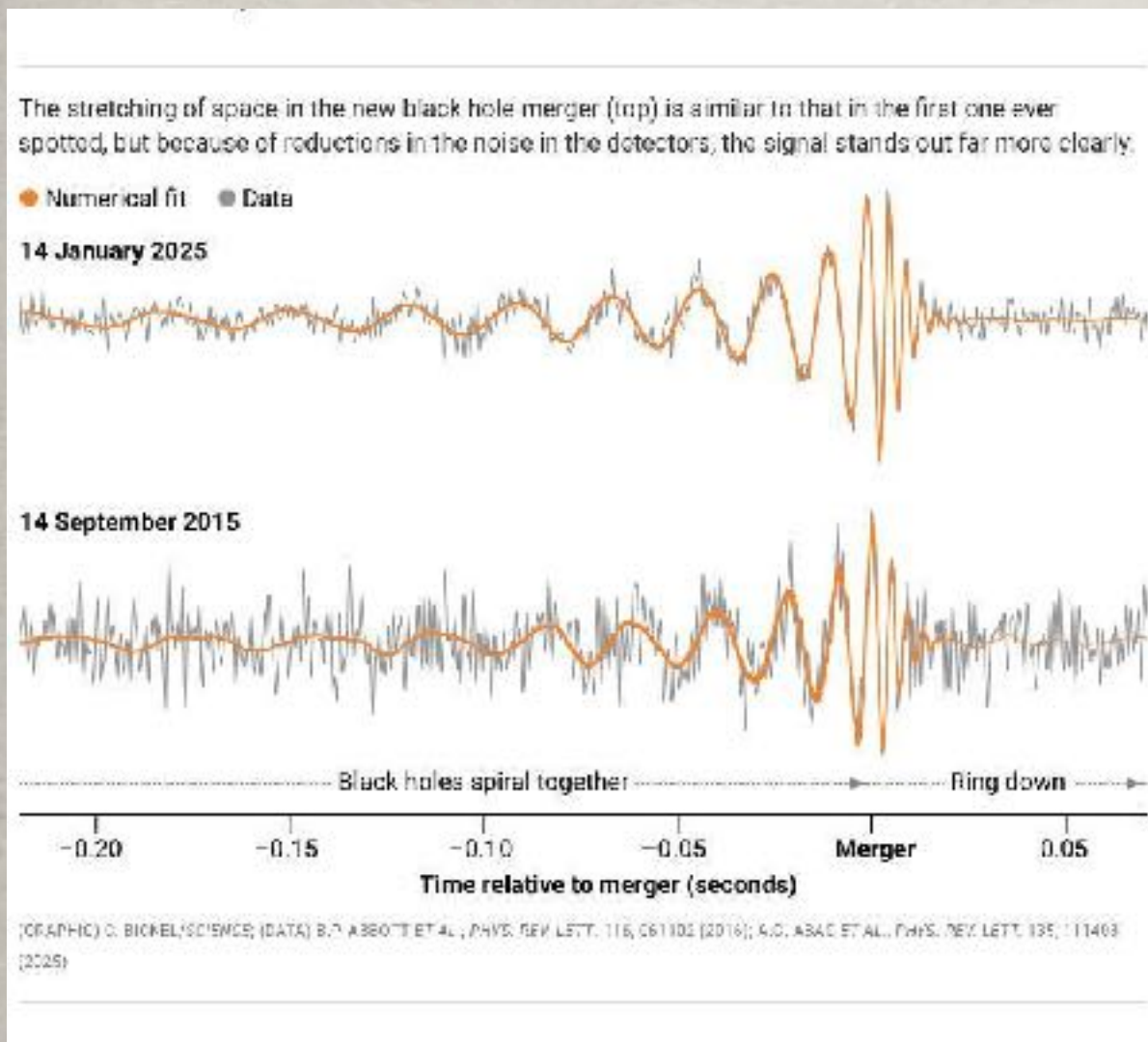
GW170817

- Primeira detecção de uma fusão de estrelas de neutrões;
- Evento multimensageiro, seguido em todo o espectro electromagnético
- Limite à velocidade da gravidade:
ApJL13(2017)848
$$-3 \times 10^{-15} \leq \frac{v_{GW} - c}{c} \leq +7 \times 10^{-16}$$
- Restringe modelos de gravidade modificada
e.g. 1710.05877, 1710.05901, 1710.06394



Event	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	M/M_\odot	χ_{eff}	M_f/M_\odot	a_f	$E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	d_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/\text{deg}^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$28.6^{+1.6}_{-1.5}$	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$3.6^{+0.4}_{-0.4} \times 10^{56}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$15.2^{+2.0}_{-1.1}$	$0.04^{+0.28}_{-0.19}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$3.2^{+0.8}_{-1.7} \times 10^{56}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.18^{+0.20}_{-0.12}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$3.4^{+0.7}_{-1.7} \times 10^{56}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$21.5^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.04^{+0.17}_{-0.20}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$3.3^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$3.5^{+0.4}_{-1.3} \times 10^{56}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$35.7^{+6.5}_{-4.7}$	$0.36^{+0.21}_{-0.25}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$4.2^{+0.9}_{-1.5} \times 10^{56}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$25.0^{+2.1}_{-1.6}$	$0.07^{+0.16}_{-0.16}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$24.2^{+1.4}_{-1.1}$	$0.07^{+0.12}_{-0.11}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$3.7^{+0.4}_{-0.5} \times 10^{56}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$	≤ 2.8	≤ 0.89	≥ 0.04	$\geq 0.1 \times 10^{56}$	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$26.7^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.09^{+0.18}_{-0.21}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$3.4^{+0.5}_{-0.7} \times 10^{56}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$29.3^{+4.2}_{-3.2}$	$0.08^{+0.20}_{-0.22}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$3.6^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

Evento mais “barulhento” (GW250114):



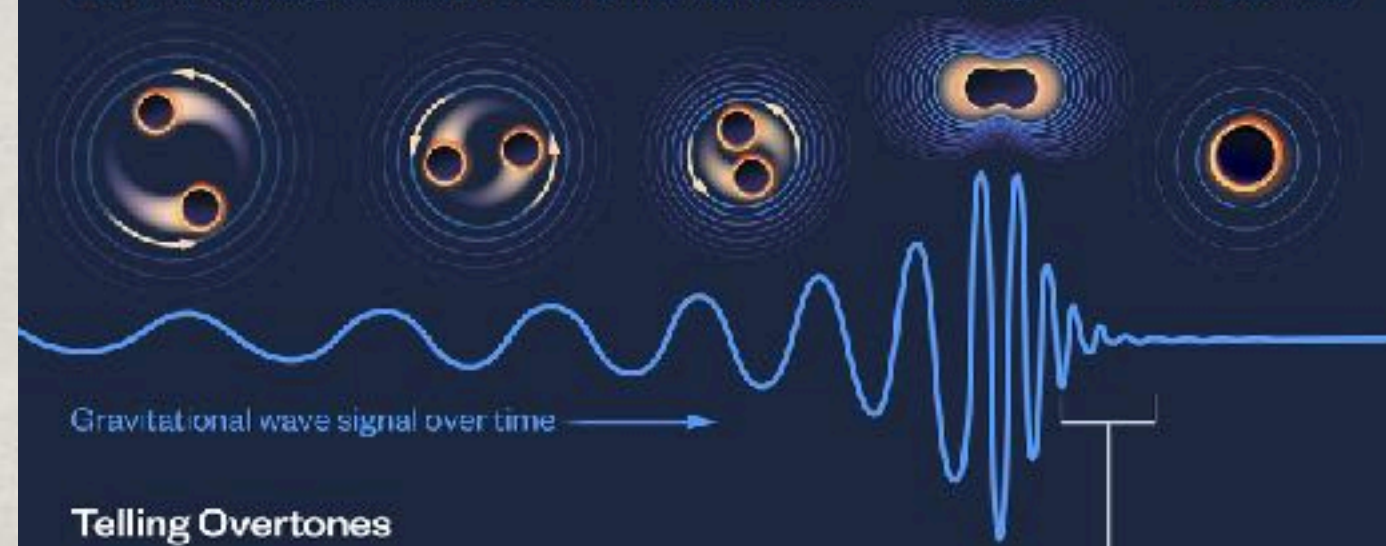
Clear Signal Sheds Light on Black Holes

When two black holes (BHs) collide and merge, they release gravitational waves. These waves can be detected by sensitive instruments on Earth, allowing scientists to determine the mass and spin of the BHs. The clearest BH merger signal yet, named GW250114, recorded by LIGO in January 2025, offers new insights into these mysterious cosmic giants.

Two BHs release gravitational waves as they spiral inward

Merger

BH stabilizes



Telling Overtones

A fleeting secondary tone was detected in the signal, offering a rare chance to test the “Kerr solution,” which describes a rotating BH using only mass and spin. Excitingly, the mass and spin values from this **overtone** matched those from the **fundamental tone**. If they had differed, it would imply that additional properties are necessary to describe a BH, but a match confirms that — at least for this BH — no other details are needed.



Forever Growing

The signal also tested **Hawking's area theorem**, which states that a BH's surface area can never decrease — it can only grow. Surface area of a BH is determined by the area of its event horizon and is proportional to the square of the BH's mass. Comparing the BHs before and after the merger confirmed that the surface area had increased, supporting the theorem.



Deteções de ondas gravitacionais

12/09/2015

30/11/2016

1/4/2019

04

01

19/01/2016

02

25/08/2017

03a

1/11/2019

03b

27/3/2020

Maio
2023

11 eventos

PHYSICAL REVIEW X

Highlights Recent Subjects Accepted Collections Authors Referees Search Press About Staff

Open Access

GWTC-1: A Gravitational-Wave Transient Catalog of Compact Binary Mergers Observed by LIGO and Virgo during the First and Second Observing Runs

B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
Phys. Rev. X **9**, 031040 – Published 4 September 2019



44 eventos

PHYSICAL REVIEW X

Highlights Recent Subjects Accepted Collections Authors Referees Search Press About Staff

Open Access

GWTC-2: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo during the First Half of the Third Observing Run

R. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
Phys. Rev. X **11**, 021053 – Published 9 June 2021



35 eventos

arXiv.org > gr-qc > arXiv:2111.03606

Search...

Help | Advanced Search

General Relativity and Quantum Cosmology

[Submitted on 5 Nov 2021]

GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the Second Part of the Third Observing Run

"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel



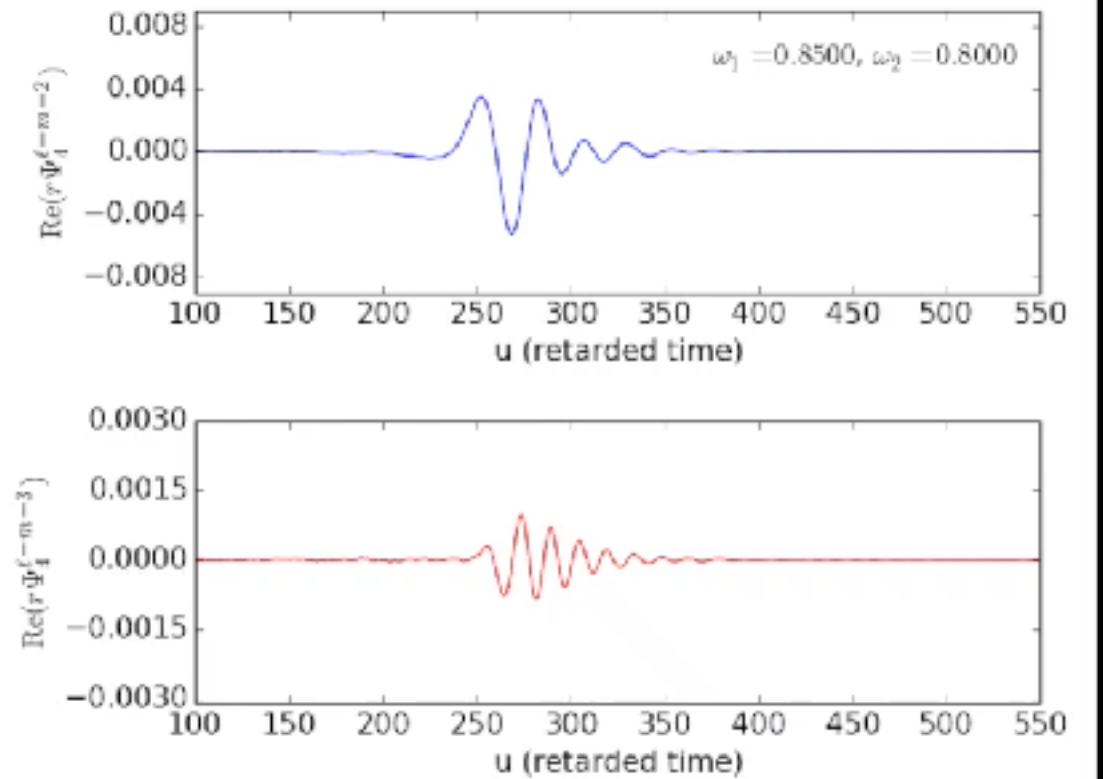
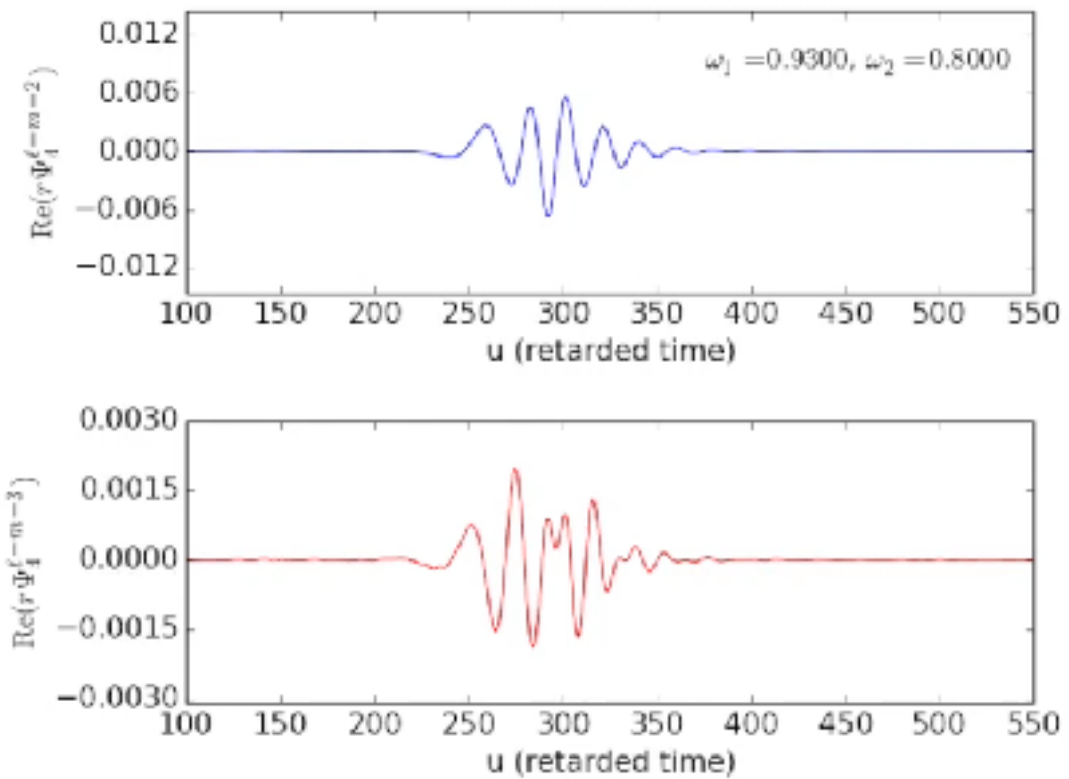
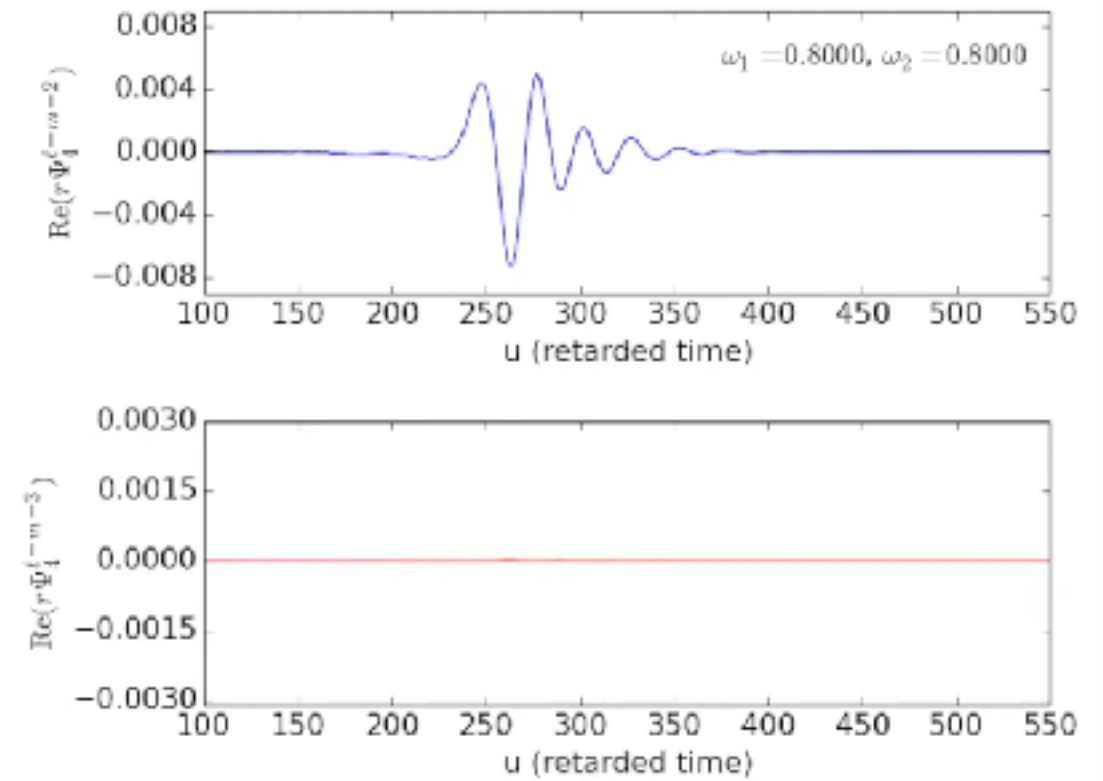
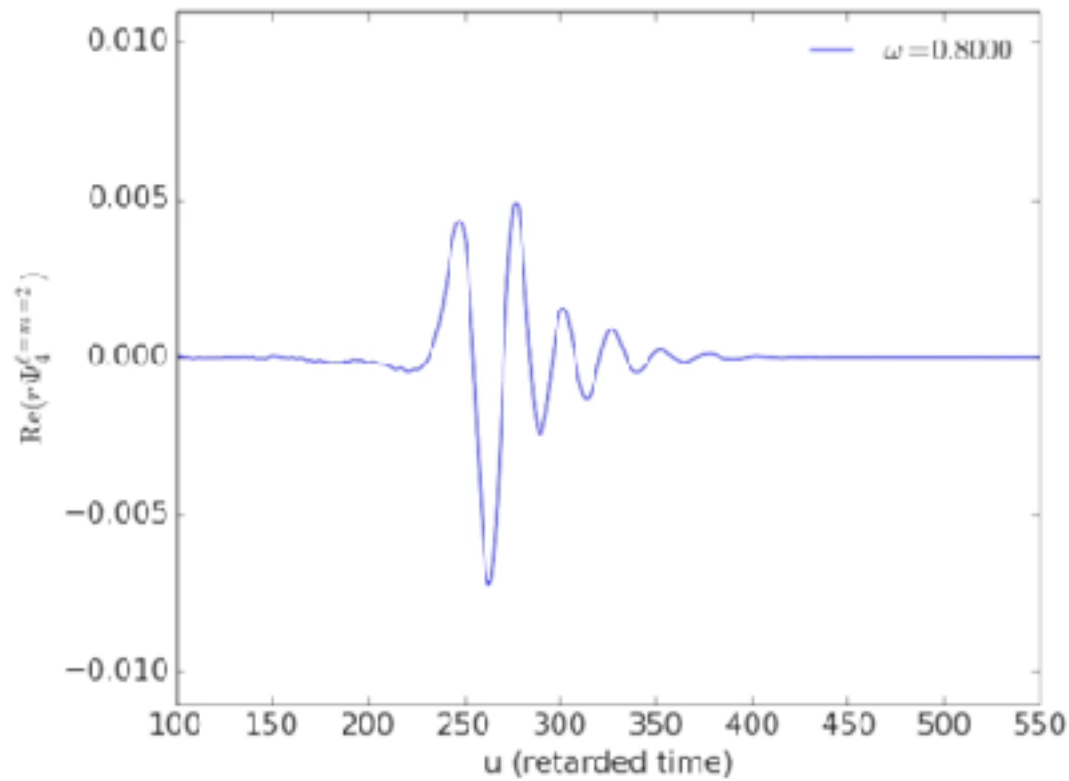
The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS



**Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne**

"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"

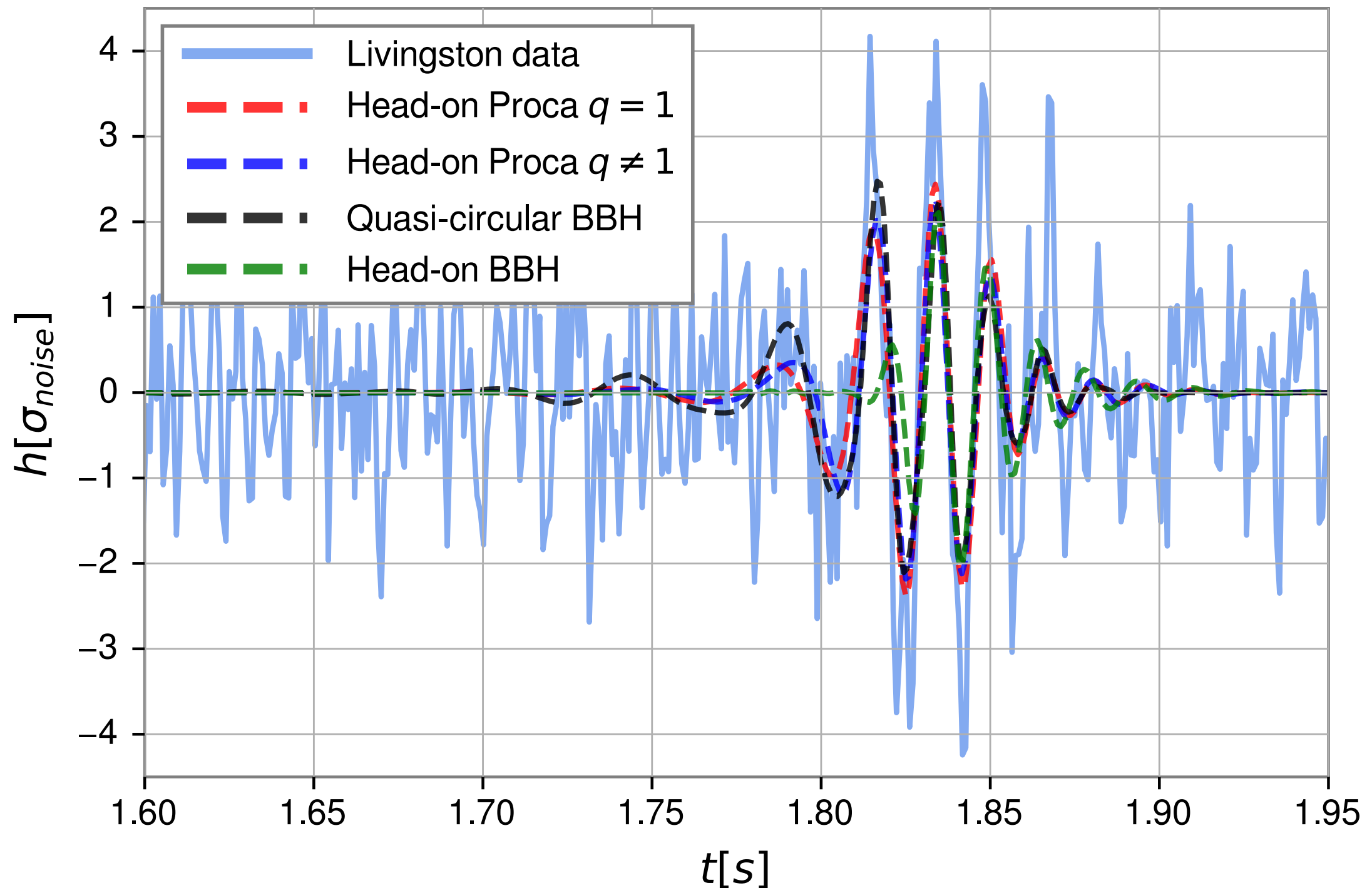


Um catálogo diferente

(mais de 750 formas de onda de estrelas de matéria escura) Sanchis-Gual , Herdeiro et al. (2022)

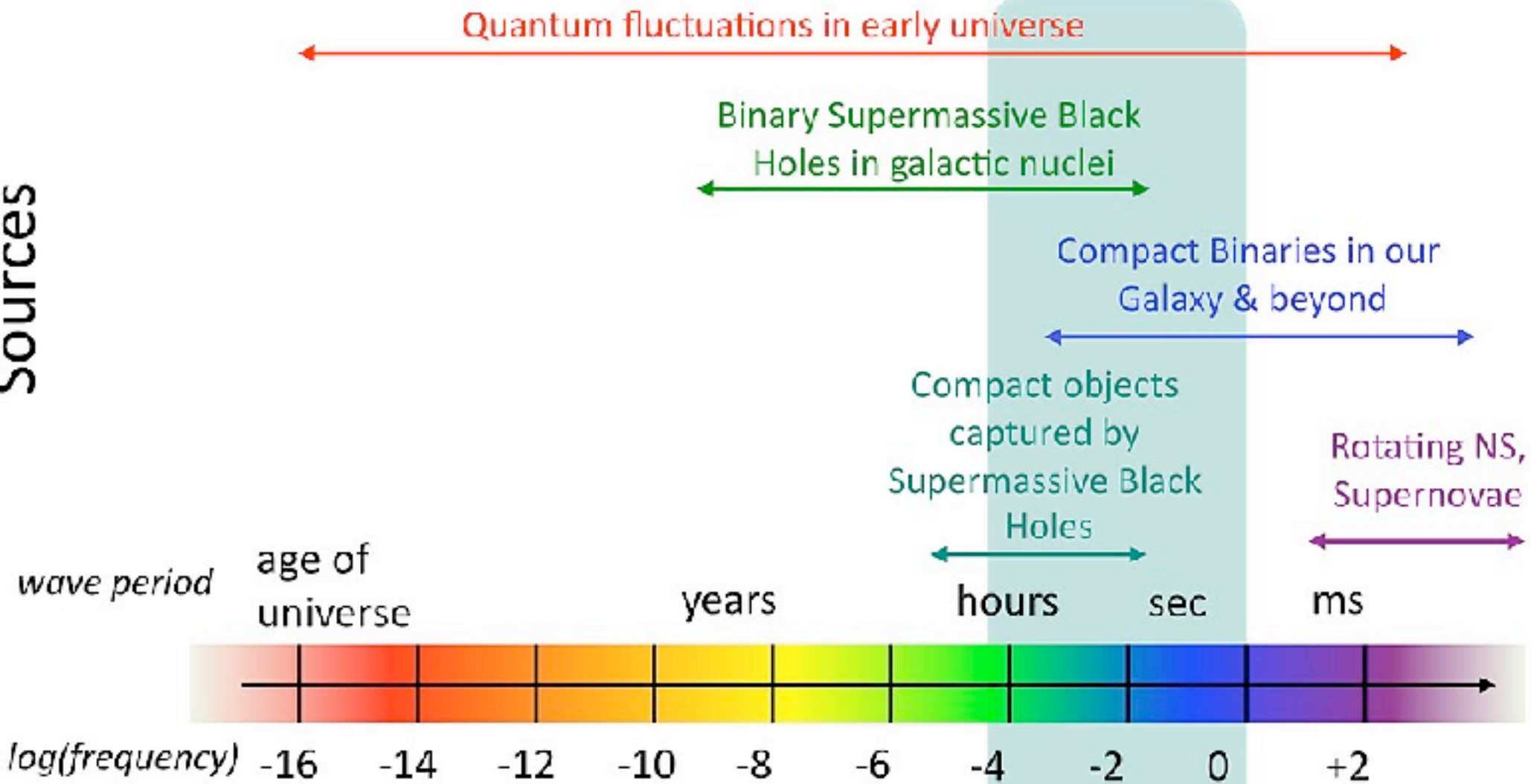
GW190521 as a Merger of Proca Stars: A Potential New Vector Boson of 8.7×10^{-13} eV

Juan Calderón Bustillo^{1,2,3,4,*} Nicolas Sanchis-Gual^{5,6,†} Alejandro Torres-Forné^{7,8,9} José A. Font^{8,9} Avi Vajpeyi^{3,4}
 Rory Smith^{3,4} Carlos Herdeiro⁶ Eugen Radu⁶ and Samson H. W. Leong²

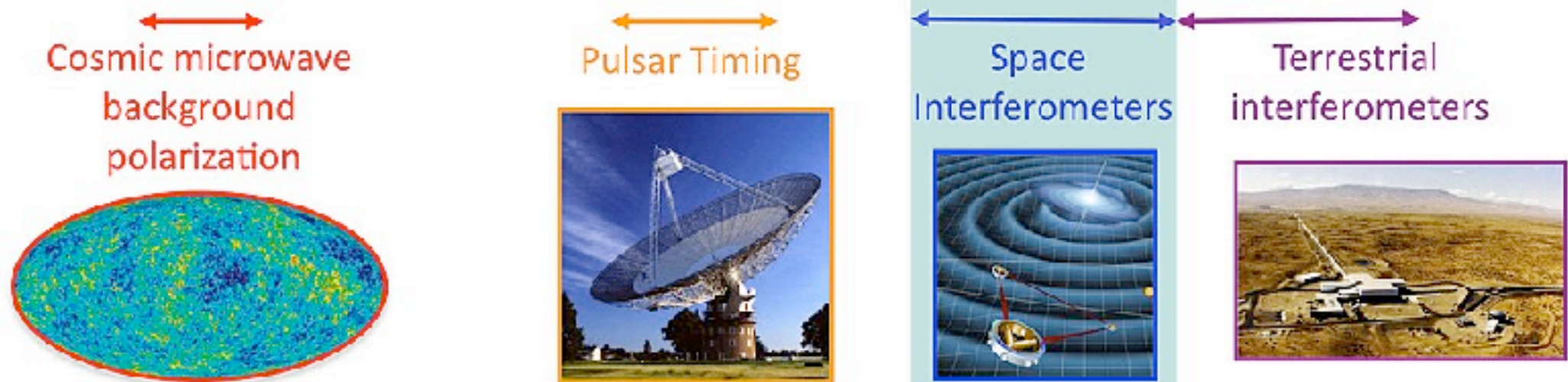


The Gravitational Wave Spectrum

Sources

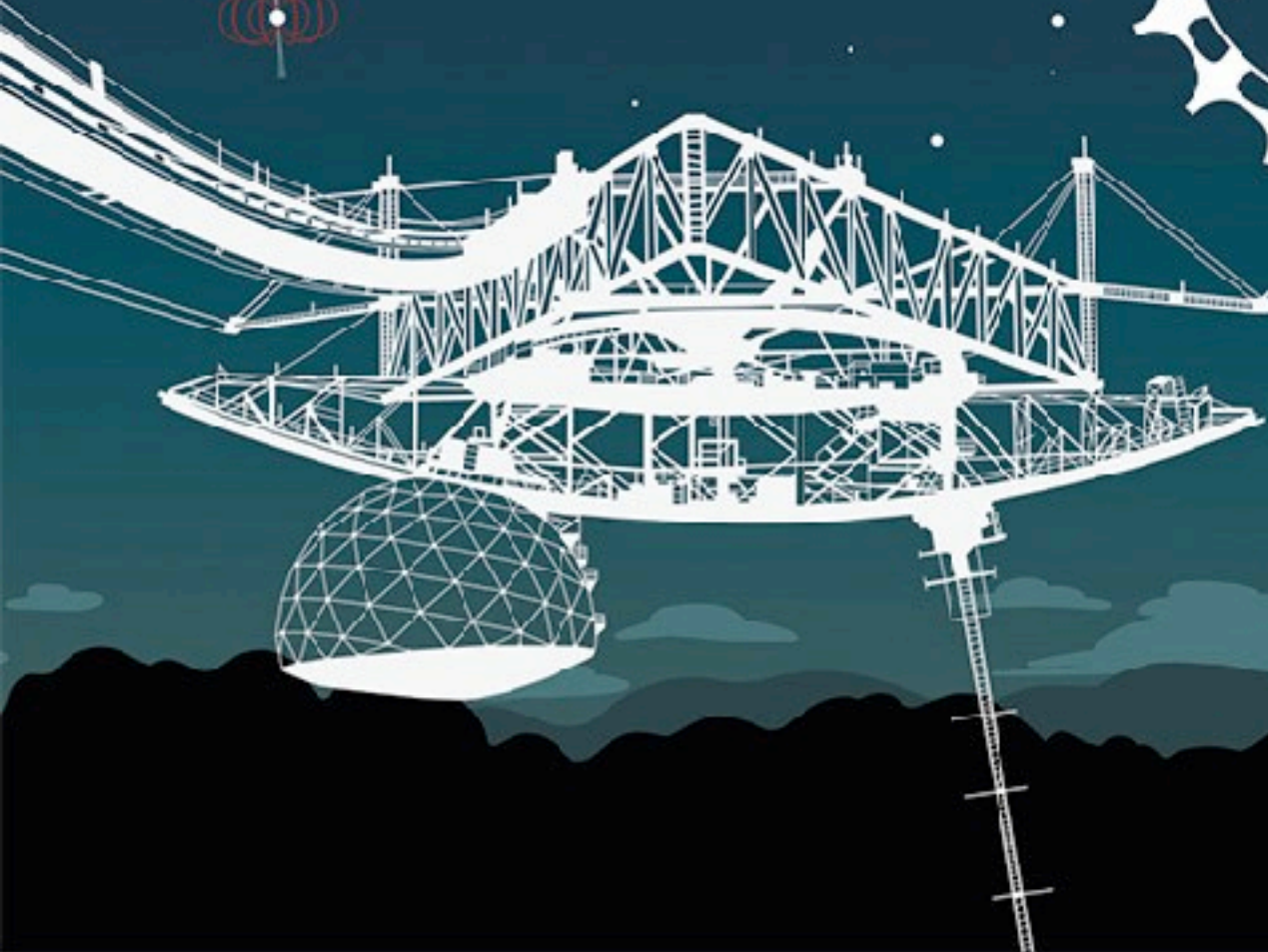


Detectors



NANOGrav

Physics Frontiers Center



4) A verdadeira música celestial

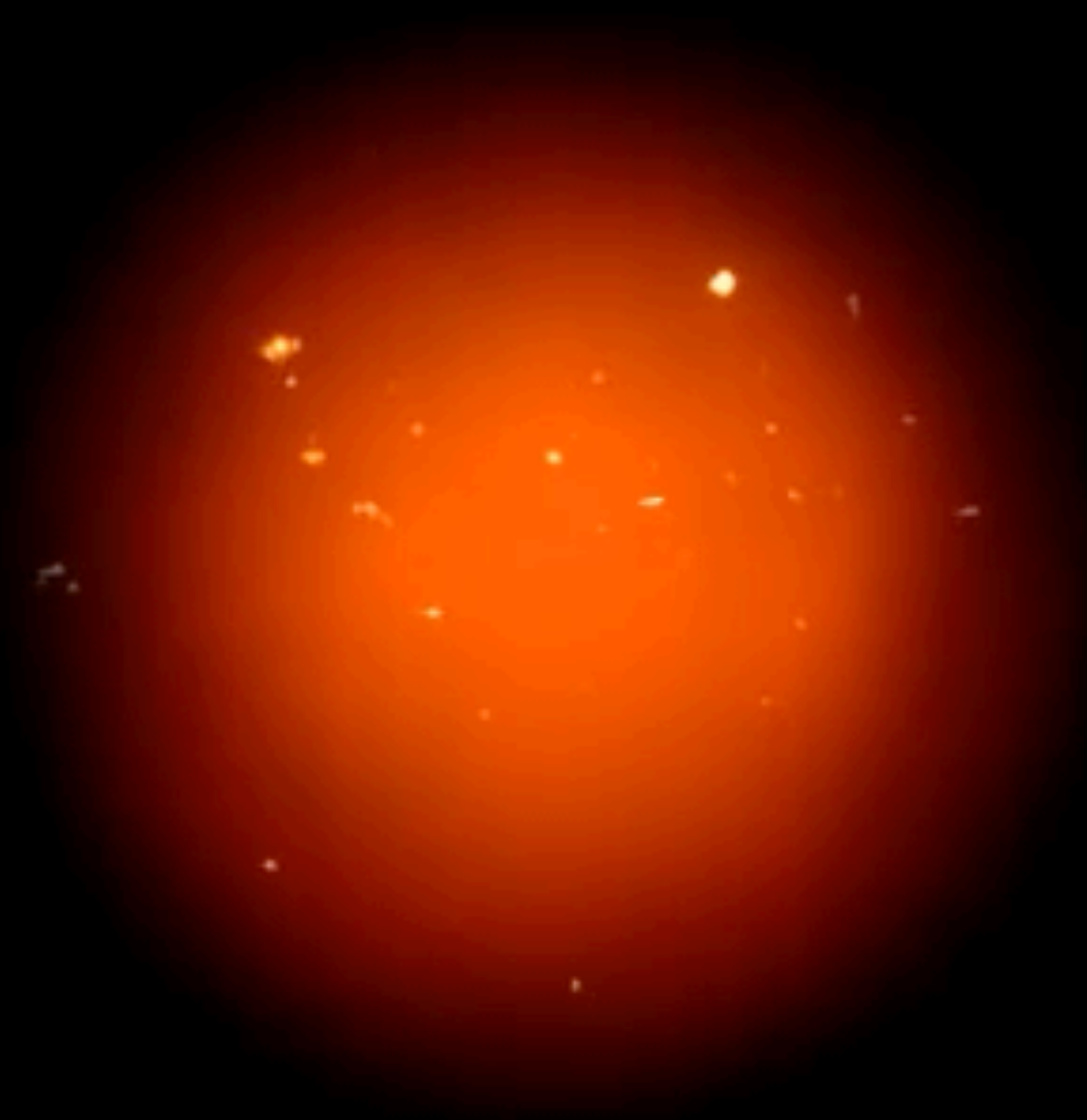
As ondas gravitacionais NÃO SÃO ondas sonoras!

Mas, num certo sentido são ondas acústicas:

- São vibrações de um meio muito especial: o espaço-tempo, o meio mais rígido que existe;
- É um canal completamente distinto das ondas electromagnéticas e por isso compara-las ao “som” fornece uma analogia ilustrativa;
- As frequências de eventos de massa estelar têm frequências correspondentes à banda audível dos humanos (20Hz-20kHz);
- Detectores são “microfones”: omnidireccionais e não identificam direcção (é necessário triangular);



Até agora, a nossa compreensão científica do Universo
eramos capazes de ver o Universo...
encontrava-se numa posição semelhante:

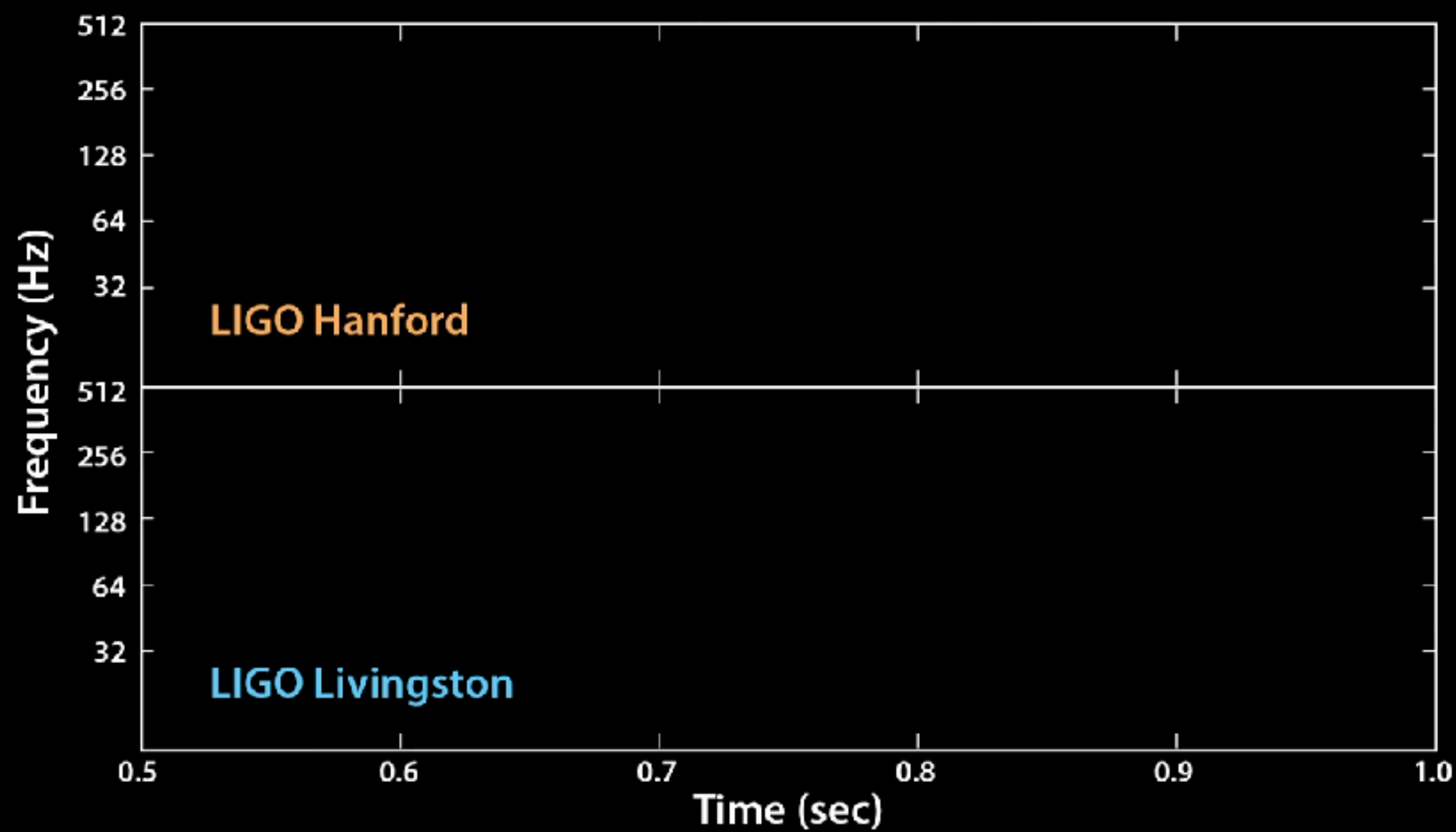


... mas incapazes de o “ouvir”...

A long time ago in a galaxy far,
far away...

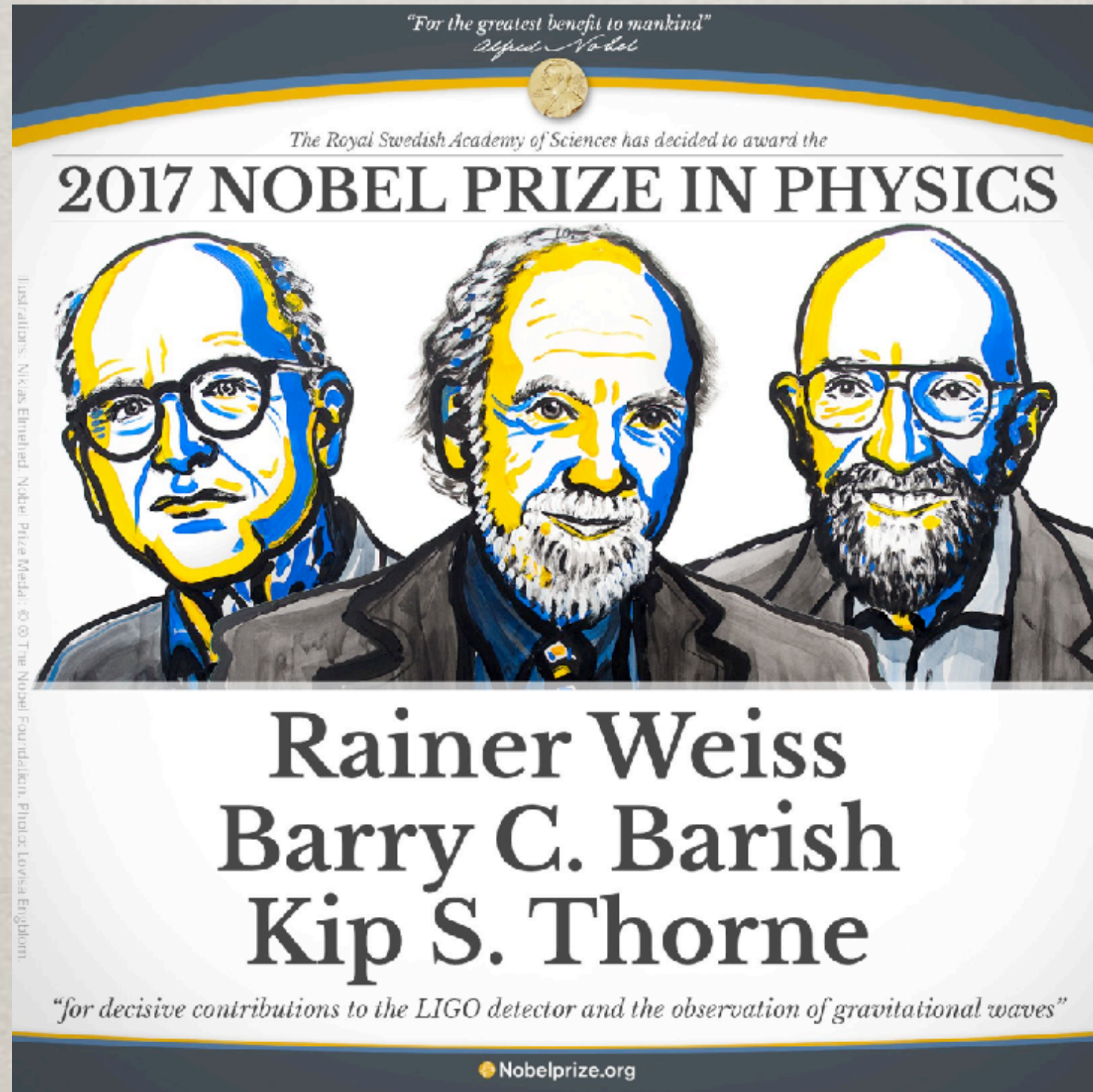
Sabiamos que o
Universo está a falar ...

... e agora... estamos a ouvir!





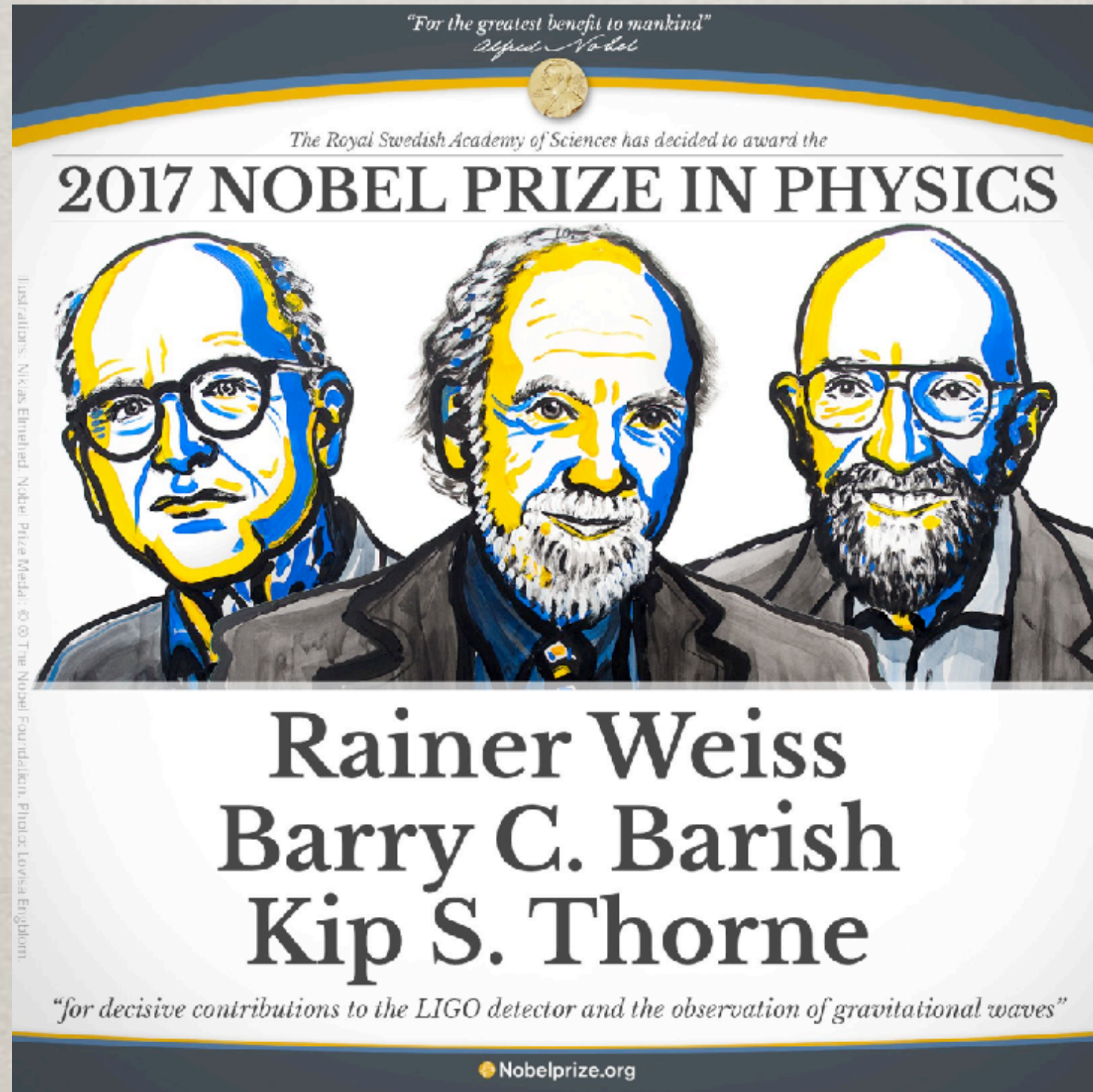
Abre-se uma nova janela (um novo ouvido!) para o Universo



Come on you target for faraway laughter,
come on you stranger, you legend, you martyr and shine!



Abre-se uma nova janela (um novo ouvido!) para o Universo



Muito obrigado pela vossa atenção!