重力波物理学と情報科学

2017/5/31　@ 情報科学部 研究サロン

真貝寿明 hisaaki.shinkai@oit.ac.jp

(1) これまで手がけてきた研究
（重力波物理学関連）
(2) 現在進行中の研究
(3) 情報科学部教員との研究交流ネタ

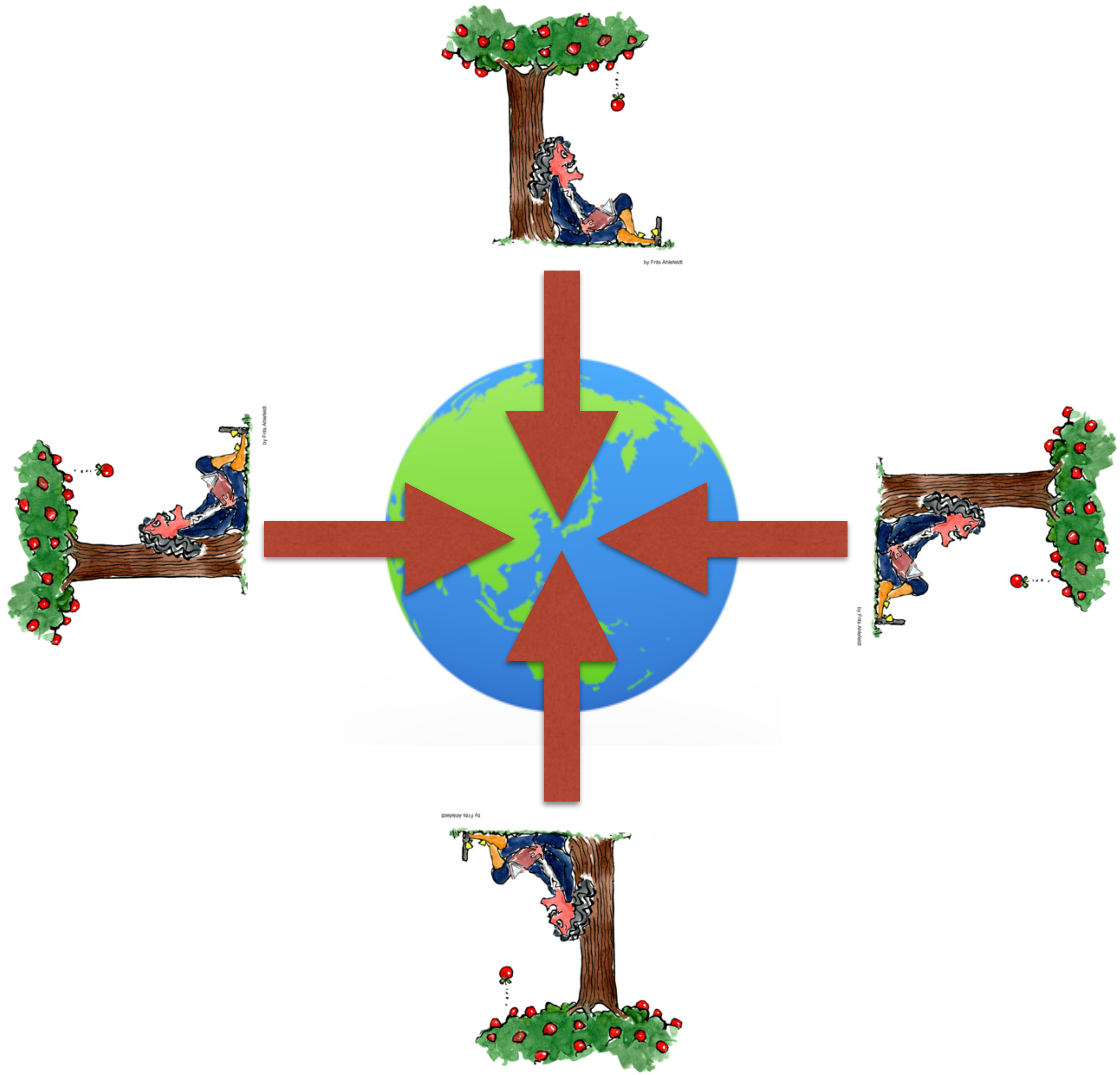
2016年2月，LIGOが重力波を初めて検出した，と発表した

四国新聞だけ

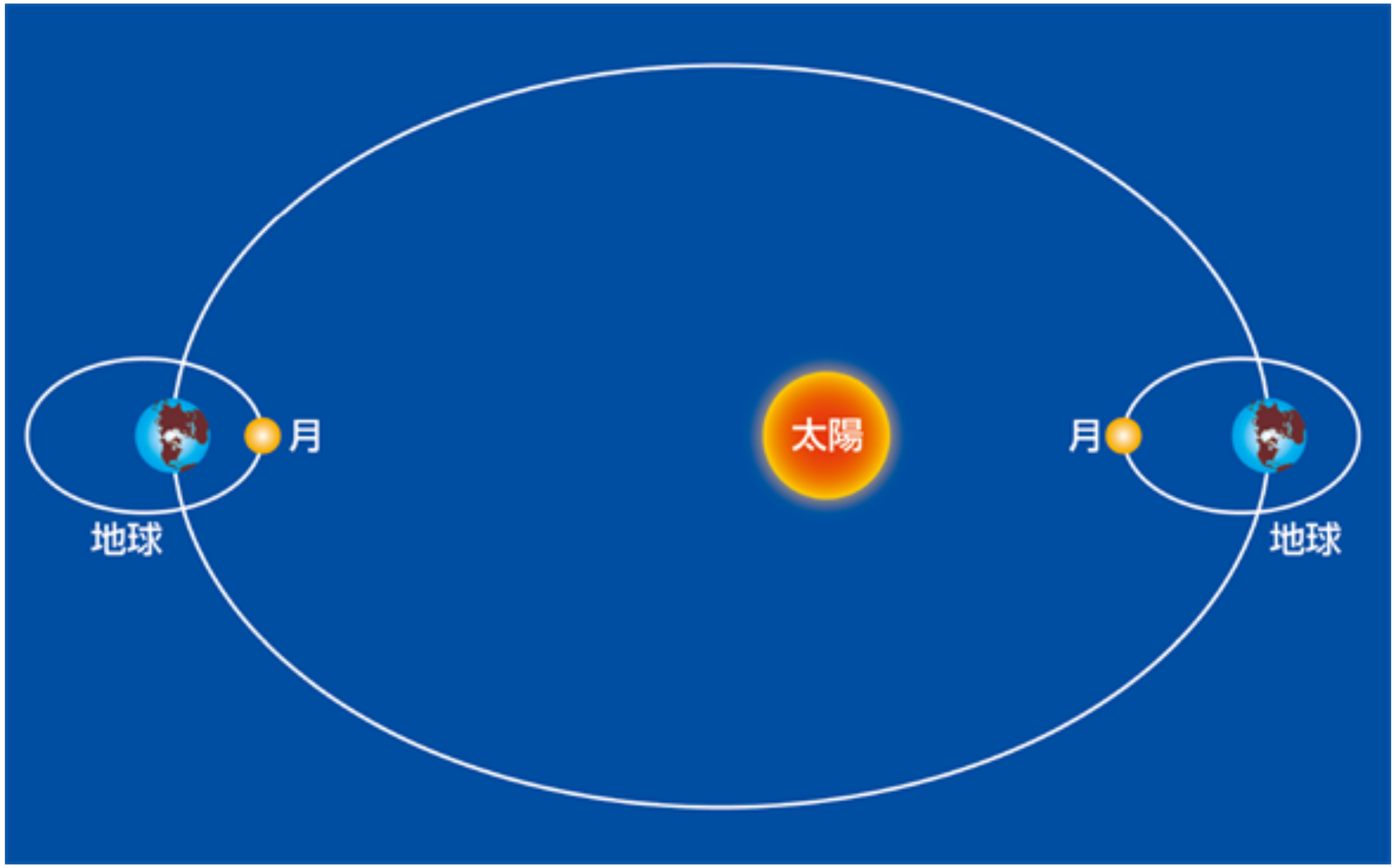
ちがった．．．残念（笑）

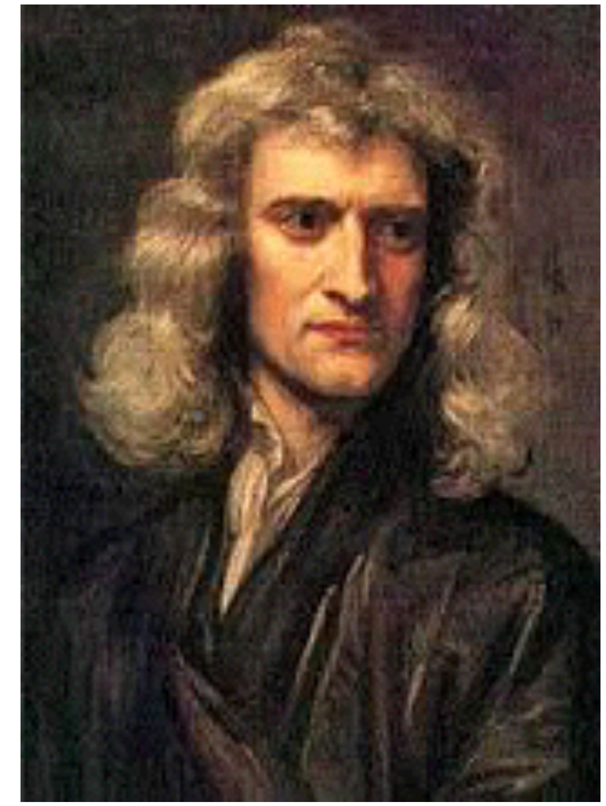
重力の正体は？

http://hikingartist.com/



重力の正体は？





ニュートン

万有引力

＝すべてのものは引力で引き合う

重力の正体は？

「万有引力があるからだ」（ニュートン，1687）

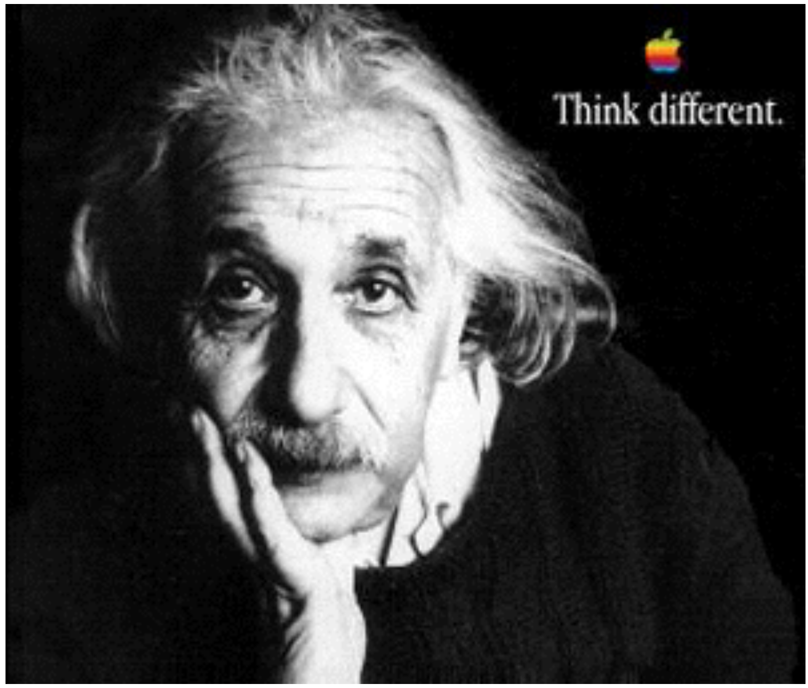
$$F = G\frac{Mm}{r^2} \qquad m\frac{d^2x}{dt^2} = F$$

http://hikingartist.com/

「時空のゆがみだ」

（アインシュタイン，1915）

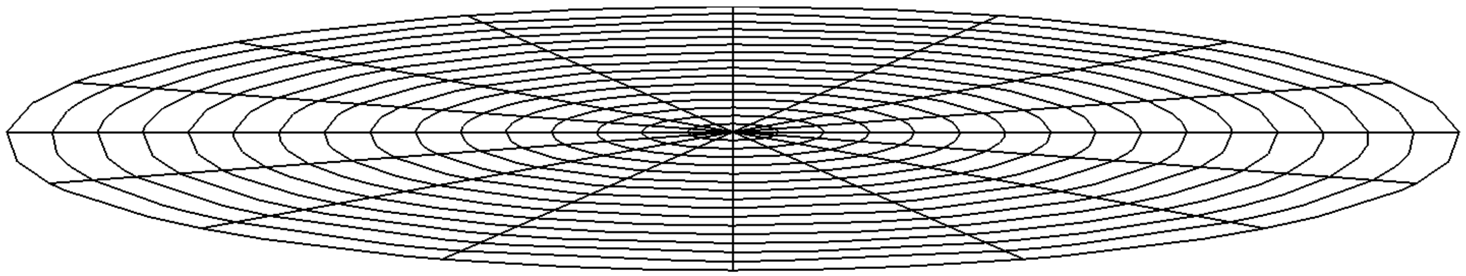
一般相対性理論

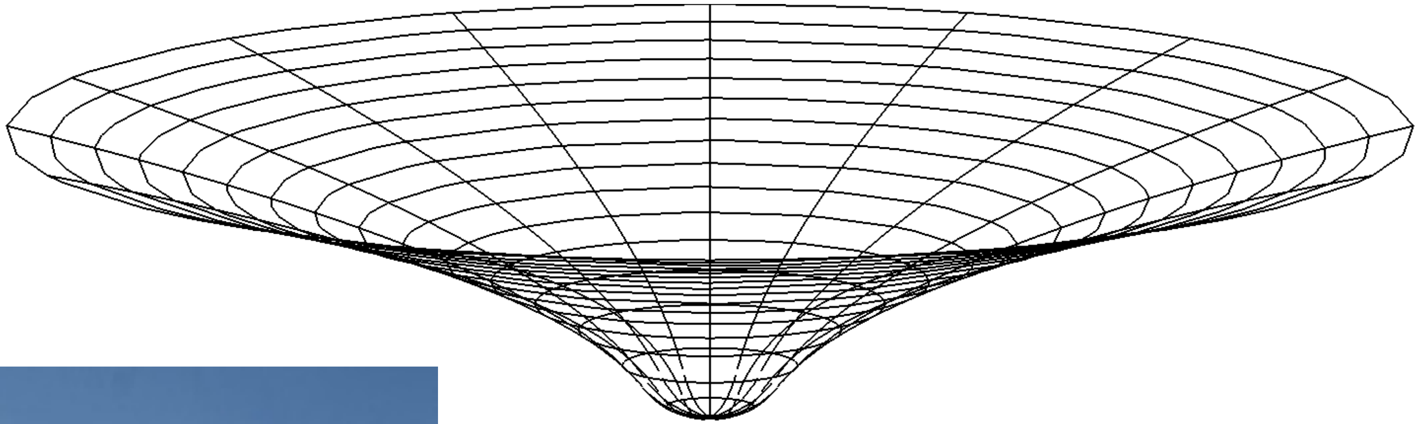


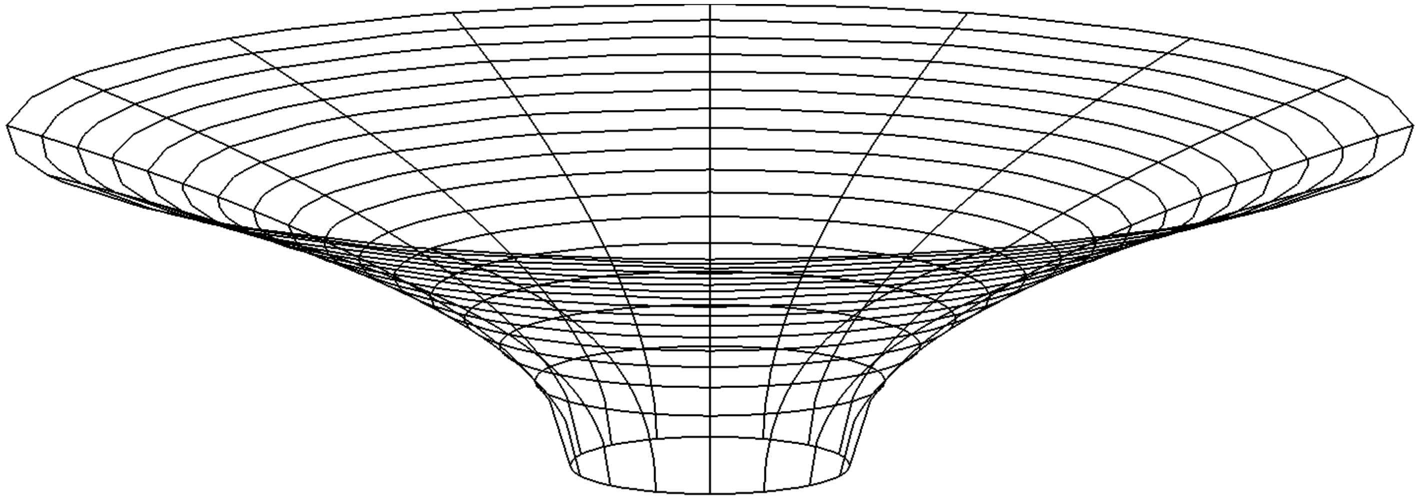
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$$\frac{d^2\xi^\mu}{d\tau^2} = R^\mu{}_{\nu\rho\sigma}\frac{d\xi^\nu}{d\tau}\frac{d\xi^\rho}{d\tau}\xi^\sigma$$

時空のゆがみ　＝　沈み込むトランポリン

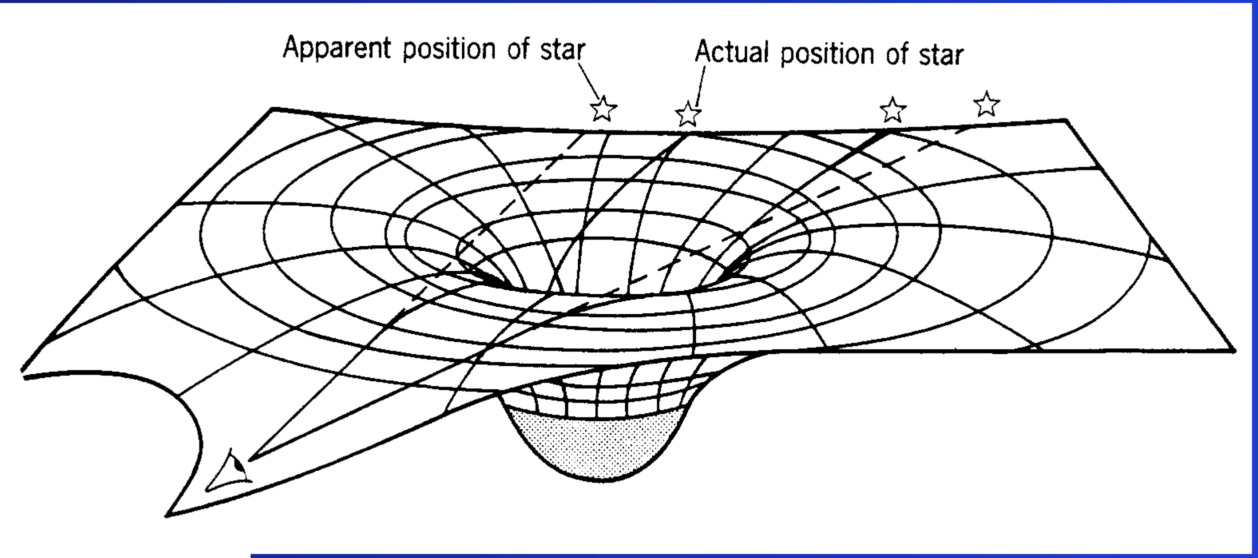


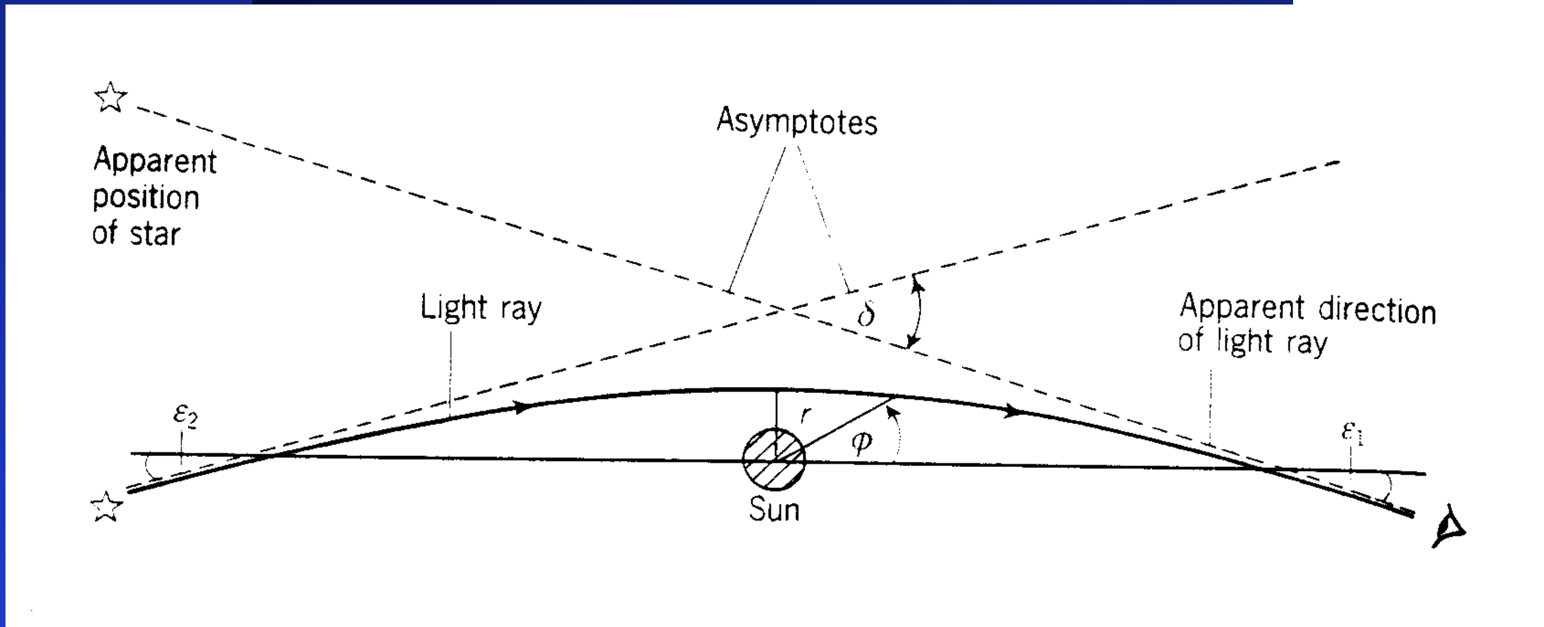




一般相対性理論の予言【光の曲がり】

光は時空を直進するが，重い天体の周りでは，
時空の歪みにより，曲がって進むことになる．





1919年，エディントンが，
皆既日食を利用して，光の
曲がりを確認（0.875秒角）

Taken from the 22 November 1919 edition of the Illustrated London News.

Coverage in the (more excitable) New York Times.

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

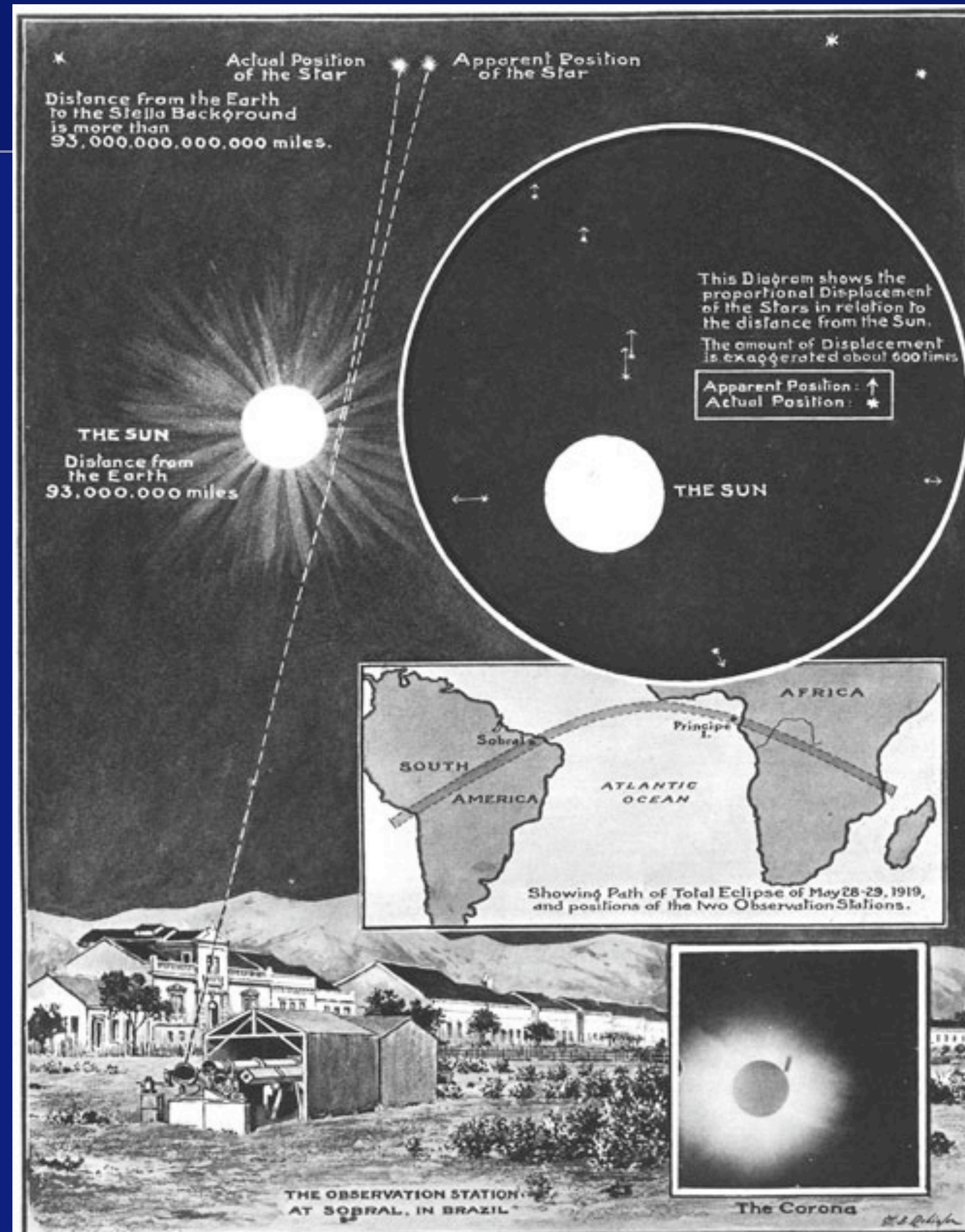
Men of Science More or Less Agog Over Results of Eclipse Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed or Were Calculated to be, but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could Comprehend It, Said Einstein When His Daring Publishers Accepted It.



アインシュタイン方程式　＝　一般相対性理論の核　10本の偏微分方程式

The Einstein equation

geodesics

spacetime curvature → matter distribution

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Einstein tensor

cosmological constant

Energy-Momentum tensor

Solve for metric
$g_{\mu\nu}$(t,x,y,z)
(10 components)

flat spacetime (Minkowskii spacetime):

$$\begin{aligned} ds^2 &= -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= -dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \end{aligned}$$

$$ds^2 = \sum_{\mu,\nu} g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu := g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$$

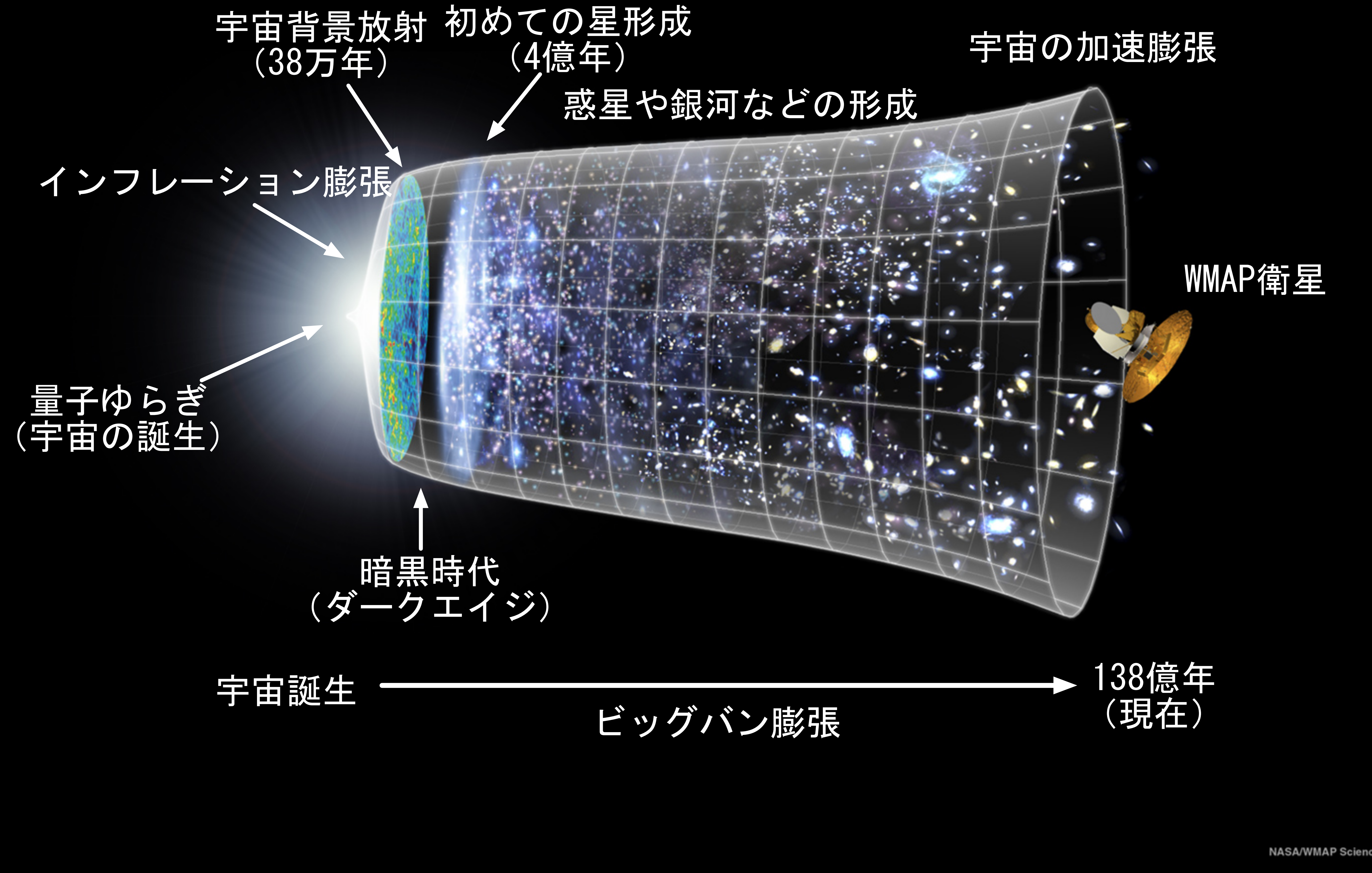
$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ & & g_{yy} & g_{yz} \\ sym. & & & g_{zz} \end{pmatrix}$$

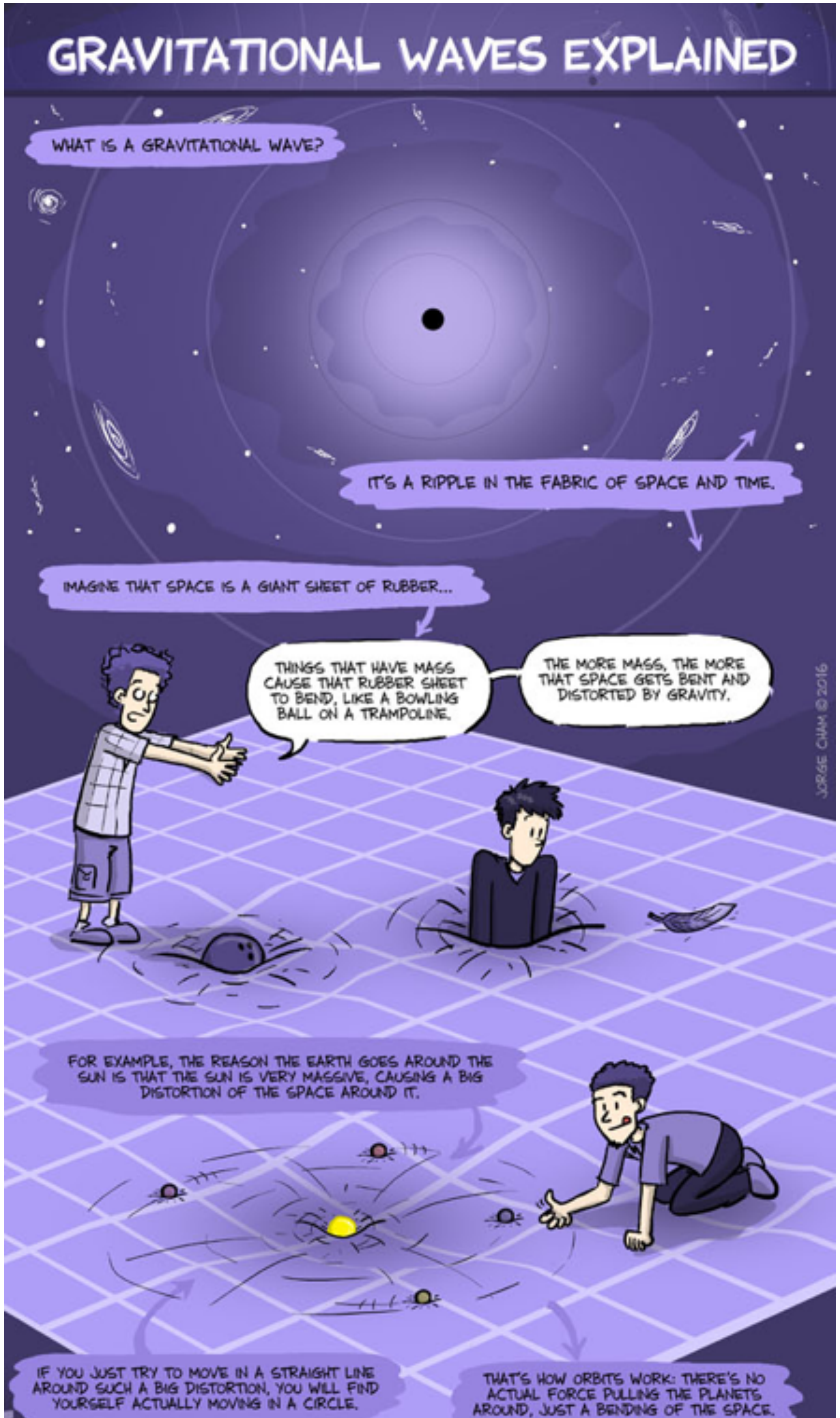
$$\begin{aligned} \Gamma^\alpha_{\mu\nu} &\equiv \frac{1}{2}g^{\alpha\beta}(\partial_\nu g_{\beta\mu} + \partial_\mu g_{\beta\nu} - \partial_\beta g_{\mu\nu}) \\ R^\mu{}_{\nu\alpha\beta} &\equiv \partial_\alpha\Gamma^\mu_{\nu\beta} - \partial_\beta\Gamma^\mu_{\nu\alpha} + \Gamma^\mu{}_{\sigma\alpha}\Gamma^\sigma{}_{\nu\beta} - \Gamma^\mu{}_{\sigma\beta}\Gamma^\sigma{}_{\nu\alpha} \\ R_{ab} \equiv R^\mu{}_{a\mu b} &\equiv \partial_\mu\Gamma^\mu_{ab} - \partial_b\Gamma^\mu_{a\mu} + \Gamma^\mu{}_{\nu\mu}\Gamma^\nu{}_{ab} - \Gamma^\mu{}_{\nu b}\Gamma^\nu{}_{a\mu} \\ R &= g^{ab}R_{ab} \end{aligned}$$

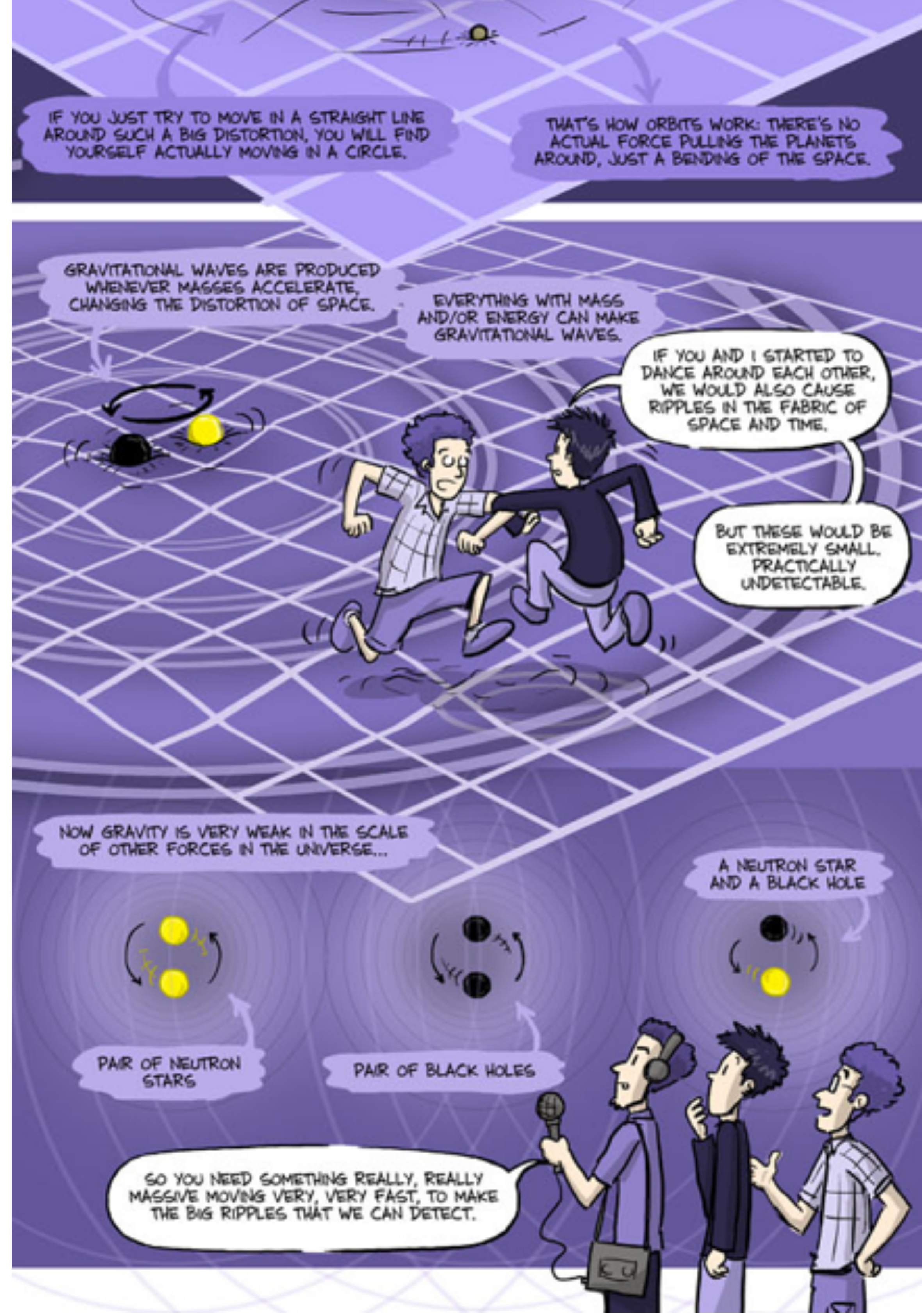
一般相対論の応用される分野

重くて小さな星
（中性子星，ブラックホール）
宇宙論
（初期宇宙，宇宙膨張）
重力波
（天文学？）
理論の検証
（修正重力理論？）
GPSの精度向上

『ブラックホール・膨張宇宙・重力波
一般相対性理論の100年と展開』
光文社新書
2015年9月刊


宇宙背景放射
（38万年）
初めての星形成
（4億年）
宇宙の加速膨張
惑星や銀河などの形成
インフレーション膨張
WMAP衛星
量子ゆらぎ
（宇宙の誕生）
暗黒時代
（ダークエイジ）
宇宙誕生
138億年
（現在）
ビッグバン膨張
NASA/WMAP Scienc

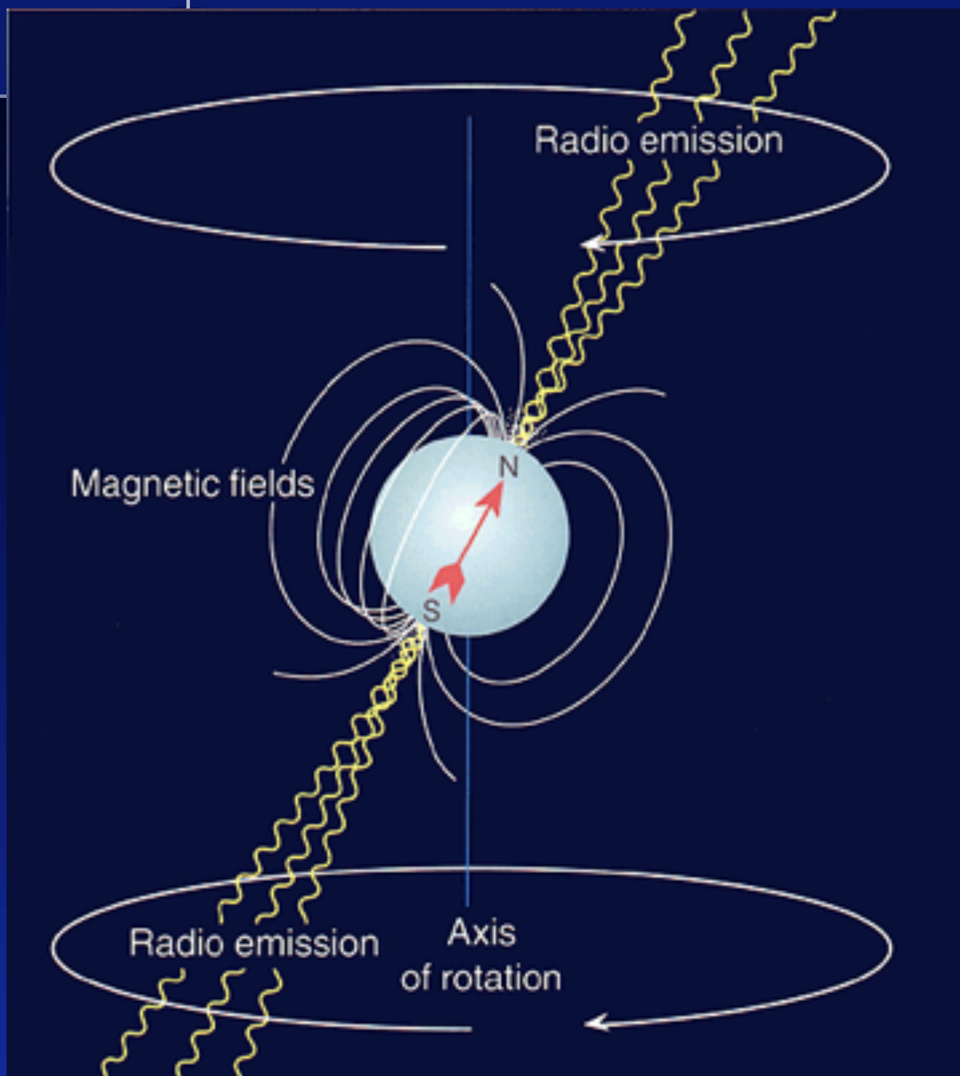


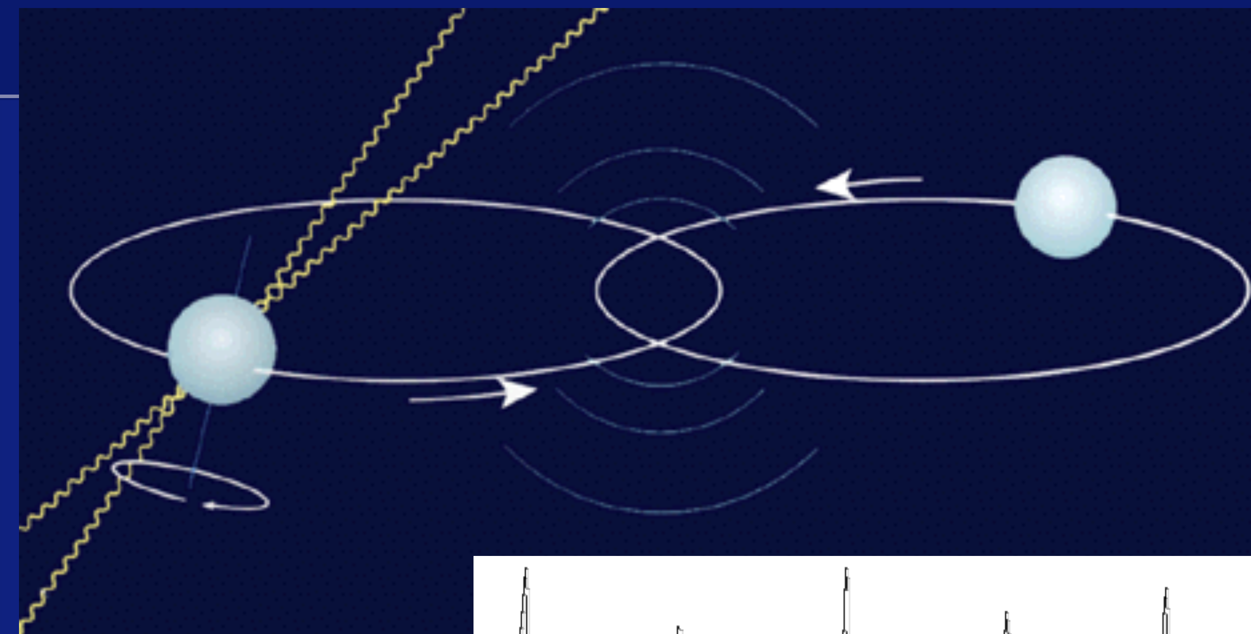


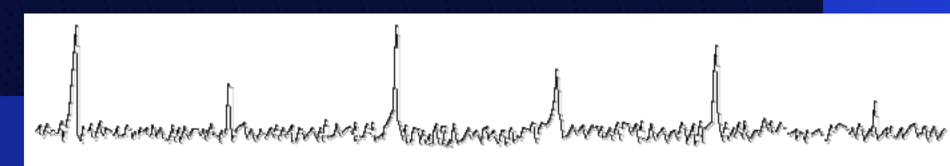
www.phdcomics.com

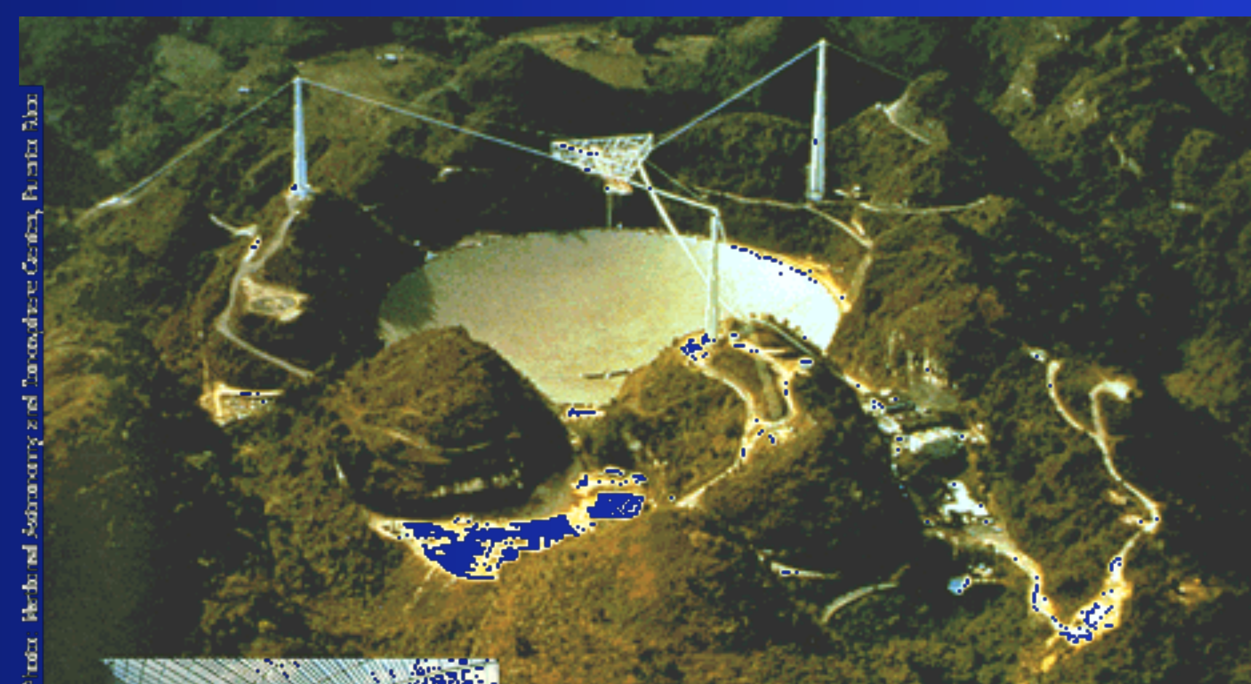
“gravitational waves explained”

連星中性子星の発見 (1974)







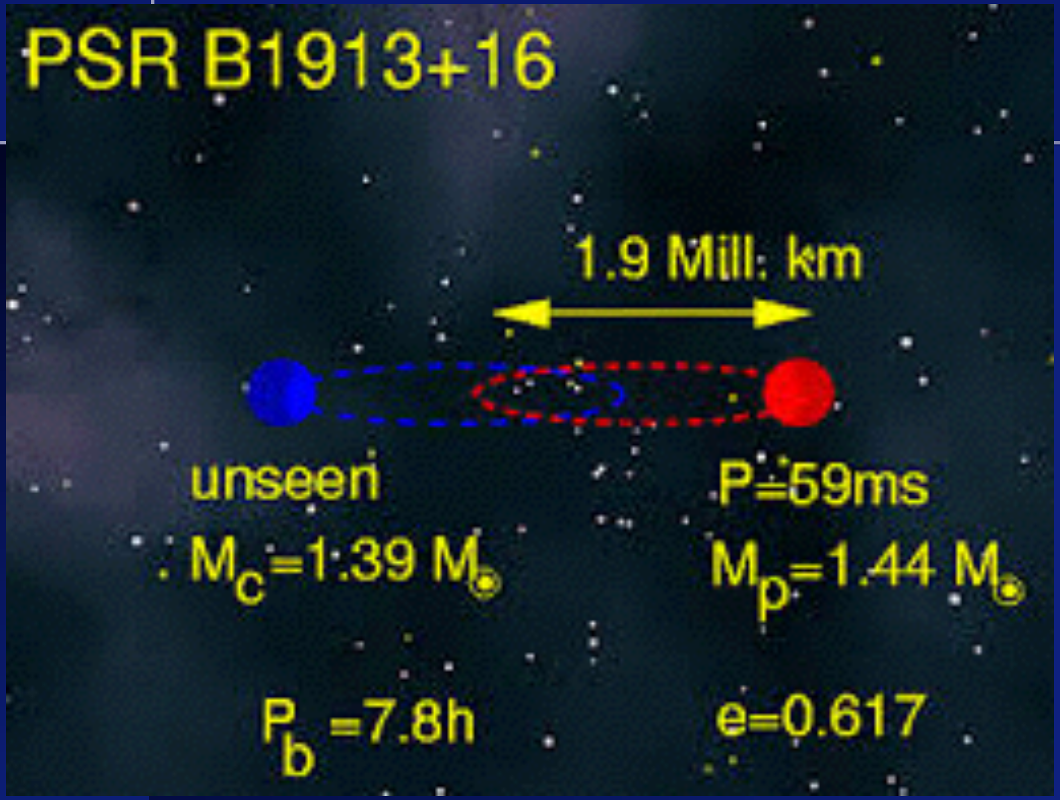


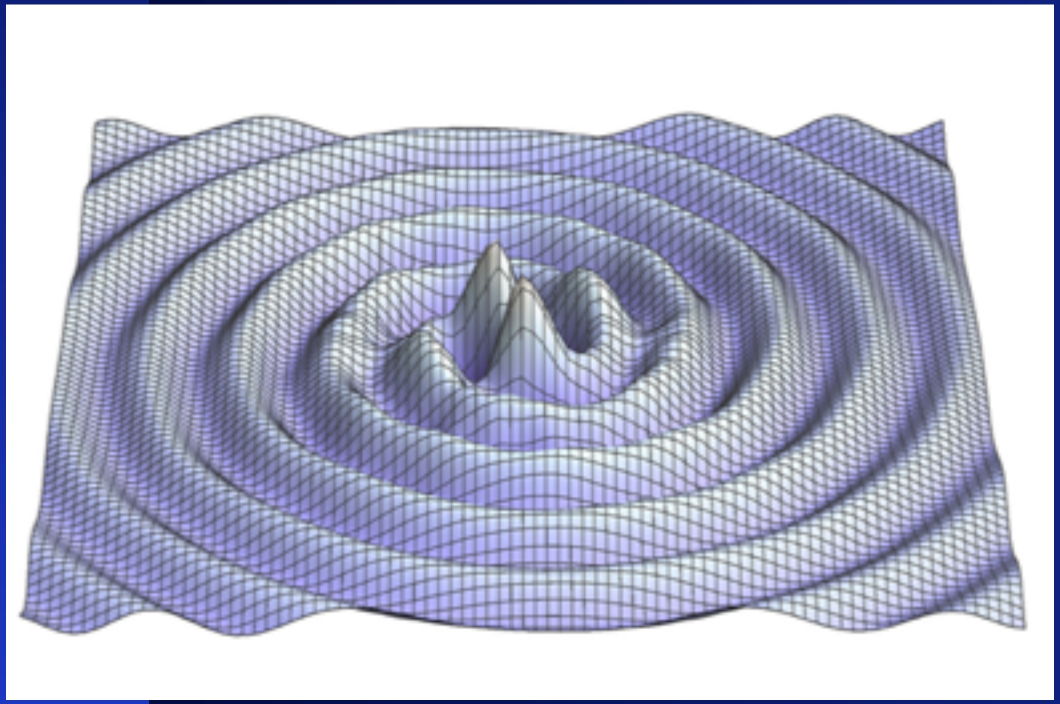
Arecibo, Puerto Rico

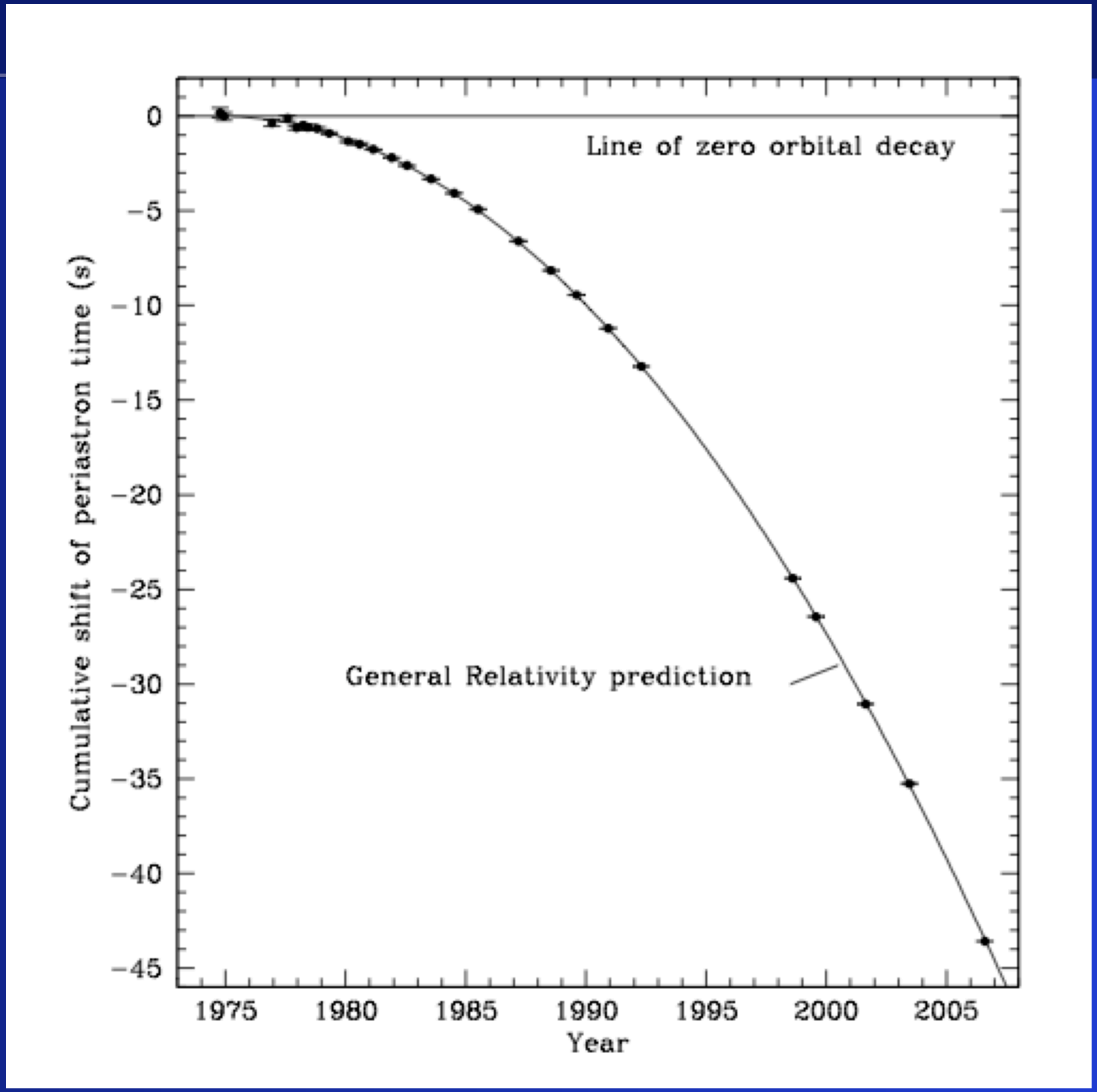
パルサー＝中性子星
半径 10km位
質量 1.4x太陽

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/illpres/discovery.html

連星中性子星の発見 (1974)



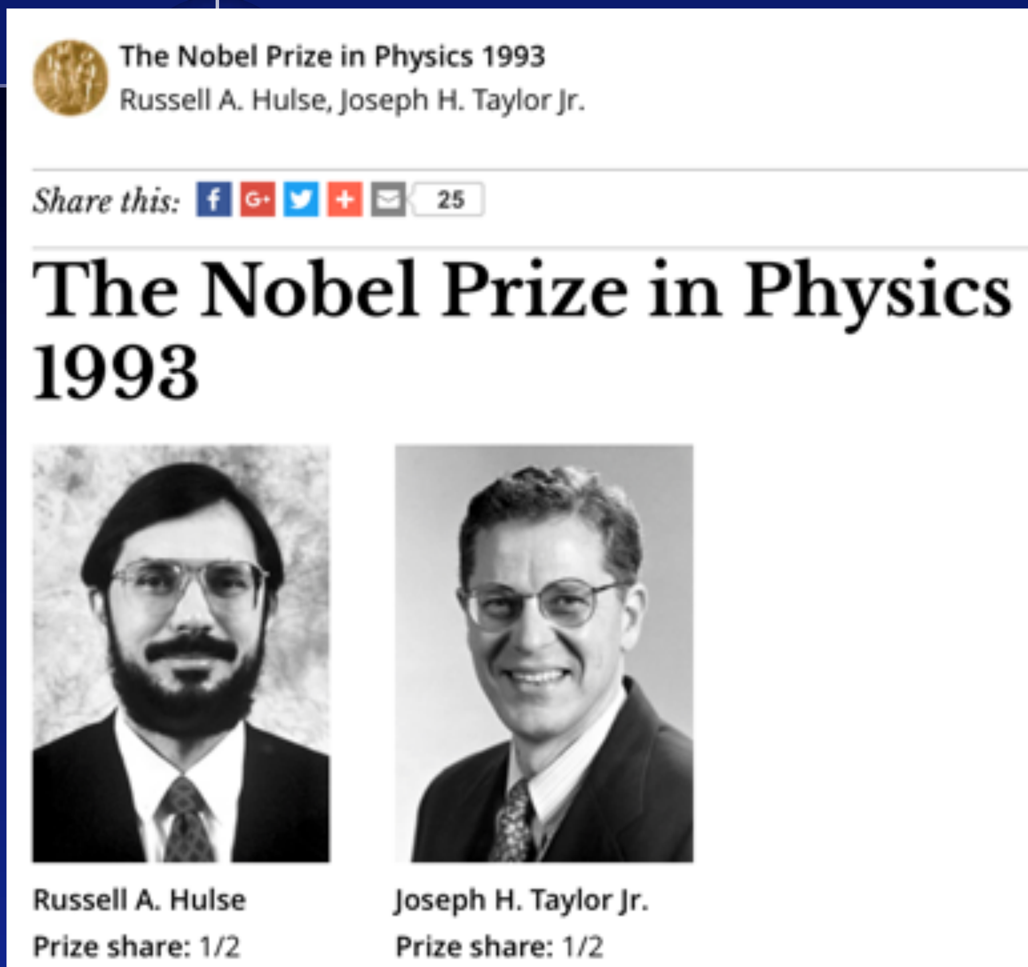


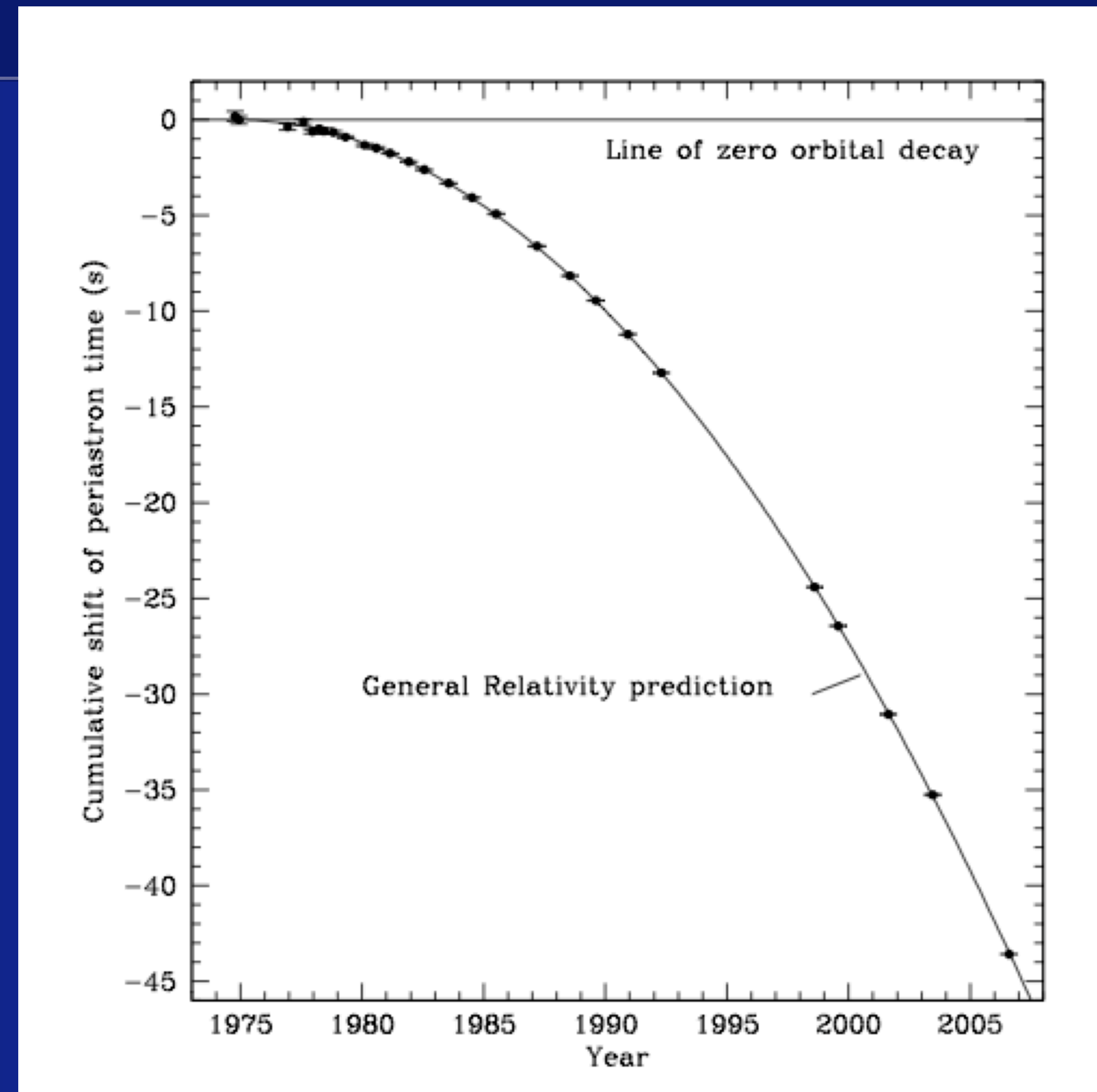


重力波を放出してエネルギーを失うので，星が近づいてゆく.

重力波の存在が**間接的に確かめられた.**

連星中性子星の発見 (1974)



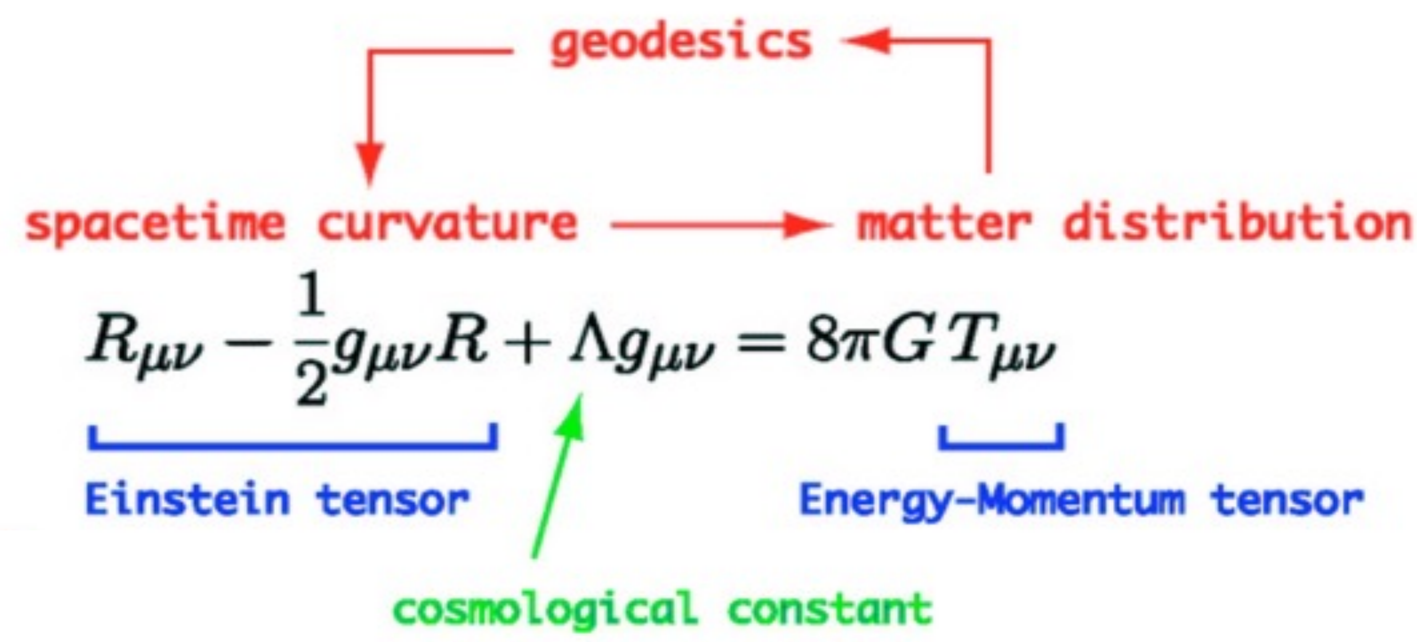


"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

"重力についての新しい研究を開いた，新種のパルサーの発見に対して"

重力波の存在が間接的に確かめられた.

数値相対論（Numerical Relativity）



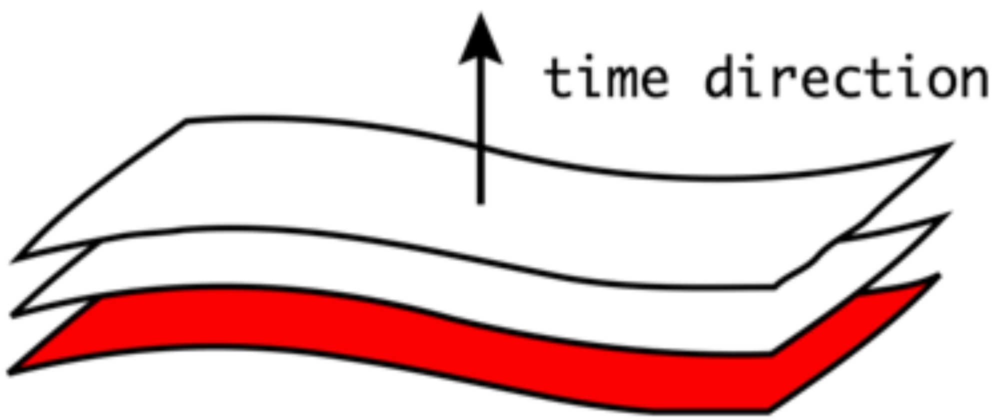
「数値シミュレーションを行う」

しかし，何故か難しい．何故かできない．(90年代)

4本の楕円型偏微分方程式
6本の双曲型偏微分方程式
座標条件（ゲージ条件）
ブラックホールの取り扱い
・・・・・

スパコン能力不足？

時空の3+1分解



Σ: Initial 3-dimensional Surface

Class. Quantum Grav. 12 (1995) 133–140. Printed in the UK

A '3+1' method for finding principal null directions

Laurens Gunnarsen†, Hisa-Aki Shinkai† and Kei-Ichi Maeda‡
Department of Physics, Waseda University, Shinjuku-ku, Tokyo 169, Japan

Received 7 June 1994, in final form 24 October 1994

Abstract. We present a new method for finding principal null directions (PNDs). Because our method assumes as an input the intrinsic metric and extrinsic curvature of a space-like hypersurface, we expect it will be useful to numerical relativists. We illustrate our method by finding the PNDs of the Kastor–Traschen spacetimes, which contain arbitrarily many $Q = M$ black holes in a de Sitter background.

2.1. Our strategy

Here, we present our method as it applies to vacuum spacetimes with cosmological constant Λ. We begin by fixing a triple (Σ, h_{ab}, p_{ab}), where Σ is a smooth 3-manifold, h_{ab} is a Riemannian metric on Σ, and p_{ab} is the extrinsic curvature of Σ. The constraints on h_{ab} and p_{ab} are

$$R - p_{ab}p^{ab} + p^2 = 2\Lambda \tag{1}$$

$$D_a(p^{ab} - ph^{ab}) = 0 . \tag{2}$$

Here $p = p_{ab}h^{ab}$, D_a is the (unique) torsion-free derivative operator compatible with h_{ab}, and $R = R_{ab}h^{ab}$, where $R_{ab}v^b = -2D_{[a}D_{m]}v^m$ for all smooth v^a on Σ.

From (h_{ab}, p_{ab}) we construct two further tensor fields E_{ab}, B_{ab} as follows:

$$E_{ab} = R_{ab} - p_a{}^m p_{bm} + pp_{ab} - \tfrac{2}{3}\Lambda h_{ab} \tag{3}$$

$$B_{ab} = \varepsilon_a{}^{mn} D_m p_{nb} \tag{4}$$

where the tensor field $\varepsilon_{abc} = \varepsilon_{[abc]}$ satisfies $\varepsilon_{abc}\varepsilon^{abc} = 3!$ It follows from (1) and (2) that the fields E_{ab}, B_{ab} are both trace-free and symmetric.

The next step is to choose a unit vector field $\hat{z}^a$ on Σ, and to decompose E_{ab}, B_{ab} into components along and perpendicular to $\hat{z}^a$. We set

$$e = E_{ab}\hat{z}^a\hat{z}^b \tag{5}$$

$$e_a = E_{bc}\hat{z}^b(\delta_a{}^c - \hat{z}_a\hat{z}^c) \tag{6}$$

$$e_{ab} = E_{cd}(\delta_a{}^c - \hat{z}_a\hat{z}^c)(\delta_b{}^d - \hat{z}_b\hat{z}^d) + \tfrac{1}{2}es_{ab} \tag{7}$$

$$b = B_{ab}\hat{z}^a\hat{z}^b \tag{8}$$

$$b_a = B_{bc}\hat{z}^b(\delta_a{}^c - \hat{z}_a\hat{z}^c) \tag{9}$$

$$b_{ab} = B_{cd}(\delta_a{}^c - \hat{z}_a\hat{z}^c)(\delta_b{}^d - \hat{z}_b\hat{z}^d) + \tfrac{1}{2}es_{ab} \tag{10}$$

where $s_{ab} = h_{ab} - \hat{z}_a\hat{z}_b$. Finally, we set

$$\Psi_0 = (-e_{ab} + J_a{}^c b_{bc})m^a m^b \tag{11}$$

$$\Psi_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_a - J_a{}^c b_c)m^a \tag{12}$$

$$\Psi_2 = \tfrac{1}{2}(-e + \mathrm{i}b) \tag{13}$$

$$\Psi_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_a + J_a{}^c b_c)\bar{m}^a \tag{14}$$

$$\Psi_4 = (-e_{ab} - J_a{}^c b_{bc})\bar{m}^a\bar{m}^b \tag{15}$$

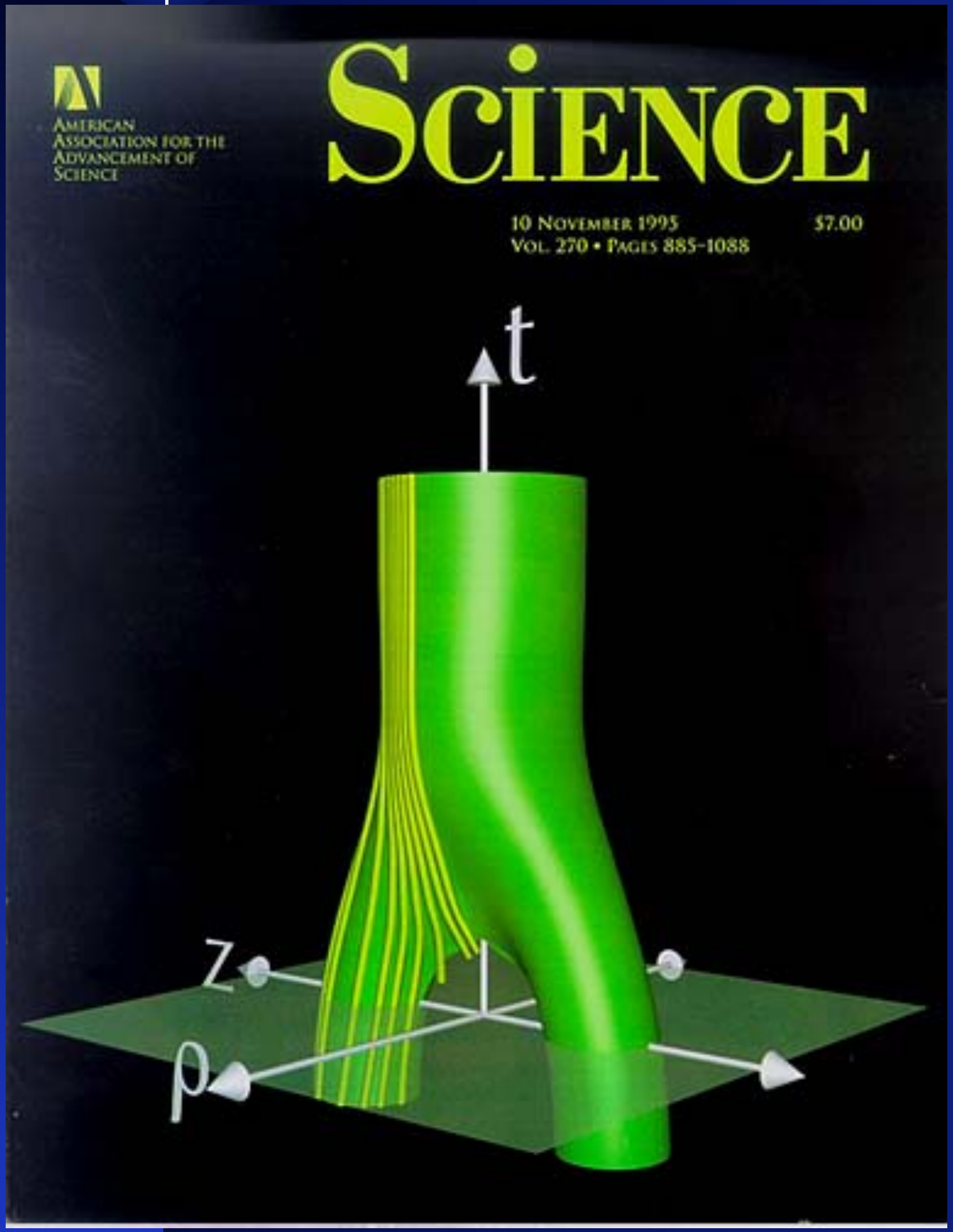
where $J_a{}^b \equiv \varepsilon_a{}^{bc}\hat{z}_c$ is a rotation by 90 degrees in the plane orthogonal to $\hat{z}^a$, and $m^a = 1/\sqrt{2}(\hat{x}^a - \mathrm{i}\hat{y}^a)$ for some pair of orthogonal unit vector fields which span that plane.

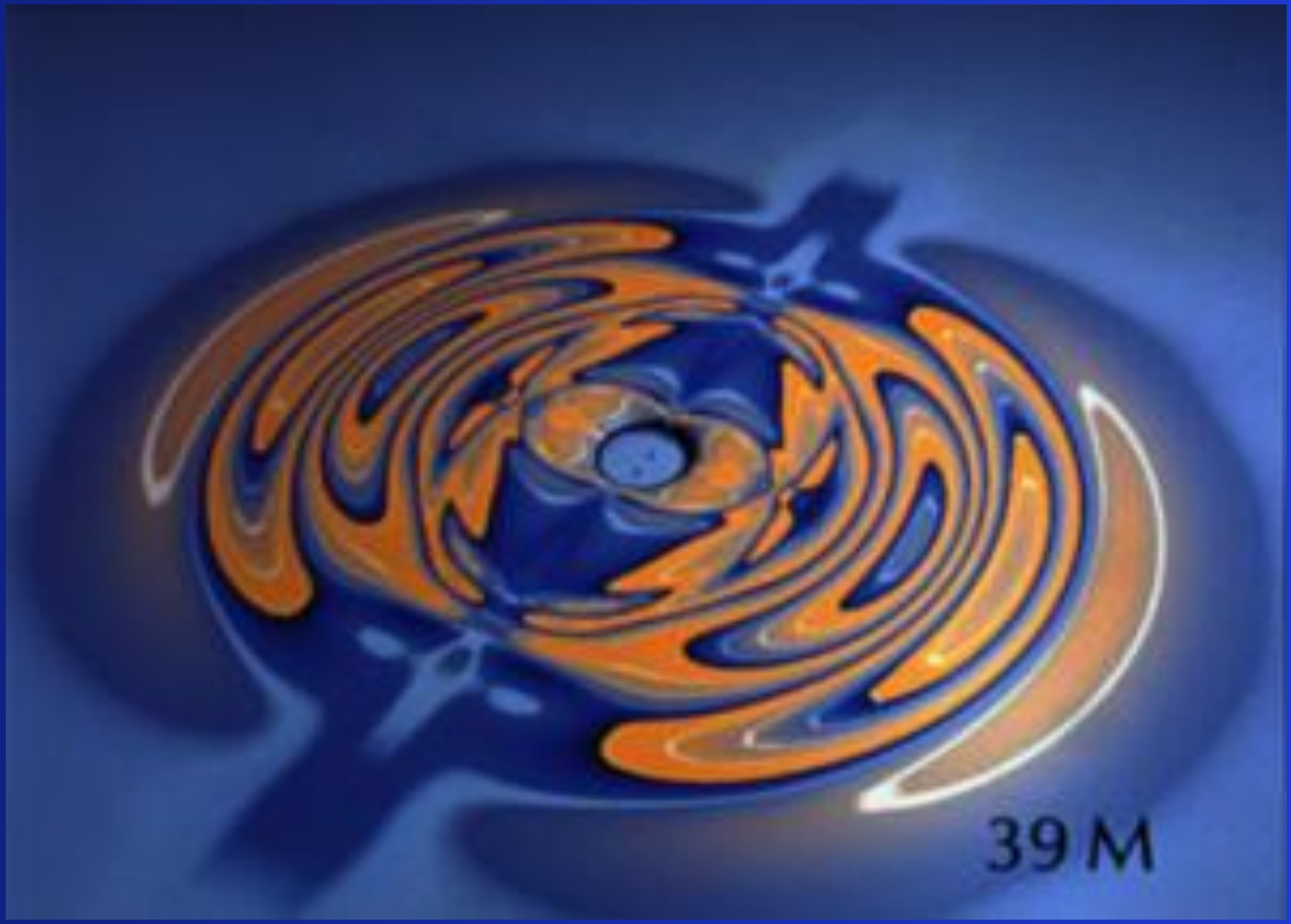
Finding Principal Null Direction for Numerical Relativists

Laurens Gunnarsen, Hisa-aki Shinkai, Kei-ichi Maeda

(Submitted on 2 Jun 1994)

ブラックホールの合体シミュレーション





２つのブラックホールの合体と重力波放出
（90年代，NCSAグループ）

Cactusコードの開発　（現在の Einstein Toolkit ）

Cactus コードの特長（１）

●●　共同コード開発を意識した，モジュール構造　●●

サボテン (cactus) = 幹 (flesh) + とげ (thorn)

Cactusコードの開発　（現在の Einstein Toolkit ）

数値相対論の計算規模

- メモリ とりあえず45GB （もっともっと欲しい）
  - 171 Grid Functions
  - 400x400x200 grid
- 1ステップの計算量　グリッドあたり 6000 演算
  典型的には3000ステップ時間発展（本当はもっと）
  - 600 テラ演算
- アウトプット　一つの関数を 1 ステップ出すのに
  - 256 MB
  - (320 GB for 10 Grid Function every 50 time steps)
- 典型的な1回のシミュレーション
  - Need 10-50 hours

Requirements

並列化

最適化

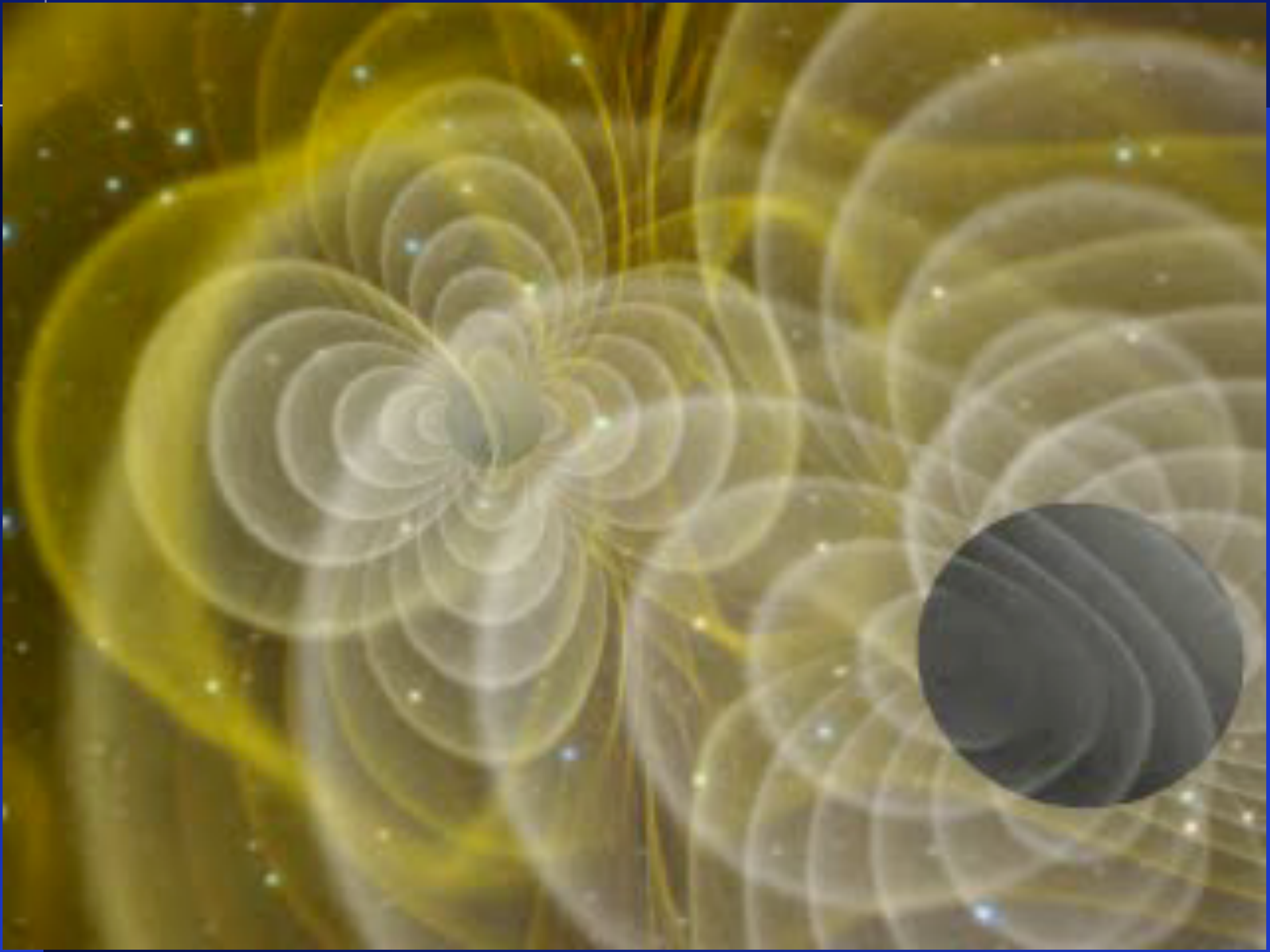
並列・高速 IO,
Data Management,
可視化

Checkpointing

Interactive
monitoring, steering,
visualization, portals

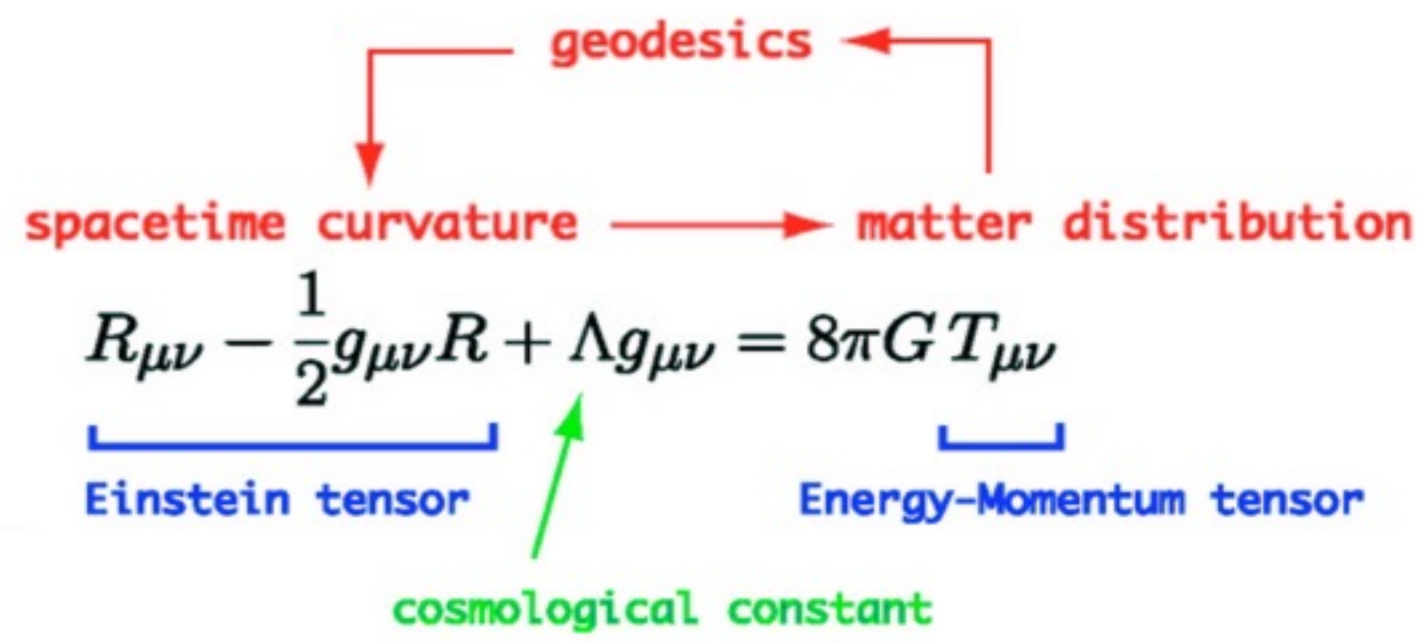
富士通SS研　発表資料 2003/1

ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)

数値相対論（Numerical Relativity)



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

「数値シミュレーションを行う」

しかし，何故か難しい．何故かできない．(90年代)

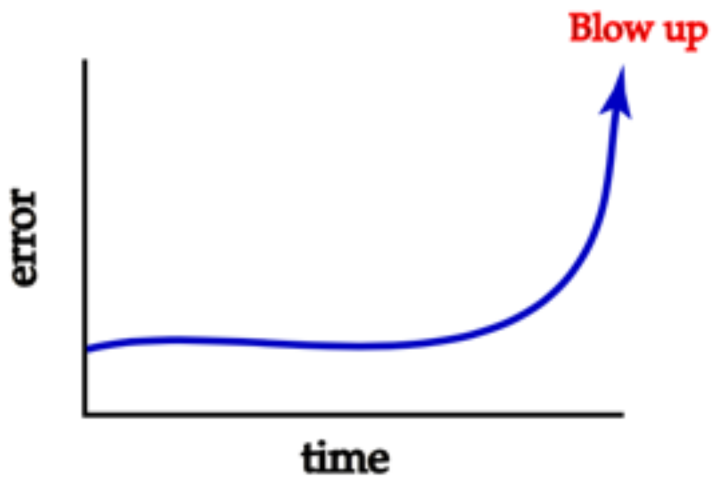
4本の楕円型偏微分方程式
6本の双曲型偏微分方程式
座標条件（ゲージ条件）
ブラックホールの取り扱い
・・・・・

スパコン能力不足？

使っている方程式が悪かった

(90s-2006)

Einstein方程式の定式化問題 ： 発散を起こさないように Lagrange乗数法 を使え！



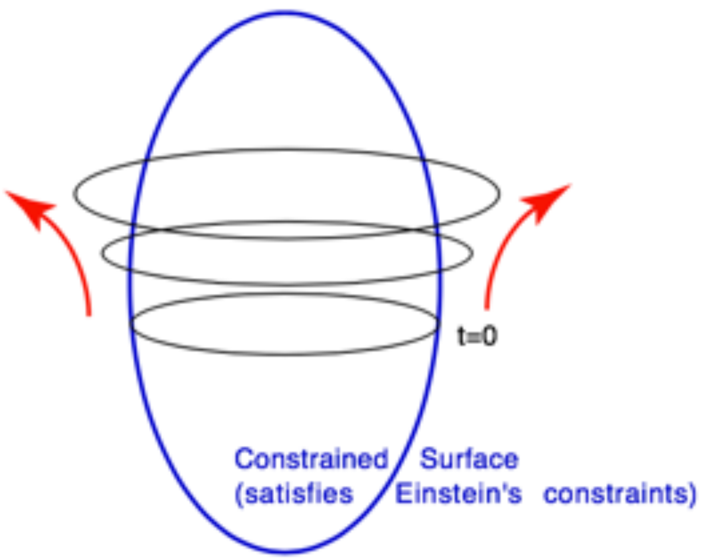


Fig. 1. Origin of the problem for numerical relativists: Numerical evolutions depart from the constraint surface.

“adjusted method”

“constraint-damping technique”

The Adjusted system (procedures): **Box 2.9**

1. Prepare a set of evolution eqs. $\partial_t u = J\partial_i u + K$
2. Add constraints in RHS $\partial_t u = J\partial_i u + K \underbrace{+\kappa C}$
3. Choose the coeff. κ so as to make the eigenvalues of the homogenized adjusted $\partial_t C$ eqs negative reals or pure imaginary. (See Box 3.2 and 3.3) $\partial_t C = D\partial_i C + EC$, $\partial_t C = D\partial_i C + EC \underbrace{+F\partial_i C + GC}$

The details are in §3.

Formulations of the Einstein Equations for Numerical Simulations

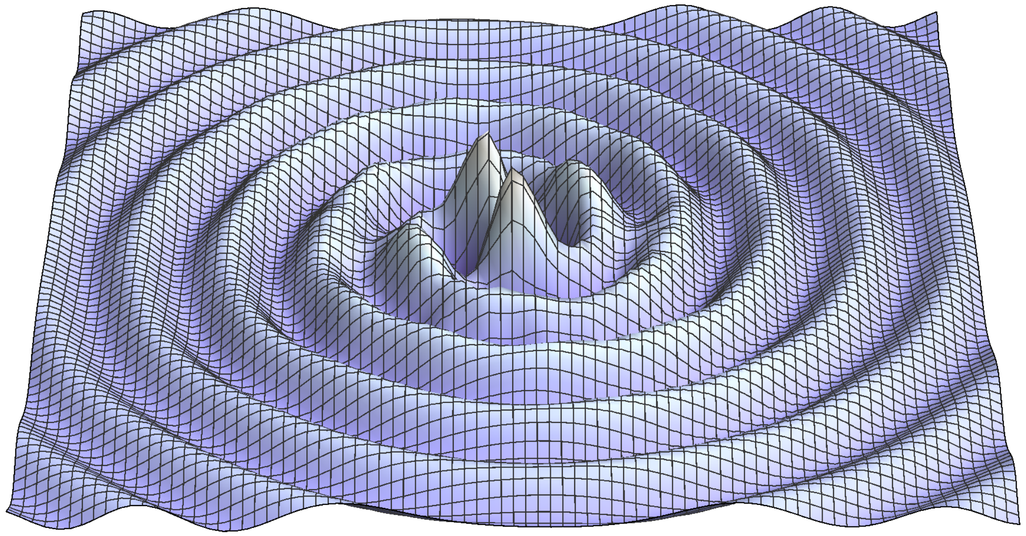
Hisa-Aki Shinkai*

Department of Information Systems, Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology, Kitayama 1-79-1, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan

(Received 24 January 2008)

We review recent efforts to re-formulate the Einstein equations for fully relativistic numerical simulations. The so-called numerical relativity is a promising research field matching with ongoing gravitational wave observations. In order to complete long-term and accurate simulations of binary compact objects, people seek a robust set of equations against the violation of constraints. Many trials have revealed that mathematically equivalent sets of evolution equations show different numerical stabilities in free evolution schemes. In this article, we overview the efforts of the community, categorizing them into three directions: (1) modifying of the standard Arnowitt-Deser-Misner (ADM) equations initiated by the Kyoto group [the so-called Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura (BSSN) equations], (2) rewriting the evolution equations in a hyperbolic form and (3) constructing an “asymptotically constrained” system. We then introduce our series of works that tries to explain these evolution behaviors in a unified way by using an eigenvalue analysis of the constraint-propagation equations. The modifications of (or adjustments to) the evolution equations change the character of constraint propagation and several particular adjustments using constraints are expected to damp the constraint-violating modes. We show several sets of adjusted ADM and BSSN equations, together with their numerical demonstrations.

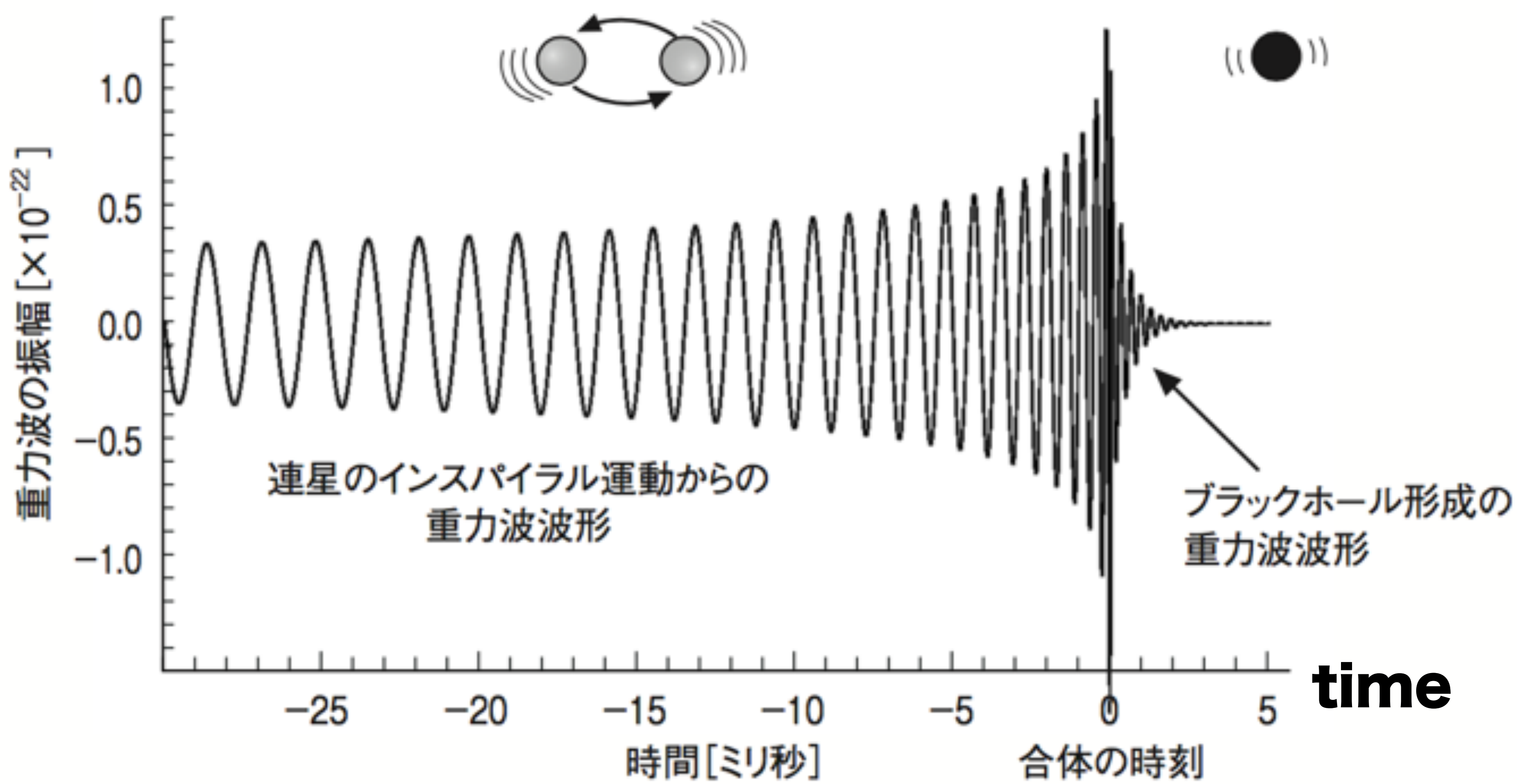
Journal of the Korean Physical Society, Vol. 54, No. 6, June 2009, pp. 2513~2528



NS-NS
NS-BH
BH-BH

Inspiral | Merger | Ringdown

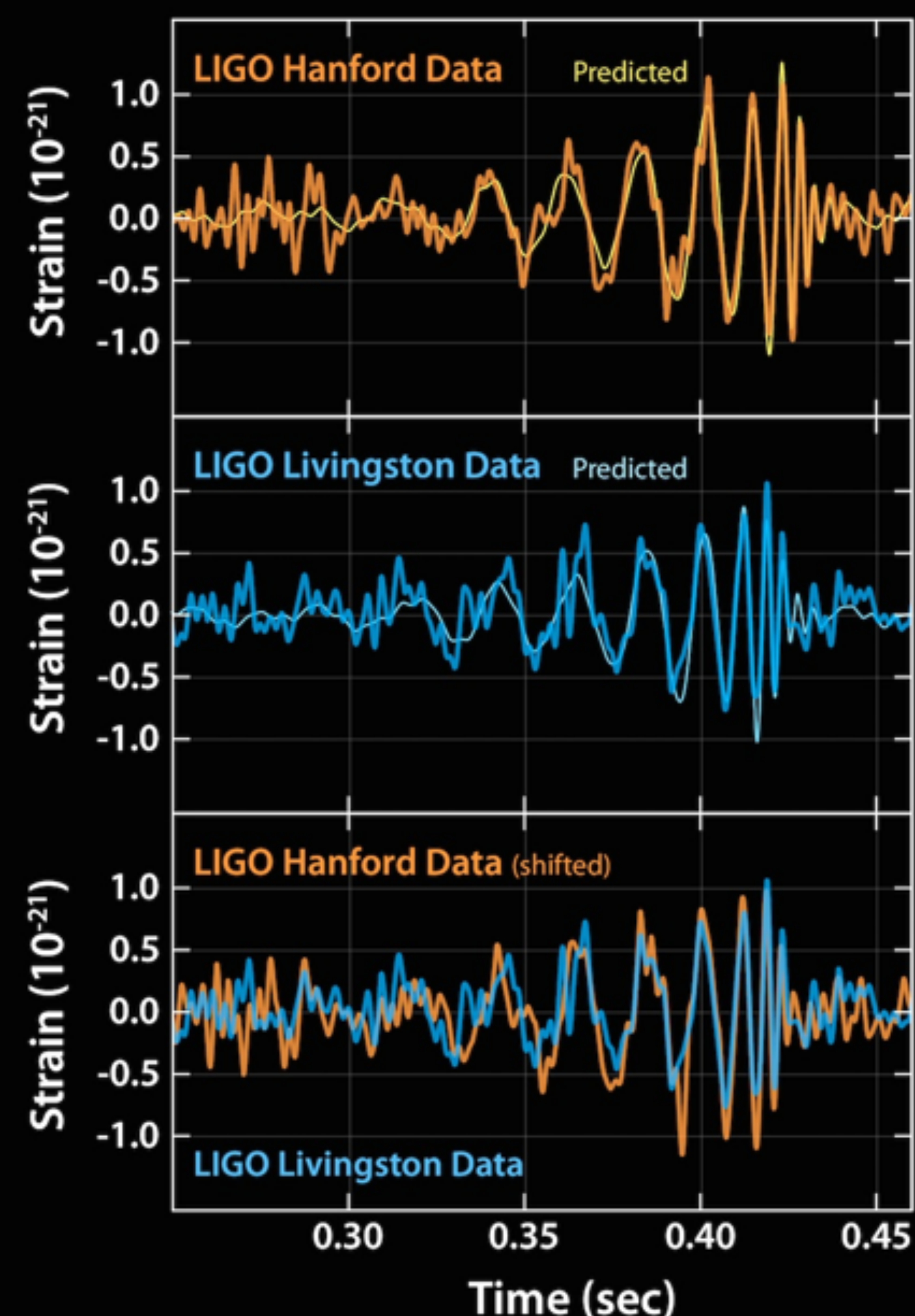
h



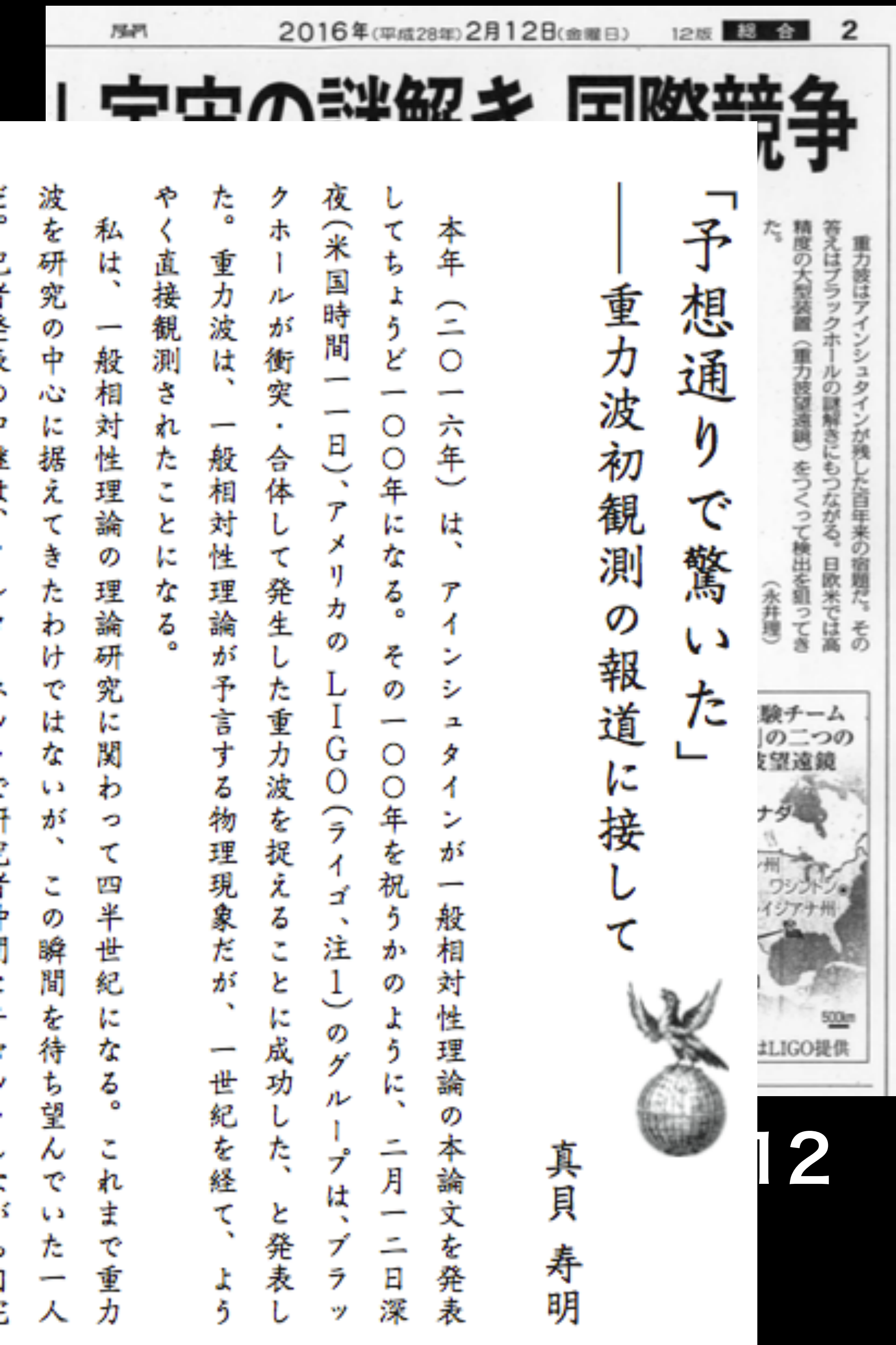
time

2016年2月，LIGOが重力波を初めて検出した，と発表した

2015年9月14日



2016年2月，LIGOが重力波を初めて検出した，と発表した


2016年(平成28年)2月12日(金曜日) 12版 総合 2

宇宙の謎解き 国際競争

重力波はアインシュタインが残した百年来の宿題だ。その答えはブラックホールの謎解きにもつながる。日欧米では高精度の大型装置（重力波望遠鏡）をつくって検出を狙ってきた。（永井理）

「予想通りで驚いた」
——重力波初観測の報道に接して

真貝寿明

本年（二〇一六年）は、アインシュタインが一般相対性理論の本論文を発表してちょうど一〇〇年になる。その一〇〇年を祝うかのように、二月一二日深夜（米国時間一一日）、アメリカのLIGO（ライゴ、注1）のグループは、ブラックホールが衝突・合体して発生した重力波を捉えることに成功した、と発表した。重力波は、一般相対性理論が予言する物理現象だが、一世紀を経て、ようやく直接観測されたことになる。

私は、一般相対性理論の理論研究に関わって四半世紀になる。これまで重力波を研究の中心に据えてきたわけではないが、この瞬間を待ち望んでいた一人

「窮理」　2016/8


重力波 初の直接観測

「研究者勇気づけた」

大阪市大院・神田教授 学生らに解説

米国を中心とした国際研究チームが「重力波」を初めて直接観測したとの発表を受け、重力波の研究が専門の神田展行・大阪市立大大学院教授(51)は12日、発表内容についての説明会を大阪市住吉区の同大杉本キャンパスで開いた。成果を詳しく理解してもらう狙い。学生ら約100人が参加し、真剣な表情で聴き入った。【畠山哲郎】

神田教授は、岐阜県飛騨市の大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」のプロジェクトでもデータ管理グループのリーダーを務める。説明会では観測されたデータの見方などを解説し「我々にとっても勇気づけられるものだった」と語った。発表を受けて、研究室の学生が締め切り間際の論文を慌てて書き換えたエピソードを披露すると、会場は笑いに包まれた。

同大大学院理学研究科2年の和知慎吾さん(23)は「重力波だけでなく、ブラックホールも直接観測したことになると分かり、ためになった」と話していた。

重力波は、質量を持った物体が動いた時に周囲の時空にゆがみが生じ、そのゆがみが光速でさざ波のように宇宙空間に伝わる現象。物理学者のアインシュタインが「一般相対性理論」で存在を予言し、世界中の研究者が観測に挑戦していた。

重力波観測について解説する大阪市立大学大学院理学研究科の神田展行教授＝大阪市住吉区で、川平愛撮影

大阪工大 真貝教授「予想通りで驚いた」

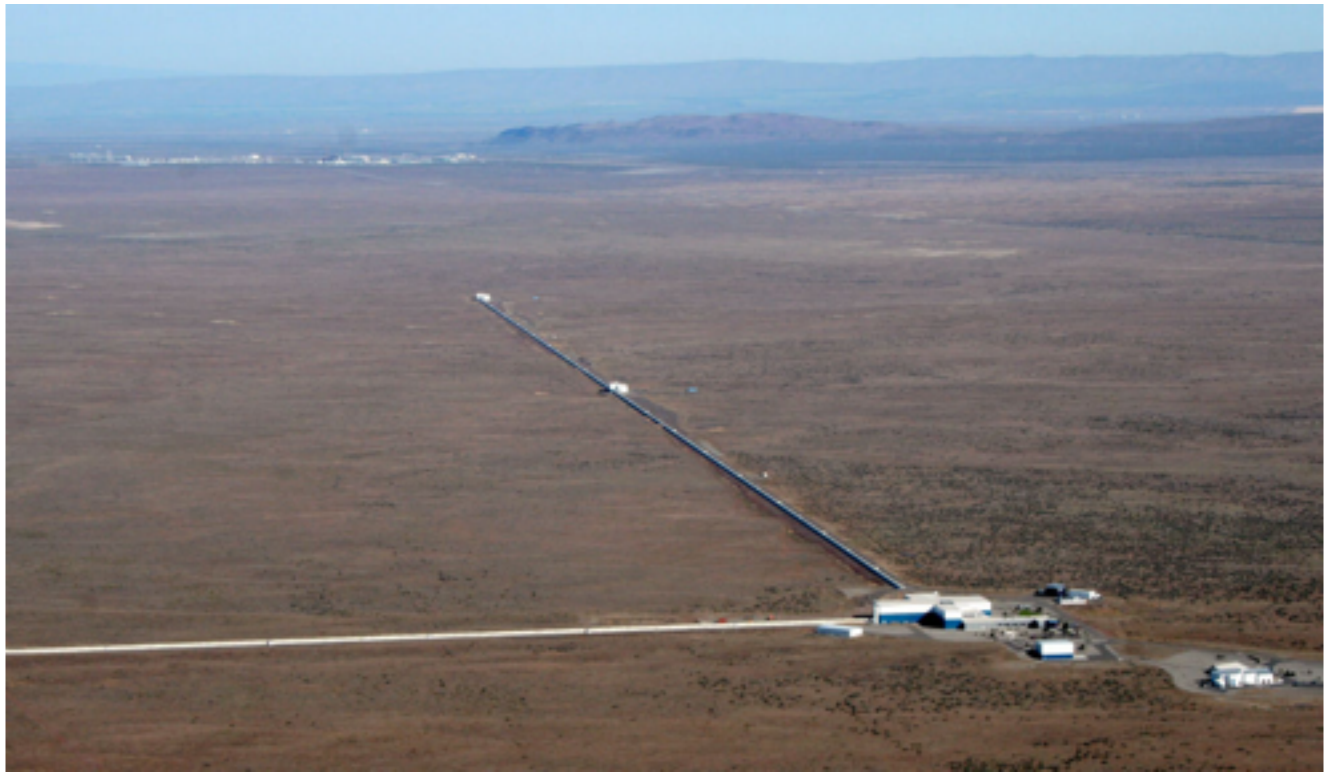
大阪工業大情報科学部の真貝寿明教授（一般相対性理論）は「祝・重力波の直接検出」と題して、研究室のウェブページに一般向けの緊急解説記事を掲載した。昨年には一般向けの解説書「ブラックホール・膨張宇宙・重力波 一般相対性理論の100年と展開」を出版している。「こんなにも予想通りのものが見つかるのかと驚いた。素晴らしい発見だ」と感想を語った。

今後の研究については「日本でもKAGRAを使い、改めて重力波を確認したり、海外のチームと協力して重力波がどこから来たものなのかを調べたりしていくことが重要だ」と話した。【畠山哲郎】

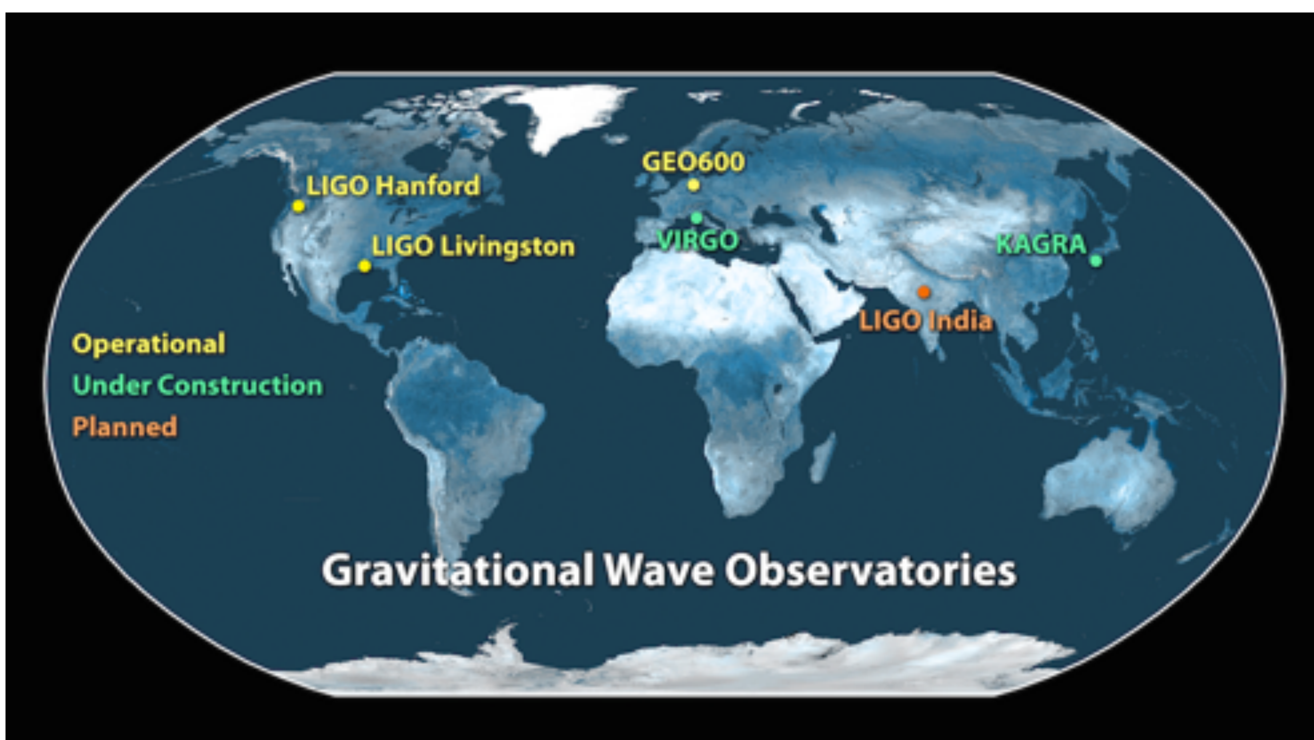
毎日新聞　2016/2/13

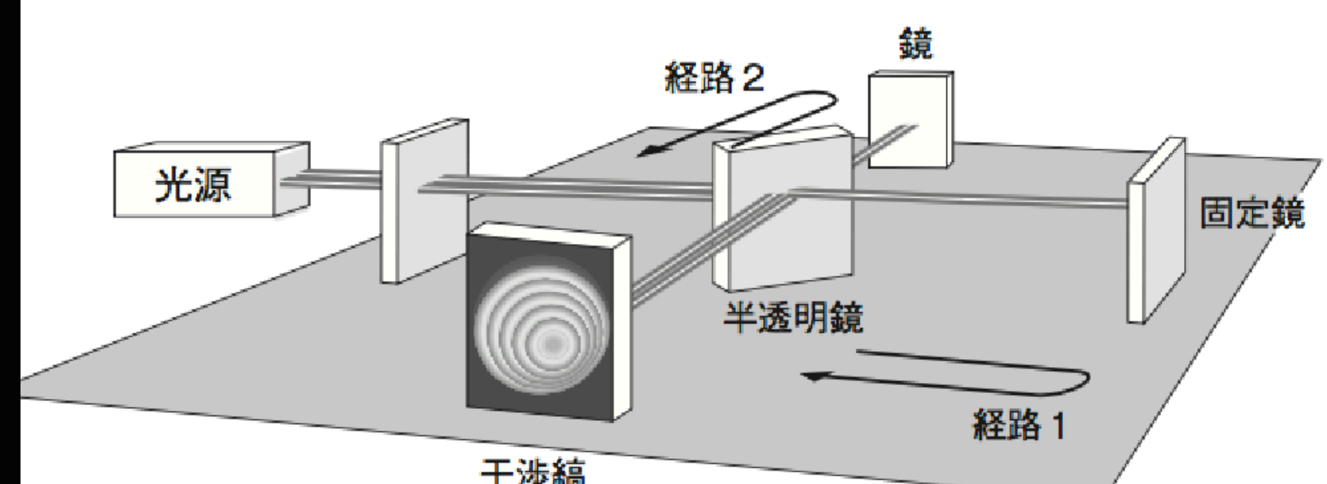
LIGO（ライゴ：レーザー干渉計重力波天文台）

Laser Interferemeter Gravitational-Wave Observatory　（1992年予算承認）

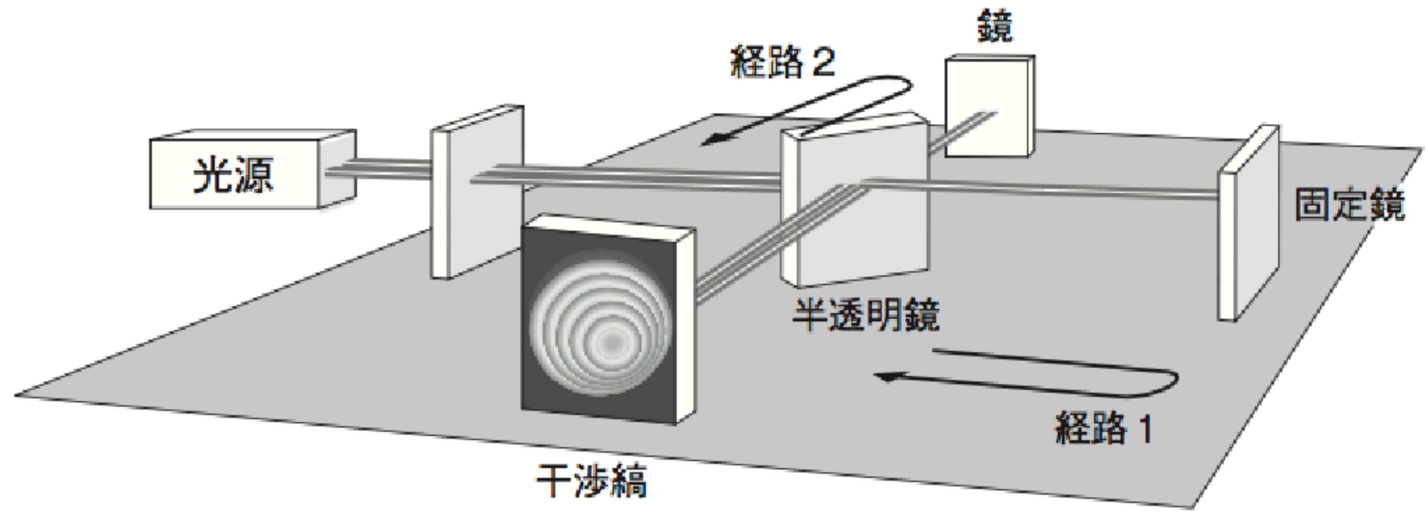


https://mediaassets.caltech.edu/gwave





干渉計のしくみ



光の重ね合わせで強めあったり弱めあったりする現象（干渉）を利用して，微小な長さを測る

朝日新聞　2015/11/5

KAGRA（かぐら：大型低温重力波望遠鏡）

Kamioka Gravitational wave detector, **(Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)**

望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設
地面振動が小さい岐阜県飛騨市にある神岡鉱山

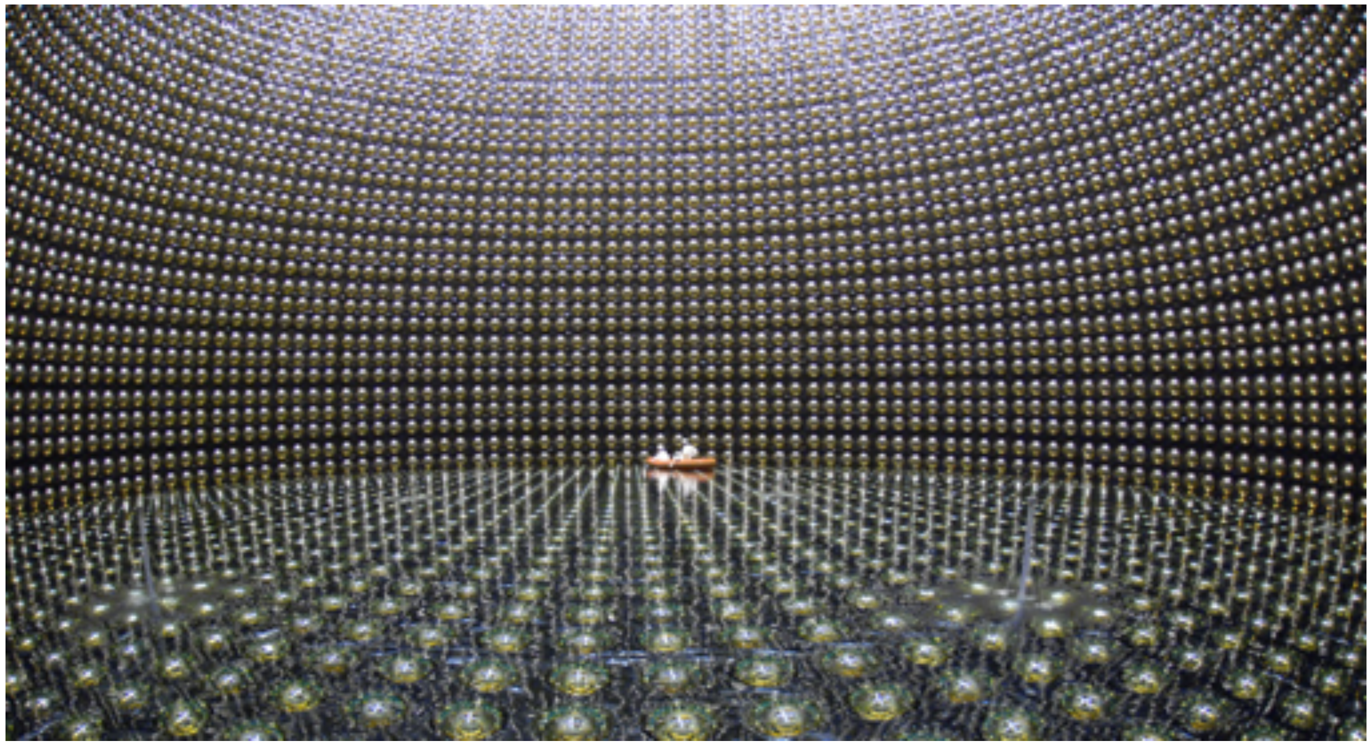
鏡をマイナス250度（20K）まで冷却
熱雑音を小さくするため

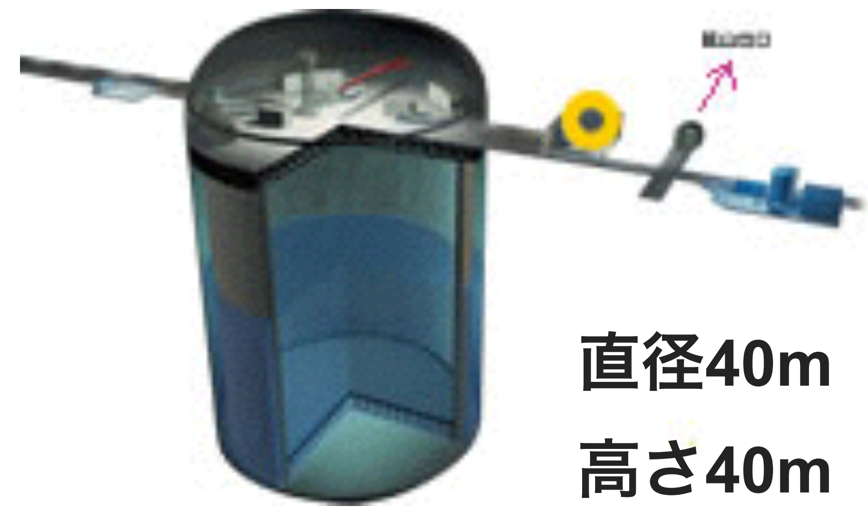
鏡の材質としてサファイア
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/history

スーパー・カミオカンデ（ニュートリノ観測装置）

Super-Kamiokande　　http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/





直径40m

高さ40m

岐阜県・神岡の鉱山跡の空洞に巨大な水槽をつくり，
宇宙から飛来するニュートリノを観測する．

ノーベル物理学賞を受賞

小柴昌俊（2002年）

梶田隆章（2015年）

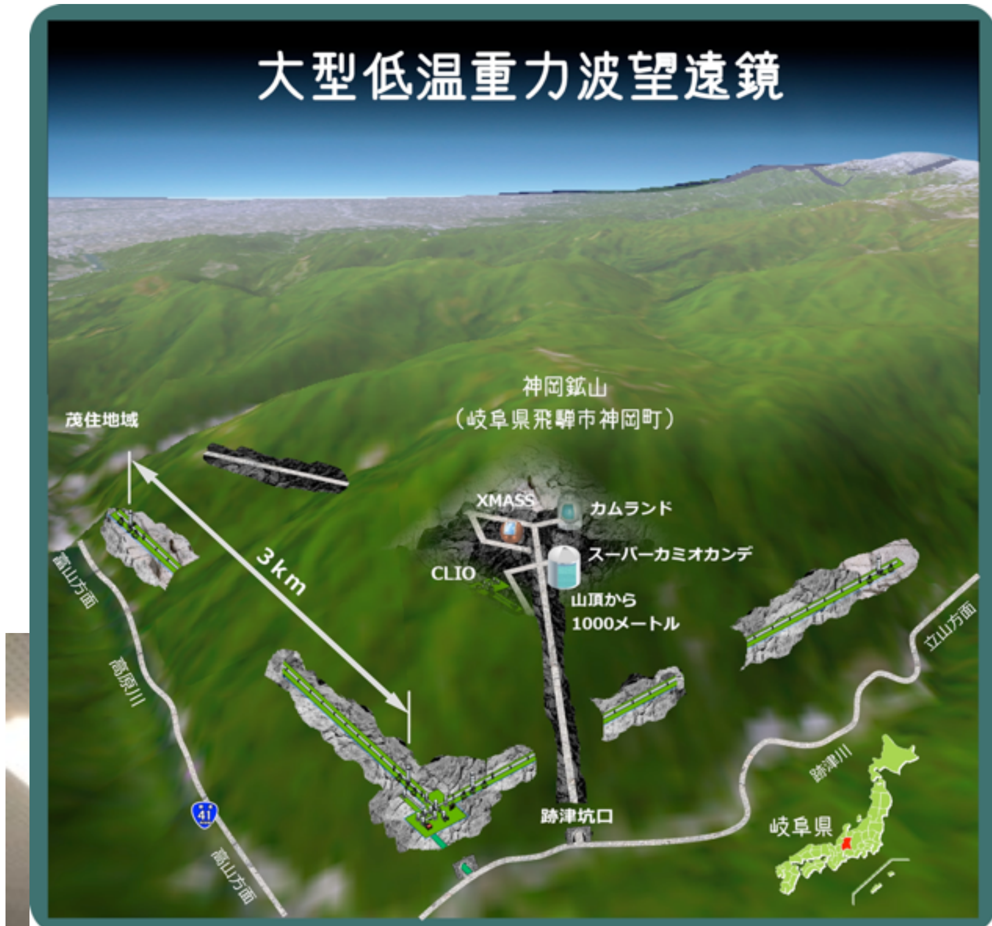
KAGRA（かぐら：大型低温重力波望遠鏡）

2015年8月

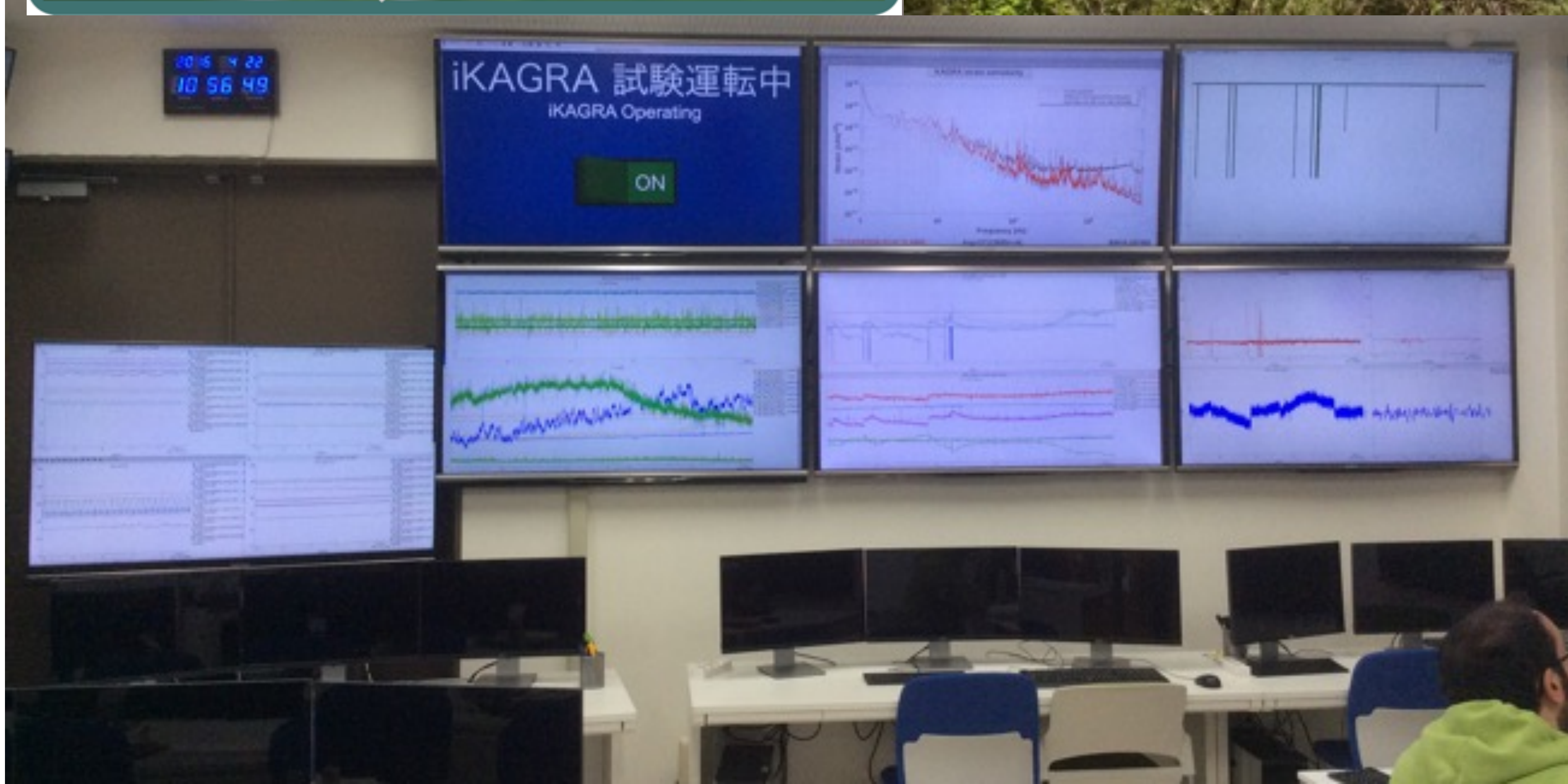
Hisaaki Shinkai

Seiji Kawamura　　Kieran Craig
Martynov Denis

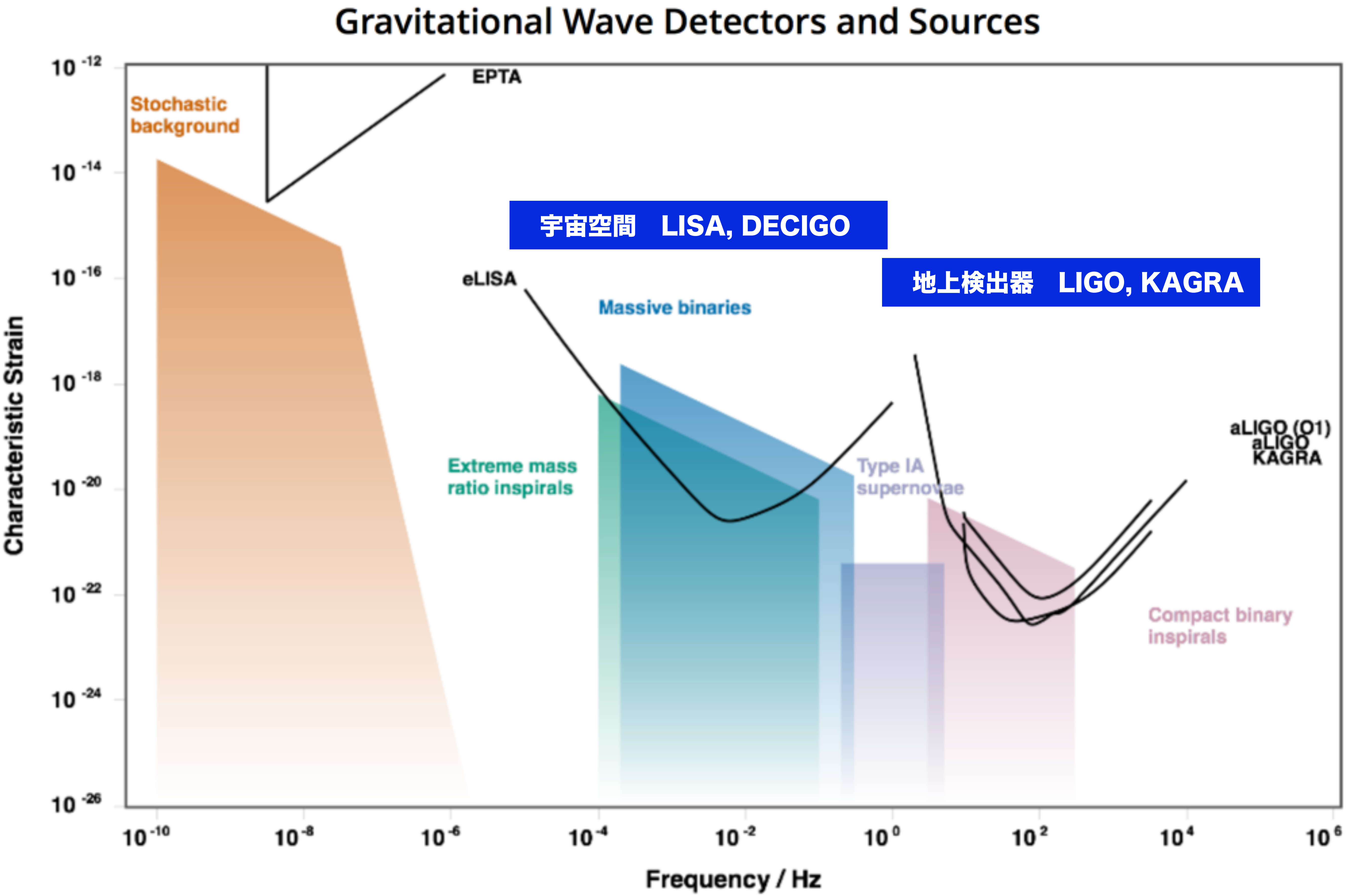
KAGRA（かぐら：大型低温重力波望遠鏡）



2016年4月

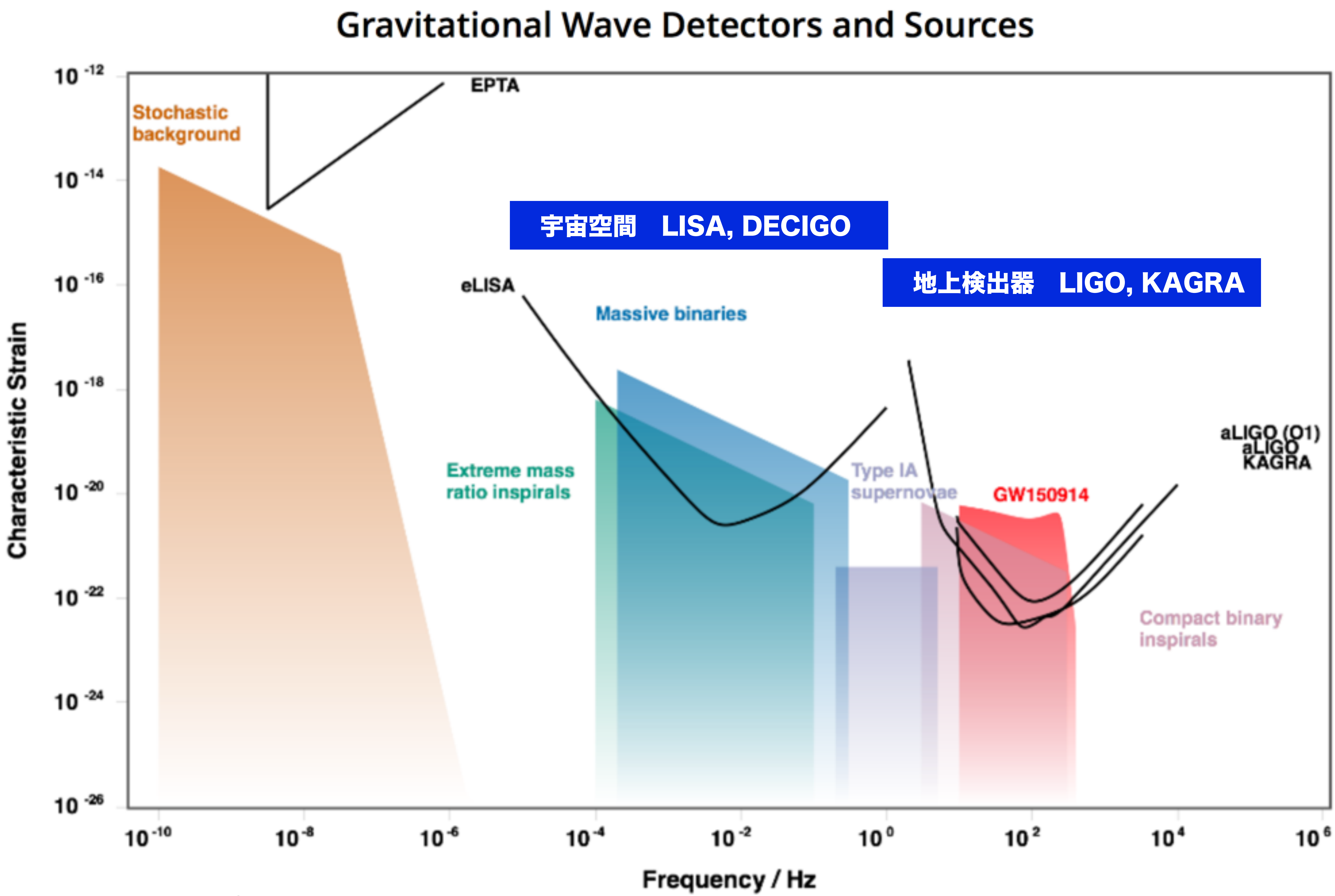


重力波検出器の感度と予想される波源



http://rhcole.com/apps/GWplotter/

重力波検出器の感度と予想される波源



http://rhcole.com/apps/GWplotter/

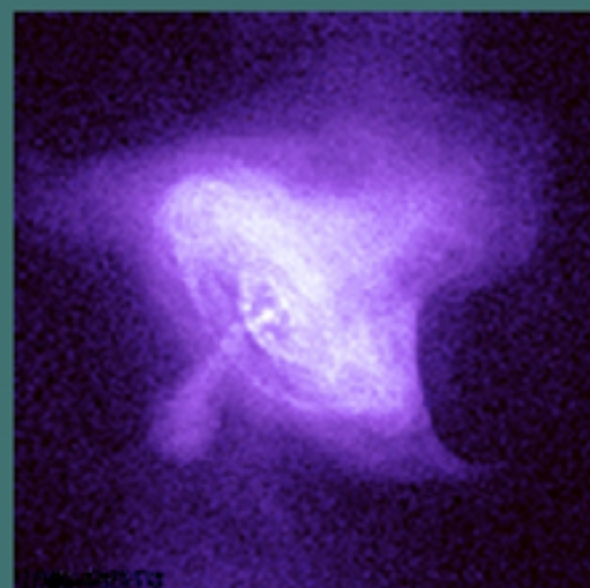
重力波の波源

sources of gravitational wave

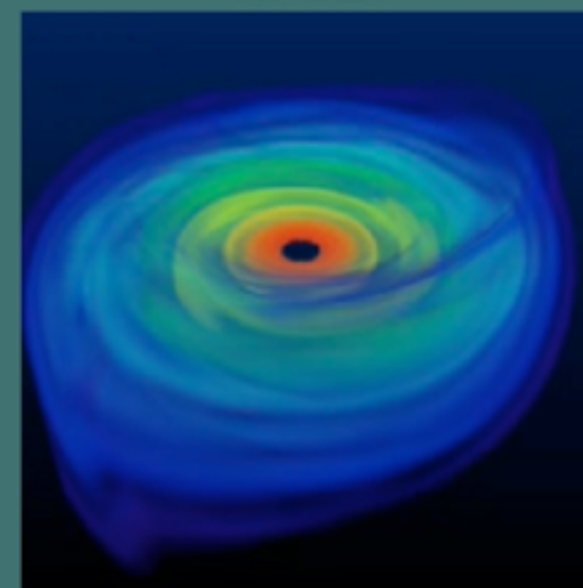
http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/

超新星爆発（写真出典：NASA）

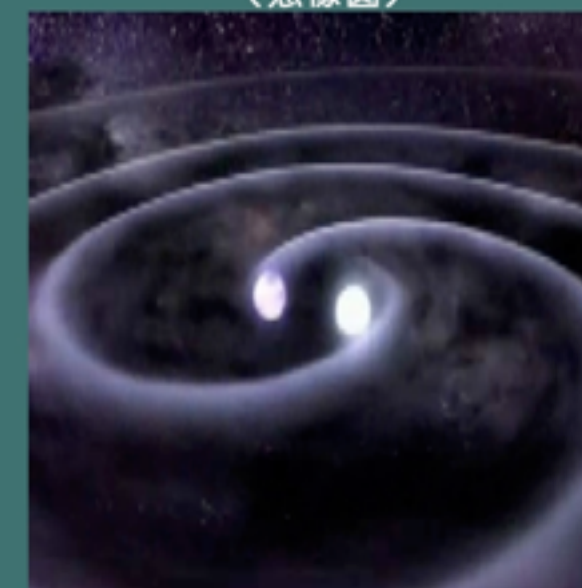
パルサー（写真出典：NASA）



ブラックホール（想像図）



連星中性子星合体（想像図）



予測が難しい

振幅が小さい

振幅が小さい

連星合体をターゲットに

重力波は弱いのであらかじめ，波形の予測が必要

ノイズにまみれたデータに，予測した波形があるか探す

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PRL **116**, 061102 (2016) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 12 FEBRUARY 2016

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*[*]
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21}. It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ. The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

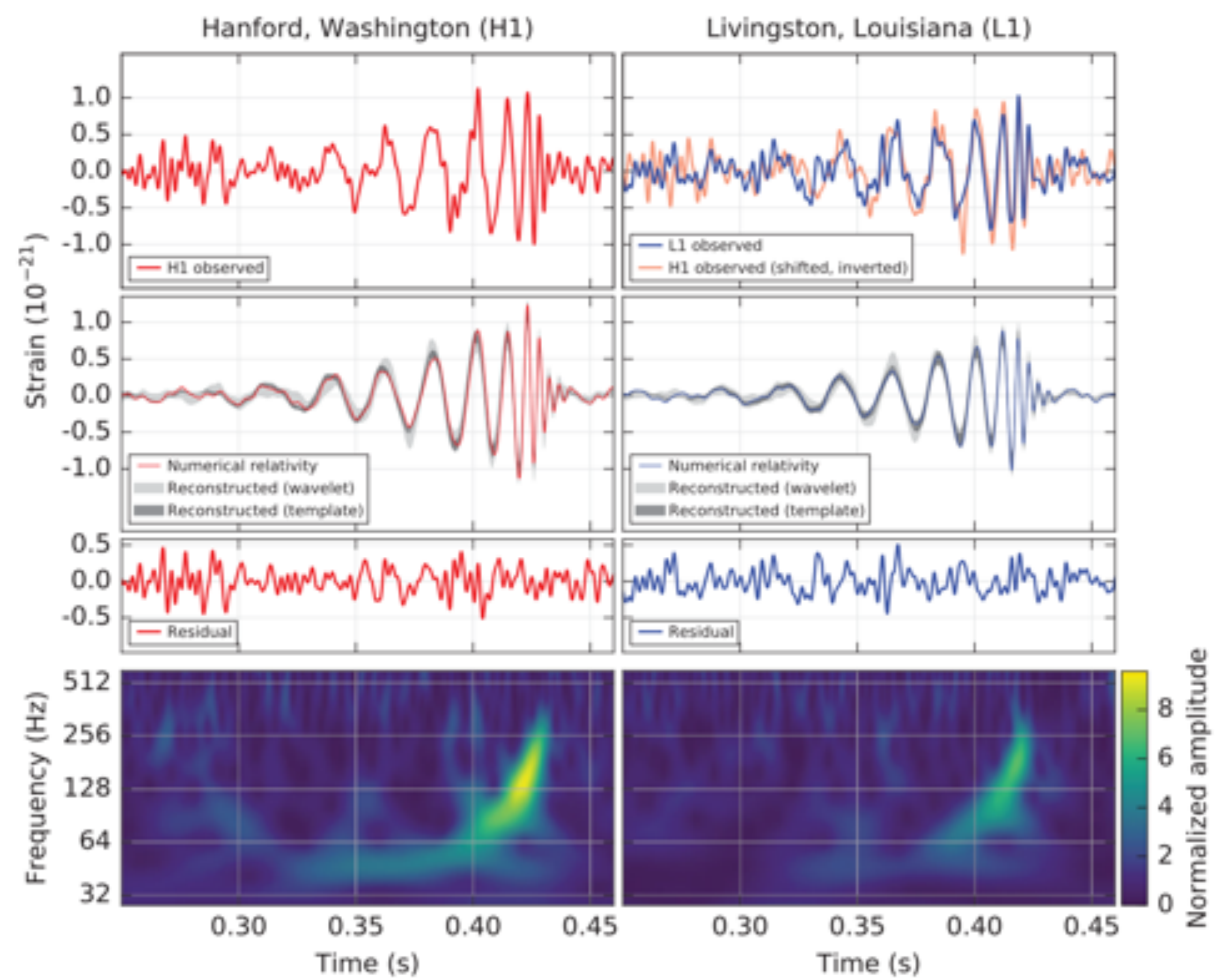
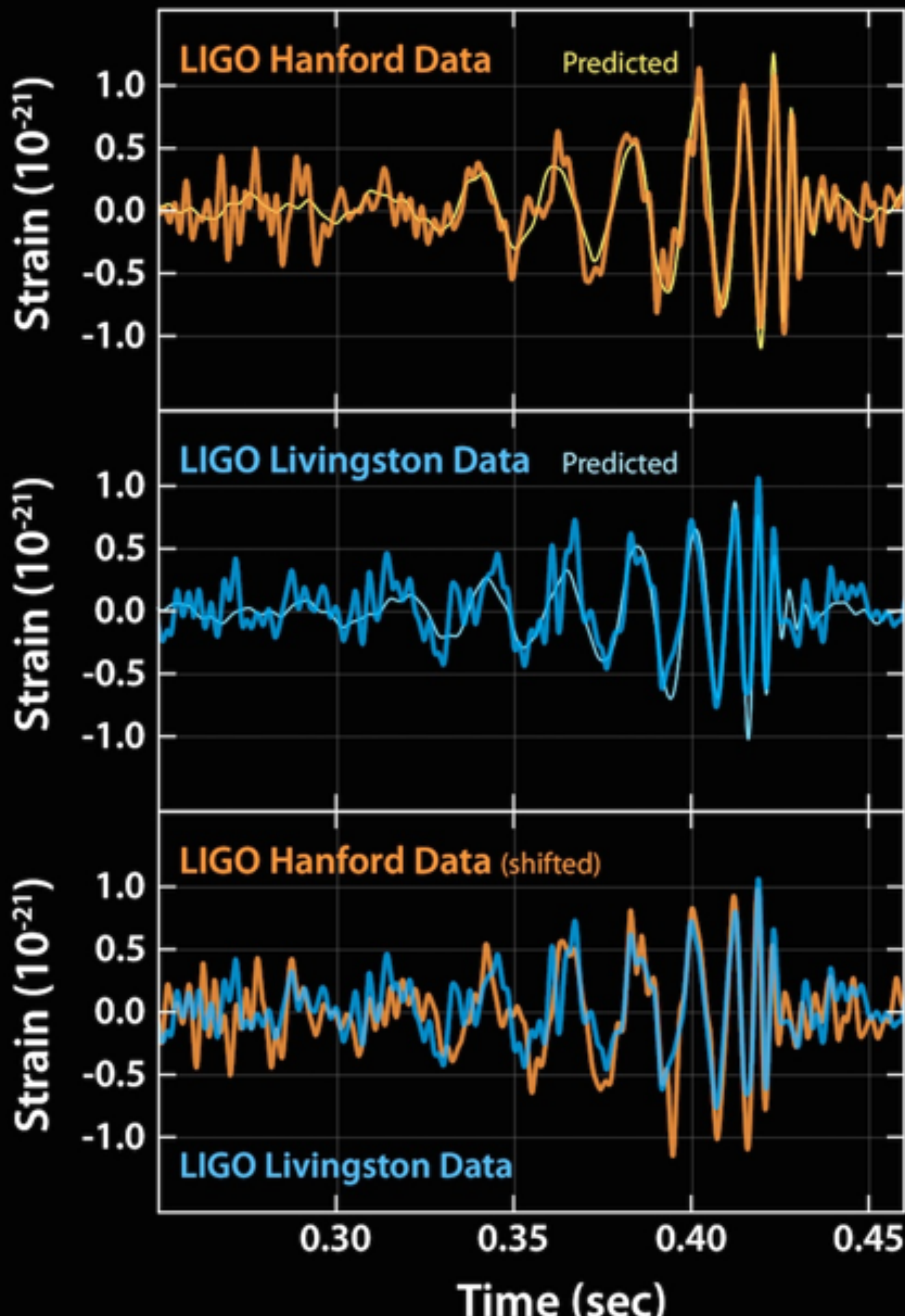
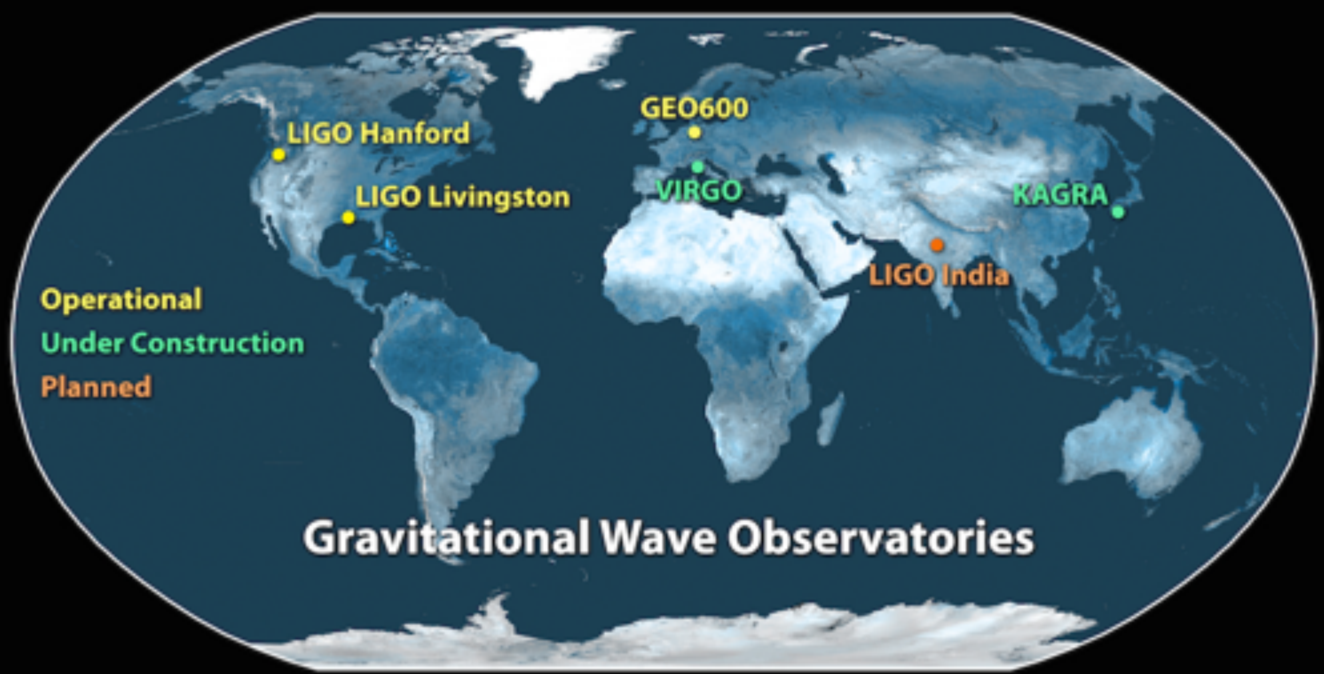


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right

2015年9月14日





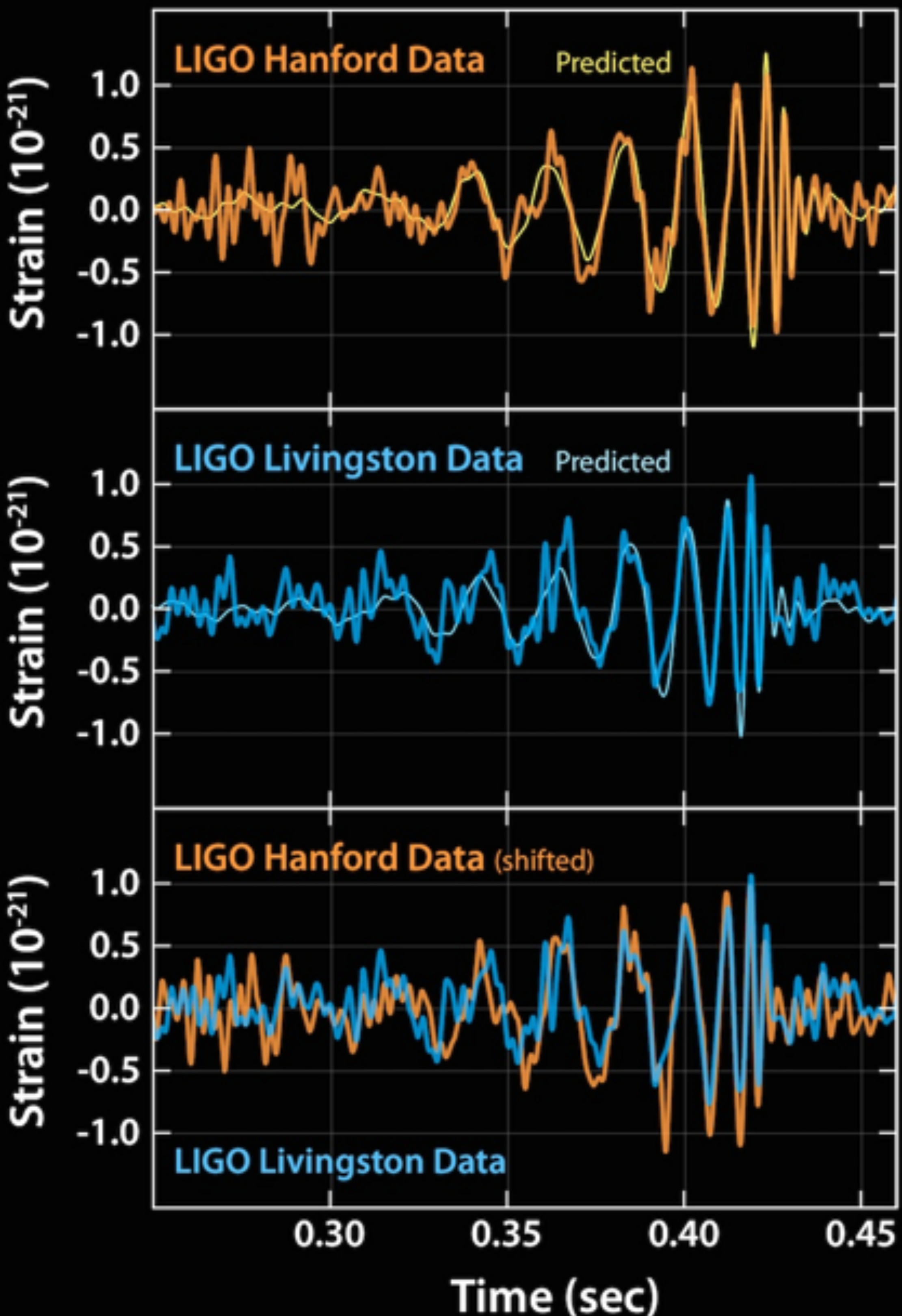
太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して，
太陽の62倍のブラックホールになった．

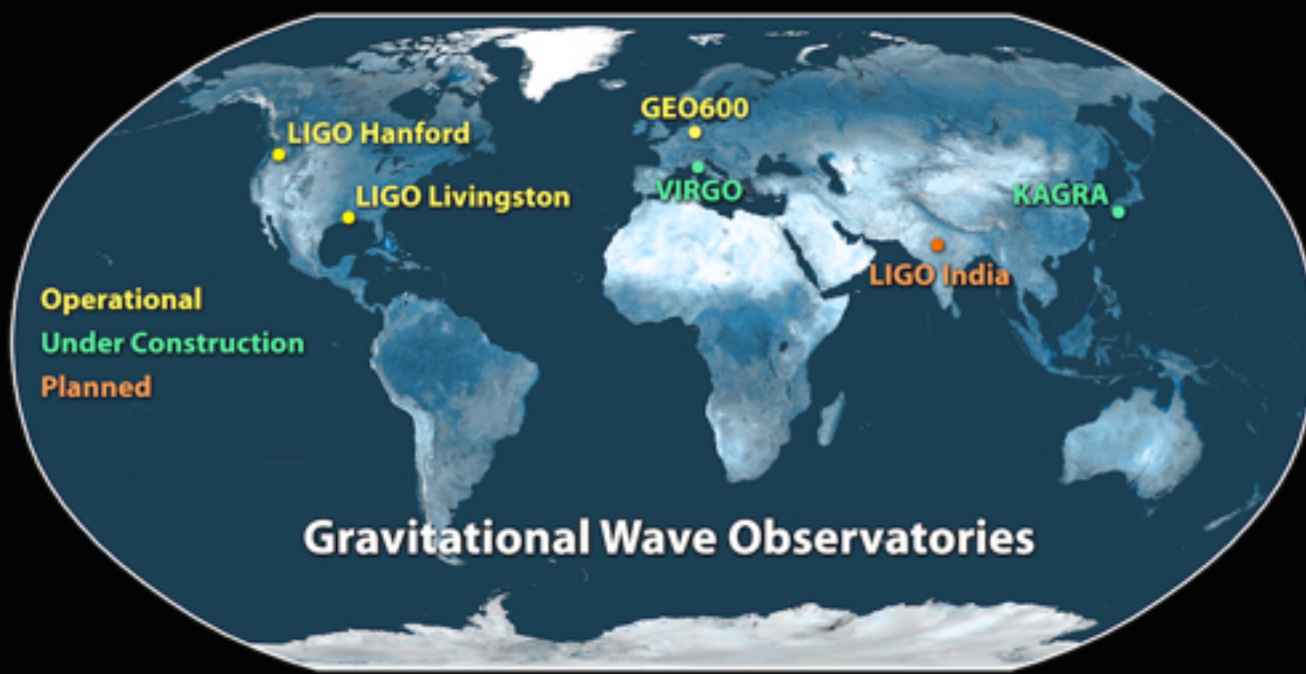
3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先

2015年9月14日





重力波が検出された！

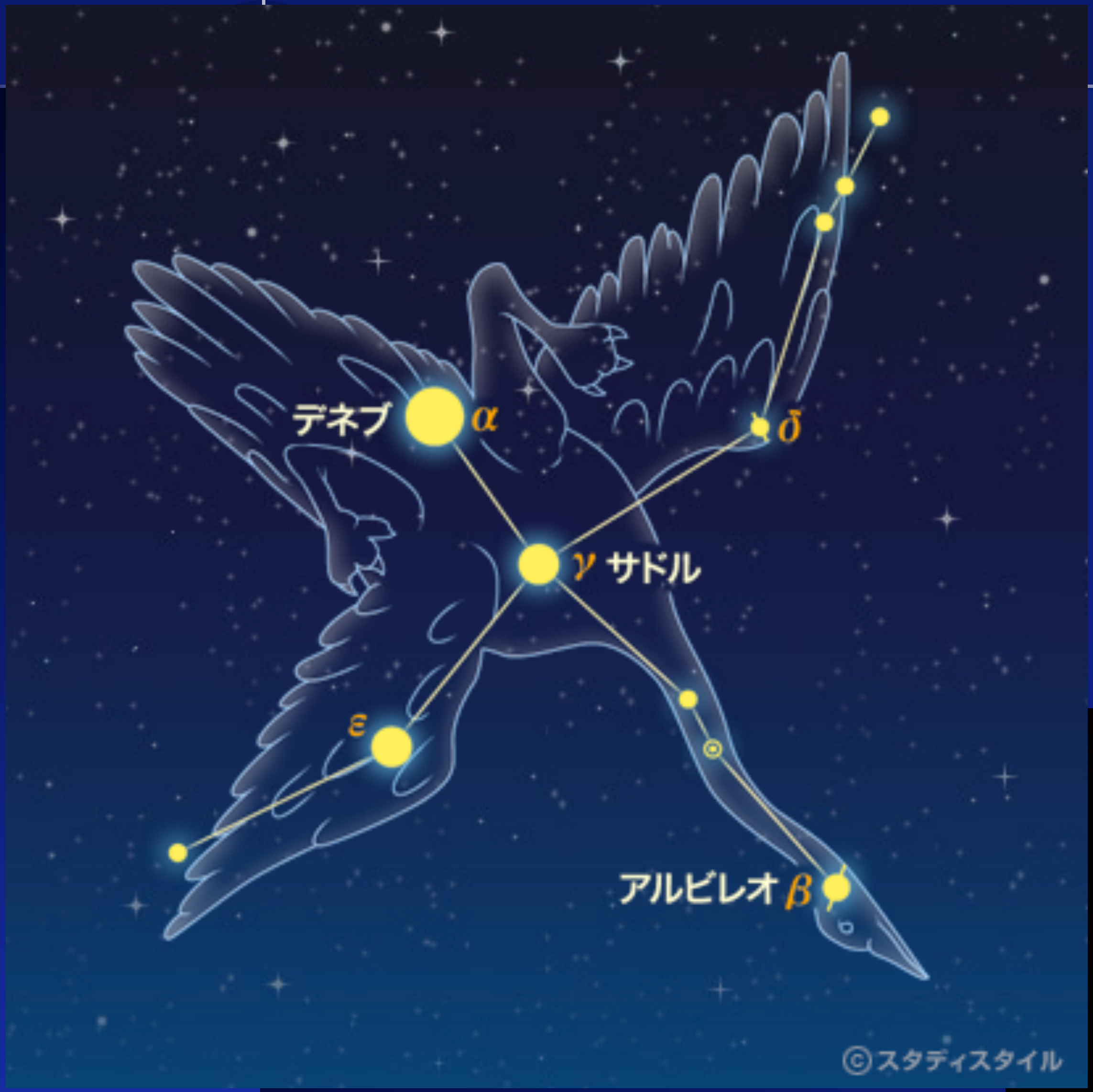
重力波が検出できた！

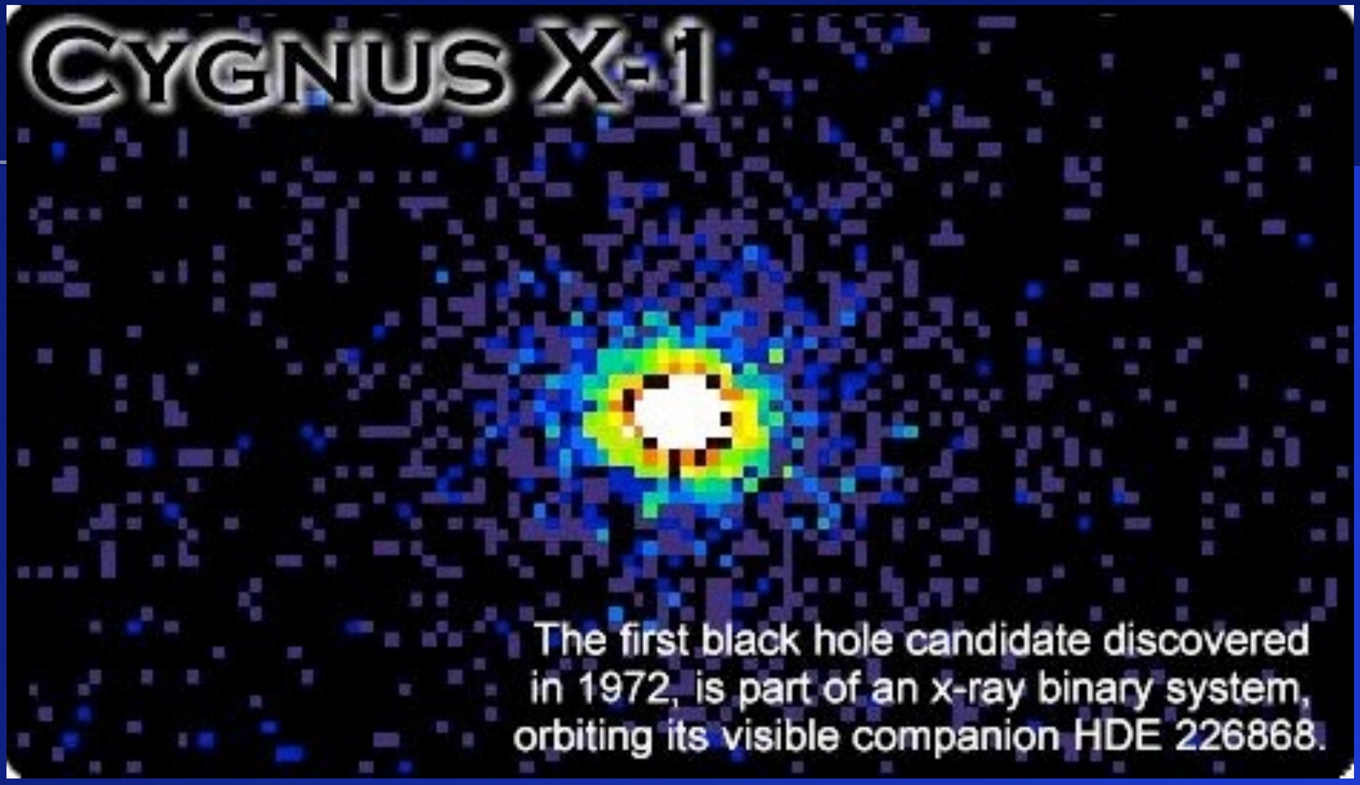
ブラックホールが存在した！

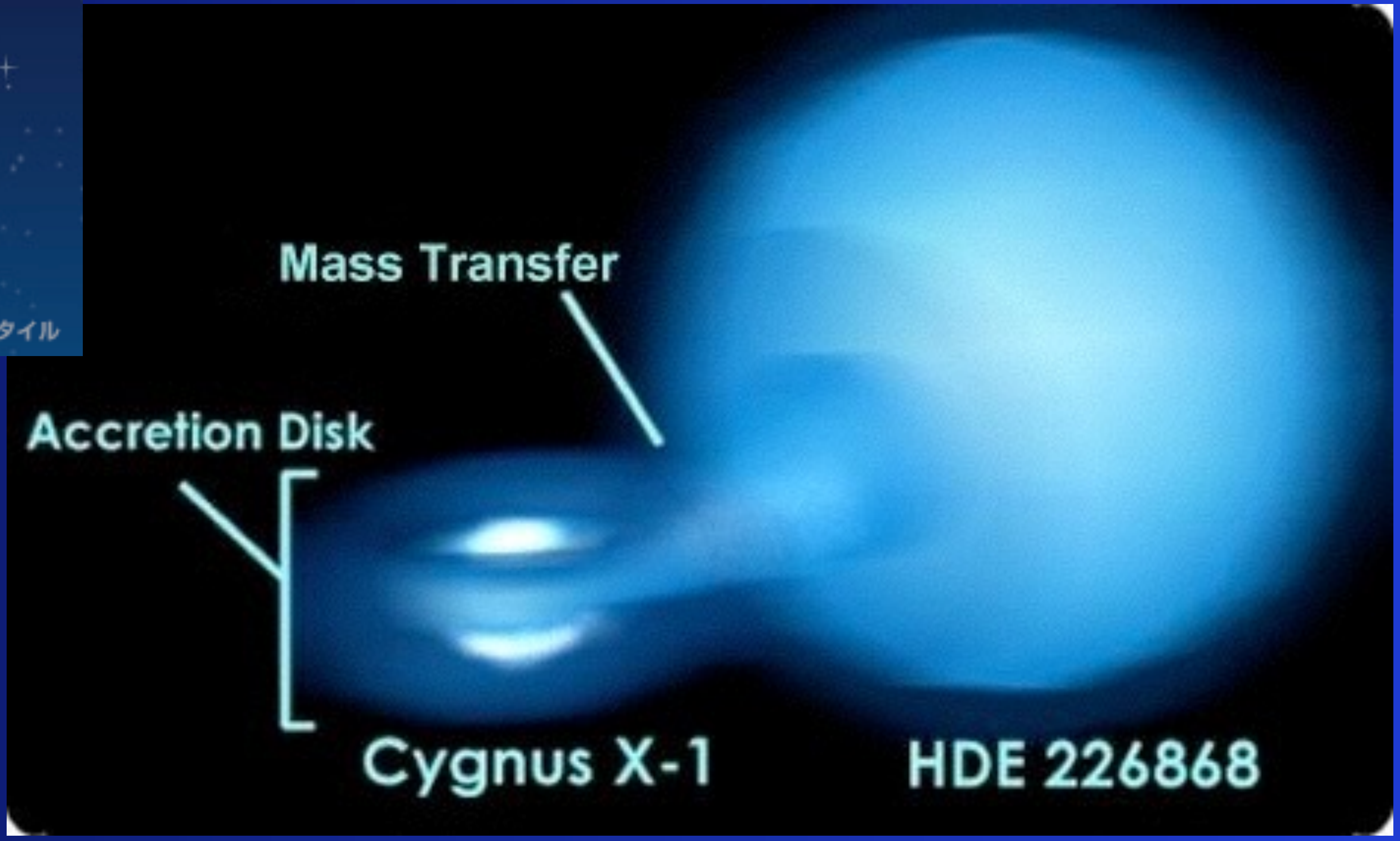
ブラックホール連星が存在した！

相対性理論，正しかった！

BH candidate: Cygnus X-1







Interstellar (2014)

Executive Producer: Kip Thorne

https://www.youtube.com/watch?v=qZZ9jRan9eo

重力波天文学で何がわかる？

対応する天体の姿

→ 天体物理学

ブラックホールの存在する強い重力場

→ 一般相対性理論の検証

中性子星連星合体のふるまい

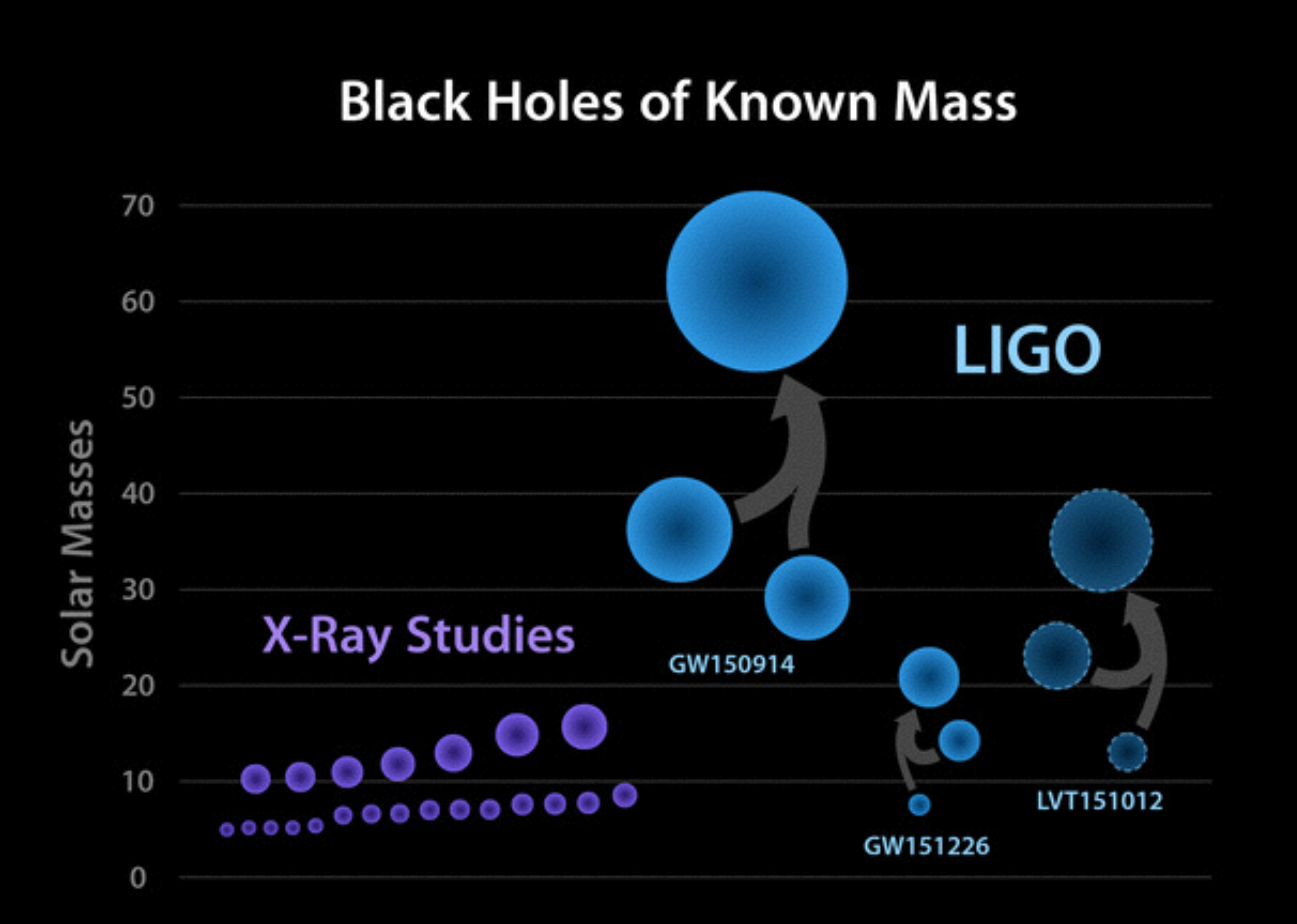
→ 原子核の状態方程式

イベント頻度・統計

→ 星形成モデル・銀河中心ブラックホール
宇宙論パラメータ

背景重力波の存在

→ 星形成モデル・宇宙初期モデル



https://www.ligo.caltech.edu/system/avm_image_sqls/binaries/57/page/Black_Hole_Mass_Chart.jpg?1465864737

天の川銀河 (our Galaxy)

http://shop.nationalgeographic.com/ngs/product/maps/wall-maps/space-maps/the-milky-way-map%2C-laminated
http://ernstgraphics.wordpress.com/page/2/

Model of SMBH (super-massive black-hole)

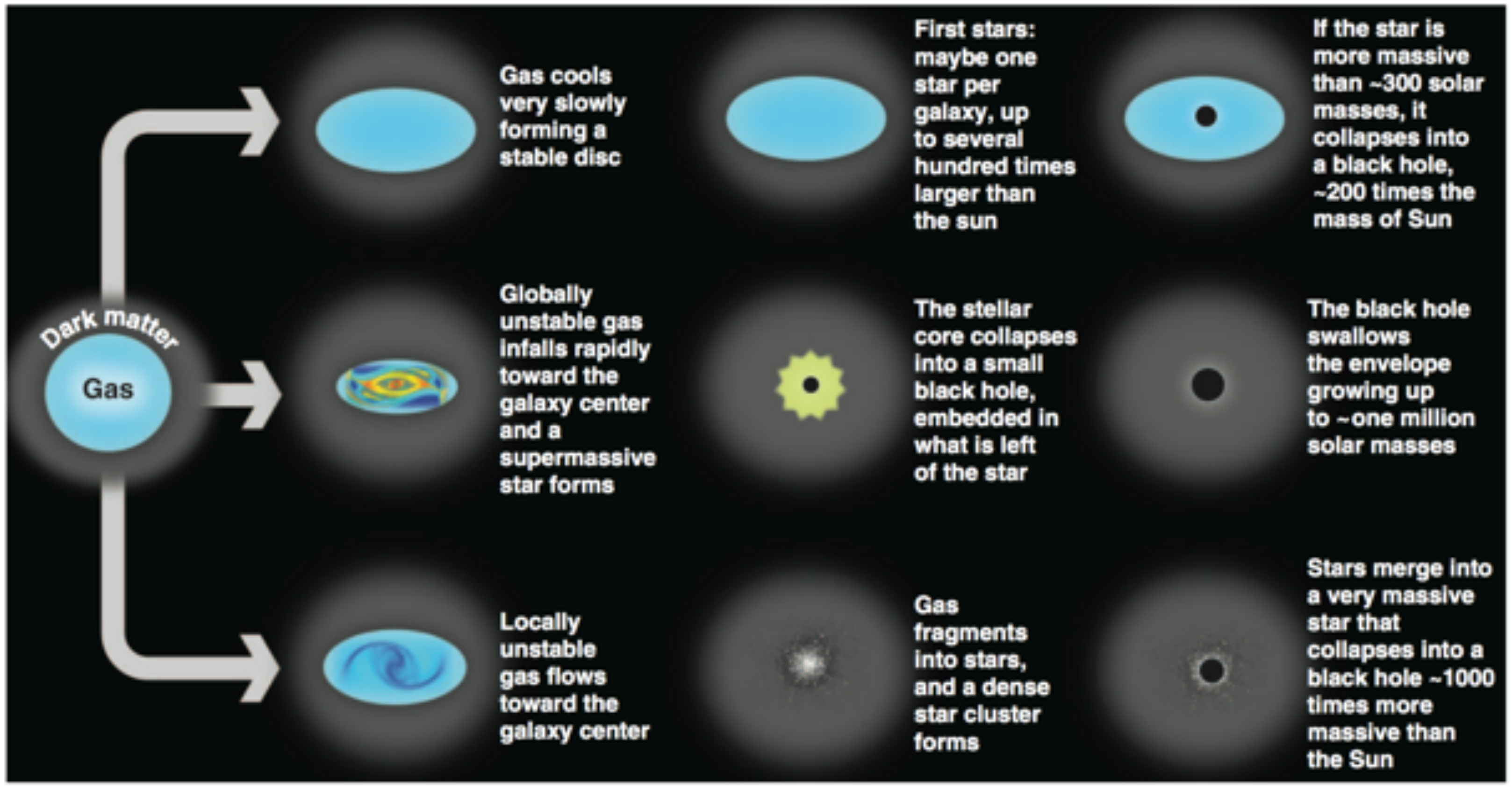


Fig. 1. Illustration showing three pathways to MBH formation that can occur in a distant galaxy (*56*). The starting point is a primeval galaxy, composed of a dark matter halo and a central condensation of gas. Most of this gas will eventually form stars and contribute to making galaxies as we know them. However, part of this gas has also gone into making a MBH, probably following one of these routes.

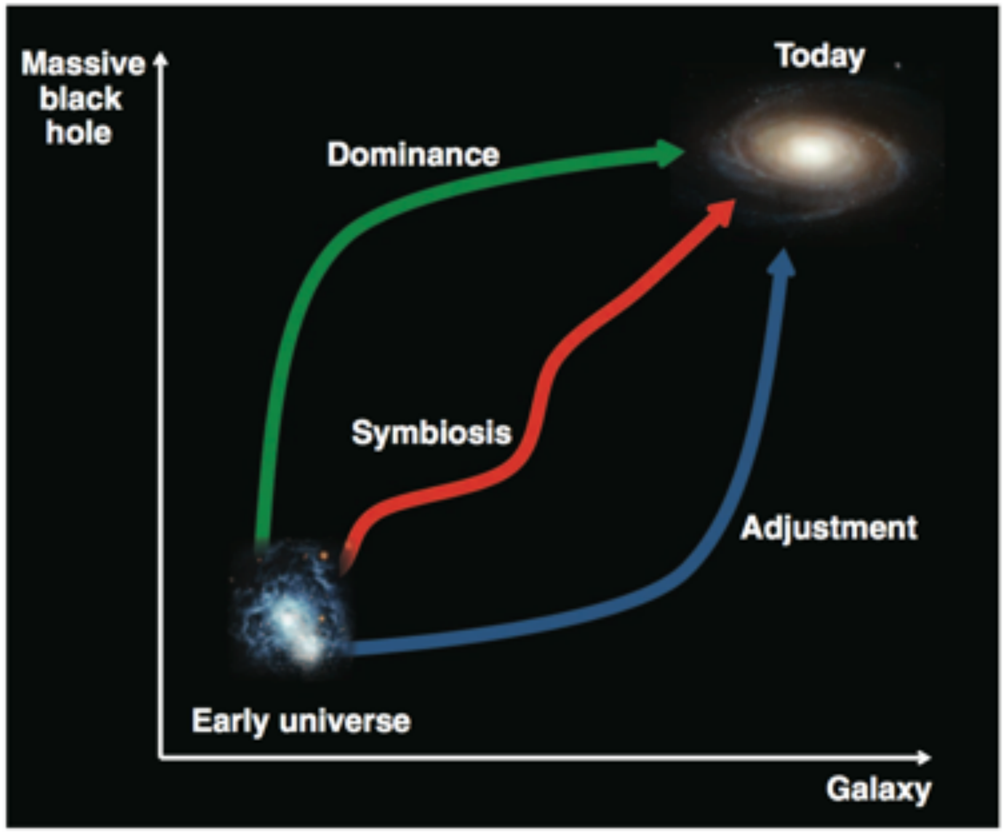


Fig. 3. Possible routes to MBH and galaxy coevolution, starting from black holes forming in distant galaxies in the early universe. [Image credits: NASA, European Space Agency (ESA), A. Aloisi (Space Telescope Science Institute and ESA, Baltimore, MD), and The Hubble Heritage Team (Space Telescope Science Institute/Association of Universities for Research in Astronomy)]

REVIEW

The Formation and Evolution of Massive Black Holes

M. Volonteri[1,2]

The past 10 years have witnessed a change of perspective in the way astrophysicists think about massive black holes (MBHs), which are now considered to have a major role in the evolution of galaxies. This appreciation was driven by the realization that black holes of millions of solar masses and above reside in the center of most galaxies, including the Milky Way. MBHs also powered active galactic nuclei known to exist just a few hundred million years after the Big Bang. Here, I summarize the current ideas on the evolution of MBHs through cosmic history, from their formation about 13 billion years ago to their growth within their host galaxies.

Volonteri, Science 337 (2012) 544

現在進行中の研究 （1）　BH連星合体から銀河中心SMBHの形成シナリオを決める

★BH連星合体が繰り返されて，SMBHが形成されると考える
★1つの銀河にいくつBH連星合体があるかを数える
★宇宙にいくつ銀河があるかを数える
★LIGOやKAGRAの検出器感度で，1年にいくつ観測できるのか予想する

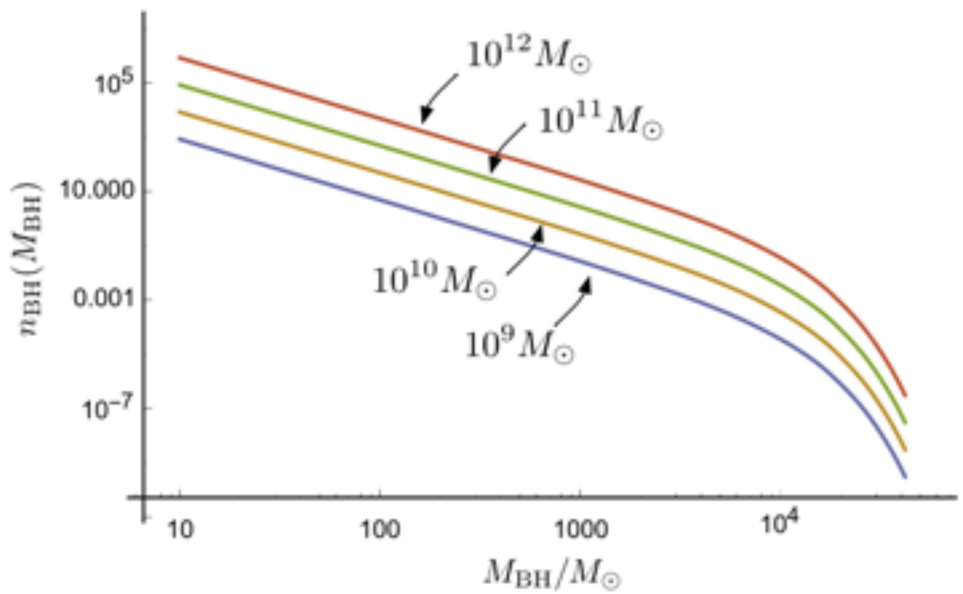


Figure 5. Number density of BHs per galaxy as a function of BH mass for different total mass of galaxies $M_{\rm galaxy} = 10^9 M_\odot, \cdots, 10^{12} M_\odot$.

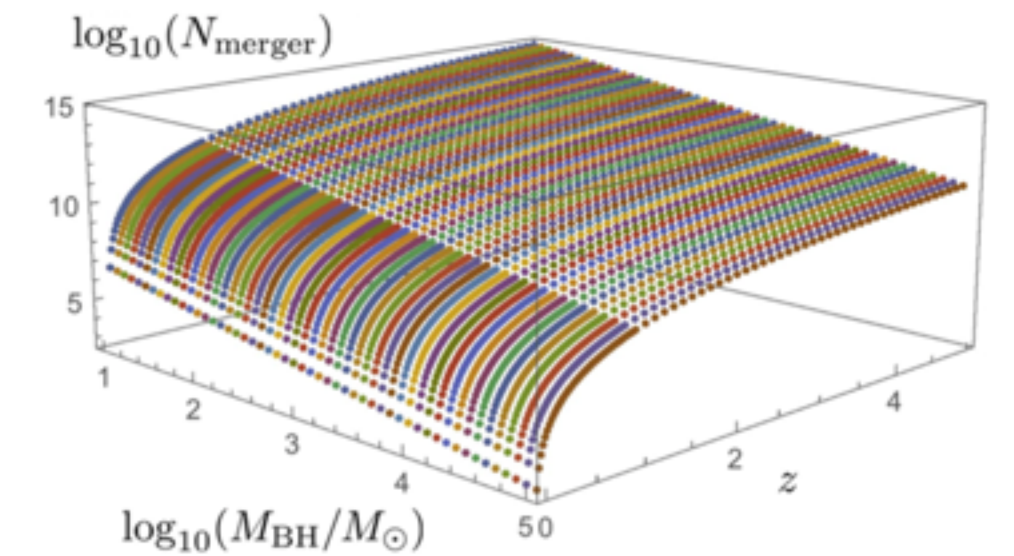


Figure 6. Cumulative distribution function of the number of BH mergers $N_{\rm merger}(M_{\rm BH})$ as a function of the redshift z. $N_{\rm merger}$ is expressed with binned one, of which we binned 20 for one order in $M_{\rm BH}$.

The Astrophysical Journal, 835:276 (8pp), 2017 February 1　doi:10.3847/1538-4357/835/2/276

CrossMark

Gravitational Waves from Merging Intermediate-mass Black Holes. II. Event Rates at Ground-based Detectors

Hisa-aki Shinkai[1], Nobuyuki Kanda[2], and Toshikazu Ebisuzaki[3]

Signal-to-Noise Ratio (SNR)

Let the true signal $h(t)$, the function of time, is detected as a signal, $s(t)$, which also includes the unknown noise, $n(t)$:

$$s(t) = h(t) + n(t). \tag{17}$$

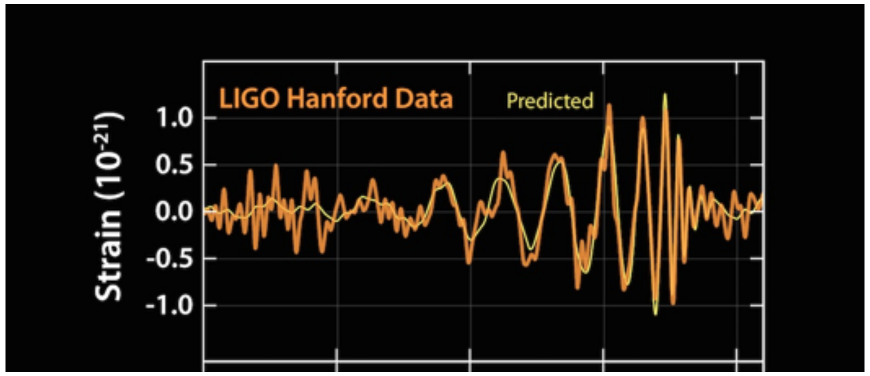
The standard procedure for the detection is judged by the optimal signal-to-noise ratio (SNR), ρ, which is given by

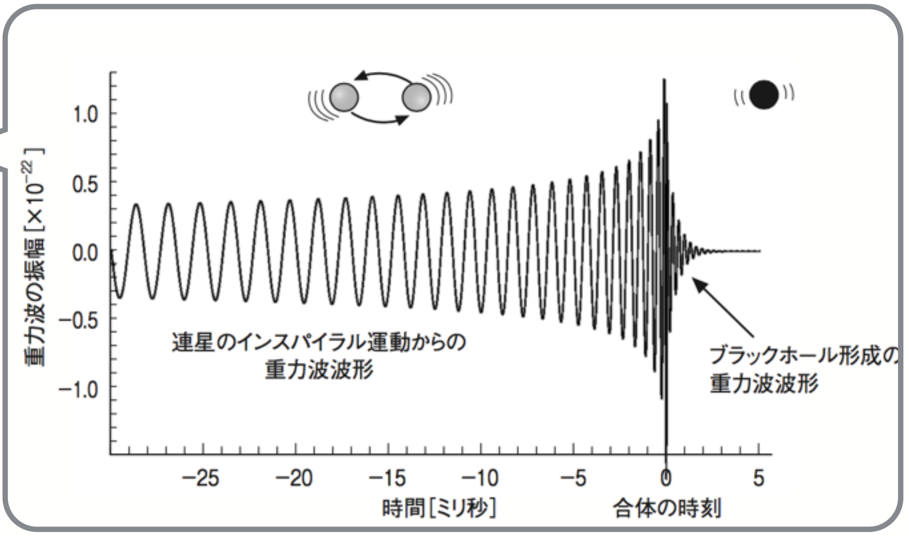
$$\rho = 2\left[\int_0^{\infty} \frac{\tilde{h}(f)\,\tilde{h}^*(f)}{S_n(f)}\,df\right]^{1/2}, \tag{18}$$

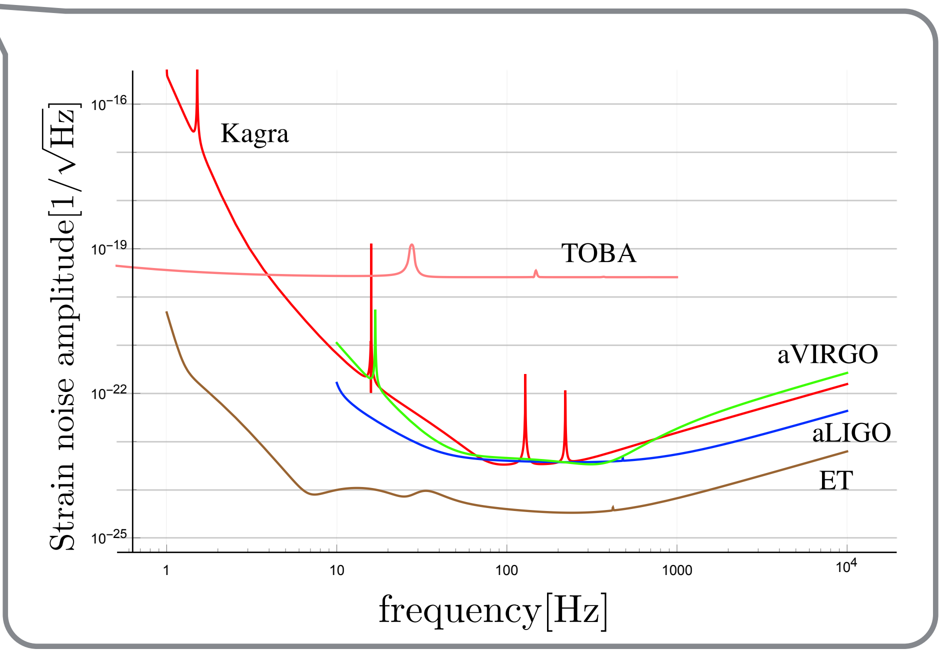
where $\tilde{h}(f)$ is the Fourier-transformed quantity of the wave,

$$\tilde{h}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{2\pi i f t}\, h(t)\, dt, \tag{19}$$

and $S_n(f)$ the (one-sided) power spectral density of strain noise of the detector, as we showed in Fig. 1.

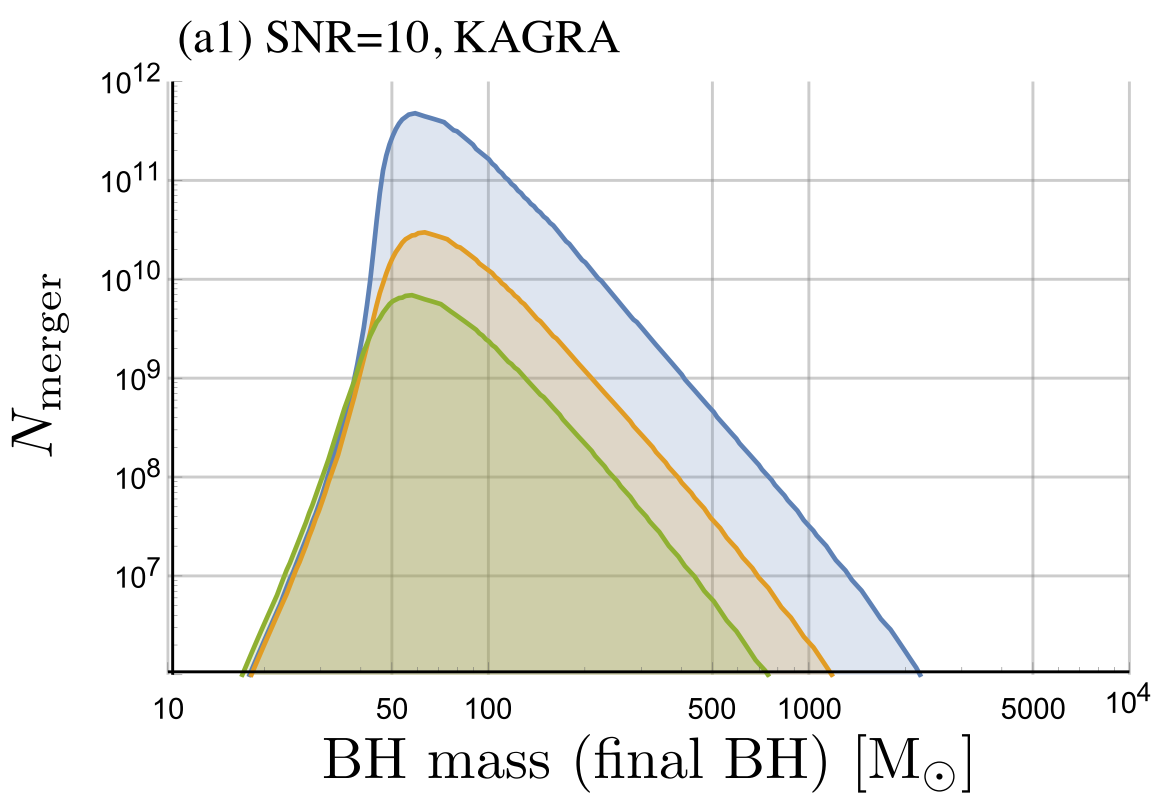


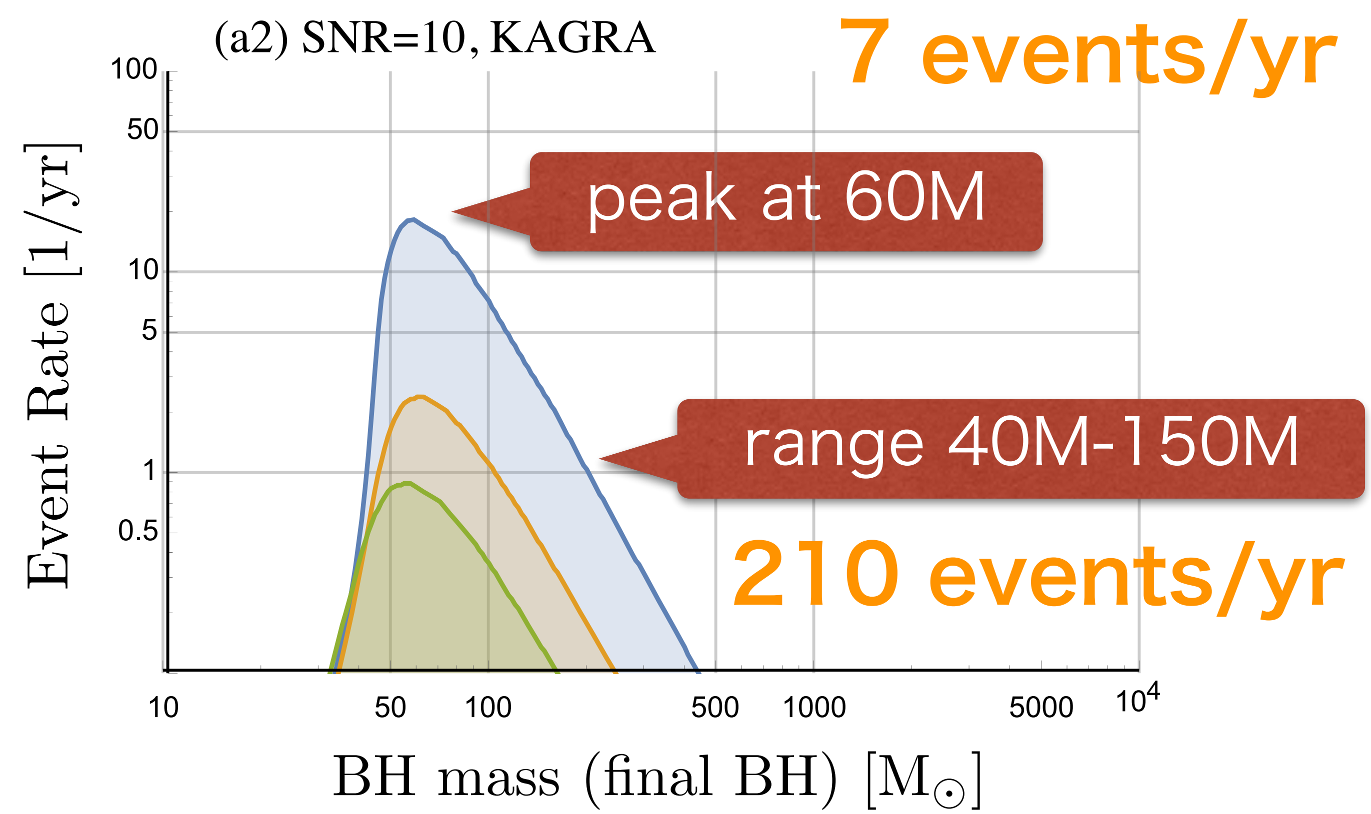




現在進行中の研究 （1） BH連星合体から銀河中心SMBHの形成シナリオを決める

★BH連星合体が繰り返されて，SMBHが形成されると考える
★1つの銀河にいくつBH連星合体があるかを数える
★宇宙にいくつ銀河があるかを数える
★LIGOやKAGRAの検出器感度で，1年にいくつ観測できるのか予想する





The Astrophysical Journal, 835:276 (8pp), 2017 February 1
doi:10.3847/1538-4357/835/2/276

CrossMark

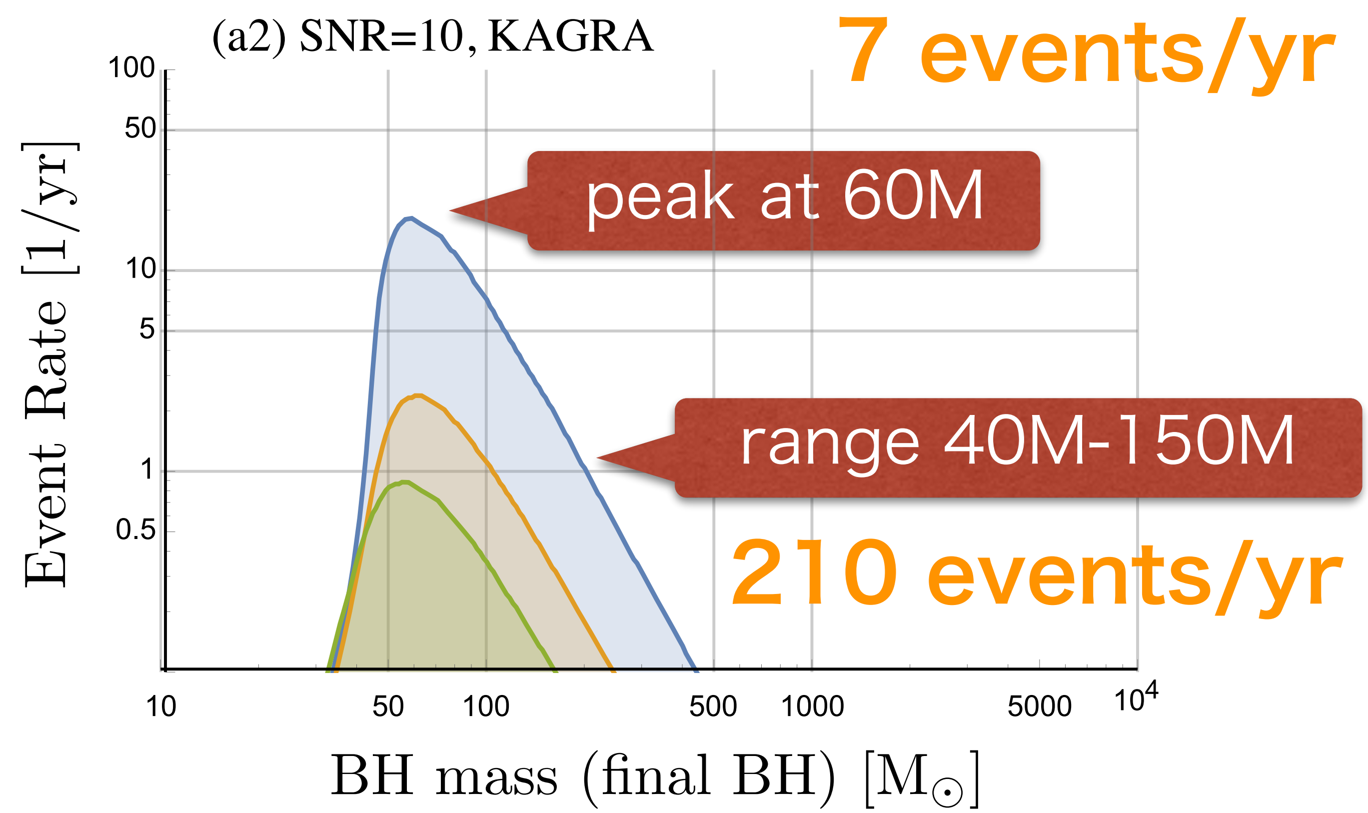
Gravitational Waves from Merging Intermediate-mass Black Holes. II. Event Rates at Ground-based Detectors

Hisa-aki Shinkai[1], Nobuyuki Kanda[2], and Toshikazu Ebisuzaki[3]

Event Rates at bKAGRA/aLIGO

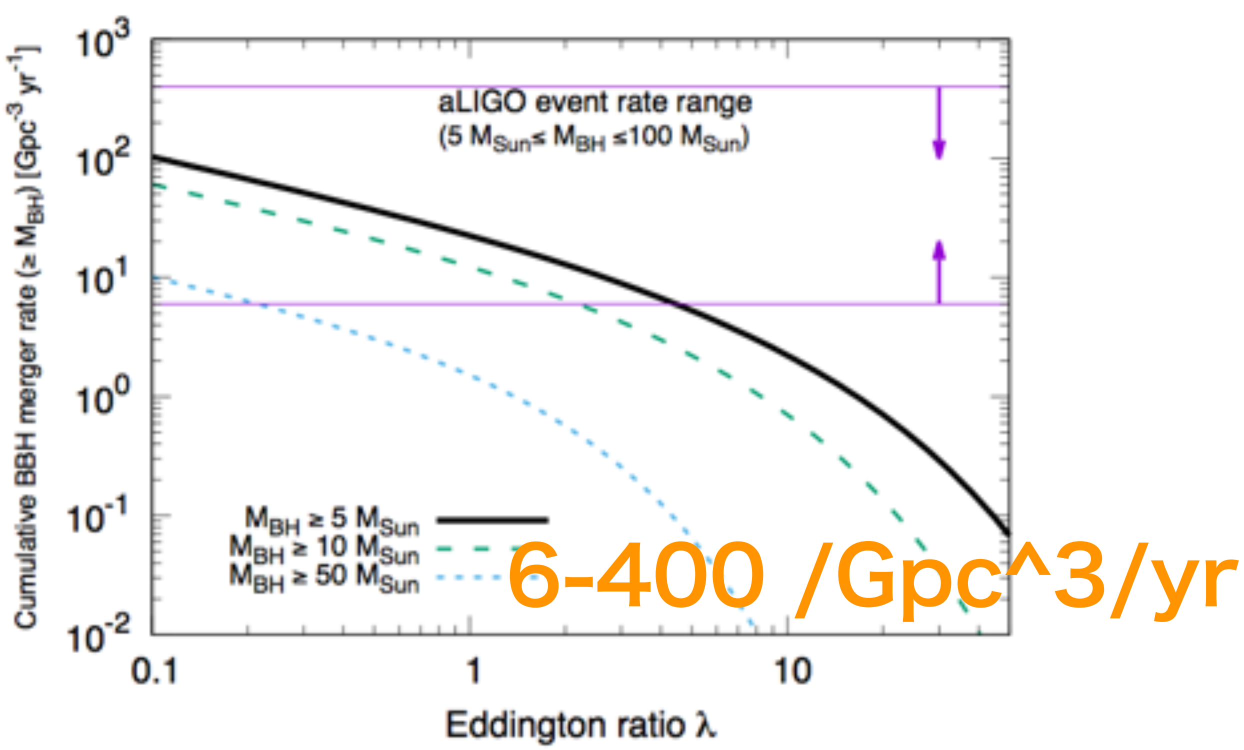
Mass distribution	PyCBC	GstLAL	Combined
	$R/(\mathrm{Gpc}^{-3}\ \mathrm{yr}^{-1})$		
	Event based		
GW150914	$3.2^{+8.3}_{-2.7}$	$3.6^{+9.1}_{-3.0}$	$3.4^{+8.8}_{-2.8}$
LVT151012	$9.2^{+30.3}_{-8.5}$	$9.2^{+31.4}_{-8.5}$	$9.1^{+31.0}_{-8.5}$
GW151226	35^{+92}_{-29}	37^{+94}_{-31}	36^{+95}_{-30}
All	53^{+100}_{-40}	56^{+105}_{-42}	55^{+103}_{-41}
	Astrophysical		
Flat in log mass	31^{+43}_{-21}	29^{+43}_{-21}	31^{+42}_{-21}
Power law (−2.35)	100^{+136}_{-69}	94^{+137}_{-66}	97^{+135}_{-67}

LIGO group PRX6(2016)041015

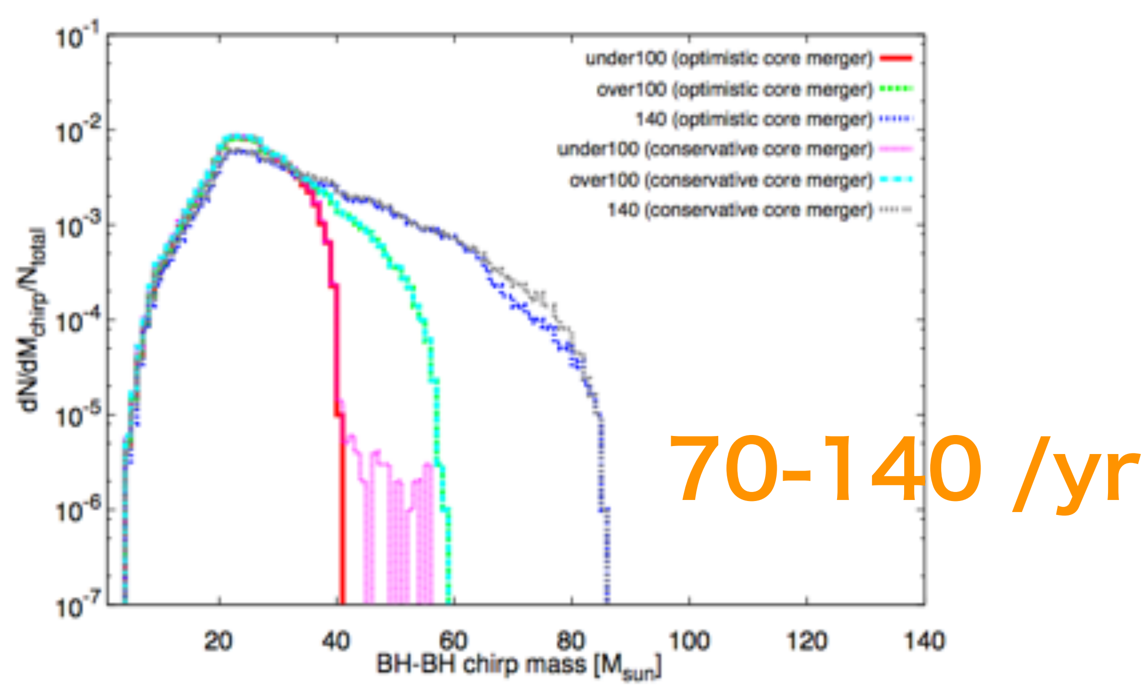


Shinkai+ ApJ 835(2017)276

Inoue+ MNRAS461(2016)4329



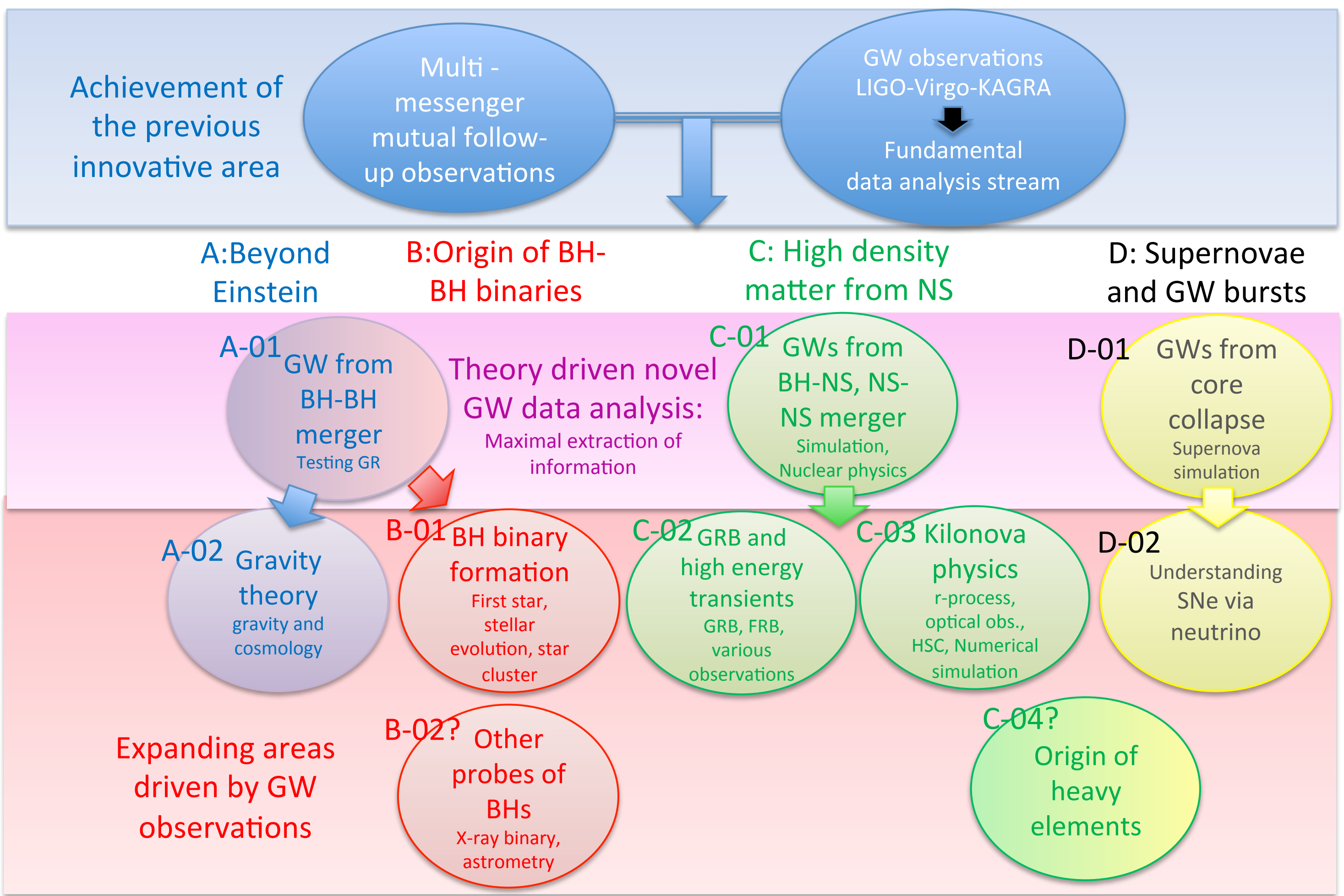
Kinugawa+ MNRAS456(2015)1093

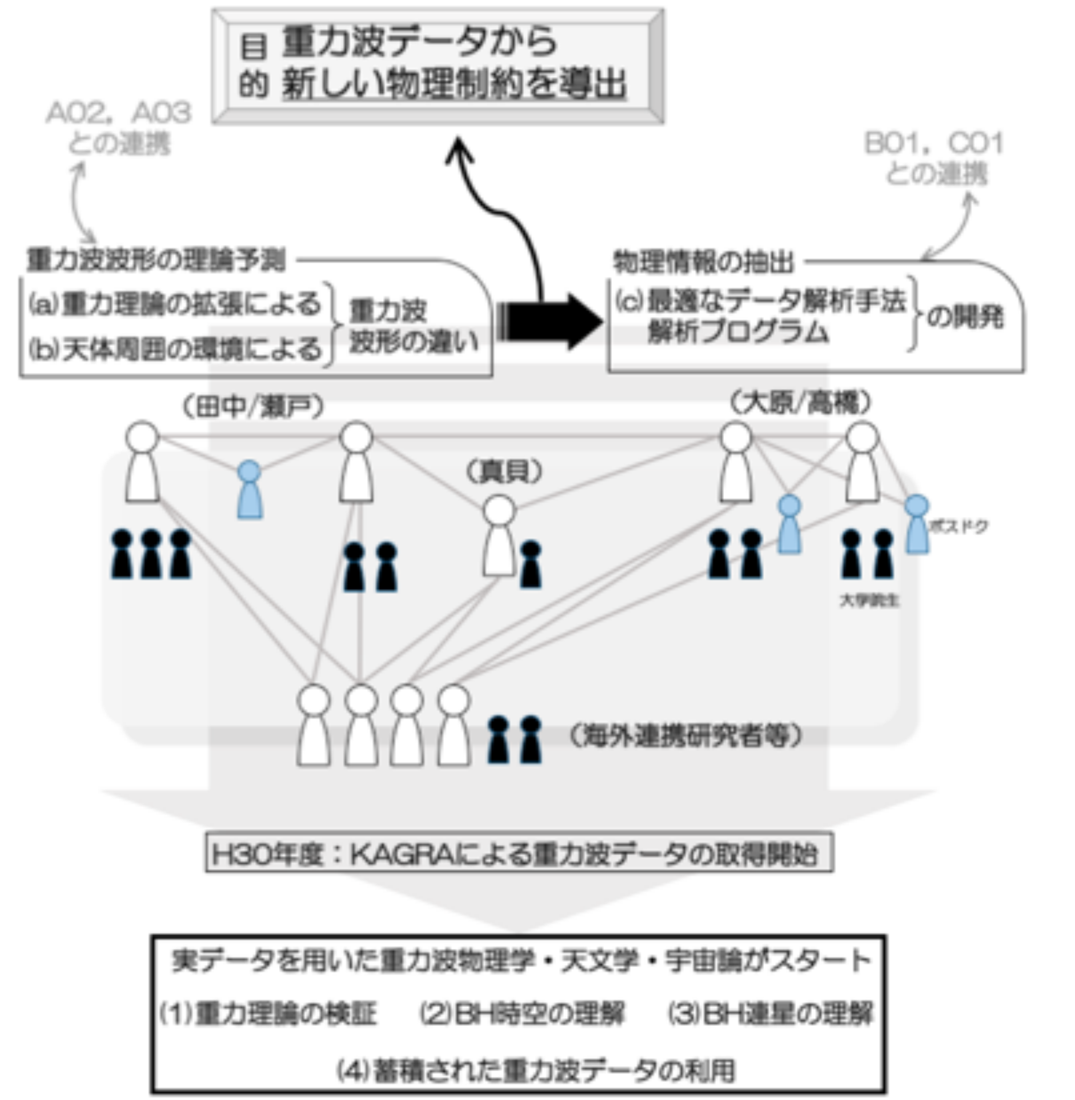


現在進行中の研究 （2） 重力波観測から一般相対性理論を検証する

2018年度 新学術「重力波創世記」（A01研究分担）申請中

Gravitational wave physics/astronomy：Genesis





KAGRA観測開始：天文学と物理学の融合研究

- A01 重力理論の検証
- A02 重力理論と宇宙論
- B01 ブラックホール連星の進化
- C01 中性子星連星の進化
- C02 重力波源天体の高エネルギー放射観測
- C03 重力波源天体の光赤外線観測
- D01 超新星爆発と重力波
- D02 超新星爆発のニュートリノ観測

H29年度

理論・解析手法の開発

- (a)重力理論の拡張による重力波波形の違い
- (b)天体周囲環境による重力波波形の違い
- (c)それぞれの効果に対する最適な解析手法の検討

重力波データ解析コードの開発

- (d) KAGALIの基本設計 応用アプリケーションの開発
- (e) 実装試験のための並列計算機環境の構築

H30年度

KAGRAによる重力波データの取得開始

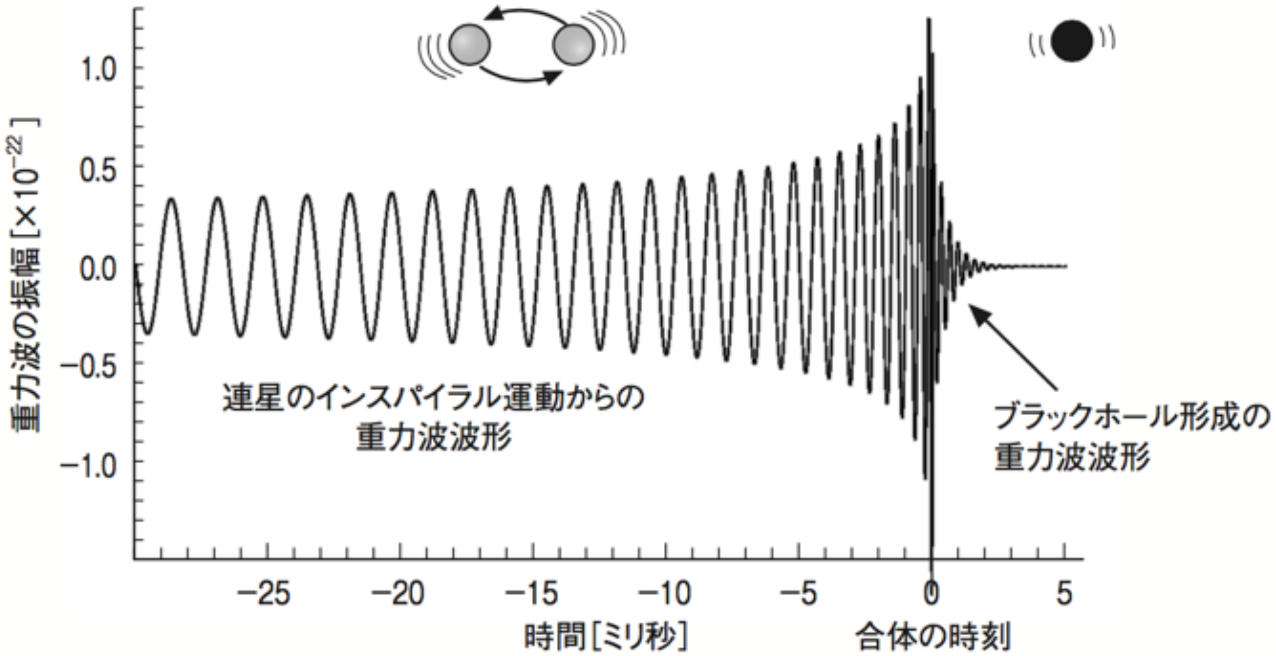
H31年度以降

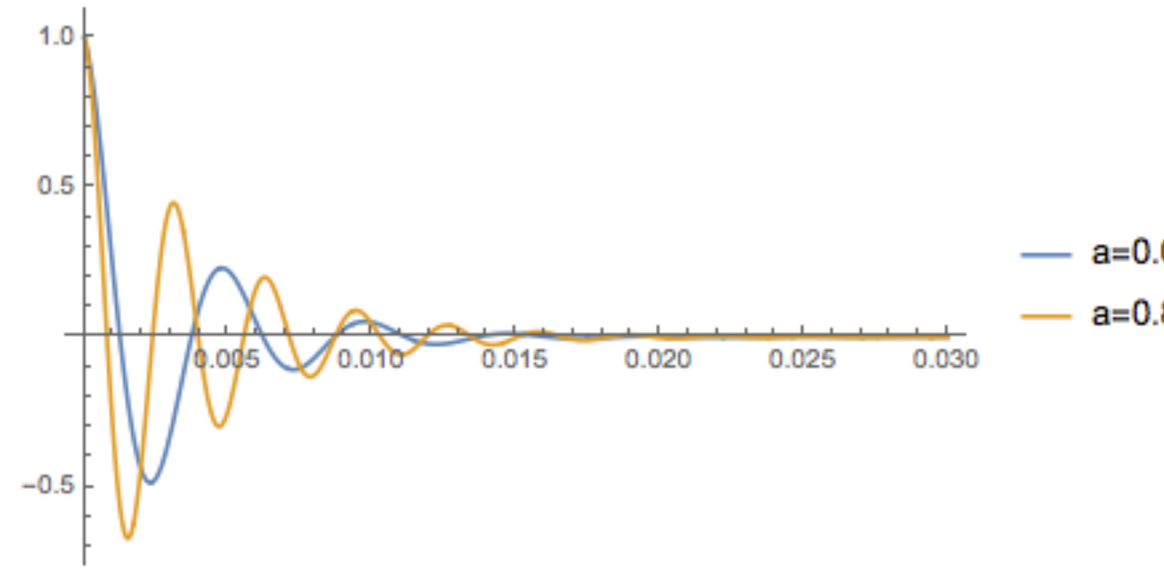
実データを用いた重力波物理学・天文学・宇宙論がスタート

- (1)重力理論の検証
- (2)BH時空の理解
- (3)BH連星の理解
- (4)蓄積された重力波データの利用
- (5)計算機環境の維持・データストレージの管理

現在進行中の研究 （2）　重力波観測から一般相対性理論を検証する

2018年度　新学術「重力波創世記」（A01研究分担）申請中





★BH形成におけるリングダウン波形から，
周波数と減衰率，モードの重なり率を得る

★BHの質量M，回転パラメータaのほかに，
理論の整合性を調べる

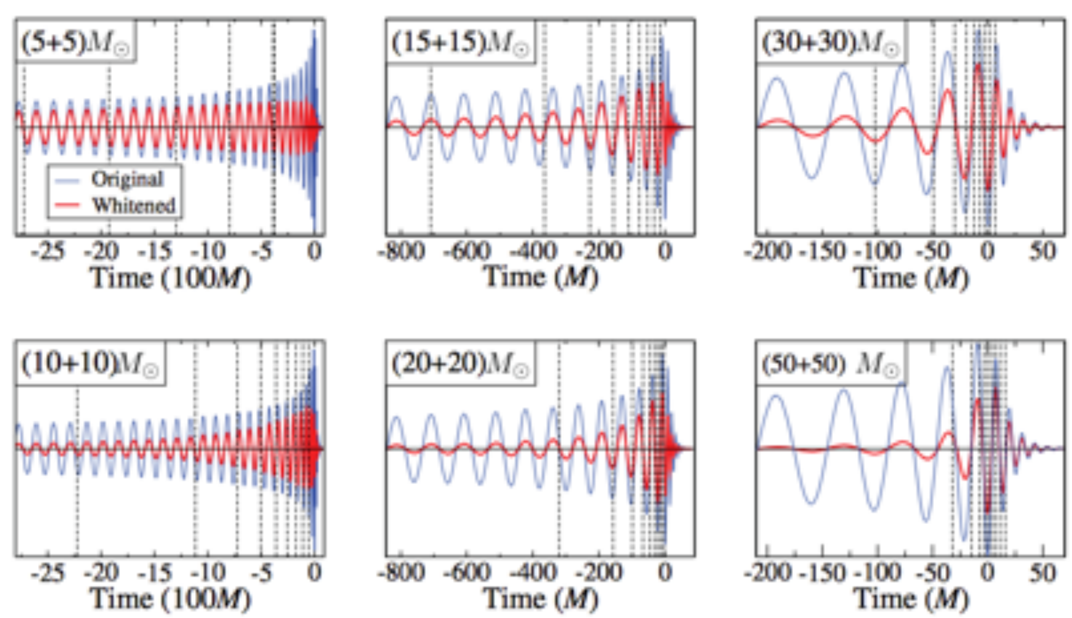


FIG. 4 (color online). Distribution of GW signal power. In each panel, we plot a hybrid waveform (a Tpn waveform stitched to the Goddard waveform) in both its original form (blue, lighter curve) and its whitened form (red, darker curve) [40]. We show waveforms from six binary systems with total masses $10M_\odot$, $20M_\odot$, $30M_\odot$, $40M_\odot$, $60M_\odot$, and $100M_\odot$. The vertical lines divide the waveforms into segments, where each segment contributes 10% of the total signal power.

重力波波形のテンプレート (TaylorF2)
Pan+, PRD77 (08) 024014

PHYSICAL REVIEW D　　VOLUME 56, NUMBER 2　　15 JULY 1997

Gravitational waves in Brans-Dicke theory: Analysis by test particles around a Kerr black hole

Motoyuki Saijo*
Department of Physics, Waseda University, Shinjuku-ku, Tokyo 169, Japan

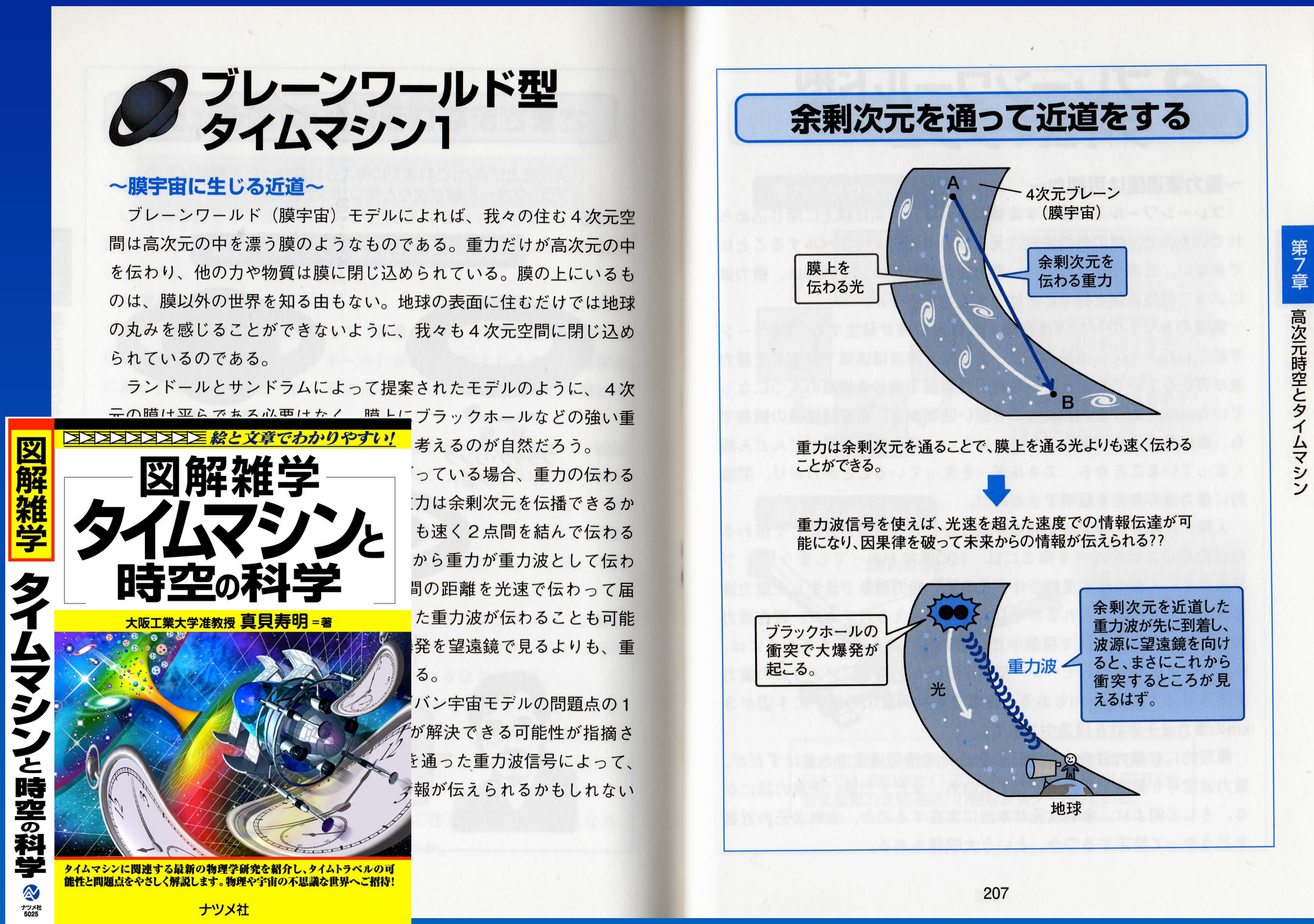
Hisa-aki Shinkai†
Department of Physics, Washington University, St. Louis, Missouri 63130-4899

Kei-ichi Maeda‡
Department of Physics, Waseda University, Shinjuku-ku, Tokyo 169, Japan

(Received 18 December 1996)

重力波天文学で何がわかる？

とんでもないこと？ → 世の中，実は5次元．．とか



現在進行中の研究 （3） 高次元・修正重力理論での非線形ダイナミクス

2012--2017年度 科研費・基盤C・代表

IOP Publishing — Classical and Quantum Gravity
Class. Quantum Grav. 27 (2010) 045012 (15pp) doi:10.1088/0264-9381/27/4/045012

Black objects and hoop conjecture in five-dimensional space-time

Yuta Yamada and Hisa-aki Shinkai

Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology, 1-79-1 Kitayama, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan

PHYSICAL REVIEW D **83**, 064006 (2011)

Formation of naked singularities in five-dimensional space-time

Yuta Yamada[1,*] and Hisa-aki Shinkai[1,2,†]
[1]*Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology, 1-79-1 Kitayama, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan*

★5次元時空でのBH形成条件

★5次元時空での時空特異点形成条件

PHYSICAL REVIEW D **88**, 064027 (2013)

Wormholes in higher dimensional space-time: Exact solutions and their linear stability analysis

Takashi Torii[1,*] and Hisa-aki Shinkai[2,3,†]
[1]*Department of General Education, Osaka Institute of Technology, Asahi-ku, Osaka 535-8585, Japan*
[2]*Department of Information Systems, Osaka Institute of Technology, Kitayama, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan*

★n次元ワームホールの不安定予想

★n次元ワームホールの不安定確認

IOP Publishing
Journal of Physics: Conference Series **574** (2015) 012056 doi:10.1088/1742-6596/574/1/012056

Wormhole Dynamics

Hisa-aki Shinkai[1,2], Takashi Torii[3]
[1] Faculty of Information Science and Technology, Osaka Institute of Technology, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan
[2] Computational Astrophysics Laboratory, Institute of Physical & Chemical Research

現在進行中の研究 （3）　高次元・修正重力理論での非線形ダイナミクス

2012--2017年度　科研費・基盤C・代表

$$S = \int_{\mathcal{M}} d^n x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2\kappa^2} \left(\alpha_{\rm GR} \mathcal{R} - 2\Lambda + \alpha_{\rm GB} \mathcal{L}_{\rm GB} \right) + \mathcal{L}_{\rm matter} \right]$$

$$\mathcal{L}_{\rm GB} = \mathcal{R}^2 - 4\mathcal{R}_{\mu\nu}\mathcal{R}^{\mu\nu} + \mathcal{R}_{\mu\nu\rho\sigma}\mathcal{R}^{\mu\nu\rho\sigma}$$

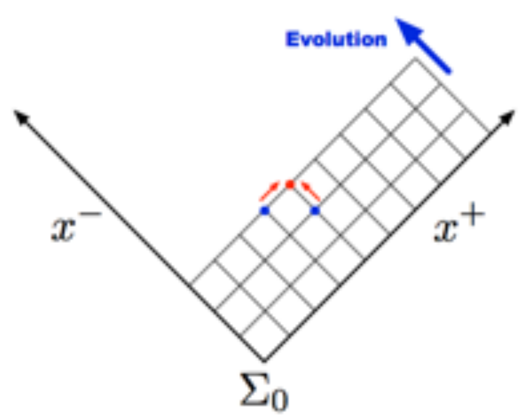
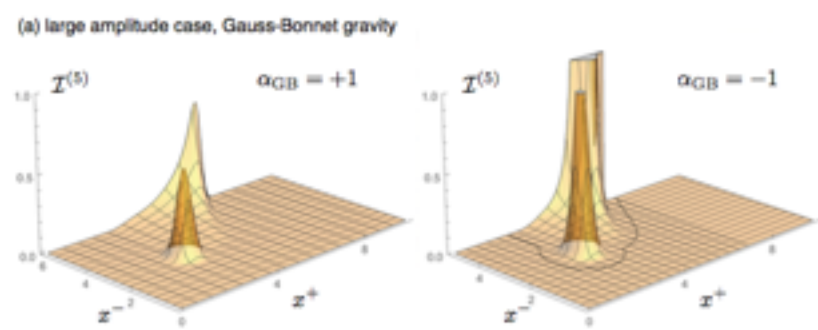
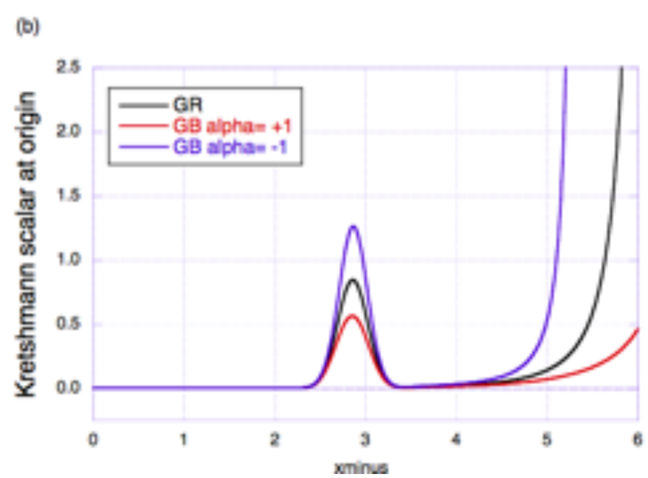


FIG. 1: Numerical grid structure. Initial data are given on null hypersurfaces $\Sigma_\pm$ ($x^\mp = 0$, $x^\pm > 0$) and their intersection Σ_0.





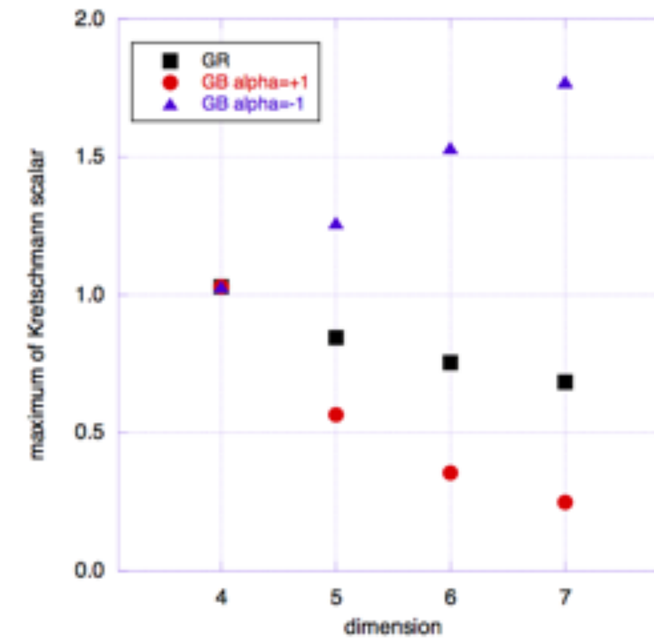


FIG. 10: The Kretschmann scalar, $\mathcal{I}^{(n)}$, at the moment of the collision of scalar pulses (at $x^+ = x^- = 2\sqrt{2}$). We plot for the models of $\alpha_{\rm GB} = 0, \pm 1$ and of the dimension $n = 4$, 5, 6, and 7. For larger dimension, the magnitude becomes lower in GR. We also find that introducing positive $\alpha_{\rm GB}$ (i.e. the normal higher-curvature correction) reduces its magnitude.

Non-Linear Dynamics in Einstein-Gauss-Bonnet gravity

Hisa-aki Shinkai[1,*] and Takashi Torii[2,†]

[1] *Department of Information Systems, Faculty of Information Science & Technology, Osaka Institute of Technology, Kitayama, Hirakata City, Osaka 573-0196, Japan*

[2] *Department of System Design, Faculty of Robotics & Design, Osaka Institute of Technology,*

情報系の方とのコラボ？（1）　重力波波形のデータ解析

日本版データ解析ライブラリ KAGALI (KAGra Algorithmic Library) の開発

神楽

calibration
パイプライン
解析ツール
（連続波，**連星合体**，
背景，未知）

← LIGOグループ LAL

一部は要移植

篝

効率のよいmatched filtering法？
最適なフィルタ？　Beyond Fisher?
Markov chain Monte Carlo?

波形未知の重力波はどうしたら検出できるか？

C	C
Perl	Python
Haskell	Perl

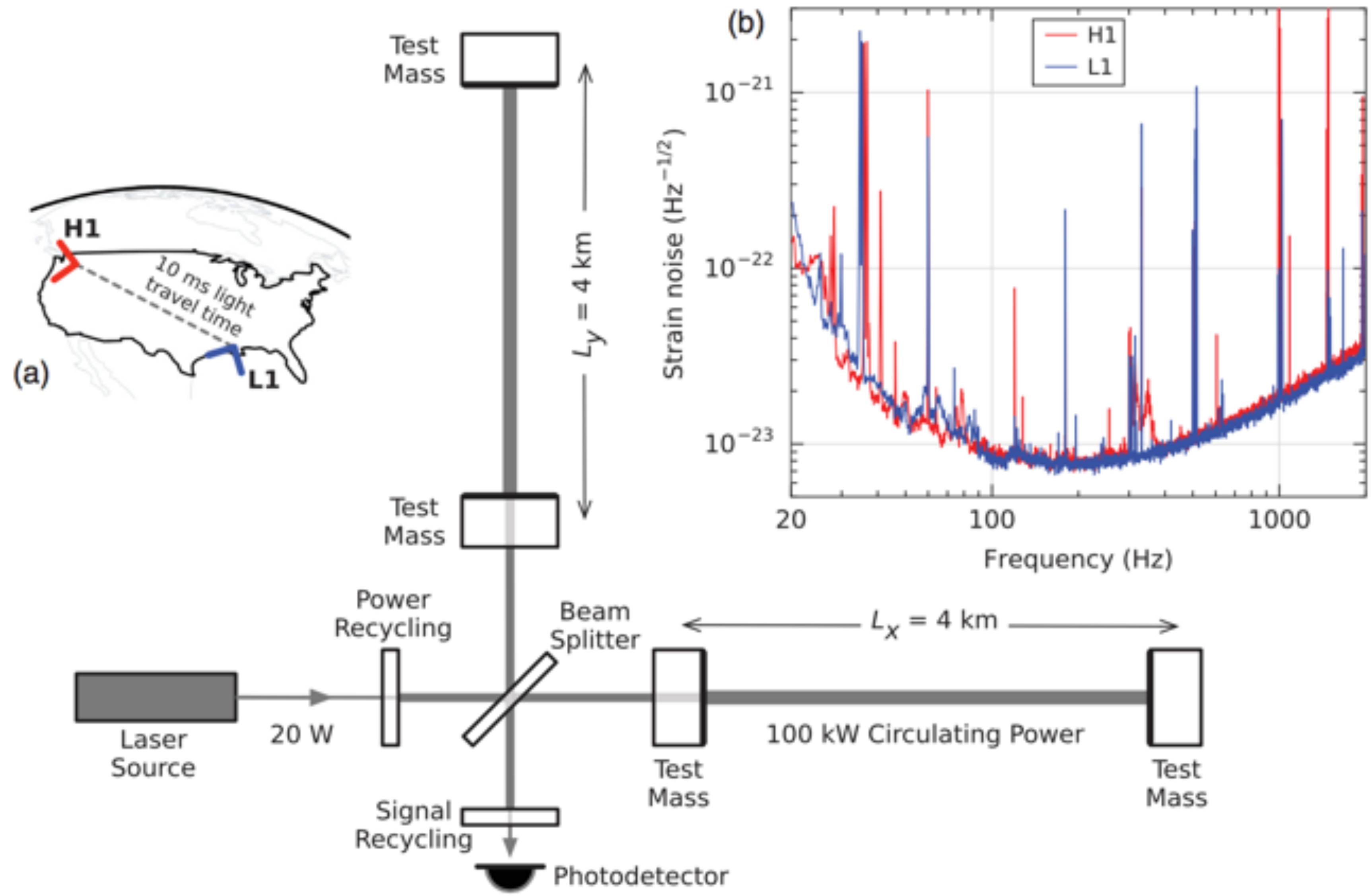
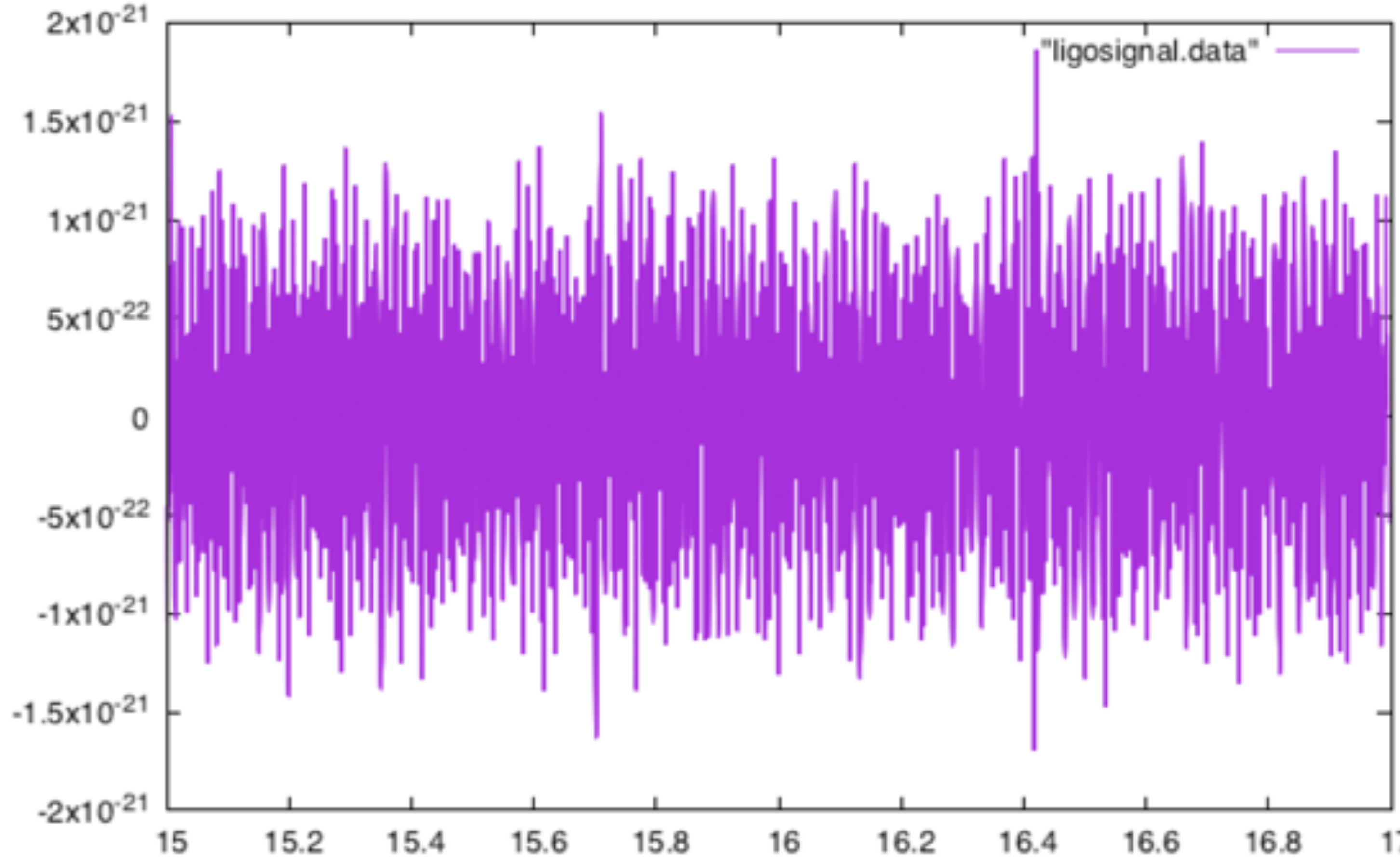


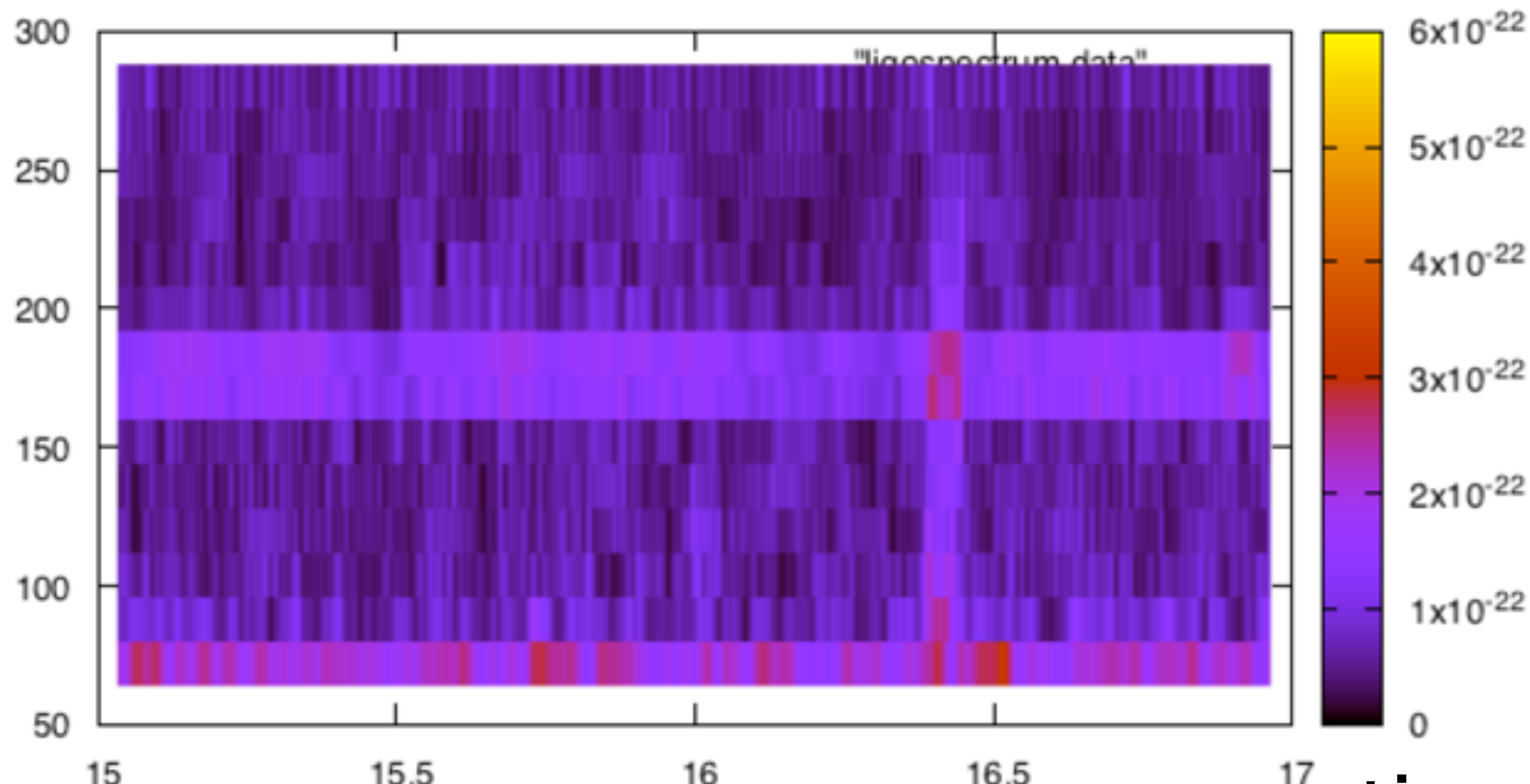
FIG. 3. Simplified diagram of an Advanced LIGO detector (not to scale). A gravitational wave propagating orthogonally to the detector plane and linearly polarized parallel to the 4-km optical cavities will have the effect of lengthening one 4-km arm and shortening the other during one half-cycle of the wave; these length changes are reversed during the other half-cycle. The output photodetector records these differential cavity length variations. While a detector's directional response is maximal for this case, it is still significant for most other angles of incidence or polarizations (gravitational waves propagate freely through the Earth). *Inset (a):* Location and orientation of the LIGO detectors at Hanford, WA (H1) and Livingston, LA (L1). *Inset (b):* The instrument noise for each detector near the time of the signal detection; this is an amplitude spectral density, expressed in terms of equivalent gravitational-wave strain amplitude. The sensitivity is limited by photon shot noise at frequencies above 150 Hz, and by a superposition of other noise sources at lower frequencies [47]. Narrow-band features include calibration lines (33–38, 330, and 1080 Hz), vibrational modes of suspension fibers (500 Hz and harmonics), and 60 Hz electric power grid harmonics.

GW150914

h(t)



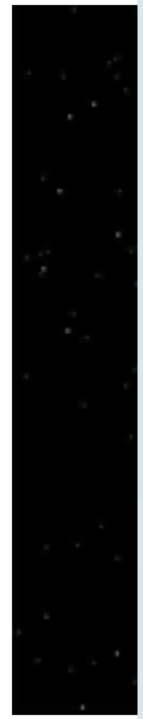
freq

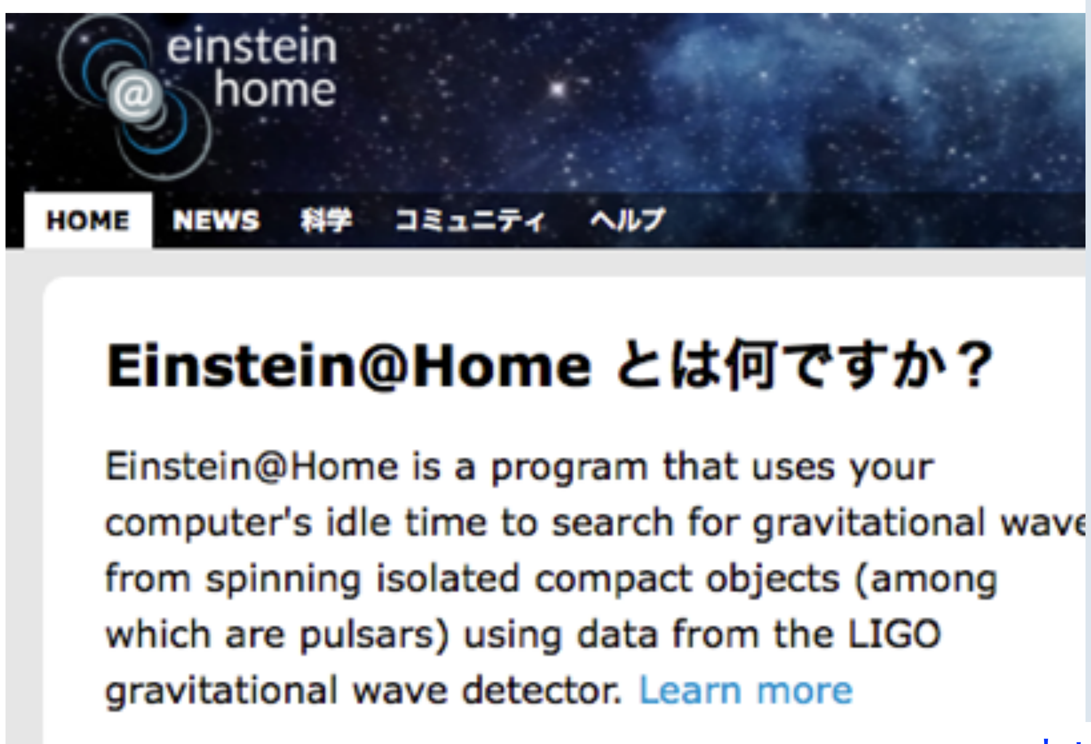


time

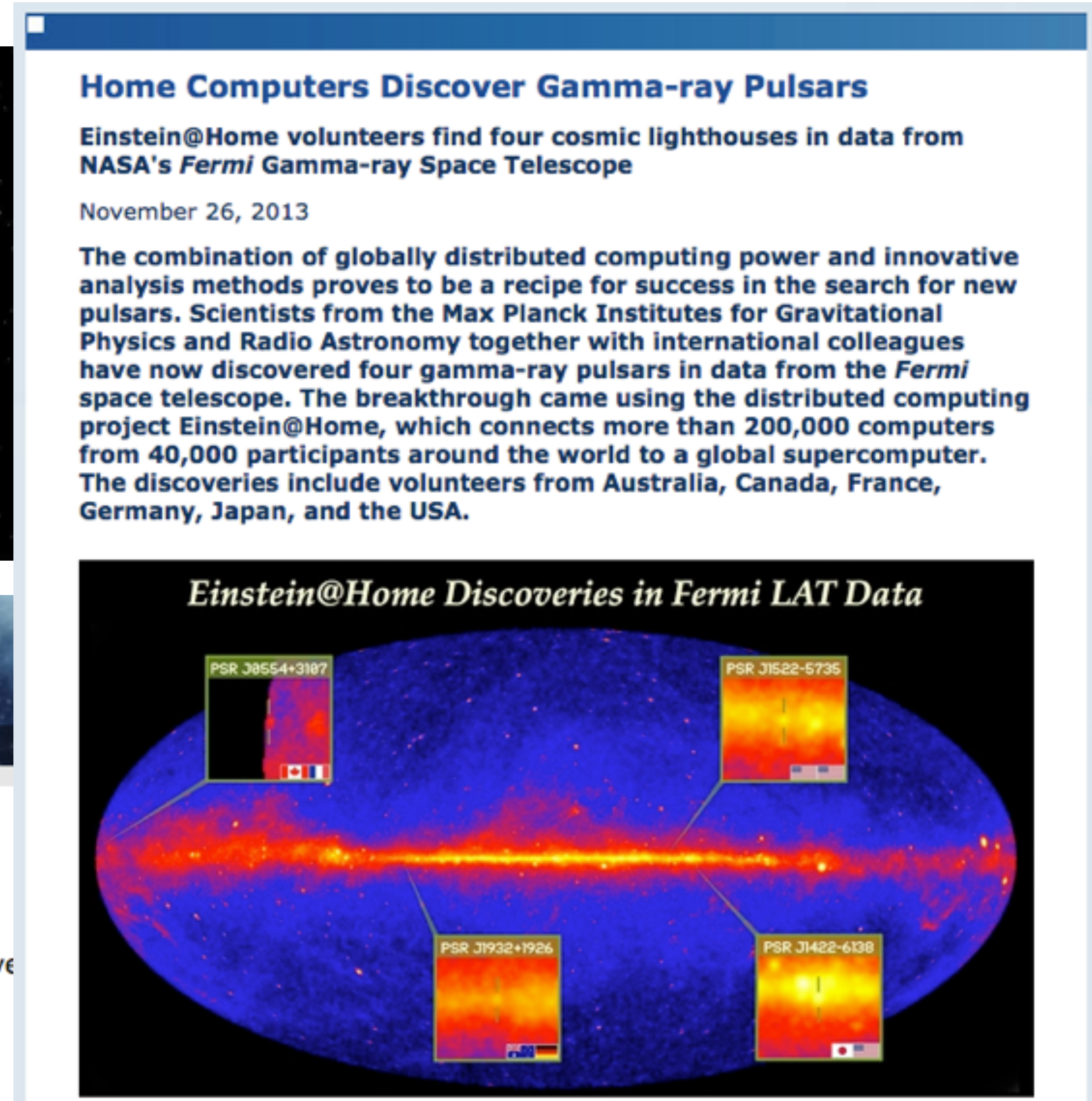
SETI@home, Einstein@home の 日本版をつくりたい.

http://setiathome.berkeley.edu





https://einsteinathome.org/ja/home



Home Computers Discover Gamma-ray Pulsars

Einstein@Home volunteers find four cosmic lighthouses in data from NASA's *Fermi* Gamma-ray Space Telescope

November 26, 2013

The combination of globally distributed computing power and innovative analysis methods proves to be a recipe for success in the search for new pulsars. Scientists from the Max Planck Institutes for Gravitational Physics and Radio Astronomy together with international colleagues have now discovered four gamma-ray pulsars in data from the *Fermi* space telescope. The breakthrough came using the distributed computing project Einstein@Home, which connects more than 200,000 computers from 40,000 participants around the world to a global supercomputer. The discoveries include volunteers from Australia, Canada, France, Germany, Japan, and the USA.

https://www.aei.mpg.de/972495/einsteinathome_gammapsrs2013

情報系の方とのコラボ？（１）　重力波波形のデータ解析

日本版データ解析ライブラリ KAGALI (KAGra Algorithmic Library) の開発

効率のよいmatched filtering法？
最適なフィルタ？　Beyond Fisher?
Markov chain Monte Carlo?

波形未知の重力波はどうしたら検出できるか？

SETI@home, Einstein@home の 日本版をつくりたい.

情報系の方とのコラボ？（２）　光格子時計を人工衛星に搭載したときの科学的意義

情報系の方とのコラボ？（３）　江戸・明治期における近代物理学・天文学の受容過程