# ブラックホールと重力波







2017/9/29 慶應義塾高校 科学講演会

近代物理学から現代物理学へ

### 惑星の運動を説明することから物理学は始まった



地動説

コペルニクス

ブラーエ Tycho Brahe (1546-1601)



天体観測

ケプラー Johannes Kepler (1571-1630)





ガリレイ

Galileo Galilei (1564-1642)



ニュートン

Isaac Newton (1642-1727)



運動の法則 万有引力

慣性・自由落下運動 地動説の物理的根拠

#### - ケプラーの惑星の運動についての 3 法則 (1609,1618) -

#### 第1法則 **楕円軌道の法則**

惑星は太陽を1つの焦点とする楕円軌道を描く.

第2法則 **面積速度一定の法則** 

太陽と惑星を結ぶ線分が単位時間に描く扇形の面積(面積速度)は, 惑星それぞれについて一定である.

第3法則 T<sup>2</sup>/R<sup>3</sup> 一定の法則 惑星の公転周期Tの2乗と、惑星の描く楕円の長軸半径(長軸の長 さの半分)Rの3乗の比T<sup>2</sup>/R<sup>3</sup>は、惑星によらず一定である。









#### **AILKY W** $\mathbf{V}$

of Earth, the Millor Way is a spisal-du hed billion stars. Bright re









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

WEAR HIRE

### 銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



#### Zooming in on the centre of the Milky Way http://www.youtube.com/watch?v=XhHUNVEKUY8 (1:15)

# S2 orbit around Sgr A\*









我々の銀河中心には, 太陽の420万倍の質量の ブラックホール!



http://www.extinctionshift.com/SignificantFindings08.htm http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#





Altmetric: 660

More detail ≫

Letter

#### Millimetre-wave emission from an intermediate-mass black hole candidate in the Milky Way

Tomoharu Oka 🏁, Shiho Tsujimoto, Yuhei Iwata, Mariko Nomura & Shunya Takekawa 🗉

Nature Astronomy (2017) doi:10.1038/s41550-017-0224-z Download Citation Received: 15 March 2017 Accepted: 14 July 2017 Published online: 04 September 2017

### 60pc from SgrA\* 10<sup>5</sup> Msun

#### 天の川銀河で中質量ブラックホール候補の実体を初めて確認

2017年9月5日 | 研究成果



中質量ブラックホールによる重力散乱でガス雲が加速される様子の想像図 オリジナルサイズ <u>(5.0MB)</u>

慶應義塾大学理工学部物理学科の同朋治(おかともはる)教授らの研究チームは、アルマ望遠鏡を使用して、天の川銀河の中心部分に発見された特異分子雲「CO-0.40-0.22」の詳細な電波観測を行いました。この特異分子雲は、天の川銀河中心核「いて座A'(エー・スター)」から約200%年離れた位置にあり、その異常に広い速度幅から内部に太陽の10万倍の質量をもつプラックホールが潜んでいる可能性が指摘されていました。観測の結果、特異分子雲「CO-0.40-0.22」の中心近くに、コンバクトな高密度分子雲と点状電波

#### https://www.nao.ac.jp/news/science/2017/20170905-alma.html

## 近代物理学の進展



### 現代物理学の発展



#### 2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した



# 2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した





### contents

1. 重力波とは

Einsteinが残した100年越しの宿題

2. 直接観測された重力波 レーザー干渉計のしくみ LIGOグループが発見した4つの重力波イベント

重力波観測の将来
宇宙空間での重力波観測
重力波観測から何がわかるか







### 2017年9月28日, LIGO-Virgoが4例目となる重力波を検出し た, と発表した



## 重力の正体は?



by Frite Ahlefeid:

http://hikingartist.com/



## 重力の正体は?



by Frits Ahlefeid:

http://hikingartist.com/



## 重力の正体は?







## $F = G \frac{Mm}{r^2}$ 万有引力 =すべてのものは引力で引き合う





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

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











アインシュタイン方程式の解 【シュワルツシルド解】

#### Schwarzschild (1916) 球対称,真空での方程式の厳密解

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2r}\right)c^2dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2r}} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)$$

困ったことに, …… r=0 で特異点 ⇒ 今でも困ってる r=2GM/c<sup>2</sup> でも特異点 ⇒ ブラックホールの境界



ブラックホール

ブラックホール = 重力が強すぎて、光さえも 出られない天体 = 因果的に隔離される領域 境界=地平面 (ホライズン)



## 重い星が燃え尽きるとブラックホールに



星(恒星)の一生を決めるのは、どれだけの質量 があるか、そしてどのように燃えていくかの2つ の要素だ、巨大な星は、核燃料の消費もはやく、 数万年くらいの寿命しかないが、小さな星は現 在の宇宙年齢の数倍も燃焼し続ける可能性が ある。

褐色矮星\*はよく「星のなりそこない」と呼ばれる. 水素の核融合反応に点火するほどの質量を持てな かった星の残骸だからだ.これらの星は,まわりの空 間に熱を放出して,ゆっくりと死んでゆき,やがて消 えてゆく.巨大なガス惑星と同じなので,「できすぎ た惑星」と考えてもよいかもしれない.[\*訳注:矮星 (dwarf)は,小さな星という意味.]

赤色矮星は小さいけれども水素の核融合を起こす ことのできる星だ.低い温度で燃えるために、宇宙が 今の何倍の年齢になったとしても薄暗く輝き続ける ことができる、宇宙にある多くの星は -- 全体のおよ そ75パーセントの星は -- 赤色矮星である.

太陽型恒星(あるいは黄色矮星)は、水素とヘリウム の両方の核融合反応に点火できる十分な質量を持 つ星だ.これらの星がヘリウムを失ったあとは赤色巨 星になり、周囲のガス層を照らして惑星ガス雲とし、 そしてやがて白色矮星となる、100億年以上の時間 をかけて(もし宇宙がそれだけ長く続くならば、だが) 、これらの星はゆっくりと冷却して、黒色矮星になっ てゆく、

超巨星や極超巨星は,星の仲間たちからみても病的 に肥満している星である.太陽の10倍から数百倍の 大きさの質量のものは,燃料の消費も大きく,数十万 年程度の寿命である.

宇宙におけるすべての重元素の合成主の星たちは、その星のコアでひとたび鉄が合成されると、超新星として爆発する.

痩せている星は中性子星やパルサーとなって生き延びるが、肥満している星は、自分の巨大な体重で押しつぶされてブラックホールに変貌する。

図にした星の大きさは正しいものではない. 例え ば、太陽の20倍の質量をもつ超巨星は、太陽の75倍 の大きさになる..



宇宙のつくり方(ギリランド著, 真貝・鳥居訳, 丸善出版, 2016年12月刊)

## はくちょう座 X-1はブラックホール



### ブラックホールの存在はどうしてわかるのか?



### 落下していくガスが 高い温度で輝く (降着円盤 accretion disk)

### 周りの星の激しい運動から 強い重力源であることがわかる





http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/black-hole-spews-atoms/

### ブラックホールの存在はどうしてわかるのか?



### 銀河中心からジェットが吹き出す (活動銀河核 active galactic nuclei)





CREATED BY: UMBERTO CANNELLA, DANIEL WHITEGON AND JORGE CHAM SPECIAL THANKS TO ADAN BROOKS, FLIP TANEDO AND LIGO!

#### <u>www.phdcomics.com</u> "gravitational waves explained"





#### sources of gravitational wave

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



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

## 重力波 幻の発見 (1968/70)



Joseph Weber (**pictured**), a physicist at the University of Maryland in College Park, believed that gravitational waves were real. In 1969, he announced that he had found them with a detector of his own invention: an aluminium cylinder, about 2 metres long and 1 metre in diameter, that 'rang' when it was struck by such a wave<sup>2</sup>. His result was never replicated, and was eventually rejected by nearly everyone except Weber himself. Nonetheless, his work drew many other researchers into the gravitational wave field.

#### 68年に「2台の装置で同時に重力波信号を検出」

70年に「重力波信号はおよそ一日に三回の頻度で 検出され、検出装置が銀河の中心に対して垂直方向 に向いているときに検出率が高い」

と発表したが、他のグループで追試されず、

ウェーバー Joseph Weber

## 連星中性子星の発見 (1974)



パルサー=中性子星 半径 10km位 質量 1.4x太陽





Arecibo, Puerto Rico

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)

The Nobel Prize in Physics 1993 Russell A. Hulse, Joseph H. Taylor Jr.

#### Share this: 🥂 💁 🗾 🔁 🔼 25

#### The Nobel Prize in Physics 1993





Russell A. Hulse Prize share: 1/2

Joseph H. Taylor Jr. Prize share: 1/2

"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。



### 重力波の存在が間接的に確かめられた.

重力波の直接観測をしたい!



Inspiral







## 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)

## ブラックホールの合体シミュレーション



#### NCSA-AEI group (1998)
## contents

1. 重力波とは Einsteinが残した100年越しの宿題

2. 直接観測された重力波 レーザー干渉計のしくみ LIGOグループが発見した4つの重力波イベント

重力波観測の将来
 宇宙空間での重力波観測
 重力波観測から何がわかるか









# 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



## 干渉計のしくみを理解しよう

波の干渉



**Puddle Interference** The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

# 重ね合わせ (superposition)



図 31: 左 2 つの波を足すと右の波になる.  $y_1(t) = \sin(2\pi t), y_2(t) = y_1(t)$  としたときの,  $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ の図.



図 32: 左 2 つの波を足すと右の波になる。 $y_1(t) = \sin(2\pi t), y_2(t) = -\sin(2\pi t)$ としたときの、 $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ の図。

# 波の干渉 = 強めあったり弱めあったりする現象

### 同位相で振動する2つの波源の場合

●逆位相で振動する2つの波源の場合



## レーザー干渉計による重力波検出のしくみ



https://imgur.com/gallery/0VhrXPV



# 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





# KAGRA (かぐら:大型低温重力波望遠鏡)

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



<u>望遠鏡の大きさ:基線長 3km</u> <u>望遠鏡を神岡鉱山内に建設</u> <u>鏡をマイナス250度(20K)まで</u> <u>冷却</u> 熱雑音を小さくするため

<u>鏡の材質としてサファイア</u> 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

# 検出機は大きければ大きいほどいい!

ミラー ミラー 3km ビームスプリッター ダークポート レー

# さらに信号を増幅するエ夫



# さらにさらに、雑音をやっつける



### KAGRAでの 雑音対策

# ①地面振動

- 地下に検出器を設置する
- ミラーを大きな振り子に吊るす



苔山圭似子氏(東京大宇宙線研究所)のスライドから

トンネル

2階部分

Nitorio Inverted Pendulums

Magnet Dam Riter I

Rhor 2

### KAGRAでの 雑音対策



180Wのハイパワーレーザーを使う



# KAGRA (かぐら:大型低温重力波望遠鏡)

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



<u>望遠鏡の大きさ:基線長 3km</u> 望遠鏡を神岡鉱山内に建設 鏡をマイナス250度(20K)まで <u>冷却</u> 熱雑音を小さくするため

<u>鏡の材質としてサファイア</u> 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



2014年6月、日本が岐阜県に建設している重力波干渉計KAGRA (かぐら)のトンネルが貫通し、マスコミに公開された。KAGRAは、一 辺が3kmもあるレーザー干渉計だが、岐阜県神岡鉱山跡の山中に わざわざ建設した理由は何か。

①近くにはスーパーカミオカンデというニュートリノ観測装置があり、 実験装置の調整にニュートリノを使うから

②山の中だと地面の振動が少なく、干渉計装置のゆれを押さえるこ とができるから

③山の中だと温度調整が少なくて済むので、レーザー光源のメンテ ナンスに都合がよいから

④強力なレーザー光の発生や、真空ポンプの稼働で、騒音が激し いから

# 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/





### 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

**梶田隆章**(2015年)





# KAGRA (かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



Hisaaki Shinkai

Seiji Kawamura Kieran Craig Martynov Denis

# KAGRA (かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



### 重力波初検出を発表するライツィLIGO所長

### 2016年2月11日



## "We had detected gravitational waves. We did it." "我々は,重力波を検出した.やり遂げたのだ."

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

## 2015年9月14日





重力波波形を音にすると...



始め2回は実周波数,後の2回は聞えやすいように+400Hz

https://mediaassets.caltech.edu/gwave

## 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

## GW150914





Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown black holes are spinning, and angular momentum is exchanged among the two black holes and with the orbit. This results in a quite dramatic change in the orientation of the orbital plane, clearly visible in the movie. Furthermore, the spin-axes of the black holes change, as visible through the colored patch on each black hole horizon, which indicates the north pole.

The lower part of the movie shows the two distinct gravitational waves (called 'polarizations') that the merger is emitting into the direction of the camera. The modulations of the polarizations depend sensitively on the orientation of the orbital plane, and thus encode information about the orientation of the orbital plane and its change during the inspiral. Presently, LIGO can only measure one of the polarizations and therefore obtains only limited information about the orientation of the advent of additional gravitational wave detectors in Italy, Japan and India.

Finally, the slowed-down replay of the merger at the end of the movie makes it possible to observe the distortion of the newly formed remnant black hole, which decays quickly. Furthermore, the remnant black hole is "kicked" by the emitted gravitational waves, and moves upward. (Credit: A. Babul/H. Pfeiffer/CITA/SXS.) - See more at: <u>http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash.NZPaW2LT.dpuf</u>

### http://ligo.org/detections/GW170104.php

### APPENDIX B: SIMULATION RANKINGS

In this appendix, we enumerate the simulations used in this work, ordered by one measure of their similarity with the data  $(\ln L, \text{ in Table III})$ . For nonprecessing binaries, Fig. 6 provides a visual illustration of some trends in  $\ln L$  versus mass ratio and the two component spins.

TABLE III. Peak Marginalized ln L I: Consistency between simulations: Peak value of the marginalized log likelihood ln L [Eq. (7)] evaluated using a lower frequency  $f_{low} = 30$  Hz and all modes with  $l \le 2$ ; the simulation key, described in Table II [an asterisk (\*) denotes a new simulation motivated by GW150914, and a (+) denotes one of the simulations reported in LVC-detect [1]]; the *initial* spins of the simulation (using – to denote zero, to enhance readability); the initial  $\chi_{eff}$ ; the total (redshifted) mass of the best fit; and the starting frequency (in Hz) of the best fit. Though omitting information accessible to the longest simulations, this choice of low-frequency cutoff eliminates systematic biases associated with simulation duration, which differs across our archive, as seen by the last column.

ln L	Key	q	$\chi_{1,x}$	X1,y	$\chi_{1,z}$	<b>X</b> 2,x	X2,y	X2,z	Xeff	$M_z/M_{\odot}$	$f_{\rm start}({\rm Hz})$
272.2	SXS:BBH:0310(*)	1.221							0.00	73.0	15.1
272.1	D12 g1.00 a-0.25 0.25 n100(*)	1.0			0.250			-0.250	-0.00	73.2	20.5
272.1	SXS:BBH:0002[S]	1.0							0.00	73.2	10.0
271.8	D11 q0.75 a0.0 0.0 n100(*)	1.333			• • •				-0.00	72.1	23.1
271.8	SXS:BBH:0305(*+)	1.221			0.330			-0.440	-0.02	74.2	14.8
271.6	SXS:BBH:0218	1.0	•••		-0.500			0.500	0.00	73.3	10.6
271.6	SXS:BBH:0198	1.202	• • •		•••	•••		•••	0.00	73.4	12.7
271.6	SXS:BBH:0307(*)	1.228	• • •		0.320			-0.580	-0.08	70.0	17.0
271.6	GT:BBH:476	1.0	• • •		-0.200			-0.200	-0.20	67.9	24.3
271.6	S0 D10.04 q1.3333 a0.45 -0.80 n100	1.334			0.450			-0.801	-0.09	71.9	27.9
271.5	D12.00 q0.85 a0.0 0.0 n100(*)	1.176	• • •		•••			•••	-0.00	73.0	20.6
271.5	D12.25_q0.82_a-0.44_0.33_n100(*+)	1.22	• • •		0.330			-0.440	-0.02	72.9	20.2
271.5	SXS:BBH:0312(*)	1.203	• • •		0.390	•••		-0.480	-0.00	73.9	14.8
271.4	SXS:BBH:0127	1.34	0.010	-0.077	-0.017	-0.061	-0.065	-0.179	-0.09	71.5	14.3
271.4	SXS:BBH:0115	1.07	0.019	0.013	-0.204	0.243	-0.067	0.291	0.04	74.1	13.8
271.3	SXS:BBH:0213	1.0			-0.800			0.800	0.00	73.2	11.7
271.3	UD D10.01 q1.00 a0.4 n100	1.0	• • •		0.400			-0.400	-0.00	73.4	26.7
271.2	D12 q1.00 a-0.25 0.00 n100(*)	1.0	•••		•••			-0.250	-0.12	69.4	21.8
271.2	SXS:BBH:0222	1.0	•••		-0.300				-0.15	69.1	12.3
271.2	SXS:BBH:0217	1.0	•••		-0.600	•••		0.600	0.00	73.2	11.9

#### 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  $1.0 \times 10^{-21}$ . 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 5.1 $\sigma$ . 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  $36^{+4}_{-4}M_{\odot}$  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.115.051102



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

B. P. Abbon,<sup>1</sup> E. Abbon,<sup>1</sup> T. D. Abbon,<sup>1</sup> M. B. Abernathy,<sup>1</sup> F. Acemese,<sup>14</sup> K. Ackley,<sup>5</sup> C. Adams,<sup>4</sup> T. Adams,<sup>7</sup> F. Addesso<sup>1</sup> R.X. Adiikari,<sup>1</sup> V.B. Adya,<sup>8</sup> C. Affekk,<sup>8</sup> M. Agataon,<sup>9</sup> K. Agataona,<sup>9</sup> N. Aggarwal,<sup>10</sup> O.D. Again,<sup>11</sup> L. Aielle, A. Ain.<sup>16</sup> P. Aikh.<sup>15</sup> B. Allen.<sup>51517</sup> A. Allosca.<sup>31,5</sup> P. A. Altin.<sup>20</sup> S. B. Anderson, W. G. Anderson, <sup>16</sup> K. Ami,<sup>1</sup> M. A. Amin<sup>1</sup>

M. C. Araya,<sup>1</sup> C. C. Ascenenzs,<sup>21</sup> J. S. Acueda,<sup>22</sup> N. Arauda<sup>20</sup> K. G. Ann,<sup>16</sup> S. Ascenei,<sup>25,13</sup> G. Asleon,<sup>16</sup> M. Asc.<sup>1</sup> S. M. Asson<sup>6</sup> P. Astone,<sup>21</sup> P. Asfmuth,<sup>4</sup> C. Aslbert,<sup>4</sup> S. Bebsk,<sup>32</sup> P. Bacon,<sup>32</sup> M. K. M. Bader,<sup>9</sup> P.T. Baker,<sup>31</sup> F. Bactocini,<sup>20,10</sup> O. Balardin,<sup>10</sup> S. W. Ballner,<sup>20</sup> J. C. Fanayegs,<sup>1</sup> S. E. Barzay,<sup>20</sup> B. C. Berish,<sup>1</sup> D. Baroer,<sup>20</sup> F. Baroes,<sup>20</sup> B. Barzay,<sup>20</sup> L. Baroet,<sup>20</sup> R. Basali,<sup>40</sup> A. Bard,<sup>11</sup> D. Barter,<sup>20</sup> J. Barler,<sup>20</sup> L. Baroe,<sup>20</sup> R. Basali,<sup>40</sup> A. Bard,<sup>11</sup>

J.C. Bakh,<sup>17</sup> C. Baue,<sup>1</sup> V. Brvigakla,<sup>26</sup> M. Bauan,<sup>11,42</sup> B. Belnike,<sup>27</sup> M. Bejger,<sup>43</sup> C. Belevynski,<sup>36</sup> A.S. Bell,<sup>26</sup> C. J. Bell,<sup>26</sup> E. K. Bergen,<sup>1</sup> J. Bergman,<sup>17</sup> G. Bergmann,<sup>4</sup> C. P. L. Bery,<sup>45</sup> D. Beranetti,<sup>46,11</sup> A. Bertelin,<sup>7</sup> J. Bergwiesen, S. Bhagwet, <sup>57</sup> R. Bhandare, <sup>46</sup> L. A. Eilenico, <sup>49</sup> G. Hillingsley, <sup>1</sup>J. Birch, <sup>6</sup> R. Birney, <sup>50</sup> O. Birnholtz, <sup>8</sup> S. Biscant, <sup>8</sup> A. Bisht, <sup>8,17</sup> M. Bilassi,<sup>34</sup> C. Biwer,<sup>16</sup> M. A. Bizcuard,<sup>23</sup> J. K. Blackburn,<sup>1</sup> C. D. Elnin,<sup>11</sup> D. G. Blain,<sup>10</sup> R. M. Blain,<sup>11</sup> S. Bloemer,<sup>4</sup> O. Bock,<sup>1</sup> T. P. Bockya,<sup>10</sup> M. Boer,<sup>10</sup> G. Bogaert,<sup>10</sup> C. Bogaert,<sup>10</sup> A. Bote,<sup>21</sup> P. Bojos,<sup>10</sup> C. Bond,<sup>21</sup> F. Bonda,<sup>26</sup> R. Bonnald,<sup>25</sup> B. A. Boon,<sup>1</sup> R. Bork,<sup>11</sup> V. Boschi,<sup>10,10</sup> S. Bose,<sup>10,11</sup> Y. Bouffmain,<sup>21</sup> A. Bond,<sup>10</sup> C. Bundarchin,<sup>20</sup> P. R. Bendy,<sup>10</sup> V. B. Bengy,<sup>10</sup> V. B. Bengy,<sup>10</sup> M. Bendersin,<sup>11</sup> J. E. Bunz,<sup>10</sup> T. Briant,<sup>10</sup> A. Brillet,<sup>10</sup> M. Bendersin,<sup>11</sup> V. Brissen,<sup>12</sup> P. Breekill,<sup>10</sup> A. F. Brooks,<sup>1</sup> D. A. Brown,<sup>10</sup> D. D. Brown,<sup>40</sup> N. M. Barwn,<sup>10</sup> C. C. Buchanan,<sup>2</sup> A. Buikema,<sup>10</sup> T. Bulik,<sup>44</sup> H. J. Bulten,<sup>419</sup> A. Buotanno,<sup>21,42</sup> D. Buskulie,<sup>7</sup> C. Buy,<sup>30</sup> R. L. Byer,<sup>40</sup> M. Cabero,<sup>8</sup> L. Cadorati,<sup>10</sup> G. Cagnoli,<sup>6400</sup> C. Cahillane,<sup>1</sup>

J. Calderón Bustillo, <sup>66,0</sup> T. Callette,<sup>1</sup> E. Calleri,<sup>67,4</sup> J. B. Carne,<sup>66</sup> E. C. Carnen,<sup>65</sup> J. Car,<sup>76</sup> C. D. Caparo,<sup>8</sup> H. Capcensa,<sup>2</sup> E. Carbognani,28 S. Caride,78 J. Casanaeva Diaz,29 C. Casentini,20,11 S. Cautill,26 M. Cavaglia,21 F. Cavaller,7 R. Catalleri,<sup>54</sup> O. Celle,<sup>75</sup> C. B. Cepela,<sup>1</sup> L. Cerboni Bahell,<sup>57,10</sup> O. Centtari,<sup>10,10</sup> E. Cearial,<sup>77,11</sup> R. Chakadarry,<sup>1</sup>

T. Chrienmangale,<sup>1</sup> S.J. Charberlin,<sup>15</sup> M. Chan,<sup>16</sup> S. Chan,<sup>16</sup> F. Charlun,<sup>16</sup> E. Chawarake-Maxin,<sup>16</sup> H.Y. Chen Y. Chen,<sup>16</sup> C. Cheng,<sup>17</sup> A. Chincadal,<sup>46</sup> A. Chierman,<sup>26</sup> H. S. Cho,<sup>17</sup> M. Che,<sup>46</sup> J. H. Chow,<sup>26</sup> N. Christman,<sup>26</sup> Q. Chu,<sup>4</sup> S. Chua,<sup>46</sup> S. Chung,<sup>16</sup> D. Chau,<sup>17</sup> F. Chen,<sup>17</sup> J. A. Cherk,<sup>46</sup> F. Cleva,<sup>46</sup> B. Coccia,<sup>46,220</sup> H.-F. Cohadoe,<sup>46</sup> A. Colla,<sup>27,26</sup> C.G. Colletz,<sup>10</sup> L. Cominsky,<sup>10</sup> M. Constancio Jr,<sup>11</sup> A. Conta,<sup>2028</sup> L. Conta,<sup>42</sup> D. Cock,<sup>17</sup> T.R. Corbit,<sup>2</sup> N. Cornica,<sup>21</sup> A. Cont,<sup>11</sup> S. Contest,<sup>14</sup> C. A. Costa,<sup>11</sup> M. W. Coughlin,<sup>28</sup> S. B. Coughlin,<sup>20</sup> J.-P. Coulor,<sup>11</sup> S. T. Countryman,

F. Casvera,<sup>1</sup> E. F. Cowan,<sup>55</sup> D. M. Casvari,<sup>5</sup> M. J. Cowan,<sup>5</sup> D. C. Cayne,<sup>1</sup> E. Cayne,<sup>7</sup> K. Craig.<sup>36</sup> J. D. E. Craighton,<sup>16</sup> T. D. Creighton, <sup>10</sup> J. Cript, <sup>2</sup> S. G. Cacwder, <sup>14</sup> A. M. Cruise, <sup>10</sup> A. Cumming, <sup>10</sup> L. Carringhara, <sup>20</sup> E. Cacco, <sup>16</sup> T. Dal Carton, <sup>16</sup> T. D. Creighton, <sup>10</sup> J. Cripo,<sup>45</sup> S. C. Crewder,<sup>11</sup> A. M. Creise, <sup>11</sup> A. Commission, <sup>10</sup> C. F. De Silva Costa,<sup>11</sup> V. Dattlo,<sup>10</sup> L. Dave,<sup>10</sup> S. Darmar,<sup>10</sup> C. F. De Silva Costa,<sup>10</sup> V. Dattlo,<sup>10</sup> L. Dave,<sup>10</sup> H. P. Devekeen,<sup>10</sup> M. Davies,<sup>10</sup> S. Deries,<sup>118</sup> E. J. Dave,<sup>10</sup> S. Dave,<sup>10</sup> S. Deslow,<sup>10</sup> S. Deslow,<sup>10</sup> S. Deslow,<sup>10</sup> J. Deslow,<sup>10</sup> J. Deslow,<sup>10</sup> S. Deslow,<sup>10</sup> S. Deslow,<sup>10</sup> J. Deslow,<sup>10</sup> J. Deslow,<sup>10</sup> S. Deslow,<sup>10</sup> S. Deslow,<sup>10</sup> S. Deslow,<sup>10</sup> J. Deslow,<sup>10</sup> J. Deslow,<sup>10</sup> S. Deslow,<sup>10</sup> J. Des S. Di Pace, <sup>51,6</sup> I. Di Paina, <sup>51,4</sup> A. Di Virgillo,<sup>12</sup>G. Dejcinoski,<sup>16</sup> V. Dolipue,<sup>44</sup> P. Donovan,<sup>15</sup>K. L. Deoley,<sup>11</sup> S. Deravari,<sup>65</sup> F. Douglas," T.F. Downes," M. Diago,"" R. W. P. Durve, J. C. Diggers," Z. Du," M. Dazoel, S.E. Doyer, T.B. Eds.<sup>66</sup> M.C. Edwards.<sup>76</sup> A. Effler,<sup>6</sup> H.-D. Eggenstein,<sup>5</sup> F. Ehmas,<sup>1</sup> J. Eichholz,<sup>5</sup> S. S. Eikenberry,<sup>5</sup> W. Eagels,<sup>1</sup>

R. C. Bosick,<sup>10</sup> T. Bissl,<sup>1</sup> M. Evans,<sup>10</sup> T.M. Evans,<sup>6</sup> F. Everst,<sup>12</sup> M. Fectourovich,<sup>10</sup> V. Pafona,<sup>20,0,15</sup> H. Fein,<sup>10</sup> 5. Fairman,<sup>41</sup> X. Far,<sup>42</sup> Q. Fang,<sup>21</sup> S. Fairnon,<sup>41</sup> B. Far,<sup>41</sup> W. M. Far,<sup>44</sup> M. Farua,<sup>16</sup> M. Fary,<sup>4</sup> H. Fehrman,<sup>41</sup> M. M. Fejer,<sup>42</sup> D. Feldbaum,<sup>5</sup> L. Fernara,<sup>111</sup> E. C. Ferrain,<sup>11</sup> E. Ferrin,<sup>14</sup> F. Feldbaum,<sup>5</sup> L. S. Fan,<sup>72</sup> I. Fior,<sup>14</sup> D. Forreci.<sup>30</sup> R.E. Fisher.<sup>30</sup> R. Flaminia.<sup>4552</sup> M. Heucher.<sup>30</sup> H. Forg.<sup>40</sup> J.-D. Fournin.<sup>31</sup> S. France.<sup>35</sup> S. France.<sup>35</sup> J.

E. Frasconi,<sup>19</sup> M. Frede,<sup>17</sup> Z. Fazi,<sup>26</sup> A. Freise,<sup>16</sup> R. Fray,<sup>29</sup> V. Fray,<sup>20</sup> T. T. Fuicke,<sup>19</sup> P. Fritchel,<sup>10</sup> V. V. Frolev,<sup>2</sup> P. Falda<sup>1</sup> M. Fyffe,<sup>6</sup> H. A. G. Gabbard,<sup>12</sup> J. E. Gair,<sup>39</sup> L. Gammaitoni,<sup>2220</sup> S. G. Gaerkar,<sup>19</sup> F. Gardi,<sup>67,8</sup> A. Gate,<sup>34</sup> O. Casa,<sup>14,15</sup>

N. Gebraiz, <sup>66</sup> G. Gemme, <sup>67</sup> B. Gendre, <sup>57</sup> E. Genin, <sup>56</sup> A. Gennal, <sup>16</sup> J. George, <sup>46</sup> L. Gergels, <sup>56</sup> V. Cermain, <sup>7</sup> Abbirep Gheet, <sup>1</sup> Anchiman Chosh,<sup>16</sup> S. Chosh,<sup>50</sup> I. A. Cinire,<sup>15</sup> N. D. Ciardra,<sup>4</sup> A. Giacetta,<sup>19</sup> N. Gill,<sup>10</sup> A. Glacke,<sup>8</sup> J. R. Classev, E. Oosta,<sup>16</sup> R. Owen,<sup>14</sup> L. Oosta,<sup>14</sup> G. Oosafer,<sup>1</sup> J. M. Owanier, Castra,<sup>10,10</sup> A. Oosaferana,<sup>40</sup> N. A. Oosafera,<sup>20</sup> M. L. Gorgiersky,<sup>10</sup> S. E. Gessen,<sup>1</sup> M. Gessela,<sup>10</sup> R. Gessey<sup>3</sup> C. Grast,<sup>13</sup> R. B. Gastf,<sup>13</sup> M. Grassa,<sup>16</sup> A. Grast,<sup>16</sup> S. Grassa,<sup>17</sup> S. Grassa,<sup>17</sup> A. C. Grassa,<sup>16</sup> S. J. S. Grassa,<sup>18</sup> D. Grassa,<sup>18</sup> S. Grassa,<sup>19</sup> J. Hador,<sup>12</sup> B. J. Hal,<sup>18</sup>

 E.D. Hall, G. Harnsend,<sup>20</sup> M. Harsy,<sup>20</sup> M.M. Hanor,<sup>1</sup> J. Harts,<sup>21</sup> C. Harns,<sup>21</sup> M.D. Farmar,<sup>21</sup> J. Harson,<sup>1</sup>
 T. Harbrick<sup>2</sup> J. Harres,<sup>220</sup> G. M. Harry,<sup>20</sup> M.W. Harry,<sup>21</sup> M.J. Hart,<sup>25</sup> M.T. Hartman,<sup>2</sup> C.J. Haster,<sup>5</sup> X. Harghan,<sup>34</sup> J. Harts,<sup>15</sup> L. Horther,<sup>15</sup> A. Halman,<sup>24</sup> M.C. Heiming,<sup>16</sup> J. Hartson,<sup>21</sup> G. Menning,<sup>16</sup> M. Hendry, <sup>30</sup> L. S. Heng,<sup>30</sup> J. Hennig,<sup>20</sup> A. W. Heptonsmill,<sup>1</sup> M. Hens,<sup>517</sup> S. Hild,<sup>24</sup> D. Hossa,<sup>127</sup> K. A. Heege,<sup>1</sup> D. Hofmar,<sup>9</sup> S. E. Hallin,<sup>128</sup> K. Hak,<sup>4</sup> D. E. Hols,<sup>15</sup> E. Hogkin,<sup>30</sup> D. I. Hesken,<sup>10</sup> J. Heagh,<sup>25</sup> E. A. Heasten,<sup>35</sup> E.J. Hewell,<sup>35</sup> S. E. Hallin,<sup>128</sup> K. Hak,<sup>4</sup> D. E. Hols,<sup>15</sup> E. Howell,<sup>35</sup> H. Hawell,<sup>35</sup> H. Y.M. Ha." S. Hump, 21 E. A. Harata. ""." D. Hart." E. Hapley, 53 R. Hasa, 56 S. H. Hutter, 57 T. Hay dr-Dird, 5 A. klrivy, N. Indik, D. B. Ingran, "R. Ina," H. N. Isa," J.-M. Isao, "M. Bil, "G. Inlas," T. Bogal, "B. R. Iye, "S. Hami," H. Hami, "J. Hami, "G. Isao," T. Bogal, "B. R. Iye, "S. Hami," H. B. Robben, "T. Bogal," "R. Ina, "H. Hami," P. Isao, "S. Hami," J. Hamine, "G. Isao, "S. K. Isao," N. K. Isao, "D. Isao, "S. Isao, "S. Isao, "D. Isao, "S. Isao, "S. J. O. Jonkes," L. Je, "B. Hamis, "S. C. V. Kalaghang," N. K. Mang, "S. J. Markes, "R. Hamis, "S. V. Kalaghang," S. K. Kalaghang, "S. K. Kalaghang," S. K. Kalaghang, "S. K. Kalaghang," S. K. Kalaghang, "S. K. Kalaghang, "S. K. Kalaghang," S. K. Kalaghang, "S. K. Kalaghang, "S. K. Kalaghang, "S. K. Kalaghang," S. K. Kalaghang, "S. K.

V. Kalogen," S. Kandhasaray," G. Kang," J.B. Kanner, S. Karid," M. Kaprauk, 200," E. Kanaweankis," W Katzmar, 55, Kuster, 77 T. Kaur, 97 K. Kewabe, 77 F. Kawarez, 507 F. Keitlian, 57 M. S. Kehl, 50 D. Keitel, 506 D. S. Kelley, 5 W Kells,<sup>1</sup> R. Kennedy,<sup>10</sup> D. G. Keppel,<sup>2</sup> J. S. Key,<sup>21</sup> A. Kludsidovski,<sup>2</sup> F. Y. Khulli,<sup>10</sup> I. Khue,<sup>11</sup> S. Khue,<sup>11</sup> Z. Khue, E. A. Khuzanov,<sup>20</sup> N. Kijunebos,<sup>20</sup> C. Kim<sup>10</sup> J. Kim<sup>10</sup> K. Kim<sup>10</sup> Nam-Oyu Kim<sup>10</sup> Namjua Kim,<sup>40</sup> Y.-M. Kim<sup>11</sup> 5. J. King.<sup>164</sup> S. J. King.<sup>16</sup> D. L. Kingel,<sup>1</sup> J. S. Kissel,<sup>19</sup> L. Klavbolk,<sup>27</sup> S. Kimenico,<sup>1</sup> S. M. Kochlenbeck,<sup>1</sup> K. Kibeyarm,<sup>1</sup> S. Koley,<sup>9</sup> V. Kondushos,<sup>1</sup> A. Kontos,<sup>10</sup> S. Konada,<sup>10</sup> M. Korobko,<sup>11</sup> W.Z. Korth,<sup>1</sup> I. Kowakiz,<sup>41</sup> D.B. Korak,<sup>1</sup> V. Kringel,<sup>8</sup> S. Krahme,<sup>6</sup> A. Krélak,<sup>12,13</sup> C. Krager,<sup>17</sup> O. Kucha,<sup>3</sup> E. Kame,<sup>46</sup> K. Kame,<sup>9</sup> L. Koo,<sup>18</sup> A. Kosynk,<sup>10</sup> S. Kaves,<sup>18</sup> D. Lacky,<sup>27</sup> M. Landy,<sup>30</sup> J. Lange,<sup>10</sup> S. Larta,<sup>44</sup> P. D. Lacky,<sup>18</sup> A. Lazanini,<sup>1</sup> C. Lazzer,<sup>44</sup> P. Loni,<sup>20,5</sup>,9 S. Leasey,<sup>20</sup> E. O. Lebiger,<sup>20,20</sup> C. H. Lee,<sup>18</sup> H. K. Lee,<sup>11</sup> H. M. Lee,<sup>10</sup> K. Lee,<sup>20</sup> A. Lenee,<sup>20</sup> M. Lereard, <sup>20,50</sup>

J. R. Lereg," N. Lerey," N. Levendre, "Y. Levin," R.M. Levine," T.O. F. Li, A. Libson," T. B. Libsonerg, N.A. Lovkerbin," A Legen, "A.L. Lorgherd," D.L. T. Lowlee, "L.B. Loui," M. Lerenzini, "W.V. Leviets," V. Leviets, "A L. Lorgherd, "D. L. T. Lowlee," J. B. Loui, "M. Lerenzini, "W.V. Leviets," A L. Lorgherd, "D. L. T. Lowlee," J. B. Loui, "M. Lerenzini, "W.V. Leviets," A L. Lorgherd, "D. L. T. Lowlee," J. B. Loui, "M. Leviets," K.A. Lowlee, "L.B. Lowlee, M Lomand,<sup>10</sup> O. Losado,<sup>20</sup> J. D. Lough,<sup>117</sup> C. G. Lousta<sup>102</sup> O. Lovelace,<sup>22</sup> H. Lück,<sup>178</sup> A. P. Londyma,<sup>4</sup> J. Luo,<sup>26</sup> R. Lyrch," Y. Mr., 7 T. MicDonald," B. Machenschalk," M. Machenia," D. M. Mackeol, 7 B. Magalia-Sandaval, 3. M. Magan,<sup>10</sup> M. Mapowania,<sup>1</sup> E. Majarana,<sup>28</sup> I. Maksimovic,<sup>10</sup> V. Malvenz,<sup>20,0</sup> N. Mar,<sup>10</sup> I. Mardel,<sup>40</sup> V. Mantie,<sup>10</sup> V. Margano, <sup>56</sup> G.L. Marsell,<sup>27</sup> M. Marsko,<sup>28</sup> M. Mantssani,<sup>38</sup> F. Maylesoni,<sup>111,10</sup> F. Marien,<sup>7</sup> S. Mirka,<sup>39</sup> Z. Mirka, A. S. Markosyan," I. Maros, R. Martelli, <sup>51,9</sup> L. Mantellini, <sup>51</sup> I. W. Marda, <sup>6</sup> R. M. Marda, <sup>5</sup> D. V. Marynos, <sup>1</sup> J. N. Mare,

K. Masor, <sup>10</sup> A. Masseret,<sup>7</sup> T.J. Massinger,<sup>20</sup> M. Masso-Reis,<sup>10</sup> F. Matichard,<sup>10</sup> L. Matone,<sup>20</sup> N. Mavalvala,<sup>20</sup> N. Mazander,<sup>26</sup> O. Mazaolo<sup>1</sup> R. McCenty,<sup>27</sup> D E. McCleland,<sup>25</sup> S. McConnik,<sup>5</sup> S.C. McGuire,<sup>10</sup> O. McIarye,<sup>1</sup> J. Melver,<sup>1</sup> D.J. McManus,<sup>20</sup> S.T. McWilliams,<sup>42</sup> D. Meacher,<sup>17</sup> O.D. Meadors,<sup>303</sup> J. Meldaer,<sup>9</sup> A. Melster, G. Mendell,<sup>17</sup> E. Menders Gankas,<sup>8</sup> E. A. Mossel,<sup>16</sup> E. Merik,<sup>17</sup> M. Mennugzi,<sup>20</sup> S. Medikas,<sup>1</sup> C. Messeger,<sup>26</sup> C. Messick,<sup>26</sup> P.M. Meyer,<sup>14</sup> F. Merserl,<sup>26,9</sup> H. Mint,<sup>16</sup> C. Michel,<sup>16</sup> H. Michelm,<sup>16</sup> F. E. Michalev,<sup>10</sup> L. Micro,<sup>11</sup> J. Miller,<sup>10</sup> M. Millouae,<sup>11</sup> Y. Mineskov,<sup>10</sup> J. Ming.<sup>25,4</sup> S. Minhelaet,<sup>21</sup> C. Misira,<sup>11</sup> S. Mira,<sup>14</sup> V.F. Mittefmov,<sup>10</sup> G. Mitseinakhar,<sup>5</sup> R. Mitlema,<sup>10</sup> A. Mogal,<sup>10</sup> M. Mohan,<sup>24</sup> S. R.P. Meispate,<sup>10</sup> M. Messari,<sup>21,21</sup> B.C. Meora,<sup>1</sup>

C.J. Moore,<sup>102</sup> D. Moran,<sup>10</sup> G. Morane,<sup>11</sup> S.R. Morane,<sup>10</sup> K. Moward,<sup>8</sup> B. Moare,<sup>11</sup> C.M. Mow-Lowey,<sup>16</sup> C. L. Maeller,<sup>1</sup> G. Maclier,<sup>25</sup> A. W. Male,<sup>26</sup> Areanon Mulderjer,<sup>26</sup> D. McLinejer,<sup>16</sup> S. Malderjer,<sup>21</sup> N. McKard,<sup>26</sup> A. McLiney,<sup>8</sup> J. Musch,<sup>26</sup> D. J. Murphy,<sup>26</sup> P. G. Marray,<sup>26</sup> A. Mytidis,<sup>2</sup> L. Narderchik,<sup>25,33</sup> L. Matkethieul,<sup>25,33</sup> R. K. Nayak,<sup>10</sup> V. Noraka,<sup>26</sup> X. Nodkova,<sup>26</sup> G. Nelemana,<sup>25,4</sup> M. Nori,<sup>65,47</sup> A. Novanert,<sup>10</sup> G. Novren,<sup>26</sup> T.T. Njuyer,<sup>26</sup> A. B. Nielsen,<sup>1</sup> S. Nisanke,<sup>25,7</sup> Nica,<sup>6</sup> E. Nores,<sup>4</sup> D. Noling,<sup>6</sup> M. E. Nores,<sup>4</sup> M. K. Nores,<sup>6</sup> J. Owing<sup>11</sup> E. Dehaw,<sup>8</sup> J. Offsel,<sup>9</sup> J. Orbit,<sup>9</sup> S. Celler,<sup>10</sup> J. J. Orbit,<sup>10</sup> S. H. Og,<sup>10</sup> S. H. Og,<sup>10</sup> F. Ohres,<sup>11</sup> M. Oliver,<sup>11</sup> M. Oliver,<sup>10</sup> R. Opperman,<sup>8</sup> Kithard J. Omm,<sup>10</sup> K. O'Reilly,<sup>4</sup> R. O'Shagharay,<sup>10</sup> C.D. Ot.<sup>10</sup> D.J. Otaway.<sup>24</sup> R.S. Dters,<sup>5</sup> H. Overnier,<sup>6</sup> B.J. Over,<sup>70</sup> A. Pai,<sup>10</sup> S.A. Pai,<sup>4</sup> Distanganesis, "C. D. Kort, "D. C. Balenka," A. Pal-Steph, "H. Direct," in Construct: Distance, "D. Palaceta," C. Palaceta, "A. Palaceta," A. Palaceta, "C. Palaceta," Plannersky, "E. C. Part,"
 Palaceta, "A. Palaceta," M. A. Meg, <sup>20,00</sup> B. R. Paris, <sup>10</sup> W. Parker," D. Pascuelle, "A. Palaceta," R. Passagnareta, <sup>20,7</sup>
 D. Passaello, <sup>10</sup> B. Patricelli, <sup>110</sup> Z. Patrick, <sup>40</sup> B. L. Portistone, <sup>20</sup> M. Polence, <sup>1</sup> R. Patricelli, <sup>110</sup> Z. Patrick, <sup>40</sup> B. L. Portistone, <sup>20</sup> M. Polence, <sup>1</sup> R. Patricelli, <sup>110</sup> Z. Patrick, <sup>40</sup> B. L. Portistone, <sup>20</sup> M. Polence, <sup>110</sup> A. Pareza, <sup>111</sup> H. P. Fikiller, <sup>30,20</sup> M. Pielos, <sup>30</sup> O. Piecini, <sup>30,20</sup> M. Pielos, <sup>51</sup> D. Piecini, <sup>51,20</sup> M. Pielos, <sup>51</sup> D. Piecini, <sup>31,20</sup> M. Pielos, <sup>51</sup> D. Piecini, <sup>31,20</sup> M. Pielos, <sup>51</sup> P. Piecini, <sup>31,20</sup> M. Pielos, <sup>51</sup> P. Piecini, <sup>31,20</sup>

061002-13

V. Plarto,<sup>17</sup> G. Pillart,<sup>16</sup> L. Plaard,<sup>16</sup> L.M. Pine,<sup>17</sup> M. Pikin,<sup>18</sup> J. H. Poeld,<sup>1</sup> R. Peggiani,<sup>10, 16</sup> E. Pepolgie,<sup>14</sup> A. Poel,<sup>1</sup> Provel,<sup>16</sup> J. Panad,<sup>14</sup> V. Profel,<sup>51</sup> S. S. Premachandre,<sup>16</sup> T. Prestrgard,<sup>16</sup> L. R. Price,<sup>1</sup> M. Prijatelj,<sup>16</sup> M. Principe,<sup>17</sup>
 S. Prijaten,<sup>17</sup> R. Pitz,<sup>1</sup> G. A. Prof.,<sup>10,0</sup> L. Prilderre,<sup>16</sup> G. Pancien,<sup>18</sup> M. Panarov,<sup>21</sup> P. Pogge,<sup>21</sup> M. Principal H. Qi,<sup>6</sup> Qin,<sup>5</sup> V. Corrachiz,<sup>5</sup> H. A. Quinceo,<sup>1</sup> R. Quintee-James,<sup>50</sup> R.J. Rais,<sup>15</sup> D. S. Rabeling,<sup>26</sup> H. Raddin,<sup>10</sup> P. Raffal,<sup>46</sup> S. Raja,<sup>46</sup> M. Raizmano,<sup>10</sup> C. R. Ramet,<sup>5</sup> P. Rappani,<sup>171</sup> V. Raywand,<sup>15</sup> M. Raizmano,<sup>10,17</sup> V. Ra<sup>15</sup> J. Read,<sup>12</sup> C. M. Ratel,<sup>31</sup> T. Reginhan,<sup>32</sup> L. Ru<sup>17</sup> S. Solal,<sup>20</sup> D. H. Raizma,<sup>11</sup> H. Reac,<sup>10</sup> S. D. Bryan,<sup>20</sup> F. Ricz,<sup>21,10</sup> K. Silos,<sup>31</sup> N. A. Roberson,<sup>114</sup> R. Robel,<sup>26</sup> E. Roberson,<sup>114</sup> A. Robeling,<sup>14</sup> L. Robeling,<sup>14</sup> K. Silos,<sup>31</sup> N. A. Roberson,<sup>114</sup> R. Robel,<sup>26</sup> E. Roberson,<sup>114</sup> R. Robeling,<sup>15</sup> L. Robeling,<sup>15</sup> J. Robeling,<sup>16</sup> K. Roberson,<sup>114</sup> R. Robeling,<sup>16</sup> J. Robeling,<sup>16</sup> J. Robeling,<sup>16</sup> L. Robeling,<sup>16</sup> K. Robeling 5. Bachdes,<sup>1</sup> T. Sadeeki,<sup>37</sup> L. Backgrinn,<sup>16</sup> L. Selconi,<sup>16</sup> M. Saleen,<sup>108</sup> F. Selern,<sup>16</sup> A. Sarnijdar,<sup>27</sup> L. Sammat,<sup>1</sup> M. Sarapera, "E. J. Sancher," V. Saraberg, "B. Sancherg," G. H. Sanders, J. R. Sanders, "M. B. Sancher,"
 B. Sathyappalaste," P. R. Santher, "O. Sante," R. L. Savage, "A. Savadsky," P. Sander, "R. Schling," J. Schwich, E Schwick 156 R. Schushel,<sup>21</sup> R. M. S. Schoffeld,<sup>20</sup> A. Schönbeck,<sup>21</sup> E. Schwick,<sup>310</sup> D. Schwett,<sup>310</sup> B. F. Schwa,<sup>31,20</sup> Sout,<sup>16</sup> S. M. Scot,<sup>16</sup> D. Sellen,<sup>7</sup> A. S. Sengapa,<sup>16</sup> D. Senana,<sup>16</sup> V. Sepako,<sup>17,1</sup> A. Sergev,<sup>16</sup> G. Sena,<sup>15</sup> Y. Seyawat,<sup>112</sup> A. Sovigry,<sup>17</sup> D. A. Shaddeek,<sup>18</sup> T. Shafta,<sup>16</sup> S. Shah<sup>215</sup> M. S. Shahrin,<sup>17</sup> M. Shaiwa,<sup>1</sup> Z. Shao, E. Shapiro, <sup>44</sup> P. Shawimi, <sup>42</sup> A. Sheperd, <sup>16</sup> D. H. Shoemaker, <sup>16</sup> D. M. Shoemaker, <sup>45</sup> K. Sieller, <sup>15,0</sup> X. Siemena, <sup>16</sup> D. Kipp, <sup>1</sup> A. D. Siba,<sup>11</sup> D. Simskov,<sup>1</sup> A. Singer,<sup>1</sup> L. P. Singer,<sup>16</sup> A. Singh,<sup>21,1</sup> R. Singh,<sup>2</sup> A. Singhal,<sup>11</sup> A.M. Sinter,<sup>10</sup> B. J. J. Singmoler," J. R. Smith," M. R. Smith," N.D. Smith," R. J. E. Smith," H.J. Son,"" H. Soraru," R. Somersine," T. Soundeep,<sup>14</sup> A. K. Seivasuva,<sup>16</sup> A. Staley,<sup>20</sup> M. Steinie,<sup>2</sup> J. Steiniechner,<sup>20</sup> S. Steiniechner,<sup>20</sup> D. Steinmyrer,<sup>5,1</sup> B. D. Stephens,<sup>25</sup> S. P. Stevenson,<sup>45</sup> R. Stene,<sup>45</sup> K. A. Stenie,<sup>16</sup> N. Straniere,<sup>45</sup> B. Steitz,<sup>57,5</sup> N. A. Stenne,<sup>79</sup> S. Strigie,<sup>40</sup> R. Stanni,<sup>321</sup> A.L. Staver,<sup>6</sup> T.Z. Summerscales,<sup>128</sup> L. Sun,<sup>39</sup> P.J. Suttin,<sup>10</sup> B.L. Swiniels,<sup>10</sup> M.J. Scorepaiceyk, M. Thern,<sup>20</sup> D. Talaider,<sup>50</sup> D. S. Tanner,<sup>6</sup> M. Tipes,<sup>50</sup> S. S. Tarabrin,<sup>1</sup> A. Tarachini,<sup>10</sup> R. Taylor,<sup>1</sup> T. Theog. M.P. Thirugamasanburdara<sup>1</sup> E.O. Thorna,<sup>40</sup> M. Thomas,<sup>4</sup> F. Thomas,<sup>21</sup> K.A. Thorne,<sup>4</sup> K. S. Thorne,<sup>10</sup> E. Thruce,<sup>10</sup> M. F. Hartginnanersensation, E. G. Freenko, M. Lechard, F. Leenko, T. P. S. Harts, R. S. Herrer, S. Herrer, R. S. Herrer, Herrer, R. S. Herrer, Herrer, R L. van der Schauf, <sup>2</sup> J. V. van Heijninger, <sup>2</sup> A. A. van Veggel,<sup>20</sup> M. Variars,<sup>1941</sup> S. Vas,<sup>1</sup> M. Varida,<sup>20</sup> R. Vaslin,<sup>1</sup> A. Yozaka, "O. Vodovski, "J. Verski," P.J. Verski, "F. Verski, "L. Verski, "D. Verski," J. Verski, "M. A. Verski, "S. Verski," D. Verski, "D. Verski," M. Verski, "D. Verski," M. Verski, "D. Verski," D. Verski, "D. Verski," S. Verski, "T. V.," H. Verski, "D. Verski," D. Verski, "D. Verski," D. Verski, "D. Verski," S. Verski, "D. Verski," D. Verski, "D. Verski," S. Verski," S.P. Vyentanin,<sup>46</sup> A.R. Wade,<sup>17</sup> L. E. Wate,<sup>10</sup> M. Wade,<sup>10</sup> S.J. Waldman,<sup>10</sup> M. Walker,<sup>1</sup> L. Walloce,<sup>1</sup> S. Walch,<sup>10,10</sup> G. Wang," H. Wang," M. Wang," X. Wang," Y. Wang," H. Ward," R. L. Wand," J. Wemer," M. Was," S. Werrer," L-W. Wei,<sup>10</sup> M. Weinert,<sup>1</sup> A. I. Weinstein,<sup>1</sup> R. Wein,<sup>10</sup> T. Weiner,<sup>5</sup> L. Wei,<sup>9</sup> P. Weiler,<sup>1</sup> T. Weighal,<sup>1</sup> H. Weite,<sup>1</sup> J.T. Wiehe, 2018 S.E. Whiteash, D.J. White, B.F. Whiting, K. Wiesser, C. W.Bitsson, T.P.A. Willers, L. William, R.D. Willams,<sup>1</sup> A.R. Willamoya,<sup>21</sup> J.L. Wills,<sup>108</sup> B. Willor,<sup>101</sup> M.H. Winner,<sup>107</sup> L. Wiskeimans,<sup>6</sup> W. Wiskler, C. C. Wipf,<sup>1</sup> A.G. Wischan,<sup>16</sup> H. WitkL<sup>137</sup> C. Wenn,<sup>28</sup> J. Worten,<sup>37</sup> J. L. Weight,<sup>26</sup> G. Wi,<sup>4</sup> J. Yabios,<sup>10</sup> I. Yabioshin,<sup>1</sup> W. Yan, <sup>10</sup> H. Yamanan, <sup>1</sup> C. C. Yanag, <sup>10</sup> M. L. Yay,<sup>20</sup> H. Y.,<sup>10</sup> M. Yvet,<sup>1</sup> A. Zahades,<sup>10</sup> L. Zangaraha,<sup>10</sup> M. Zavaki,<sup>10</sup> J. P. Zandei,<sup>21</sup> M. Zavaki,<sup>10</sup> H. Zhang,<sup>11</sup> L. Zhang,<sup>11</sup> M. Zhang,<sup>11</sup> Y. Zang,<sup>10</sup> Y. Zang,<sup>10</sup> C. Zhao,<sup>11</sup> M. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> X. J. Zhu,<sup>11</sup> M. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> X. J. Zhu,<sup>11</sup> M. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> X. Zhou,<sup>11</sup> Y. Zhou,<sup>11</sup> Y. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> X. J. Zhu,<sup>11</sup> Y. Zhou,<sup>11</sup> Y. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> X. J. Zhu,<sup>11</sup> Y. Zhou,<sup>11</sup> Y. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> X. Zhou,<sup>11</sup> Y. Zhou,<sup>11</sup> Y. Zhou,<sup>11</sup> Y. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> Z. Zhou,<sup>11</sup> X. Zhou,<sup>11</sup> Y. Zho

IL PEDRUNEY 2015

#### M.E. Zuokes,<sup>110</sup> S.E. Zarso,<sup>10</sup> and J. Zweizig<sup>1</sup> (LICO Scientific Collaboration and Vago Collaboration)

<sup>1</sup>ERGO, California Institute of Technology, Paradona, California 93725, USA Jairon Rear Dalarenty, Paten Ringe, Louisiane 2083; <sup>3</sup>Universitä di Saleren, Parimo, J 54081 Saleren, Reiv <sup>1</sup>INFR, Segure & Papels, Complexes Concentration & Mente S. Jargels, 180/26 Nepels, Buly "University of Florida, deducable, Florida, 30(1), 856. <sup>1</sup>LIGO Ladugaton Observatory, Unigaton, Louisians 70734, 0521 <sup>1</sup>Laboratelre d'Annary-le Vienz de Physique des Particulas (IAPP), Université Savele Mont Blave, UNESPIP), 3-3400 Innary-le Vienz, France <sup>1</sup>/Bast Electric Index, Mar Planck Index & Graduationskyll, D-FRIT However, George <sup>1</sup>/Mart, Service 1995, 1058 70 Amsterdam, Intherlands

061102-13

12 TE HEAVY COL PRI, 116, 051105 (2005) <sup>10</sup>2020, Hamorinaren Dauhart of Ercharlegs, Canderligs, Hamorinaren (2128, 158) <sup>10</sup>Juniuro Nachard de Perestian Ecosisis, 12127-170 Mile Korl des Convers, Site Paule, Bradi <sup>20</sup>DRH, Gen Samo Science Instana, 1-57100 L'Aquili, Italy "IN"IN Sectors of Sense Ter Version: 1-00123 Sense, Italy <sup>1</sup> Joseph Berland, S. & Karran, J. & Vergland, J. Joseph Stein, Bary Jacks Discours (2007) for Administry and Associations, Pher 41, 2007. Julia <sup>10</sup> Journal of Control for Theorem All Condenses, Manual Association, Manual Association, 550512, Joseph <sup>10</sup> Discours of Physics and Associations, Witcours (2007), 6526 <sup>10</sup> University of Phys. J. 2010, 77 June 2009. Control of Sciences <sup>10</sup> University of Phys. J. 2010, 77 June 2009. <sup>10</sup> Delevatio di Pilo, 152,157 Pilo, 2023 <sup>10</sup> Dell'E Science di Pilo, 16507 Pilo, 2025 <sup>20</sup> Januarian Matasal Elevativity Cathereit, Annataina Capital Revisity (200, Antroph <sup>2</sup> The Catherenty of Michigal Nationally Microsofty (2007, 2004 <sup>10</sup> California Net Network) (Patrices, Patrices, California Viel), 133 <sup>10</sup> Mi, University Pacietical (California), Delevativity Pacherine, Comp. France. <sup>10</sup> Microsoft Pacietical (California), Delevativity Pacherine, Comp. Patrices. extension Australia [] Internal Foundation Conductive Contention Foundation of Content Contention Metabarrised Particles, Contention Intel 60(10) "University of Australian Content, Content Conference on Contention Conference on Contention of Conference Operation Contention Contention on Contention Conference With Neuronal Contention Contention Conference With Neuronal Contention Contention Conference With Neuronal Contention Contention Conference With Contention Contention Contention Conference With Contention Content <sup>2</sup> Albert Deabier ducing, Mar Visuel Justine (In: Generalizing-public, D. 14/18) Paulour-O.A., Generali "MPC AstroPostesia et Cosmologie, Distantial Parts Distance, COSSMAPS, CEMPie Commerciale de l Bristonie Parts Cale, P. 7500 Parts Cales II, Prante <sup>10</sup>Materia Sano Delverity Jacoman, Montana 50762, USA <sup>10</sup>Valuentità di Perazia, 148123 Perazia, July <sup>12</sup> Discriments of PHERS PARAD PARAD Parado, May "Derty, Seytem & Pranja, Editor 2013 Dampis, Bule "Blacqueer Gravitational Glaveratory (EUG), IA8897 Corelae, Par, July "Systems University of Charactery, Spectra New Sork (1994) USA "EUKo University of Charactery, Stochard Paradona "EUGO Barghest Observatory, Bellind, Parkington 96352, 1934 <sup>12</sup> De Disporte Deleverative, Recebble Personales Webb, USA, Company <sup>14</sup> Parter UKZ, 1997 & J. 111 Deleverative, Rockich Theore Mellike of 2014, Company <sup>14</sup> Columbia University, New York, New Fack, 10027, USA <sup>15</sup> Paradona University, Complex Company, Science 3, 1000 <sup>16</sup> Paradona University, Complex Company, 2017, 1235
 <sup>16</sup> Paradona University, New York, 101701, Fachene, Justy <sup>16</sup> Paradona University, Vision Delevera, 165701, Fachene, Justy <sup>16</sup> Paradona University, 167701, 16 TOTA, Science & Palence, 16223, Fallman, Soy "College Colls, 90-710 Research Information Discontatory Warner University, 00-472 Warners, Public Distances of Researchers, Octobergions 372 TL: United Research Research Aug Research, 164504 Sciences, Roly "RNNA Science of Sciences, 164504 Sciences, Roly "RNNA Science of Sciences, 164504 Sciences, Roly "RNNA, Science of Sciences, 164504 Sciences, Roly "RNNA, Collier MP 421215, Units Foreignet Plantes Los senler of Physics, Lancourse, Marson Base, University, Linners 13999), Passie 2009, University of the West of Sociand, Facility Fol. 200, United Kingdom University of Phatom Annoche, Ceresley, Wessen Anstralia 5005, Anstralia <sup>1</sup>Operiment of Asimphysics/GALPY, Radiant University Mfrager, P.O. Res 2000, 4000 OE Alfreger, Methodawis <sup>2</sup>Arapsis, Weinschle Cher Mann, CMS, Observation Cher Chege, CS 2022, New color 4, Panne <sup>24</sup> D.A. Devis Detwering, "Limbal: Assophysics Research Group, Budgers III," Bingary "Initia de Nyslane de Romas, CMR, Echannel de Roma, 1, P.1054; Nareas, France, "Waldagens State University, Palman, Phylosophys. 9518, 1954.

PHYSICAL REVIEW LETTERS.

PHYSICAL REVIEW LETTERS 12 FUELNEY 2010 PRL 116, 051 002 (2015) <sup>10</sup>MASA/Sodded Speer Flight Conve. Genetich, Mergland 2079, 85h
<sup>10</sup>Canadian invites for Theoretyd Assophysics, University of Theoret, Theoret, Mitz Bill, Canada
<sup>10</sup>Salaghan University, Japing 120846, Oliva "Displant University, Labback Toxas 2000", Const.
 "The PersonDraw State University, Labback Toxas 2000", USA
 "The PersonDraw State University, Labback Toxas 2000", USA
 "Maland Triag Tan University, Labback 2013, 2017 Talware, Pepade of China
 "Derive Seen University, Hagge Wagge, Kawa Solit, USA
 "Derive Seen University, College, Calabace, Share 60519, USA
 "Calabace CoRT, Francisco, Calabace Solit, USA
 "Calabace CoRT, Francisco, Calabace Solitones (SI-568, Kange) <sup>16</sup>Even Jammy, efficient and Sectority Information, Dataset 198-306, Even <sup>16</sup>Carteney Callage, Machinel, Barrante Stati, Uta <sup>16</sup>Carteney Callage, Machinel, Barrante Stati, Uta <sup>16</sup>Carteney Callage, Machinel, Constitution, Mathematical State <sup>16</sup>Carteney of America, Constanti COM, Malayam <sup>16</sup>Carteney State (Informatio, Rainews Field, California, 1992), 1554. <sup>10</sup>Northwatern Univoity, Business, Block 2028, USA "Net University of Journa Fue Constant Valley, Amountality, Tenas 78276, USA "Categories of Mexicons, Meesuremic Research, Networks 39755, USA "Take University of Medicants, Meesuremic Networks AMR Australia <sup>1</sup> Sectore and the Sectore and Sectore <sup>1</sup>Natawai Advantation (Secondary of Advance), Color Control Control of Mathematical Concentration of Mathematical Control "University of Stated, Dém Nr & Stated £730, Renger <sup>1</sup>Aschurrt Publier of Technology, Rosenter, Per Yuni 1962, 055 <sup>1</sup>Opposite of Manuscinetic Anteriot. Manuscinetic UVM, 55 <sup>1</sup>Opposite of Advanta, Advanta, South Anterialia 5905, Australia <sup>1</sup>Opposite of Advanta, Advantation, South Anterialia 5905, Australia 100 <sup>44</sup> Stor Magnetic University, Magnetown, West Weglets 2002, 554 <sup>45</sup> Deleversity of Hild path, 15-464 Just path, Printed <sup>11</sup>Deleving of hist party, 10-100 rule party reasons "Diffy, University of 2-andredge Georgeo et al. 100, University Implies "MERP 1000, CST Computer Terminium Kernels 66/D16, 2040 "Partner of Anghad Francis, Nahara Neuroperst, 201700, Austin "Partner of Anghad Francis, Nahara Neuroperst, 201700, Austin "Partner of Anghad Francis, Nahara Neuroperst, 201700, Austin "Partner Neuronal University, Journal 600, 717, Rossa <sup>10</sup>Mapping Onlinevily, Secol (1973), Konsel <sup>10</sup>MCRI, 65-693 Subol-Greenel, Pulsad <sup>11</sup> D. A.R. Oxford Control Control <sup>11</sup> Memory Research, Poland <sup>12</sup> Memory Colorently, Natura, 2009, American <sup>13</sup> Social Institute Distantity, Social 151–762, Ecology <sup>13</sup> Social Institute Distantity, Social 151–762, Ecology <sup>14</sup> Social Institute Distantity, Social 151–762, Ecology <sup>15</sup> Social Institute Distantian Social Institute Distantian Social Institute Distantian Social Institute <sup>15</sup> Social Institute Distantian Social Institute Distantian Social Institute Distantian Social Institute <sup>15</sup> Social Institute Distantian Social Institute Distantian Social Institute Distantian Social Institute <sup>15</sup> Social Institute Distantian Social Institute Distant

PHYSICAL REVIEW LETTERS VICE COMING 12 PERMIT 2010 PRL 115, 061102 (2016) <sup>10</sup>January CRI Institute of Astronomy, University of Violana Gian, 65-303 Zielana Gian, Fieland "Amirova University, Burrier Springs, Ministran 49/04, USA <sup>10</sup>Universitä di Sima, 35,5160 Sima, Iudy <sup>10</sup>Tribily University, San Antonio, Tease 74212, USA <sup>20</sup>Latronay of Washington Scattly Westington (2006, 100 <sup>20</sup>European College, Grandier, Gida (2002, USA <sup>20</sup>Ablane Caristian University, Address, Tesse 79666, USA

"Deceased, April 2012 torneol, May 2015. Deceand, March 2015.

> 著者1010人 PRL 16ページ

## 2016年2月、LIGOが重力波を初めて検出した、と発表した



第1問 の都合で本文の段落に 1 ! 13 の番号を付してある。また、表記を一部改めている。 次の文章は、二〇〇二年に刊行された科学論の一節である。これを読んで、後の問い(問--6)に答えよ。なお、設問 (配点 50 (2601-4)

ョン」

| 1| 現代社会は科学技術に依存した社会である。近代科学の成立期とされる十六世紀、十七世紀においては、そもそも「科学」と 発揮し始める。二度にわたる世界大戦が科学-技術の社会における位置づけを決定的にしていったのである になり、国民国家の競争の時代になると、科学は技術的な威力と結びつくことによって、この競争の重要な戦力としての力を へと変容し始める。既存の知識の改訂と拡大のみを生業とする集団を社会に組み込むことになったのである。さらに二十世紀 かった。しかし、十九世紀になると、科学研究は「科学者」という職業的専門家によって各種高等教育機関で営まれる知識生産 いう名称で認知されるような知的活動は存在せず、伝統的な自然哲学の一環としての、一部の好事家による楽しみの側面が強

**2]第二次世界大戦以後、科学技術という営みの存在は膨張を続ける。プライスによれば、科学技術という営みは十七世紀以** (注一) 的性格を失い、A先進国の社会体制を維持する重要な装置となってきている。 来、十五年で「パイソウするという速度で膨張してきており、二十世紀後半の科学技術の存在はGNPの二パーセント強の(注2) 投資を要求するまでになってさているのである。現代の科学技術は、かつてのような思弁的、宇宙論的伝統に基づく自然哲学 4 —

◎ 十九世紀から二十世紀前半にかけては科学という営みの規模は小さく、にもかかわらず技術と結びつき始めた科学-技術は 社会の諸問題を解決する能力を持っていた。「もっと科学を」というスローガンが説得力を持ち得た所以である。しかし二十世 紀後半の科学-技術は両面価値的存在になり始める。現代の科学-技術では、自然の仕組みを解明し、宇宙を説明するという るのである。科学-技術が恐るべき速度で生み出す新知識が、われわれの日々の生活に商品や製品として放出されてくる。 威を制御できるようになってきたが、同時に、科学-技術の作り出した人工物が人類にさまざまな災いをもたらし始めてもい 介入し、操作する能力の開発に重点が移動している。その結果、永らく人類を咎かし苦しめてきた病や災害といった自然の脅 含みの比重が下がり、実験室の中に天然では生じない条件を作り出し、そのもとできまざまな人工物を作り出すなど、自然に  $\langle i \rangle$ 

**4** しかし、科学者は依然として「もっと科学を」という発想になじんでおり、このような「科学が問題ではないか」という問い ガンの説得力は低下し始め、 けを、科学に対する無知や誤解から生まれた情緒的反発とみなしがちである。ここからは、素人の一般市民への科学教育の充 わゆる「環境ホルモン」や地球環境問題、先端医療、情報技術などがその例である。 B. うして「もっと科学を」というスロー(注\*) 「科学が問題ではないか」という新たな意識が社会に生まれ始めているのである。 か

5 このような状況に一石を投じたのが科学社会学者のコリンズとピンチの『ゴレム』である。ゴレムとはユダヤの神話に登場す [注4] ば主人を破壊する威力を持っている。コリンスとピンチは、現代では、科学が、全面的に善なる存在か全面的に悪なる存在か 実や、科学啓蒙プログラムの展開という発想しか生まれないのである。 のどちらかのイメージに引き裂かれているという。そして、このような分裂したイメージを生んだ理由は、科学が実在と直結 る怪物である。人間が水と土から創り出した怪物で、魔術的力を備え、日々その力を増加させつつ成長する。人間の命令に従 した無謬の知識という神のイメージで捉えられてきており、科学が自らを実態以上に美化することによって過大な約束を い、人間の代わりに仕事をし、外敵から守ってくれる。しかしこの怪物は不器用で危険な存在でもあり、適切に制御しなけれ それが必ずしも実現しないことが幻滅を生み出したからだという。つまり、全面的に善なる存在というイメージが科学者

から振りまかれ、他方、チェルノブイリ事故や狂牛病に象徴されるような事件によって科学への幻滅が生じ、一転して全面的(注2)(注2)(注2)

5

2017年1月センター試験

に悪なる存在というイメージに変わったというのである。

|6| コリンズとピンチの処方箋は、科学者が振りまいた当初の「実在と直結した無謬の知識という神のイメージ」を科学の実態に

即した「不確実で失敗しがちな向こう見ずでへまをする巨人のイメージ」、つまり(ゴレムのイメージに取りかえることを主

7 彼らが扱ったケーススタディーの一例を挙げよう。一九六九年にウェーバーが、十二年の歳月をかけて開発した実験装置を (注?)

タディーを提示し、科学上の論争の終結がおよそ科学哲学者が想定するような論理的、方法論的決着ではなく、さまざまなヨ

張したのである。そして、科学史から七つの具体的な実験をめぐる論争を取り上げ、近年の科学社会学研究に基づくケースス

ウィインが絡んで生じていることを明らかにしたのである。

(2601 - 5)

「科学コミュニケーシ 小林博司 語 王

ウ(1)/ンが絡んで生じていることを明らかにしたのである。 うう、 一ち載うし、 未付上の 副守の 糸魚カま よそ未当 老今老カガガゴ るこれ諸理由 さまさまたこ

? 彼らが扱ったケーススタディーの一例を挙げよう。一九六九年にウェーバーが、十二年の歳月をかけて開発した実験装置を (注?)

問題を抱え込むのである。否定的な結果を発表することは、ウェーバーの実験が誤りであり、このような大きな値の重力波は ウェーバーの結果を否定するようなデータを手に入れた科学者は、それを発表するかいなかという選択の際に(ウヤッカイな 争となったのである。この論争において、実験はどのような役割を果たしていたかという点が興味深い。追試実験から、 用いて、重力波の測定に成功したと発表した。これをきっかけに、追試をする研究者があらわれ、重力波の存在をめぐって論(注\*) 力波が存在するということが明らかになれば、この追試実験の結果によって彼は自らの実験能力の低さを公表することにな 存在しないという主張をすることになる。 しかし、実は批判者の追試実験の方に不備があり、本当はウェーバーの検出した重

(2601-6)

「科学コミュニケーション」

**8** 学生実験の場合には、実験をする前におおよそどのような結果になるかがわかっており、それと食い違えば実験の失敗がセ 功といえるかがわからないのである。重力波が検出されれば、実験は成功なのか、それとも重力波が検出されなければ、実験 ンはコクされる。しかし現実の科学では必ずしもそうはことが進まない。重力波の場合、どのような結果になれば実験は成 ఫ్ 家の悪循環」と呼んでいる。 ならない。しかし、その装置を使って適切な結果を手に入れなければ、装置が優れたものであったかどうかはわからない。 る結果なのかを、前もって知ることはできない。重力波が存在するかどうかを知るために、「優れた検出装置を作らなければ かし、優れた装置がなければ、 は成功なのか。しかしまさに争点は、重力波が存在するかどうかであり、そのための実験なのである。何が実験の成功といえ 何が適切な結果かということはわからない……」。 コリンズとピンチはこのような循環を「実験 ι

- 6

9 **さ、それ以後、重力波の存在は明確に否定されたのであった。つまり、** (注9) (存在、非存在の可能性がある)、結局、有力科学者の否定的発言をきっかけにして、科学者の意見が雪崩を打って否定論に傾 て決着をつけられていなかったが、科学者共同体の判断は、非存在の方向で収束したということである。 重力波の論争に関しては、このような悪循環が生じ、その存在を完全に否定する実験的研究は不可能であるにもかかわらず 論理的には重力波の存在もしくは非存在を実験によっ

小林博司

10 コリンズとビンチは、このようなケーススタディーをもとに、「もっと科学を」路線を批判するのである。 民主主義国家の

- Marting またつからいないたいたまではつってねる。 しいてきたて、ウェーバー――ジョセフ・ウェーバー(一九一九~二〇〇〇)。物理学者

語

玉

9 8 重力波の存在は明確に否定された。 重力波-時空のゆがみが波となって光速で伝わる現象。一九一六年にアインシュタインがその存在を予言していた。 ウェーバーによる検出の事実は証明されなかったが、二〇一六年、 アメリカの研究チー

ムが直接検出に成功したと発表した。

 $(\mathfrak{G})$ ヤッカイ 3 0 0 3 0 6 ツウヤクの資格を取得する ごリヤクがある ヤッコウがある野草を探す ヤッキになって反対する ヤクドシを乗り切る (I) センコク ❹ 3 2 1 筆跡がコクジした署名 コクソウ地帯 コクビャクのつけにくい議論 コクメイな描写 上級裁判所へのジョウコク

2017年1月センター試験

#### 2017年1月大阪工業大学 物理

玾

#### 空所を埋め、問いに答えよ。(配点 60)

物

2015年9月14日、重力波が観測された。この重力波は、13億光年のかなたで2つのブラック ホールが互いの周りを回転しながら衝突・合体したときに、放出されたものだという。以下では 2つのブラックホールを,質量 $m_1$ , $m_2$ [kg]の2つの質点(以下,星1,星2と呼ぶ)とみな し、万有引力の下でどのような運動をするかを力学的観点から調べてみよう。

(1) 星1. 星2の位置ベクトルを $\vec{n}$ ,  $\vec{n}$  (m), 速度を $\vec{v}$ ,  $\vec{v}$  (m/s) とする。以下で、物理量 X の微小な時間  $\Delta t$  [s] の間の変化を  $\Delta X$  と書き表すことにする。この書き方では、位置べ クトル  $\vec{r_1}$  の変化は、速度ベクトル  $\vec{v_1}$  を用いて、 $\Delta \vec{r_1} = \vec{v_1} \Delta t$  となる。この式は、以下のよう に書いてもよい。

$$\vec{v_1} = \frac{\Delta \vec{r_1}}{\Delta t}$$

星1の速度の変化  $\Delta \overrightarrow{v_1}$  (m/s) と, 星2から星1にはたらく万有引力  $\overrightarrow{F}$  (N) の間には,  $m_1 \Delta \overrightarrow{v_1} = \overrightarrow{F} \Delta t$ という関係がある。式①は ア の変化が イ に等しいことを表している。一方, ウ の法則により $-\vec{F}$ となるので、次の関係式が成 星1から星2にはたらく力は, り立つ。  $m_2 \Delta \overrightarrow{v_2} = -\overrightarrow{F} \Delta t$ 

式①, ②より.

 $m_1 \Delta \overrightarrow{v_1} + m_2 \Delta \overrightarrow{v_2} = \Delta (m_1 \overrightarrow{v_1} + m_2 \overrightarrow{v_2}) = 0$ 

(2)

(3)

(4)

(5)

1) 式③の表す物理的内容を簡潔に述べよ。

星1. 星2の重心の位置ベクトル  $\vec{R}$  [m],速度  $\vec{V}$  [m/s],加速度  $\vec{A}$  [m/s<sup>2</sup>] は、次のよ うに表される。

 $\vec{R} = \frac{m_1 \overrightarrow{r_1} + m_2 \overrightarrow{r_2}}{m_1 + m_2}, \quad \vec{V} = \frac{\Delta \vec{R}}{\Delta t} = \frac{m_1 \overrightarrow{v_1} + m_2 \overrightarrow{v_2}}{m_1 + m_2}, \quad \vec{A} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$ 

2) 問1)の結果を踏まえ、重心がどのような運動をするか簡潔に述べよ。

(2) 星1から見た星2の相対位置を表すベクトルを $\vec{r}$  [m].相対速度を $\vec{v}$  [m/s] とすると.

$$\vec{r} = \vec{r_2} - \vec{r_1}, \quad \vec{v} = \frac{\varDelta \vec{r}}{\varDelta t} = \vec{v_2} - \vec{v_1}$$

となる。この式より

 $\Delta \vec{v} = -\left( \boxed{\mathbf{I}} \right)$ が得られる。式④は、  $\mu \frac{\vec{\Delta v}}{At} = -\vec{F}, \ t t$ 

$$L \mu = \frac{1}{\Box}$$

式⑤は 星1を原点とする座標系で、質量 $\mu$ [kg]の質点(以下,質点 $\mu$ と呼ぶ)が、常 に原点に向かうカ - デ(万有引力)を受けて運動しているときの運動方程式と見なすこと ができる。以下では、質点 $\mu$ が星1を中心とする半径 $\ell$ (m)の円周上を、角速度 $\omega$ で等速 円運動する場合を考えよう。2つの質点の間にはたらく万有引力は、お互いの位置関係のみ によって決まり、質点の速度には無関係である。したがって、どのような座標系から見ても、 その大きさは万有引力定数を $G[N\cdot m^2/kg^2]$ として $G\frac{m_1m_2}{a^2}$ である。また、無限の遠方を 基準とした万有引力による位置エネルギーは  $-G \frac{m_1 m_2}{\ell}$ である。

3) 質点 µ の円運動について、中心方向の運動方程式を書き、角速度 ω [rad/s] を求めよ。 ただし, μはそのまま用い. エの値を代入する必要はない。

問3)の結果は、円運動の周期の2乗が半径ℓの オ 乗に比例することを示して いる。これは、カ法則に相当する。

4) 質点  $\mu$  の力学的エネルギー E[J] を求め、  $\ell$  との関係を解答欄のグラフに描け。

5) 重力波の放出により力学的エネルギーが失われると、半径 ℓ、角速度 ω および質点 μ の速さはどのように変化するか、解答欄からそれぞれ正しいものを選び丸で囲め。

(3) (2) では相対運動に着目し、静止した星1の周りを 星2が円運動すると見る立場で考察した。現実には星1. 星2は互いの周りを回って加速度運動しているので、こ のような見方は許されないはずだが、星2の質量をμ に置きかえることで、矛盾が解消されている。

この運動を元の座標系から見るときは、星1、星2が、 共通の角振動数 $\omega$  [rad/s] で, それぞれ半径 $\ell_1$ ,  $\ell_2$  [m] の等速円運動をしていると考える (図1参照)。大きさ

 $G = \frac{m_1 m_2}{a^2}$ の万有引力を向心力として円運動するから、円 運動の中心は、星1、星2を結ぶ線分上にある。更に、 星1、星2の運動方程式を用いて計算すると,

 $\ell_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \ell$ ,  $\ell_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \ell$ となり, 全体の力学 的エネルギーが、先に求めたEと一致することが確認 できる。これによって、相対運動に着目した考え方が正 当化されることがわかる。

6) 図2に、力学的エネルギーが保存するときの星1. 星2の円軌道の一部を実線で描いた。重力波を放出し て力学的エネルギーが失われていくとき, 軌道がどの ように変わるかを示す概略図を解答欄に描き込め。







力学的エネルギーが 义 2 保存するときの軌道

と書き直すことができる。

http://www.chugakujuken.net/mailmag\_advice/backnumber/20160229.html



< アインシュタインの最後の宿題>

今月11日、米国重力波観測所LIGOのリーダーであるデビッド・ライツ氏は、重力波の 観測に成功したと発表しました。この発見は100年にアインシュタインによって存在が予 言されていた重力波が確認されたものです。これはノーベル賞級の快挙です。

### 『重力波ってなに?』

皆さんはセルロイドの下敷きを髪の毛でこすると髪の毛や軽い紙やほこりが下敷きに引 き寄せられてくっつく遊びをしたこと有りますよね。これは電気(静電気)の力ですが、 砂場で遊んだ磁石が砂鉄や他の磁石とくっつくのは磁気の力(磁力)です。他に物体が引 き寄せあう力には重力があります。リンゴが地面に落ちるのを見てアイザック・ニュー トンが発見したと言われる万有引力の法則がありますが、これは物体同士の引き合う力

## GW150914



## GW150914:FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; SIMULATION OF BLACK HOLE HORIZONS (MIDDLE-TOP), BEST FIT WAVEFORM (MIDDLE-BOTTOM)

first direct detection of gravitational waves (GW) and first direct observation of a black hole binary

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms ~10					
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz						
date	14 Sept 2015	peak GW strain	1 x 10 <sup>-21</sup>					
time	09:50:45 UTC	peak displacement of	±0.002 fm 150 Hz, 2000 km					
likely distance	0.75 to 1.9 Gly	interferometers arms						
	230 to 570 Mpc	frequency/wavelength						
redshift	0.054 to 0.136	at peak Gw strain	~ 0.6 c					
signal-to-noise ratio	o 24	peak GW luminosity	3.6 x 10 <sup>56</sup> erg s <sup>-1</sup>					
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M⊙					
false alarm rate	false alarm rate < 1 in 200,000 yr		remnant ringdown freg. ~ 250 Hz					
Source Ma	asses Mo	remnant damping time ~ 4 ms						
total mass	60 to 70							
primary BH	32 to 41	consistent with passes all tes						
secondary BH	25 to 33	general relativity?	performed					
remnant BH	58 to 67	graviton mass bound	< 1.2 x 10 <sup>-22</sup> eV					
mass ratio	0.6 to 1	coalescence rate of	2 to 400 Gpc <sup>-3</sup> yr <sup>-1</sup>					
primary BH spin	< 0.7	binary black holes						
secondary BH spin	< 0.9	online trigger latency	~ 3 min					
remnant BH spin	0.57 to 0.72	# offline analysis pipeli	nes 5					
signal arrival time	arrived in L1 7 ms		~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)					
delay	before H1	CPU hours consumed						
likely sky position	Southern Hemisphere	papers on Feb 11, 2016 13						
likely orientation	face-on/off	# recerchere	~1000, 80 institutions in 15 countries					
resolved to	~600 sq. deg.							

Detector noise introduces errors in measurement. Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear=9.46 x 10<sup>12</sup> km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc=10<sup>3</sup> Mpc, fm=femtometer=10<sup>-15</sup> m, M⊙=1 solar mass=2 x 10<sup>30</sup> kg
## GW151226

14Msun + 7.5 Msun のBHが合体して 21 Msun (1 Msun分の質量が消失)

15億光年先 (440±190 Mpc) (z=0.05—0.13)

## GW151226:FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND SIGNAL-TO-NOISE RATIO TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; EXAMPLE WAVEFORM (MIDDLE)

observed by	LIGO L1, H1	duration from 35 Hz	~1 s		
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 35 Hz	~55		
date	26 Dec 2015	signal arrival time	arrived in H1 1 ms afte L1		
time	03:38:53 UTC	delay			
distance	250 to 620 Mpc	peak GW strain	~ 3.4 x 10 <sup>-22</sup>		
redshift	0.05 to 0.13	peak displacement of	~ ±0.7 am		
signal-to-noise ratio	13	interferometers arms			
false alarm prob.	~ 1 in 10 million	frequency/wavelength at peak GW strain	420 Hz, 710 km		
Source Mass	es M⊙	nesk speed of BHs			
total mass	20 to 28	peak speed of bits	2 to 4 x 10 <sup>56</sup> err c <sup>-1</sup>		
primary BH	11 to 23				
secondary BH	<b>5 to 10</b>	radiated GW energy	0.8-1.1 M⊙		
remnant BH structed	(template)9 to 27 <sup>0.48</sup>	remnant ringdown fre	eq. ~ 750 Hz		
mass ratio	o.28	remnant damping tim	e 0.00 ~ 1.3 ms		
spin of one of the	> 0.2	remnant size, area	60 km, 3.5 x 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>		
ыаск noles remnant BH spin	0.7 to 0.8	online trigger latency	~ 67 s		
resolved to	~850 sq. deg.	# offline analysis pipelir	nes 2		

Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1/H1=LIGO Livingston/Hanford; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, am=attometer= $10^{-18}$  m,  $M\odot=1$  solar mass= $2 \times 10^{30}$  kg

يترج وكالو اصاريها ومراجع وتراسا أوا والأخريان بالحراك والألفات وتوالا أتته المتعاليين وجريق ويتخلل والسوي والرابا أستر بالباتين

## GW170104



## GW170104:FACTSHEET

Background Images: time-frequency trace (top), H1 and L1 time series and maximum-likelihood binary black hole model (middle top), residuals between data and best-fit model (middle bottom), reconstructed waveforms from wavelet and binary black hole analyses (bottom)

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 0.25 to 0.31 s
source type	black hole (BH) binary	# of cycles from 30 Hz	- 14 to 16
date	04 Jan 2017		arrived at H1
time	10:11:58.6 UTC	signal arrival time delay	3 ms before L1
signal-to-noise ratio	13	credible region sky area	1200 sq. deg.
false alarm rate	< 1 in 70,000 years	peak GW strain	- 5 × 10-22
probability of	> 0.99997		1 V V
astrophysical origin		interferometer arm	~ ± 1 am
distance	1.6 to 4.3 billion		
radahilt	0 10 to 0 25	GW strain	160 to 199 Hz
reashin	0.10 to 0.25		
total mass	46 to 57 M <sub>o</sub>	wavelength at peak	1510 to 1880 km
primary BH mass	25 to 40 Ma		
secondary BH mass	13 to 25 M	peak GW luminosity	1.8 to 3.8 × 1056
	HAMA CANA.	an will a	erg s.
mass ratio	0.36 to 0.94	radiated GW energy	1.3 to 2.6 $M_{\rm c}$
remnant BH mass	44 to 54 $M_{\odot}$	remnant ringdown freq.	297 to 373 Hz
The second second	0.20 + 0.7	and the second	
remnant BH spin	0.39 to 0.7	remnant damping time	2.5 to 3.2 ms
remnant size	123 to 150 km	consistent with general	passes all tests
(enective radius)	In the second second	relativity?	performed
remnant area	1.9 to 2.8 x 10 <sup>5</sup> km <sup>2</sup>	graviton mass	≤ 7.7 x 10 <sup>-23</sup> eV/c <sup>2</sup>
effective spin paramet	er -0.42 to 0.09	combined bound	
effective precession spin parameter	unconstrained	evidence for dispersion of GWs	none

Parameter ranges correspond to 90% credible intervals.

Acronyms:

L1/H1=LIGO Livingston/Hanford, am=attometer=10<sup>-18</sup> m,  $M_{\odot}$ =1 solar mass=2 x 10<sup>30</sup> kg

## GW170814

Hanford

14 12 10

SNR





# アメリカ LIGO 2台と, ヨーロッパ Virgoの3台の 同時観測に成功

## GW170814:FACTSHEET

	observed by	H1, L1, V1	duration from 30 Hz	~ 0.26 to 0.28 s		
	source type	black hole (BH) binary	# of cycles from 30 Hz	~ 15 to 16		
	date time	14 Aug 2017 10:30:43 UTC	credible region sky area (with V1)	60 deg²		
	online trigger latency	~ 30 s	credible region sky area	1160 deg <sup>2</sup>		
Amplitude	signal arrival time delay signal-to-noise ratio	at L1 8 ms before H1 and 14 ms before V1 18	(without V1) latitude, longitude (at time of arrival)	45° S, 73° W		
mulized	false alarm rate	≲ 1 in 27 000 years	sky location	in direction of Eridanus constellation		
Not	probability of noise	0.3%	*RA, Dec	03 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> , -44°57 <sup>m</sup>		
	broducing vi Sivk peak	1.1 to 2.2 billion light-years 0.07 to 0.14	Peak GW strain (10 <sup>-22</sup> ) (H1, L1, V1) peak stretching of interferometer arm	~ 6, 6, 5 ~ ± 1.2, 1.2, 0.8 am		
	total mass primary BH mass	53 to 59 $M_{\odot}$ 28 to 36 $M_{\odot}$	(H1, L1, V1) frequency at peak GW strain	155 to 203 Hz		
	secondary BH mass	21 to 28 $M_{\odot}$	wavelength at peak GW strain	1480 to 1930 km		
	remnant BH mass	51 to 56 $M_{\odot}$	peak GW luminosity	3.2 to 4.2 × 10 <sup>56</sup> erg s <sup>-1</sup>		
	remnant BH spin	0.65 to 0.77	radiated GW energy	2.4 to 3.1 $M_{\odot}c^2$		
	remnant size (effective radius)	139 to 153 km	remnant ringdown freq.	312 to 345 Hz		
	remnant area	2.4 to 2.9 x 10 <sup>5</sup> km <sup>2</sup>	remnant damping time	3.1 to 3.6 ms		
	effective spin parameter	-0.06 to 0.18	consistent with general relativity?	passes all tests performed		
	effective precession spin parameter	unconstrained	evidence for dispersion of GWs	none		

Parameter ranges correspond to 90% credible intervals.

L1/H1=LIGO Livingston/Hanford, V1=Virgo, am=attometer=10<sup>-18</sup> m, M<sub>☉</sub>=1 solar mass=2 x 10<sup>30</sup> kg Background Images (H1, L1, V1 from left to right): time-frequency trace (top), sky maps (middle), and time series with reconstructed waveforms from modeled and un-modeled searches (bottom) \* Maximum a Posteriori estimates Rapid LIGO localization

Rapid LIGO and Virgo localization Refined localization

## List of Detected GW events

		M1+M2=Mf, Mdiff/Mtotal	spin a_final	Mpc z	SNR	deg^2
GW150914	PRL116, 061102 (2016/2/11)	36.2+29.1=62.3+3.0 <b>4.59%</b>	0.68	410Mpc 0.09	23.7	600
LVT151012	(2016/2/11)	23+13=35+1.5 <b>2.78%</b>	0.66	1000Mpc 0.20	9.7	
GW151226	PRL116, 241103 (2016/6/15)	14.2+7.5=20.8+0.9 <b>4.15%</b>	0.74	440Mpc 0.09	13.0	850
GW170104	PRL118, 221101 (2017/6/1)	31.2+19.4=48.7+1.9 <b>3.75%</b>	0.64	880Mpc 0.18	13.0	1300
GW170814	(2017/9/28)	30.5+25.3=53.2+2.6 <b>4.66%</b>	0.70	540Mpc 0.11	18	60

https://losc.ligo.org/events/GW150914/ https://losc.ligo.org/events/LVT151012/ https://losc.ligo.org/events/GW151226/

https://losc.ligo.org/events/GW170104/

# [LIGO'S GRAVITATIONAL-WAVE DETECTIONS]



## contents

1. 重力波とは

Einsteinが残した100年越しの宿題

2. 直接観測された重力波 レーザー干渉計のしくみ LIGOグループが発見した4つの重力波イベント

重力波観測の将来
宇宙空間での重力波観測
重力波観測から何がわかるか







## 重力波宇宙干渉計LISA ESA予算承認 <sup>2017/6/20</sup> Laser Interferometer Space Antenna



2034年に打ち上げ予定 250万kmの腕の長さ 地球の公転軌道のL4 低周波数帯(mHzからHz帯)



# **Black Holes of Known Mass**



LIGO/VIRGO

http://www.virgo-gw.eu/docs/GW170814/BHmassChartGW092017.jpg

# 重力波天文学で何がわかる?



背景重力波の存在



――― 星形成モデル・宇宙初期モデル

# 重力波天文学で何がわかる?

## 





銀河にはいくつBHがあるのか? 宇宙にはいくつ銀河があるのか?

# 宇宙にBH合体はいくつ 生じるか

我々は1年間にいくつ観測 できるか

重力波で観測可能な距離?

ground-base / space

宇宙モデル?

BH spin? Signal-to-Noise?

#### 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  $M_{\text{galaxy}} = 10^9 M_{\odot}, \dots, 10^{12} M_{\odot}$ .



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

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 835:276 (8pp), 2017 February 1

© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

doi:10.3847/1538-4357/835/2/276



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

Hisa-aki Shinkai<sup>1</sup>, Nobuyuki Kanda<sup>2</sup>, and Toshikazu Ebisuzaki<sup>3</sup>

## 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):

$$s(t) = h(t) + n(t).$$
 (17)

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

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

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

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

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 © 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved. doi:10.3847/1538-4357/835/2/276



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

Hisa-aki Shinkai<sup>1</sup>, Nobuyuki Kanda<sup>2</sup>, and Toshikazu Ebisuzaki<sup>3</sup>

## **Event Rates at bKAGRA/aLIGO**

		$R/(Gpc^{-3} vr^{-3})$	·1)
Mass distribution	PyCBC	Combined	
	Event bas	ed	
GW150914	$3.2^{+8.3}_{-2.7}$	$3.6^{+9.1}_{-3.0}$	$3.4^{+8.8}_{-2.8}$
LVT151012	$9.2^{+30.3}_{-85}$	$9.2^{+31.4}_{-85}$	$9.1^{+31.0}_{-85}$
GW151226	$35_{-29}^{+92}$	$37^{+94}_{-31}$	$36^{+95}_{-30}$
All	$53^{+100}_{-40}$	$56^{+105}_{-42}$	$55_{-41}^{+103}$
	Astrophysi	cal	
Flat in log mass	$31^{+43}_{-21}$	$29^{+43}_{-21}$	$31^{+42}_{-21}$
Power law (-2.35)	$100_{-69}^{+136}$	$94_{-66}^{+137}$	$97_{-67}^{+135}$

## LIGO group PRX6(2016)041015





### Shinkai+ ApJ 835(2017)276

## Kinugawa+ MNRAS456(2015)1093







	宇宙線	ガンマ線	X 線	光			電磁波					
				紫外線	可視光線	赤外線	マイクロ波	超短波	短波	中波	長波	超長波
波長[m]	10-	<sup>13</sup> 10 <sup>-1</sup>	<sup>10</sup> 10	) <sup>-9</sup> 3.8	$\times 10^{-7}$ 7.7	$10^{-7} 10^{-7}$	) <sup>-4</sup> 1	1	0 10	$)^2$ 1	0 <sup>3</sup> 10 <sup>4</sup>	
波長[nm]				3	80 77	70						
振動数[Hz]	11.11	$3 \times 10^{18}$	$3 \times$	10 <sup>17</sup>		3>	$ imes 10^{12}$ 3 $ imes$	$10^8 3 \times 3$	10 <sup>7</sup> 3	$ imes 10^{6}$	$3 \times 10^{5}$ 32	$ imes 10^4$
利用例		医療/食品照射	医療/X線写真	殺菌	光学機器	赤外線写真	携帯電話	F M ラジオ	短波ラジオ	AMラジオ	電波時計	

