

宇宙はどこまで解明されたか

- 4月25日 天文学と宇宙物理学：観測技術の進展と星までの距離の測定
- 5月23日 惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？
- 6月27日 星とブラックホールと惑星系と銀河：構造形成は何か先か？
- 7月25日 超新星爆発と宇宙論：6つのパラメータで描かれる膨張宇宙
- 8月29日 初期宇宙と素粒子物理：高次元モデルが描くビッグバン以前
- 9月26日 **重力波と重力理論：アインシュタインはどこまで正しいか？**

真貝寿明 (しんかい ひさあき)

大阪工業大学 情報科学部 教授
 武庫川女子大学 非常勤講師
 理化学研究所 客員研究員
<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>



2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS
For the greatest benefit to mankind
Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne

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

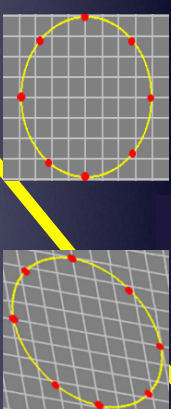
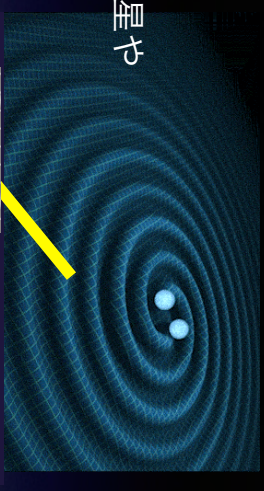
LIGO検出器への決定的な貢献と重力波の観測に対して

ライナー・ワイス(85)
 バリー・バリッシュ(77)
 キップ・ソーン(77)

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第6回】重力波と重力理論 2019/9/26 毎日文化センター(備前)

重力波の発生と伝播

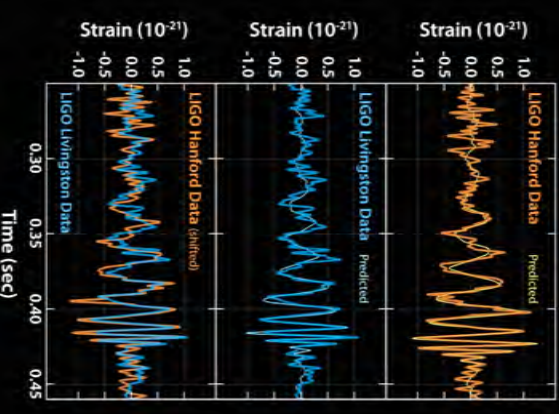
ブラックホール連星や
 中性子星連星



レーザー干渉計
 LIGO=Laser Interferometer
 Gravitational-Wave Observatory

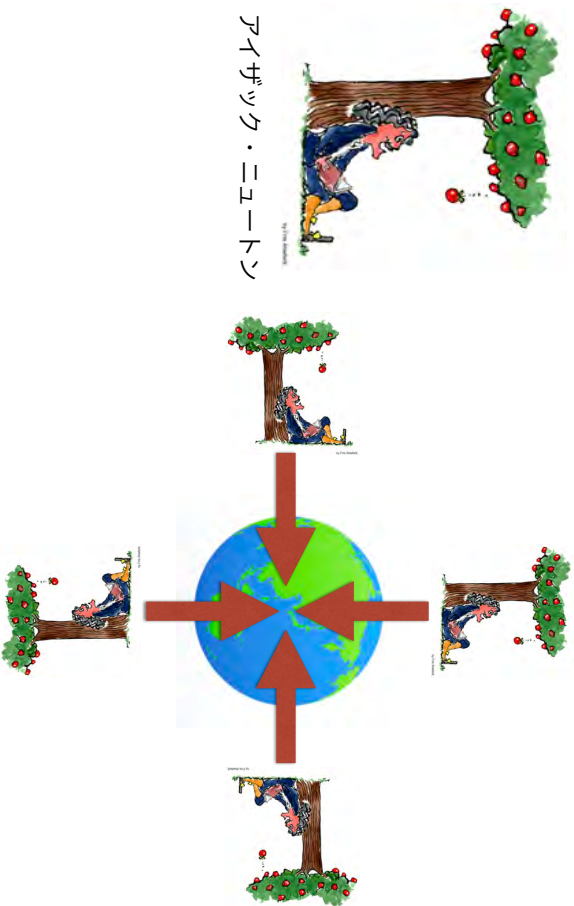
2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

2015年9月14日

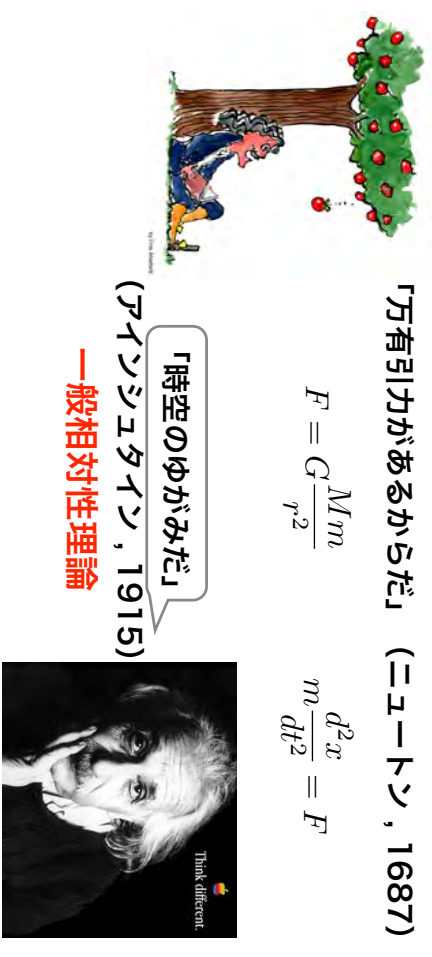


ブラックホール連星の合体
 によって生じた重力波だった

重力の正体は？



重力の正体は？



「万有引力があるからだ」 (ニュートン, 1687)

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F$$

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

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

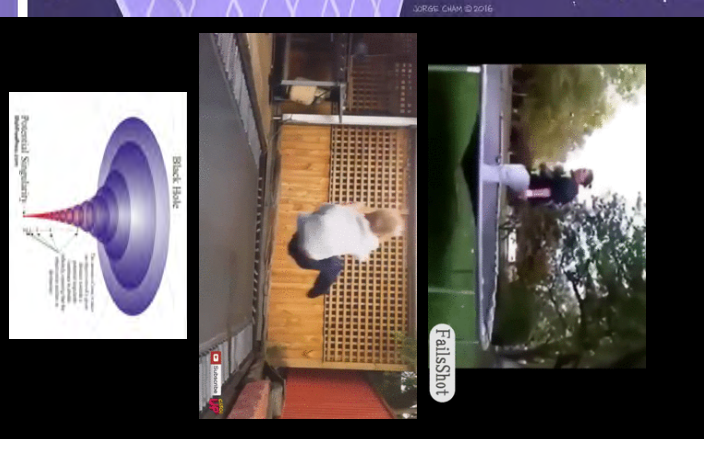
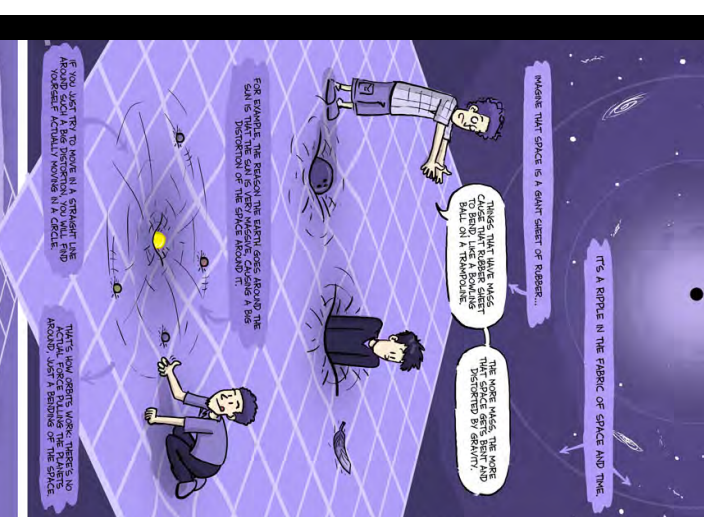
重力の正体は？



ニュートン

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

万有引力
=すべてのものは引力で引き合う



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)**

重い物体のまわりでは時空がゆがむ。

非常に重い物体のまわりでは時空が大きくゆがんで、ブラックホールになる。

ここから内側からは光さえも外向きに脱出できない。
= 時空の地平面 (event horizon)

大きさはシュワルツシルト半径 r

$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

(M: 物体の質量, G: 重力定数, c: 光速)

太陽なら半径3km, 地球なら半径9mm! それぞれの全質量を押しこめば、ブラックホールになる。

光さえも脱出できない巨大な重力を「ブラックホール」と命名しよう。

ホーラー

重い星が燃え尽きると 中性子星やブラックホールに

星の進化の道筋

- 主系列星 (Main Sequence): 燃料は水素。燃焼してヘリウムになる。燃焼速度は約 10^6 C。
- 赤巨星 (Red Giant): 燃料が尽きると膨らむ。燃焼速度は約 10^8 C。
- 超巨星 (Supergiant): 膨らみ続ける。燃焼速度は約 10^9 C。
- 超新星爆発 (Supernova): 激しく爆発。燃焼速度は約 10^{10} C。
- 中性子星 (Neutron Star): 爆発後残る高密度の星。燃焼速度は約 10^{11} C。
- ブラックホール (Black Hole): 中性子星がさらに縮み、重力が強すぎて光すら出なくなる。燃焼速度は約 10^{12} C。

宇宙のつくり方 (ガリランド著, 真貝・鳥居訳, 丸善出版)

はくちよう座 X-1はブラックホール

6000光年先

Accretion Disk

Mass Transfer

Cygnus X-1 HDE 226868

The first black hole candidate discovered in 1972, is part of an X-ray binary system, orbiting its visible companion HDE 226868.

はくちよう座

こと座

へびつかい座

わし座

銀河中心

はくちよう座 (Cygnus)

こと座 (Cassiopeia)

へびつかい座 (Hercules)

わし座 (Sagittarius)

いて座 (Scorpius)

さそり座 (Scorpius)

銀河中心

イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT)

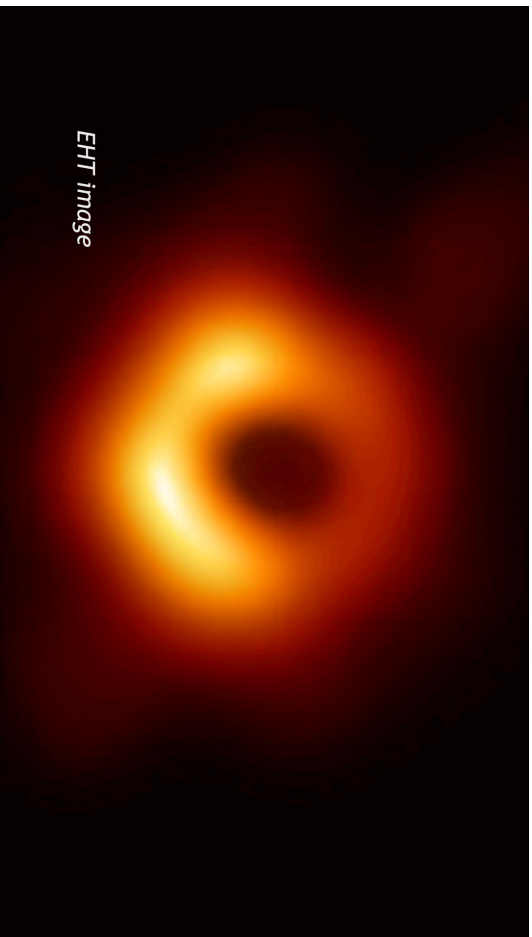
— 各地の電波望遠鏡をつなぎ、地球サイズの仮想望遠鏡を構成 —



- 2017年の観測
- ALMA プリズマ望遠鏡
チリ/ペルー/ボリビア
 - APEX アペックス望遠鏡
チリ/ペルー/ボリビア
 - IRAM 30m望遠鏡
スペイン/フランス
 - JCMT ジェームズクラークマクスウェル望遠鏡
ハワイ/カリフォルニア
 - 30M 大直径30m電波望遠鏡
メキシコ/エルサルバドル
 - LMT 大直径10m電波望遠鏡
メキシコ/エルサルバドル
 - SMA サタミ100m電波望遠鏡
ハワイ/マウナケア
 - SMT サタミ17m電波望遠鏡
チリ/ペルー/ボリビア
 - SPT 南緯点電波望遠鏡
南緯点/南緯点

最近のニュースから

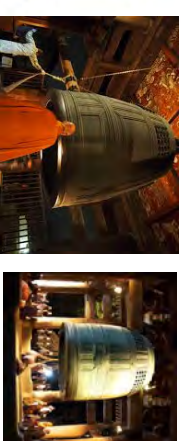
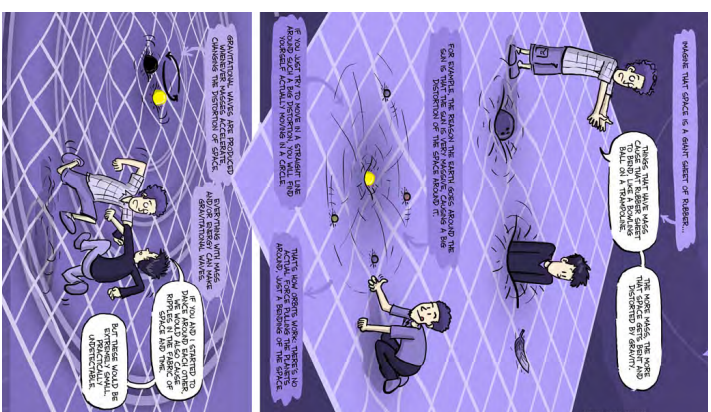
ブラックホールシミュレーションのメカニズム解説映像



EHT image

<https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-ehnt/videos.html>

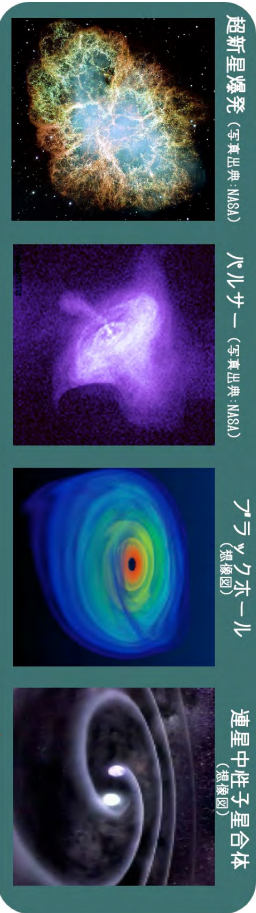
0'58"



重力波の波源

Sources of gravitational wave

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



- 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

2. 重力波の発見まで

重力波 幻の発見 (1968/70)



クエーバー
Joseph Weber

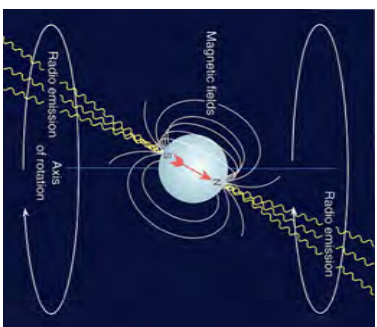
Joseph Weber (pictured), a physicist at the University of Maryland in College Park, believed that gravitational waves were real. In 1969, he announced that he had found them with a detector of his own invention: an aluminum cylinder, about 2 metres long and 1 metre in diameter, that "rang" when it was struck by such a wave. 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。

2. 重力波の発見まで

連星中性子星の発見 (1974)

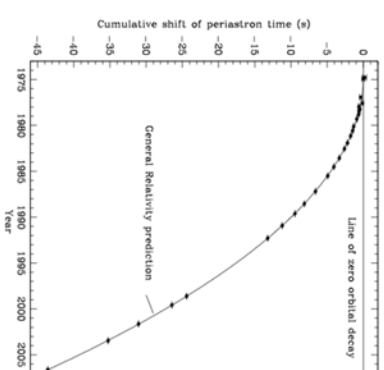
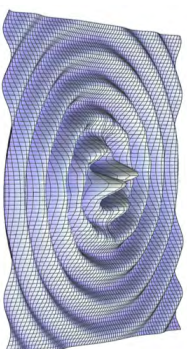
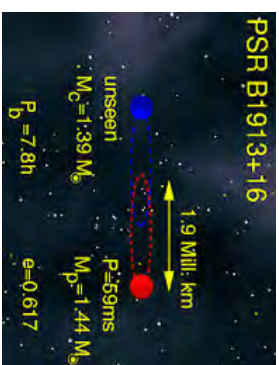


パルサー＝中性子星
半径 10km位
質量 1.4x太陽

<http://www.nobelprize.org/nobel/prizes/physics/laureates/1993/illpres/discovxy.html>

2. 重力波の発見まで

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。

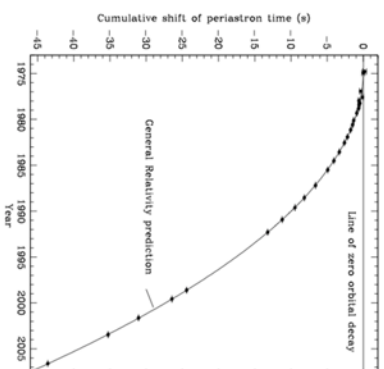
重力波の存在が間接的に確かめられた

連星中性子星の発見 (1974)



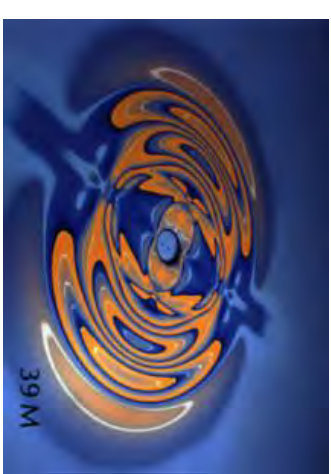
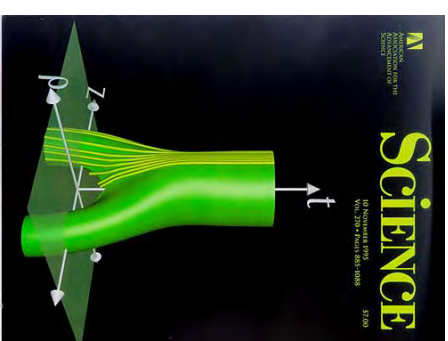
"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

"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"



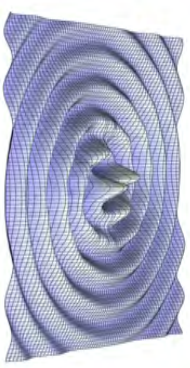
重力波の存在が間接的に確かめられた

グラツクホールの合体シミュレーション



2つのグラツクホールの合体と重力波放出 (90年代, NCSAグループ)

グラツクホールの合体シミュレーション



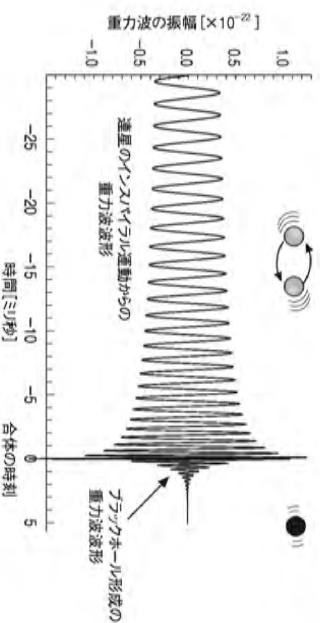
重力波の存在が間接的に確かめられた。
重力波の直接観測をしたい!

連星中性子星
連星ブラックホール

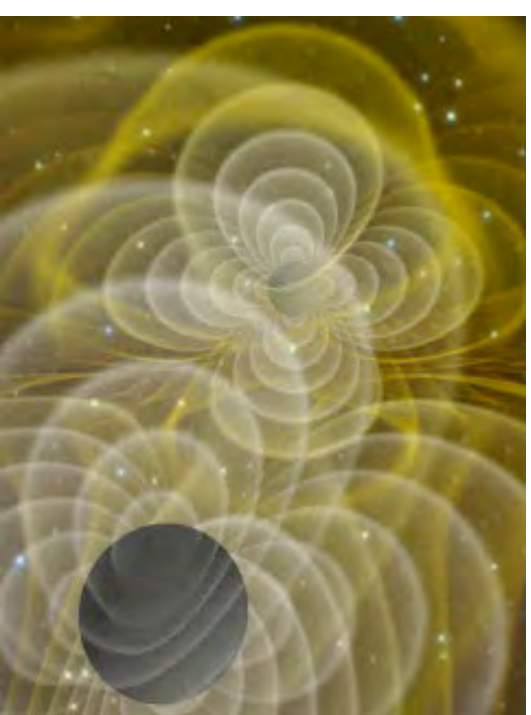
インスパイラル

合体

リングダウン



NCSA-AEI group (1998)

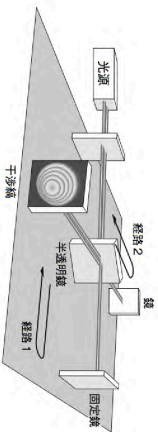


アメリカ，LIGO計画始動（1992年予算承認）

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory



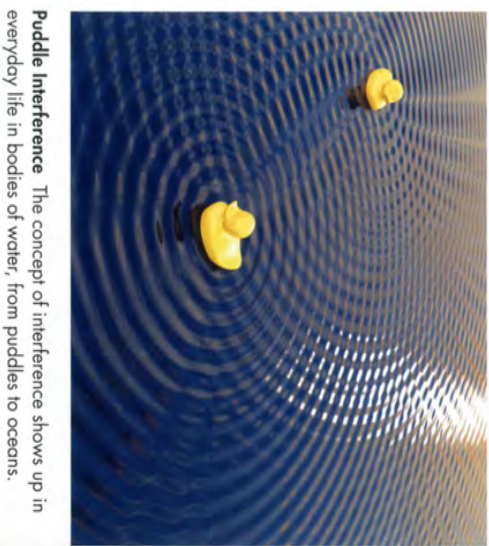
<https://mediassets.caltech.edu/qwave>



1 辺4kmの腕を2本もつレーザー干渉計2つ

干渉計のしくみ

波の干渉



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

波は重ね合わせで強くなったり弱くなったり

波の特徴：重ね合わせと干渉

- 2つの波が重なるときは、重ね合わせの原理が成り立つ。
- 波が足し合わされると、振幅が大きくなる箇所と小さくなる箇所が発生する。

山+山=強め合う， 山+谷=弱め合う

このように、互いに強めあったり弱めあったりする現象を干渉という。

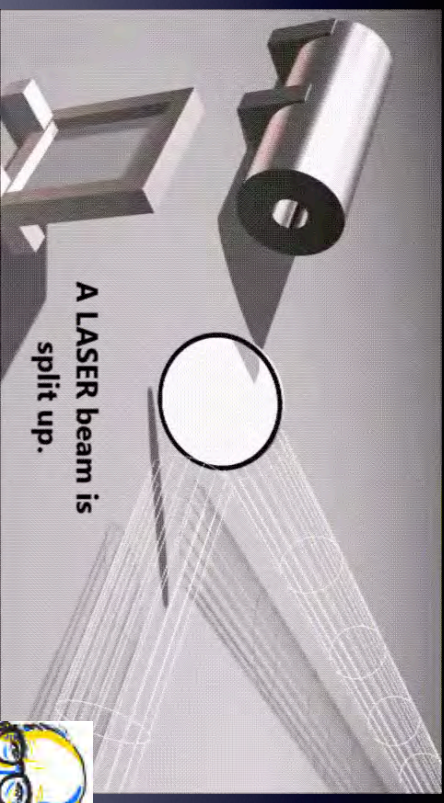
山と山の重ねあわせ

山と谷の重ねあわせ

© 教育出版

© 教育出版

レーザー干渉計による重力波検出のしくみ

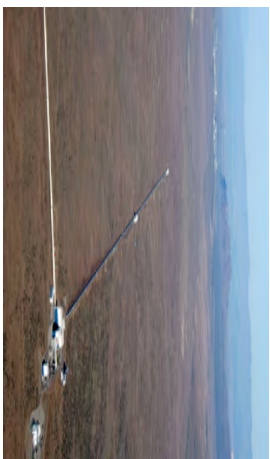


<https://imgur.com/gallery/0VhrXPV>

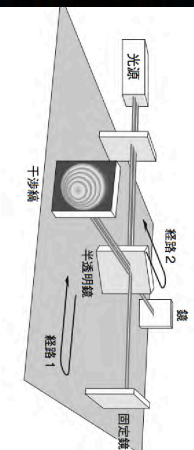
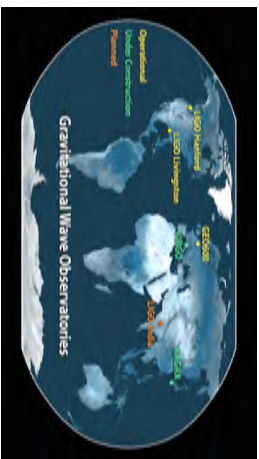


アメリカ, LIGO計画始動 (1992年予算承認)

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

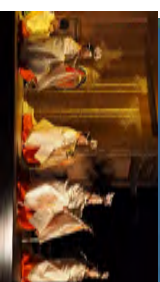


<https://mediassets.caltech.edu/gwave>



KAGRA (かぐら: 大型低温重力波望遠鏡)

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



大型低温重力波望遠鏡

望遠鏡の大きさ: 基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

鏡をマイナス250度(20K)まで

冷却

熱雑音を小さくするため

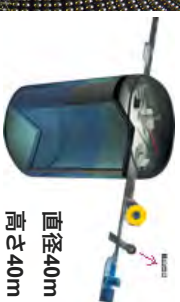
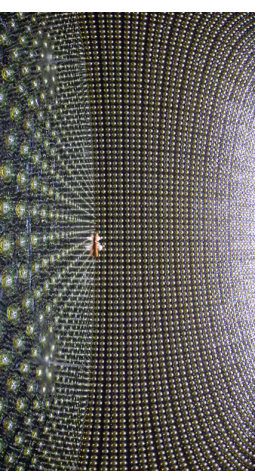
鏡の材質としてサファイア

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



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



小柴昌俊 (2002年)

梶田隆章 (2015年)



天文宇宙検定



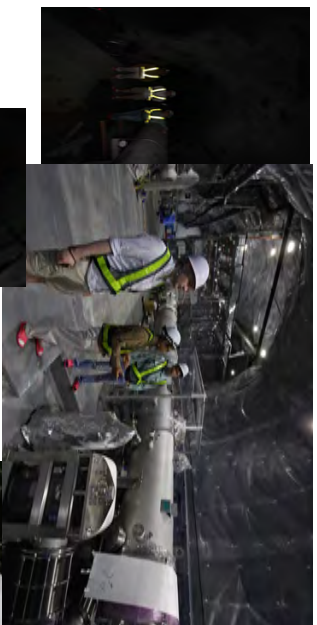
2014年6月、日本が岐阜県に建設している重力波干渉計KAGRA (かぐら)のトンネルが貫通し、マスコミに公開された。KAGRAは、一辺が3kmもあるレーザー干渉計だが、岐阜県神岡鉱山跡の山の中にわざわざ建設した理由は何か。

- 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し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、真空ポンプ稼働で、騒音が激しいから

2. 重力波の発見まで

KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

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



2015年8月



Hisaaki Shinkai



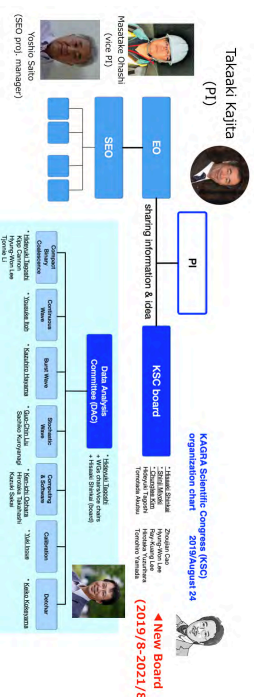
Seiji Kawamura Martynov Denis Kieran Craig

2. 重力波の発見まで

KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)



2019年8月富山にて、KAGRA Face-to-Face meeting



真岡寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」 第6回) 重力波と重力理論

2019/9/26 毎日文化センター(輔田)

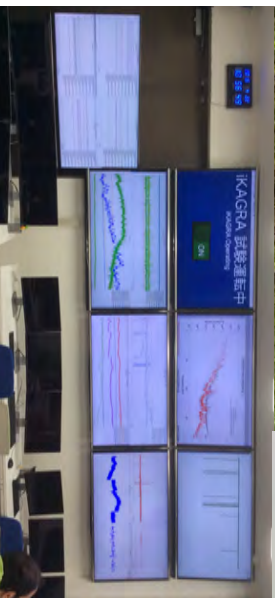
2. 重力波の発見まで

KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

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



2016年4月

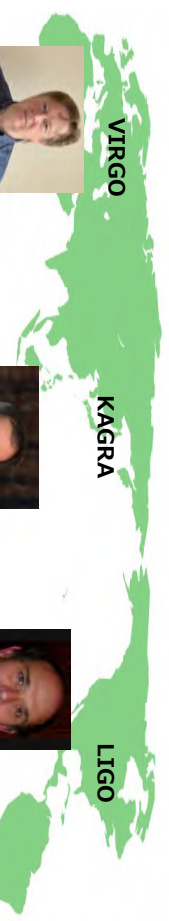


(輔田)

2. 重力波の発見まで

重力波観測ネットワーク

来週、10月4日に、共同観測MoAに調印することになりました。

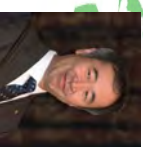


VIRGO



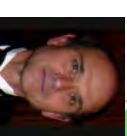
Jo van den Brand

KAGRA



梶田隆章

LIGO



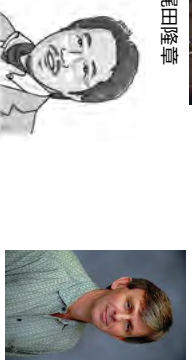
Albert Lazzarini



Patrick Brady



Stavros Katsanevas



真貝



David Reitze

真岡寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」 第6回) 重力波と重力理論

2019/9/26 毎日文化センター(輔田)

重力波初検出を発表するライツイイLIGO所長

2016年2月11日

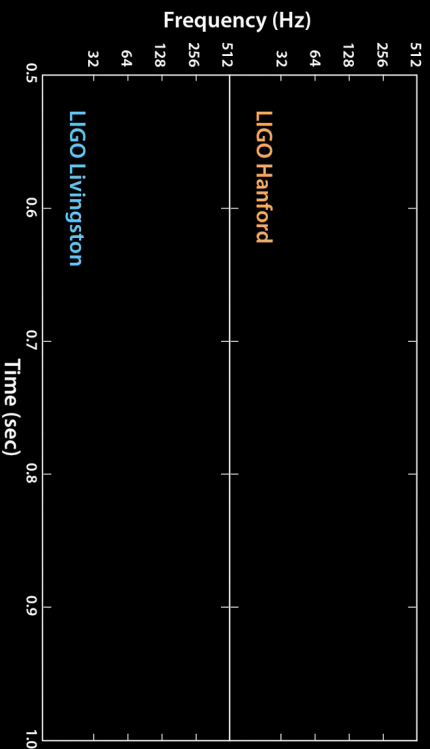


“We had detected gravitational waves. We did it.”

“我々は、重力波を検出した。 やり遂げたのだ。”

<https://www.youtube.com/watch?v=aEPIWcJmZYE>

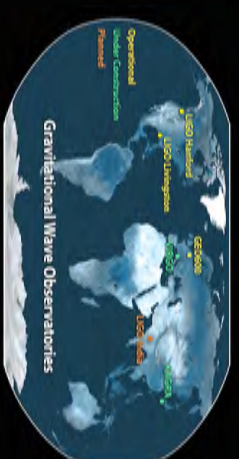
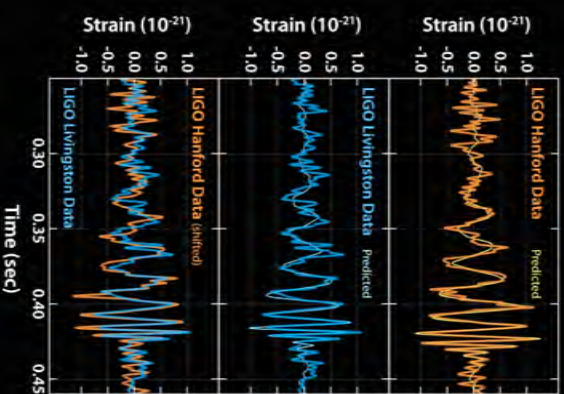
重力波波形を音にすると...



始め2回は実周波数, 後の2回は聞えやすいように+400HZ

<https://mediassets.caltech.edu/gwave>

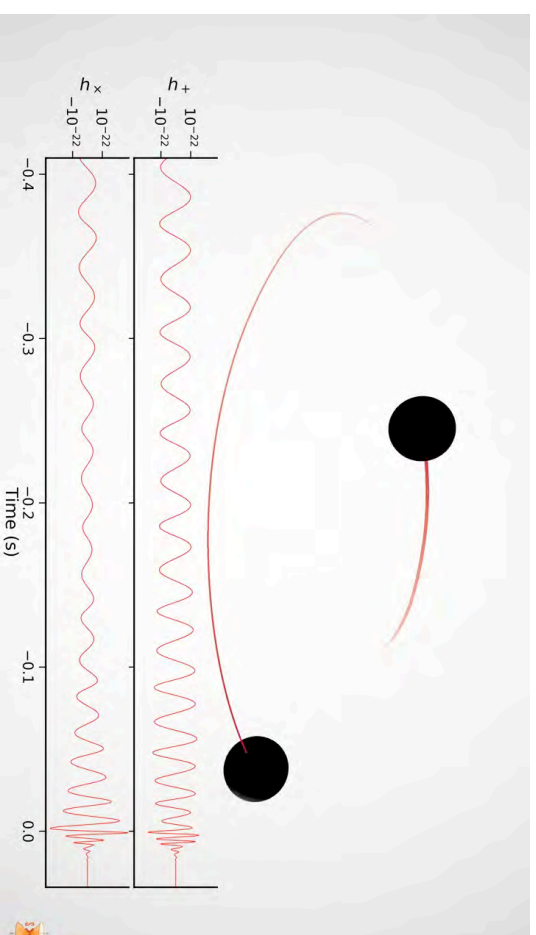
2015年9月14日



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
13億光年先

$$E = mc^2$$



Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW150914. 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 bottom black holes are spinning, and angular momentum is exchanged among the two black holes and with the orbit. This results in a series of small changes in the orientation of the orbital plane, clearly visible as wobble through the colored paths on each black hole horizon, which are the apparent horizons. The lower part of the movie shows the two distinct gravitational waves (called polarizations) that the merger is emitting into the corners. The modulations of the polarizations depend sensitively on the orientation of the binary. This characteristic is used to distinguish the orientation of the binary. This characteristic will be used to distinguish the orientation of the binary. The only limited information about the orientation of the binary. This characteristic will be used to distinguish the orientation of the binary. Finally, the forward-pointing reply of the merger at the end of the movie makes it possible to observe the detector of the newly formed remnant black hole, which decays quickly. Furthermore, the remnant black hole is visible by the emitted gravitational waves, and moves apart of (Credit: A. Buonaiuti, P. Di Stefano, S. H. H. See more at <https://ligo.org/detections/GW150914>).

<http://ligo.org/detections/GW150914.php>

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

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

On September 14, 2015, advanced LIGO observed the first direct detection of gravitational waves from the merger of two black holes. The signal was observed with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the prediction by general relativity for the signal and merger of a pair of black holes and the merger 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 σ . The detection is at a luminosity distance of 410^{+120}_{-110} Mpc, corresponding to a redshift $z = 0.36^{+0.05}_{-0.05}$. The masses of the initial black holes were $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+9}_{-8} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.4} M_{\odot}$ radiated in gravitational waves. All uncertainties quoted here include systematics. 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.

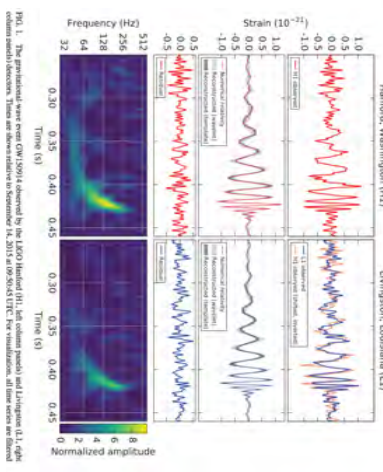


FIG. 1. The predicted wave form (GW) signal observed by the LIGO Hanford (H) (left column panels) and Livingston (L) (right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all times were set to dawn.

PHYSICAL REVIEW LETTERS 116, 061102 (2016)
RECEIVED FEBRUARY 11, 2016
ACCEPTED FEBRUARY 11, 2016
PUBLISHED FEBRUARY 11, 2016
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

PHYSICAL REVIEW LETTERS 116, 061102 (2016)
RECEIVED FEBRUARY 11, 2016
ACCEPTED FEBRUARY 11, 2016
PUBLISHED FEBRUARY 11, 2016
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102



2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS
Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne

著者1010人
PRL 16ページ

36Msun + 29 Msun
のBHが合体して 62 Msun
(3 Msun分の質量が消失)

13億光年先
(400±170 Mpc)
(z=0.054—0.136)

重力波が検出された！
重力波が検出できた！
BHが存在した！
BH連星が存在した！
相対論が第0近似として正しい！

GW 150914: FACT SHEET
BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS, SIMULATION OF BLACK HOLE MERGER (MIDDLE TOP), BEST FIT WAVEFORM (MIDDLE BOTTOM)

2016年2月2日、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

「予想通りで驚いた」重力波初観測の報道に接して
「重力波初観測」国際競争
「予想通りで驚いた」
「重力波初観測」国際競争

「算理」 2016/8
毎日新聞 2016/2/13

2017年1月センター試験 国語

小林博司「科学コミュニケーション」

第一節 科学コミュニケーションとは何か

科学コミュニケーションとは、科学者と一般市民との間の相互理解を促進することを目的とした活動である。科学者が一般市民に対して科学的知識を伝えることは、社会の発展に不可欠である。科学者は、一般市民に対して科学的知識を伝えるだけでなく、一般市民の科学的素養を高めることも重要な役割を果たしている。

科学コミュニケーションの重要性は、近年ますます高まっている。科学技術の進歩が著しい現代社会において、一般市民が科学的知識を身につけることは、日常生活を送る上で不可欠である。また、科学技術の進歩がもたらす社会問題の解決にも、一般市民の科学的素養の高まりが不可欠である。

科学コミュニケーションの手法は多岐にわたる。講演会、シンポジウム、ワークショップ、テレビ番組、新聞記事など、様々な手法が用いられている。また、インターネットを活用した科学コミュニケーションも、近年急速に普及している。

科学コミュニケーションの効果を高めるためには、科学者と一般市民との相互理解を促進することが不可欠である。科学者は、一般市民の科学的素養を高めるだけでなく、一般市民の科学的素養を高めることも重要な役割を果たしている。

科学コミュニケーションの重要性は、近年ますます高まっている。科学技術の進歩が著しい現代社会において、一般市民が科学的知識を身につけることは、日常生活を送る上で不可欠である。また、科学技術の進歩がもたらす社会問題の解決にも、一般市民の科学的素養の高まりが不可欠である。

2017年1月センター試験 国語

小林博司「科学コミュニケーション」

科学コミュニケーションとは、科学者と一般市民との間の相互理解を促進することを目的とした活動である。科学者が一般市民に対して科学的知識を伝えることは、社会の発展に不可欠である。科学者は、一般市民に対して科学的知識を伝えるだけでなく、一般市民の科学的素養を高めることも重要な役割を果たしている。

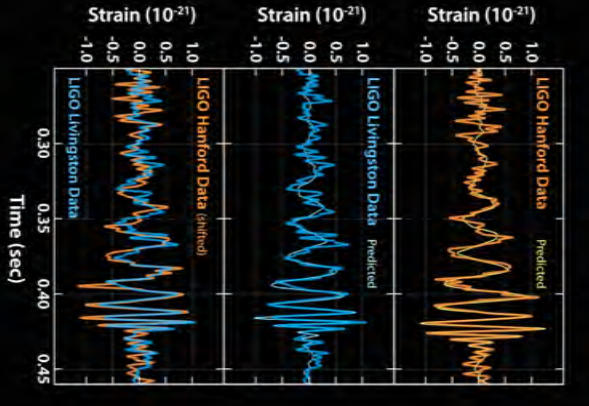
科学コミュニケーションの重要性は、近年ますます高まっている。科学技術の進歩が著しい現代社会において、一般市民が科学的知識を身につけることは、日常生活を送る上で不可欠である。また、科学技術の進歩がもたらす社会問題の解決にも、一般市民の科学的素養の高まりが不可欠である。

科学コミュニケーションの手法は多岐にわたる。講演会、シンポジウム、ワークショップ、テレビ番組、新聞記事など、様々な手法が用いられている。また、インターネットを活用した科学コミュニケーションも、近年急速に普及している。

科学コミュニケーションの効果を高めるためには、科学者と一般市民との相互理解を促進することが不可欠である。科学者は、一般市民の科学的素養を高めるだけでなく、一般市民の科学的素養を高めることも重要な役割を果たしている。

科学コミュニケーションの重要性は、近年ますます高まっている。科学技術の進歩が著しい現代社会において、一般市民が科学的知識を身につけることは、日常生活を送る上で不可欠である。また、科学技術の進歩がもたらす社会問題の解決にも、一般市民の科学的素養の高まりが不可欠である。

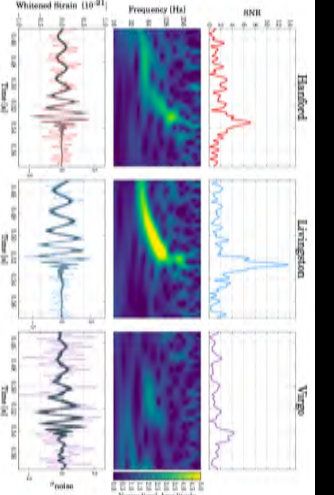
GW150914



GW150914: FACT SHEET

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~200 ms
source type	black-hole BH binary	# cycles from 30 Hz	~10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	1×10^{-21}
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	40,002 fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.084 to 0.136	peak GW luminosity radiated	3.6×10^{56} erg s ⁻¹
signal-to-noise ratio	24	peak GW energy	2.5×10^5 M _⊙
false alarm prob.	< 1 in 5 million	signal damping time	~250 Hz
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant damping time	~4 ms
Source masses	M _⊙	remnant size, area	180 km, 3.5×10^4 km ²
total mass	60 to 70	constant with general relativity?	performed
primary BH	32 to 41	graviton mass bound	$< 1.2 \times 10^{-12}$ eV
secondary BH	25 to 35	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc ⁻³ yr ⁻¹
remnant BH	58 to 67	online trigger latency	~3 min
mass ratio	0.6 to 1	# of offline analysis pipelines	5
primary BH spin	< 0.7	CPUs hours consumed	50 million (~20,000 papers on Feb 11, 2016)
secondary BH spin	< 0.9	PCs run for (100 days)	13
remnant BH spin	0.57 to 0.72	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
signal arrival time	arrived in L1 7 ms before in H1		
signal delay	likely sky position Southern Hemisphere		
likely sky position	likely observation field-of-view		
likely observation	likely observation field-of-view		
likely observation	likely observation field-of-view		

GW170814

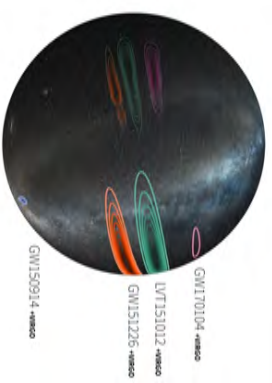


アメリカ LIGO 2台とヨーロッパ Virgoの3台の同時観測に成功

observed by	H1, L1, V1	duration from 30 Hz	~ 0.28 s
source type	black-hole (BH) binary	# of cycles from 30 Hz	~ 15 to 16
date	14 Aug 2017	credible regionally area (with 90% credib. w/ 90% w/ 90% w/ 90%)	40 deg ²
time	10:03:04 UTC	credible area w/ 90% w/ 90% w/ 90%	1160 deg ²
online trigger latency	~30 s	black-hole tangential sky location	45° S, 23° W
signal arrival time delay	-11.1, 8.6, before in H1 and 14 ms before in V1	direction of Earth's rotation	~ 1.2, 1.2, 0.8 m/s
signal-to-noise ratio	~ 18	peak stretching of GW strain	~ 6.5
false alarm rate	< 1 in 27,000 years	peak stretching of GW strain (90% w/ 90% w/ 90%)	0.317, 0.447, 0.779
probability of noise producing 1, 5, 50, 100 peak	0.3%, 0.03%, 0.003%, 0.0003%	GW strain	~ 1.2, 1.2, 0.8 m/s
distance	1.1 to 2.2 billion light-years	frequency at peak GW strain	150 to 200 Hz
redshift	0.07 to 0.14	wavelength at peak	1480 to 1950 km
total mass	53 to 59 M _⊙	redshifted GW energy	3.2 to 4.2 × 10 ⁵⁶ erg
primary BH mass	28 to 36 M _⊙	remnant ringdown freq.	312 to 348 Hz
secondary BH mass	21 to 28 M _⊙	remnant damping time	3.1 to 3.8 ms
remnant BH mass	0.6 to 1.0 M _⊙	coefficient with general relativity	performed
mass ratio	0.62 to 0.77	evidence for postmerger	none
remnant BH spin	0.62 to 0.77	dispersion of GW	performed
remnant size (effective radius)	139 to 153 km	dispersion of GW	performed
remnant area	2.4 to 2.9 × 10 ⁴ km ²	dispersion of GW	performed
effective spin parameter	0.06 to 0.18	dispersion of GW	performed
effective spin parameter	0.06 to 0.18	dispersion of GW	performed
effective spin parameter	0.06 to 0.18	dispersion of GW	performed

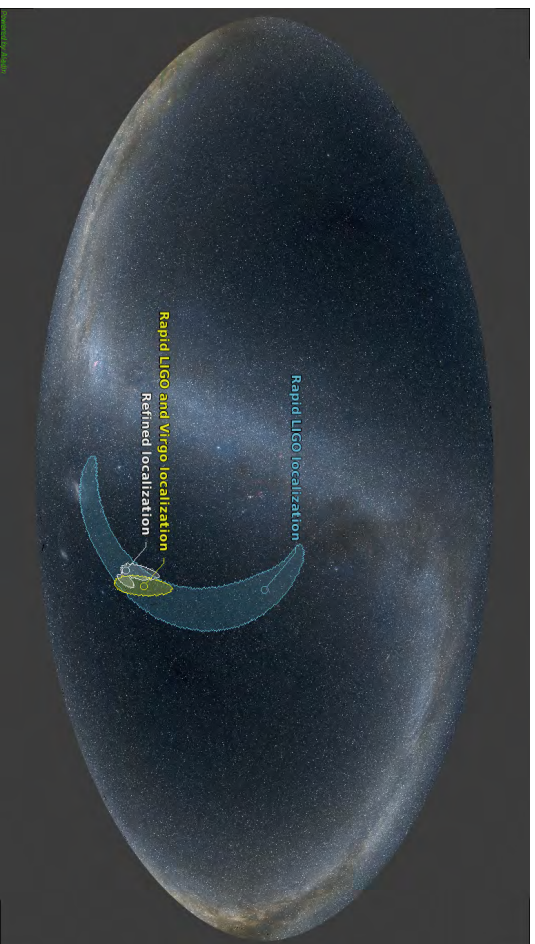


Sky Map of LIGO's Black-Hole Mergers. This three-dimensional projection of the Milky Way galaxy onto a transparent globe shows the probable locations of the three confirmed LIGO black-hole merger events—GW150914 (orange), GW151226 (green), and the first merger detected by Virgo, GW170104 (purple)—and the 90 percent confidence region, at lower significance (lighter green). The outer contour for each represents the 90 percent confidence region; the innermost contour signifies the 10 percent confidence region. [Image credit: LIGO/Caltech/MIT/LIGO Scientific (Miley Way image; Axel Meltinger)] - See more at: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash=3X5V1JdL2cpH>

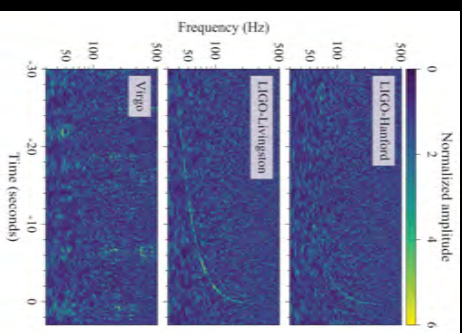


Forecasting LIGO Detections in the Three-Detector Era. This map illustrates how the addition of the Virgo detector, scheduled to come online this summer, will improve the localization of gravitational waves. The map shows the estimated locations of the four black-hole merger events detected by LIGO to date (including one event seen at lower significance), after including hypothetical Virgo data. Outer contours represent the 90 percent confidence region; innermost contours signify the 10 percent confidence region. [Image credit: LIGO/Caltech/MIT/LIGO Scientific (Miley Way image; Axel Meltinger)] - See more at: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash=3X5V1JdL2cpH>

<http://ligo.org/detections/GW170104.php>

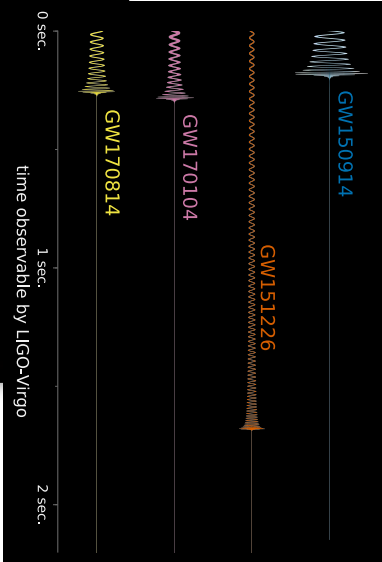


2017年10月, LIGO/Virgoが中性子星連星の合体によって生じた重力波を初めて検出した, と発表した

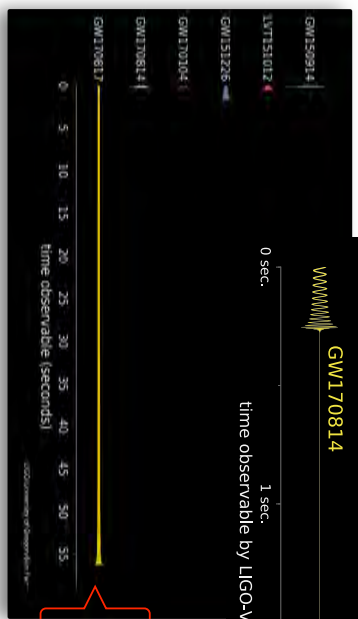


2017/10/16
連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測 GW170817

これまでの BHBH合体 による重力波

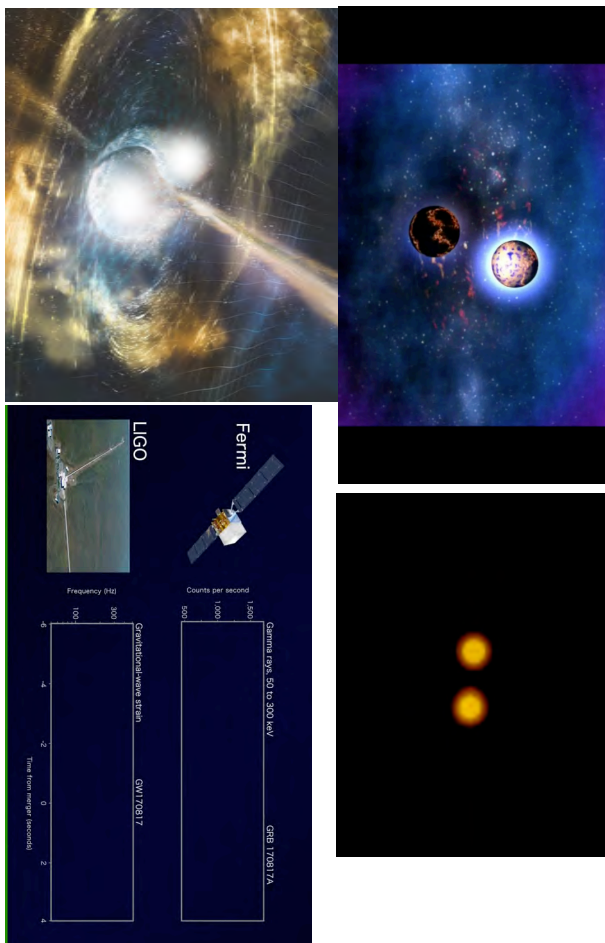


今回のNSNS 合体による重力波



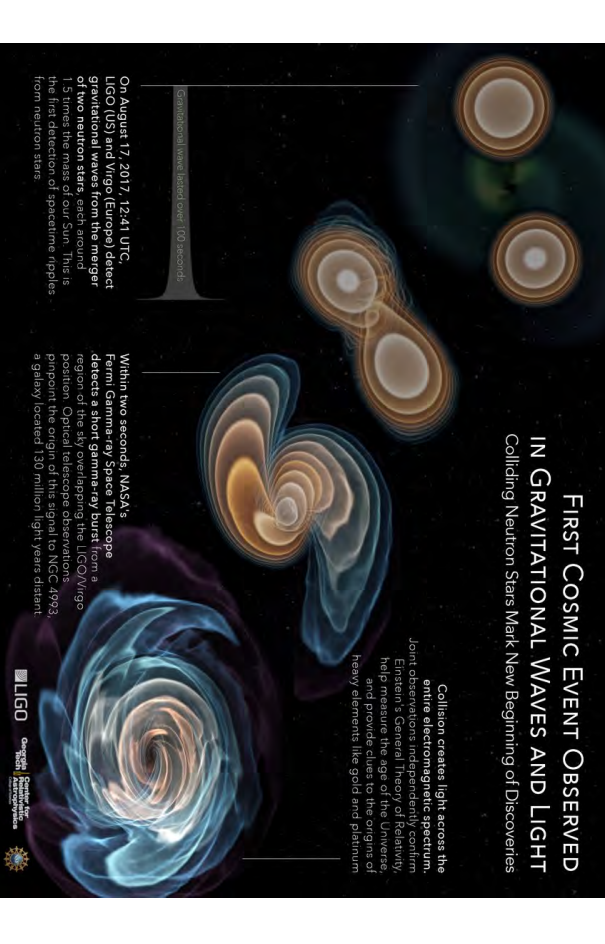
連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



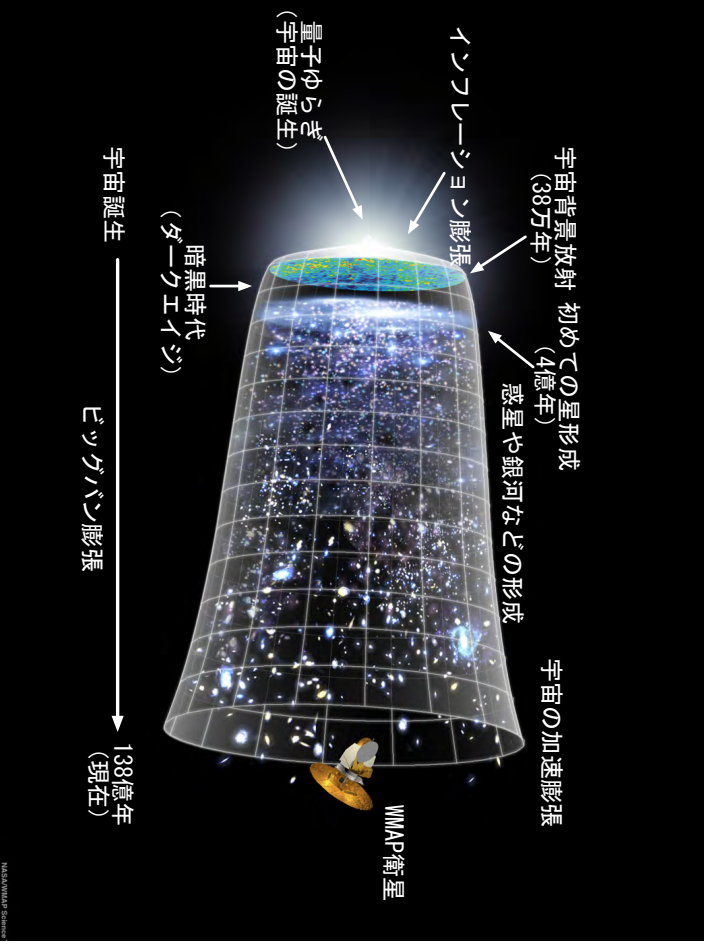
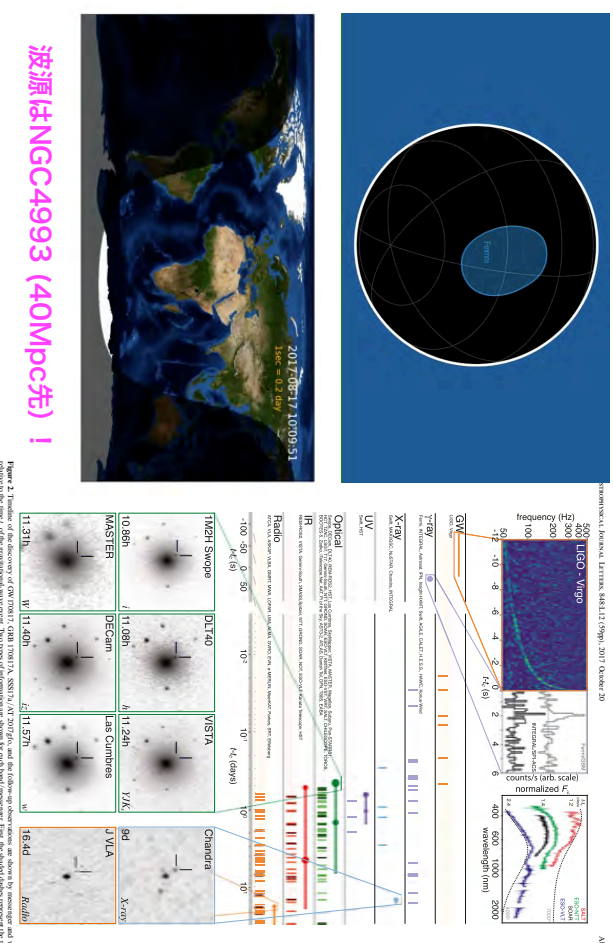
連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



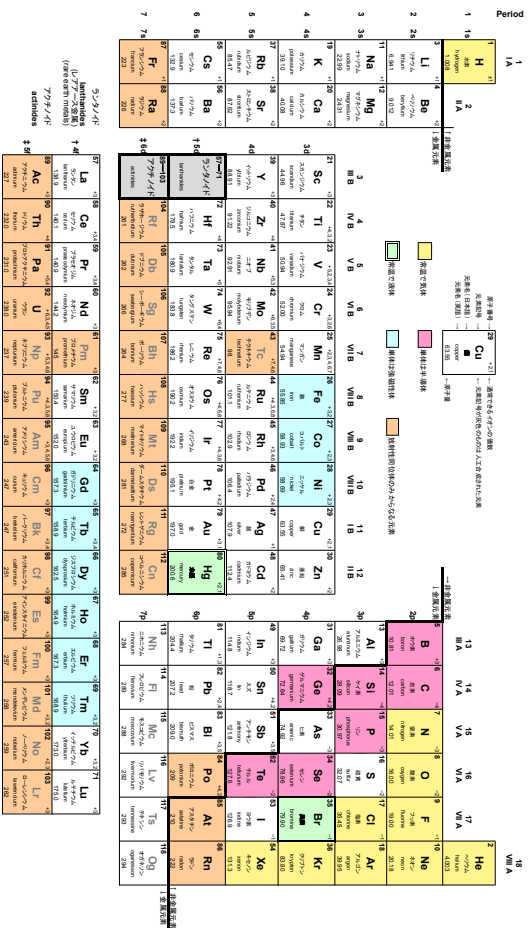
連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



波源はNGC4993 (40Mpc先) !

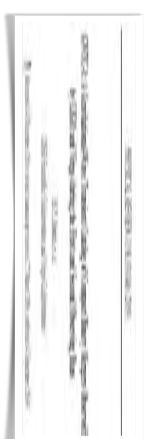
周期表 (periodic table)



宇宙の始まりは素粒子。
だんだんと冷えるにしたがって水素 (H) が形成。
集まって星ができ、核融合で恒星になる。
しかし、核融合は、鉄 (Fe) までしか進まない。
現在、周期表に Fe より重い元素があるのは何故か？

超新星爆発で作られた！
中性子星連星合体で作られた！

現在までに BHBH 10例, NSNS 1例の重力波検出報告



2019年4月からの第3期観測では
週に一度の検出の模様...

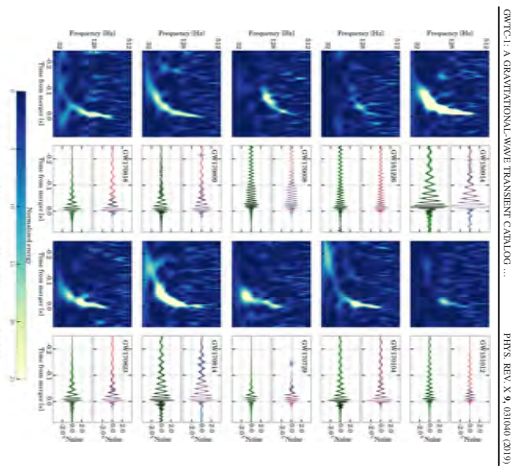


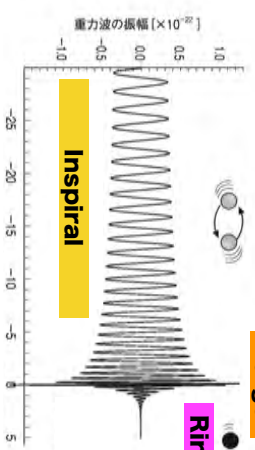
FIG. 10. Time-frequency maps and reconstructed signal waveforms for the six BHBH events. Each event is represented with three frequency power spectra of GW strain. The spectrograms show the typical characteristic from the precursor probe-like decay. The time-series plots show the reconstructed signal waveforms. The color bars show the reconstructed signal waveforms. The color bars show the reconstructed signal waveforms. The color bars show the reconstructed signal waveforms.

自己回帰モデルを用いた重力波データ解析(2): LIGO/Virgo 02までのカタログデータ解析

ラマックホールリソングダウン波形の



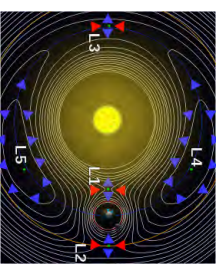
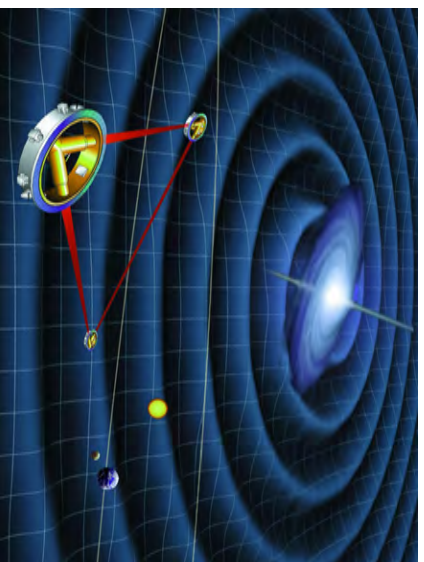
真貝寿明 (大阪工大)



BH 準固有モード (quasi-normal modes)
⇨ BH 摂動理論
⇨ (M, a)
強い重力場の表れ
⇨ 一般相対論の検証ができる

テンソリートをかわず、データから波形を再構築

重力波宇宙干渉計LISA (リサ) ESA予算承認 Laser Interferometer Space Antenna



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

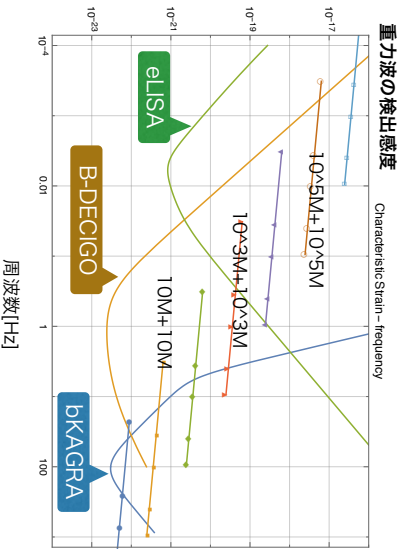
重力波宇宙干渉計DECIGO (デイスイゴ) Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory



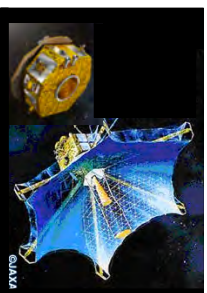
宇宙全体スケールで
巨大ブラッックホール連星合体の
重力波が検出できる

銀河中心の超巨大ブラッックホール
形成過程がわかる

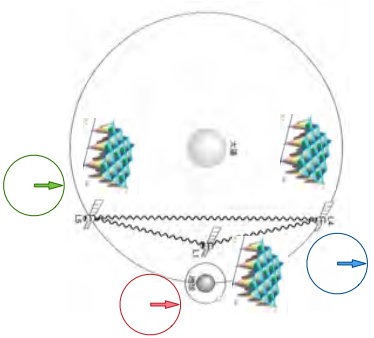
宇宙の膨張速度がわかる



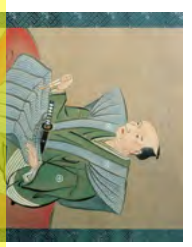
宇宙空間光格子時計ネットワーク INO Interplanetary Network of Optical Lattice Clocks



宇宙全体スケールで
巨大ブラッックホール連星合体の
重力波が検出できる



銀河中心の超巨大ブラッックホール
形成過程がわかる



伊能忠敬
江戸時代、日本中で
精密な測量をして地図を作成

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

宇宙はどこまで解明されたか

- 4月25日 天文学と宇宙物理学：観測技術の進展と星までの距離の測定
- 5月23日 惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？
- 6月27日 星とブラッックホールと惑星系と銀河：構造形成は何か先か？
- 7月25日 超新星爆発と宇宙論：6つのパラメータで描かれる膨張宇宙
- 8月29日 初期宇宙と素粒子物理：高次元モデルが描くビッグバン以前
- 9月26日 重力波と重力理論：アインシュタインはどこまで正しいか？

真貝寿明 (しんかい ひさあき)

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員

<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainchi/>



ご聴講ありがとうございました。

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



マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

宇宙線		ガンマ線		X線		光		電磁波				
波長 [m]	10^{-13}	10^{-10}	10^{-9}	3.8×10^{-7}	7.7×10^{-7}	10^{-4}	1	10	10^2	10^3	10^4	
波長 [nm]					380	770						
振動数 [Hz]	3×10^{18}	3×10^{17}						3×10^{12}	3×10^8	3×10^7	3×10^6	3×10^4
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	電子レンジ	F Mラジオ	短波ラジオ	A Mラジオ	電波時計	飛行機の通信

ガンマ線

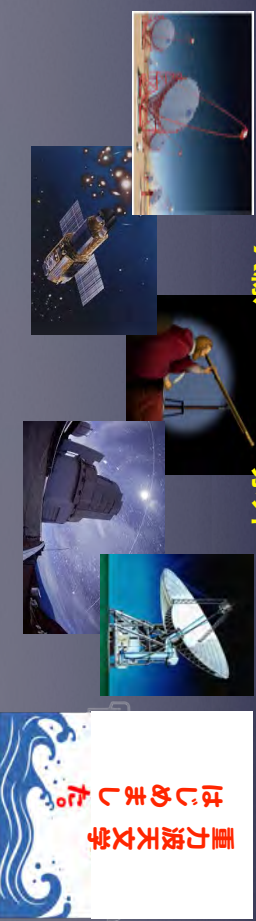
X線

可視光

赤外

電波

重力波



重力波天文学
はじめました。