NPO法人 花山星空ネットワーク 第28回 講演会

重力波観測から わかったこと わからないこと

- アインシュタインの相対性理論
 重力波が観測されるまで
 重力波が観測されてから
 日本のKAGRA
 わからないこと
- 6. 将来計画



こちらは真貝先生では なくて,犬です

2022/6/5

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/



里化字研究所 答頁研究頁 <u>http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/</u>





ナツメ社

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/

近代物理学から現代物理学へ

物理学奇跡の年 1905年

近代物理学の進展



19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。

近代物理学から現代物理学へ 物理学奇跡の年 1905年



特殊相対性理論(1905年)

これまでの物理学を否定せず、拡張した理論!



特殊相対性理論の結論

時間の進み方は観測者によって異なる

光の速さは誰からみても同じと考えると, 時間の進み方は相対的になる



地球の人がロケット内の光時計を見ると、ロケット が移動するので光は斜めの経路を進み、その分長 い距離を進まなければならない。光の速度は誰か ら見ても一定なので、ロケット内の光時計は2億 9979万2458回往復するのに地球の1秒より長い 時間がかかる。つまりロケット内の光時計はゆっ くりと時を刻んでいる。

動いている人の時間の進み方は,静止している人よりも遅い

真貝寿明「重力波観測 わかったこと わからないこと」 2022/6/5 花山星空ネットワーク第28回講演会

一般相対性理論(1915年)

一般相対性理論 強い重力場での時空の力学 「空間が歪むのが重力の正体である」

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学 「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

F = ma

ニュートン : リンゴはなぜ落ちる?



by Frits Ahlefeldt

http://hikingartist.com/











ニュートン : 万有引力の法則

万有引力の法則

すべてのものは、引力で引き合う

Advanced 万有引力の法則

質量 *m* と *M* の質点が *r* だけ離れて置かれているとき,両質点にはたら く力 *F* は,大きさが

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \tag{2.2}$$

でつねに引力である. G は定数であり, 万有引力定数と呼ぶ.



http://hikingartist.com/

by Frits Ahlefeldt





WE WOULD ALSO CAUSE



空間のゆがみが重力の原因だ

光や物体は,まっすぐ進んで いるつもりでも,曲がって進む

一般相対性理論(1915年)



重力の正体は,空間の性質だ

を解く方程式である。

空間のゆがみが 重力の正体だ

重力場の方程式(アインシュタイン方程式, 1915年)

重力の正体は,時空の歪みである. その関係は,次の式で表される.

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{時空の歪み}} = \frac{8\pi G}{c^4} \underbrace{T_{\mu\nu}}_{\text{質量の分布}}$$

左辺はリーマン幾何学にもとづいて時空がどのように曲がっている のかを表している。右辺は物体がどのように分布しているのかを表 す量である。



水星の近日点移動の問題(ルベリエ、1854) 100年で574秒角ずれる。2250世紀で完全な「ばら模様」。 →→金星の影響で277秒角、木星で153秒角、地球で90秒角、 その他の惑星で10秒角分の説明が可能。

残りの43秒角は???



空間のゆがみが 重力の正体だ

重力の正体は,空間の性質だ

1915年,アインシュタインが,できたばかりの一般相対性理論を 適用すると,「43秒角の歳差運動」が出てきた.

一般相対性理論が予言したもの

- 重力によってゆがんだ空間では、光の経路も曲がる
- 重力によってゆがんだ空間では、時間の進み方は遅くなる.
- ・ 強い重力のもとでは星はつぶれ続ける.
- 宇宙全体は動的でなければならない.
- ・重力波が宇宙空間を伝わる





一般相対性理論が予言した「重力レンズ」

• 重力によってゆがんだ空間では、光の経路も曲がる



1919年5月の皆既日食で 太陽のすぐ近くにみえる星の位置が 普段の位置とずれていた

重力レンズ効果として観測される▶





Galaxy Cluster Abell 2218 NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScl, ST-ECF) • STScl-PRC00-08

HST • WFPC2

ブラックホール



WE WOULD ALSO CAUSE









真貝寿明「重力波観測 わかったこと わからないこと」 2022/6/5 花山星空ネットワーク第28回講演会

2019年4月10日,国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



地球から16.8Mpc, 5500万光年 M87 太陽の65億倍の質量

https://alma-telescope.jp/news/press/eht-201904

2022年5月12日,国立天文台グループ「天の川ブラックホールの直接撮像に初めて成功」





地球から8kpc, 3万光年 SgrA*, 太陽の400万倍の質量

https://www.miz.nao.ac.jp/eht-j/c/pr/pr20220512





http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu/rule.html

NPO法人 花山星空ネットワーク 第28回 講演会

重力波観測から わかったこと わからないこと

- 1.アインシュタインの相対性理論
- 2. 重力波が観測されるまで
- 3.重力波が観測されてから
- 4. 日本のKAGRA
- 5.わからないこと
- 6.将来計画

2022/6/5

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/





GRAVITATIONAL WAVES ARE PRODUCED WHENEVER MASSES ACCELERATE, CHANGING THE DISTORTION OF SPACE.

EVERYTHING WITH MASS AND/OR ENERGY CAN MAKE GRAVITATIONAL WAVES.



3

BUT THESE WOULD BE EXTREMELY SMALL. PRACTICALLY UNDETECTABLE.



Ó

WWW.PHDCOMICS.COM

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





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

IMAGINE THAT SPACE IS A GIANT SHEET OF RUBBER ... THE MORE MASS, THE MORE THINGS THAT HAVE MASS THAT SPACE GETS BENT AND CAUSE THAT RUBBER SHEET DISTORTED BY GRAVITY. TO BEND, LIKE A BOWLING BALL ON A TRAMPOLINE. FOR EXAMPLE, THE REASON THE EARTH GOES AROUND THE SUN IS THAT THE SUN IS VERY MASSIVE, CAUSING A BIG DISTORTION OF THE SPACE AROUND IT. -1++ 0: qui 1=0: IF YOU JUST TRY TO MOVE IN A STRAIGHT LINE AROUND SUCH A BIG DISTORTION, YOU WILL FIND YOURSELF ACTUALLY MOVING IN A CIRCLE. THAT'S HOW ORBITS WORK: THERE'S NO ACTUAL FORCE PULLING THE PLANETS AROUND, JUST A BENDING OF THE SPACE. GRAVITATIONAL WAVES ARE PRODUCED WHENEVER MASSES ACCELERATE, EVERYTHING WITH MASS AND/OR ENERGY CAN MAKE GRAVITATIONAL WAVES. CHANGING THE DISTORTION OF SPACE. IF YOU AND I STARTED TO DANCE AROUND EACH OTHER. WE WOULD ALSO CAUSE RIPPLES IN THE FABRIC OF SPACE AND TIME.

> BUT THESE WOULD BE EXTREMELY SMALL. PRACTICALLY UNDETECTABLE.

83

WWW. PHDCOMICS. COM CREATED BY: UMBERTO CANNELLA, DANIEL WHITESON AND JORGE CHAM SPECIAL THANKS TO ADAN BROOKS, FLIP TANEDO AND LIGO!

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















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 wave². 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.



重力波の直接観測をしたい!

連星中性子星 連星ブラックホール







ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)



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

レーザー干渉計のしくみ

干渉=波が重なって強めあったり弱めあったりする現象

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO,らいご)





レーザー干渉計のしくみ

干渉=波が重なって強めあったり弱めあったりする現象





Michelson Interferometer

MIT Department of Physics Technical Services Group

start on click, last half, 1'45"

http://techtv.mit.edu/videos/9823-michelson-interferometer



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




日本でも早期から重力波レーザー干渉計を開発していたが、初観測には至らなかった

TAMA 300 m (国立天文台,東京三鷹, 2008)



NPO法人 花山星空ネットワーク 第28回 講演会

重力波観測から わかったこと わからないこと

- 1.アインシュタインの相対性理論
- 2. 重力波が観測されるまで
- 3. 重力波が観測されてから
- 4. 日本のKAGRA
- 5.わからないこと
- 6.将来計画

2022/6/5

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/

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

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 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



重力波波形を音にすると...



はじめ2回は実周波数,後の2回は聞えやすいように+400Hz <u>https://mediaassets.caltech.edu/gwave</u>

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



相対性理論、正しかった!

「予想通りで驚いた」

重力波初観測の報道に接

して

×

真貝 寿明

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

だ。 る「我々は重力波を検出した。 波を研究の中心に据えてきたわけではな ッ で見守っていた。 ポー 私は、 記者発表の中継は、 ズが、 一般相対性理論の 我々の喜びを倍増させた。 発表の第一声は、 インターネットで研究者仲間とチャ 理論研究に関わ やり遂げたのだ (We did it)。」だ LIGO 所長のデビット 63 が、 0 て四半世紀になる。 この瞬間を待ち望んで ッ Ի 0 これ ライ た。 しな 彼 が ŧ ッ 63 た 1 ら自宅 で Ø 一 人 重力 に ガ ŀ ッ

物理系の科学者が中心の随筆雑誌。

重力波につ いては広く報道されたので、 ここでは詳細を避ける が • 少しだ け

内容紹介



窮理含

2016年7月20日発売

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1~6)に答えよ。なお、 (配点 50 設問 (2601 - 4)

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 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 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 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1) 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「パイゾ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きているのである。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 —

3 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、 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 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、永らく人類を脅かし苦しめてきた病や災害といった自然の脅 営みの比重が下がり、実験室の中に天然では生じない条件を作り出し、そのもとでさまざまな人工物を作り出すなど、自然に 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。 63 63

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、 「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 (2601 - 5)

実や、 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 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。

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。コリンズとピンチは、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 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 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5) (注6) 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

5

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 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 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Cゴレムのイメージに取りかえることを主 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 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。

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?)

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。

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」

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

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

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8) 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、 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(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、 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)

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 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。 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 功といえるかがわからないのである。 ンビコクされる。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 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、 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 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 ι

— 6

_

9 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 き、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、 (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 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

 コリンズとピンチは、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

9 7 8 ムが直接検出に成功したと発表した 重力波の存在は明確に否定された 重力波 ウェーバ 時空のゆがみが波となって光速で伝わる現象。 - ジョセフ・ウェーバー(一九一九~二〇〇〇)。物理学者 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、 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。 アメリカの研究チー

国語



「科学コミュニケーション」 小林博司

శ్



2016/4/21

sport

Cameron McEvoy wears his passion on his swimming cap

Swimmer and physics student Cameron McEvoy is sporting the signature of a gravitational wave on his cap.



Cameron McEvoy wins a 100m heat with the gravitational wave on his Bond University club cap. Source:AAP

The discovery has made a big impression on McEvoy, 21, whose heroes tend to be scientists rather than swimmers.

"It's the 100th anniversary of Einstein's general theory of relativity, which is his theory of gravity and coincidentally, physicists at Advanced LIGO (observatory) discovered gravitational waves, which is the stretching and contraction of space-time itself — everything we move in and pretty much what the universe is,' he said.



2017/10









GRAVITATIONAL WAVES DRESS



ADD TO (

Want to wear the fabric of space time?

Celebrate the discovery of gravitational wave first glance, you see plaid. Look a bit further data from the LIGO detectors. It's a classic educational twist.

MATCHING PLAID TIE AND ACCESSORIES N





Posting for a bit of comic relief: "It's like a better version of Ms Frizzle!!" Thanks to Gabriela Gonzalez for the dress, a rite of passage of sort?

...





Ð

Accessories > Ties

Gravitational Waves Tie

***** 4.4 (1254)

N

Tied



Independent artist's content may not match model depicted; RealView™ technology illustrates fit and usage only.



by Shenova by Zazzle







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

"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

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



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





<u>波源はNGC4993 (40Mpc先)</u> 1億3000万光年先

STROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20 500 400 LIGO - Virgo ESO-NT SOAF scale) ESO-VL 200[.] 100-100normalized (arb. ounts/s (-2 400 600 1000 2000 -12 -8 -10 -6 -4 wavelength (nm) $t-t_c$ (s) GW LIGO, Virgo γ-ray Fermi, INTEG IPN, Insight-HXMT, Swift, AGILE, CALET, H.E.S.S., HAWC, Konus-Wind X-ray UV Swift, HST Optical E, TOROS IR REM-ROS2, VISTA 2MASS Spitzer, NTT, GROND, SOAR, NOT, ESO-VLT Kanata Telescope, HS Radio LMA, OVRO, EVN, e-MERLIN, Me 10-2 **10**⁻¹ -100 -50 00 0 50 $t - t_c$ (s) t-t_c (days) 1M2H Swope VISTA DLT40 Chandra 10.86h 11.08h h 11.24h YJK, 9d X-ray MASTER DECam J VLA Las Cumbres

Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and w relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band/messenger. First, the shaded dashes represent the t

iz.

11.57h

16.4d

W

Radio

11.40h

W

11.31h

周期表 (periodic table)



Pu

プルトニウム

plutonium

239

Am

アメリシウム

americium

243

Cm

キュリウム

curium

247

Bk

バークリウム

berkelium

247

Cf

カリホルニウム

californium

251

Es

インスタイニウム

einsteinium

252

Fm

フェルミウム

fermium

257

Md

メンデレビウム

mendelevium

258

No

ノーベリウム

nobelium

259

Lr

ローレンシウム

lawrencium

262

Np

ネプツニウム

neptunium

237

Th

トリウム

thorium

232.0

Pa

ロトアクチニウム

protactinium

231.0

U

ウラン

uranium

238.0

Ac

アクチニウム

actinium

227

‡ 5f

actinides



核反応 原子核の組み替えによって莫大なエネルギーが放出



 $4p \rightarrow {}^{4}He + 2e^{+} + 2\nu_{e} + 2\gamma$

核融合 (nuclear fusion)

合体した方が安定(エネルギー放出)

 $^{235}_{92}\text{U} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3 ^{1}_{0}\text{n}$

核分裂 (nuclear fission) 分裂した方が安定 (エネルギー放出)



ばらばらでいるより,結合している方が, エネルギーが低くて安定



核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か?



→ → 質量数(大)



核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か?



質量数(大)

The Convection Zone

Energy continues to move toward the surface through convection currents of heated and cooled gas in the convection zone.

The Corona

The ionized elements within the corona glow in the x-ray and extreme ultraviolet wavelengths. NASA instruments can image the Sun's corona at these higher energies since the photosphere is quite dim in these wavelengths.

The Radiative Zone

Energy moves slowly outward—taking more than 170,000 years to radiate through the layer of the Sun known as the radiative zone.

Coronal Streamers

The outward-flowing plasma of the corona is shaped by magnetic field lines into tapered forms called coronal streamers, which extend millions of miles into space.



Energy is generated by thermonuclear reactions creating extreme temperatures deep within the Sun's core.

The Chromosphere

The relatively thin layer of the Sun called the chromosphere is sculpted by magnetic field lines that restrain the electrically charged solar plasma. Occasionally larger plasma features—called prominences—form and extend far into the very tenuous and hot corona, sometimes ejecting material away from the Sun.



マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

	MM	M	\mathcal{M}	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim	\sim				
	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	支
波長[m] 波長[nm]	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$										³ 10 ⁴		
版页[IIII] 振動数[Hz]	• : : •	3×10^{18}	3×:	10 ¹⁷	80 11	32	$ imes 10^{12}$ 3 $ imes$	10^8 3×	10 ⁷ 3	$ imes 10^{6}$ 3	$\times 10^{5}$ 3	×10 ⁴	
		医瘤	医瘤	殺菌	光	赤外	携電	テFレM	短波	A M	電飛		_
利用例		() 食	X		機器	線写	ー 電 レ 話 ン	ビラジ	ラジ	ラジ	時機計の		
	· · ·	品照	線写		нн	真	ジ	オ	オ	オ	通信		
		射	真										-
ガン	く路				視光		Ē	雪波			重ナ	波	
	• 48	Ϋ́	線	_		赤	外					1+	
									antiittiit			1 ×	重
												Ľ	力
								(Lenni)				め	波
			- 141 2		A DESC			Å		C		ま	天
		And and				1						L	文
·		100 M				1	4	. /			6	た	学
				ć.		- and		50 1		le le	Ċ		

NPO法人 花山星空ネットワーク 第28回 講演会

重力波観測から わかったこと わからないこと

- 1.アインシュタインの相対性理論
- 2. 重力波が観測されるまで
- 3. 重力波が観測されてから
- 4. 日本のKAGRA
- 5.わからないこと
- 6.将来計画

2022/6/5

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/

世界の重力波観測ネットワーク

LIGO Hanford USA 4 km **KAGRA Hida LIGO Livingston** USA Japan 4 km IGO-India Gufu **GEO600** Hanover Hida Kamioka Germany Ikenoyama 600 m (amland Sakonish EGADS CLIO **KAGRA** 3 km Virgo Pisa Atotsu Entrance Atotsu River Italy

3 km

KAGRA (かぐら:大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector



<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 冷却 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

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

スーパー・カミオカンデ (ニュートリノ観測装置)

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





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)



2016年4月

KAGRA (かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)干渉計の工夫



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)干渉計の工夫


KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)干渉計の工夫



鏡が熱振動で揺れたら困る

▶ 温度を下げよう 20K (マイナス250度)

低温度で耐えられる素材は?

▶ 人工サファイア

22.8 kg diameter 22cm thickness 15cm

低温にする装置は? 対流 x 放射 x

伝導 〇



Figure 3. The CAD drawing of the cryogenic payload under Type-A (left) and the schematic of the cryogenic suspension system of sapphire test masses (right). Suspension stages outside of the outer shield are at room temperature.

KAGRA (かぐら:大型低温重力波望遠鏡)





360 members 200 authors 110 groups 14 regions



KAGRA (かぐら:大型低温重力波望遠鏡)





2019年10月、アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

国際重力波観測ネットワーク

ZLIGO





Virgo Collaboration Virgo is a European collaboration with about 360 authors from 89 institutes Advanced Virgo (AdV) and AdV+: upgrades of the Virgo interferometric detecto Participation by scientists from France, Italy, Belgium, The Netherlands, Poland, Hungary, Spain, Germany · Institutes in Virgo Steering Committee INFN Perugia - APC Paris ARTEMIS Nic INFN Pisa LKB Paris UCLouvain, ULiege IFAE Barcelona INFN Roma La LMA Lyon Univ. of Barcelona ILM and Navier INFN Firenze-Urbino Sapienza INFN Roma Tor Vergata Maastricht Uni University of Sannia Nikhef Amsterdan Univ. of Valencia INFN Genova INFN Trento-Padova POLGRAW(Poland INFN Napoli LAL Orsay ESPCI Paris Advanced Virgo project has been for completed on July 31, 2017 Part of the international network of 2nd generation detectors Started O3 run on April 1, 2019 8 European countries





1330 members860 authors101 groups20 countries

465 members 360 authors 96 groups 8 countries 360 members 200 authors 110 groups 14 regions

KAGRA 2020年2月25日, 観測開始



KAGRA 2020年2月25日, 観測開始



longest lock: 6h 44m max. sensitivity: 442 kpc duty cycle: 60%-74% (24hr)





観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b)



NPO法人 花山星空ネットワーク 第28回 講演会

重力波観測から わかったこと わからないこと

- 1.アインシュタインの相対性理論
- 2. 重力波が観測されるまで
- 3. 重力波が観測されてから
- 4. 日本のKAGRA
- 5. わからないこと
- 6. 将来計画

2022/6/5

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/

重力波で何がわかる?



★ ノイズにまみれた観測データに、予想される波形を掛け合わせて、重力波の検出を行う(matched-filtering法)
 ★ 数値シミュレーションを用いたテンプレートづくり+パラメータで補間した波形モデル

★ 連星BHのパラメータ $(m_1, m_2, \mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \iota, \mathbf{n}, t_c, \varphi_c, \psi, r)$

質量,スピン,軌道傾斜角,合体時刻,位相,偏角,距離

重力波天文学で何がわかる?





01 (2015/9/12 - 2016/1/19)



3 BHBH

GW150914: the first ever detection of gravitational waves from the merger of two black holes more than a billion light years away

https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot

02 (2016/11/30 - 2017/8/25)

After O2 : GWTC1 (2018/12/3 released)

1 NSNS



- GW170814: the first GW signal measured by the three-detector network, also from a binary black hole 10 BHBH (BBH) merger;
- GW170817: the first GW signal measured from a binary neutron star (BNS) merger and also the first event observed in light, by dozens of telescopes across the entire electromagnetic spectrum.

https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot

O3a (2019/4/1 - 2019/9/30)

After O3a : GWTC2 (2020/10/28 released)



真貝寿明「重力波観測 わかったこと わからないこと」 2022/6/5 花山星空ネットワーク第28回講演会

重力波の生成機構一般相対性理論によれば、大質量でコンパクトな天体が加速度運動 することにより、重力波が発生する.重力波源としては連星の合体や超新星爆発、非球対称 な星の高速回転や、宇宙初期に起源をもつ重力波が宇宙空間を伝播していると考えられる. これらのうち、データとの相関解析を可能にする波形予測ができるのは、連星合体からの重 力波である.十分に合体前はニュートン力学に相対論補正を加えたポスト・ニュートン展開 により、合体前後は数値シミュレーションにより、合体後ブラックホールが生じる場合に はブラックホール時空の摂動によっても波形モデルが得られる。これらのモデルと重力波 干渉計で得られる信号の相関をとることで、連星ブラックホール(以下 BBH)や連星中性 子星 (BNS)、および中性子星・ブラックホール連星 (NSBH)の合体現象による重力波の検 出、および、パラメータ推定が 2015 年以来可能になった.

重力波の観測 これまでに、米欧のレーザー干渉計 LIGO、Virgo によって、O3a と呼ば れる観測期間終了までに、BBH による重力波が 46 例、BNS による重力波が 2 例報告され ている。日本の KAGRA(かぐら)も O3b 観測期間の最後に共同観測に入った。O3b 期 の重力波イベントは 2021 年 7 月時点で未発表である。現在、各干渉計は次の観測期間 O4 (2022 年夏から 1 年間の予定)に向けて観測感度を上げるため、干渉計の改良中である。

重力波イベントは、観測された年月日を用いて、GW150914の形で命名される. O3a 期 より、時分秒を加えた名称が正式となった. 重力波イベントは速報体制が取られ、多波長 電磁波追観測が可能になっているが、これまでに波源が特定されたのは GW170817 のみで ある.

表 1: 重力波レーザー干渉計の位置と腕の向き(例えば N 36° W は,北から西方 に 36° の向きを指す.)

干渉計		腕長 (km)	緯度	経度	X-腕	Y-腕
LIGO Hanford	米国	4	46°27′19″ N	119°24′28″ W	N 36° W	W 36° S
LIGO Livingston	米国	4	30 33 46 N	90 46 27 W	N 18° S	S 18° E
Virgo	欧州	3	43 37 53 N	10 30 16 E	N 19° E	W 19° N
KAGRA	日本	3	36 24 36 N	137 18 36 E	E 28.3° N	N 28.3° W

表 2: 過去の観測期間

観測期	Advanced LIGO	Advanced Virgo	KAGRA		
	年月日 年月日	年月日 年月日	年月日 年月日		
O1	2015 9 12 -2016 1 19	_	_		
O2	$2016\ 11\ 30\ -2017\ \ 8\ 25$	$2017 \ 8 \ 1 - 2017 \ 8 \ 25$	_		
O3a	2019 4 1 -2019 9 30	同左	_		
O3b	2019 11 1 -2020 3 27	同左			
O3GK	_	_	$2020\ 4\ 7\ -2020\ 4\ 21$		

観測された中で特筆すべきイベント 突発的重力波カタログ 2(GWTC2) として 2020 年 10 月に発表されたものが 2021 年 7 月時点で最新である.

<u>GW150914</u> 最初に報告された直接重力波観測イベント.BBHの存在を明らかにし,太陽 質量(M_{\odot})の 30 倍以上の BH の存在を初めて確認した.報告された BBH のイベントの中で も最もシグナル・ノイズ比 (SNR) が高い.<u>GW170817</u> 最初に報告された BNS イベント. 直後に多くの追観測がなされ、マルチ・メッセンジャー天文学の初めての成功例となった.重 力波波形から得られた中性子星の状態方程式に対する制限は核密度 $\rho_{\rm nuc} = 2.8 \times 10^{14} {\rm g/cm}^3$ の 2 倍の密度における圧力として ($2\rho_{\rm nuc}$) = $3.5^{+2.7}_{-1.7} \times 10^{34} {\rm dyn/cm}^2$ (90% 信頼区間)であ る.ガンマ線と重力波の到着時刻の差 1.7 秒から得られた重力は伝播速度の光速からのず れの割合に対する制限は 1×10^{-15} 以下である.また,可視・赤外における追観測から鉄 以上の重元素合成の形跡が見られ,r-過程元素合成の重要なチャンネルになっていることを 示唆している.<u>GW190412</u>明らかに質量比の異なる BBH からの重力波で,重力波の高 次モードの検出がなされた.<u>GW190425</u>2番目に発見された BNS.<u>GW190521</u>総質量 が最大の BBH で,合体後の質量が $150M_{\odot}$ を超えるものと考えられる.いわゆる中間質量 BH の領域の候補天体の初の発見となった.BBH の合体の第2世代の合体とも考えられて いる.<u>GW190814</u>星形成のシナリオでは不可能とされる $2-5M_{\odot}$ の質量領域のコンパクト 天体からの重力波と考えられる.<u>GW190924</u>:現在までで最小質量の BBH.<u>GW200105</u>, GW200115:はじめて確実なものと報告された NS-BH 連星系合体.

表 3:報告された主な重力波 (2021 年 7 月現在).連星の質量を M_1, M_2 としたときの, チャープ質量 $M_c = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$, 質量比 (中央値の比) M_2/M_1 , 有効スピ ン χ_{eff} ,最終的に形成された BH の質量 M_{final} (NS を含む場合は全質量 $M_{\underline{2}} = M_1 + M_2$), 距離, 波源特定精度 (平方度) ($\Delta \theta$)², シグナル・ノイズ比を示す. 幅のある量は 90% の

言頼区間. (種類ことに日付順. BBH については, SNR か 13.1 より大さいもののみ.)								
イベント (BBH)	$M_c(M_{\odot})$	質量比	$\chi_{ m eff}$	$M_{\rm final}(M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta \theta)^2$	SNR	
GW150914	$28.6^{+1.7}_{-1.5}$	0.86	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.4}_{-3.0}$	440^{+150}_{-170}	179	24.4	
GW170608	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	0.69	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$	$17.8^{+3.4}_{-0.7}$	320^{+120}_{-110}	392	14.9	
GW170814	$24.1^{+1.4}_{-1.1}$	0.82	$0.07^{+0.12}_{-0.12}$	$53.2^{+3.2}_{-2.4}$	600^{+150}_{-220}	87	15.9	
$GW190408_{-181802}$	$18.3^{+1.9}_{-1.2}$	0.75	$003^{+0.14}_{-0.19}$	$41.1^{+3.9}_{-2.8}$	1550^{+400}_{-600}	_	14.67	
GW190412	$13.3^{+0.4}_{-0.3}$	0.28	$0.25^{+0.08}_{-0.11}$	$37.3^{+3.9}_{-3.8}$	740^{+140}_{-170}	21	18.86	
GW190521	$69.2^{+17.0}_{-10.6}$	0.72	$0.03^{+0.32}_{-0.39}$	$156.3^{+36.8}_{-22.4}$	3920^{+2190}_{-1950}	940	14.38	
$GW190521_074359$	$32.1^{+3.2}_{-2.5}$	0.78	$0.09^{+0.1}_{-0.13}$	$71.0^{+6.5}_{-4.4}$	1240^{+400}_{-570}	500	24.38	
$GW190630_185205$	$24.9^{+2.1}_{-2.1}$	0.68	$0.1^{+0.12}_{-0.13}$	$56.4^{+4.4}_{-4.6}$	890^{+560}_{-370}	_	15.64	
$GW190728_064510$	$8.6^{+0.5}_{-0.3}$	0.66	$0.12_{-0.07}^{+0.2}$	$19.6^{+4.7}_{-1.3}$	870^{+260}_{-370}	_	13.64	
GW190814	$6.09^{+0.06}_{-0.06}$	0.11	$0^{+0.06}_{-0.06}$	$25.6^{+1.1}_{-0.9}$	240_{-50}^{+40}	19	22.18	
$GW190828_063405$	$25.0^{+3.4}_{-2.1}$	0.82	$0.19^{+0.15}_{-0.16}$	$54.9^{+7.2}_{-4.3}$	2130^{+660}_{-930}	520	16.04	
$GW190910_{-}112807$	$34.3^{+4.1}_{-4.1}$	0.81	$0.02^{+0.18}_{-0.18}$	$75.8^{+8.5}_{-8.6}$	1460^{+1030}_{-580}	_	13.42	
$GW190924_021846$	$5.8^{+0.2}_{-0.2}$	0.56	$0.03_{-0.09}^{+0.3}$	$13.3^{+5.2}_{-1.0}$	570^{+220}_{-220}	380	13.16	
イベント (BNS)	$M_c(M_{\odot})$	質量比	$\chi_{ m eff}$	$M_{\widehat{\pm}}(M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta \theta)^2$	SNR	
GW170817	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	0.87	$0^{+0.02}_{-0.01}$	-	$40^{+7.0}_{-15.0}$	39	33	
GW190425	$1.44^{+0.02}_{-0.02}$	0.70	$0.06^{+0.11}_{-0.05}$	$3.4^{+0.3}_{-0.1}$	160^{+70}_{-70}	9900	13.03	
イベント (NSBH)	$M_c(M_{\odot})$	質量比	$\chi_{ m eff}$	$M_{\pm}(M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta \theta)^2$	SNR	
GW200105_162426	$3.41^{+0.08}_{-0.07}$	0.21	$-0.01^{+0.11}_{-0.15}$	$10.9^{+1.1}_{-1.2}$	280^{+110}_{-110}	7700	13.9	
$GW200115_042309$	$2.42^{+0.05}_{-0.07}$	0.26	$-0.19^{+0.23}_{-0.35}$	$7.1^{+1.5}_{-1.4}$	300^{+150}_{-100}	900	11.6	

得られた科学的成果 連星系については、その合体頻度について、BBH は、23.8^{+14.0} /Gpc³/yr,BNS は、561⁺⁸³⁴/Gpc³/yr,NSBH は、45⁺⁷³/Gpc³/yr と見積もられている.このほか、背景重力波に対して、宇宙膨張率に対して重力波のエネルギーが寄与する割合として(平坦なエネルギースペクトルを仮定した上で) $\Omega_{\rm GW} < 6.0 \times 10^{-8}$ の上限が得られている.連続重力波の重力波振幅に対しては、おおよそ1×10⁻²⁵程度(200 Hz まわり)の上限が得られている。また、既知のパルサーからの連続重力波に対しても個々に上限が得られている.

ー般相対性理論の検証も行われ、数あるテストすべてで、一般相対性理論から得られる予 言と観測されている重力波信号との間に矛盾は生じていない、今後、発見数が増すにつれて 連星系の形成シナリオが明らかになることが期待される、将来的には、銀河系形成シナリオ や初期宇宙の情報などにも、重力波観測から多くの知見がもたらされるであろう.





2021/11/5



2021年11月 重力波カタログ3 発表

https://www.ligo.org/science/Publication-O3bCatalog/index.php





LIGO-Virgo-KAGRA Science Summary (2021 年 11 月 7 日) https://www.ligo.org/science/outreach.php

GWTC-3,重力波イベントのカタログ第3版

はじめに

GWTC-3 (突発的重力波カタログ, Gravitational-Wave Transient Catalog-3) は、ライゴ (LIGO), ヴィルゴ (Virgo), および KAGRA (かぐら) から提供される、3番目の突発的重力波カタログです。GWTC-3 は、2019 年 11 月から 2020 年 3 月まで続いた第 3 期観測期間の後半 (O3b) で検出された重力波イベントをこれまでのカタログに加えて更新し たものです。その結果として、GWTC-3 は、現在までに観測されたイベントをすべて集めた最大の重力波カタログ です

まずは、これまでの重力波カタログの復習からはじめましょう.

- GWTC-1 は、第1期と第2期の観測期間(01と02)で検出された11個のイベントを含んだカタログでした.
- GWTC-2 は、O1, O2, と第3期前半(O3a)で得られた全部で50個のイベントを含んだカタログでした.

・ GWTC-2.1 は、O3a 中に検出されたイベントの定義を見直した結果、新たに8個のイベントを加え、GWTC-2の3個のイベントを除いたカタログでした.ここでは、天体物理学的な信号である確率が50%より小さなイベント候補を除くことにしました(以下の「重力波の検出」の項を参照してください).結果として全部で55個のイベントを含んだカタログになりました.

• GWTC-3 (今回のカタログ)では、O3b 中に検出された 35 個のイベントを追加し、現在までに観測されてい る合計 90 個ものイベントを含むカタログになりました.(以下の図 3 は、膨大に増えてきた検出イベントの質 量分布を示しています.)

O3b の最後 (2020 年 4 月) には, KAGRA が LIGO と Virgo に加わりました. KAGRA は, ドイツにある GEO 600 との共同観測を 2 週間実施しました. この観測の結果については, 別に報告します.

これまでの私たちの重力波観測はすべて,ブラックホールや中性子星からなる連星の合体を波源とするものです. これらをコンパクト天体と呼び,私たちは,これらが巨大な星の残骸であると想定しています.重力波のイベント には,連星ブラックホールの合体,連星中性子星の合体,中性子星-ブラックホールの合体の組み合わせがあります. 私たちの検出器の感度がより上昇するにつれて,重力波イベントの発見効率は劇的に改善されてきました.2015年 に最初の検出を行ってからの,長い道のりの成果です.

この要約には,データの収集方法,検出方法,連星合体イベントの特徴の推定方法,GWTC-3のハイライト,および将来計画されている観測について書かれています.

1

重力波検出器

長年にわたる検出器の改良とデータの質の向上,そし て解析手法の改善の組み合わせにより,LIGOと Virgo の感度は向上してきました.重力波検出器の感度を測 定する方法はいくつかあります.1つは,検出器が典 型的な連星中性子星の合体を検出できるおおよその距 離を推定することです.検出可能な距離が大きいほど, より遠くの信号を検出できるため、より多くの検出が 期待できます. 03 は O3a と O3b の 2 つの観測期間に 分かれており、その間の 2019 年 10 月に 1 か月の休止 期間がありました. この 1 ヶ月の休止期間中に、多く のアップグレードと修理が行われました. その中には、 LIGO のリヴィングストン (Livingston) 検出器での鏡の クリーニング、LIGO のハンフォード (Hanford) 検出器 での真空装置の交換、Virgo でのレーザー強度の増大な



LIGO-Virgo-KAGRA Science Summary (2021年11月7日) https://www.ligo.org/science/outreach.php

LIGOと Virgoの第3観測期間のブラックホールと中性子星の母集団の統計

Introduction

ブラックホールや中性子星のような、コンパクト天 体で構成される連星の合体による個々の重力波イベン トからは、固有の重力波源の特性を明らかにすること ができます.しかし、これらの連星系が宇宙全体でど のように形成され進化してきたかを明らかにするため には、多くの重力波イベントを観測して母集団の統計 を明らかにすることが必要です.コンパクト天体の質 量とスピンの分布を測定することは、連星系の形成過 程を明らかにすることにつながるため、私たちは、特 に注目しています.

科学者たちは、コンパクト天体の連星系が宇宙で形 成される可能性として2つの方法に焦点を当ててきま した. 以下では2つの「チャンネル」と呼ぶことにし ます. 孤立した連星進化チャンネルでは、巨大な恒星 がつくる連星が共に進化し、それぞれが最終的に爆発 して、中性子星またはブラックホールになったコンパ クトな連星が形成された、と考えます.動的形成チャ ンネルでは、球状星団や中心核星団のような密集した 環境で、中性子星やブラックホールが結合して連星系 を形成する、と考えます. これらの形成チャンネルは どちらも,重力波で検出されるコンパクト天体の観測 可能な量に独自の特徴を残します. LIGO によって検 出可能な重力波源は、太陽質量(記号 M_☉ で表します) の1倍から100倍の範囲を広くカバーすると予想され ます.しかし、天体物理学的プロセスが異なると、こ の質量の範囲全体で、ブラックホールや中性子星が検 出されない領域が生じる可能性があります. たとえば, X線と重力波による最近のコンパクト天体の観測では、 3~5 M_☉ の範囲に低い質量ギャップが存在し,最も質 量の大きい中性子星と最も質量の小さいブラックホー ルの間に空白があることが示唆されています. この空 自は, 巨大星がどのように死ぬかを支配する物理的メ カニズムによって説明される可能性があります.また, 脈動対不安定型超新星の理論によって、ブラックホー ルには、約50から120 M_☉の範囲で、高い質量ギャッ 星の外層が放出され、質量の小さいブラックホールが残 るか、残骸がまったく残りません. したがって、これ らのギャップのどちらかまたは両方が存在すれば、私 たちは、巨大な星がどのように一生を終わらせるかに ついて学ぶことができます.

プがあることが予測されています。この場合、瀕死の



図1:私たちの論文で統計解析された連星系の母集団. 横軸 に大きい方の天体の質量,縦軸に小さい方の天体の質量を表 す.関心を引く個々のイベントをマークしている.また,連星 の質量比と総質量の線も示す.(Credit:LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration / IGFAE / Thomas Dent.)

コンパクト連星系の形成史を解くもう1つの重要な 特徴は、構成天体の自転(スピン)軸の公転軌道軸に対 する方向です.たとえば、地球が、太陽の周りの公転 軸に対して、自転軸をわずかに傾けていることが、季節 の原因になっています.孤立して形成されたコンパク ト連星では、通常自転軸が軌道の公転軸と同じ向きを 向いているのに対し、動的に形成された連星は自転軸 がランダムな方向を向いている可能性があります.重 力波で調べることができる3番目の重要な観測可能な

O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

After O3b : GWTC3 (2021/11/7 released)



真貝寿明「重力波観測 わかったこと わからないこと」 2022/6/5 花山星空ネットワーク第28回講演会 **88**

O3b (2019/11/1 - 2020/3/27) After O3b : GWTC3 (2021/11/7 released)



真貝寿明「重力波観測 わかったこと わからないこと」 2022/6/5 花山星空ネットワーク第28回講演会

O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

After O3b : GWTC3 (2021/11/7 released)



O3b (2019/11/1 - 2020/3/27)

After O3b : GWTC3 (2021/11/7 released)

Masses in the Stellar Graveyard



ブラックホールの未解決問題:ブラックホールの質量分布

この現状をどう説明する?



NPO法人 花山星空ネットワーク 第28回 講演会

重力波観測から わかったこと わからないこと

- 1.アインシュタインの相対性理論
- 2. 重力波が観測されるまで
- 3. 重力波が観測されてから
- 4. 日本のKAGRA
- 5.わからないこと
- 6. 将来計画

2022/6/5

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/

観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b)



観測スケジュール (04/05)



R Magee et al 2021 ApJL 910 L21 [arXiv:2102.04555]

これからの重力波観測

重力波観測装置(地上)の将来計画



アメリカの計画 🕨

予算申請準備

ヨーロッパの計画
 予算承認
 建設地未定(候補地2つ)

Cosmic Explorer 40km L-shape



これからの重力波観測

重力波観測装置(地上)の将来計画







これからの宇宙研究

重力波観測装置(宇宙空間)の将来計画



日本の計画 ▶
予算申請準備
1000kmの腕の長さ
低周波数帯(deciHzからHz帯)

宇宙全体スケールで 巨大ブラックホール連星合体の 重力波が検出できる ヨーロッパの計画
 予算承認
 2034年頃打ち上げ、3年間稼働
 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)



銀河中心の超巨大BH 形成過程がわかる



これからの宇宙研究

重力波観測装置(宇宙空間)の将来計画



NPO法人 花山星空ネットワーク 第28回 講演会

重力波観測から わかったこと わからないこと

重力波は存在する 重力波は観測できる 相対性理論は正しいようだ 連星ブラックホール結構ある 連星中性子星あまりない 連星中性子星合体で元素合成 連星中性子星合体でγ線バースト

超新星爆発からの重力波? パルサーからの重力波? 相対性理論はどこまで正しいのか 今後どれだけ発見されるか 今後どれだけ発見されるか 元素合成のメカニズム γ線バーストのメカニズム ブラックホールはどう形成されたか 連星合体によるブラックホール成長? 原始ブラックホール? 銀河中心の巨大ブラックホール? 未知の重力波源?



2018/10 Fermi衛星チーム, ガンマ線バースト天体 カタログで21星座を命名

https://fermi.gsfc.nasa.gov/science/constellations/

000000

0

0

Fermi Bubbles Colosseum Eiffel Tower Einstein Fermi Satellite **Golden Gate** The Little Prince Mjolnir Mount Fuji Castle Obelisk **Pharos Radio Telescope** Saturn V Rocket Schrödinger's Cat Starship Enterprise TARDIS

Black Widow Spider



http://www.virgo-gw.eu/skymap.html

重力波源が特定されたのは、まだ1つ.



20<mark>2x/xx</mark> LIGO/Virgo/KAGRAチーム, 重力波天体カタログで108星座を命名 しかし 2022年12月から観測がはじまれば, 週に数回, BH-BH 月に1回, NS-NS

> 宇宙空間での観測がはじまれば, 1日に10回, BH-BH ??