

理論物理学を仕事にする

一般相対性理論(ブラックホール・重力波)研究の現場から

1. 私の高校時代
2. 現在の私の研究
3. 理系の研究者になるには
4. 職業選びについて

栄光33期 真貝寿明

(大阪工業大学情報科学部教授)

<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>



2023/10/4 @ 栄光学園



朝までラーニング!

#相対性理論 ~100分後にE=mc²を説明するサンシャイン池崎~

共有

概要 放送予定 過去のエピソード

この番組について

サンシャイン池崎と一緒に教養ある大人になろう!テーマは、聞いたことあるけどよく知らない「相対性理論」。数式が飛び交う2時間30分。NHKラーニングのショート動画も。



出演
サンシャイン池崎
(お笑い芸人)



出演
真貝寿明
(大阪工業大学 教授)



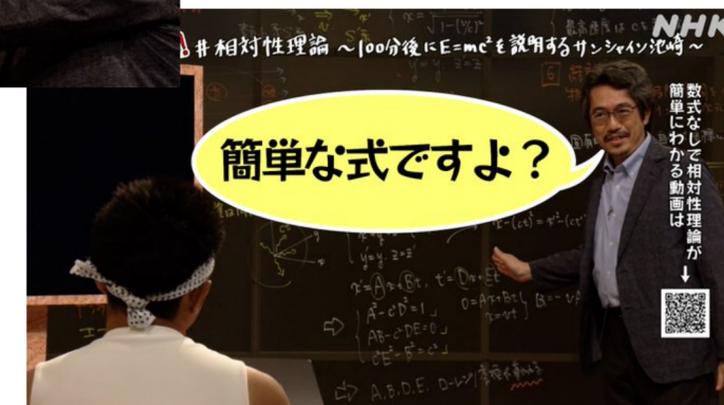
出演
小池美波(櫻坂46)

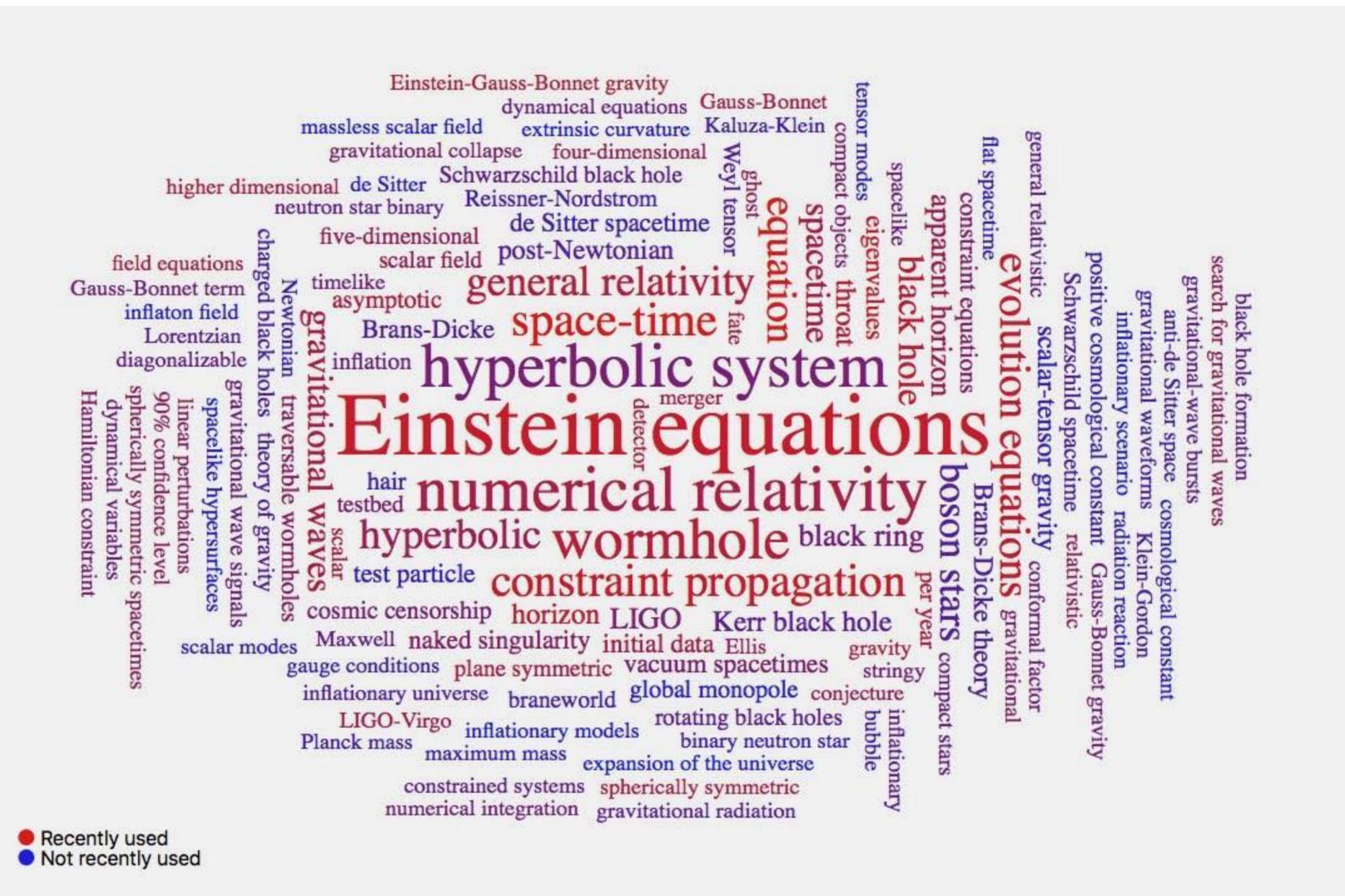


#相対性理論 サンシャイン池崎がひたすら学ぶ 謎の深夜番組

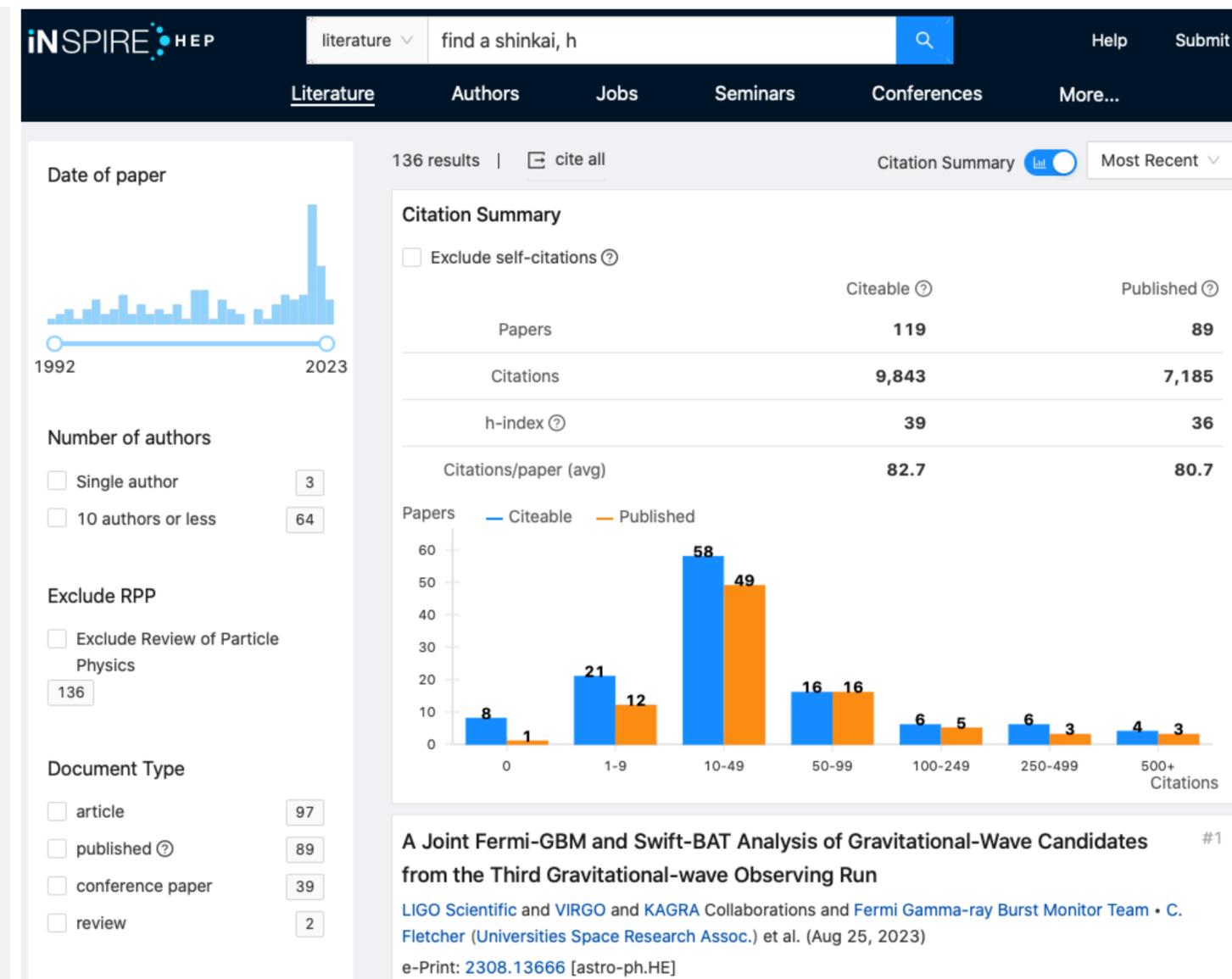
初回放送日: 2023年8月27日

「相対性理論をサラッと説明できたらカッコいい!」芸人・サンシャイン池崎さんが100分の大学教授の講義に本気で挑む!難解な数式も登場!「一からちゃんと理解したい」そんな大人の知的欲求に応えます。「数式はムリ」という方にはウェブサイト・NHKラーニングのショート動画でわかりやすく解説!池崎さんの本気の推し、櫻坂46・小池美波さんが内緒で登場!なななな~なななな~ナレーションはジョイマン高木さん。





Word Cloudで、論文の概要のワードを抽出したもの



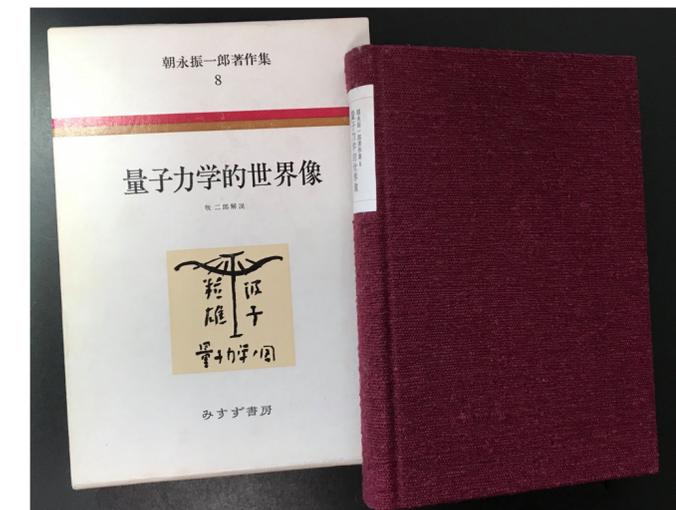
<https://inspirehep.net/>

将来について真剣に悩んでいた

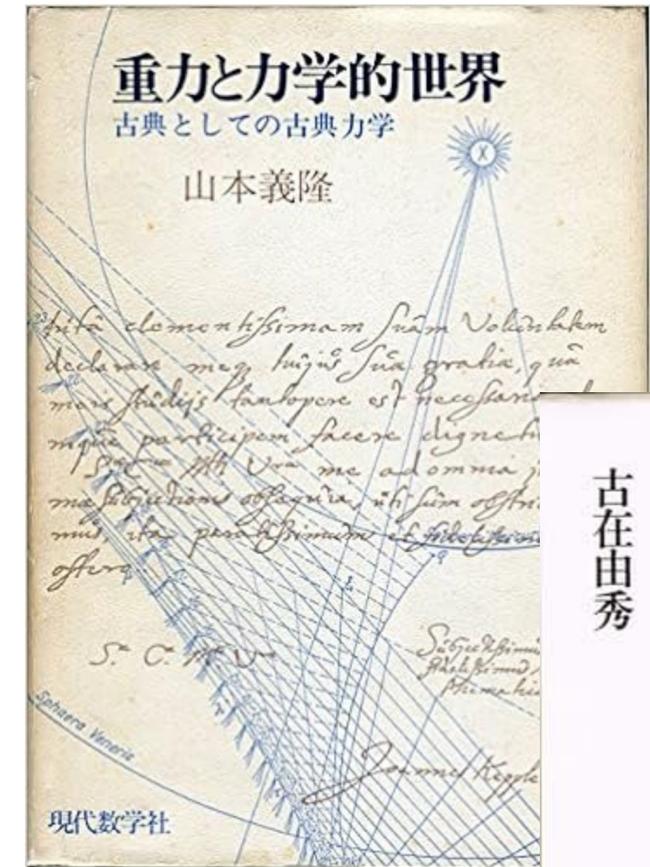
- ブラスバンド部でクラリネットを吹いていた。夏には4人で白樺湖・美ヶ原にハイキング旅行。
- ことあるごとに丹沢ヒュッテに通っていた
- 成績は中の上。
- 中学3年間、ウルフ先生に理科1を教えてもらい、物理・地学は大好きだった。ただし成績は良くない。数学は苦手。行列が理解できず、成績赤点。
- 文章を書くのが好きだった。英語も努力していた。だが、いろいろ努力してもなかなか実を結ばない時期。
- **自分が文系なのか理系なのか分からなかった。**

読んだ本すべてに単純に影響されてしまう時期

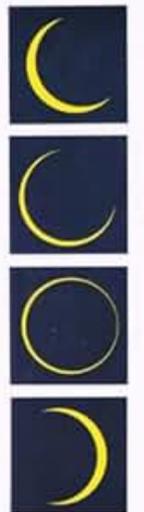
- 「曠野から」(川田順造) 文化人類学？
- 「天文学者のノート」(古在由秀) 天文学？
- 新田次郎 登山小説家？
- 「暮らしの気象学」(倉嶋厚) 天気予報士？
- NHK教育テレビ製作？
- 「社会あぐるよりどりみどり」(宮崎緑)
- 「量子力学的世界像」(朝永振一郎) 物理学者？
- 物理 One Point シリーズ 乱読はじまる



- **物理か天文学をやってみよう**, と決める。
(数学も苦手だし, 物理も得点源ではないが, 物理の背後にある すっきりした論理が好きだ. 物理を考えているのが好きだ.)
- **自分は理系なのかな**, と一度決めてみたら, 暗雲が消え去った気分になった.
- 真貝 「天文学者目指して頑張ります」
谷口先生「足元にも気をつけてください」

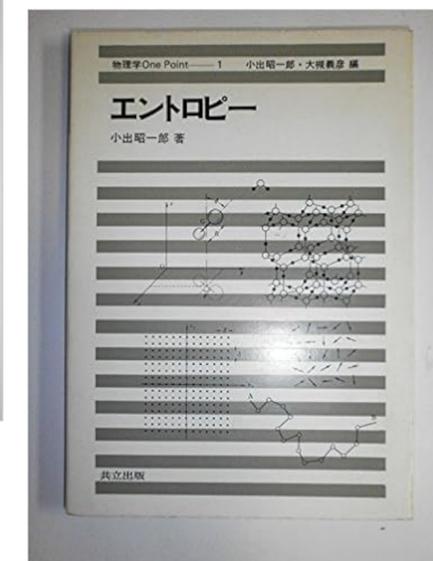
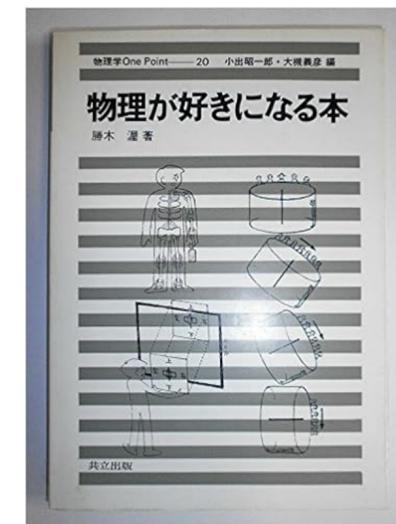


古在由秀

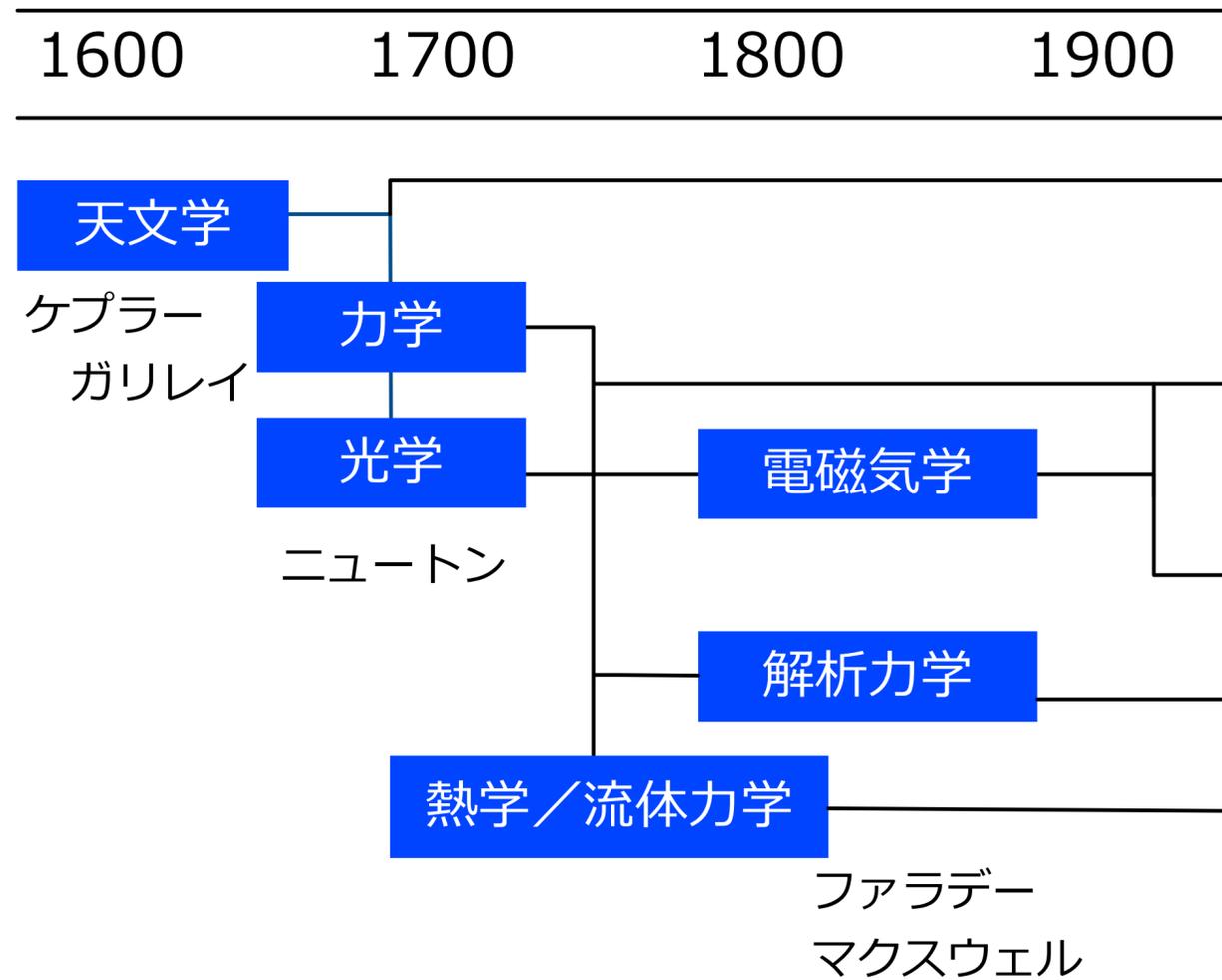


天文学者のノート

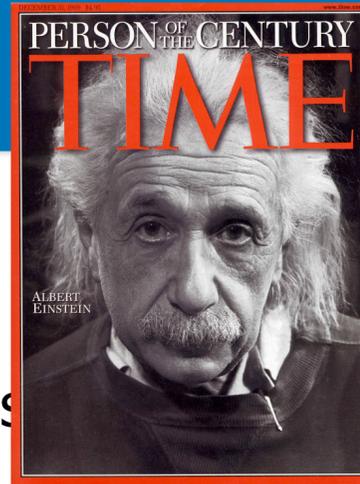
文藝春秋



近代物理学の進展

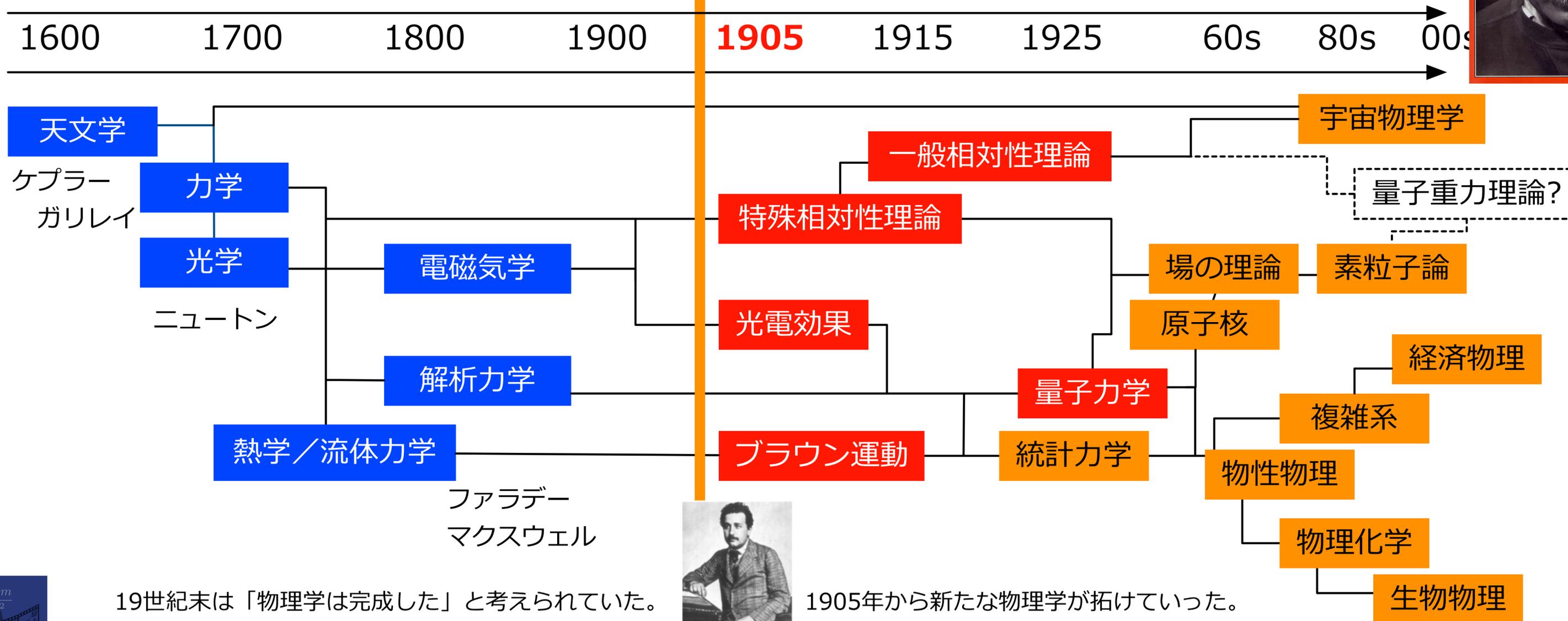


19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。



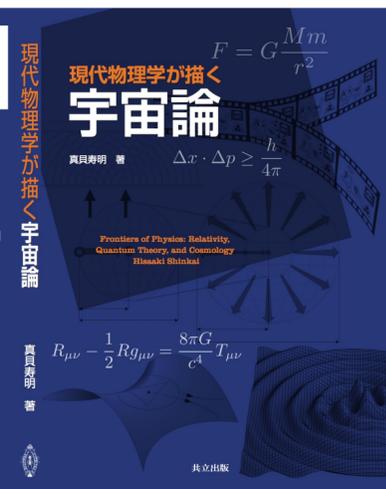
近代物理学の進展

現代物理学の進展



19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。

1905年から新たな物理学が拓けていった。



一般相対性理論

強い重力場での時空の力学
「重力の正体は空間の歪みである」

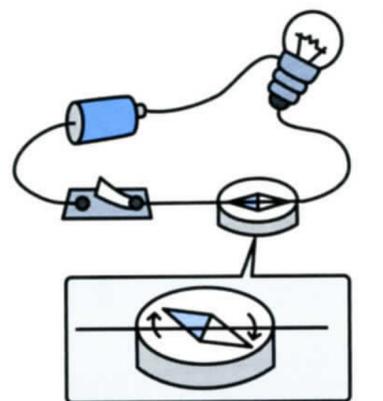
特殊相対性理論

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」

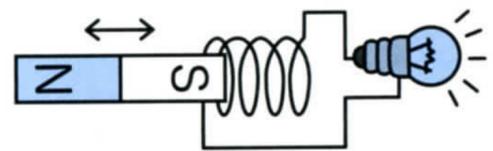
ニュートン力学

$$F = ma$$

電磁気学の完成から生じた疑問



電流が流れると方位磁針の針が振れる。



ファラデー

コイルに磁石を出し入れすると電流が流れるぞ。

電磁誘導現象の発見(1831年)

電気力と磁石の力は関係しあうから「電磁気学」としてまとめよう。

電磁気現象を説明する「マクスウェルの方程式」を完成させ(1864年)、電場と磁場が互いに作用して電磁波として伝わることを示す。



マクスウェル

Eは電場, Bは磁場
cは光速

誰が測った光速???

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= 4\pi\rho, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \\ \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0. \end{aligned}$$

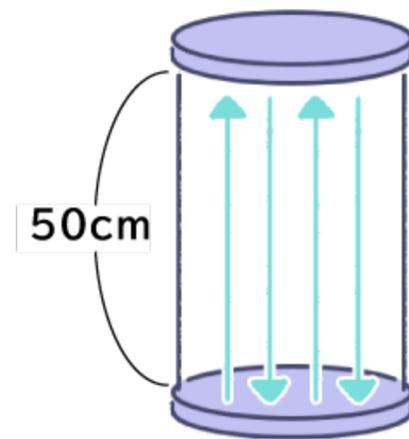


アインシュタイン

光の速さは誰が測っても同じ, と考えてみよう

時間の進み方は, 相対的だ. 測定する人の運動状態によって異なる.

光時計の思考実験



光時計

光が 2億9979万2458回往復すると「1秒」を刻む時計

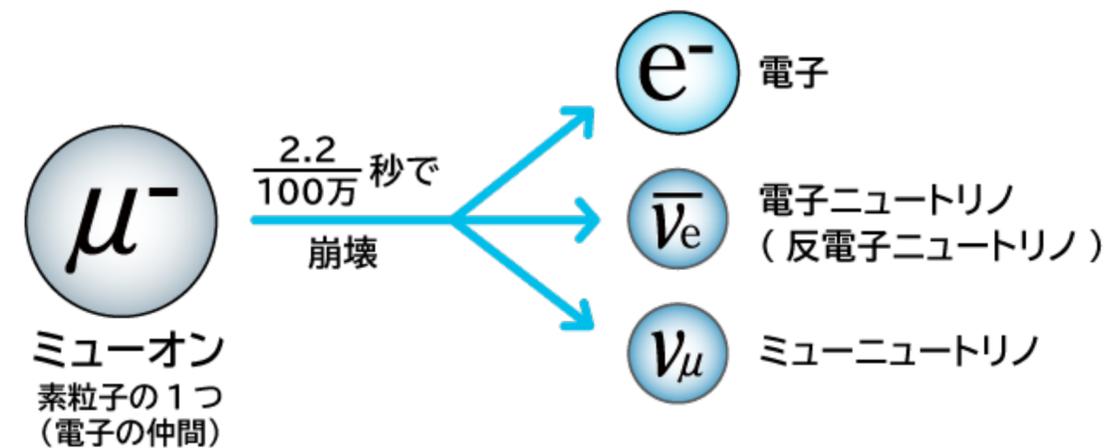
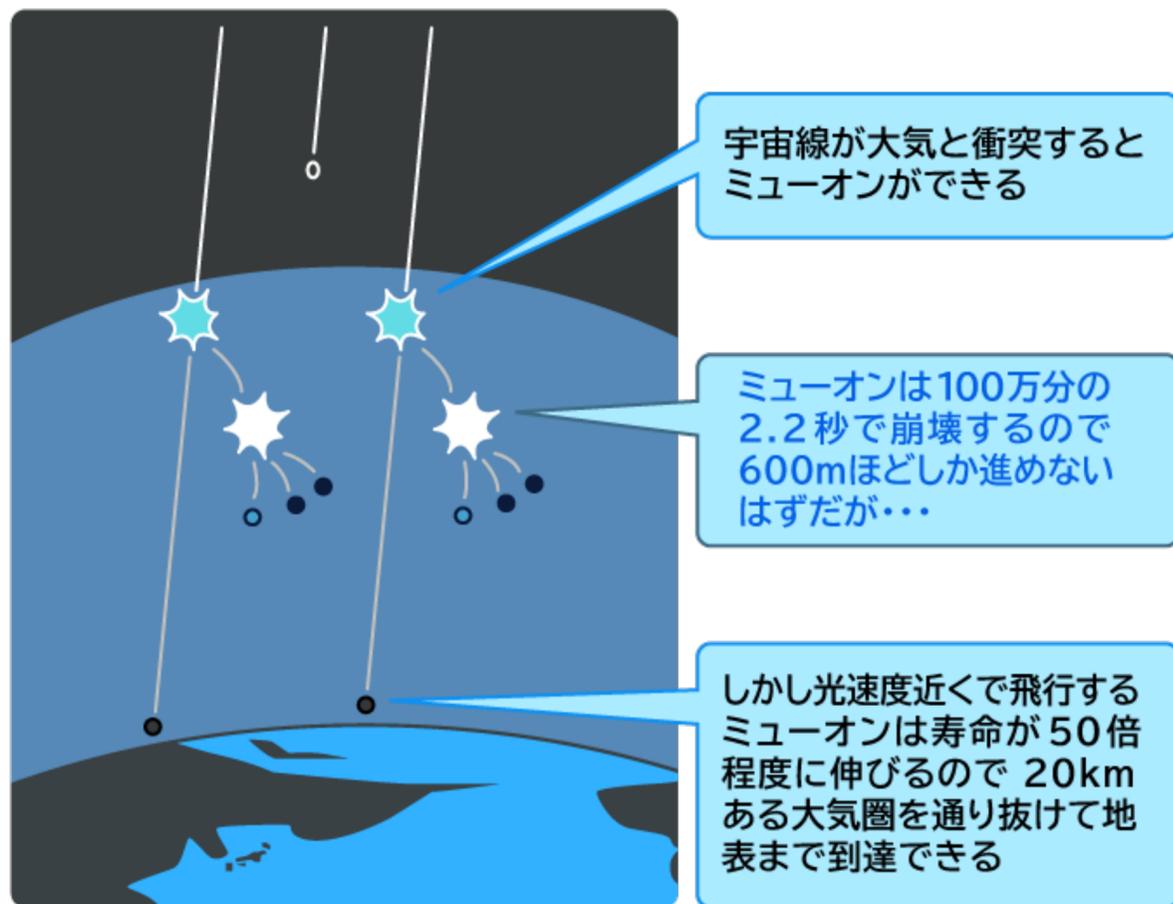


地球の人がロケット内の光時計を見ると ロケットが移動するので光は斜めの経路を進み その分長い距離を進まなければならない 光の速度は誰から見ても一定なので ロケット内の光時計は 2億9979万2458回往復するのに地球の1秒より長い時間がかかる つまりロケット内の光時計はゆっくりと時を刻んでいる

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

時間の進み方は**相対的**になる

素粒子の寿命は確かに延びている！

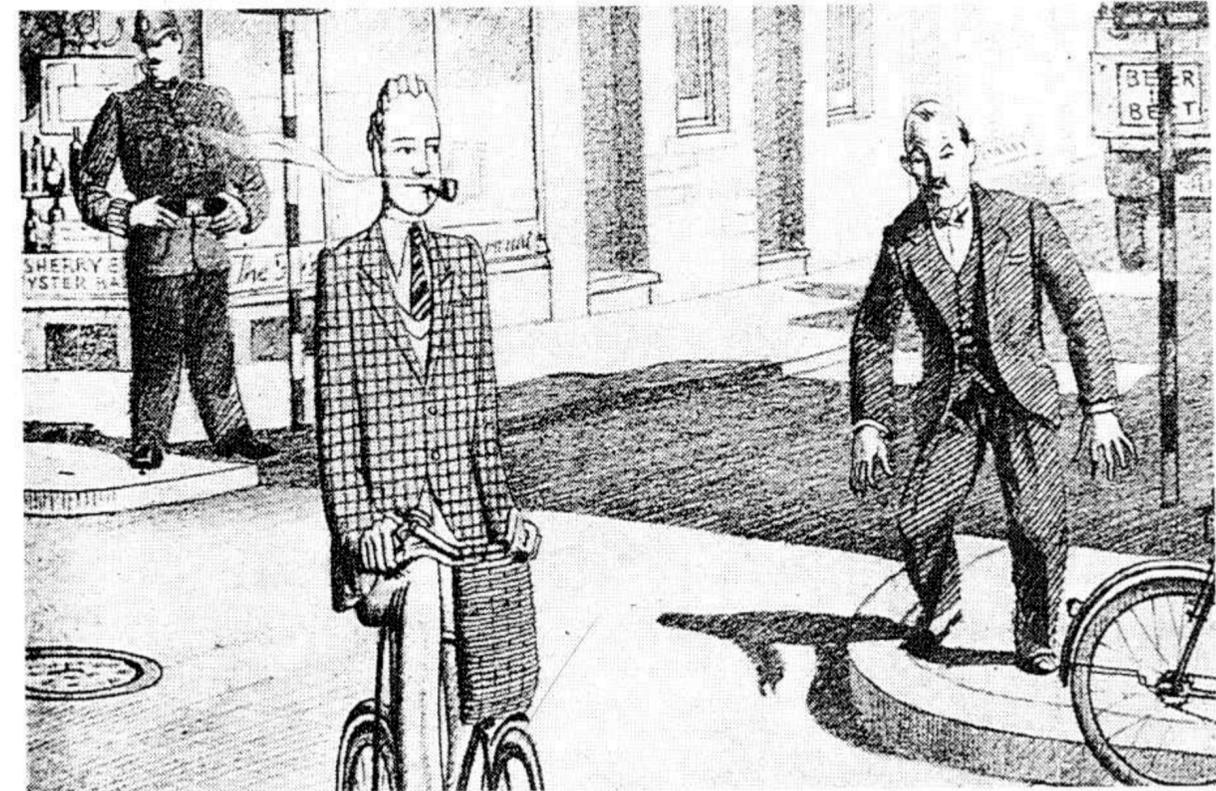
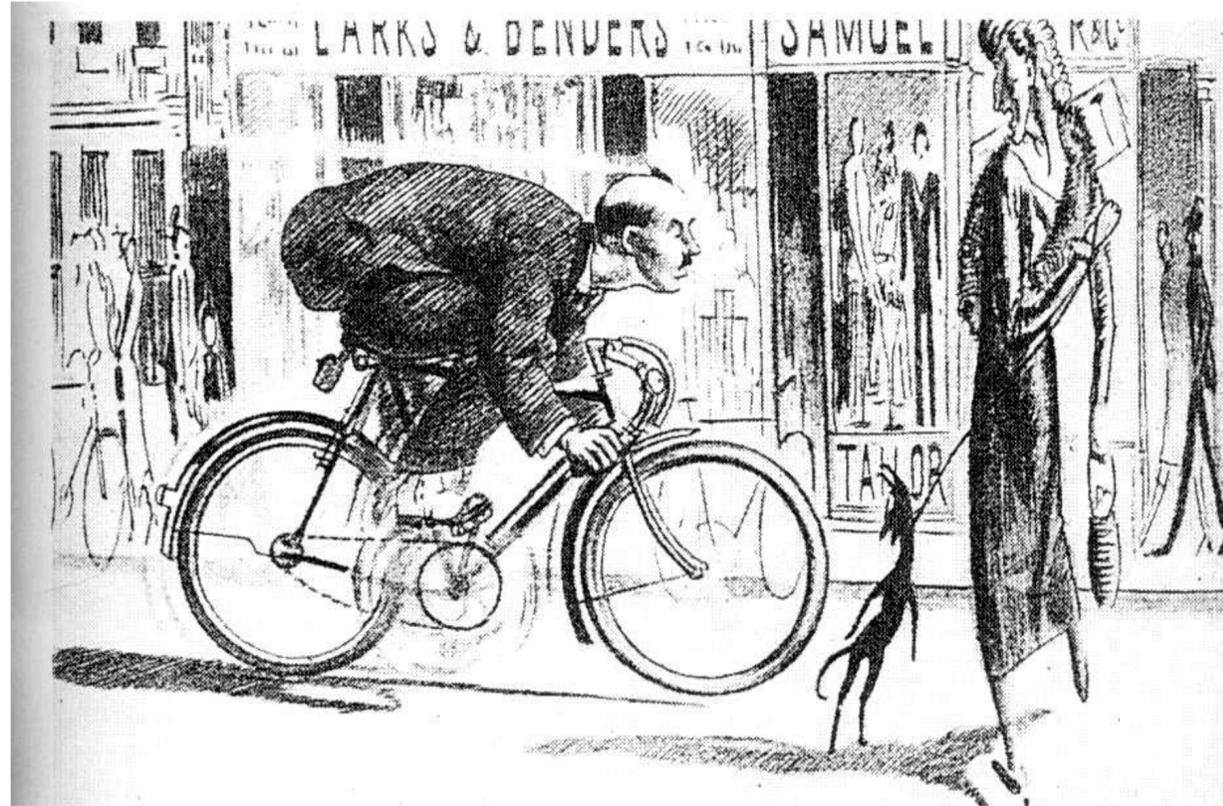


ISSは秒速 7.8km
1年間乗務すると...

0.01067秒 地表より時間が短くなる

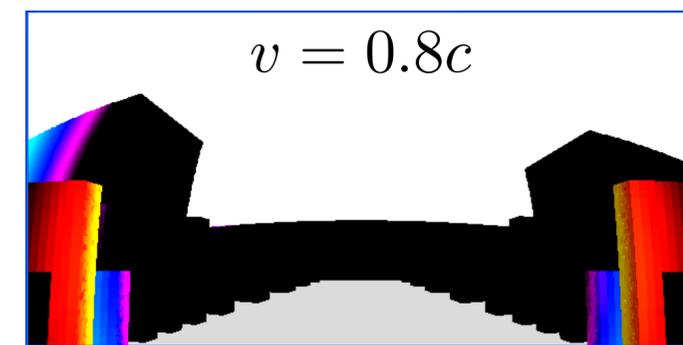
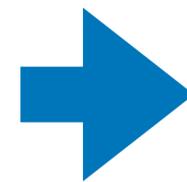
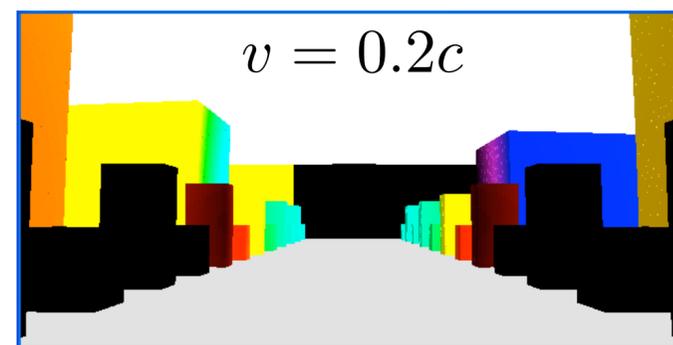
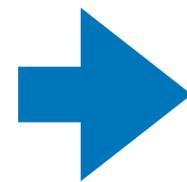
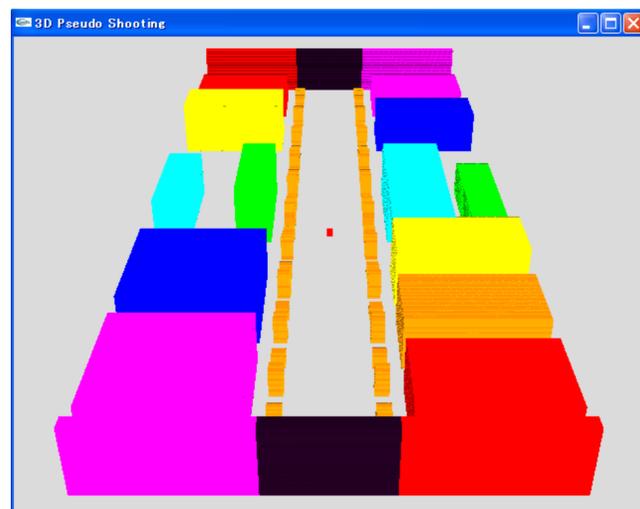
ガモフ 『不思議の国のトムキンス』(1943)

光の速度が時速30km だったとしたら, 日常生活でも相対性理論の効果がいろいろみえる.



自転車に乗っている人から見ると, ゆがんだ風景に

静止している人から自転車の人を見ると, 薄っぺらく見える



葭矢景淑君の卒業論文(大阪工業大学情報科学部)から

万有引力の法則



ニュートン (1642-1727)

万有引力の法則

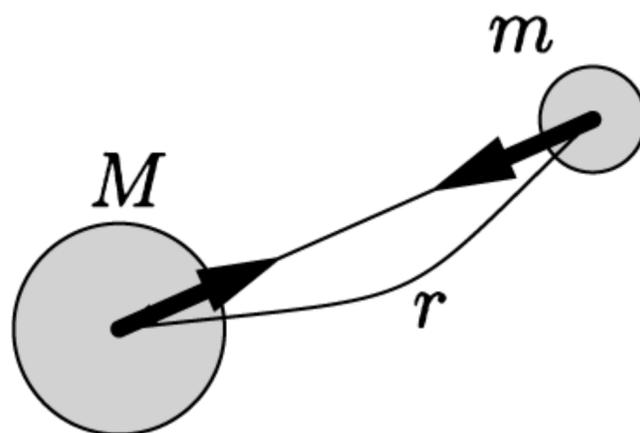
すべてのものは 引力で引き合う

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

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

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

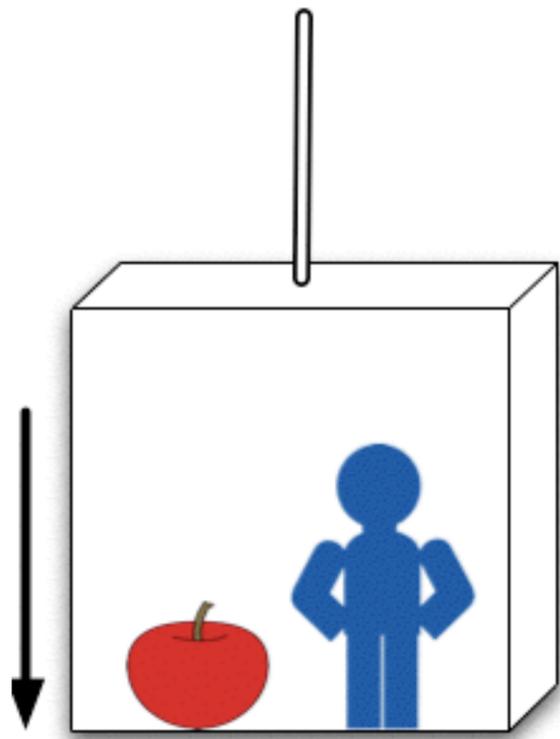




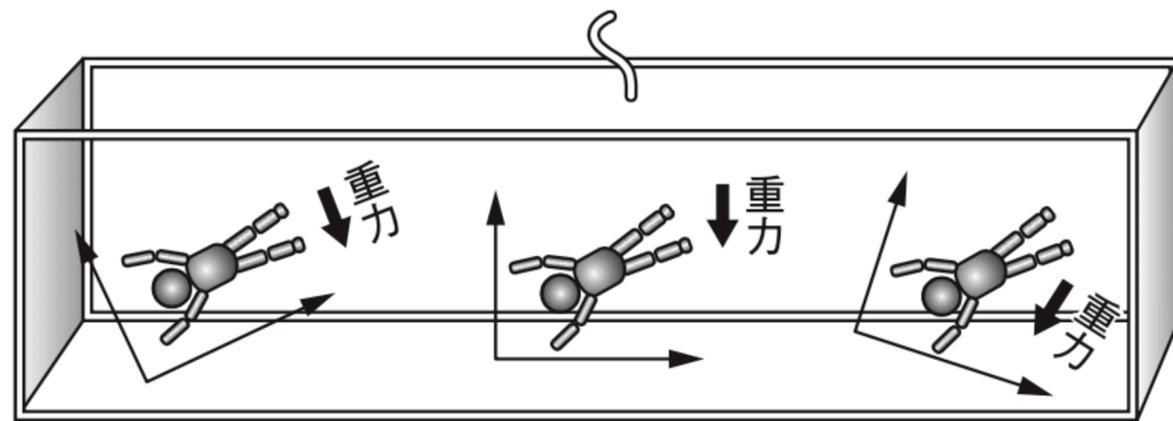
1905年の相対性原理では、等速運動しか扱っていない。
加速度運動する場合の相対性理論はなるだろうか。

加速度運動する代表が重力のはたらきだ。
重力の正体はなんだろうか。

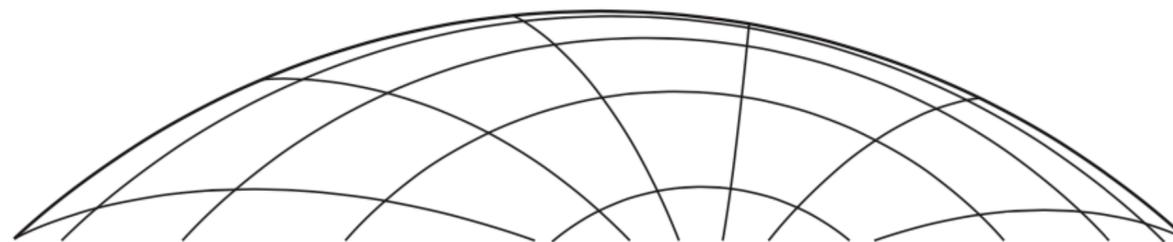
自由落下するエレベータ内では、重力がはたらいっていることを感じない。
重力は局所的には消すことができるが、大域的には消せない。



エレベーターの思考実験



地球の半径ていどの大きさのエレベータだと重力の向きがちがうので、全体で重力を打ち消すことができない。



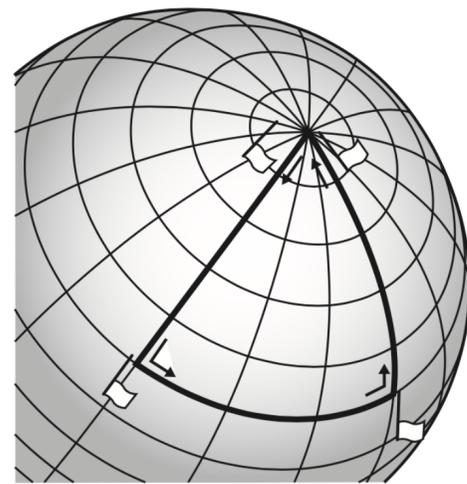
重力の正体は 空間の性質だ

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

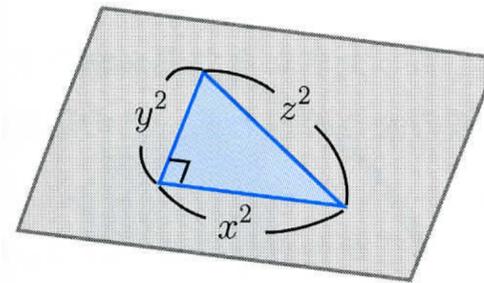
空間のゆがみが
重力の正体だ



正の曲率 (地球表面)

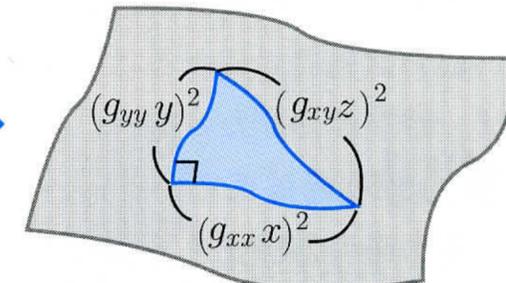
時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

平らな面ではピタゴラスの定理が成り立つ。



$$x^2 + y^2 - z^2 = 0$$

曲がった空間でも成立するために計量関数で調整する。



$$(g_{xx}x)^2 + (g_{yy}y)^2 - (g_{xy}z)^2 = 0$$

このように、曲がり具合は関数 $g_{\mu\nu}$ に押し付けて表すことができる。
アインシュタイン方程式は、3次元空間+時間の4次元の曲がり $g_{\mu\nu}$ を解く方程式である。

BLUE BACKS

宇宙検閲官仮説

「裸の特異点」は隠されるか

真貝寿明



重力場の方程式 (アインシュタイン方程式, 1915年)

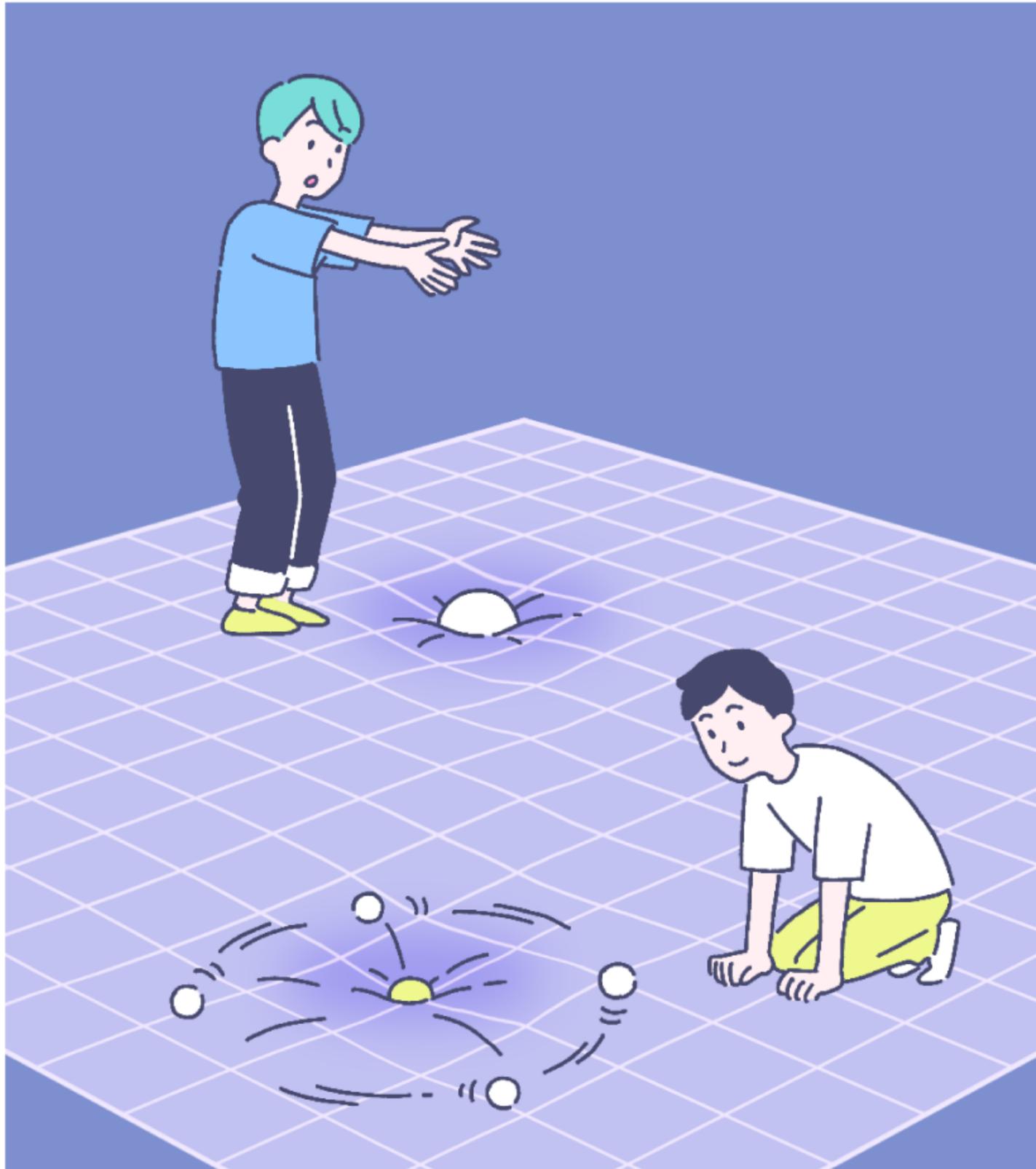
重力の正体は、時空の歪みである。その関係は、次の式で表される。

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

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

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

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



◆ 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

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2.2)$$

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。



空間のゆがみが重力の原因だ

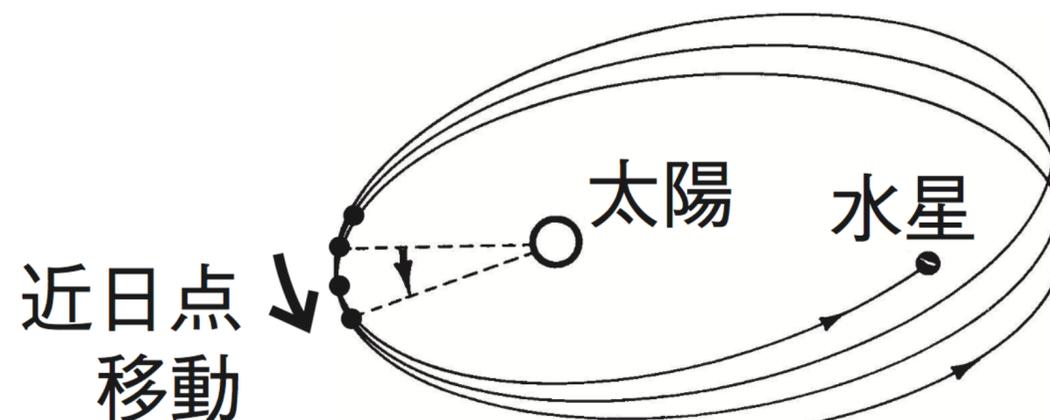
光や物体は まっすぐ進んでいるつもりでも 曲がって進む

水星の近日点移動

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???



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.

心臓の鼓動を感じた

最終的に一般相対性理論は, 一つの論理的構造物としてここに完成した. (1915年11月25日)



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(重力レンズ)
- 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(重力赤方偏移)
- 強い重力のもとでは星はつぶれ続ける(ブラックホール)
- 宇宙全体は動的でなければならない(膨張宇宙)
- 重力波が宇宙空間を伝わる(重力波)

ブラックホール特異点は簡単すぎる仮定をしたからだ

X 宇宙は膨張するはずない

X 重力波は座標系の変換で消せる

X 一般相対性理論は日常生活に影響することはない

Sの科学 Yの科学

Sの科学

physics **s** 物理
mathematics **s** 数学
statistics **s** 統計学
genetics **s** 遺伝学

Yの科学

astronomy **y** 天文学
economy **y** 経済学
biology **y** 生物学
archaeology **y** 考古学
anthropology **y** 人類学
sociology **y** 社会学

体系化の学問
対象物の性質を理論で説明



発見の学問
対象物を分類し記載

相対性理論

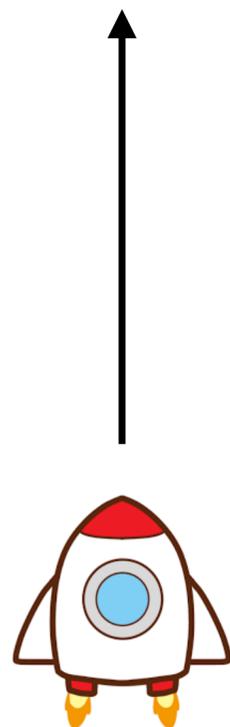
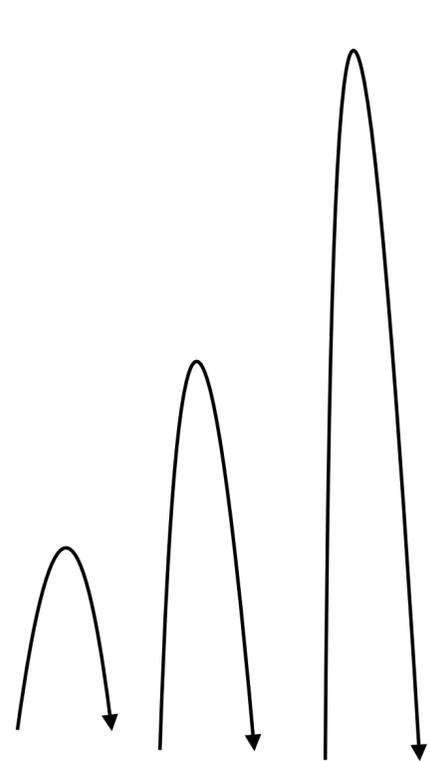


ブラックホール
膨張宇宙
重力波

光も脱出できない天体とは...

とてつもなく 重くて小さな天体では

ボールを速く投げ上げると、
高くまで飛ぶ



地球からの脱出速度
秒速 12 km

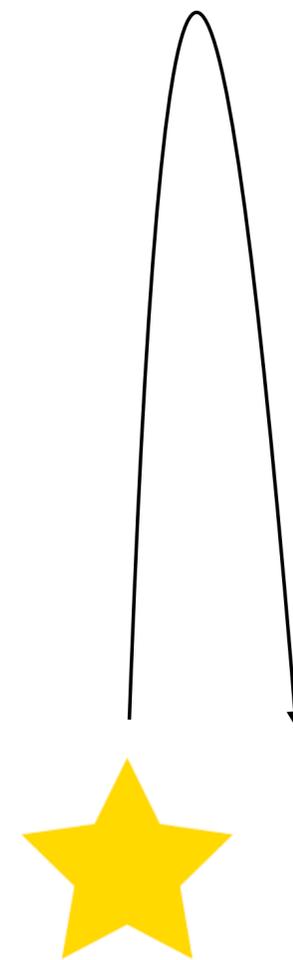


秒速
30万 km



光は当然
脱出できる

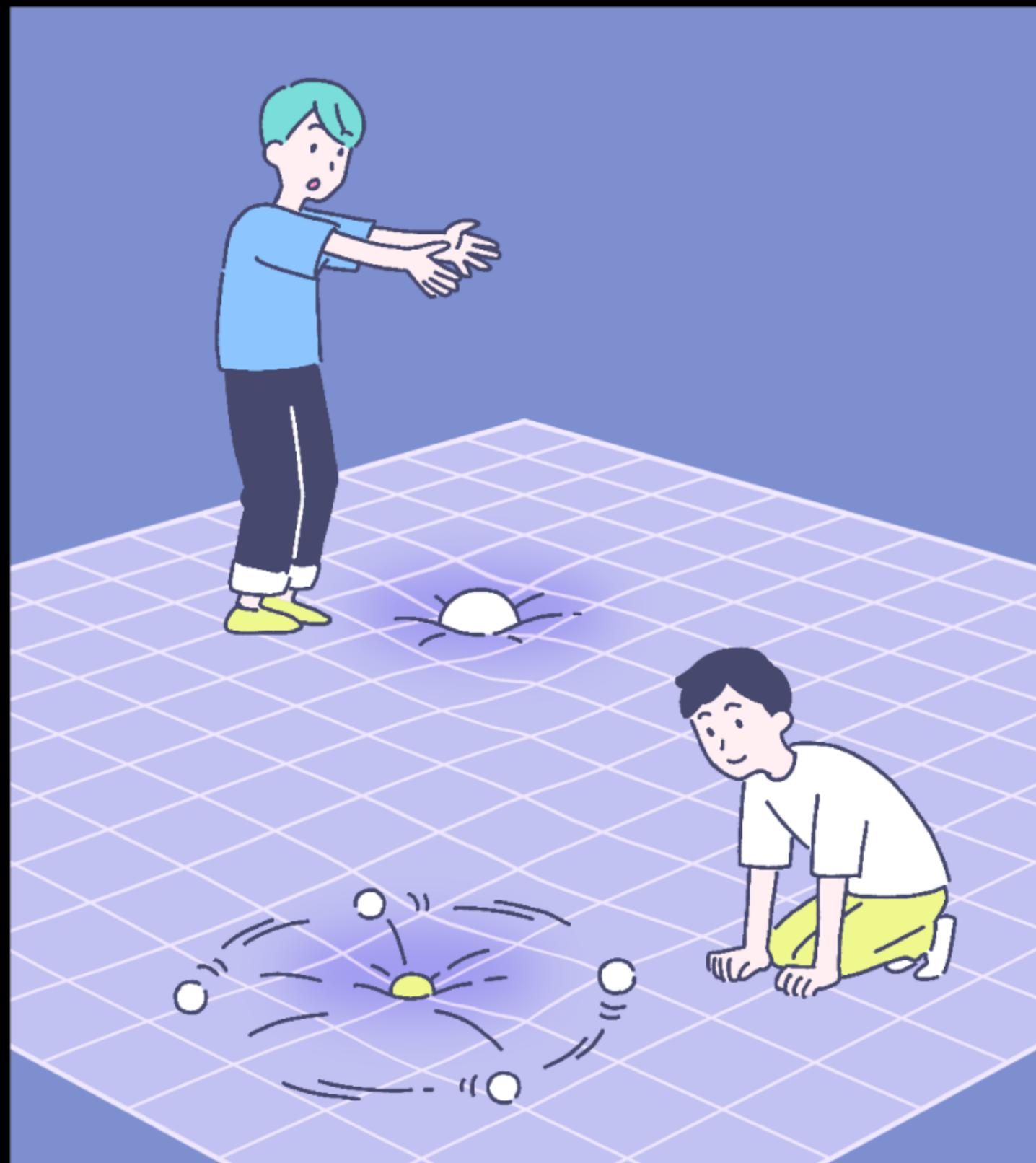
光も
脱出できない



地球質量が半径9mmに
なったら、

ブラックホール

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
= 事象の地平面 (event horizon)

大きさはシュワルツシルト半径 r

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

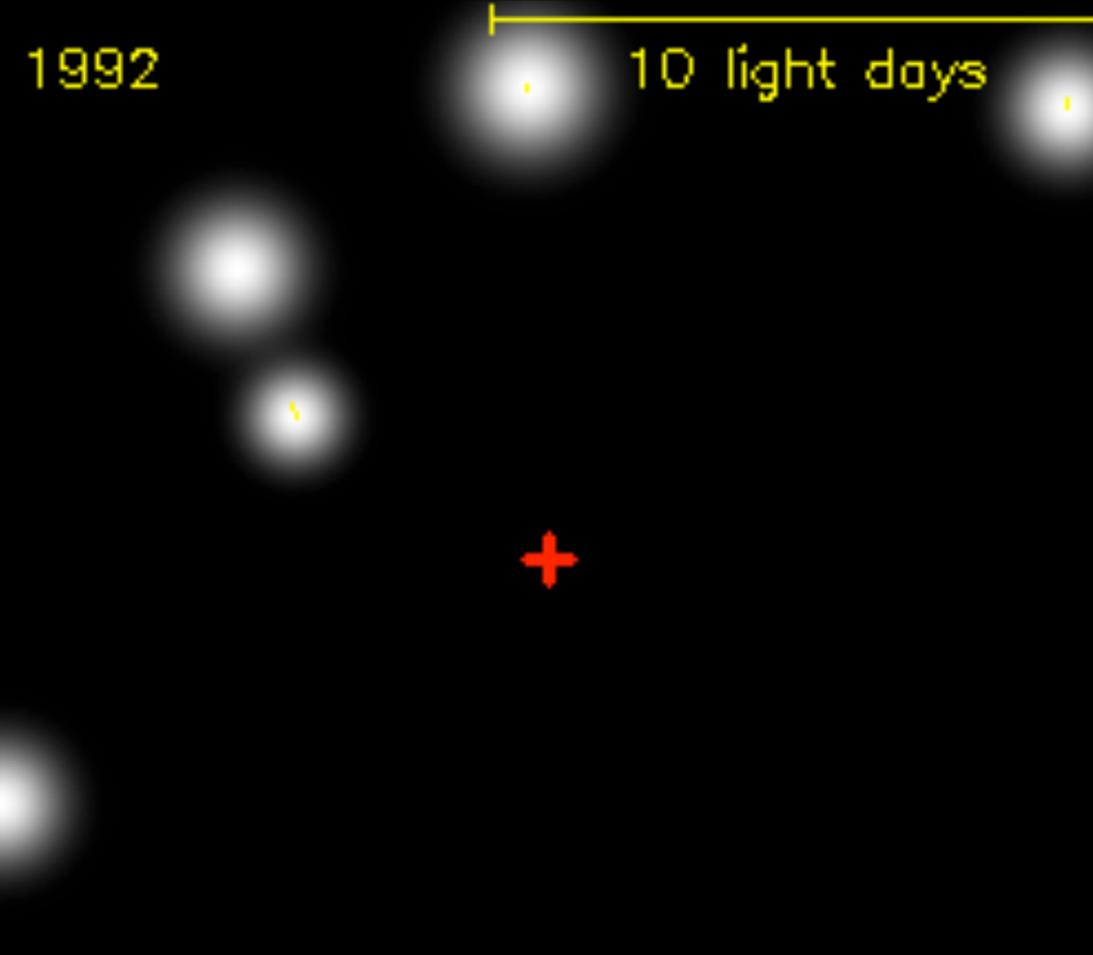
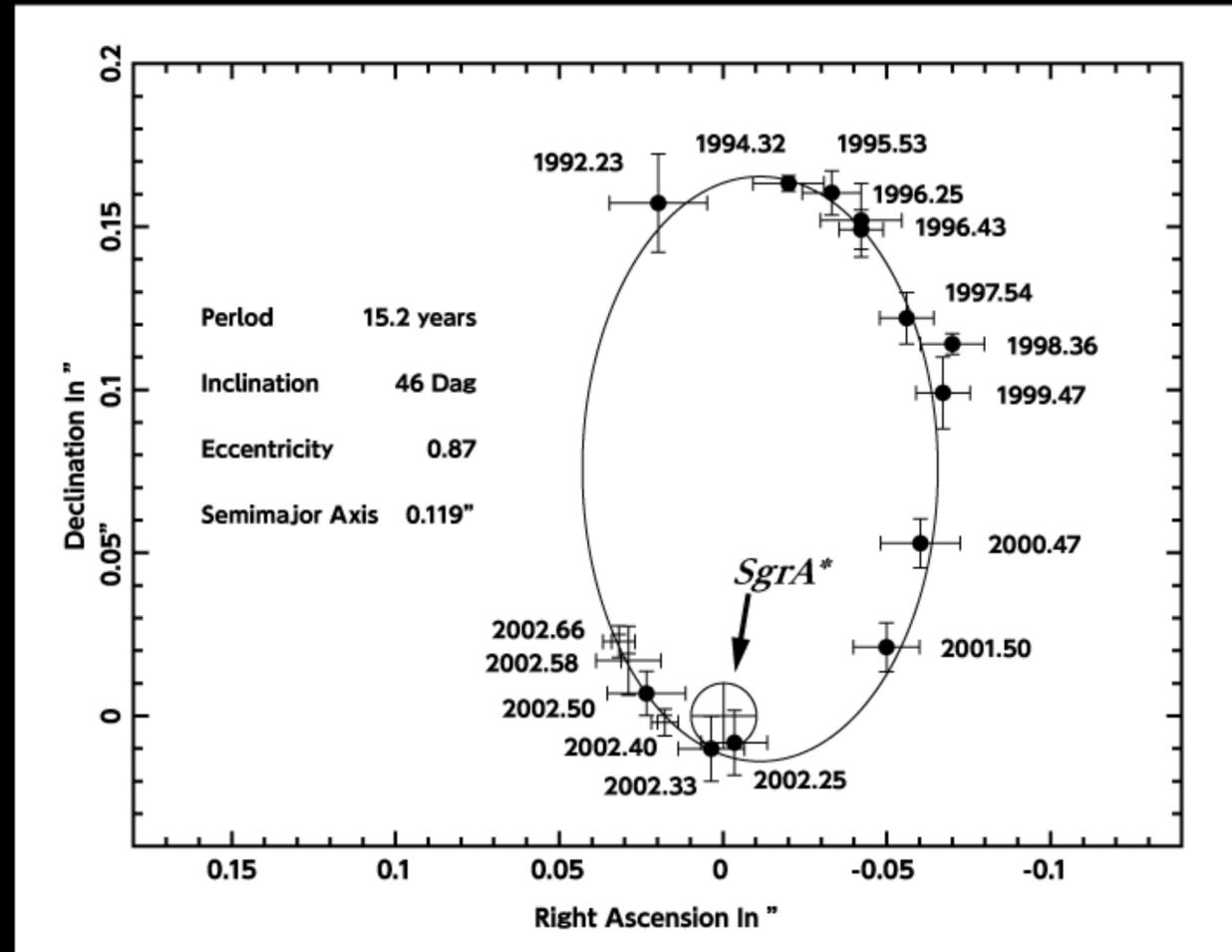
(M : 物体の質量 G : 重力定数 c : 光速)

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

ホイーラー
命名者については諸説あります

光さえも脱出できない
巨大な重力をもつ
こんな天体を
「ブラックホール」と命名
しよう

天の川銀河の中心には巨大ブラックホールがある(太陽質量の400万倍)



2020年 ノーベル物理学賞受賞

ロジャー・ペンローズ

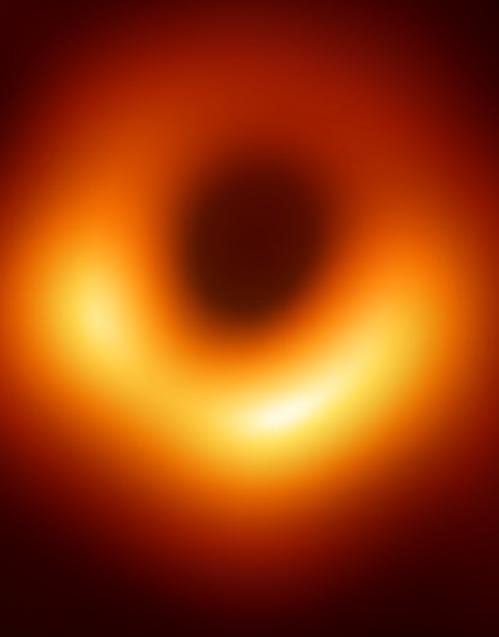
「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」

ラインハルト・ゲンツェル

アンドレア・ゲズ

「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに對して」

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」

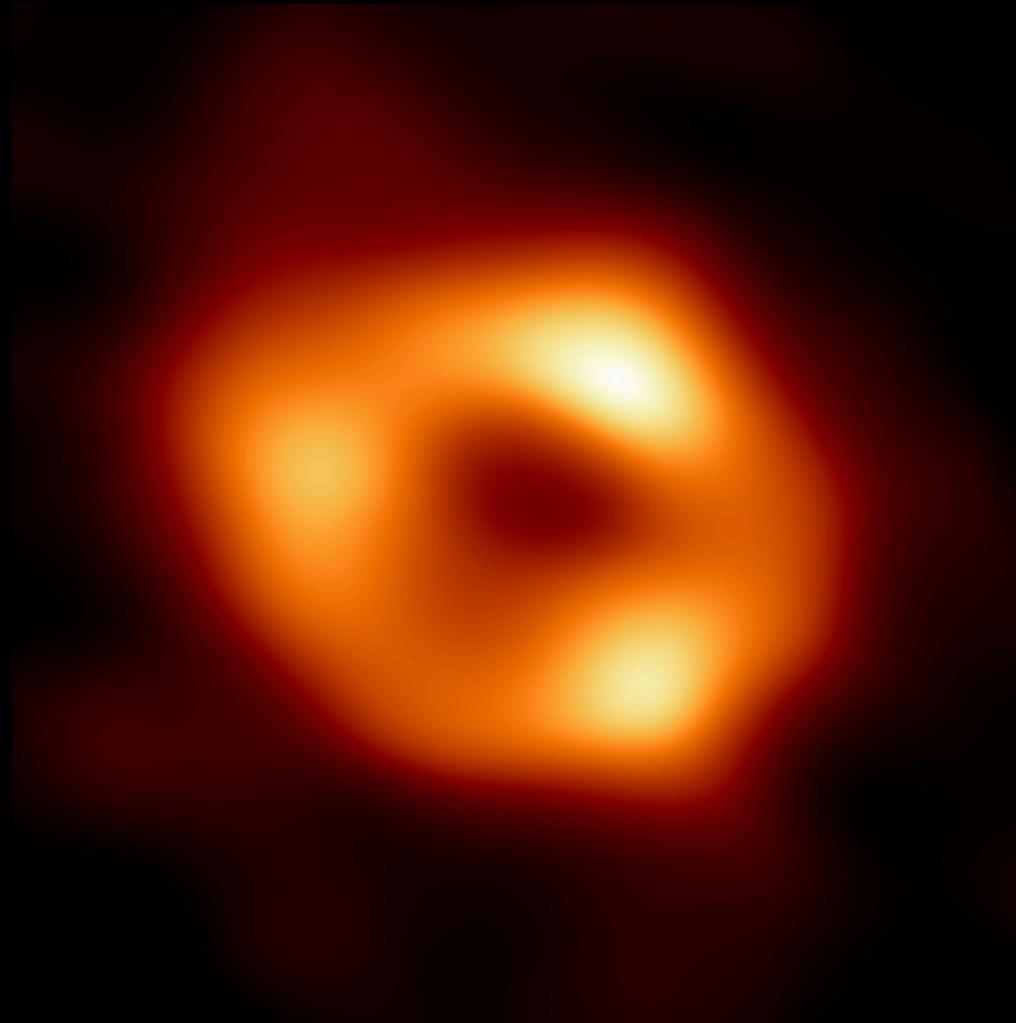


M87銀河（地球から5500万光年, 太陽質量の65億倍）

38期 本間希樹氏

出典 Event Horizon Telescope HP

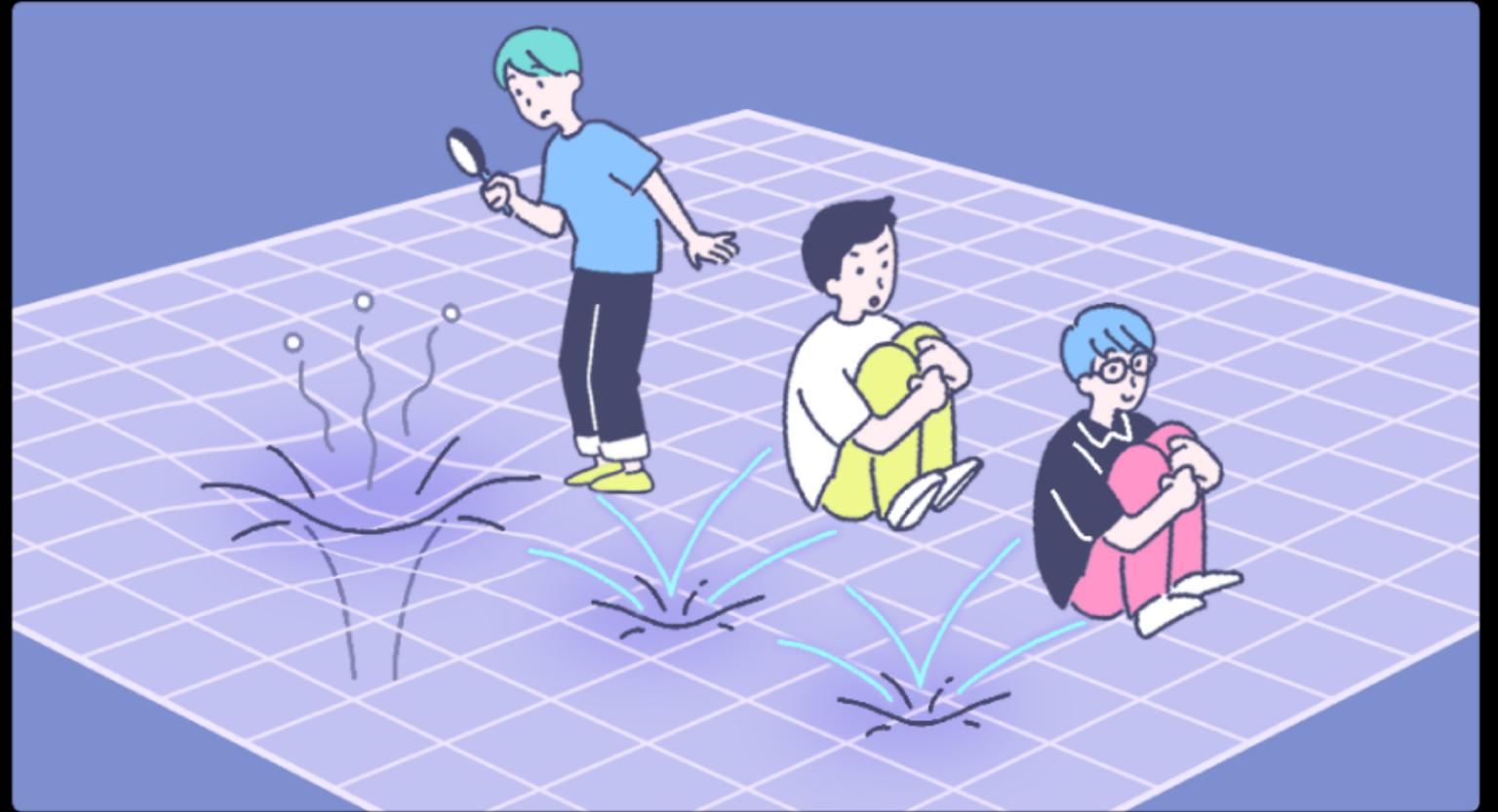
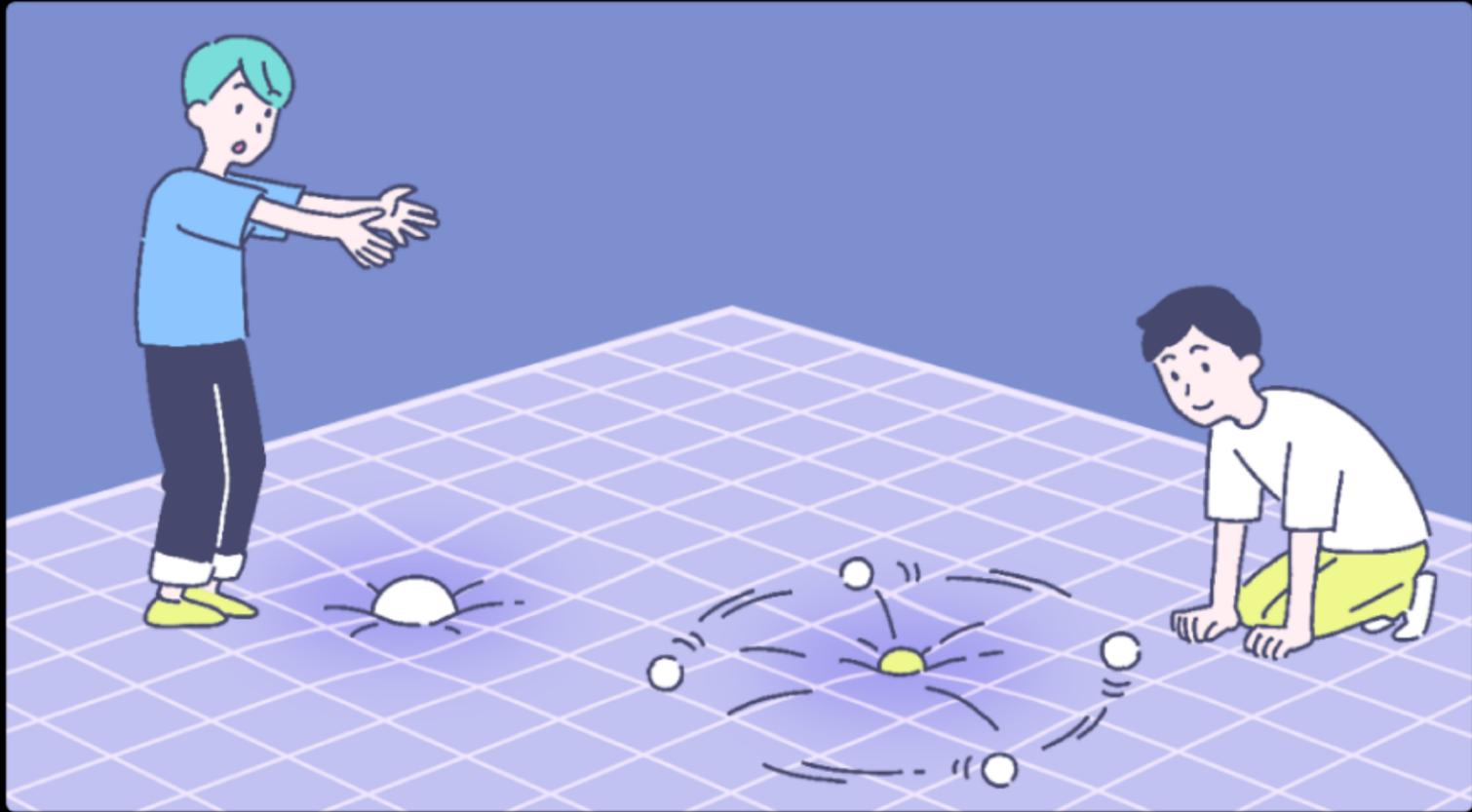
2022年5月22日 国立天文台グループ「天の川ブラックホールの撮像に成功」

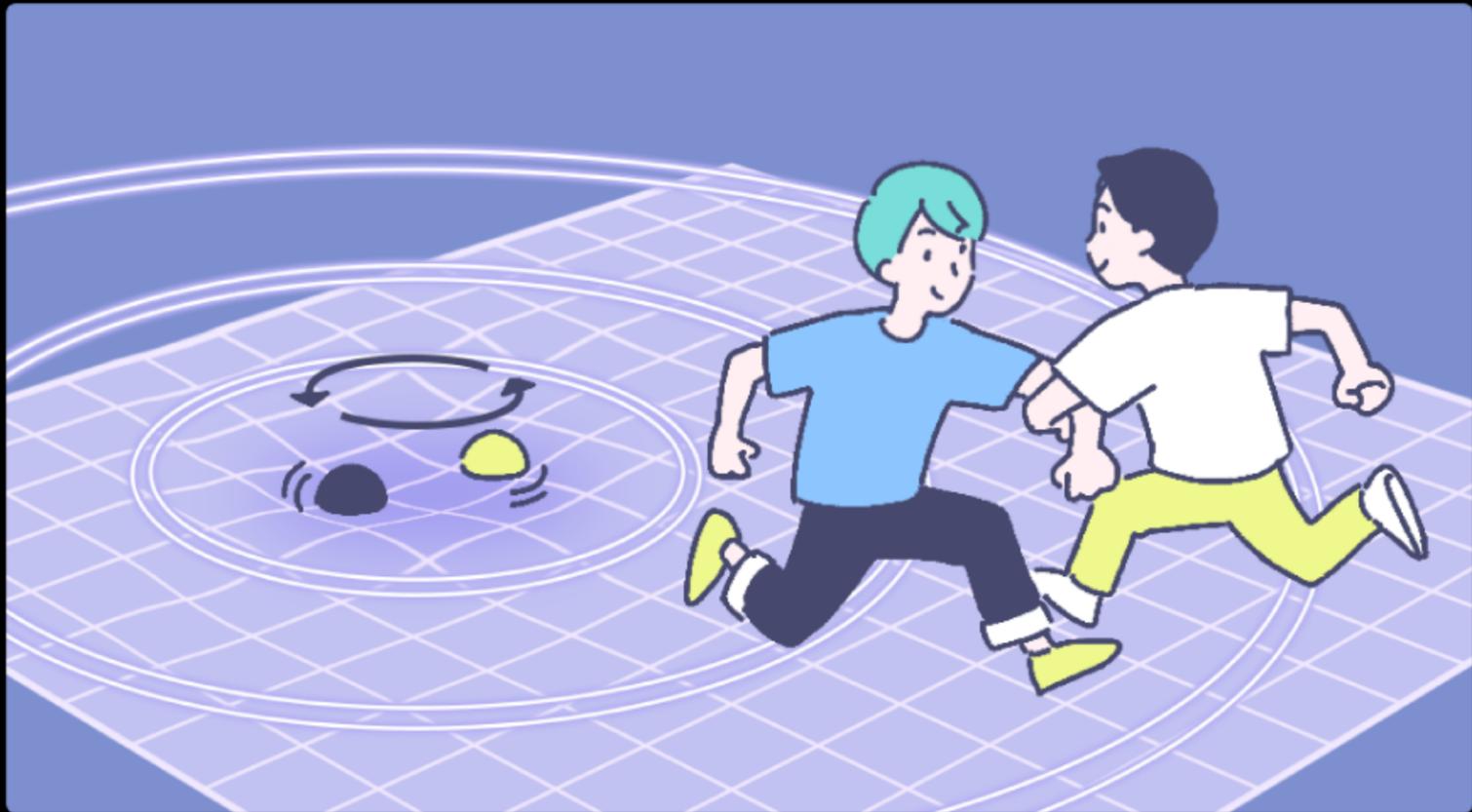
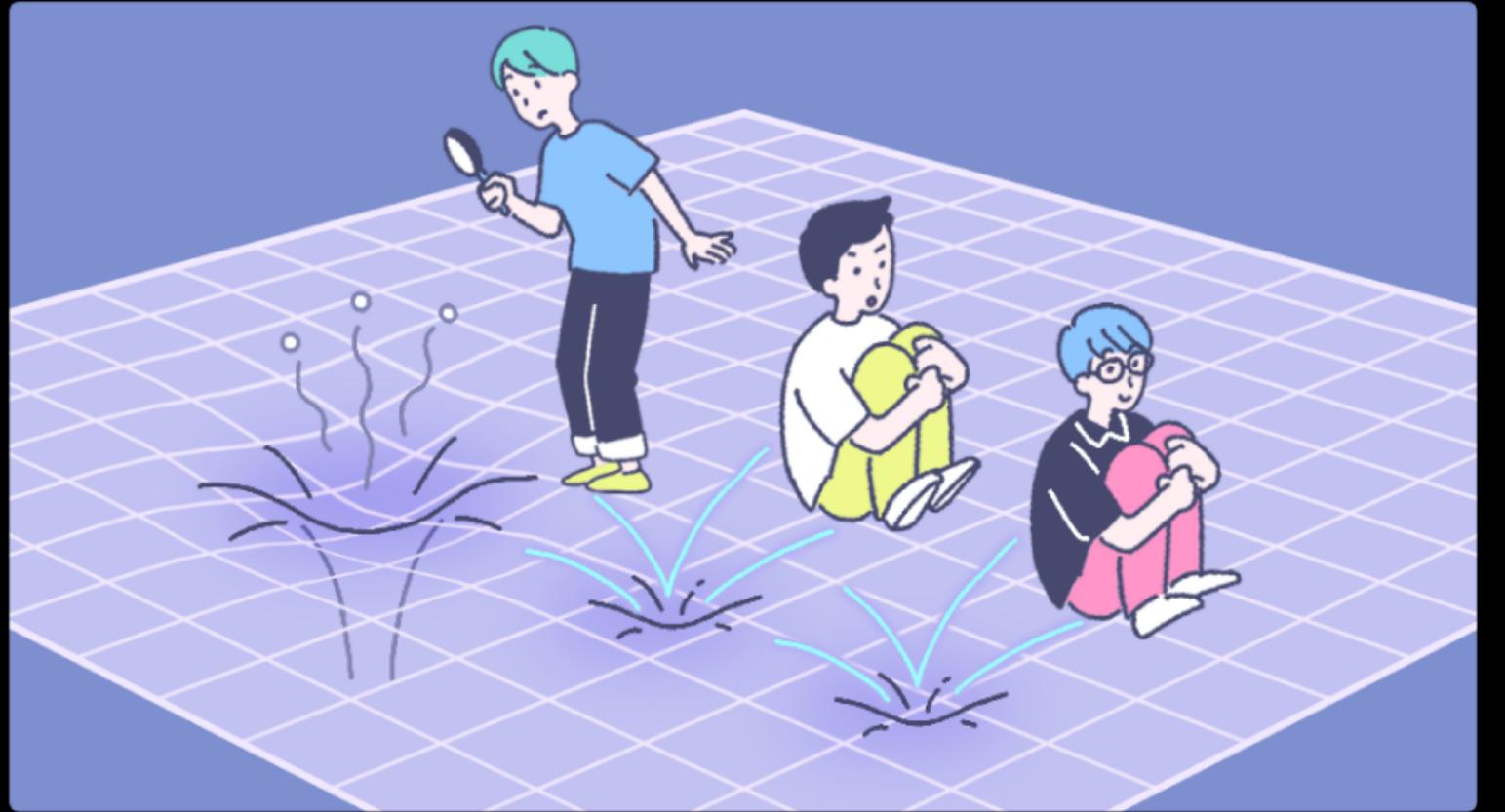
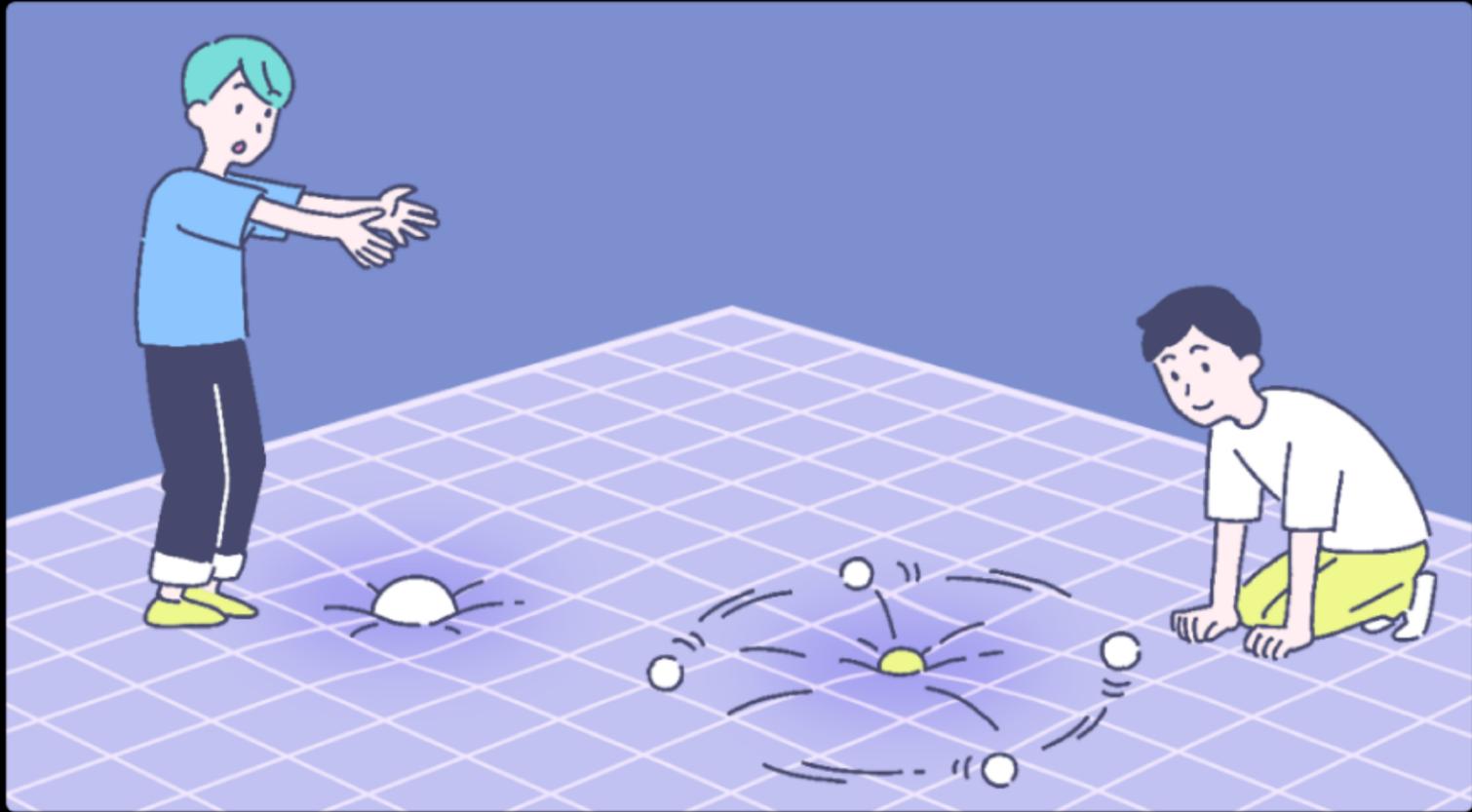


天の川銀河中心（地球から3万光年, 太陽質量の400万倍）

38期 本間希樹氏

出典 Event Horizon Telescope HP



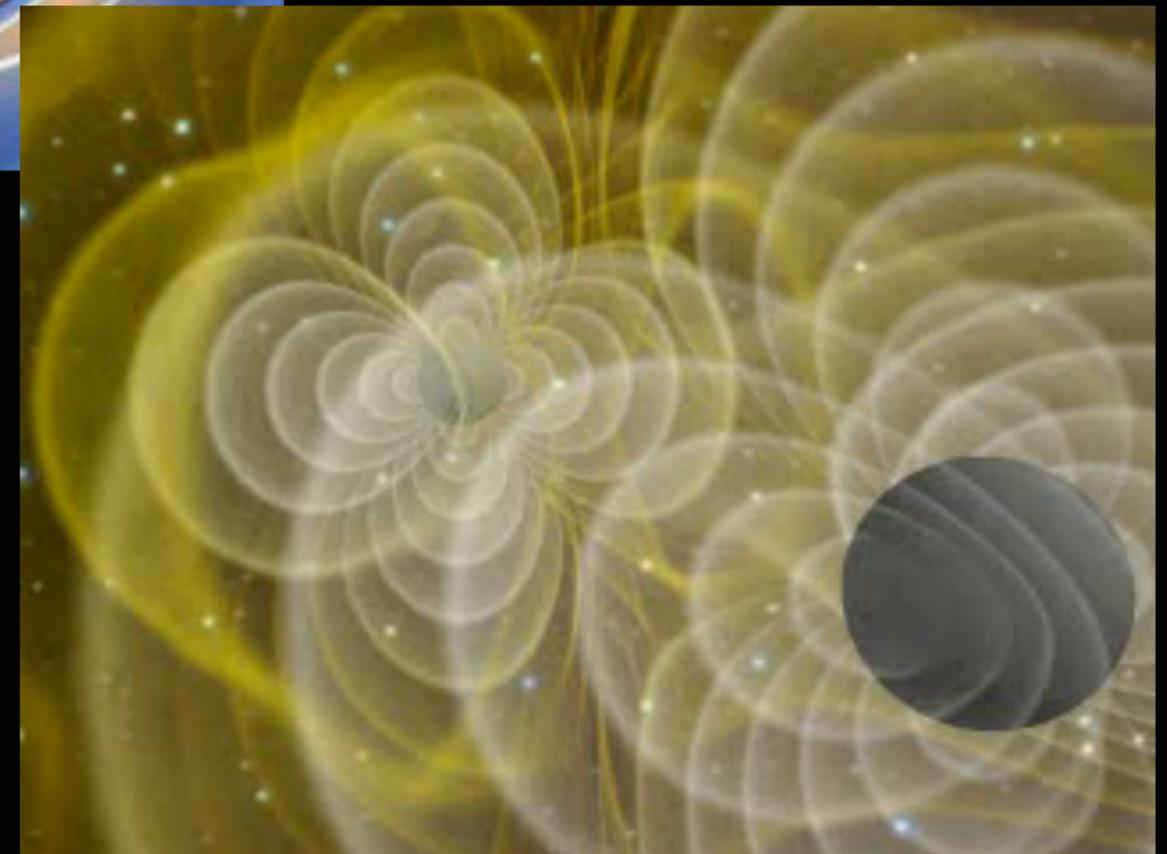


ブラックホール合体と重力波放出のシミュレーション (1990年代-2000年代)



2つのブラックホールの合体と重力波放出
(1995年, NCSAグループ)

時間発展データから外向きの重力波を表現する方法は,
Gunnarsen-Shinkai-Maeda (94) の変換公式



(NCSA-AEIグループ, 1998年)

The waveform explained

[BLACK HOLE]

A BLACK HOLE IS ONE OF THE SIMPLEST OBJECTS IN THE UNIVERSE. IT HAS ONLY TWO CHARACTERISTICS: ITS MASS (WHICH DETERMINES ITS SIZE), AND ITS SPIN (HOW MUCH SPACETIME SWIRLS AROUND).

WHEN YOU HAVE TWO BLACK HOLES IN A BINARY SYSTEM, THINGS GET MORE COMPLICATED. WE NOW HAVE THE MASSES AND SPINS OF BOTH BLACK HOLES. THE SPINS STAY THE SAME SIZE DURING THE ORBIT, BUT THEIR DIRECTIONS WOBBLE AROUND IN A PROCESS CALLED PRESSION. THE GRAVITATIONAL WAVES REACHING EARTH FROM THE BINARY ALSO DEPEND ON WHERE THE BINARY IS AND WHICH WAY IT IS ORIENTATED.



[SPIN]

AS THE BLACK HOLES ORBIT EACH OTHER, THEIR SPINS CHANGE DIRECTION. THIS ALSO CAUSES THE ORIENTATION OF THE ORBIT TO TOPPLE BACKWARDS AND FORWARDS A LITTLE. THIS PRESSION LEAVES AN IMPRINT ON THE GRAVITATIONAL WAVES: THEY BECOME LOUDER AND QUIETER AS THE SPINS WOBBLE AROUND. THE PRESSION DEPENDS ON DIRECTIONS OF THE TWO SPINS, COMPARED TO EACH OTHER AND COMPARED TO THAT OF THE ORBIT. THE SPIN OF THE MORE MASSIVE BLACK HOLE HAS A LARGER EFFECT THAN THAT OF THE SMALLER ONE.

WE DON'T SEE MUCH SIGN OF PRESSION IN GW150914. THIS MAY BE BECAUSE SPINS ARE SMALL, ITS INCLINATION MEANS THE WOBBLING AREN'T VISIBLE, OR A COMBINATION OF BOTH. SINCE THE INSPIRAL IS SHORT, WE WOULD NOT EXPECT TO SEE A LARGE EFFECT IN ANY CASE.

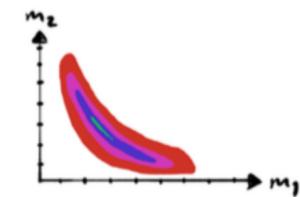


[REDSHIFT]

THE EXPANSION OF THE UNIVERSE AFFECTS GRAVITATIONAL WAVES IN A COUPLE OF WAYS. AS THE UNIVERSE EXPANDS, IT STRETCHES THE WAVES TRAVELLING THROUGH IT. THIS IS WELL KNOWN IN ASTRONOMY AND IS CALLED REDSHIFT, AS IT MAKES VISIBLE LIGHT MORE RED. TO HAVE A LARGE EFFECT, THE WAVES MUST HAVE TRAVELLED A LONG WAY.

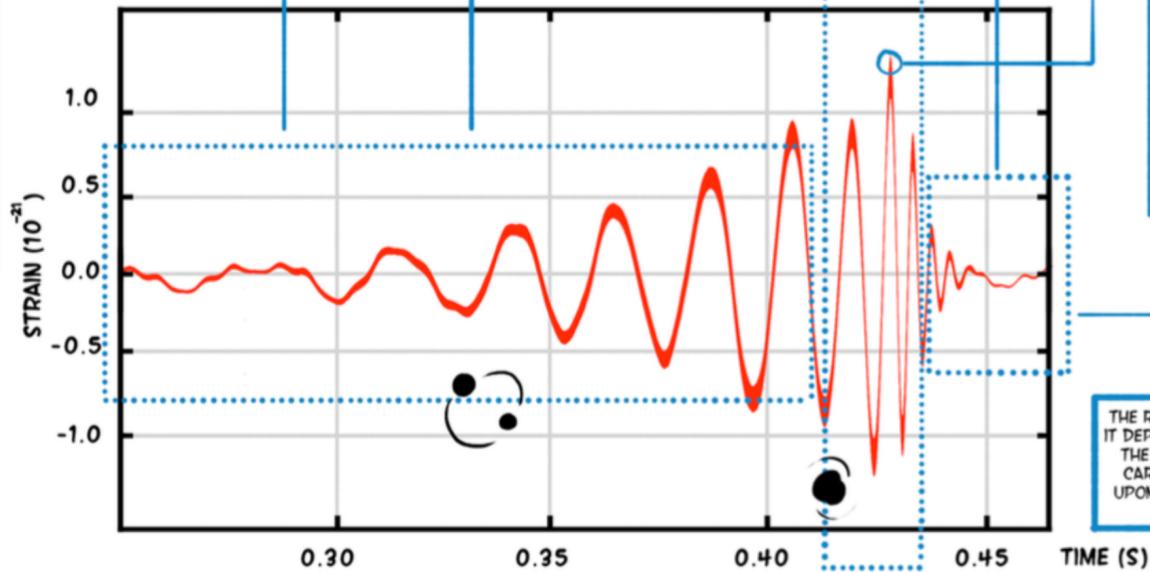
THE FIRST EFFECT IS THAT THE FREQUENCY OF THE WAVE CHANGES. THIS HAS THE SAME IMPACT AS CHANGING THE MASSES: THINGS FURTHER AWAY APPEAR MORE MASSIVE. THE SECOND EFFECT IS TO CHANGE THE AMPLITUDE, WHICH IS THE SAME AS CHANGING THE DISTANCE: WE OFTEN TALK ABOUT THE LUMINOSITY DISTANCE, WHICH ABSORBS THIS EFFECT, BUT ISN'T THE SAME AS IF WE MEASURED THE DISTANCE TO THE SOURCE USING A TAPE MEASURE.

IF WE GET ENOUGH MEASUREMENTS OF HOW GRAVITATIONAL WAVES ARE REDSHIFTED, WE COULD POSSIBLY LEARN SOMETHING ABOUT HOW THE UNIVERSE IS EXPANDING.



[CHIRP MASS]

THE WAY THE SIGNAL CHANGES DURING THE INSPIRAL IS PRIMARILY FIXED BY A COMBINATION OF THE BLACK HOLE MASSES WE CALL THE CHIRP MASS. IF WE SEE LOTS OF CYCLES OF INSPIRAL, WE CAN MEASURE THE CHIRP MASS REALLY WELL (BETTER THAN A FRACTION OF A PERCENT). WHEN THINKING ABOUT WHAT WE CAN LEARN FROM GRAVITATIONAL WAVES, PEOPLE OFTEN FIRST THINK ABOUT THE CHIRP MASS.



[STAGES]

ONE OF THE REASONS WE DIVIDE UP THE GRAVITATIONAL WAVE SIGNAL IS BECAUSE DIFFERENT TECHNIQUES CAN BE USED TO CALCULATE THE WAVES AT DIFFERENT POINTS. THE EARLY **INSPIRAL** CAN BE CALCULATED USING POST-NEWTONIAN THEORY (THIS STARTS WITH NEWTON'S THEORY OF GRAVITY AND ADDS LITTLE EXTRA BITS TO ACCOUNT FOR HOW THINGS CHANGE IN GENERAL RELATIVITY). THE **RINGDOWN** CAN BE CALCULATED USING BLACK HOLE PERTURBATION THEORY (THIS STARTS WITH THE FINAL SHAPE OF THE BLACK HOLE, AND SEES HOW IT REACTS TO SMALL CHANGES). THE **MERGER** CAN ONLY BE CALCULATED USING NUMERICAL RELATIVITY (SIMULATIONS OF THE FULL EQUATIONS OF GENERAL RELATIVITY WHICH TAKE LOTS OF COMPUTING POWER); THIS HAS ONLY BEEN POSSIBLE IN THE LAST 10 YEARS, SO THE MERGER WAS THE LAST PART OF THE PUZZLE.

IF WE HAD A BINARY CONTAINING NEUTRON STARS INSTEAD OF BLACK HOLES, THE INSPIRAL WOULD BE MUCH THE SAME, BUT THERE WOULD NOT BE THE SAME MERGER AND RINGDOWN. THE SIGNAL WOULD BE MUCH MESSIER, POSSIBLY FEATURING NEUTRON STARS BEING RIPPED APART, BEFORE COLLIDING AND COLLAPSING TO A FINAL BLACK HOLE.

- INSPIRAL
- MERGER
- RINGDOWN

[AMPLITUDE]

THE SIZE OF THE SIGNAL, ITS AMPLITUDE, DEPENDS ON HOW FAR AWAY THE BINARY IS. IF THE DISTANCE WERE TWICE AS BIG, THE AMPLITUDE WOULD BE HALF. THE QUIETER A SIGNAL IS, THE HARDER IT IS TO DETECT, AND THE LESS WE CAN LEARN ABOUT ITS PROPERTIES.

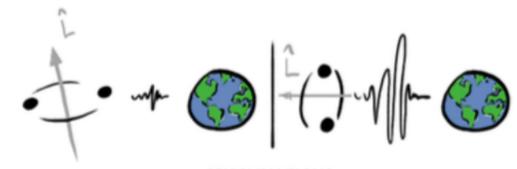
HEAVIER SYSTEMS PRODUCE LOUDER GRAVITATIONAL WAVES AS THERE IS MORE MASS MOVING AROUND TO CREATE THE WAVES.

THE SIGNAL AMPLITUDE DEPENDS UPON THE WAY THE BINARY IS FACING (ITS INCLINATION), AND ITS POSITION IN THE SKY. THE DETECTORS ARE NOT EQUALLY SENSITIVE TO GRAVITATIONAL WAVES FROM ALL DIRECTIONS (THE SIGNAL IS LOUDEST WHEN THE SOURCE IS DIRECTLY ABOVE OR BELOW A DETECTOR).

$$h_{ctz} = \frac{Gm\dot{v}^2}{c^4 r}$$

[RINGDOWN]

THE RINGDOWN PART OF THE SIGNAL COMES FROM THE FINAL BLACK HOLE, SO IT DEPENDS UPON ITS MASS AND SPIN. THE FINAL MASS IS ALMOST THE SAME AS THE TOTAL MASS OF THE TWO INITIAL BLACK HOLES (SOME ENERGY IS LOST, CARRIED AWAY BY THE GRAVITATIONAL WAVES). THE FINAL SPIN DEPENDS UPON THE SPIN OF THE INITIAL BLACK HOLES AND HOW THEY WERE ORBITING AROUND EACH OTHER WHEN THEY MERGED.



[INCLINATION]

THE WAY THE BINARY IS FACING THE EARTH DETERMINES THE GRAVITATIONAL WAVES WE SEE. IF IT IS EDGE ON, THE SIGNAL IS QUIETER, BUT IT IS EASIER TO SPOT SMALL CHANGES CAUSED BY THE BLACK HOLES' SPINS. IF IT IS FACING US, THE SIGNAL IS LOUDER, BUT IT'S HARDER TO TELL IF THE ORBIT WOBBLING BECAUSE OF PRESSION. WE HAVE A GREATER CHANCE OF DETECTING A FACE-ON BINARY BECAUSE THEY CAN BE DETECTED FROM FURTHER AWAY.

[TOTAL MASS]

THE TOTAL MASS OF THE SYSTEM DETERMINES HOW LONG IT TAKES FOR THINGS TO HAPPEN. HEAVY SYSTEMS ARE BIGGER, AND SO CHANGE MORE SLOWLY. THE GRAVITATIONAL WAVES ARE AT LOWER FREQUENCIES, WHICH MEANS THAT LIGO CAN ONLY SEE THE FINAL PARTS. LIGHTER SYSTEMS PRODUCE GRAVITATIONAL WAVES AT HIGHER FREQUENCIES, SO WE CAN MEASURE MORE OF THE INSPIRAL.

THE TOTAL MASS OF THE SYSTEM SETS WHICH PARAMETERS ARE MOST EASILY MEASURED. FOR REALLY MASSIVE SYSTEMS WE MEASURE THE TOTAL MASS BEST (AS WE ONLY SEE THE MERGER AND RINGDOWN), BUT FOR LIGHT SYSTEMS, LIKE BINARY NEUTRON STARS, WE MEASURE THE CHIRP MASS BEST (AS WE ONLY SEE THE INSPIRAL). GW150914 IS SOMEWHERE IN THE MIDDLE.

[SKY]

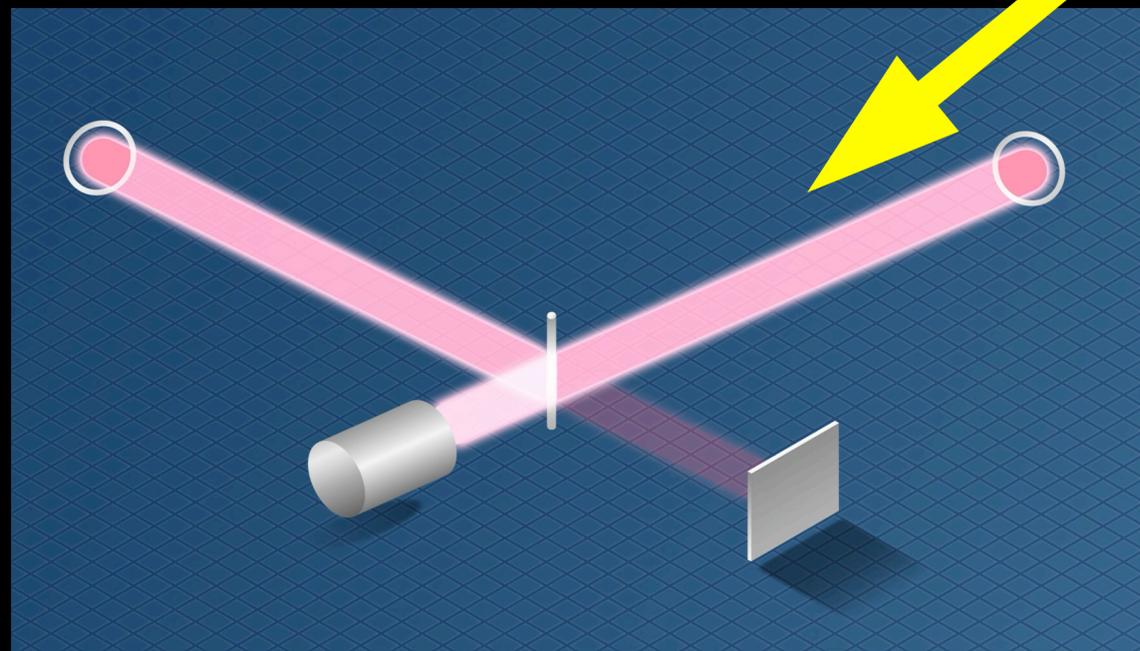
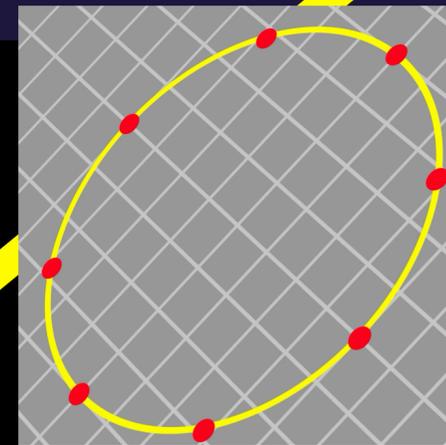
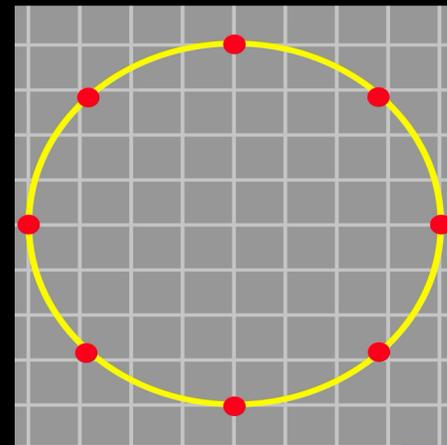
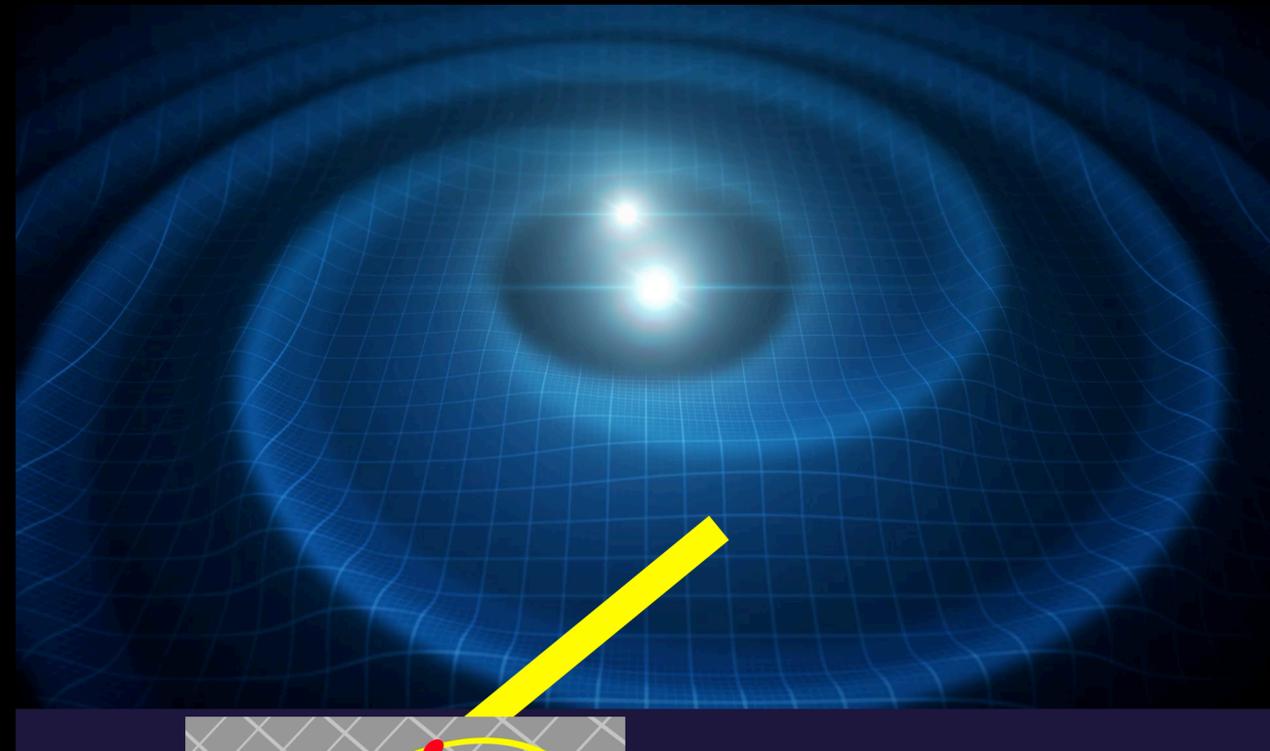
WITH MULTIPLE DETECTORS, WE CAN WORK OUT WHICH DIRECTION THE GRAVITATIONAL WAVES CAME FROM BY LOOKING AT THE TIMES WHEN THE SIGNALS ARRIVED AT EACH DETECTOR. THIS IS SIMILAR TO HOW YOU CAN LOCATE THE SOURCE OF A SOUND USING YOUR EARS.

WE CAN GET SOME EXTRA INFORMATION ABOUT THE DIRECTION FROM HOW LOUD EACH SIGNAL IS (SINCE EACH OF THE DETECTORS HAS ITS BEST SENSITIVITY IN A DIFFERENT DIRECTION), AND WHERE THE WAVE IS IN ITS CYCLE.



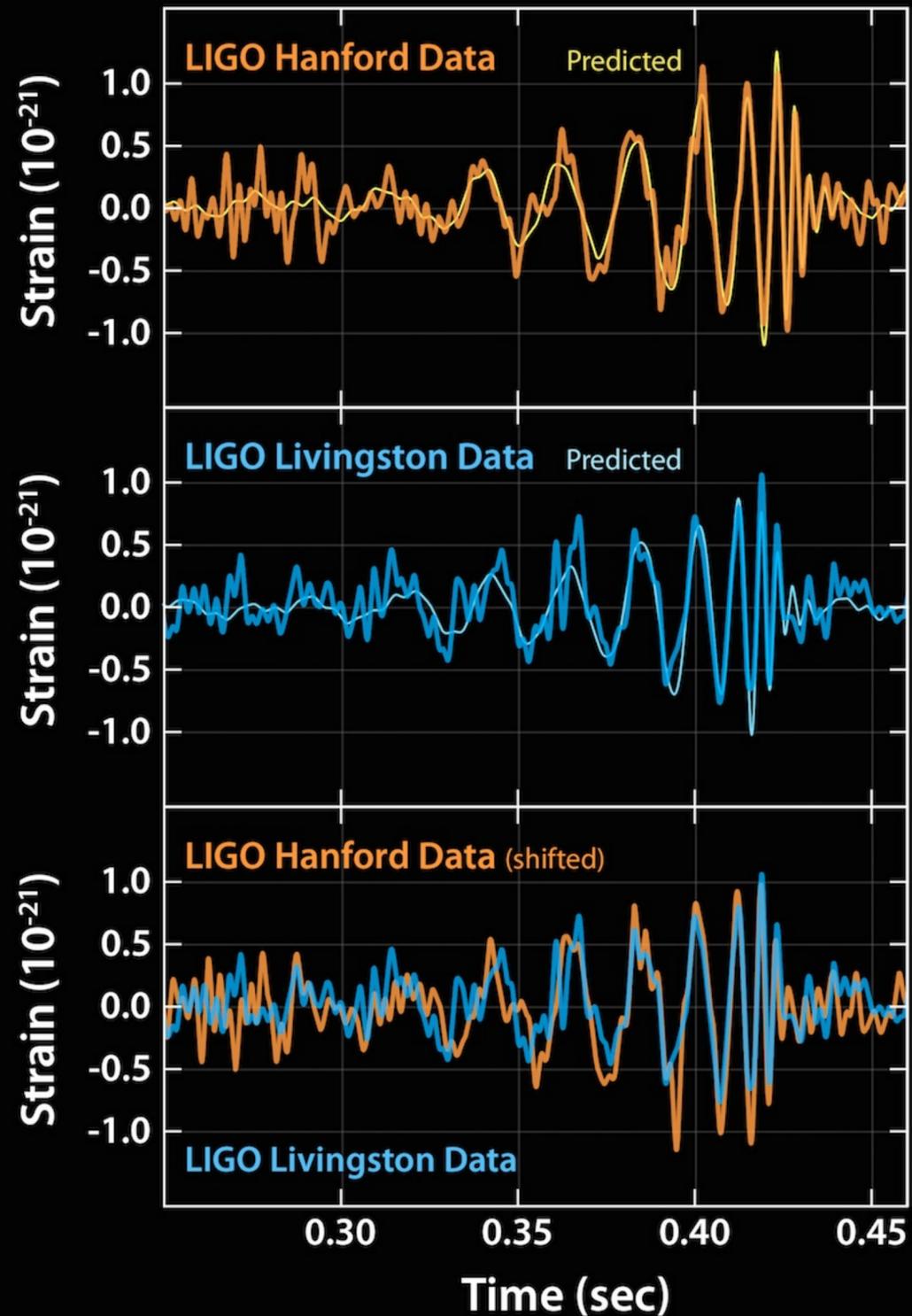
重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星



レーザー干渉計

重力波の初観測



2015年9月14日 GW150914



米国 LIGO

欧州 Virgo

連星ブラックホールの合体によって生じた重力波

太陽質量の36倍と29倍のブラックホールが合体して、太陽質量の62倍のブラックホールになった。

Selected for a **Viewpoint** in *Physics*
week ending
12 FEBRUARY 2016

PRL 116, 061102 (2016) PHYSICAL REVIEW LETTERS

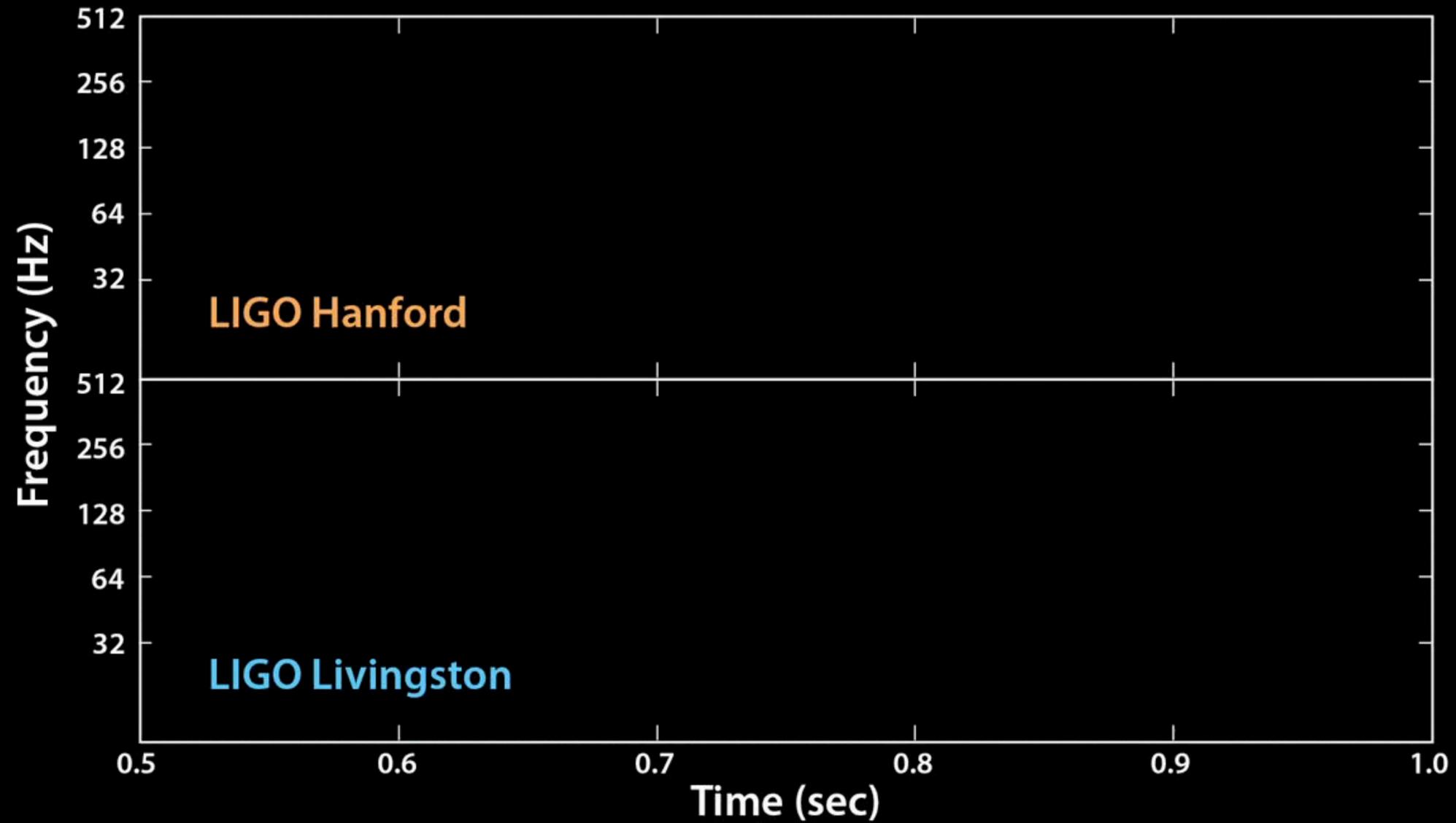


Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*^{*}
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

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

重力波波形を音にすると. . .

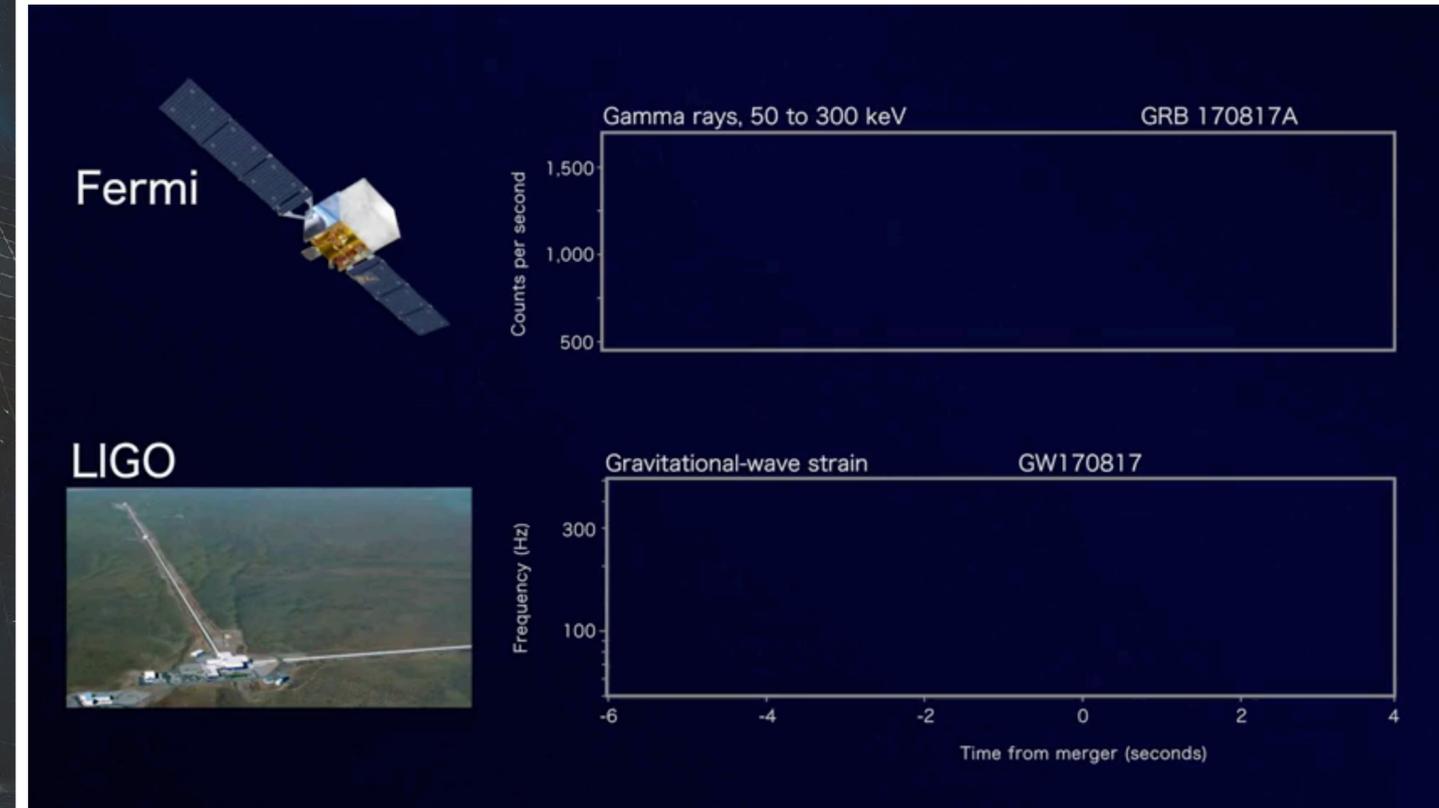
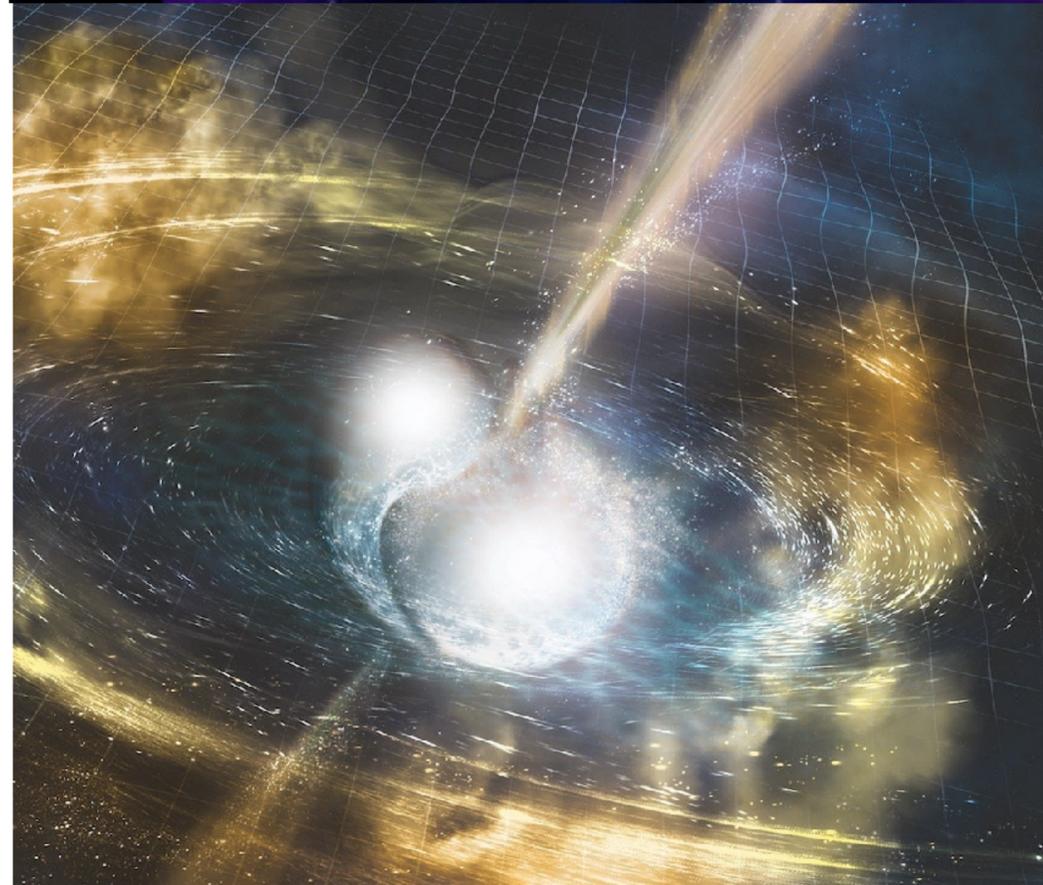


はじめ2回は実周波数, 後の2回は聞きやすいように+400Hz

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

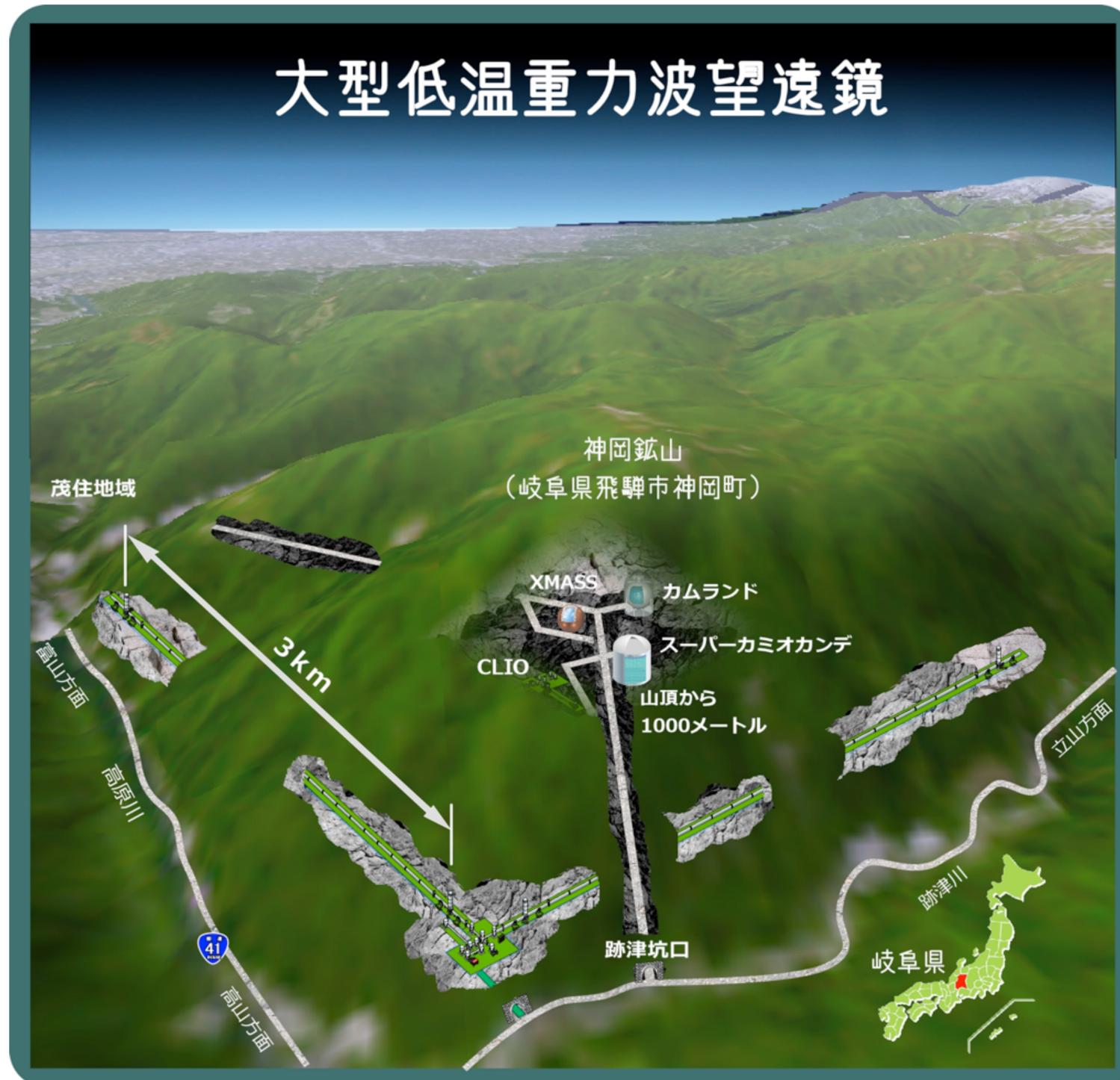
連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)

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



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

地面振動が小さい岐阜県飛騨市にある神岡鉱山

鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却

熱雑音を小さくするため

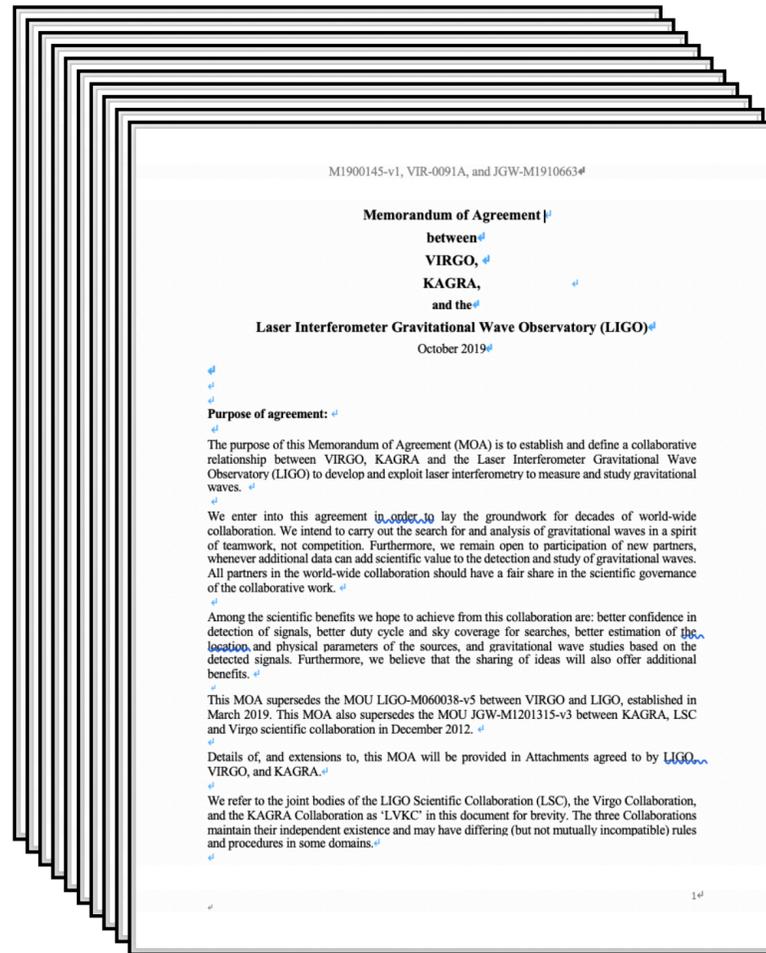
鏡の材質としてサファイア

光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

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)



2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

2023年5月から 日米欧で重力波共同観測中

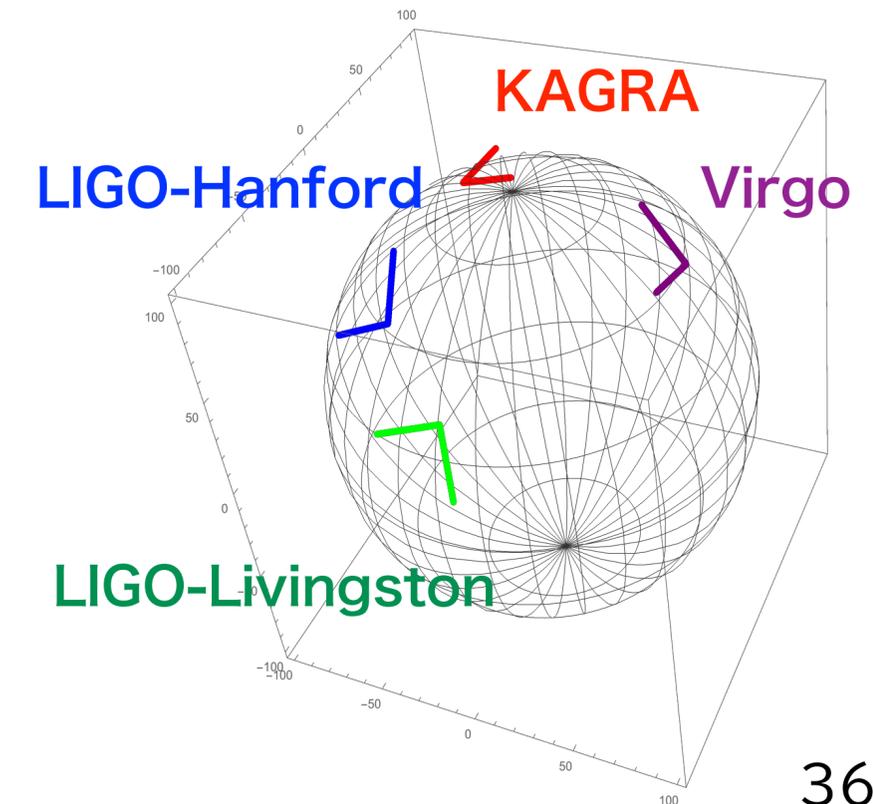
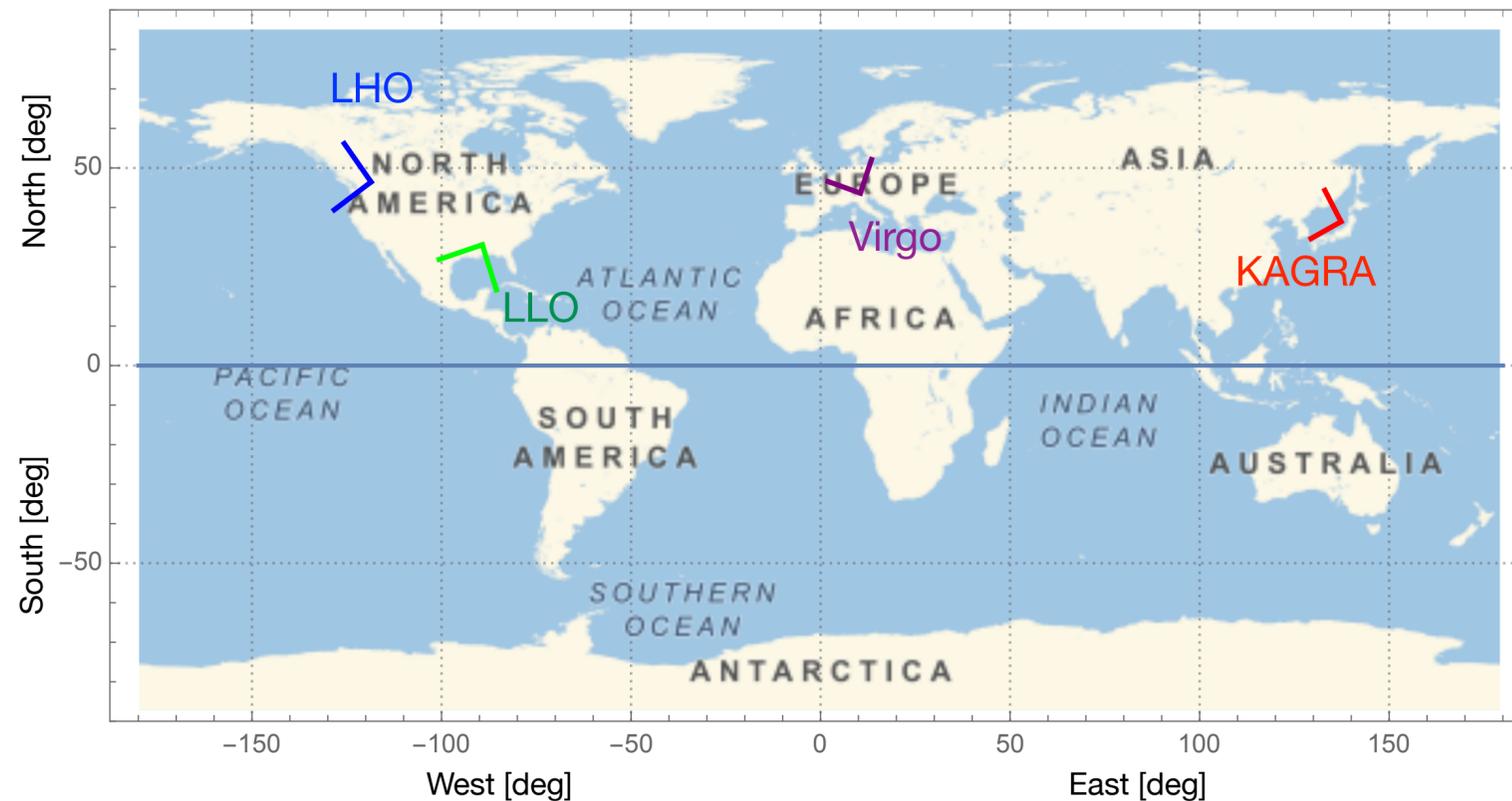
アメリカ・LIGO



ヨーロッパ・VIRGO



日本・KAGRA(岐阜・神岡)



2021年11月 重力波カタログ3 発表

<https://www.ligo.org/science/Publication-03bCatalog/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 (O1とO2) 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。

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、

より速く信号を検出できるため、より多くの検出が期待できます。O3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**



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せん。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必要があります。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_{\odot} 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、 $3\sim 5 M_{\odot}$ 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。この空白は、**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_{\odot} の範囲で、**高い質量ギャップ**

があることが予測されています。この場合、瀕死の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。

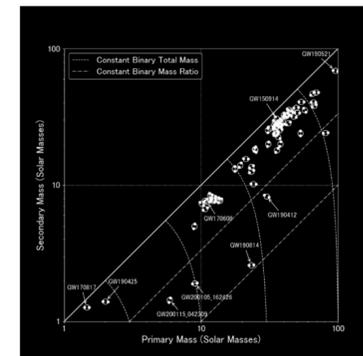


図1: 私たちの論文で統計解析された連星系の母集団。横軸に大きい方の天体の質量、縦軸に小さい方の天体の質量を表す。関心を引く個々のイベントをマークしている。また、連星の質量比と総質量の線も示す。(Credit: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration / IGF AE / Thomas Dent.)

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

2021年11月 重力波カタログ3 発表



Zoheyr Doctor / CIERA / LIGO-Virgo Collaboration

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

2021年11月 重力波カタログ3 発表

Masses in the Stellar Graveyard

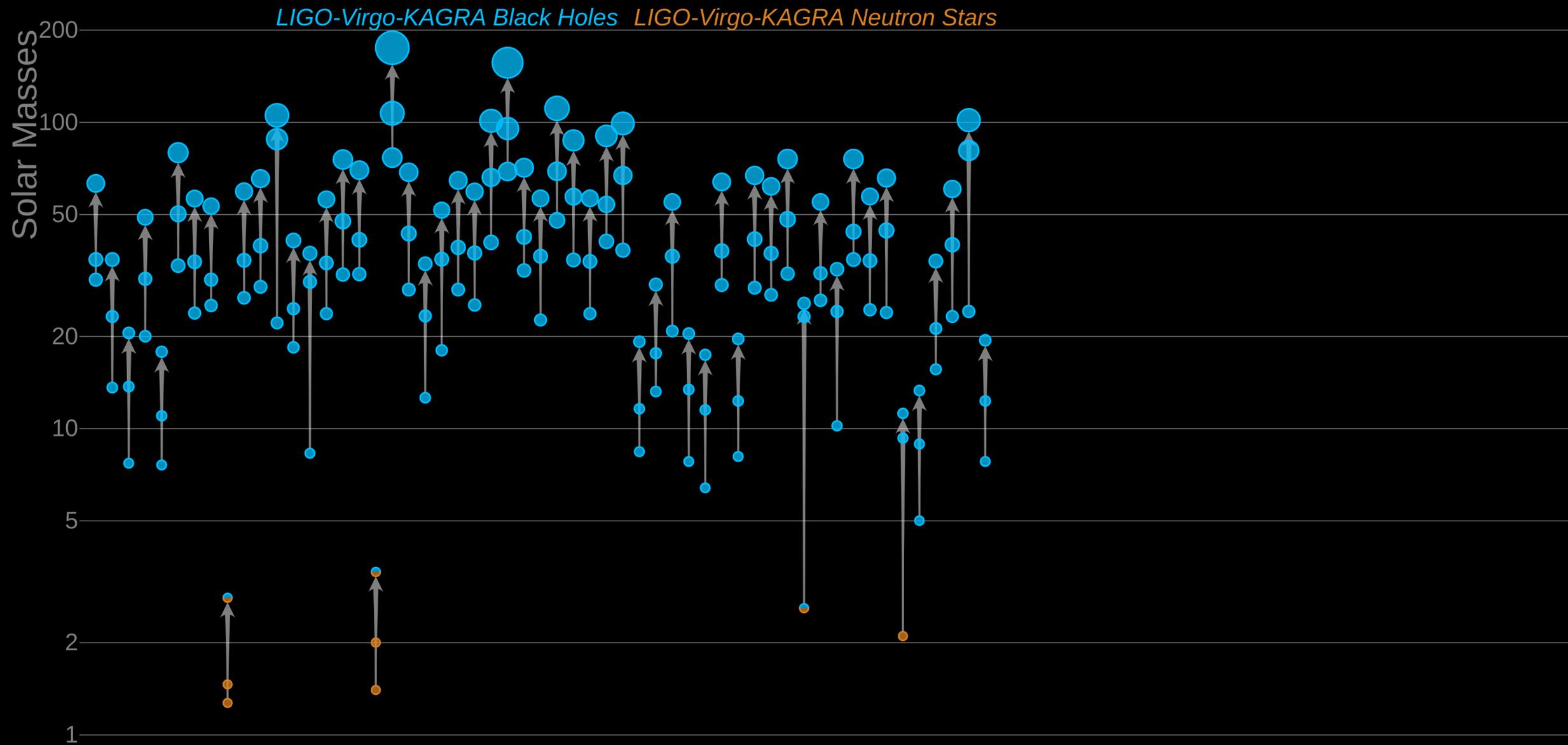


LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

2015/9—2018/6

2021年11月 重力波カタログ3 発表

Masses in the Stellar Graveyard



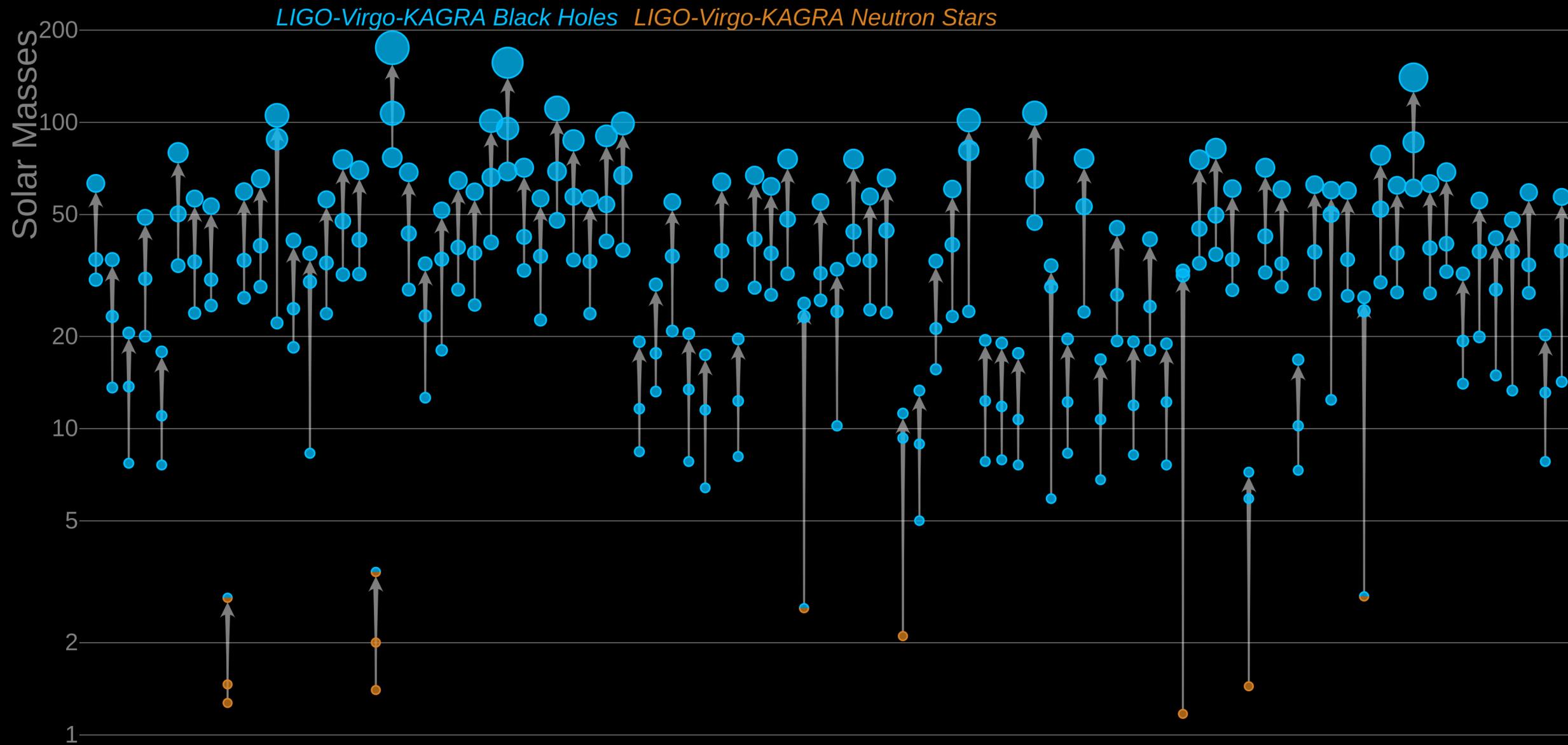
LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

2015/9—2018/6

2019/4—2019/9

2021年11月 重力波カタログ3 発表

Masses in the Stellar Graveyard



2015/9—2018/6

2019/4—2019/9

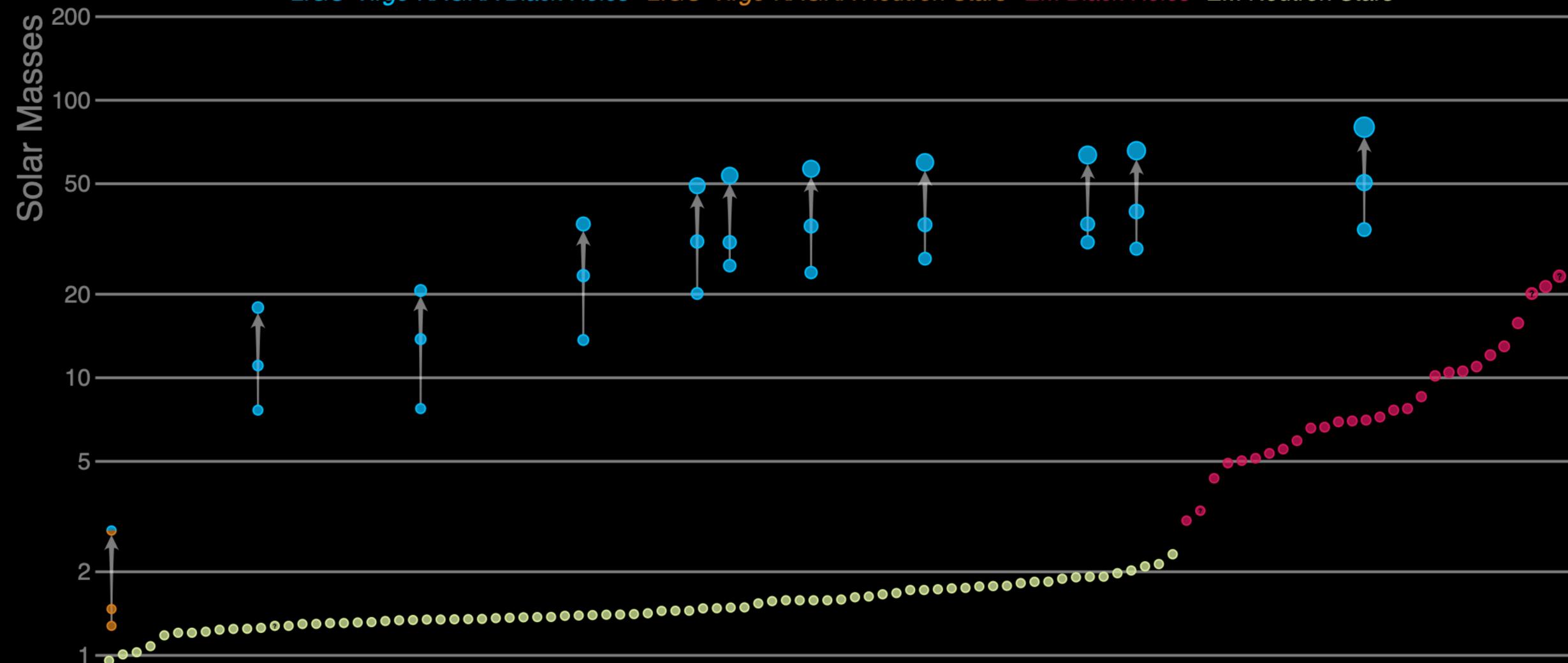
2019/11—2020/3

2021年11月 重力波カタログ3 発表

Masses in the Stellar Graveyard



LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

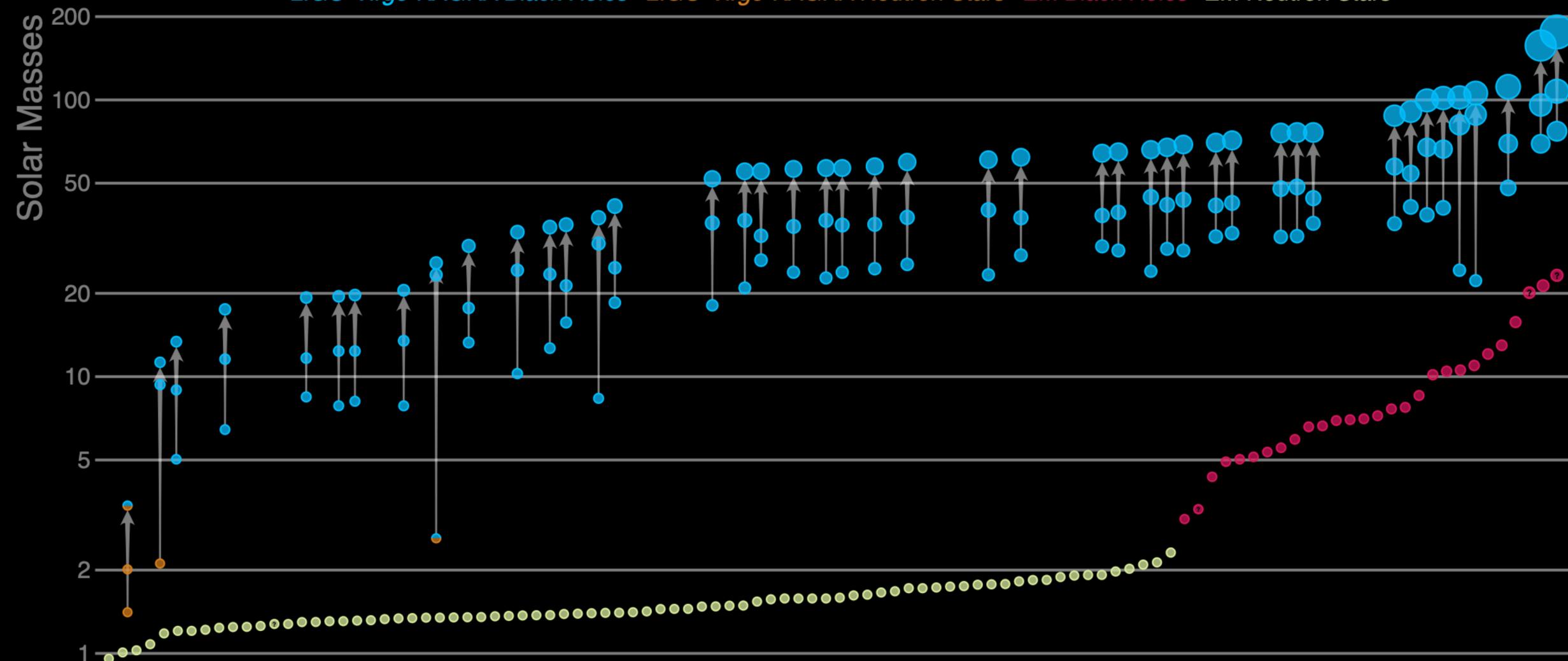
2015/9—2018/6

2021年11月 重力波カタログ3 発表

Masses in the Stellar Graveyard



LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

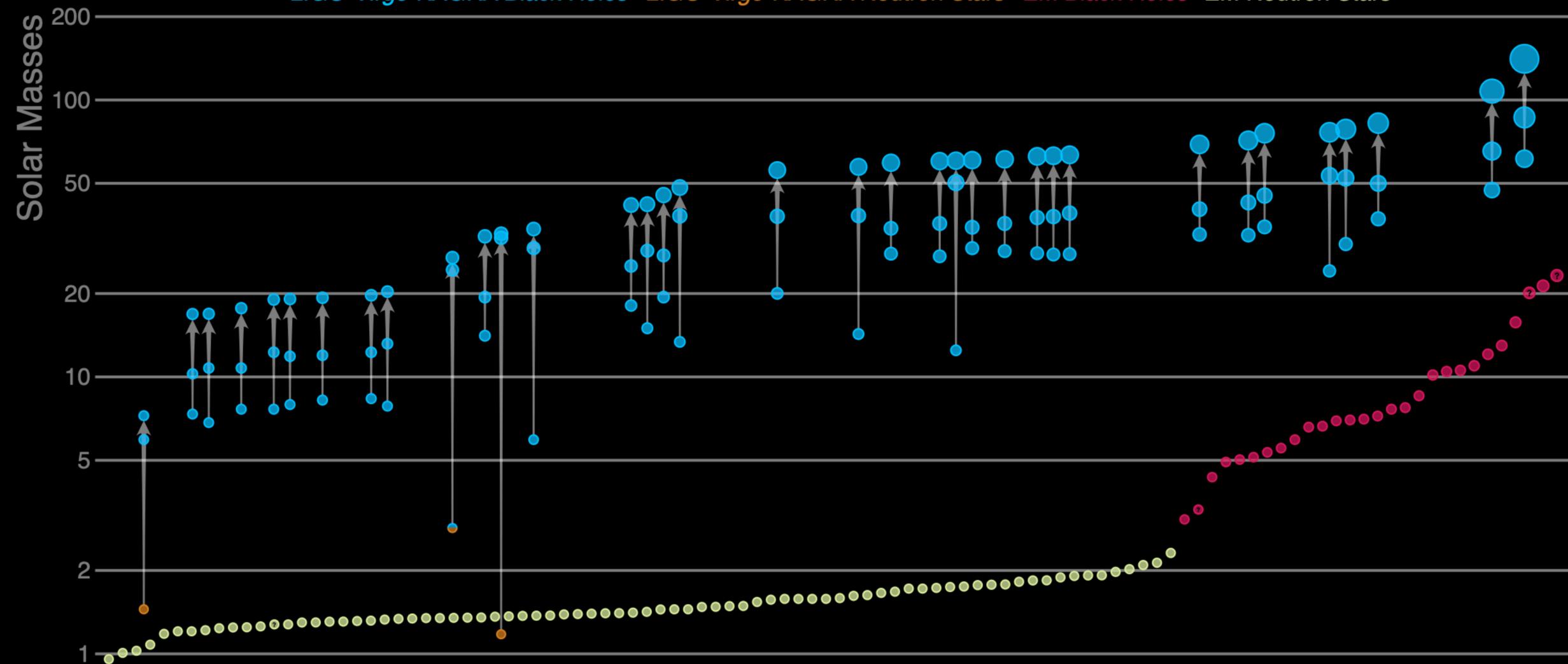
2019/4—2019/9

2021年11月 重力波カタログ3 発表

Masses in the Stellar Graveyard



LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

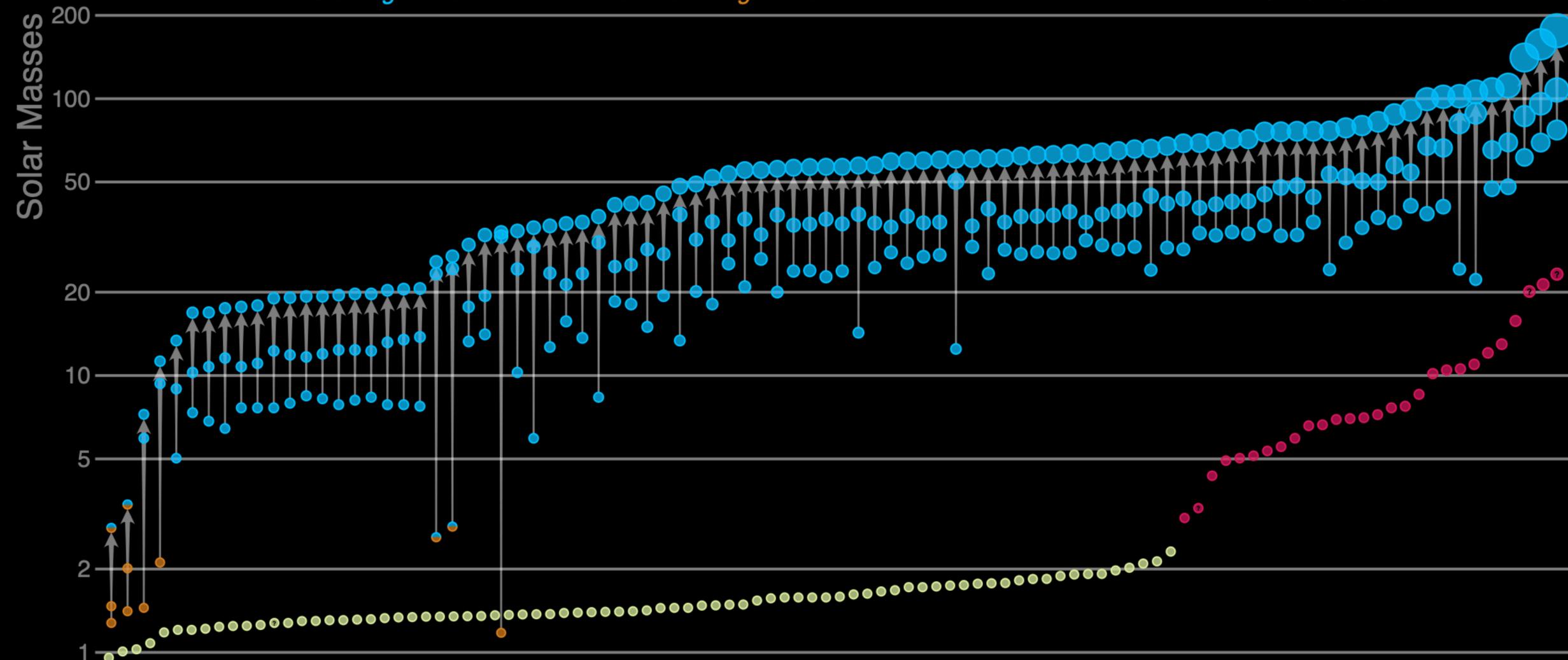
2019/11—2020/3

2021年11月 重力波カタログ3 発表

Masses in the Stellar Graveyard



LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



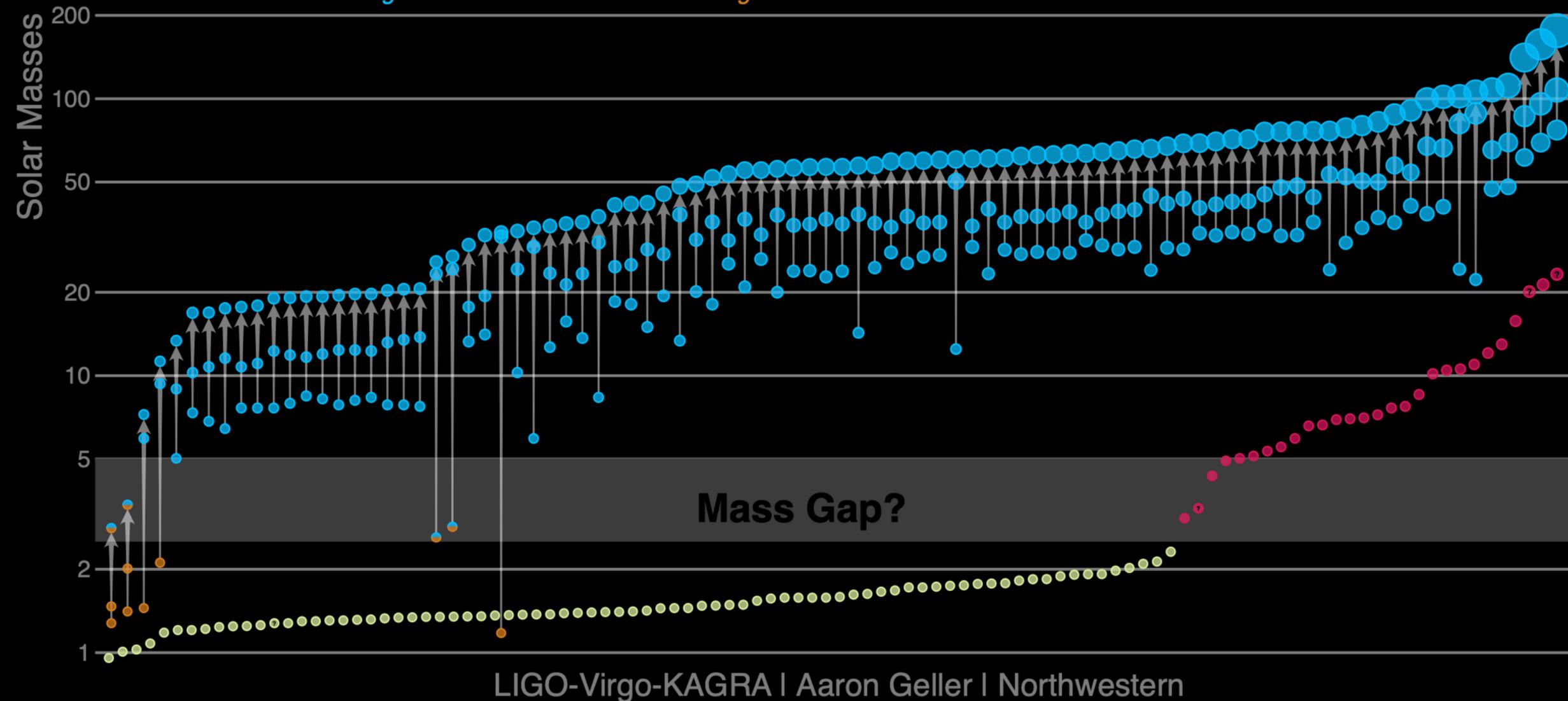
2015/9—2020/3

2021年11月 重力波カタログ3 発表

Masses in the Stellar Graveyard

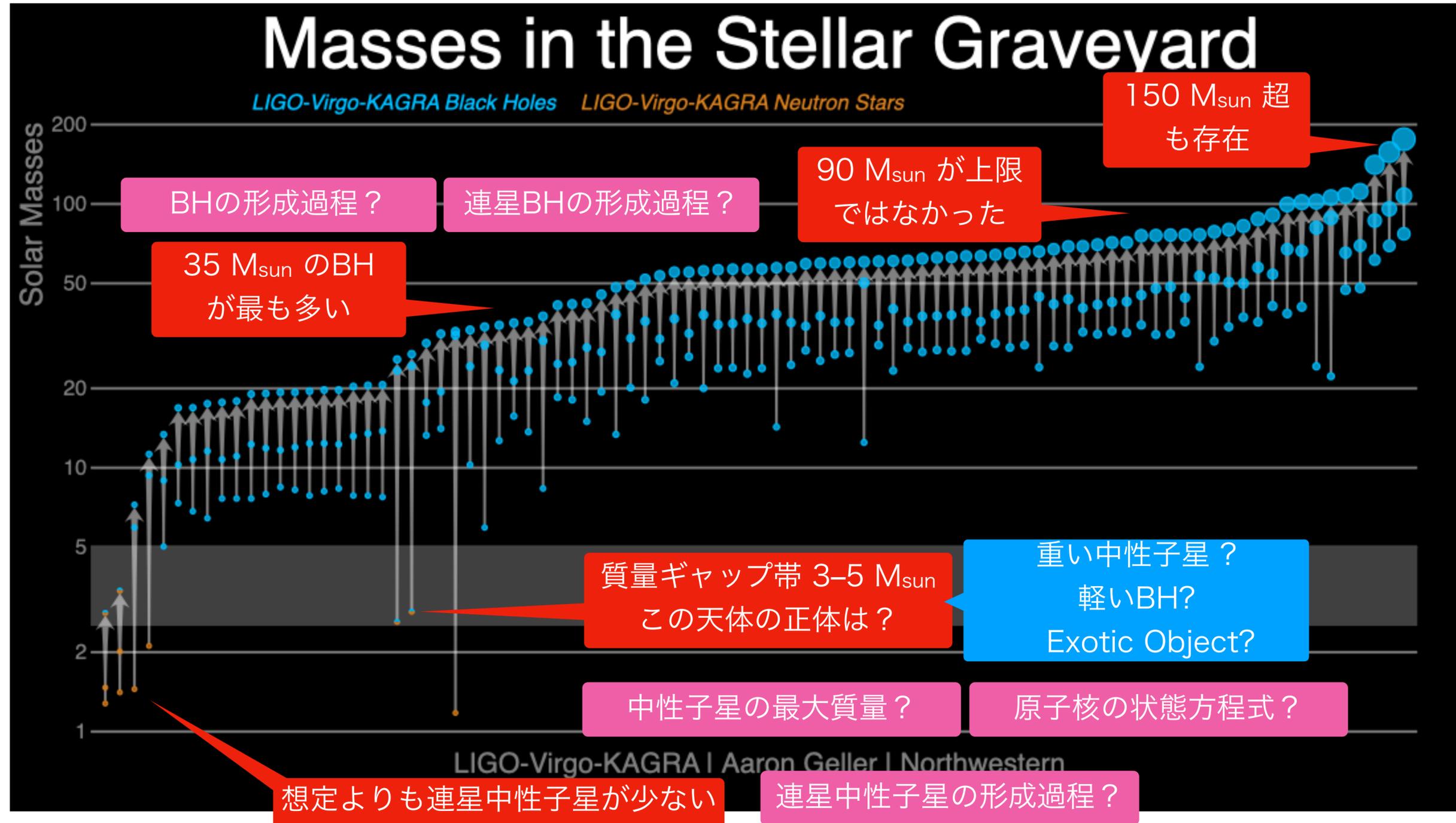


LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



2015/9—2020/3

この現状をどう説明する？



理科年表2024 (2023年11月発売)

重力波 2023-0815 田中・真貝

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、O3b と呼ばれる観測期間終了までに、BBH 波源の重力波が 85 例、BNS 波源が 2 例、NSBH 波源が 2 例、片方が BH で相方が不明なもの 1 例 の合計 90 例が報告されている。日本の KAGRA（かぐら）も O3b の最後に共同観測に入った。O4 観測が、2023 年 5 月から 18 ヶ月間の予定で行われている。

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。

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	所在地	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	W 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

観測期間 (Observing Run)						
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	–
O4	2023 5 26	–	2023 後半より開始	2023 5 26	–6 25,	2024 春に再開

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 3 (GWTC3) として 2021 年 11 月に発表されたものが最新の重力波イベントカタログである。

GW150914 最初に報告された重力波直接観測イベント。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。**GW170817** 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 $\rho_{\text{nuc}} = 2.8 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$ の 2 倍の密度における圧力として $2\rho_{\text{nuc}} = 3.5_{-1.7}^{+2.7} \times 10^{34} \text{dyn/cm}^2$ (90% 信頼区間) である。 γ 線が重力波のピークと 1.7 秒差で到着したことから重力波伝播速度の光速からのずれの割合は 1×10^{-15} 以下と制限された。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。**GW190412** 明らかに質量比の大きな BBH からの重力波で、重力波の高次モードの検出が試みられた。**GW190425** 2 番目に発見された BNS。**GW190521** 総質量が最大の BBH で、合体後の質量が $150M_{\odot}$ 程度と考えられる。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。**GW190814** 星形成のシナリオでは不可能とされる $2\text{--}5M_{\odot}$ 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。**GW200115**: 初めて高い精度で NSBH 合体として報告されたイベント。

報告されたおもな重力波 (2023 年 6 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 $M_{\text{全}} = M_1 + M_2$)、距離、波源特定精度 (平方度) $(\Delta\theta)^2$ 、シグナル・ノイズ比 (SNR) を示す。幅のある量は 90% の信頼区間。(種類ごとに日付順。BBH については、GW190521 と SNR が 17.3 より大きいもののみ。)

イベント (BBH)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{final}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW150914	$28.6_{-1.5}^{+1.7}$	0.86	$-0.01_{-0.13}^{+0.12}$	$63.1_{-3.0}^{+3.4}$	440_{-170}^{+150}	182	26
GW170814	$24.1_{-1.1}^{+1.4}$	0.82	$0.07_{-0.12}^{+0.12}$	$53.2_{-2.4}^{+3.2}$	600_{-220}^{+150}	92	17.7
GW190412	$13.3_{-0.5}^{+0.5}$	0.32	$0.21_{-0.13}^{+0.12}$	$35.6_{-4.5}^{+4.8}$	720_{-220}^{+240}	240	19.8
GW190521	$63.3_{-14.6}^{+19.6}$	0.58	$-0.14_{-0.45}^{+0.5}$	$147.4_{-16.0}^{+40.0}$	3310_{-1800}^{+2790}	1000	14.3
GW190521_074359	$32.8_{-2.8}^{+3.2}$	0.77	$0.1_{-0.13}^{+0.13}$	$72.6_{-5.4}^{+6.5}$	1080_{-530}^{+580}	470	25.9
GW190814	$6.11_{-0.05}^{+0.06}$	0.11	$0_{-0.07}^{+0.07}$	$25.7_{-1.3}^{+1.3}$	230_{-50}^{+40}	22	25.3
GW191109_010717	$47.5_{-7.5}^{+9.6}$	0.72	$0_{-0.31}^{+0.42}$	$107_{-15.0}^{+18.0}$	1290_{-650}^{+1130}	1600	17.3
GW191204_171526	$8.55_{-0.27}^{+0.38}$	0.69	$0.16_{-0.05}^{+0.08}$	$19.21_{-0.95}^{+1.79}$	650_{-250}^{+190}	350	17.5
GW191216_213338	$8.33_{-0.19}^{+0.22}$	0.64	$0.11_{-0.06}^{+0.13}$	$18.87_{-0.94}^{+2.8}$	340_{-130}^{+120}	490	18.6
GW200112_155838	$27.4_{-2.1}^{+2.6}$	0.79	$0.06_{-0.15}^{+0.15}$	$60.8_{-4.3}^{+5.3}$	1250_{-460}^{+430}	4300	19.8
GW200129_065458	$27.2_{-2.3}^{+2.1}$	0.84	$0.11_{-0.16}^{+0.11}$	$60.3_{-3.3}^{+4.0}$	900_{-380}^{+290}	130	26.8
GW200224_222234	$31.1_{-2.6}^{+3.2}$	0.81	$0.1_{-0.15}^{+0.15}$	$68.6_{-4.7}^{+6.6}$	1710_{-640}^{+490}	50.0	20
GW200311_115853	$26.6_{-2.0}^{+2.4}$	0.81	$-0.02_{-0.2}^{+0.16}$	$59_{-3.9}^{+4.8}$	1170_{-400}^{+280}	35	17.8
イベント (BNS)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{全}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW170817	$1.186_{-0.001}^{+0.001}$	0.87	$0_{-0.01}^{+0.02}$	–	$40_{-15.0}^{+7.0}$	16	33
GW190425	$1.44_{-0.02}^{+0.02}$	0.62	$0.07_{-0.05}^{+0.07}$	$3.4_{-0.1}^{+0.3}$	150_{-60}^{+80}	8700	12.4
イベント (NSBH)	$M_c (M_{\odot})$	質量比	χ_{eff}	$M_{\text{全}} (M_{\odot})$	距離 (Mpc)	$(\Delta\theta)^2$	SNR
GW190917_114630	$3.7_{-0.2}^{+0.2}$	0.22	$-0.08_{-0.43}^{+0.21}$	$11.6_{-2.9}^{+3.1}$	720_{-310}^{+300}	2100	8.3
GW200115_042309	$2.43_{-0.07}^{+0.05}$	0.24	$-0.15_{-0.42}^{+0.24}$	$7.2_{-1.7}^{+1.8}$	290_{-100}^{+150}	370	11.3

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 は赤方偏移 $z = 0.2$ 付近において $17.9\text{--}44/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 、BNS は $10\text{--}1700/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 、NSBH は $7.8\text{--}140/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ 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) $\Omega_{\text{GW}} < 6.0 \times 10^{-8}$ 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。

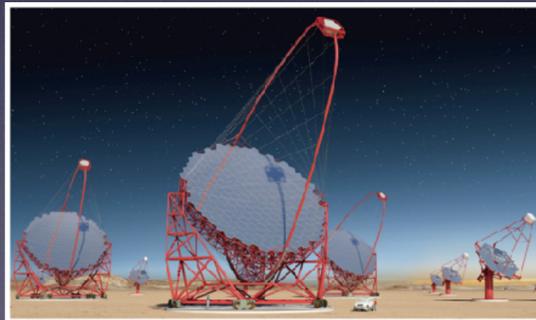
一般相対性理論の検証も行われ、数あるテストすべてで、一般相対性理論から得られる予言と観測されている重力波信号との間に矛盾は生じていない。今後、発見数が増すにつれて連星系の形成シナリオが明らかになることが期待される。将来的には、銀河系形成シナリオや初期宇宙の情報などにも、重力波観測から多くの知見がもたらされるであろう。

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							
				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^{-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	3×10^5	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	テレビ	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



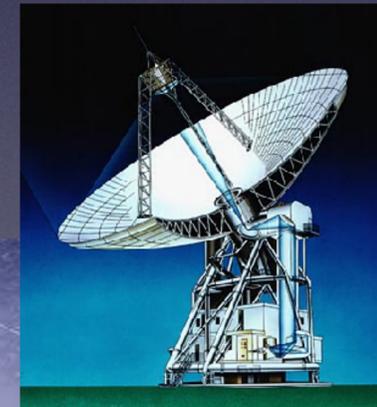
可視光



赤外



電波

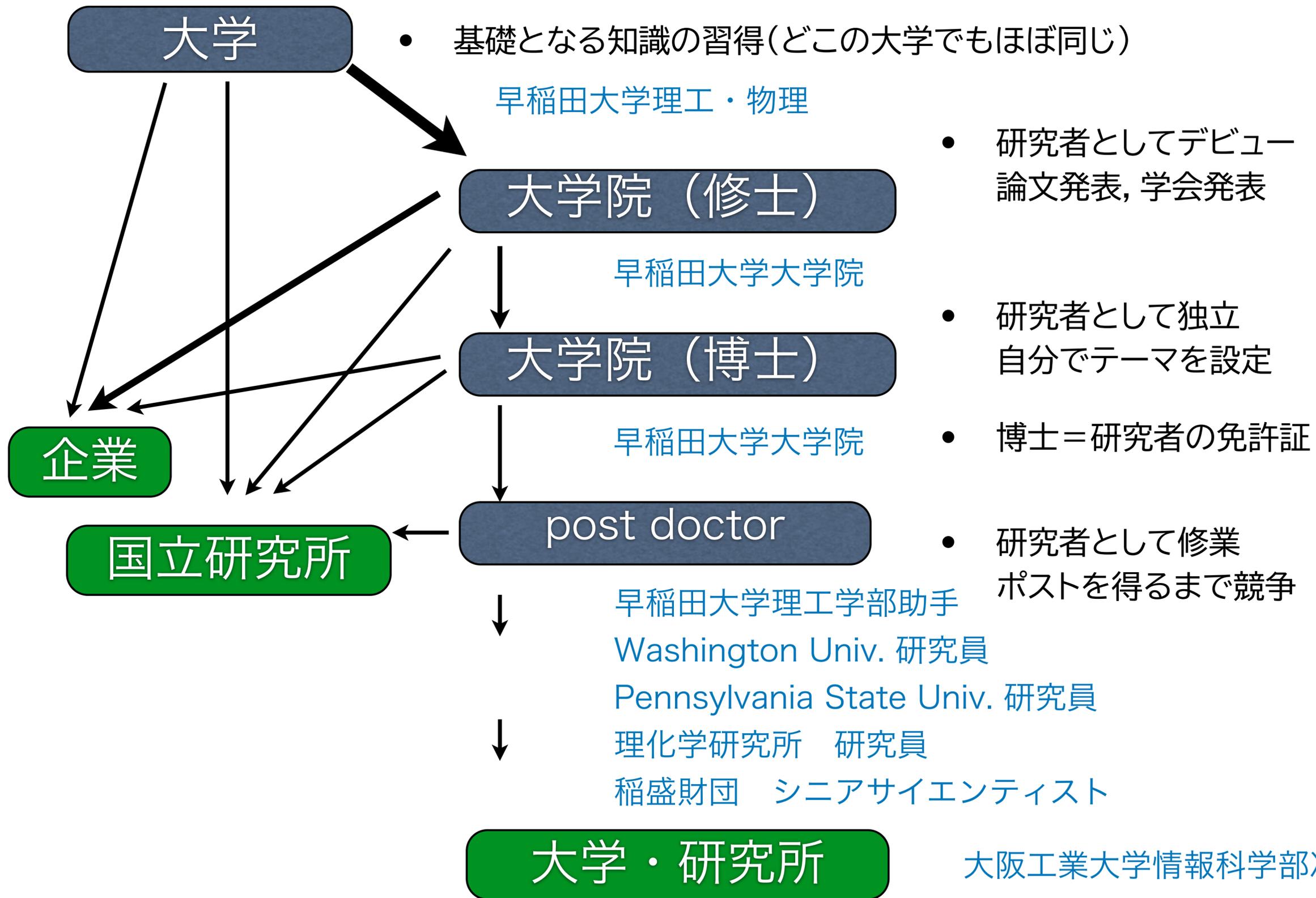


重力波

重力波天文学
はじめました



理系の研究者への道



大学院へ進む
その後、修業と研鑽を積む
ひたすら努力

職業を選ぶ

「好きなこと」を仕事にしよう。

現時点での「点が取れる・取れない」は無関係
「好きなこと」なら熱中できる。努力できる。
楽しく毎日が過ごせる。人生に納得できる。

高校時代, 自分を「発見」しよう。

何か1つ, 人一倍努力してみよう。

世の中に貢献する

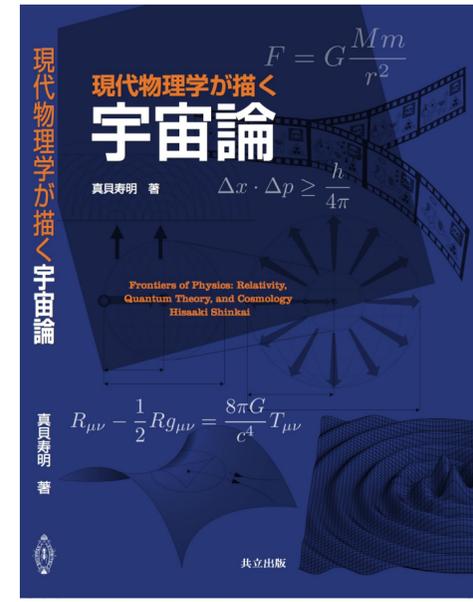
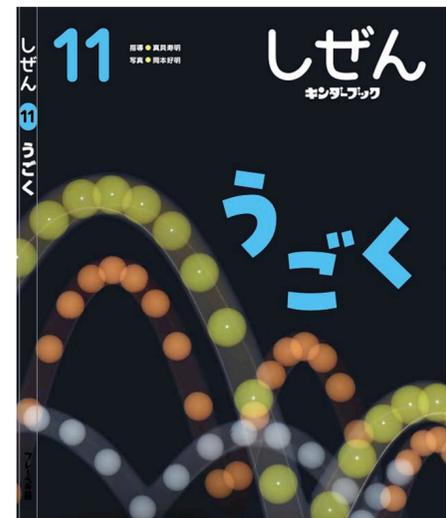
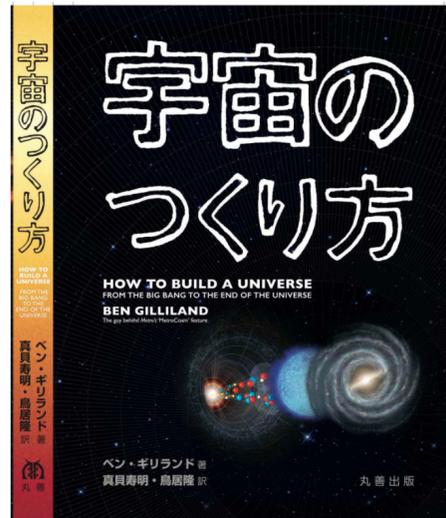
理論物理では「役立つかどうか」は二の次だが...

職業選択は自己実現の1つ

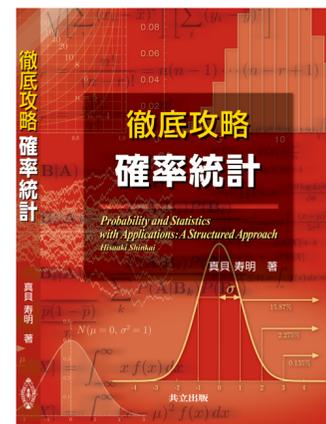
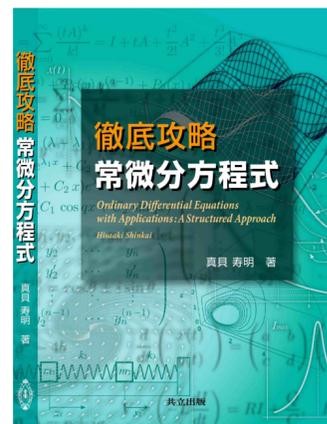
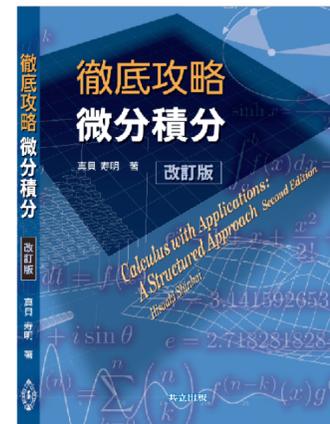
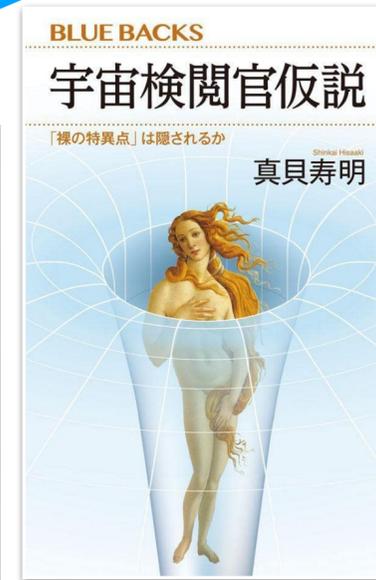
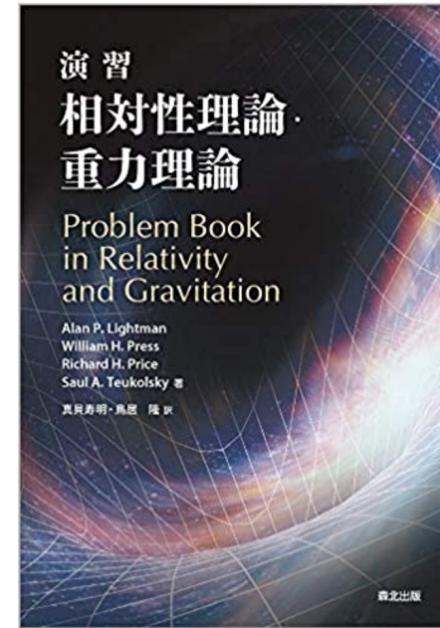
物理の面白さを伝えたい



易しい本

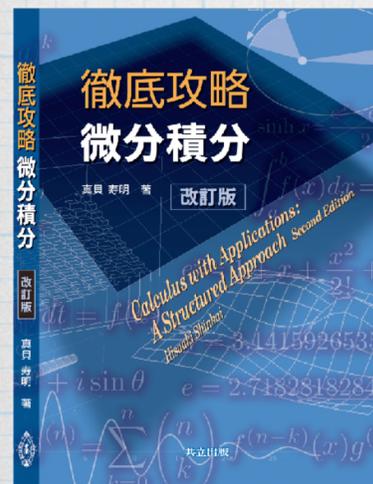
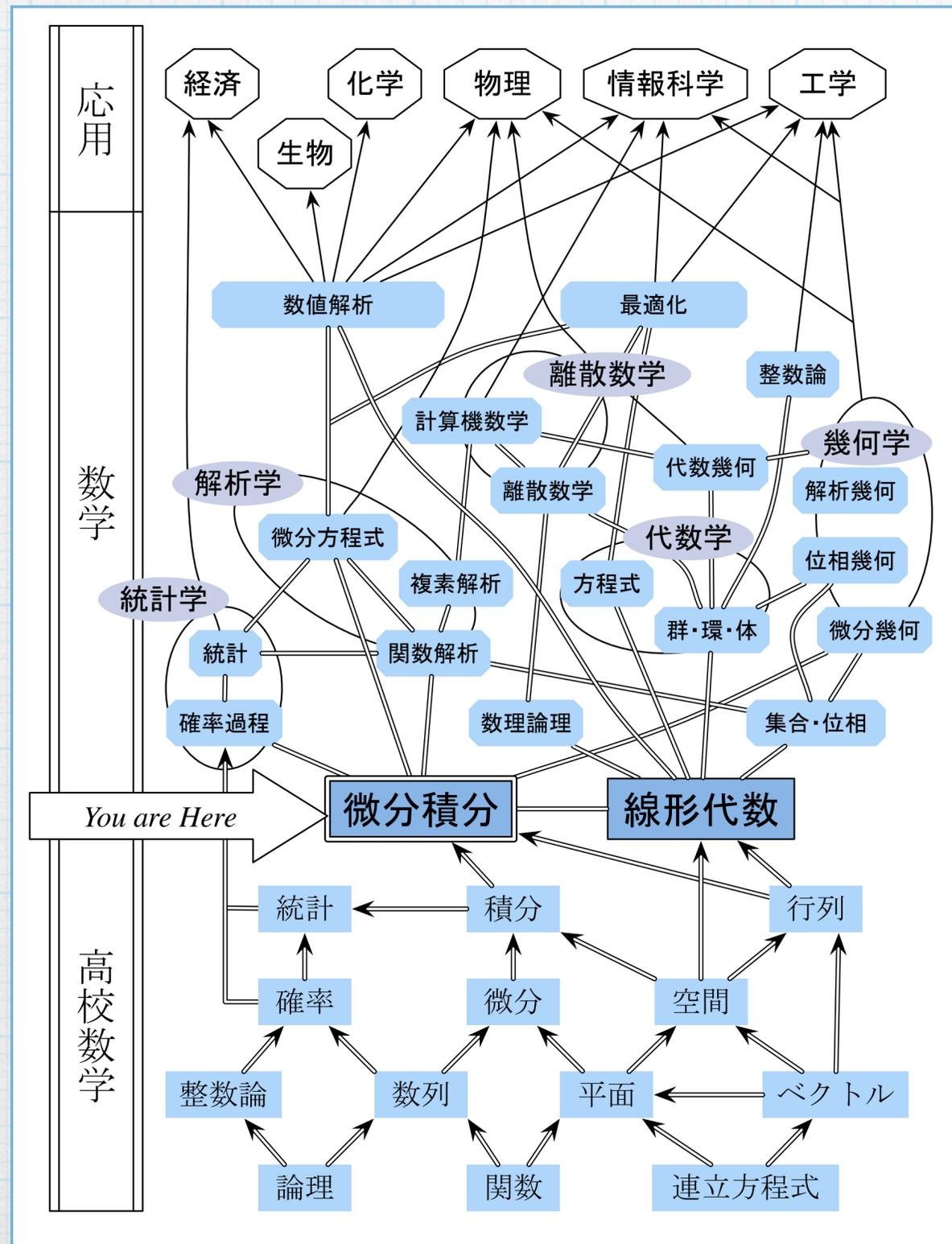


難しい本

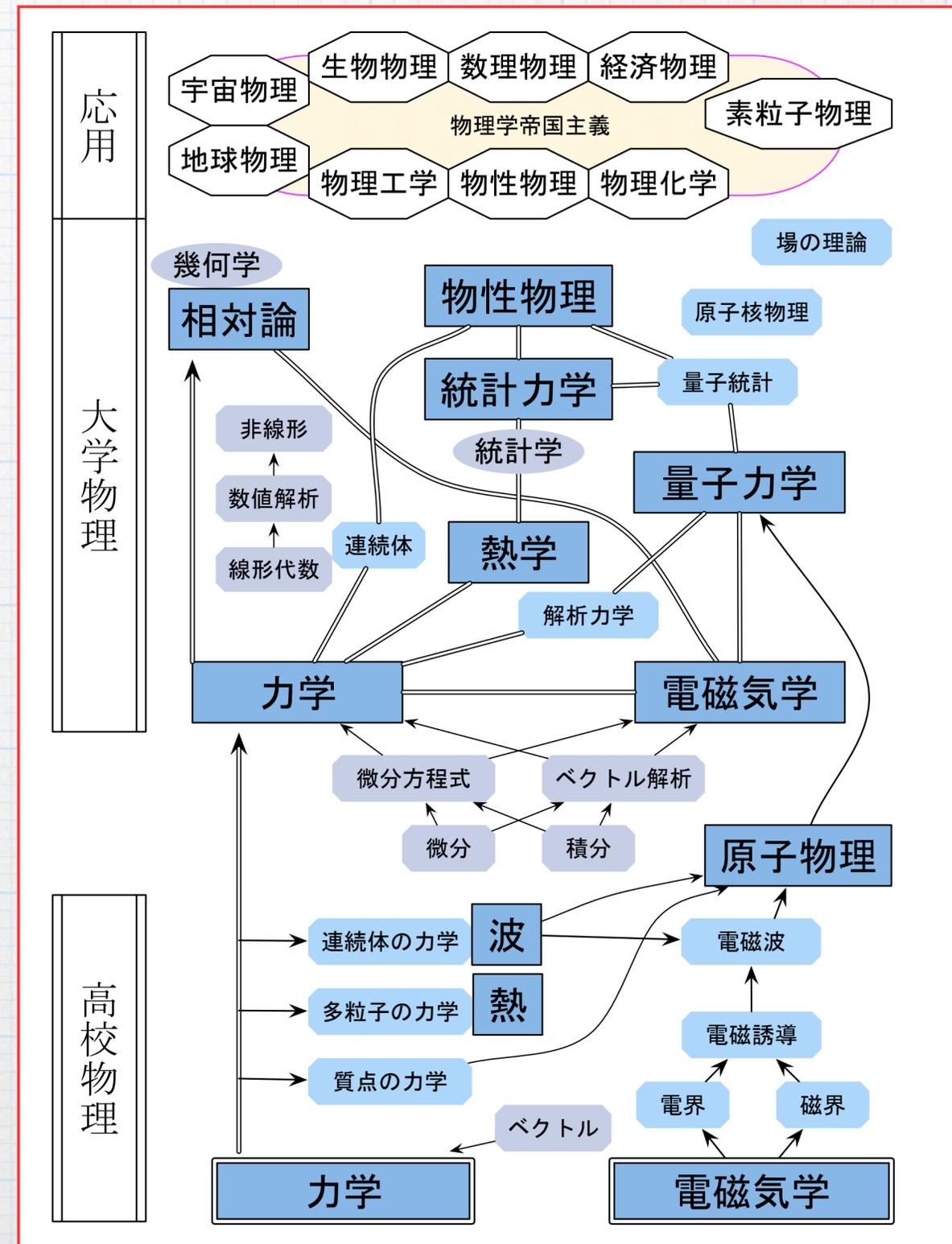


わかりやすく伝えたい

数学の世界



物理の世界



大阪工業大学のオリジナル入試問題をベースに、難しめの問題集を作りました。
図書館にリクエストをしてください。(2700円x3)

2023年11月4日発売

一歩進んだ
物理の理解 **1** 力学・熱・波

一歩進んだ 物理 の 理解

1
力学・熱・波

鳥居隆 真貝寿明・林正人 著

高校から大学初年度レベルの
物理学を例題形式で学ぶ

花火の軌跡や工事現場のくい打ち、ジェットコースター、ふうせん、水飲み鳥、楽器、虹、蜃気楼…

身のまわりの現象を物理法則を使って理解 朝倉書店

一歩進んだ
物理の理解 **2** 電磁気学・発展問題

一歩進んだ 物理 の 理解

2
電磁気学・発展問題

鳥居隆 真貝寿明・林正人 著

高校から大学初年度レベルの
物理学を例題形式で学ぶ

発光ダイオードやICカード、惑星探査機の軌道など身のまわりの現象や実社会のテーマを物理法則で理解

微分方程式など必要な数学も丁寧に補足 朝倉書店

一歩進んだ
物理の理解 **3** 原子・相対性理論

一歩進んだ 物理 の 理解

3
原子・相対性理論

鳥居隆 真貝寿明・林正人 著

高校から大学初年度レベルの
物理学を例題形式で学ぶ

地球温暖化、超音波、GPS、重力波など身のまわりの現象や実社会のテーマを物理法則を使って理解

式を解くだけでなく、数値計算手法も紹介 朝倉書店

職業を選ぶ

「好きなこと」を仕事にしよう。

現時点での「点が取れる・取れない」は無関係
「好きなこと」なら熱中できる。努力できる。
楽しく毎日が過ごせる。人生に納得できる。

高校時代, 自分を「発見」しよう。

何か1つ, 人一倍努力してみよう。

世の中に貢献する

理論物理では「役立つかどうか」は二の次だが...

職業選択は自己実現の1つ