

一般相対性理論110年の概観

依頼された内容 「一般相対性理論の歴史と重力波を」

このスライドpdf

202507_SummerSchool.pdf



論文選 16ページ

一般相対性理論110年論文選.pdf



Contents

ブラックホール研究の歴史

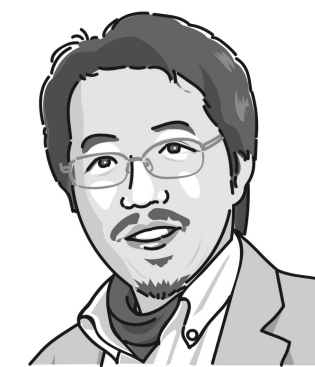
宇宙論研究の歴史

重力波研究の歴史

相対論検証研究の歴史

...

若い人へのメッセージ



真貝寿明(大阪工業大学 情報科学部)

hisaaki.shinkai@oit.ac.jp

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



- 1995年 早稲田大学 前田恵一研究室の第1期学生として博士学位取得
インフレーション宇宙モデル (非一様時空)
- 1994年 早稲田大学理工学部助手
数値相対論の重力波抽出方法, Ashtekar変数を用いた数値相対論
- 1996年 ワシントン大学 (米国セントルイス) 博士研究員 ホストはCliff. Will & WaiMo Suen
連星中性子星シミュレーションの初期値問題, ボゾンスター時間発展
- 1999年 ペンシルバニア州立大学 (米国) 日本学術振興会海外特別研究員 ホストはAbhay Ashtekar
数値相対論の定式化問題, 5次元ブラックホール
- 2001年 理化学研究所, 基礎科学特別研究員, ホストは戎崎俊一
アインシュタイン方程式の双曲形式の構成, ワームホール時間発展, 重力波統計と中間質量BH
- 2004年 稲盛財団に就職
データベース構築技術
- 2006年 大阪工業大学 情報科学部



2006年 大阪工業大学 情報科学部

特異点形成問題, ワームホール解 (高次元)

Gauss-Bonne時空ダイナミクス

重力波統計とSupermassive BH形成モデル

光格子時計を用いた相対性理論検証, 重力波観測法提案

重力波データ解析での新手法提案 (自己回帰モデル法, 独立成分分析法)

天文文化学の創設

江戸末期・明治初期の西洋物理学受容

世界地図・星図の系譜

中国星図の系譜 など

2015年 KAGRAコラボレーション (PIは梶田隆章氏) に入れてもらう

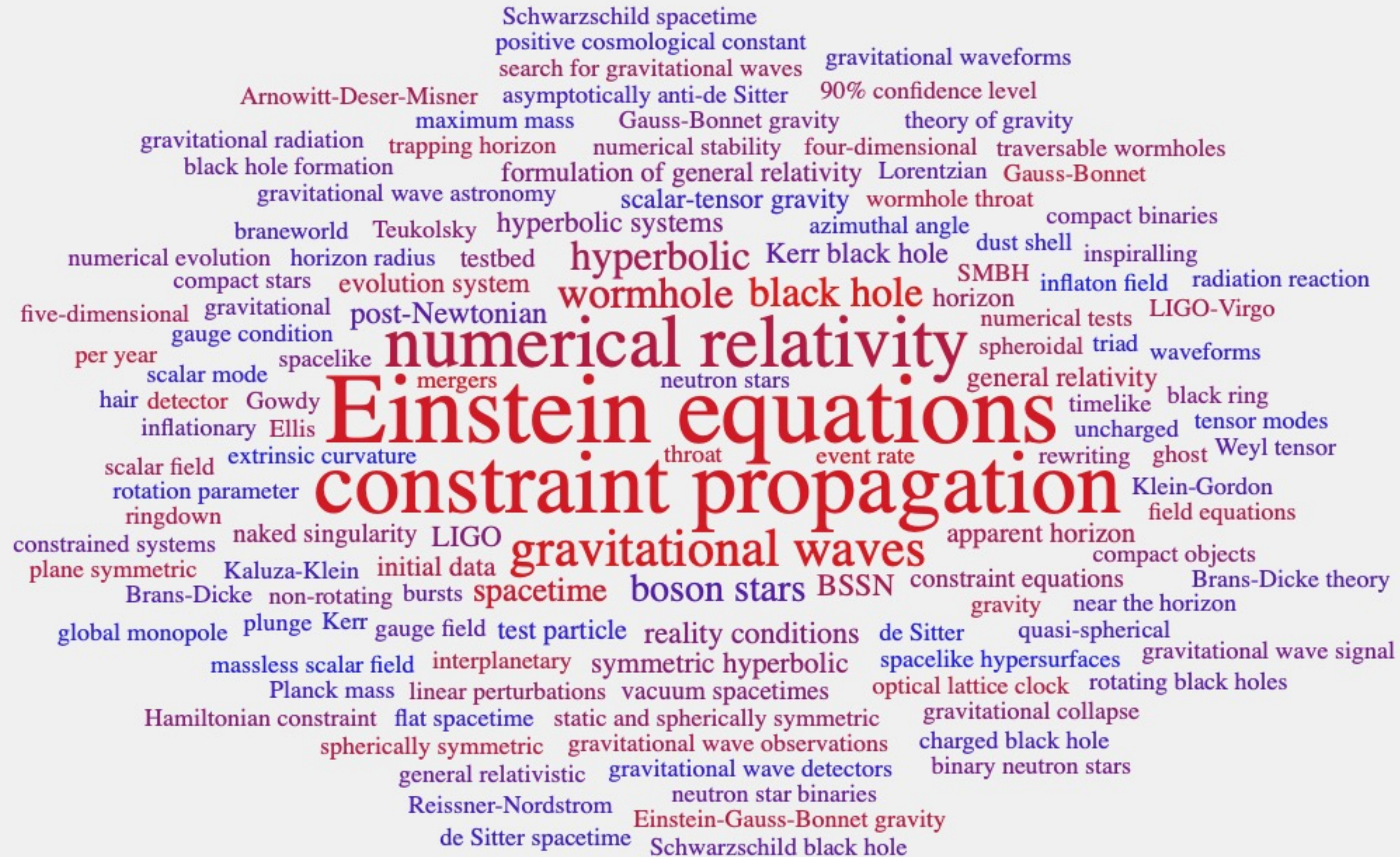
2017-21 KAGRA研究者代表 として, 組織構築・LIGO-Virgoとの共同観測調印など

現在は, LVK education, public-outreach 統括





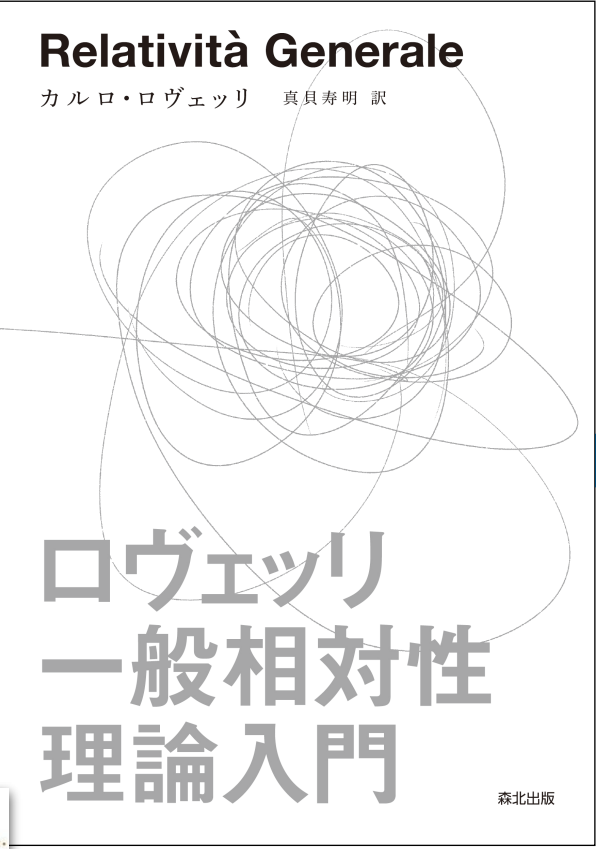
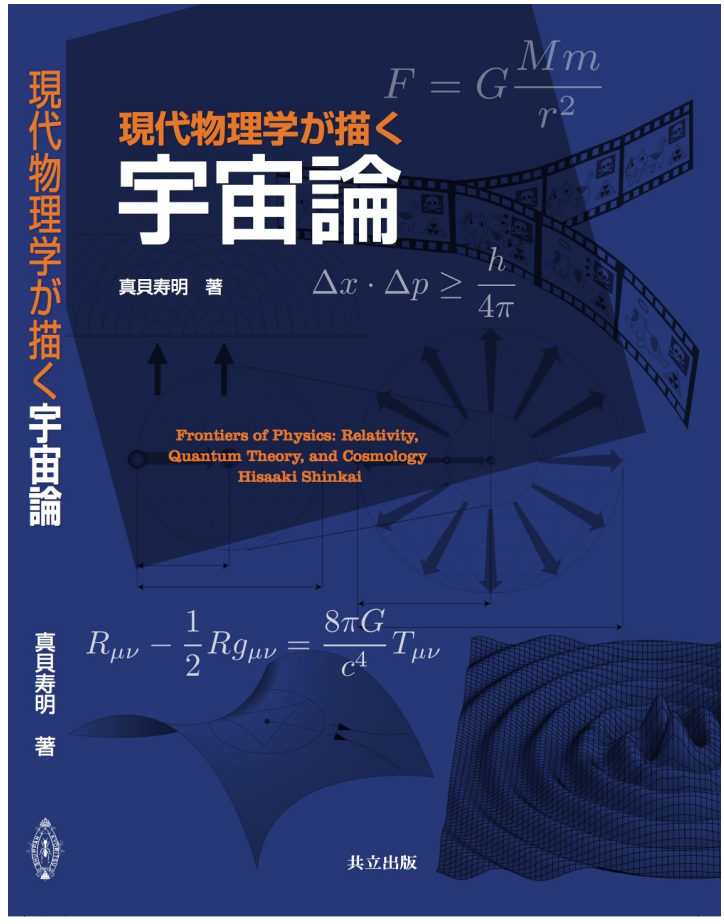
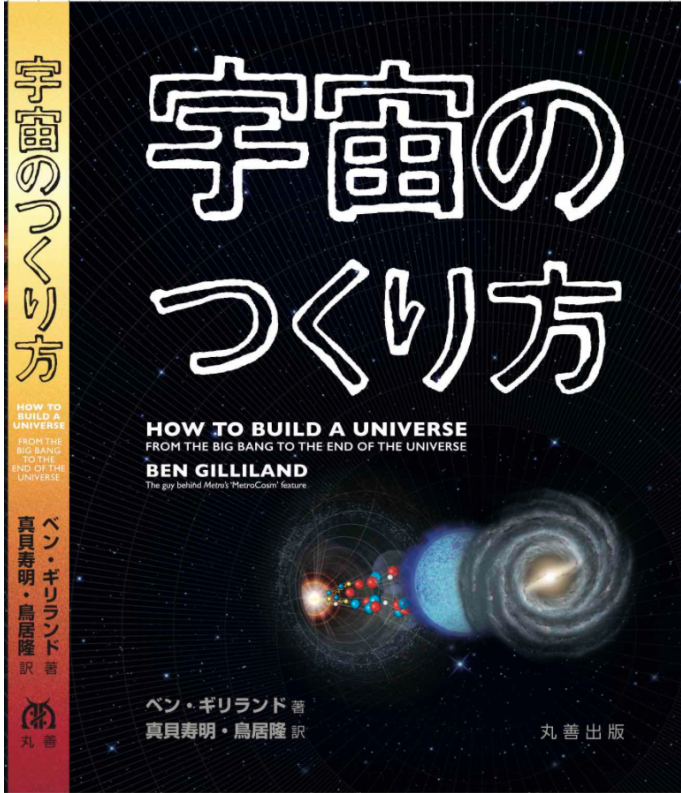
<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/>



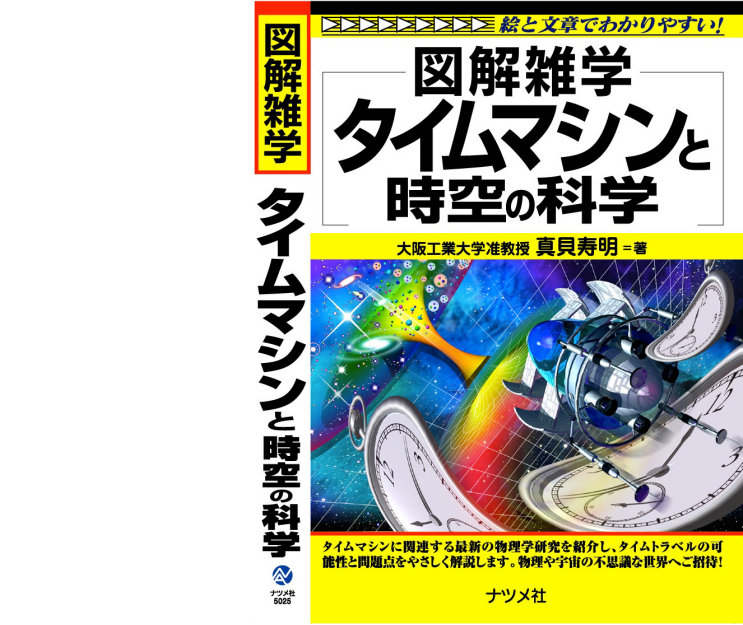
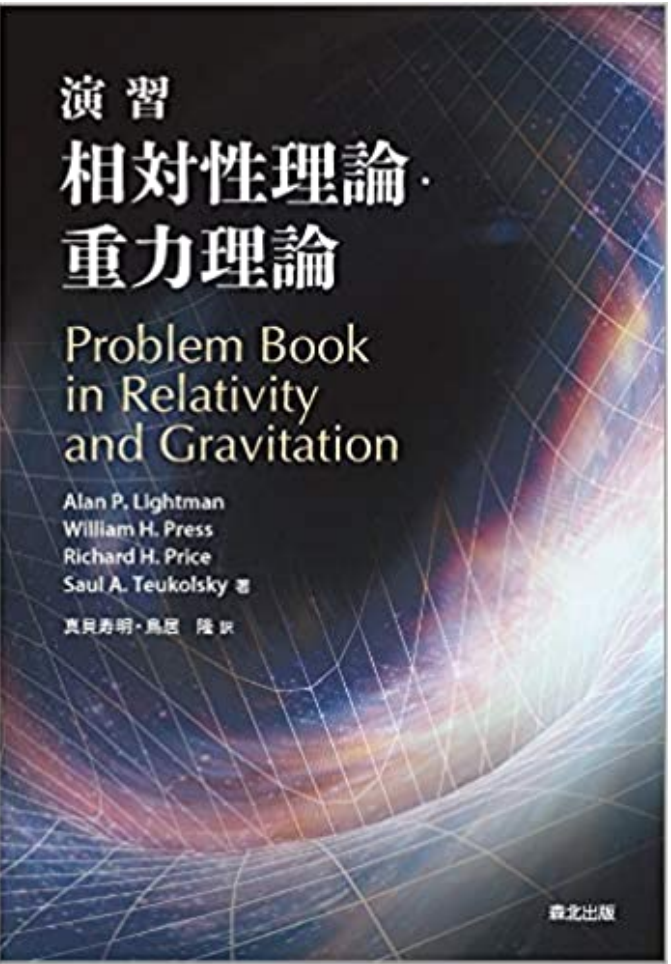
LVKpaper 除く

Word Cloudで、論文の概要のワードを抽出したもの

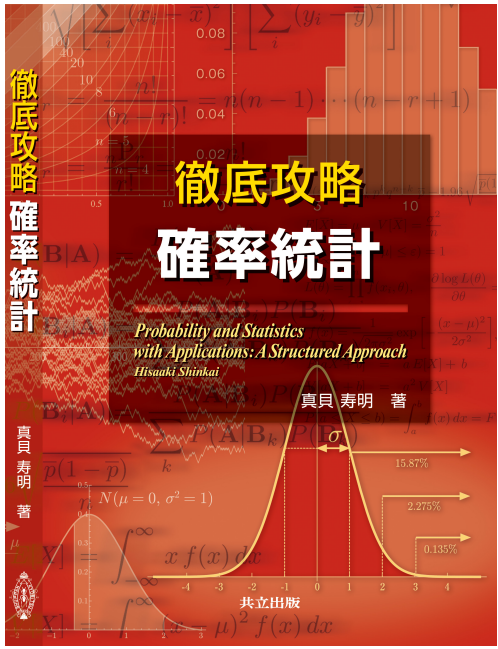
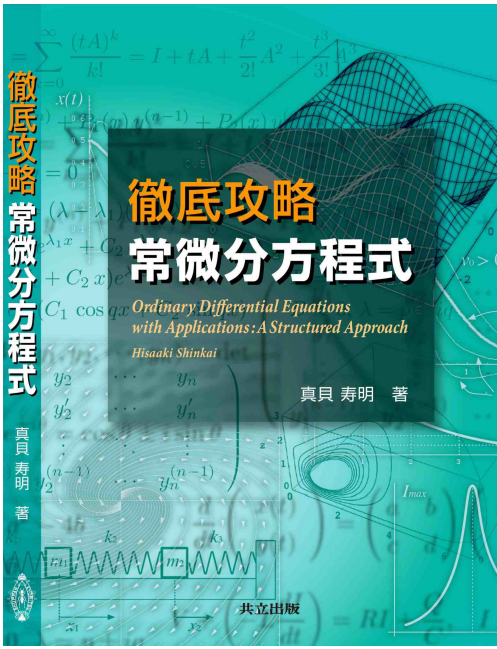
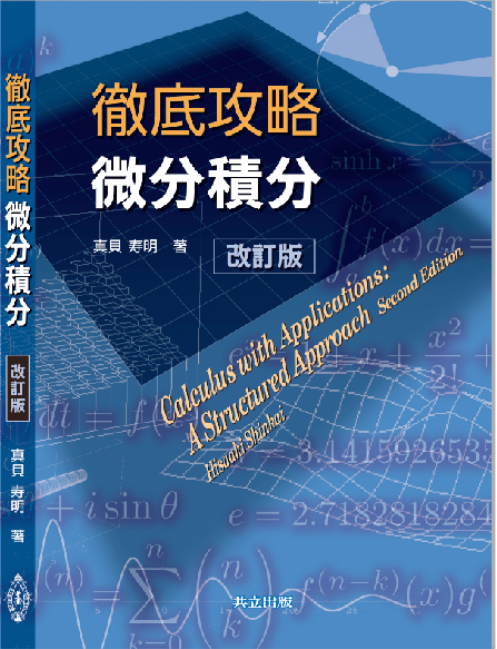
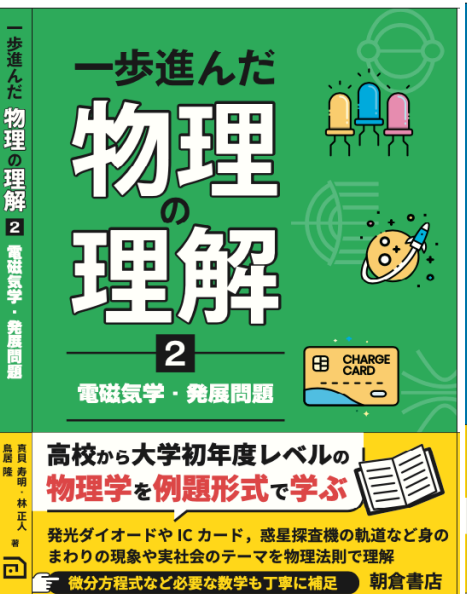
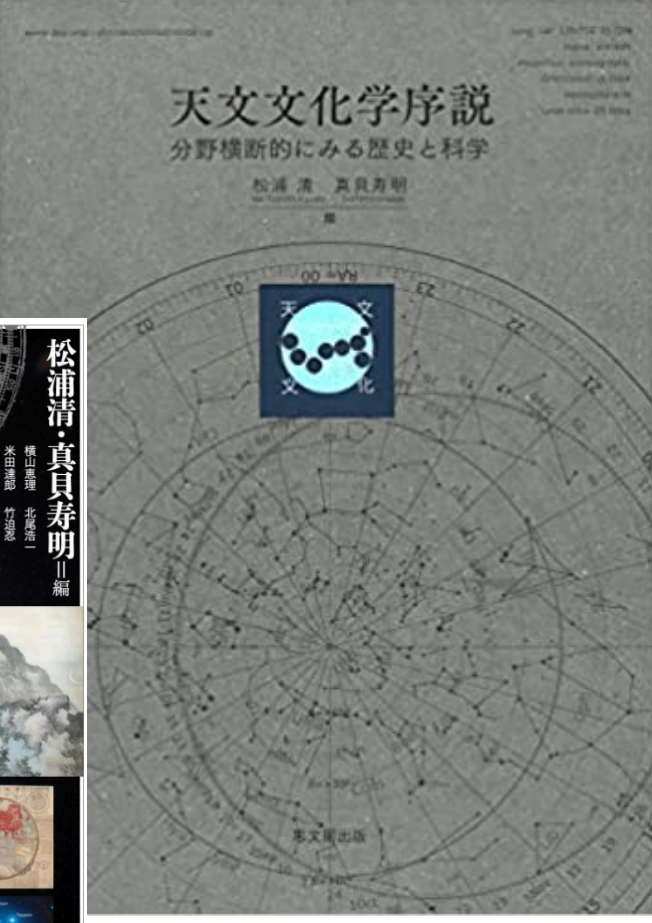
物理の面白さを伝えたい



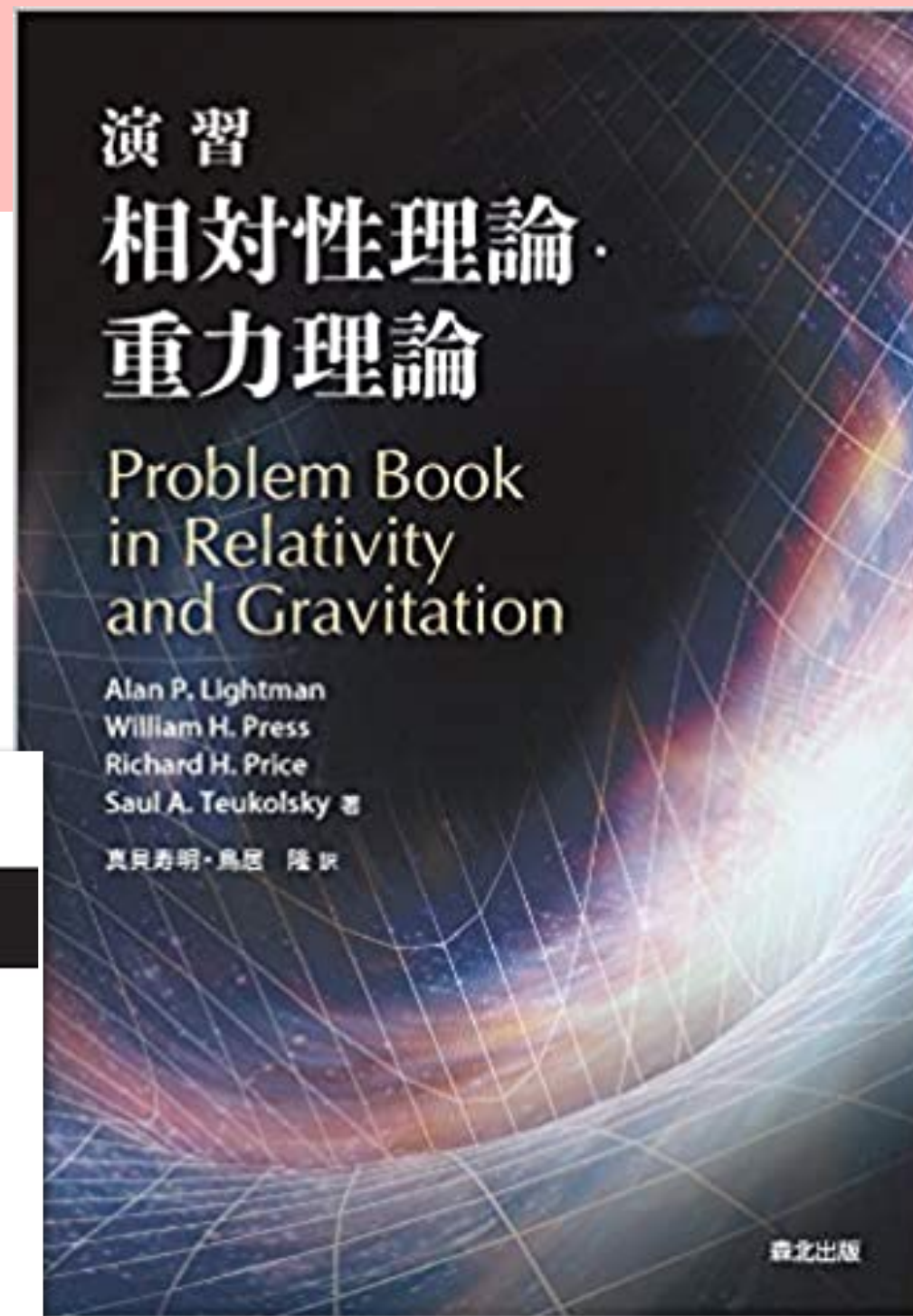
難しい本



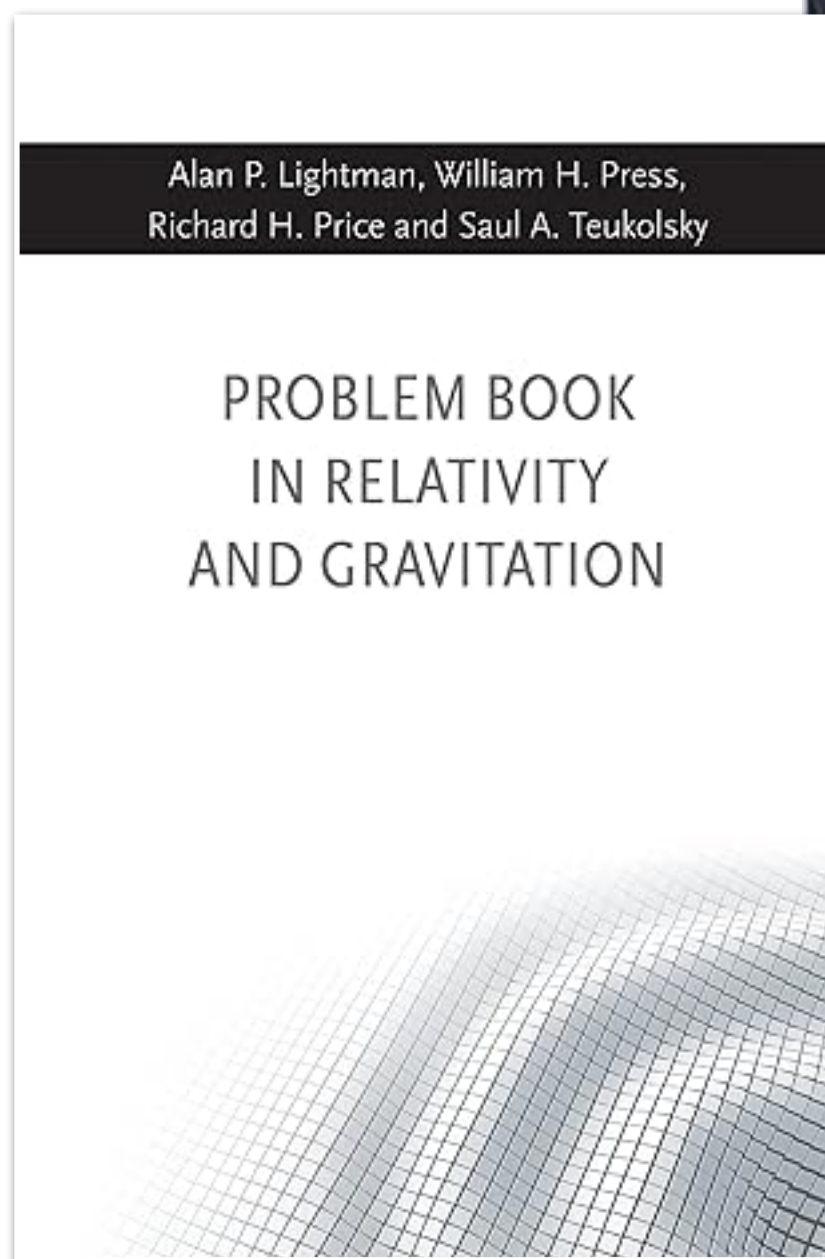
易しい本



わかりやすく伝えたい



真貝，鳥居訳
森北出版，2020



[Alan P. Lightman](#) (著), [William H. Press](#) (著),
[Richard H. Price](#) (著), [Saul A. Teukolsky](#) (著)

Princeton University Press,
1974

最近の一般相対性理論研究の進展

訳者 真貝寿明・鳥居隆

本書の出版は 1975 年である．以来，一般相対性理論の唯一の問題集として再販を重ね，多くの学生・研究者に親しまれてきた．本書の扱う問題は，数学的なものが中心となっているので，どの問題も古びることなく，40 年以上経った今でも十分に通用する．しかし，学習する者にとっては，最近の進展についての概観がある方が望ましいとも考えられる．そこで，訳者がいくつかのトピックを選び，最近の進展について補遺の形で若干の解説をすることにする．

A.1 ブラックホール研究の進展

A.2 宇宙論研究の進展

A.3 重力波研究の進展

A.4 重力理論検証の進展

A.5 拡張重力理論の進展

一般相対性理論誕生の頃（1915年11月）

重力場の方程式の導出は、紆余曲折し、アインシュタイン自身も最終的な式に達したのは、直前だった。1915年11月は1週間おきに学士院で途中経過を発表し、その翌週には報告として論文を書き、自宅にこもりきりで計算を続けていた。というのも、10月になって、それまでの考えが間違っていたことに気がついたからだ。

（中略）

1915年**11月4日の論文**では、座標系に制限をおいた上で、重力場の方程式を得た。

翌週**11日の論文**ではこの座標条件を出発点とすることを主張する（2週間後の論文では撤回する）。次週

18日の論文では、水星の近日点移動の値が（以前得た値の倍の）100年間に43秒角になるという正しい値を得た（当時観測から知られていた値は45秒角 $\pm$ 5秒角だった）。この値を得たときには「心臓の鼓動 (palpitation)を感じた」と述懐している。また、この論文には半ページだけ使って「太陽のそばを通過する光は、重力によって、（以前得た値の倍の）1.7秒角だけ湾曲する」とも述べている。

（中略）

アインシュタインは演繹的方法で得られた重力場の方程式を**25日に投稿して受理される**。アインシュタインの論文は、12月2日に出版された。

1915年の論文『水星の近日点の移動に対する一般相対性理論による説明』
(S.B. Preuss. Akad. Wiss., 831-839)

1916年3月20日発行の論文は「まとめ」論文。
『一般相対性理論の基礎』（Annalen der Physik (Germany), 49, 769-822）



このエキサイティングな数週間にアインシュタインとヒルベルトとの往復書簡が残されている。アインシュタインは、11月7日と12日に、新たに重力場の方程式を得たことをヒルベルトに伝えた。これに対して、13日にヒルベルトは「あなたの結果は私が得た結果とは違う。電磁場と重力場を合わせた理論が得られた。16日にゲッティンゲンに来てくれれば説明する」と返事を出している。アインシュタインは15日、「胃炎なので行かない。論文を送ってほしい」と返信。16日に講演したヒルベルトはすぐにアインシュタインに論文原稿を送った。

ヒルベルトが導いた重力場の方程式は『変分原理』と呼ばれる手法で、アインシュタインとは全く異なるアプローチだった。（中略）

18日、アインシュタインは「あなたの式は私と同じ式である。この数週間に、共変性をみだし、かつニュートン理論を極限としてもつ式を見つけた。水星の近日点移動の値も得られた」と返事を出している。実際のところ、ヒルベルトの出した式は、現在知られているアインシュタインの重力場の方程式（アインシュタイン方程式）と同じである。しかも、変分原理による導出は、まさに数学的なお墨付きともいえる話であった。11日の時点で議論している論文では座標系を制限していたが、その場合にはゼロになって消えて出てこない項もヒルベルトの論文原稿には書かれていた。アインシュタインは心穏やかでなかったにちがいない。

ヒルベルトは11月20日に論文を投稿して受理された。アインシュタインは演繹的方法で得られた重力場の方程式を25日に投稿して受理される。アインシュタインの論文は、12月2日に出版された。ヒルベルトの論文が出版されたのは、翌年3月である。

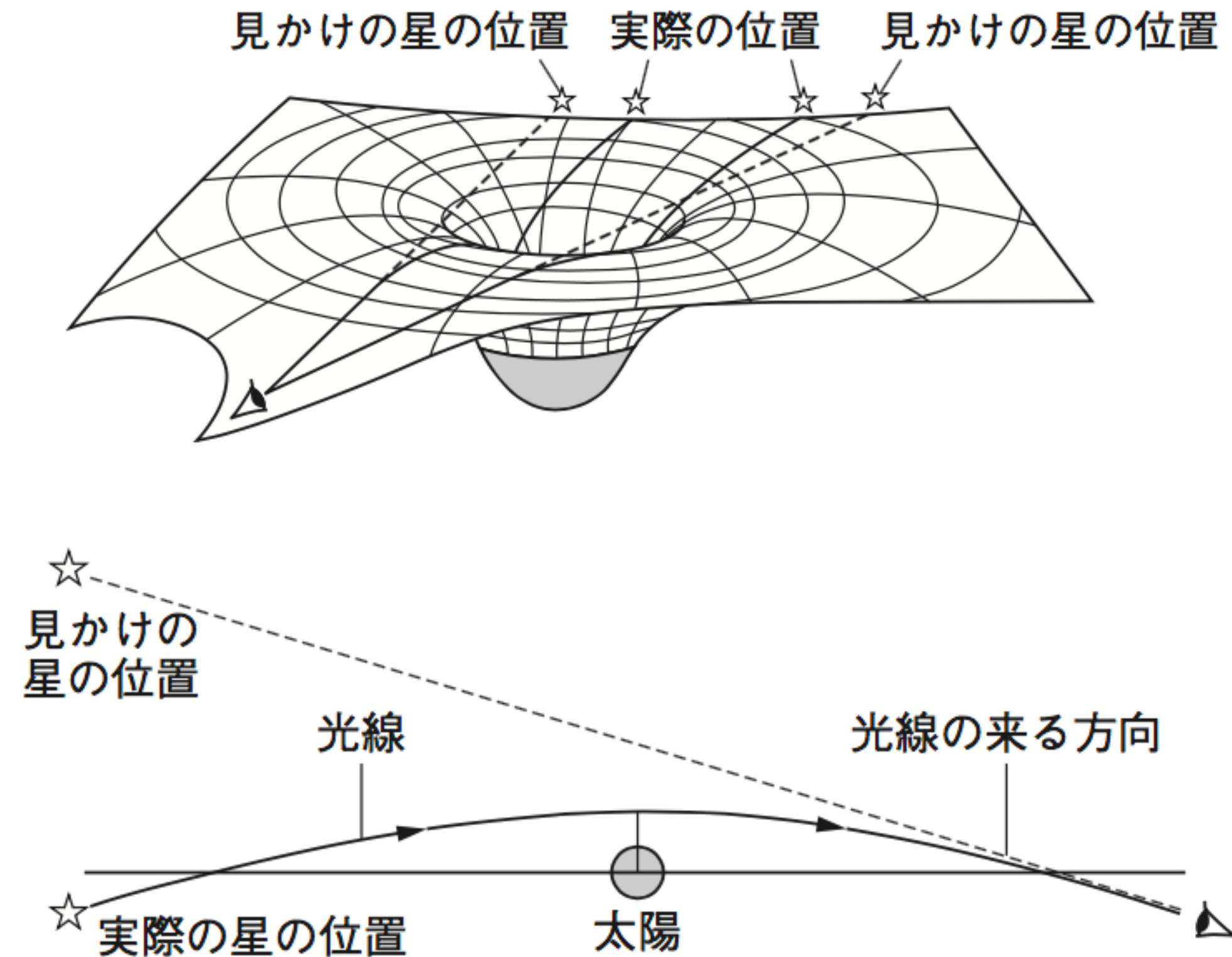


ヒルベルトによる変分原理をつかった重力場方程式の導出 との先陣争い

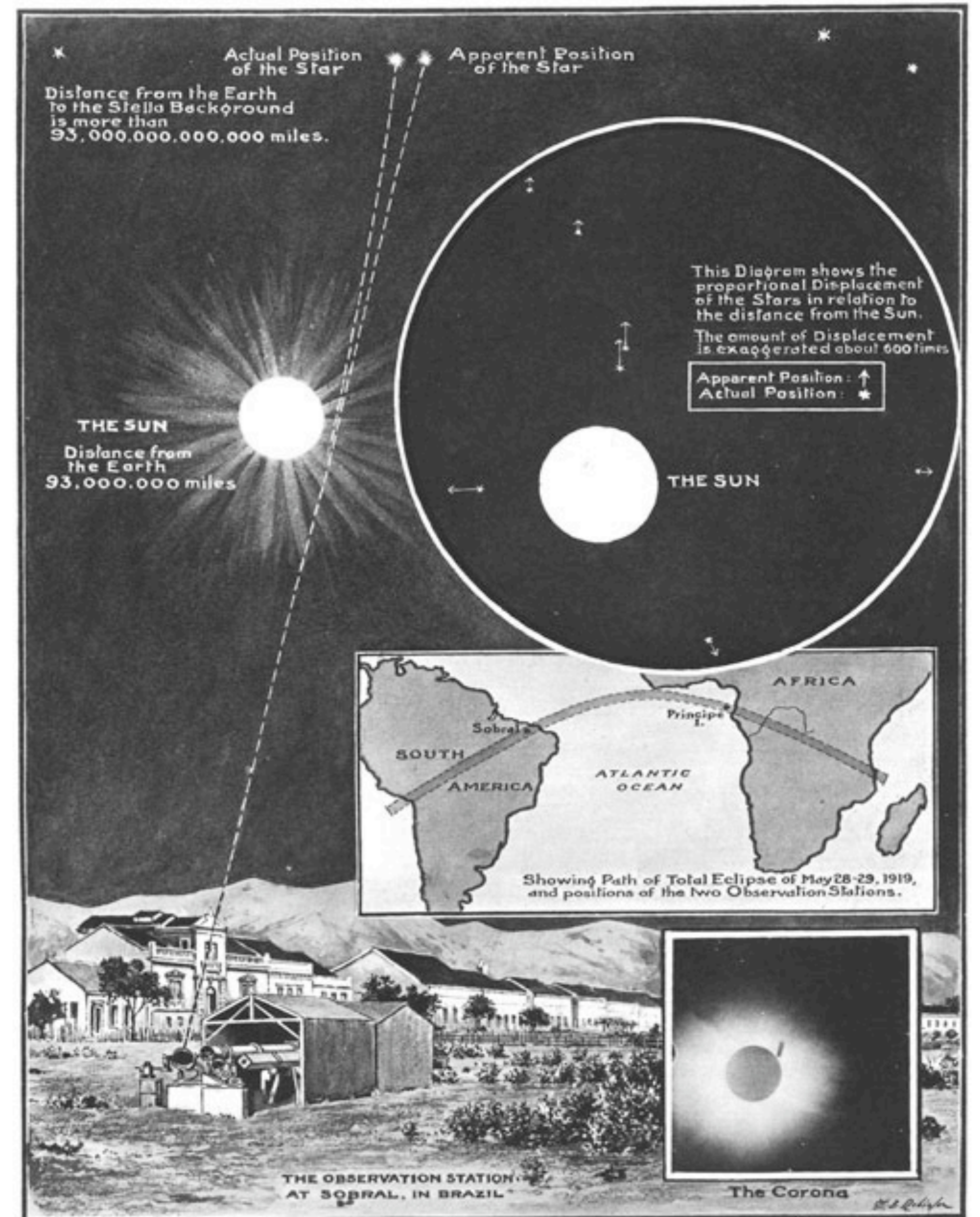
▶ のちに「不幸な過去」として仲直り

重力レンズ効果 ▶▶▶ 1919年の皆既日食で確認

- 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 ▶▶▶ 1919年の皆既日食で確認

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる

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

Coverage in the (more excitable) New York Times.

**LIGHTS ALL ASKEW
IN THE HEAVENS**

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

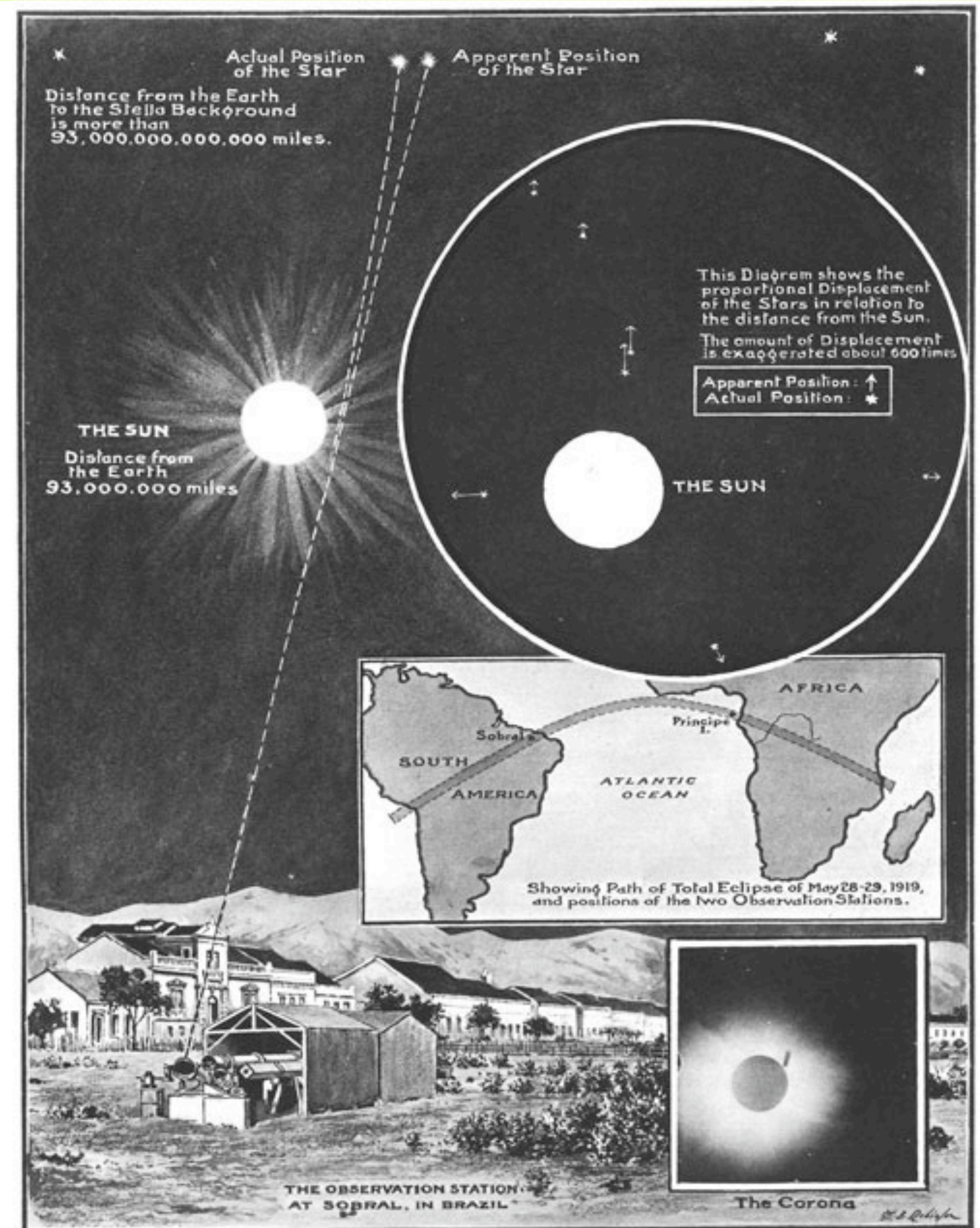
EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

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

A BOOK FOR 12 WISE MEN

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

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



「一般相対性理論を理解しているのは世界に3人と言われているが？」



Arthur Stanley Eddington
(1882–1944)

He was an early advocate of Einstein's General Relativity, and an interesting anecdote well illustrates his humour and personal intellectual investment: Ludwig Silberstein, a physicist who thought of himself as an expert on relativity, approached Eddington at the Royal Society's (6 November) 1919 meeting where he had defended Einstein's Relativity with his Brazil-Principe Solar Eclipse calculations with some degree of scepticism and ruefully charged Arthur as one who claimed to be one of three men who actually understood the theory (Silberstein, of course, was including himself and Einstein as the other two). When Eddington refrained from replying, he insisted Arthur not be "so shy", whereupon Eddington replied,

"Oh, no! I was wondering who the third one might be!"

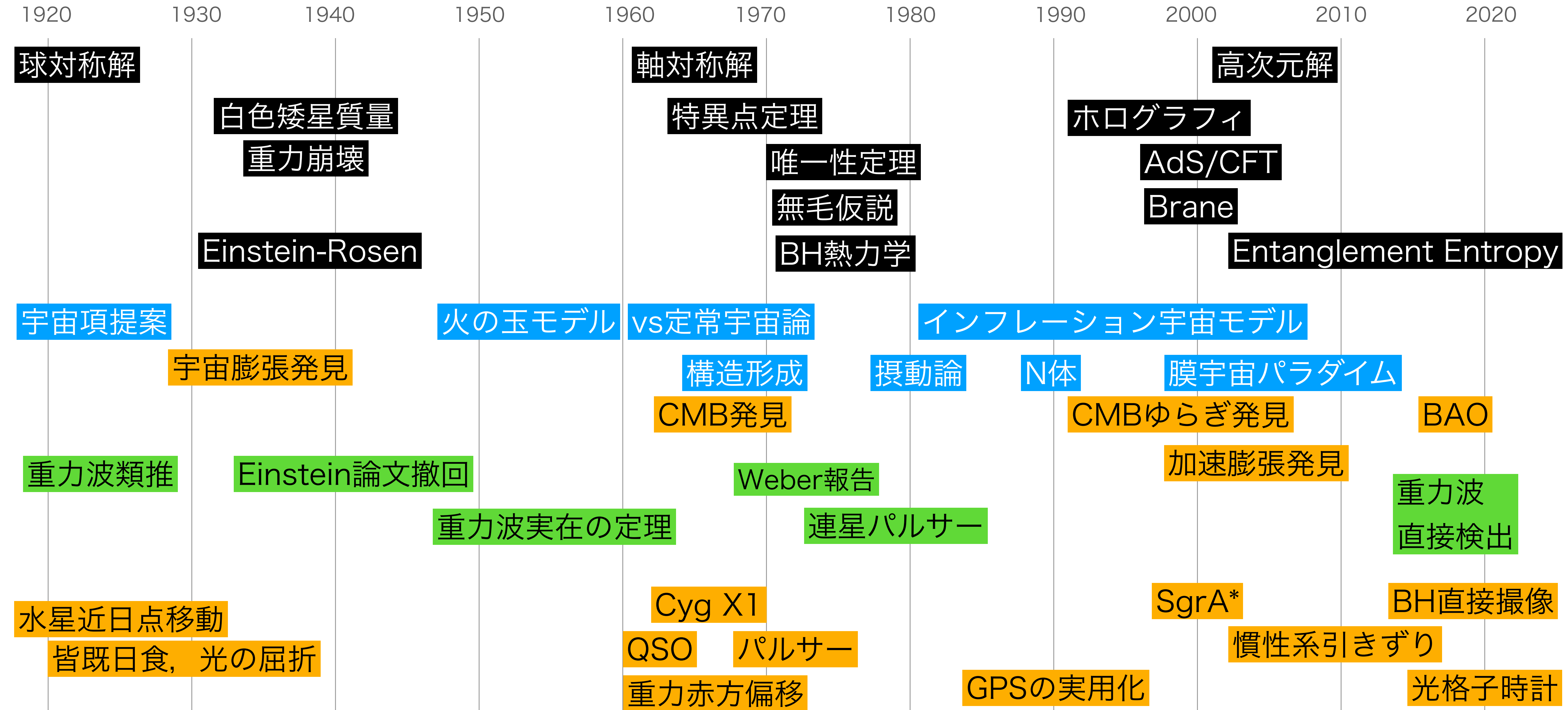
Silberstein 「一般相対性理論を理解しているのは世界に3人と言われているが？」

Eddington 「...」

Silberstein 「そう謙遜なさないで」

Eddington 「いや, 誰が3人目かを考えていたんです」

一般相対性理論の110年



アインシュタインも一般相対性理論の結論に右往左往する

- 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)

X

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

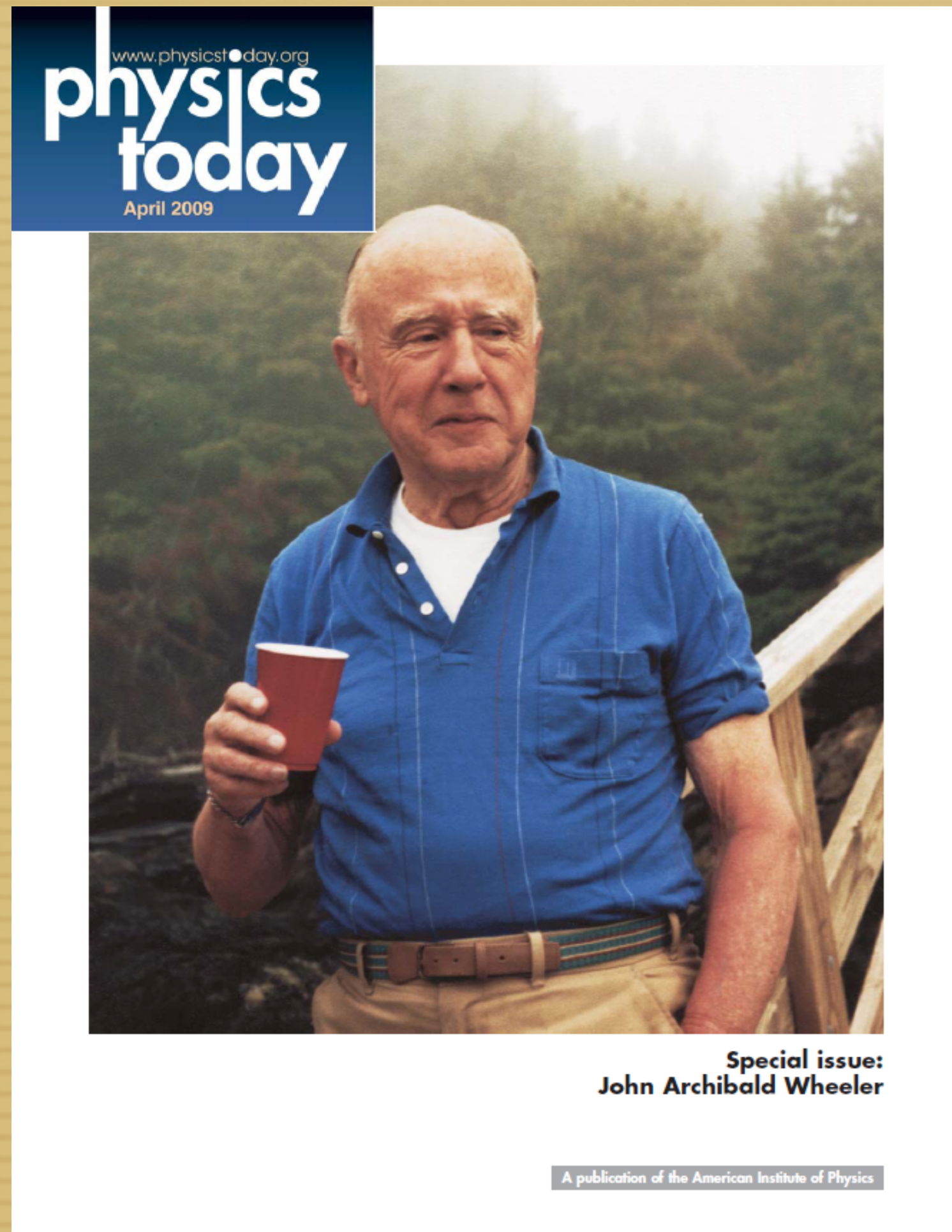
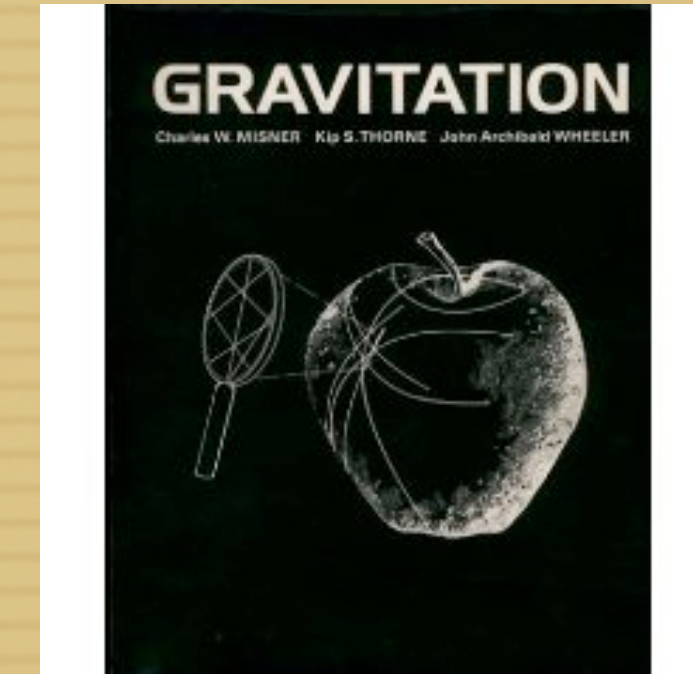
X

一般相対性理論は日常生活に影響することはない



John A. Wheeler

(July 9, 1911 – April 13, 2008)



Physics Today, 2009-4



Wheelerの育てた人材

- Richard Feynman (PhD 1942)
- Hugh Everett (PhD 1956)
- Charles Misner (PhD 1957)
- David Sharp (AB 1960)
- Richard Lindquist (PhD 1962)
- Kip Thorne (PhD 1965)
- Robert Geroch (PhD 1967)
- Yavuz Nutku (PhD 1969)
- Wojciech Zurek (PhD 1979)
- William Unruh (PhD 1971)
- Demetrios Christodoulou (PhD 1971)
- Robert Wald (PhD 1972)
- Jacob Bekenstein (PhD 1972)
- Warner A. Miller (PhD 1986)

.....

Wheelerの創った言葉

S-Matrix,
Sum over histories,
Planck length,
Planck time,
Wormhole,
Black Hole,
Geon,
Quantum foam,
A BH has no hair,
law without law,
it from bit, ...

Box 1. Wheeler coinages

John Wheeler believed that the names given to concepts or to descriptions of an idea strongly influence how we think about concepts and ideas, even how we work on them and build on them. In short, the word inspires the deed. Accordingly, Wheeler spent many hours (often soaking in a warm bathtub) searching for the most apt terms. Here, in rough chronological order, are some of his coinages:

S-Matrix the scattering operator in quantum mechanics

Sum over histories Richard Feynman's path-integral method

Moderator the material that slows neutrons in a nuclear reactor

Stellarator a plasma magnetic confinement device

Planck length, Planck time the scales at which quantum gravity dominates

Geon an object made from waves bound together by their energy's gravity

Mass without mass gravitating object containing no massive particles

Charge without charge wormholes as sources and sinks of electric field lines

Wormhole a topological "handle" in the geometry of curved space

Quantum foam quantum fluctuations in the geometry of spacetime

Black hole* the object formed by implosion of a sufficiently massive star

A black hole has no hair a classical black hole's properties are determined by only its mass, spin angular momentum, and charge

Space tells matter how to move and matter tells space how to curve the summarized content of general relativity

Law without law** emergence of law from random processes

It from bit** a physical world built of information units

Mutability** susceptibility of physical law to evolution and change

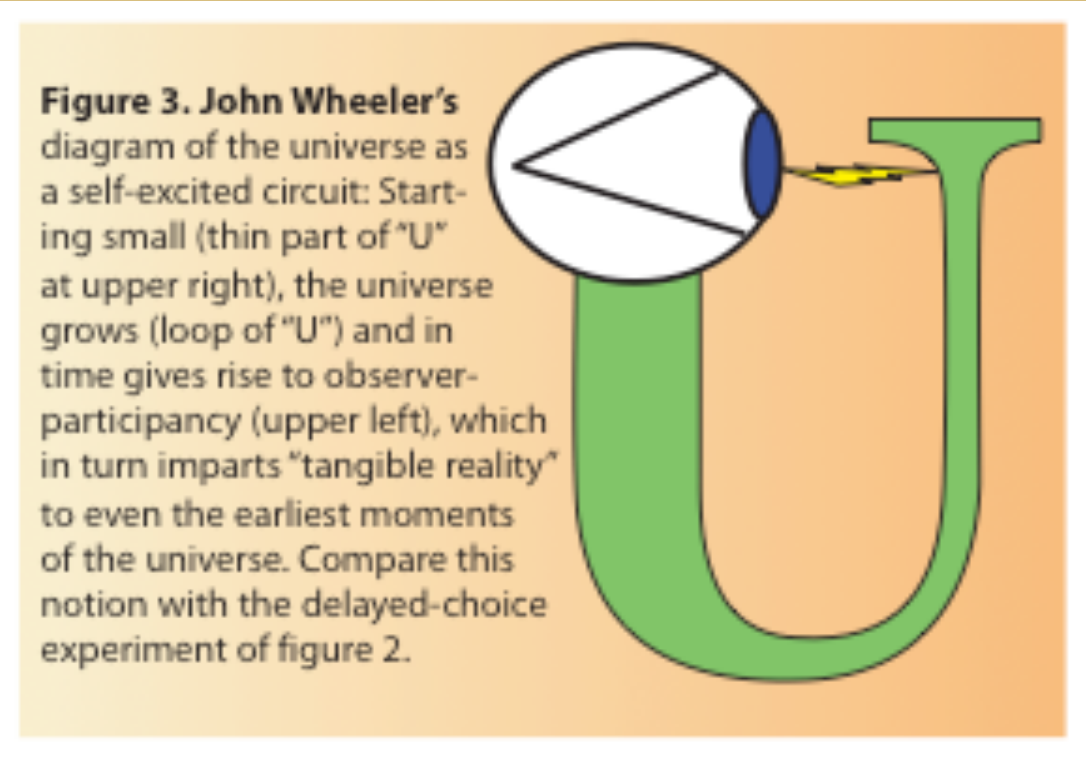
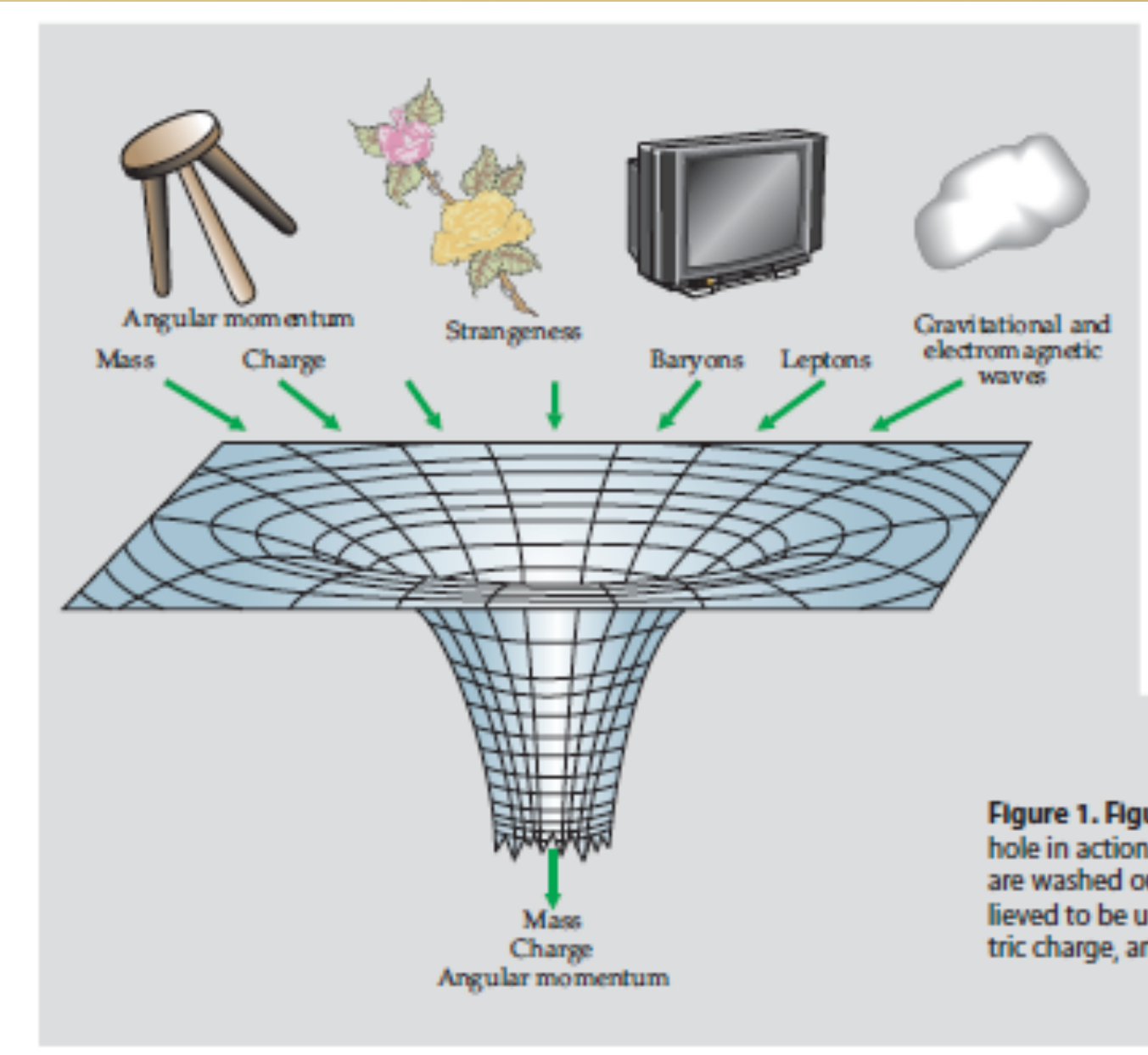
Observer-participancy** influence of the observer on reality

The universe as a self-excited circuit** shaping the past from the present

A single quantum cannot be cloned a theorem that puts a limit on quantum amplifiers

* The phrase "black hole" appears to have been used first, for the object formed by stellar implosion, by one or more non-physicists shortly after the 1963 discovery of quasars, but it did not stick. Wheeler recalls adopting it in 1968 after somebody at a lecture he was giving shouted it out as a suggestion, and in his hands it was quickly adopted worldwide.

**An influential, speculative idea due to Wheeler.



アインシュタインはブラックホールという言葉を知らずに亡くなっている

1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

A. Einstein 1879-1955

重力崩壊

35 Tolman, 39 Oppenheimer-Volkoff
39 Oppenheimer-Snyder

「重力で切り離された領域」

「ブラックホール」

67 Wheeler

「重力崩壊星コラプサー」
「凍結星」

1964年Science Newsletter(Jan 18)にて、ジャーナリストのAnn Elizabeth Ewingが、「“Black Holes” in Space」という記事を書いたのが、はじめ。（福江純氏からメール）

SCIENCE NEWS LETTER for January 18, 1964

ASTRONOMY

"Black Holes" in Space

The heavy densely packed dying stars that speckle space may help determine how matter behaves when enclosed in its own gravitational field—By Ann Ewing

➤ SPACE may be peppered with "black holes."

This was suggested at the American Association for the Advancement of Science meeting in Cleveland by astronomers and physicists who are experts on what are called degenerate stars.

Degenerate stars are not Hollywood types with low morals. They are dying stars, or white dwarfs, and make up about 10% of all stars in the sky.

The faint light they emit comes from the little heat left in their last stages of life. It is not known how a star quietly declines to become a white dwarf.

Degenerate stars are made of densely packed electrons and nuclei, or cores of atoms. They are so dense that a thimbleful of their matter weighs a ton.

Some such stars are predicted in theory to have a density of one million tons per thimbleful. When this happens, the star is essentially made of neutrons and strange particles.

Because a degenerate star is so dense, its gravitational field is very strong. According to Einstein's general theory of relativity, as mass is added to a degenerate star a sudden collapse will take place and the intense gravitational field of the star will close in on itself.

Such a star then forms a "black hole" in the universe.

Modern tools, such as telescopes on an orbiting space platform, may be used to detect such black holes and to help determine how matter behaves when it is enclosed by its own gravitational field.

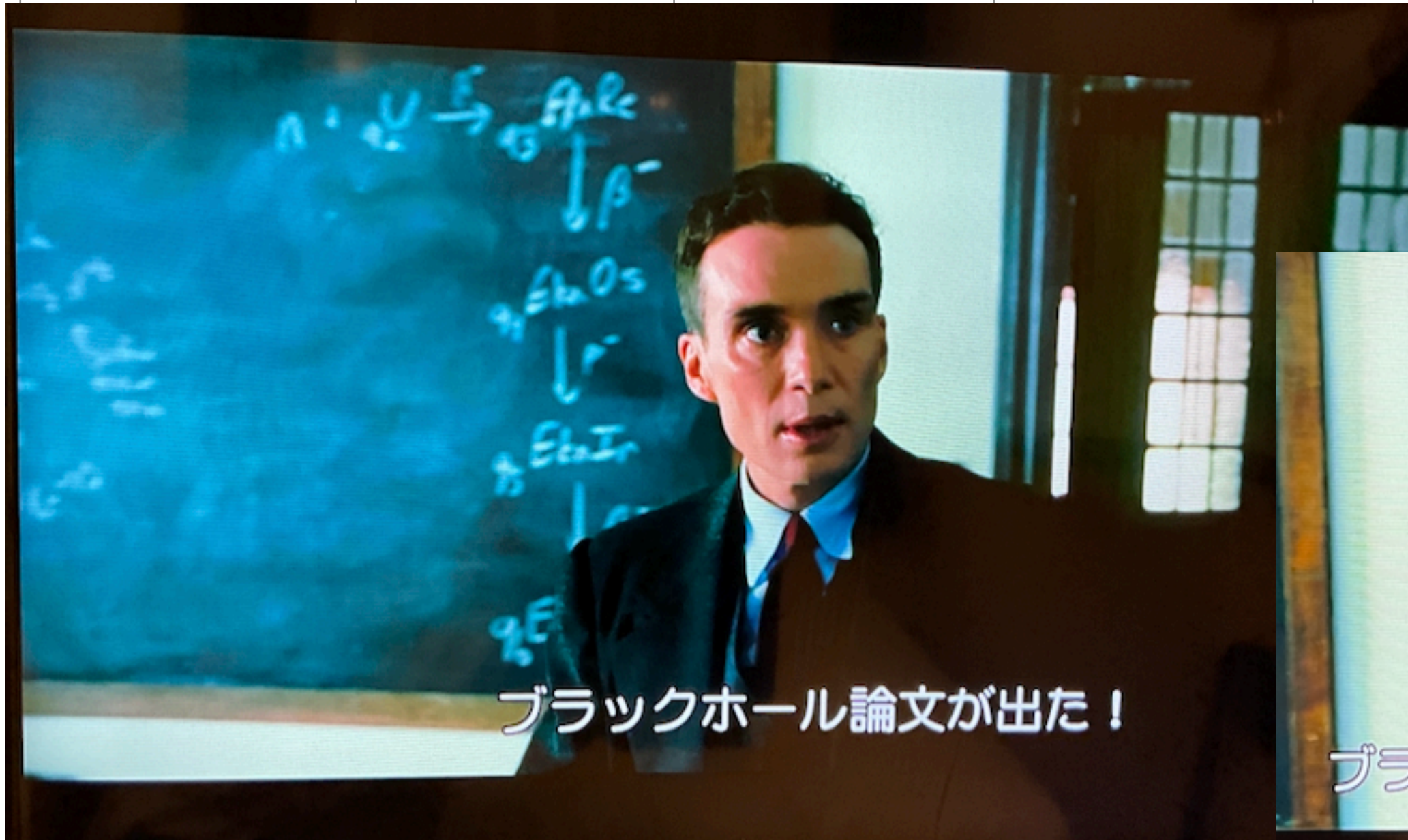
The light from the most famous white dwarf star, Sirius B, a companion to Sirius—which is the brightest star in the heavens visible from earth—has been captured using the 200-inch telescope atop Mt. Palomar. This was done as part of a program to study at least 20 white dwarfs.

Preliminary analysis of the light from Sirius B indicates that it has an effective temperature of 16,800 degrees Kelvin, or 30,000 degrees Fahrenheit. Its radius can be calculated from the temperature, and is only nine-thousandths that of the sun.

The star must therefore consist mainly of helium or heavier elements.

The speakers at the symposium were Drs. A. G. W. Cameron of the National Aeronautics and Space Administration's Goddard Institute for Space Studies, New York; Charles Misner of the University of Maryland; Volker Weidemann, Physikalisches Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany, and J. B. Oke of California Institute of Technology. The symposium was arranged by Dr. Hong-ye Chiu of the Goddard Institute for Space Studies.

• Science News Letter, 85:39 Jan. 18, 1964



映画「オッペンハイマー」時代考証ミス

On Continued Gravitational Contraction

J. R. OPPENHEIMER AND H. SNYDER
University of California, Berkeley, California

(Received July 10, 1939)

When all thermonuclear sources of energy are exhausted a sufficiently heavy star will collapse. Unless fission due to rotation, the radiation of mass, or the blowing off of mass by radiation, reduce the star's mass to the order of that of the sun, this contraction will continue indefinitely. In the present paper we study the solutions of the gravitational field equations which describe this process. In I, general and qualitative arguments are given on the behavior of the metrical tensor as the contraction progresses: the radius of the star approaches asymptotically its gravitational radius; light from the surface of the star is progressively reddened, and can escape over a progressively narrower range of angles. In II, an analytic solution of the field equations confirming these general arguments is obtained for the case that the pressure within the star can be neglected. The total time of collapse for an observer comoving with the stellar matter is finite, and for this idealized case and typical stellar masses, of the order of a day; an external observer sees the star asymptotically shrinking to its gravitational radius.

slowed up by a factor $(1 - r_0/r_b)$. All energy emitted outward from the surface of the star will be reduced very much in escaping, by the Doppler effect from the receding source, by the large gravitational red-shift, $(1 - r_0/r_b)^{1/2}$, and by the gravitational deflection of light which will prevent the escape of radiation except through a cone about the outward normal of progressively shrinking aperture as the star contracts. The star thus tends to close itself off from any communication with a distant observer; only its gravitational field persists. We shall see later that although it takes, from the point of view of a distant observer, an infinite time for this asymptotic isolation to be established, for an observer comoving with the stellar matter this time is finite and may be quite short.

球対称 一様ダストの
重力崩壊

「遠方とは通信できない
重力で閉ざされた領域」

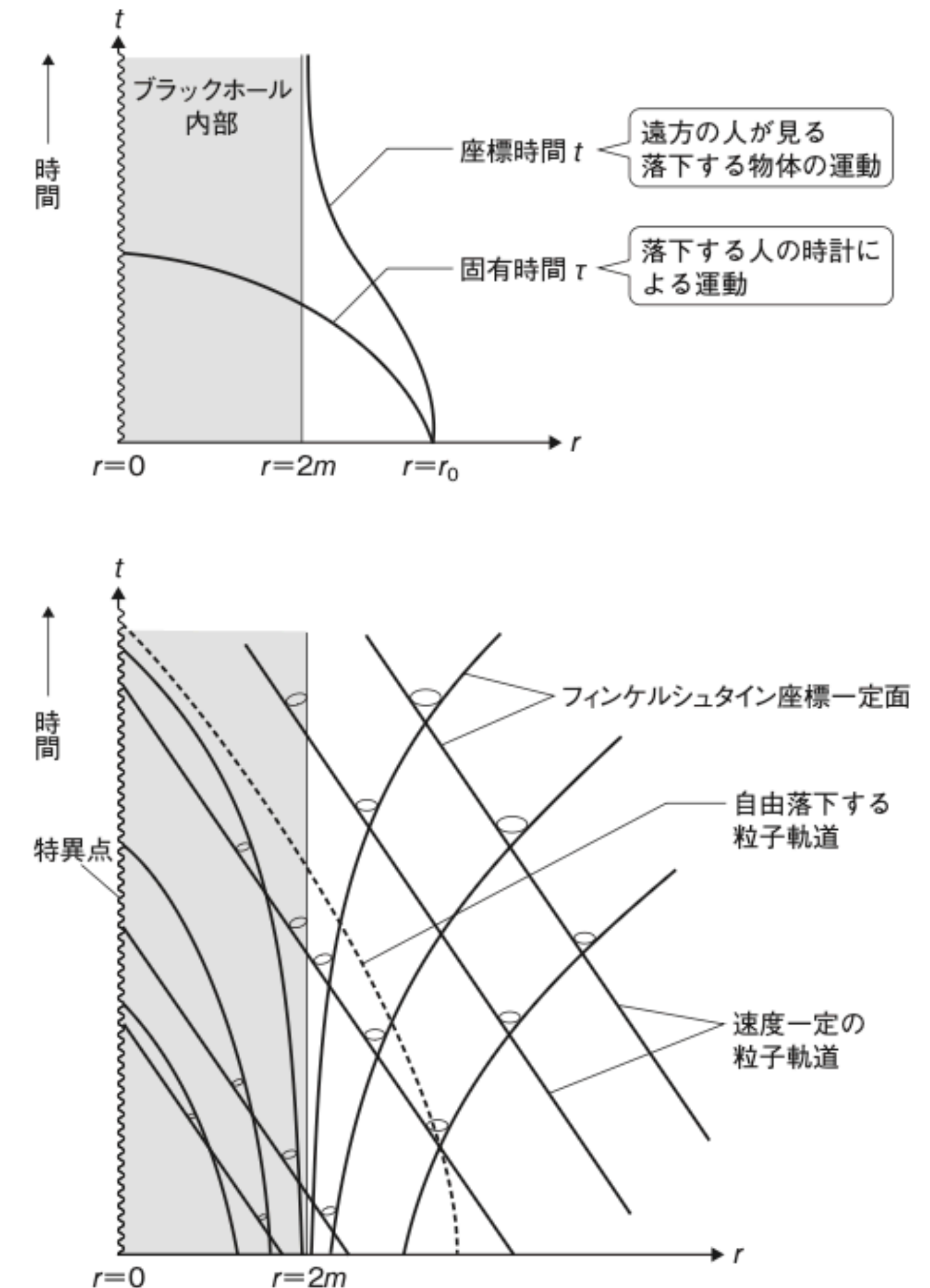
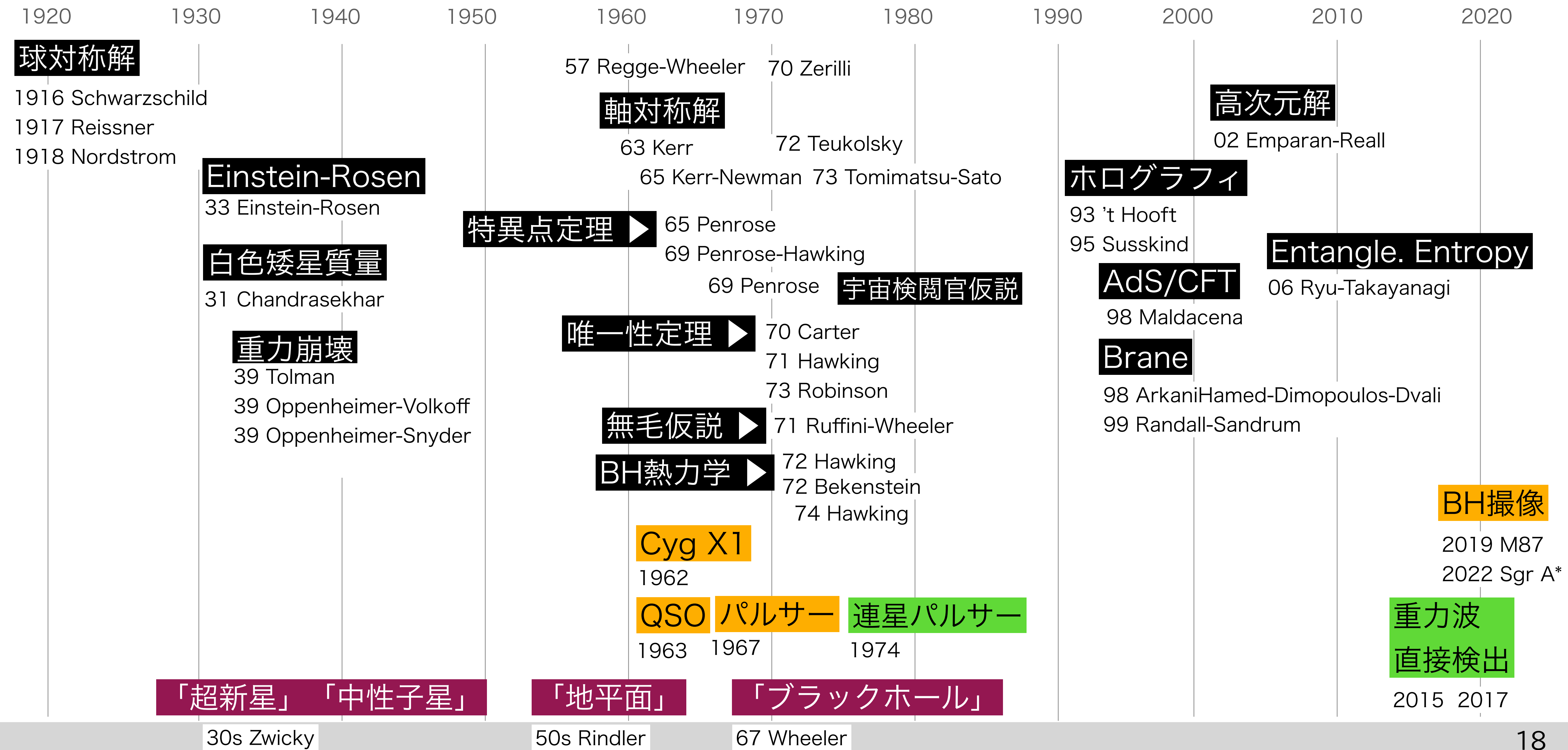


図2-1 シュヴァルツシルト解のふるまい

(上) もともとの座標で見ると、星が重力崩壊して落ち込んでいく人は有限時間で落下するが、遠方から見ている人には無限の時間が経っても半径 $r = r_g$ の面にまでしか到達しないように見える
 (下) 縦軸と横軸がもとのシュヴァルツシルト座標で、図中の実線がフィンケルシュタインの考案した座標。フィンケルシュタインの座標を使うと、半径 $r = r_g$ の面を通過して扱うことが可能になる。各時刻と位置から光を出したときの光円錐も描いてある

ブラックホール研究の歴史



ブラックホール解

Schwarzschild (1916)

球対称, 真空でのEinstein方程式の厳密解

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

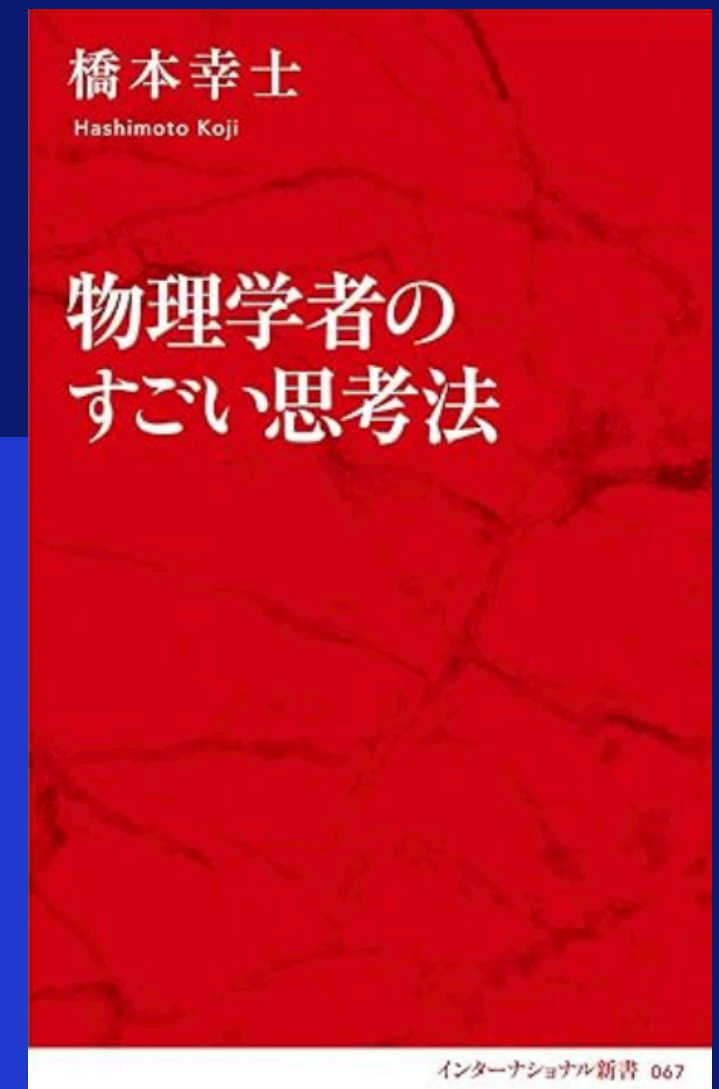
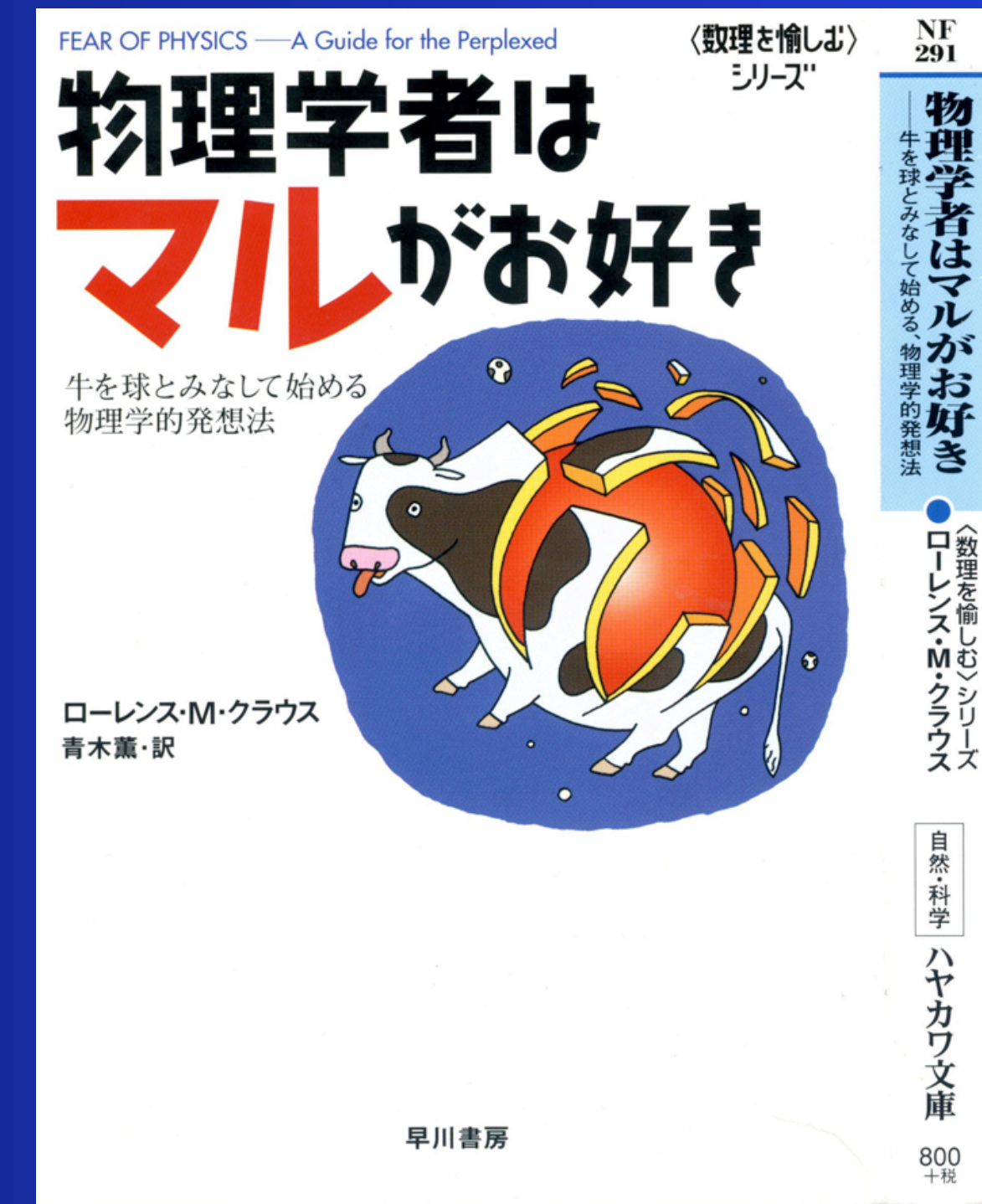
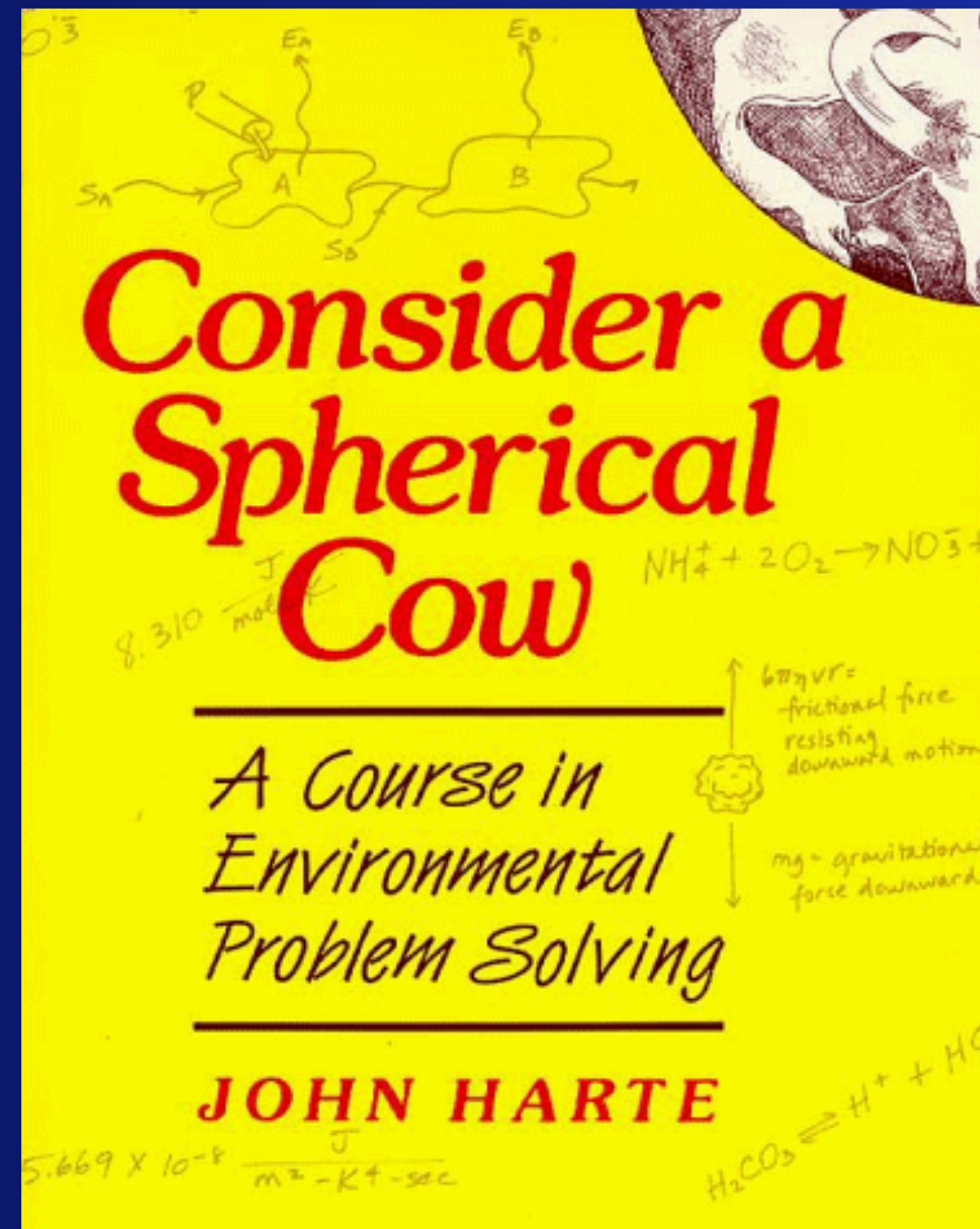
	電荷なし	電荷あり
宇宙項なし	Schwarzschild 1916	Reissner-Nordstrom 1916, 1918
宇宙項あり	Sch-de Sitter (Kottler) 1918	RN-de Sitter

$$ds^2 = -V(R)dT^2 + \frac{dR^2}{V(R)} + R^2 d\Omega^2$$
$$V(R) = 1 - \frac{2M}{R} + \frac{Q^2}{R^2} - \frac{\Lambda}{3}R^2$$

Lesson 1

乳牛の乳の生産量を増やすには？

「乳牛の乳の生産量を増やすにはどうしたらよいか」
(物理学者) 「まず、球対称の牛がいた、と考えよう」

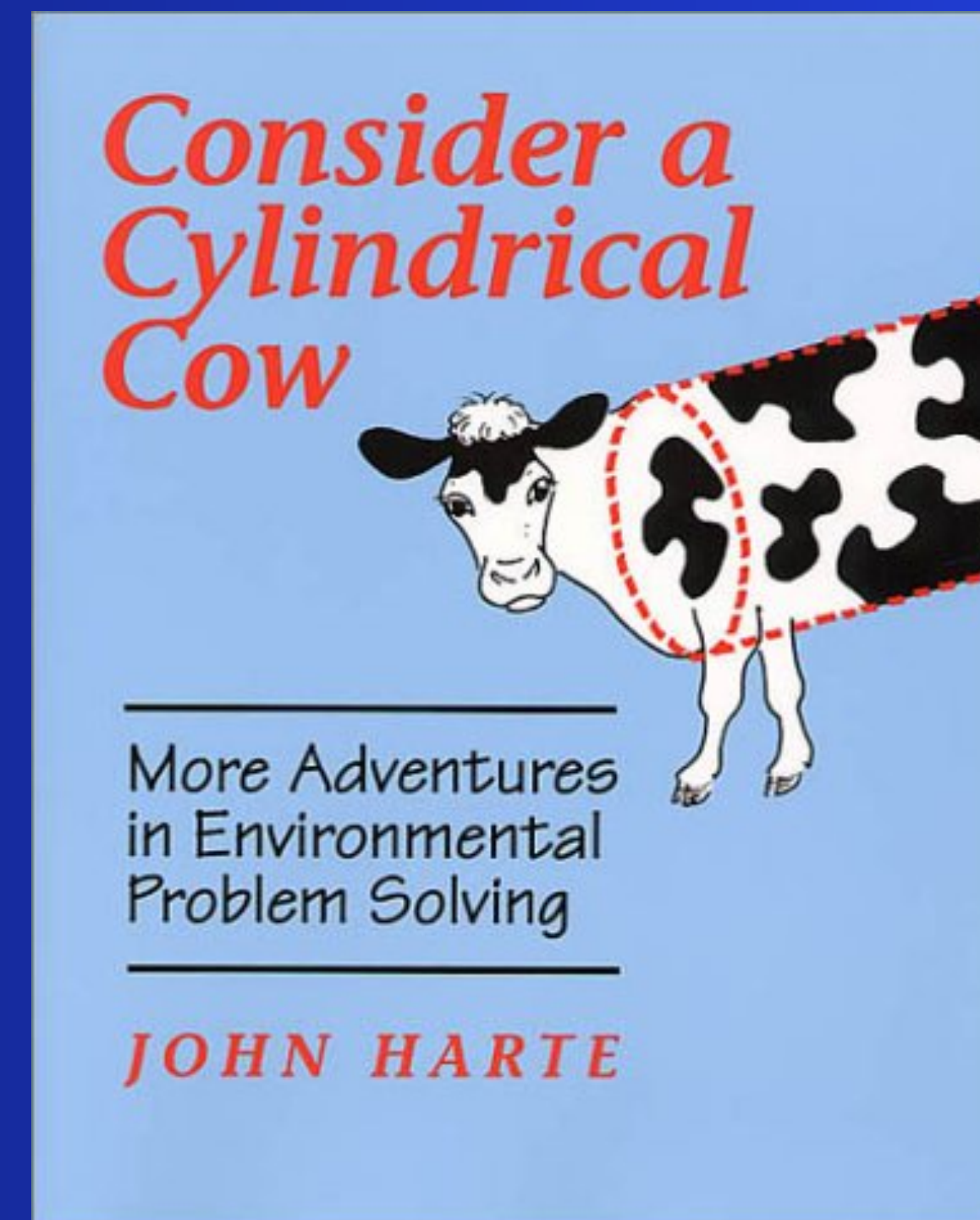
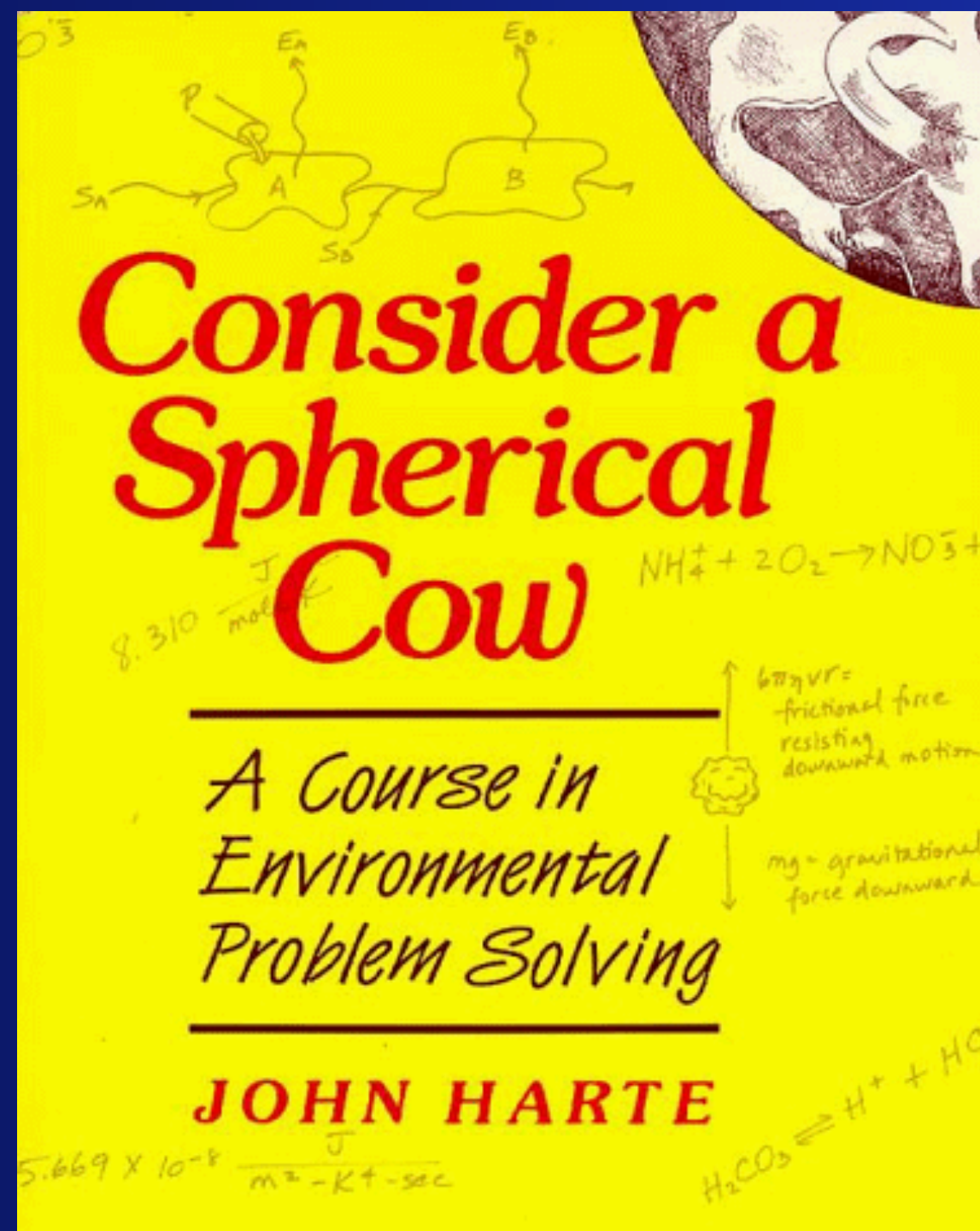


Lesson 1

円筒対称の牛アプローチ【物理屋の思考回路】

「乳牛の乳の生産量を増やすにはどうしたらよいか」

「次に、円筒対称の牛がいた、と考えよう」



Lesson 1

〇〇対称の牛アプローチ【時空】

「乳牛の乳の生産量を増やすにはどうしたらよいか」

「まず、球対称の牛がいた、と考えよう」

「次に、円筒対称の牛がいた、と考えよう」

「次に、面対称の牛がいた、と考えよう」

「次に、軸対称の牛がいた、と考えよう」

「次に、回転している牛がいた、と考えよう」



GRAVITATIONAL FIELD OF A SPINNING MASS AS AN EXAMPLE
OF ALGEBRAICALLY SPECIAL METRICS

Roy P. Kerr*

University of Texas, Austin, Texas and Aerospace Research Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio
(Received 26 July 1963)

Kerr (1963)

軸対称, 真空でのEinstein方程式の厳密解

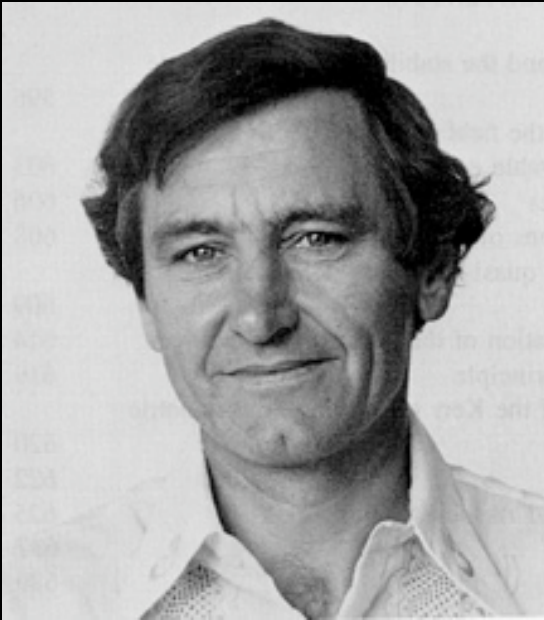
$$ds^2 = -\frac{\Delta_r}{\Sigma\Xi^2} [dt - a \sin^2 \theta d\phi]^2 + \frac{\Sigma}{\Delta_r} dr^2 + \frac{\Sigma}{\Delta_\theta} d\theta^2 + \frac{\Delta_\theta \sin^2 \theta}{\Sigma\Xi^2} [(r^2 + a^2) d\phi - a dt]^2$$

$$\Delta_r = r^2 - 2Mr + a^2$$

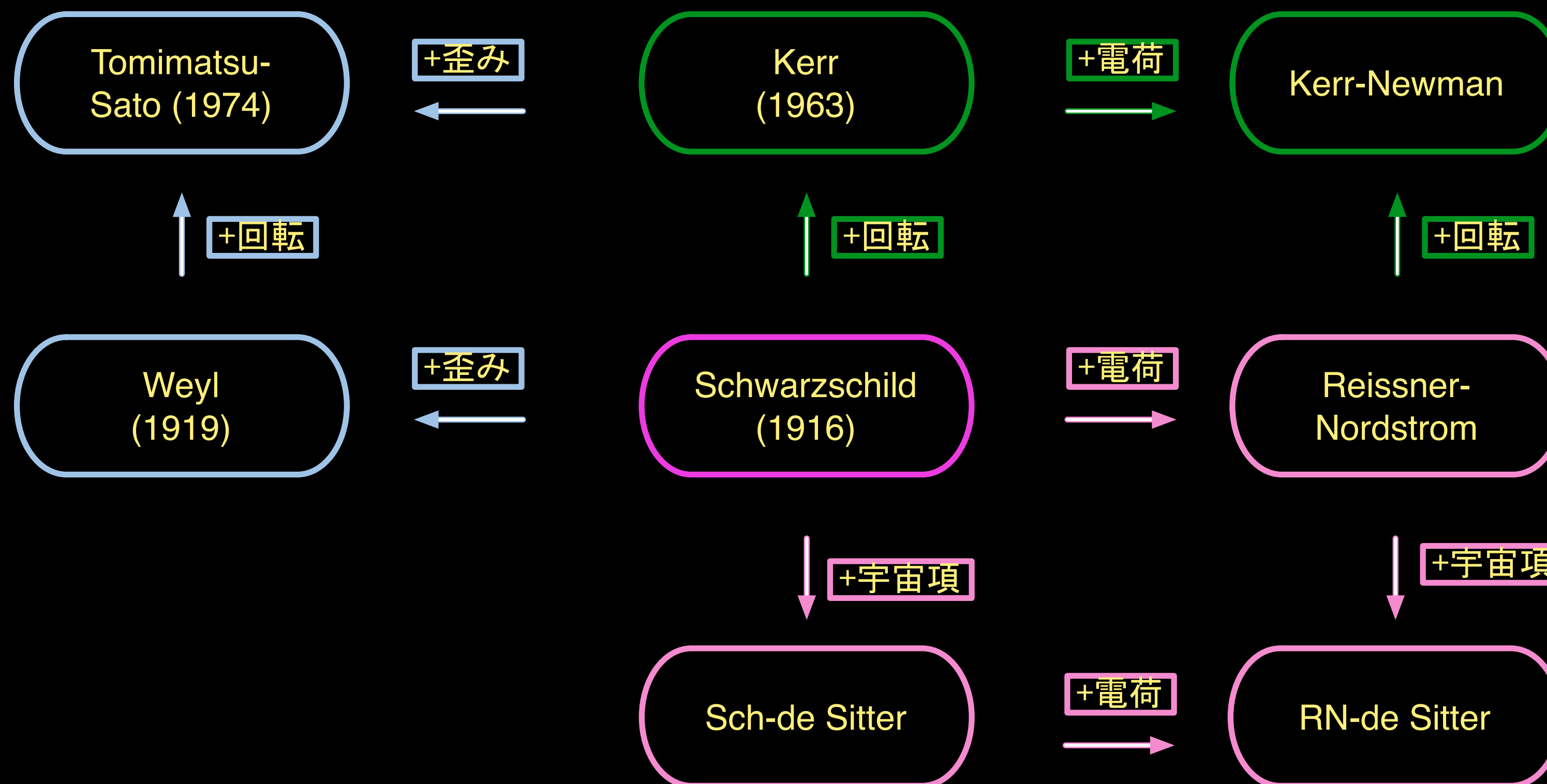
$$\Delta_\theta = 1$$

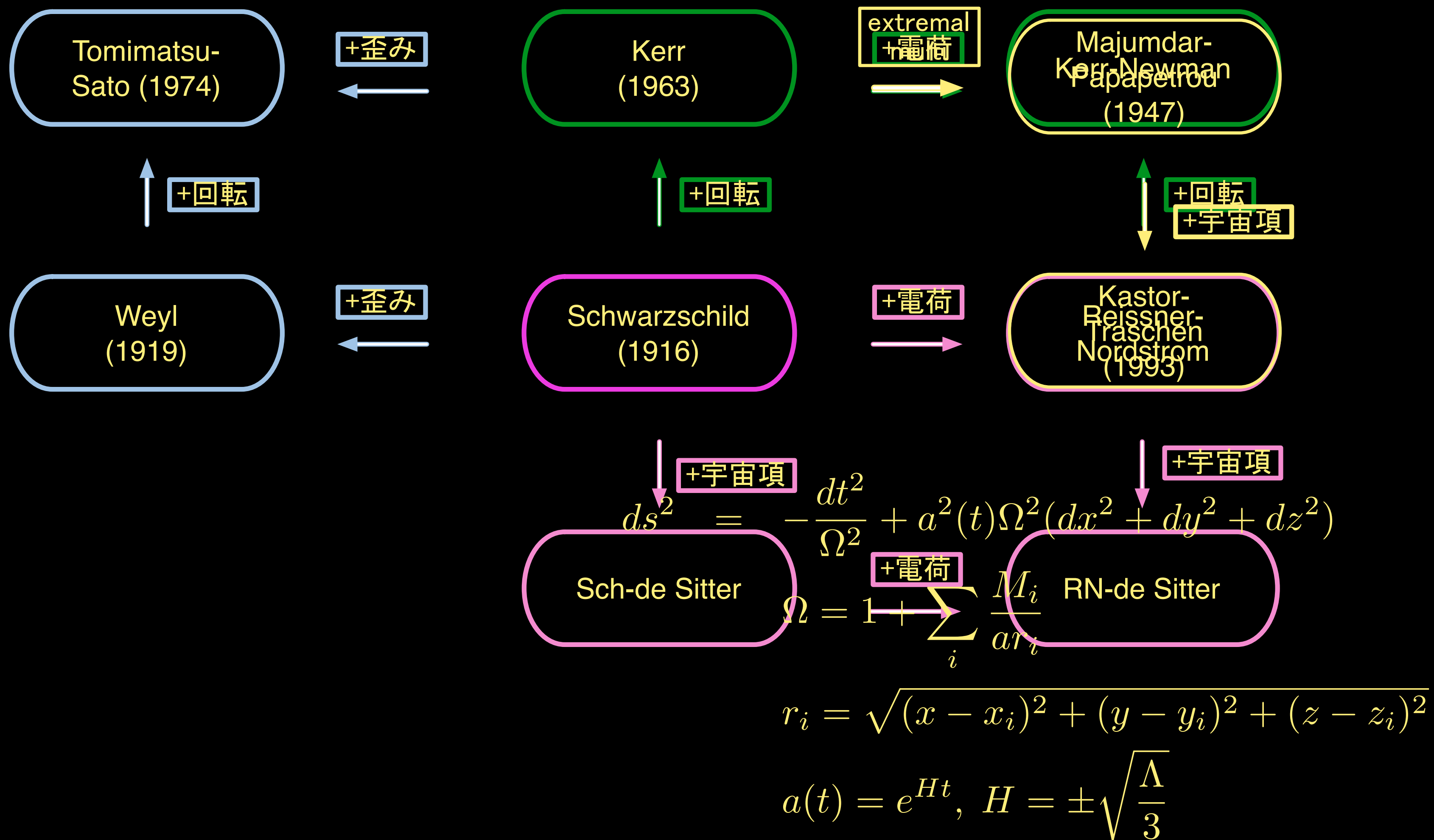
$$\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2 \theta,$$

$$\Xi = 1$$



	電荷なし	電荷あり
宇宙項なし	Kerr 1963	Kerr-Newman 1963
宇宙項あり	Kerr-de Sitter	KN-de Sitter





BH研究史に学ぶ

〇〇対称の牛アプローチ【時空】

「乳牛の乳の生産量を増やすにはどうしたらよいか」



「まず、球対称の牛がいた、と考えよう」

「次に、円筒対称の牛がいた、と考えよう」

「次に、面対称の牛がいた、と考えよう」

「次に、軸対称の牛がいた、と考えよう」



「次に、回転している牛がいた、と考えよう」

「次に、歪んだ牛がいた、と考えよう」

「次に、帯電した牛がいた、と考えよう」

「次に、膨張している牛がいた、と考えよう」



「次に、2頭の牛がいた、と考えよう」

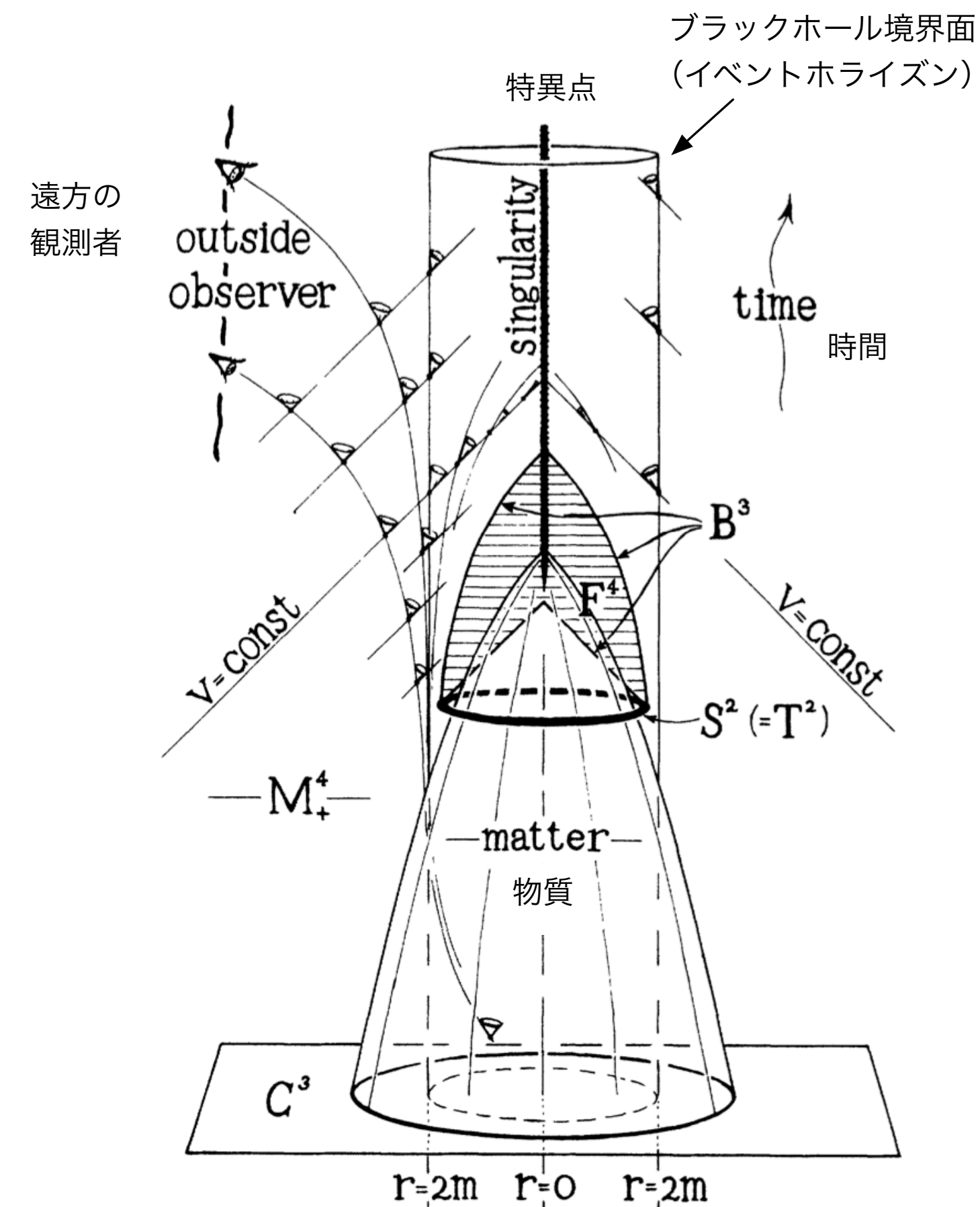
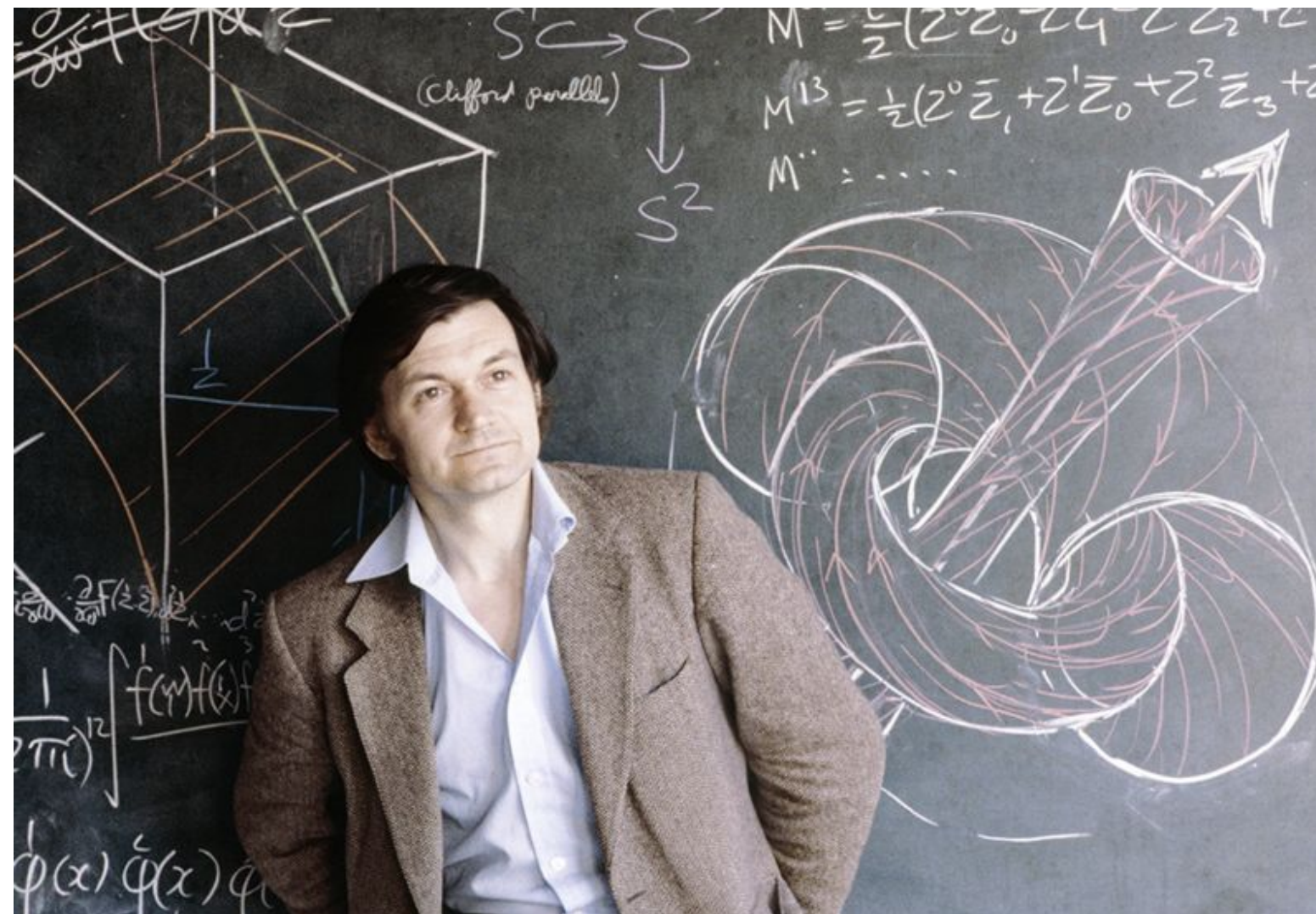
時空特異点(spacetime singularity)の問題

1960年代はじめまで

特異点を含む解が出てきたのは、球対称や軸対称の特殊な仮定をしたからでは？
現実には存在しない？

1965年 ペンローズ, 特異点定理

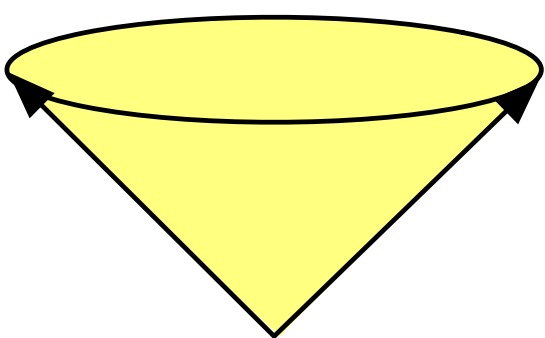
星が重力崩壊すれば、必ず特異点が形成される。



特異点定理 (Penrose, 1965年)

ブラックホールの定義 = 光が無限遠まで届かない空間領域(事象の地平面の内側)

光円錐(light cone)

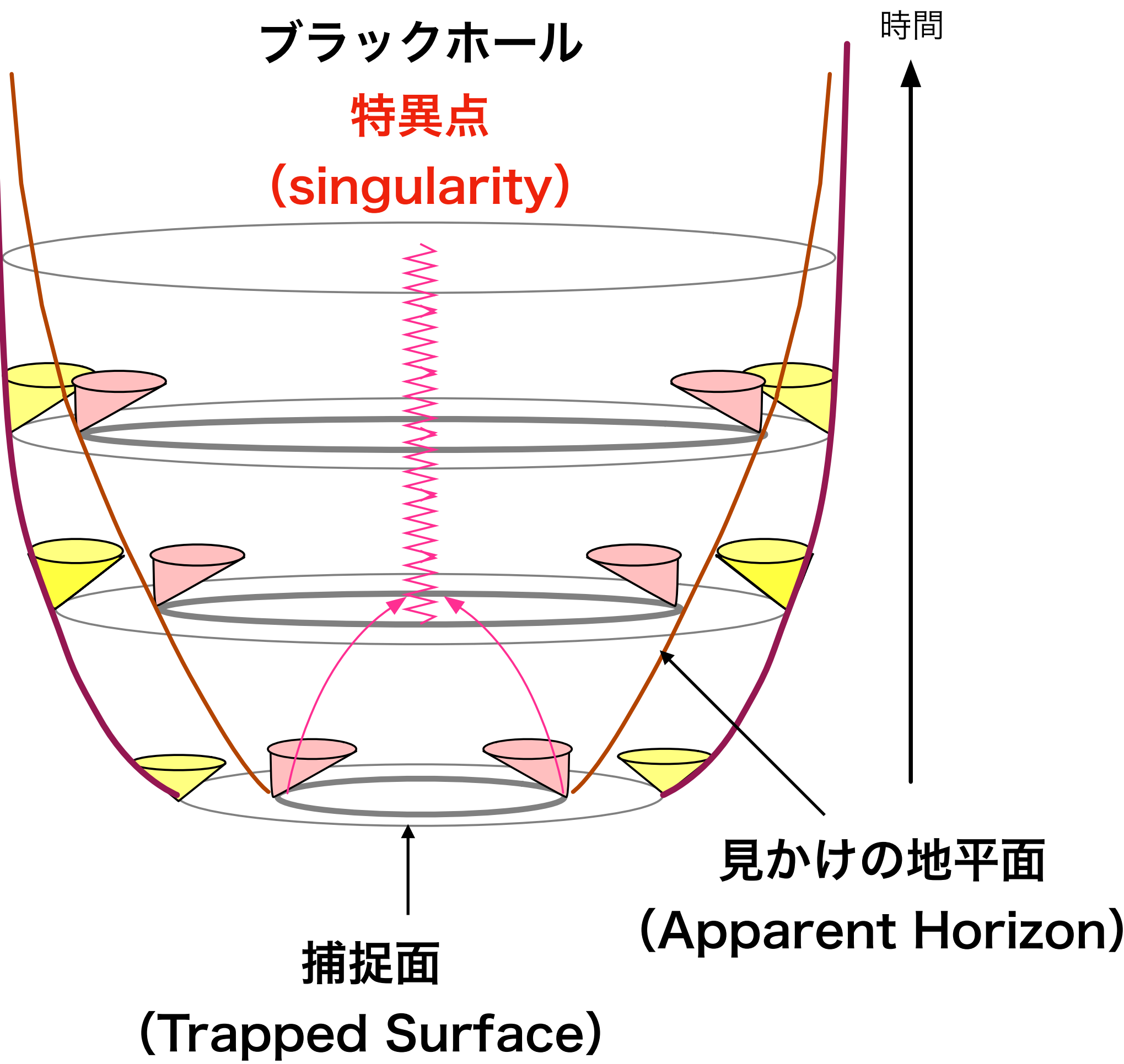


事象の地平面
(Event Horizon)

大域的に双曲的な漸近平坦時空において、
光的エネルギー条件が成立すれば、
捕捉面はブラックホール内部に含まれる

大域的に双曲的な漸近平坦時空が、
(1) 光的エネルギー条件が成立
(2) 宇宙が空間的に無限大
(3) 捕捉面が存在
の条件をみたせば、特異な測地線が存在する

時空の対称性に関係なく、特異点は形成される!



エネルギー条件

エネルギー条件 (EC=energy condition)	定義とおよその意味(k^a, v^a をそれぞれ任意の光的ベクトル、時間的ベクトルとする)	完全流体の場合 $T^a_b = (-\rho c^2, p, p, p)$	利用される例 (BH=ブラックホール)
弱いエネルギー条件 (Weak EC; WEC)	$\sum_a \sum_b T_{ab} v^a v^b \geq 0$ 光速未満の観測者が測るエネルギーが正 (通常の物質ならばWECはみたされる)	$\rho c^2 + p \geq 0$ かつ $p \geq 0$	
強いエネルギー条件 (Strong EC; SEC)	$\sum_a \sum_b (T_{ab} - (1/2) T g_{ab}) v^a v^b \geq 0$ SECが破れると、重力理論は斥力が優勢な解を導く	$\rho c^2 + p \geq 0$ かつ $\rho c^2 + 3p \geq 0$	⇒ホーキング-ペンローズの特異点定理
光的エネルギー条件 (Null EC; NEC)	$\sum_a \sum_b T_{ab} k^a k^b \geq 0$ 光速移動の観測者が測るエネルギーが正	$\rho c^2 + p \geq 0$	⇒ペンローズの特異点定理 ⇒BH熱力学第2法則
優勢エネルギー条件 (Dominant EC; DEC)	$\sum_b (-T_{ab} v^b)$ が時間的または光的ベクトルになる エネルギー流が光速より遅く、保存則が保証される	$\rho c^2 \geq p \geq 0$	⇒BH熱力学第0法則 ⇒正エネルギー定理 ⇒宇宙検閲官仮説

表3-1 一般相対性理論で使われるエネルギー条件の定義と、その利用される例

強いエネルギー条件 (SEC)・弱いエネルギー条件 (WEC) などと言うと包含関係がありそうだが、両者の間には包含関係はない。存在する包含関係は $SEC \in NEC$ (SEC が成立すれば NEC も成立している) および $DEC \in WEC \in NEC$ である (→図3-11 参照)

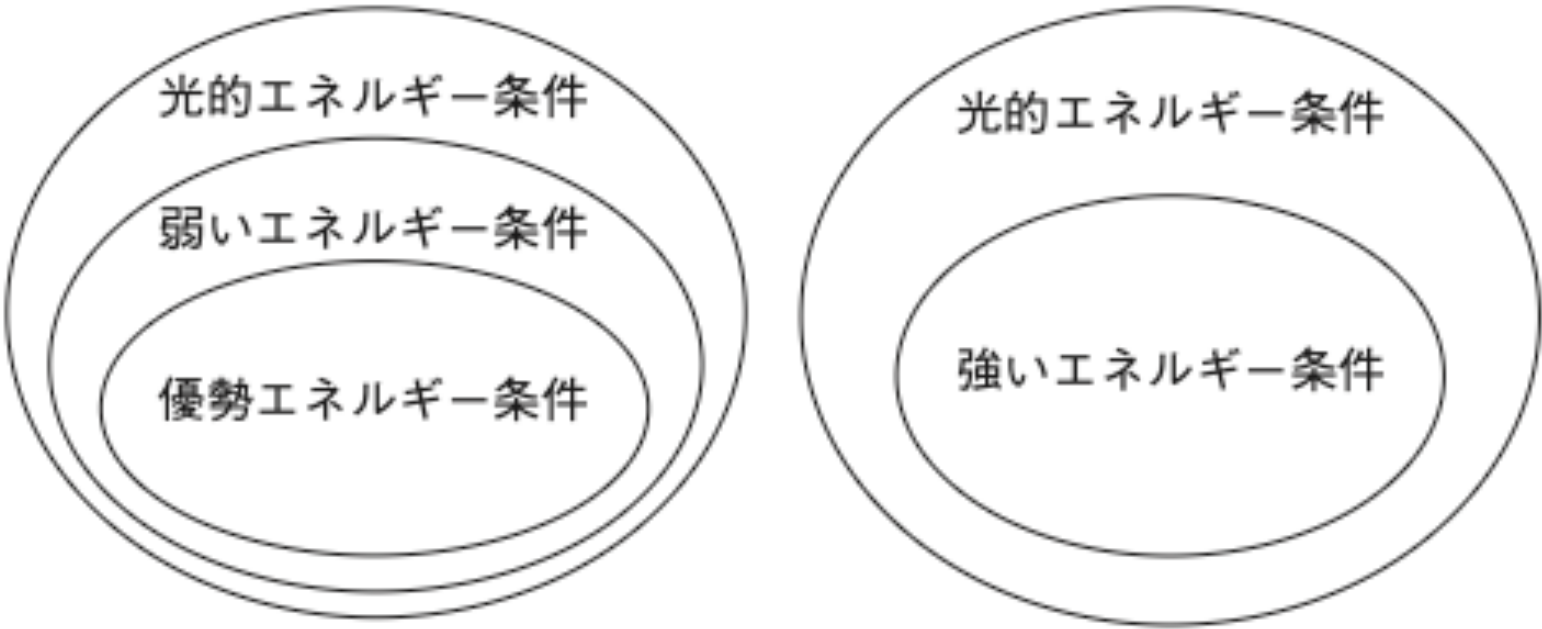


図3-11 エネルギー条件の包含関係

特異点定理 (Penrose, 1965年)

証明は, 背理法

- 4次元時空 M_4^+ (コーシー面 C^3 より未来側)
- (1) 光的測地線は完備である (無限に長い)
 - (2) M_4^+ 内の測地線はすべて C^3 へ拡張可能
 - (3) M_4^+ 内では光的エネルギー条件がみたされる
 - (4) M_4^+ 内では捕捉面が存在
- これらは同時に成り立たない.

大域的に双曲的な漸近平坦時空が,
(1) 光的エネルギー条件が成立
(2) 宇宙が空間的に無限大
(3) 捕捉面が存在
の条件をみたせば, **特異な測地線が存在する**

時空の対称性に関係なく, 特異点は形成される!

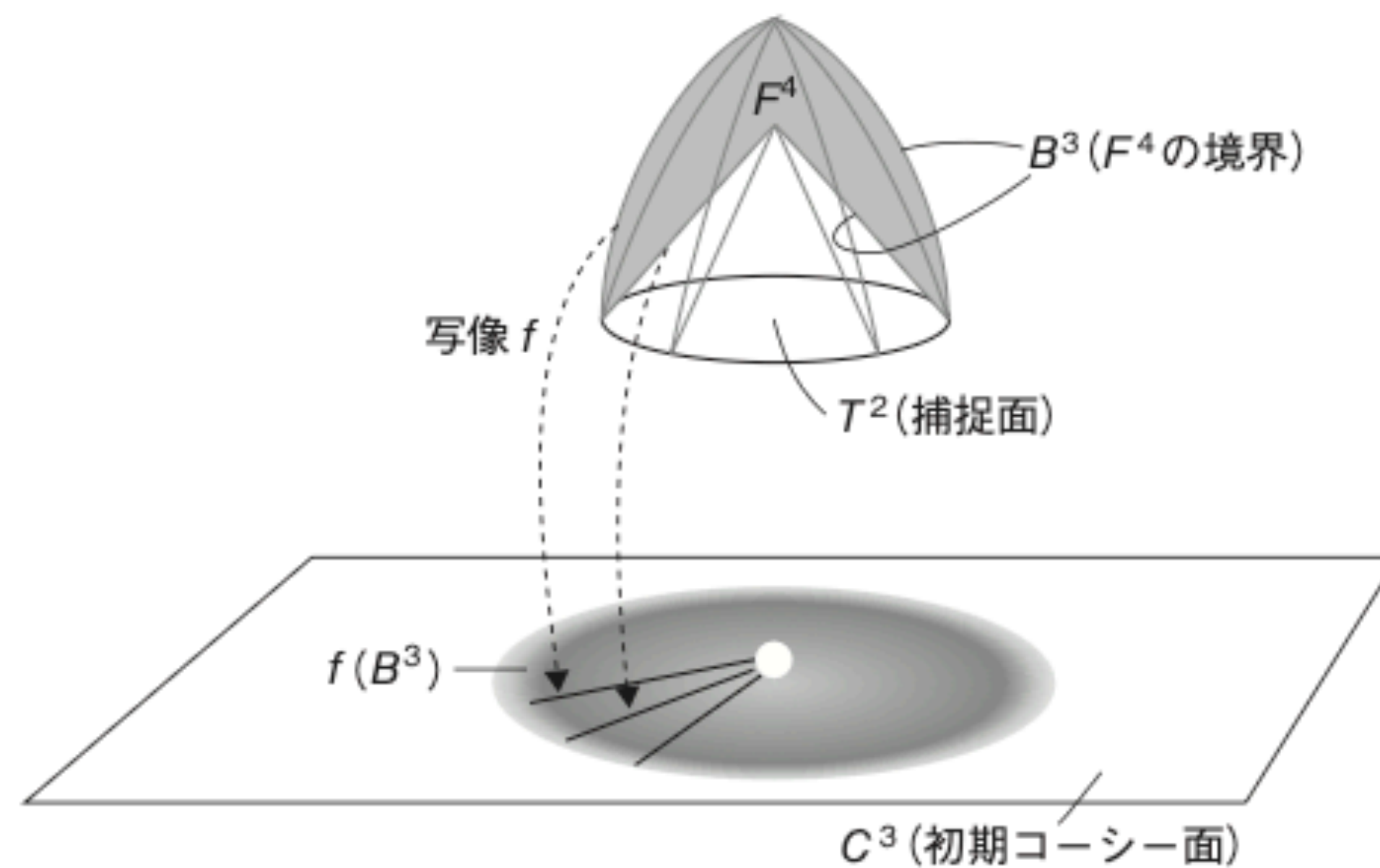
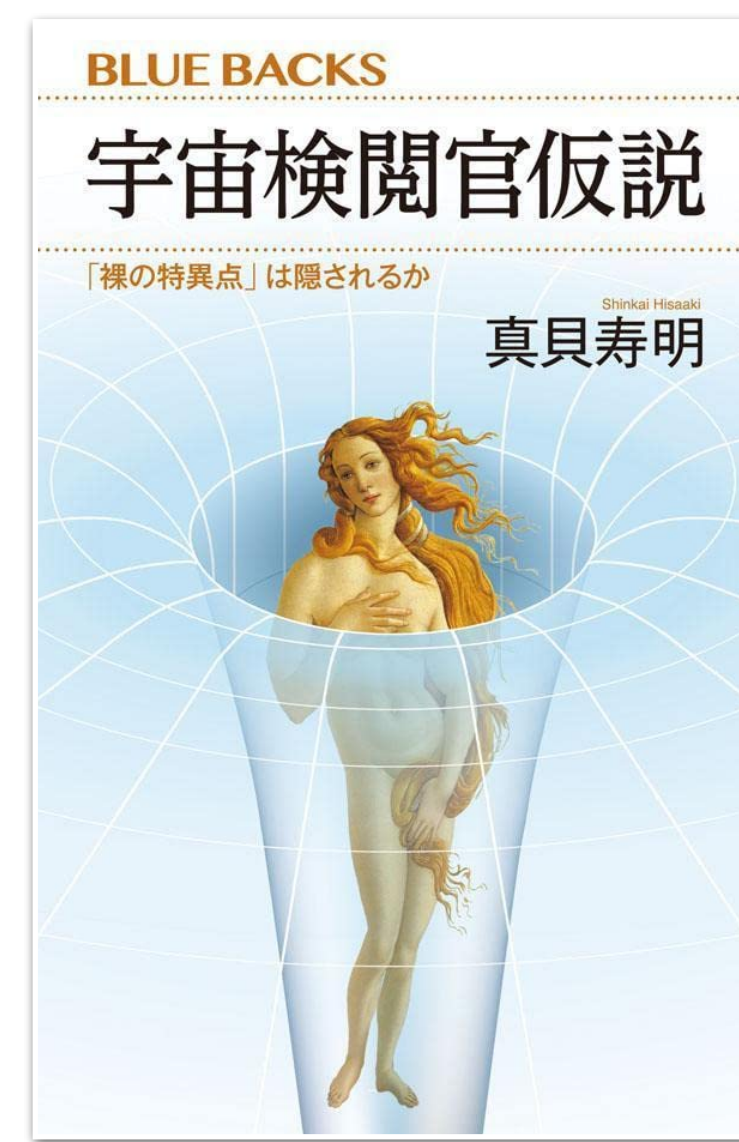


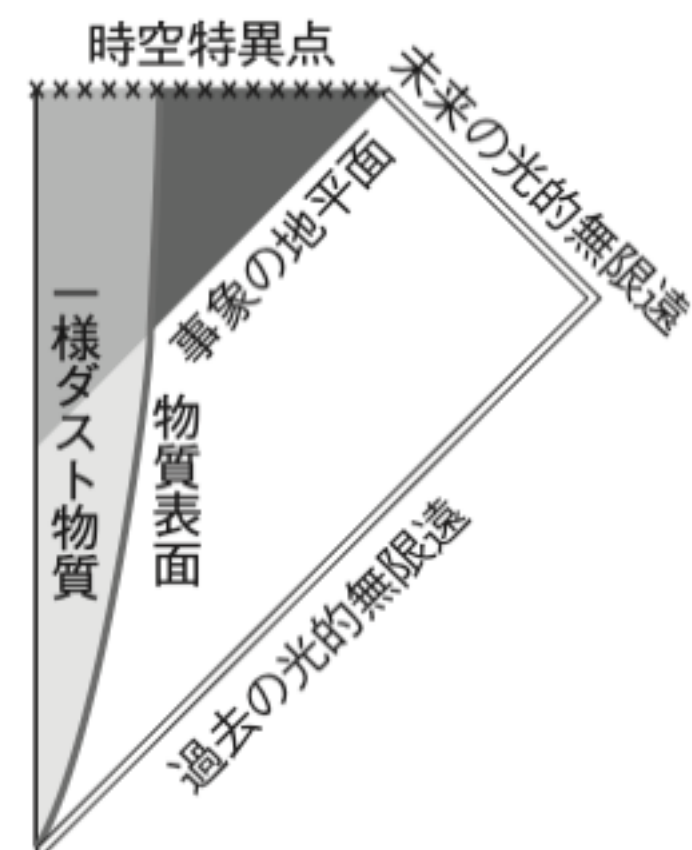
図3-16 特異点定理のあらすじ

捕捉面 T^2 から出た時間的曲線がみたす領域を F^4 、その境界面を B^3 とする。 B^3 は閉曲面になる。 B^3 の各点は写像 f によって、初期コーシー面 C^3 上の各点に1対1で対応させることができる。 T^2 から出る測地線に行き止まりがないとすると、写像 $f(B^3)$ が開集合か閉集合かで矛盾が生じる

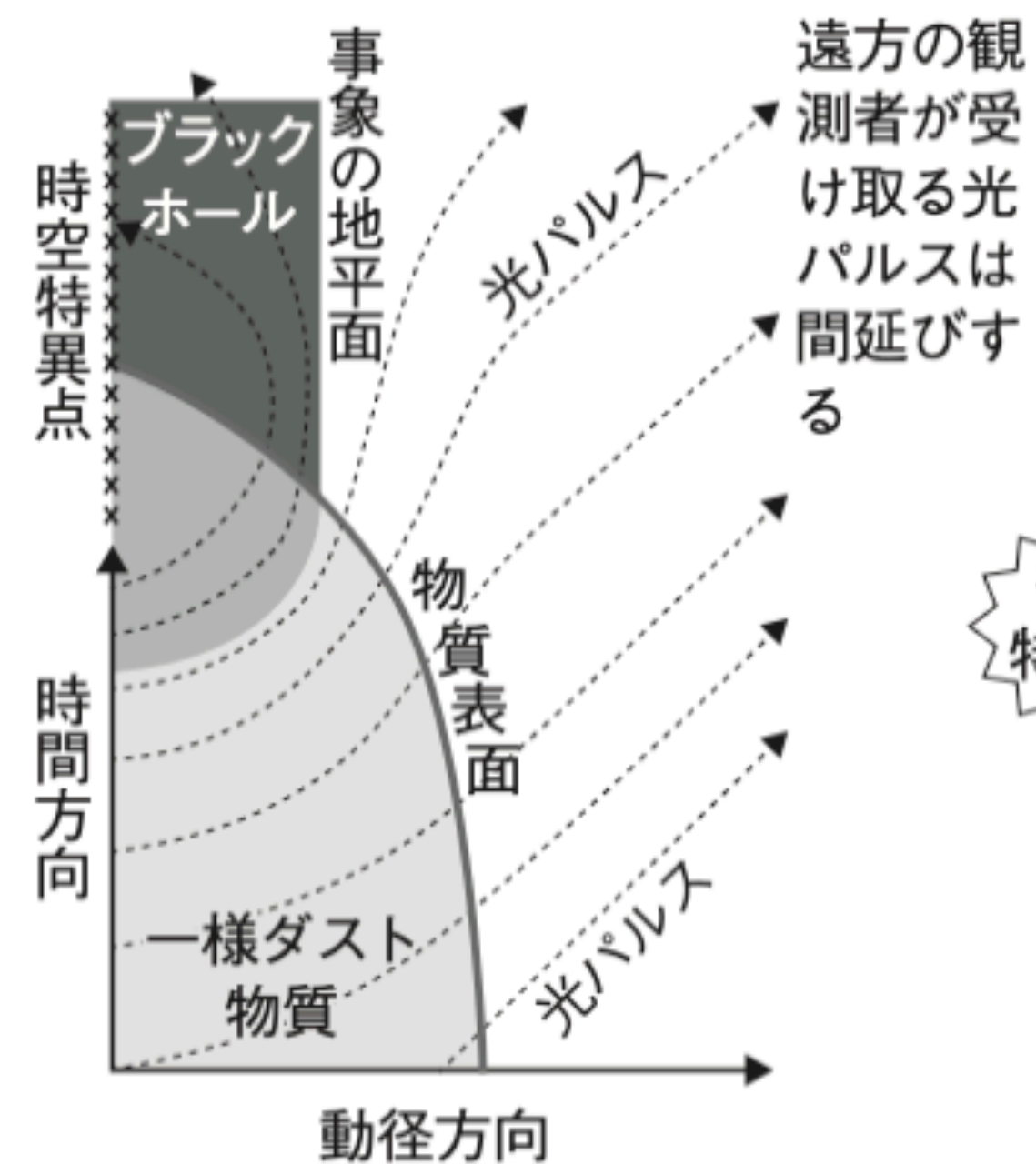


球対称 一様ダストの 重力崩壊

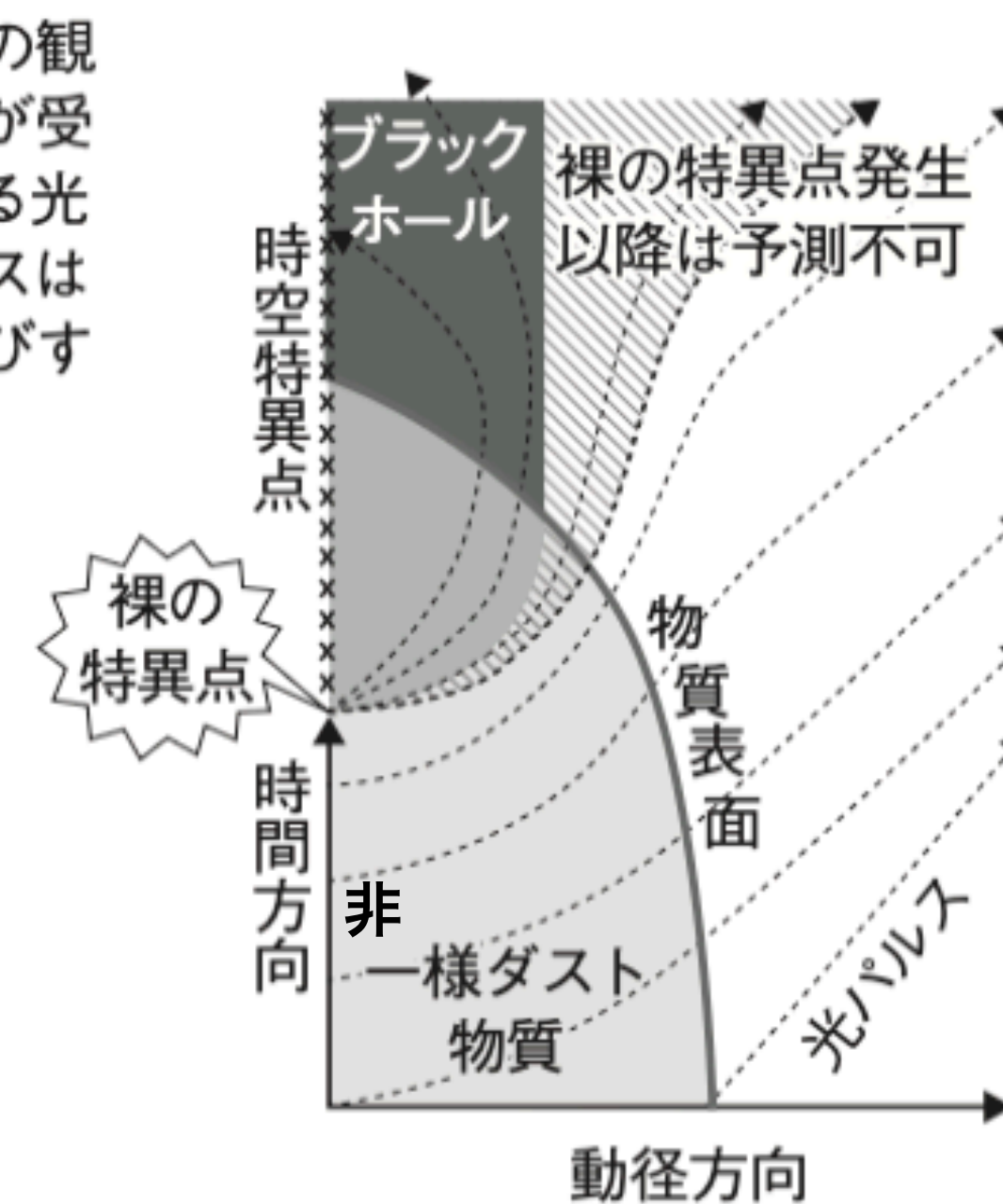
球対称 非一様ダストの 重力崩壊



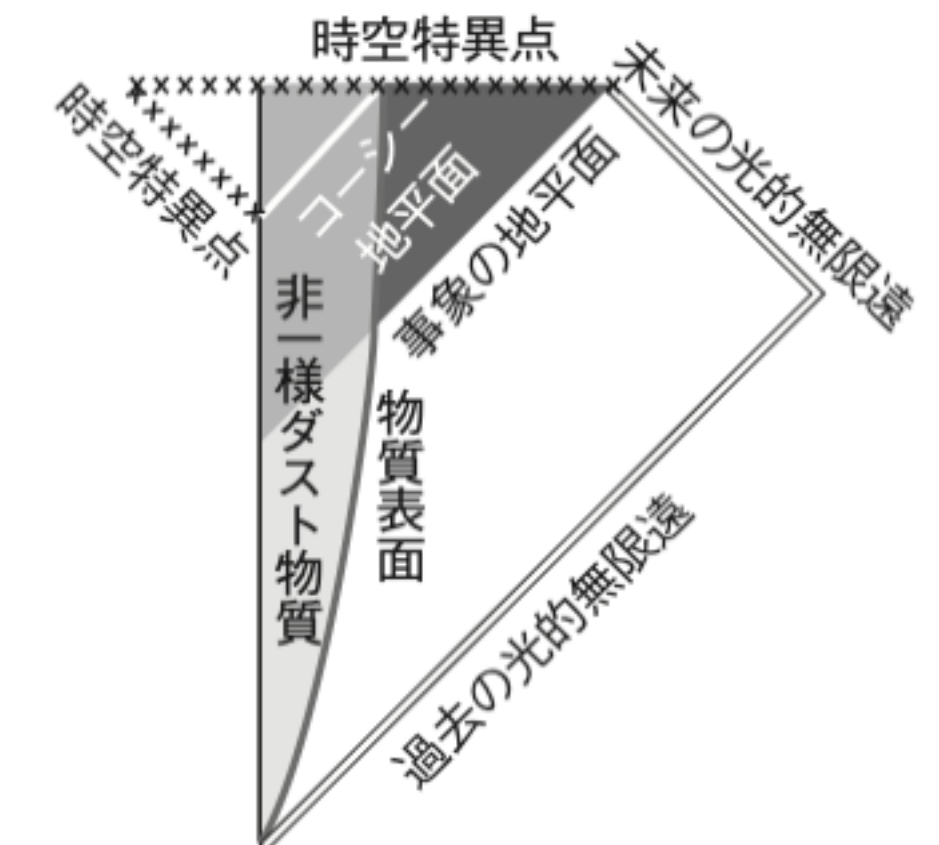
(a) 一様ダスト物質の重力崩壊
(オッペンハイマー・スナイダー解)



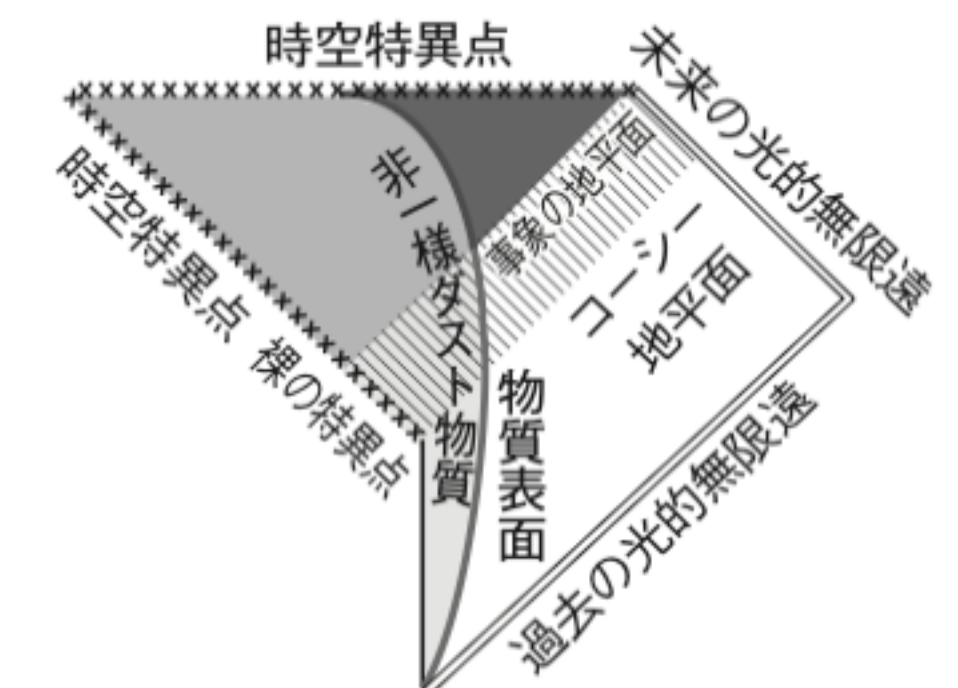
(a) 一様ダスト物質の重力崩壊
(オッペンハイマー・スナイダー解)



(b) 非一様ダスト物質の重力崩壊で裸の特異点が発生
(ルメートル・トールマン・ボンディ解)

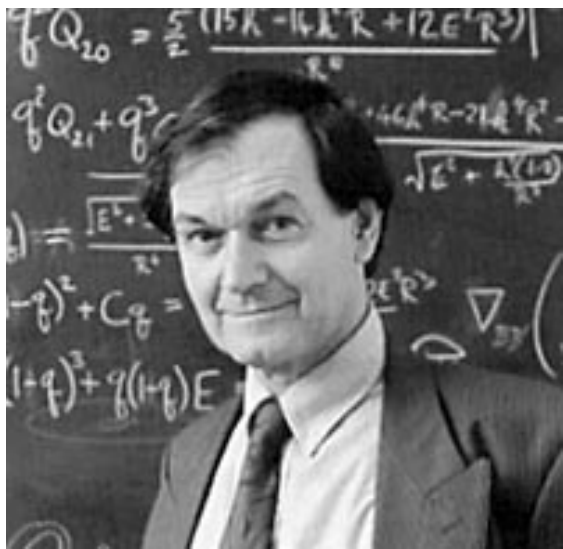


(b) 非一様ダスト物質の重力崩壊で裸の特異点が発生しないとき
(ルメートル・トールマン・ボンディ解)



(c) 非一様ダスト物質の重力崩壊で裸の特異点が発生するとき

宇宙検閲官仮説 (Penrose, 1969/79年)



特異点が発生すると、物理の議論ができなくなって困る。
特異点発生は、物理的に禁止されているのではないか？

cosmic censorship conjecture

弱い宇宙検閲官仮説 R. Penrose (1969)

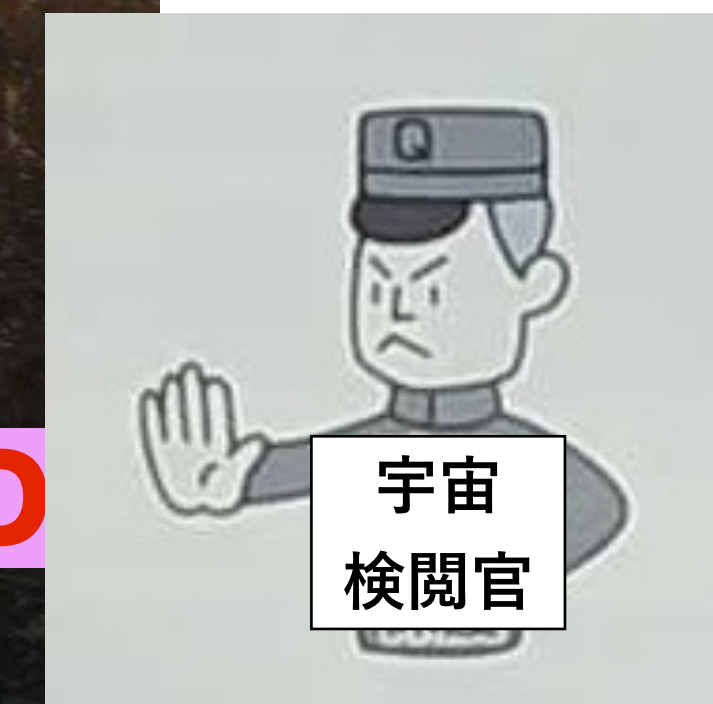
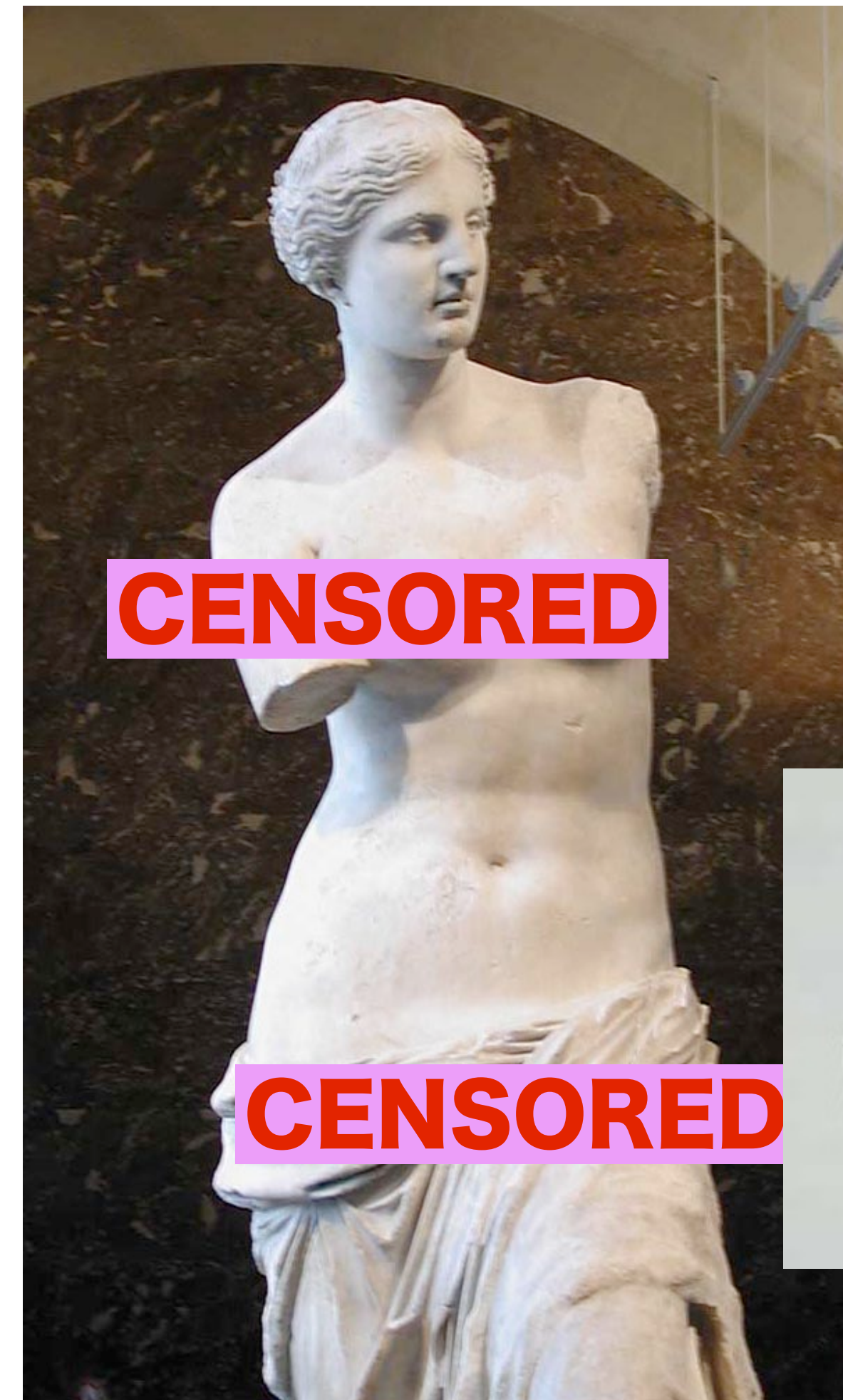
適切なエネルギー条件をみたす漸近平坦時空では、重力崩壊によって発生するすべての特異点は、ブラックホールの事象の地平面に覆われる。

「裸の特異点は、見えてはならない」

強い宇宙検閲官仮説 R. Penrose (1979)

適切なエネルギー条件をみたす漸近平坦時空では、裸の特異点は形成されない。

「裸の特異点は、存在しない」



裸の特異点は存在するのか？（ホーキングvsソーンの賭け）

Whereas Stephen W. Hawking firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager with odds of 100 pounds sterling to 50 pounds sterling, that when any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, the result can never be a naked singularity.

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable concessionary message.



John P. Preskill Kip S. Thorne

Stephen W. Hawking John P. Preskill & Kip S. Thorne
Pasadena, California, 24 September 1991

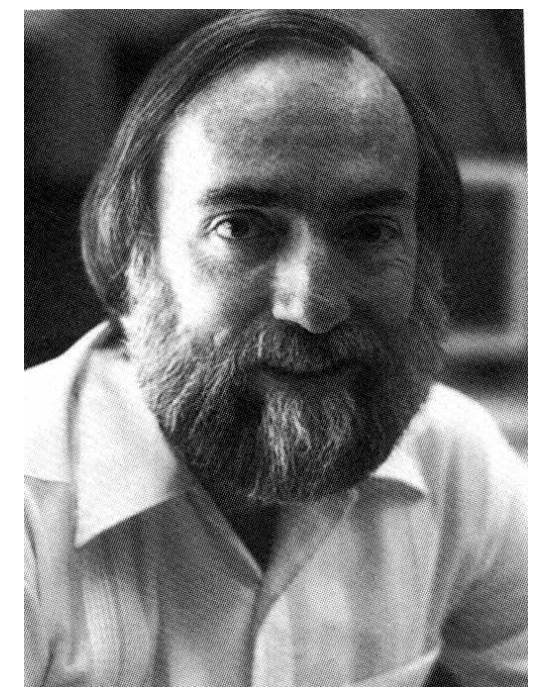
ホーキング

「裸の特異点は物理法則によって禁止されている」



ソーン, プレスキル

「あり得る」



敗者は裸体を覆う着物を勝者に与えること

1991年9月24日

裸の特異点は出現する！

数値シミュレーションによる実例 (1991)

collisionless 粒子の重力崩壊
形状が細長いとnaked singularity出現

VOLUME 66, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

25 FEBRUARY 1991

Formation of Naked Singularities: The Violation of Cosmic Censorship

Stuart L. Shapiro and Saul A. Teukolsky

Center for Radiophysics and Space Research and Departments of Astronomy and Physics,
Cornell University, Ithaca, New York 14853

(Received 7 September 1990)

We use a new numerical code to evolve collisionless gas spheroids in full general relativity. In all cases the spheroids collapse to singularities. When the spheroids are sufficiently compact, the singularities are hidden inside black holes. However, when the spheroids are sufficiently large, there are no apparent horizons. These results lend support to the hoop conjecture and appear to demonstrate that naked singularities can form in asymptotically flat spacetimes.

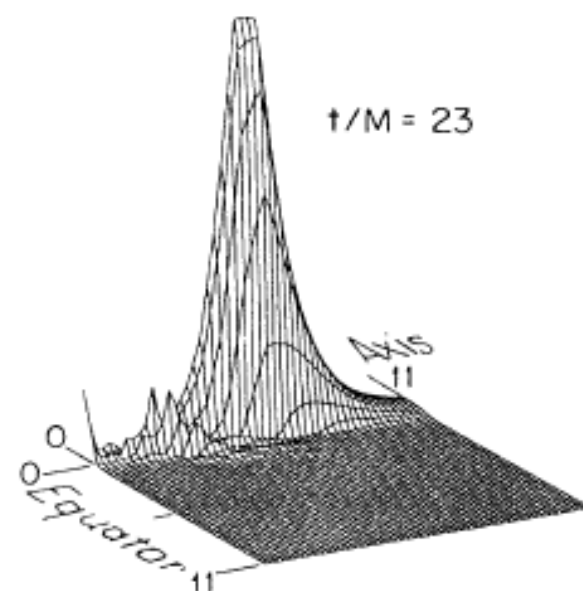
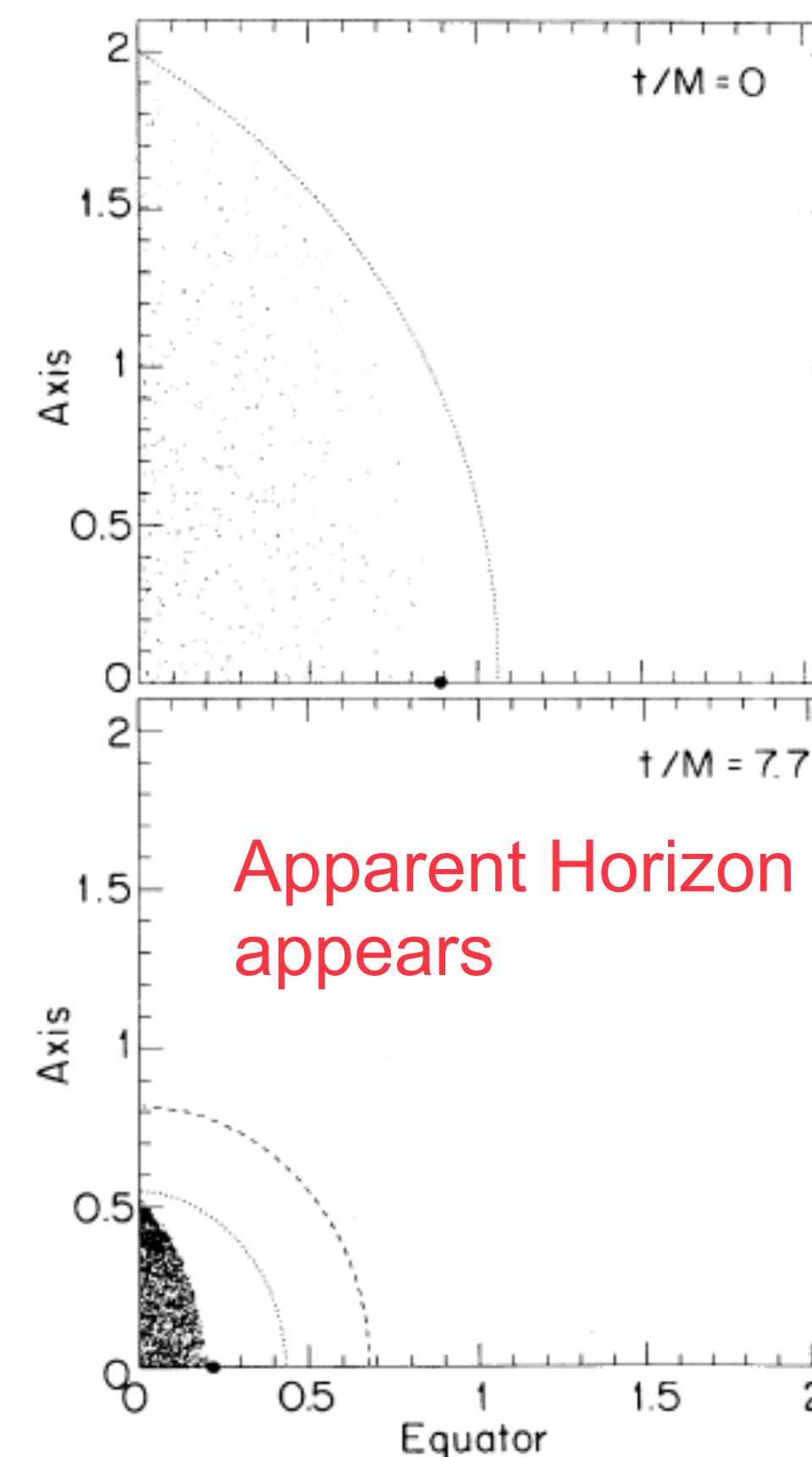
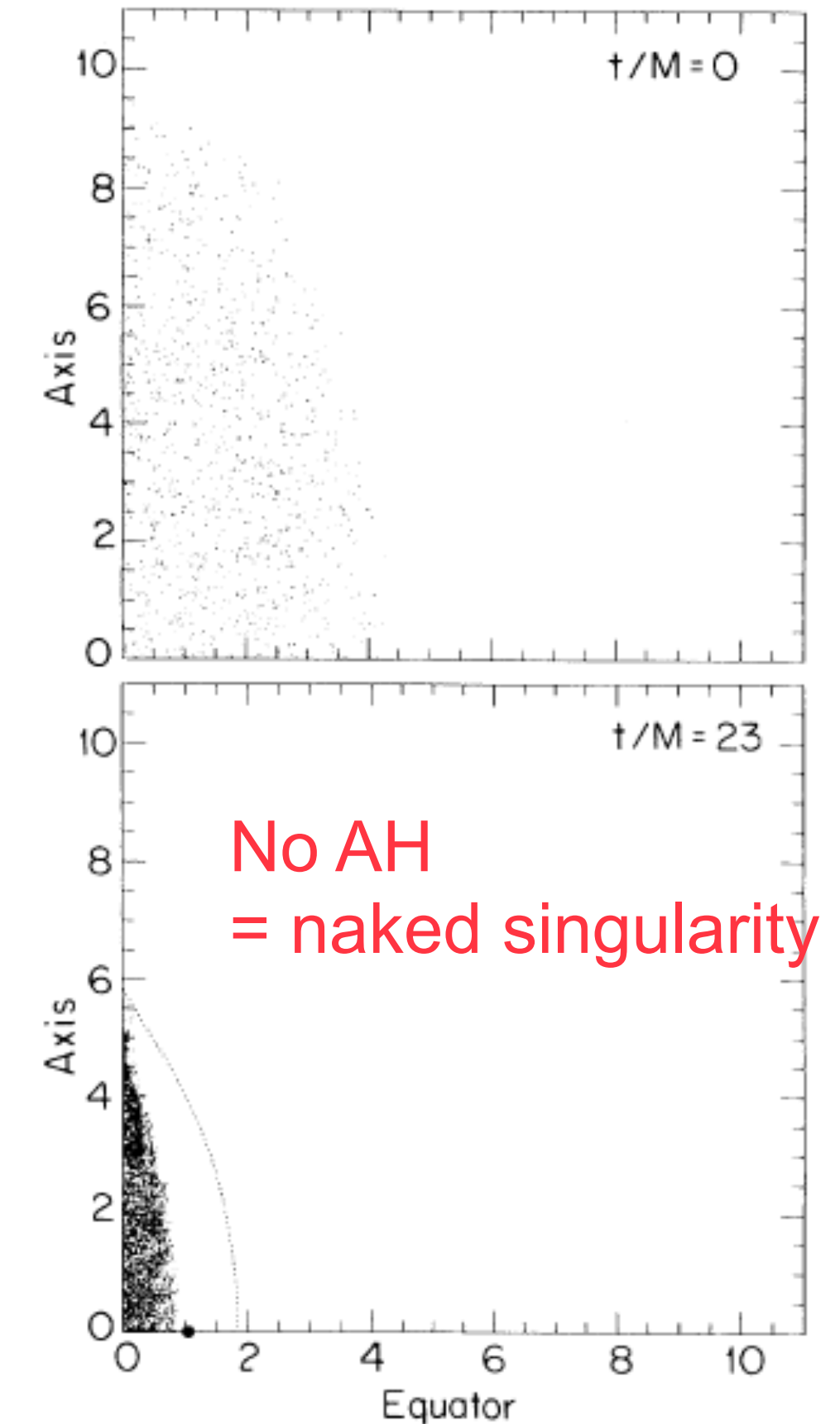


FIG. 4. Profile of I in a meridional plane for the collapse shown in Fig. 2. For the case of 32 angular zones shown here, the peak value of I is $24/M^4$ and occurs on the axis just outside the matter.

FIG. 1. Snapshots of the particle positions at initial and late times for prolate collapse. The positions (in units of M) are projected onto a meridional plane. Initially the semimajor axis of the spheroid is $2M$ and the eccentricity is 0.9. The collapse proceeds nonhomologously and terminates with the formation of a spindle singularity on the axis. However, an apparent horizon (dashed line) forms to cover the singularity. At $t/M=7.7$ its area is $\mathcal{A}/16\pi M^2=0.98$, close to the asymptotic theoretical limit of 1. Its polar and equatorial circumferences at that time are $\mathcal{C}_{\text{pole}}^{\text{AH}}/4\pi M=1.03$ and $\mathcal{C}_{\text{eq}}^{\text{AH}}/4\pi M=0.91$. At later times these circumferences become equal and approach the expected theoretical value 1. The minimum exterior polar circumference is shown by a dotted line when it does not coincide with the matter surface. Likewise, the minimum equatorial circumference, which is a circle, is indicated by a solid dot. Here $\mathcal{C}_{\text{eq}}^{\text{min}}/4\pi M=0.59$ and $\mathcal{C}_{\text{pole}}^{\text{min}}/4\pi M=0.99$. The formation of a black hole is thus consistent with the hoop conjecture.



Apparent Horizon
appears



No AH
= naked singularity

裸の特異点は出現する！

数値シミュレーションによる実例（2011）

PHYSICAL REVIEW D 83, 064006 (2011)

Formation of naked singularities in five-dimensional space-time

Yuta Yamada^{1,*} and Hisa-aki Shinkai^{1,2,†}

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

²*Computational Astrophysics Laboratory, Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN),
Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan*

(Received 18 December 2010; published 4 March 2011)

We numerically investigate the gravitational collapse of collisionless particles in spheroidal configurations both in four- and five-dimensional (5D) space-time. We repeat the simulation performed by Shapiro and Teukolsky (1991) that announced an appearance of a naked singularity, and also find similar results in the 5D version. That is, in a collapse of a highly prolate spindle, the Kretschmann invariant blows up outside the matter and no apparent horizon forms. We also find that the collapses in 5D proceed more rapidly than in 4D, and the critical prolateness for the appearance of an apparent horizon in 5D is loosened, compared to 4D cases. We also show how collapses differ with spatial symmetries comparing 5D evolutions in single-axisymmetry, $SO(3)$, and those in double-axisymmetry, $U(1) \times U(1)$.

DOI: 10.1103/PhysRevD.83.064006

PACS numbers: 04.20.Dw, 04.20.Ex, 04.25.dc, 04.50.Gh

collisionless 粒子の重力崩壊
形状が細長いとnaked singularity出現

5次元にすると重力崩壊ははやいが、
地平面は発生しやすい。

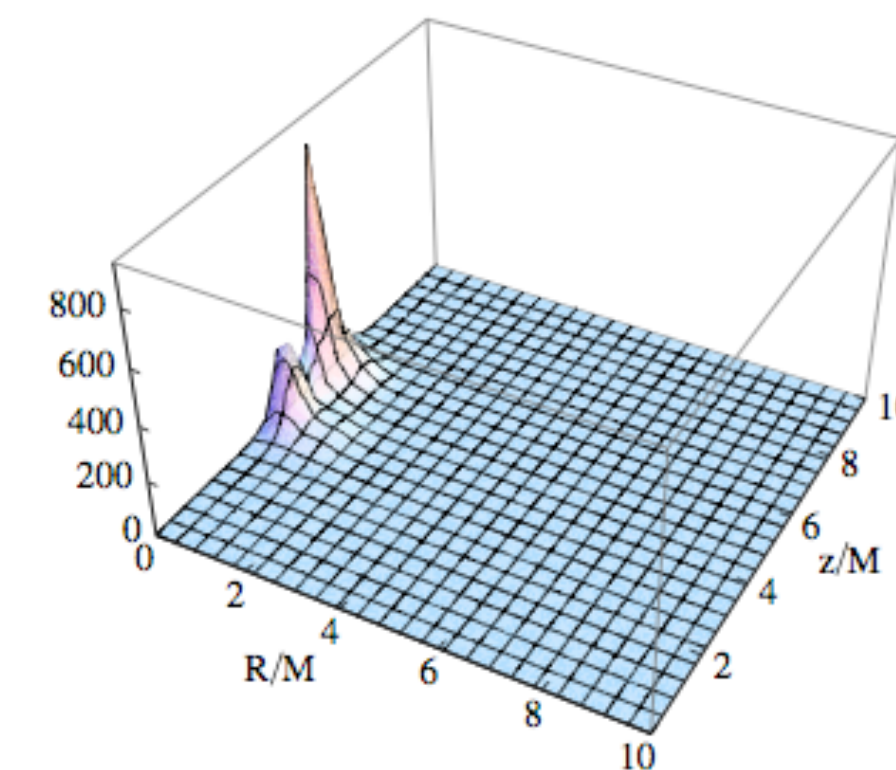


FIG. 3 (color online). Kretschmann invariant I for model 5DS δ at $t/M = 15.4$. The maximum is $O(1000)$, and its location is on z -axis, just outside of the matter.

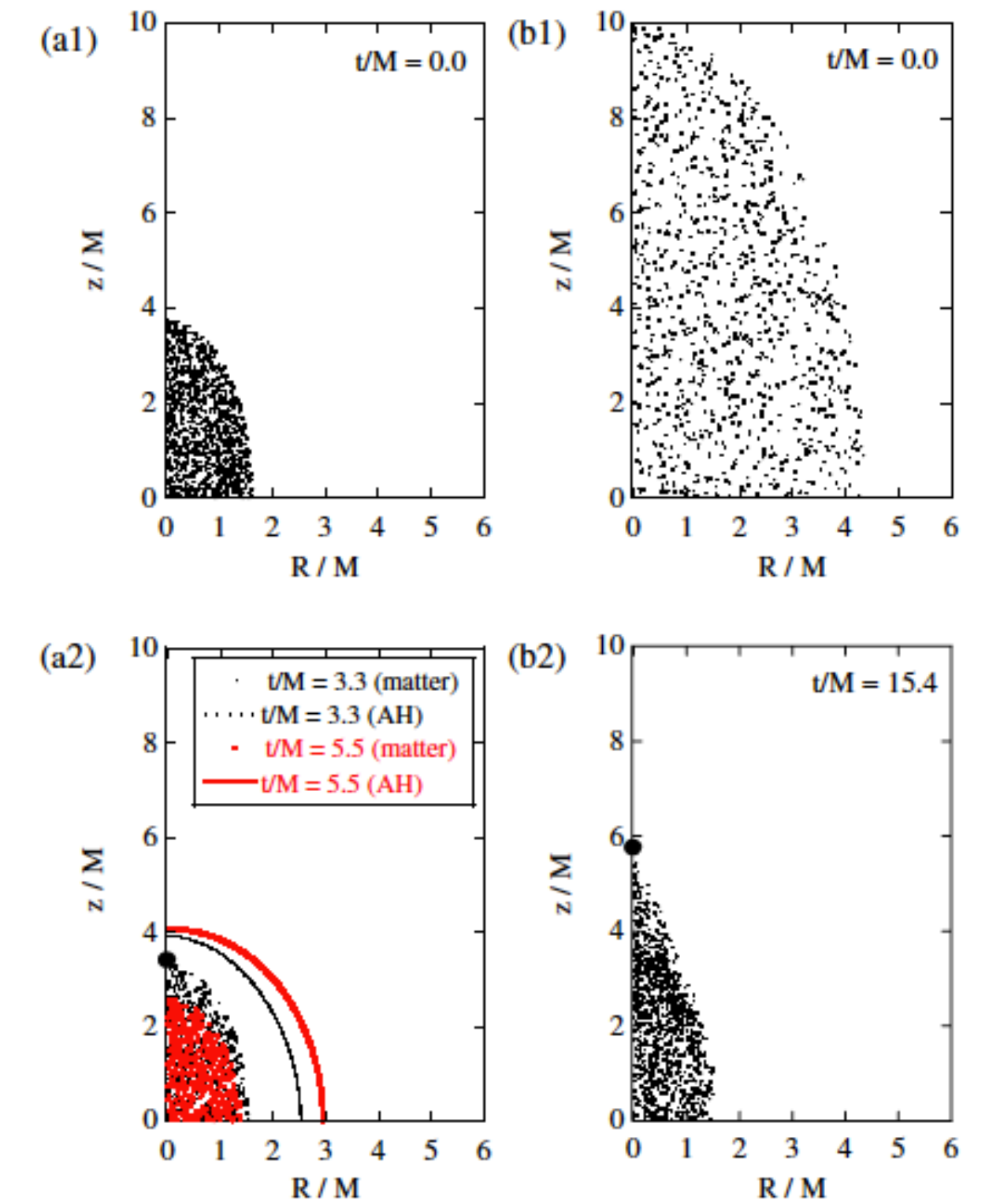


FIG. 2 (color online). Snapshots of 5D axisymmetric evolution with the initial matter distribution of $b/M = 4$ [(a1) and (a2); model 5DS β in Table I] and 10 [(b1) and (b2); model 5DS δ]. We see the apparent horizon (AH) is formed at the coordinate time $t/M = 3.3$ for the former model and the area of AH increases, while AH is not observed for the latter model up to the time $t/M = 15.4$, when our code stops due to the large curvature. The big circle indicates the location of the maximum Kretschmann invariant $I_{\max}$ at the final time at each evolution. Number of particles are reduced to 1/10 for figures.

BH形成の臨界現象

Choptuik, PRL70(1993)9

球対称, massless scalar場のBH形成

(1) 臨界点近傍では場は離散的な自己相似性を持つ

(同じパターンが繰り返される) $\Phi(te^\Delta, re^\Delta) \simeq \Phi(t, r)$

(2) BH質量 M (秩序パラメタ) は波形や振幅などの (制御) パラメタ p と,

$$M \propto |p - p^*|^\beta$$

(3) $\Delta \simeq 3.4, \beta \simeq 0.37$ の値は初期条件に依存しない.

TABLE I. Initial data specification for various one-parameter families discussed in text. For families (a)–(c), I specified the initial pulses to be purely in-going. For family (d), the functions $X_>(r)$, $Y_<(r)$ and $X_>(r)$, $Y_>(r)$ are late-time fits to subcritical and supercritical evolutions, respectively, of the pulse shape shown in Fig. 1(d).

Family	Form of initial data	p
(a)	$\phi(r) = \phi_0 r^3 \exp(-[(r - r_0)/\delta]^q)$	ϕ_0, r_0, δ, q
(b)	$\phi(r) = \phi_0 \tanh[(r - r_0)/\delta]$	ϕ_0
(c)	$\phi(r + r_0) = \phi_0 r^{-5} [\exp(1/r) - 1]^{-1}$	ϕ_0
(d)	$X(r) = (1 - \eta)X_<(r) + \eta X_>(r)$ $Y(r) = (1 - \eta)Y_<(r) + \eta Y_>(r)$	η

TABLE II. Numerically determined values of the scaling exponent γ in the conjectured relationship $M_{\text{BH}} \simeq c_f |p - p^*|^\gamma$. μ_{min} and μ_{max} are the minimum and maximum mass fractions ($\mu \equiv M_{\text{BH}}/M$) of the black holes computed in the simulation and γ is the least-squares estimate of the scaling exponent.

Family	Parameter	μ_{min}	μ_{max}	γ
(a)	ϕ_0	7.9×10^{-3}	8.9×10^{-1}	0.376
(a)	δ	1.3×10^{-3}	9.4×10^{-1}	0.372
(a)	q	3.1×10^{-3}	9.8×10^{-1}	0.372
(a)	r_0	1.3×10^{-2}	9.2×10^{-1}	0.379
(b)	ϕ_0	2.8×10^{-3}	4.0×10^{-1}	0.372
(c)	ϕ_0	4.9×10^{-3}	9.9×10^{-1}	0.366
(d)	η	2.2×10^{-5}	1.7×10^{-2}	0.380

VOLUME 70, NUMBER 1

PHYSICAL REVIEW LETTERS

4 JANUARY 1993

Universality and Scaling in Gravitational Collapse of a Massless Scalar Field

Matthew W. Choptuik

Center for Relativity, University of Texas at Austin, Austin, Texas 78712-1081

(Received 22 September 1992)

I summarize results from a numerical study of spherically symmetric collapse of a massless scalar field. I consider families of solutions, $S[p]$, with the property that a critical parameter value, p^* , separates solutions containing black holes from those which do not. I present evidence in support of conjectures that (1) the strong-field evolution in the $p \rightarrow p^*$ limit is universal and generates structure on arbitrarily small spatiotemporal scales and (2) the masses of black holes which form satisfy a power law $M_{\text{BH}} \propto |p - p^*|^\gamma$, where $\gamma \approx 0.37$ is a universal exponent.

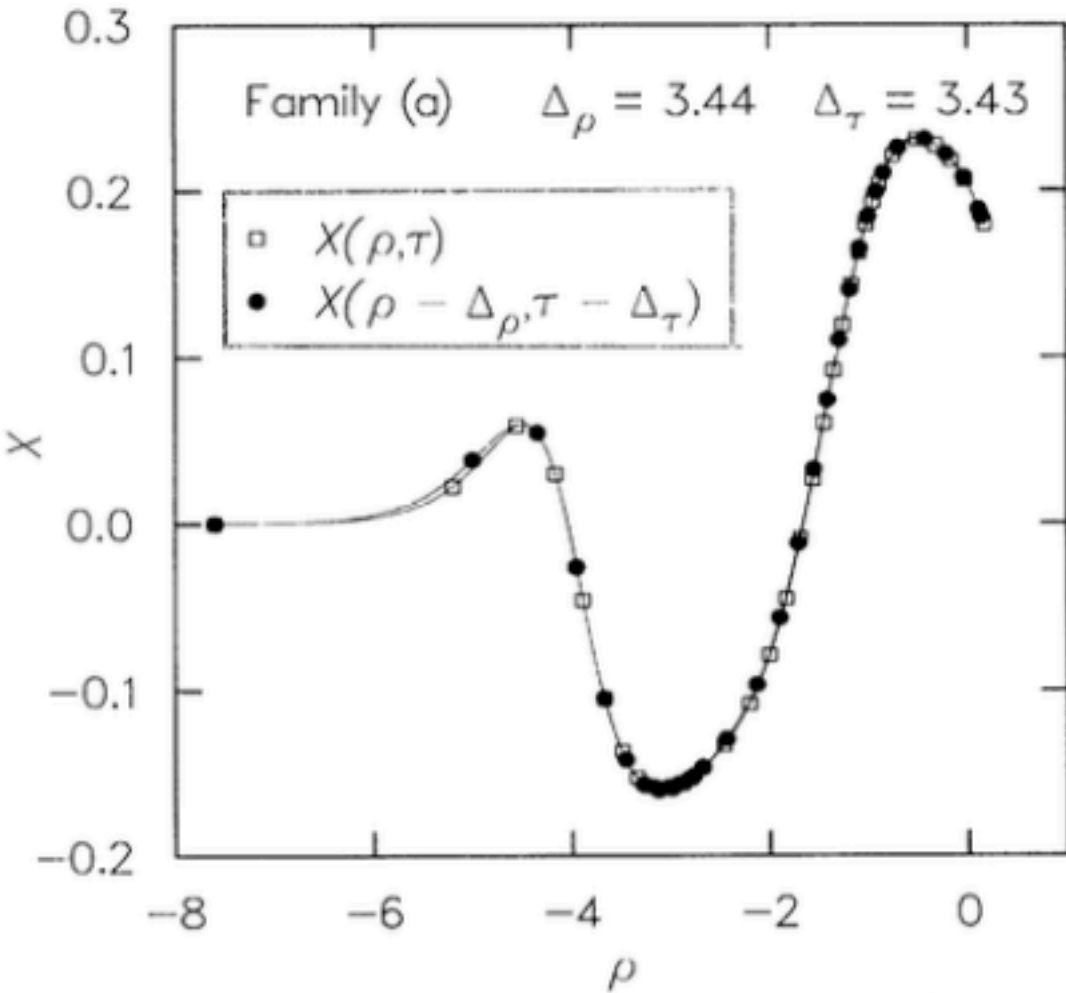


FIG. 2. Illustration of the rescaling or echoing property observed in near-critical evolution of the scalar field. The curve marked with open squares shows the profile of the scalar field variable, X , at some proper central time T_0 . The curve marked with solid circles is the profile at a later time $T_0 + e^{\Delta\tau}$ but on a scale $e^{\Delta\rho} \approx 30$ times smaller.

- 1993 Choptuik: 球対称, massless scalar場のBH形成
 1993 Abrahams-Evans: 軸対称, 真空, 重力波, PRL 70 (1994) 2980
 1994 Evans-Coleman: 球対称, 輻射流体, PRL 72 (1994) 1782

ポテンシャル付スカラー場,
 axion-dilaton系,
 2+1次元モデル,
 複素スカラー場,
 厳密解に基づくモデル, 線形摂動,
 流体+状態方程式,

- 1995 Koike-Hara-Adachi, PRL74 (1995) 5170
 1995 Gundlach, PRL75 (1995) 3214
 1996 Maison, PLB366 (1996) 82

自己相似解+くりこみ群+相転移

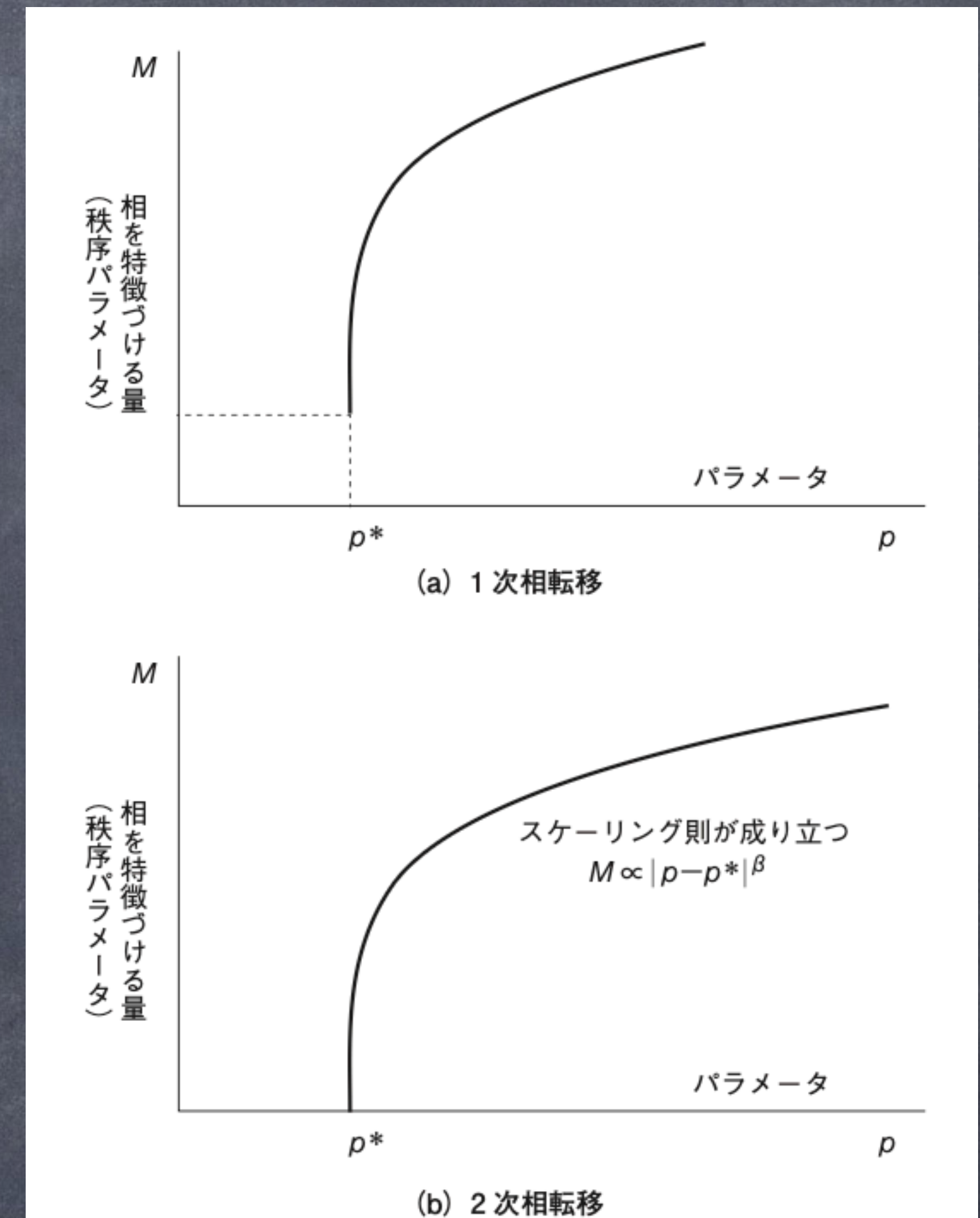


図4-5 相転移現象で普遍的に見られる特徴

(縦軸 M は相を特徴づける量、横軸 p は相転移を引き起こすパラメータ)
 (a): 1次相転移の例。たとえば M は磁化、 p は温度の逆数
 (b): 2次相転移の例。たとえば M はブラックホールの質量、 p は初期に与える質量密度の非一様度。2次相転移では特徴的なスケーリング則が成り立ち、その指数 β は系によって普遍的な定数になることが知られている

臨界現象研究に学ぶ

〇〇対称の牛アプローチ



「乳牛の乳の生産量を増やすにはどうしたらよいか」

「原因となるメカニズムを考えよう」

「次に、違う物質場で、考えよう」

「次に、違う状態方程式で、考えよう」

「次に、違う次元で、考えよう」

「次に、厳密解に基づいたモデルを考えよう」

「次に、厳密解の摂動展開を考えよう」

「次に、他の物理とのアナロジーを考えよう」



裸の特異点は存在するのか？（ホーキングvsソーンの賭け ver2）

Whereas Stephen W. Hawking (having lost a previous bet on this subject by not demanding genericity) still firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne (having won the previous bet) still regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist, unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager that

When any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, then

A dynamical evolution from generic initial conditions (i.e., from an open set of initial data) can never produce a naked singularity (a past-incomplete null geodesic from $\mathcal{I}_+$).

The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable, truly concessionary message.

Stephen W. Hawking

John P. Preskill & Kip S. Thorne

Pasadena, California, 5 February 1997

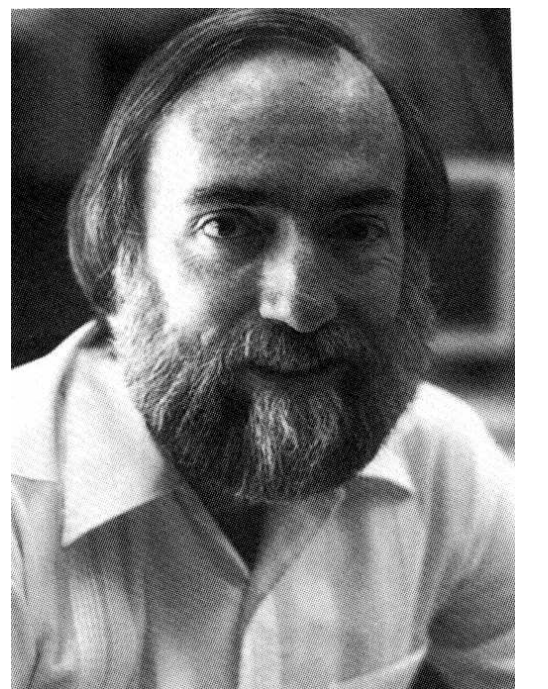
ホーキング

「一般的な初期条件では、裸の特異点は発生しない」



ソーン, プレスキル

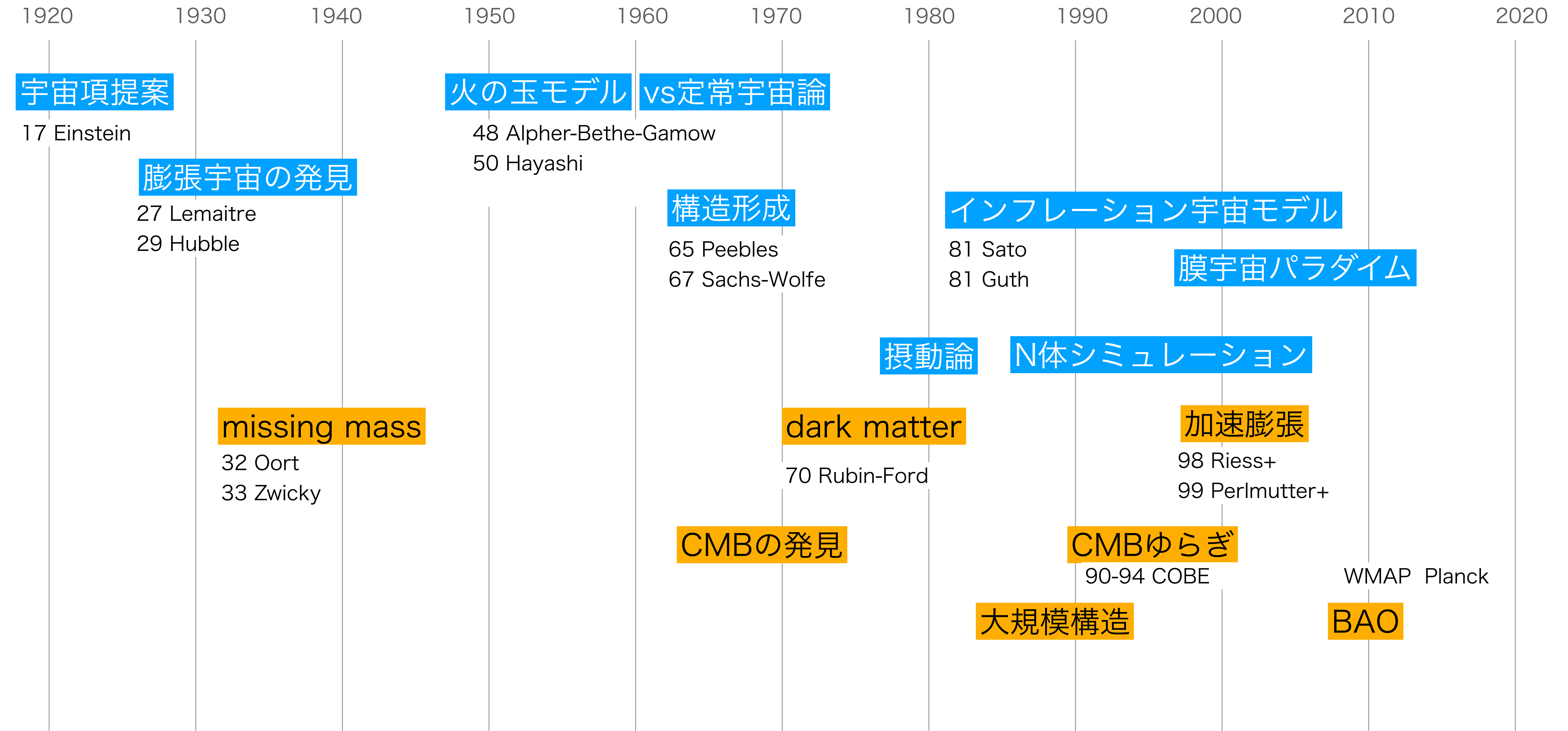
「あり得る」



敗者は裸体を覆う着物を勝者に与え、その着物には敗北を認める文章を入れること。

1997年2月5日

宇宙論研究の歴史



宇宙原理 (cosmological principle)

宇宙を考える上での大前提

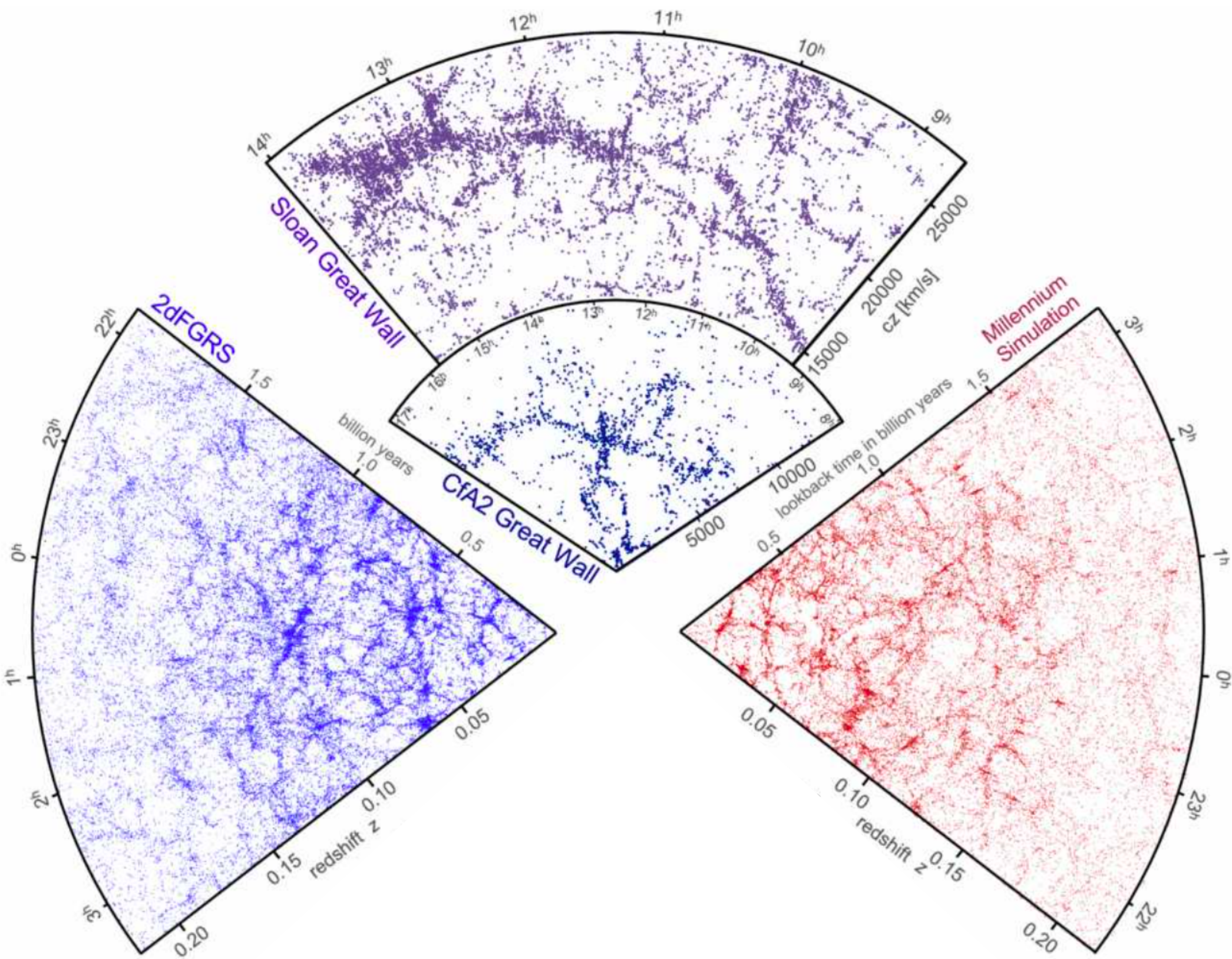
宇宙原理 (大意)

私たちは宇宙の中で特別な位置にいるわけではない. (人間が宇宙の中心にいるわけではない.)

宇宙原理 (物理用語バージョン)

宇宙は巨視的なスケールでは空間的に一様・等方である, すなわち宇宙空間のすべての点は本質的に同等である.
(宇宙は空間的にでこぼこがなく, どちらを向いても同じである.)

宇宙には天体や構造があるが、
とりあえず一様等方時空を考えよう

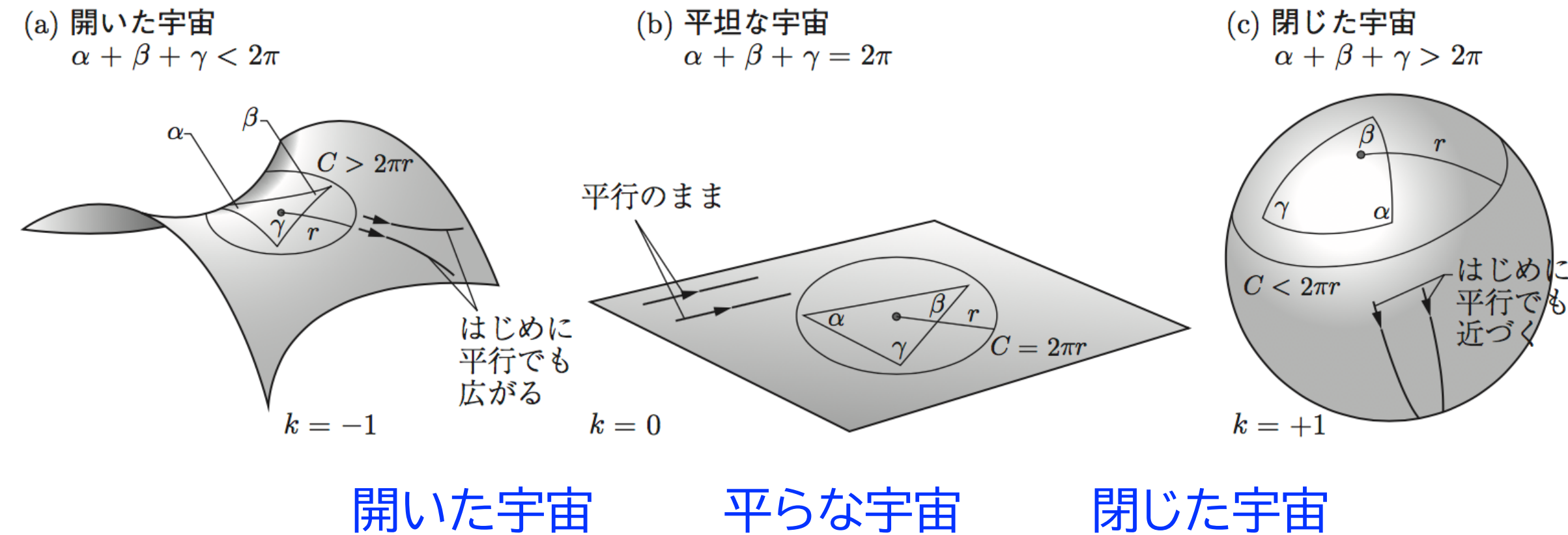


(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)

図 1.35 銀河の分布観測とシミュレーションによる疑似分布を並べたもの. [上] SDSS サーベイによる銀河の分布図と図 1.34 を重ねたもの. SDSS は, 北天から見える 65 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している. 1.3 億光年の距離に及ぶ 1 万個以上のグレートウォール (万里の長城) も新たに発見された. [左] 2dFGR サーベイによる銀河の分布図. 南天の 22 万個以上の銀河を 2 億光年まで示している. [右] ミレニアム・シミュレーションという数値計算結果を似せて示したもの. [Springel, Frenk, White の論文 (2006) を加工]

宇宙原理 (cosmological principle)

➡ 球対称時空として, 3つのタイプが許される



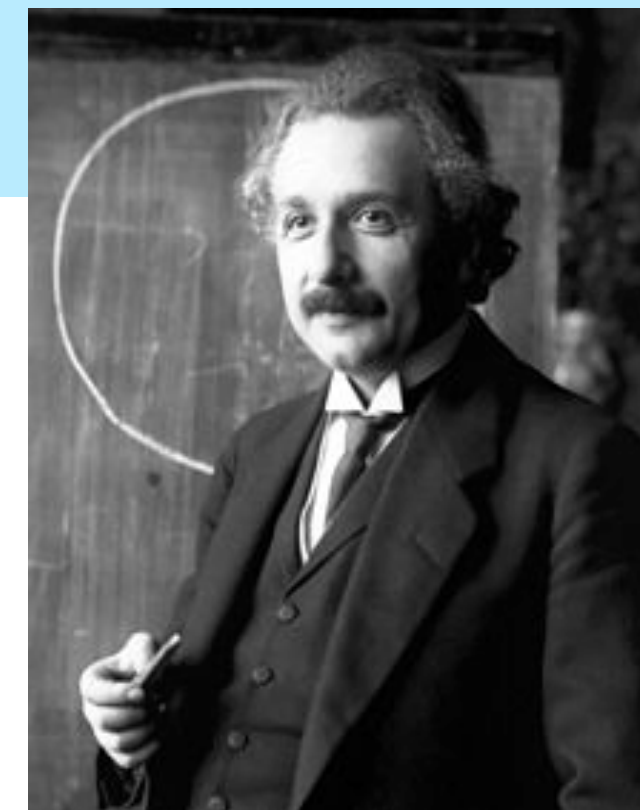
➡ アインシュタイン方程式を解くと, 大きさが時間と共に変化する時空の解(フリードマン解)が出てくる

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

Friedmann, Robertson, Walker, Lemaitre (1920s)

完全流体, 一様等方時空 (球対称) でのEinstein方程式の厳密解

アインシュタインは膨張宇宙を信じなかった



「宇宙は未来永劫不変であるべきだ」

⇒定常的な宇宙モデルをつくるために、方程式を修正
(宇宙項, cosmological constant)

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

⇒重力（引力）作用に反対する斥力を導入
ただし、不安定なつり合いの解でしかない。
アインシュタインらしくない。

Lemaitre



「宇宙は膨張するのが
自然です」

「あなたの計算は正しいが（こんな解を信じる
なんて）あなたの物理的センスは言語道断だ..」
(Your calculation is correct, but your
physical insight is abominable.)

宇宙全体は膨張・収縮する？

➡ 一般相対性理論(時空の方程式)を使って, 3つのタイプを計算するすると, 膨張したり収縮したりする宇宙の解になった

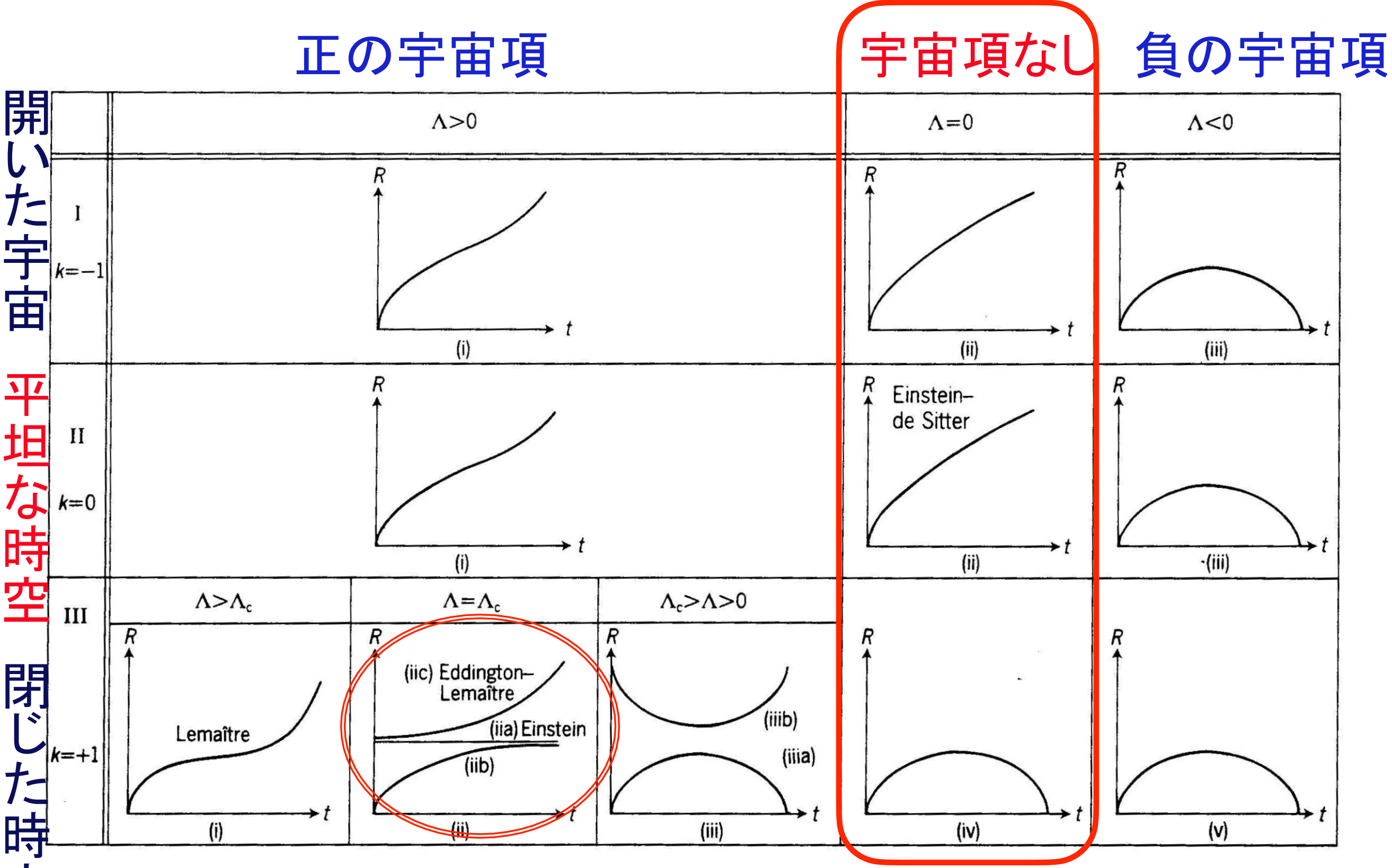


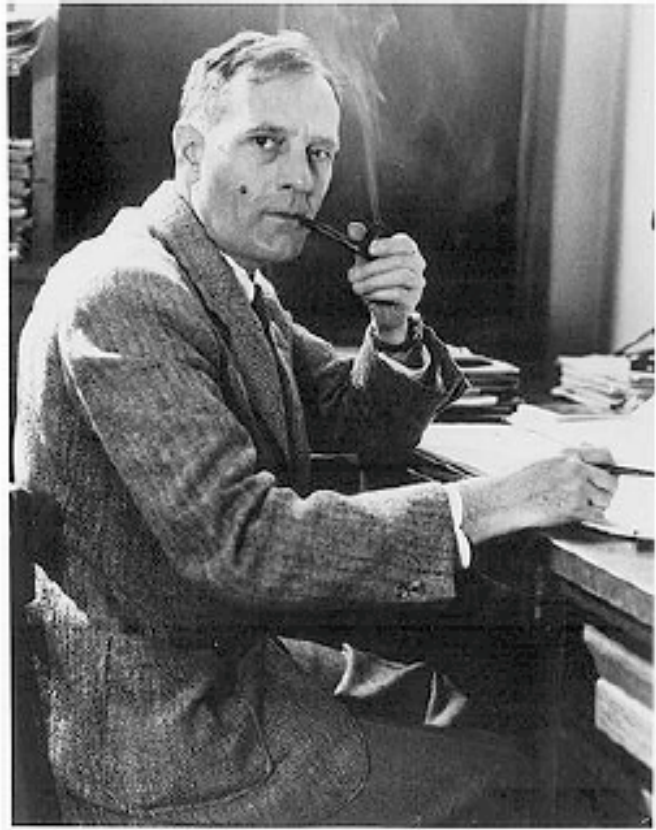
Fig. 23.1 Classification of Friedmann models.

d’Inverno: Introducing Einstein’s Relativity

➡ 宇宙は不変のもの, と考えていたアインシュタインは困った

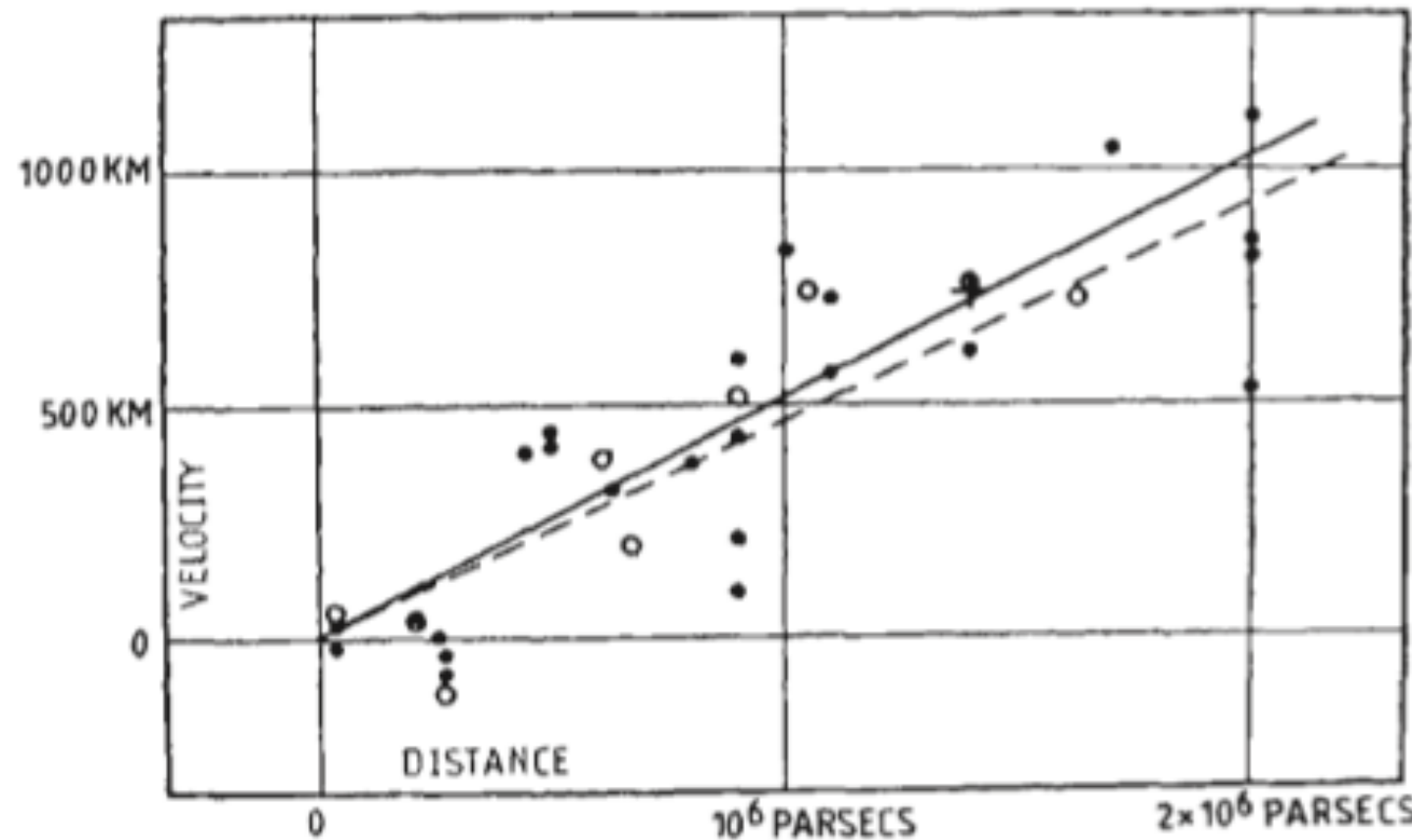
ハッブル・ルメートル 宇宙膨張の発見 (1927/1929)

Edwin Powell Hubble
(1889–1953)



1923年 アンドロメダ星雲が、我々の銀河内ではなく独立した銀河である

1929年 遠方の銀河ほど後退速度が大きい



$$v = H_0 d$$

銀河の後退速度 = ハッブル定数 H_0 × 銀河までの距離

$$H = 530 \text{ km/s/Mpc}$$

現在値 70 km/s/Mpcよりかなり大きい
宇宙年齢18億年

「ハッブル・ルメートルの法則」と呼ぶことに、
2019年、国際天文学連合 (IAU) が議決。

真貝: 『現代物理学が描く宇宙論』

コラム 30 宇宙膨張はハッブルの発見か

宇宙膨張を報告したのは1929年のハッブルの論文だというのが通説だ。速度と距離の比例定数をハッブル定数 H_0 というのも広く知れ渡っている。しかし、ルメートルの1927年のフランス語の論文では、すでに銀河の後退速度が宇宙膨張によるものだと述べられていて、「ハッブル定数」がほぼ同じ値で計算されていた、という事実が、2011年になって研究者間で話題になった。

ルメートルの論文はほとんど知られていなかったが、1931年に英訳されて英国王立天文学会誌に掲載されている。だが、その際に、ハッブルの業績と重なる部分は故意に訳されずに、抜け落ちていることも指摘された。ハッブル定数の計算に関する式の一部と、本文および脚注がすっぽりと抜け落ちているのである。

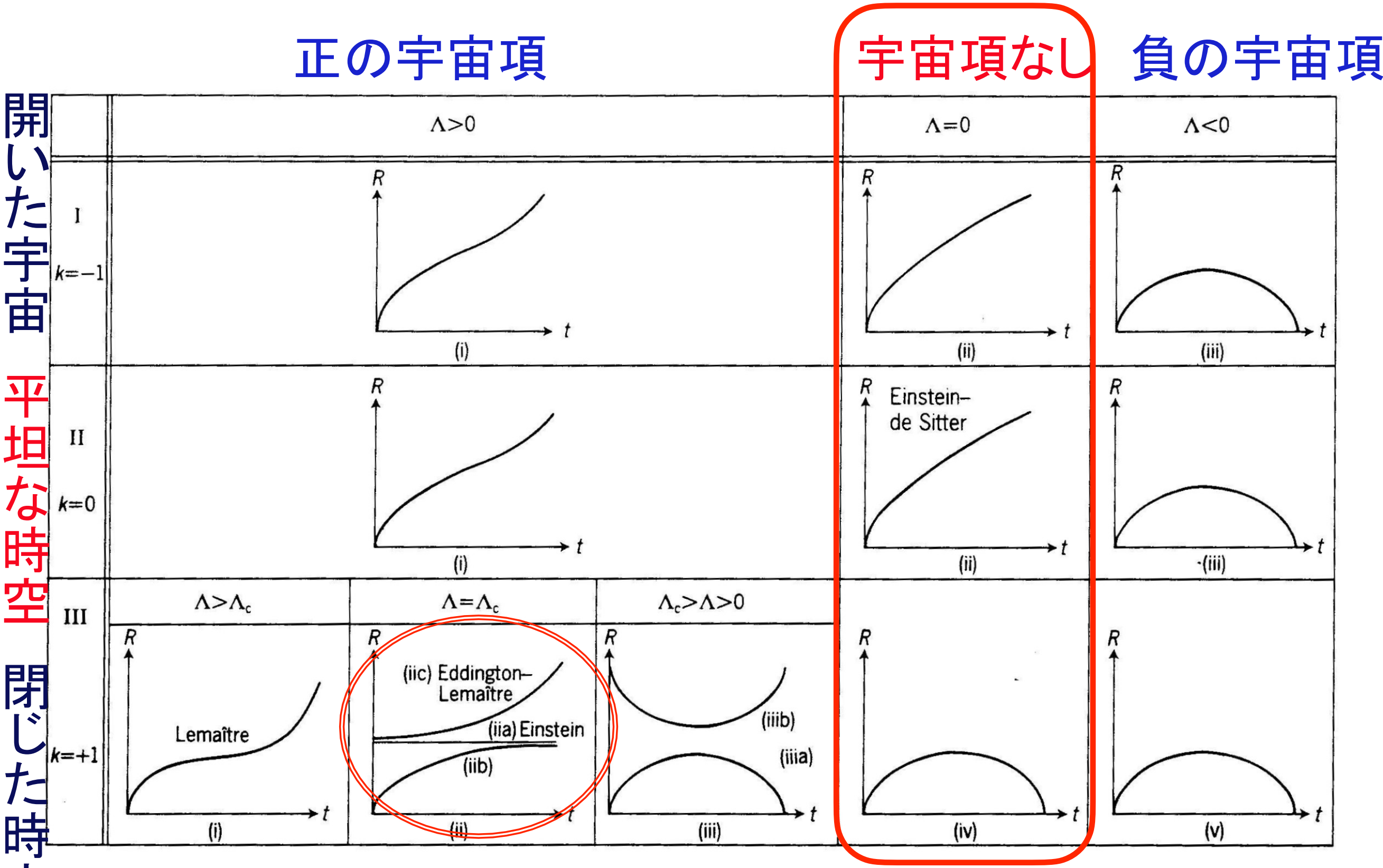
ハッブルの観測結果は、図5.7に紹介したが、以前から「これだけまばらなデータから、宇宙膨張をすぐに結論したのはなぜか」という疑問は物理学者の間でよく話題になっていた。ハッブルの慧眼だ、と説明されることも多かったが、直前にルメートルの業績を知っていたなら理解できる。ルメートルは神父でもあったので、「謙虚で超越した聖人 vs 科学発見の先取権に強欲な悪人」という構図も考えられ、かくして、ハッブル本人の悪人説や、ハッブルを怒らせることを恐れた英国王立天文学会悪人説などいろいろな憶測が飛び交うことになった。

2011年の最後になって、この騒動に終止符を打つ報告があった。英訳したのは、ルメートル本人であり、該当箇所を削除したのもルメートルだというのだ。その理由については不明であるが、ハッブル悪人説は誤解だったことになる（悪人ではなかったことが証明されたわけではないが）。いずれにせよ、ルメートルの業績について再評価が進んでおり、1927年の彼の論文の引用件数も増加している。

参考：須藤靖，日本物理学会誌，2012年5月号，p311

宇宙全体は膨張・収縮する？

一般相対性理論(時空の方程式)を使って, 3つのタイプを計算するすると, 膨張したり収縮したりする宇宙の解になった



- 1. 閉じた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = +1$.
- 2. 平坦な宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = 0$.
- 3. 開いた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = -1$.
- 4. 平坦な宇宙で宇宙項あり. $\Lambda > 0, k = 0$.

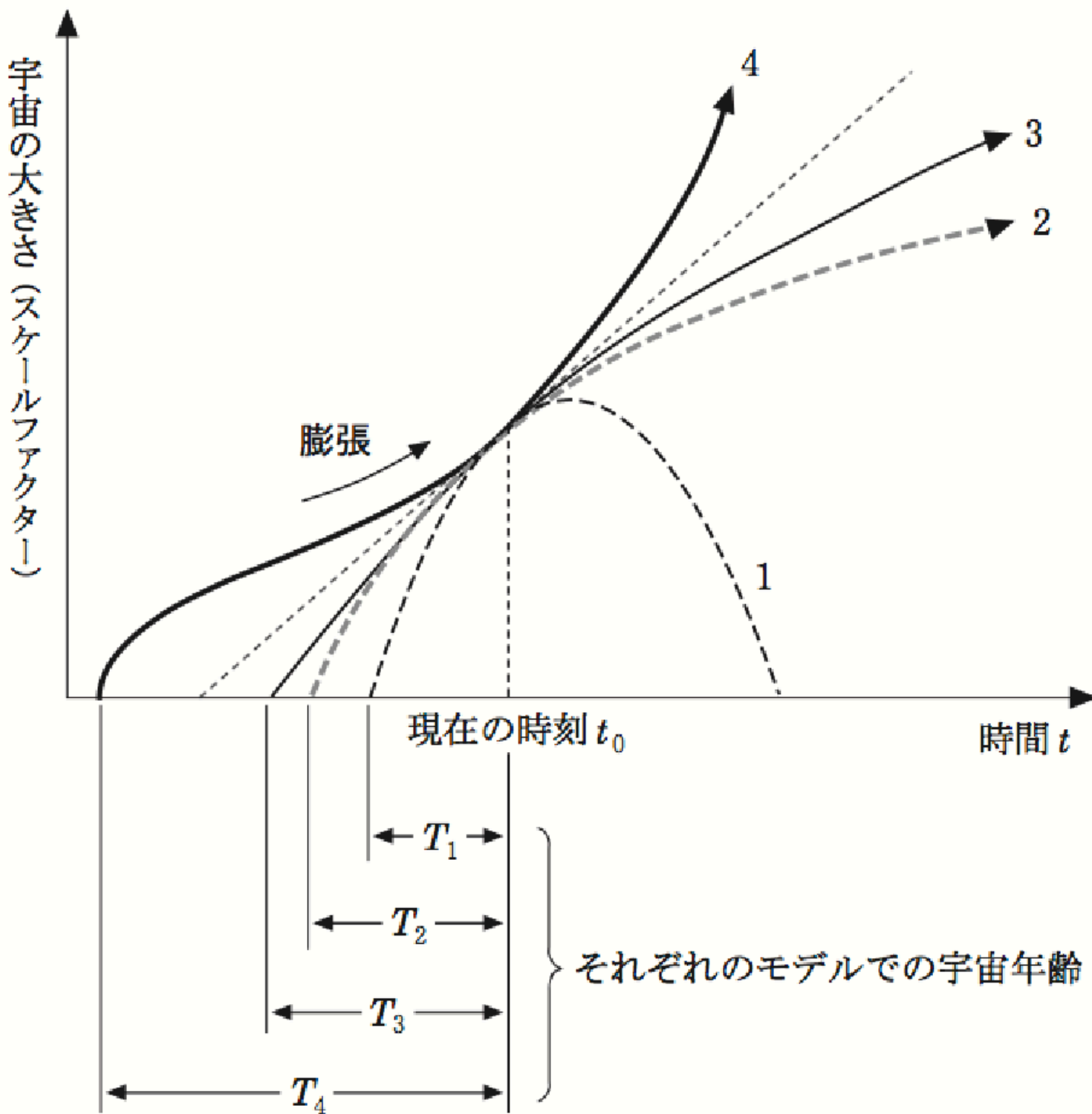


Fig. 23.1 Classification of Friedmann models.

d'Inverno: Introducing Einstein's Relativity

宇宙は不変のもの, と考えていたアインシュタインは困った

真貝: 『現代物理学が描く宇宙論』



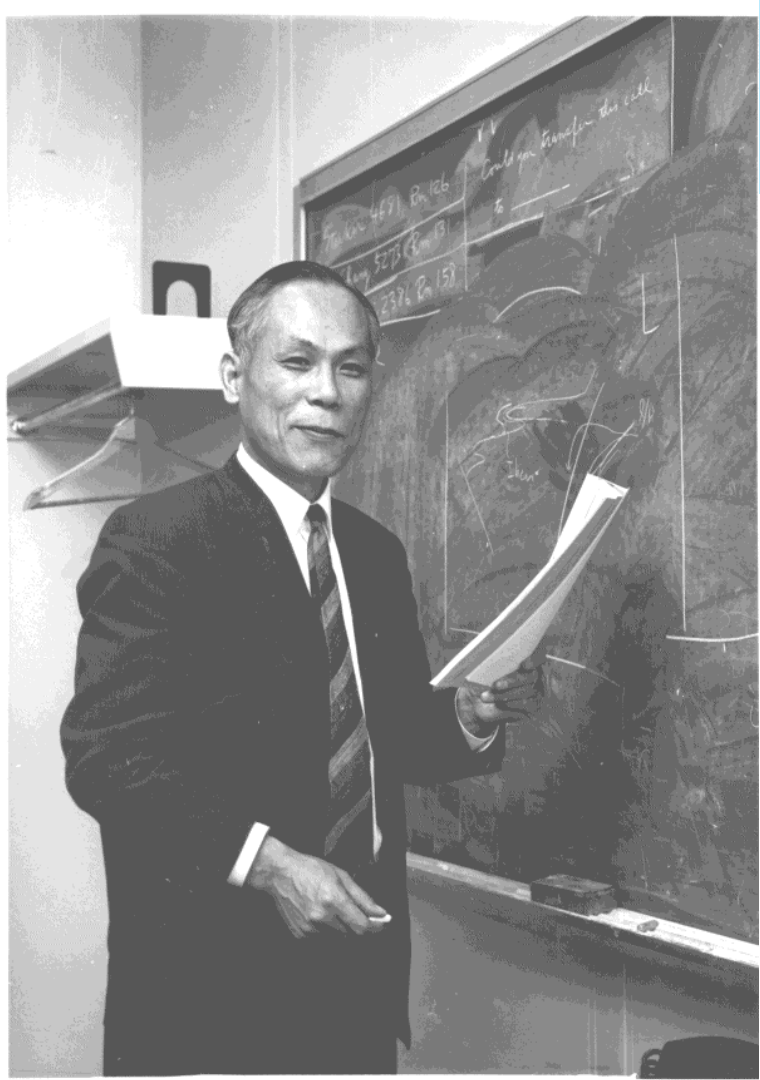
ガモフ

火の玉宇宙論の誕生

宇宙膨張が本当なら，過去は小さな宇宙だったはず。
宇宙のはじまりは，すべての物質とエネルギーが集まり，
非常に高温で高密度の状態だったことになる。

1946年，ガモフ，「宇宙が高温高密度の火の玉の状態だったときに，短時間で元素が合成されていった」

1948年， $\alpha\beta\gamma$ ，「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で，すべての元素が~~す~~えられる」



NASA G-68-10,414

林忠四郎（1950）

『元素合成ははじめの3分間で終了』

The Origin of Chemical Elements
R. A. ALPHER* α
*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*
AND
H. BETHE β
Cornell University, Ithaca, New York
AND
G. GAMOW γ
The George Washington University, Washington, D. C.
February 18, 1948

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas

The results of these calculations were first announced in a letter to *The Physical Review*, April 1, 1948. This was signed Alpher, Bethe, and Gamow, and is often referred to as the 'alphabetical article'. It seemed unfair to the Greek alphabet to have the article signed by Alpher and Gamow only, and so the name of Dr. Hans A. Bethe (*in absentia*) was inserted in preparing the manuscript for print. Dr. Bethe, who received a copy of the manuscript, did not object, and, as a matter of fact, was quite helpful in subsequent discussions. There was, however, a rumor that later, when the alpha, beta, gamma theory went temporarily on the rocks, Dr. Bethe seriously considered changing his name to Zacharias. The close fit of the calculated curve and the observed abundances is shown in Fig. 15, which represents the results of later calculations carried out on the electronic computer of the National Bureau of Standards by Ralph Alpher and R. C. Herman (who stubbornly refuses to change his name to Delter).

[wikipedia](#)

Physical Review, 1948/4/1

火の玉宇宙論 vs 定常宇宙論

1950-60年代 当時の観測データからは, 宇宙年齢は18億年
vs 地球の岩石からは, 地球年齢は30億年

「宇宙には始まりがあった」

宇宙誕生後, 3分で軽元素の合成がされた

「宇宙に始まりも終わりもない」

宇宙膨張をしているが外側では新たに物質が生成している

表 5.1 ビッグバン宇宙モデルと定常宇宙モデルの比較.

	ビッグバン宇宙モデル	定常宇宙モデル
宇宙膨張	宇宙全体が1点からはじまり, 膨張を続けている. 過去は高温高密度の火の玉だったが, 現在は膨張のため, 温度が低下した.	膨張を続けているが, 物質生成がつねに行われているので, 宇宙の物質密度は一定である. 宇宙の姿は, 過去も現在も不変である.
宇宙マイクロ波背景放射	過去の火の玉宇宙の名残りとして 5 K ~ 7 K で存在するはずだ.	存在する必要はない.
元素の存在比	元素合成の理論から, 軽元素 (H, He) の存在比は説明できた. それ以外はまだできていない.	(説明せず)
宇宙年齢	宇宙膨張を観測することによって, 宇宙年齢が決まる.	宇宙は大局的に不変なので, 宇宙年齢を考える必要はない.
宇宙誕生	宇宙はある時刻にはじまった. しかし, そのメカニズムを説明できない.	議論する必要はない.



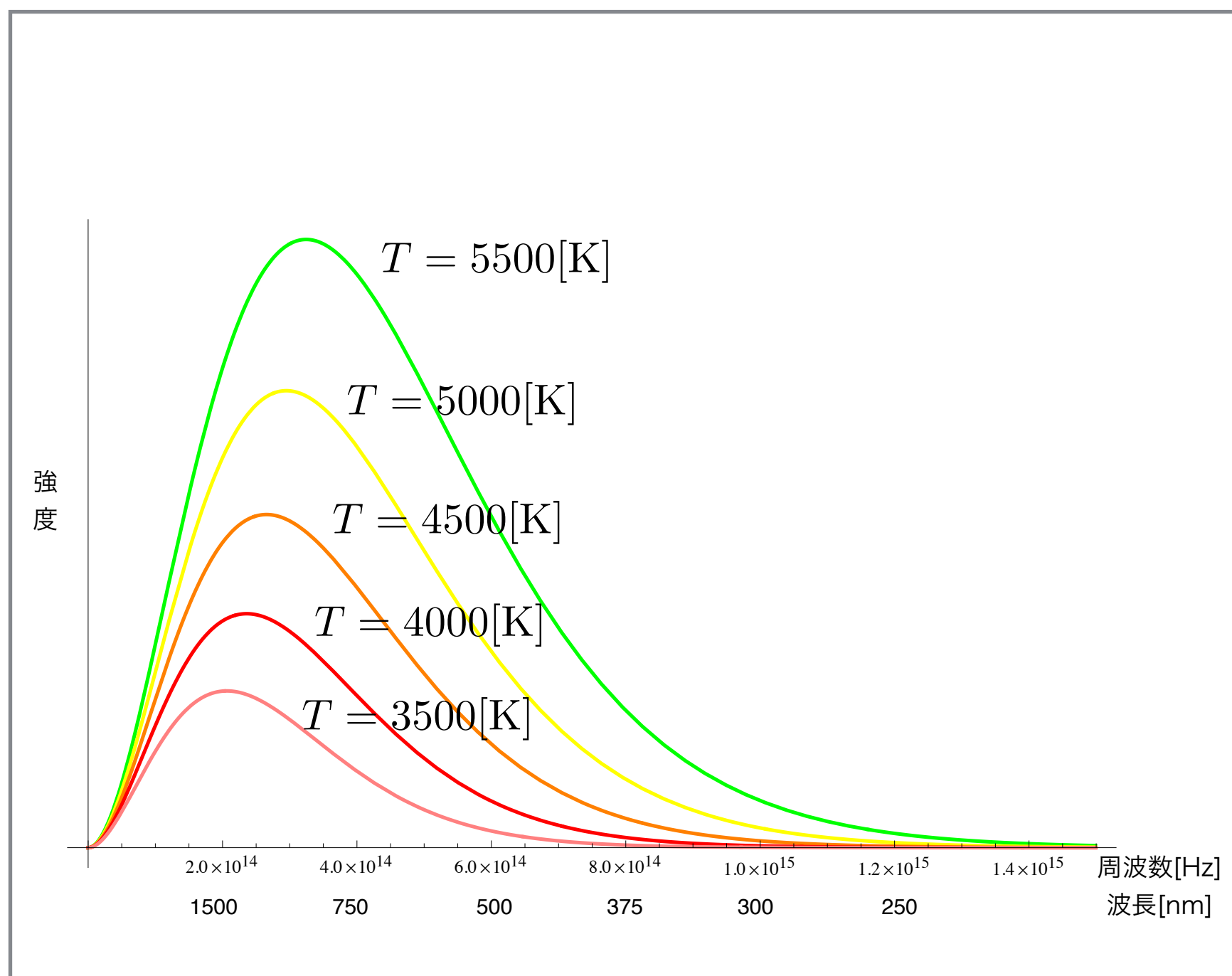
ガモフ



ホイル

宇宙マイクロ波背景輻射

Cosmological Microwave Background Radiation (CMB)



黒体放射(黒体輻射)

＝物体は、温度に応じて
熱を電磁波の形で放射する

過去に宇宙が高温だったら、
その証拠の「放射」があるはず

宇宙誕生後、30万年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度(約3000K)が放射されて残っているはず。

宇宙膨張で温度下がって 5～7K ($-268^{\circ} \sim -266^{\circ}$)位

宇宙マイクロ波背景輻射の発見

Discovery of CMB



Arno A. Penzias (1933–)
Robert W. Wilson (1936–)

ベル研究所, 電波通信の実験
「どうしても取り除けないノイズがある」
「昼夜によらず, 季節によらず, 方向によらないノイズがある」



1978年, ノーベル物理学賞受賞

宇宙誕生後, 30万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. **その時の温度**(約**3000K**)が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって ~~5~7K~~ (-268° ~ -266°) 位
3.5K

インフレーション

Guth, PRD23(1981)347

Sato, MNRAS 195(1981)467

Starobinsky, PLB 91(1980) 99

Kazanas, ApJL 241 (1980) L59

Mon. Not. R. astr. Soc. (1981) 195, 467–479

First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the Universe

Katsuhiko Sato *Nordita, Blegdamsvej 17, DK-2100 Copenhagen ϕ , Denmark^{*}
and Department of Physics, Kyoto University, Kyoto, Japan[†]*

Received 1980 September 9; in original form 1980 February 21

標準BigBang宇宙論の

地平線問題

平坦性問題

銀河形成問題

モノポール問題

を解決するため.

宇宙の初期に指数関数的な急激な膨張があった

PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 23, NUMBER 2

15 JANUARY 1981

Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems

Alan H. Guth^{*}

Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 11 August 1980)

The standard model of hot big-bang cosmology requires initial conditions which are problematic in two ways: (1) The early universe is assumed to be highly homogeneous, in spite of the fact that separated regions were causally disconnected (horizon problem); and (2) the initial value of the Hubble constant must be fine tuned to extraordinary accuracy to produce a universe as flat (i.e., near critical mass density) as the one we see today (flatness problem). These problems would disappear if, in its early history, the universe supercooled to temperatures 28 or more orders of magnitude below the critical temperature for some phase transition. A huge expansion factor would then result from a period of exponential growth, and the entropy of the universe would be multiplied by a huge factor when the latent heat is released. Such a scenario is completely natural in the context of grand unified models of elementary-particle interactions. In such models, the supercooling is also relevant to the problem of monopole suppression. Unfortunately, the scenario seems to lead to some unacceptable consequences, so modifications must be sought.

インフレーションモデル

$$S = \int d^4x [L_{\text{gravity}} + L_{\text{matter}}]$$

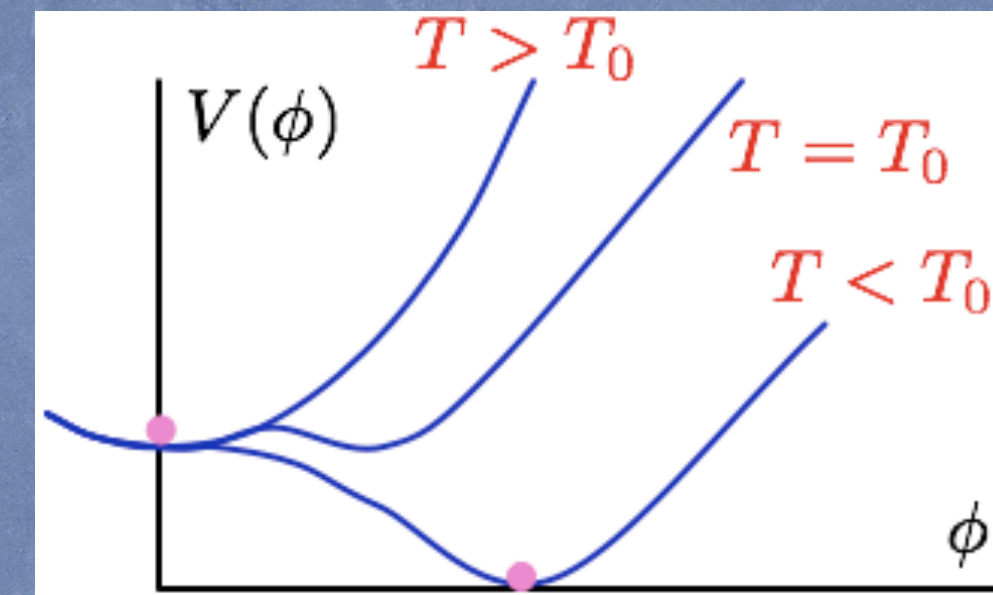
インフレーションを引き起こす場

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} R$$

(original model)

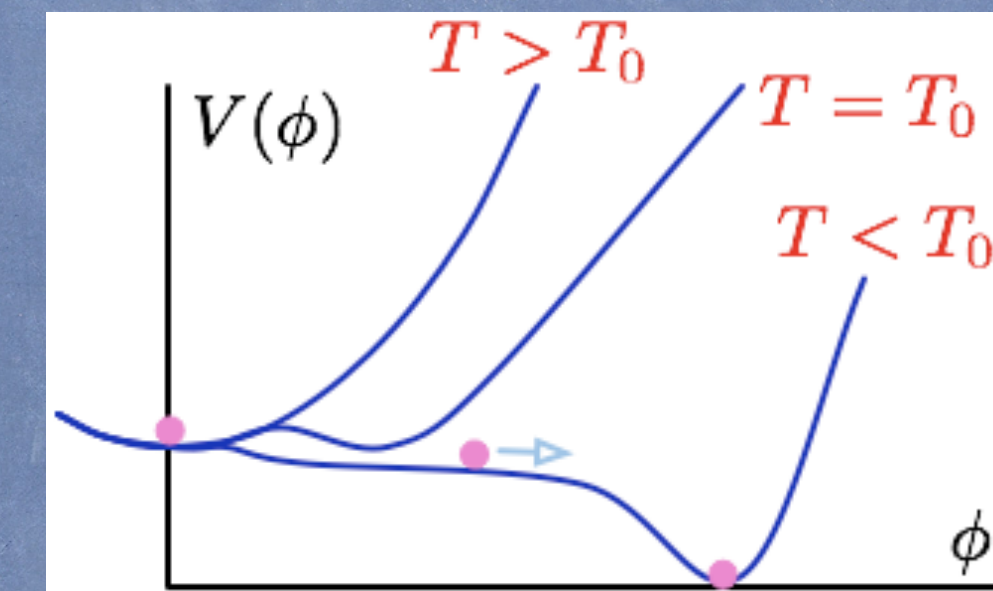
old inflation

Guth 81, Sato 81



new inflation

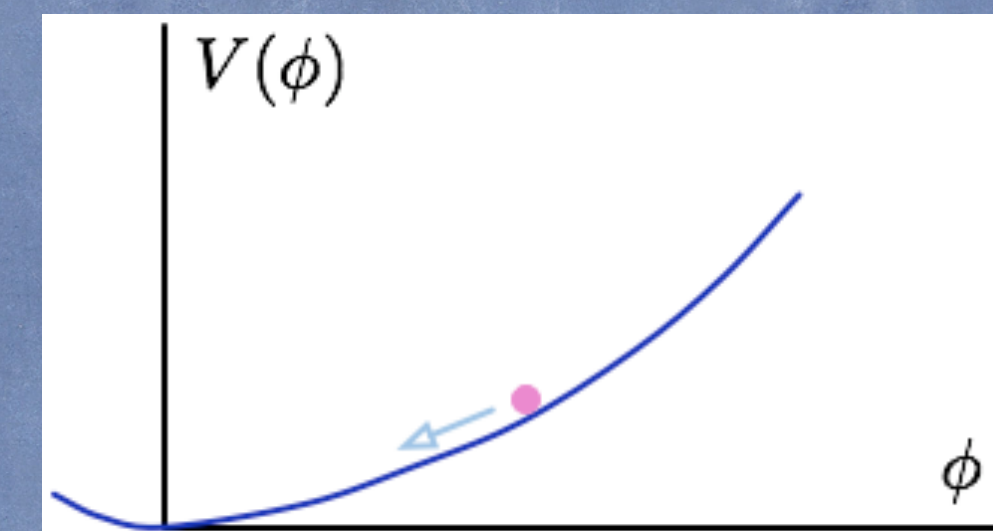
Linde 82



chaotic inflation

“inflaton”

Linde 83



インフレーションモデル

インフレーションを引き起こす場

$$S = \int d^4x [L_{\text{gravity}} + L_{\text{matter}}]$$

重力理論の補正

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} R$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha R^2]$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha R^2 + \beta R^3]$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha R^2 + \gamma R \square R]$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha e^{\beta\phi} R^2 + (\nabla\phi)^2]$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha R^2] - \frac{1}{2}\xi\phi^2 R - \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2$$

old inflation
new inflation
chaotic inflation

インフレーションモデル

$$S = \int d^4x [L_{\text{gravity}} + L_{\text{matter}}]$$

インフレーションを引き起こす場

重力理論の補正

Einstein
R²-cosmology
non-minimum coupling
Induced gravity
Brans-Dicke gravity
Kaluza-Klein theory
Gauss-Bonnet gravity
etc.

old inflation
new inflation
chaotic inflation
soft inflation
extended inflation
hybrid inflation
topological inflation
open inflation
dilation inflation

power-law inflation
natural inflation
supernatural inflation
eternal inflation
mexican inflation
bubble inflation
creeping inflation
galloping inflation
hyper inflation
etc. etc.

「インフレーションモデルは研究者の数だけある」

インフレーション宇宙モデルから学ぶ

〇〇対称の牛アプローチ

「乳牛の乳の生産量を増やすにはどうしたらよいか」

「原因となるメカニズムを考えよう」



「次に、新しい物質場があった、と考えよう」

「次に、ポテンシャルがこうだった、と考えよう」



「次に、スカラー場を2つ考え、couplingさせよう」

「次に、時空の曲率を考えよう」

「次に、重力場に補正項を考えよう」



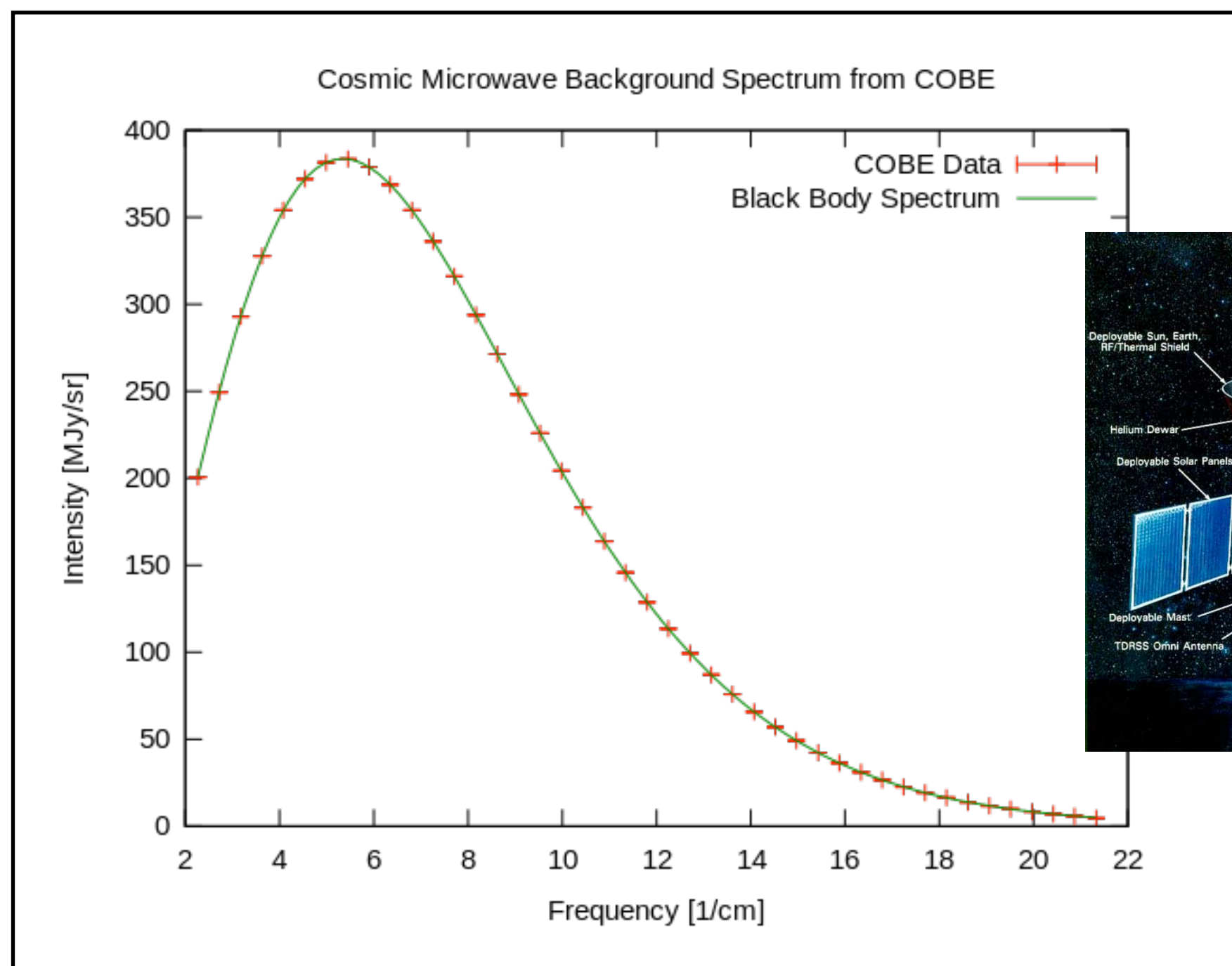
「次に、拡張された重力理論で考えよう」



「次に、重力場と物質場の相互作用を考えよう」

COBE衛星によるCMBの測定

Cosmological Background Explorer, 1992



Planck曲線！

10万分の1の温度ゆらぎの存在！

John C. Mather (1946–)
George F. Smoot III (1945–)

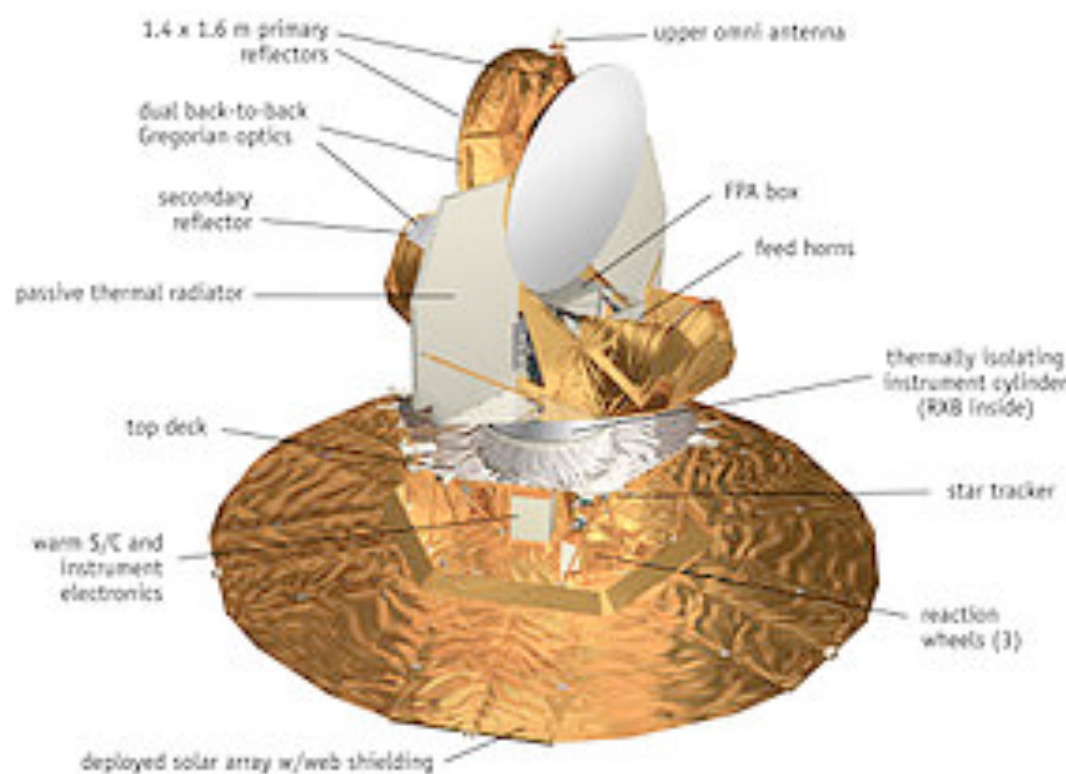
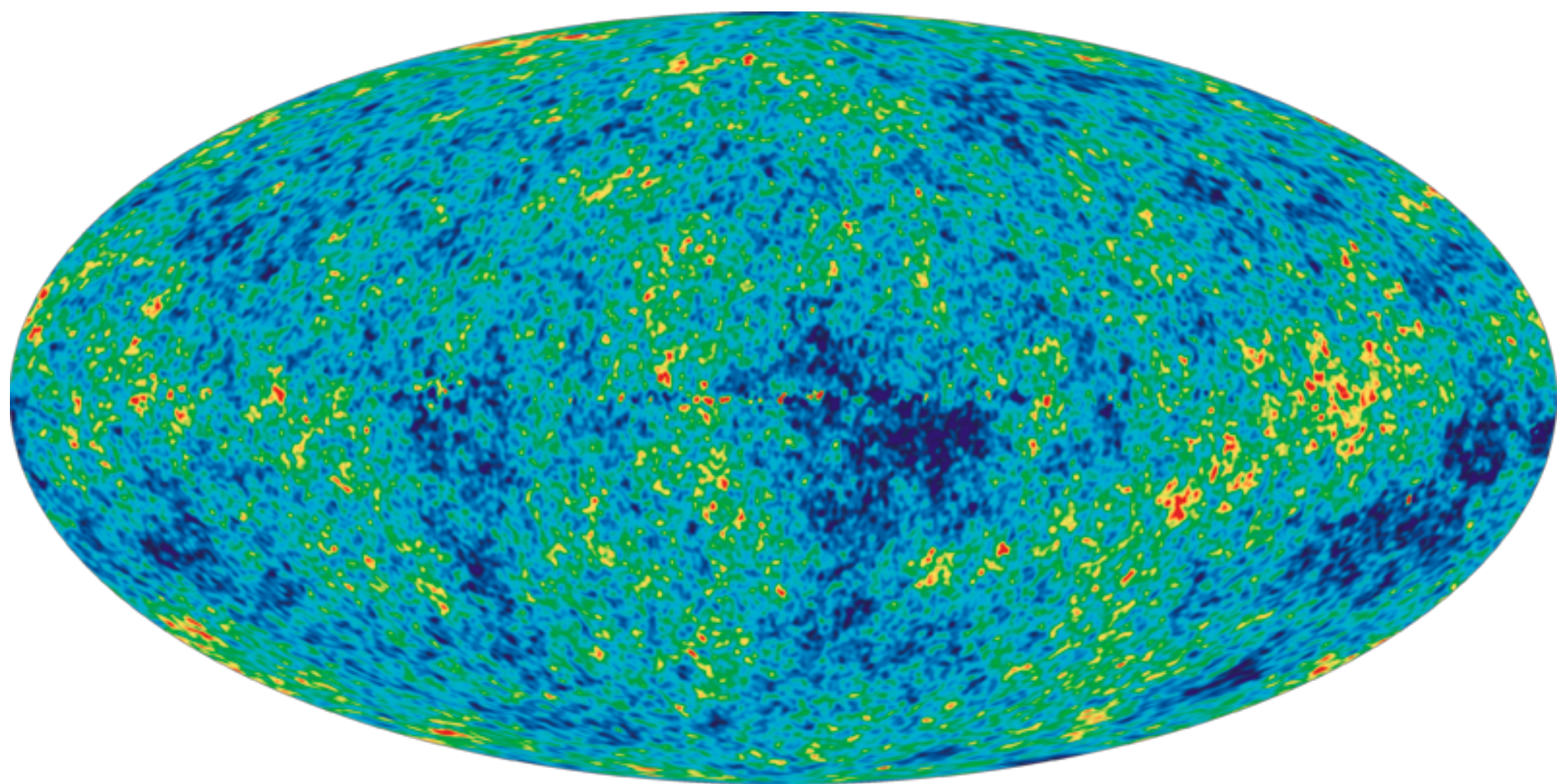
2006年, ノーベル物理学賞受賞

宇宙誕生後, 30万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. **その時の温度**(約**3000K**)が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって ~~5~7K~~ ~~3.5K~~ **2.73 K**

WMAP衛星によるCMBの測定

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2002



37万9000年

宇宙の年齢は 137 ± 1 億年, と報告

宇宙誕生後, ~~30~~万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. **その時の温度**(約**3000K**)が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって

~~5~7K~~

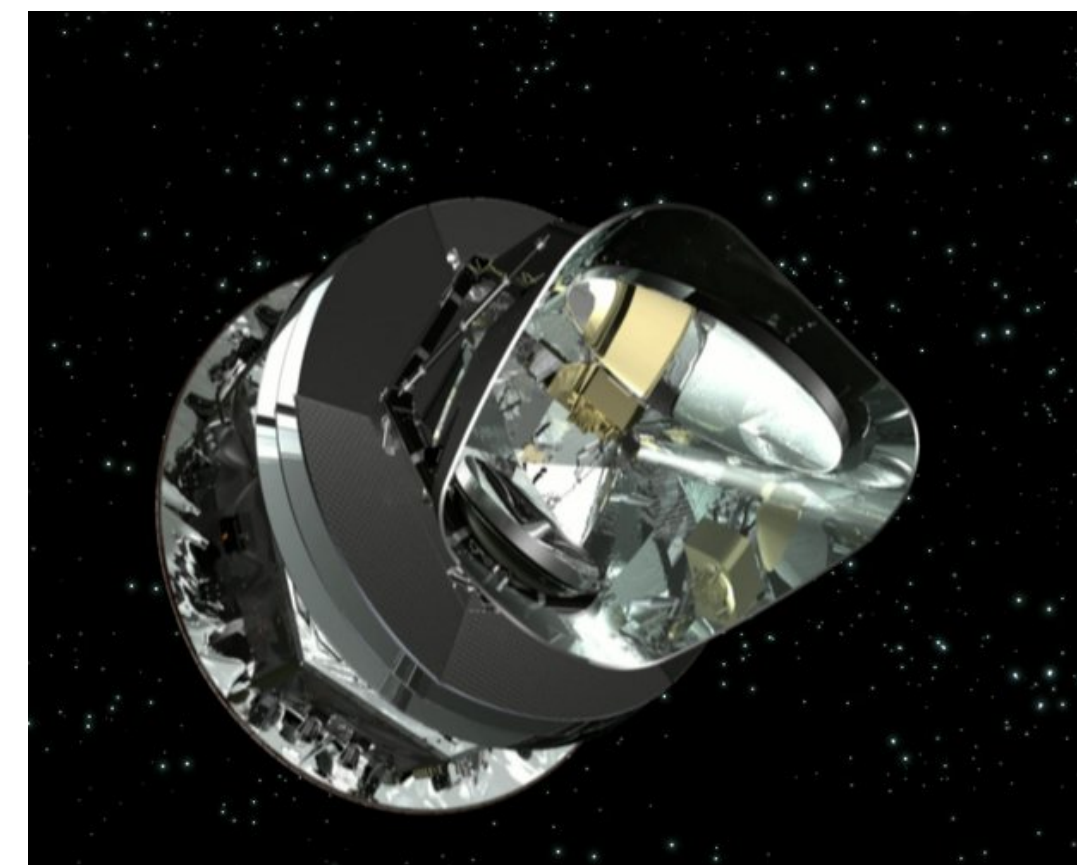
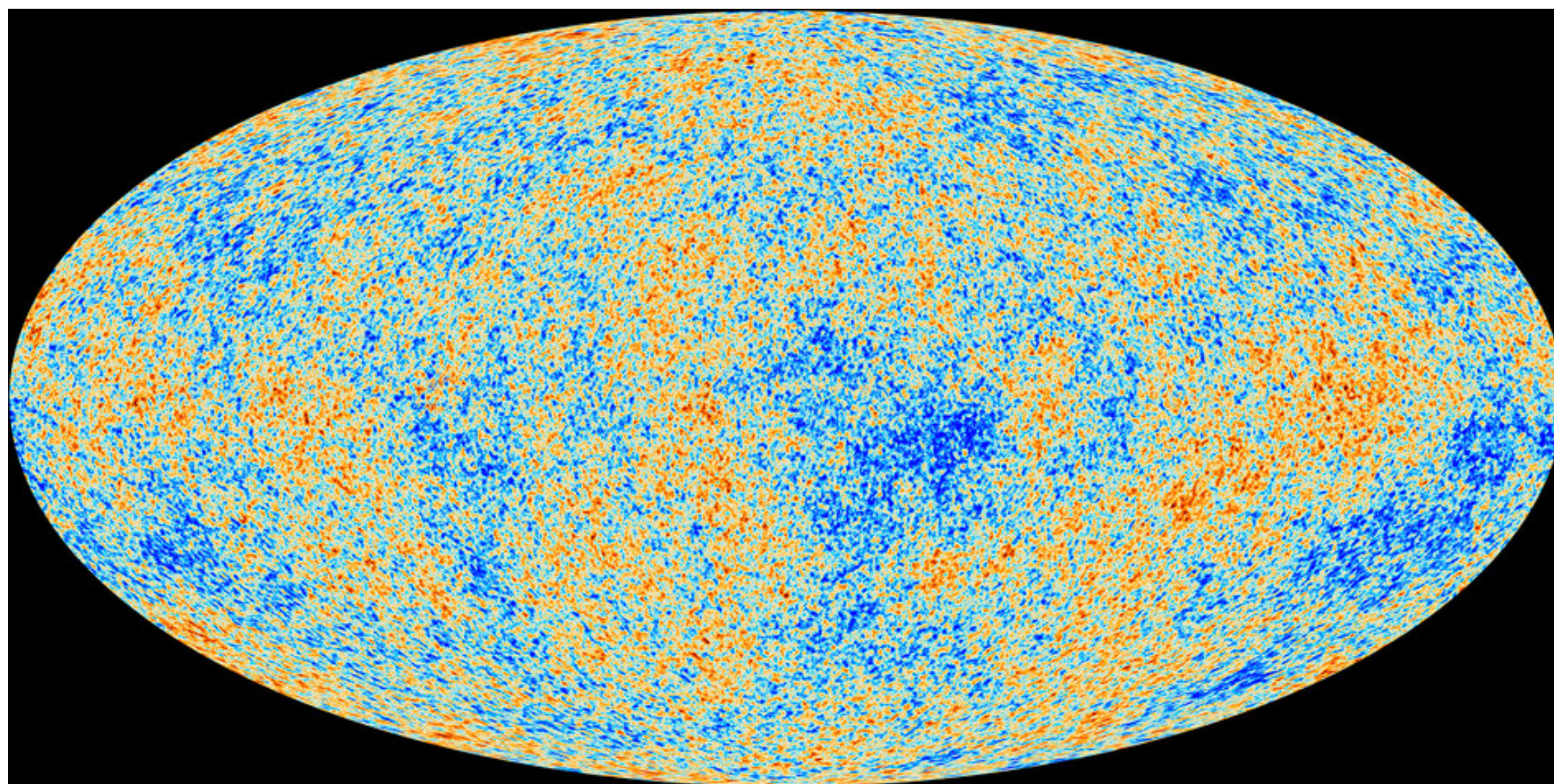
~~3.5K~~

~~2.73 K~~

2.725K

Planck衛星によるCMBの測定

Planck, 2013



38万年

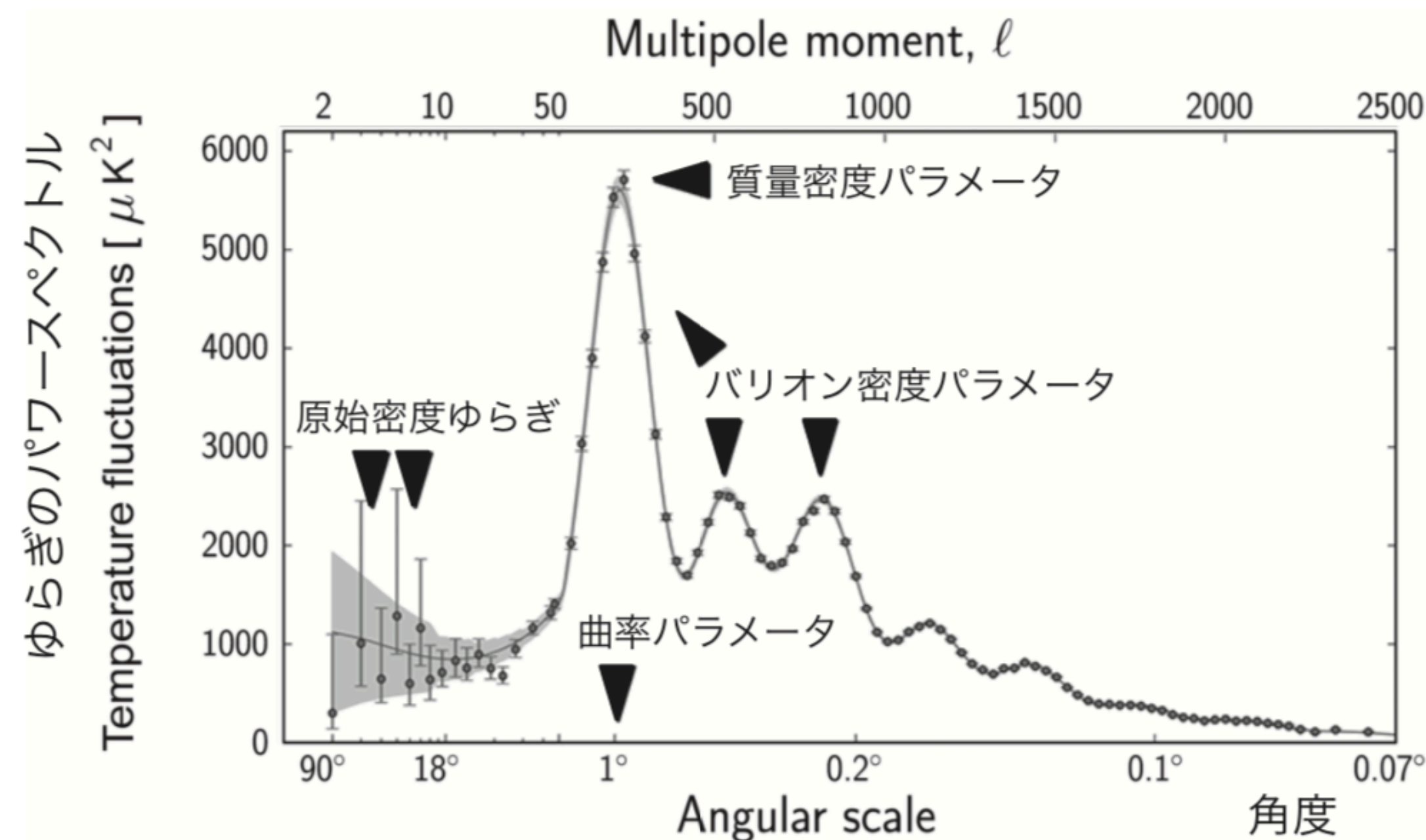
宇宙の年齢は 138 ± 0.5 億年, と報告

宇宙誕生後, ~~37~~万9000年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. **その時の温度** (約**3000K**) が放射されて残っているはず.

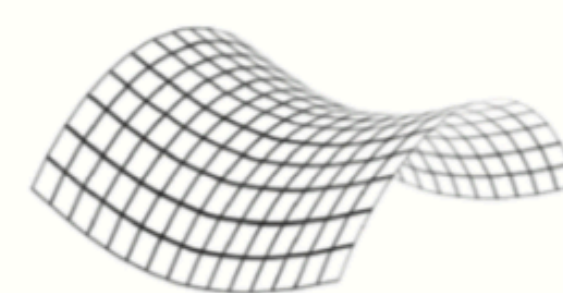
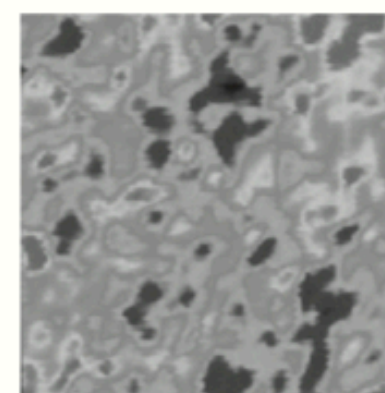
宇宙膨張で温度下がって ~~2.725~~K (-270°)位

2.72548 ± 0.00057 K

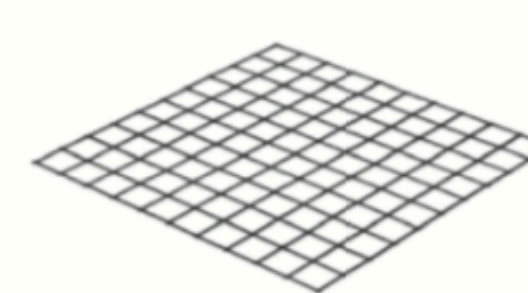
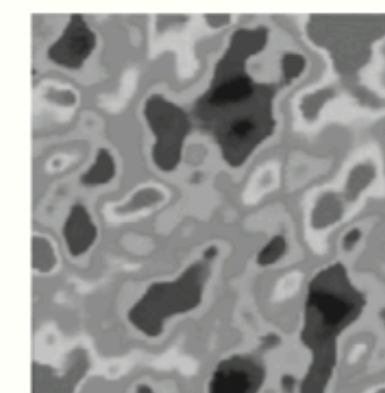
CMBの2点相関関数から宇宙論パラメータを決定する



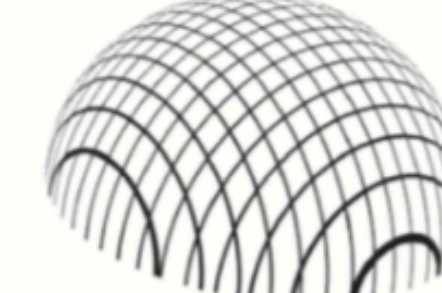
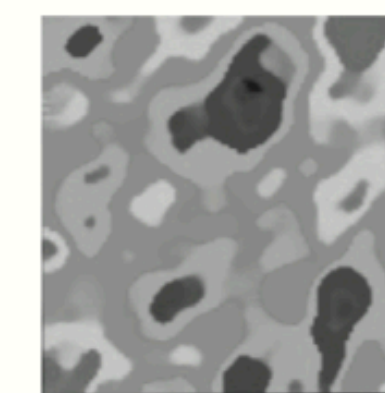
宇宙の幾何的な構造がCMB観測で判定される

**OPEN**

開いた宇宙

**FLAT**

平坦な宇宙

**CLOSED**

閉じた宇宙

図 5.39 〔左〕 CMB の角度相関図を理論曲線に重ねて示した図. 1 度スケールにピークがあり, この大きさから質量密度パラメータ, この位置から曲率パラメータがわかる. 〔右〕 CMB の温度ゆらぎを統計解析することで, 宇宙の曲率が, 開いている・平坦・閉じているのいずれかが判定できる. 結果は, 「平坦」であった. (NASA/ESA のサイトで得られる図を加工した)

宇宙論は, パラメータ6個で決定される: 20世紀物理学最大の到達点

表 5.3 Planck 衛星による観測チームが発表した宇宙論パラメータ (2015 年). 左欄の P. は Λ CDM モデルを決める 6 つの基本的なパラメータ, C. はモデルを決めると計算されるパラメータ, F. はモデルを決めるために設定したパラメータを示す.

パラメータ	記号	値
P. バリオン密度	$\Omega_b h^2$	0.02230 ± 0.00014
P. ダークマター密度	$\Omega_c h^2$	0.1188 ± 0.0010
P. 曲率ゆらぎ振幅	Δ_R^2	$2.441^{+0.088}_{-0.092} \times 10^{-9}$
P. 宇宙年齢	t_0	$137.99 \text{ 億年} \pm 2100 \text{ 万年}$
P. CMB 放射の光学的深さ	τ	0.066 ± 0.012
P. スカラスpekトル指数	n_s	0.9667 ± 0.0040
C. ハッブルパラメータ	H_0	$67.74 \pm 0.46 \text{ [km/s/Mpc]}$
C. バリオン (通常物質)	Ω_b	$4.86 \pm 0.10\%$
C. 冷たいダークマター	Ω_{CDM}	$25.89 \pm 0.57\%$
C. ダークエネルギー	Ω_Λ	$69.11 \pm 0.62\%$
C. 臨界密度	$\rho_{\text{crit.}}$	$(8.62 \pm 0.12) \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$
C. CMB 放射の赤方偏移	z_{eq}	1089.90 ± 0.23
C. CMB 放射時の宇宙年齢	t_{eq}	$37 \text{ 万 } 7700 \text{ 年} \pm 3200 \text{ 年}$
C. 再イオン化の赤方偏移	z_{red}	$8.5^{+1.0}_{-1.1}$
C. $8h^{-1}\text{Mpc}$ でのゆらぎ振幅	σ_8	0.8159 ± 0.0086
F. 状態方程式パラメータ	w	-1 (-1 なら宇宙項)
F. テンソル・スカラー比	r	0
F. 全密度パラメータ	Ω_{tot}	1

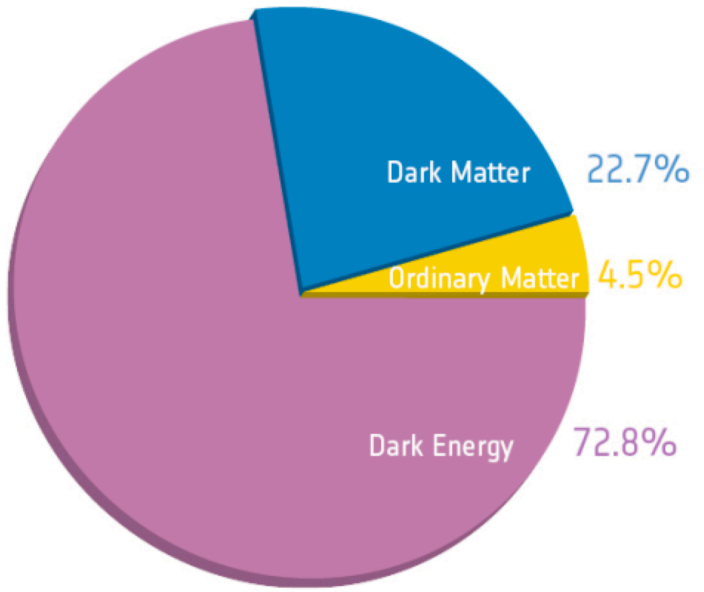
- CMBの温度ゆらぎ発見 (1992年COBE)
- 銀河系内MACHOの検出 (1993年 MACHOグループ)
- 10%精度でのハッブル定数の決定 (1999年 HST key project)
- 宇宙定数(暗黒エネルギー)が存在する可能性 (1999年 Ia型超新星)
- 非バリオン暗黒物質の存在が決定的 (CDMパラダイムの確立)
- 素粒子論的宇宙論による初期条件
(インフレーション、密度揺らぎのスペクトル)

宇宙年齢は,
137.99億年±2100万年

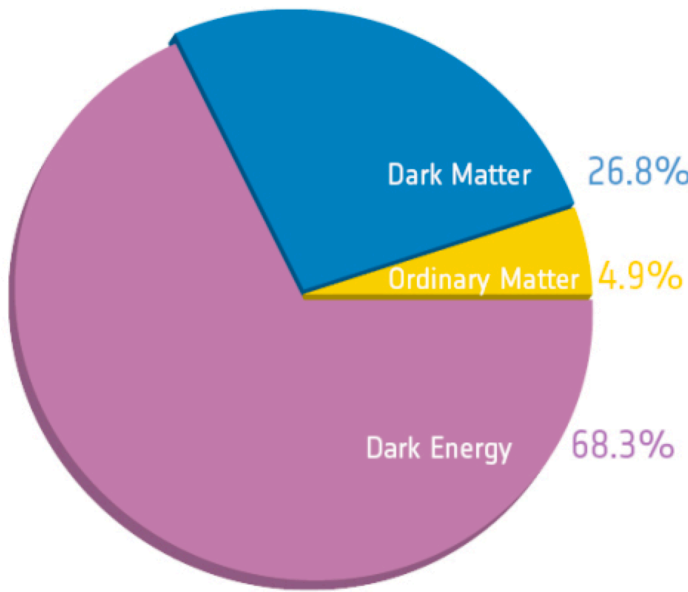
通常物質は, 4.86 %

ダークマター+通常物質は, 30.9 %

正体不明のダークエネルギーは, 69.1 %

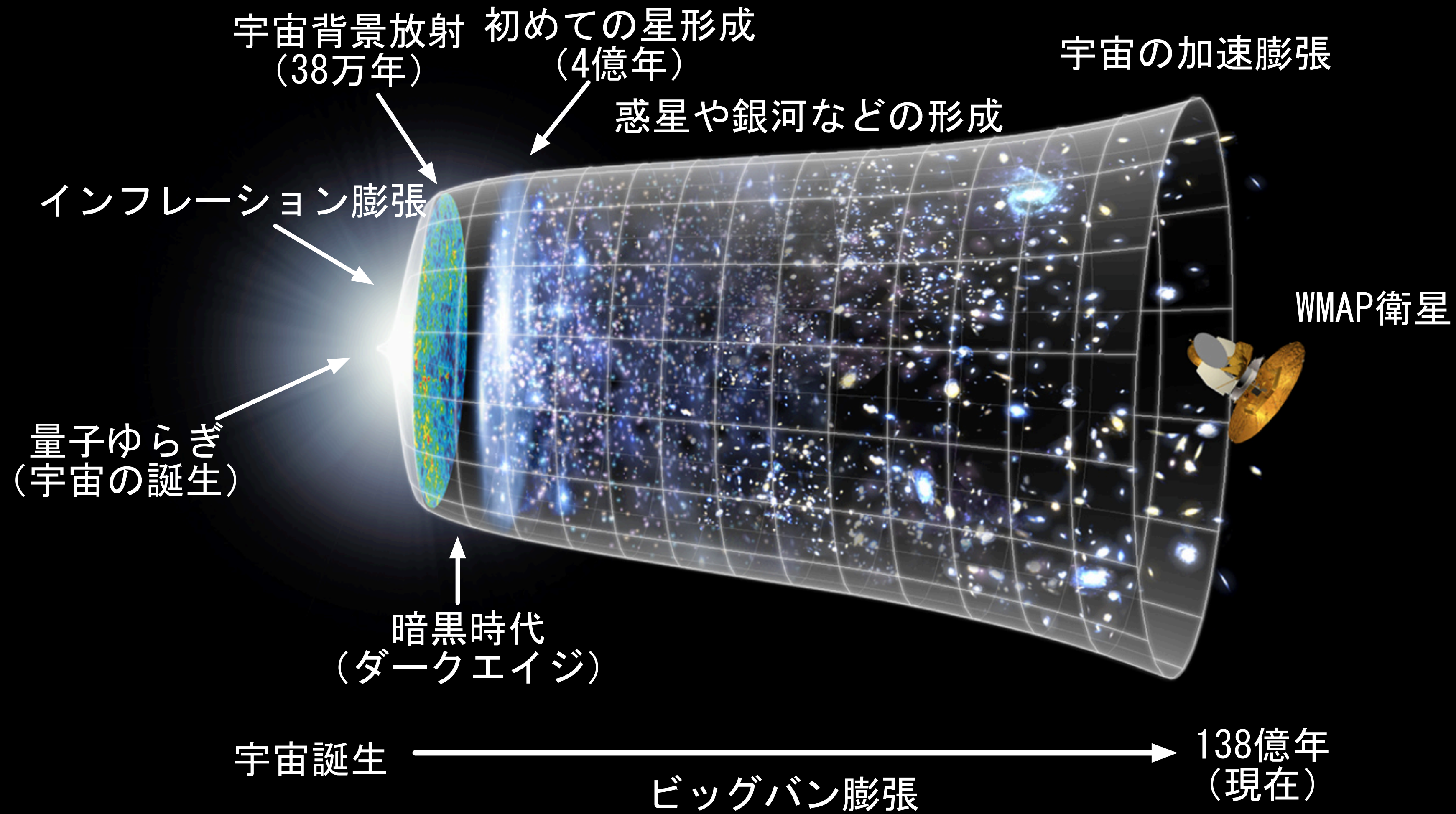


Before Planck



After Planck

真貝: 『現代物理学が描く宇宙論』 (共立出版, 2018)



未知の問題

ダークエイジ

dark age

ダークマター

dark matter

ダークエネルギー

dark energy

宇宙が加速膨張している原因は何か？？？

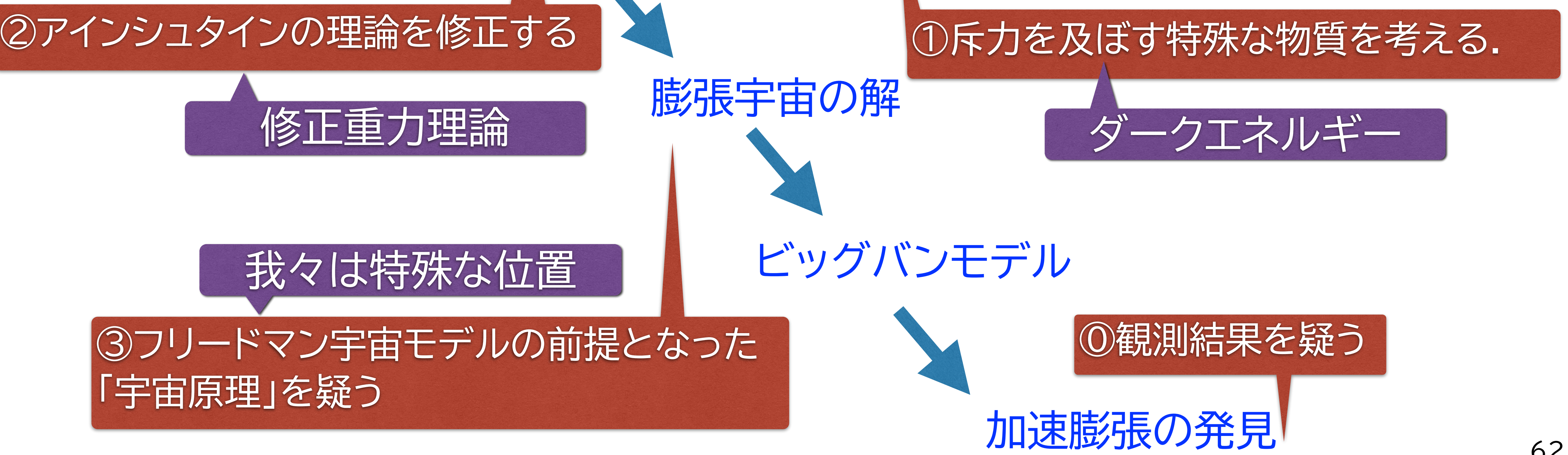
重力場の方程式（一般相対性理論）

空間の曲がりモノの運動を決める ⇔ モノがあると空間が曲がる

<空間の歪み>

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

<モノの分布>



重力波研究の歴史



「重力波は存在しない」(Einstein-Rosen, 1936)

- ・1936年に、アインシュタインはローゼンと共に「重力波は存在しない」という論文を執筆し、Physical Review誌に投稿した。当時、すでに多くの物理学者が、重力波の存在を原理的には信じるようになっていたため、論文を審査する査読者は、丁寧に論文を読み、10ページに及ぶレポートを作成して、論文の誤りを指摘した。
- ・ところが大御所だったアインシュタインは、自らの論文が査読者に渡り、かつ再考を促されたことに対して激怒した。そして、投稿を取り下げ、それ以降フィジカル・レビュー誌に論文を投稿することはなかった。当該論文はその後、『フランクリン研究所紀要』に投稿され、直に受理された。しかし、著者校正の段階で、同じ査読者がインフェルトを通じてアインシュタインに誤りを伝え、結論が180度変更されることになったという。
- ・現在では、「重力波は存在しない」との結論に至った当初の論文原稿は失われていて詳細は不明であるが、（平面の波面が無限に広がっているような）簡単な重力波のモデルを考えると特異性が生じてしまうことから、このような例を根拠に「重力波を表す解は物理的には存在しない」と導いたのではないかとされている。今日では平面重力波の厳密解では座標特異性が存在することが知られているが、当時は座標特異性と物理的特異性を区別する手法はまだ確立していなかったために、解釈を間違えても仕方がなかった問題である。
- ・重力波が物理的に現象として存在しうるものであり、エネルギーを運ぶ実体であることが数学的に証明されたのは、56年にピラーニによってであり、アインシュタインの死後のことである。

査読者. Howard P. Robertson
(1903–1961)



Einstein Versus the Physical Review

A great scientist can benefit from peer review, even while refusing to have anything to do with it.

Daniel Kennefick

Physics Today 58, 43 (2005-9)

Dear Sir,

We (Mr. Rosen and I) had sent you our manuscript for publication and had not authorized you to show it to specialists before it is printed. I see no reason to address the—in any case erroneous—comments of your anonymous expert. On the basis of this incident I prefer to publish the paper elsewhere.

Respectfully,



Einsteinの抗議

「重力波の検出」 (Weber, 1968)



OBSERVATION OF THE THERMAL FLUCTUATIONS OF A GRAVITATIONAL-WAVE DETECTOR*

J. Weber†

Department of Physics and Astronomy, University of Maryland, College Park, Maryland

(Received 3 October 1966)

We report operation of apparatus to measure the Fourier transform of the Riemann curvature tensor at sensitivity limited by the thermal fluctuations. The gravitational interaction drives a mechanical system which in turn is coupled to the electromagnetic field. Strains as small as a few parts in 10^{18} are observable for a compressional mode of a large cylinder.

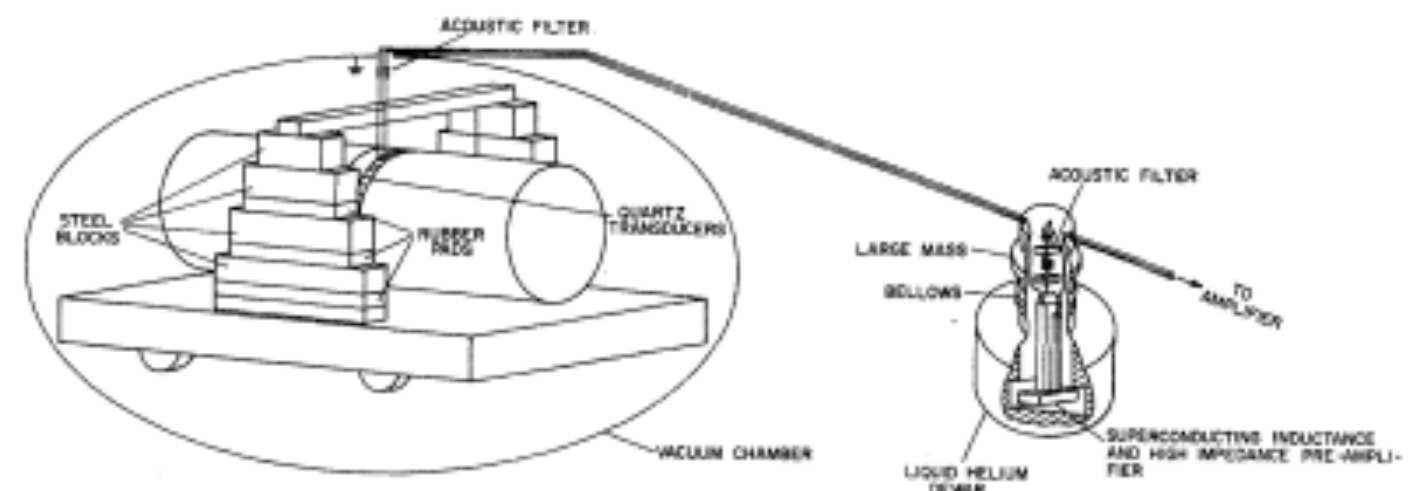


FIG. 1. Schematic diagram of apparatus to measure Fourier transform of the Riemann tensor.

PHYSICAL REVIEW LETTERS

3 JUNE 1968

GRAVITATIONAL-WAVE-DETECTOR EVENTS*

J. Weber

[PRL 20, 1307 \(1968\)](#)

Department of Physics and Astronomy, University of Maryland, College Park, Maryland

(Received 4 April 1968)

A new series of experiments is described, involving two gravitational wave detectors spaced about 2 km. A number of coincident events have been observed, with extremely small probability that they are statistical. It is clear that on rare occasions these instruments respond to a common external excitation which may be gravitational radiation.

EVIDENCE FOR DISCOVERY OF GRAVITATIONAL RADIATION*

J. Weber

[PRL 22, 1320 \(1969\)](#)

Department of Physics and Astronomy, University of Maryland, College Park, Maryland 20742

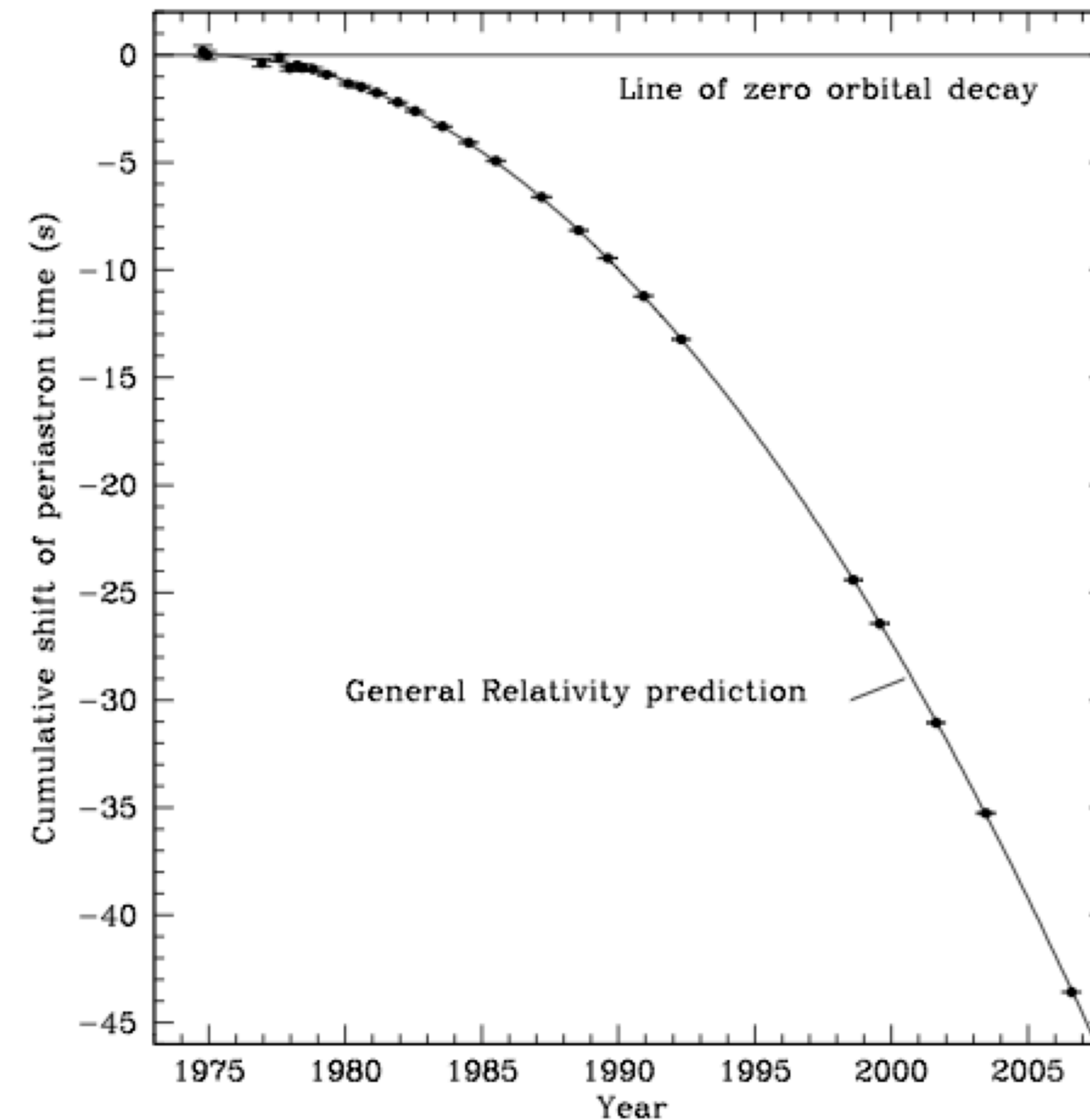
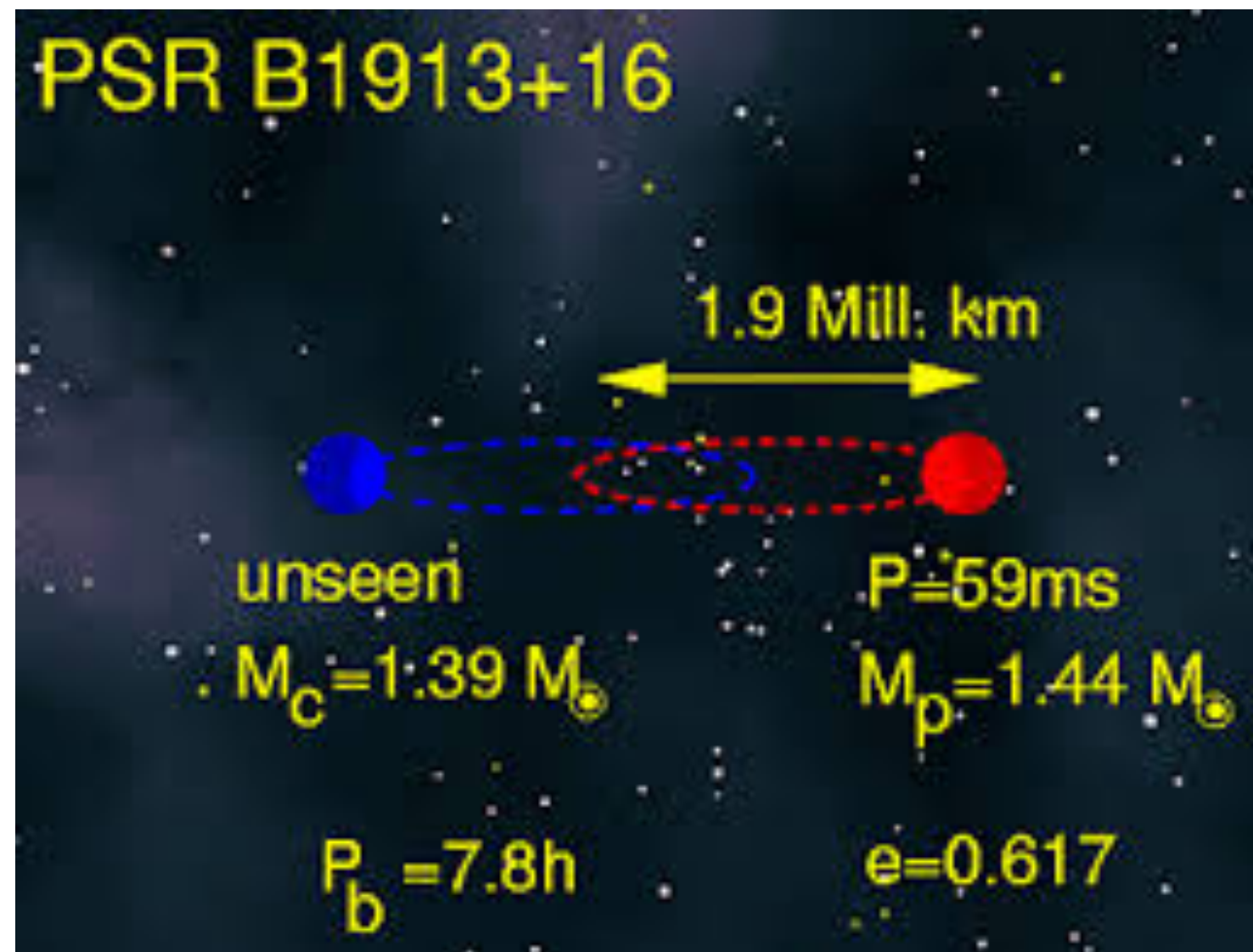
(Received 29 April 1969)

Coincidences have been observed on gravitational-radiation detectors over a base line of about 1000 km at Argonne National Laboratory and at the University of Maryland. The probability that all of these coincidences were accidental is incredibly small. Experiments imply that electromagnetic and seismic effects can be ruled out with a high level of confidence. These data are consistent with the conclusion that the detectors are being excited by gravitational radiation.

Table I. Observed coincidences January-March 1968.

Event	(Large-detector power)/mean	No. of large-detector events per day exceeding given power	(Small-detector power)/mean	No. of small-detector events per day exceeding given power	Probability of a random coincidence	Frequency of random coincidence	Date and Greenwich mean time
A	18	Too infrequent to determine by experiment	2.2	43	7.7×10^{-13}	Once in 8000 yr	7 February 2101
B	11	Too infrequent to determine by experiment	2.2	43	1.5×10^{-10}	Once in 40 yr	13 March 1150
C	6	40	2.3	39	8×10^{-9}	Once in 300 d	29 March 0732
D	5	80	2.3	39	1.6×10^{-8}	Once in 150 d	29 March 0358

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。



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

Share this: [f](#) [G+](#) [Twitter](#) [+](#) [Email](#) 25

The Nobel Prize in Physics 1993



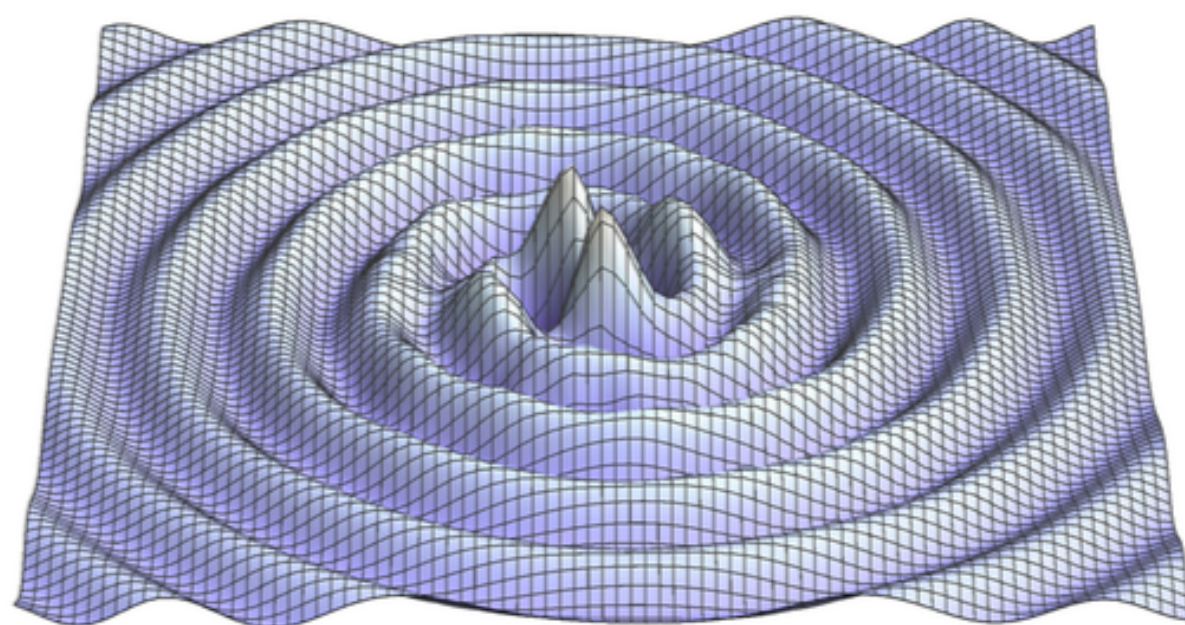
Russell A. Hulse
Prize share: 1/2



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

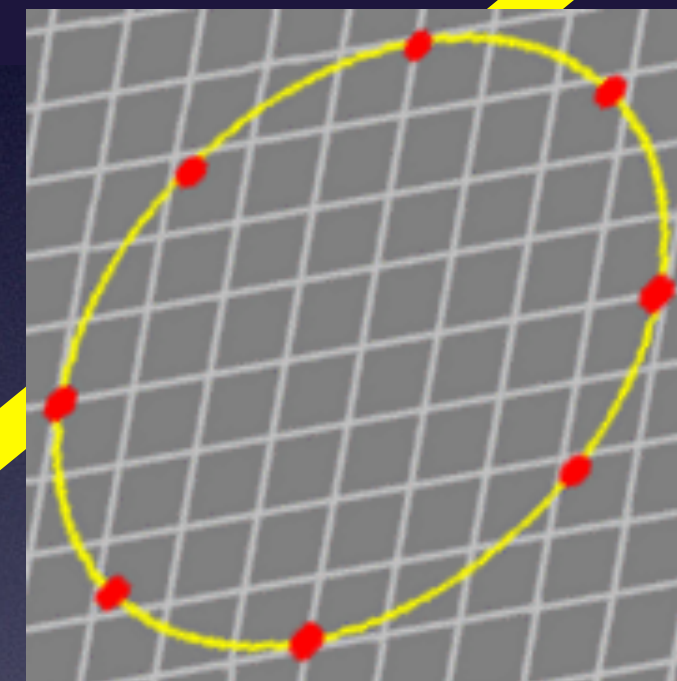
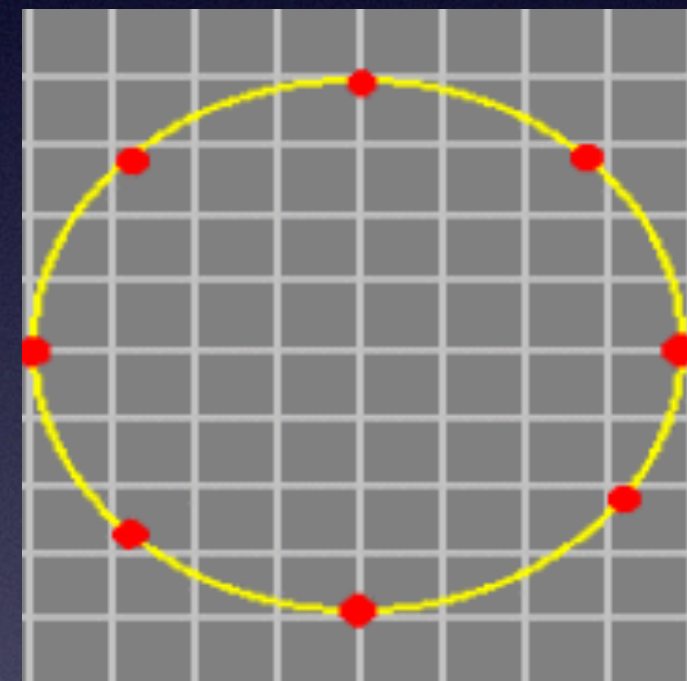
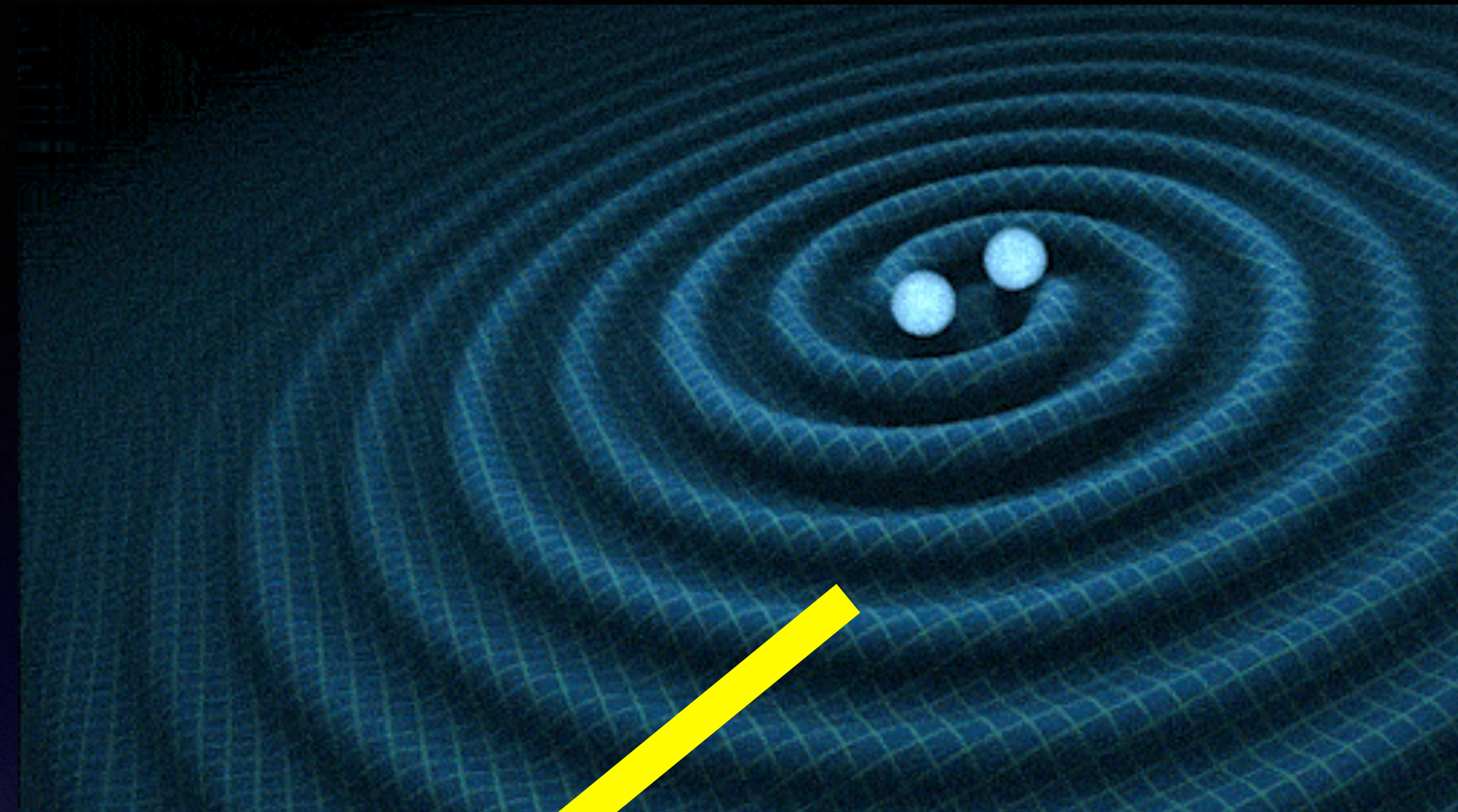
”for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation”

”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

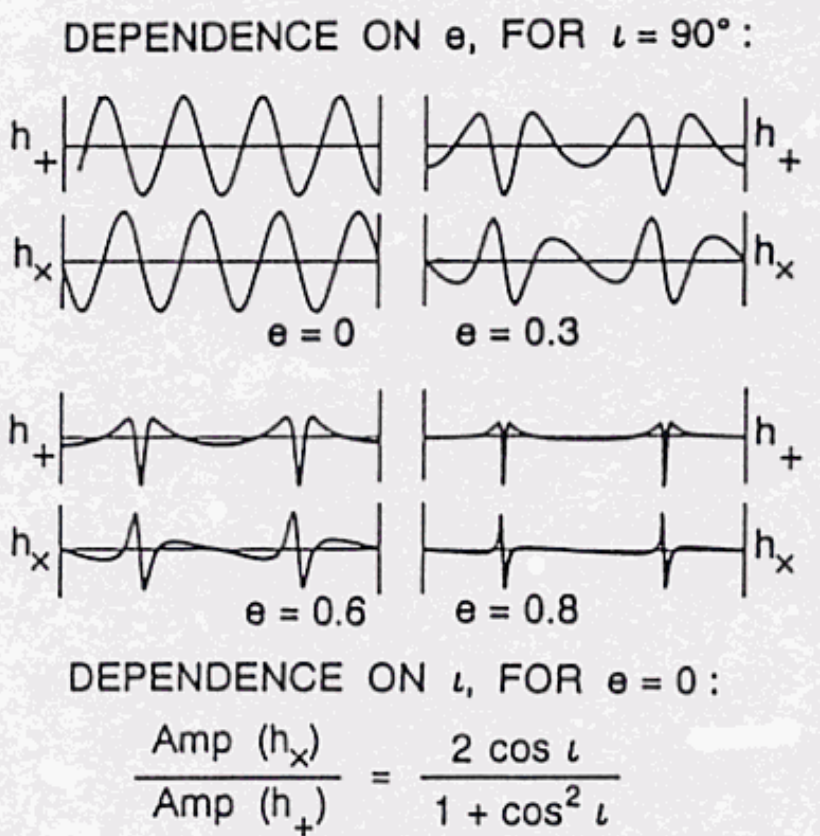
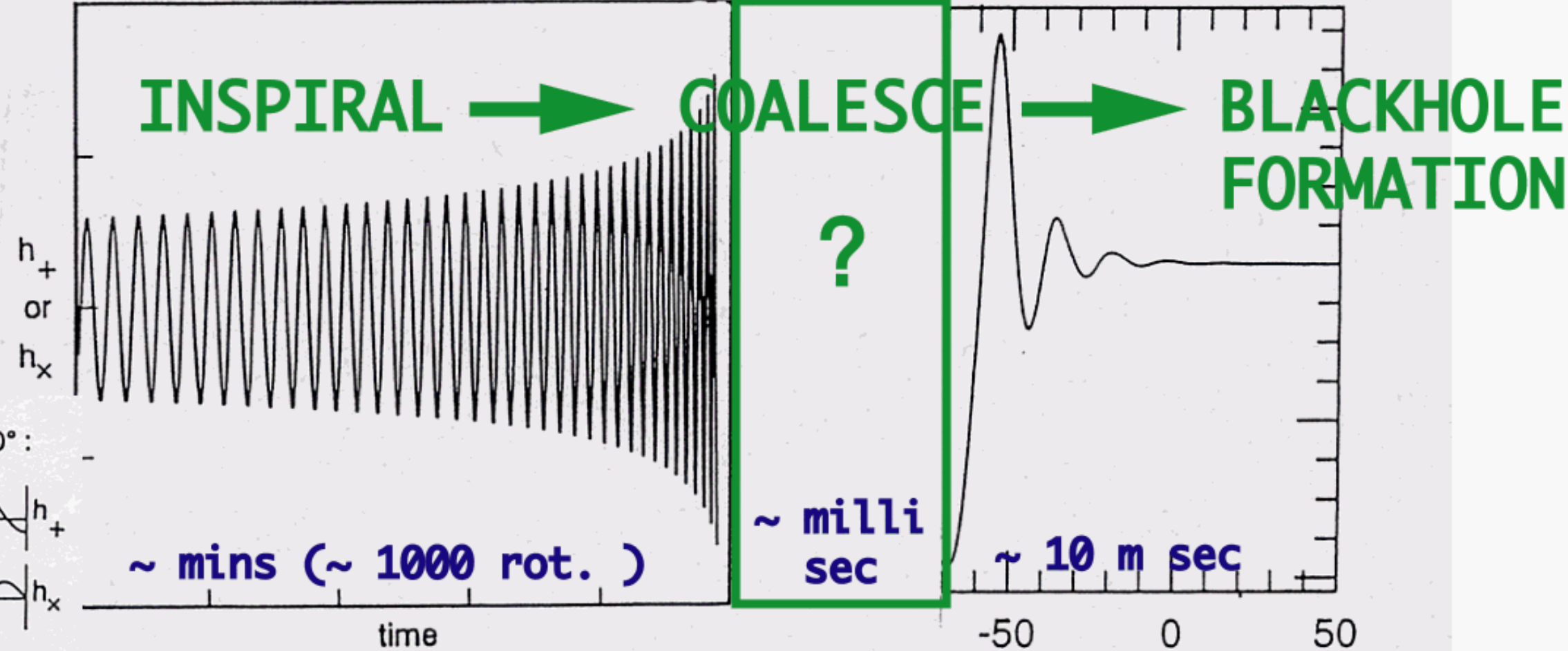
LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

連星合体からの重力波の波形(理論予測)

What can we learn from gravitational waveform?

Inspiral Merger Ringdown

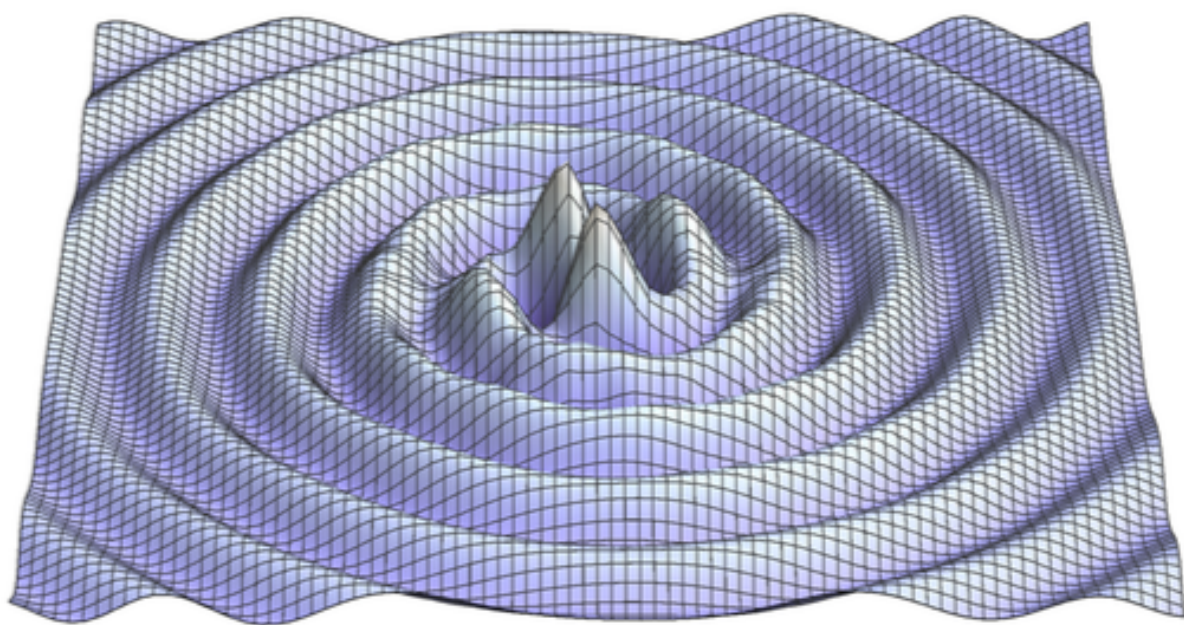


Post Newtonian Approx. Numerical Relativity BH. Perturbation

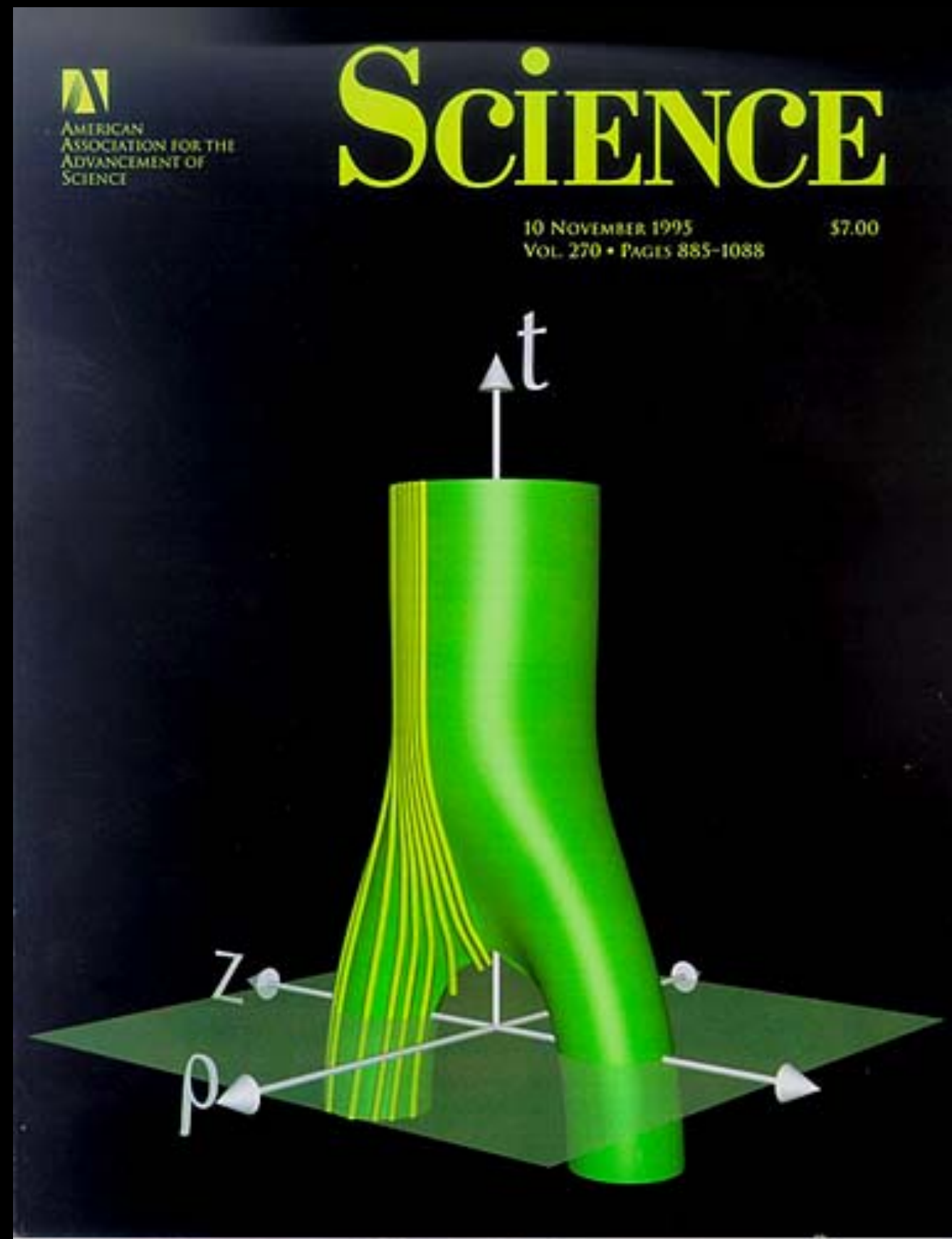
ISCO freq $\Rightarrow$ EoS of NS,
waveform $\Rightarrow$ Formation of BH or NS,
BH mass,
BH angular momentum,...

"chirps" $df/dt \Rightarrow$ chirp mass, $M_c = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$
amplitude up $\Rightarrow$ M_c , distance
amplitude $h_+/h_x \Rightarrow$ inclination
waveform $\Rightarrow$ eccentricity
moduration $\Rightarrow$ spin, ...

statistics $\Rightarrow$ cosmological parameters

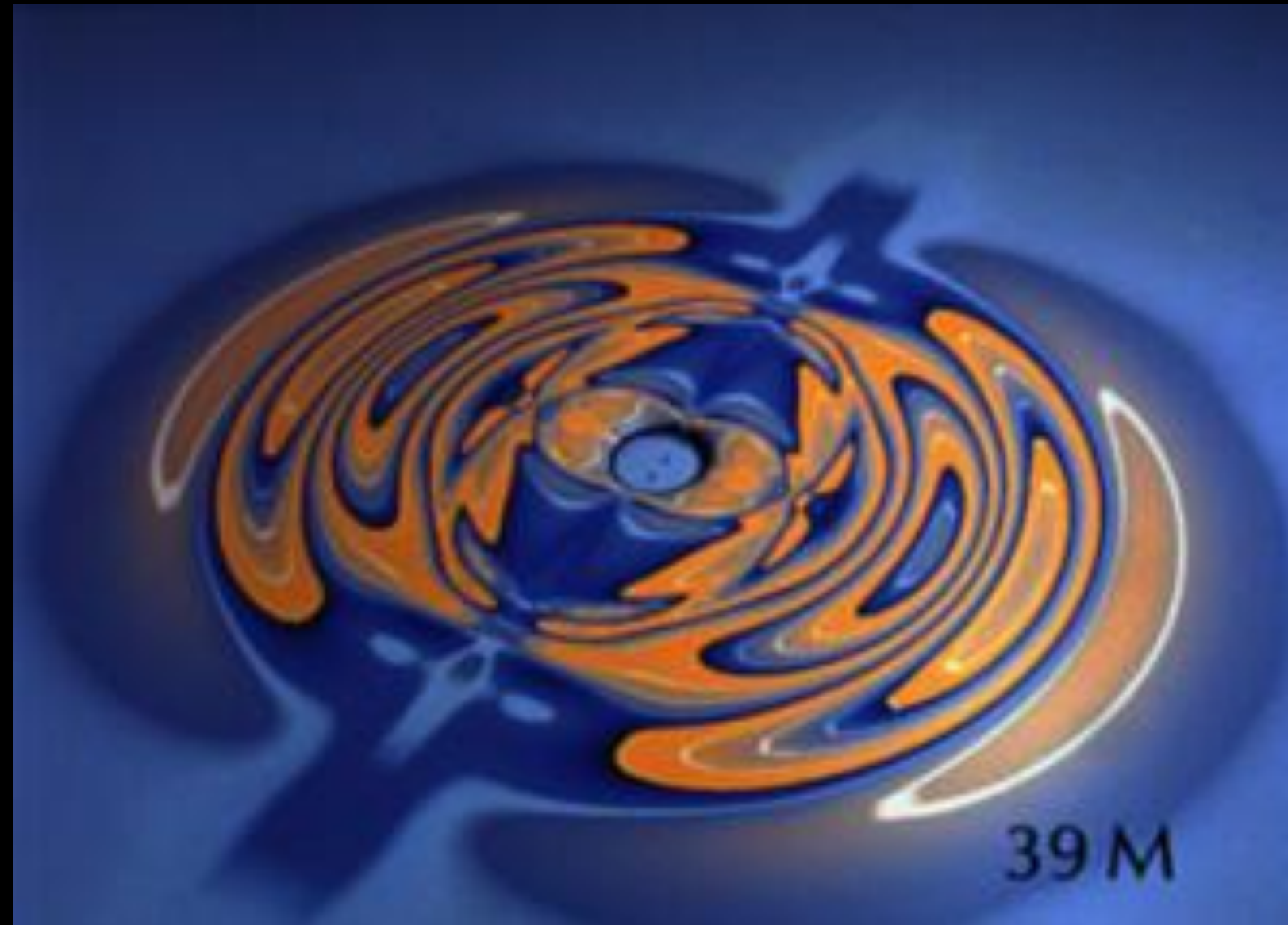


ブラックホール合体と重力波放出のシミュレーション (1990年代–2000年代)



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



シミュレーション研究は, なかなか難しかった.

- * ブラックホールの取り扱い?

- * 重力波への変換公式

- * 初期条件, 境界条件の設定

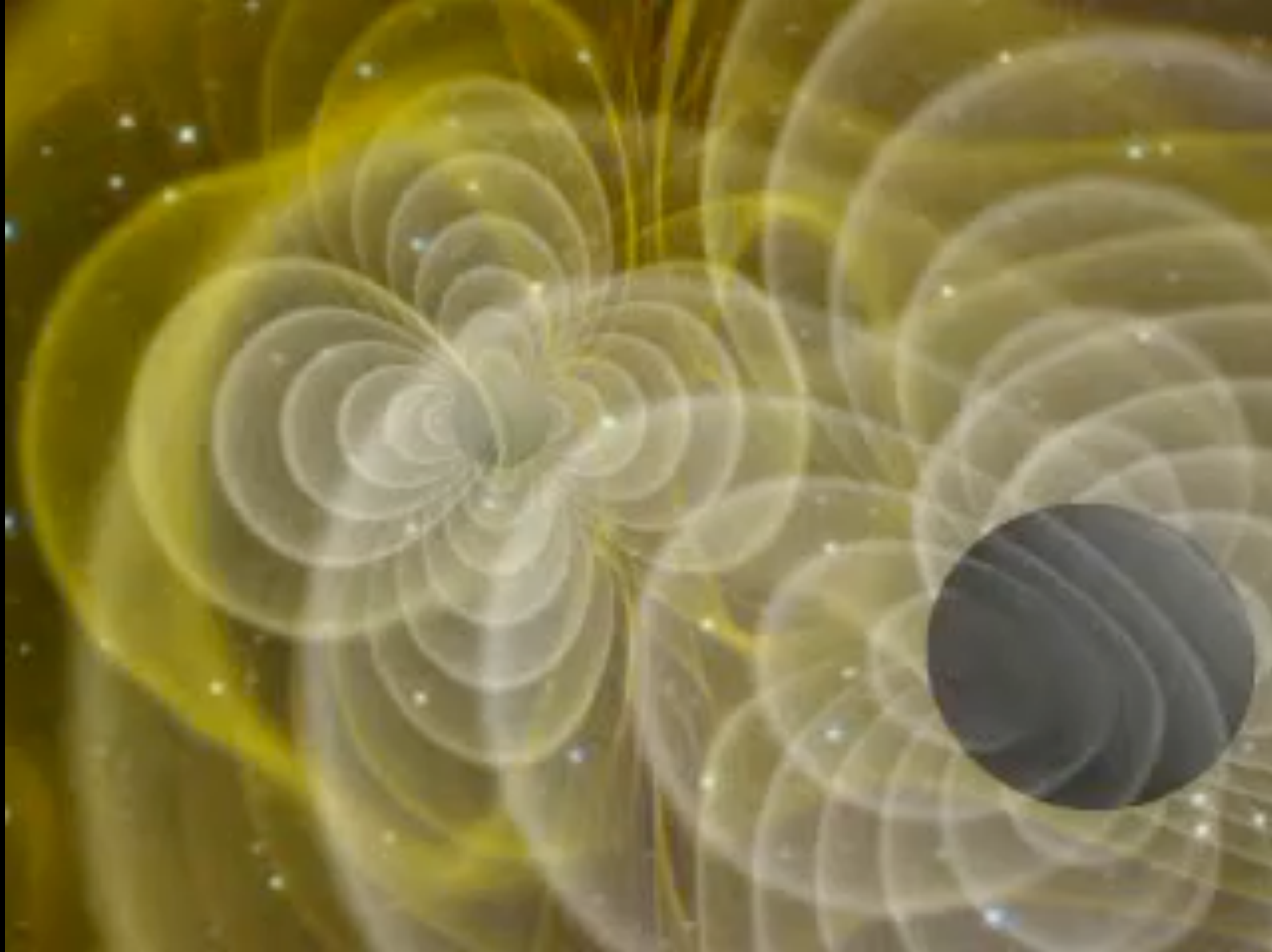
- * 安定な定式化問題

- * 解像度

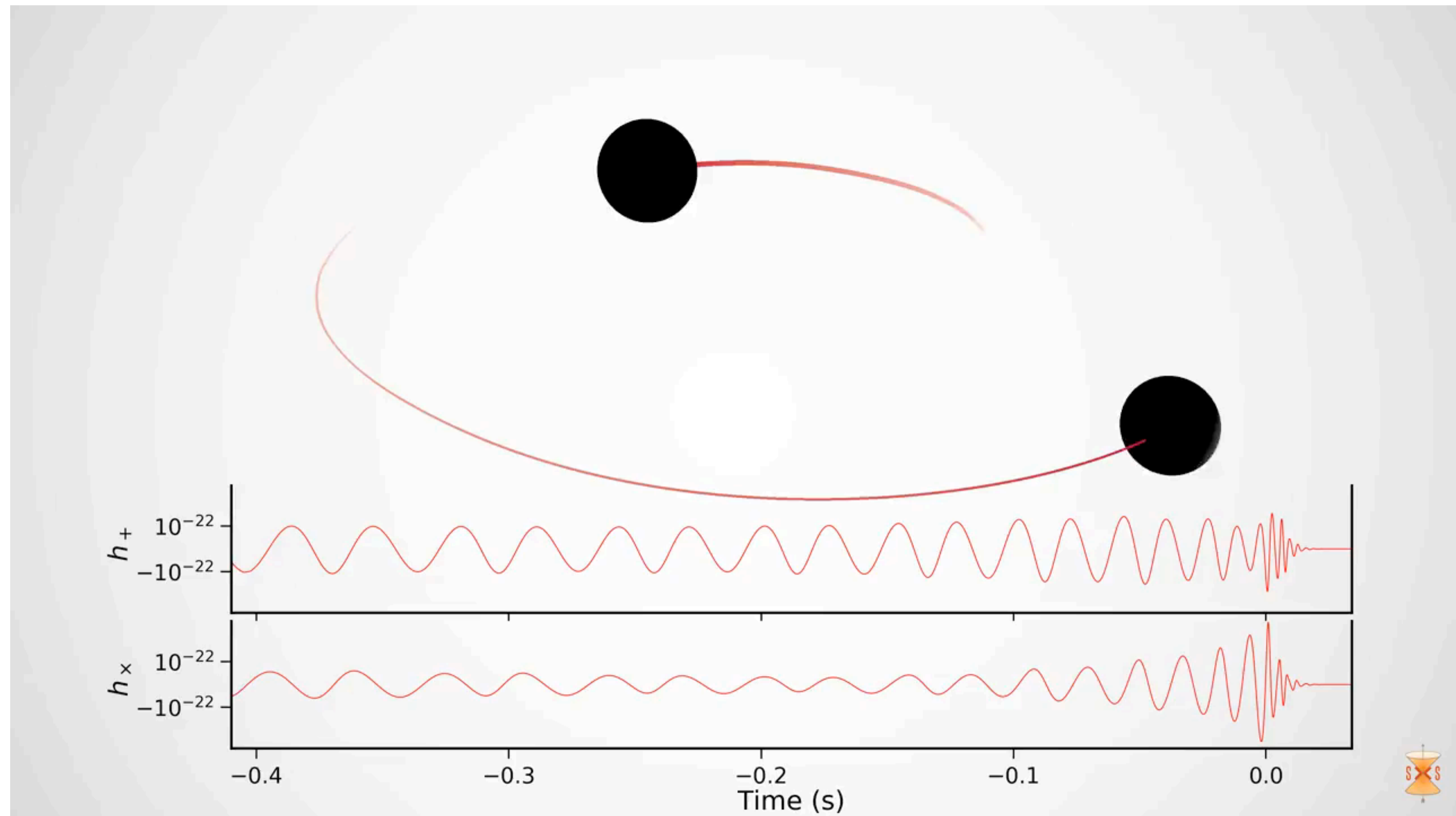
- * スーパーコンピュータ

...

ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)



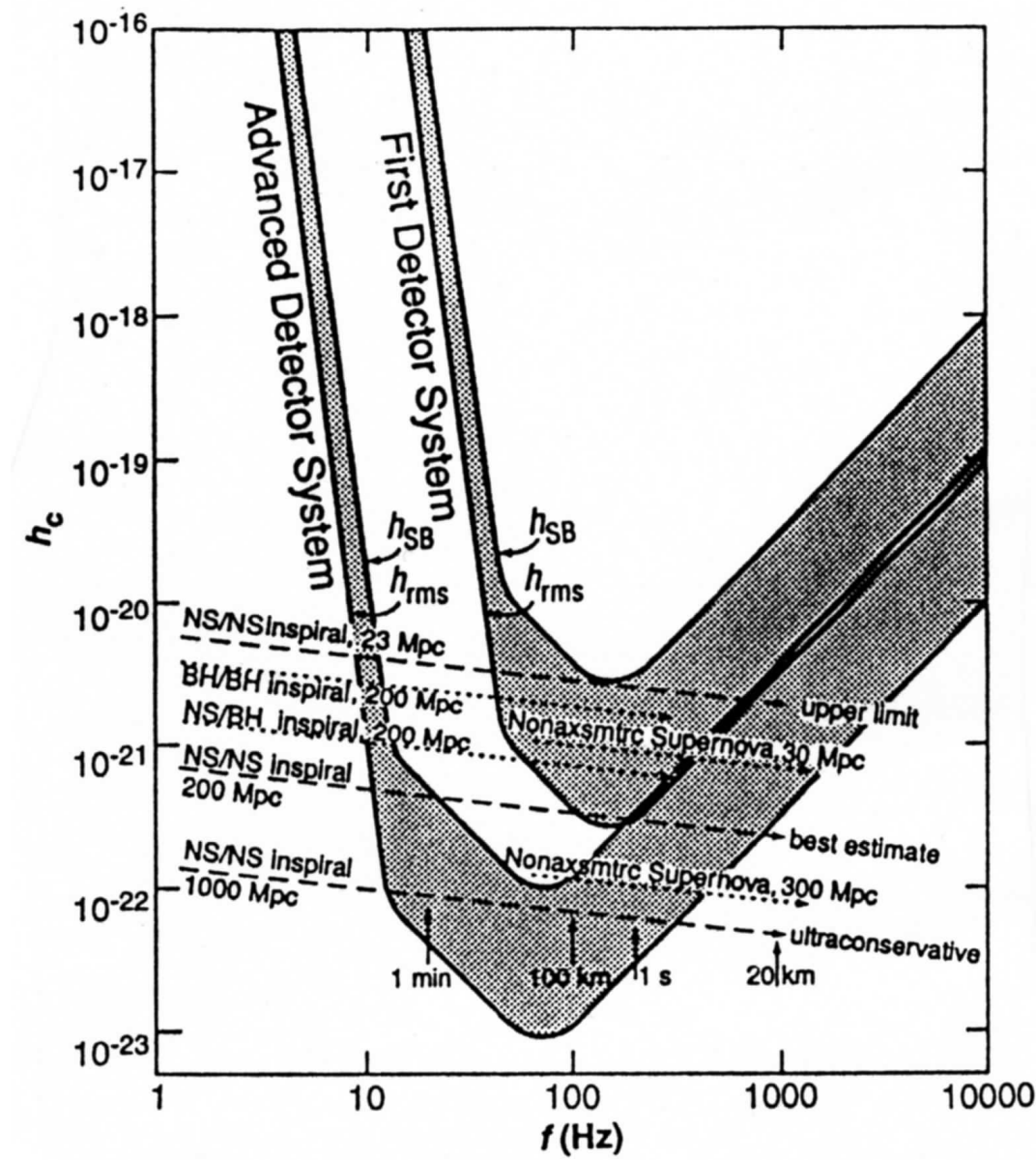
Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown 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 binary. This disadvantage will be remedied with 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: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash.NZPaW2LT.dpuf>

大型地上レーザー干渉計 LIGO, Virgo, KAGRA

Science 256 (1992) 325



signal = gw + noise
 $s(t) = h(t) + n(t)$

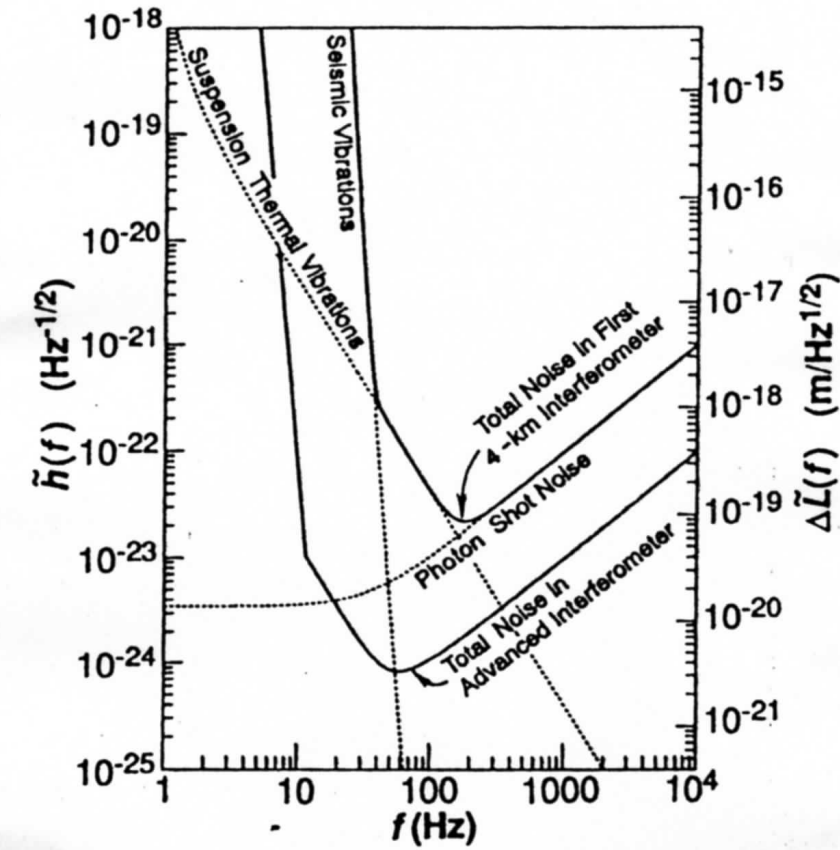


Fig. 7. The expected total noise in each of LIGO's first 4-km interferometers (upper solid curve) and in a more advanced interferometer (lower solid curve). The dashed curves show various contributions to the first interferometer's noise.

spectral density [sec]

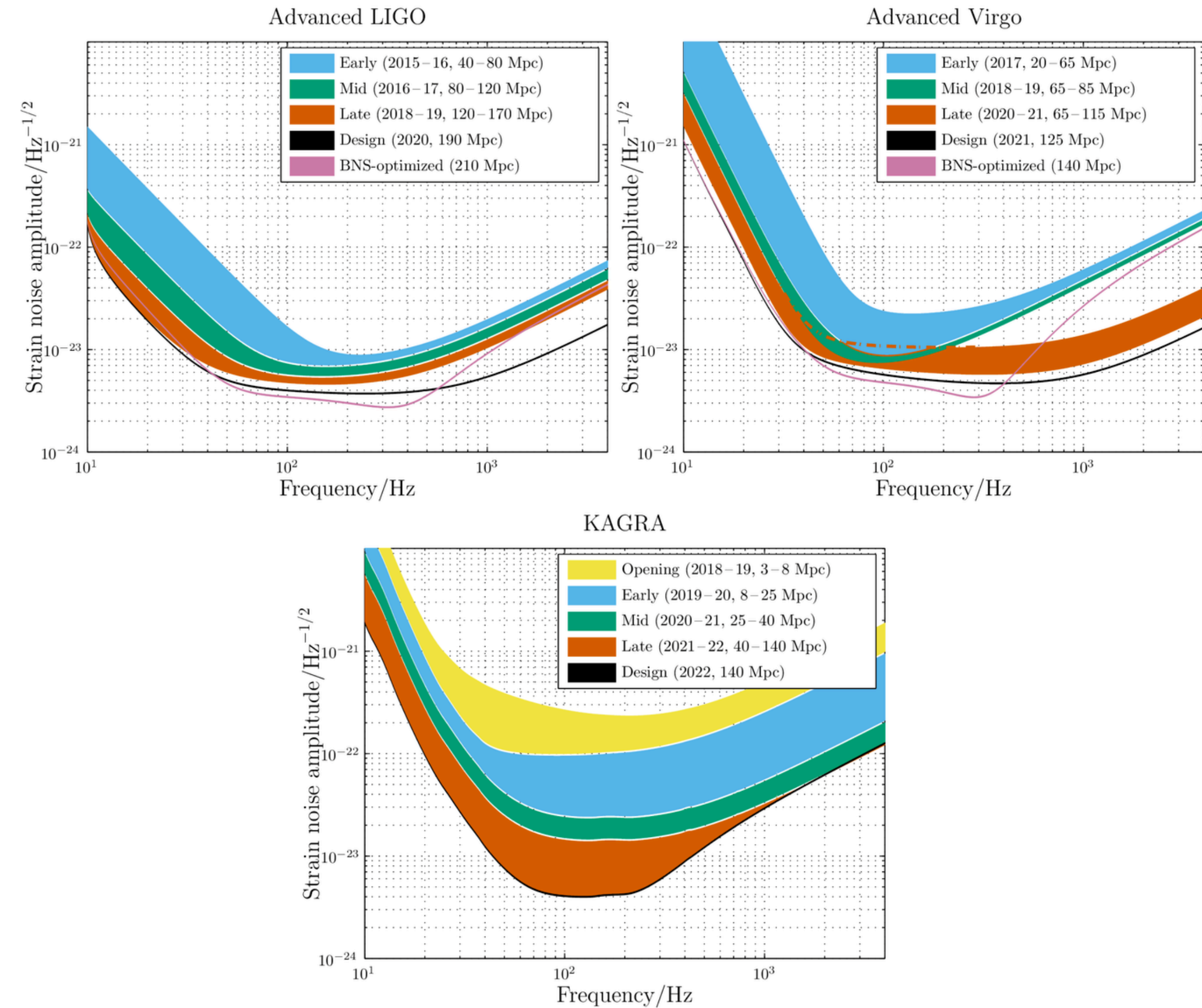
$$S_n(f) = 2 \int C_n(\tau) e^{i2\pi f\tau} d\tau$$

$$C_n(\tau) = \overline{n(t)n(t+\tau)}$$

$$\overline{n(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} n(t) dt$$

$$h_n(f) = \sqrt{f S_n(f)} \rightarrow \sqrt{S_n(f)}$$

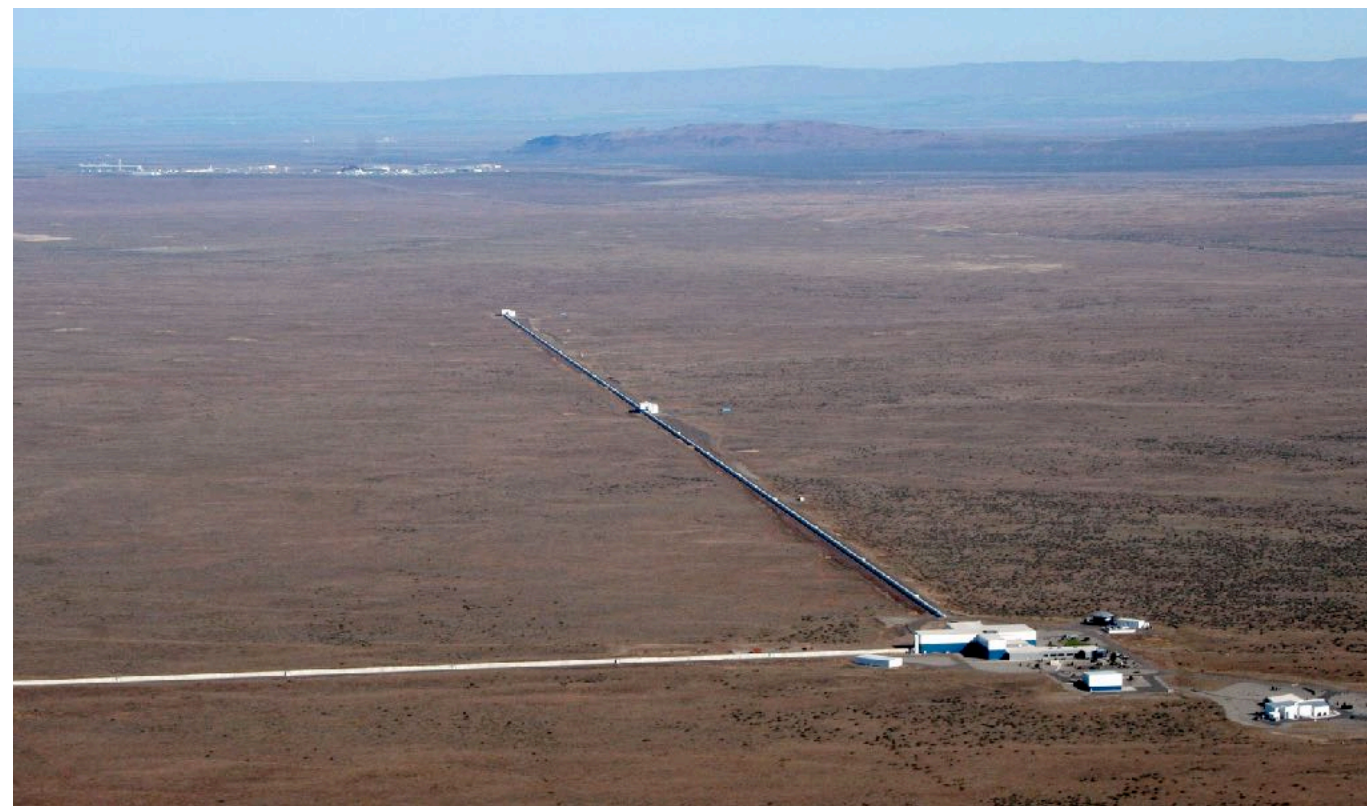
strain noise



Living Reviews in Relativity; 21:3; 2018

世界の重力波天文台（レーザー干渉計）

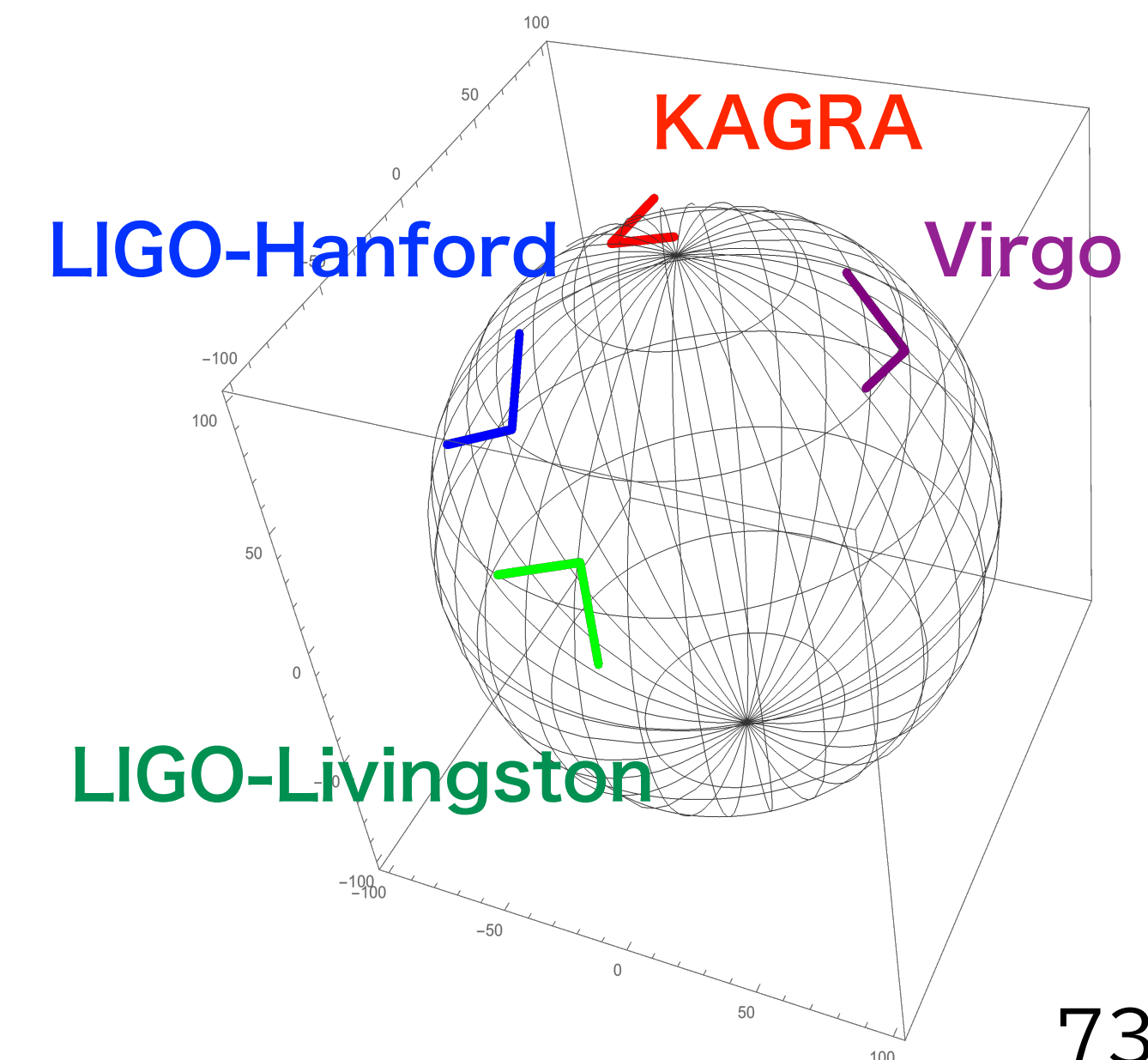
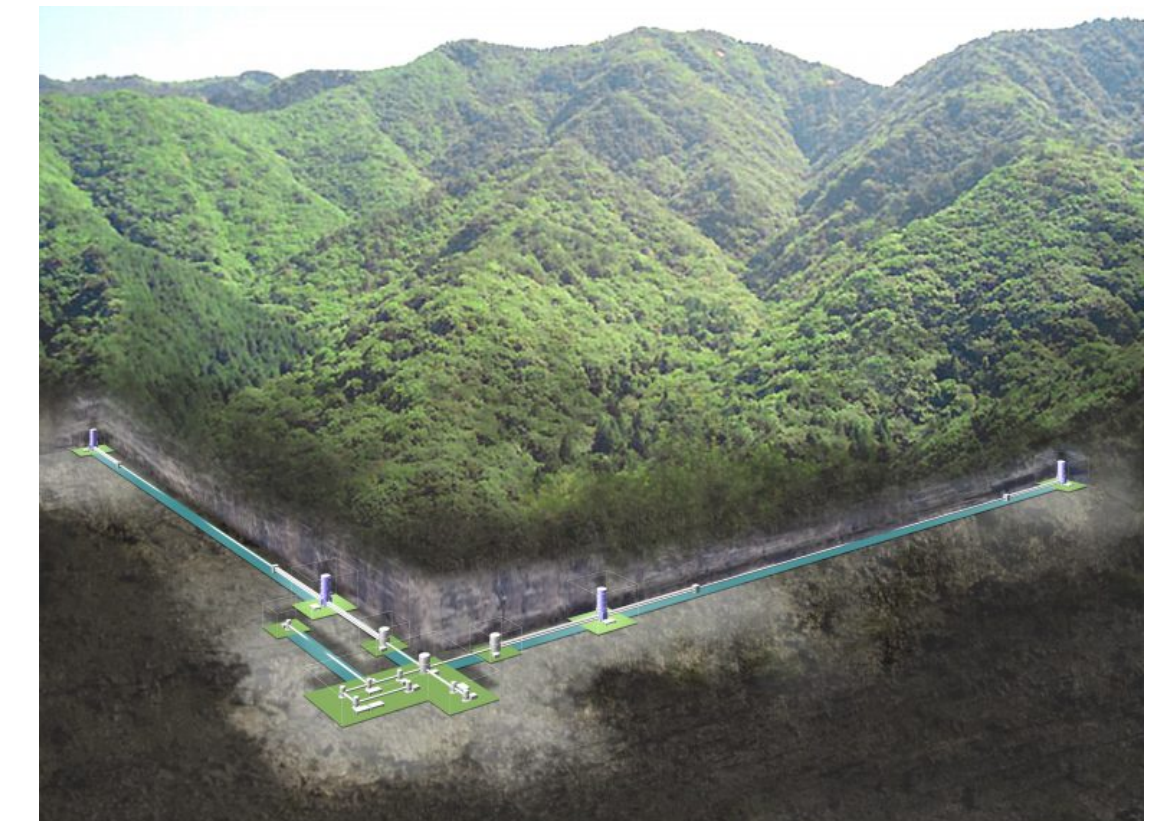
アメリカ・LIGO



ヨーロッパ・VIRGO

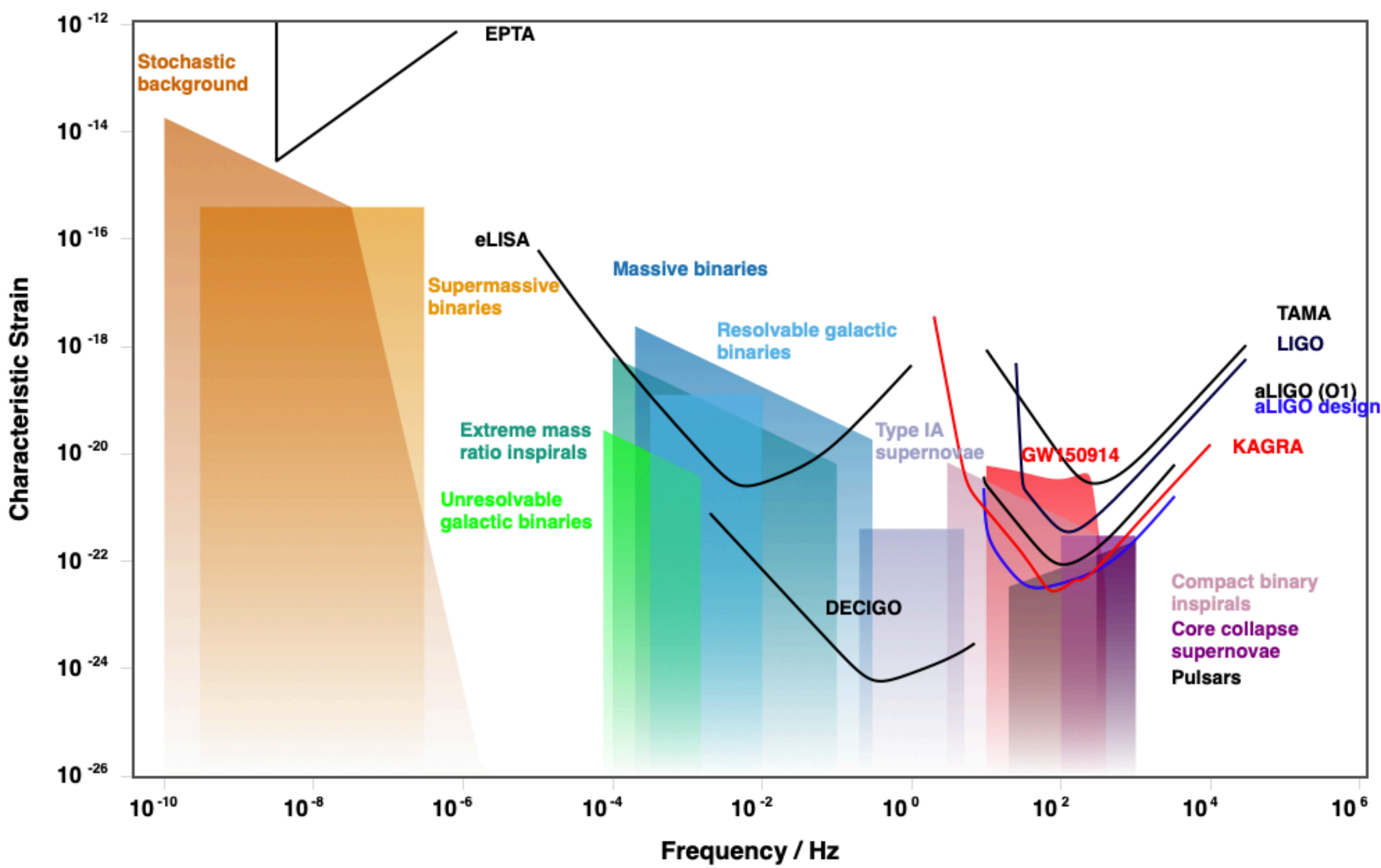


日本・KAGRA(岐阜・神岡)

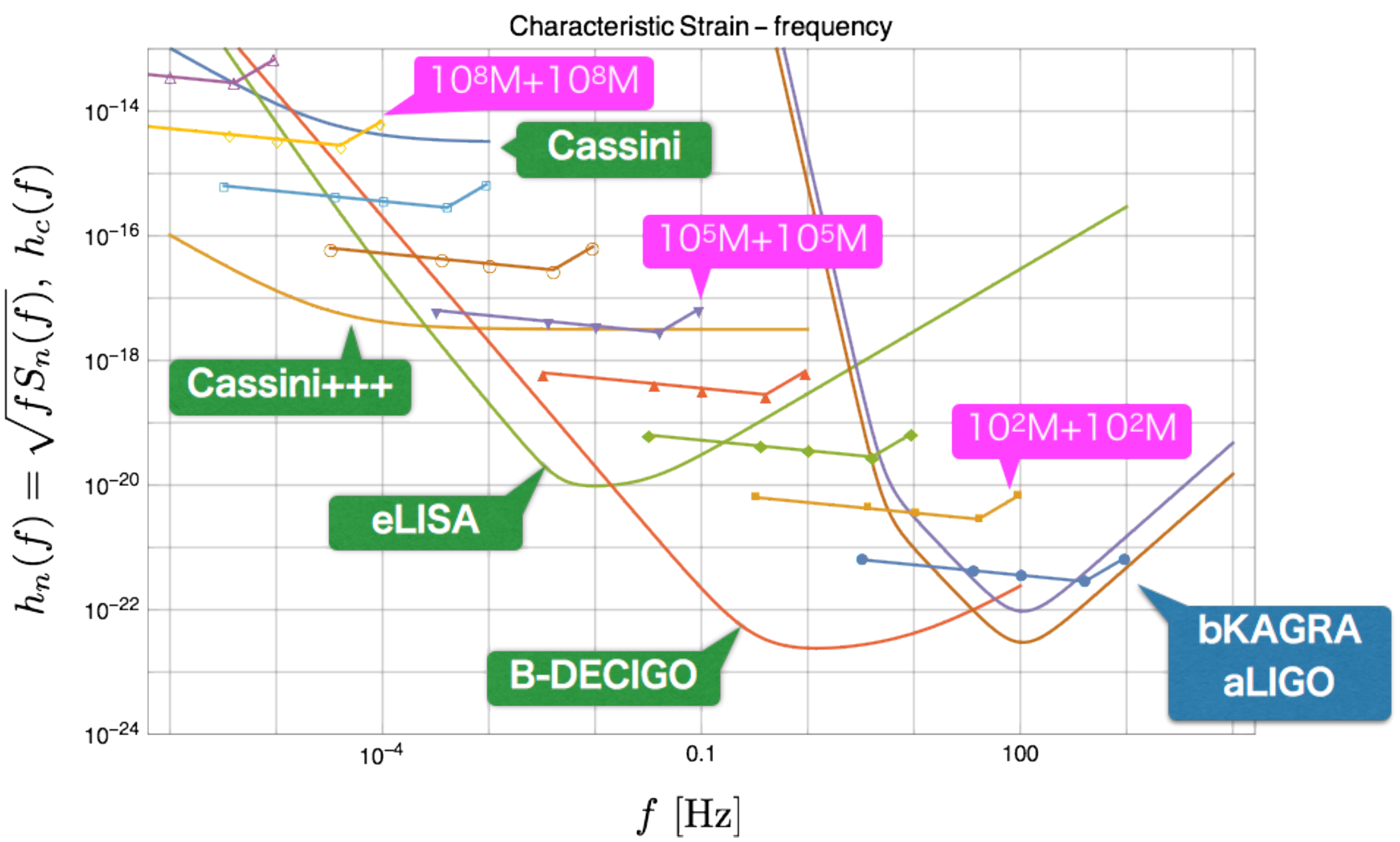


地上の干渉計では, 10Hz以上のみ観測可, ringdown波は500Msunまで

Gravitational Wave Detectors and Sources



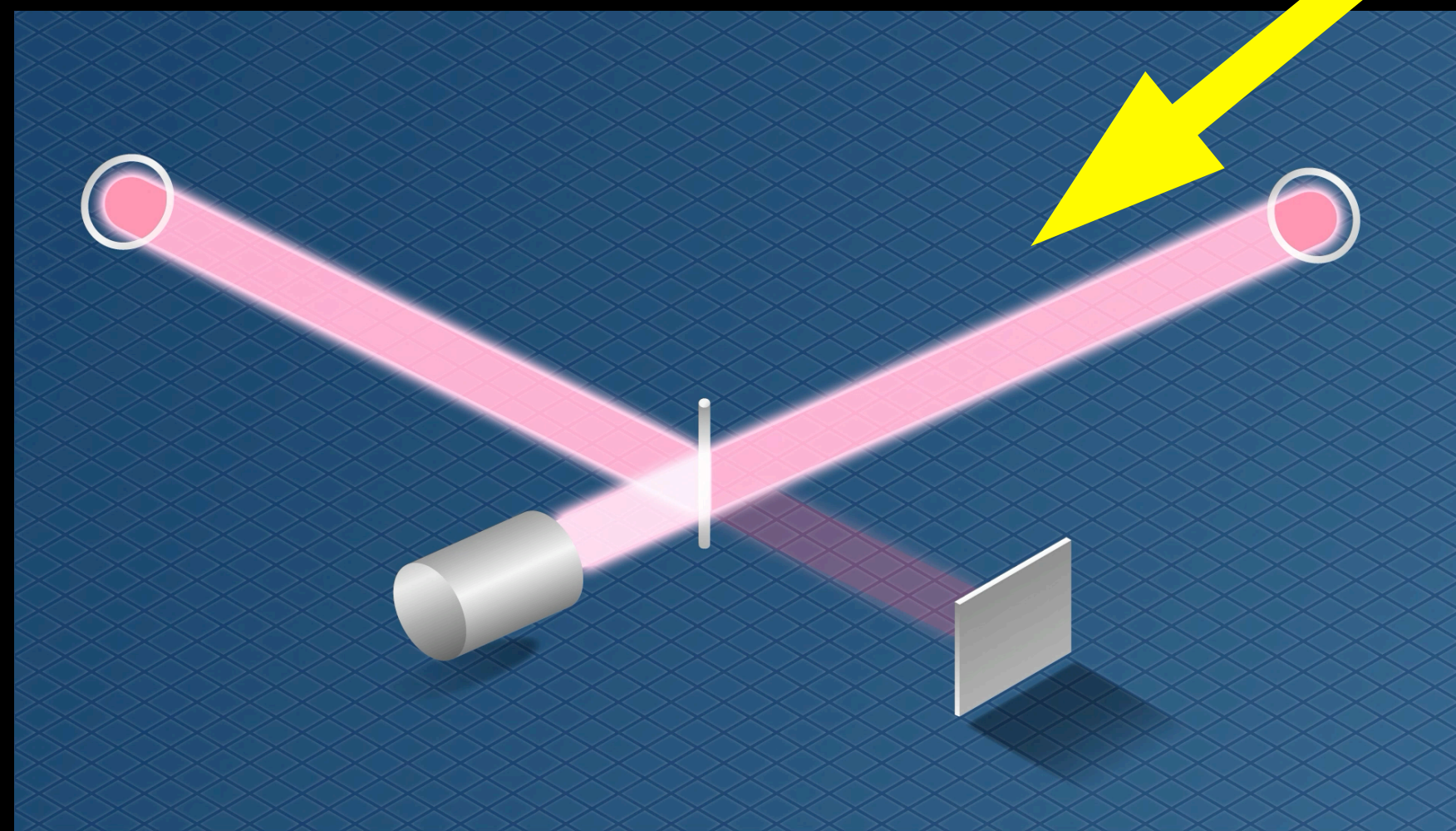
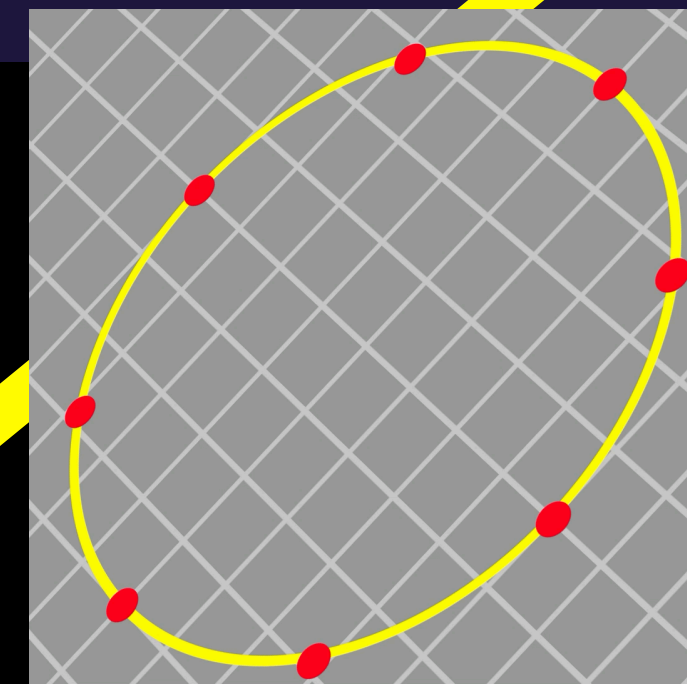
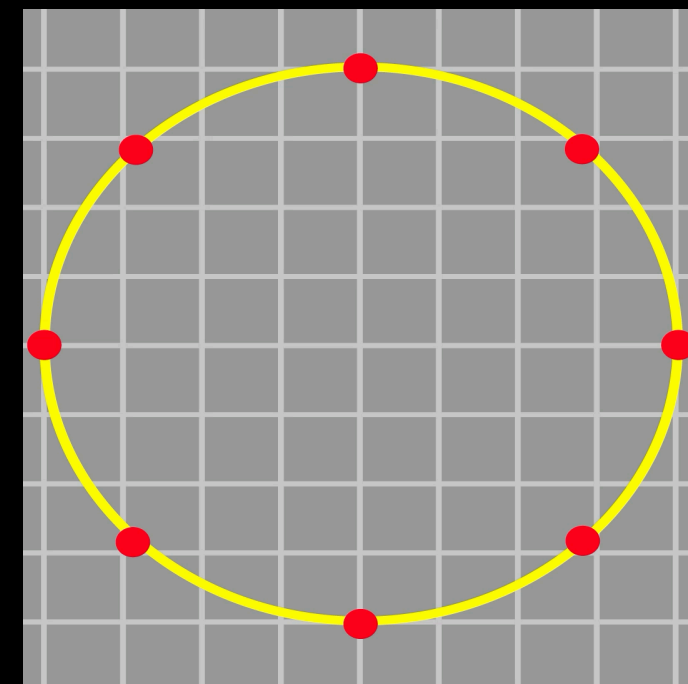
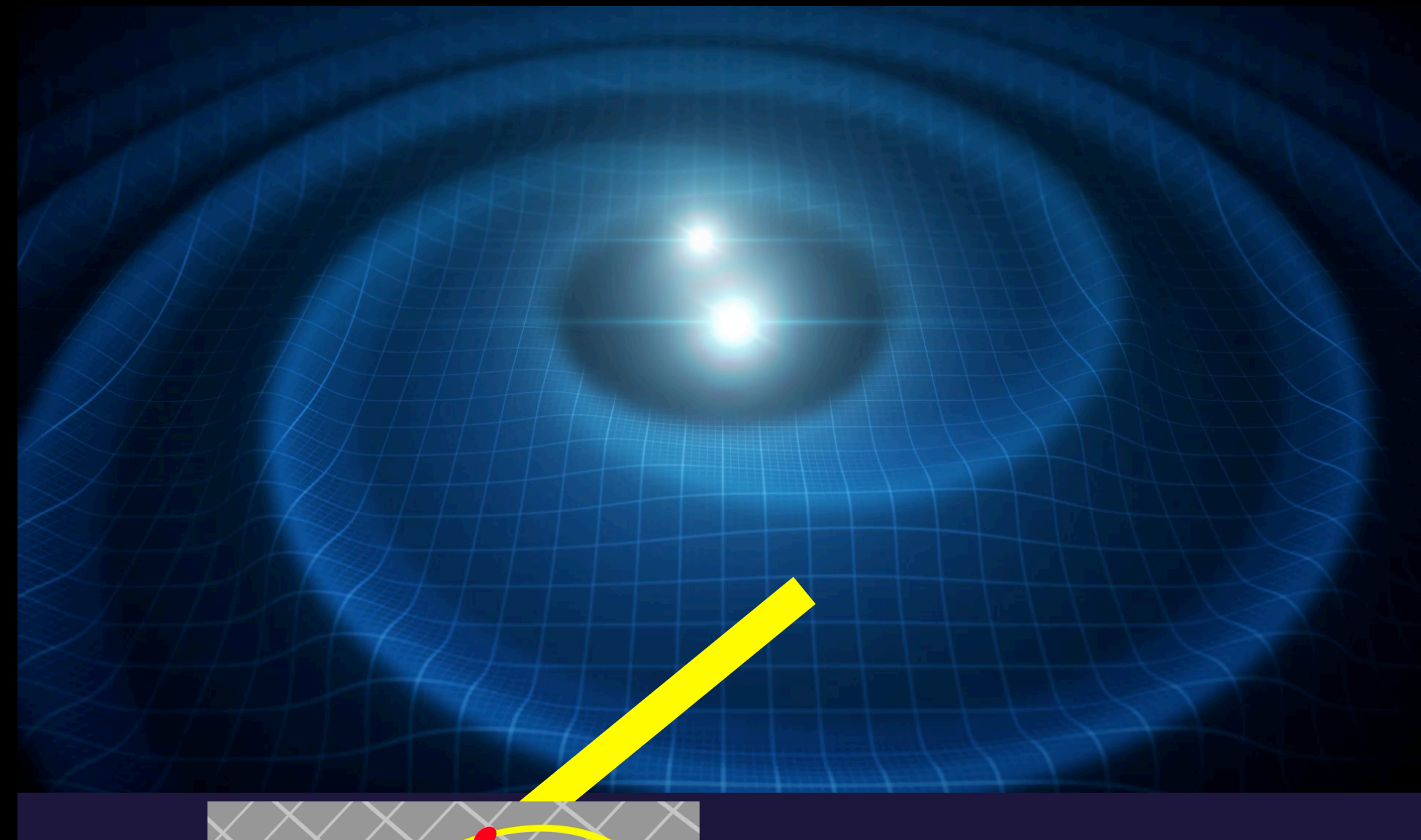
<http://gwplotter.com>



cf) HS, Kanda, Ebisuzaki, *Astrophysical Journal* 835 (2017) 276
Ebisuzaki, et al. *Int. J. Mod. Phys. D.* 29 (2020) 1940002

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

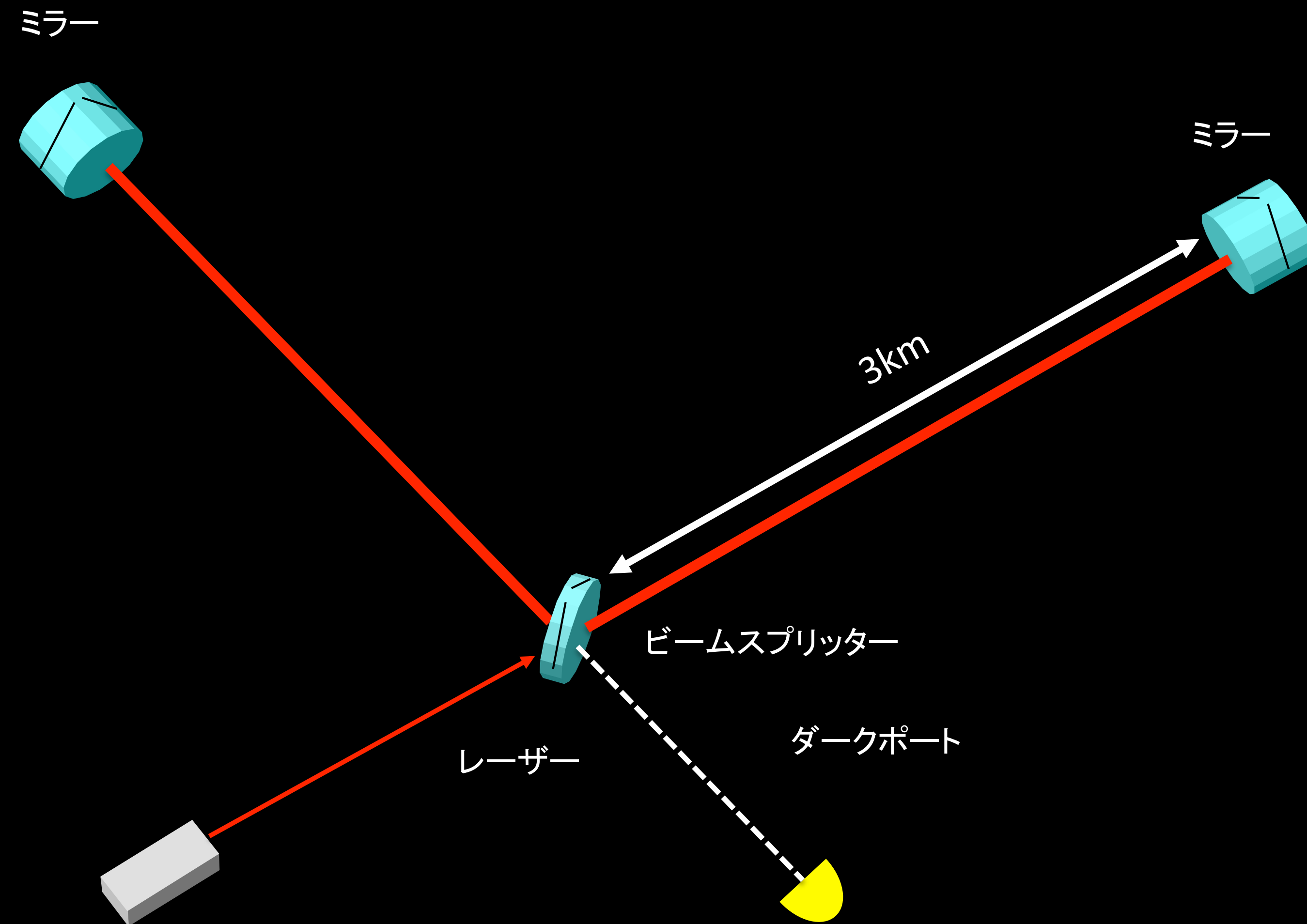


レーザー干渉計

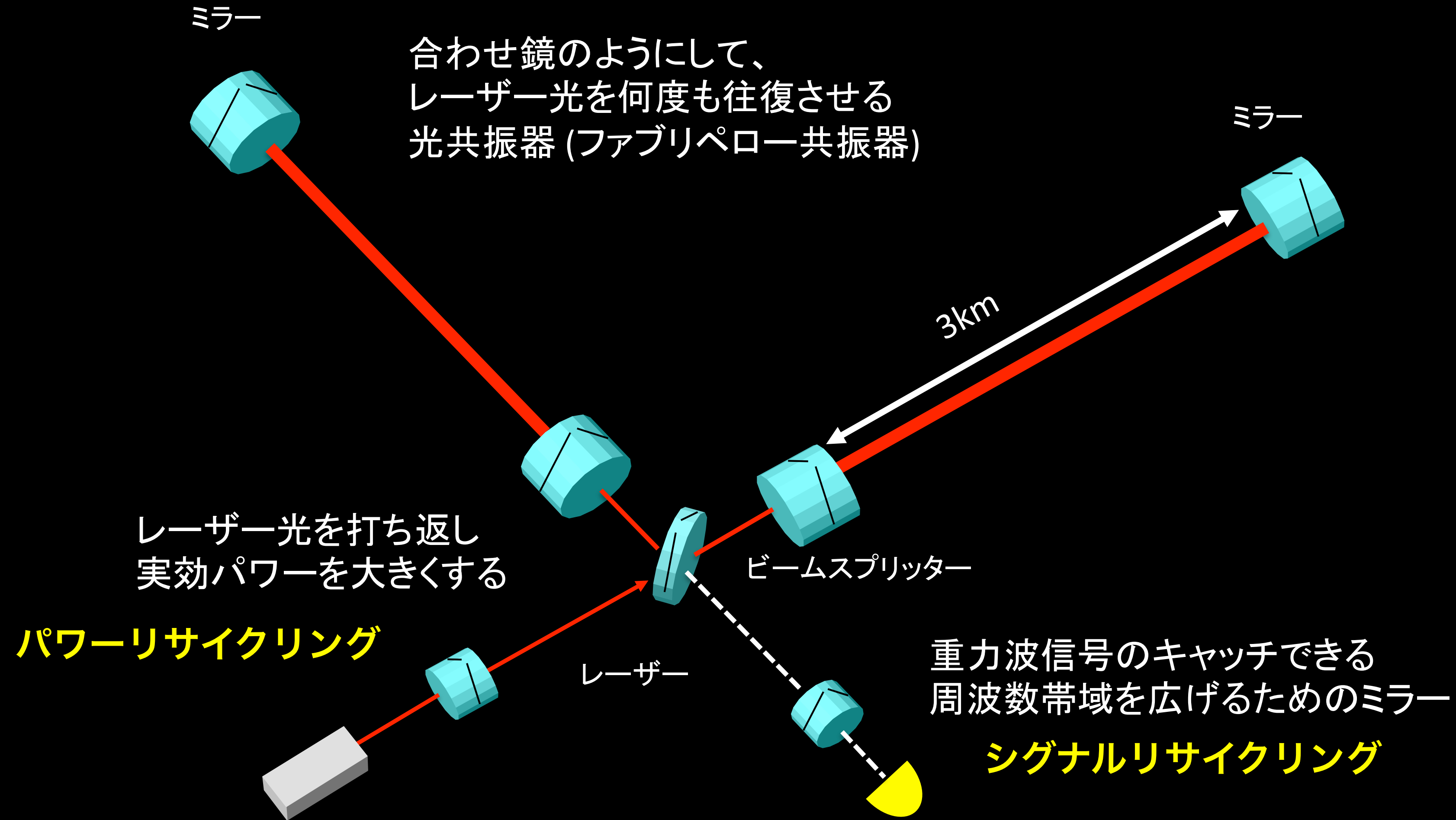
LIGO=Laser Interferometer
Gravitational-Wave Observatory

振幅は 10^{-22} 太陽地球距離で水素原子一つ分

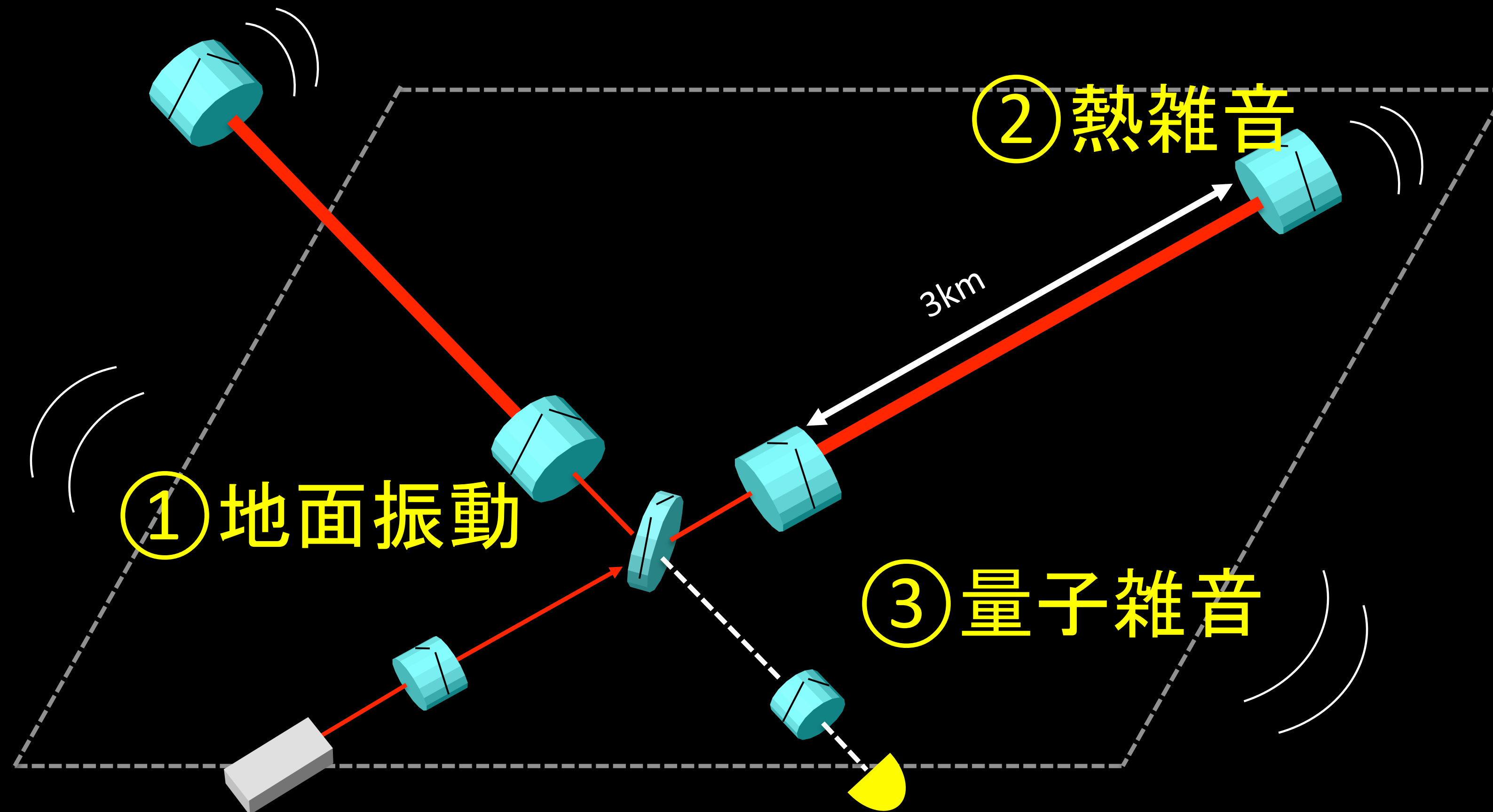
干渉計は、大きければ大きいほどよい。



さらに、信号を増幅させる



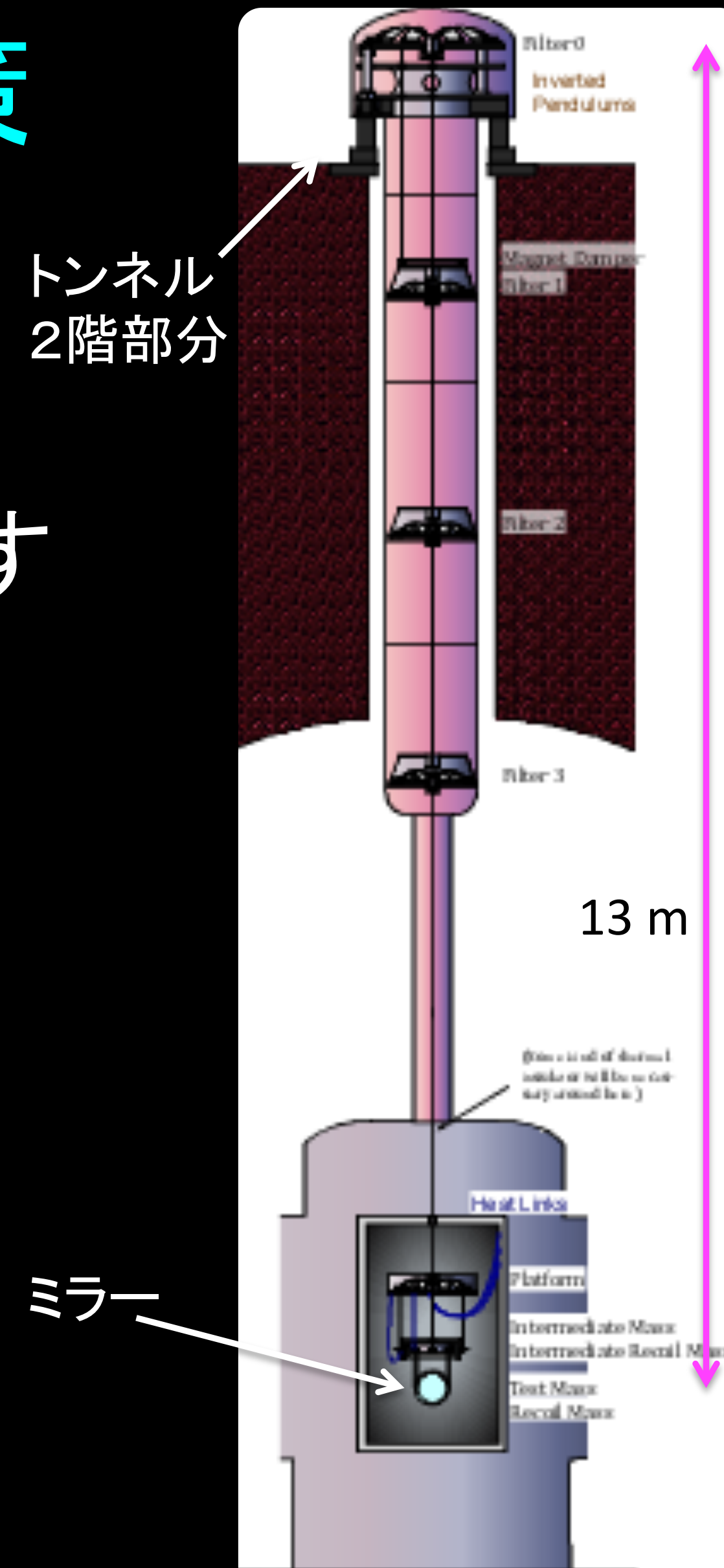
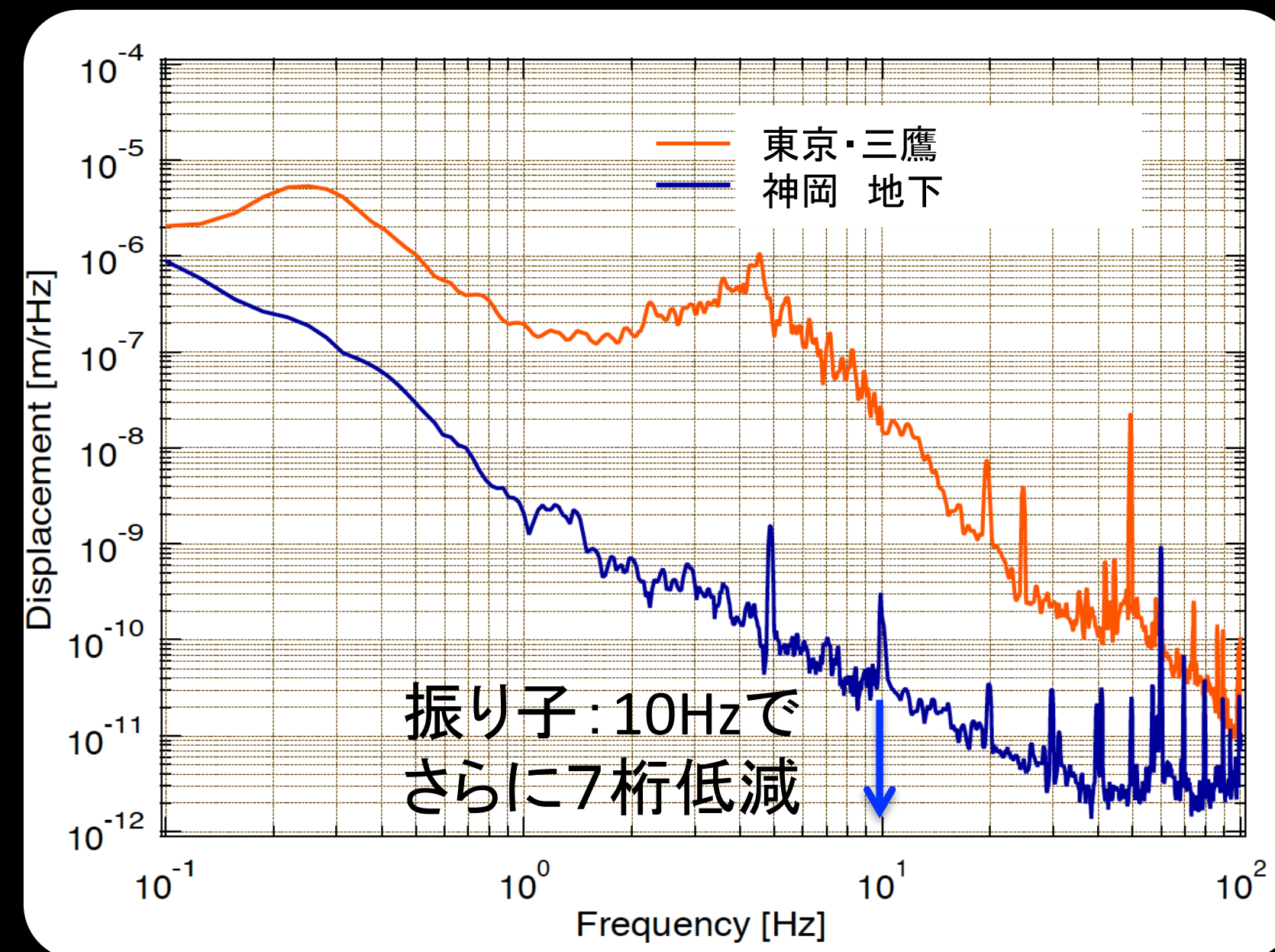
さらに、さらに、雑音を減らす



KAGRAでの雑音対策

①地面振動

- 地下に検出器を設置する
- ミラーを大きな振り子に吊るす



KAGRAでの雑音対策

② 熱雑音

鏡の表面の分子や振りが熱運動して揺れ、空間の揺らぎと区別がつかずに雑音となる

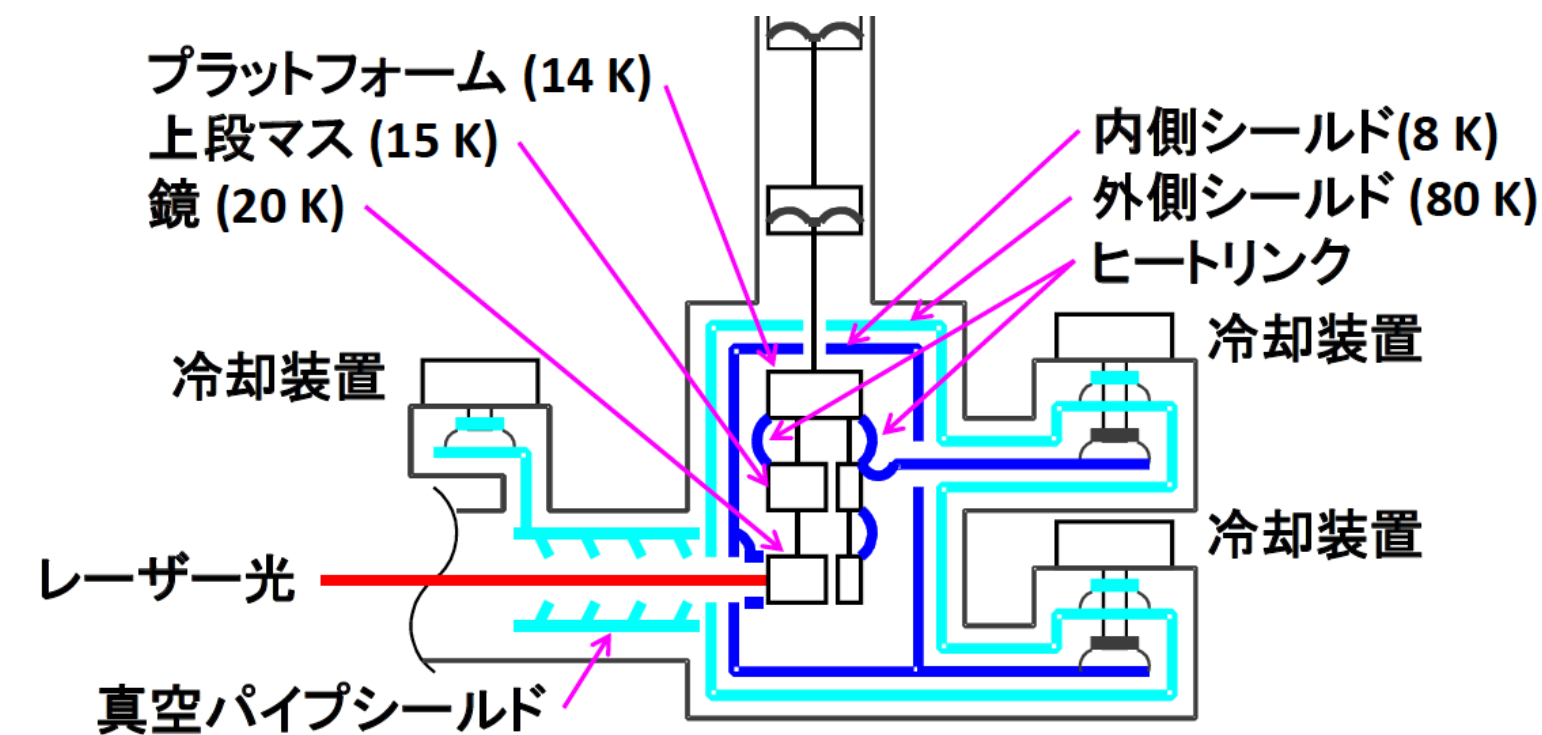
$$\text{熱雑音} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

- ミラーをマイナス253℃に冷やす
- サファイアミラーを使う

サファイアミラー



冷却システム

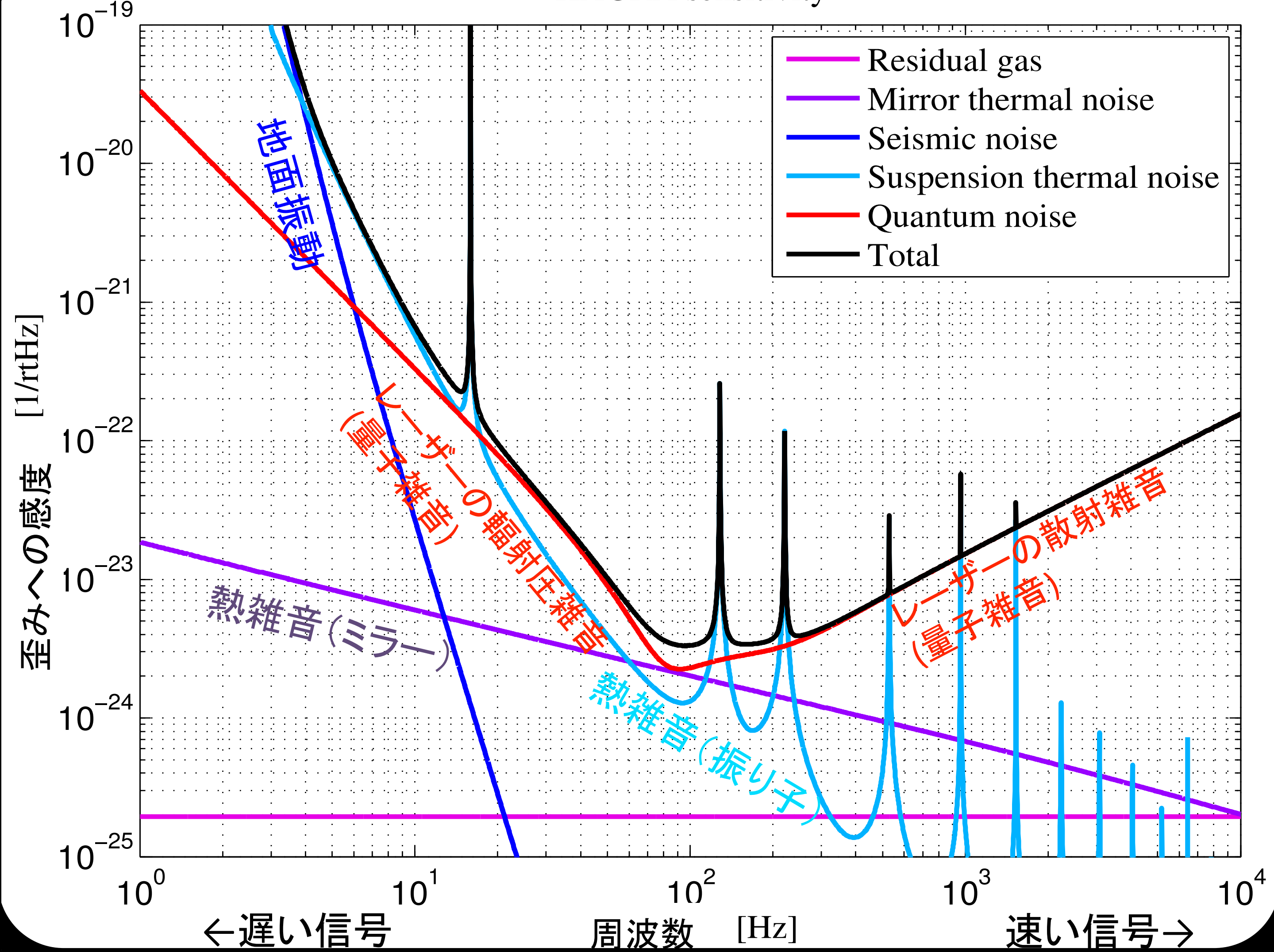


③ 量子雑音

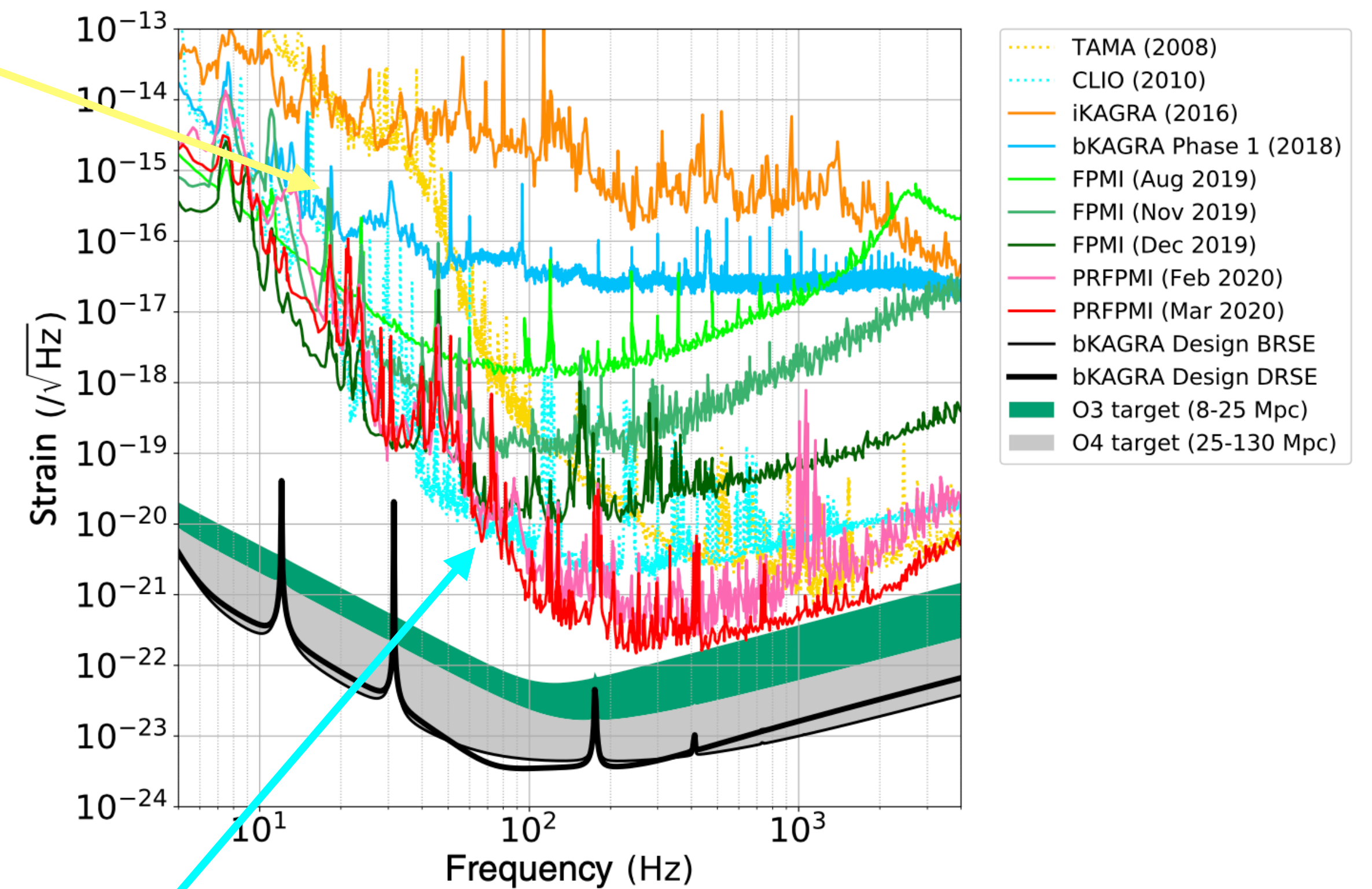
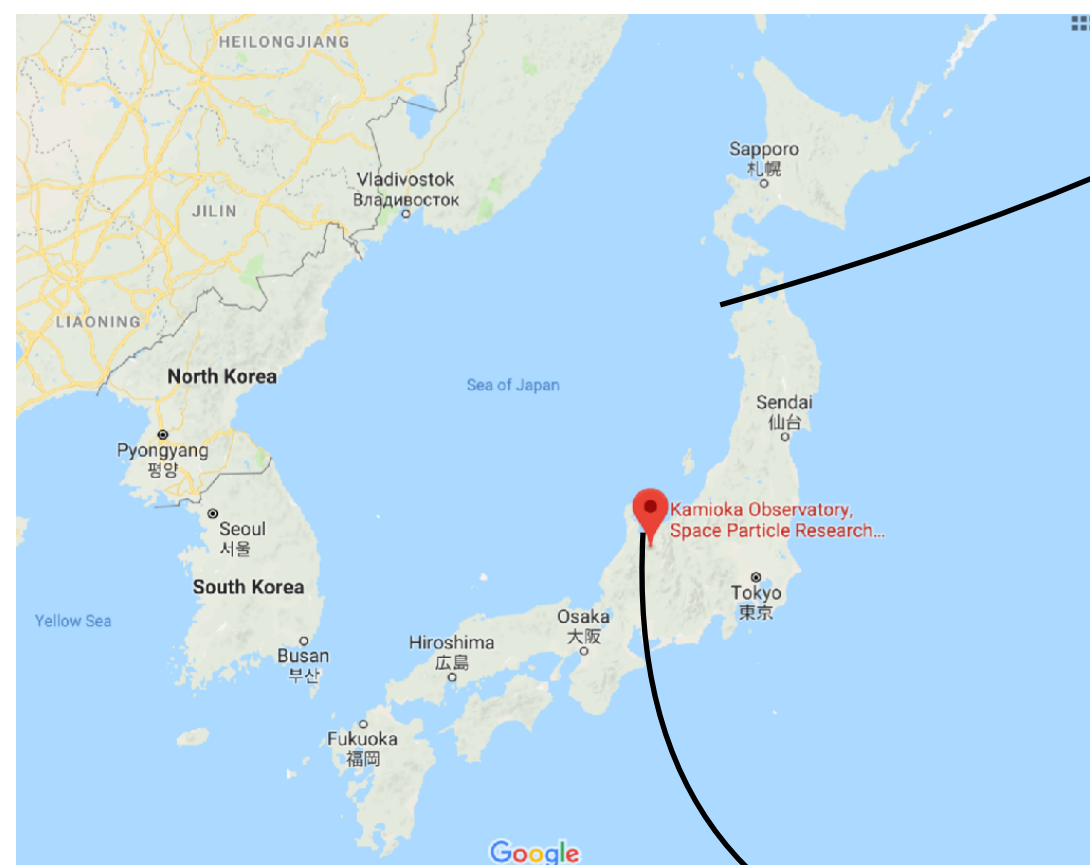
光子が量子的なふるまいをするせいで起きる雑音

- 180Wのハイパワーレーザーを使う

KAGRA sensitivity



TAMA 300 m (国立天文台, 東京三鷹, 2008)

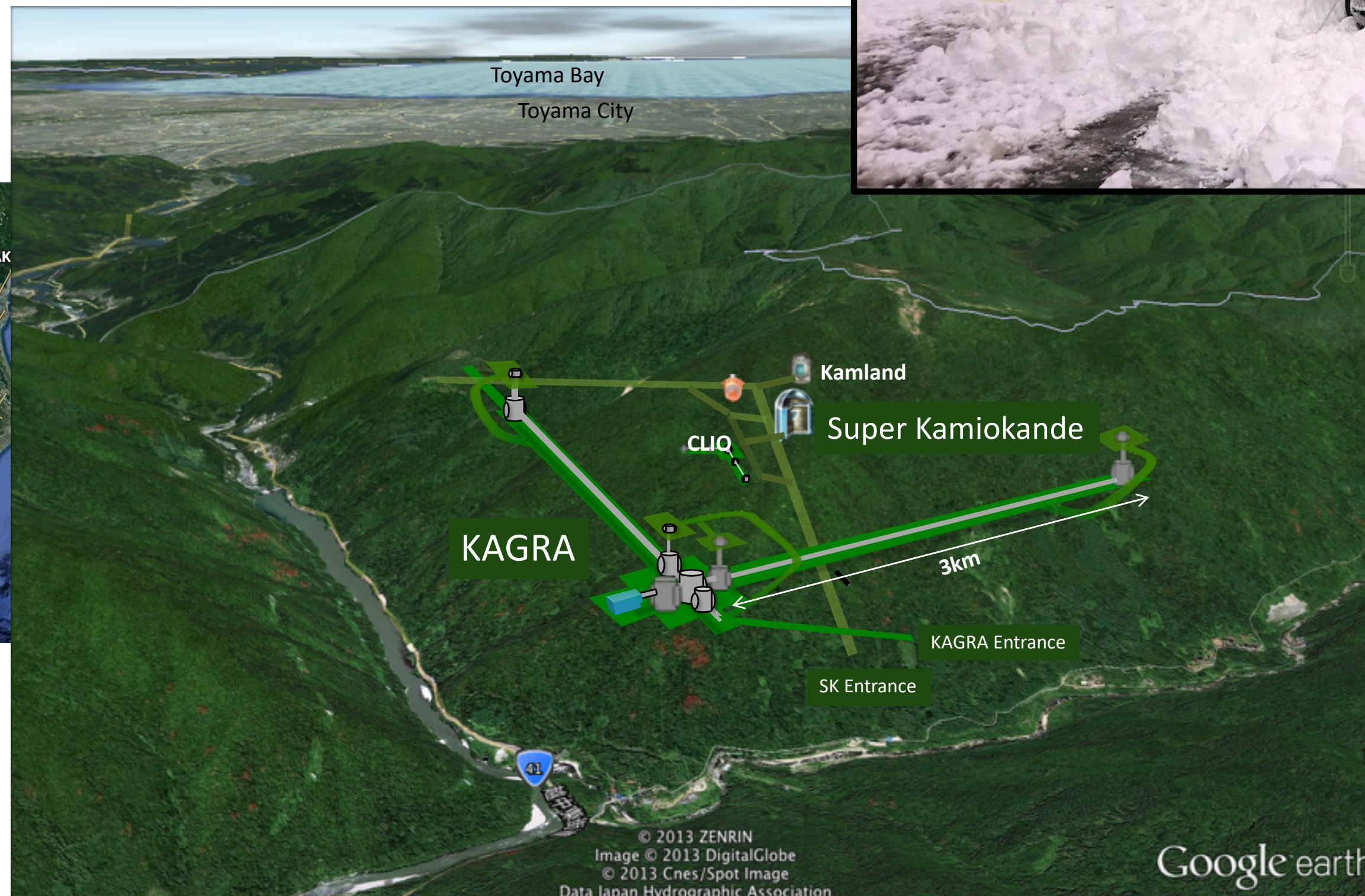


CLIO 20 m (岐阜県神岡, 2010)

KAGRA 3km (岐阜県神岡) 2011予算承認

KAGRA (Kamioka GW Observatory)

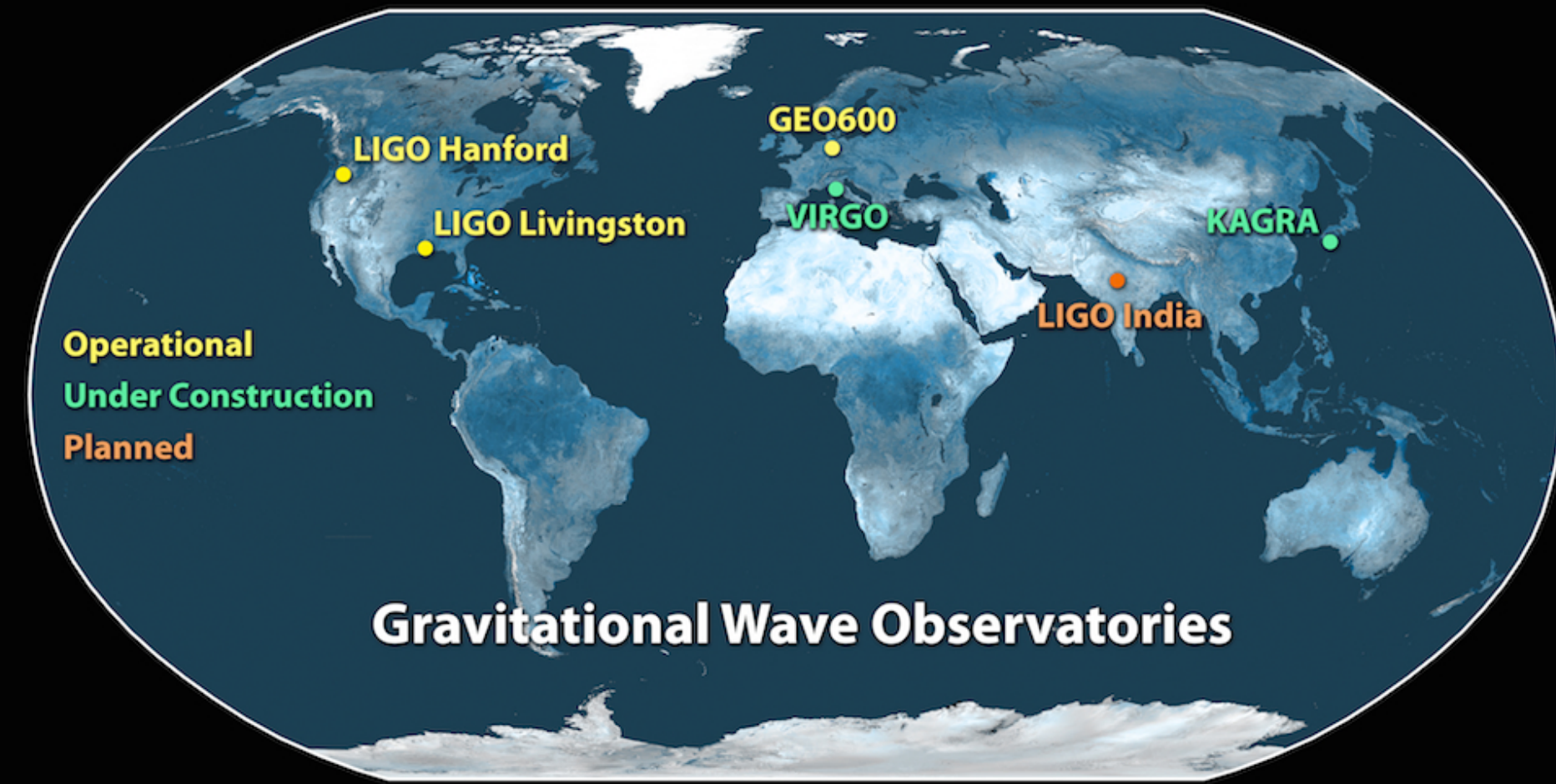
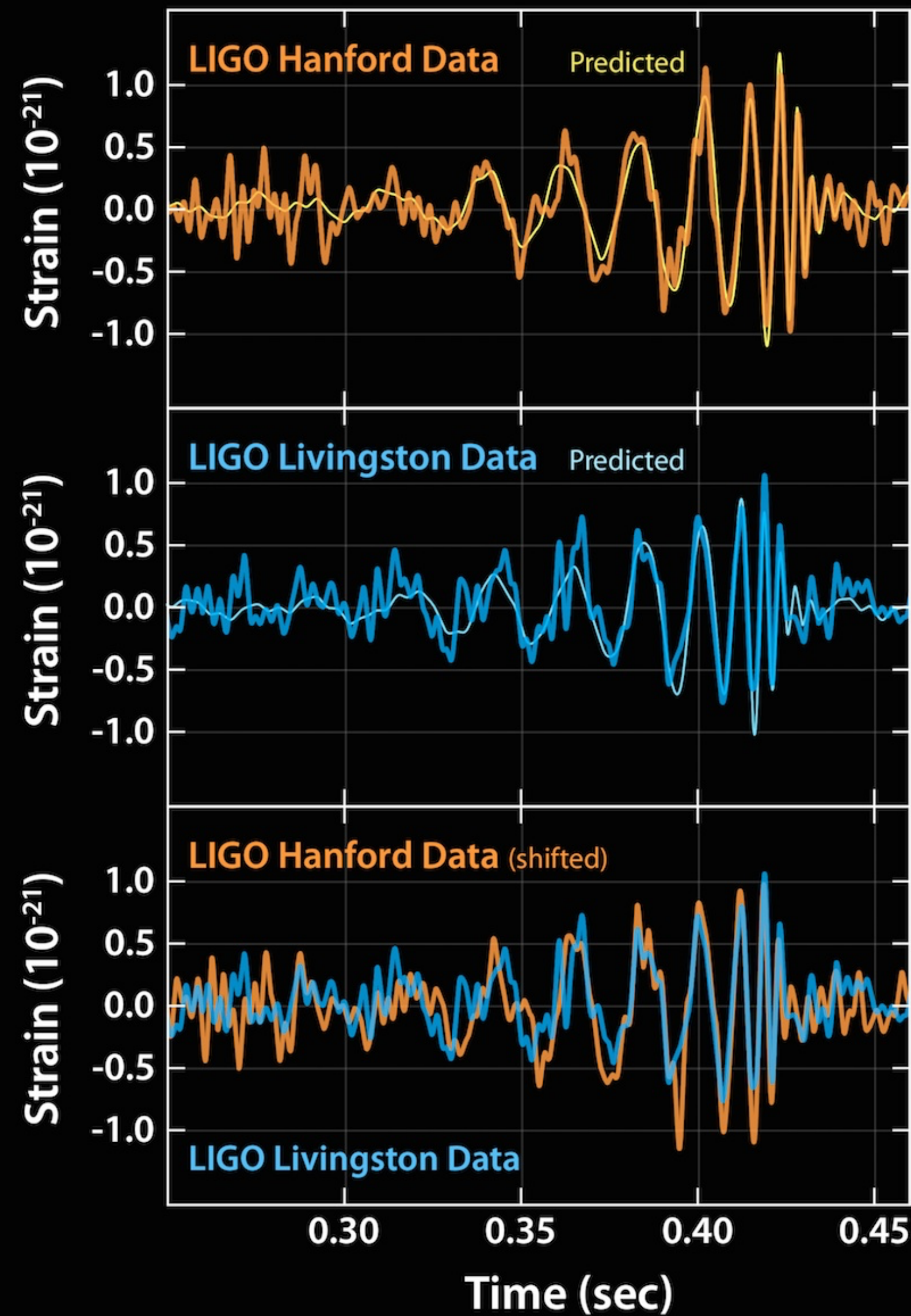
◆ **Underground** and **Cryogenic** interferometric gravitational-wave detector at Kamioka, Japan



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



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。

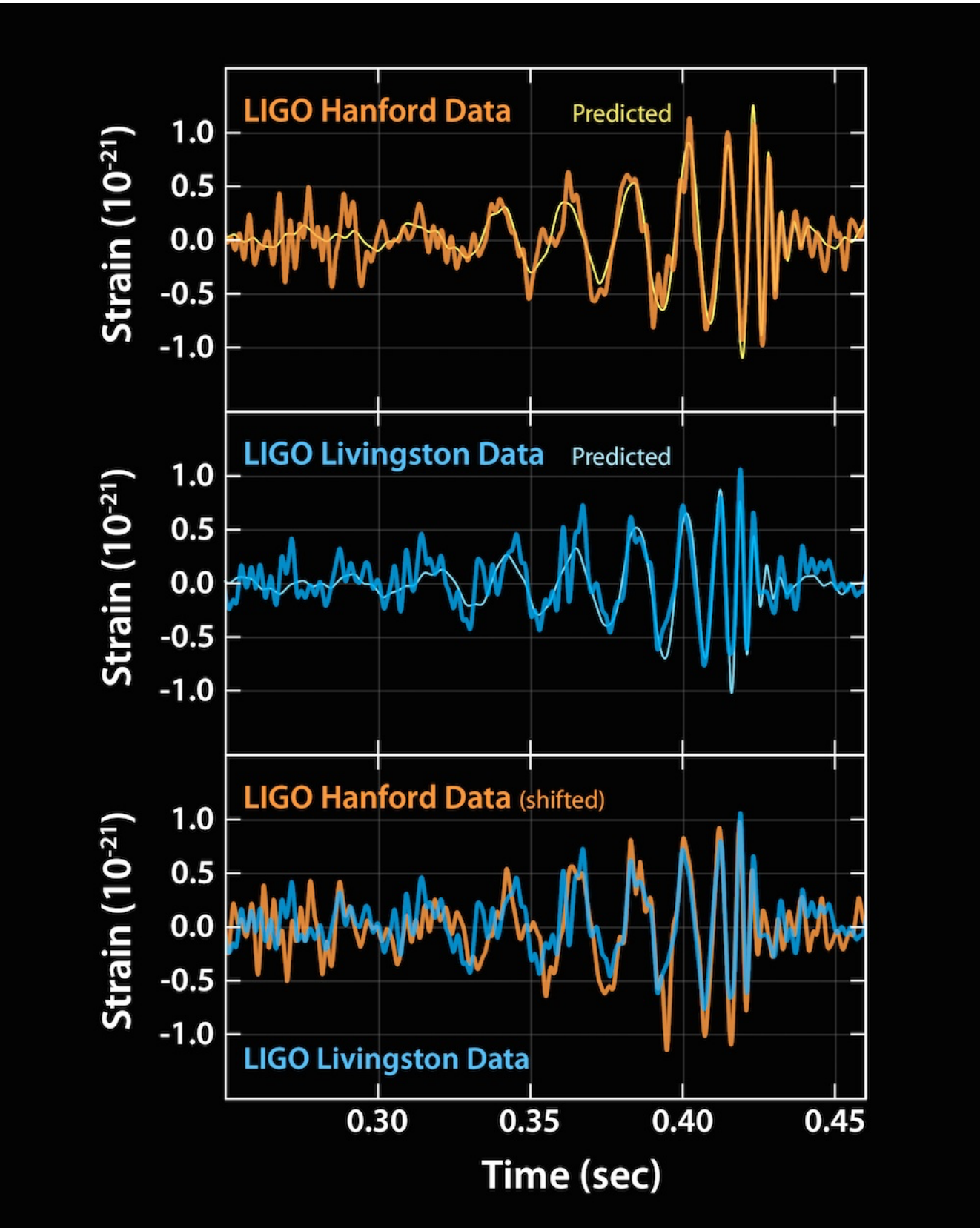
3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

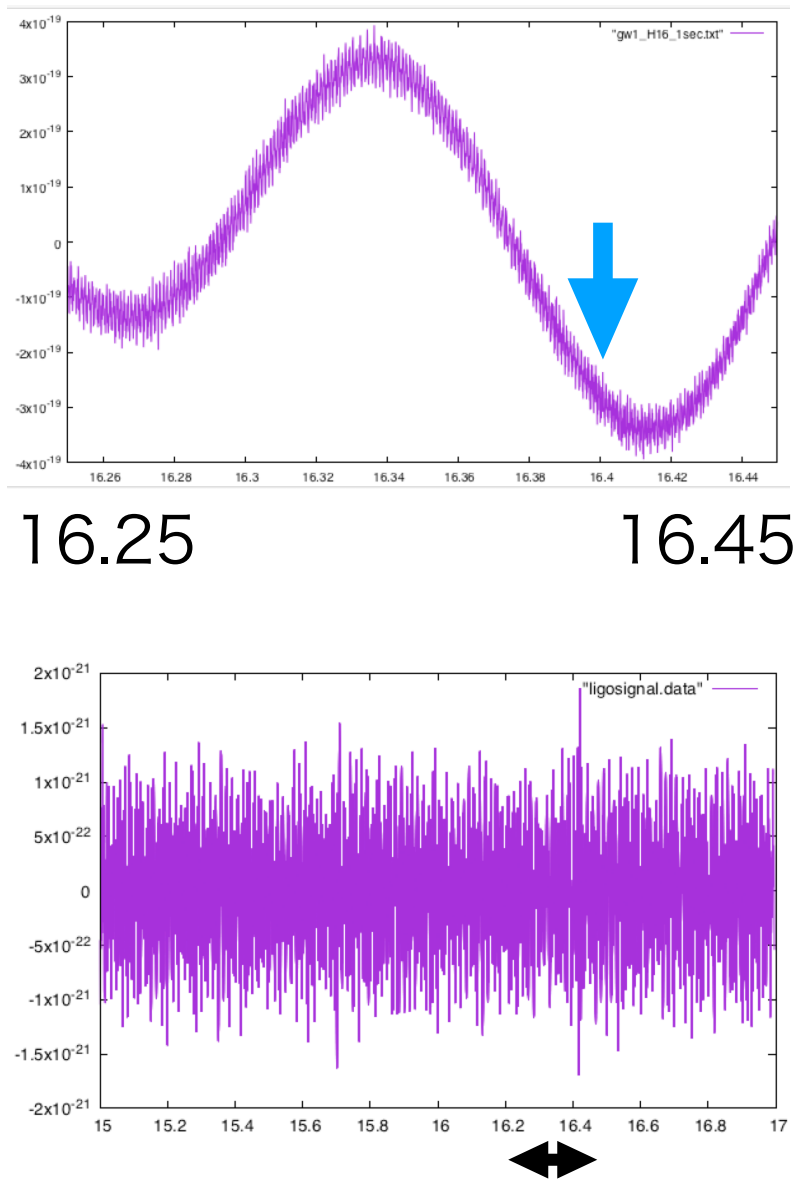
13億光年先

重力波データ解析の主流: Matched-Filtering method

GW150914 (S/N=23.7)

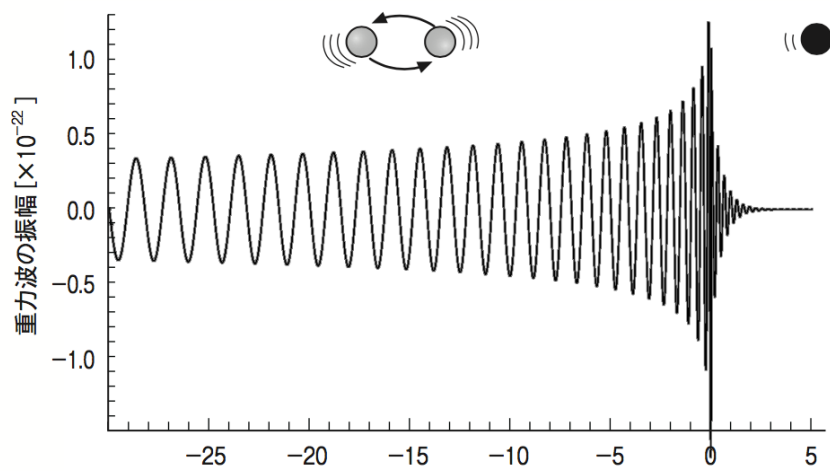


challenging for data analysis
GW data is with noise
signal quickly decays
(M=60Msun, a=0.75 → 300Hz, tau = 3 ms)

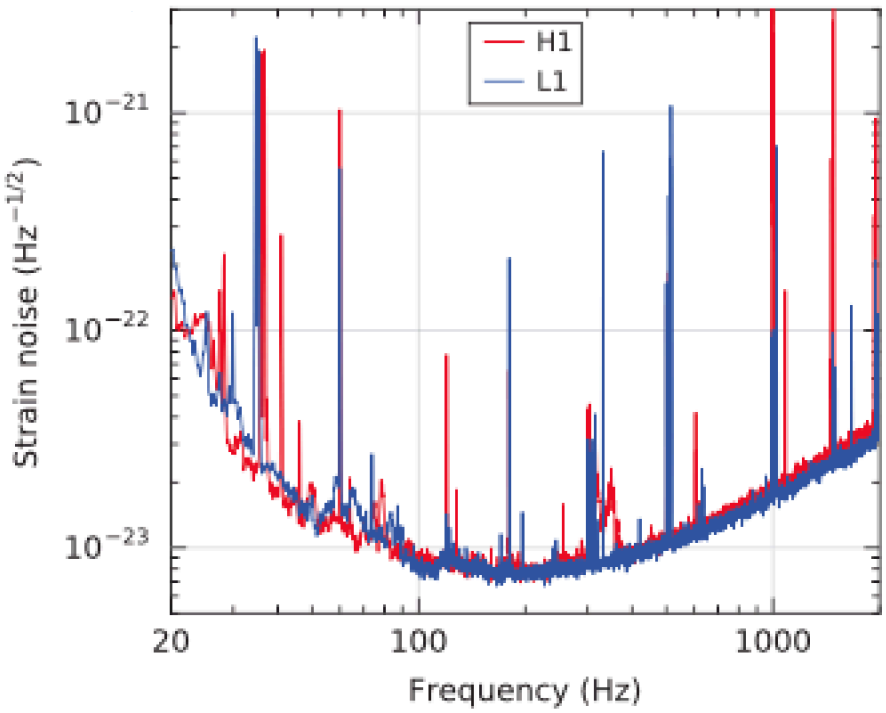


signal = gw + noise
 $s(t) = h(t) + n(t)$

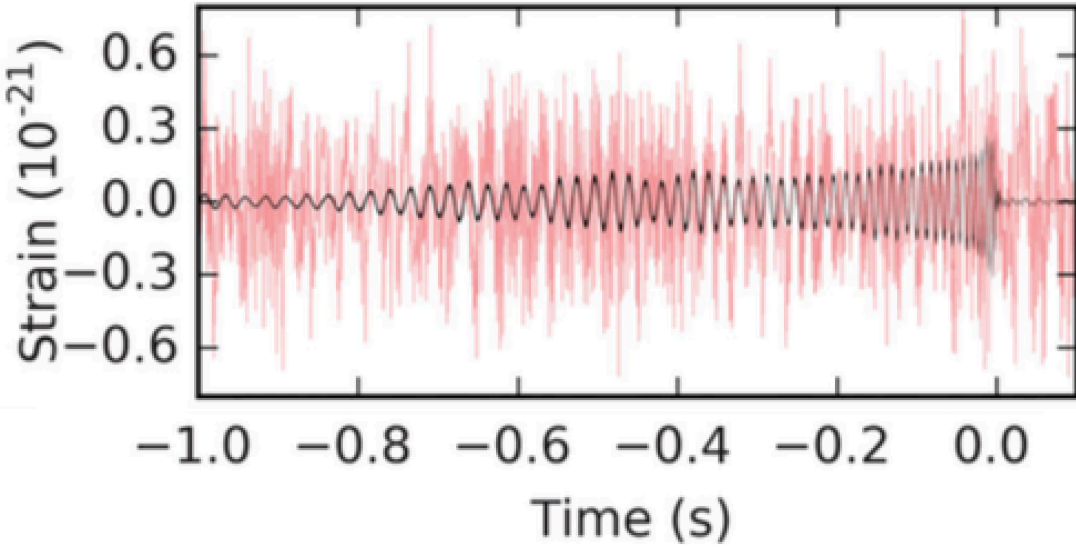
gw template
 $h(t)$



$$\rho = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{s}(f) \tilde{h}^*(f)}{S_h(|h|)} df$$
 signal/noise ratio

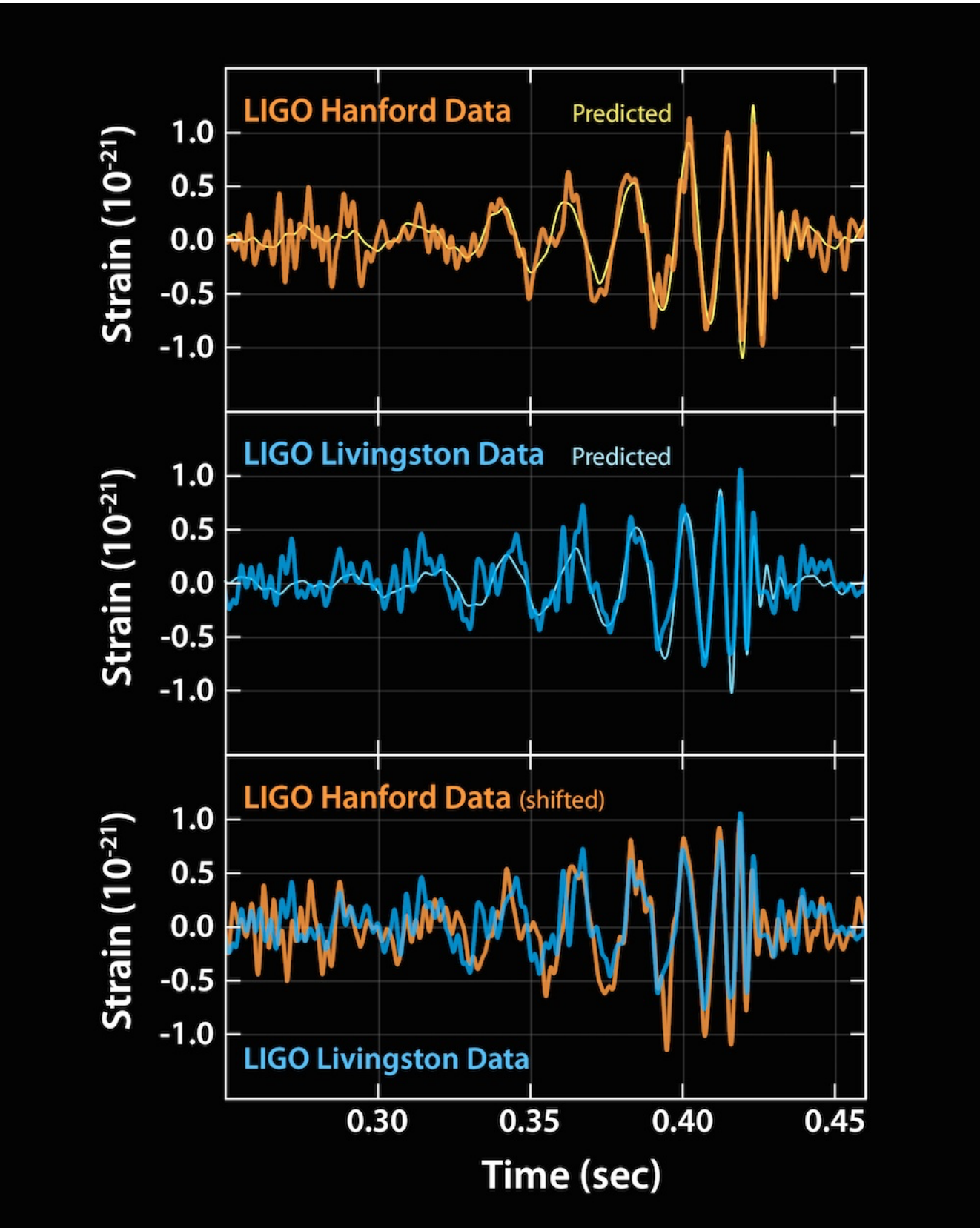


GW151226 (S/N=13.0)



重力波データ解析の主流: Matched-Filtering method

GW150914 (S/N=23.7)



challenging for data analysis
GW data is with noise
signal quickly decays
(M=60Msun, a=0.75 → 300Hz, tau = 3 ms)

B. P. ABBOTT *et al.* PHYSICAL REVIEW D **94**, 064035 (2016)

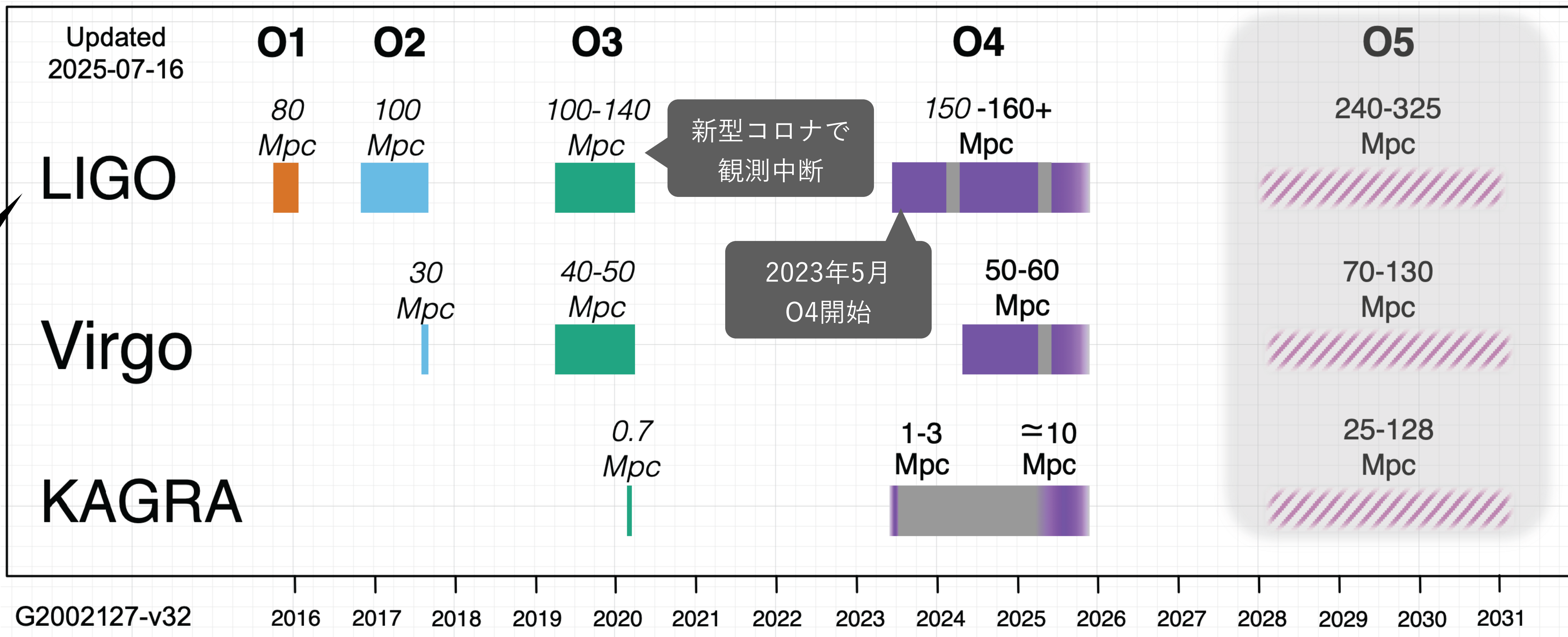
APPENDIX B: SIMULATION RANKINGS

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

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

$\ln L$	Key	q	$\chi_{1,x}$	$\chi_{1,y}$	$\chi_{1,z}$	$\chi_{2,x}$	$\chi_{2,y}$	$\chi_{2,z}$	χ_{eff}	$M_z/M_\odot$	$f_{\text{start}}(\text{Hz})$
272.2	SXS:BBH:0310(*)	1.221	...	...	...	...	...	...	0.00	73.0	15.1
272.1	D12_q1.00_a-0.25_0.25_n100(*)	1.0	...	...	0.250	...	...	-0.250	-0.00	73.2	20.5
272.1	SXS:BBH:0002[S]	1.0	...	...	...	...	...	...	0.00	73.2	10.0
271.8	D11_q0.75_a0.0_0.0_n100(*)	1.333	...	...	...	...	...	...	-0.00	72.1	23.1
271.8	SXS:BBH:0305(*+)	1.221	...	...	0.330	...	...	-0.440	-0.02	74.2	14.8
271.6	SXS:BBH:0218	1.0	...	...	-0.500	...	...	0.500	0.00	73.3	10.6
271.6	SXS:BBH:0198	1.202	...	...	...	...	...	...	0.00	73.4	12.7
271.6	SXS:BBH:0307(*)	1.228	...	...	0.320	...	...	-0.580	-0.08	70.0	17.0
271.6	GT:BBH:476	1.0	...	...	-0.200	...	...	-0.200	-0.20	67.9	24.3
271.6	S0_D10.04_q1.3333_a0.45_-0.80_n100	1.334	...	...	0.450	...	...	-0.801	-0.09	71.9	27.9
271.5	D12_00_q0.85_a0.0_0.0_n100(*)	1.176	...	...	...	...	...	...	-0.00	73.0	20.6
271.5	D12.25_q0.82_a-0.44_0.33_n100(*+)	1.22	...	...	0.330	...	...	-0.440	-0.02	72.9	20.2
271.5	SXS:BBH:0312(*)	1.203	...	...	0.390	...	...	-0.480	-0.00	73.9	14.8
271.4	SXS:BBH:0127	1.34	0.010	-0.077	-0.017	-0.061	-0.065	-0.179	-0.09	71.5	14.3
271.4	SXS:BBH:0115	1.07	0.019	0.013	-0.204	0.243	-0.067	0.291	0.04	74.1	13.8
271.3	SXS:BBH:0213	1.0	...	...	-0.800	...	...	0.800	0.00	73.2	11.7
271.3	UD_D10.01_q1.00_a0.4_n100	1.0	...	...	0.400	...	...	-0.400	-0.00	73.4	26.7
271.2	D12_q1.00_a-0.25_0.00_n100(*)	1.0	...	...	...	...	...	-0.250	-0.12	69.4	21.8
271.2	SXS:BBH:0222	1.0	...	...	-0.300	...	...	...	-0.15	69.1	12.3
271.2	SXS:BBH:0217	1.0	...	...	-0.600	...	...	0.600	0.00	73.2	11.9

観測スケジュール (Observation 1/2/3a/3b/4a)



突発性重力波のデータカタログ公開
Gravitational Wave Transient Catalog



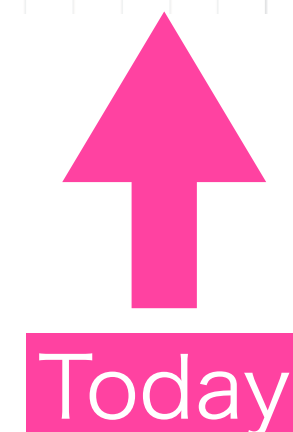
GWTC-1
2018/12/3

GWTC-2
2020/10/28

GWTC-2.1
2021/8/2

GWTC-3
2021/11/5

GWTC-4
2025/8/25



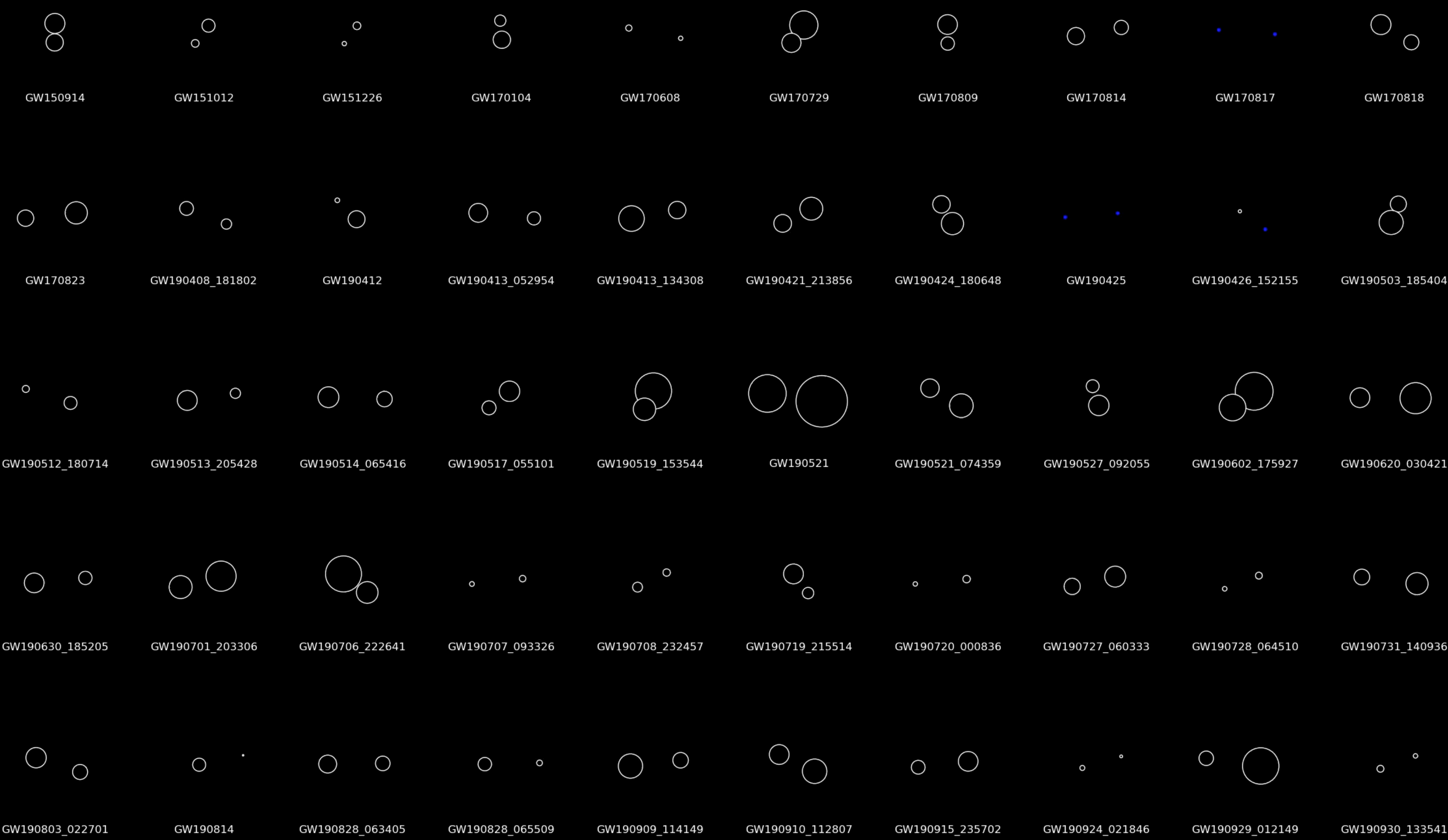
Today

複数台の干渉計での同時観測が必須

干渉計を止めて、調整して、感度が2倍
(観測できる距離が2倍) になれば、観
測できるイベント数は $2^3=8$ 倍になる。

<https://observing.docs.ligo.org/plan/>

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>

理科年表2025 (2024年11月発売)

重力波 2024-0626 田中・真貝 作成

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 **2 年**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
O4a	2023 5 26	– 2024 1 16	–		2023 5 26 – 6 25	
O4b	2024 4 3	– 2025 6 9 (予定)	同左		2024 年 12 月に再開	

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 $2\rho_{\text{nuc}} = 3.5^{+2.7}_{-1.7} \times 10^{34} \text{dyn/cm}^2$ (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 (**質量ギャップ**) 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。**GW230529-181500 LIGO Livingston でのみ検出されたが、1.2–2.0 $M_{\odot}$ と 2.5–4.5 $M_{\odot}$ の連星合体で、一方は NS の質量領域だが他方は質量ギャップ領域であることから、O4a 期のイベントとして速報された。**

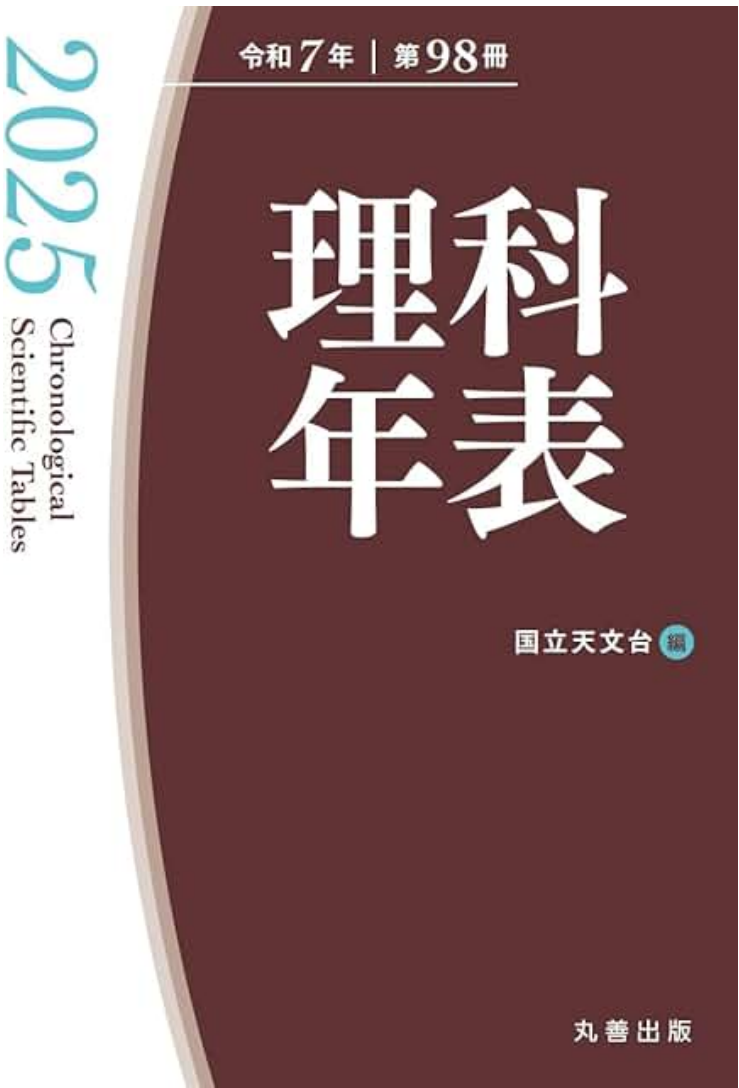
報告されたおもな重力波 (2024 年 6 月現在)

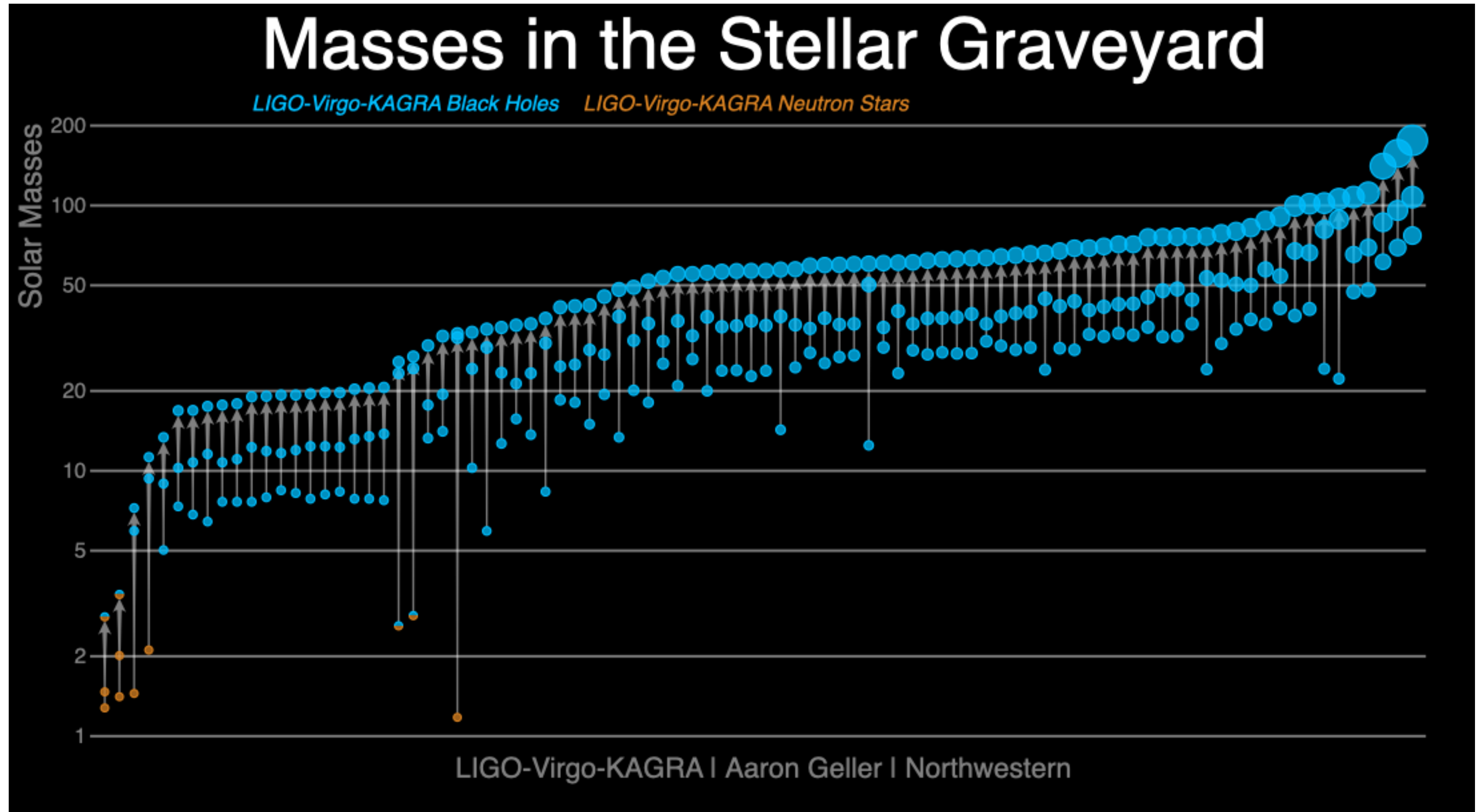
連星の質量を M_1, M_2 としたときの、チャープ質量 $M_c = (M_1 M_2)^{3/5} / (M_1 + M_2)^{1/5}$, 質量比 (中央値の比) M_2/M_1 , 有効スピン χ_{eff} , 最終的に形成された BH の質量 M_{final} (NS を含む場合は全質量 $M_{\text{全}} = M_1 + M_2$), 距離, 波源特定精度 (平方度) $(\Delta\theta)^2$, シグナル・ノイズ比 (SNR) を示す。幅のある量は 90% の信頼区間。(種類ごとに日付順。BBH については, GW190521 と SNR が 17.3 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	$28.6^{+1.7}_{-1.5}$	0.86	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.4}_{-3.0}$	440^{+150}_{-170}	250	26
GW170814	$24.1^{+1.4}_{-1.1}$	0.82	$0.07^{+0.12}_{-0.12}$	$53.2^{+3.2}_{-2.4}$	600^{+150}_{-220}	92	17.7
GW190412	$13.3^{+0.5}_{-0.5}$	0.32	$0.21^{+0.12}_{-0.13}$	$35.6^{+4.8}_{-4.5}$	720^{+240}_{-220}	240	19.8
GW190521	$63.3^{+19.6}_{-14.6}$	0.58	$-0.14^{+0.5}_{-0.45}$	$147.4^{+40.0}_{-16.0}$	3310^{+2790}_{-1800}	1000	14.3
GW190521.074359	$32.8^{+3.2}_{-2.8}$	0.77	$0.1^{+0.13}_{-0.13}$	$72.6^{+6.5}_{-5.4}$	1080^{+580}_{-530}	470	25.9
GW190814	$6.11^{+0.06}_{-0.05}$	0.11	$0^{+0.07}_{-0.07}$	$25.7^{+1.3}_{-1.3}$	230^{+40}_{-50}	22	25.3
GW191109.010717	$47.5^{+9.6}_{-7.5}$	0.72	$0\text{--}29^{+0.42}_{-0.31}$	$107^{+18.0}_{-15.0}$	1290^{+1130}_{-650}	1600	17.3
GW191204.171526	$8.56^{+0.41}_{-0.28}$	0.72	$0.16^{+0.08}_{-0.05}$	$19.18^{+1.71}_{-0.93}$	640^{+200}_{-260}	350	17.4
GW191216.213338	$8.33^{+0.22}_{-0.19}$	0.64	$0.11^{+0.13}_{-0.06}$	$18.87^{+2.81}_{-0.93}$	340^{+120}_{-130}	490	18.6
GW200112.155838	$27.4^{+2.6}_{-2.1}$	0.79	$0.06^{+0.15}_{-0.15}$	$60.8^{+5.3}_{-4.3}$	1250^{+430}_{-460}	4300	19.8
GW200129.065458	$27.2^{+2.1}_{-2.3}$	0.84	$0.11^{+0.11}_{-0.16}$	$60.2^{+4.1}_{-3.2}$	890^{+260}_{-370}	130	26.8
GW200224.222234	$31.1^{+3.3}_{-2.7}$	0.82	$0.1^{+0.13}_{-0.16}$	$68.7^{+3.7}_{-4.8}$	1710^{+500}_{-650}	50.0	20
GW200311.115853	$26.6^{+2.4}_{-2.0}$	0.81	$-0.02^{+0.16}_{-0.2}$	$59^{+4.8}_{-3.9}$	1170^{+280}_{-400}	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	$0^{+0.02}_{-0.01}$	–	$40^{+7.0}_{-15.0}$	16	33
GW190425	$1.44^{+0.02}_{-0.02}$	0.62	$0.07^{+0.07}_{-0.05}$	$3.4^{+0.3}_{-0.1}$	150^{+80}_{-60}	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	$-0.08^{+0.21}_{-0.43}$	$11.8^{+3.0}_{-2.8}$	720^{+300}_{-310}	2100	8.3
GW200115.042309	$2.43^{+0.05}_{-0.07}$	0.24	$-0.15^{+0.23}_{-0.42}$	$7.4^{+1.7}_{-1.7}$	290^{+150}_{-109}	370	11.3
GW230529-181500	$1.94^{+0.04}_{-0.04}$	0.39	$-0.1^{+0.12}_{-0.17}$	$5.1^{+0.6}_{-0.6}$	201^{+102}_{-96}	–	11.6

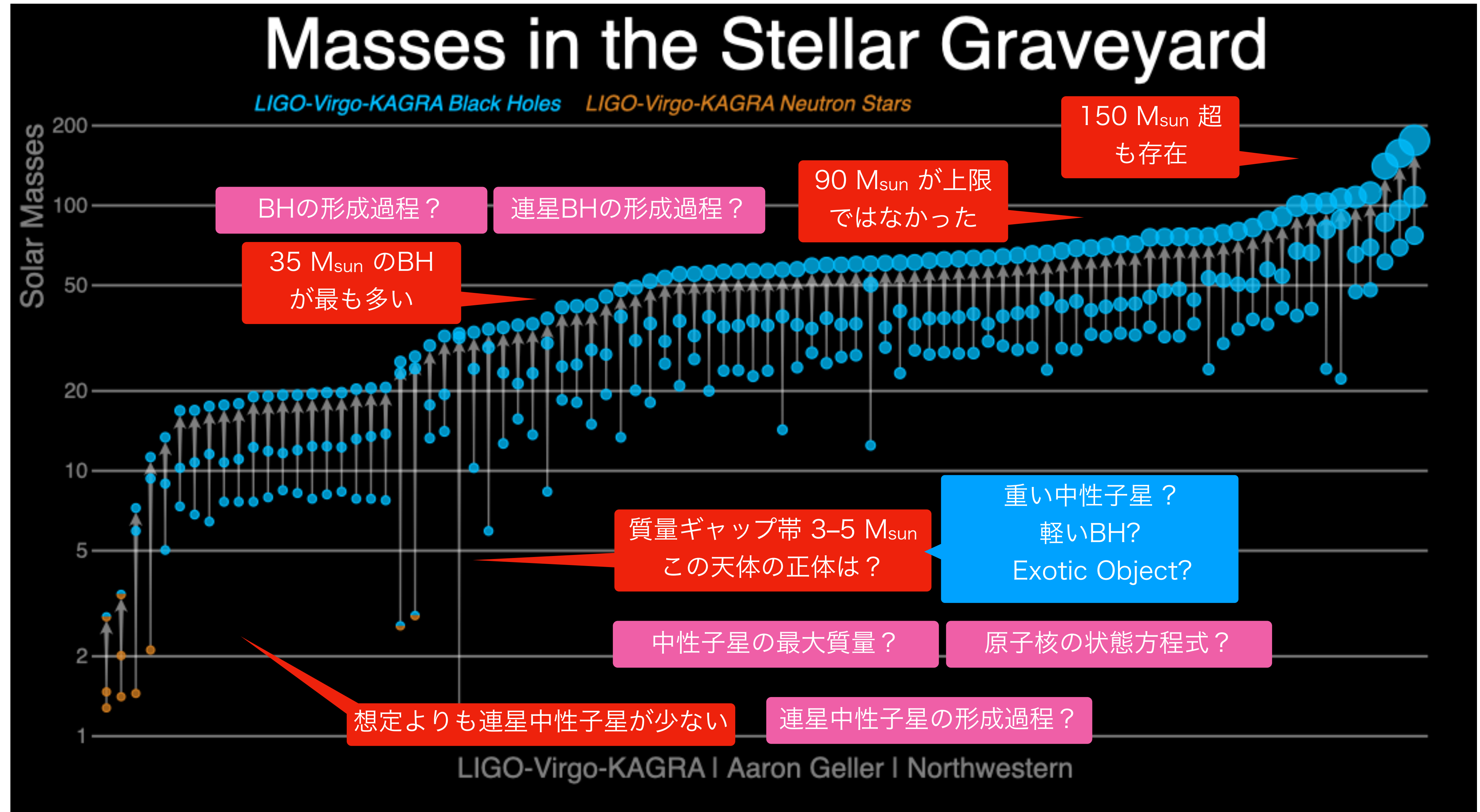
得られた科学的成果 連星系については、その合体頻度について、BBH は赤方偏移 $z = 0.2$ 付近において $17.9\text{--}44/\text{Gpc}^3/\text{yr}$, BNS は $10\text{--}1700/\text{Gpc}^3/\text{yr}$, NSBH は $7.8\text{--}140/\text{Gpc}^3/\text{yr}$ と見積もられている。このほか、背景重力波に対して、宇宙膨張率に対して重力波のエネルギーが寄与する割合として (平坦なエネルギースペクトルを仮定した上で) $\Omega_{\text{GW}} < 6.0 \times 10^{-8}$ 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。

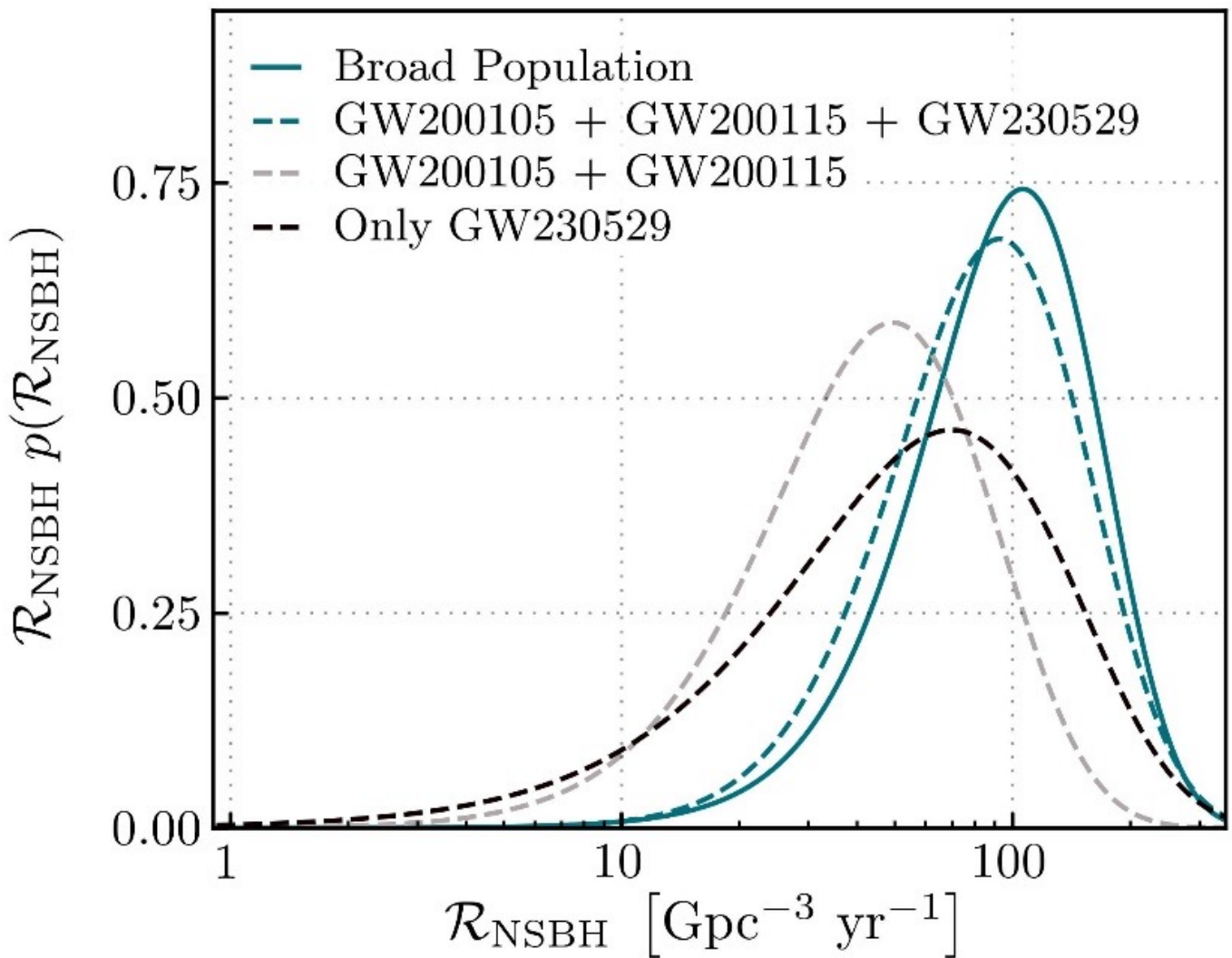
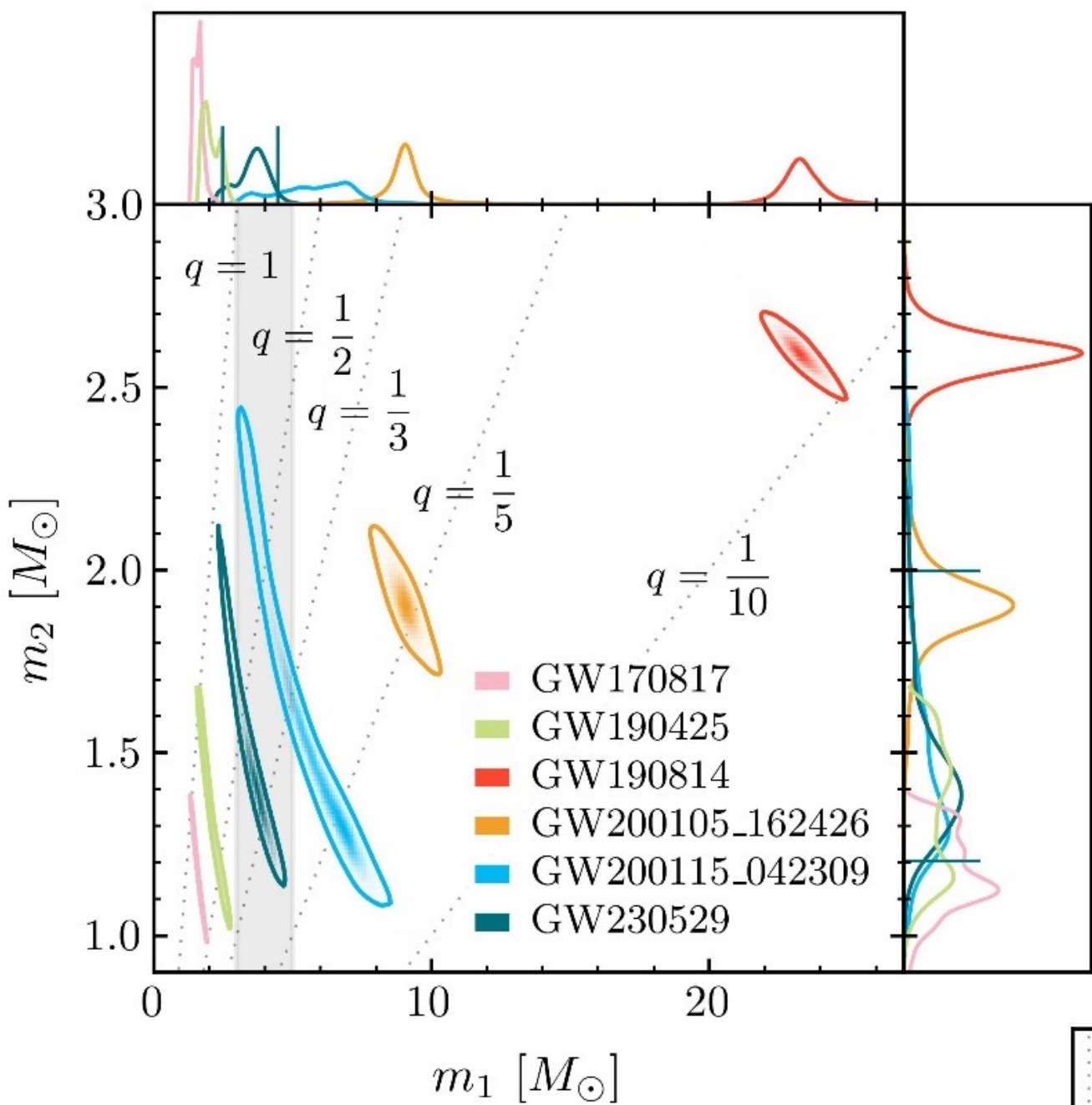
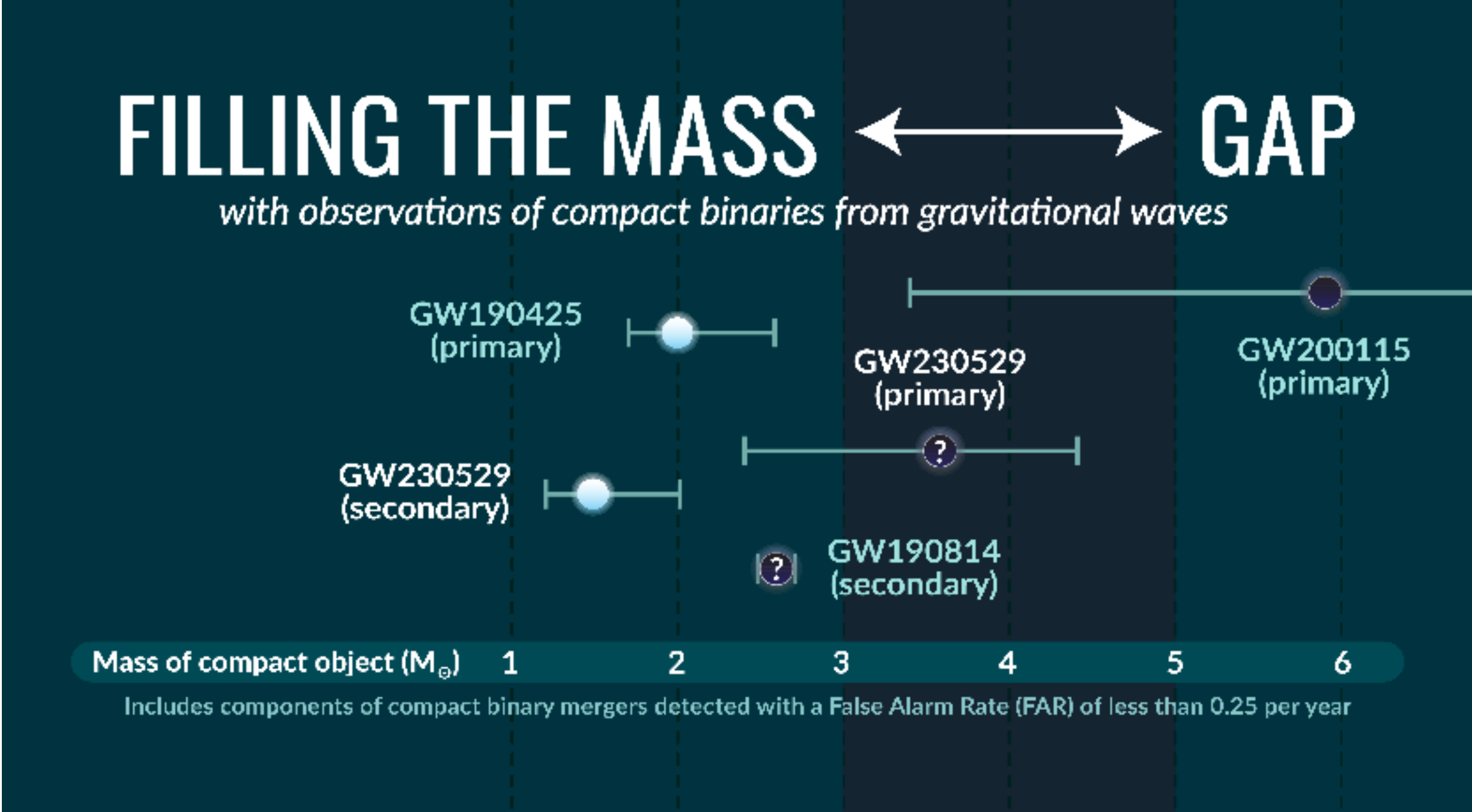




この現状をどう説明する？



GW230529: 中性子星と未知なるコンパクト天体の合体の観測



[ApJL 970, L34 \(2024\)](#)

Abstract

We report the observation of a coalescing compact binary with component masses $2.5\text{--}4.5 M_\odot$ and $1.2\text{--}2.0 M_\odot$ (all measurements quoted at the 90% credible level). The gravitational-wave signal GW230529_181500 was observed during the fourth observing run of the LIGO–Virgo–KAGRA detector network on 2023 May 29 by the LIGO Livingston observatory. The primary component of the source has a mass less than $5 M_\odot$ at 99% credibility. We cannot definitively determine from gravitational-wave data alone whether either component of the source is a neutron star or a black hole. However, given existing estimates of the maximum neutron star mass, we find the most probable interpretation of the source to be the coalescence of a neutron star with a black hole that has a mass between the most massive neutron stars and the least massive black holes observed in the Galaxy. We provisionally estimate a merger rate density of $55^{+127}_{-47} \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ for compact binary coalescences with properties similar to the source of GW230529_181500; assuming that the source is a neutron star–black hole merger, GW230529_181500-like sources may make up the majority of neutron star–black hole coalescences. The discovery of this system implies an increase in the expected rate of neutron star–black hole mergers with electromagnetic counterparts and provides further evidence for compact objects existing within the purported lower mass gap.

Science Summary (LVK プロジェクトの発表論文を一般向けに解説したもの, 日本語の解説もあります)

<http://ligo.org/science-summaries/>

Science Summaries – LSC – L

×

+

←

→

↺

🏠

🔒 保護されていない通信

ligo.org/science-summaries/

🔍

🌟

👤

⋮

🍱

👤 クラス

🌐 Hisaaki Shinkai Ho...

LSC

LIGO Scientific Collaboration

Science ▾

News

Resources ▾

Collaboration ▾

📘

📺

📷

🔗

🔍

Science Summaries

For each of our new research articles, we feature a summary of the paper's key points written for the general public. Simply click on any of the '[PDF]' links for a downloadable file in PDF format. Translations into several languages are also available for some of these summaries. Most recent papers, and their summaries, are written together by the LIGO Scientific Collaboration (LSC), the Virgo Collaboration and the KAGRA Collaboration, forming the LVK collaboration.

Translations are a volunteer effort and different sets of languages are available for each summary. For most summaries, we list any available translations by their [ISO 639-1 / ISO 639-2](#) keys, as listed [here](#).

Jump to:

[2025](#) | [2024](#) | [2023](#) | [2022](#) | [2021](#) | [2020](#) | [2019](#) | [2018](#) | [2017](#) | [2016](#) | [2015](#) | [2014](#) | [2013](#) | [2012](#) | [2011](#)

2025

▶

No continuous gravitational waves from 45 known pulsars in O4a data

この▶をクリックすると、各国語翻訳版へ辿り着ける

Translations

You can search for the key of your language, in square brackets – for instance [fr] for French – on this page to find all science summaries that have been translated into it.

• [bla]: Blackfoot

• [bn]: Bengali (Bangla / বাংলা)

• [ca]: Catalan (Català)

• [de]: German (Deutsch)

• [el]: Greek (Ellinika / Ελληνικά)

• [es]: Spanish (Español / Castellano)

• [fr]: French (Français)

• [gl]: Galician (Galego)

• [he]: Hebrew (Ivrit / עברית)

• [hi]: Hindi (मानक हिन्दी)

• [hu]: Hungarian (Magyar)

LSC

LIGO Scientific Collaboration

Science ▾

News

Resources ▾

Collaboration ▾

📘

📺

📷

🔗

🔍

VIRGO

KAGRA

LIGO-Virgo-KAGRA Science Summary (2025 年 2 月 15 日)

<https://www.ligo.org/science/outreach.php>

O4a 期の観測：45 個の既知のパルサーからの連続重力波は観測されず

LIGO-Virgo-KAGRA コラボレーション（以下、LVK 共同研究チーム）は、中性子星からの極めて微弱な連続重力波 (continuous gravitational waves) の新たな探索結果を発表しました。2023 年 5 月から行われている第 4 期観測の初期 (2024 年 1 月まで) の期間 (O4a) のデータに対するこの探索は、ブラックホールの合体などの劇的なイベントではなく、安定し、孤立した物体から放出される重力波を捉えるという研究に、新たな一歩を踏み出したことになります。連続重力波は微弱で安定したほぼ周期的な信号であり、ブラックホールを除けば宇宙で最も密度の高い物体である中性子星の内部について教えてくれるかもしれません。

なぜパルサーを扱うのか？

パルサーは 連続重力波探索にとって特に興味深いターゲットです。パルサーは強力な磁場を持つ中性子星で、さまざまな周波数帯域（電波、X 線、ガンマ線）にわたる電磁波のビームを放射します。パルサーが回転すると、これらのビームは宇宙の灯台のように空間を照らし、地球方向を向くたびにパルスを地球に届けます。複数の天文台によるパルサーの電磁気観測により、パルサーの天球面上の位置、自転速度、およびその時間的変化に関する正確な情報が得られます。この情報により、パルサーは連続重力波探索の主要候補となります。連続重力波が出現する可能性のある周波数範囲に正確に焦点を合わせることができるためです。今回の探索では、LVK 共同研究チームは 45 個の既知のパルサー（図 2 を参照）に焦点を当て、それらから発せられる微弱な連続重力波を探しました。研究チームは、2 つの異なる理論放射モデルを検討しました。自転周波数の 2 倍での連続重力波放射モデル（単一高調波モデル）と、スピン周波数の 1 倍と 2 倍の両方での 連続重力波放射（二重高調波放射モデル）モデルです。

図 1: X 線と可視光線領域で見える「かに星雲」(Crab Nebula)。写真の中央がかに星雲。Image credit: X-ray : NASA/CXO/ASU/J. Hester et al.; optical : NASA/HST/ASU/J. Hester et al.

連続重力波とは？ その重要性とは？

重力波は、巨大な物体が加速度運動することによって引き起こされる時空のさざ波です。これまでに、LVK 共同研究チームは、ほぼ 100 の重力波信号の検出を発表していますが、それらのほとんどは連星ブラックホールの合体からのものです。しかし、これらの爆発的な現象とは異なり、連続重力波は個々の中性子星が小さな「欠陥」を持つことから発生すると考えられています。中性子星は、超新星として爆発した巨大な星の残骸です。爆発後に残された非常に高密度のコアであり、直径わずか 20 キロメートルの球体に、太陽よりも重い質量を詰

図 2: 今回解析したパルサーの天球面上の位置。

どのよう探索をしたのか。

LVK 共同研究チームは、重力波の探索に世界で最も感度の高い観測装置を使用しています。その装置とは、高度で精密

1

94

観測史上最大質量の連星ブラックホール合体を論文発表



LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、これまでの観測で最大質量となる連星ブラックホール合体からの重力波観測を報告しました。上図は、プレスリリースに使われたものです。 https://ligo.org/wp-content/uploads/2025/07/GW231123_Japanese.pdf

観測史上最大質量の連星ブラックホール合体を論文発表

https://ligo.org/wp-content/uploads/2025/07/GW231123_Japanese.pdf



GW231123: 重力波で観測された 観測史上最大質量の連星ブラックホール合体

重力波 GW231123 は 2023 年 11 月 23 日 13:54:30 UTC（世界標準時）に LIGO-Virgo-KAGRA (LVK、ライゴ・ヴィルゴ・かぐら) 共同研究グループによって観測され、LVK が観測した重力波としては観測史上最大の総質量をもつ連星ブラックホールの合体から生じたと考えられます。これらのブラックホールは非常に速く自転しており、また、各ブラックホールの質量は大質量星の進化過程についての既存の理論に疑問を投げかけるものです。

重力波信号の観測

この重力波は第 4 期重力波観測運転の第 1 部 (O4a) 中にワシントン州ハンフォードとルイジアナ州リヴィングストンにある LIGO の 2 つの検出器によって観測されました。信号が 2 台の検出器で一貫して検出されたことが、この重力波観測を確実なものとなりました。図 1 に示すように、この重力波信号は 0.1 秒ほどの長さでしたが、検出器の通常の雑音分布に比べて **20 倍ほどの強さ**でした。この信号が観測データの大部分を占める雑音でないことを示すため、私たちは統計的な解析を注意深く行いました。数千年の長さに相当する擬似データのシミュレーションなどの手法を用いることで、雑音 **が GW231123 のような重力波信号を生じさせることは 10,000 年に一度より少ない**ことがわかりました。このことは重力波信号が天体由来であること、すなわち重力波源から生じたものであることを強く確証づけます。

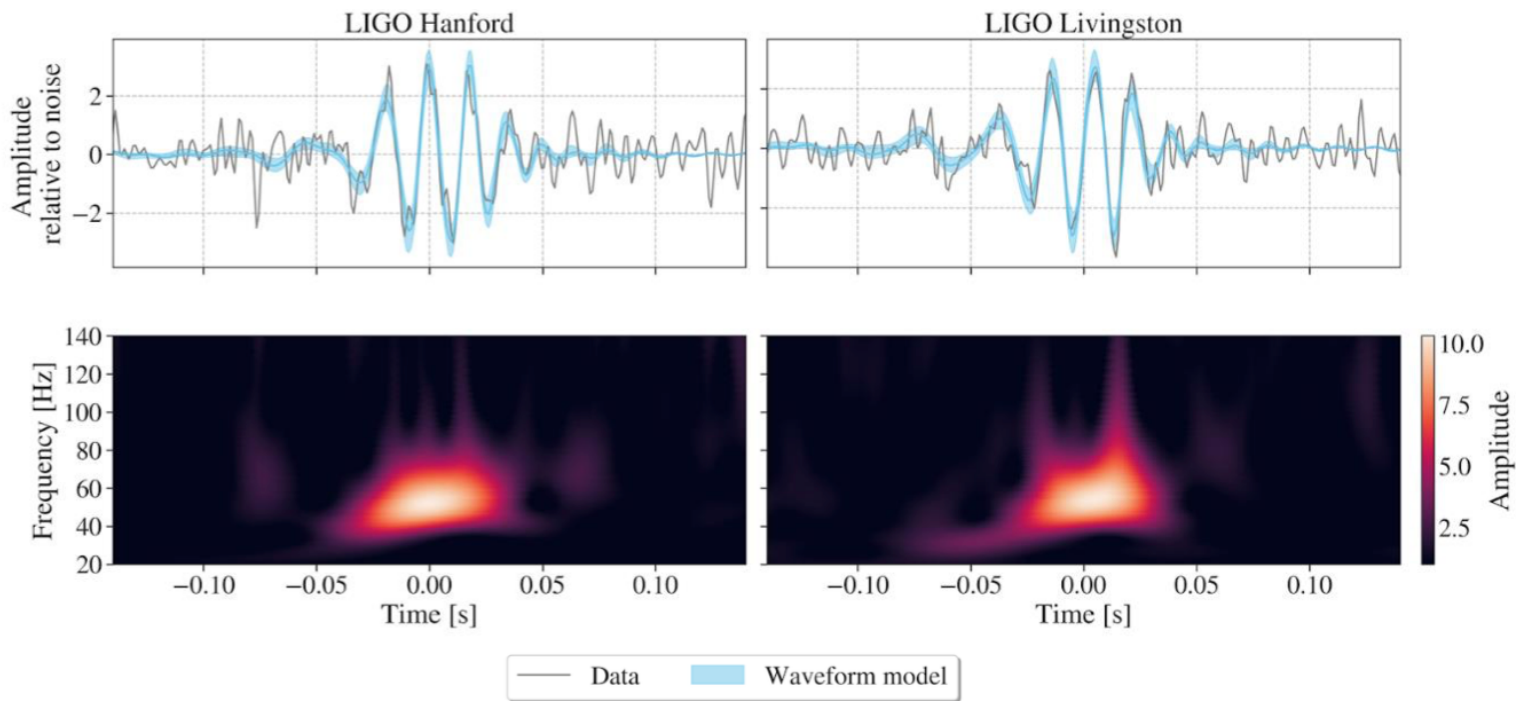


図 1: LIGO ハンフォード (左図) と LIGO リヴィングストン (右図) で観測された GW231123 の重力波信号のデータ。上図は時間に沿った観測データの振幅をグレーで、波形モデルによって得られる重力波信号の予想値を水色で表す。下図は重力波信号の振幅の時間（横軸）と周波数（縦軸）変化を表す。明るい色はより強い重力波信号を表す。

重力波信号の波源

重力波信号が 2 つのブラックホールの合体によって生じた可能性が高いことが観測データからわかります。合体前の 2 つのブラックホールの質量や自転を理解するために、私たちはアインシュタインの一般相対性理論に基づく複数のモデルを使い、さまざまなブラックホールの対のシミュレーションを行いました。観測データとシミュレーション結果を比較することで、合体前のブラックホールがそれぞれ太陽質量の約 137 倍と約 103 倍であることが判明しました。あらゆる不確定性を考慮した結果、連星の総質量が太陽質量の約 190～265 倍であり、これまで観測された連星ブラックホールの合体で最大の総質量であった GW190521 よりも大きな質量であることがわかりました。さらに興味深いことに、2 つのブラックホールそれぞれが理論上の最大自転速度に近い値で自転していたのです。したがって、**GW231123 はこれまでに高い信頼度で観測されてきた重力波信号の中でも、最大総質量のみならず、最大自転速度である連星ブラックホールを波源とするもののなのです。**

ブラックホールは合体して、太陽質量の約 182～251 倍の残骸ブラックホールを生成しました。合体によってできたブラックホールの質量は中間質量ブラックホールと呼ばれる珍しい分類に属します。中間質量ブラックホールは恒星の崩

壊から生成されるブラックホールよりも重く、銀河中心にある超巨大ブラックホールよりもずっと軽い質量帯なのです。GW231123 と GW190521 は重力波によって高い信頼度で観測され、その残骸ブラックホールは共にこの興味深い分類に属しています。

なぜこれらの性質が興味深いのか

既存の恒星進化論では、太陽質量の約 60～130 倍のブラックホールは非常に稀、または、存在しないとされています。この「禁じられた」質量領域はブラックホールの質量ギャップと呼ばれ、このギャップは大質量星を引き剥がす特殊な超新星爆発である対不安定型超新星によって、または、崩壊前に自身の質量のうちかなりの部分を放出する脈動性対不安定型超新星によって、よち大きな質量のブラックホールが形成されないことで生じると考えられています。しかし、GW231123 はこの想定に疑問を投げかけます。合体した 2 つのブラックホールのうち軽い方のブラックホールは 83% の確率で、重い方は 26% の確率でこの質量ギャップに属するのです。すなわち、既存の恒星進化論ではこれらのブラックホールの起源を十分に説明することができない可能性があるのです。

興味深い仮定のひとつとして、合体したブラックホールのうちの 1 つまたは両方が過去の連星ブラックホール合体によって生成された、とする多重合体シナリオがあげられます。この仮定は合体前のブラックホールの質量と自転速度が大きいことを説明することができ、さらに、核星団や活動銀河核のような星が密集した環境に存在していたためブラックホール同士の合体が起こりやすかったことが考えられます。このような密度が高い環境ではブラックホールが互いの周りを歪んだ軌道で、すなわち離心率が 0 でない軌道を通ることがあります。その複雑性ゆえ私たちが現在用いるモデルでは連星ブラックホールはほぼ円起動を辿り、重力波を放出しながら軌道が徐々に縮小していくと仮定しています。しかし、軌道の離心率が（特に合体直前で）大きい場合、放出される重力波に影響を及ぼす可能性があるものの、現在のモデルで捉えることができません。GW231123 はこの可能性が残っており、より高度なモデルで調べる必要があります。

GW231123 のような重力波信号を生じる現象としては他にも重力レンズ効果、原始ブラックホール、重力崩壊型超新星、ボゾン星の合体や宇宙ひもなどが挙げられますが、これらは上記で説明されたシナリオより天体物理学の観点から可能性が低いと考えられます。

合体の最終段階

LVK が観測してきた（この要約が書かれた時点では 300 近い）連星ブラックホール合体のほとんどにおいて、検出器は重力波信号の最初のインスパイラル部分（ブラックホールが合体前に互いの周りを周回する段階）での感度が最も高くなっていました。しかし、GW231123 はその大質量ゆえに、合体とリングダウン段階の観測が可能です。このリングダウン段階は生成された残骸ブラックホールが重力波を放出しながら振動し、最終的に安定した状態に落ち着く現象のことで、鳴らされた鐘が徐々に静まる様子に例えられ、「リングダウン」と呼ばれます。

重力波信号の最終段階と一般相対性理論によって予想されるブラックホールのリングダウンを比較することで、理論と観測データが良く一致することが結論づけられました。なお、GW231123 の極端な性質は我々のモデルの限界を試したことで、説明しきれない領域を残し、我々の波形モデルに改善の余地があることを示しました。

結論

数年前、私たちが発表した GW190521 の要約 で「記録は破られるためにある」と締めくくり、GW231123 はまさにそれを成し遂げました。質量ギャップに属する可能性と理論上の限界に近い自転速度をもつこの重力波源は特殊だけでなく謎も残しました。今回の発見は既存の恒星進化論を超えたブラックホール生成シナリオを探索する必要性と波形モデルの限界を私たちに示しました。私たちが重力波を通して宇宙に耳を澄まし続ける中で、GW231123 は宇宙がまだ多くの驚きと謎を用意してくれていることを示しています。私たちはそれらを明らかにし始めたばかりなのです。

さらに情報を得るには

LIGO のウェブサイト：<http://ligo.org/>
VIRGO のウェブサイト：<http://www.virgo-gw.eu/>
KAGRA のウェブサイト：<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>



GW231123 の発見についての論文：<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500026/public>
重力波オープンデータサイエンスセンター(GWOSC) で公開されている GW231123 のデータ：
https://www.gw-openscience.org/eventGWapi/html/O4_Discovery_Papers/

日本語訳：左近喜音、真貝寿明

LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、これまでの観測で最大質量となる連星ブラックホール合体からの重力波観測を報告しました。

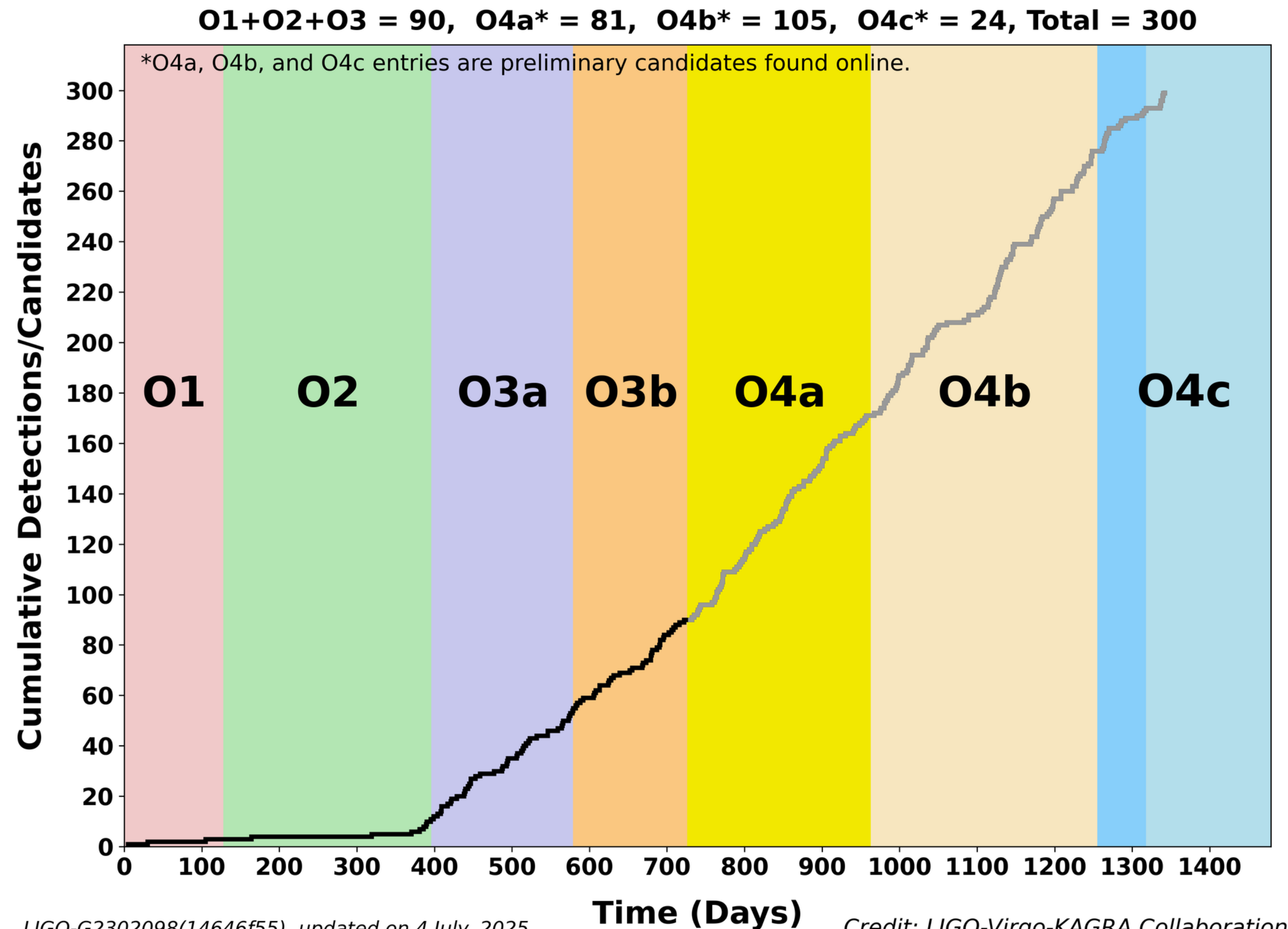
左はLIGOのウェブサイトに掲載された日本語解説です。（16ヶ国語で解説がなされています）

GW231123 日本語解説



2507.08219

300個目の重力波検出を報告



LIGO-G2302098(14646f55), updated on 4 July, 2025

Credit: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration

LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、10年前に初めての重力波観測をして以来、総計300個目の重力波観測を世界中の天文台に通知しました。

300個目の報告は、S250704abという名前で、連星ブラックホール合体の可能性82%、ブラックホールと中性子星の連星合体の可能性18%と速報されました。現在、詳しい解析が続いています。

左図は、観測運転日数を横軸に、累積報告数を縦軸にして表した図で、観測運転期間（第1期をO1、第2期をO2などとする）ごとに観測する頻度が上がっていることがわかります。干渉計の調整をして観測感度を向上させているためです。

<https://gracedb.ligo.org/superevents/S250704ab/view/>

バースト重力波は、まだ見つからず



図 1: 中性子星合体の後に形成された超大質量中性子星の想像図。このような特異な天体は、長時間持続型の重力波バーストを引き起こす可能性があります。Credit: ESO/L. Calçada/M. Kornmesser

LIGO-Virgo-KAGRA研究チームは、連星合体以外の重力波探索（バースト探索）を第4期a観測運転(O4a)のデータに対して行った結果を論文投稿しました。2台以上の干渉計データで同時刻に重力波が観測された可能性のあるデータを精査した結果、未検出という結論になりました。

ただし、重力波の振動数や振幅に対して、これまでの観測にくらべて厳しい制限をつけることができました。

今回の解析には初めて機械学習が導入されました。

日本語解説ページ

O4a LongBurst 日本語解説



2507.12374

O4a ShortBurst 日本語解説



2507.12282

継続時間1秒未満のバースト波源として考えられるもの

- ＊超新星、パルサー・グリッチ（回転速度の変化）

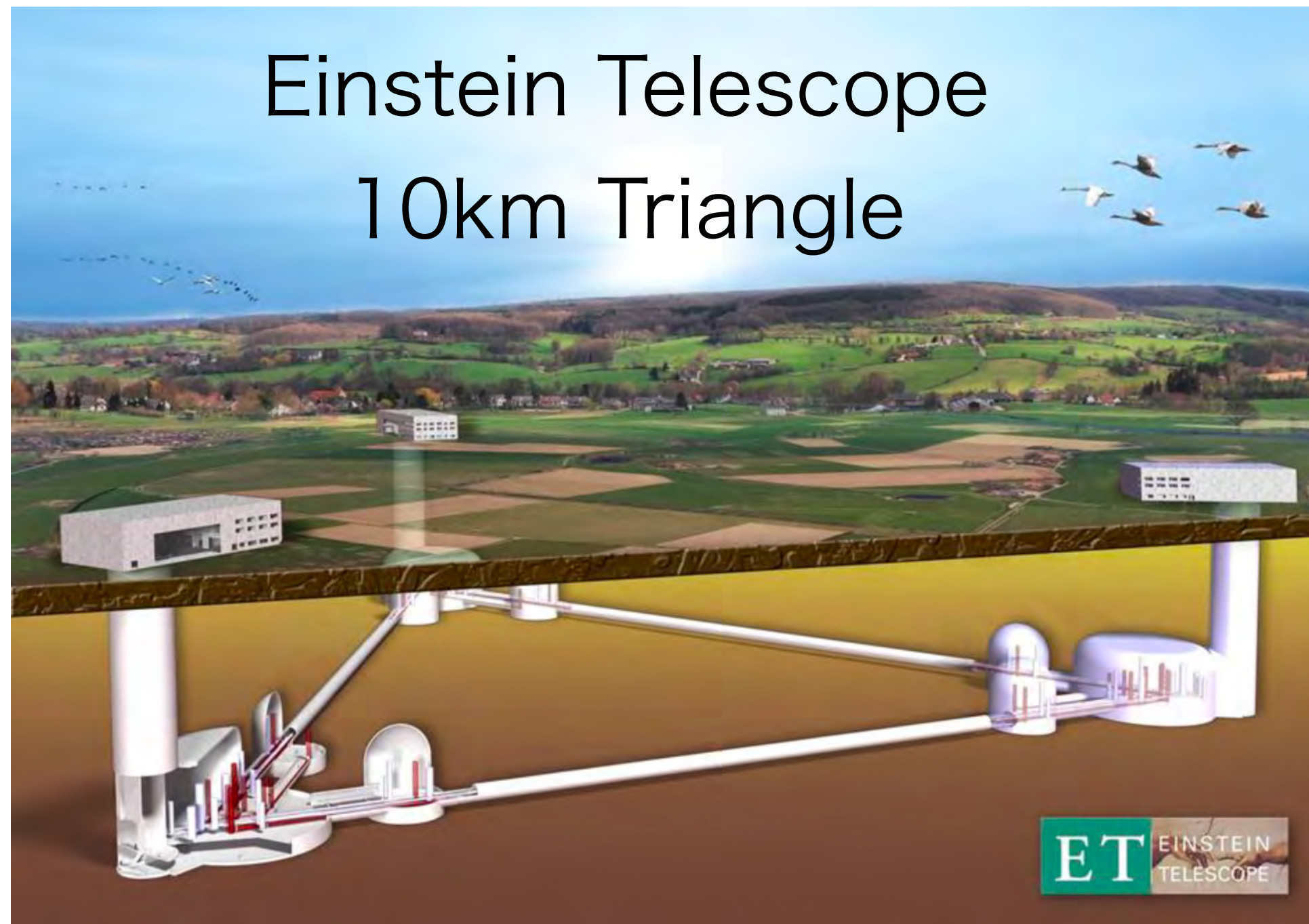
継続時間1秒-100秒のバースト波源として考えられるもの

- ＊誕生直後の中性子星

- ＊ブラックホール周囲の不安定降着円盤

- ＊非常に離心率の高い軌道を周回する中性子星またはブラックホール連星

重力波観測装置(地上)の将来計画



◀ ヨーロッパの計画

予算承認

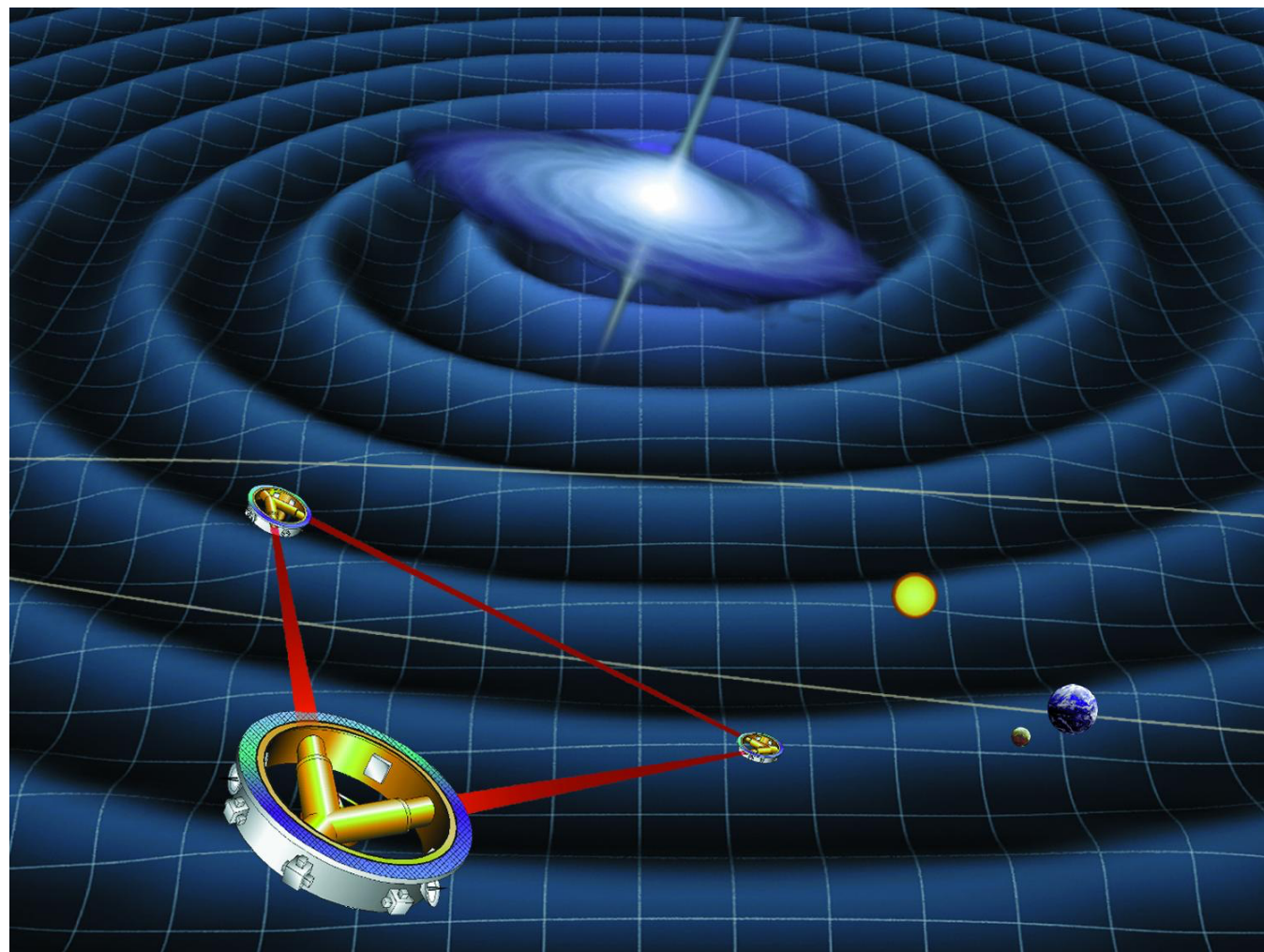
建設地未定(候補地2つ)

アメリカの計画 ▶

予算申請準備



重力波観測装置(宇宙空間)の将来計画



◀ 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

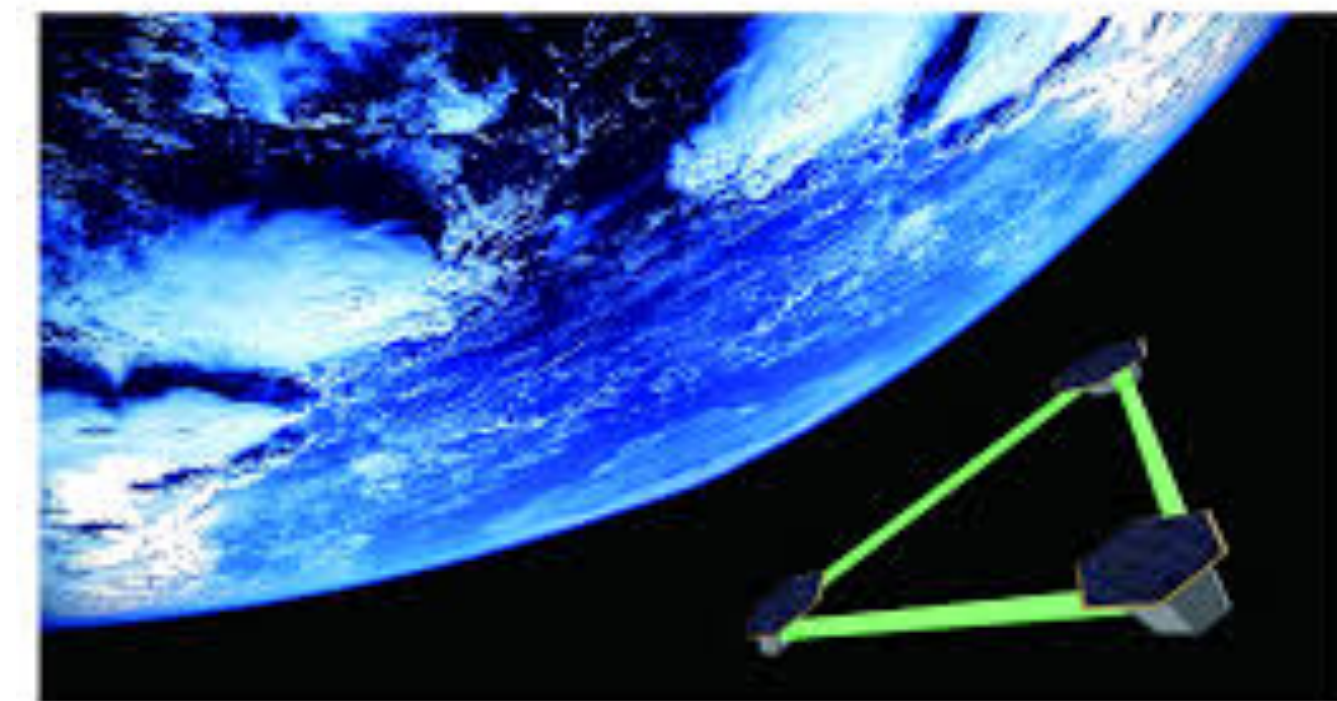
低周波数帯(mHzからHz帯)

日本の計画 ▶

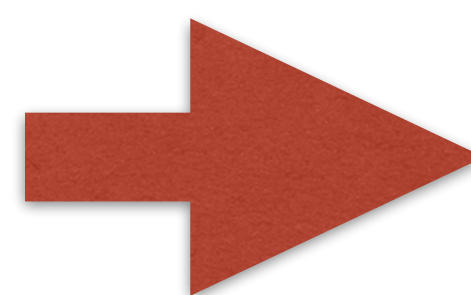
予算申請準備

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



銀河中心の超巨大BH形成過程がわかる
宇宙の膨張速度がわかる

独立成分分析を用いた重力波抽出方法の提案

[arXiv:2503.14179](https://arxiv.org/abs/2503.14179)

Gravitational-wave Extraction using Independent Component Analysis

下村りか, 田部優一, 真貝寿明 (大阪工大情報科学部)

Rika Shimomura, Yuuichi Tabe, Hisaaki Shinkai (OIT)

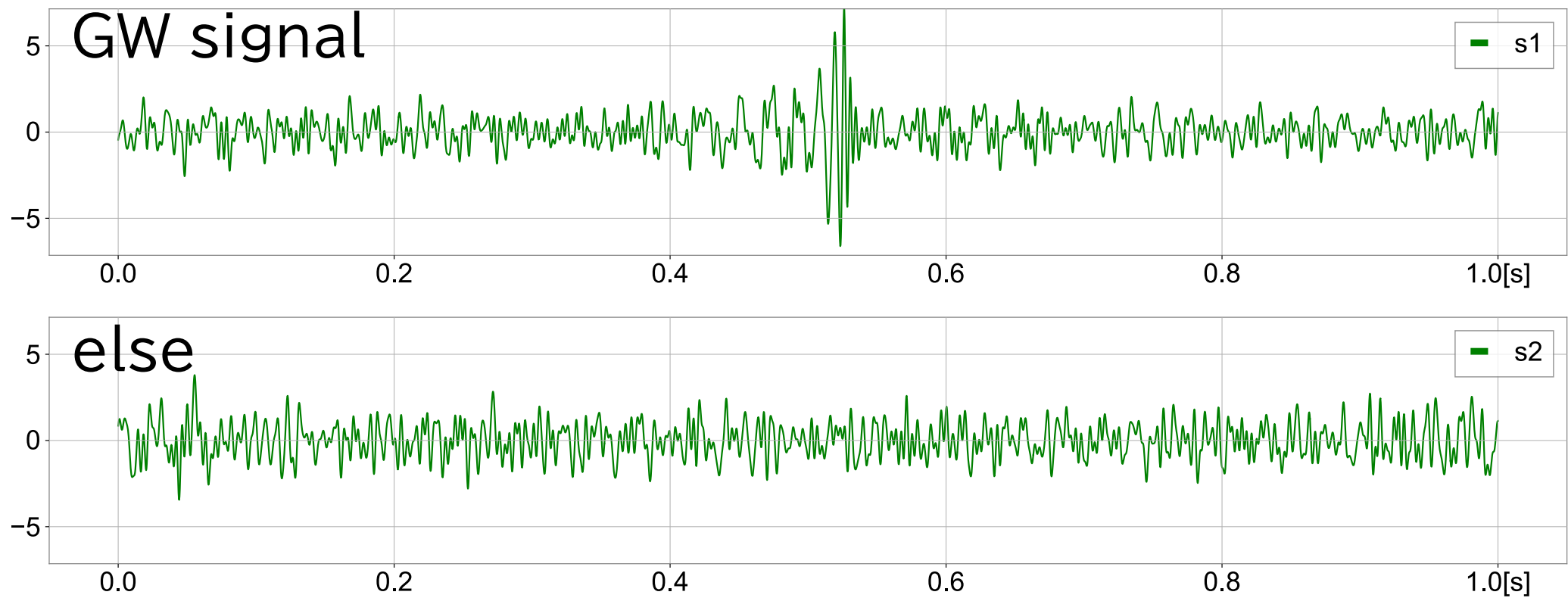
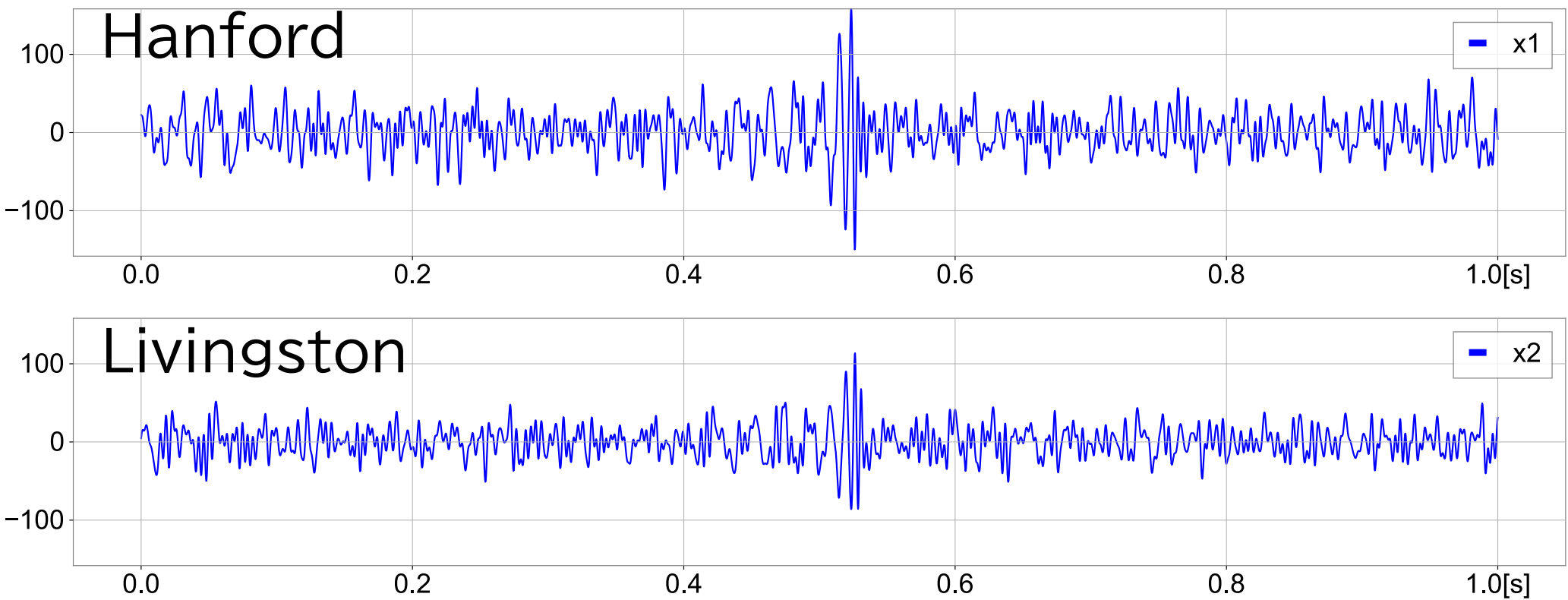
目的

- テンプレートを用いずに、重力波の波形を取り出す新たな手法を提案する
 - 一般相対性理論の検証
 - 未知の重力波の発見

結論

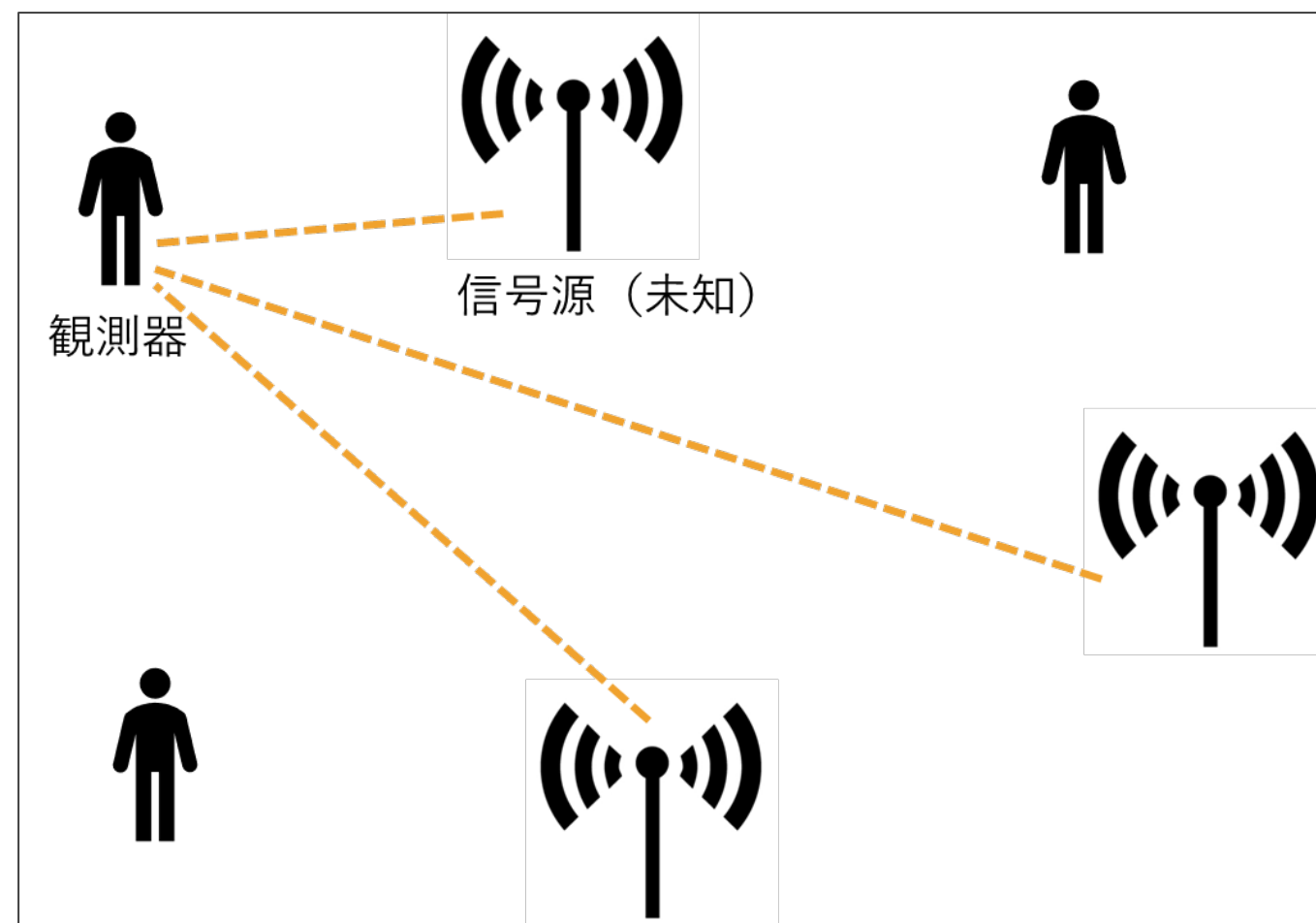
- Injection testにより、干渉計の実ノイズでも、 $\text{SNR} > 15$ で有効
- O3までの実イベント10例以上に応用
 - 波形を抽出でき、 $M_c(1+z)$ も GWTC3と無矛盾
 - 干渉計への重力波到着時刻の誤差を小さくできる例あり

GW150914



探すべき成分が統計的に独立であり、非ガウスのである場合に、多変量のデータから隠された因子や成分を見つけ出す手法

Blind Source Separation(ブラインド信号源分離)



3つの観測信号から、信号源の信号3つを推定する

$$x(t) = As(t)$$

観測データ

係数行列

信号源

$$\tilde{s}(t) = Wx(t)$$

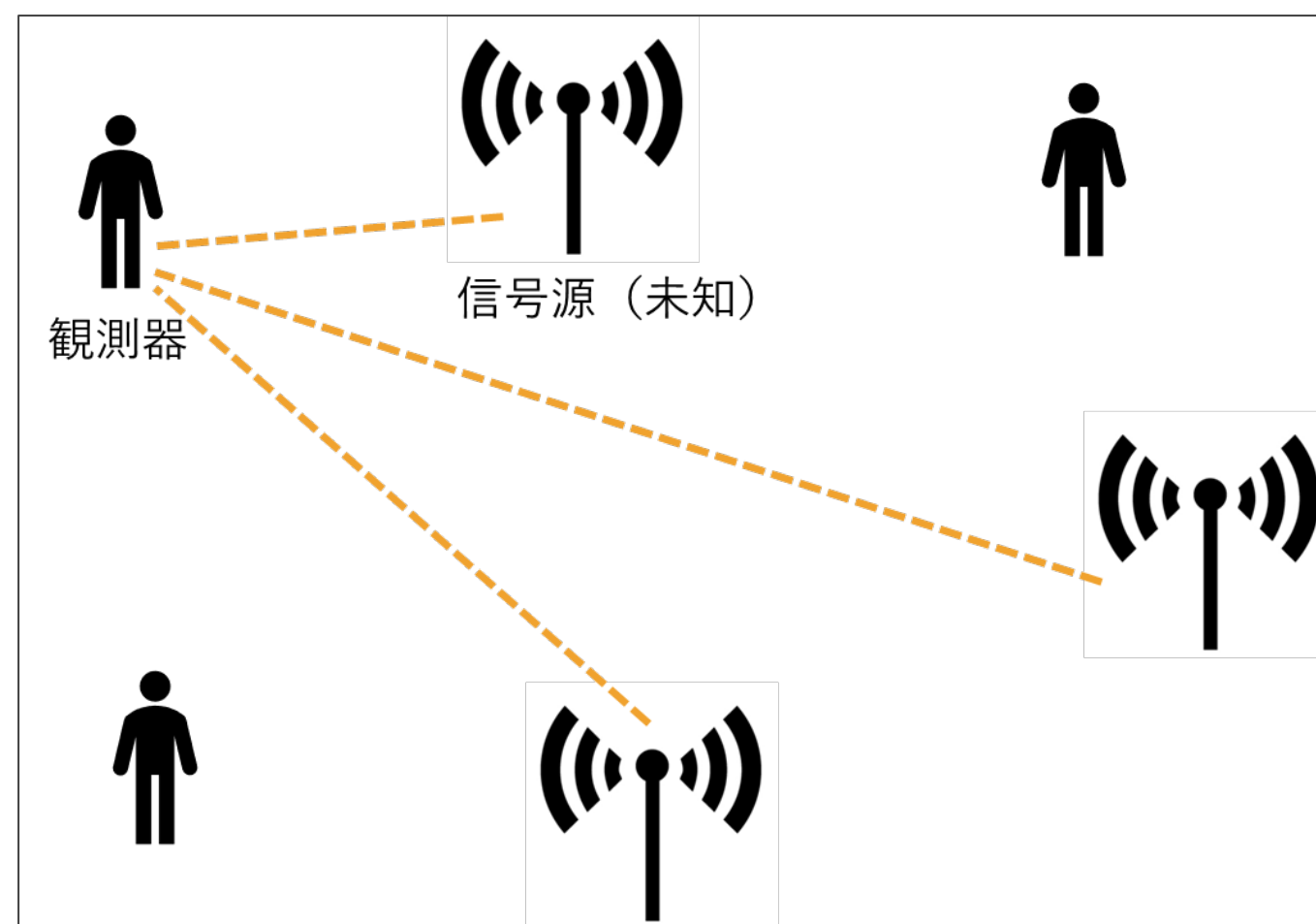
推定された信号

観測データ

この行列を求めたい！

探すべき成分が統計的に独立であり、非ガウスのである場合に、多変量のデータから隠された因子や成分を見つけ出す手法

Blind Source Separation(ブラインド信号源分離)



3つの観測信号から、信号源の信号3つを推定する

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t)$$

観測データ 係数行列 信号源

$$\tilde{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t)$$

推定された信号 観測データ

この行列を求めたい！

統計的に独立 非ガウスの な信号を取り出す
 ... ガウシアンから離れている信号を探す

ホワイトニングしたデータ列 $\mathbf{z}(t)$ にして,

$$s_i(t) = \mathbf{w}_i^T \mathbf{V} \mathbf{x}(t) \equiv \mathbf{w}_i^T \mathbf{z}(t)$$

尖度が最大となるような変換行列 $\mathbf{W}$ を求める

$$\text{kurt}(\mathbf{w}^T \mathbf{z}) = E[(\mathbf{w}^T \mathbf{z})^4] - 3\{E[(\mathbf{w}^T \mathbf{z})^2]\}^2$$

収束するまで繰り返しながら

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{w}_i} |\text{kurt}(\mathbf{w}_i^T \mathbf{z})| = \begin{pmatrix} E[4(\mathbf{w}_i^T \mathbf{z})^3 z_1] \\ E[4(\mathbf{w}_i^T \mathbf{z})^3 z_2] \\ \vdots \end{pmatrix} - 12 \|\mathbf{w}_i\|^2 \begin{pmatrix} w_{11} \\ w_{12} \\ \vdots \end{pmatrix}$$

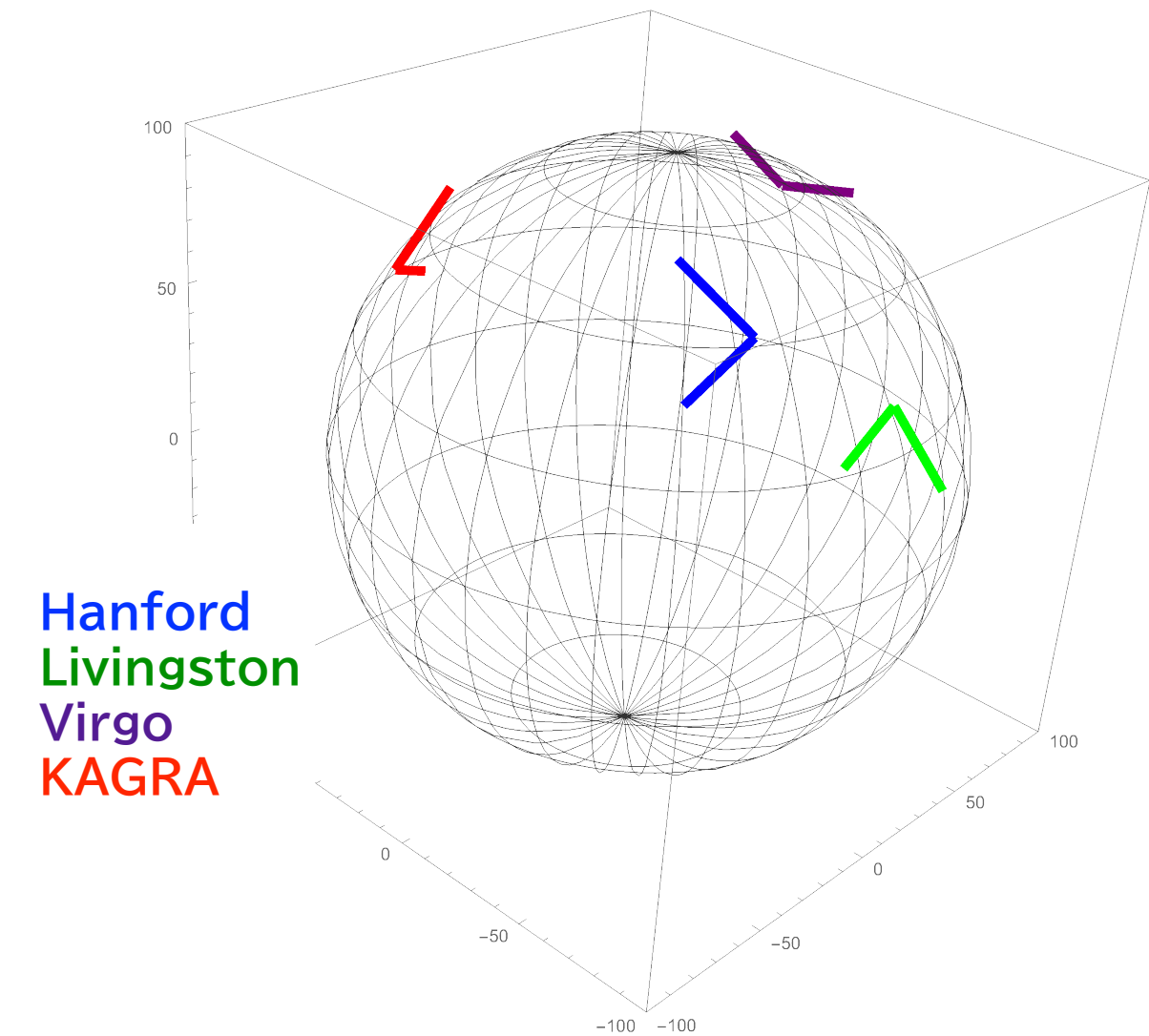
実際には 尖度は、外れ値に引きづられることが多いので、g関数法と呼ばれる $\mathbf{w}_p = E[\mathbf{z}g(\mathbf{w}_p^T \mathbf{z})] - E[g'(\mathbf{w}_p^T \mathbf{z})]\mathbf{w}_p$

where $g(y) = \tanh y$. とする手法を用いる (FastICA法の1つ).

独立成分分析の重力波データ解析への応用

これまでの重力波に関連するreferences

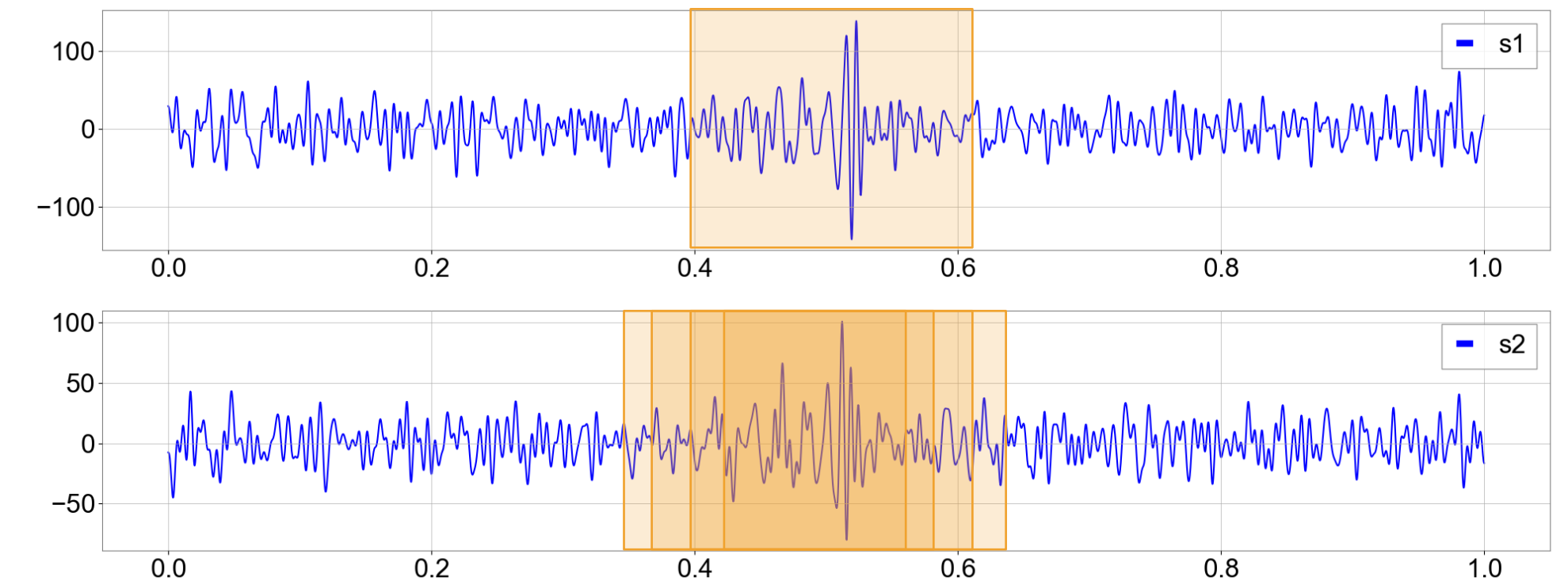
- [1] R. De Rosa, et al., CQG 29, 215008 (2012)
Matched-Filter解析の前処理にICAを用いることで、重力波の検出効率を高められる可能性を干渉計のmock dataで示す
- [2] S. Morisaki, J. Yokoyama, K. Eda, Y. Itoh, J.Comp. Phys. 300, 275 (2016)
非ガウス性ノイズ除去への応用可能性を指摘
- [3] KAGRA Collaboration, CQG 40, 085015 (2023)
iKAGRA観測時(2020)の実データを用いて、地震計などの物理環境チャンネル信号を例に、ICAによるノイズ除去の実例を示す



➤実際の干渉計のデータに対して重力波の抽出を試みた研究はない

論点

実際の干渉計データから重力波を取り出すことができるのか
どこまでのSNRの波を取り出せるのか



特別な工夫 干渉計データの時刻をずらしながら、最もよく信号が抽出できる状況を探す

実データへの応用: GW150914

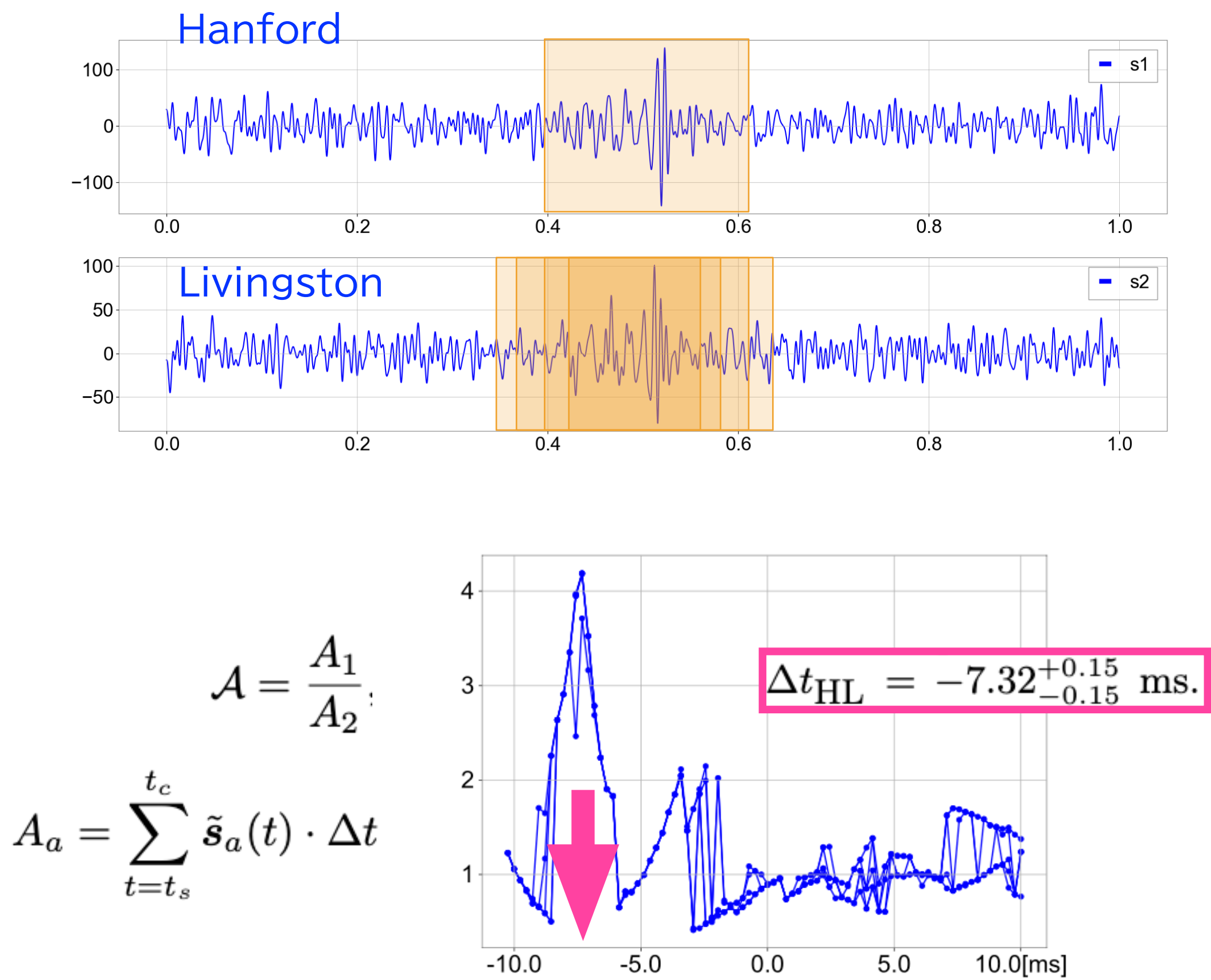
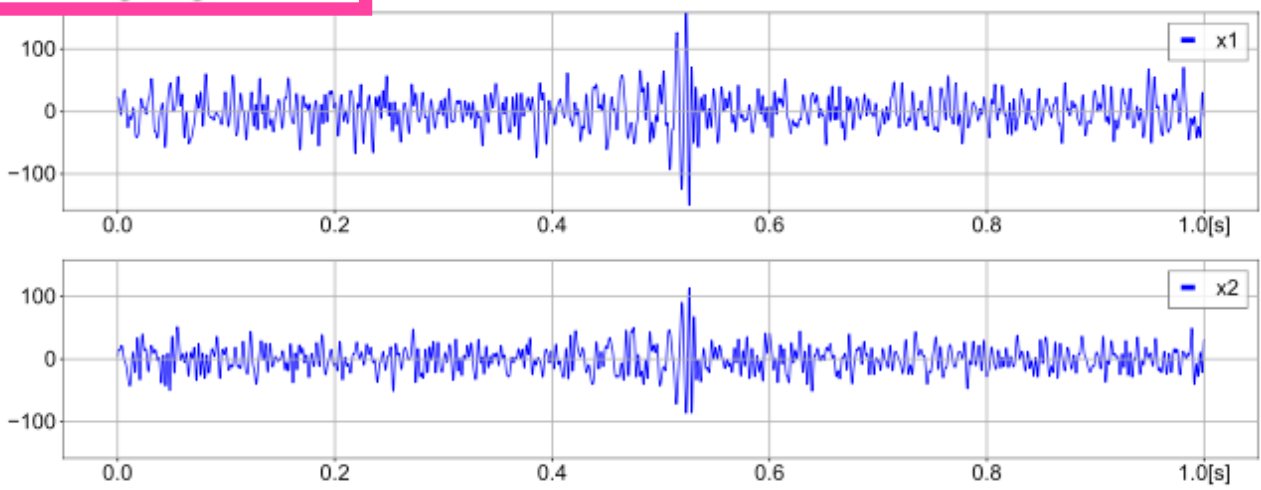


FIG. 5. The strength of the extracted signal, $\mathcal{A}$ [eq. (10)] as a function of Δt_{HL} for the case of GW150914. Five trials of different initial weight matrix are plotted at each Δt_{HL} . We see the maximum is at $\Delta t_{\text{HL}} = -7.32^{+0.15}_{-0.15} \text{ ms.}$ Note that LIGO-Virgo paper [1] shows $\Delta t_{\text{HL}} = 6.9^{+0.5}_{-0.4} \text{ ms.}$

LV論文での値▶ $\Delta t_{\text{HL}} = -6.9^{+0.5}_{-0.4} \text{ ms.}$

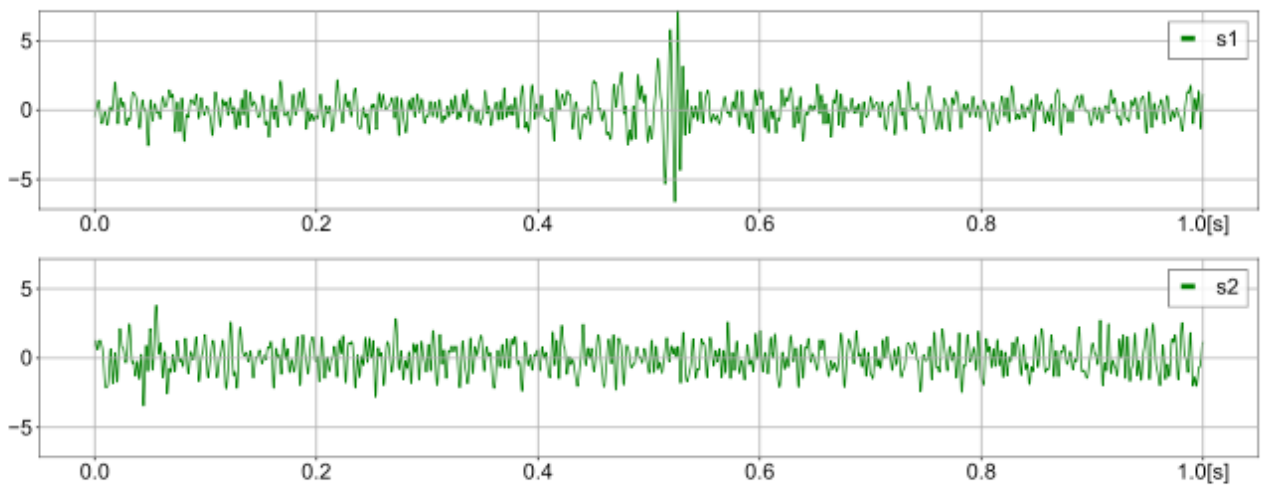
$\Delta t_{\text{HL}} = -7.32^{+0.15}_{-0.15} \text{ ms.}$

input $x(t)$

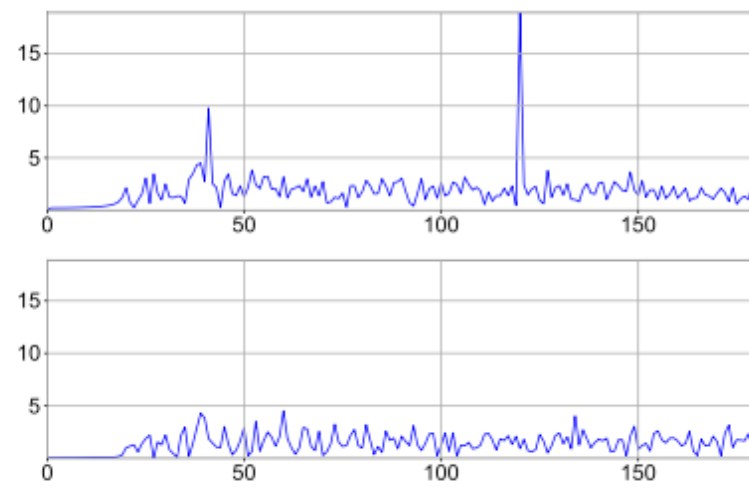


(a) Input signals with $\Delta t_{\text{HL}} = -7.32 \text{ ms.}$ The data $x1$ and $x2$ are of Hanford and Livingston data, respectively.

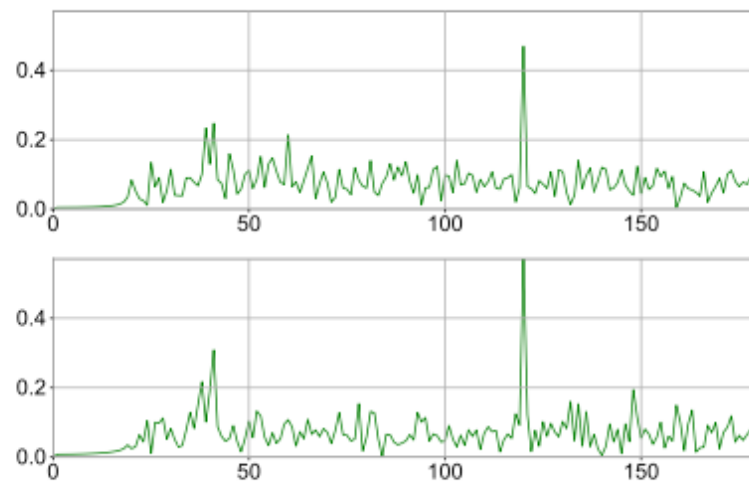
output $s(t)$



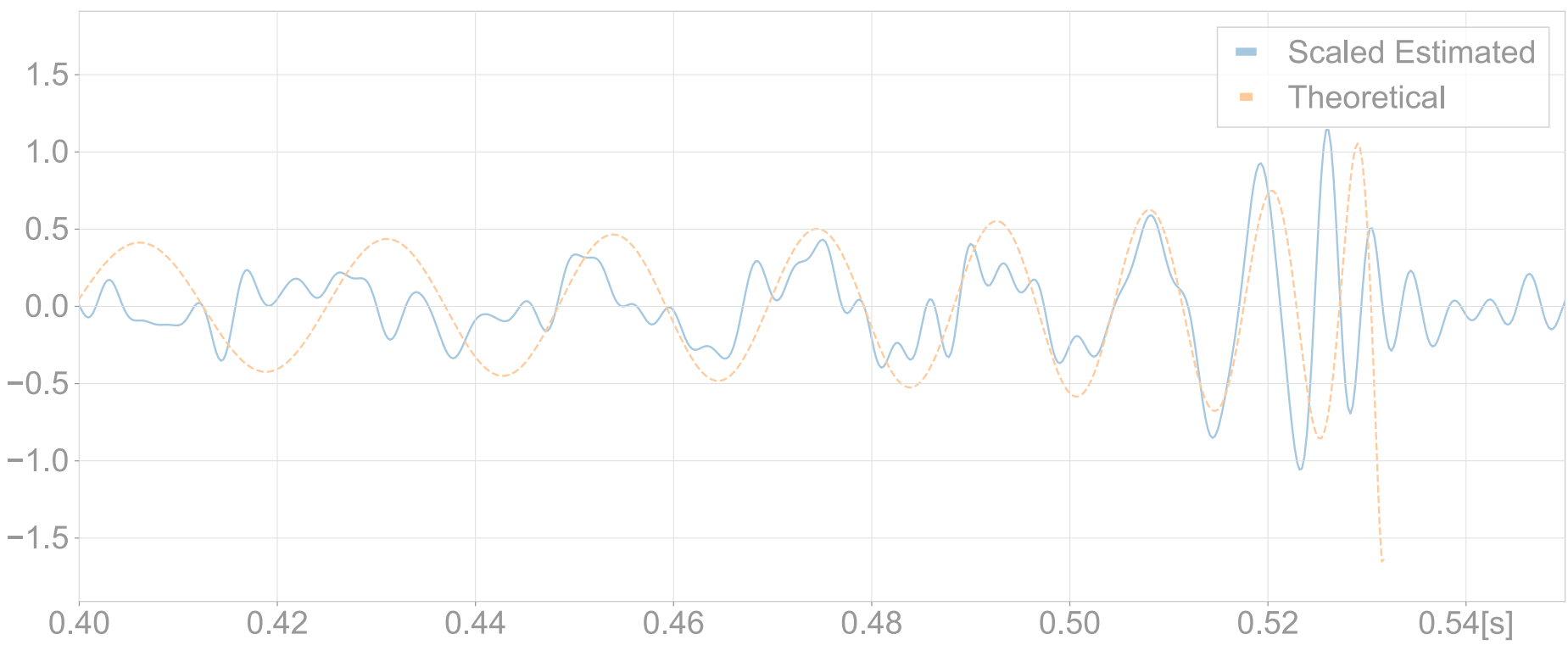
(c) Output of ICA.



(b) Fourier spectrum of (a).



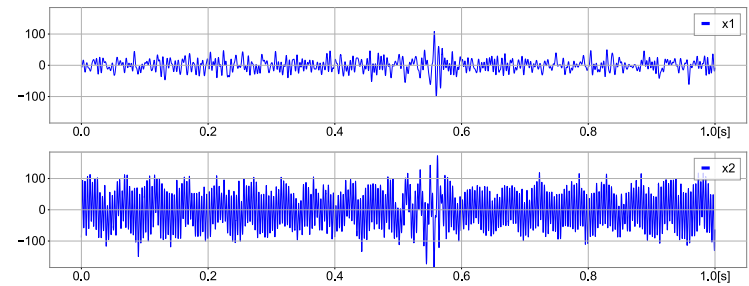
(d) Fourier spectrum of (c).



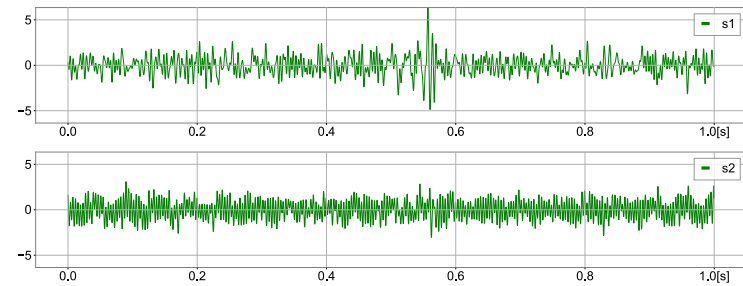
抽出されたGW信号と, inspiral 波形を重ねて, マッチする $M_c(\text{obs})$ を算出
LVK論文で記載されている $M_c(\text{source})$ と, $(1+z)$ のファクターが無矛盾

実データへの応用： O1-O3のBBH イベント 理科学年表に掲載されているSNRの高いものすべて

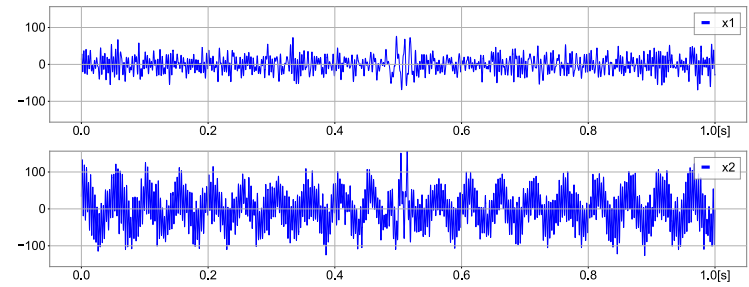
10



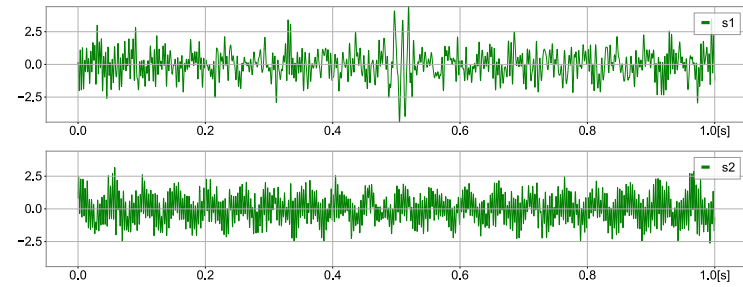
(a1) Input signals of GW190521.074359 with $\Delta t_{\text{HL}} = -6.35$ ms. The data x1 and x2 are of Hanford and Livingston data, respectively.



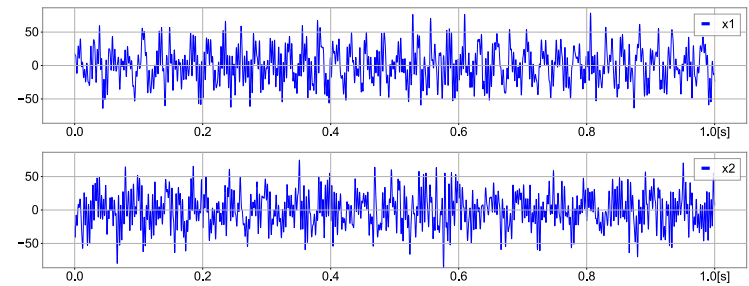
(a2) Output of ICA for GW190521.074359.



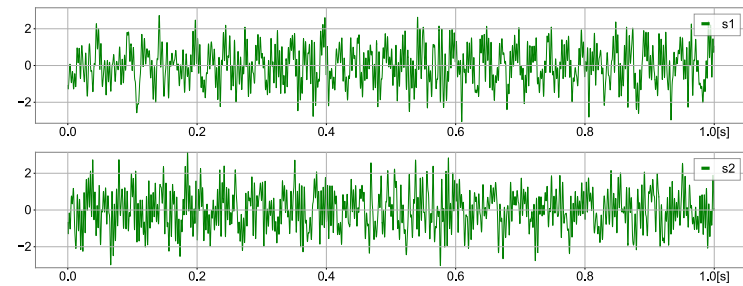
(b1) Input signals of GW191109.010717 with $\Delta t_{\text{HL}} = +3.17$ ms. The data x1 and x2 are of Hanford and Livingston data, respectively.



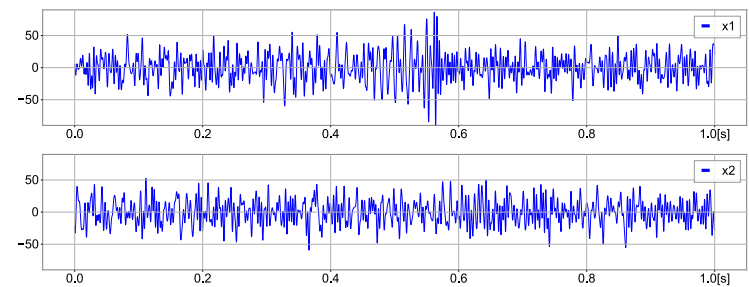
(b2) Output of ICA for GW191109.010717.



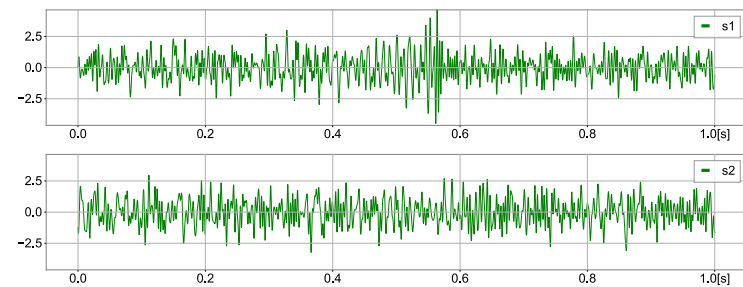
(c1) Input signals of GW191204.171526 with $\Delta t_{\text{HL}} = -2.44$ ms. The data x1 and x2 are of Hanford and Livingston data, respectively.



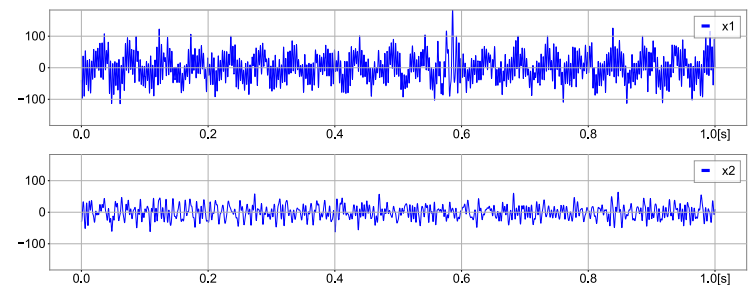
(c2) Output of ICA for GW191204.171526.



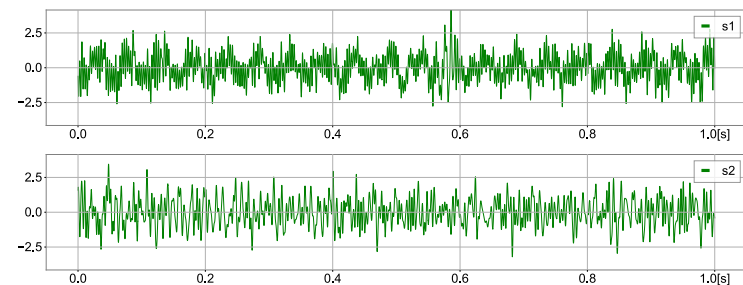
(d1) Input signals of GW191216.213338 with $\Delta t_{\text{HV}} = -11.0$ ms. The data x1 and x2 are of Hanford and Virgo data, respectively.



(d2) Output of ICA for GW191216.213338



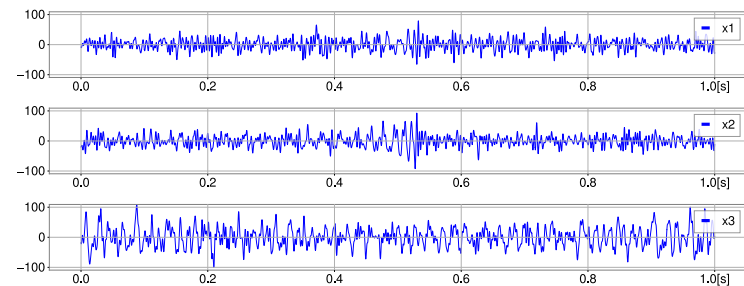
(e1) Input signals of GW200112.155838 with $\Delta t_{\text{LV}} = -23.2$ ms. The data x1 and x2 are of Livingston and Virgo data, respectively.



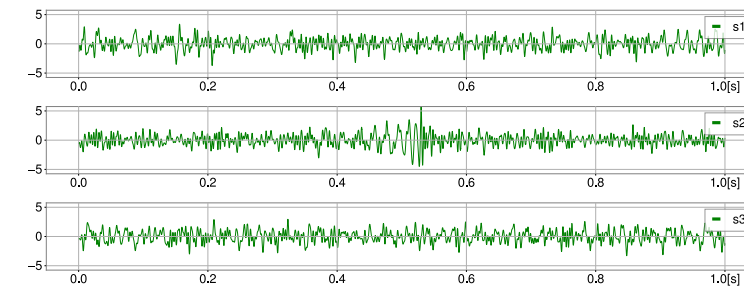
(e2) Output of ICA for GW200112.155838.

FIG. 7. Input and Output data of ICA analysis.

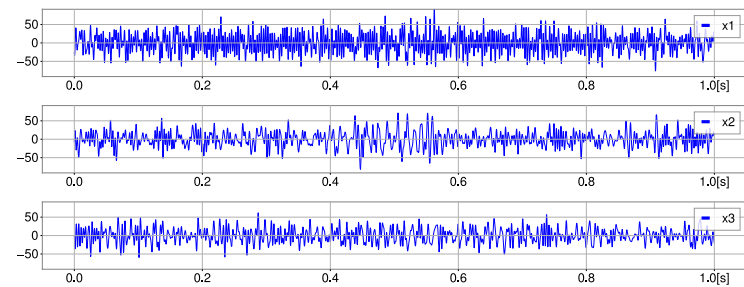
11



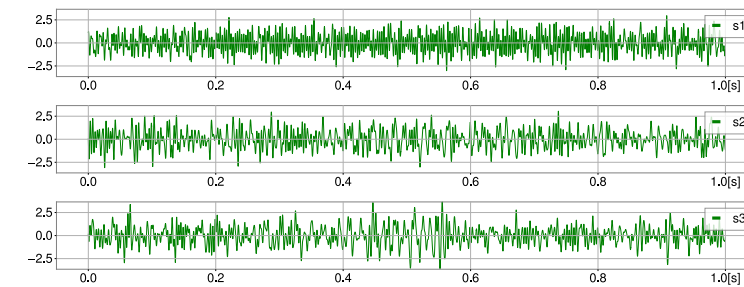
(f1) Input signals of GW170814 with $\Delta t_{\text{HL}} = -8.06$ ms and $\Delta t_{\text{HV}} = +0.98$ ms. The data x1, x2, and x3 are of Hanford, Livingston, and Virgo, respectively.



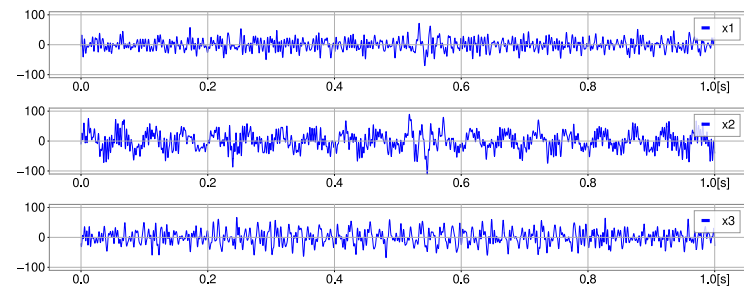
(f2) Output of ICA for GW170814.



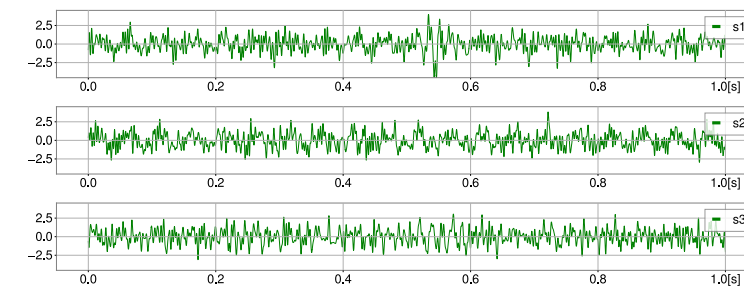
(g1) Input signals of GW190412 with $\Delta t_{\text{HL}} = -3.91$ ms and $\Delta t_{\text{HV}} = -13.92$ ms. The data x1, x2, and x3 are of Hanford, Livingston, and Virgo, respectively.



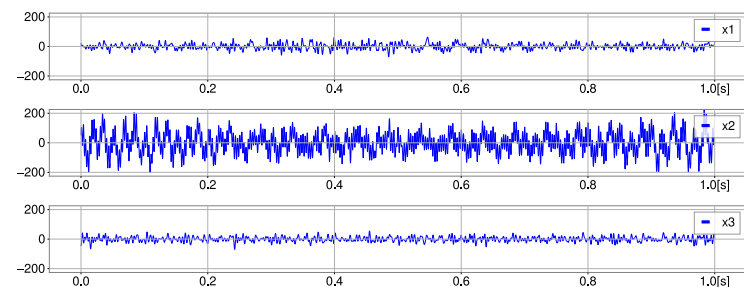
(g2) Output of ICA for GW190412.



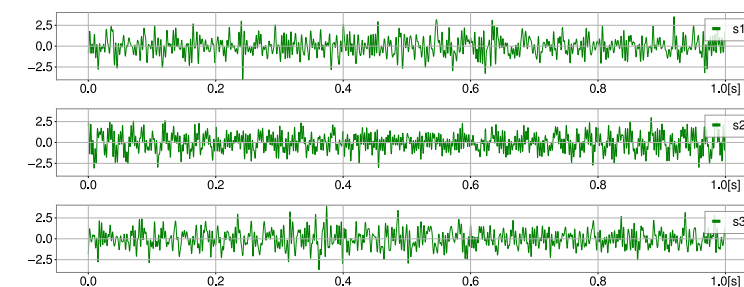
(h1) Input signals of GW190521 with $\Delta t_{\text{HL}} = +2.93$ ms and $\Delta t_{\text{HV}} = -25.15$ ms. The data x1, x2, and x3 are of Hanford, Livingston, and Virgo, respectively.



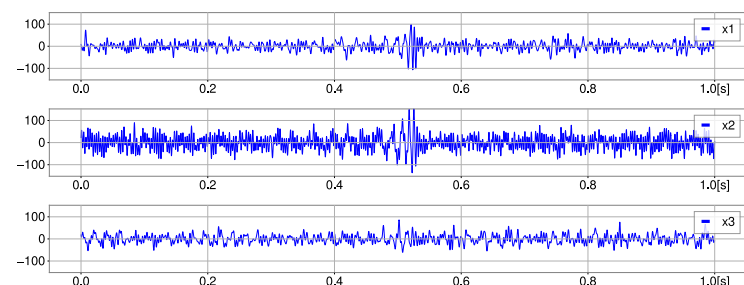
(h2) Output of ICA for GW190521.



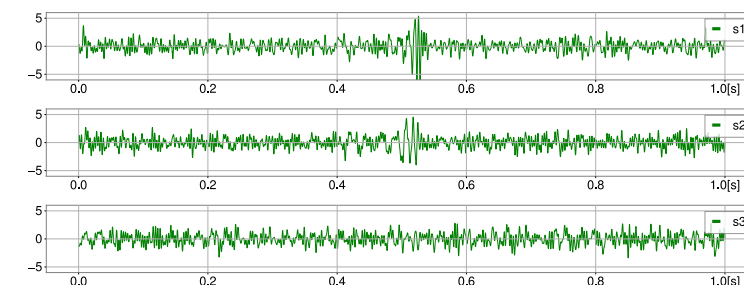
(i1) Input signals of GW190814 with $\Delta t_{\text{HL}} = +2.20$ ms and $\Delta t_{\text{HV}} = +21.24$ ms. The data x1, x2, and x3 are of Hanford, Livingston, and Virgo, respectively.



(i2) Output of ICA for GW190814.



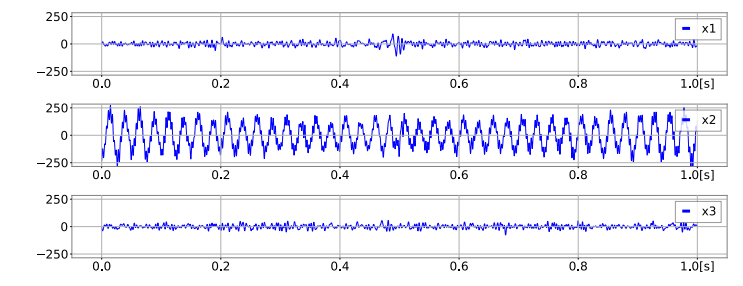
(j1) Input signals of GW200129.065458 with $\Delta t_{\text{HL}} = +3.42$ ms and $\Delta t_{\text{HV}} = -18.31$ ms. The data x1, x2, and x3 are of Hanford, Livingston, and Virgo, respectively.



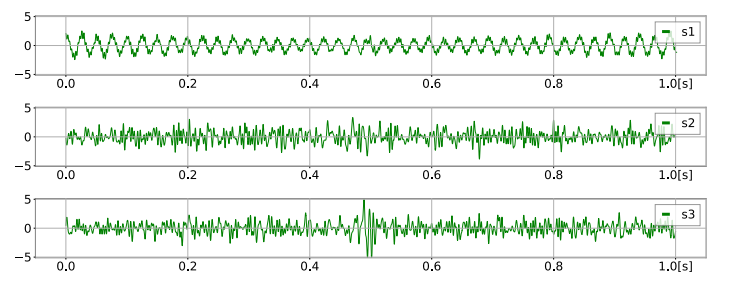
(j2) Output of ICA for GW200129.065458.

FIG. 7. Input and Output data of ICA analysis (cont.)

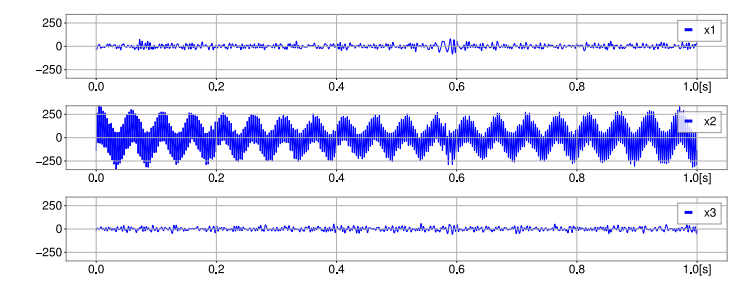
12



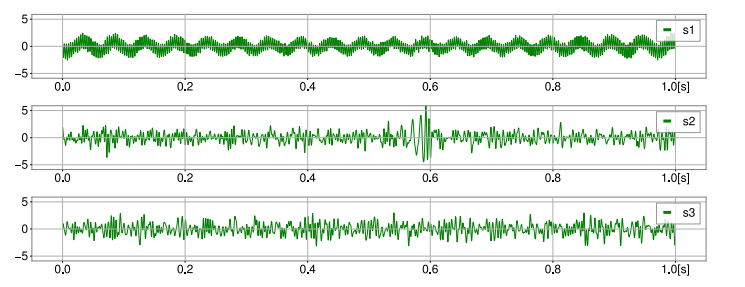
(k1) Input signals of GW200224.222234 with $\Delta t_{\text{HL}} = -3.66$ ms and $\Delta t_{\text{HV}} = -9.28$ ms. The data x1, x2, and x3 are of Hanford, Livingston, and Virgo, respectively.



(k2) Output of ICA for GW200224.222234.



(l1) Input signals of GW200311.115853 with $\Delta t_{\text{HL}} = -3.66$ ms and $\Delta t_{\text{HV}} = -27.10$ ms. The data x1, x2, and x3 are of Hanford, Livingston, and Virgo, respectively.



(l2) Output of ICA for GW200311.115853.

FIG. 7. Input and Output data of ICA analysis (cont.)

報告されたおもな重力波 (2024 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	$28.6^{+1.7}_{-1.5}$	0.86	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.4}_{-3.0}$	440^{+150}_{-170}	250	26
GW170814	$24.1^{+1.4}_{-1.1}$	0.82	$0.07^{+3.2}_{-0.12}$	$53.2^{+3.2}_{-2.4}$	600^{+150}_{-220}	92	17.7
GW190412	$13.3^{+0.5}_{-0.5}$	0.32	$0.21^{+0.12}_{-0.13}$	$35.6^{+4.8}_{-4.5}$	720^{+240}_{-220}	240	19.8
GW190521	$63.3^{+19.6}_{-14.6}$	0.58	$-0.14^{+0.5}_{-0.45}$	$147.4^{+40.0}_{-16.0}$	3310^{+2790}_{-1800}	1000	14.3
GW190521.074359	$32.8^{+3.2}_{-2.8}$	0.77	$0.1^{+0.13}_{-0.13}$	$72.6^{+5.5}_{-5.4}$	1080^{+580}_{-530}	470	25.9
GW190814	$6.11^{+0.06}_{-0.05}$	0.11	$0^{+0.07}_{-0.07}$	$25.7^{+1.3}_{-1.3}$	230^{+40}_{-50}	22	25.3
GW191109.010717	$47.5^{+9.6}_{-7.5}$	0.72	$0.^{-0.29}_{-0.31}^{+0.42}$	$107^{+18.0}_{-15.0}$	1290^{+1130}_{-650}	1600	17.3
GW191204.171526	$8.56^{+0.41}_{-0.28}$	0.72	$0.16^{+0.08}_{-0.05}$	$19.18^{+1.71}_{-0.93}$	640^{+200}_{-260}	350	17.4
GW191216.213338	$8.33^{+0.22}_{-0.19}$	0.64	$0.11^{+0.13}_{-0.06}$	$18.87^{+2.81}_{-0.93}$	340^{+120}_{-130}	490	18.6
GW200112.155838	$27.4^{+2.6}_{-2.1}$	0.79	$0.06^{+0.15}_{-0.15}$	$60.8^{+5.3}_{-4.3}$	1250^{+430}_{-460}	4300	19.8
GW200129.065458	$27.2^{+2.1}_{-2.3}$	0.84	$0.11^{+0.11}_{-0.16}$	$60.2^{+4.1}_{-3.2}$	890^{+260}_{-370}	130	26.8
GW200224.222234	$31.1^{+3.3}_{-2.7}$	0.82	$0.1^{+0.15}_{-0.16}$	$68.7^{+6.7}_{-4.8}$	1710^{+500}_{-650}	50.0	20
GW200311.115853	$26.6^{+2.4}_{-2.0}$	0.81	$-0.02^{+0.16}_{-0.2}$	$59^{+4.8}_{-3.9}$	1170^{+280}_{-400}	35	17.8

TABLE III. Results of the wave extractions by ICA for large SNR events in O1-O3. The column obs shows which detector (Hanford/Livingston/Virgo) observed. SNR is the network signal-to-noise ratio (centered value) which is announced in GWOSC (<https://gwosc.org>). Δt_{HL} is the time shift between Hanford data and Livingston data, $t_{\text{L}} - t_{\text{H}}$, in ms when ICA shows the best separation of the signal. $\mathcal{A}$ is the ratio of extracted signal to the other noise(s) evaluated by eq. (10). $\mathcal{R}$ is the residuals of the extracted waveform and estimated inspiral waveform, (11), between $[t_c - 0.15 \text{ ms}, t_c]$. See table IV for comparisons of chirp-mass and red-shift.

event	obs	SNR	Δt_{HL} (ms)	Δt_{HV} (ms)	Δt_{LV} (ms)	$\mathcal{A}$	$\mathcal{R}/10^{-12}$	ref.
GW150914	HL	26.0	$-7.32 \pm_{1.5}^{1.5}$	—	—	4.19	5.88	Fig.4
GW190521_074359	HL	25.9	$-6.35 \pm_{0.49}^{0.98}$	—	—	1.83	10.3	Fig.7(a)
GW191109_010717	HL	17.3	$3.17 \pm_{0.73}^{0.98}$	—	—	3.40	18.4	Fig.7(b)
GW191204_171526	HL	17.5	$-2.44 \pm_{0.73}^{0.49}$	—	—	2.07	3.27	Fig.7(c)
GW191216_213338	HV	18.6	—	$-11.0 \pm_{0.73}^{1.5}$	—	3.08	2.09	Fig.7(d)
GW200112_155838	LV	19.8	—	—	$-23.2 \pm_{0.24}^{0.49}$	2.43	10.5	Fig.7(e)
GW170814	HLV	17.7	$-8.06 \pm_{0.98}^{0.49}$	$0.98 \pm_{0.24}^{2.4}$	—	3.54	5.07	Fig.7(f)
GW190412	HLV	19.8	$-3.91 \pm_{0.24}^{0.24}$	$-13.92 \pm_{0.49}^{0.98}$	—	2.21	4.40	Fig.7(g)
GW190521	HLV	14.3	$2.93 \pm_{1.2}^{0.49}$	$-25.15 \pm_{1.7}^{0.49}$	—	2.85	31.8	Fig.7(h)
GW190814	HLV	25.3	$2.20 \pm_{0.24}^{0.49}$	$21.24 \pm_{0.24}^{0.73}$	—	2.00	1.65	Fig.7(i)
GW200129_065458	HLV	26.8	$3.42 \pm_{0.24}^{0.98}$	$-18.31 \pm_{0.24}^{0.24}$	—	3.96	11.3	Fig.7(j)
GW200224_222234	HLV	20.0	$-3.66 \pm_{0.24}^{2.7}$	$-9.28 \pm_{0.98}^{0.24}$	—	3.28	13.4	Fig.7(k)
GW200311_115853	HLV	17.8	$-3.66 \pm_{1.2}^{0.73}$	$-27.10 \pm_{2.2}^{2.2}$	—	3.17	4.34	Fig.7(l)

SNR が高いものと, GW190521

ICAがGW信号を他と分離したときの
背景ノイズとの比 あまり変わらない

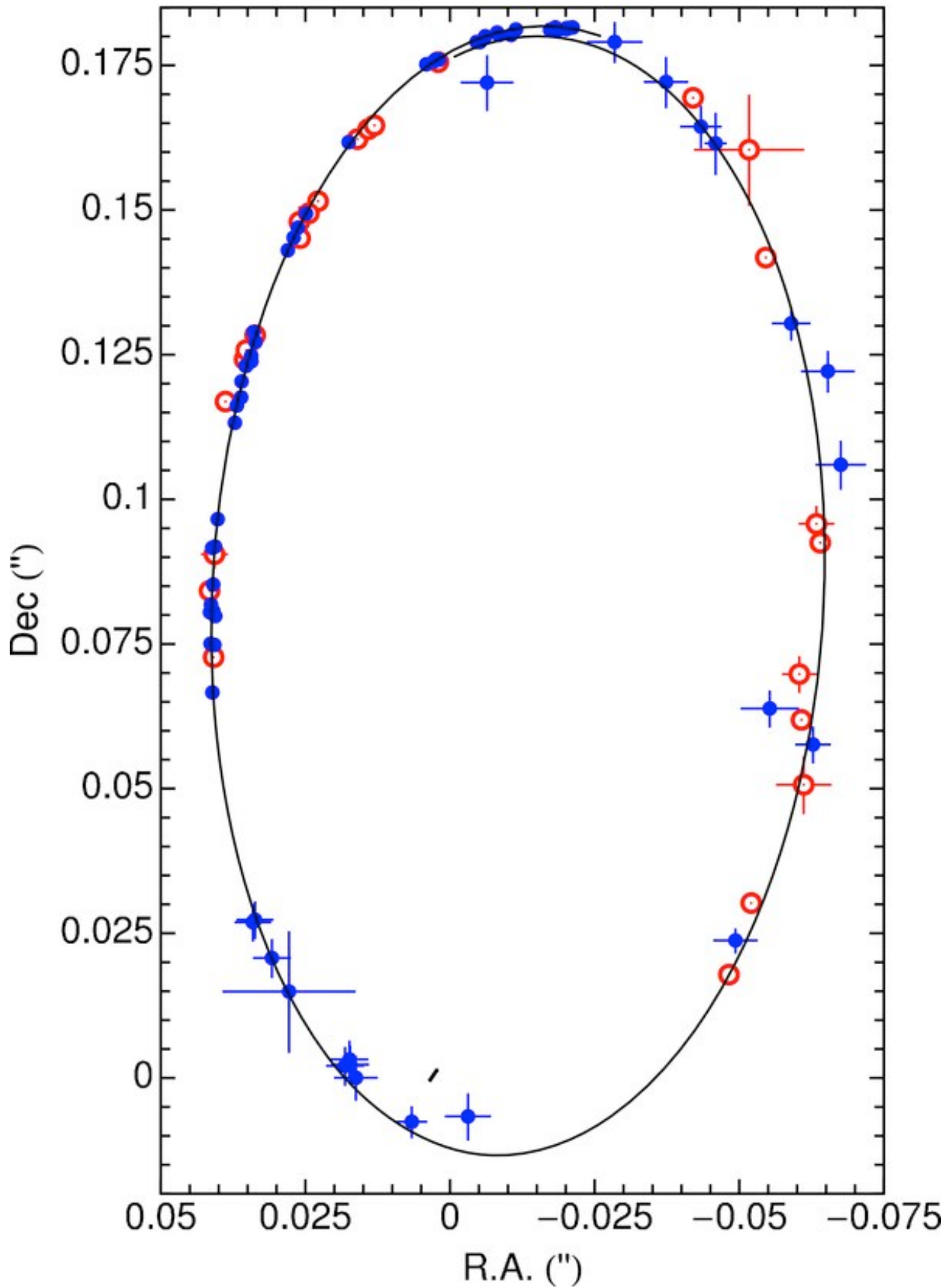
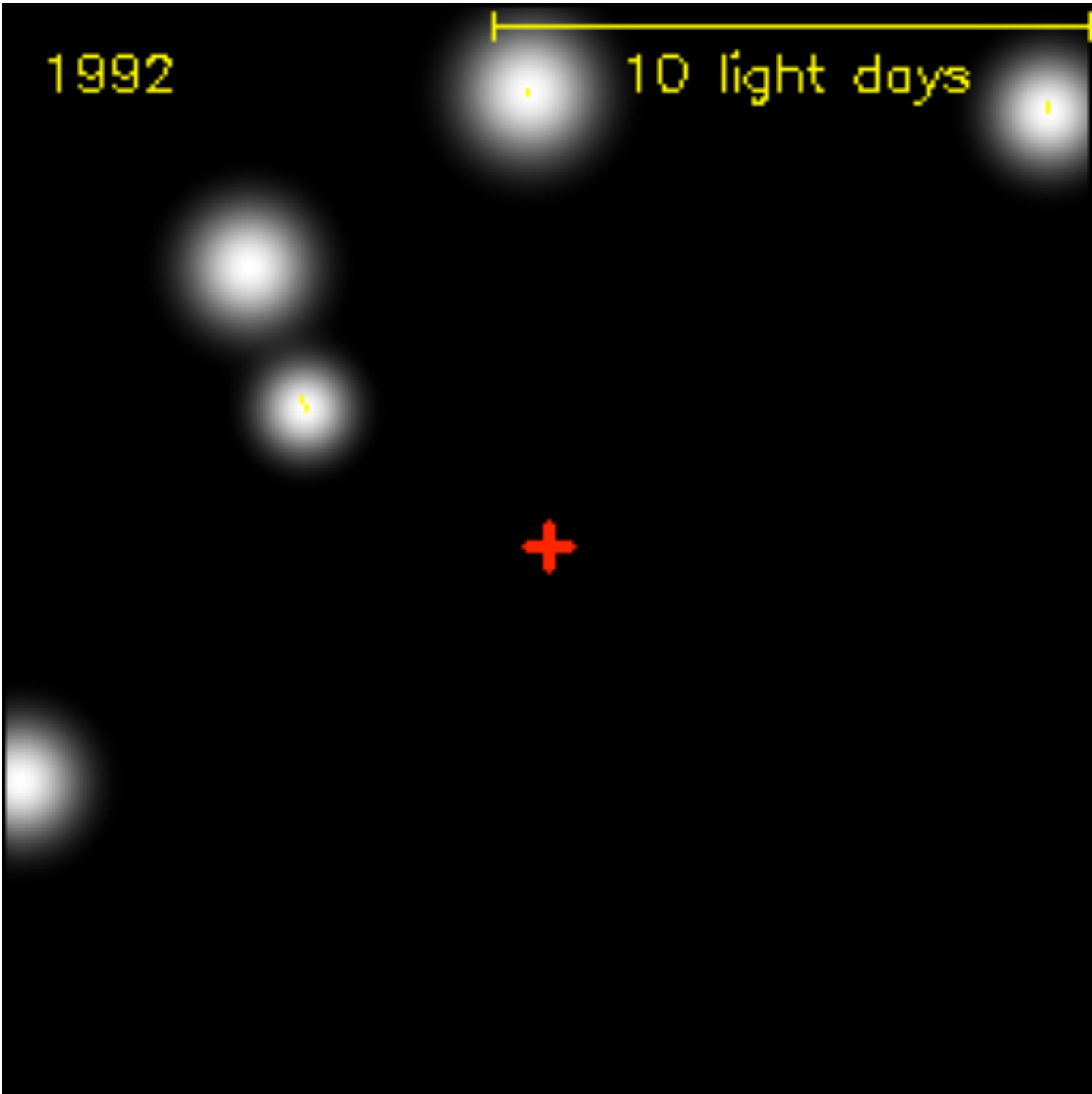
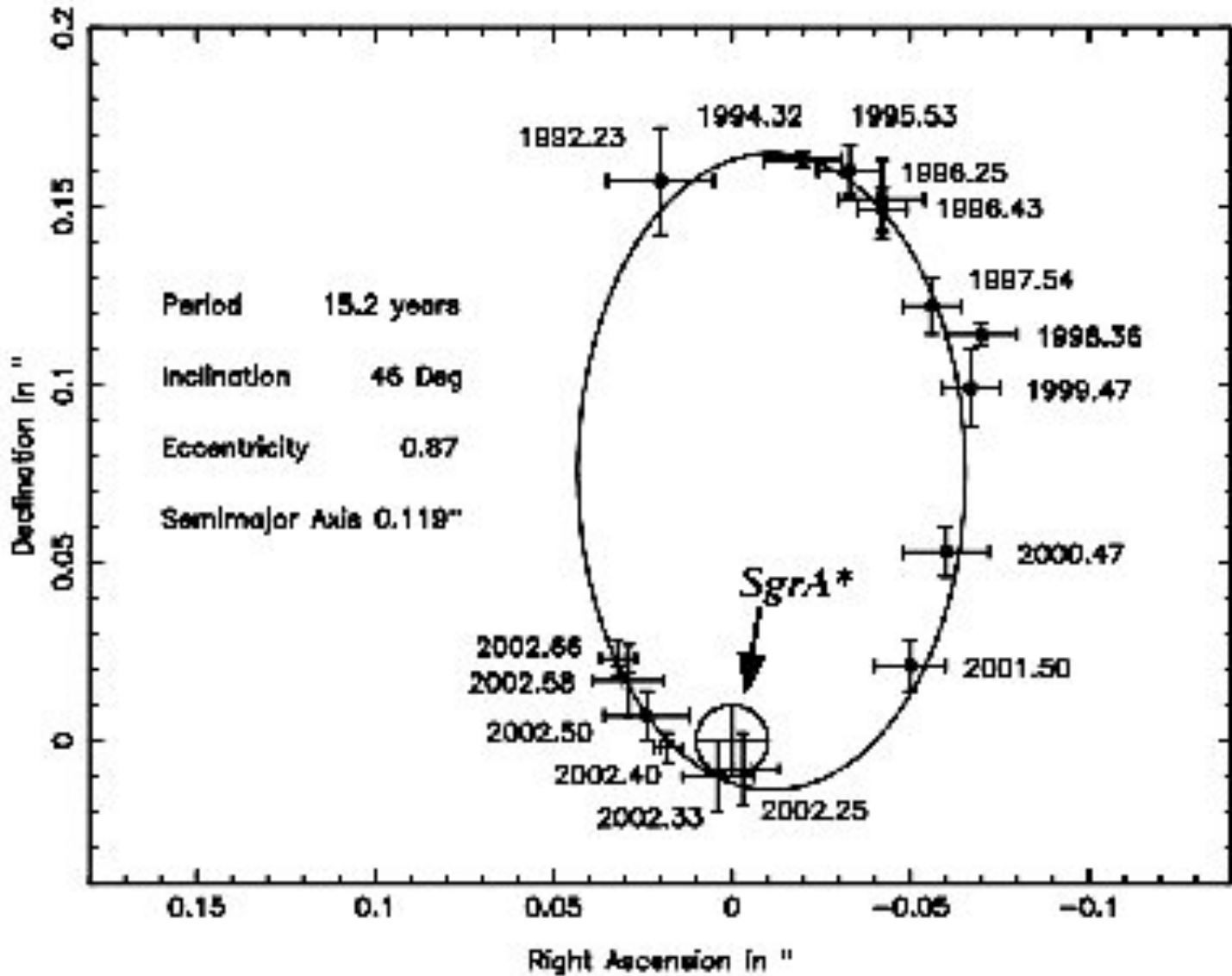
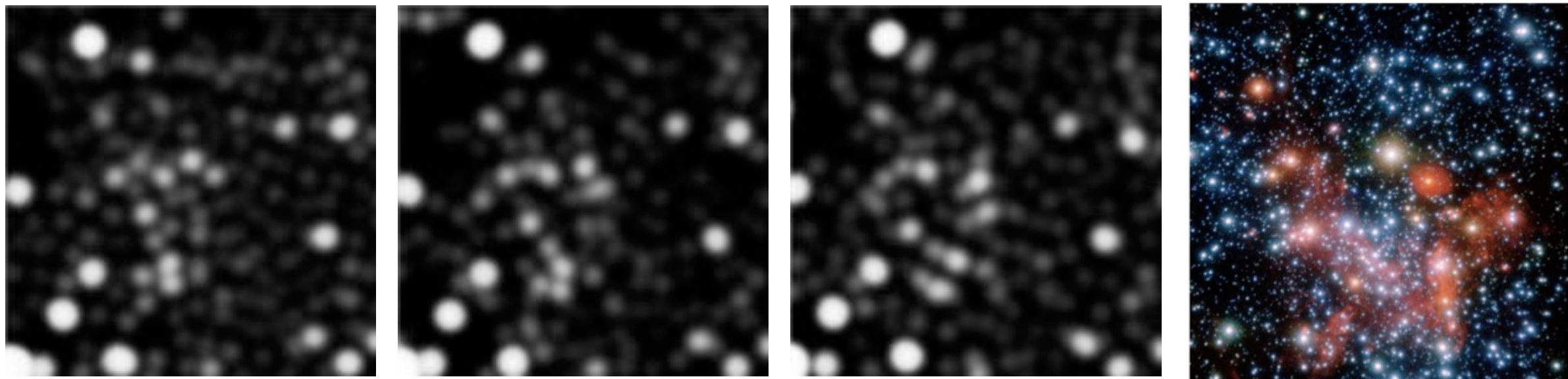
抽出されたGW信号と, inspiral 波形を
重ねた時の残差 SNRが高いと残差小さい

TABLE IV. Comparisons of chirp mass, M_c^{source} , shown in GWOSC and the one obtained by ICA, M_c^{obs} from the best fit inspiral-wave model. The difference can be regard as redshift factor $(1 + z_{\text{ICA}})$. The redshift factor in GWOSC, z , is also shown.

			GWOSC		ICA		
event	obs	SNR	$M_c^{\text{source}}/M_\odot$	z	$M_c^{\text{obs}}/M_\odot$	z_{ICA}	ref.
GW150914	HL	26.0	$28.6^{+1.7}_{-1.5}$	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	30.8	$0.077^{+0.06}_{-0.06}$	Fig.4
GW190521_074359	HL	25.9	$32.8^{+3.2}_{-2.8}$	$0.21^{+0.10}_{-0.10}$	36.4	$0.11^{+0.10}_{-0.10}$	Fig.7(a)
GW191109_010717	HL	17.3	$47.5^{+9.6}_{-7.5}$	$0.25^{+0.18}_{-0.12}$	53.7	$0.13^{+0.22}_{-0.19}$	Fig.7(b)
GW191204_171526	HL	17.5	$8.56^{+0.41}_{-0.28}$	$0.34^{+0.25}_{-0.18}$	11.1	$0.29^{+0.04}_{-0.06}$	Fig.7(c)
GW191216_213338	HV	18.6	$8.33^{+0.22}_{-0.19}$	$0.07^{+0.02}_{-0.03}$	9.00	$0.08^{+0.03}_{-0.03}$	Fig.7(d)
GW200112_155838	LV	19.8	$27.4^{+2.6}_{-2.1}$	$0.24^{+0.07}_{-0.08}$	32.7	$0.19^{+0.10}_{-0.10}$	Fig.7(e)
GW170814	HLV	17.7	$24.1^{+1.4}_{-1.1}$	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	26.0	$0.08^{+0.05}_{-0.06}$	Fig.7(f)
GW190412	HLV	19.8	$13.3^{+0.5}_{-0.5}$	$0.15^{+0.04}_{-0.04}$	14.8	$0.11^{+0.04}_{-0.04}$	Fig.7(g)
GW190521	HLV	14.3	$63.3^{+19.6}_{-14.6}$	$0.56^{+0.36}_{-0.27}$	81.7	$0.29^{+0.39}_{-0.30}$	Fig.7(h)
GW190814	HLV	25.3	$6.11^{+0.06}_{-0.05}$	$0.05^{+0.01}_{-0.01}$	6.35	$0.04^{+0.01}_{-0.01}$	Fig.7(i)
GW200129_065458	HLV	26.8	$27.2^{+2.1}_{-2.3}$	$0.18^{+0.05}_{-0.07}$	30.6	$0.13^{+0.10}_{-0.08}$	Fig.7(j)
GW200224_222234	HLV	20.0	$31.1^{+3.3}_{-2.7}$	$0.32^{+0.08}_{-0.11}$	37.6	$0.21^{+0.11}_{-0.12}$	Fig.7(k)
GW200311_115853	HLV	17.8	$26.6^{+2.4}_{-2.0}$	$0.23^{+0.05}_{-0.07}$	31.0	$0.17^{+0.09}_{-0.10}$	Fig.7(l)

抽出されたGW信号に合致するインスパイラル波形の M_c (obs) を算出
LVK論文の M_c (source) と比較して $(1+z)$ を算出
すべてのイベントで無矛盾

S2 orbit around Sgr A*



<http://www.extinctionsift.com/SignificantFindings08.htm>
<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>

2022年5月12日,「天の川銀河中心のブラックホールの直接撮像に初めて成功」

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 930:L17 (44pp), 2022 May 10

© 2022. The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6756>



First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. VI. Testing the Black Hole Metric

The Event Horizon Telescope Collaboration
(See the end matter for the full list of authors.)

Received 2022 March 15; revised 2022 April 12; accepted 2022 April 12; published 2022 May 12

Abstract

Astrophysical black holes are expected to be described by the Kerr metric. This is the only stationary, vacuum, axisymmetric metric, without electromagnetic charge, that satisfies Einstein's equations and does not have pathologies outside of the event horizon. We present new constraints on potential deviations from the Kerr prediction based on 2017 EHT observations of Sagittarius A* (Sgr A*). We calibrate the relationship between the geometrically defined black hole shadow and the observed size of the ring-like images using a library that includes both Kerr and non-Kerr simulations. We use the exquisite prior constraints on the mass-to-distance ratio for Sgr A* to show that the observed image size is within ~10% of the Kerr predictions. We use these bounds to constrain metrics that are parametrically different from Kerr, as well as the charges of several known spacetimes. To consider alternatives to the presence of an event horizon, we explore the possibility that Sgr A* is a compact object with a surface that either absorbs and thermally reemits incident radiation or partially reflects it. Using the observed image size and the broadband spectrum of Sgr A*, we conclude that a thermal surface can be ruled out and a fully reflective one is unlikely. We compare our results to the broader landscape of gravitational tests. Together with the bounds found for stellar-mass black holes and the M87 black hole, our observations provide further support that the external spacetimes of all black holes are described by the Kerr metric, independent of their mass.

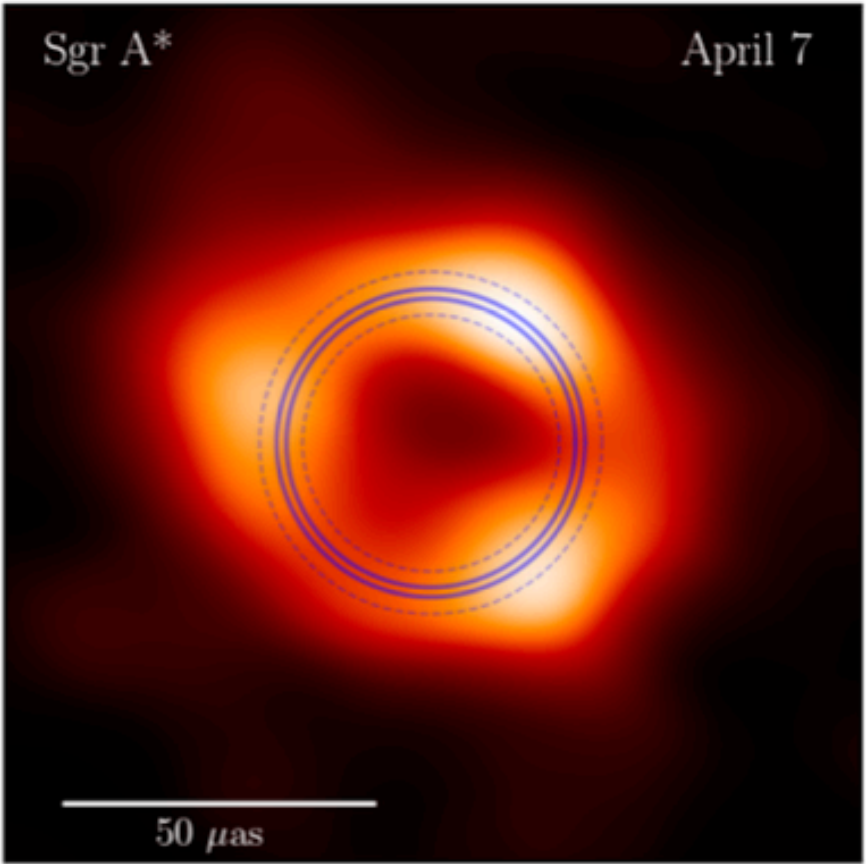
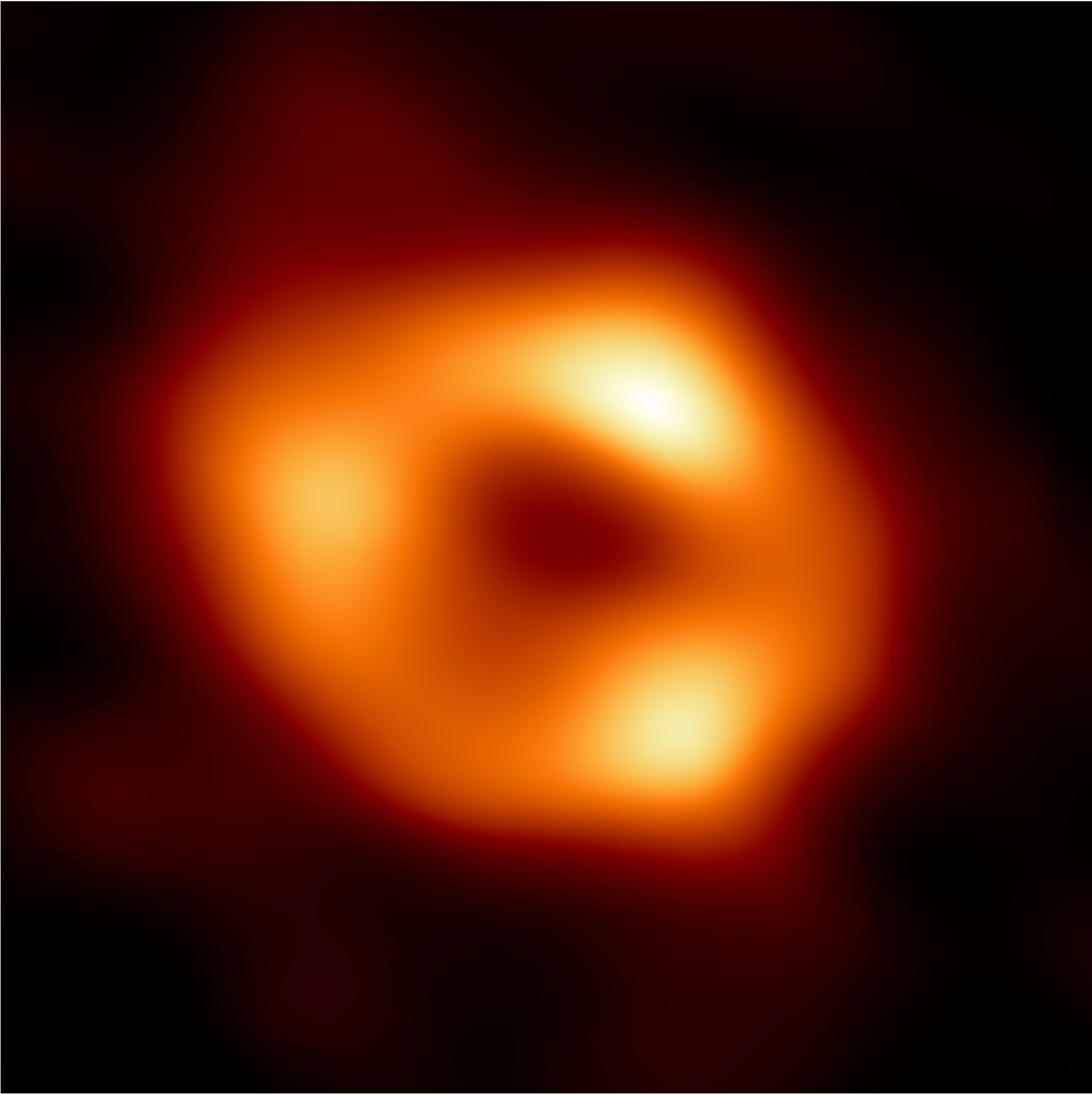


Figure 11. Inferred diameter of the black hole shadow boundary overlaid on the average EHT image of Sgr A* obtained from the 2017 April 7 data. Solid lines show the range of most likely values, while the dashed lines show the envelope of the 68th percentile credible intervals for all methods.



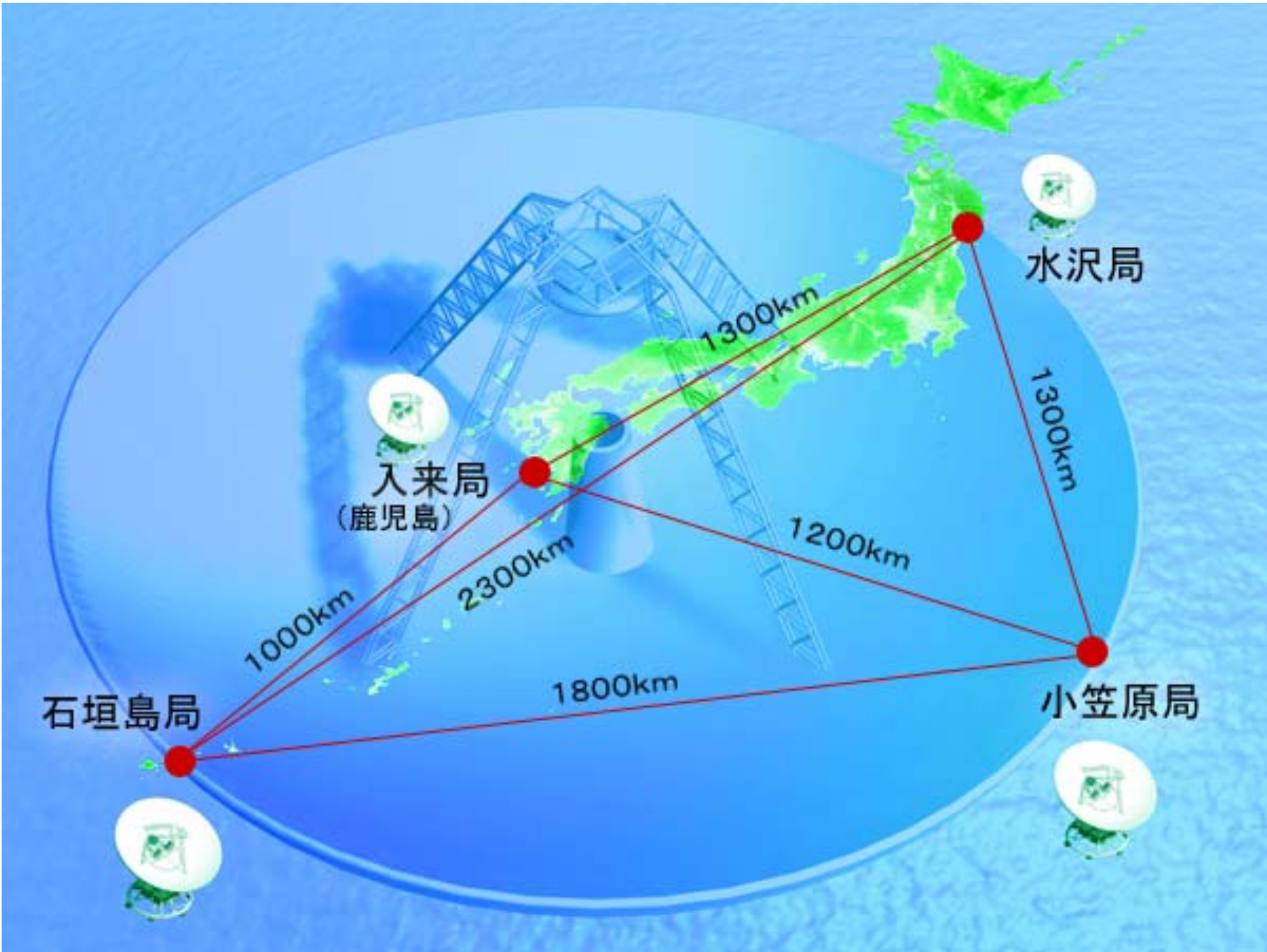
地球から2万8000光年

<https://eventhorizontelescope.org>

電波干渉計



VLBI = Very Long Baseline Interferometer
VERA = VLBI Exploration of Radio Astrometry



<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/system/index.html>

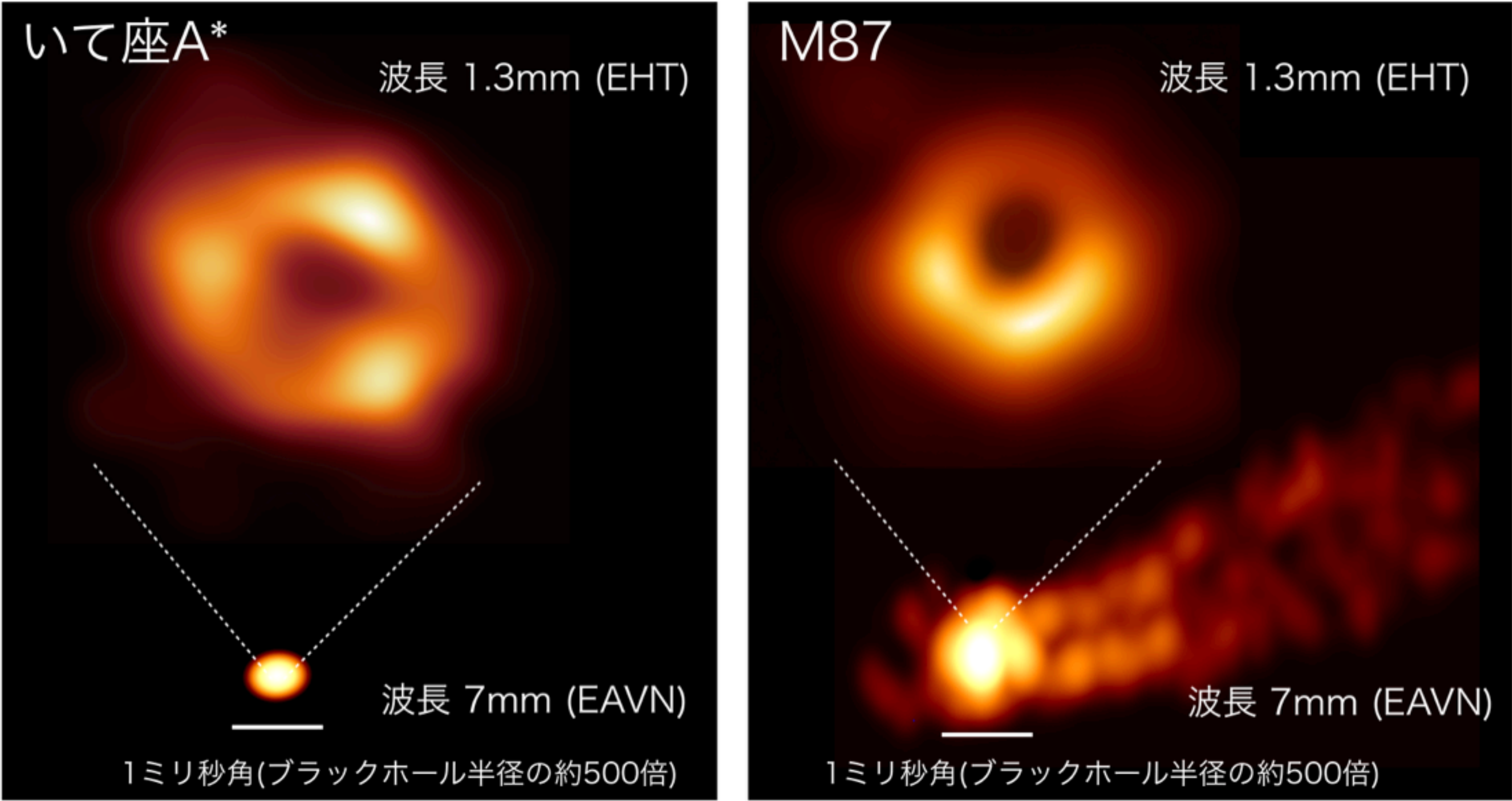
Event Horizon Telescope



2022年5月12日,「天の川銀河中心のブラックホールの直接撮像に初めて成功」

Sgr A*	M87
400万太陽質量	65億太陽質量
8 kpc	16.8 Mpc

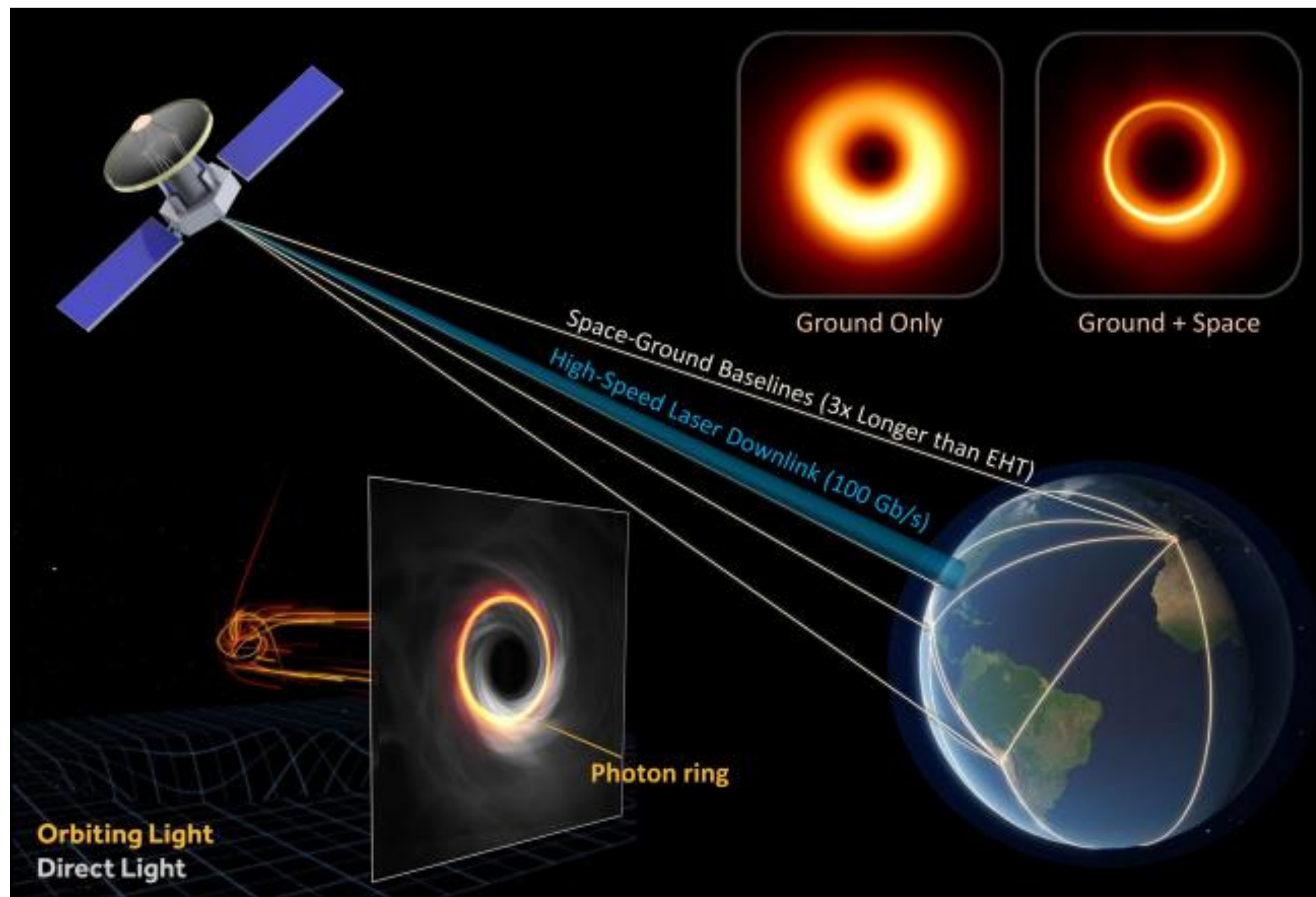
3桁大きなBHが
3桁遠くにいるので、
同じ位の大きさに見える



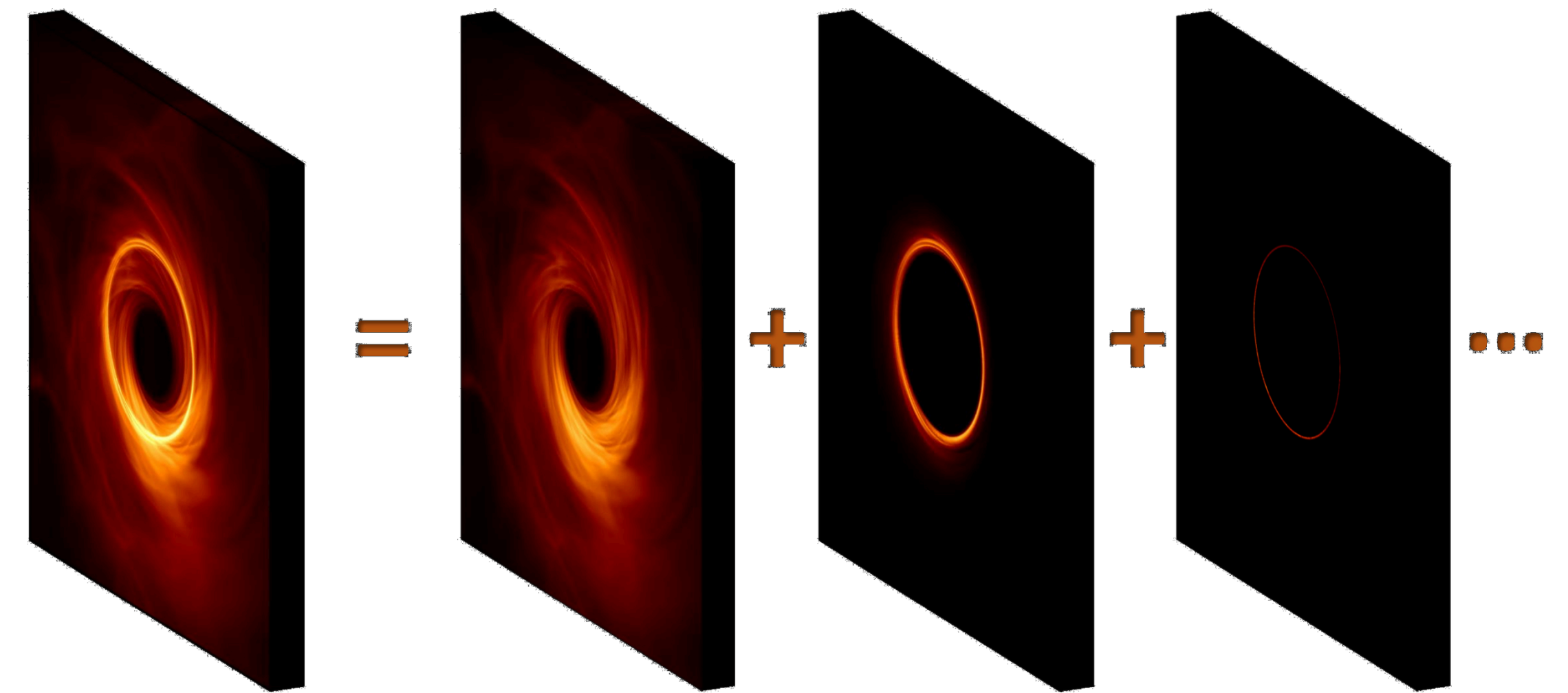
[図6] いて座A*（左）とM87（右）の画像比較。上側のリングはEHTで得られたブラックホール近傍画像。下側の画像は東アジアVLBI観測網（EAVN）で得られたブラックホール遠方画像。ブラックホール遠方画像において、M87では図の左下から右上へと伸びるジェットが見られるのに対し、いて座A*ではジェットの明確な証拠は得られていない。その一方でEHTで得られたリング画像はとてもよく似ている。（クレジット：EHT Collaboration, EAVN Collaboration）

Black Hole Explorer (BHEX) 計画

<https://www.blackholeexplorer.org/>

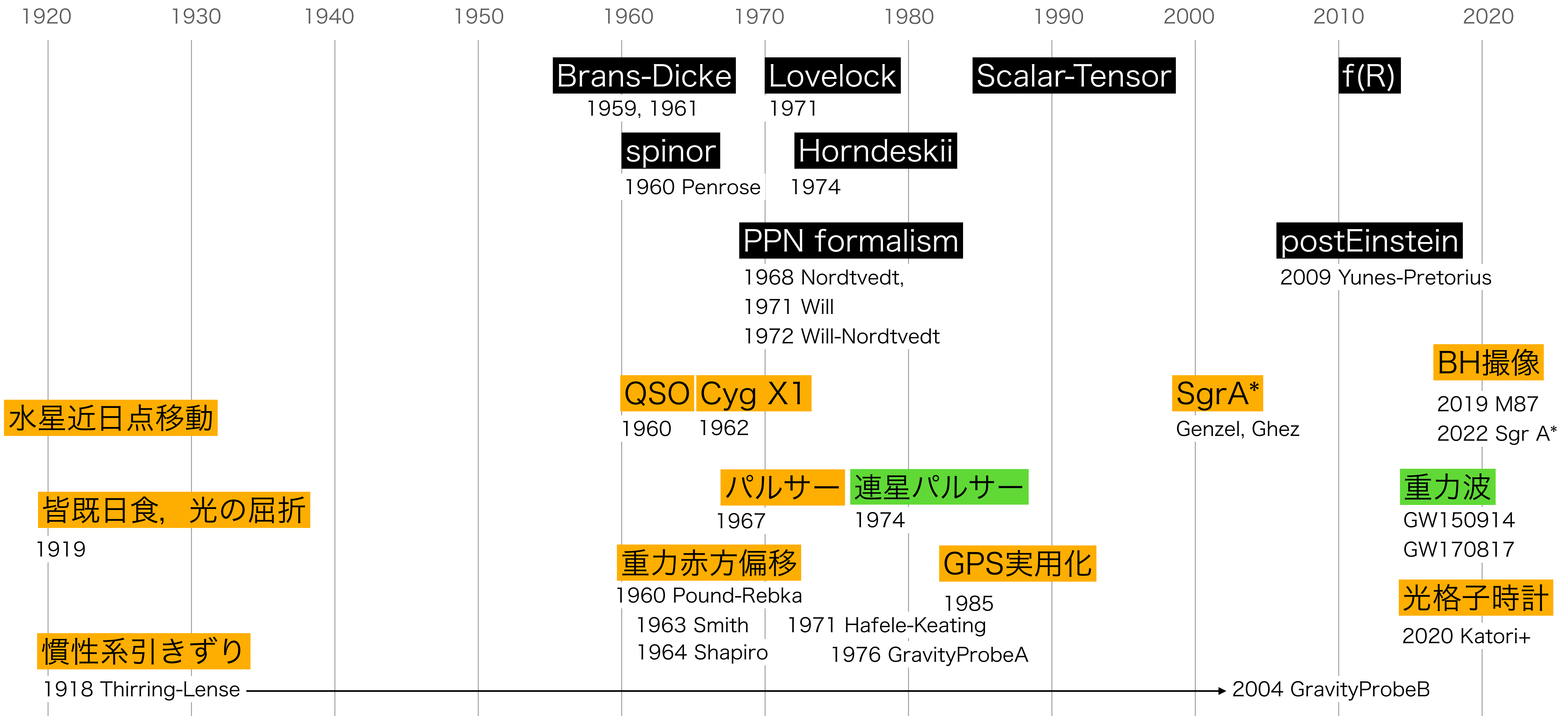


宇宙空間に電波望遠鏡を設置して、基線長をかせぐ



より細かなリング構造が観測できれば、
ブラックホールが自転している確実な証拠となり、
理論の検証も進む。

相対論検証の歴史



GPS (Global Positioning System)

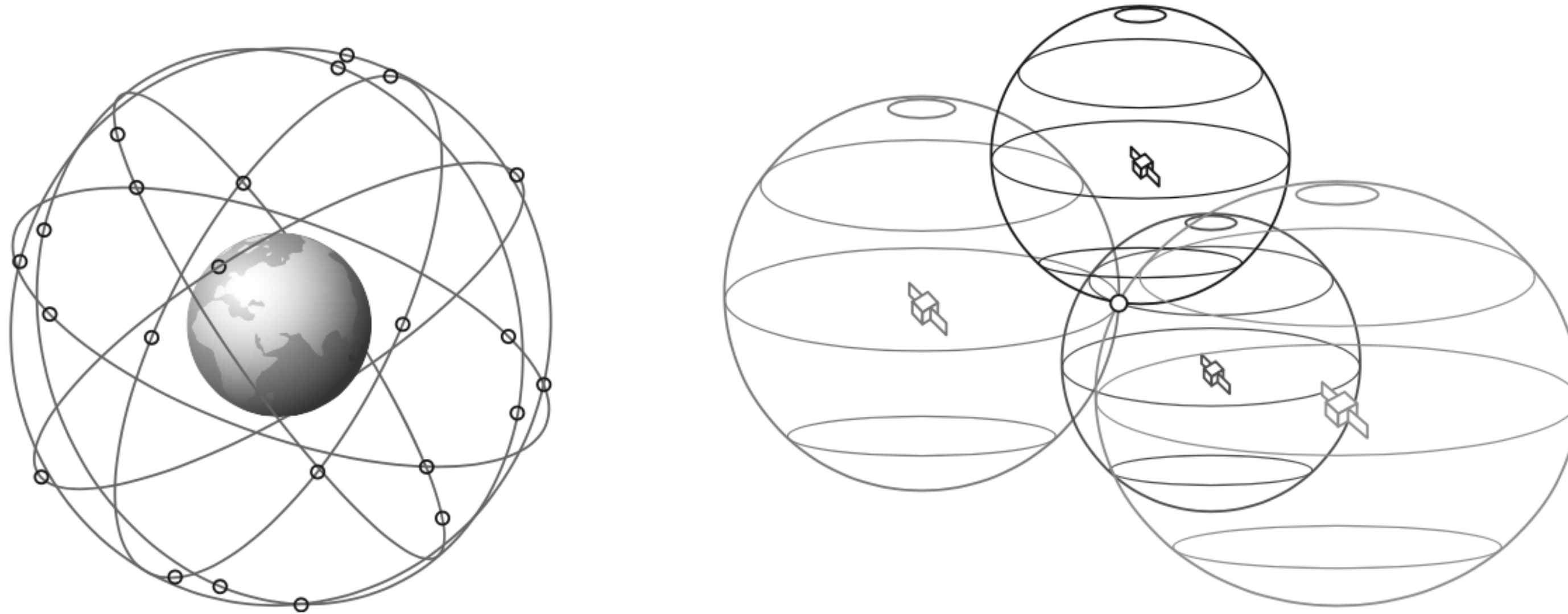


図 3.43 GPS システム. 2 台の GPS 衛星からの電波を使うと重なり合う部分は 1 つの円周上, 3 台からの電波では 3 点に絞られ, 4 台の衛星からの情報を使うと 1 点に絞られる.



正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で,

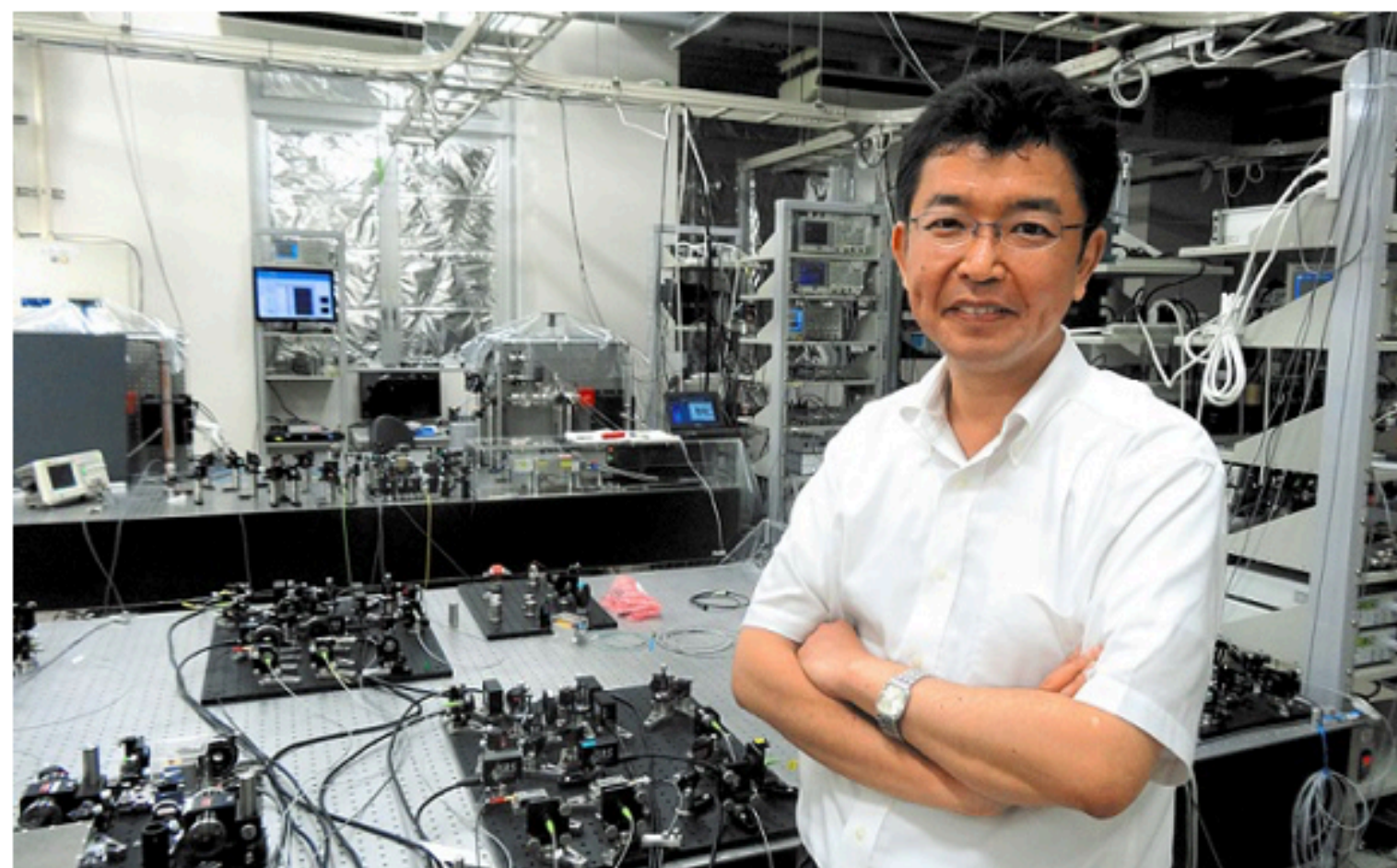
3 角測量→精度 $\pm 15\text{m}$

高速飛行の**特殊相対論効果**と

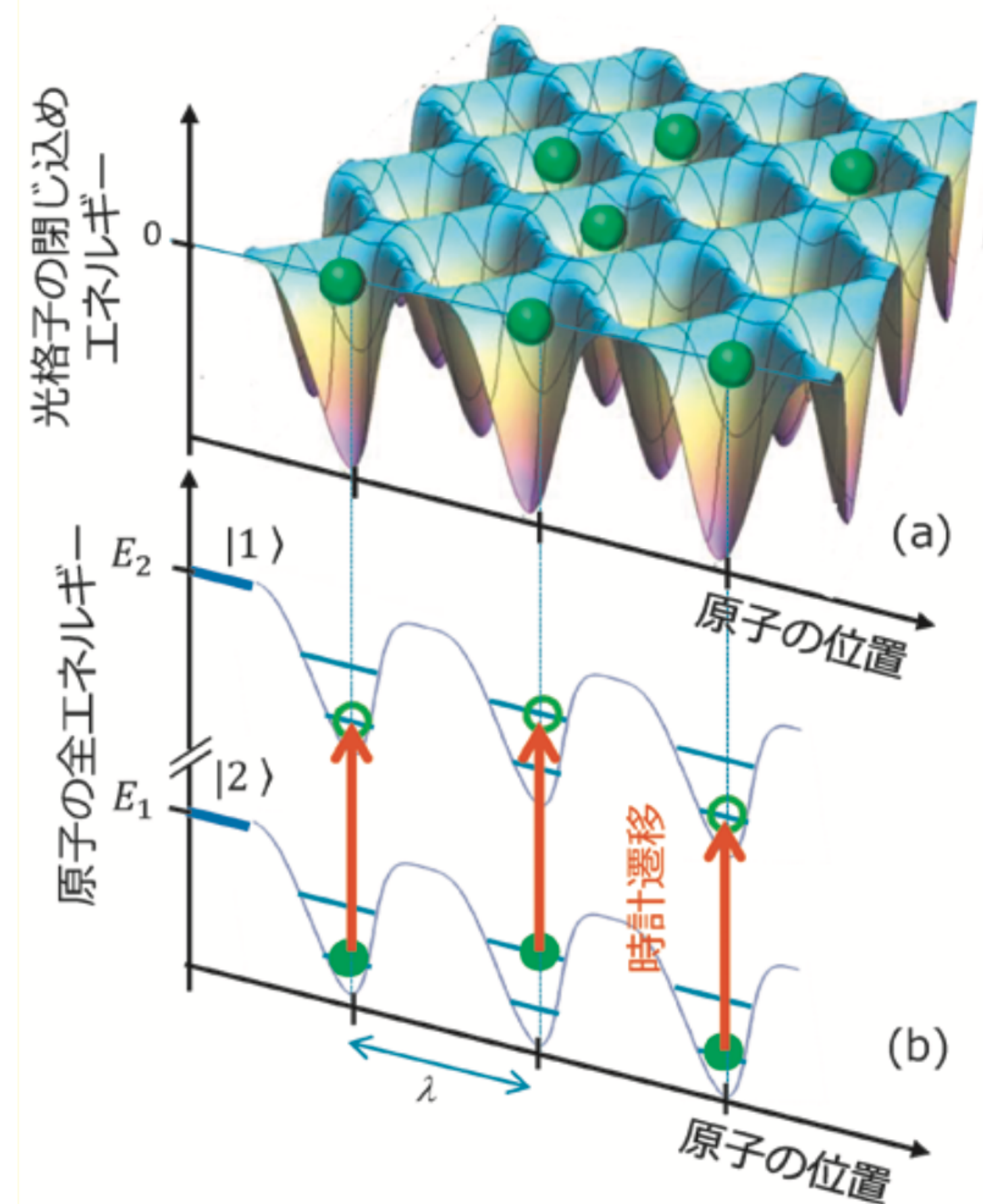
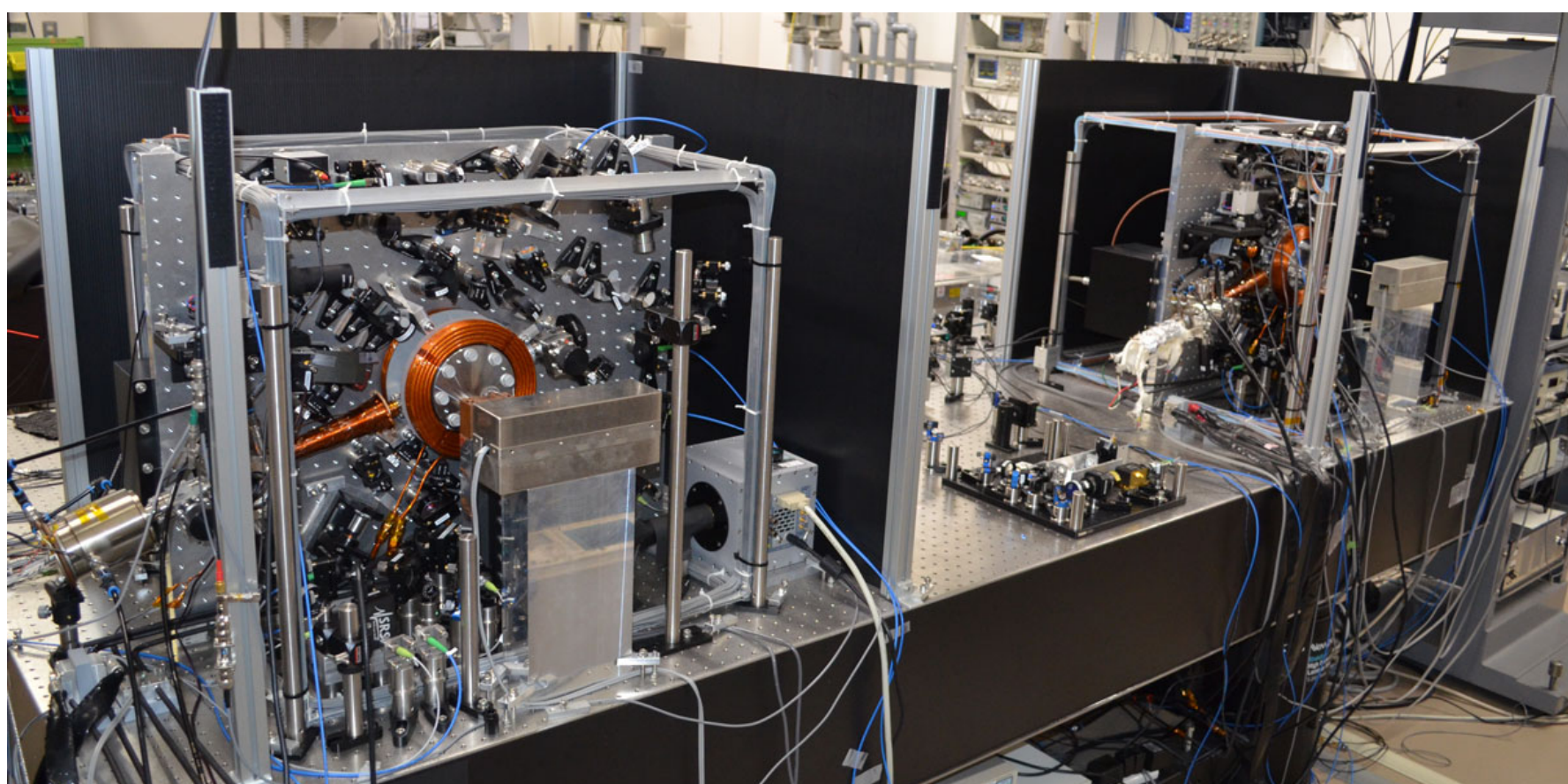
地球重力の**一般相対論効果**

⇒ 1 日につき, 38×10^{-6} 秒ずつ衛星の時計を遅らせる必要あり

一般相対性理論は正しい



光格子時計を開発した香取秀俊東京大学教授
兼理化学研究所招聘主任研究員＝2013年7月
31日、田中郁也撮影

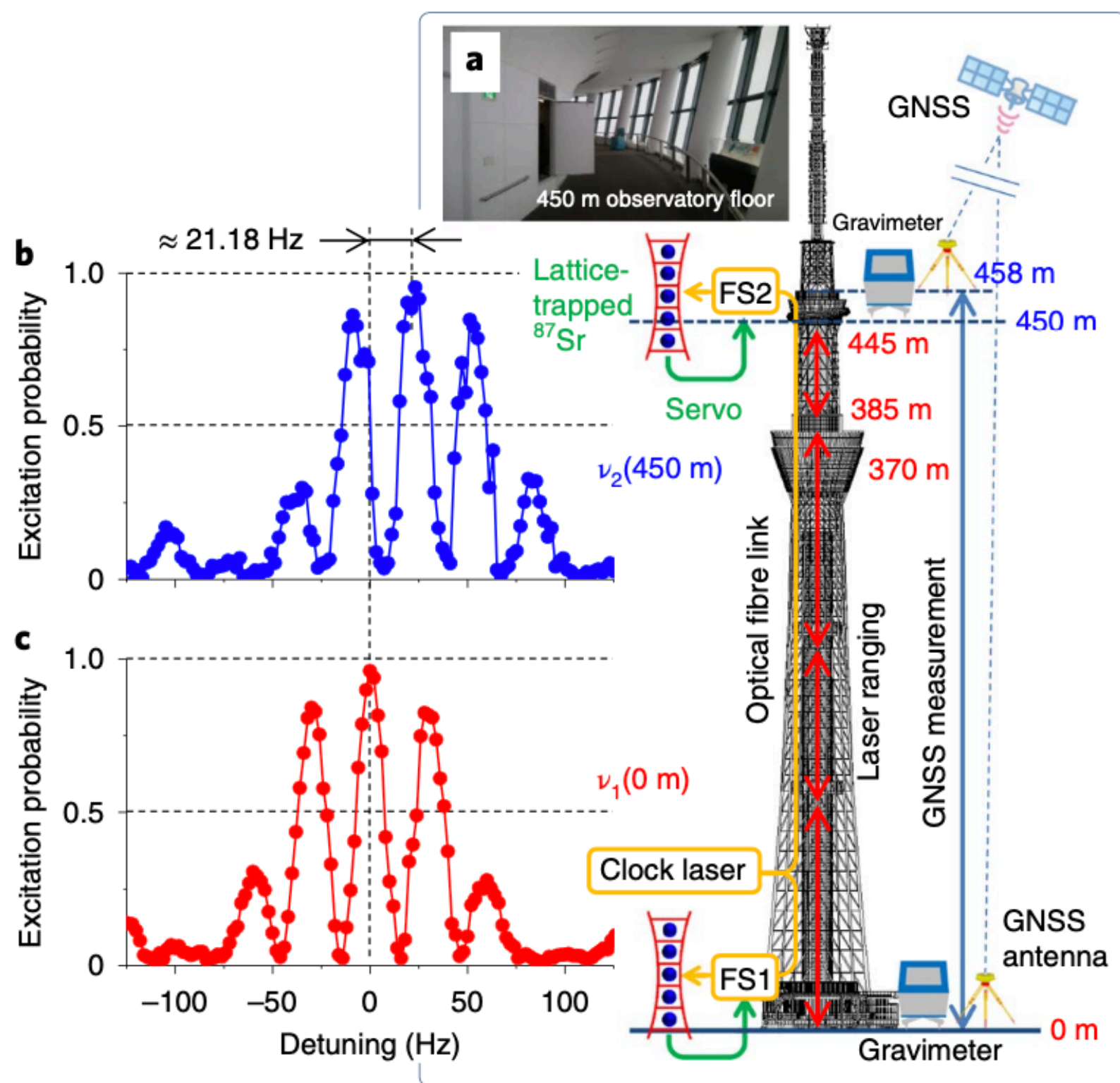


10^{-18} の精度を実現
(300億年ですれは1秒以内)

アインシュタインの相対性理論によれば、
重力の強いところでは時間の進み方が遅くなる

地上と450mの展望台に光格子時計を設置して検証

図 6: 東京スカイツリーでの一般相対論検証実験の概要。地上階と展望台に設置した2台の可搬型光格子時計を光ファイバーでつなぎ、周波数比較を行った。一方、2台の時計の標高差を従来の測量手法（GNSS 測量およびレーザー測距）によって計測した。時計遷移を分光して得られたスペクトルでは、標高差 450 メートルに相当する約 21 ヘルツの周波数シフトが観測された。



1 週間の計測。平均して、差が

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = (49337.8 \pm 4.3) \times 10^{-18}$$

$$\frac{g\Delta h}{c^2} = (49337.1 \pm 1.4) \times 10^{-18}$$

相対性理論の正しさを

$$(1.4 \pm 9.1) \times 10^{-5}$$

の精度で検証したことになる



Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks

Masao Takamoto^{1,2}, Ichiro Ushijima³, Noriaki Ohmae^{1,2}, Toshihiro Yahagi⁴, Kensuke Kokado⁴, Hisaaki Shinkai⁵ and Hidetoshi Katori^{1,2,3} ✉

Nature Photonics, 14 (2020) 411



Physics Today 2020 July

冷蔵庫サイズの時計で，高度差450mを $\pm$ 数cm で測定できる.

光格子時計の社会実装に向けた大きな一歩.
今後，地殻変動や火山活動の監視など，相対論的測地技術の実用化が期待される.

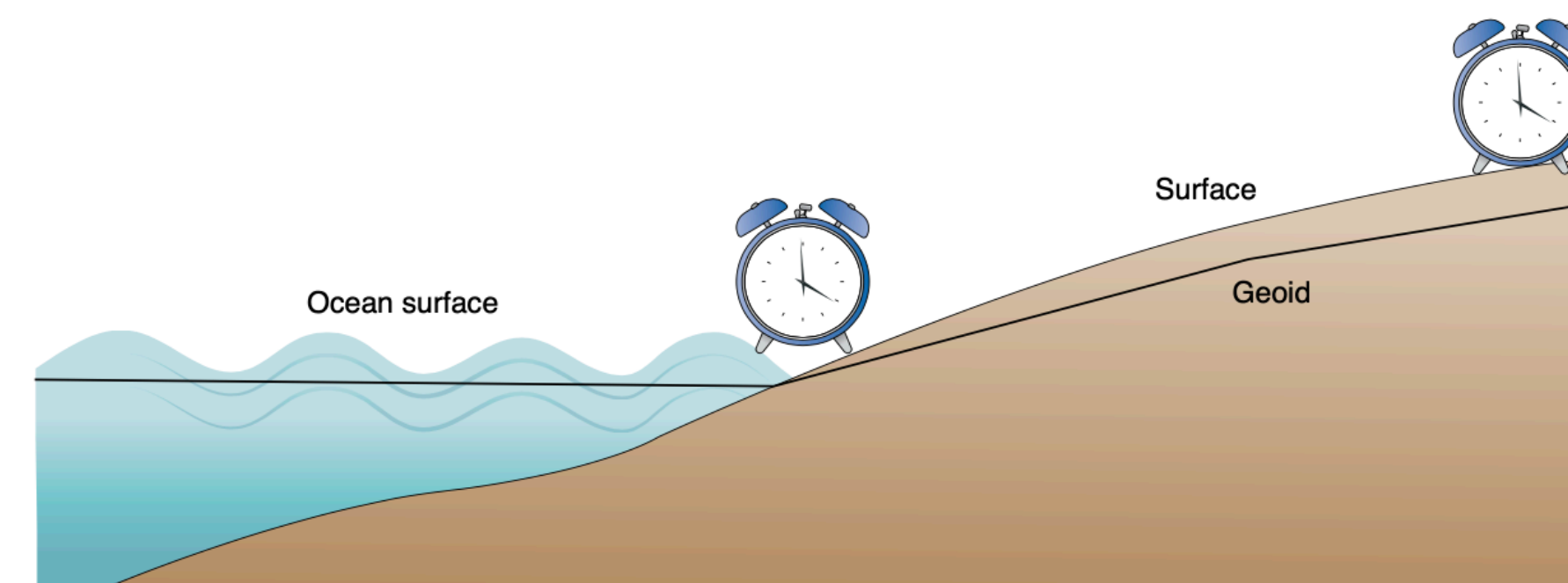


Fig. 1 | Illustration of how in the future relativistic geodesy might be done with clocks. The geoid is an equipotential surface of the Earth's gravitational potential, indicated by the black line. While the mean ocean surface is closely aligned with the geoid, the surface of land can significantly differ. Placing one clock at sea level and one at an inland location allows to determine the geoid height via a frequency comparison between the clocks.

K.Bongs & Y.Singh, Nature Photonics 14 (2020) 408

光格子時計のこれから

原子時計をしのぐ精度

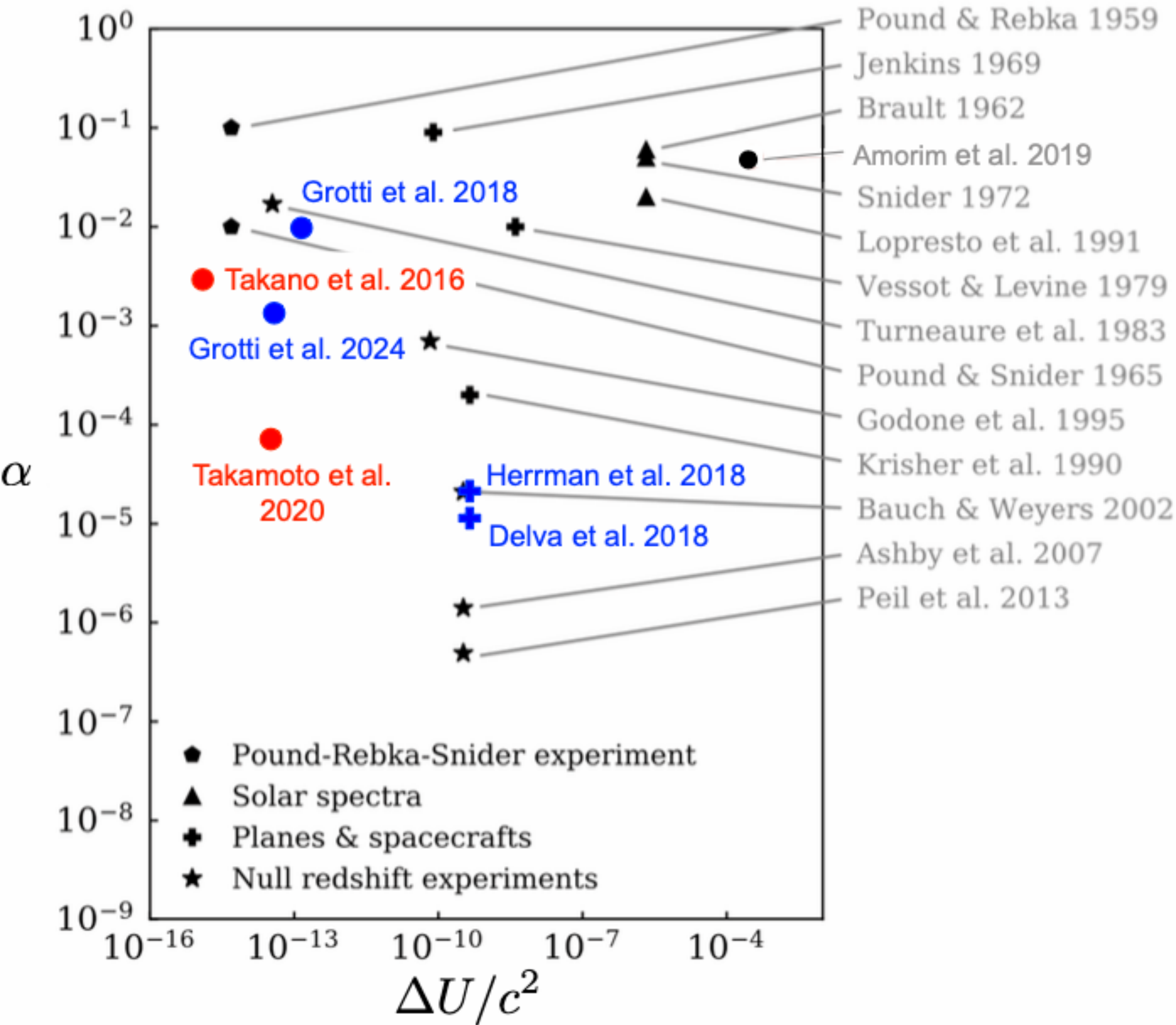
＊1秒の定義が変わる

重力のちがいを時計で計測

- ＊時計を使って地下鉱物資源探査
- ＊地球周回軌道にて, GPS衛星の補正
- ＊地球周回軌道にて, 相対性理論検証
- ＊太陽周回軌道に複数台で重力波検出

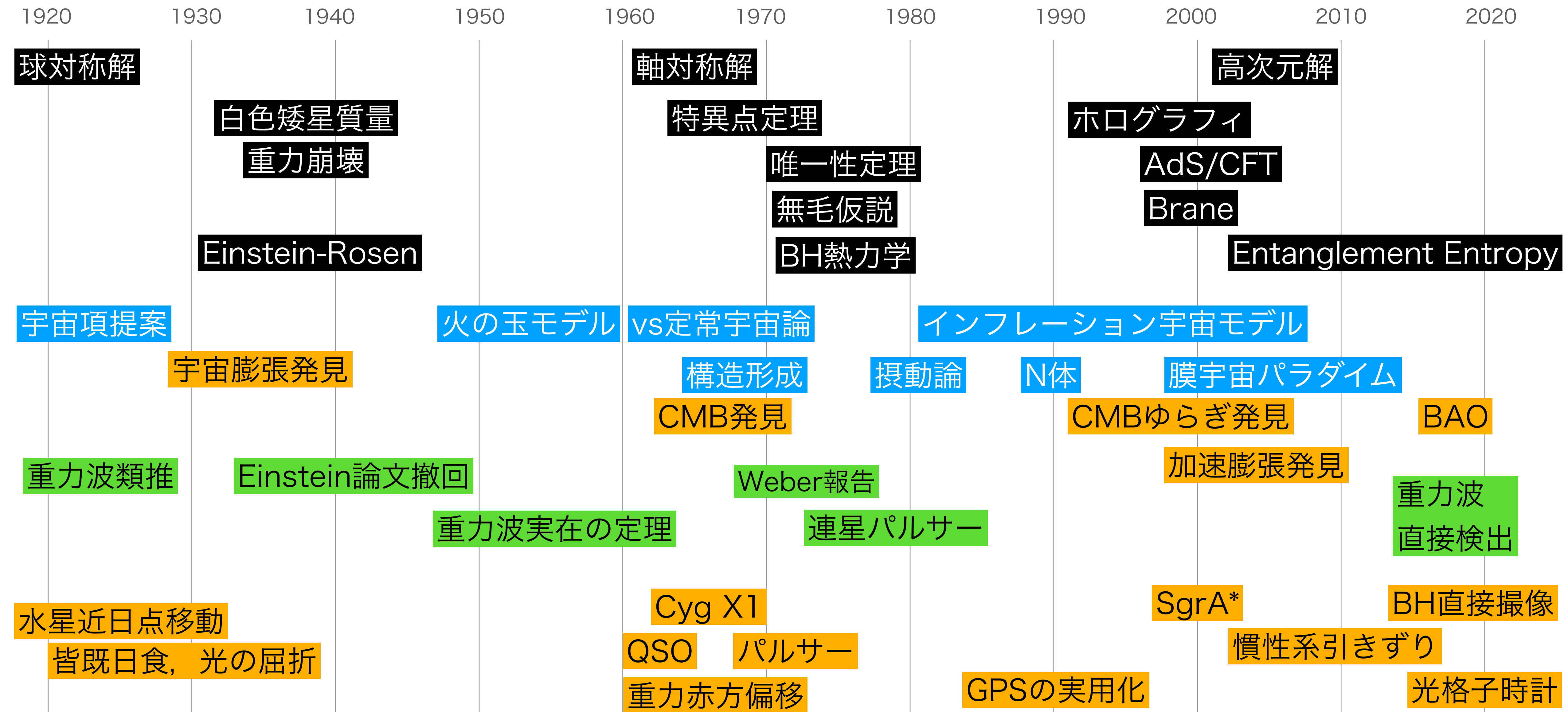
Table 2. Special and general relativistic time dilation between the one in height and the one on the surface. The signature + means delay from the surface of the Earth. We assume Kepler circular motion in space, and the surface clock is supposed at Tokyo, Japan (N 35 degree). SR effect is due to the satellite velocity and the rotation of the Earth surface. The columns PPN 1st/2nd are the contribution of PPN potential terms of first and second order (with $\beta = 1$ in (4)), respectively. The total difference at the GPS satellite is different signature than the other cases, which is due to the high speed of GPS satellite.

orbit	$\Delta t/t$ (total, SR+GR)	$\Delta t/t$ (SR)	$\Delta t/t$ (PPN 1st)	$\Delta t/t$ (PPN 2nd)
GPS (@20184km)	-4.4569×10^{-10}	$+8.2676 \times 10^{-11}$	-5.2836×10^{-10}	-4.5560×10^{-19}
@3177.963km	0	$+2.3124 \times 10^{-10}$	-2.3124×10^{-10}	-2.6810×10^{-20}
ISS (@400km)	$+2.8531 \times 10^{-10}$	$+3.2634 \times 10^{-10}$	-4.1034×10^{-11}	-5.5380×10^{-20}



2502.06104

一般相対性理論の110年



牛アプローチ【まとめ】

「乳牛の乳の生産量を増やすにはどうしたらよいか」



「まず、球対称の牛がいた、と考えよう」

「次に、円筒対称の牛がいた、と考えよう」

「次に、面对称の牛がいた、と考えよう」

「次に、軸対称の牛がいた、と考えよう」

「次に、回転している牛がいた、と考えよう」

「次に、歪んだ牛がいた、と考えよう」

「次に、帯電した牛がいた、と考えよう」

「次に、膨張している牛がいた、と考えよう」

「次に、2頭の牛がいた、と考えよう」

「次に、重力場に補正項を考えよう」

「次に、拡張された重力理論で考えよう」

「次に、重力場と物質場の相互作用を考えよう」

「次に、Newton, PostNewtonianで考えよう」

「原因となるメカニズムを考えよう」

「次に、新しい物質場があった、と考えよう」

「次に、違う物質場で、考えよう」

「次に、ポテンシャルがこうだった、と考えよう」

「次に、スカラー場を2つ考え、couplingさせよう」

「次に、時空の曲率を考えよう」

「次に、違う状態方程式で、考えよう」

「次に、違う回転則で、考えよう」

「次に、違う境界条件で、考えよう」

「次に、違う次元で、考えよう」

「次に、厳密解に基づいたモデルを考えよう」

「次に、厳密解の摂動展開を考えよう」

「次に、他の物理とのアナロジーを考えよう」

おそらく、若手の皆さんが取り組んでいる研究トピックは、
牛のアプローチのどれか。

歴史は繰り返す and/or 学問は螺旋状に進む

ちょっと待った！

論文を書く練習としては、variationはあってもいいけど、 . . .
それで研究として面白い？

Main Idea/Discovery

conjecture

counter-
example

proof

analogy

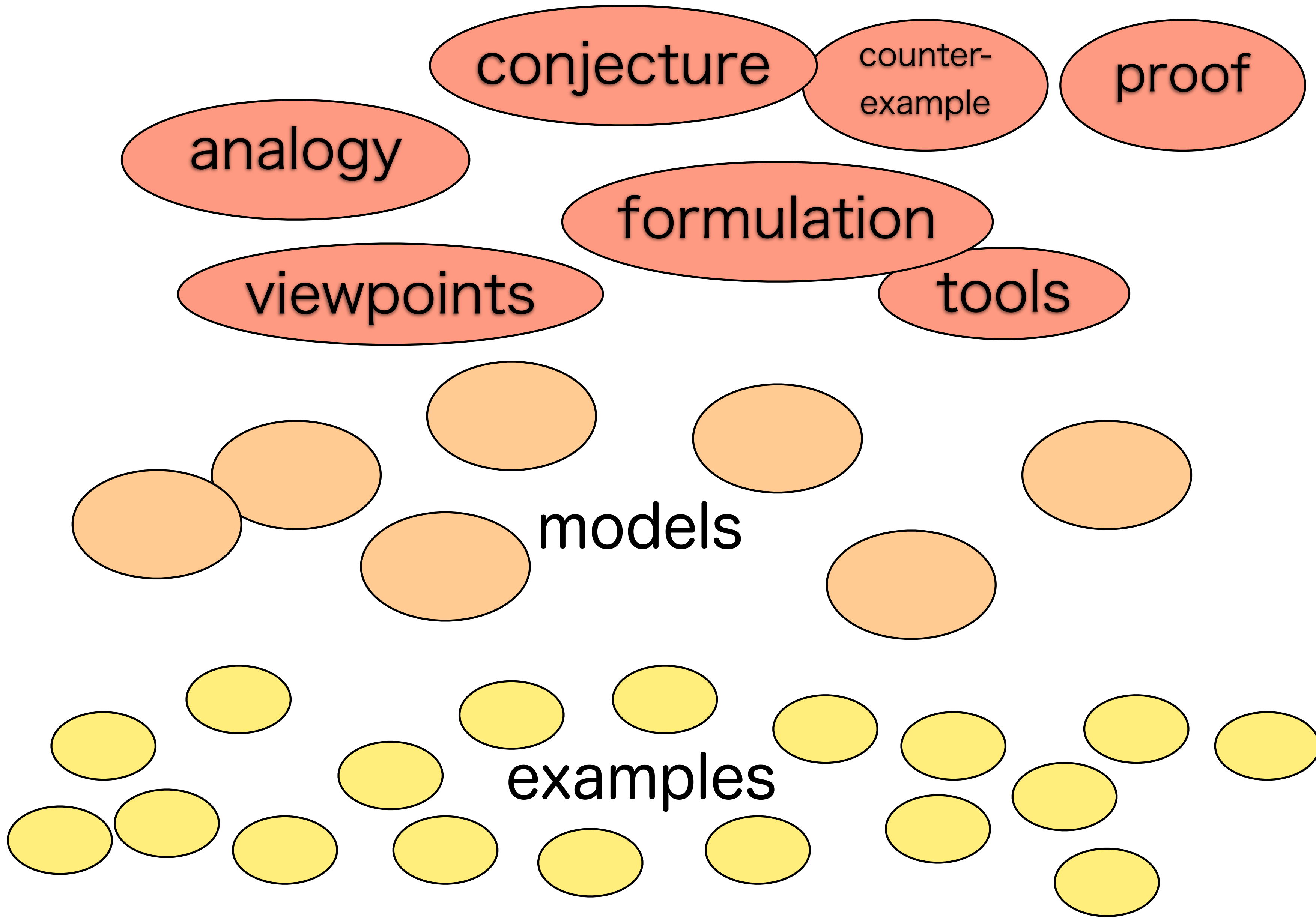
formulation

viewpoints

tools

models

examples



おそらく、若手の皆さんが取り組んでいる研究トピックは、
牛のアプローチのどれか。

歴史は繰り返す and/or 学問は螺旋状に進む

ちょっと待った！

論文を書く練習としては、variationはあってもいいけど、 . . .
それで研究として面白い？

練習を終えたら、本質的な研究を目指そう！

賞味期限の長い研究成果を目指そう

そして、楽しみながら研究を

一般相対性理論110年の概観

依頼された内容 「一般相対性理論の歴史と重力波を」

このスライドpdf

202507_SummerSchool.pdf



論文選 16ページ

一般相対性理論110年論文選.pdf



Contents

ブラックホール研究の歴史

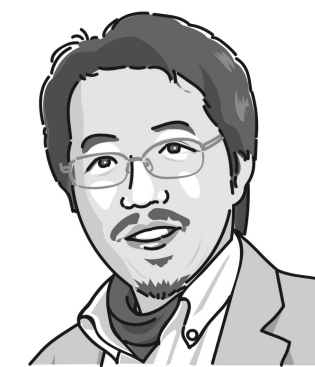
宇宙論研究の歴史

重力波研究の歴史

相対論検証研究の歴史

...

若い人へのメッセージ



真貝寿明(大阪工業大学 情報科学部)

hisaaki.shinkai@oit.ac.jp

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

ワームホール・ワープ・タイムマシン研究の歴史

1920 1930 1940 1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020

Einstein-Rosen

33 Einstein-Rosen

Goedel Universe

37 van Stockum

49 Goedel

円筒回転

74 Tipler

tachyon

67 Feinberg

通過可能WH

88 Morris-Thorne, AJP 56, 395

過去へ

88 Morris-Thorne-Yurtserver, PRL 61, 3182

WH不安定

02 Shinkai-Hayward

13 Torii-Shinkai

strings

91 Gott III

Warp

94 Alcubierre

Chronology

92 Hawking

『不適切にも
ほどがある』

「ワームホール」

『コンタクト』

『インターステラー』

15 James+



一般相対性理論の110年(ノーベル賞)

