

# 最近の宇宙研究の進展から

1. 太陽系内惑星探査
2. 太陽系外惑星探査 2018年ノーベル物理学賞
3. ブラックホールの観測 2020年ノーベル物理学賞
4. 重力波観測の現状 2017年ノーベル物理学賞
5. 時計を使った相対性理論の検証



真貝寿明 (しんかい ひさあき)

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員

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



2021/3/10 サークルすばる @大阪中央会館

# 最近の宇宙研究の進展から

## 1. 太陽系内惑星探査

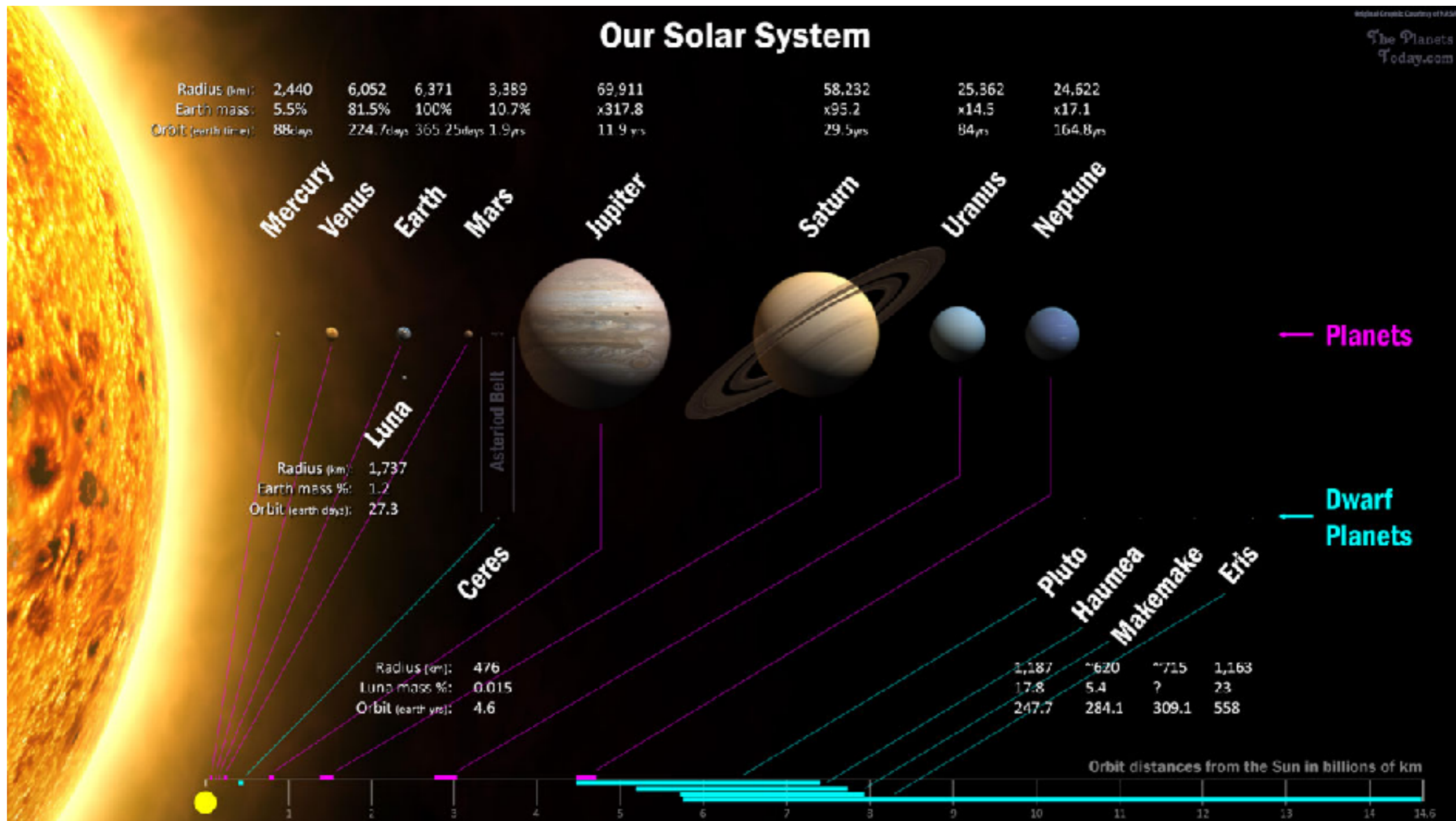
2. 太陽系外惑星探査 2018年ノーベル物理学賞
3. ブラックホールの観測 2020年ノーベル物理学賞
4. 重力波観測の現状 2017年ノーベル物理学賞
5. 時計を使った相対性理論の検証

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

2021/3/10 サークルすばる @大阪中央会館



# 太陽系 惑星・準惑星



水金地火ヶ 木 土 天海冥ハマエ

[https://www.theplanetstoday.com/solar\\_system\\_map.html](https://www.theplanetstoday.com/solar_system_map.html)

# 太陽系を回る天体の分類

表 1.5 太陽系を回る天体の分類

	定義
惑星	(1) 十分な質量があってほぼ球形の天体である, (2) 太陽を周回する軌道である, (3) その軌道上では他の天体を一掃してしまっている, の3条件をみたす天体
準惑星	惑星の定義の(1)(2)をみたし, かつ (3) その軌道近傍では他の天体が存在する (4) 衛星ではない天体.
太陽系小天体	冥王星型天体以外の太陽系外縁天体, 小惑星, 彗星, 惑星間塵など.

惑星

planet

準惑星

dwarf planet

太陽系小天体

small solar system bodies

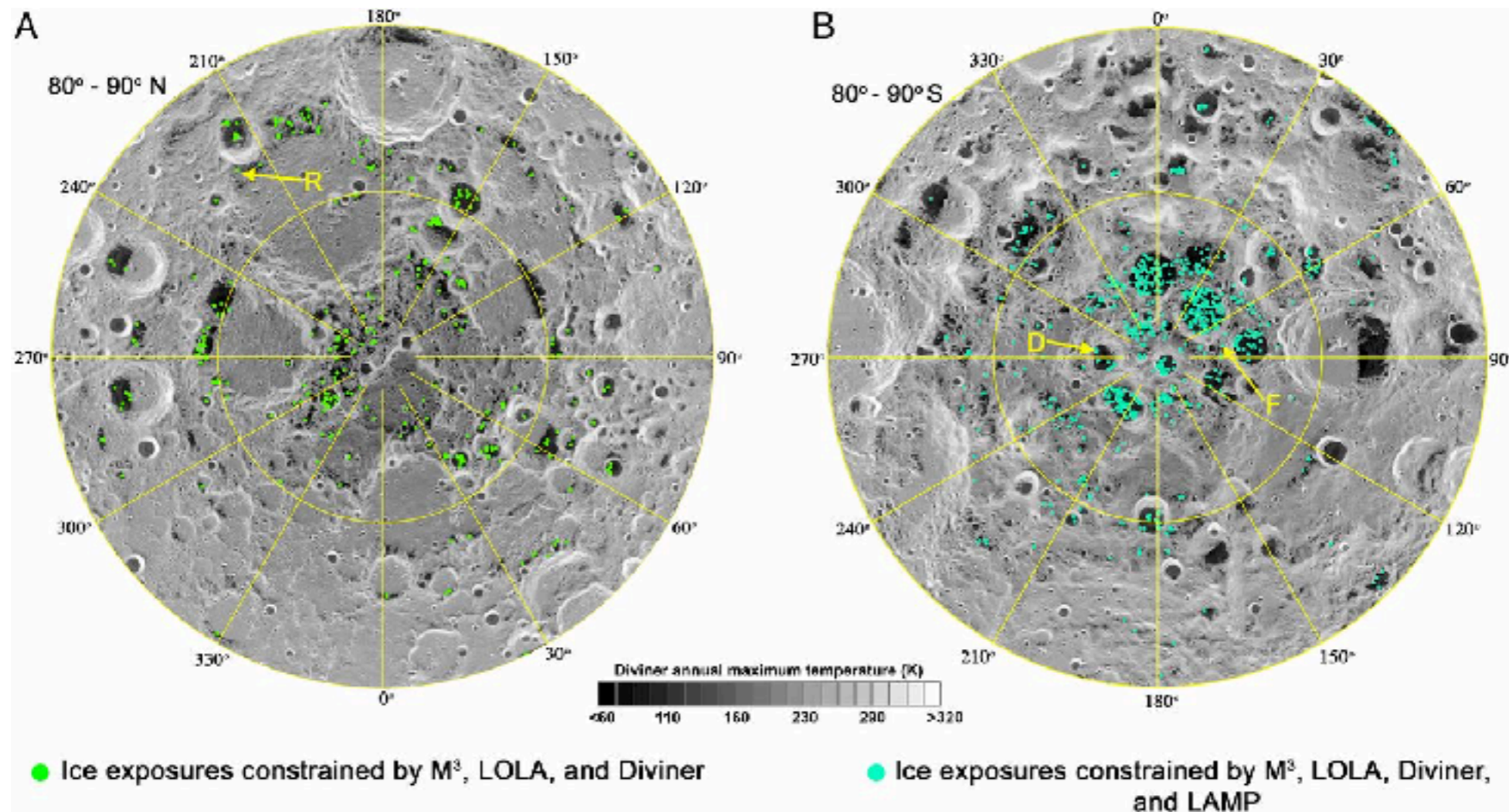
# 太陽系の惑星と準惑星

**表 1.6** 太陽系の惑星と準惑星.  $a$  は軌道長半径. 離心率はどれだけ円軌道からずれているかを示す (§2.2.2 参照). ハウメアの楕円体の大きさは  $1960 \times 1518 \times 996$  km.

天体名	$a$ [AU]	周期 [年]	離心率	半径 [km]	質量 [kg]	分類	
太陽	Sun	–	–	–	696000	$1.99 \times 10^{30}$	–
水星	Mercury	0.39	0.24	0.21	2440	$3.3 \times 10^{23}$	岩石惑星
金星	Venus	0.72	0.62	0.007	6052	$4.9 \times 10^{24}$	岩石惑星
地球	Earth	1.00	1.00	0.02	6378	$6.0 \times 10^{24}$	岩石惑星
火星	Mars	1.52	1.88	0.09	3396	$6.4 \times 10^{23}$	岩石惑星
木星	Jupiter	5.20	11.86	0.05	71492	$1.9 \times 10^{27}$	ガス惑星
土星	Saturn	9.55	29.46	0.06	60268	$5.7 \times 10^{26}$	ガス惑星
天王星	Uranus	19.22	84.02	0.05	25559	$8.7 \times 10^{25}$	ガス惑星
海王星	Neptune	30.11	164.77	0.009	24764	$1.0 \times 10^{26}$	氷惑星
ケレス	Ceres	2.77	4.6	0.08	474	$9.5 \times 10^{20}$	
冥王星	Pluto	39.54	247.80	0.25	1151	$1.3 \times 10^{22}$	
ハウメア	Haumea	43.03	282.29	0.197	楕円体	$4.0 \times 10^{21}$	
マケマケ	Makemake	45.35	305.45	0.163	??	$4.0 \times 10^{21}?$	
エリス	Eris	68.05	305.45	0.163	??	$1.66 \times 10^{22}?$	

## 月に水がある！

2018/8/29



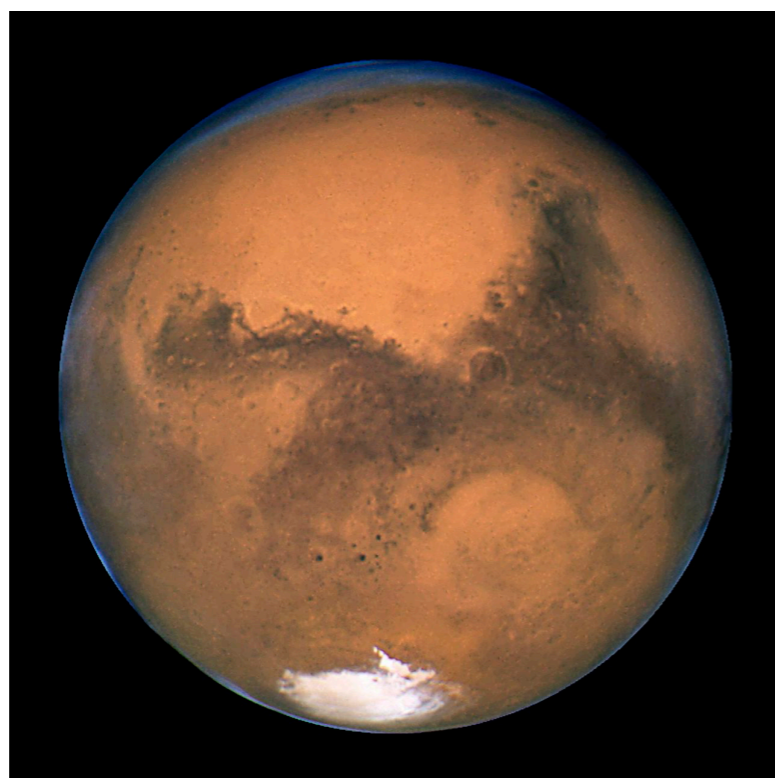
2008年から2009年の間に運用されていたインドの月周回機「チャンドラヤーン1号」に搭載されたNASAのレーダー「Moon Mineralogy Mapper (M3)」が取得した観測データの分析により、月面の極域に水が氷の状態で存在する証拠が直接観測された。

氷が観測されたのは、極域のクレーター内にある「永久影」と呼ばれる常に日陰となる領域で、氷は地表数ミリメートルの深さにある、という。マイナス170°Cの領域なので、真空でも水が蒸発しない状態だという。

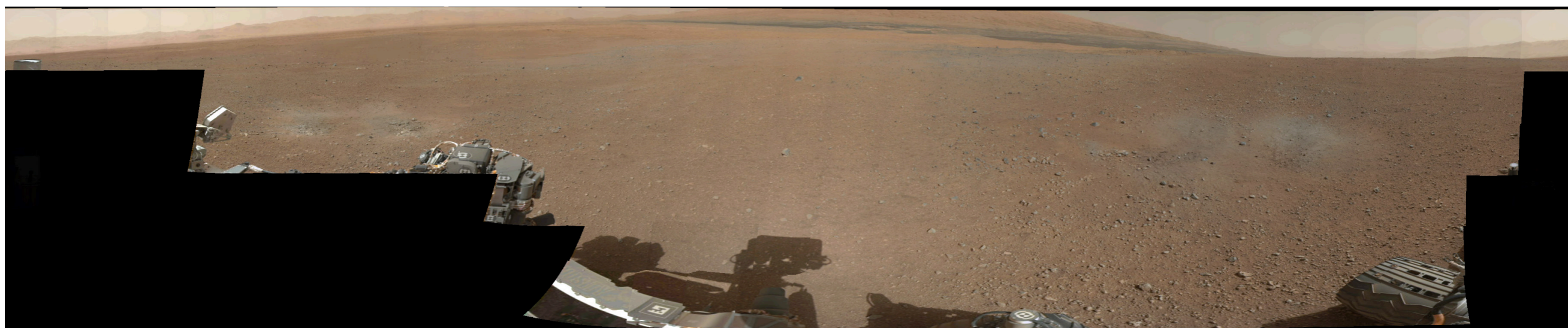
<https://doi.org/10.1073/pnas.1802345115>

<https://wired.jp/2018/08/29/moon-water-evidence/>

# 太陽系惑星探査：NASAによる火星探査



火星の大気は 95% が二酸化炭素. 大気圧は地球の 0.75%. 気温は最高 20°C. 重力は地球の 40%.



キュリオシティが着陸直後に撮影した火星表面のパノラマ写真.

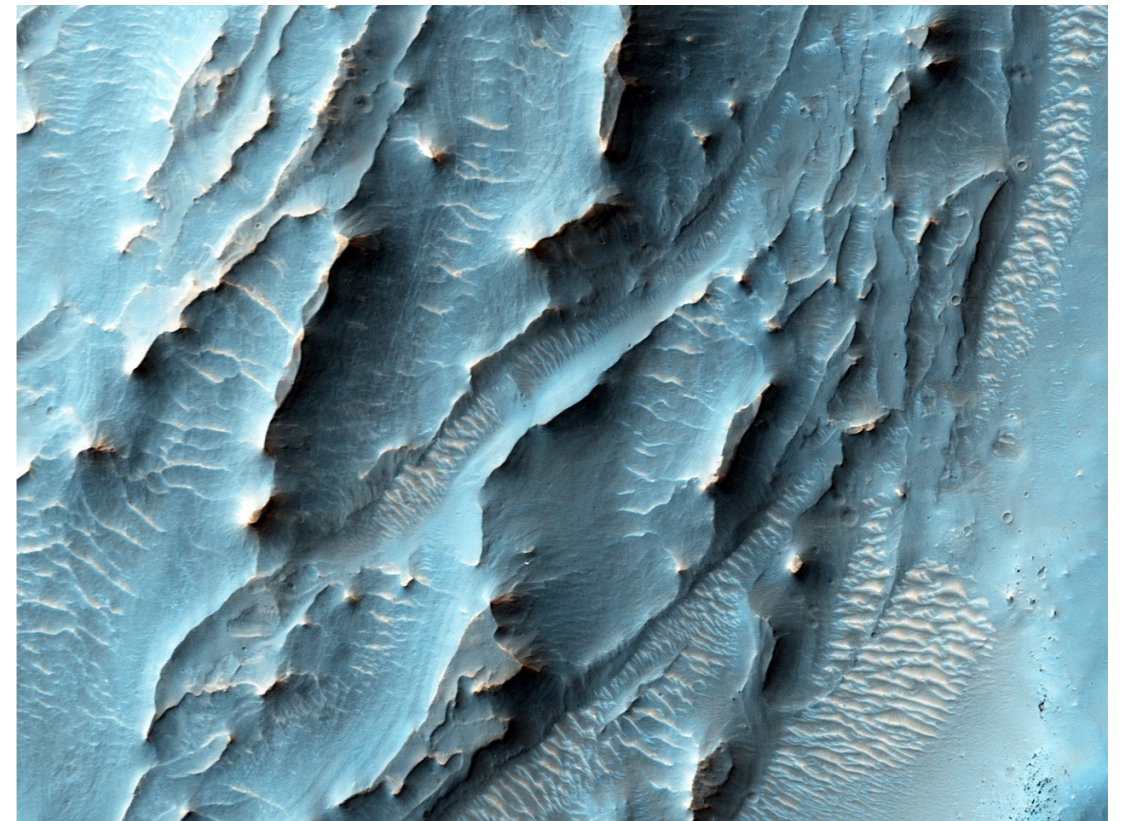
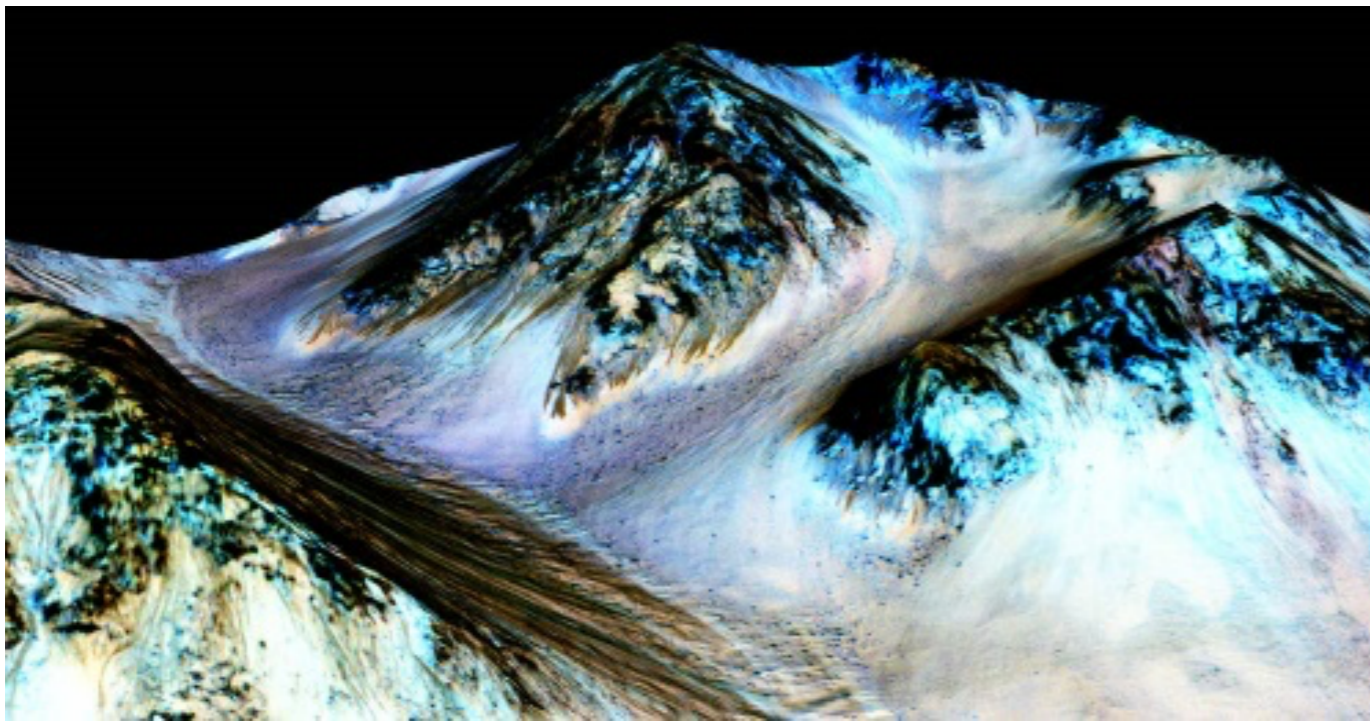
2012年8月13日 NASA

# 火星に水がある!

火星には過去に液体の水が存在した (2004年発表)

**極地方では現在も水が存在している可能性** (2015年9月29日発表)

火星の大気は太陽から吹き出したプラズマ流(太陽風)によって剥ぎ取られた



斜面上を約 100m の長さにとわたって伸びる暗い筋模様が液体の水の存在を示している。  
山の斜面と上空からの写真。



# 火星の鉱物採集調査

NASA Perseverance

2020年7月30日打ち上げ, 2021年2月19日着陸



微生物生息可能性の探索

土壌サンプルの収集、火星の表面に保存

火星の大気から酸素生産を試行

中国 天問1号 Tianwen-1

2020年7月打ち上げ,

2021年2月火星軌道到達.

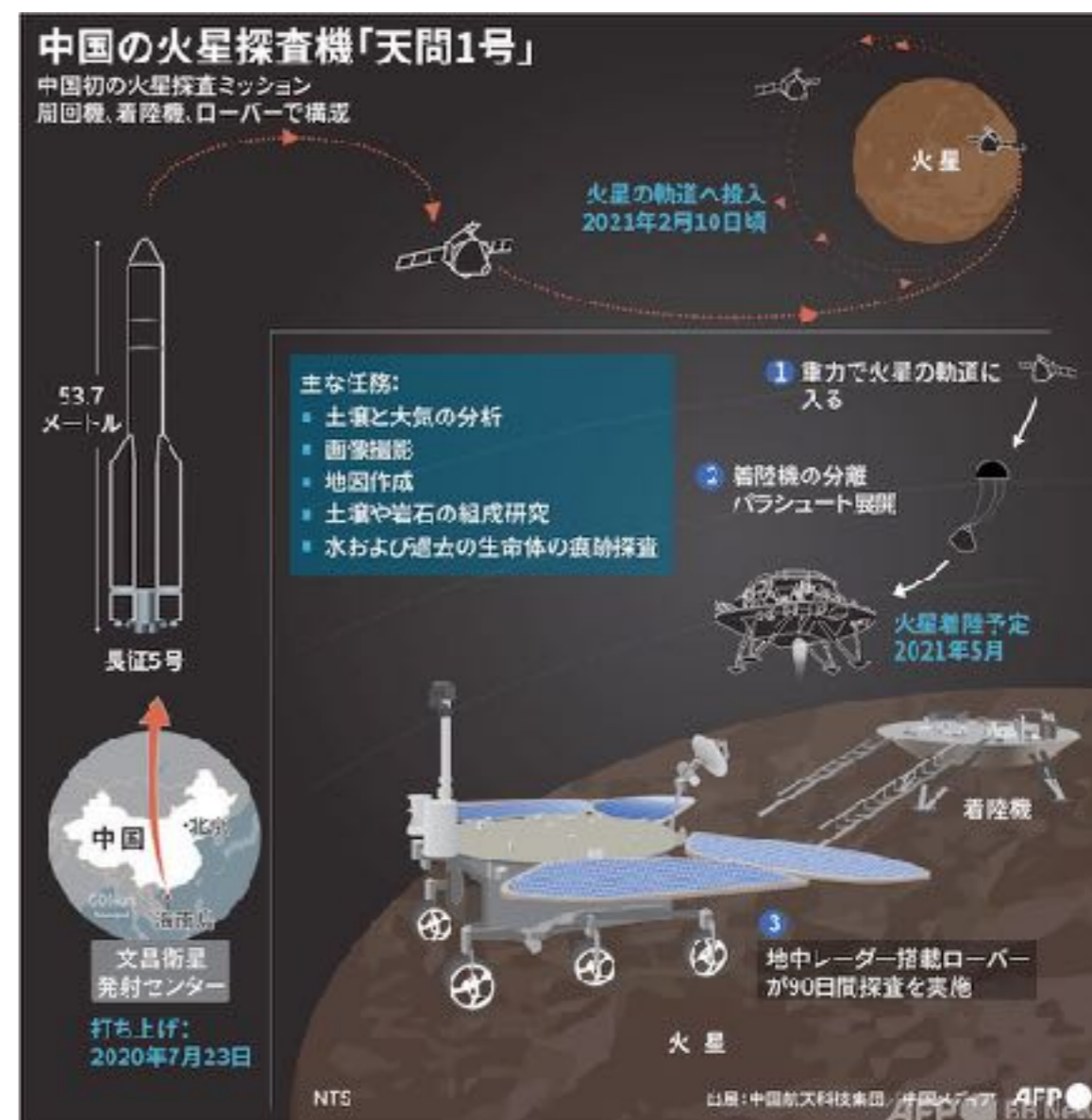
5月着陸予定, 90日間調査.

UAE Hope

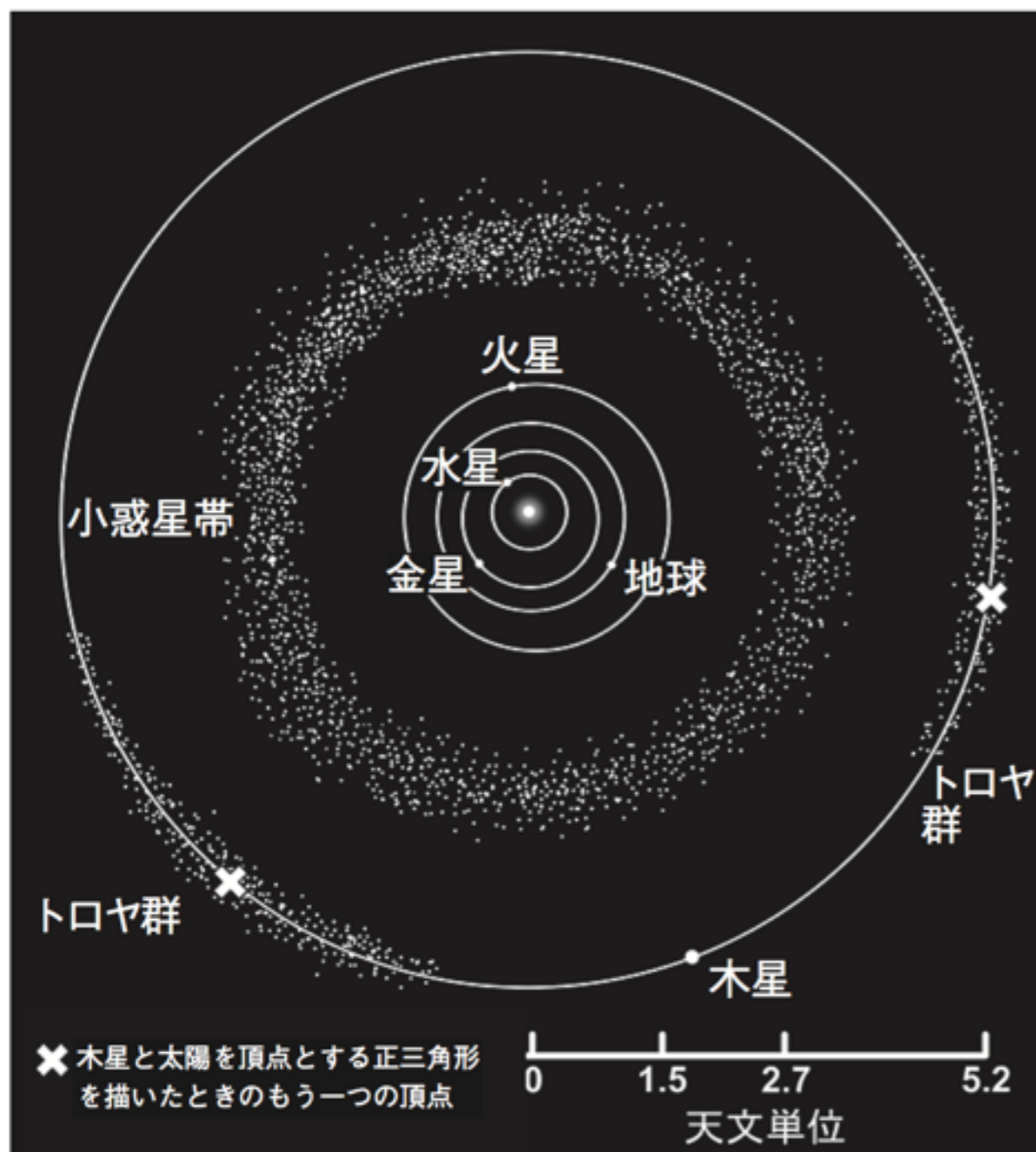
2020年7月打ち上げ (JAXA打ち上げ)

2021年2月火星軌道到達.

2年間周回して大気など調査.

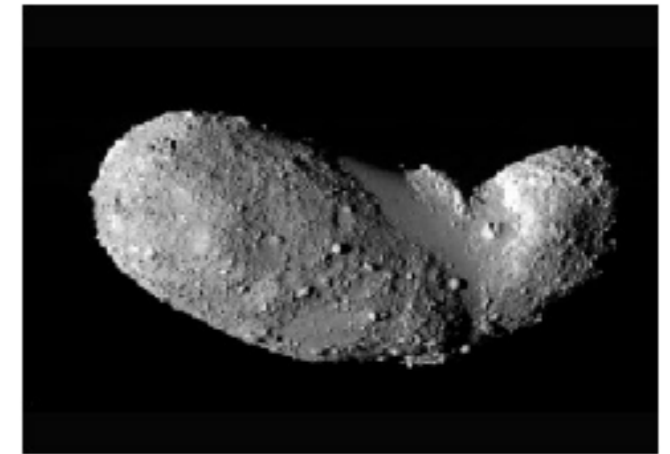
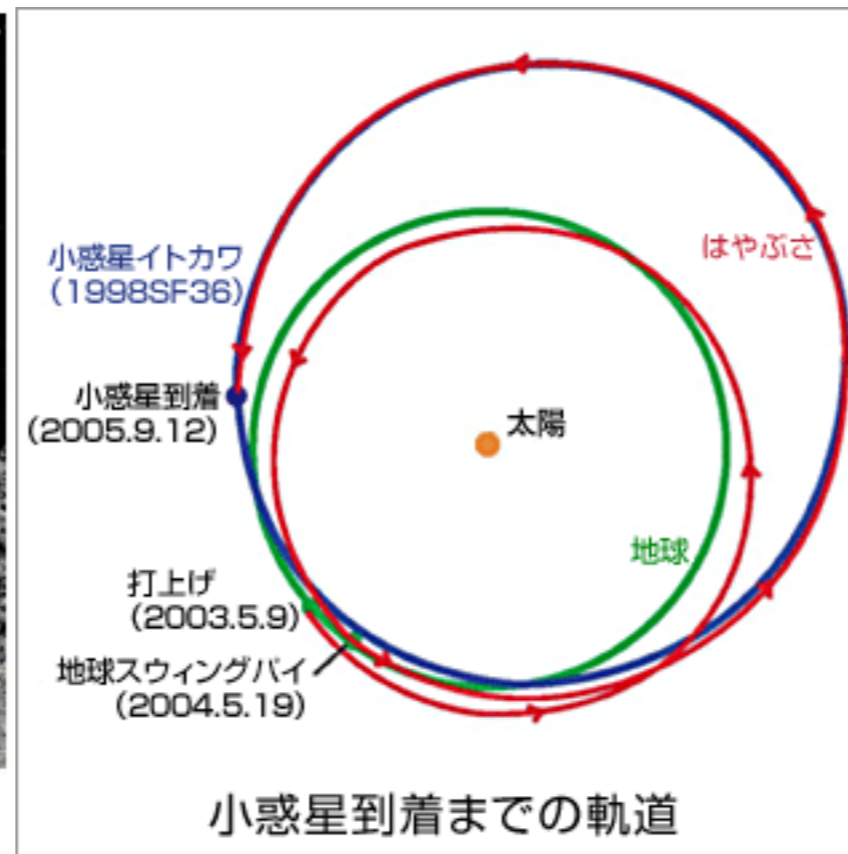


# 太陽系の小惑星



**図 1.20** 小惑星帯は火星と木星軌道の間にある。また、木星軌道にはトロヤ群と呼ばれる小惑星帯もある。トロヤ群は太陽と木星を2つの頂点として正三角形を描いたときの3つ目の頂点付近にある。

# 小惑星探査機 はやぶさ (2003年打ち上げ-2010年帰還)

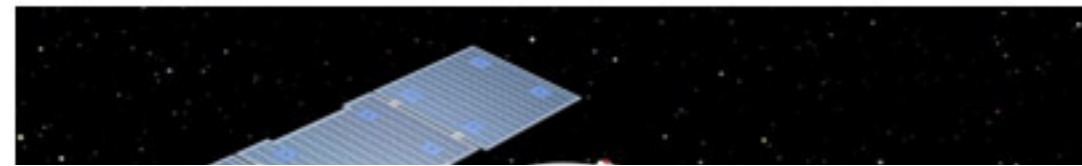


- 2003年5月9日 M-Vロケット5号機によって打ち上げ
- 2004年5月19日 地球スウィングバイ
- 2005年9月12日 小惑星イトカワに到着
- 2005年11月 史上初の小惑星への着陸を成功
- 2006年1月 通信途絶, 燃料漏れなどのトラブル
- 2010年6月 地球に帰還 (予定より3年遅れ)

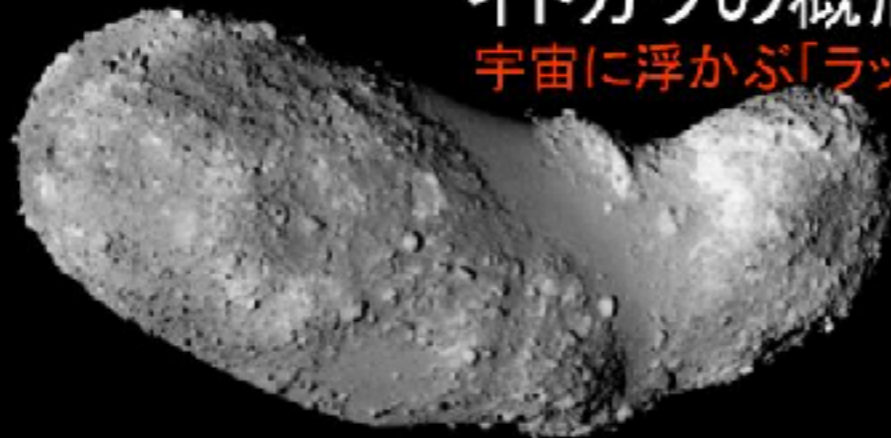


糸川英夫 (1912-1999)  
「日本の宇宙開発・ロケット開発の父」

# 小惑星探査機 はやぶさ (2003年打ち上げ-2010年帰還)



イトカワの概形  
宇宙に浮かぶ「ラッコ」



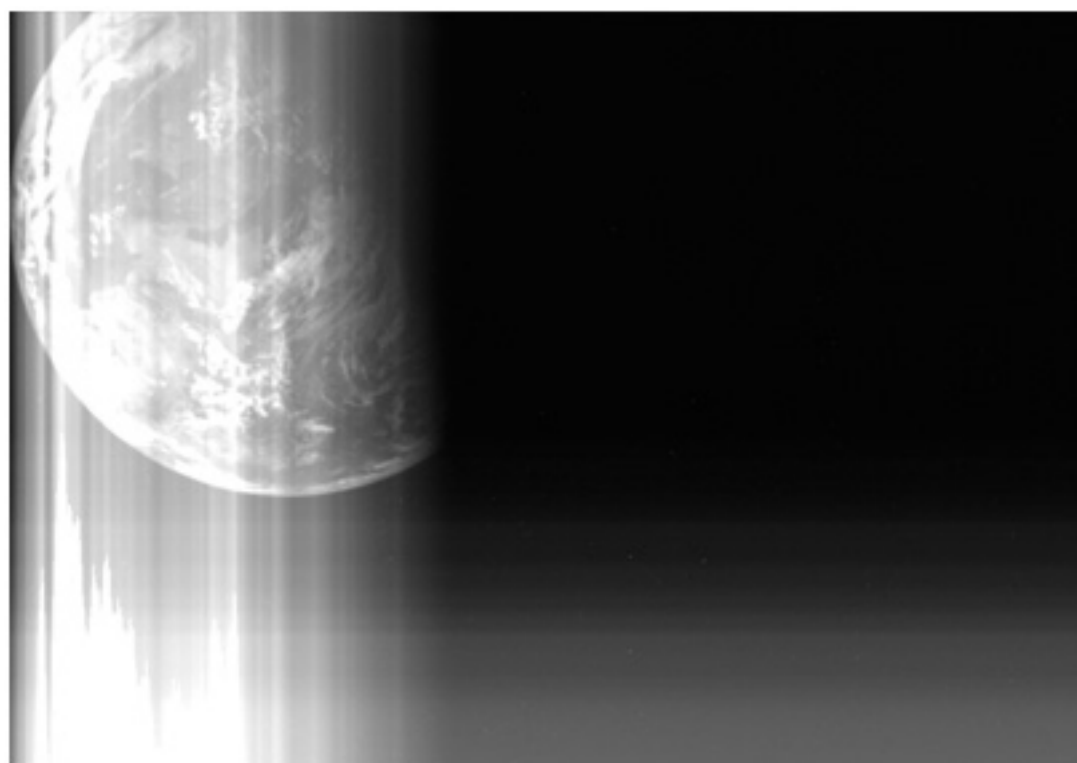
太陽系黄道面を海面、小惑星をそこに浮かぶラッコに見立てた。頭部と胴体、くびれた首、腹から両脇に掛けてと背に滑らかな表面が見える。右は、運用中の関係者に出回ったアスキーアート。



+315 deg / 2005-09-14T18:10:09.98 / 2376966800



# 小惑星探査機 はやぶさ (2003年打ち上げ-2010年帰還)



はやぶさが最後に撮影した写真 (地球)



大西浩次氏



2010年6月カプセル回収

# 小惑星探査機 はやぶさ2 (2014年12月打ち上げ)

太陽系の起源・進化を解明し、生命の原材料物質を調べるため、小惑星に着陸し、地球に岩石を持ち帰る2回目のプロジェクト小惑星探査機「はやぶさ2」が、いよいよ打ち上げられる。

探査の候補となっているのは「1999 JU3」という小惑星で、地球に接近する軌道を持つ地球接近小惑星(NEO)のひとつ。大きさは900m程度。

鉱物・水・有機物の相互作用を明らかにし、小惑星の再集積過程、内部構造、地下物質を調査することにより、小惑星の形成過程を調べる。

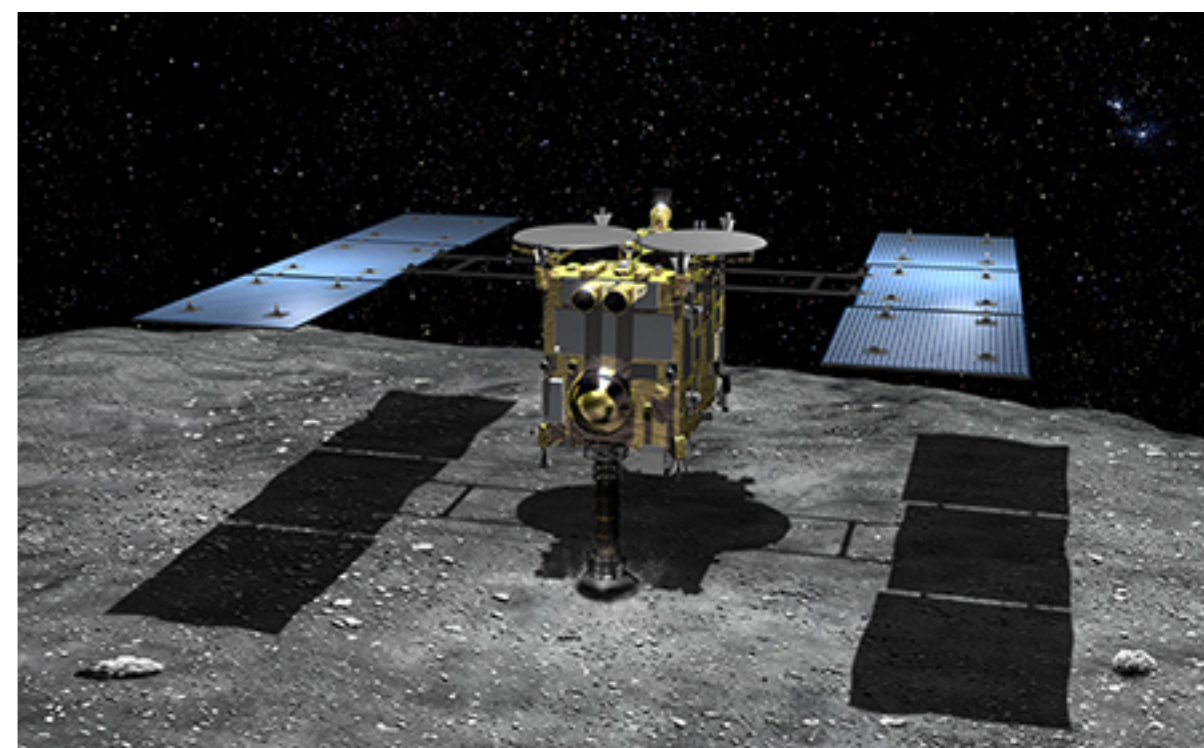
2018年小惑星着陸, 2020年地球へ帰還予定。

2014/11/30

12月6日帰還  
ほぼ予定どおり

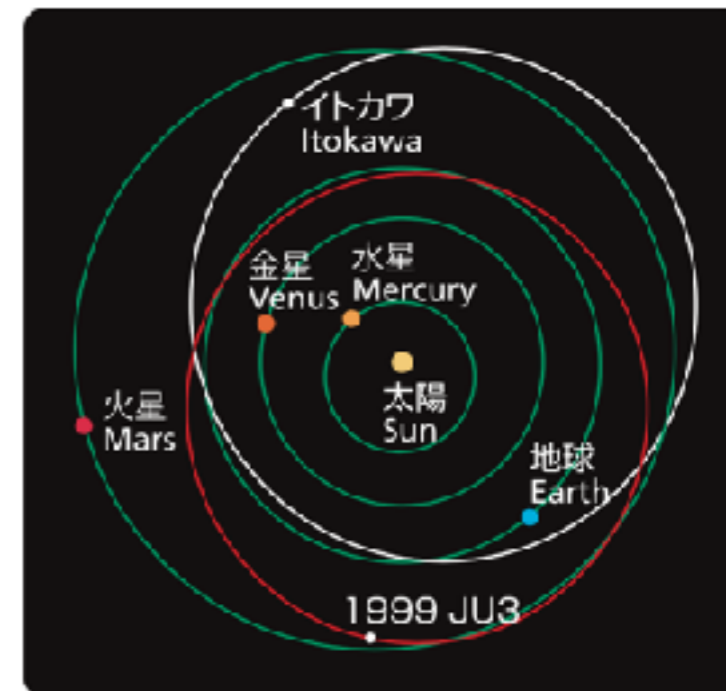
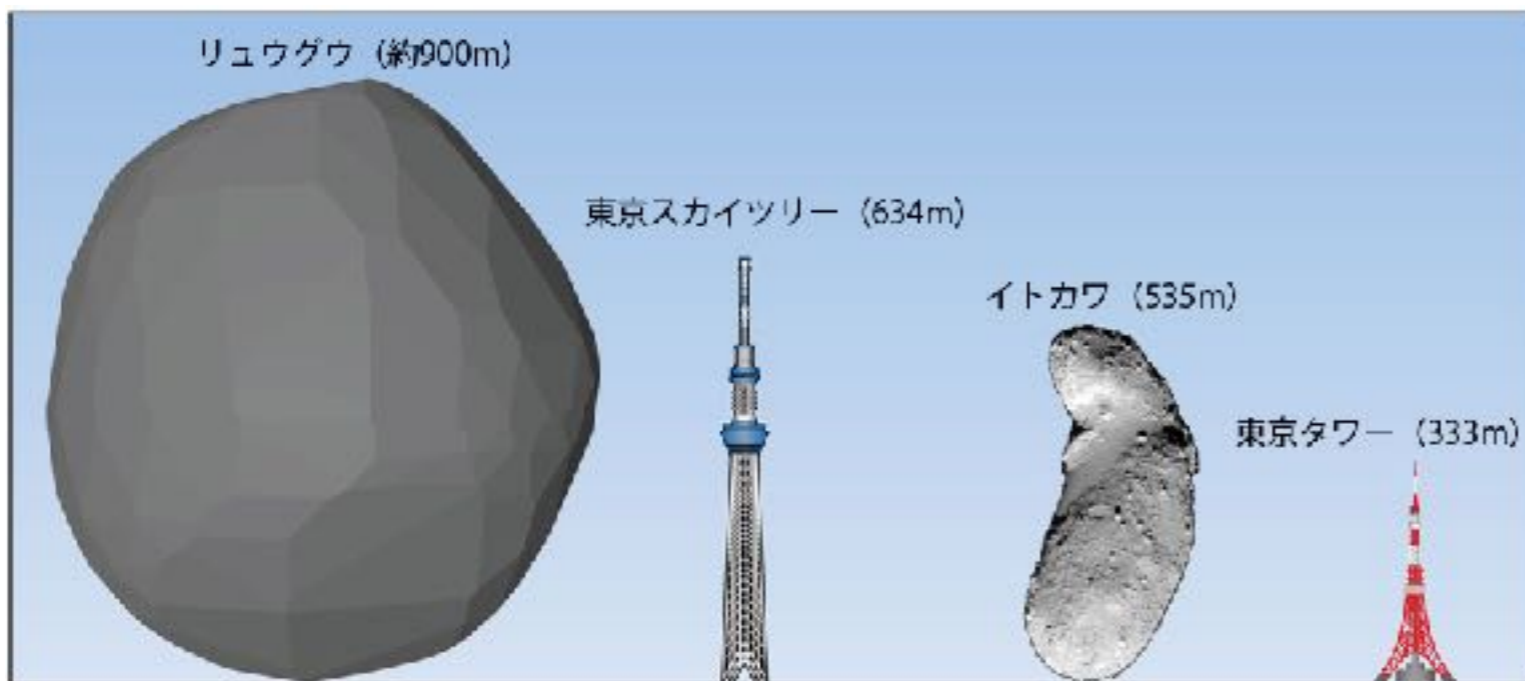
リュウグウ  
と命名

## リュウグウへ

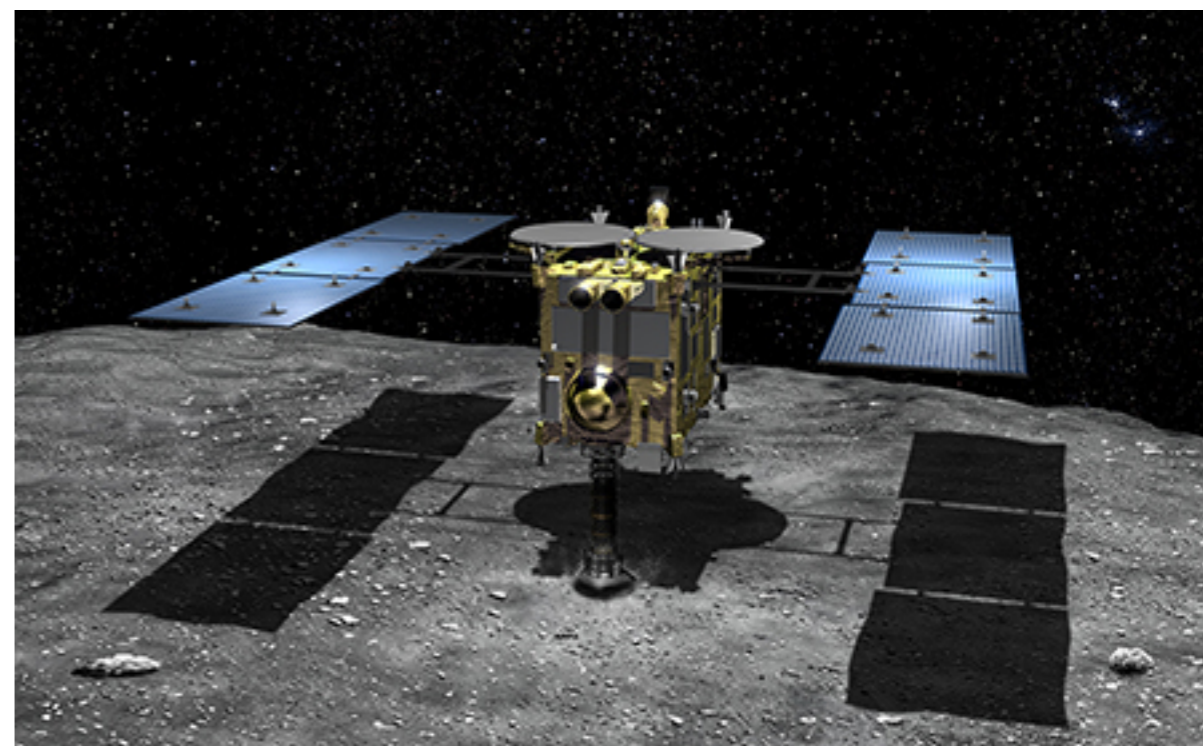


# 小惑星探査機 はやぶさ2 (2014年12月打ち上げ)

## リュウグウへ



<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20180323/>

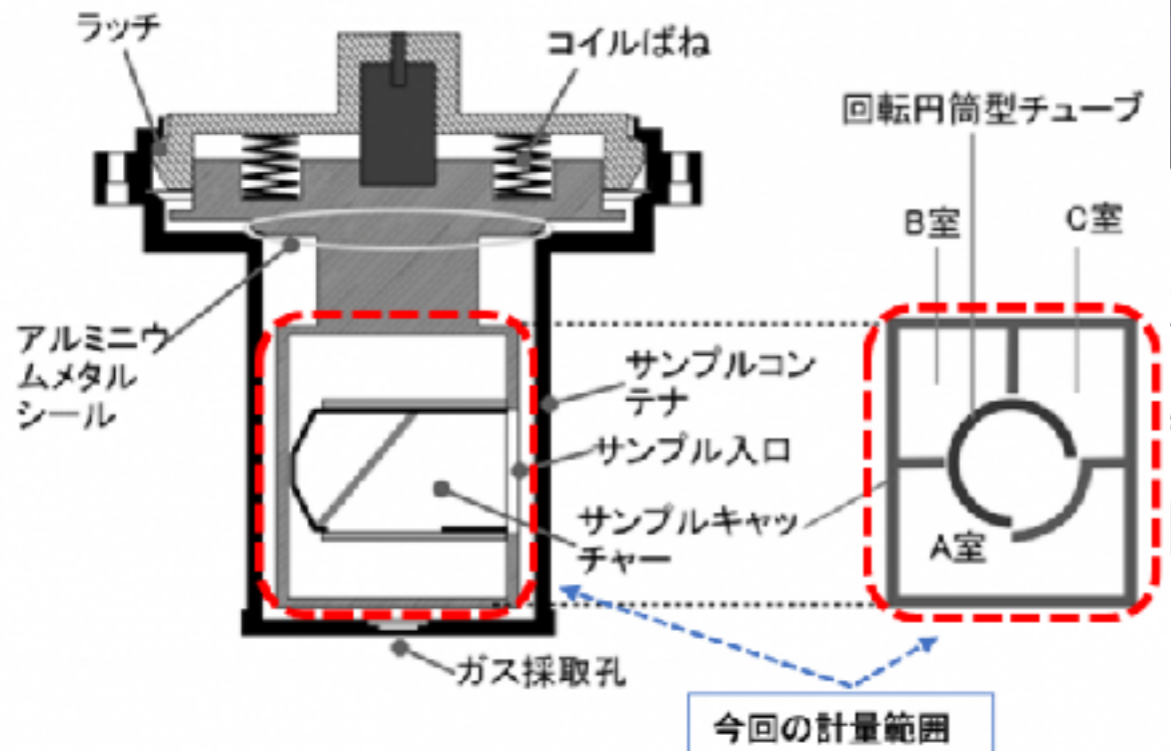






# 小惑星探査機 はやぶさ2 (小惑星からの試料回収成功！)

JAXA



2020年12月18日

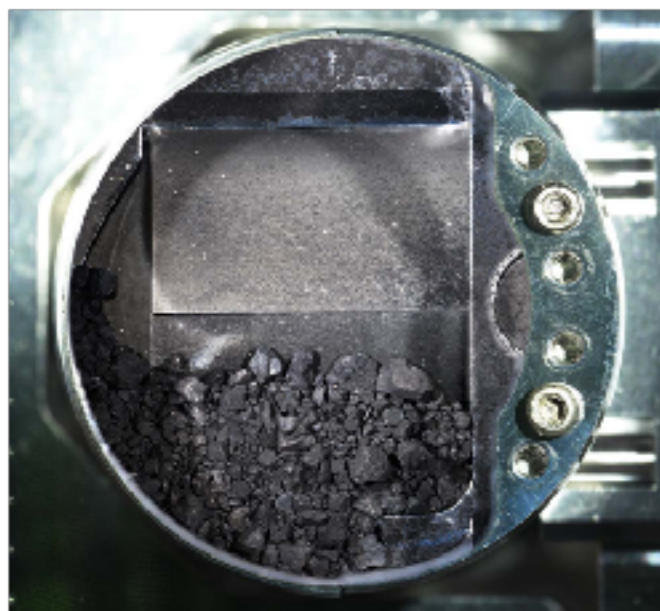
## 小惑星探査機「はやぶさ2」が採取した小惑星 Ryugu(リュウグウ)サンプルは約5.4グラム

小惑星探査機「はやぶさ2」再突入カプセルにより地球帰還した小惑星Ryugu(リュウグウ)サンプルの重量が約5.4グラムであることがわかりました。

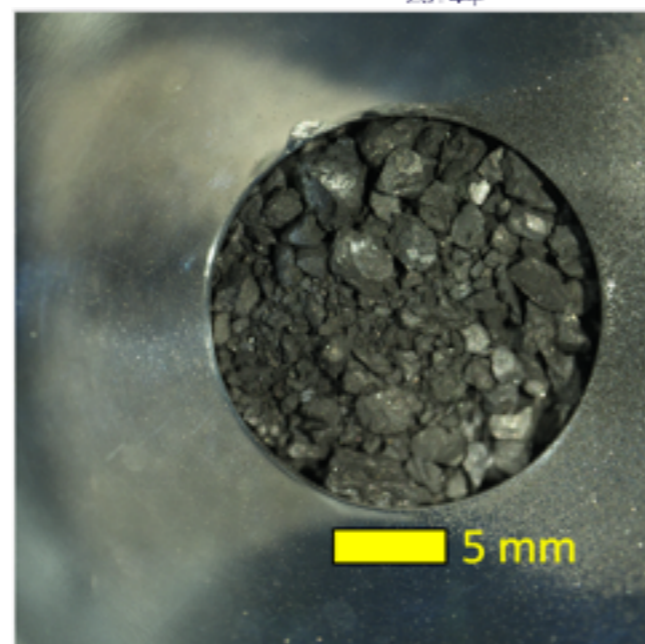
これは、2020年12月18日にJAXA相模原キャンパス内地球外試料キュレーションセンターにて、小惑星探査機「はやぶさ2」再突入カプセルより取り出したサンプルコンテナ内の「サンプルキャッチャー」全体としてサンプル込みで秤量することにより、打上げ前の「サンプルキャッチャー」重量との差分から、採取したサンプルのおおよその総重量(A、B、C室内サンプルの合計)を算出しました。これには12月14日にサンプルコンテナの底面に脱落した「サンプルキャッチャー」外のサンプル量は含まれません。

「はやぶさ2」設計時の目標サンプル収量として、初期分析に必要な科学分析を実施できるだけの量としていた0.1グラムを大きく超えるサンプル量が採取できていたこととなります。

<http://www.isas.jaxa.jp/topics/002526.html>



A室開封後の画像



[http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20201225\\_samples/index.html](http://www.hayabusa2.jaxa.jp/topics/20201225_samples/index.html)

# 最近の宇宙研究の進展から

1. 太陽系内惑星探査
2. **太陽系外惑星探査** 2018年ノーベル物理学賞
3. ブラックホールの観測 2020年ノーベル物理学賞
4. 重力波観測の現状 2017年ノーベル物理学賞
5. 時計を使った相対性理論の検証

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

2021/3/10 サークルすばる @大阪中央会館



# ハビタブルゾーン

ハビタブルゾーン(habitable zone, 生命居住可能ゾーン)

宇宙の中で生命が誕生するのに適した環境となる領域

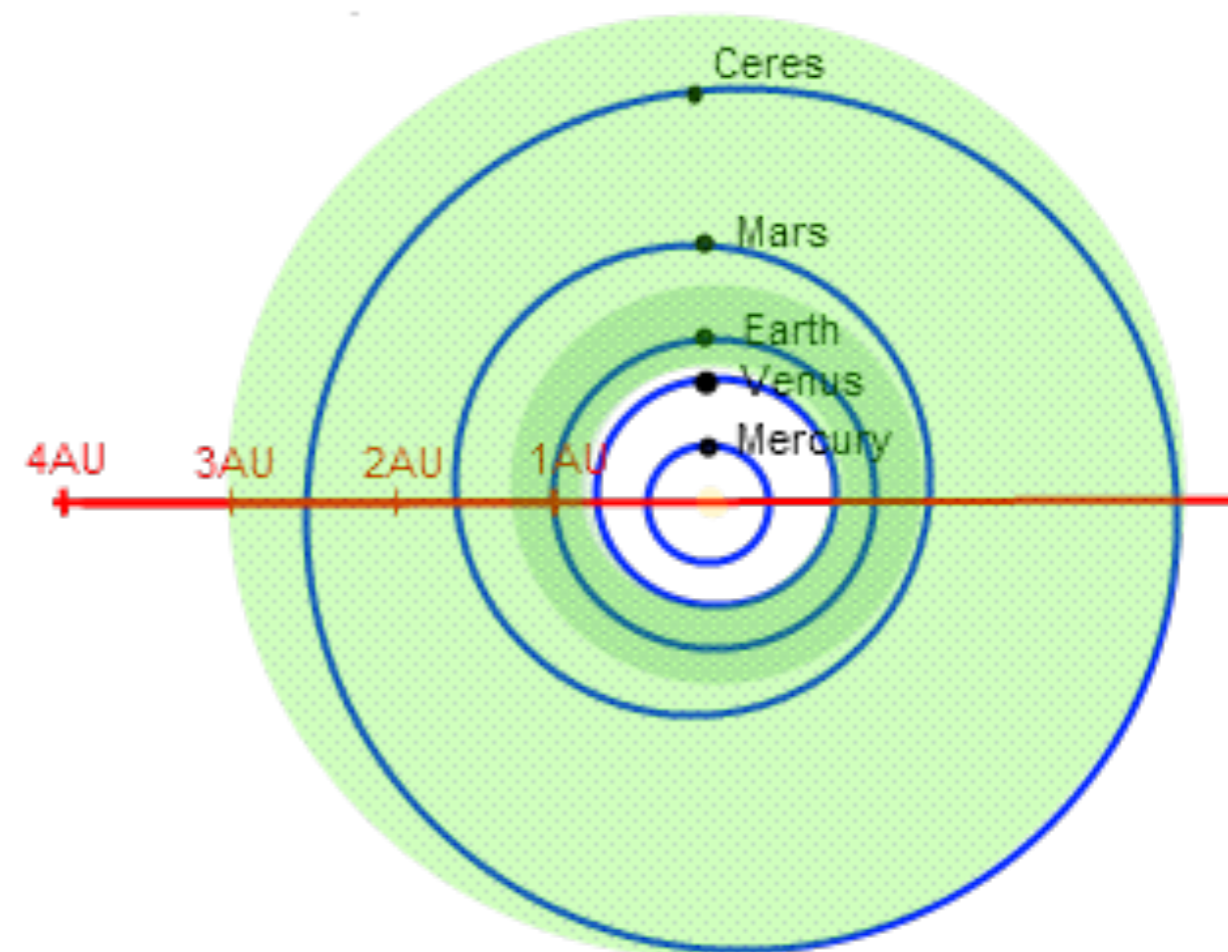
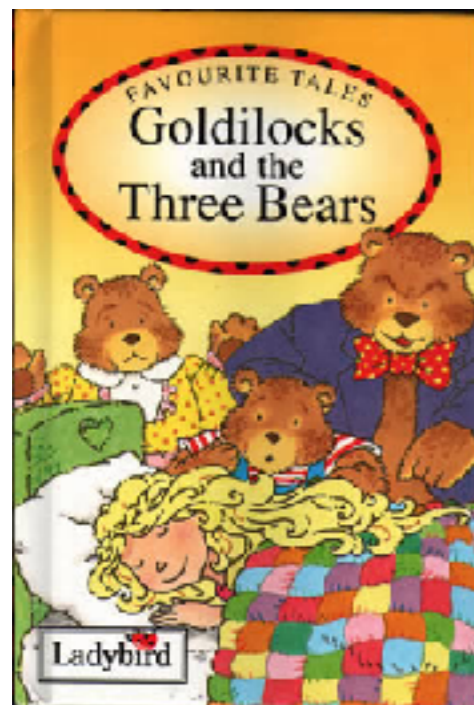
条件1：水が液体として存在できる位置に惑星があること

= **ゴルディロックズゾーン(Goldilocks zone)**

$180\text{ K} < \text{Equilibrium (T)} < 310\text{ K}$

条件2：岩石惑星であること

(ガス惑星ではないこと)



# 探査の方法

## ★直接観測

惑星からの光を直接観測する方法。 (2008年から発見)

## ★位置天文学法 (Astrometry法)

巨大な惑星によって恒星がふらつく様子を位置天文学的手法により精密観測する方法。 (2009年から発見)

## ★視線速度法 (Doppler法)

惑星によって恒星が視線方向にふらついた時に起こるドップラー効果によるスペクトル変化を調べる方法。 (2009年までは最多)

## ★食検出法 (transit法)

惑星が恒星の前を横切る時の明るさの変化によって惑星を探する方法。  
(2011年よりKepler衛星が大量発見中)

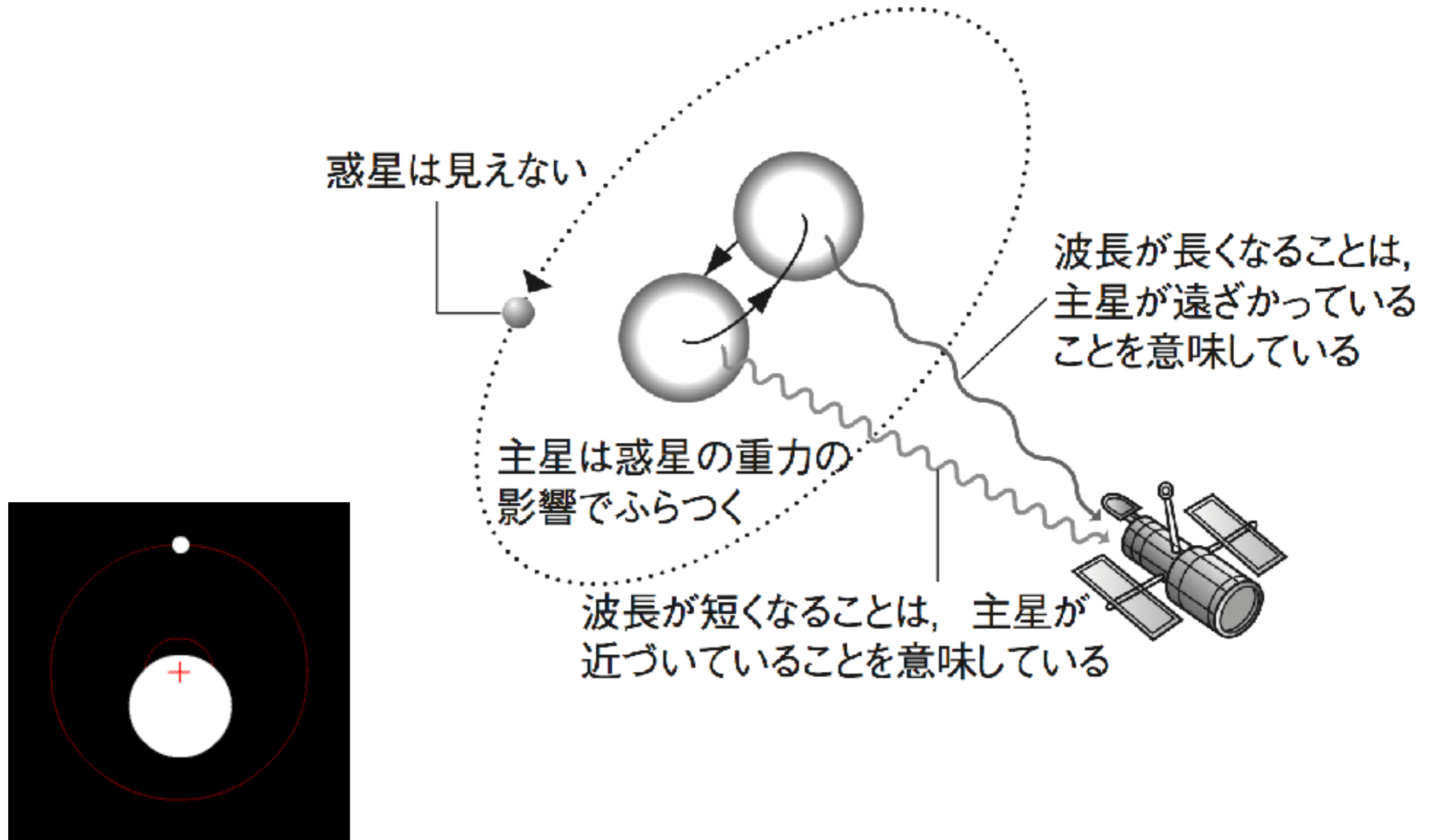
## ★重力レンズ法 (micro lensing法)

惑星による背後の天体からの光の集光現象を利用する方法。 (2005年から発見)

## ★パルサー・タイミング法

周期的に電磁波を放出するパルサーに惑星が存在する場合、パルスに周期的なズレが見られることを利用する方法。 (初めて発見された系外惑星)

# 視線速度法（ドップラー法）

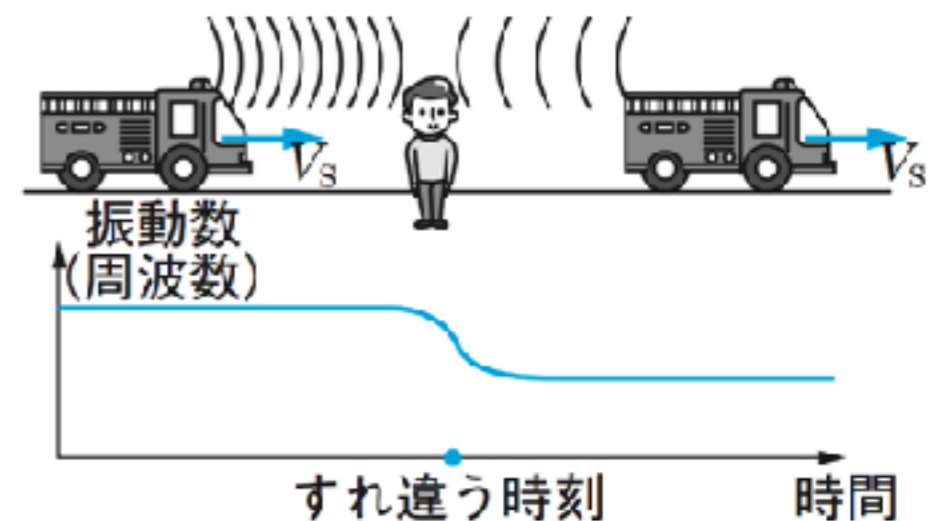
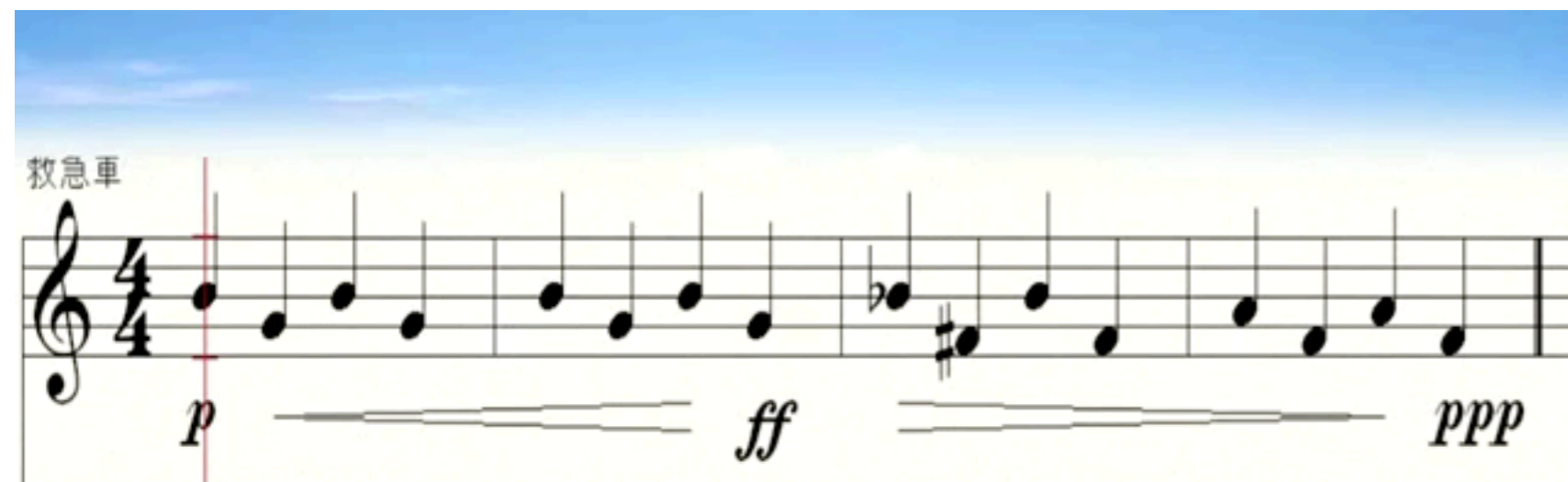


# ドップラー効果



近づくとき  
高い音  
大きい音に

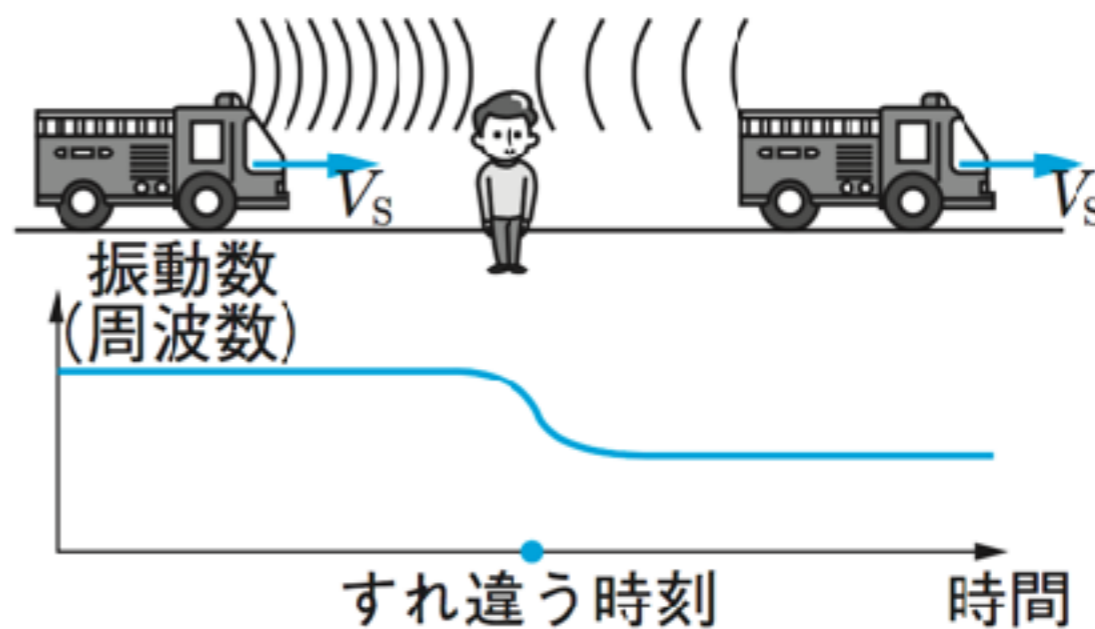
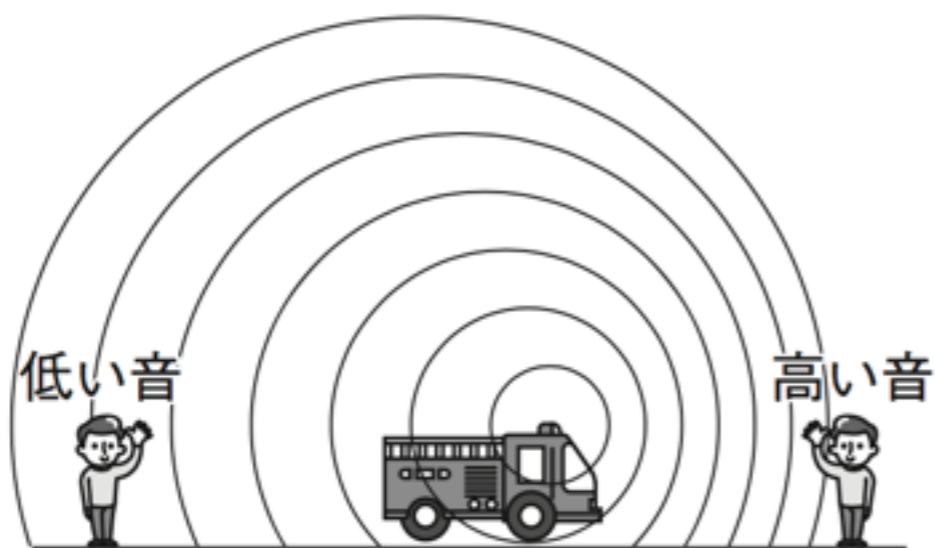
遠ざかるとき  
低い音  
小さい音に



# ドップラー効果

救急車が近づくときや遠ざかるときに、聞こえる振動数が変化する。

また、電車に乗っていると踏み切りの音が近づくときと遠ざかるときで変化する。このように、音源や観測者が移動することによって、本来伝わる音が高くなったり、低くなったりする現象（振動数・周波数が変化する現象）をドップラー効果という。



遠ざかるとき

低い音

音

近づくとき

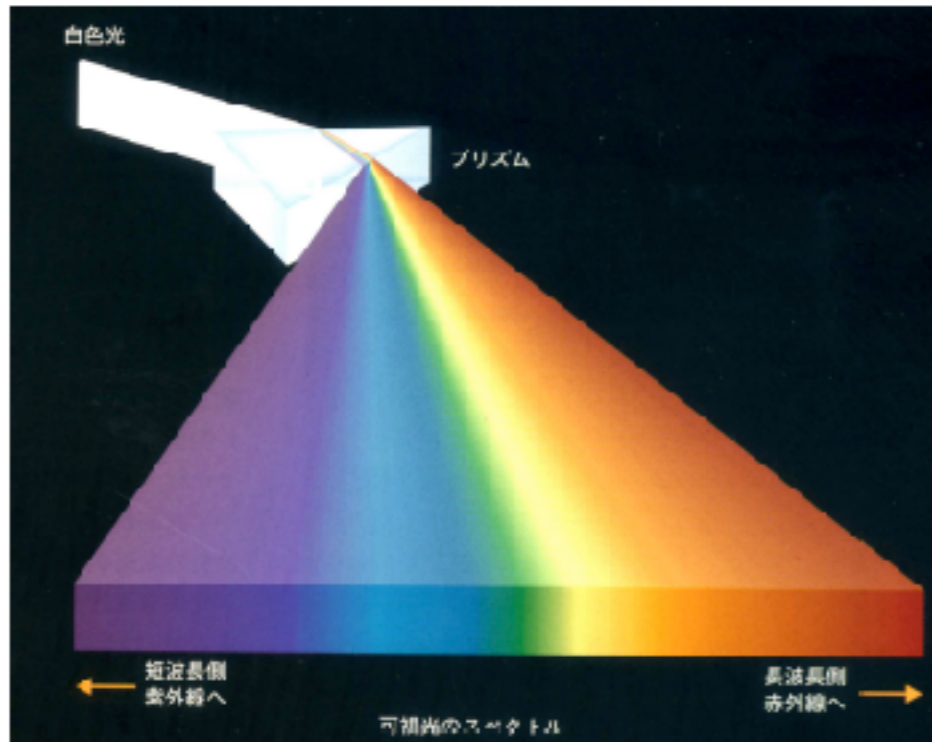
高い音

赤方偏移

光

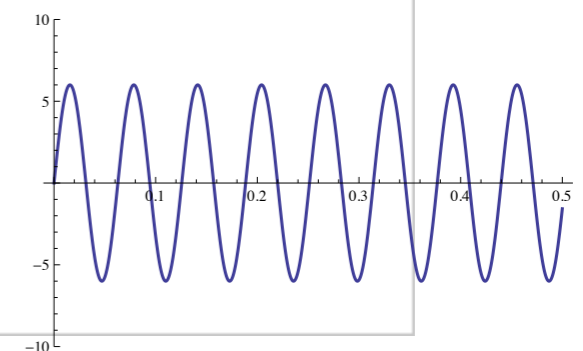
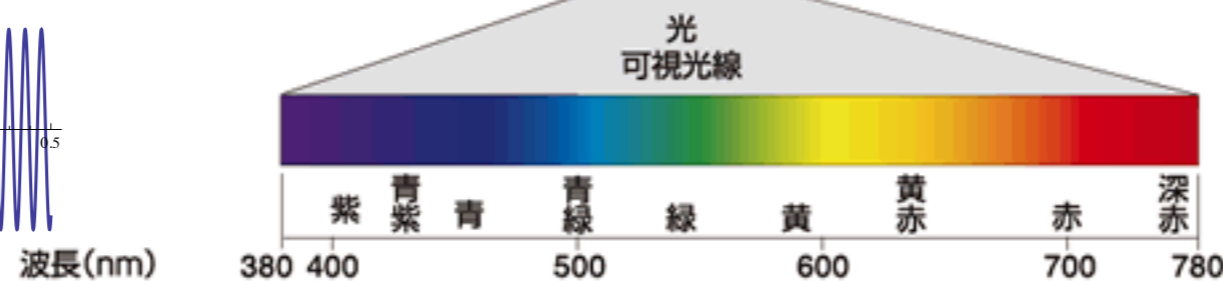
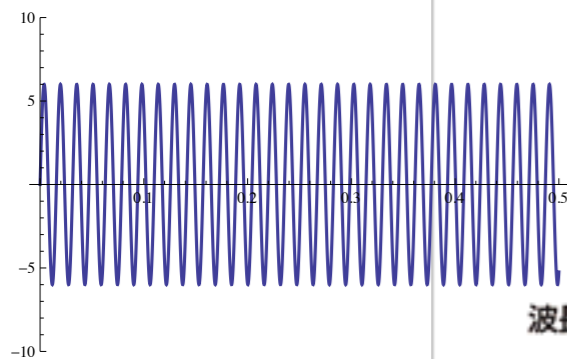
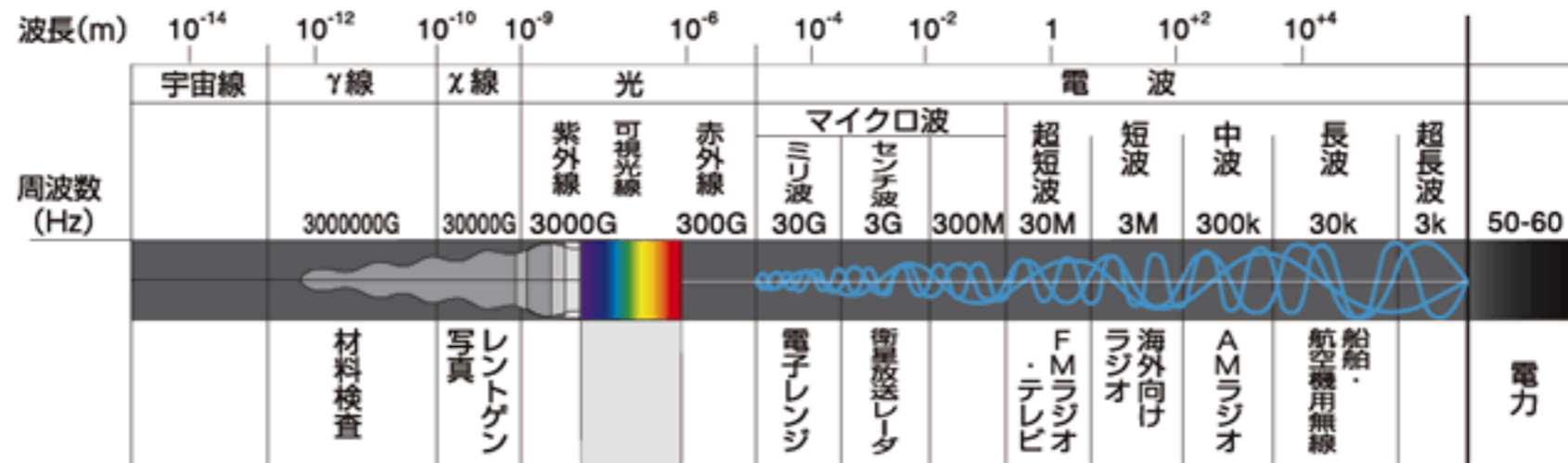
青方偏移

# 光の色=振動数



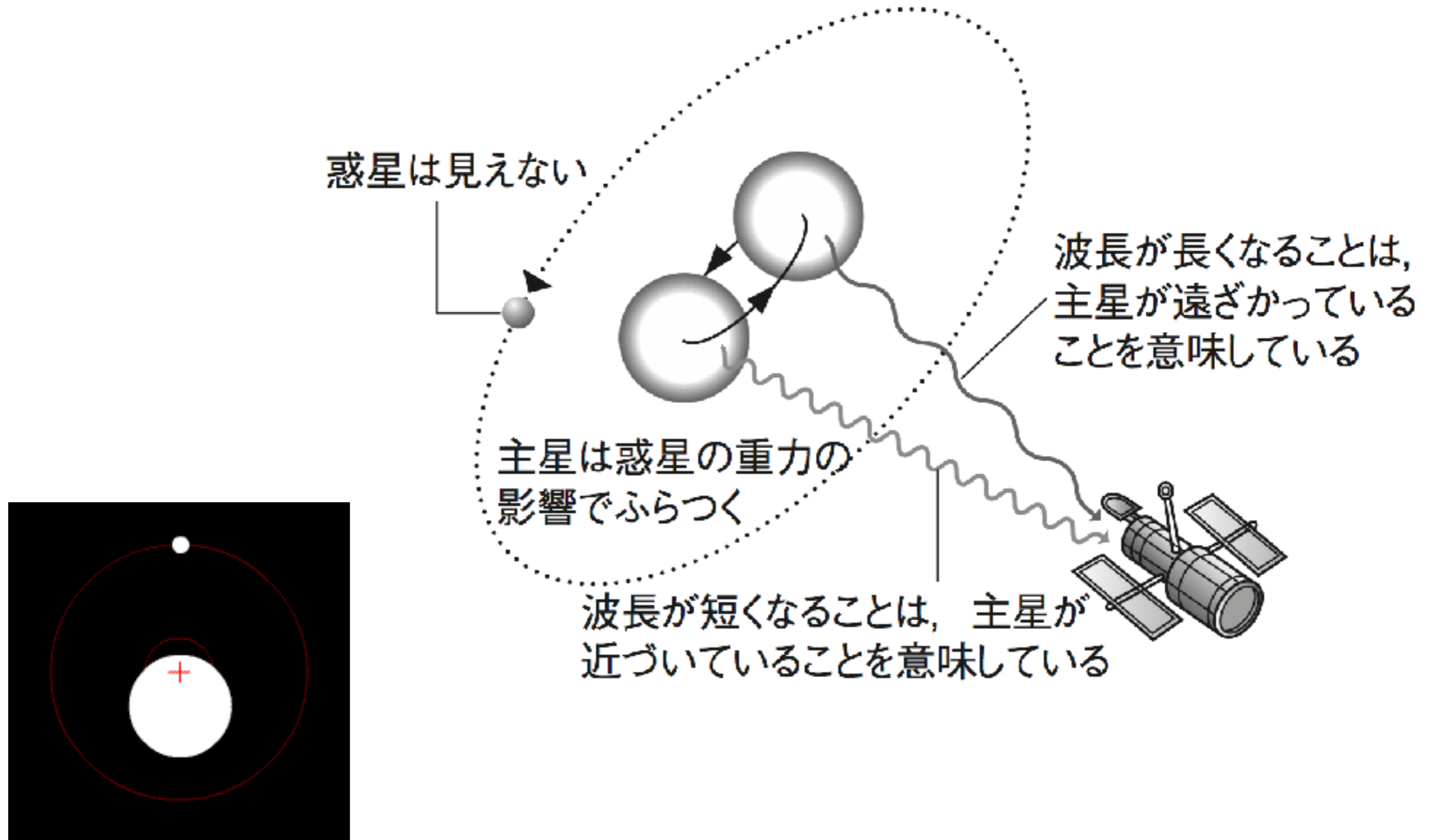
## ●電磁波の分類

名称	波長(振動数)	おもな利用例	
γ線	$1 \times 10^{-10} \text{m}$ 以下	食品照射, 医療	
X線	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-8} \text{m}$	X線写真, 医療	
紫外線	$1 \times 10^{-9} \sim 3.8 \times 10^{-7} \text{m}$	殺菌, 化学作用の利用	
可視光線	$3.8 \times 10^{-7} \sim 7.7 \times 10^{-7} \text{m}$	光学器械	
赤外線	$7.7 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-3} \text{m}$	赤外線写真, 暖房	
電波	マイクロ波	$10^{-4} \sim 1 \text{m}$ ( $3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{12} \text{Hz}$ )	携帯電話, 電子レンジ
	超短波	$1 \sim 10 \text{m}$ ( $3 \times 10^7 \sim 3 \times 10^8 \text{Hz}$ )	FMラジオ放送, テレビ放送
	短波	$10 \sim 10^2 \text{m}$ ( $3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^7 \text{Hz}$ )	短波ラジオ放送
	中波	$10^2 \sim 10^3 \text{m}$ ( $3 \times 10^5 \sim 3 \times 10^6 \text{Hz}$ )	AMラジオ放送
	長波	$10^3 \sim 10^4 \text{m}$ ( $3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^5 \text{Hz}$ )	飛行機の通信, 電波時計
	超長波	$10^4 \sim 10^5 \text{m}$ ( $3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4 \text{Hz}$ )	





# 視線速度法（ドップラー法）



## 1995年10月， 太陽系外惑星の発見

1995年10月6日

ジュネーブ天文台の

ミシェル・マイヨールとディディエ・ケロー

ペガサス座51番星 (51 Pegasi) = 地球から50光年先

木星クラスの質量を持った惑星の存在を確認

ドップラー法

主星から0.05天文単位

(太陽-水星の距離の1/6)

4.2日で公転

質量は木星の半分

表面は1000°C

「ホット・ジュピター」 (熱い木星)



太陽系外惑星としては初めて発見された  
ペガサス座51番星b (想像図)

# 2019年のノーベル賞 受賞者

## 物理学賞



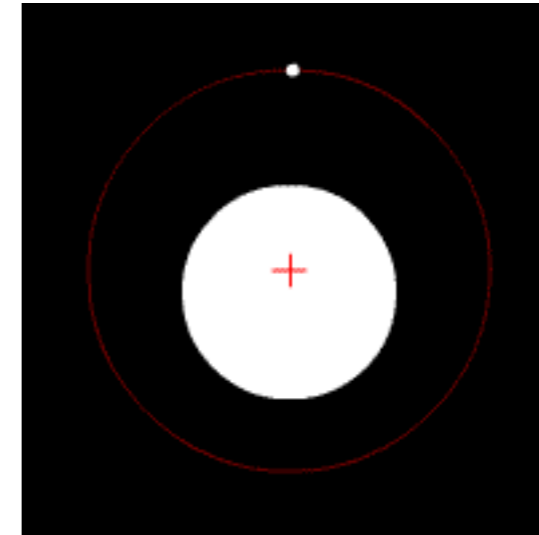
James Peebles, Michel Mayor, Didier Queloz

## ピーブルズ

ビッグバン宇宙論の基礎理論の確立に大きな貢献をした。宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の温度非等方性を定量的に計算する方法論、宇宙誕生約3分後に形成されたヘリウムの存在量、約38万年後に起こった宇宙の再結合（電離水素が中性化する過程）、膨張宇宙における密度揺らぎの線型成長とその後の非線形成長モデル、相関関数を用いた銀河分布の統計的記述などなど。

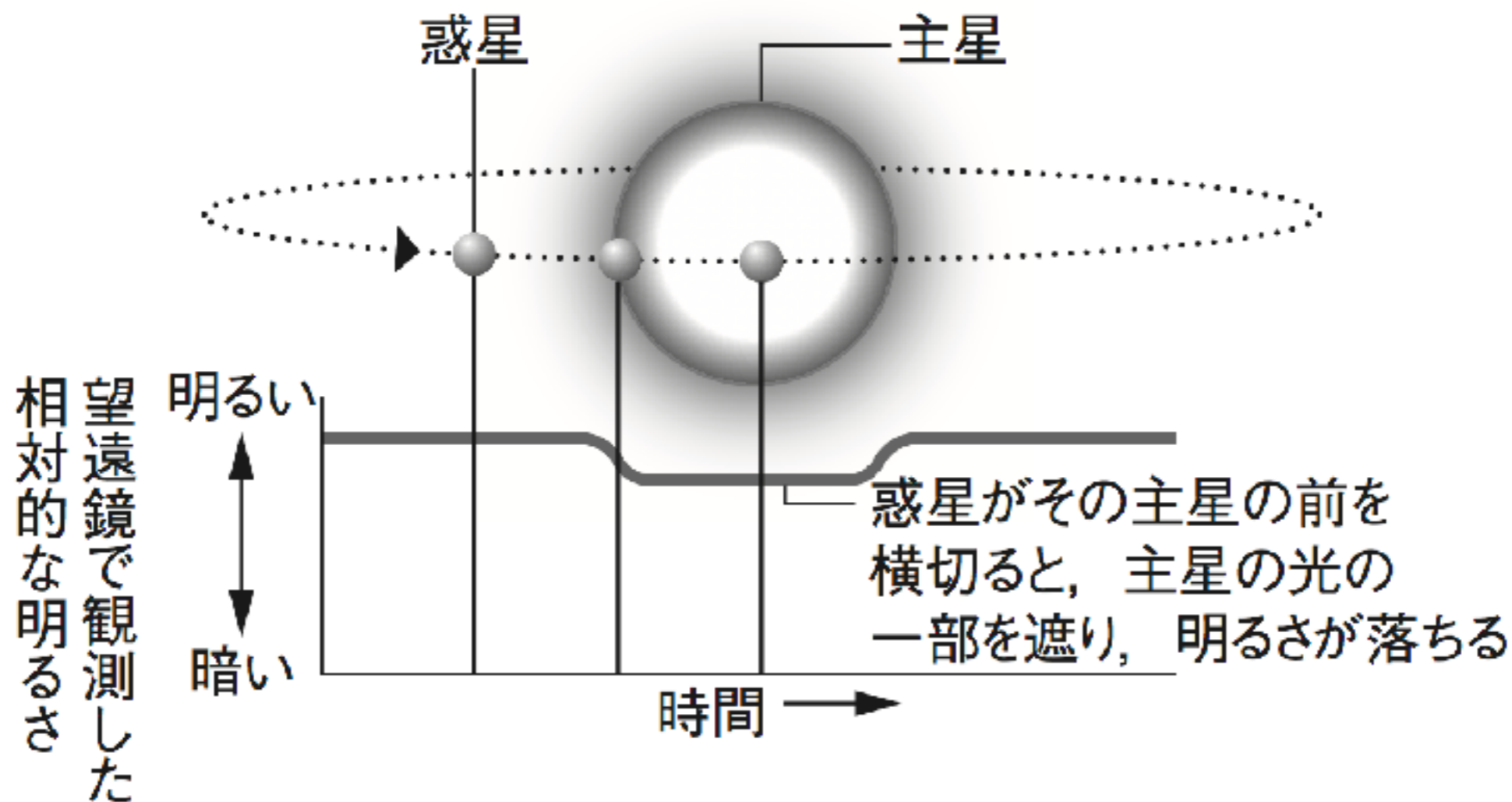
宇宙の進化、宇宙における地球の位置づけについて  
理解を改めた貢献

"for contributions to our understanding of the evolution of the universe and Earth's place in the cosmos."

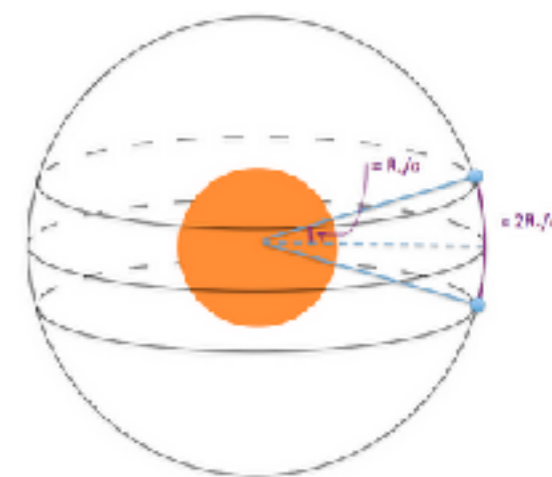


マイヨールとケロー、ペガサス座51番星のドップラー効果から、太陽系外惑星を初めて発見。

# 食検出法（トランジット法）

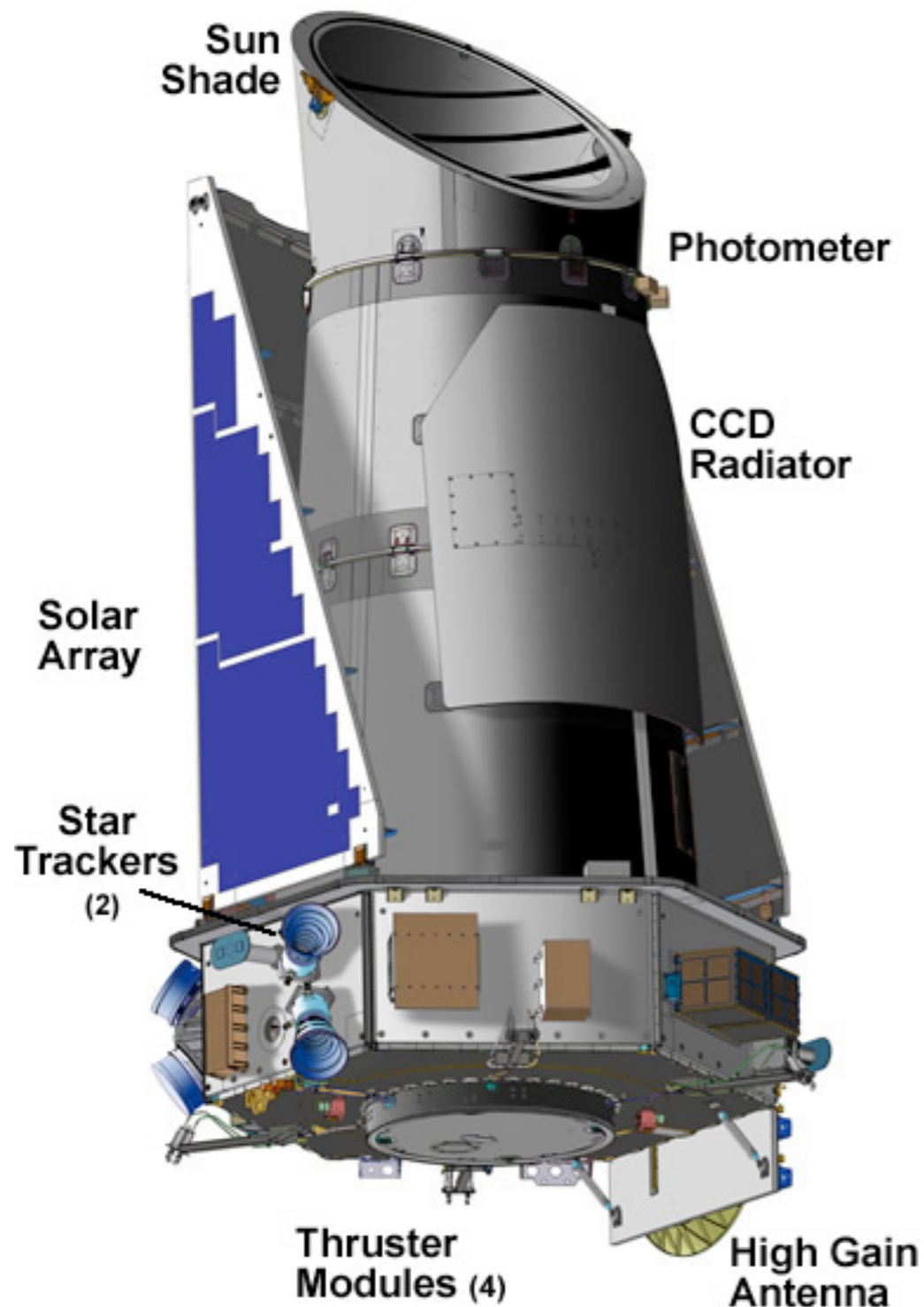


	公転周期 P(yr)	公転長半径 a (AU)	トランジット時間 (hr)	トランジット深度 (%)	幾何学的確率(%)	発生見込み角度 (deg)
	orbital period	semi-major axis	transit duration	transit depth	geometric probabi	inclination invarian
<b>Mercury</b>	0.241	0.39	8.1	0.0012	1.19	6.33
<b>Venus</b>	0.615	0.72	11.0	0.0076	0.65	2.16
<b>Earth</b>	1.00	1.00	13.0	0.0084	0.47	1.65
<b>Mars</b>	1.88	1.52	16.0	0.0024	0.31	1.71
<b>Jupiter</b>	11.86	5.20	29.6	1.01	0.089	0.39
<b>Saturn</b>	29.5	9.5	40.1	0.75	0.049	0.87
<b>Uranus</b>	84.0	19.2	57.0	0.135	0.024	1.09
<b>Neptune</b>	164.8	30.1	71.3	0.127	0.015	0.72



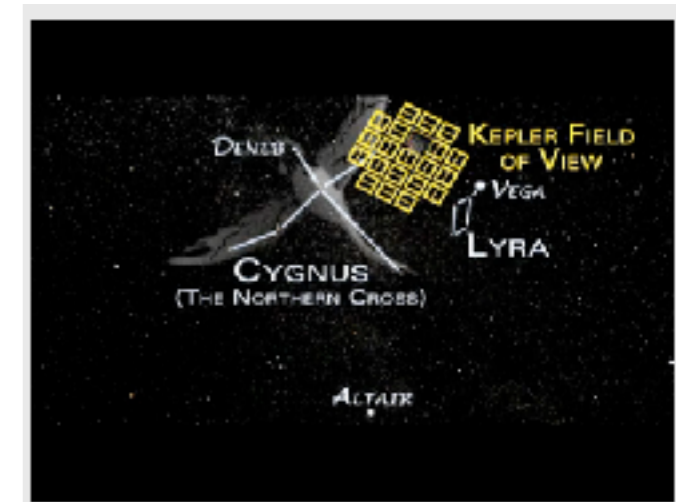
[http://certificate.ucl.ac.uk/modules/year\\_one/NASA\\_Kepler/character.html](http://certificate.ucl.ac.uk/modules/year_one/NASA_Kepler/character.html)

# ケプラー衛星



NASA  
地球型の太陽系外惑星探査  
2009年3月9日打ち上げ  
太陽周回軌道, 主鏡口径1.4m

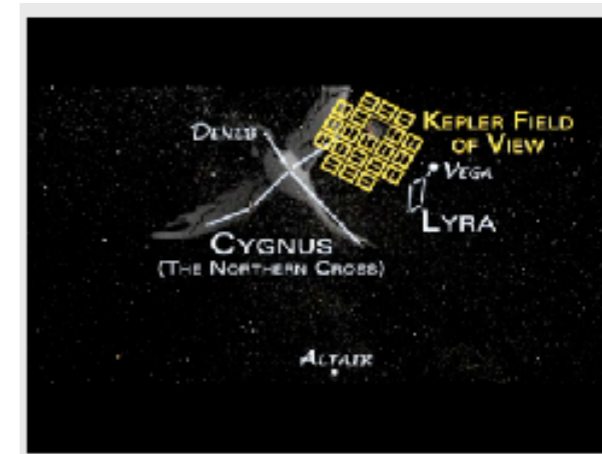
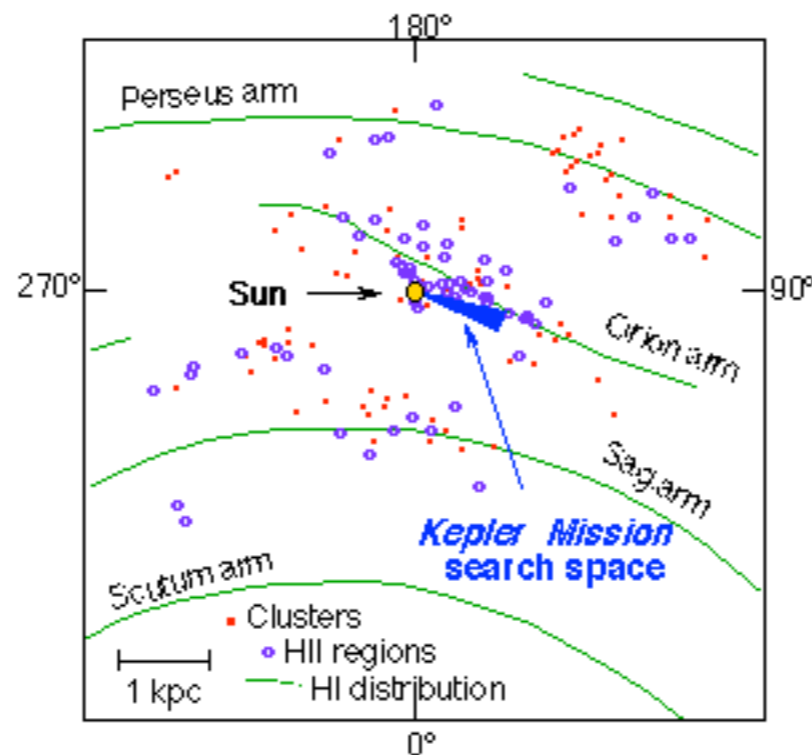
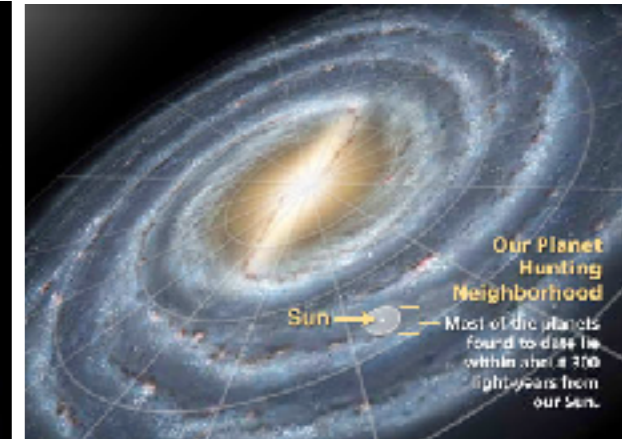
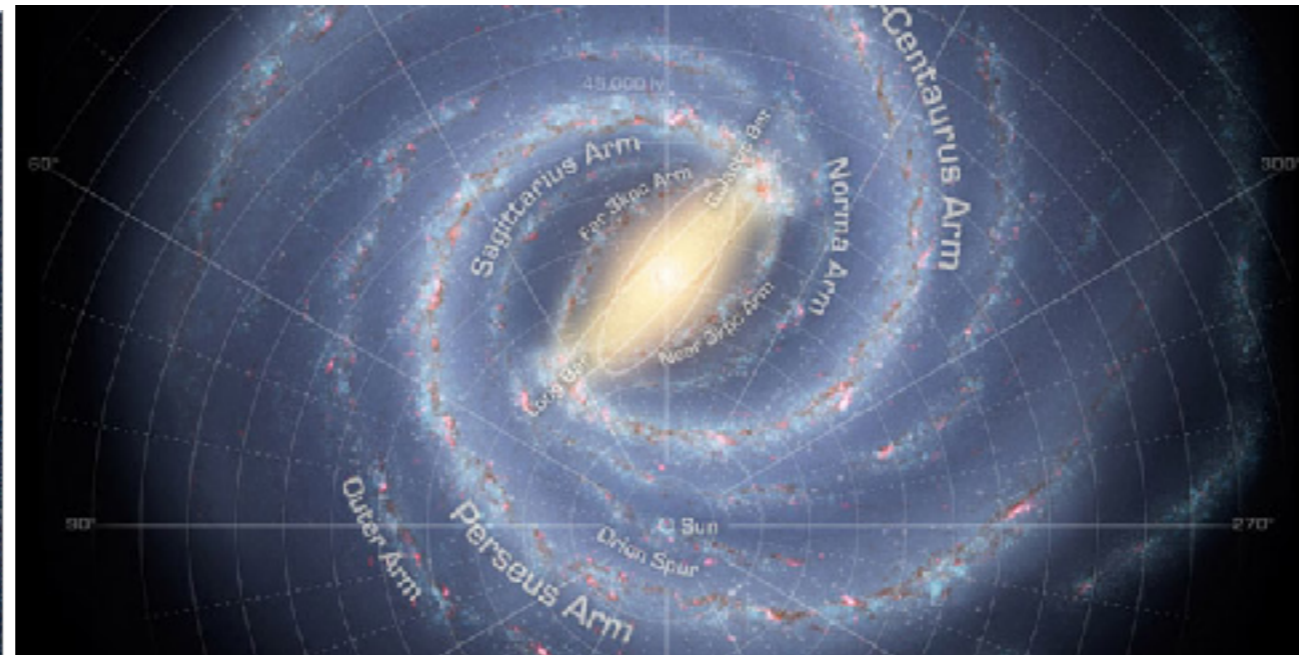
はくちょう座の方向,  
常時15万個の恒星観測



トランジット法  
主星を隠す時に生じる周期的な明るさの変動を検出すること

<http://kepler.nasa.gov/Mission/QuickGuide/>

# ケプラー衛星の探査範囲



The figure shows what we believe to be the local structure of our Galaxy, the Milky Way. The stars sampled are similar to the immediate solar neighborhood. Young stellar clusters, ionized hydrogen (HII) regions and the neutral hydrogen (HI) distribution define the arms of the Galaxy.

1 kpc = 326 光年  
=  $2 \times 10^8$  AU

# ケプラー衛星ミッション, 結果リリース

2010年1月

## KEPLER DISCOVERS FIVE EXOPLANETS

[+ Play Audio](#) | [+ Download Audio](#) | [+ Join mailing list](#)

**January 4, 2010:** NASA's Kepler space telescope, designed to find Earth-size planets in the habitable zone of sun-like stars, has discovered its first five new exoplanets.

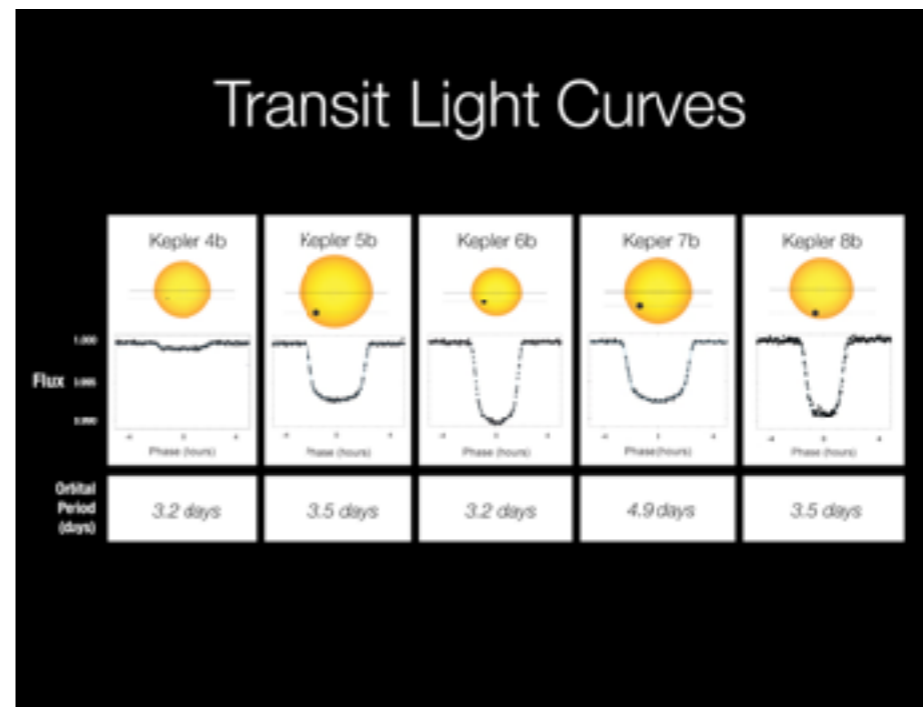
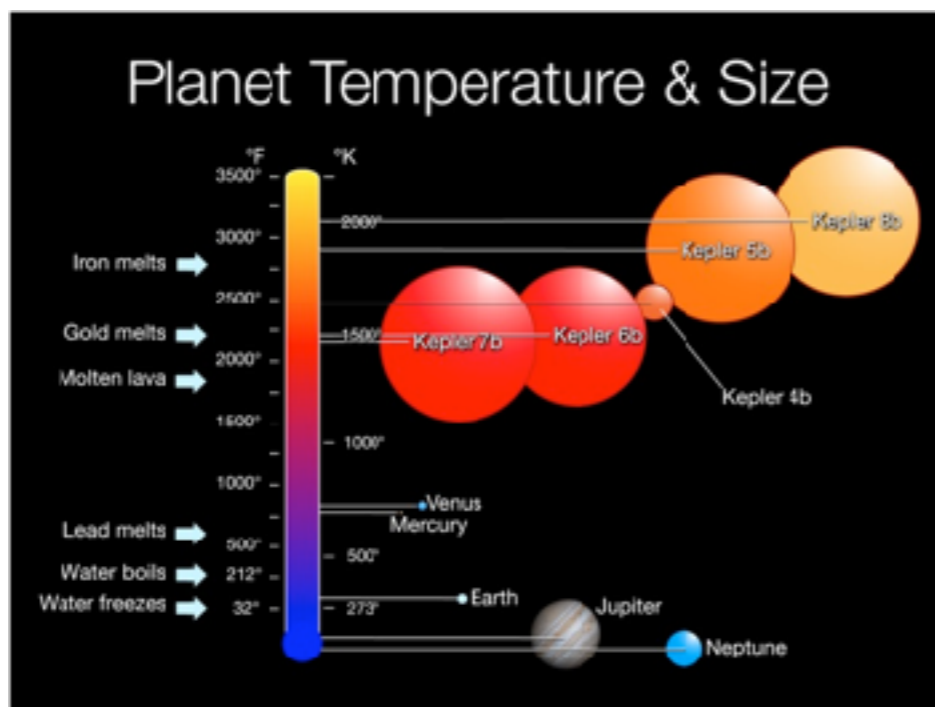
Named Kepler 4b, 5b, 6b, 7b and 8b, the planets were announced Monday, Jan. 4, by the members of the Kepler science team during a [news briefing](#) at the American Astronomical Society meeting in Washington.



**Right:** An artist's concept of the Kepler space telescope on a mission to discover habitable planets outside our own Solar System. [\[more →\]](#)

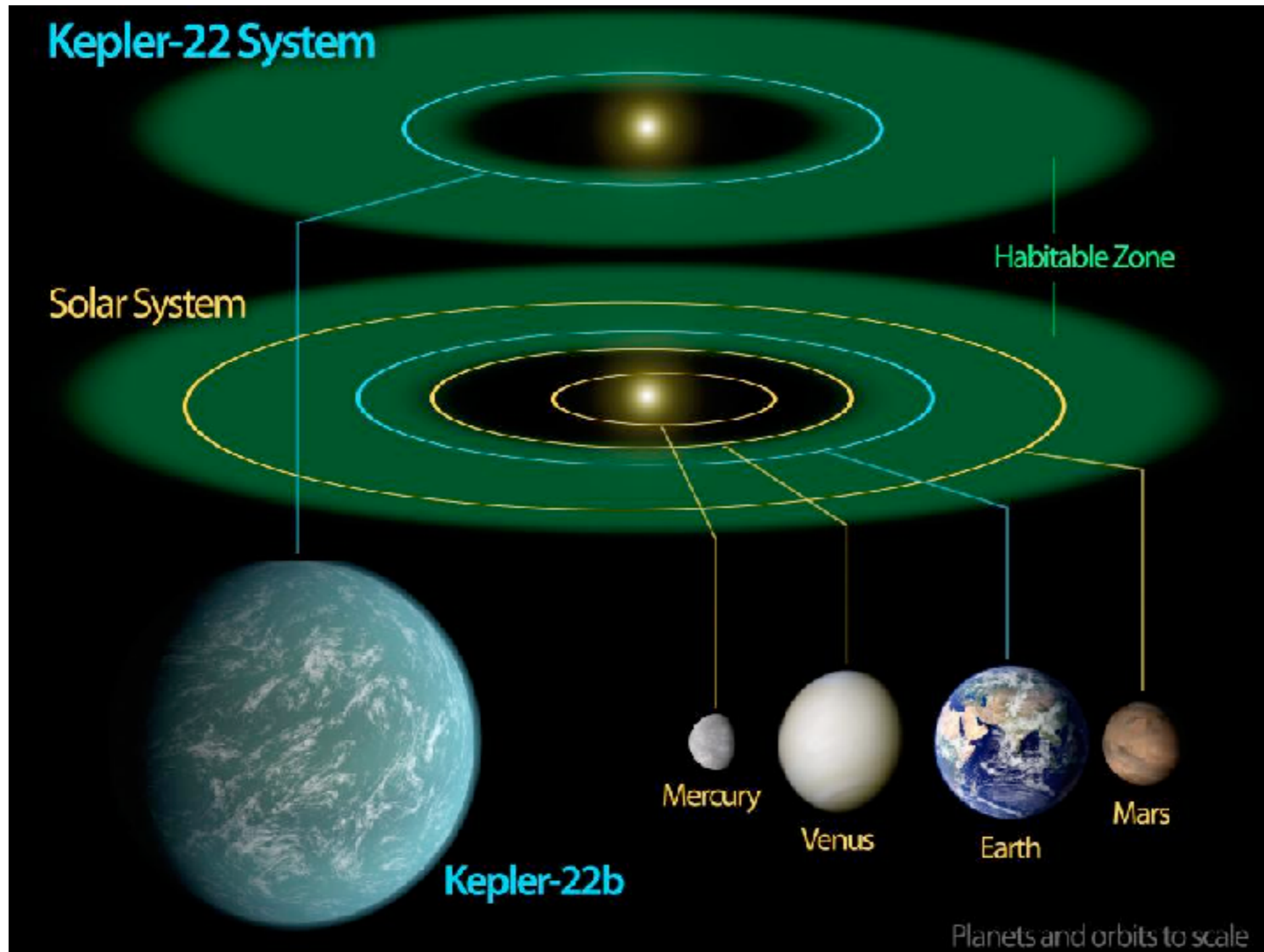
"The discoveries show that our science instrument is working well," says William Borucki of NASA's Ames Research Center in Moffett Field, Calif. Borucki is the mission's science principal investigator. "Indications are that Kepler will meet all its science goals."

The five planets are quite a bit larger than Earth. Known as "hot Jupiters" because of their high masses and extreme temperatures, the new exoplanets range in size from similar to Neptune to larger than Jupiter. They have orbits ranging from 3.3 to 4.9 days. Estimated temperatures of the planets range from 2,200 to 3,000 degrees Fahrenheit, hotter than molten lava and much too hot for life as we know it.



## ケプラー衛星、ハビタブル惑星を発見

2011年12月



This diagram compares our own solar system to Kepler-22, a star system containing the first "habitable zone" planet discovered by NASA's Kepler mission. The habitable zone is the sweet spot around a star where temperatures are right for water to exist in its liquid form. Liquid water is essential for life on Earth.

Kepler-22's star is a bit smaller than our sun, so its habitable zone is slightly closer in. The diagram shows an artist's rendering of the planet comfortably orbiting within the habitable zone, similar to where Earth circles the sun. Kepler-22b has a yearly orbit of 289 days. The planet is the smallest known to orbit in the middle of the habitable zone of a sun-like star. It's about 2.4 times the size of Earth.

Image credit: NASA/Ames/JPL-Caltech

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/multimedia/images/kepler-22b-diagram.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/multimedia/images/kepler-22b-diagram.html)



# ケプラー衛星ミッション, 結果リリース

2013年

## Kepler planet candidates discovered in the first 22 months

- Earth size
- Super-Earth size
- Neptune size
- Jupiter size



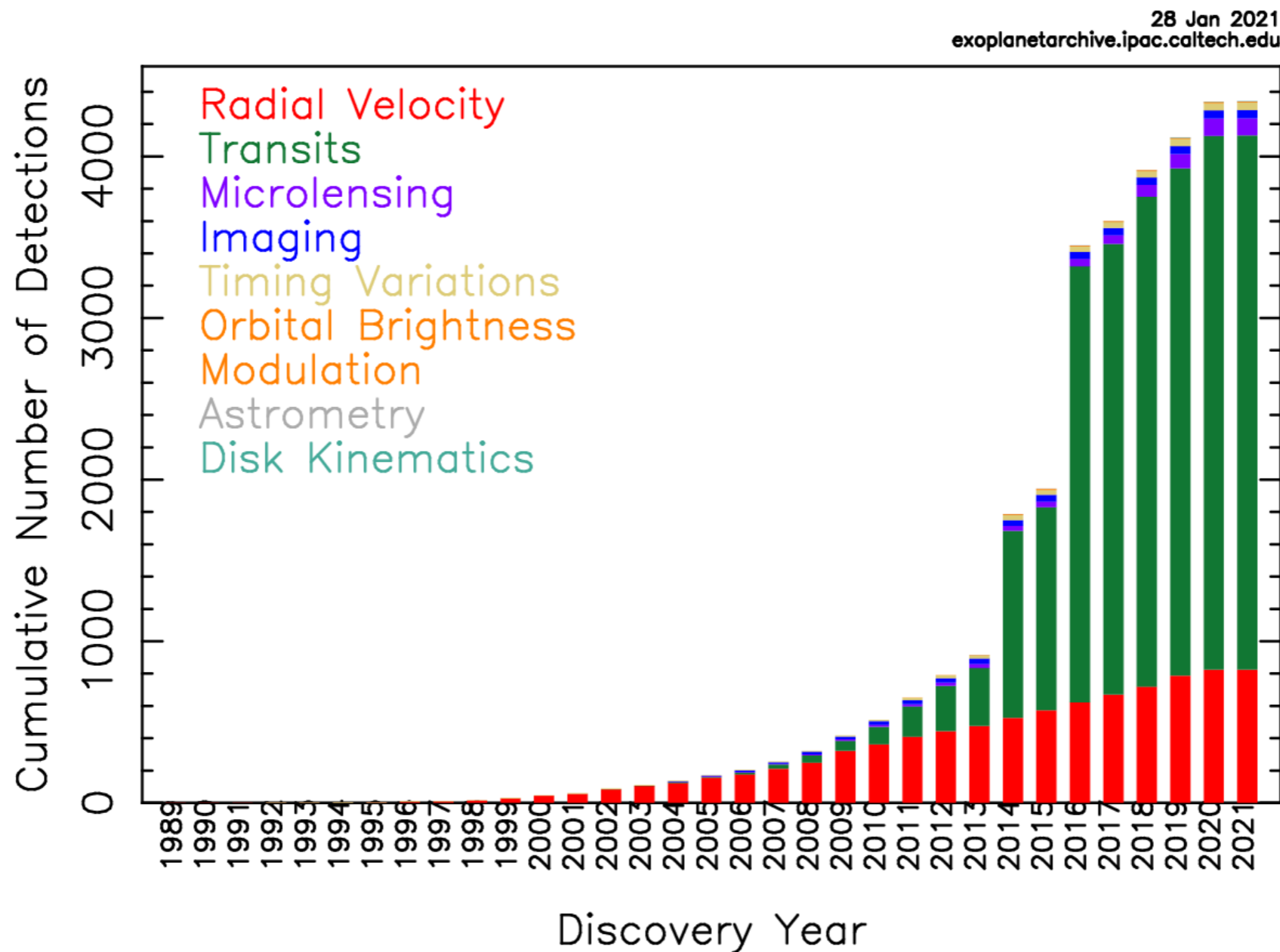
2740 Kepler planet candidates (122 confirmed) Batalha+2013



The figure shows what we believe to be the local structure of our Galaxy, the Milky Way. The stars sampled are similar to the immediate solar neighborhood. Young stellar clusters, ionized hydrogen (HII) regions and the neutral hydrogen (HI) distribution define the arms of the Galaxy.

# 太陽系外惑星 発見数 (累積)

Cumulative Detections Per Year



2021年2月14日現在 4341個.

恒星の 1/3 には惑星が発見されている.

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>

# 太陽系外惑星 発見数

2021年2月14日現在

表 5.4 これまでに発見された太陽系外惑星の数 (2018年3月10日現在).

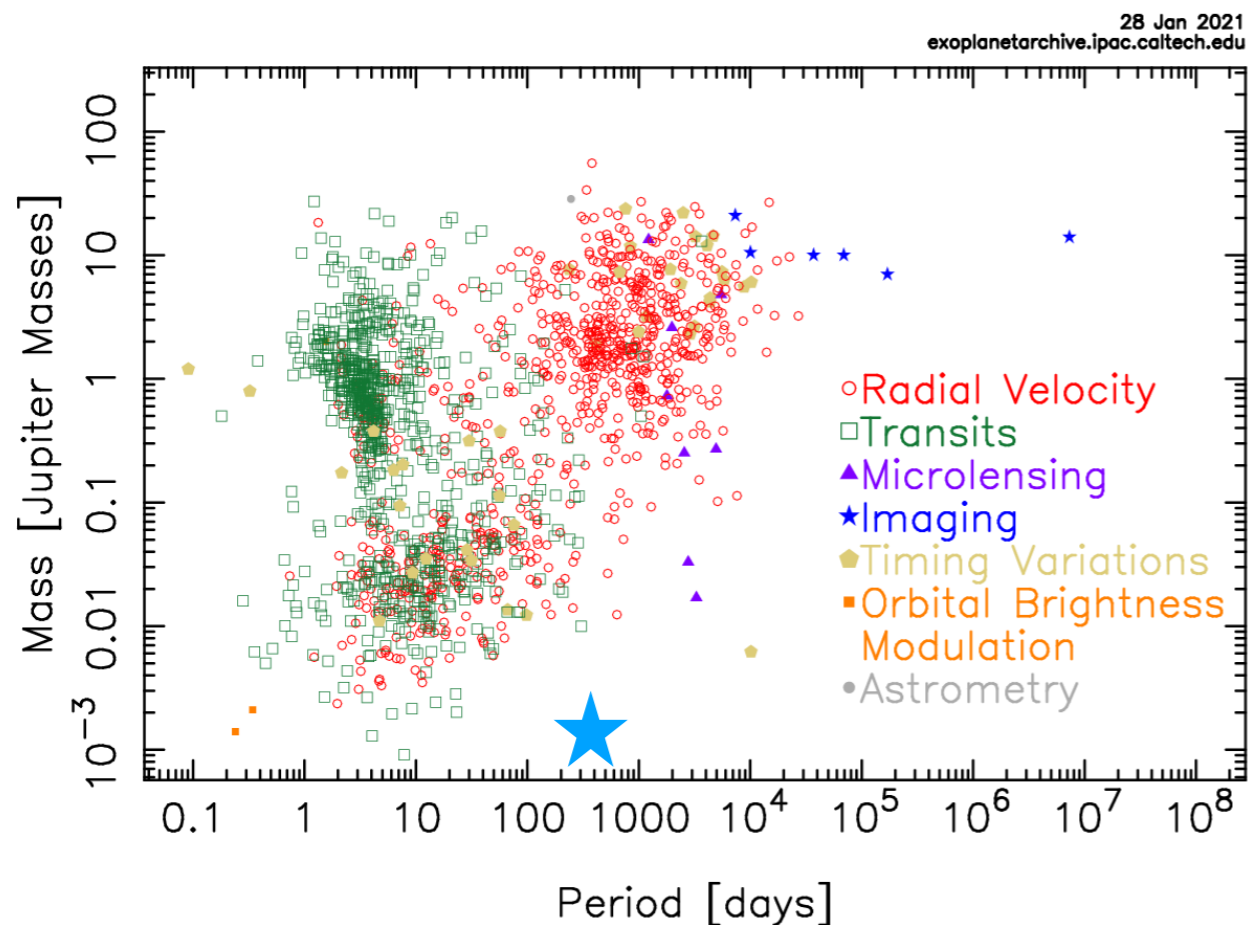
[<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>]

	発見された方法			発見数
	全観測	Kepler	K2	
確認された太陽系外惑星 (confirmed planets)*	3706	2342	307	1
複数の惑星からなる系 (multi-planet systems)	4341	2394	450	44 45
ハビタブルゾーンにある星 (確定+候補天体)	612			669 751
候補天体 (Kepler/K2 Candidates)	1864	290	479	2900 3059
		361		15 16
		4496	479	9
		2366	889	54 75
				6
				2
				6

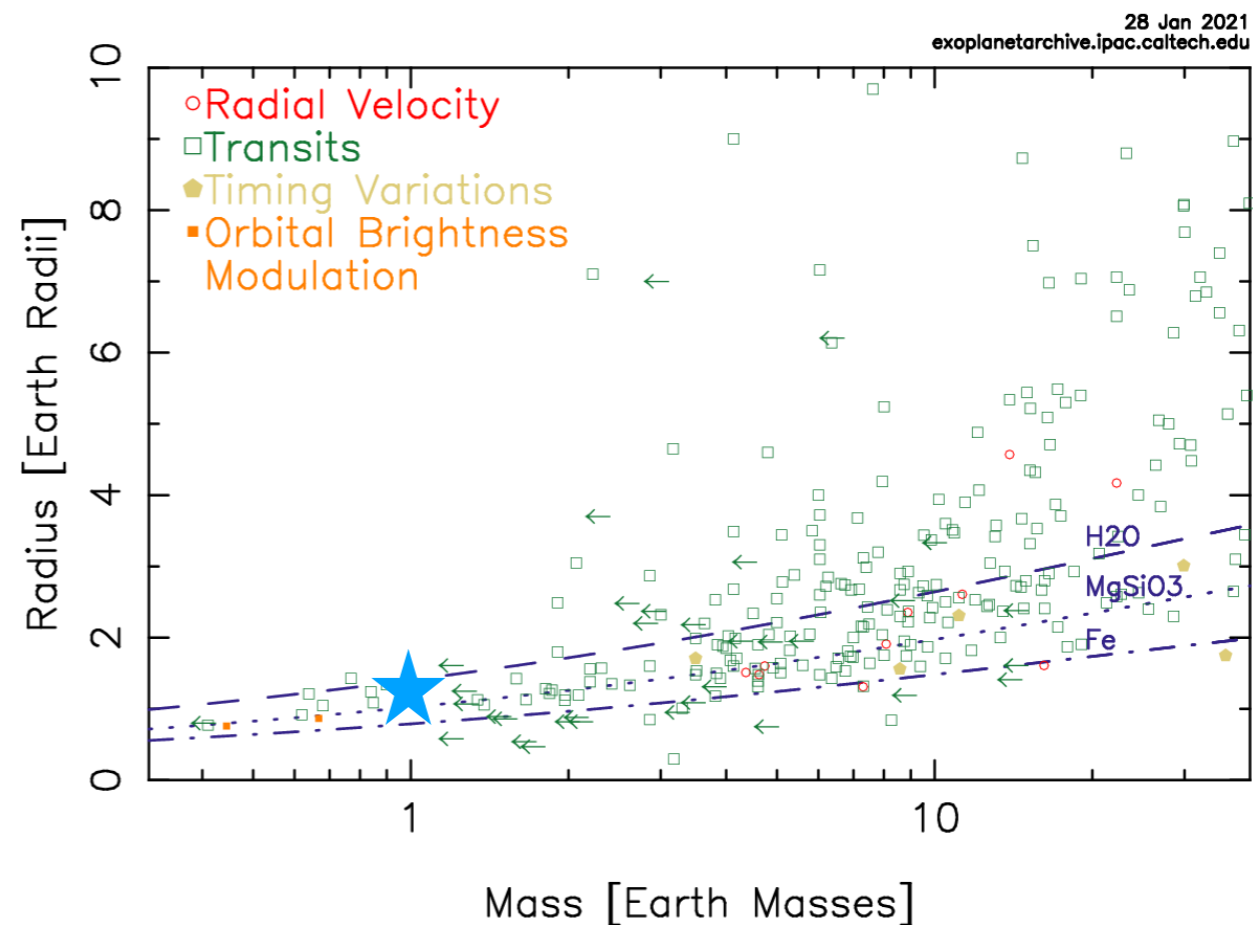
<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

# 太陽系外惑星 公転周期と質量分布

Mass – Period Distribution



Mass – Radius Distribution



2021年2月14日現在 4341個.

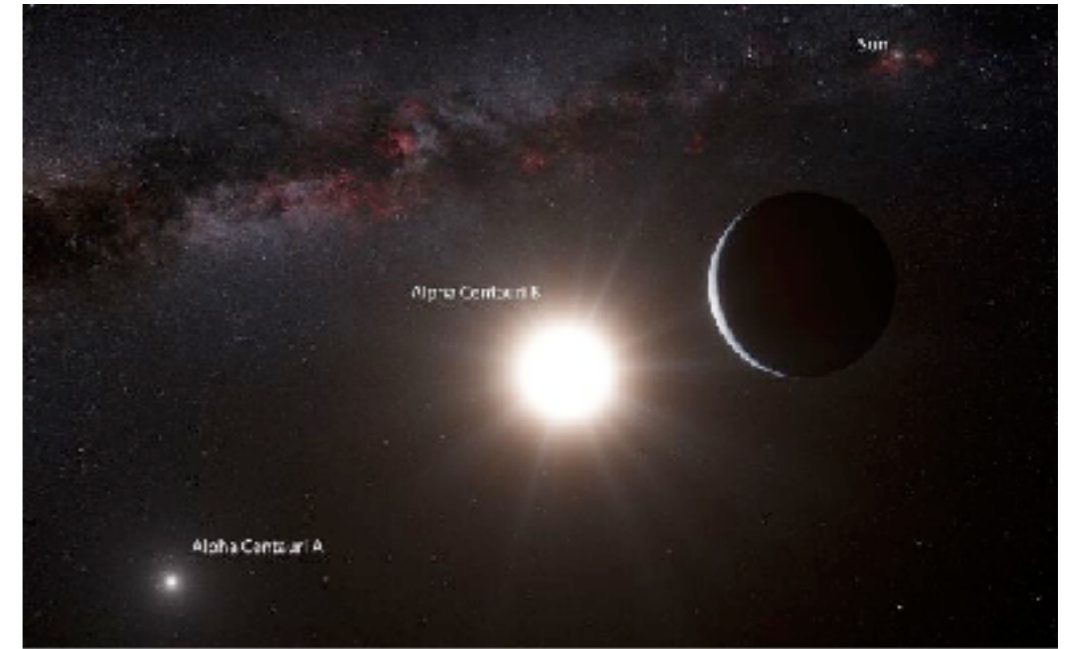
恒星の 1/3 には惑星が発見されている.

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/exoplanetplots/>

太陽系にもっとも近い4.3光年先の恒星系リギルケンタウルス（アルファケンタウリ）に、地球と同じくらいの質量の惑星が見つかった。また、4連星の中にある惑星の発見も発表されている。

リギルケンタウルスに惑星が存在するかどうかは19世紀から議論されてきたが、最近まで確認できなかった。今回初めて、チリにあるラシーヤ天文台のHARPS（高精度視線速度系外惑星探査装置）と3.6m望遠鏡を用いた観測で、リギルケンタウルスBの周りを回る惑星が発見された。この惑星は、主星からは600万km程度離れていて、3.2日の周期で公転している。太陽系で言えば、水星よりも内側の軌道を回っていて、生命が存在するには熱すぎると考えられる。

視線速度法（ドップラーシフト法）によって観測されたものだが、今回は、秒速51cm（時速1.8km）という極めて小さい動きを検出したもので、視線速度観測としては史上最高精度の観測。



リギルケンタウルスは南半球ではよく見える明るい星（想像図）

<http://www.eso.org/public/news/eso1241/>

[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/kepler/news/kepler-ph1.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/news/kepler-ph1.html)

<http://jp.arxiv.org/abs/1210.3612>

## Planet Hunters: A Transiting Circumbinary Planet in a Quadruple Star System

[Megan E. Schwamb](#), [Jerome A. Orosz](#), [Joshua A. Carter](#), [William F. Welsh](#), [Debra A. Fischer](#), [Guillermo Torres](#), [Andrew W. Howard](#), [Justin R. Crepp](#), [William C. Keel](#), [Chris J. Lintott](#), [Nathan A. Kaib](#), [Dirk Terrell](#), [Robert Gagliano](#), [Kian J. Jek](#), [Michael Parrish](#), [Arfon M. Smith](#), [Stuart Lynn](#), [Robert J. Simpson](#), [Matthew J. Giguere](#), [Kevin Schawinski](#)  
(Submitted on 12 Oct 2012)

We report the discovery and confirmation of a transiting circumbinary planet (PH1) around KIC 4862625, an eclipsing binary in the Kepler field. The planet was discovered by volunteers searching the first six Quarters of publicly available Kepler data as part of the Planet Hunters citizen science project. Transits of the planet across the larger and brighter of the eclipsing stars are detectable by visual inspection every  $\sim 137$  days, with seven transits identified in Quarters 1-11. The physical and orbital parameters of both the host stars and planet were obtained via a photometric-dynamical model, simultaneously fitting both the measured radial velocities and the Kepler light curve of KIC 4862625. The  $6.18 \pm 0.17$  Earth radii planet orbits outside the 20-day orbit of an eclipsing binary consisting of an F dwarf ( $1.734 \pm 0.044$  Solar radii,  $1.528 \pm 0.087$  Solar masses) and M dwarf ( $0.378 \pm 0.023$  Solar radii,  $0.408 \pm 0.024$  solar masses). For the planet, we find an upper mass limit of 169 Earth masses ( $0.531$  Jupiter masses) at the 99.7% confidence level. With a radius and mass less than that of Jupiter, PH1 is well within the planetary regime. Outside the planet's orbit, at  $\sim 1000$  AU, a previously unknown visual binary has been identified that is bound to the planetary system, making this the first known case of a quadruple star system with a transiting planet.

# 太陽系から一番近い星にハビタブル惑星を発見



eso1629 – Science Release

SPACE SCOOP

## Planet Found in Habitable Zone Around Nearest Star

Pale Red Dot campaign reveals Earth-mass world in orbit around Proxima Centauri

24 August 2016



Astronomers using ESO telescopes and other facilities have found clear evidence of a planet orbiting the closest star to Earth, Proxima Centauri. The long-sought world, designated Proxima b, orbits its cool red parent star every 11 days and has a temperature suitable for liquid water to exist on its surface. This rocky world is a little more massive than the Earth and is the closest exoplanet to us – and it may also be the closest possible abode for life outside the Solar System. A paper describing this milestone finding will be published in the journal Nature on 25 August 2016.

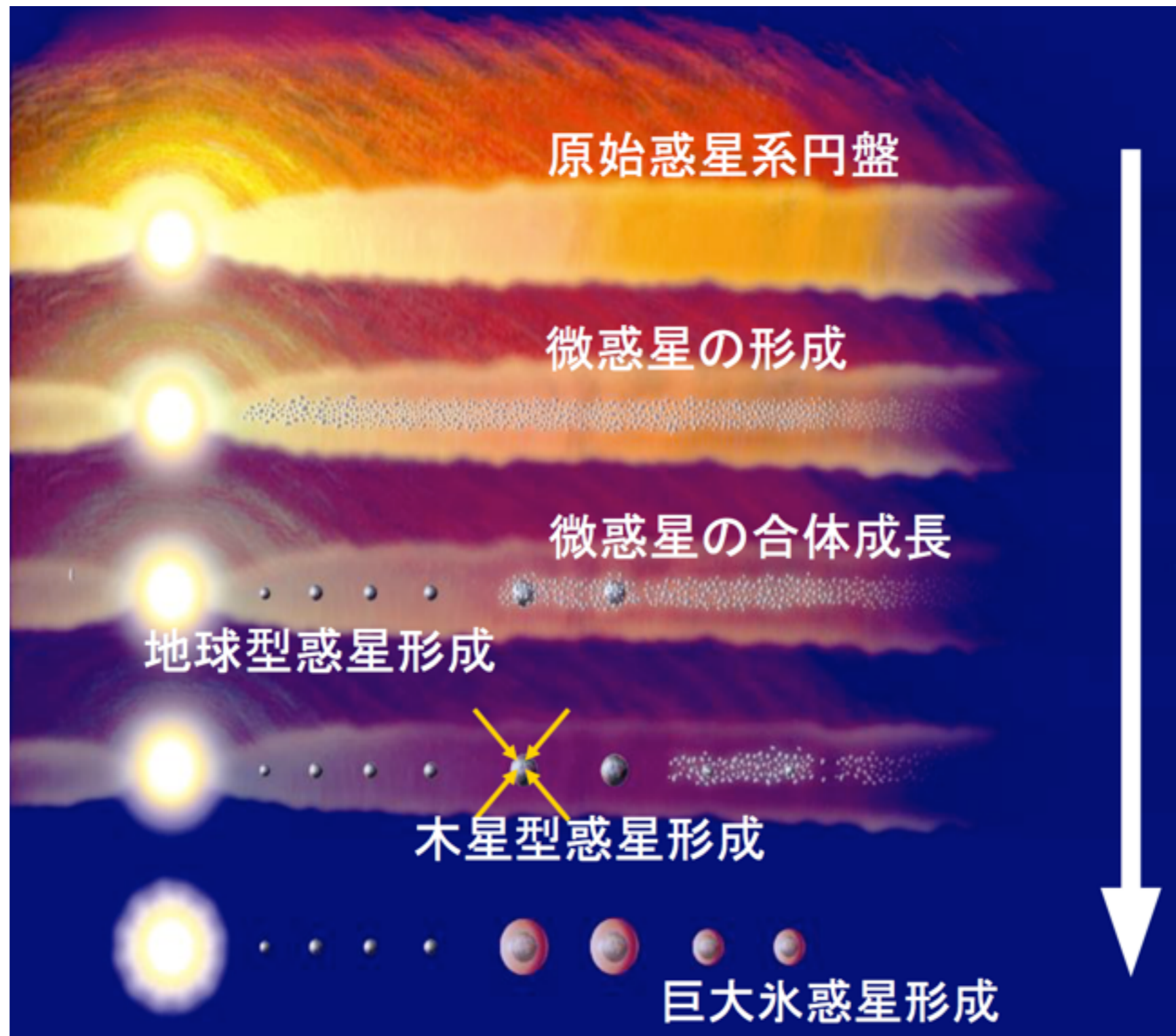
プロキシマ・ケンタウリ  
4.25光年

プロキシマ・ケンタウリb  
0.05 au (約750万 km) の距離  
を11.2日で公転  
地球質量の1.3倍  
ハビタブルゾーン内  
液体の水を有する可能性

<http://www.eso.org/public/news/eso1629/>

At a distance of 1.295 parsecs, the red dwarf Proxima Centauri ( $\alpha$  Centauri C, GL 551, HIP 70890 or simply Proxima) is the Sun's closest stellar neighbour and one of the best-studied low-mass stars. It has an effective temperature of only around 3,050 kelvin, a luminosity of 0.15 per cent of that of the Sun, a measured radius of 14 per cent of the radius of the Sun and a mass of about 12 per cent of the mass of the Sun. Although Proxima is considered a moderately active star, its rotation period is about 83 days (ref. 3) and its quiescent activity levels and X-ray luminosity are comparable to those of the Sun. Here we report observations that reveal the presence of a small planet with a minimum mass of about 1.3 Earth masses orbiting Proxima with a period of approximately 11.2 days at a semi-major-axis distance of around 0.05 astronomical units. Its equilibrium temperature is within the range where water could be liquid on its surface. Nature, 2016, vol. 536, p. 437-440

# 原始惑星円盤内: 塵 → 微惑星 → 原始惑星 → 惑星



これまでの太陽系形成モデルに修正が迫られる

# 最近の宇宙研究の進展から

1. 太陽系内惑星探査
2. 太陽系外惑星探査 2018年ノーベル物理学賞
3. **ブラックホールの観測** 2020年ノーベル物理学賞
4. 重力波観測の現状 2017年ノーベル物理学賞
5. 時計を使った相対性理論の検証

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

2021/3/10 サークルすばる @大阪中央会館





# 2020年のノーベル物理学賞 受賞者

<http://www.nobelprize.org/>

## “ブラックホール”

ロジャー・ペンローズ (89) 英オックスフォード大

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

ラインハルト・ゲンツェル (68) 独マックスプランク研究所

アンドレア・ゲズ (55) 米カリフォルニア大ロサンゼルス校

「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して」



Roger Penrose “for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity”

Reinhard Genzel and Andrea Ghez “for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy”.



# 解説

## 2020年のノーベル物理学賞

### ～脚注の多い解説～

真貝寿明（大阪工業大学）

#### 1. 今年も宇宙分野、に驚く

ノーベル物理学賞は、このところしばらくは、宇宙・素粒子分野と物性物理分野を毎年交互に授賞対象としていた。昨年の物理学賞は、宇宙論の理論を開拓したピーブルズ<sup>1</sup>と太陽系外惑星を初めて発見したマイヨールとケローだった<sup>2</sup>。そのため、私を含め多くの方は、今年は宇宙以外の分野に贈賞されるものと想定していた。ところが、10月6日夕方に発表された今年の受賞者は、ブラックホール研究でまとめられた3氏だった。嬉しい誤算である。本稿では、受賞者の業績<sup>3</sup>を含め、最近のブラックホール研究について紹介したい。教育者向けの余談を盛り込んだところ、脚注の多い解説になってしまったことを先にお断りしておく。

今年の受賞者は、英オックスフォード大のロジャー・ペンローズ (Roger Penrose, 89)、独マックスプランク研究所のラインハルト・ゲンツェル (Reinhard Genzel, 68)、米カリフォルニア大ロサンゼルス校のアンドレア・ゲズ (Andrea Ghez, 55) の3氏である。贈賞理由は、ペンローズは「ブラックホール

形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して<sup>4</sup>、ゲンツェルとゲズは「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して<sup>5</sup>」となっている。ペンローズは「特異点定理」をはじめとして一般相対性理論分野を中心に世界をリードしてきた理論物理学者・数学者であり、ゲンツェルとゲズはそれぞれ独立に私たちのいる天の川銀河の中心を観測して、超大質量ブラックホールが存在していることを示した天文学者である。



図1 左からペンローズ、ゲンツェル、ゲズの似顔絵。ノーベル財団が受賞者発表に用いたもの。

<sup>1</sup> P.J.E. Peebles (1935～)。よく「ピーブルズ」と発音され、表記されているが、「ピーブルズ」と表記するのが正しいようだ。(2020年9月の日本物理学会での須藤靖氏の講演から)

<sup>2</sup> ノーベル賞は各部門での受賞者が毎年3名までと定められている。昨年の3名の組み合わせはやや強引に感じた。今年も当初はそう感じさせる3名であったが、ノーベルの遺言にある「物理学の分野で最も重要な発見または発明をした人物」という点については誰も異論を唱えないだろう。

<sup>3</sup> 受賞者の業績など、ノーベル財団の発表した資料は、Webページ(英語)から取得できる。  
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/press-release/>

<sup>4</sup> 原文は「for the discovery that black hole formation is a robust prediction of the general theory of relativity」。robust という単語は、辞書では「強靱な、頑丈な」と出てくるが、研究分野では「多少のゆらぎは問題とならない」という意味で使われる。ここでは、ブラックホール形成が特殊なものではなく一般的に発生する、という意味になるので、「自然な帰結」と訳した。ペンローズの業績がこのタイトルの通り「発見」と言えるかどうかは、本稿読後の皆様の判断に任せたい。

<sup>5</sup> 原文は「for the discovery of a supermassive compact object at the centre of our galaxy」

# 論座 RONZA

16636 本の記事が読み放題

輪読とは? よくある質問 お問い合わせ

- 政治・国際
  - 経済・雇用
  - 社会・スポーツ
  - 科学・環境
  - 文化・エンタメ
- 科学政策 科学書評 テクノロジー 基礎科学 宇宙 生命・医療 防災 地球環境 生態系 自然史・進化

輪読 > 科学・環境 > 記事一覧 > 記事

科学・環境

## 「ブラックホール」でまとめたノーベル物理学賞

理論家ペンローズの並外れた業績と、「疑」を「実在」に転換させた長年の天文観測

真貝寿明 大阪工業大学教授 (相対性理論、宇宙物理学、天文学史)

ノーベル賞 | ブラックホール | 基礎科学 | 宇宙

2020年10月13日

- ツイート
- おすすめ
- シェア
- 印刷
- コメント
- 印刷

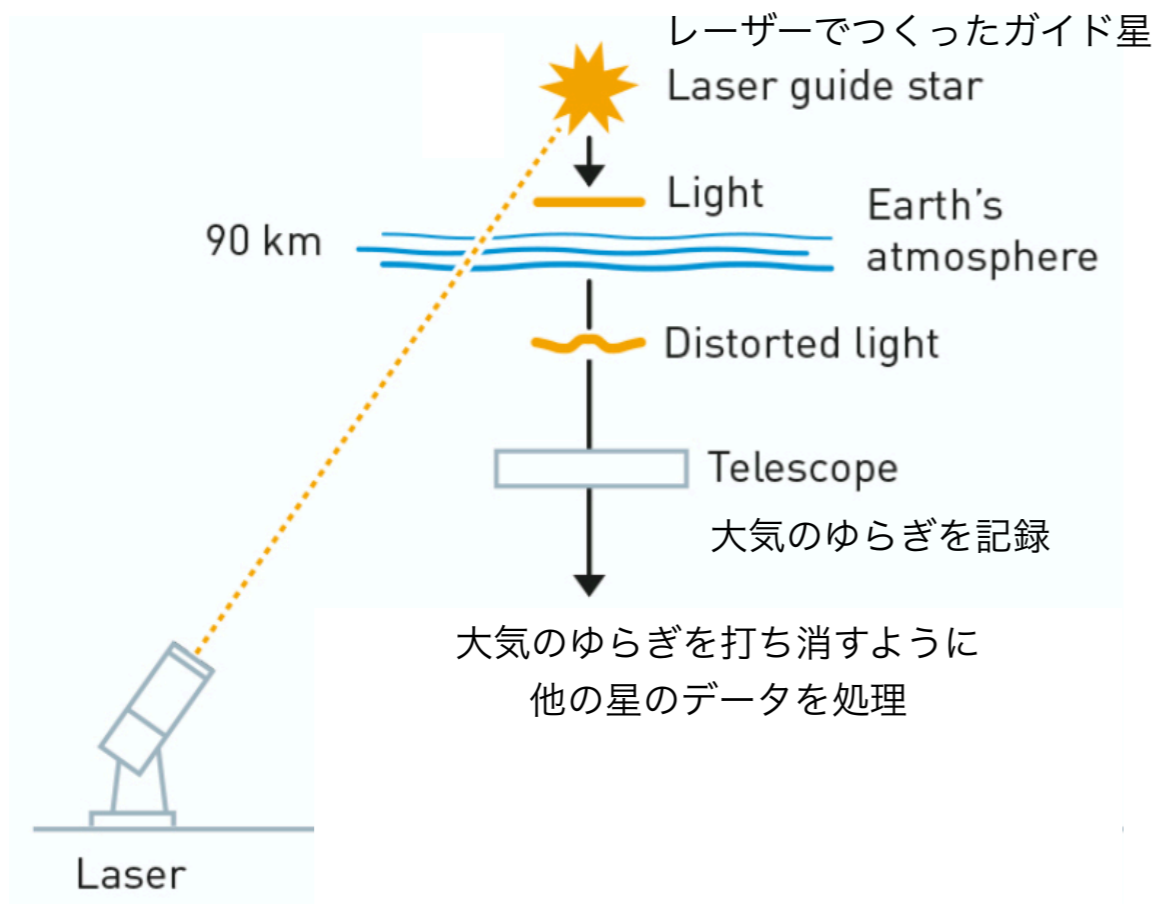


イラストはNASA提供

# ラインハルト・ゲンツェル

# アンドレア・ゲズ

「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して」



<https://ja.wikipedia.org/wiki/ヨーロッパ南天天文台>



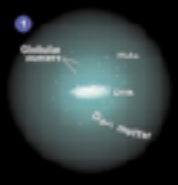
補償光学

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

## THE MILKY WAY

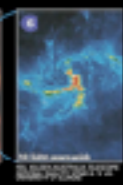
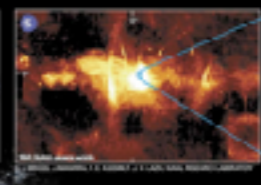
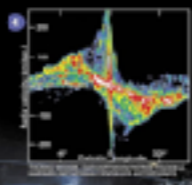
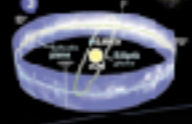


**H**ome galaxy of Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight arms, while older stars emphasize spiral shell outer layers as beautiful glimmering nebulae, then fade away into dim, thick masses of orange and red stars making the galactic bulge, concentrating the star-packed galactic center. As its sun may be a dark hole, a region so dense that incoming light can't escape to give us a peek at objects at the Milky Way orbit the galactic center, much like planets orbiting a solar system around the sun but the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.



**GUIDE TO THE GALAXY**

1. The bright star clusters orbiting the galactic center are the galactic core. Beyond it, a dark matter concentration surrounds the core.
2. Each spiral arm is a collection of stars, dust, and gas.
3. The spiral arms are the result of density waves.



**A YOUNG STAR**

A bright blue star in the spiral arm of the galaxy is a young star, possibly a protostar, that has just formed. It is surrounded by a cloud of gas and dust, which is being heated and ionized by the star's radiation.

This computer-generated image of the Milky Way is based on data from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) and the 2MASS All-Sky Survey. It shows the distribution of stars, gas, and dust in the galaxy, as well as the location of the galactic center and the Sun.



**MAGELLANIC CLOUDS**

The Magellanic Clouds are two satellite galaxies of the Milky Way. They are located about 160,000 light-years from Earth and contain about 100 billion stars each. They are named after the explorer Ferdinand Magellan, who discovered them in 1499.

**THE GALACTIC CORE**

The galactic core is the central region of the galaxy, where the density of stars is highest. It contains the supermassive black hole Sagittarius A\* and is surrounded by a dense cloud of gas and dust.

**THE GALACTIC BULGE**

The galactic bulge is the central region of the galaxy, where the density of stars is high. It is surrounded by a dense cloud of gas and dust.

**THE GALACTIC DISC**

The galactic disc is the flat, circular region of the galaxy, where the density of stars is low. It is surrounded by a dense cloud of gas and dust.

**THE GALACTIC HALO**

The galactic halo is the outer region of the galaxy, where the density of stars is very low. It is surrounded by a dense cloud of gas and dust.

**THE GALACTIC CENTER**

The galactic center is the point in the galaxy where the density of stars is highest. It contains the supermassive black hole Sagittarius A\* and is surrounded by a dense cloud of gas and dust.

**THE GALACTIC SPIN**

The galaxy rotates around a central axis, and the stars in the disc move in circular orbits. The rotation is faster in the center and slower in the outer regions.

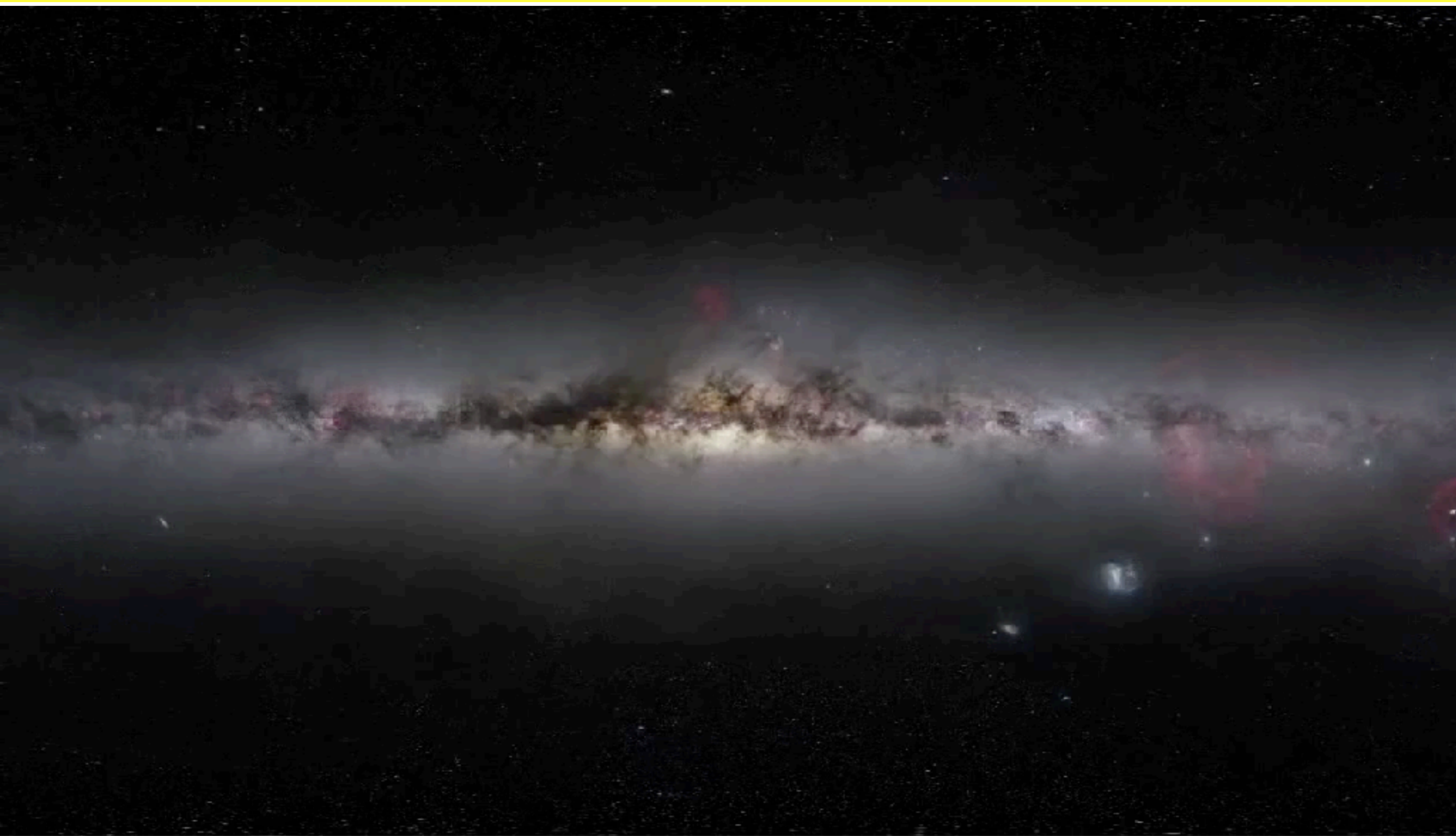


**LAGOON NEBULA**

The Lagoon Nebula is a large emission nebula in the constellation of Sagittarius. It is one of the most prominent features of the Milky Way and is visible to the naked eye.

Copyright © 2005 National Geographic Society, Washington, D.C. Reprinted August 2005. For information on our products, visit us online at [www.nationalgeographic.com](http://www.nationalgeographic.com).

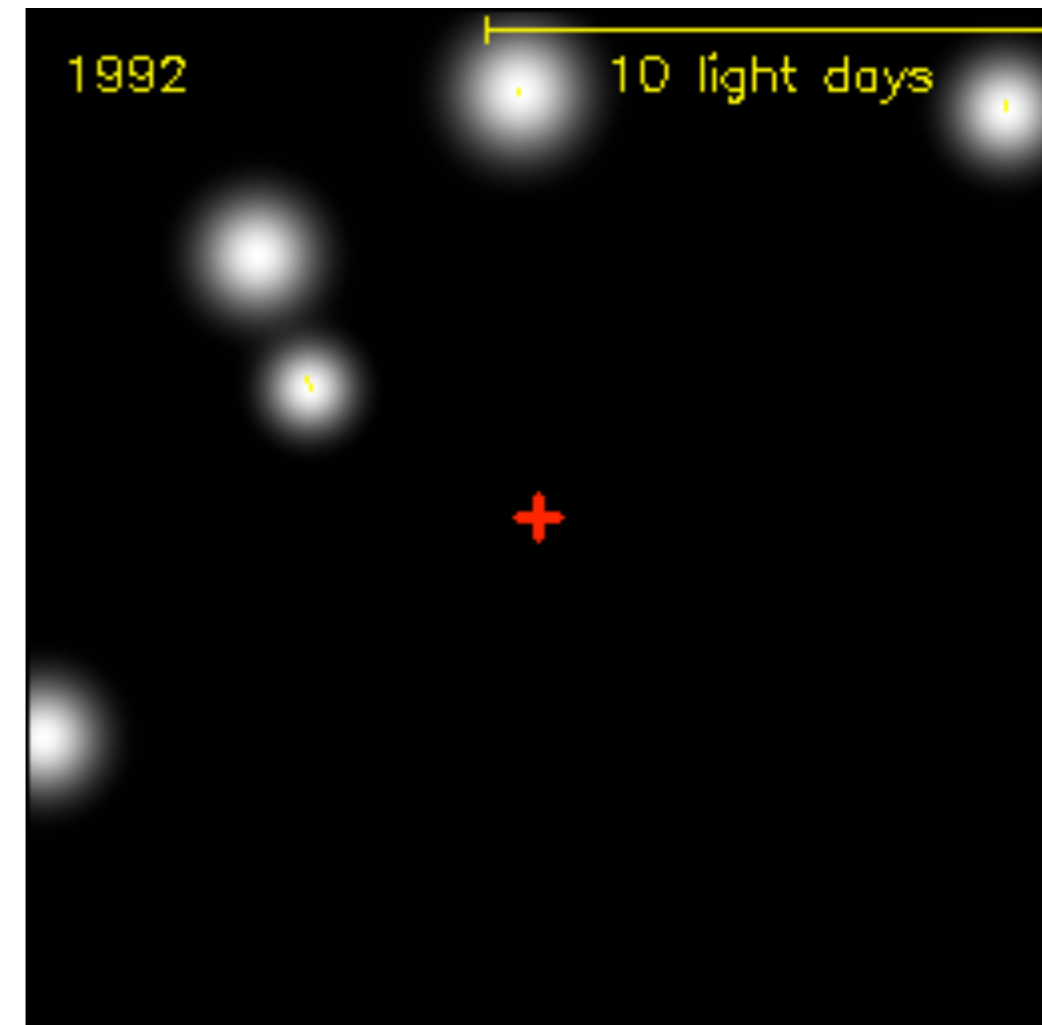
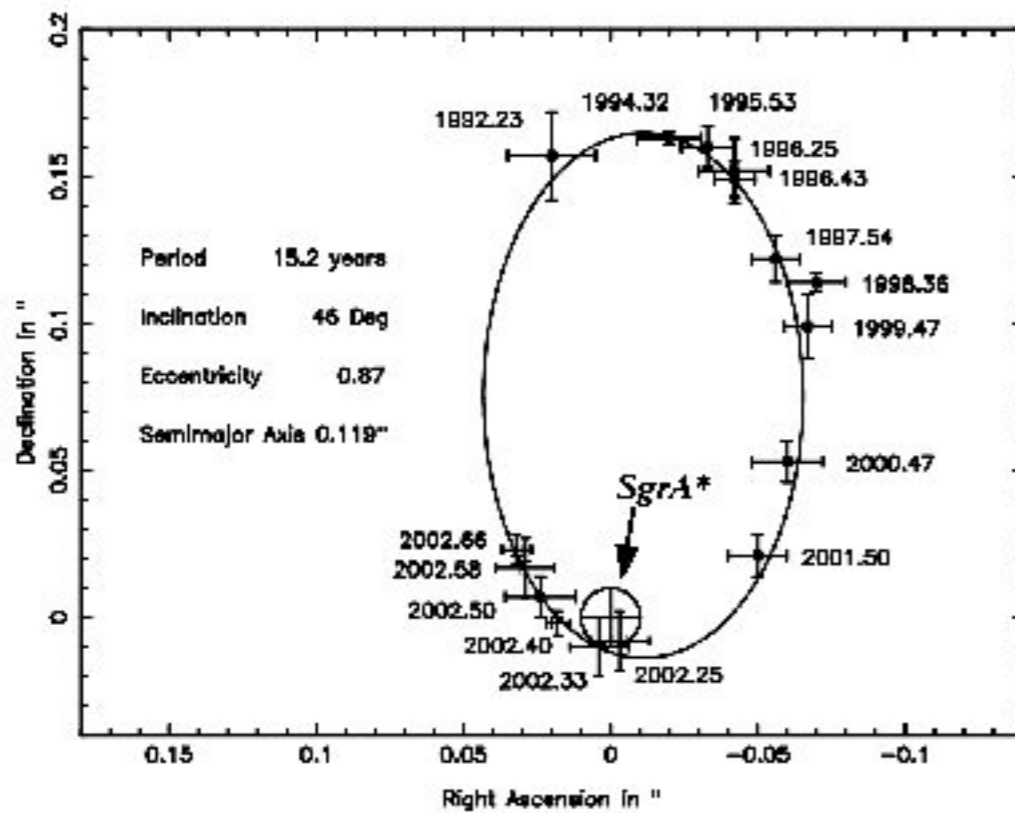
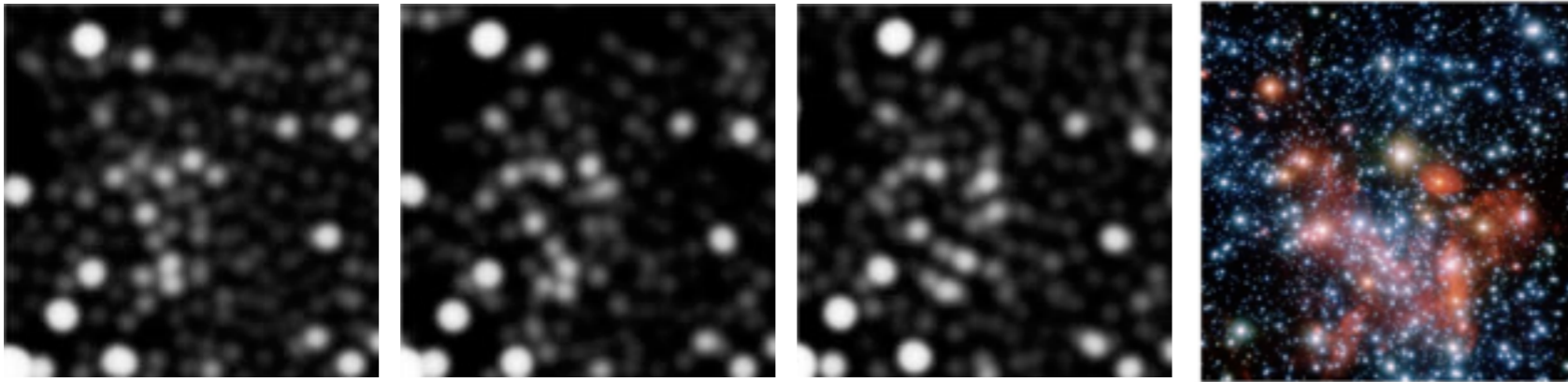
# 銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



Zooming in on the centre of the Milky Way

<http://www.youtube.com/watch?v=XhHUNvEKUY8> (1:15)

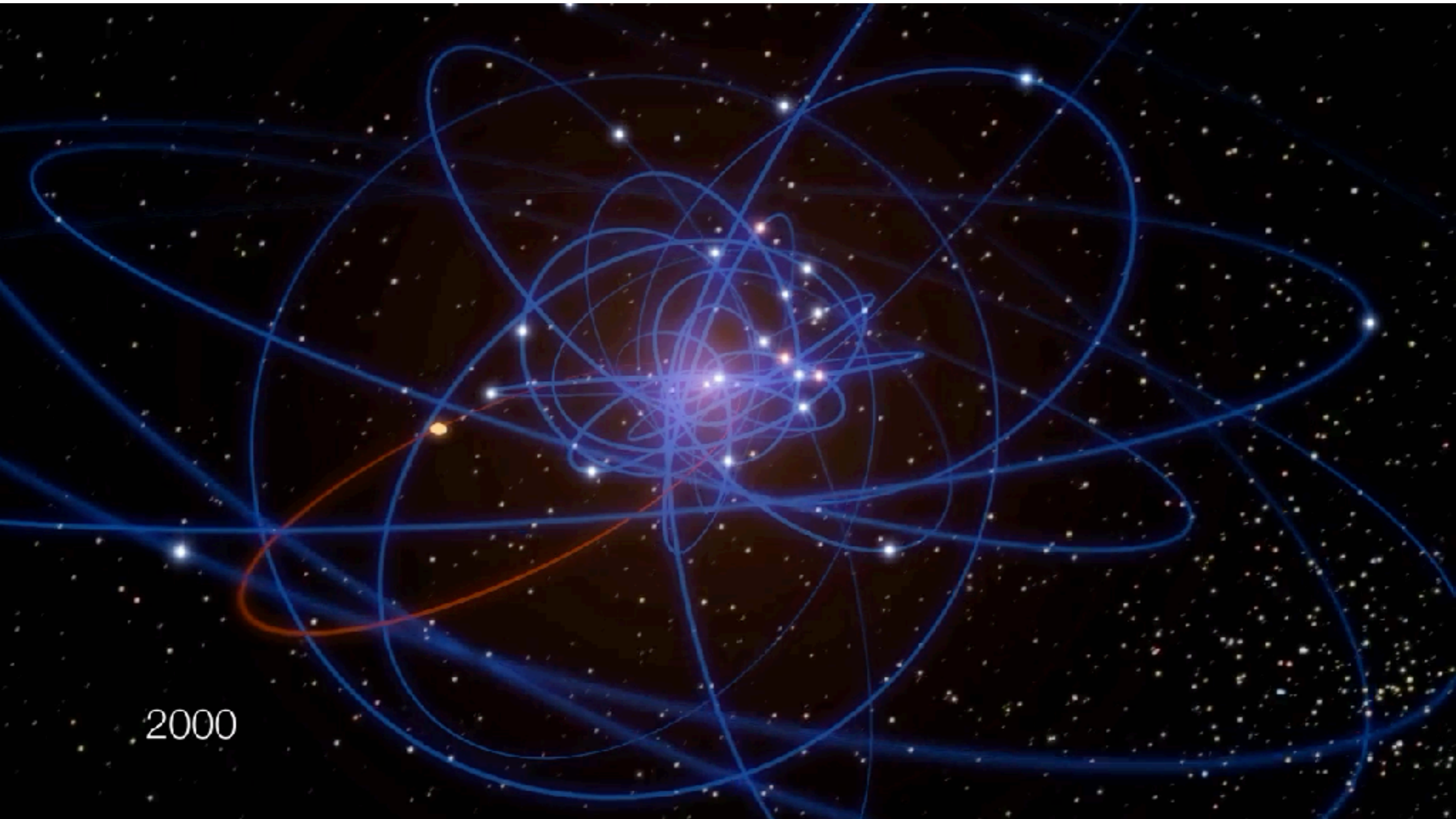
# S2 orbit around Sgr A\*



<http://www.extinctionsift.com/SignificantFindings08.htm>

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

## 天の川銀河 中心付近の星の動き (アニメーション)

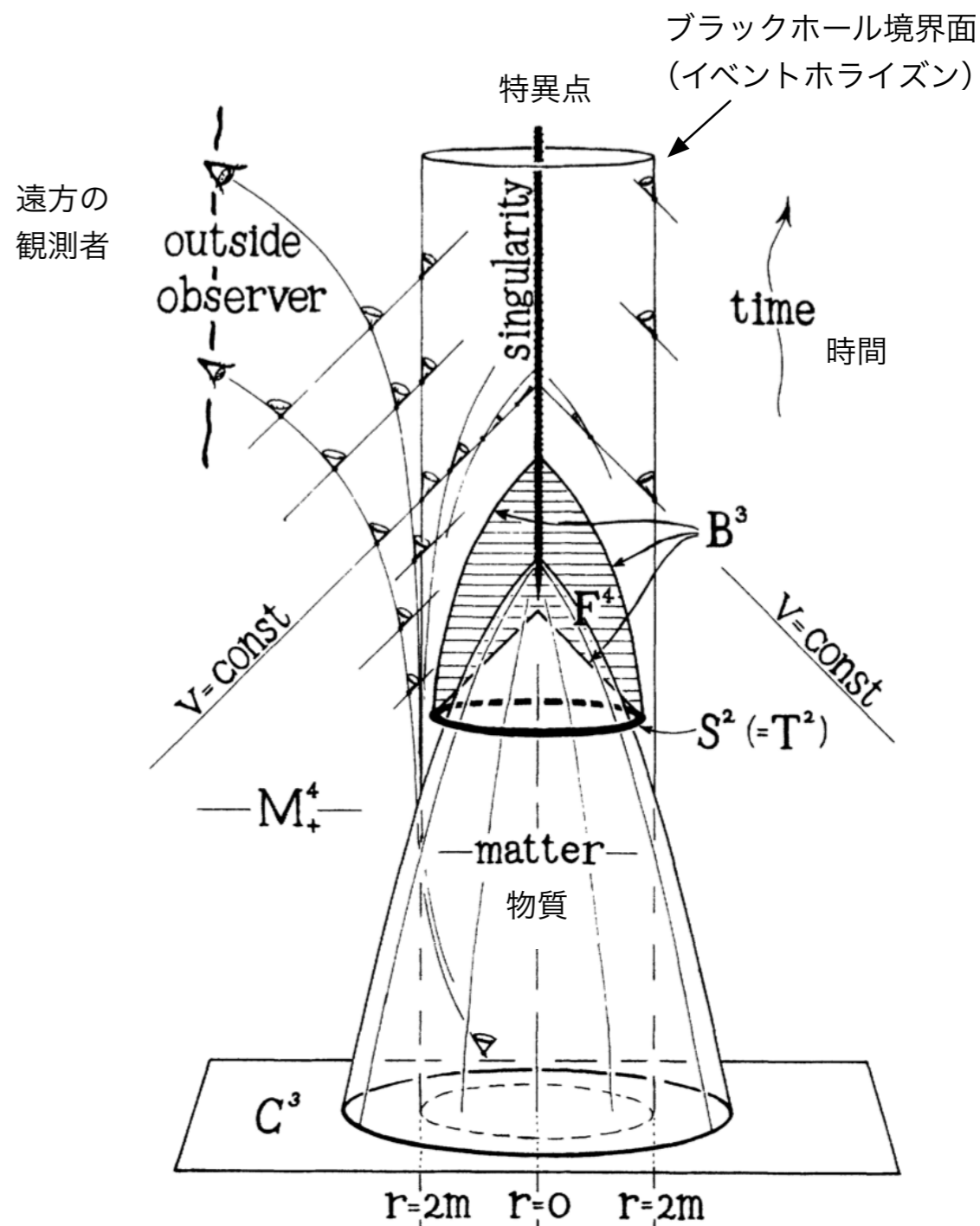
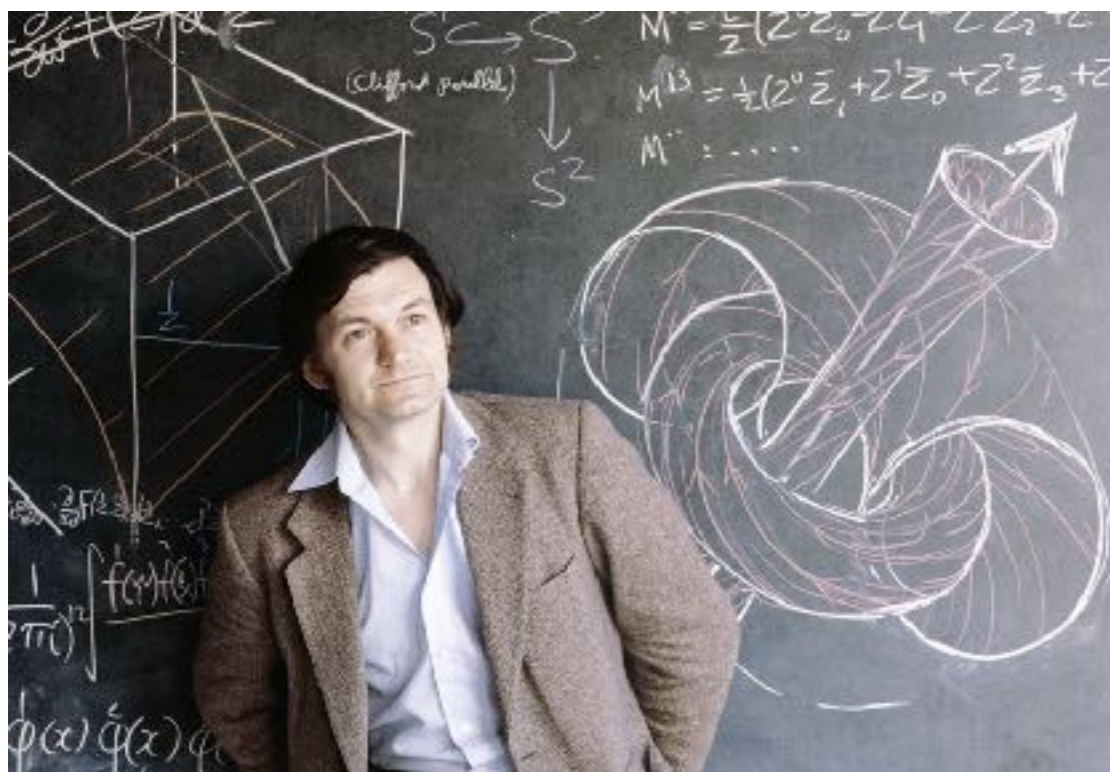


Reinhard Genzel and Andrea Ghez independently tracked the activity around the supermassive black hole at the Milky Way's center over a period of decades.

<https://www.quantamagazine.org/physics-nobel-awarded-for-black-hole-breakthroughs-20201006>

## ロジャー・ペンローズ

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



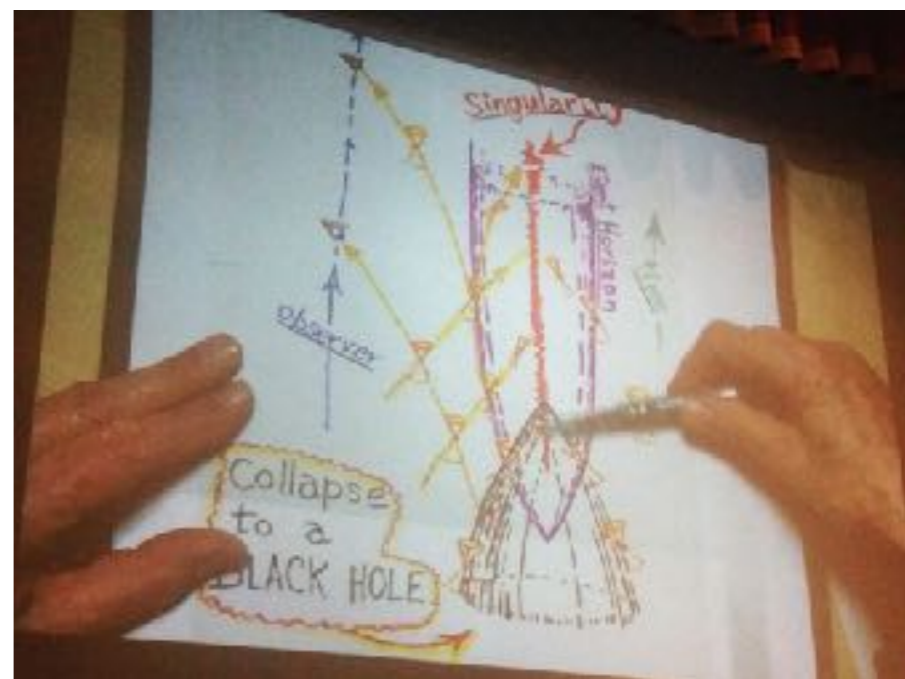
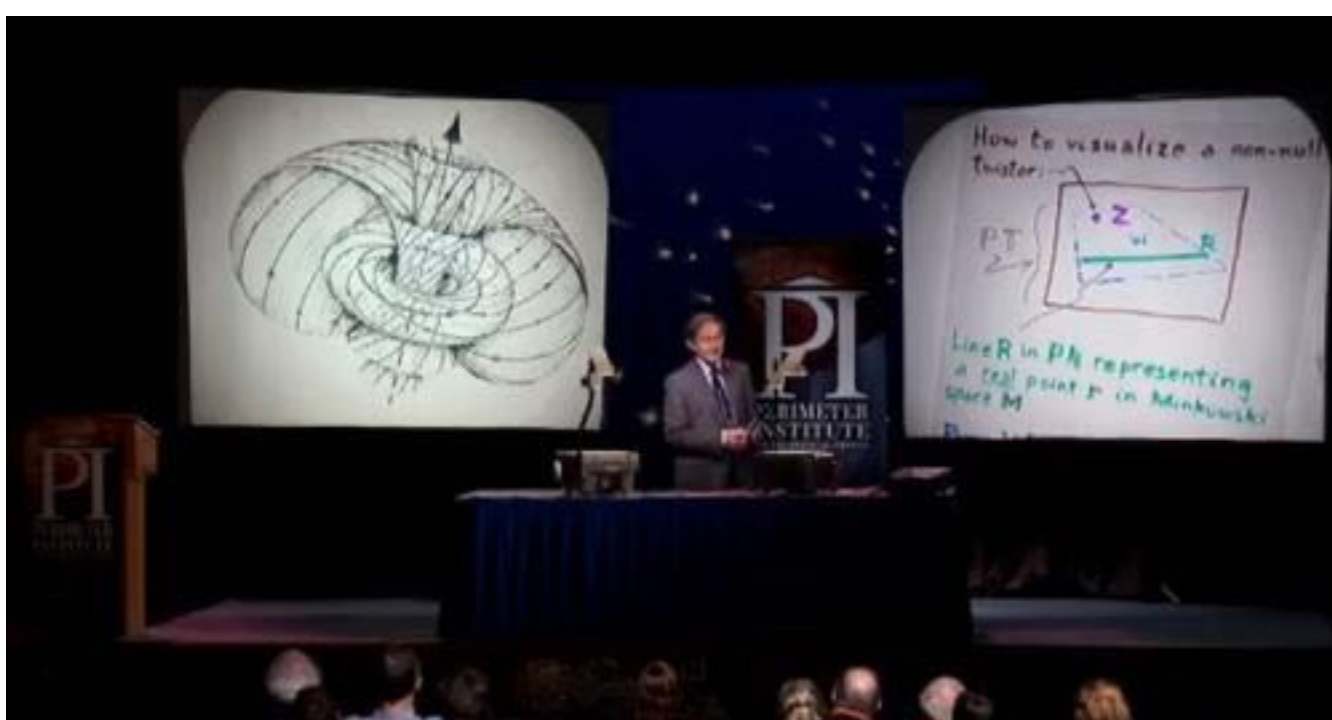
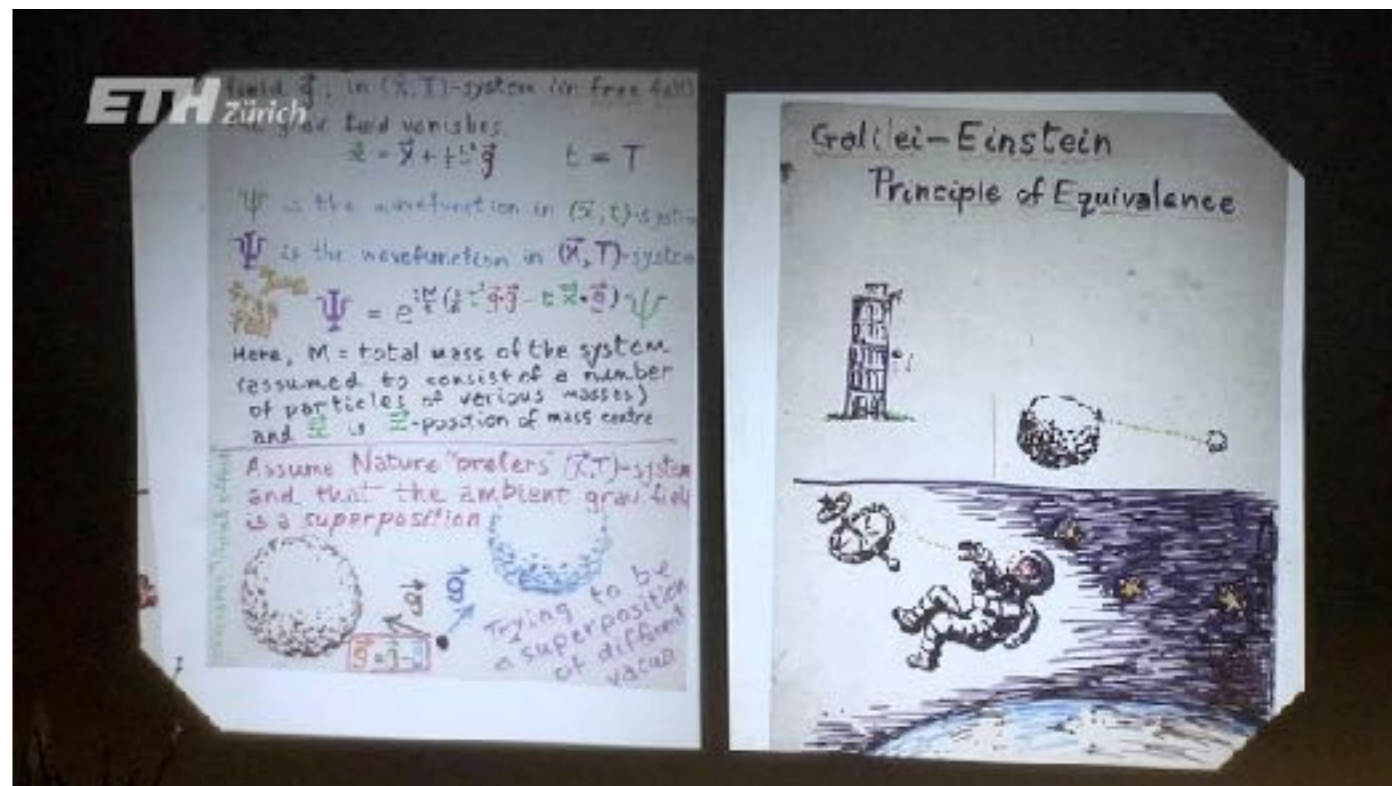
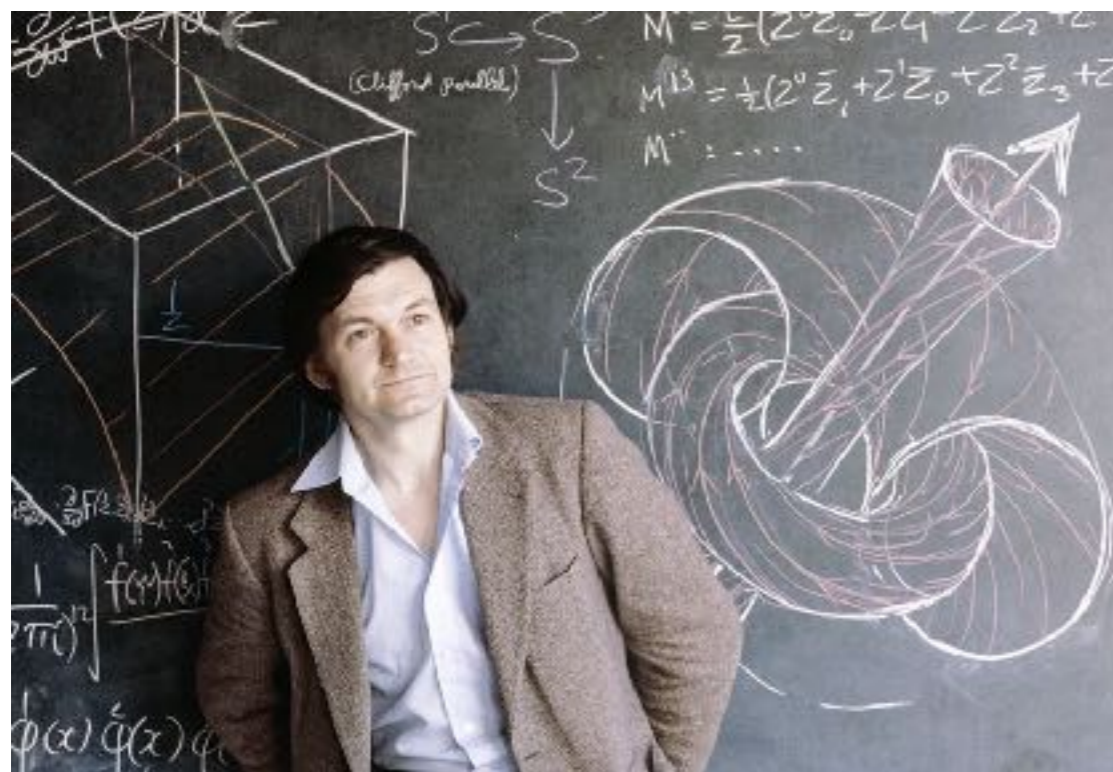
ペンローズが描いたブラックホール形成の図。横の広がりが空間（2次元で表している）、縦方向上向きに時間の進みを表す。物質が重力崩壊してつぶれ、光（円錐で描かれているのが光の広がり方を示す）が遠方へ到達しない領域が出現する。中心では特異点が発生するが、それはブラックホール境界面の内側にあるので、遠方の物理を乱さない。

(R. Penrose, Phys. Rev. Lett. 14 (1965) 57の図を加工。)



## ロジャー・ペンローズ

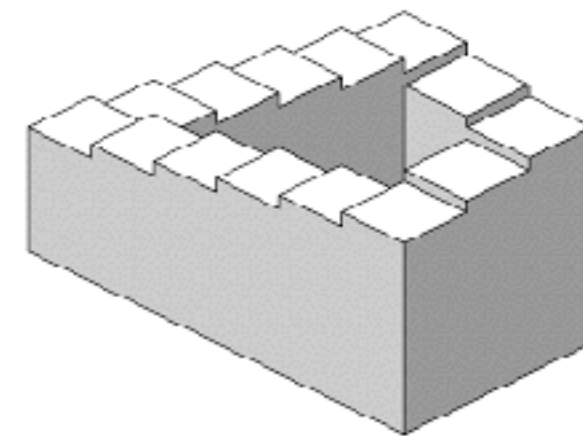
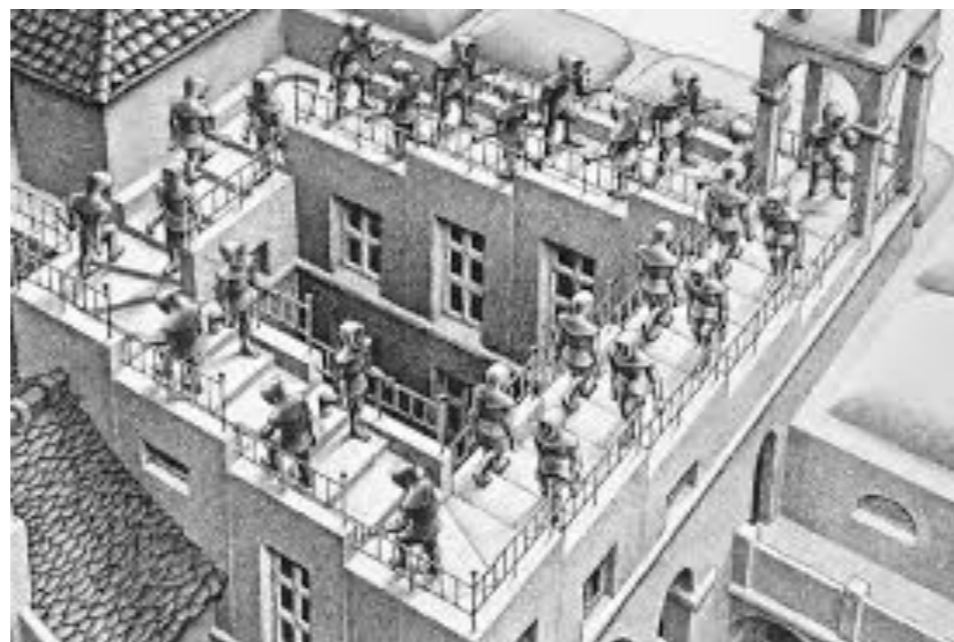
「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」



## ロジャー・ペンローズ &amp; M. C. エッシャー



*Ascending and Descending* by M. C. Escher



Penrose Stairs

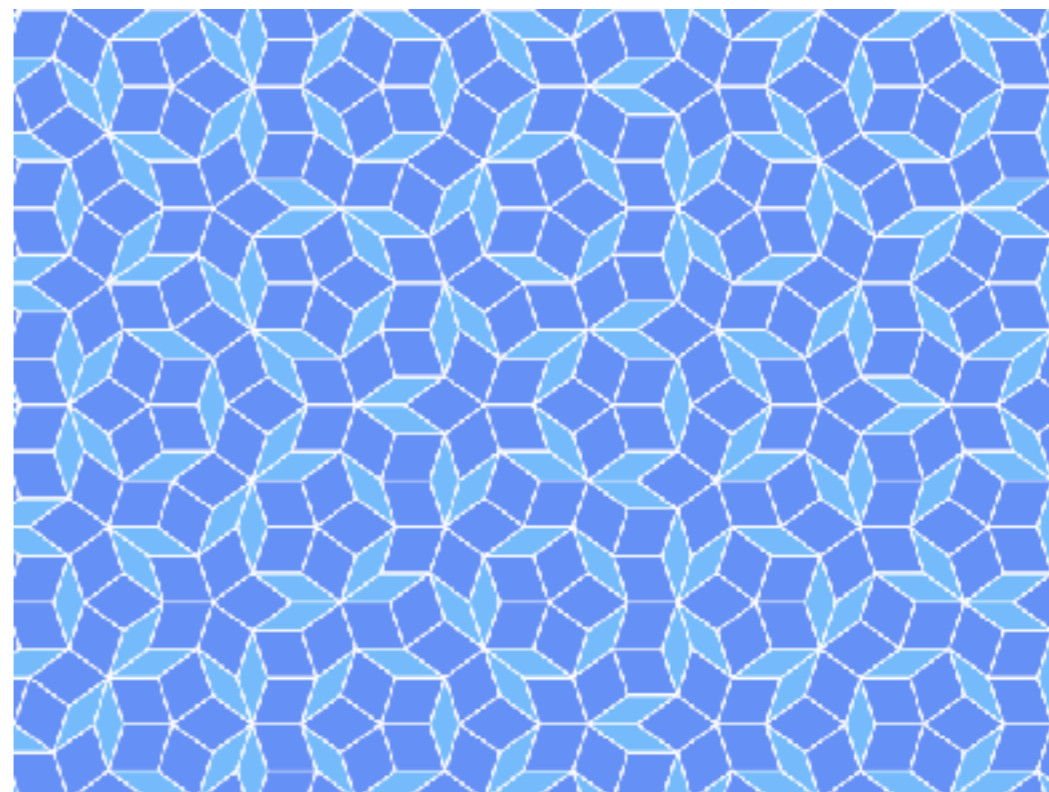
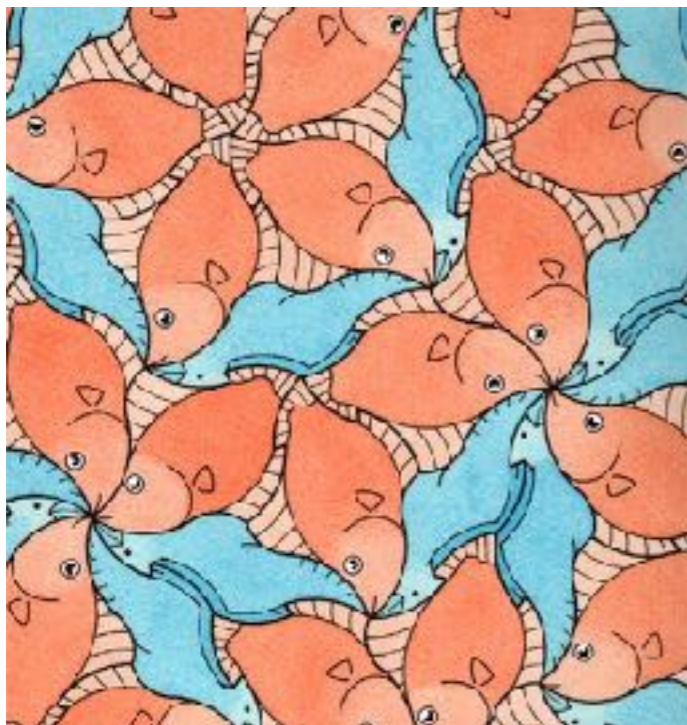


*Relativity* (1953) by M. C. Escher

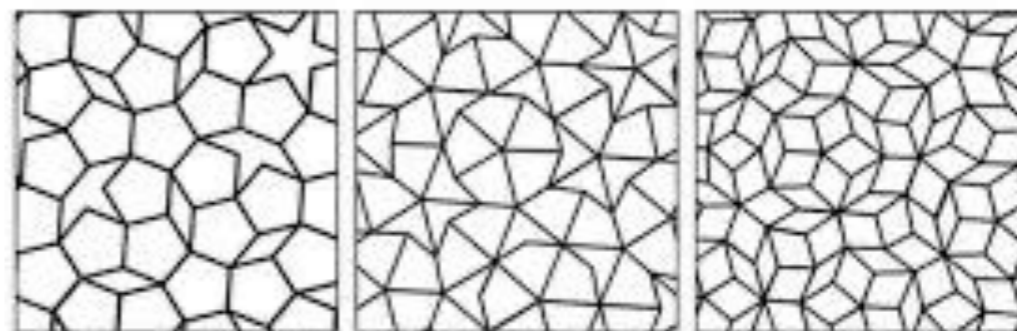


Penrose Triangle

## ロジャー・ペンローズ &amp; M. C. エッシャー



Penrose Tiling



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



地球から5500万光年

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

# 電波望遠鏡 口径が大きいほど集光力高い， 分解能高い

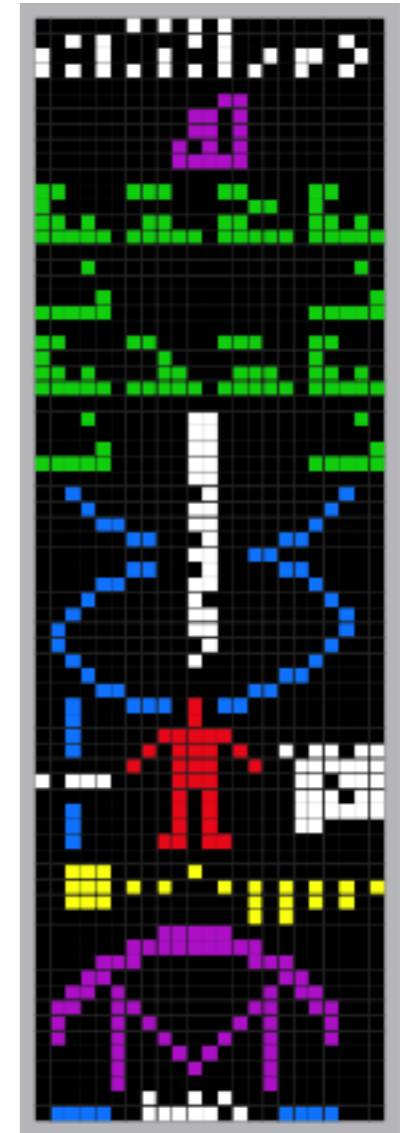


$$\text{分解能} = \text{波長} / \text{口径}$$

## 野辺山45m望遠鏡

# アレシボ電波望遠鏡 305メートル球面電波望遠鏡 (1963—2020)

(Arecibo Observatory, プエルトリコ)



- 1964 水星の自転周期55日の発見
- 1968 かにパルサー中心に中性子星発見
- 1974 連星中性子星発見
- 1989 小惑星カスターリア直接観測
- 1992 パルサーを公転する太陽系外惑星発見

アレシボ・メッセージ (1974)  
SETI (1999—)

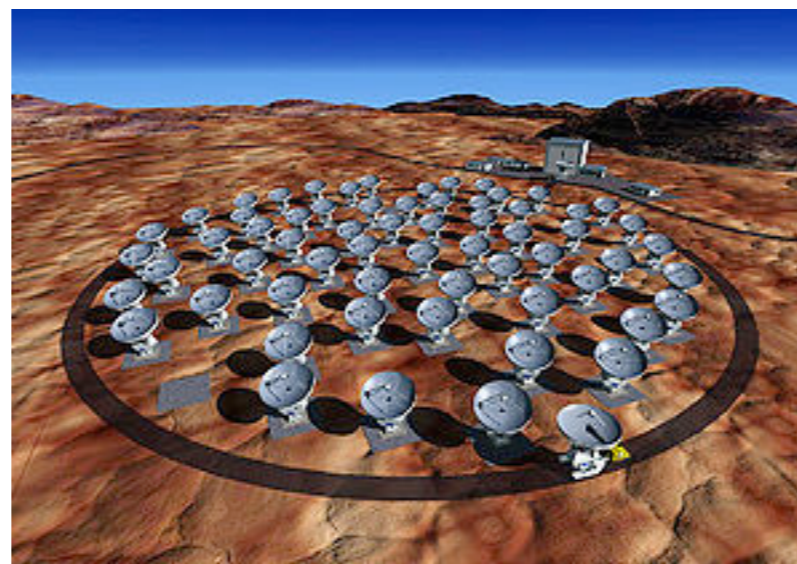
# アルマ望遠鏡 Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array

日本が、欧米と共同で、チリのアタカマに建設した電波望遠鏡

全66台のアンテナが設置され、日本は16台を担当。「いざよい」と命名。  
標高5000m地点に設置されている。

直径12メートルのアンテナを50台組み合わせるアンテナ群と、直径12メートルのアンテナ4台と直径7メートルアンテナ12台からなる。最大18.5キロメートルまでアンテナ間隔を広げることができ、最大の空間分解能は、0.05 マイクロラジアン。

「大阪にある一円玉を東京から見分けられるほどの高い解像度」



# 中国「天眼（FAST）」 500メートル球面電波望遠鏡（2016一）

(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope: FAST)



中国南西部の貴州省， 185億円， 天頂から40度の範囲を観測可能，  
1万人強制移住， 半径5 km以内携帯電話禁止

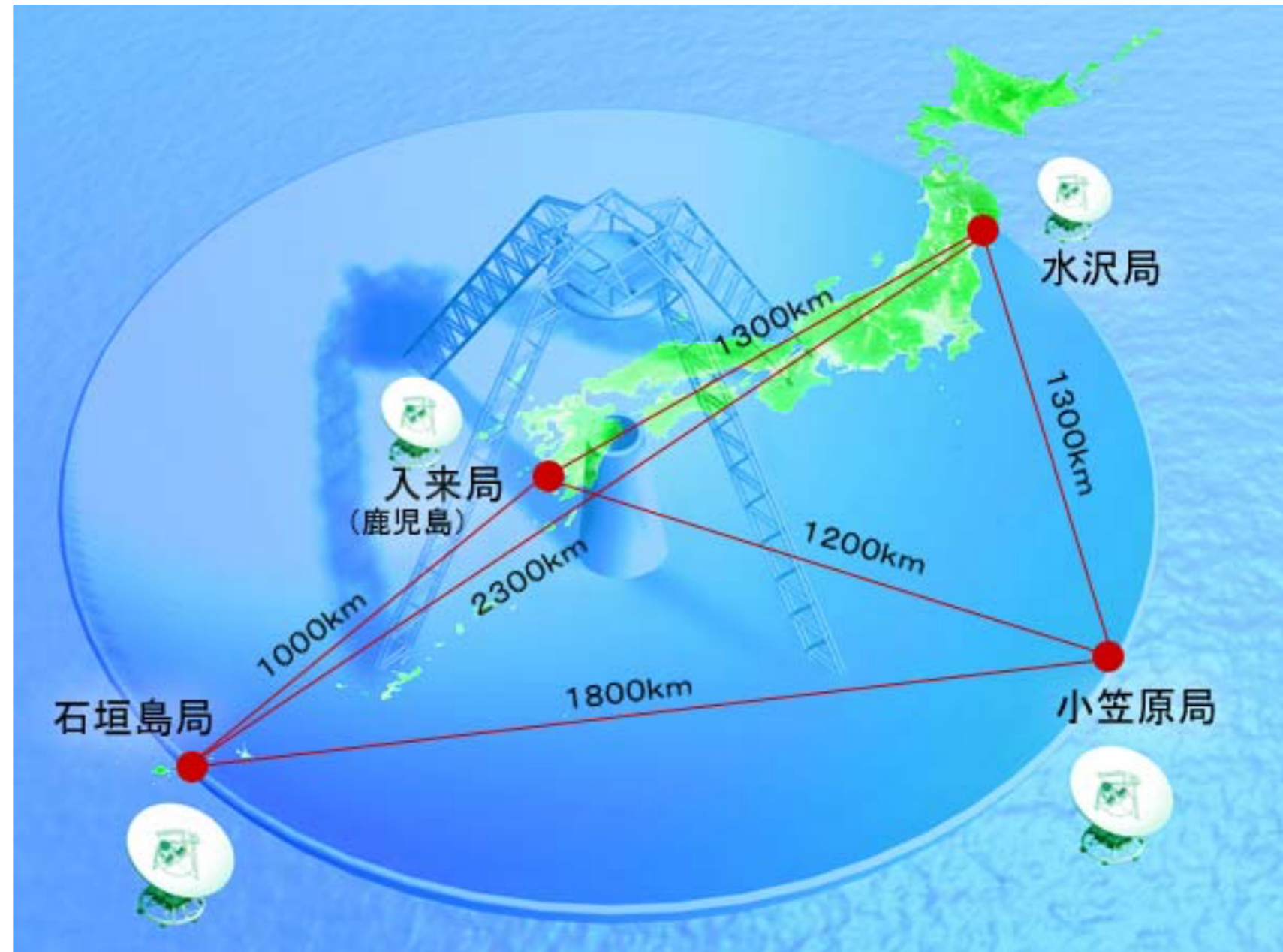
[http://japanese.china.org.cn/business/txt/2016-07/04/content\\_38806293.htm](http://japanese.china.org.cn/business/txt/2016-07/04/content_38806293.htm)



# 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>

# イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT)

— 各地の電波望遠鏡をつなぎ、地球サイズの仮想望遠鏡を構成 —



<https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190410-eh.html>



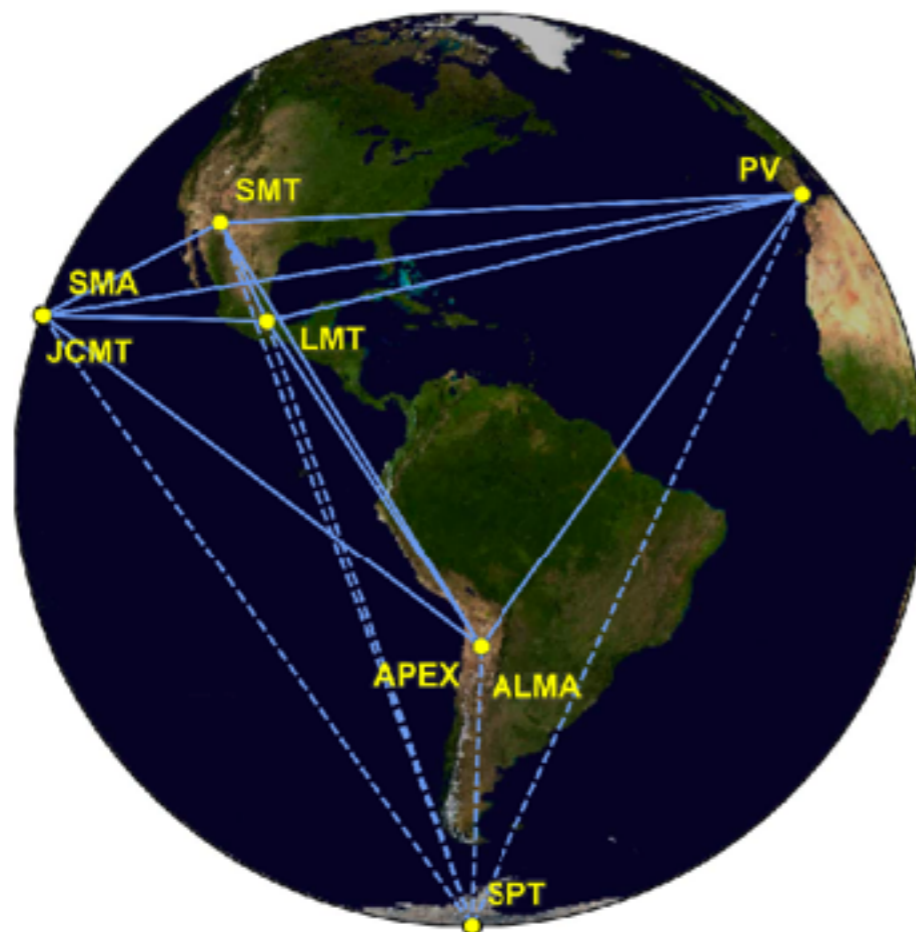
# First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole

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

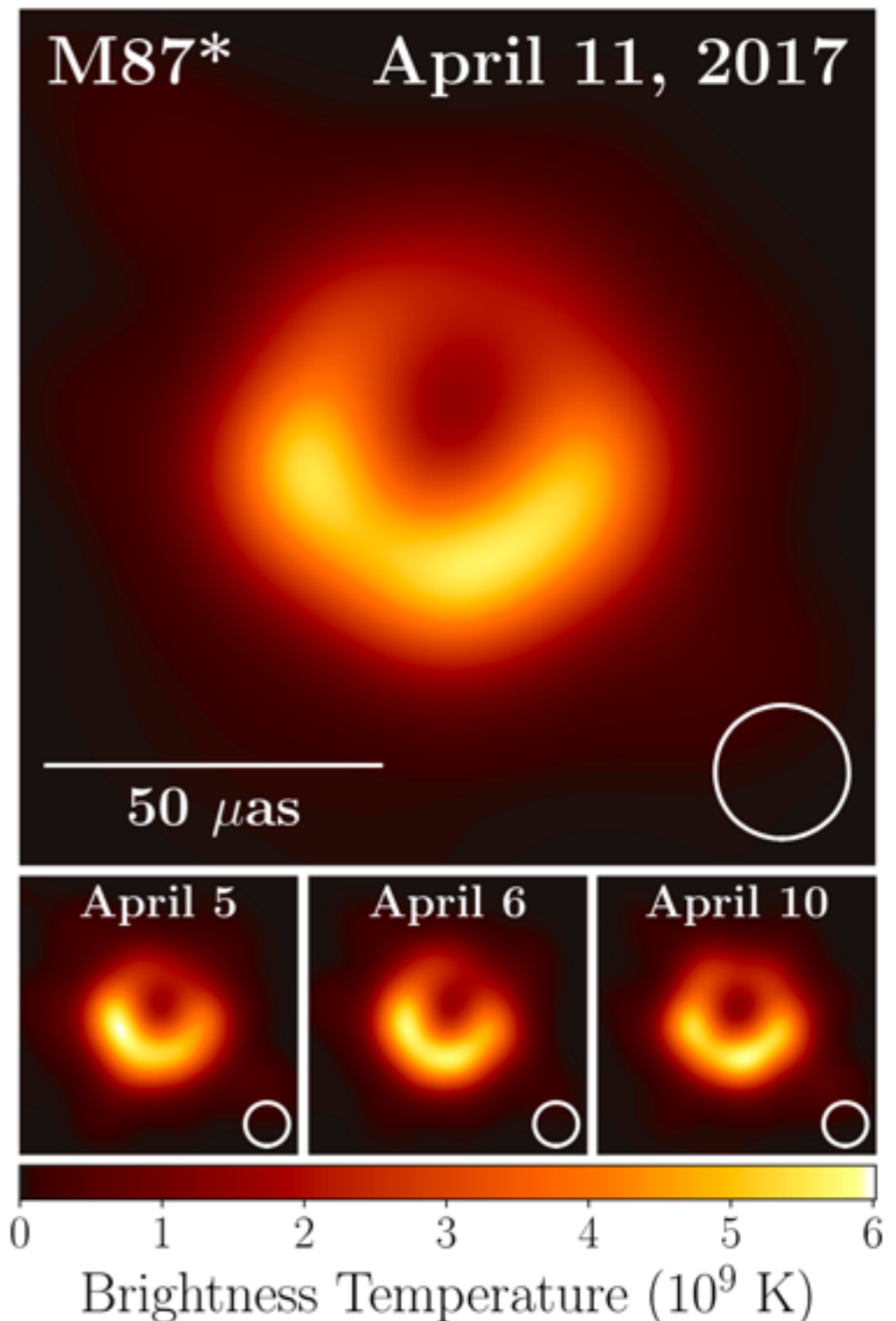
Received 2019 March 1; revised 2019 March 12; accepted 2019 March 12; published 2019 April 10

## Abstract

When surrounded by a transparent emission region, black holes are expected to reveal a dark shadow caused by gravitational light bending and photon capture at the event horizon. To image and study this phenomenon, we have assembled the Event Horizon Telescope, a global very long baseline interferometry array observing at a wavelength of 1.3 mm. This allows us to reconstruct event-horizon-scale images of the supermassive black hole candidate in the center of the giant elliptical galaxy M87. We have resolved the central compact radio source as an asymmetric bright emission ring with a diameter of  $42 \pm 3 \mu\text{as}$ , which is circular and encompasses a central depression in brightness with a flux ratio  $\gtrsim 10:1$ . The emission ring is recovered using different calibration and imaging schemes, with its diameter and width remaining stable over four different observations carried out in different days. Overall, the observed image is consistent with expectations for the shadow of a Kerr black hole as predicted by general relativity. The asymmetry in brightness in the ring can be explained in terms of relativistic beaming of the emission from a plasma rotating close to the speed of light around a black hole. We compare our images to an extensive library of ray-traced general-relativistic magnetohydrodynamic simulations of black holes and derive a central mass of  $M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_\odot$ . Our radio-wave observations thus provide powerful evidence for the presence of supermassive black holes in centers of galaxies and as the central engines of active galactic nuclei. They also present a new tool to explore gravity in its most extreme limit and on a mass scale that was so far not accessible.

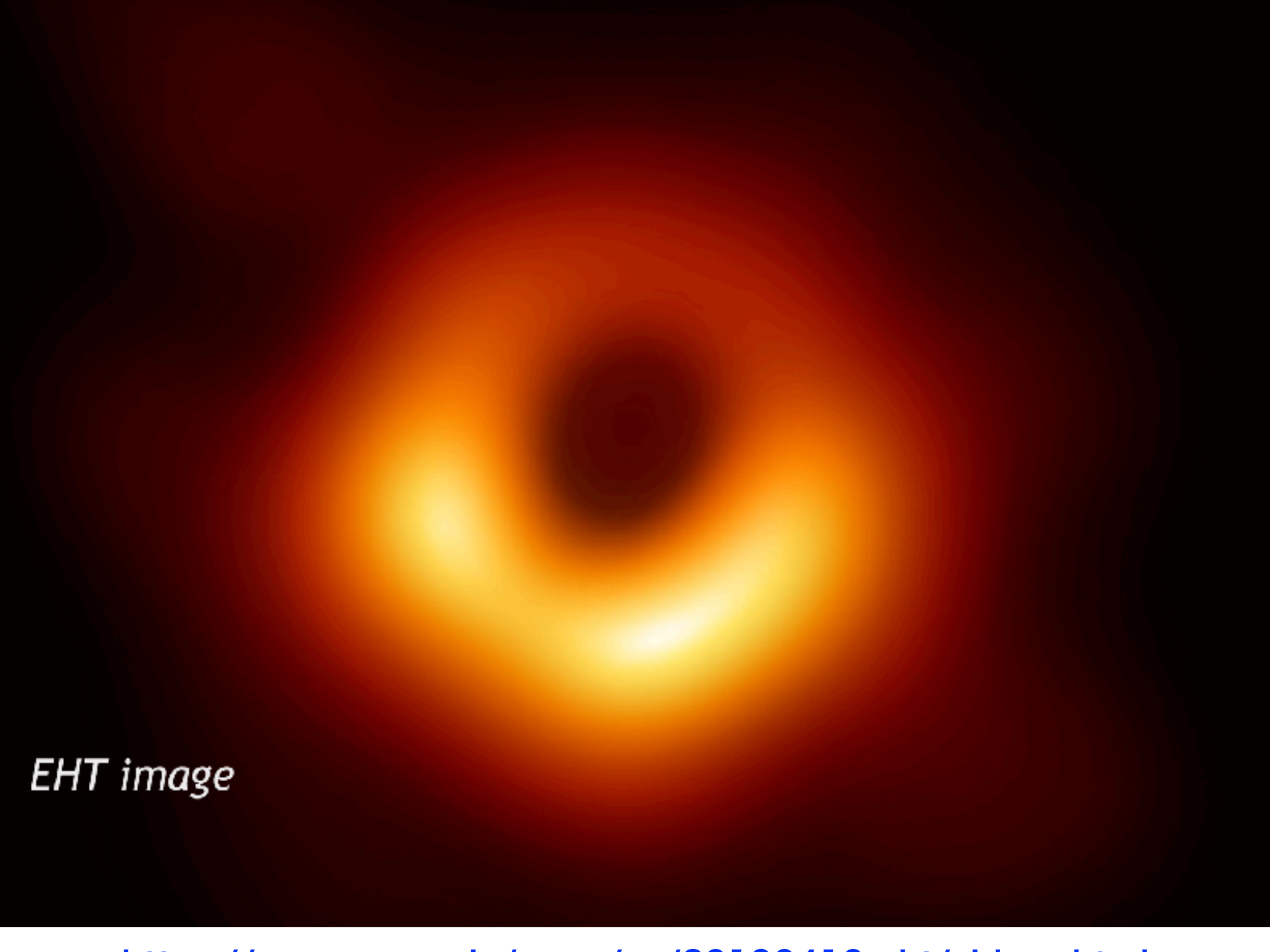


**Figure 1.** Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual



**Figure 3.** Top: EHT image of M87\* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the three kernels ( $20 \mu\text{as}$  FWHM) is shown in the lower right. The image is shown in units of brightness temperature,  $T_b = S\lambda^2/2k_B\Omega$ , where  $S$  is the flux density,  $\lambda$  is the observing wavelength,  $k_B$  is the Boltzmann constant, and  $\Omega$  is the solid angle of the resolution element. Bottom: similar images taken over different days showing the stability of the basic image structure and the equivalence among different days. North is up and east is to the left.

# ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像

A circular image showing the shadow of a black hole. It features a dark central region surrounded by a bright, glowing ring of light, with a color gradient from yellow to red. The image is centered on a black background.

*EHT image*

<https://www.nao.ac.jp/news/sp/20190410-eh/ideos.html>

0'58"

# 最近の宇宙研究の進展から

1. 太陽系内惑星探査
2. 太陽系外惑星探査 2018年ノーベル物理学賞
3. ブラックホールの観測 2020年ノーベル物理学賞
4. **重力波観測の現状** 2017年ノーベル物理学賞
5. 時計を使った相対性理論の検証

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

2021/3/10 サークルすばる @大阪中央会館



IMAGINE THAT SPACE IS A GIANT SHEET OF RUBBER...

THINGS THAT HAVE MASS CAUSE THAT RUBBER SHEET TO BEND, LIKE A BOWLING BALL ON A TRAMPOLINE.

THE MORE MASS, THE MORE THAT SPACE GETS BENT AND DISTORTED BY GRAVITY.

JORGE CHAM © 2016

FOR EXAMPLE, THE REASON THE EARTH GOES AROUND THE SUN IS THAT THE SUN IS VERY MASSIVE, CAUSING A BIG DISTORTION OF THE SPACE AROUND IT.

IF YOU JUST TRY TO MOVE IN A STRAIGHT LINE AROUND SUCH A BIG DISTORTION, YOU WILL FIND YOURSELF ACTUALLY MOVING IN A CIRCLE.

THAT'S HOW ORBITS WORK: THERE'S NO ACTUAL FORCE PULLING THE PLANETS AROUND, JUST A BENDING OF THE SPACE.

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

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

IF YOU AND I STARTED TO DANCE AROUND EACH OTHER, WE WOULD ALSO CAUSE RIPPLES IN THE FABRIC OF SPACE AND TIME.

BUT THESE WOULD BE EXTREMELY SMALL, PRACTICALLY UNDETECTABLE.

AND ANYTIME THERE'S A NEW WAY TO INVESTIGATE THE UNIVERSE WE DISCOVER THINGS THAT WE DIDN'T EXPECT.

IT'S REALLY ABOUT LOOKING FOR NEW THINGS THAT WE DIDN'T KNOW EXISTED...

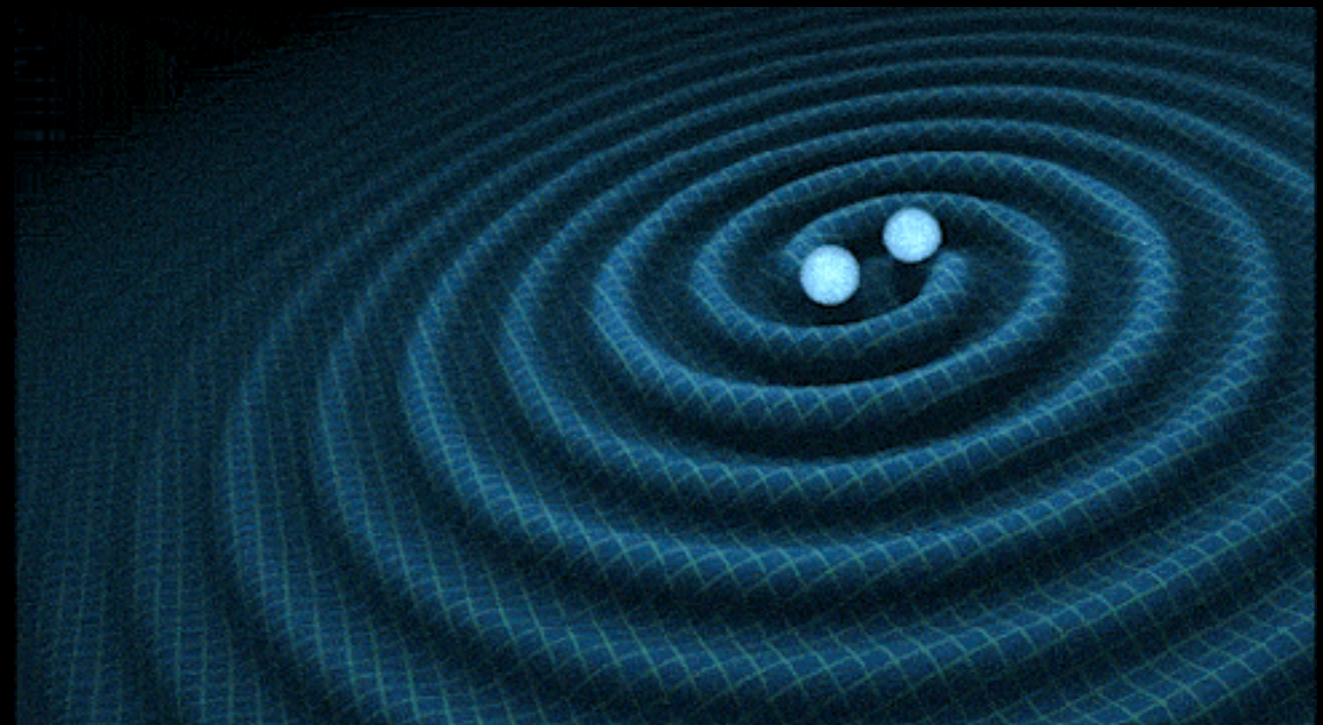
...EXAMINING THE EXTREME EDGES OF OUR KNOWLEDGE OF PHYSICS...

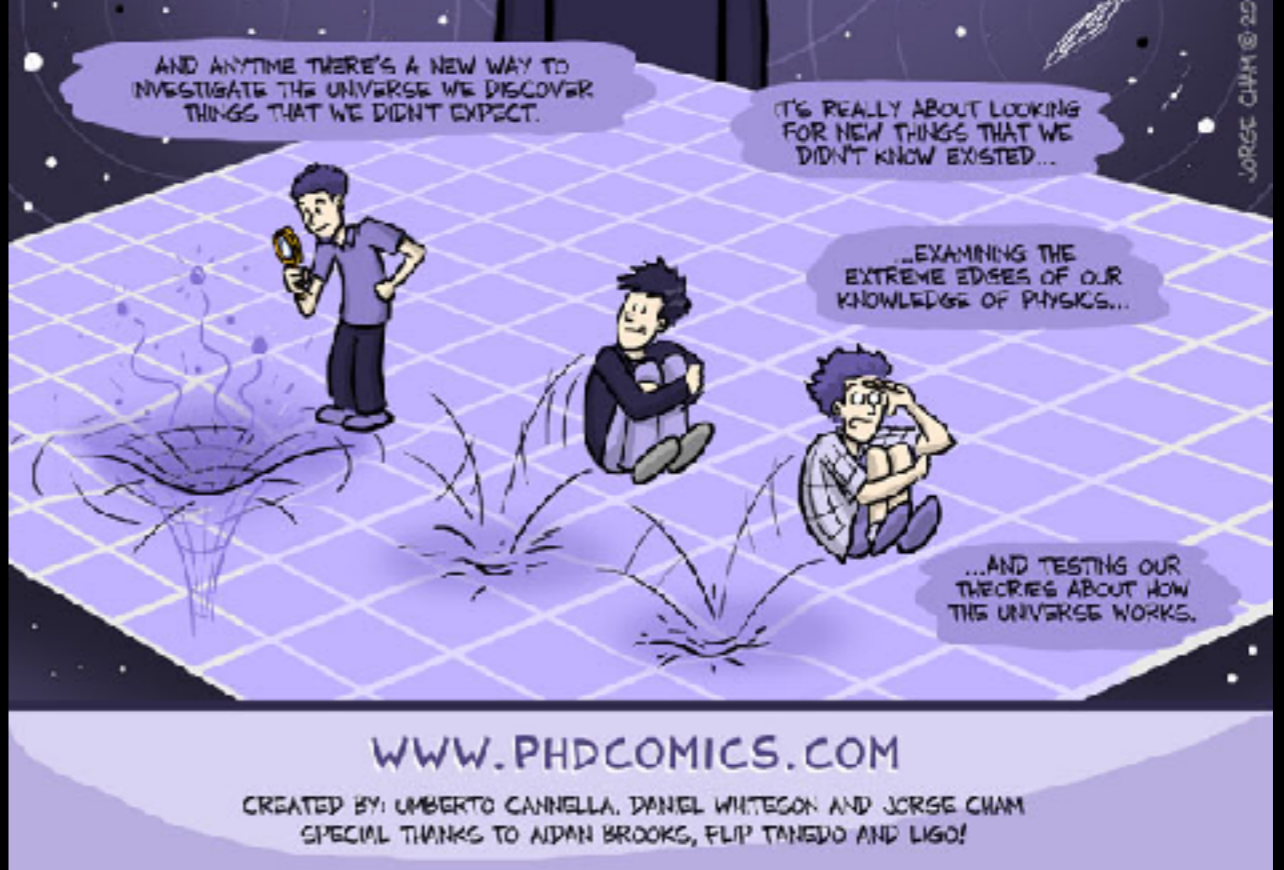
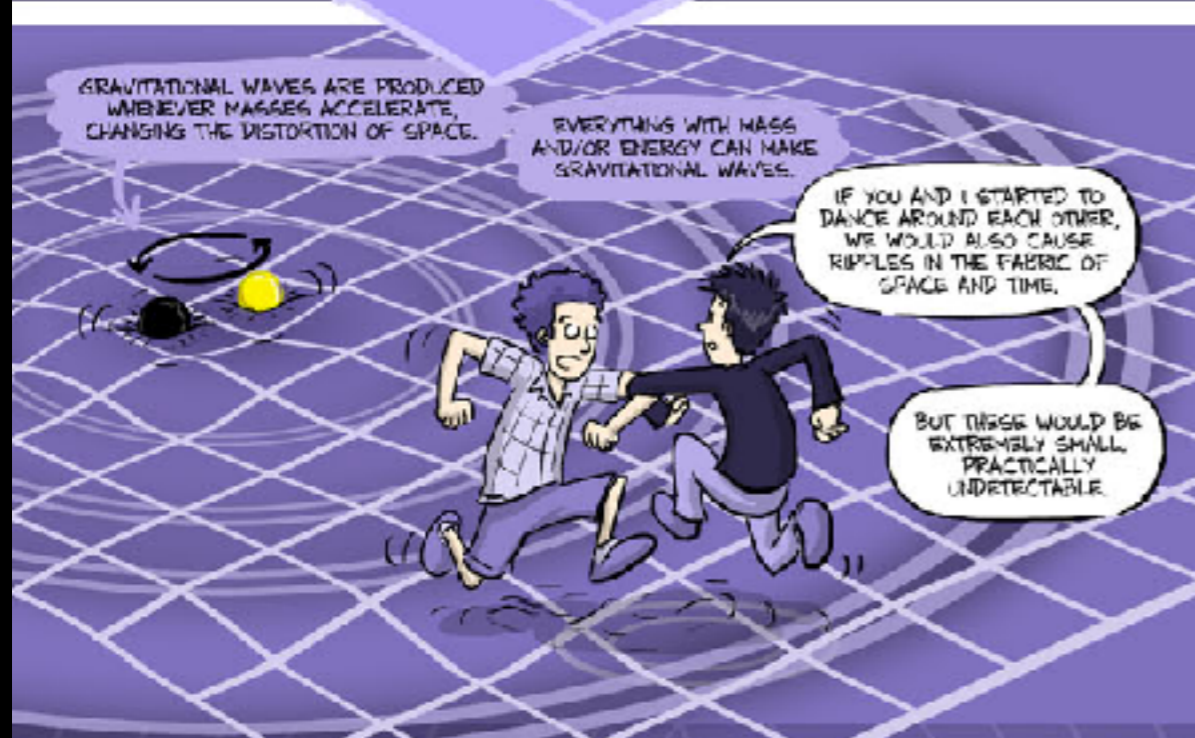
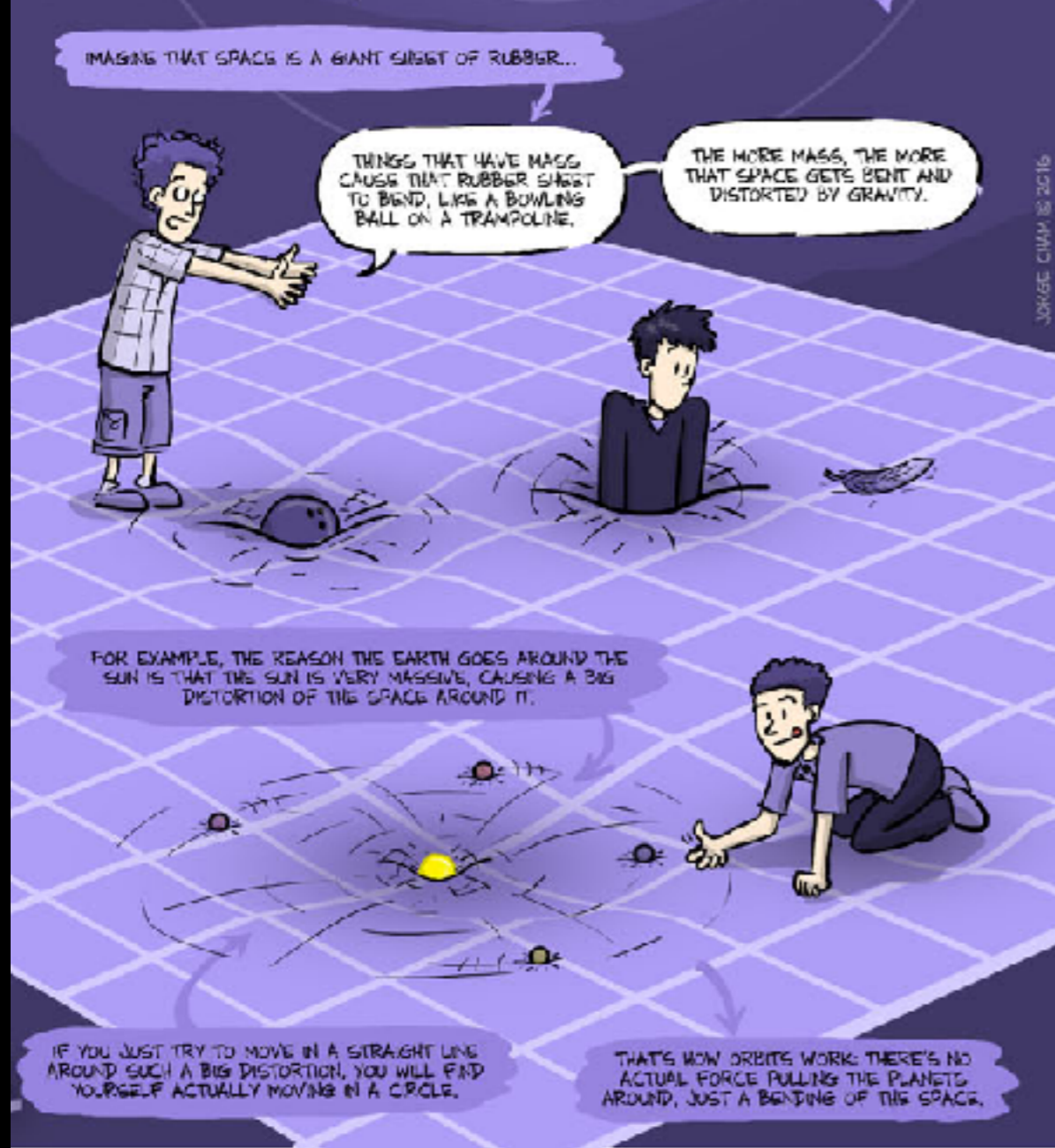
...AND TESTING OUR THEORIES ABOUT HOW THE UNIVERSE WORKS.

JORGE CHAM © 2016

WWW.PHDCOMICS.COM

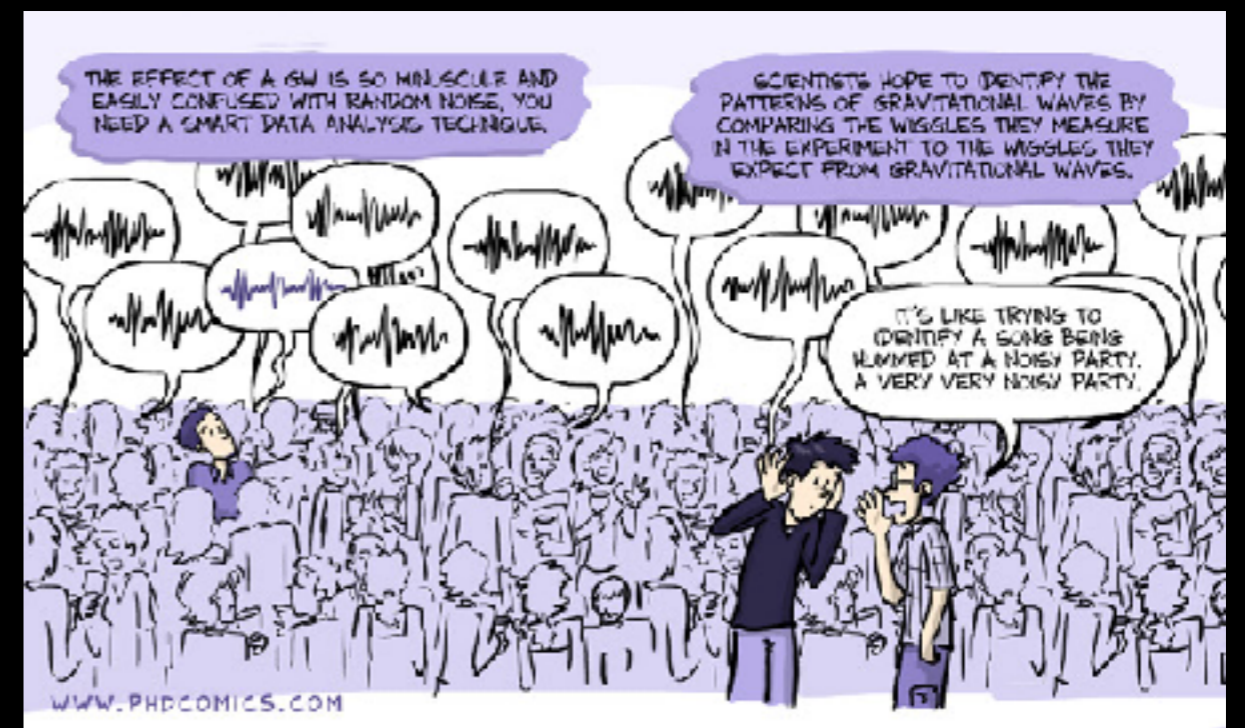
CREATED BY: UMBERTO CANNELLA, DANIEL WHITEGON AND JORGE CHAM  
SPECIAL THANKS TO ADAM BROOKS, FLIP TANEJO AND LIGO!

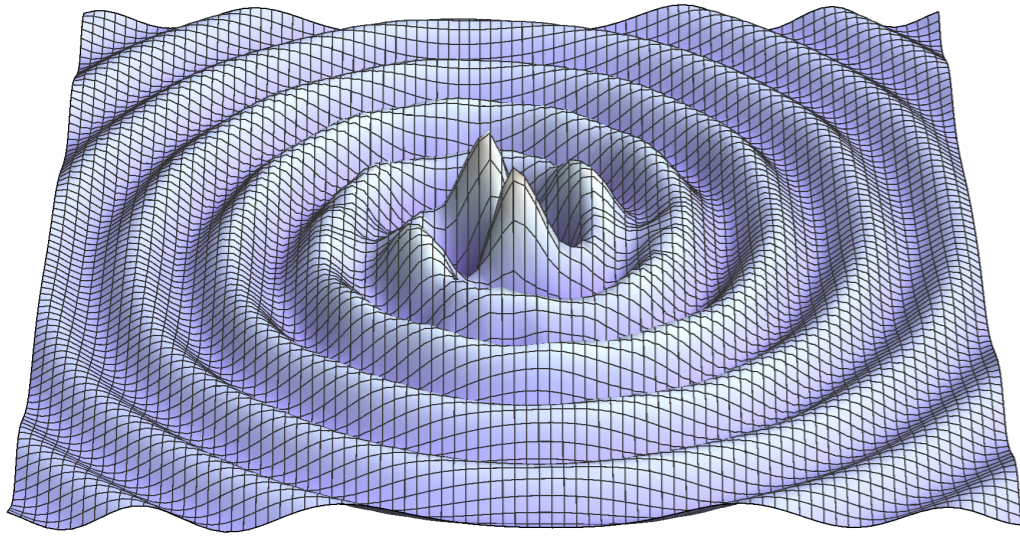




[www.phdcomics.com](http://www.phdcomics.com)

“gravitational waves explained”





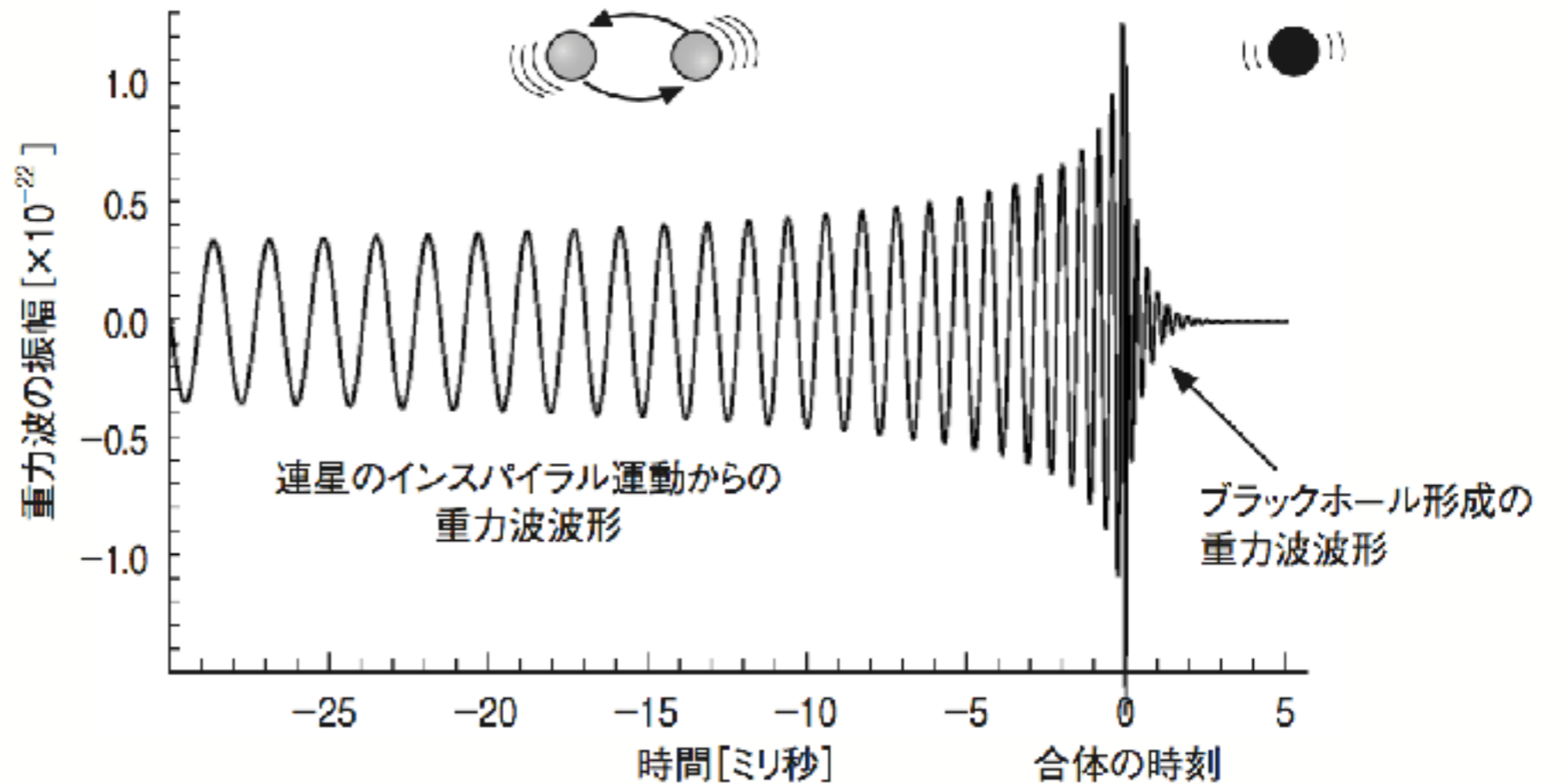
重力波の直接観測をしたい！

連星中性子星  
連星ブラックホール

インスパイラル

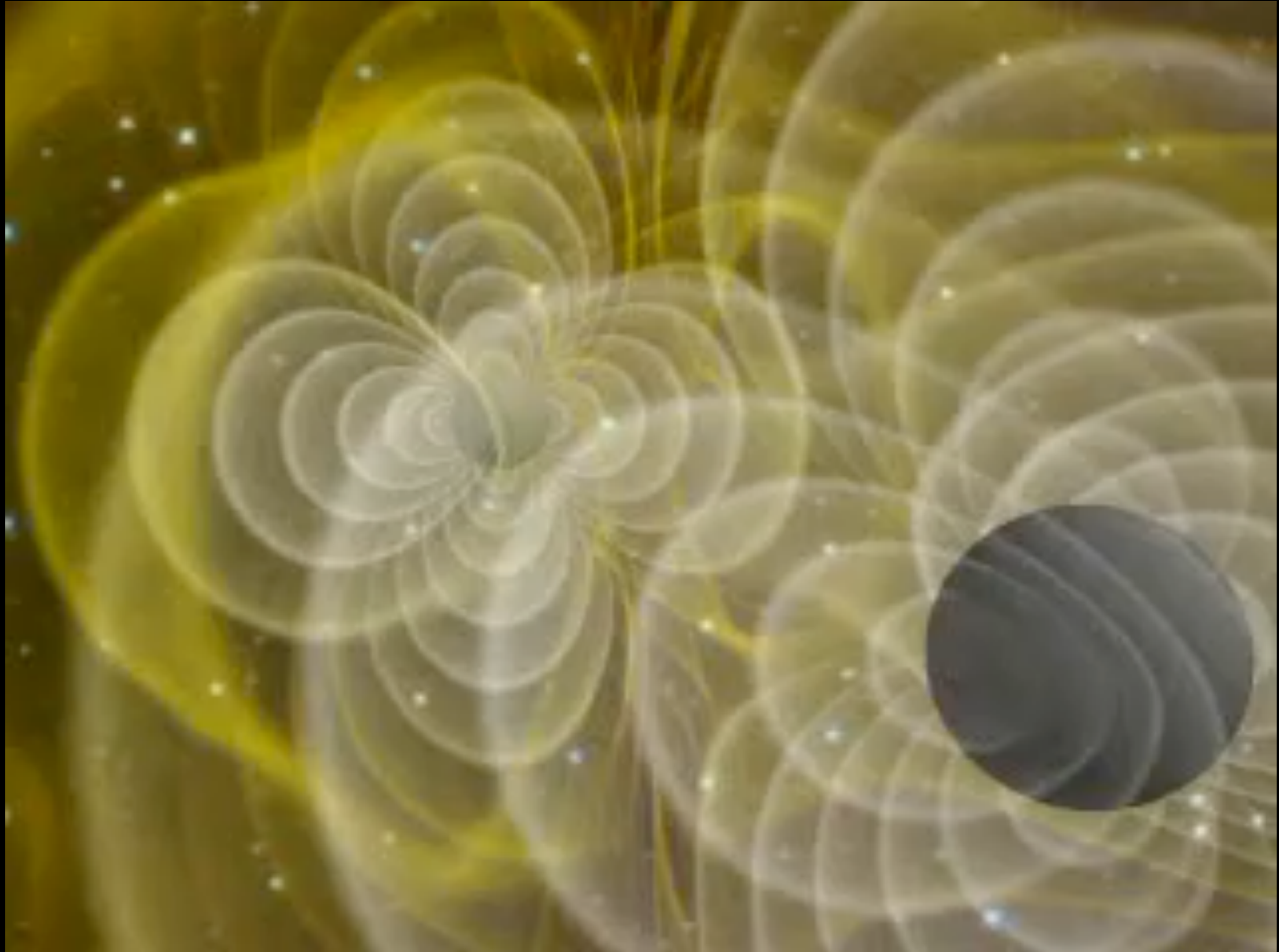
合体

リングダウン





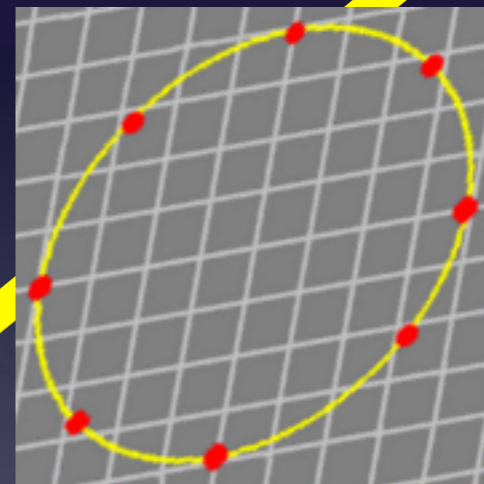
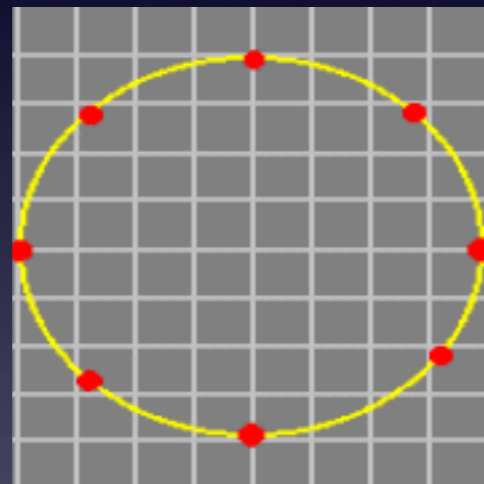
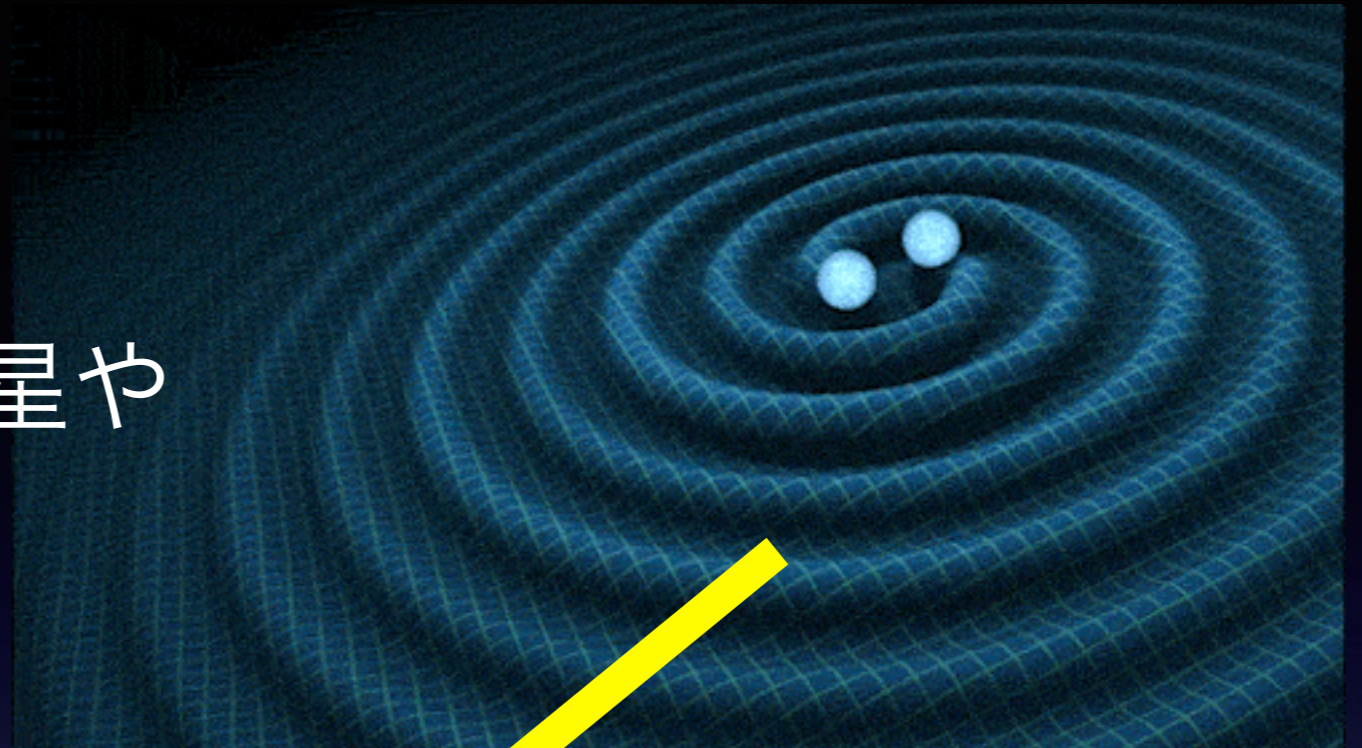
# ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)

# 重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や  
中性子星連星



レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

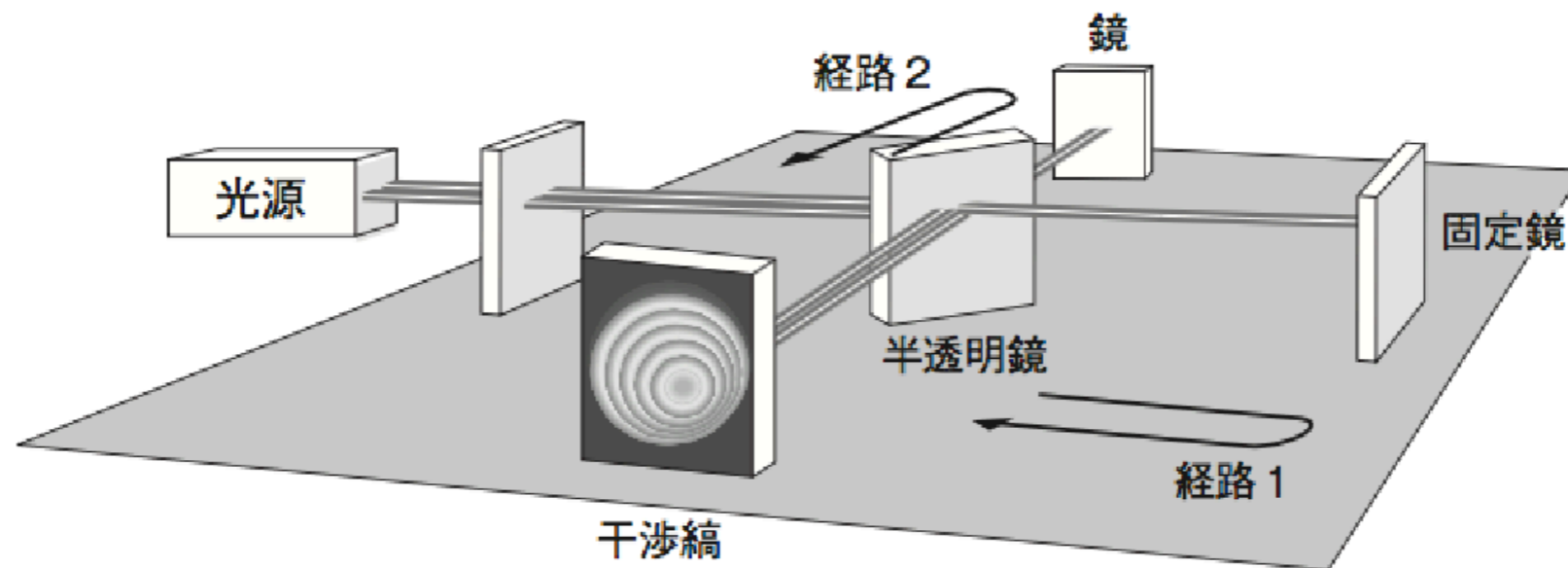
Gravitational-Wave Observatory

# LIGO (ライゴ: レーザー干渉計重力波天文台)

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (1992年予算承認)

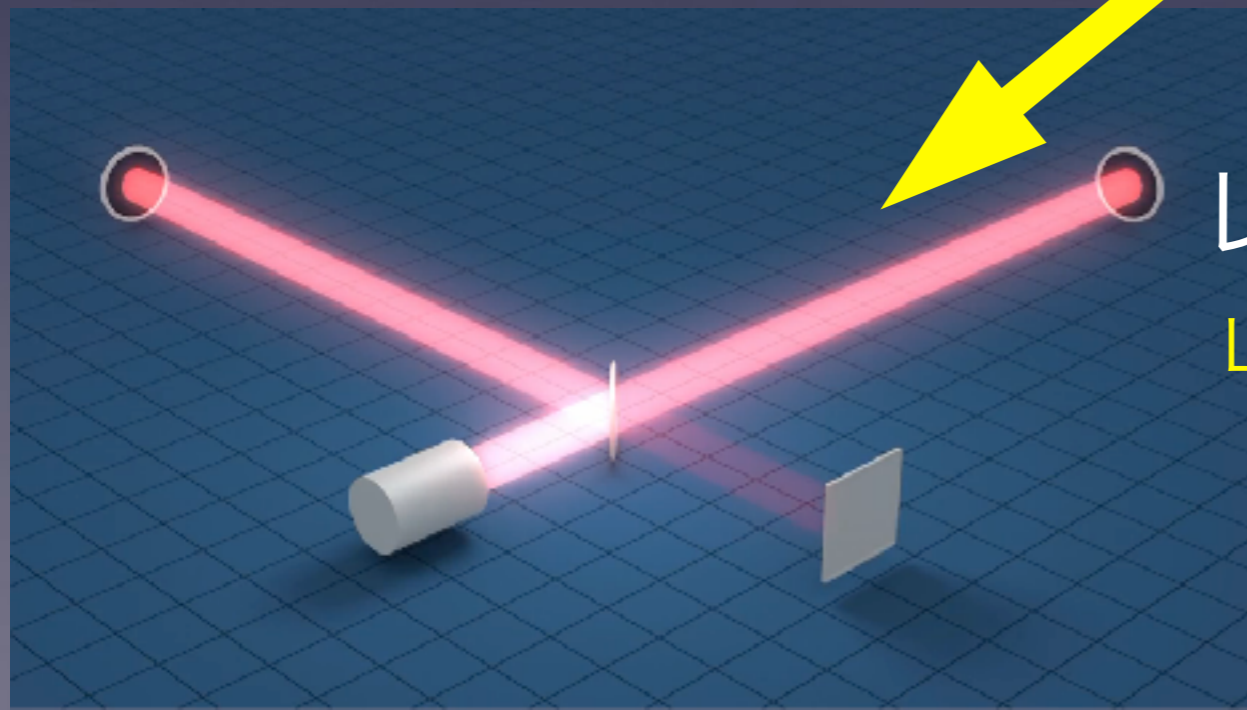
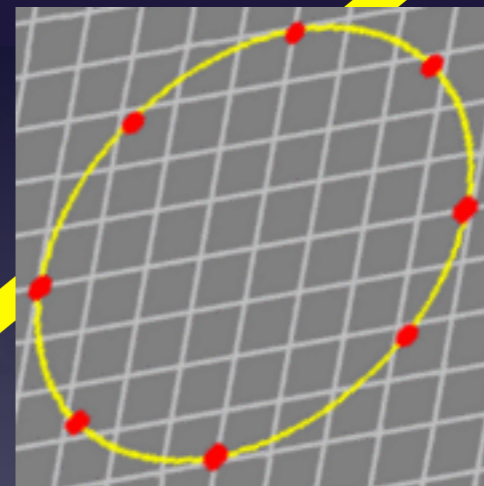
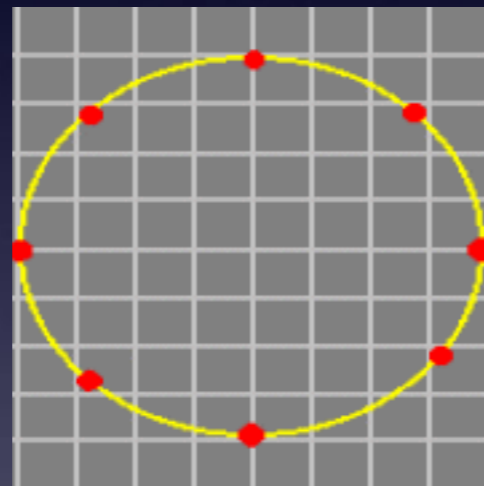
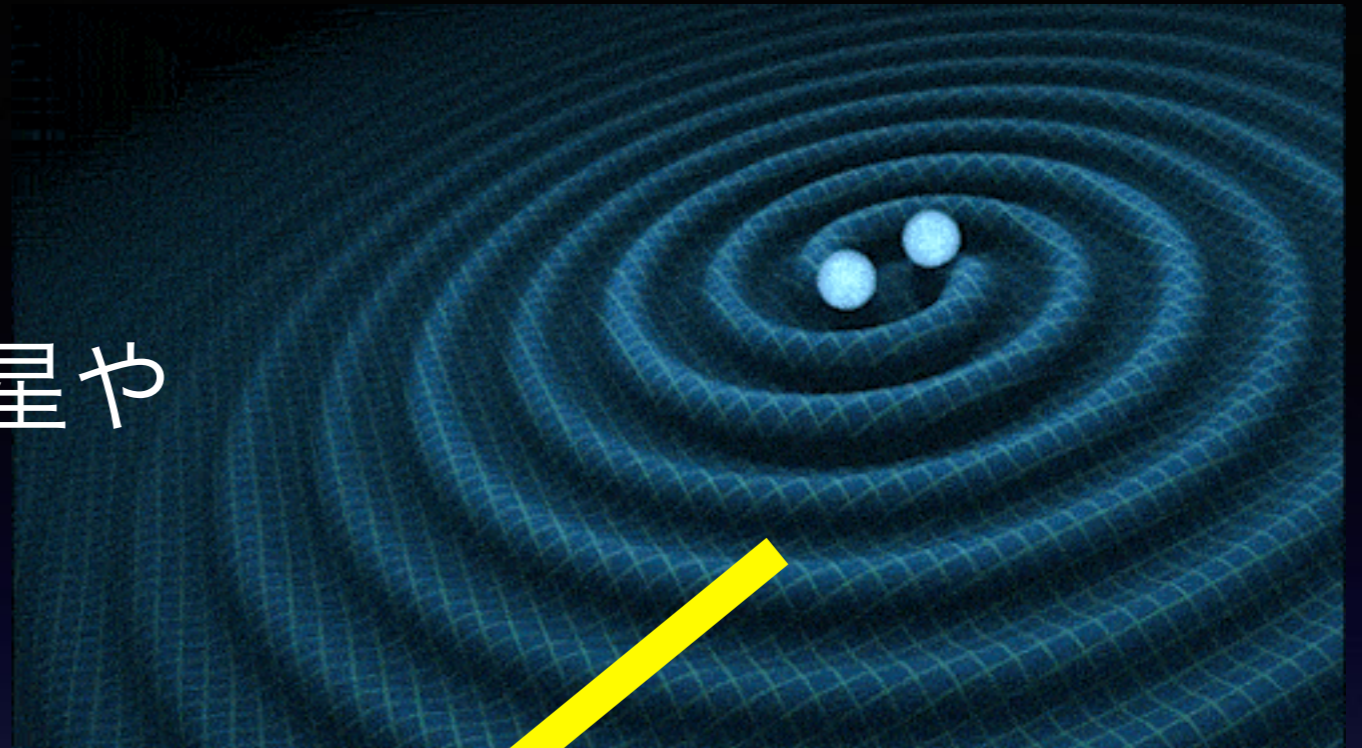


<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



# 重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や  
中性子星連星



レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した



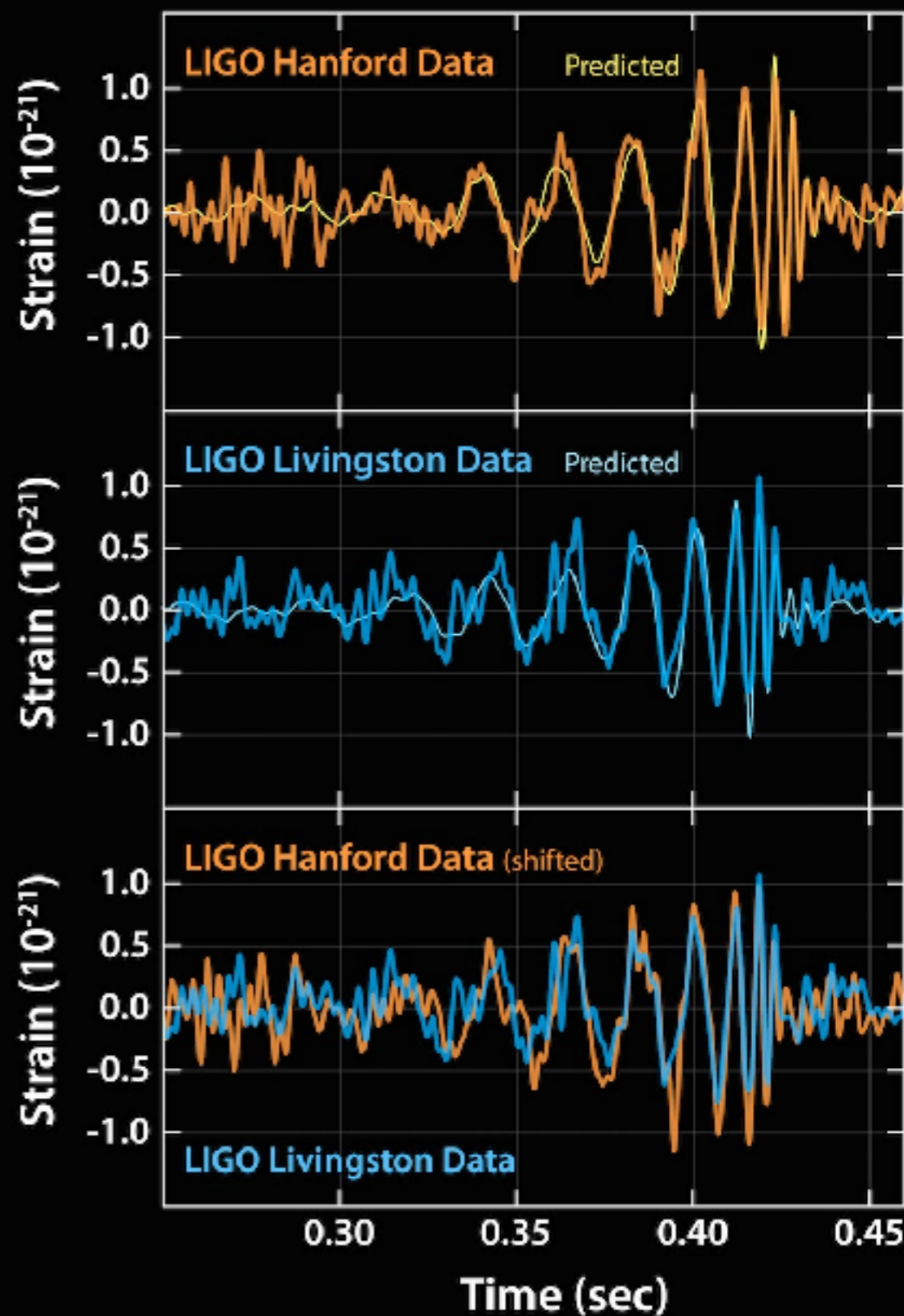
四国新聞だけ  
ちがった... 残念 (笑)

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

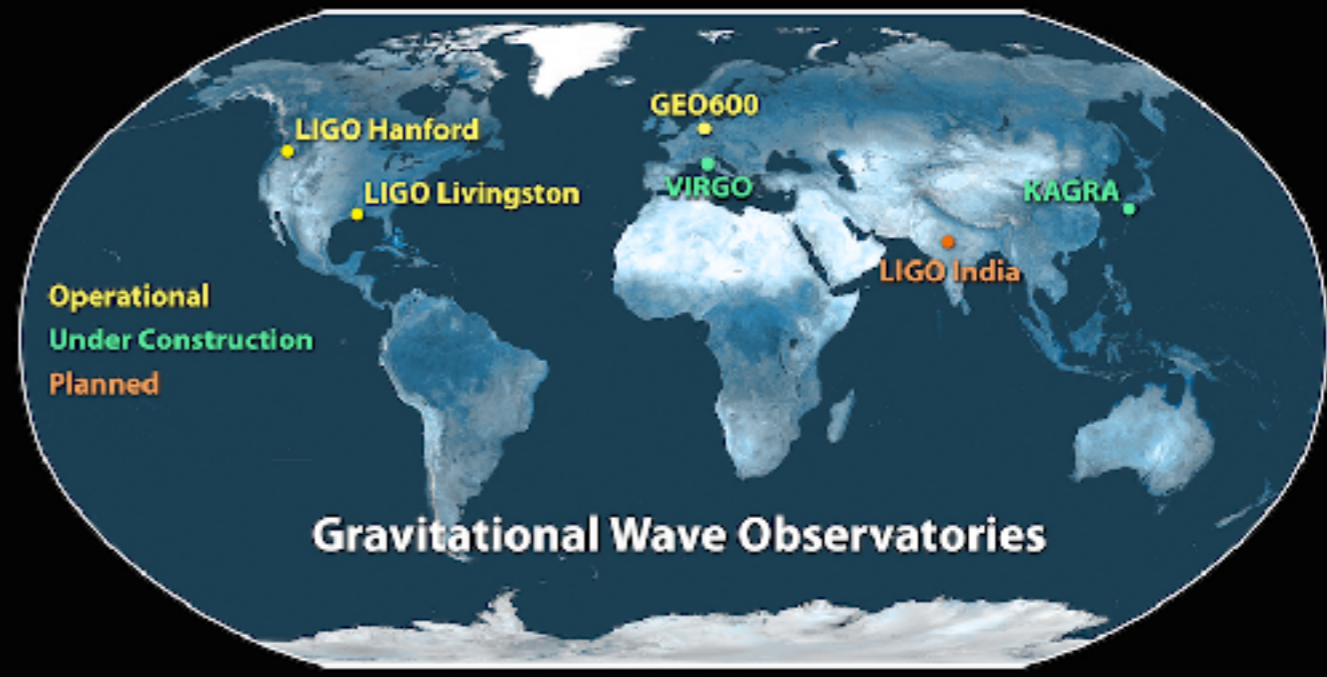
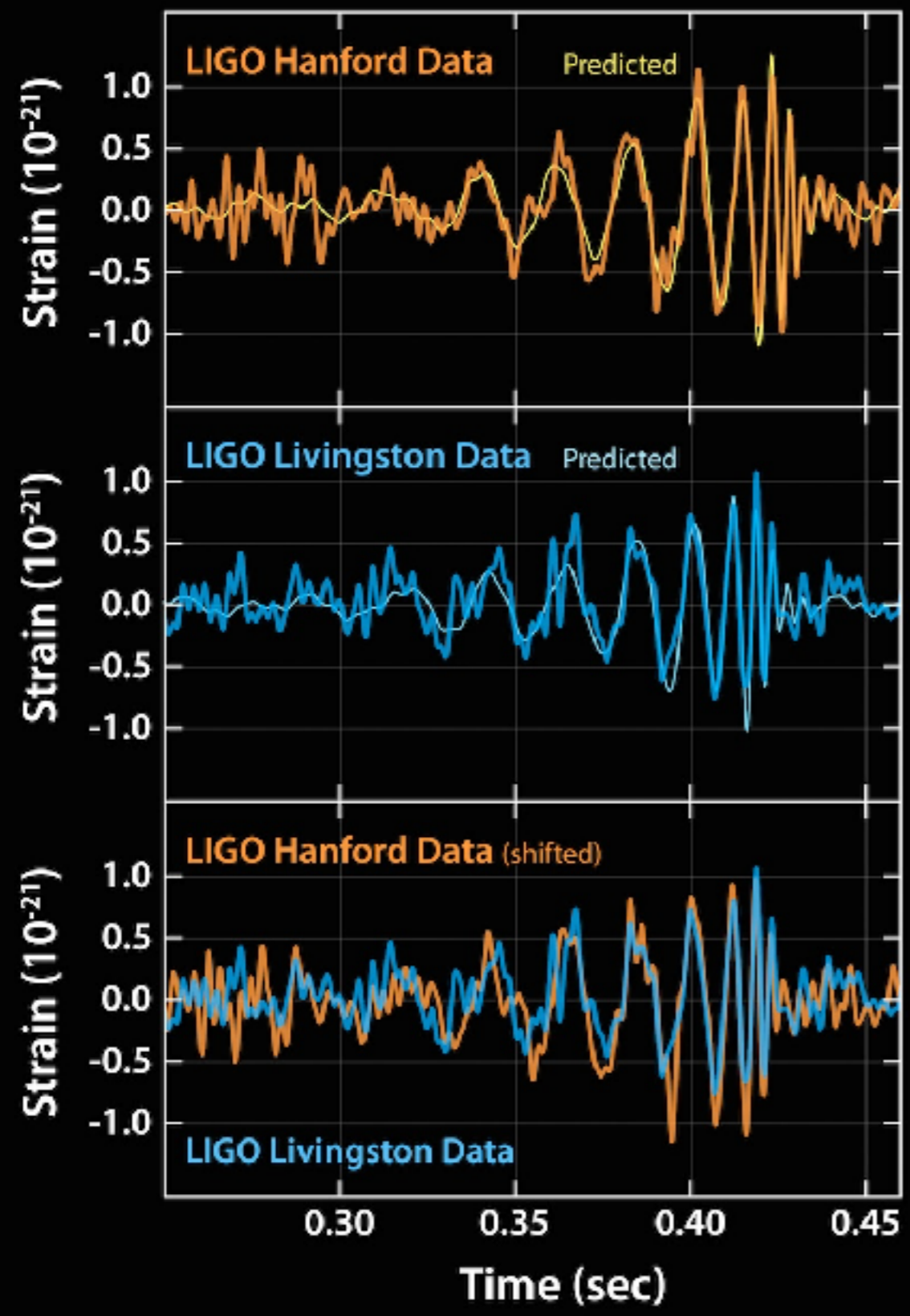
2015年9月14日



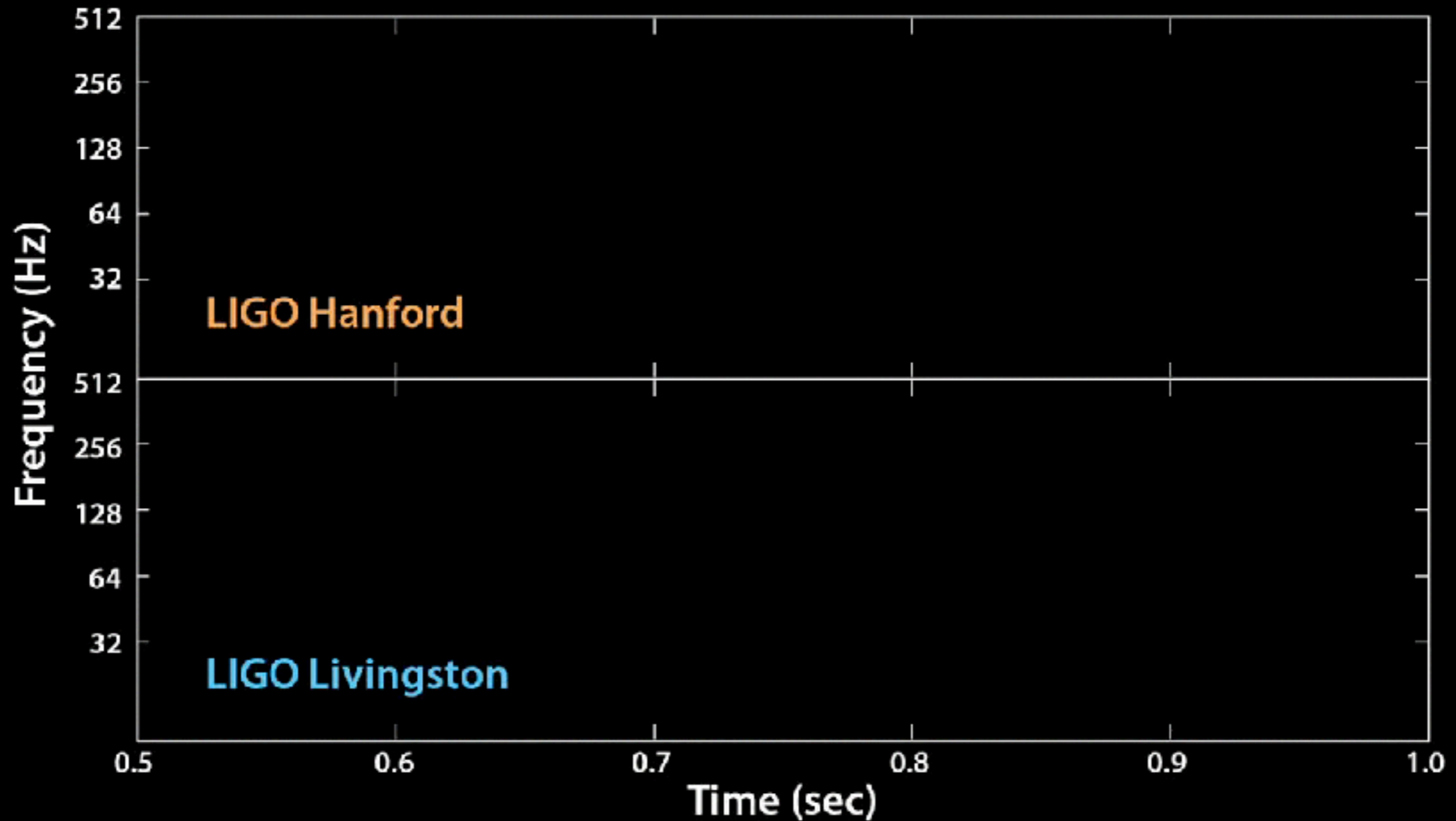
ブラックホール連星の合体  
によって生じた重力波だった



# 2015年9月14日



# 重力波波形を音にすると. . .

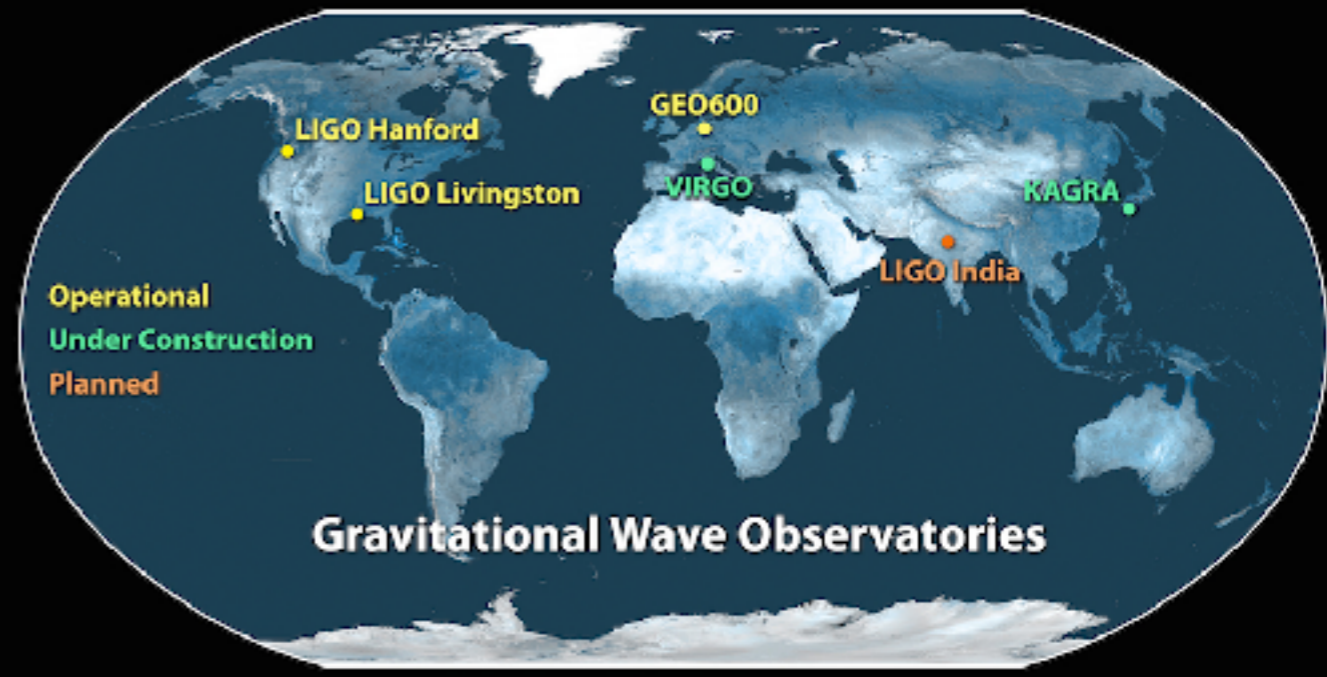
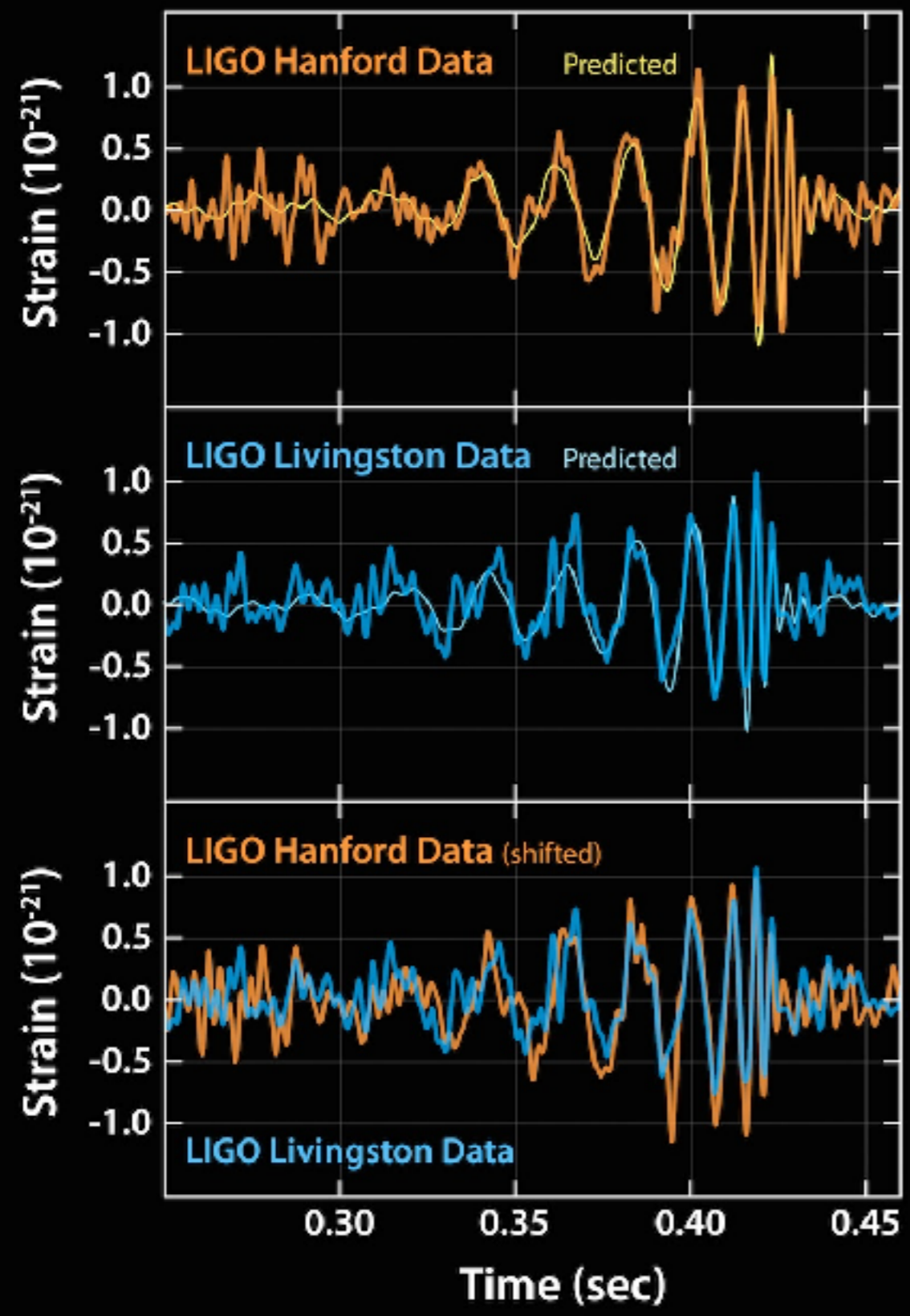


はじめ2回は実周波数, 後の2回は聞きやすいように+400Hz

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



2015年9月14日

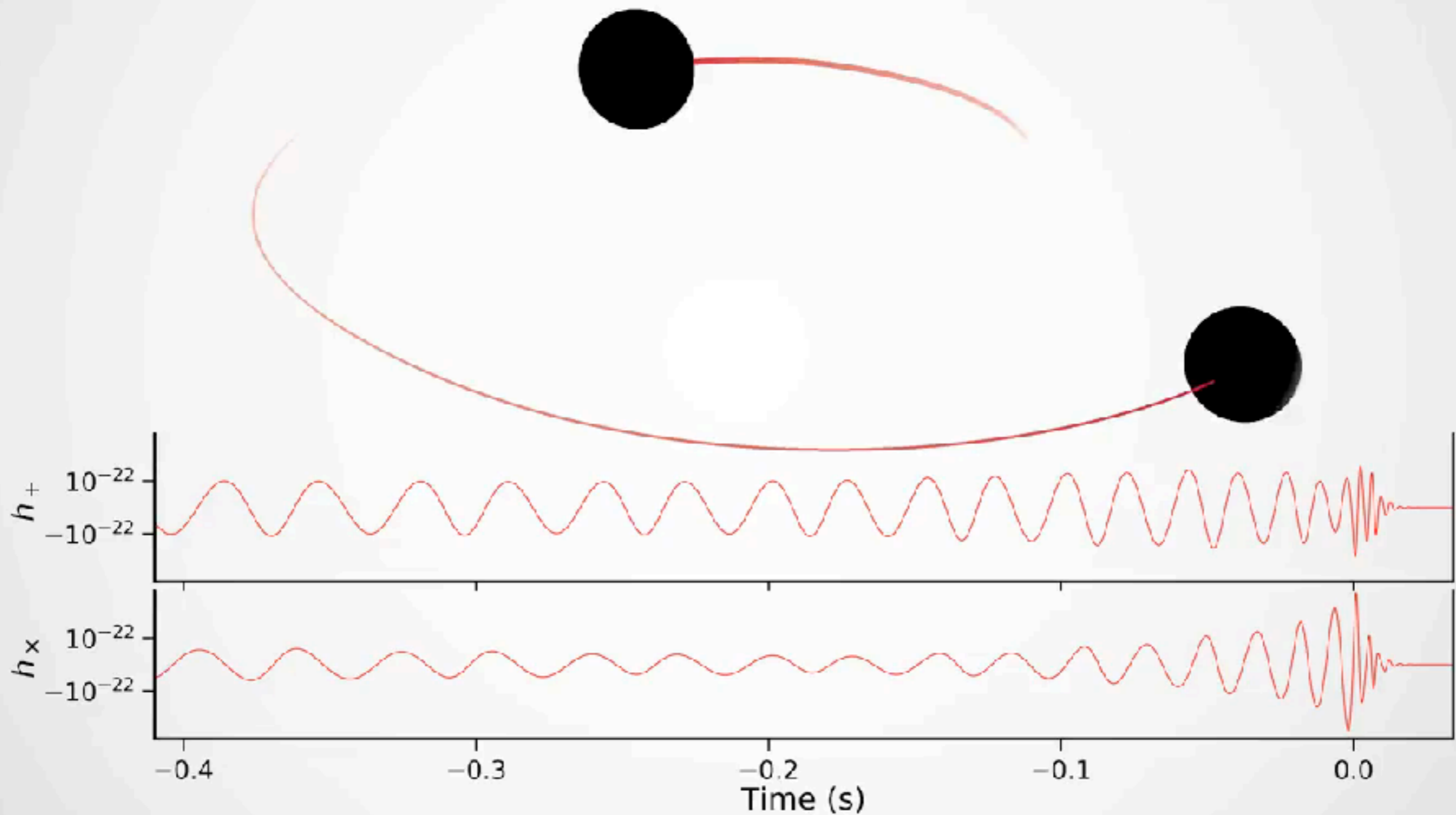


太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、  
太陽の62倍のブラックホールになった。

3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先



**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.

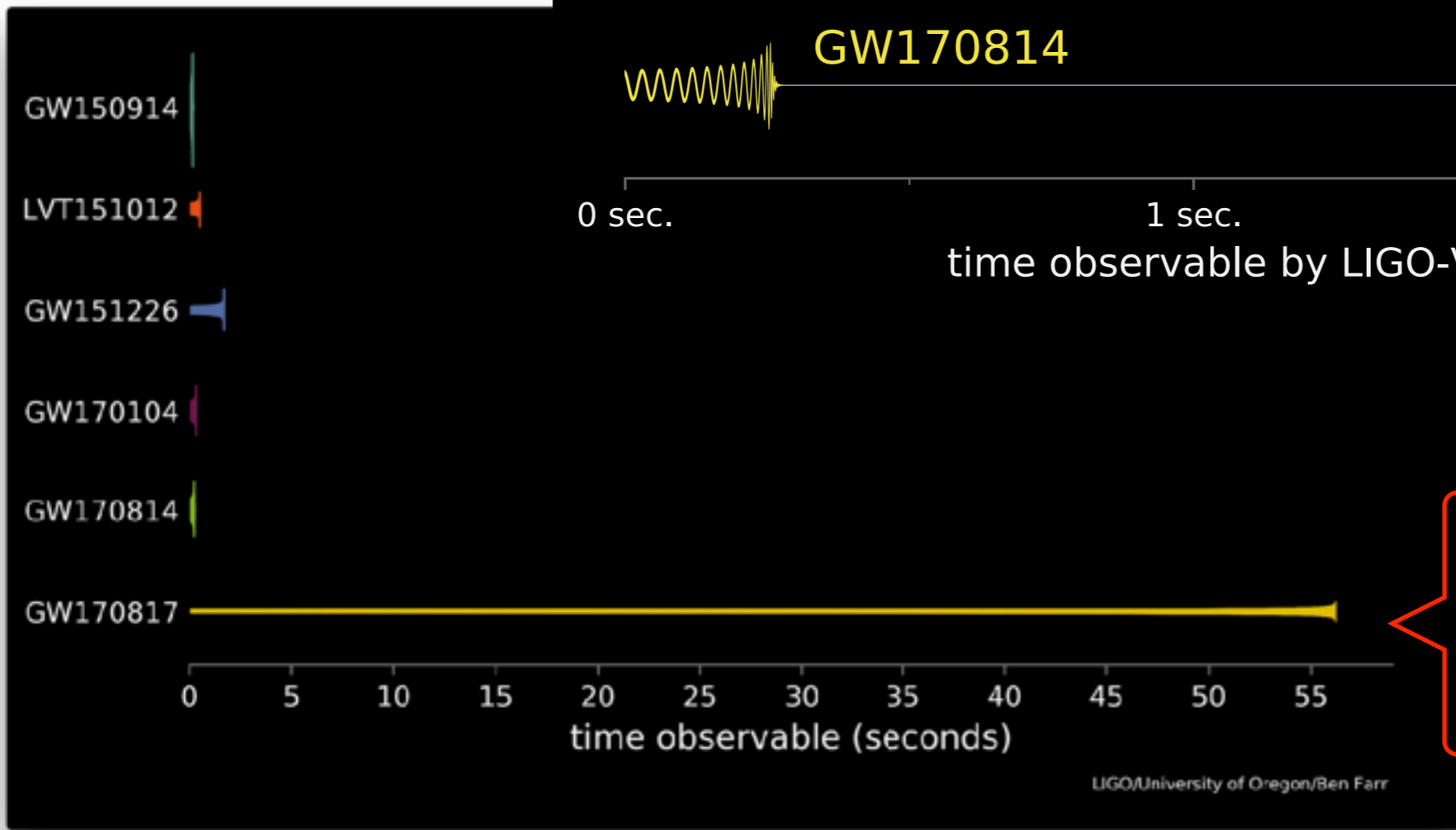
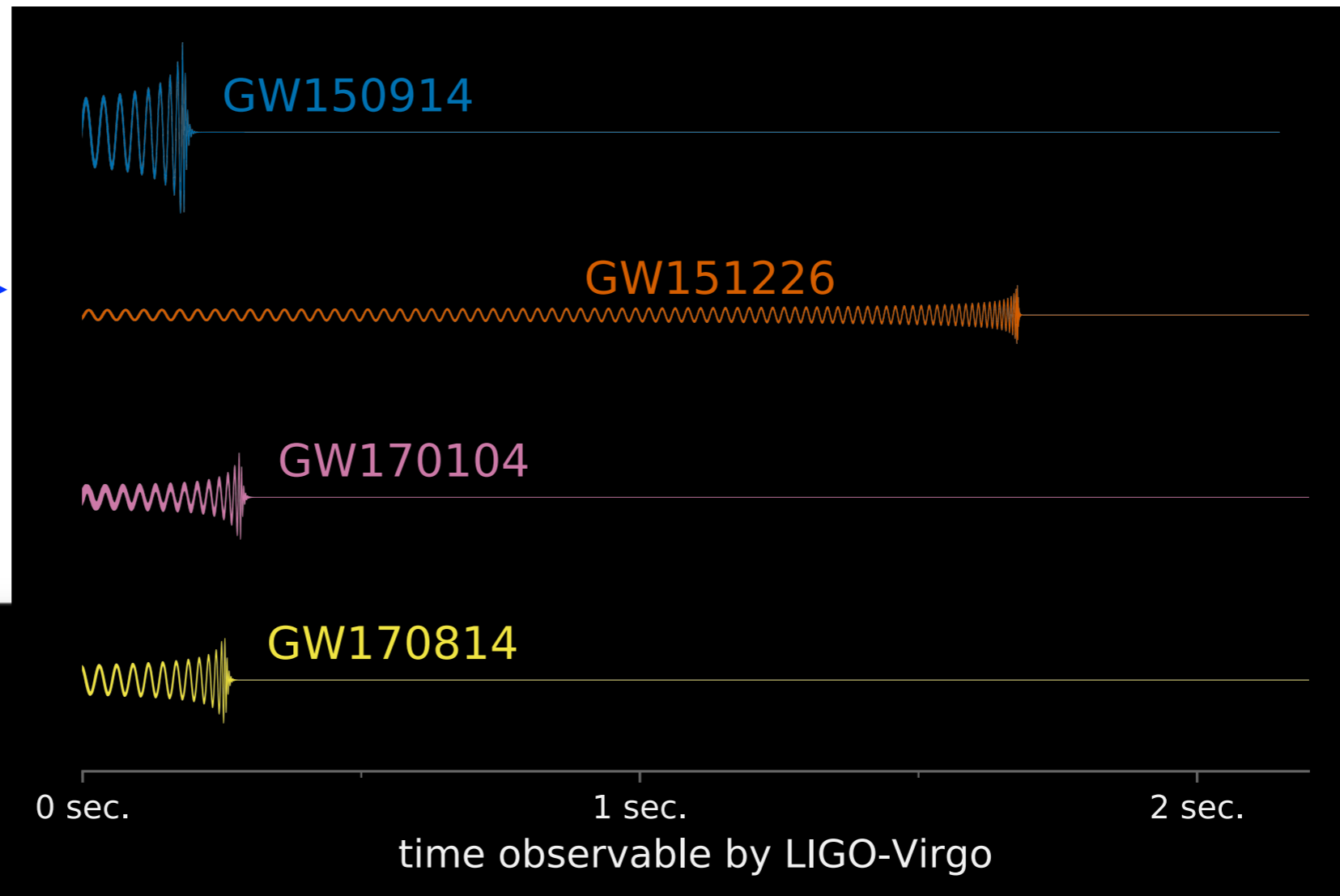
The lower part of the movie shows the two distinct gravitational waves (called 'polarizations') that the merger is emitting into the direction of the camera. The modulations of the polarizations depend sensitively on the orientation of the orbital plane, and thus encode information about the orientation 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>

# 連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

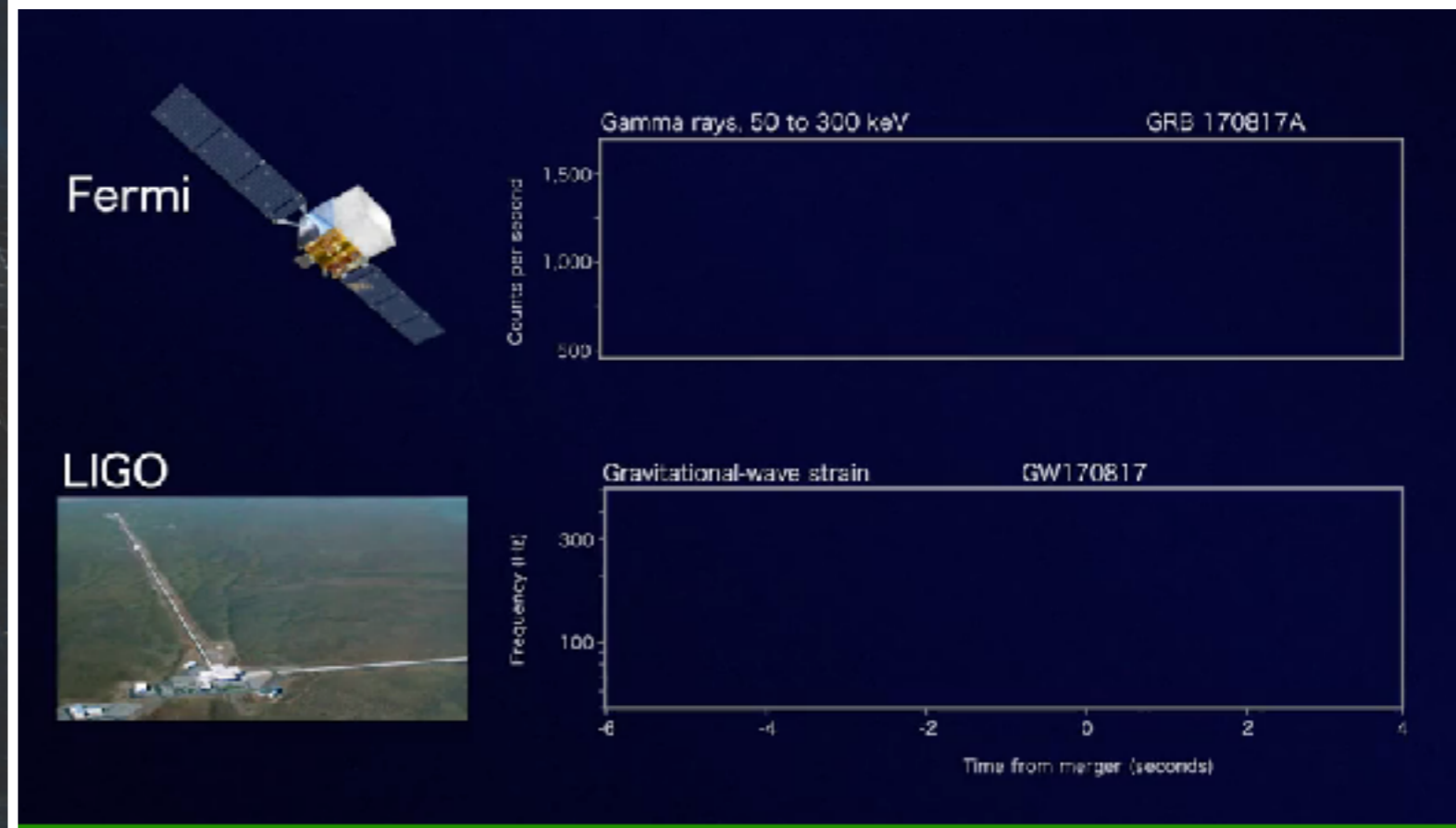
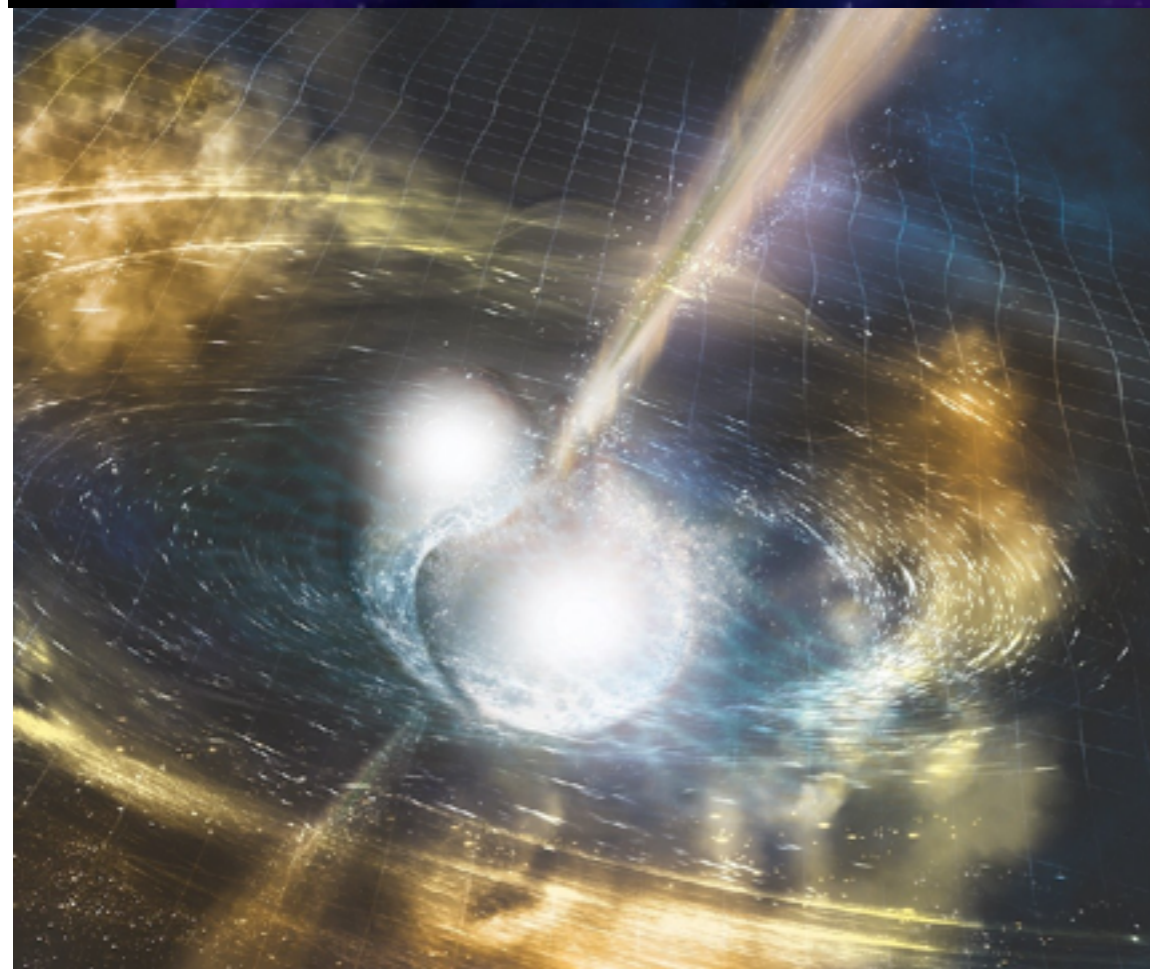
これまでの  
BHBH合体  
による重力波



今回のNSNS  
合体による重力波

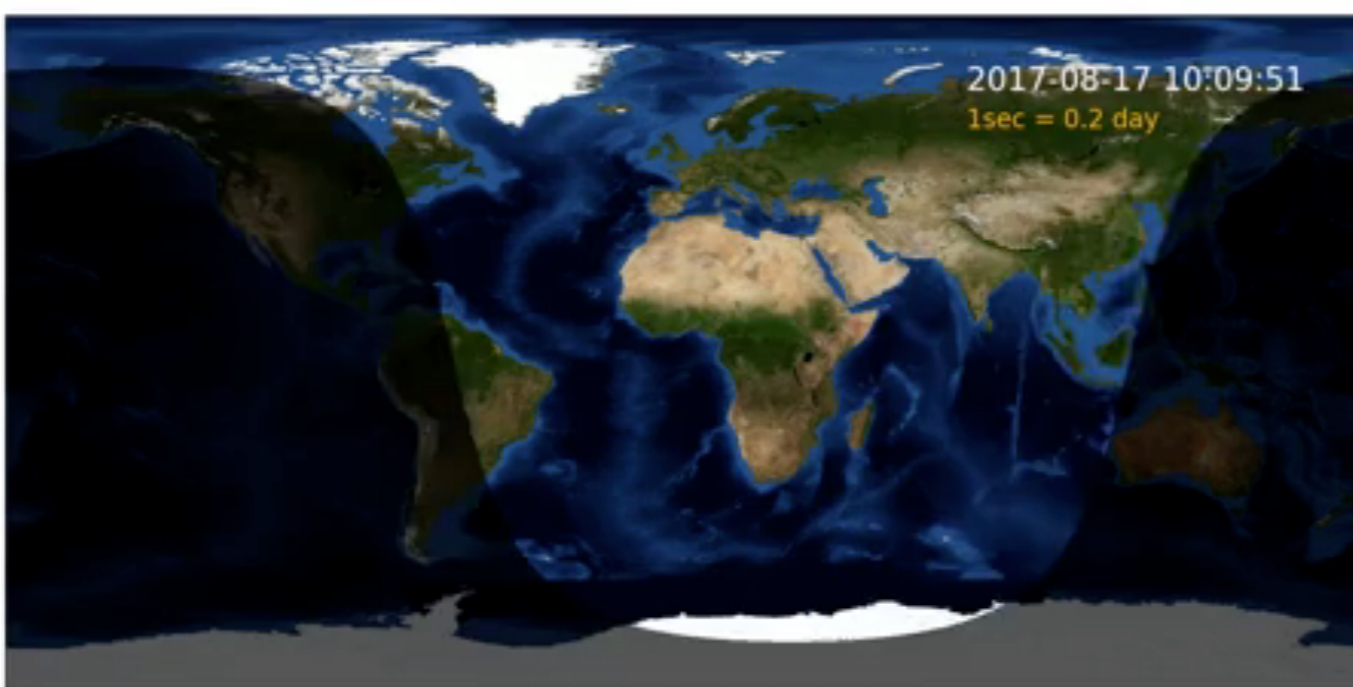
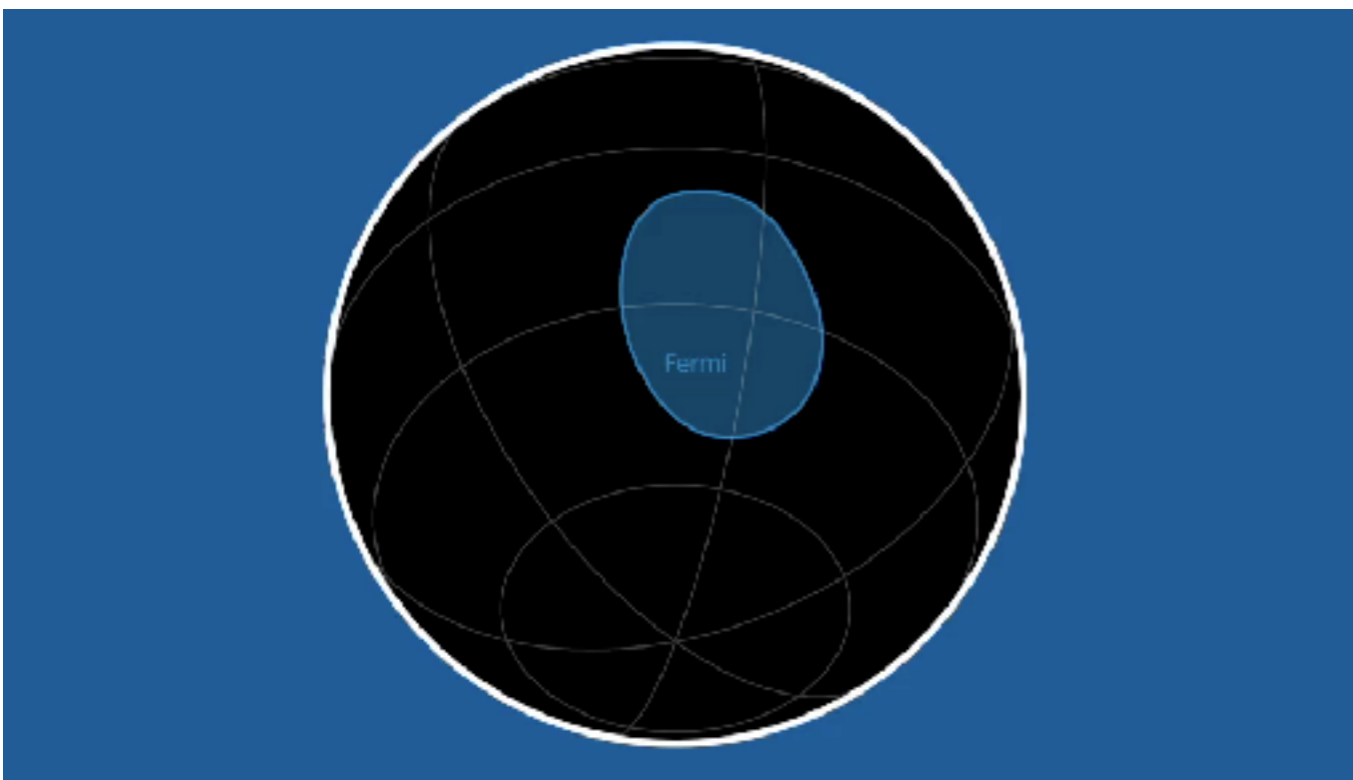
# 連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



# 連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

## GW170817



波源はNGC4993 (40Mpc先) !  
1億3000万光年先

ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20

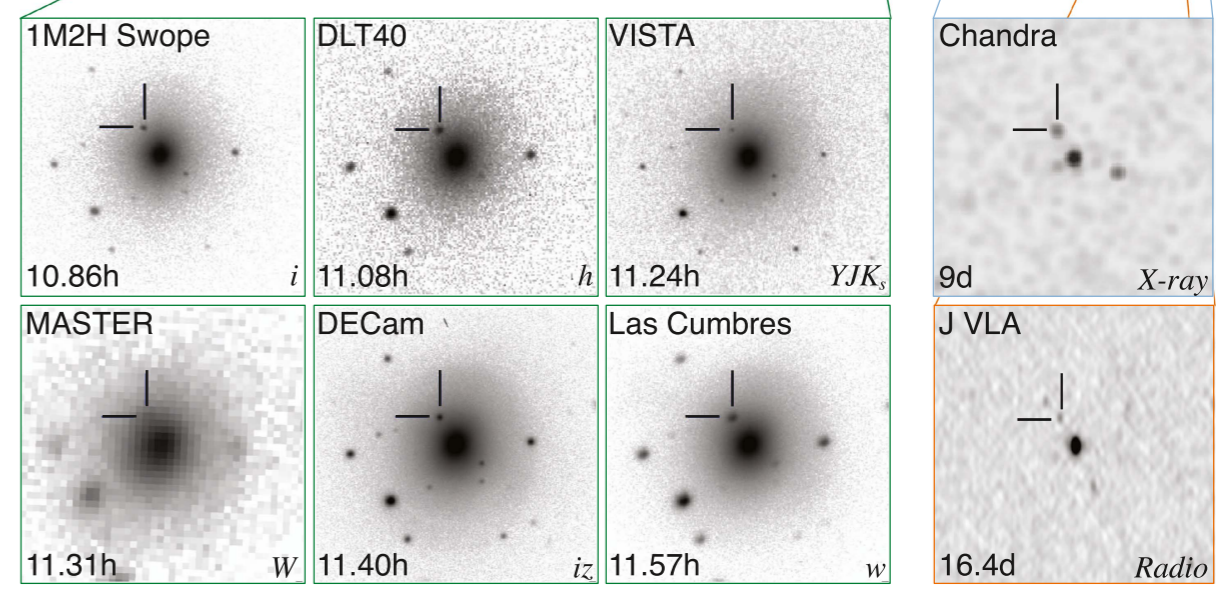
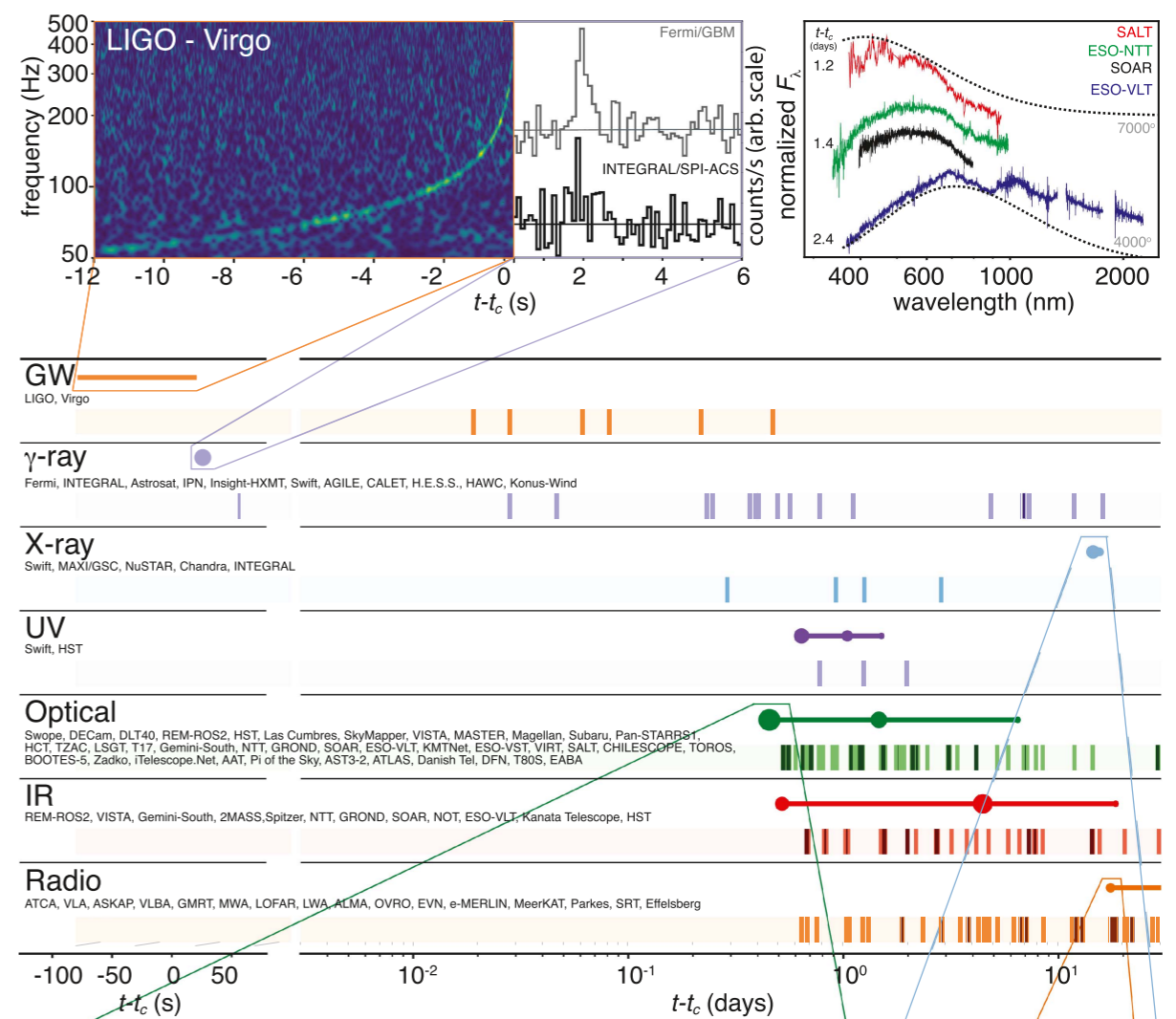


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time  $t_c$  of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band / messenger. First, the shaded dashes represent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

# 連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

## FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

Colliding Neutron Stars Mark New Beginning of Discoveries

Collision creates light across the entire electromagnetic spectrum. Joint observations independently confirm Einstein's General Theory of Relativity, help measure the age of the Universe, and provide clues to the origins of heavy elements like gold and platinum.

Gravitational wave lasted over 100 seconds

On August 17, 2017, 12:41 UTC, LIGO (US) and Virgo (Europe) detect gravitational waves from the merger of two neutron stars, each around 1.5 times the mass of our Sun. This is the first detection of spacetime ripples from neutron stars.

Within two seconds, NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope detects a short gamma-ray burst from a region of the sky overlapping the LIGO/Virgo position. Optical telescope observations pinpoint the origin of this signal to NGC 4993, a galaxy located 130 million light years distant.

LIGO

Georgia Tech Center for Relativistic Astrophysics



# 周期表 (periodic table)

Period	1	1A																	18	VIII A									
	1	1s	1													2													
			<b>H</b> 水素 hydrogen 1.008													<b>He</b> ヘリウム helium 4.003													
	2	2s	3	4											5	6	7	8	9	10									
			<b>Li</b> リチウム lithium 6.941	<b>Be</b> ベリリウム beryllium 9.012											<b>B</b> ホウ素 boron 10.81	<b>C</b> 炭素 carbon 12.01	<b>N</b> 窒素 nitrogen 14.01	<b>O</b> 酸素 oxygen 16.00	<b>F</b> フッ素 fluorine 19.00	<b>Ne</b> ネオン neon 20.18									
	3	3s	11	12											13	14	15	16	17	18									
			<b>Na</b> ナトリウム sodium 22.99	<b>Mg</b> マグネシウム magnesium 24.31											<b>Al</b> アルミニウム aluminum 26.98	<b>Si</b> ケイ素 silicon 28.09	<b>P</b> リン phosphorus 30.97	<b>S</b> 硫黄 sulfur 32.07	<b>Cl</b> 塩素 chlorine 35.45	<b>Ar</b> アルゴン argon 39.95									
4	4s	19	20											21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
		<b>K</b> カリウム potassium 39.10	<b>Ca</b> カルシウム calcium 40.08											<b>Sc</b> スカンジウム scandium 44.96	<b>Ti</b> チタン titanium 47.87	<b>V</b> バナジウム vanadium 50.94	<b>Cr</b> クロム chromium 52.00	<b>Mn</b> マンガン manganese 54.94	<b>Fe</b> 鉄 iron 55.85	<b>Co</b> コバルト cobalt 58.93	<b>Ni</b> ニッケル nickel 58.69	<b>Cu</b> 銅 copper 63.55	<b>Zn</b> 亜鉛 zinc 65.41	<b>Ga</b> ガリウム gallium 69.72	<b>Ge</b> ゲルマニウム germanium 72.64	<b>As</b> ヒ素 arsenic 74.92	<b>Se</b> セレン selenium 78.96	<b>Br</b> 臭素 bromine 79.90	<b>Kr</b> クリプトン krypton 83.80
5	5s	37	38											39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
		<b>Rb</b> ルビジウム rubidium 85.47	<b>Sr</b> ストロンチウム strontium 87.62											<b>Y</b> イットリウム yttrium 88.91	<b>Zr</b> ジルコニウム zirconium 91.22	<b>Nb</b> ニオブ niobium 92.91	<b>Mo</b> モリブデン molybdenum 95.94	<b>Tc</b> テクネチウム technetium 98	<b>Ru</b> ルテニウム ruthenium 101.1	<b>Rh</b> ロジウム rhodium 102.9	<b>Pd</b> パラジウム palladium 106.4	<b>Ag</b> 銀 silver 107.9	<b>Cd</b> カドミウム cadmium 112.4	<b>In</b> インジウム indium 114.8	<b>Sn</b> スズ tin 118.7	<b>Sb</b> アンチモン antimony 121.8	<b>Te</b> テルル tellurium 127.6	<b>I</b> ヨウ素 iodine 126.9	<b>Xe</b> キセノン xenon 131.3
6	6s	55	56											57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
		<b>Cs</b> セシウム cesium 132.9	<b>Ba</b> バリウム barium 137.3											ランタノイド lanthanides	<b>Hf</b> ハフニウム hafnium 178.5	<b>Ta</b> タンタル tantalum 180.9	<b>W</b> タングステン tungsten 183.8	<b>Re</b> レニウム rhenium 186.2	<b>Os</b> オスミウム osmium 190.2	<b>Ir</b> イリジウム iridium 192.2	<b>Pt</b> 白金 platinum 195.1	<b>Au</b> 金 gold 197.0	<b>Hg</b> 水銀 mercury 200.6	<b>Tl</b> タリウム thallium 204.4	<b>Pb</b> 鉛 lead 207.2	<b>Bi</b> ビスマス bismuth 209.0	<b>Po</b> ポロニウム polonium 209	<b>At</b> アスタチン astatine 210	<b>Rn</b> ラドン radon 222
7	7s	87	88											89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
		<b>Fr</b> フランシウム francium 223	<b>Ra</b> ラジウム radium 226											アクチノイド actinides	<b>Rf</b> ラザホージウム rutherfordium 261	<b>Db</b> ドブニウム dubnium 262	<b>Sg</b> シーボーギウム seaborgium 266	<b>Bh</b> ボーリウム bohrium 264	<b>Hs</b> ハッシウム hassium 277	<b>Mt</b> マイトネリウム meitnerium 268	<b>Ds</b> ダームスタチウム darmstadtium 281	<b>Rg</b> レントゲニウム roentgenium 272	<b>Cn</b> コペルニシウム copernicium 285	<b>Nh</b> ニホニウム nihonium 284	<b>Fl</b> フレロビウム flerovium 289	<b>Mc</b> モスコビウム moscovium 288	<b>Lv</b> リバモリウム livermorium 292	<b>Ts</b> テネシン tennessine 293	<b>Og</b> オガネソン oganeson 294

原子番号 → 29  
 元素記号 → **Cu**  
 元素名(日本語) → 銅  
 元素名(英語) → copper  
 原子量 → 63.55

← 通常できるイオンの価数  
 ← 元素記号が灰色のものは人工合成された元素  
 ← 原子量

↑ 非金属元素  
 ↓ 金属元素

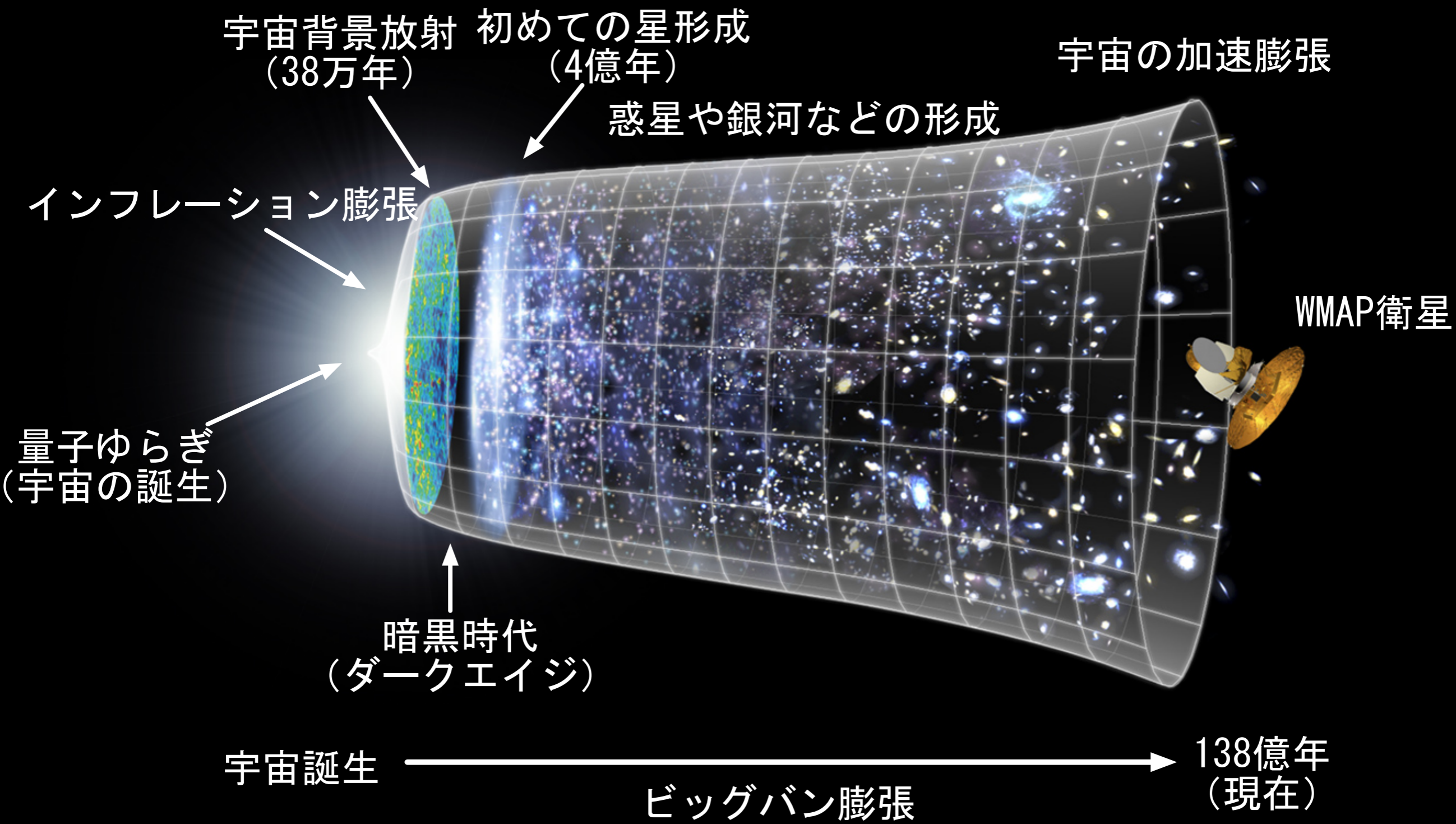
↑ 非金属元素  
 ↓ 金属元素

■ 常温で気体  
 ■ 単体は半導体  
 ■ 常温で液体  
 ■ 単体は強磁性体  
 ■ 放射性同位体のみからなる元素

ランタノイド  
lanthanides  
(レアアース金属)  
(rare earth metals)

アクチノイド  
actinides

† 4f	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	<b>La</b> ランタン lanthanum 138.9	<b>Ce</b> セリウム cerium 140.1	<b>Pr</b> プラセオジウム praseodymium 140.9	<b>Nd</b> ネオジウム neodymium 144.2	<b>Pm</b> プロメチウム promethium 145	<b>Sm</b> サマリウム samarium 150.4	<b>Eu</b> ユロビウム europium 152.0	<b>Gd</b> ガドリニウム gadolinium 157.3	<b>Tb</b> テルビウム terbium 158.9	<b>Dy</b> ジスプロシウム dysprosium 162.5	<b>Ho</b> ホルミウム holmium 164.9	<b>Er</b> エルビウム erbium 167.3	<b>Tm</b> ツリウム thulium 168.9	<b>Yb</b> イッテルビウム ytterbium 173.0	<b>Lu</b> ルテチウム lutetium 175.0
‡ 5f	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	<b>Ac</b> アクチニウム actinium 227	<b>Th</b> トリウム thorium 232.0	<b>Pa</b> プロトアクチニウム protactinium 231.0	<b>U</b> ウラン uranium 238.0	<b>Np</b> ネプツニウム neptunium 237	<b>Pu</b> プルトニウム plutonium 239	<b>Am</b> アメリシウム americium 243	<b>Cm</b> キュリウム curium 247	<b>Bk</b> バークリウム berkelium 247	<b>Cf</b> カリホルニウム californium 251	<b>Es</b> アインスタイニウム einsteinium 252	<b>Fm</b> フェルミウム fermium 257	<b>Md</b> メンデレビウム mendelevium 258	<b>No</b> ノーベリウム nobelium 259	<b>Lr</b> ローレンシウム lawrencium 262

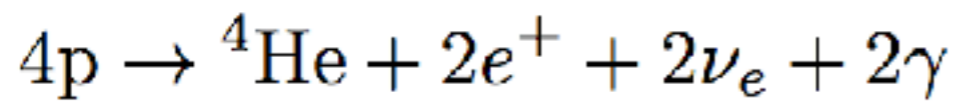
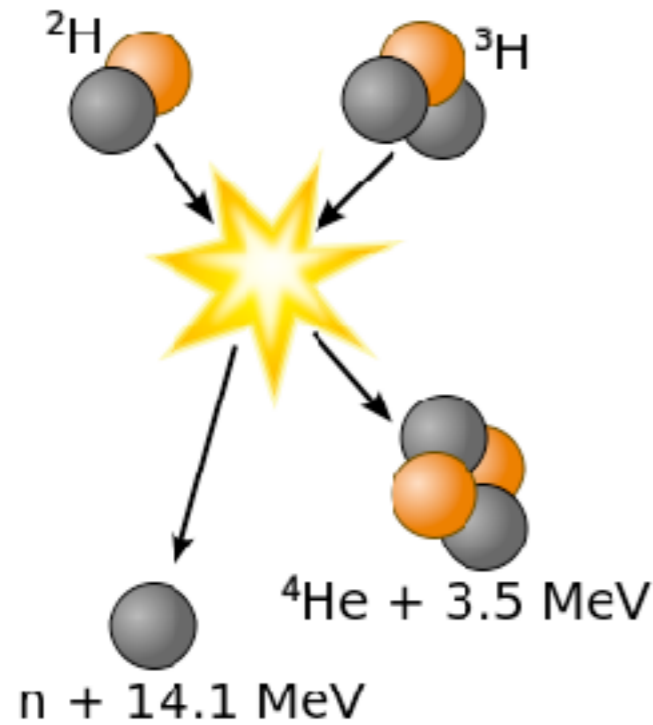




# 核反応

原子核の組み替えによって莫大なエネルギーが放出

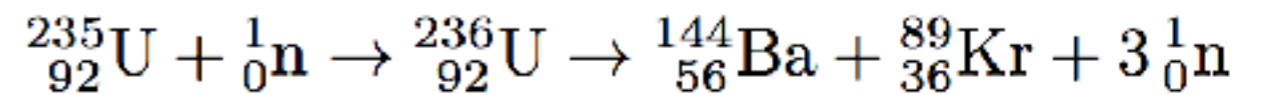
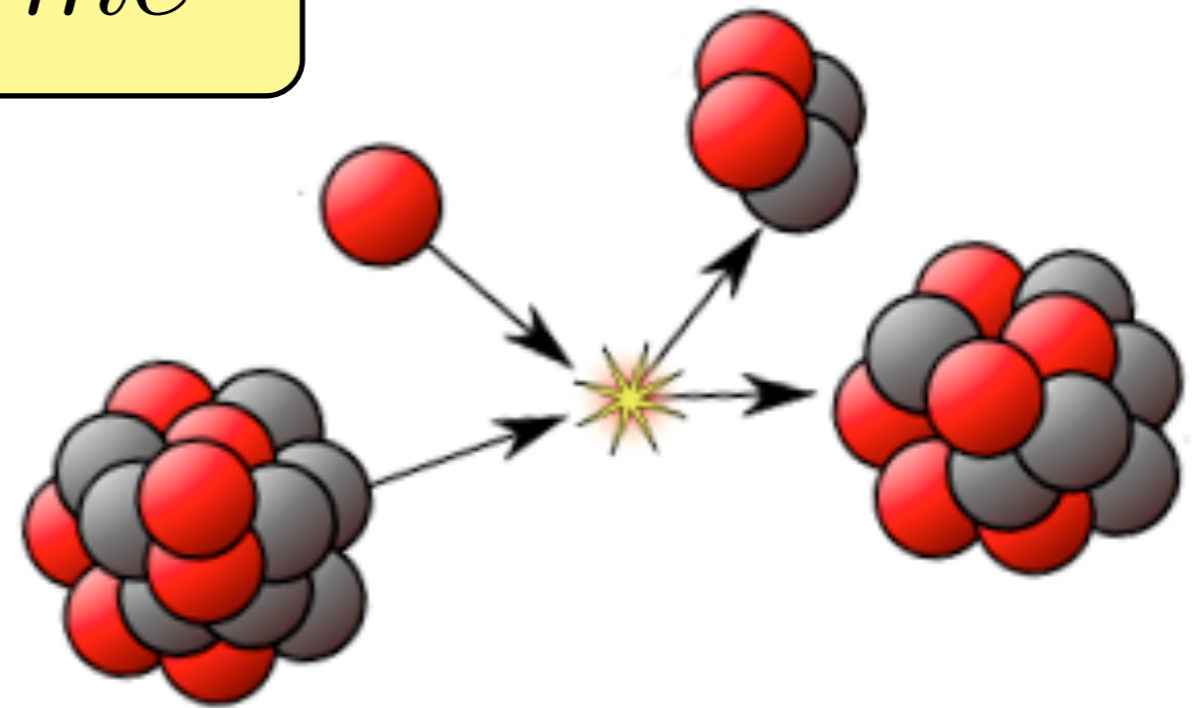
$$E = mc^2$$



## 核融合

(nuclear fusion)

合体した方が安定  
(エネルギー放出)



## 核分裂

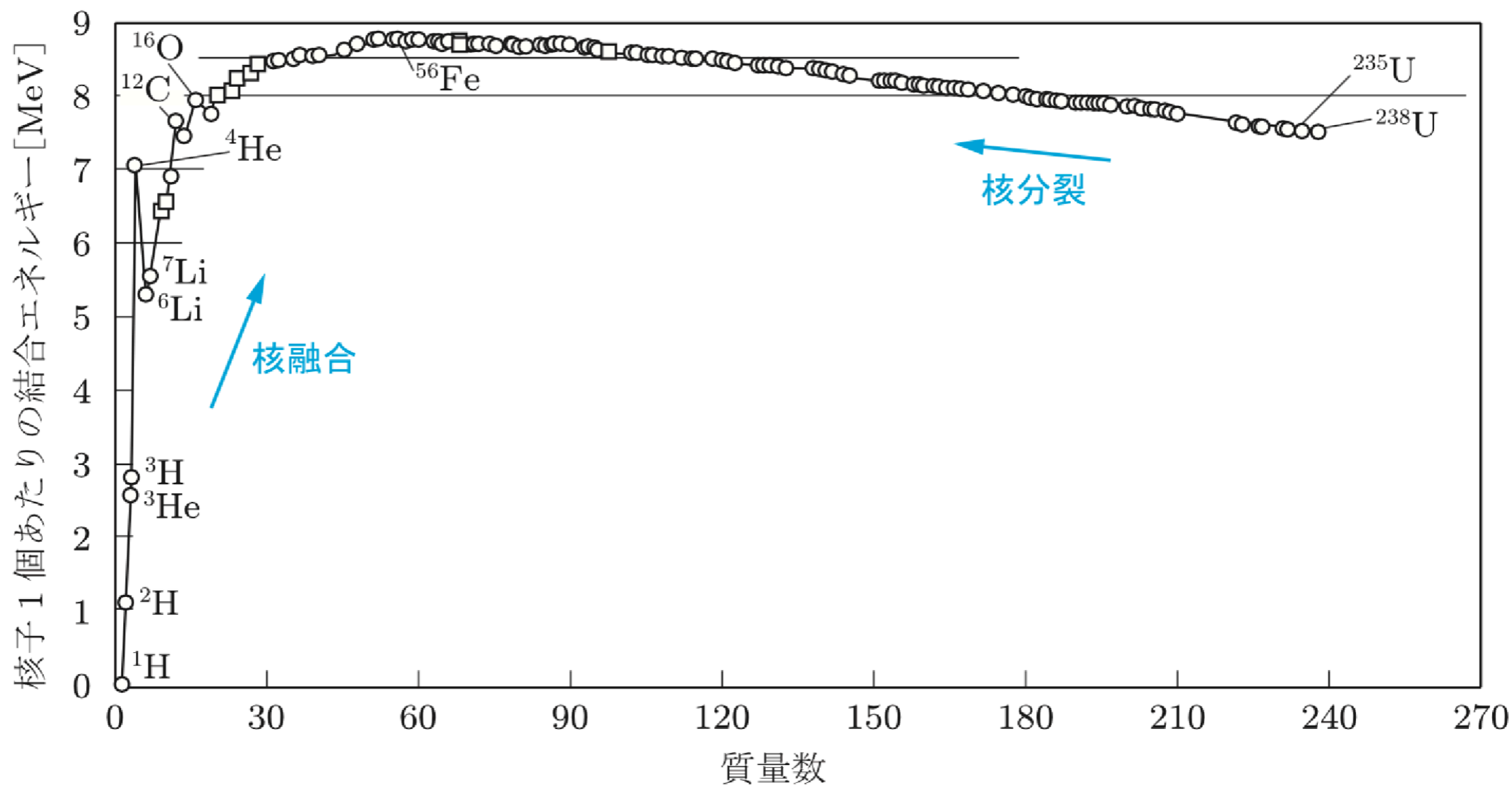
(nuclear fission)

分裂した方が安定  
(エネルギー放出)

# 結合エネルギー

核融合も核分裂もおきる理由は何か？

↑ ↑  
結合エネルギー (大)

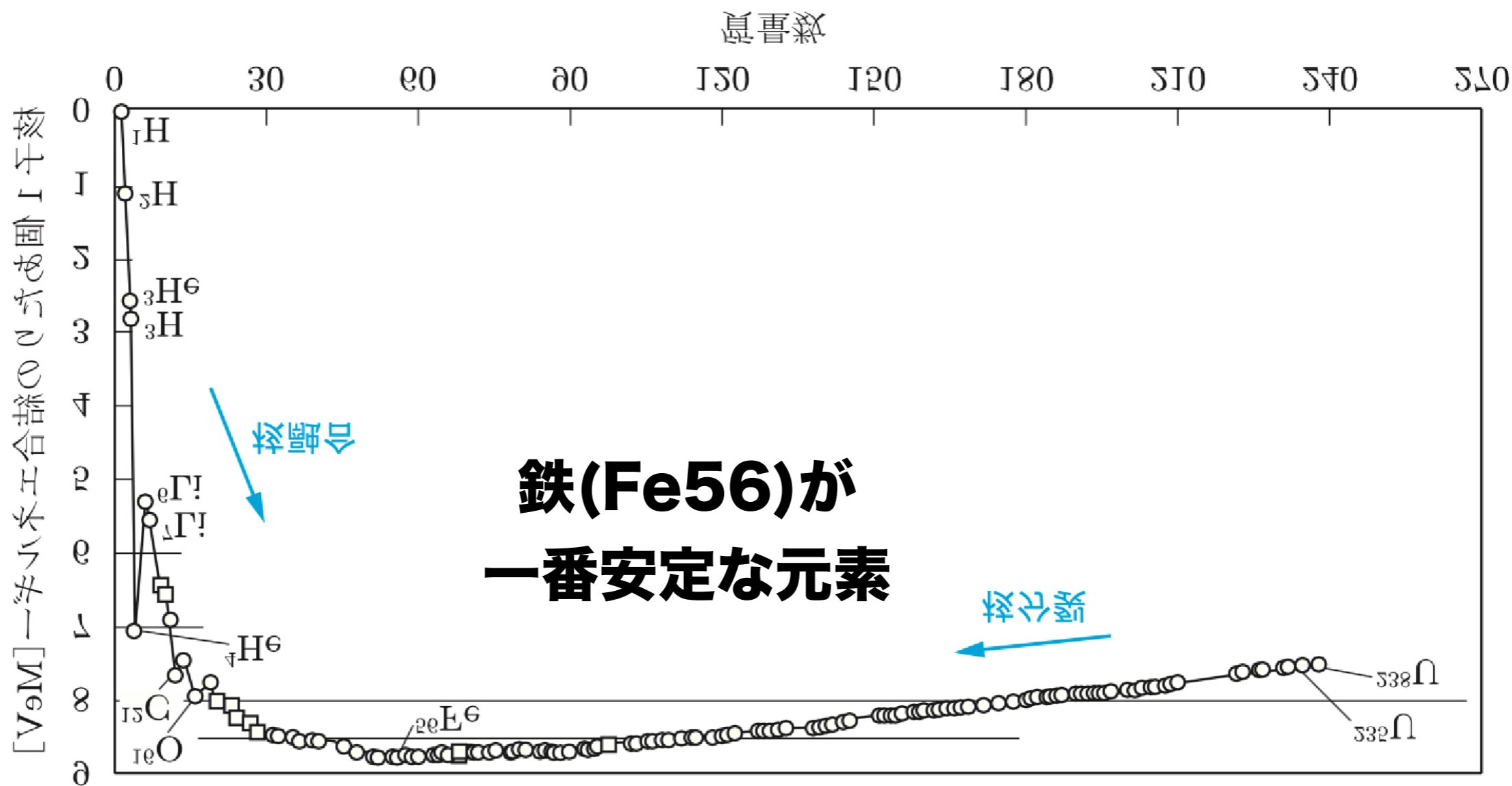


→ → 質量数 (大)

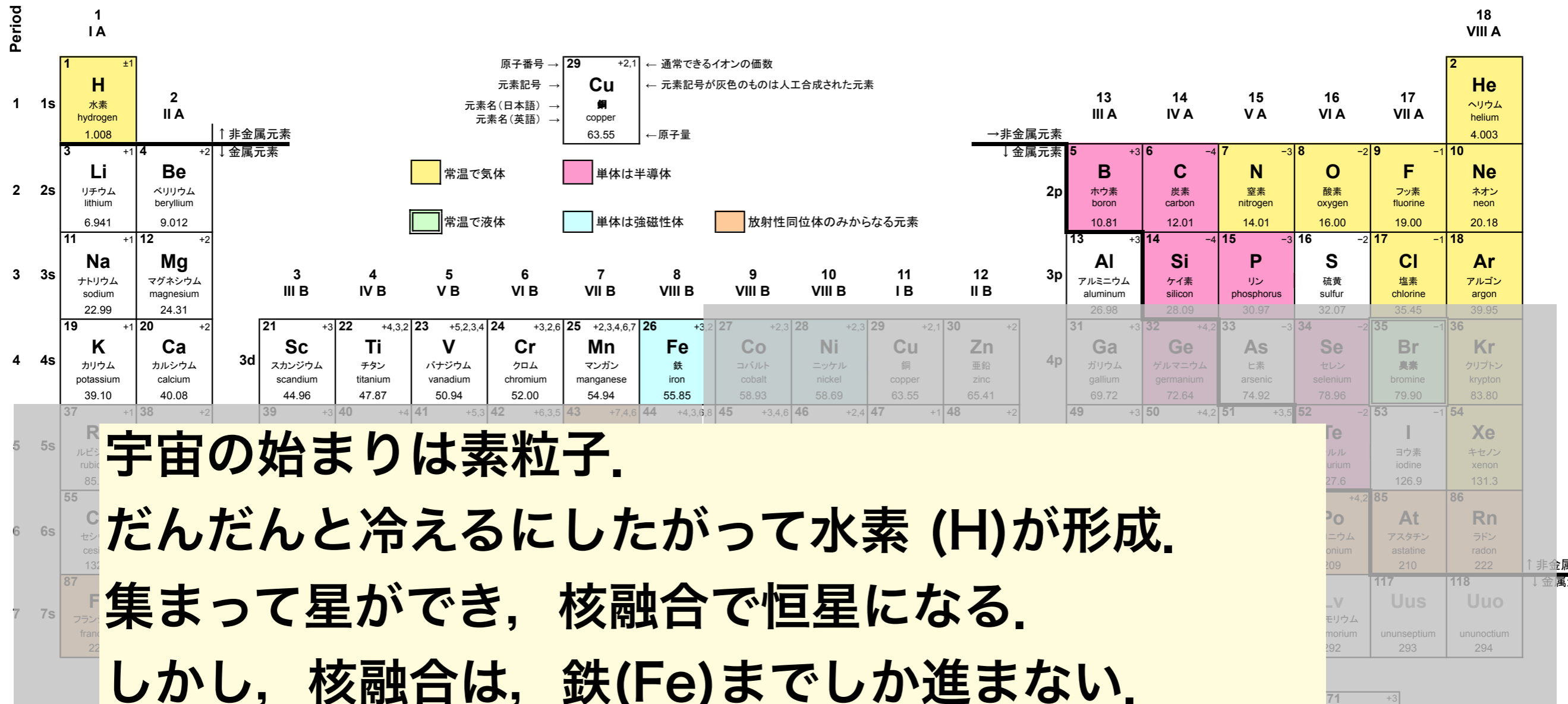
# 結合エネルギー

核融合も核分裂もおきる理由は何か？

結合エネルギー (大)



→ → 質量数 (大)



宇宙の始まりは素粒子。  
 だんだんと冷えるにしたがって水素 (H) が形成。  
 集まって星ができ、核融合で恒星になる。  
 しかし、核融合は、鉄(Fe)までしか進まない。

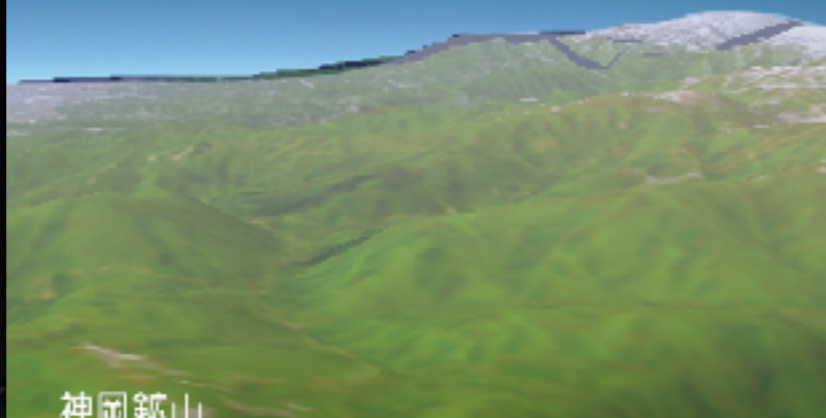
現在、周期表に Fe より重い元素があるのは何故か？

**超新星爆発で作られた！**  
**中性子星連星合体で作られた！**

# KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector

## 大型低温重力波望遠鏡



神岡鉱山  
(岐阜県飛騨市神岡町)



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却

熱雑音を小さくするため

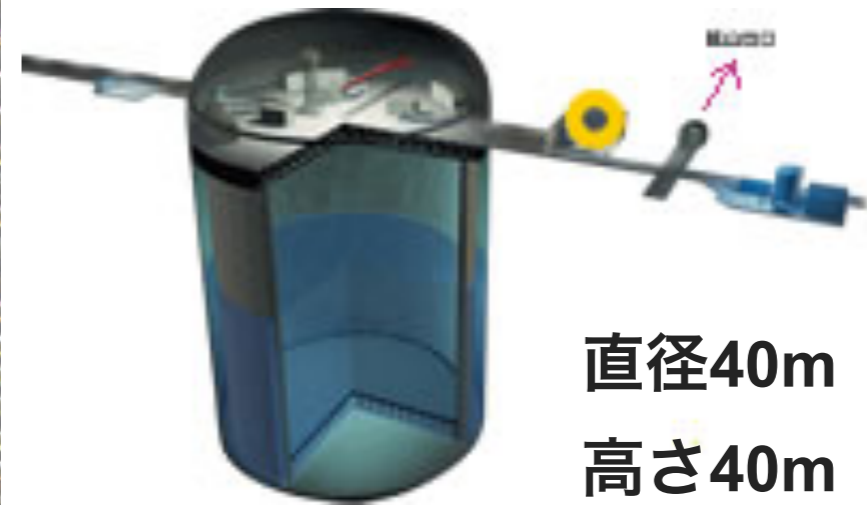
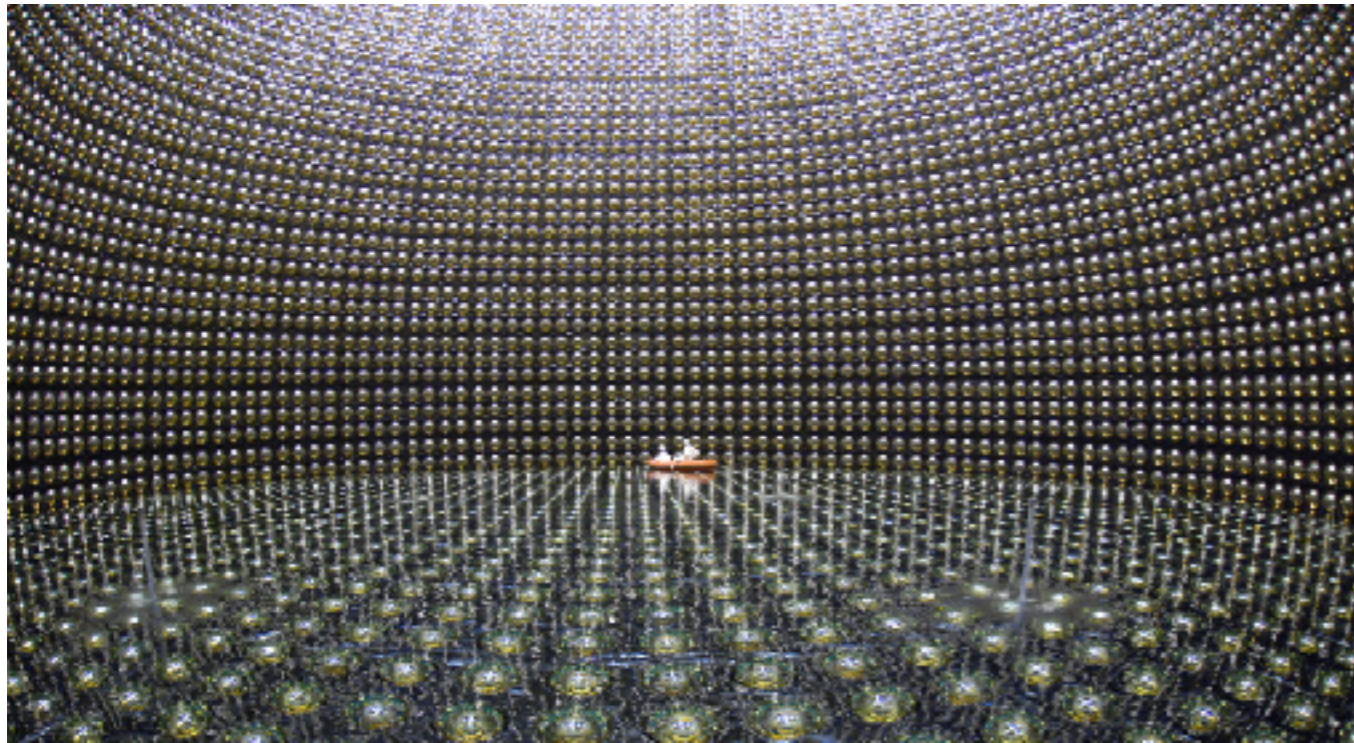
鏡の材質としてサファイア

光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

# スーパー・カミオカンデ (ニュートリノ観測装置)

Super-Kamiokande

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



直径40m  
高さ40m

岐阜県・神岡の鉱山跡の空洞に巨大な水槽をつくり、  
宇宙から飛来するニュートリノを観測する。



ノーベル物理学賞を受賞

小柴昌俊 (2002年)

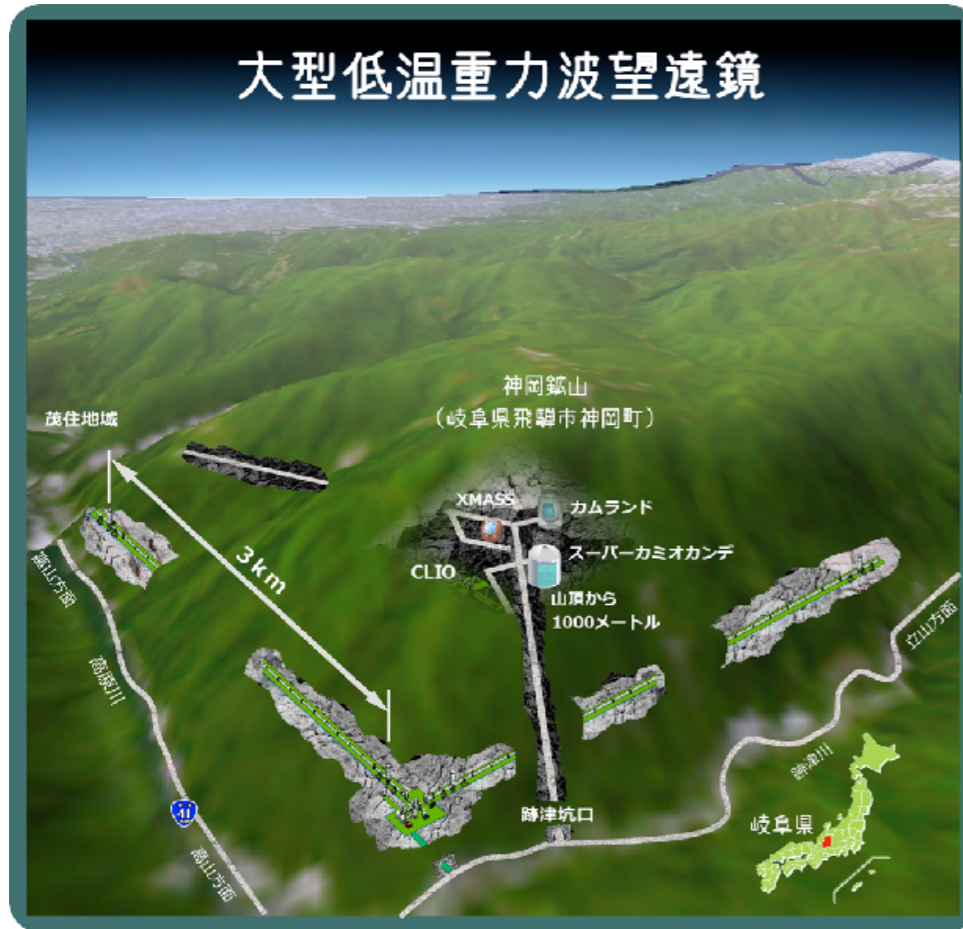


梶田隆章 (2015年)



# KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)

2016年4月

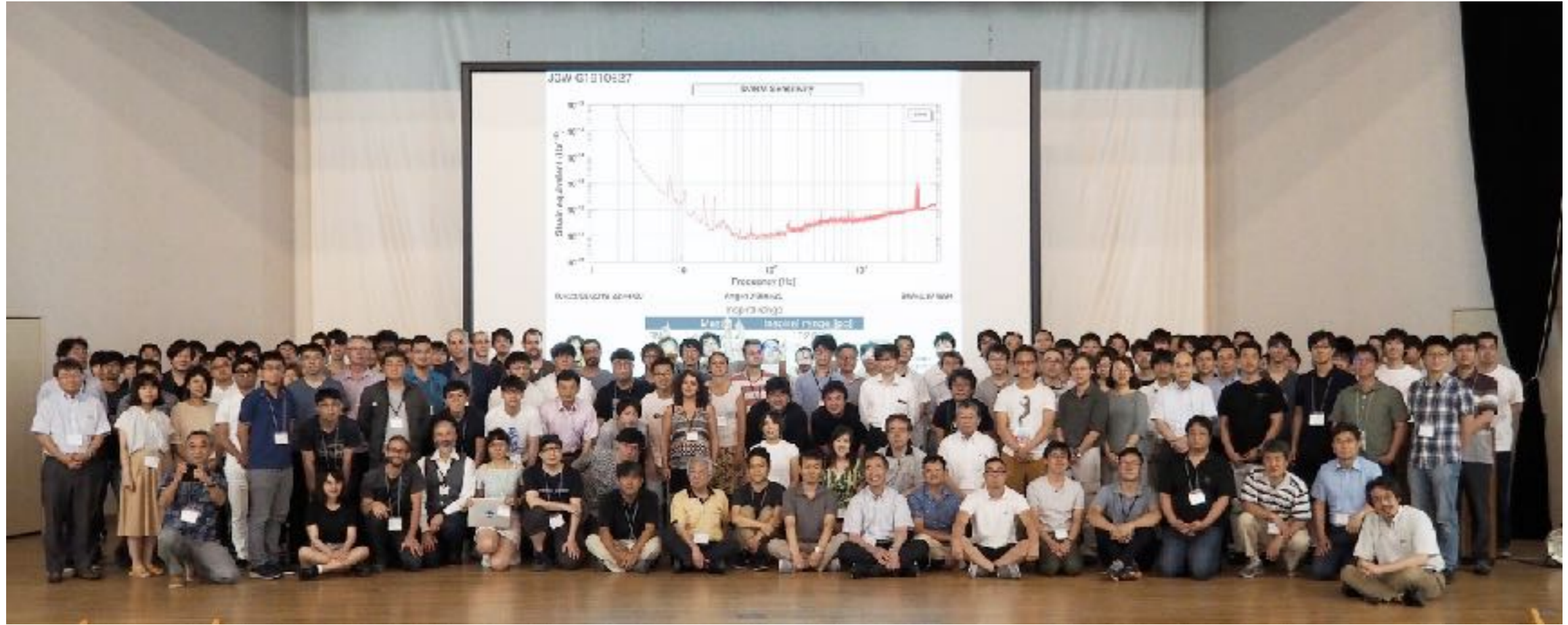


# KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)





# KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)

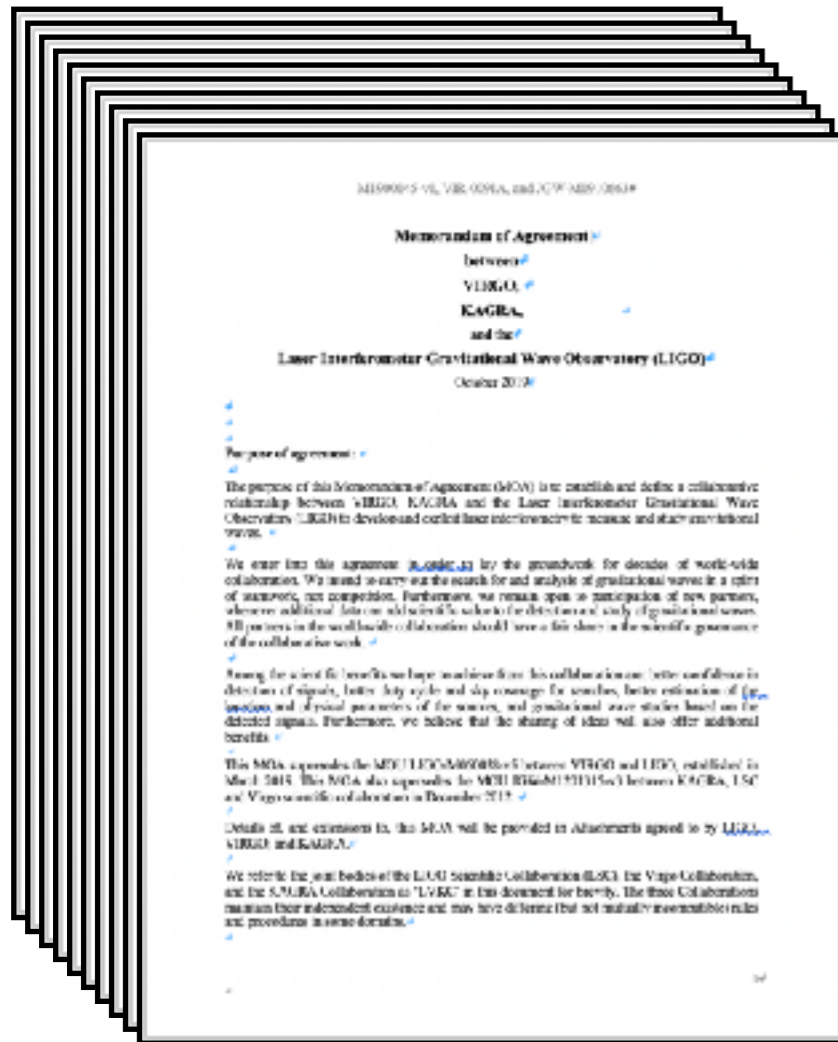


**KAGRA**

360 members  
200 authors  
110 groups  
14 regions

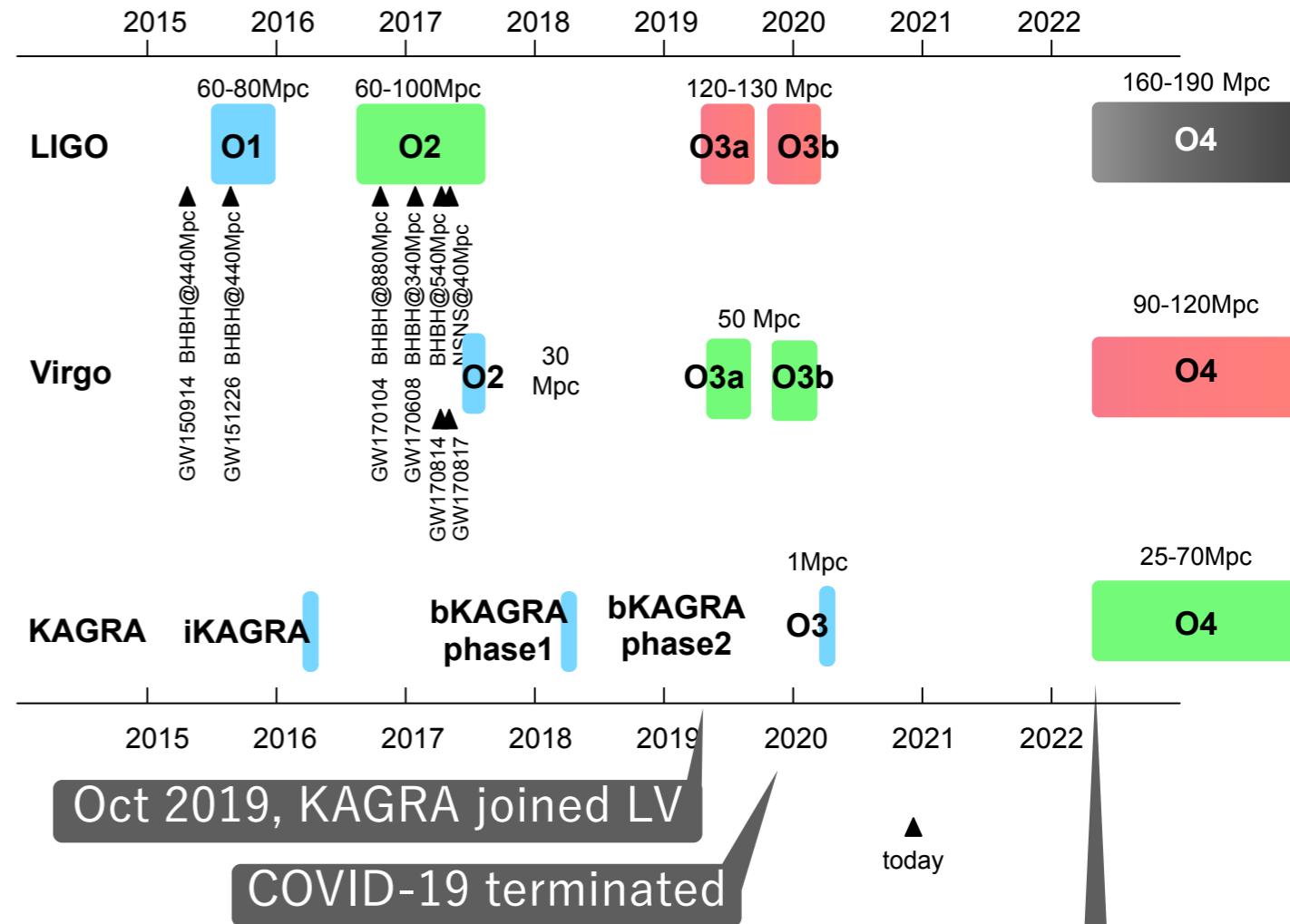
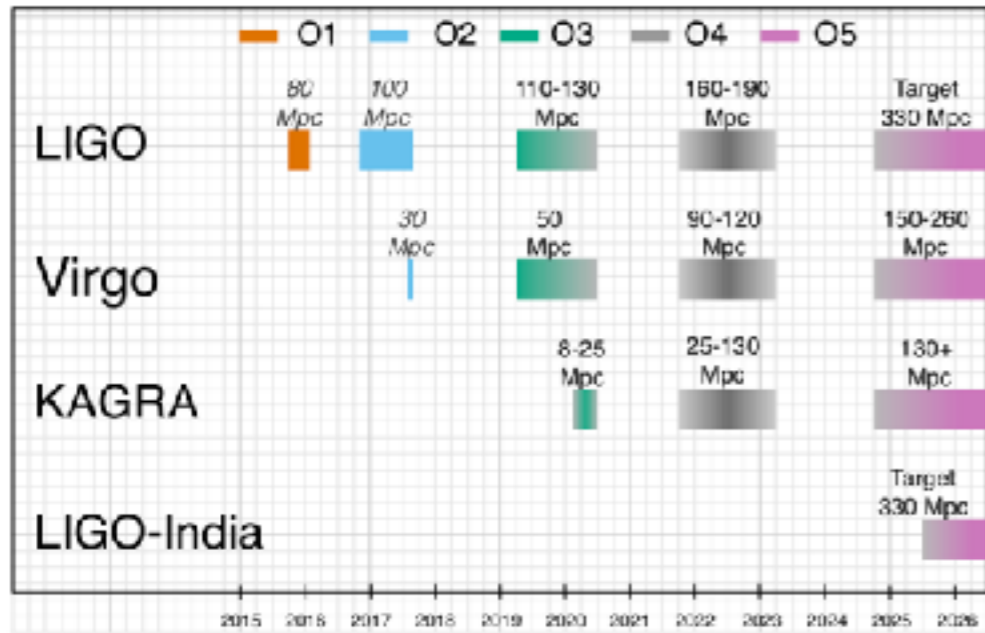


# KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)



2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

# Target Sensitivity & Schedule



O4 will likely start no earlier than June 2022

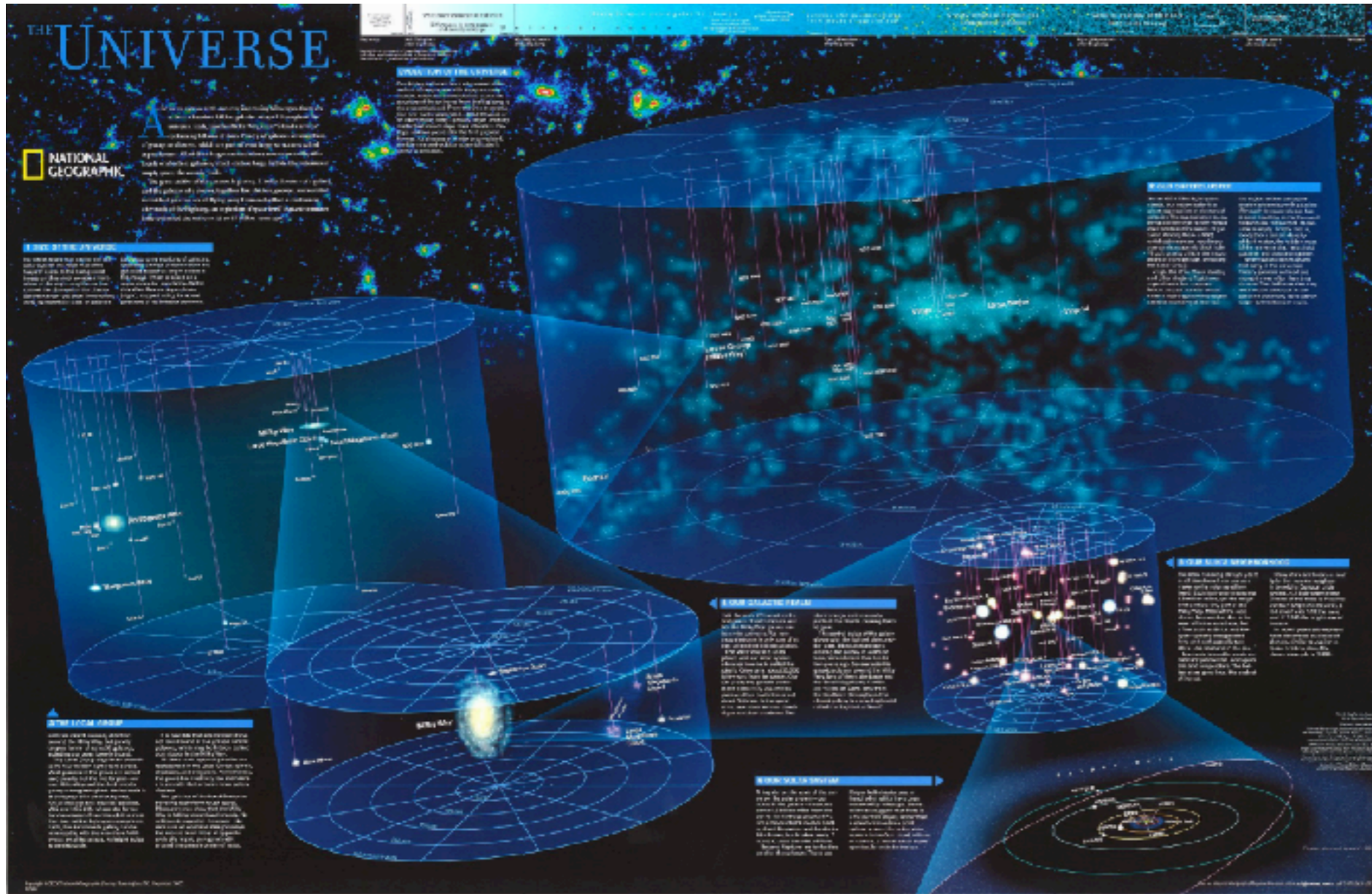
“Scenario Paper” [1304.0670ver2020Jan]

LVK collaboration, Living Rev Relativ (2020) 23:3

<https://link.springer.com/article/10.1007/s41114-020-00026-9>

- O1 (2015/9/12 - 2016/1/19) LIGO
- O2 (2016/11/30 - 2017/8/25) LIGO+Virgo
- O3a (2019/4/1 - 2019/9/30) LIGO+Virgo
- O3b (2019/10/1 - 2020/3/27) LIGO+Virgo + KAGRA

# 銀河系スケール から 銀河群スケールへ



1 pc = 3.26光年  
(年周視差1秒角となる距離)

天の川銀河 直径 10万光年  
32.5 kpc

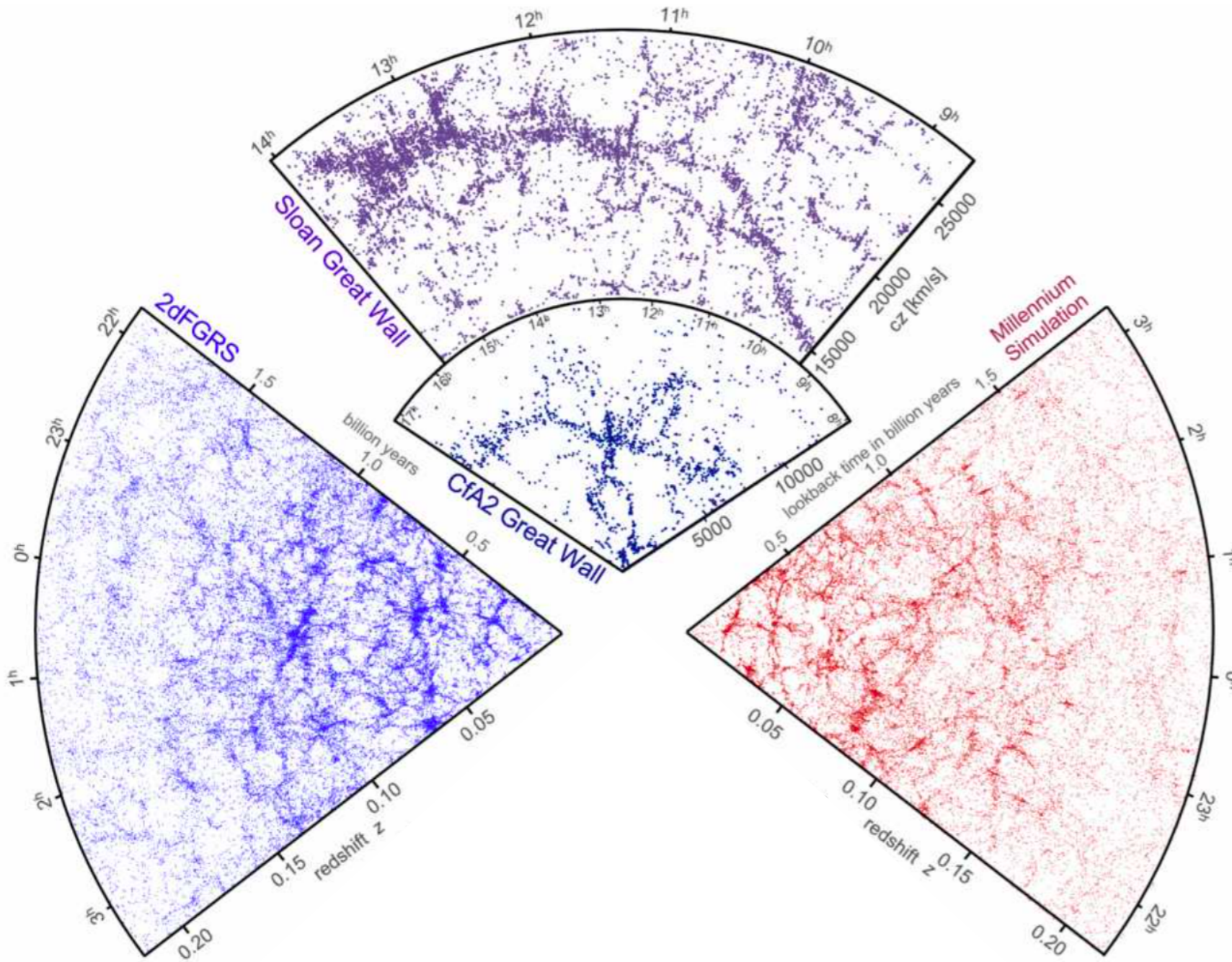
大マゼラン雲 (LMC) 50 kpc  
小マゼラン雲 (SMC) 61 kpc

アンドロメダ銀河 (M31)  
0.79 Mpc=250万光年

おとめ座銀河団 (Virgo Cluster)  
16.5 Mpc=5380万光年

National Geographic Universe Reference Map

# 銀河団スケール から 大規模構造 へ



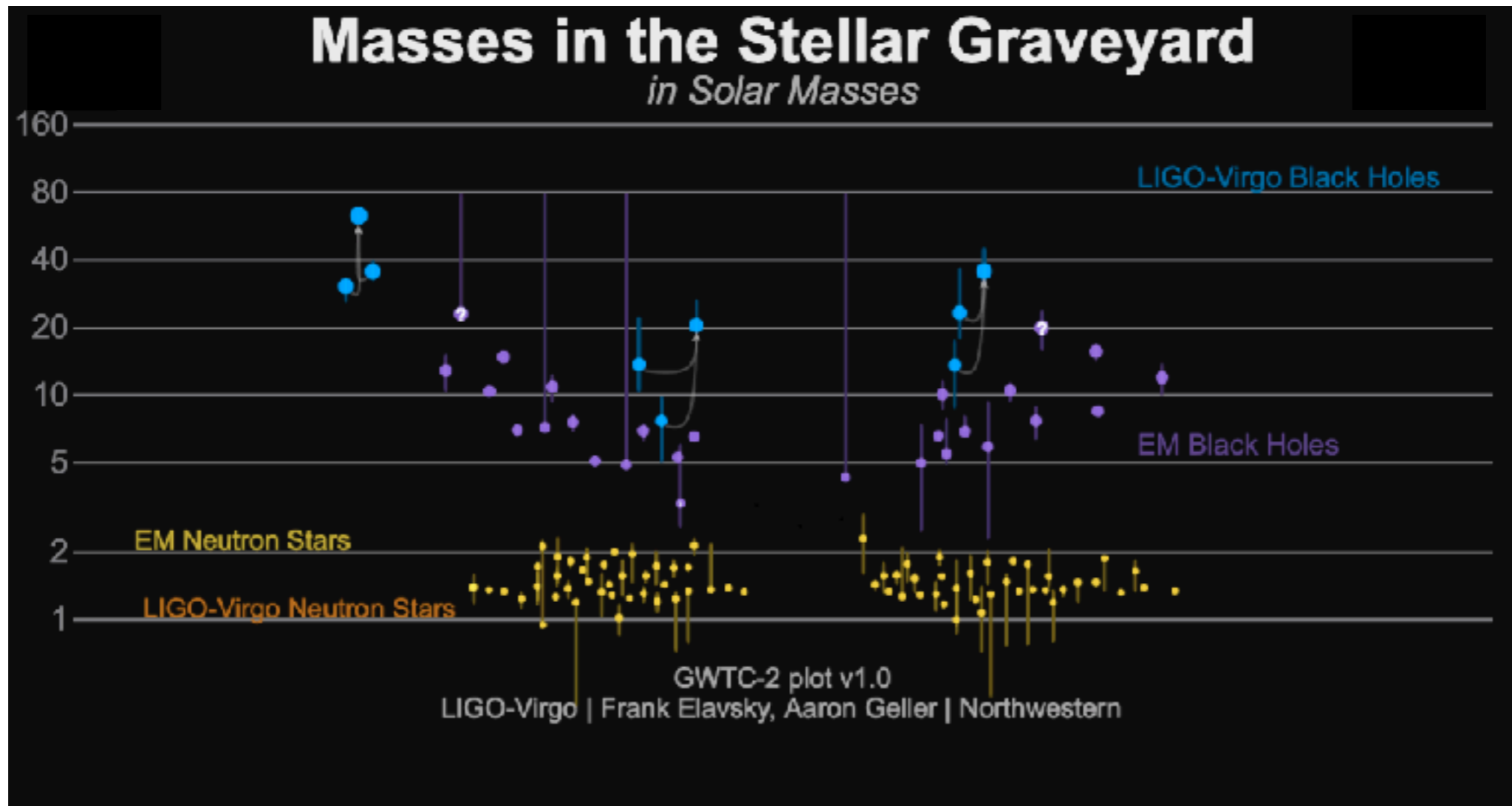
おとめ座銀河団(Virgo Cluster)  
16.5 Mpc=5380万光年

CfA2 Great Wall  
110-160 Mpc  
= 3.5-5.5 億光年

Sloan Great Wall  
300 Mpc = 10 億光年

図136 銀河の分布地図とシミュレーションによる類似分布を基にしたもの。【上】SDSSサーベイによる銀河の分布図と図134を基にしたもの。SDSSは、北天から見える45万個以上の銀河を2億光年まで示している。1.8億光年の距離に及ぶ1万個以上のダートウォール(万光年の長編)も新たに発見された。【中】2dFGRSサーベイによる銀河の分布図。西天の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基に示したもの。(Springel, Frenk, Whiteの論文(2006)を加工)

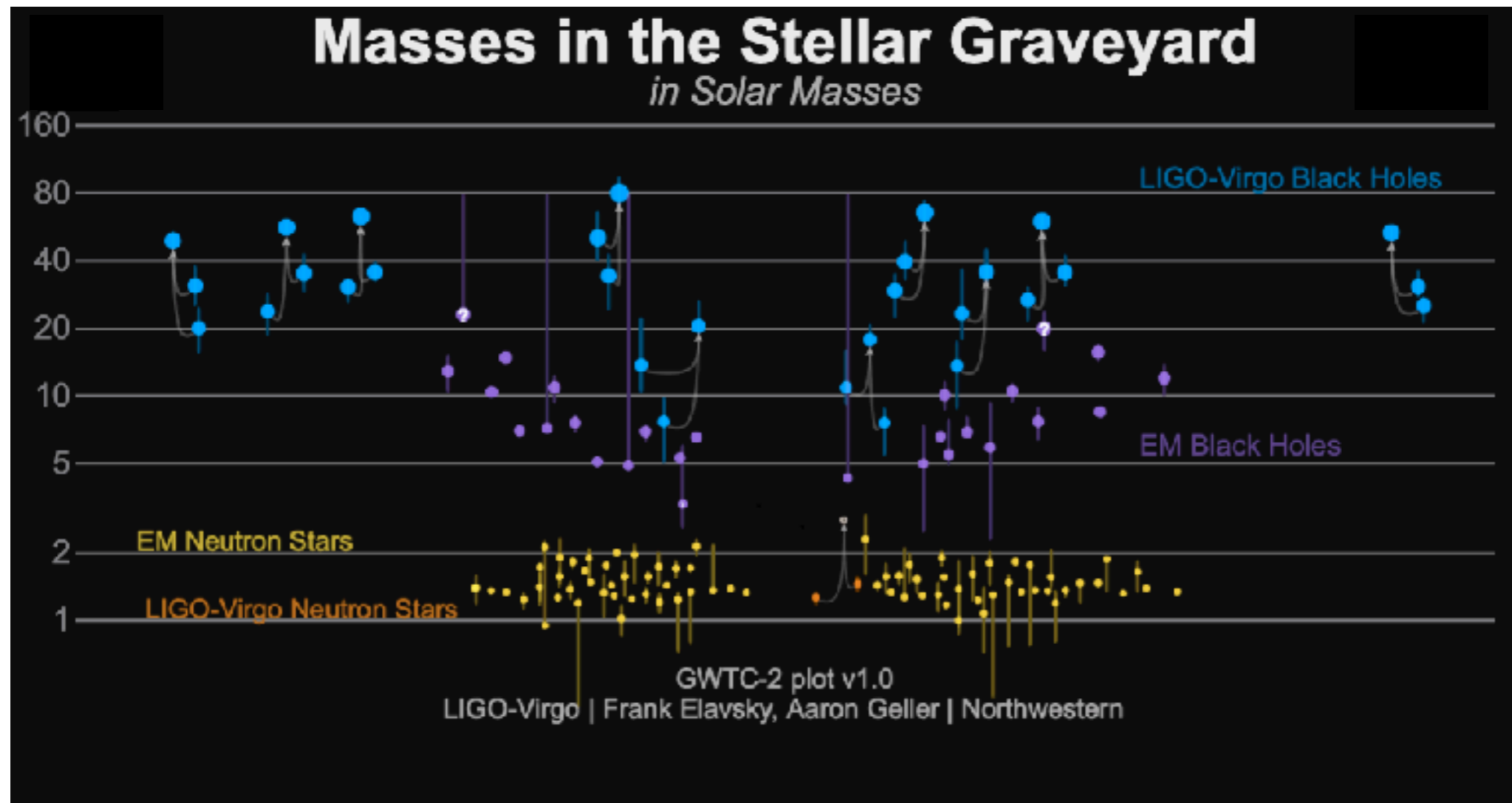
# O1 (2015/9/12 - 2016/1/19)



3 BHBH

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

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

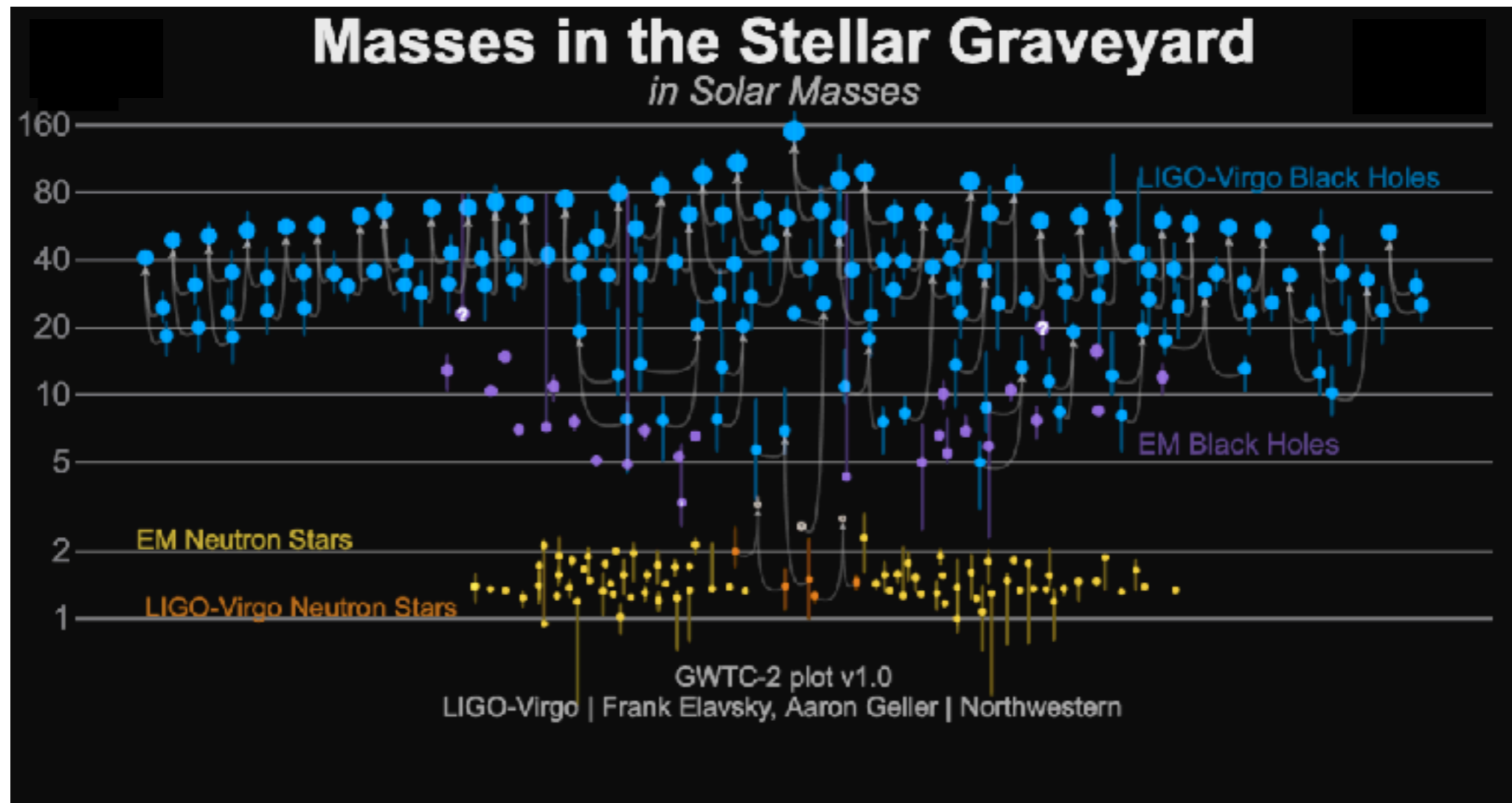


10 BHBH  
1 NSNS

- **GW170814**: the first GW signal measured by the three-detector network, also from a binary black hole (BBH) merger;
- **GW170817**: the first GW signal measured from a binary neutron star (BNS) merger — and also the first event observed in light, by dozens of telescopes across the entire electromagnetic spectrum.  
<https://media.ligo.northwestern.edu/gallery/mass-plot>

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

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



46 BHBH  
2 NSNS  
2 BH+?

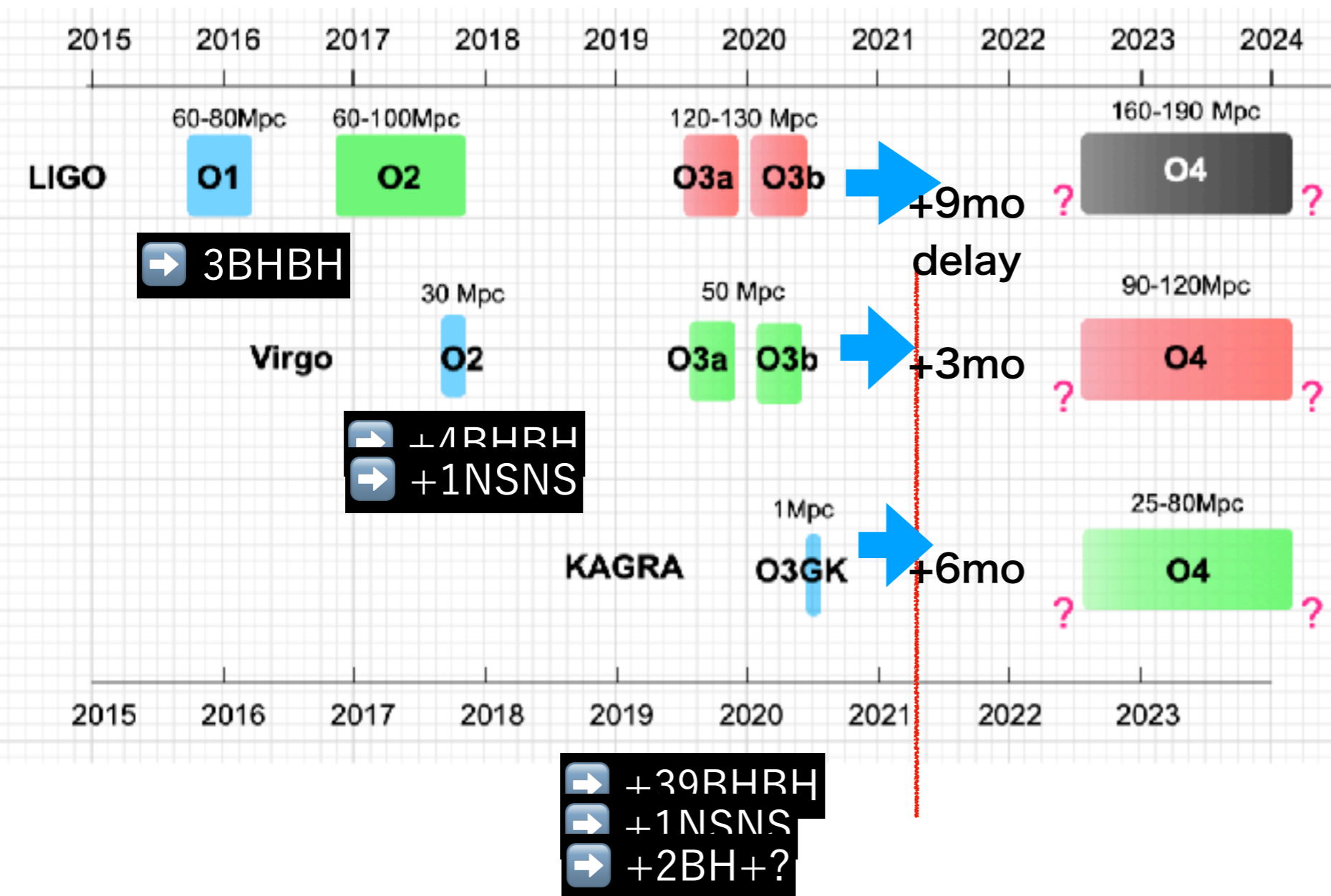
- [GW190412](#): the first BBH with definitively asymmetric component masses, which also shows evidence for [higher harmonics](#)
- [GW190425](#): the second gravitational-wave event consistent with a BNS, following [GW170817](#)
- [GW190426\\_152155](#): a low-mass event consistent with either an NSBH or BBH
- [GW190514\\_065416](#): a BBH with the smallest effective aligned spin of all O3a events
- [GW190517\\_055101](#): a BBH with the largest effective aligned spin of all O3a events
- [GW190521](#): a BBH with total mass over 150 times the mass of the Sun
- [GW190814](#): a highly asymmetric system of ambiguous nature, corresponding to the merger of a 23 solar mass black hole with a 2.6 solar mass compact object, making the latter either the lightest black hole or heaviest neutron star observed in a compact binary
- [GW190924\\_021846](#): likely the lowest-mass BBH, with both black holes exceeding 3 solar masses



# What's in 2021?

Five years ago, GW physics was a “future story”. People did not know the existence of BBH, BH over 10 solar mass (except SMBH).

Now LIGO/Virgo announced 50 events in October 2020 as GWTC-2 up to their O3a.



- 2021 Spring : O3a final analysis  
: O3a data release  
: O3b catalog
- 2021 Fall : O3b final analysis  
: O3b data release

- 2021
- LIGO Hanford: Upgrade
- LIGO Livingston: Upgrade
- Virgo : Upgrade -> Test Run
- KAGRA : Upgrade

- 2022 June or later
- LVK O4 start

# 最近の宇宙研究の進展から

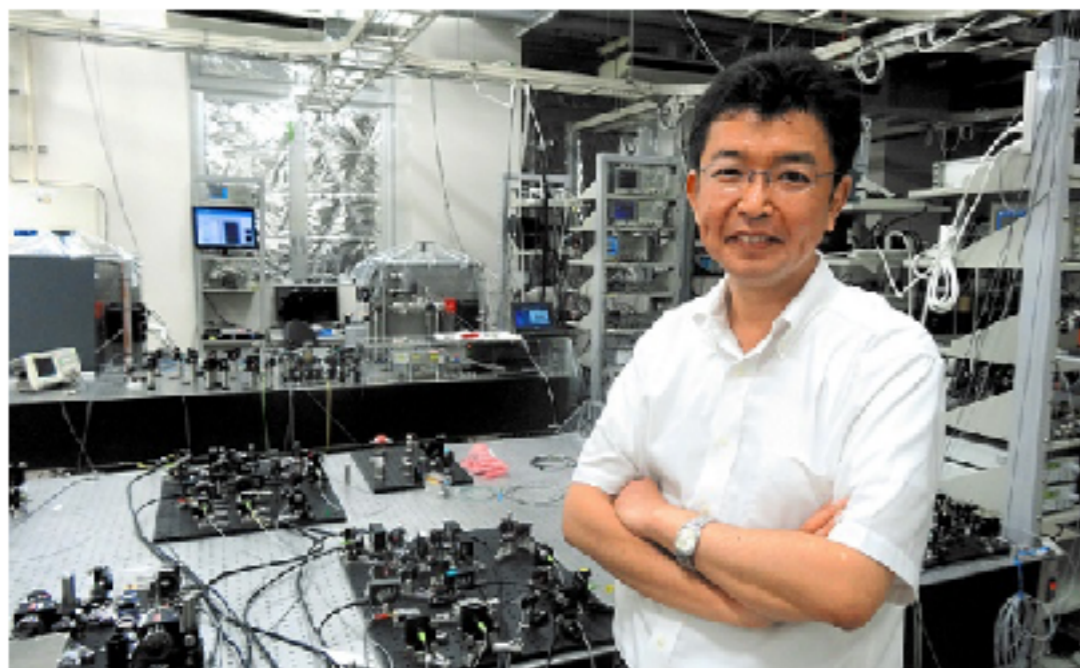
1. 太陽系内惑星探査
2. 太陽系外惑星探査 2018年ノーベル物理学賞
3. ブラックホールの観測 2020年ノーベル物理学賞
4. 重力波観測の現状 2017年ノーベル物理学賞
5. 時計を使った相対性理論の検証

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

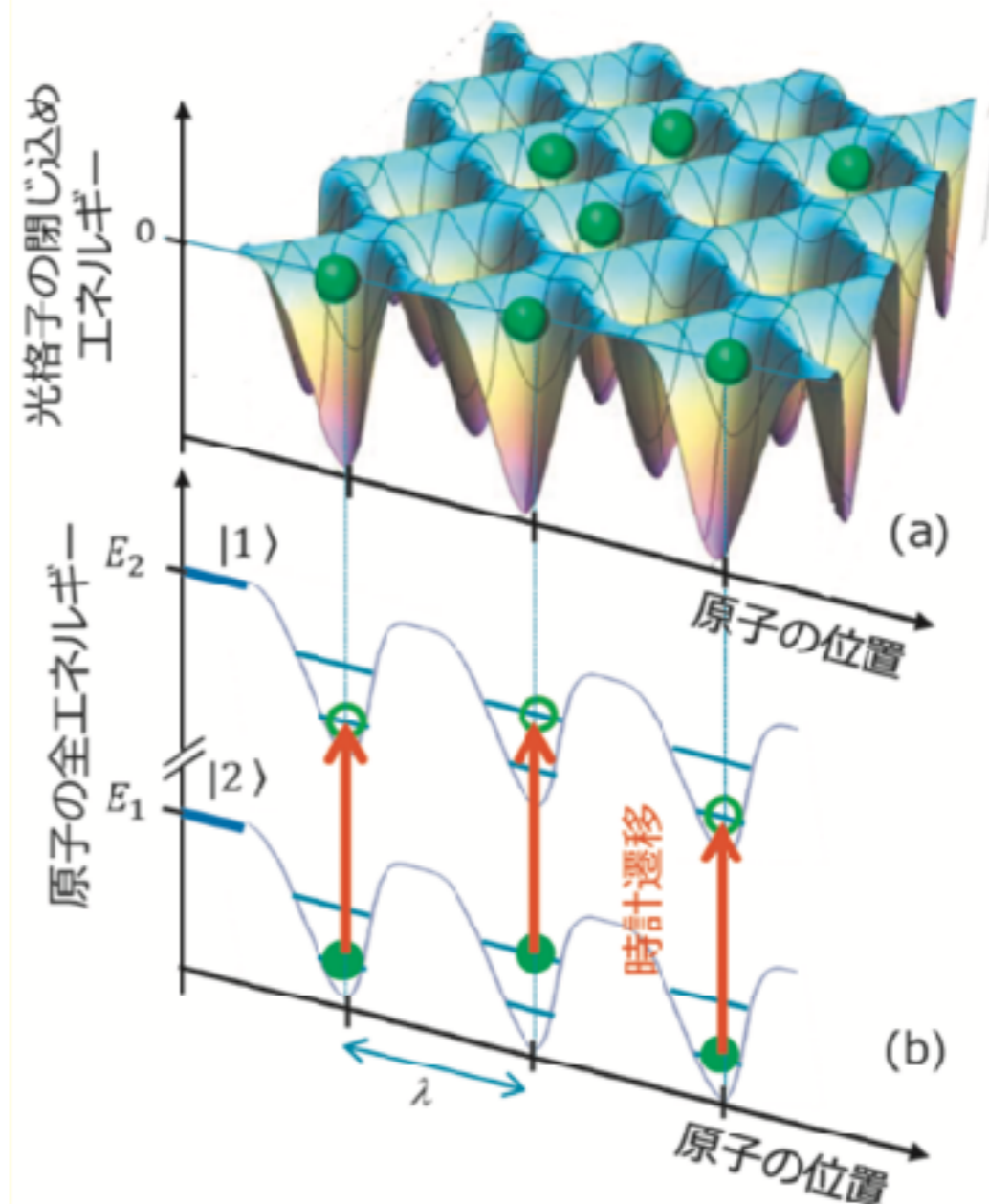
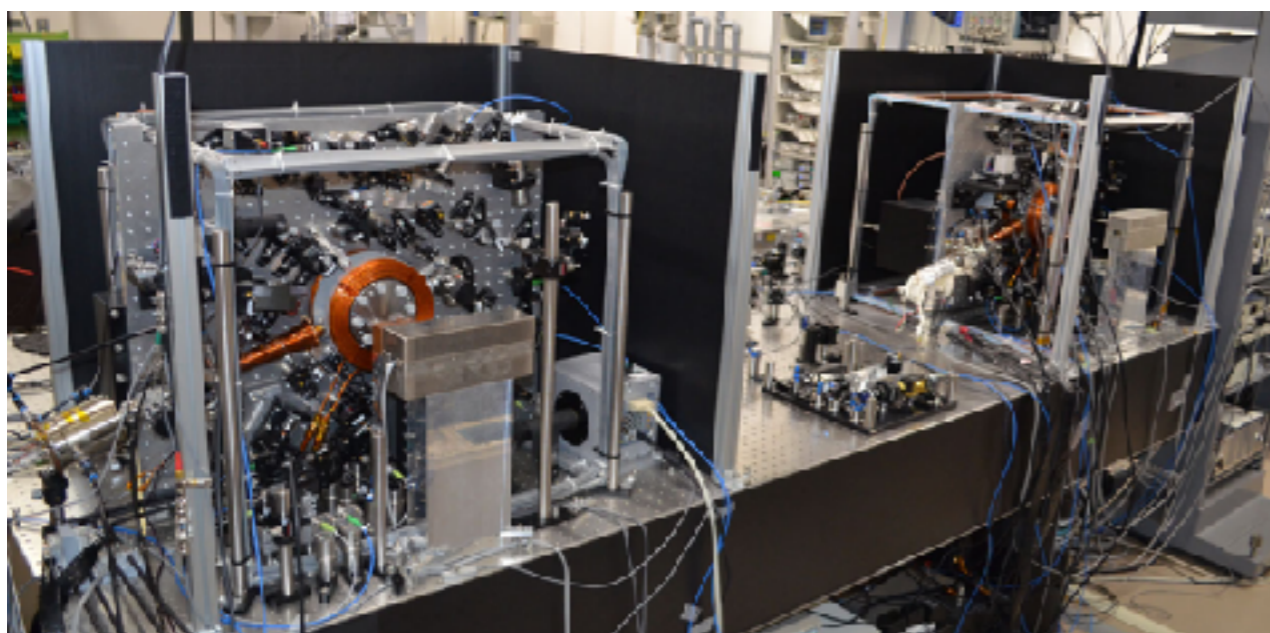
2021/3/10 サークルすばる @大阪中央会館



# もっとも精密な時計＝光格子時計



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



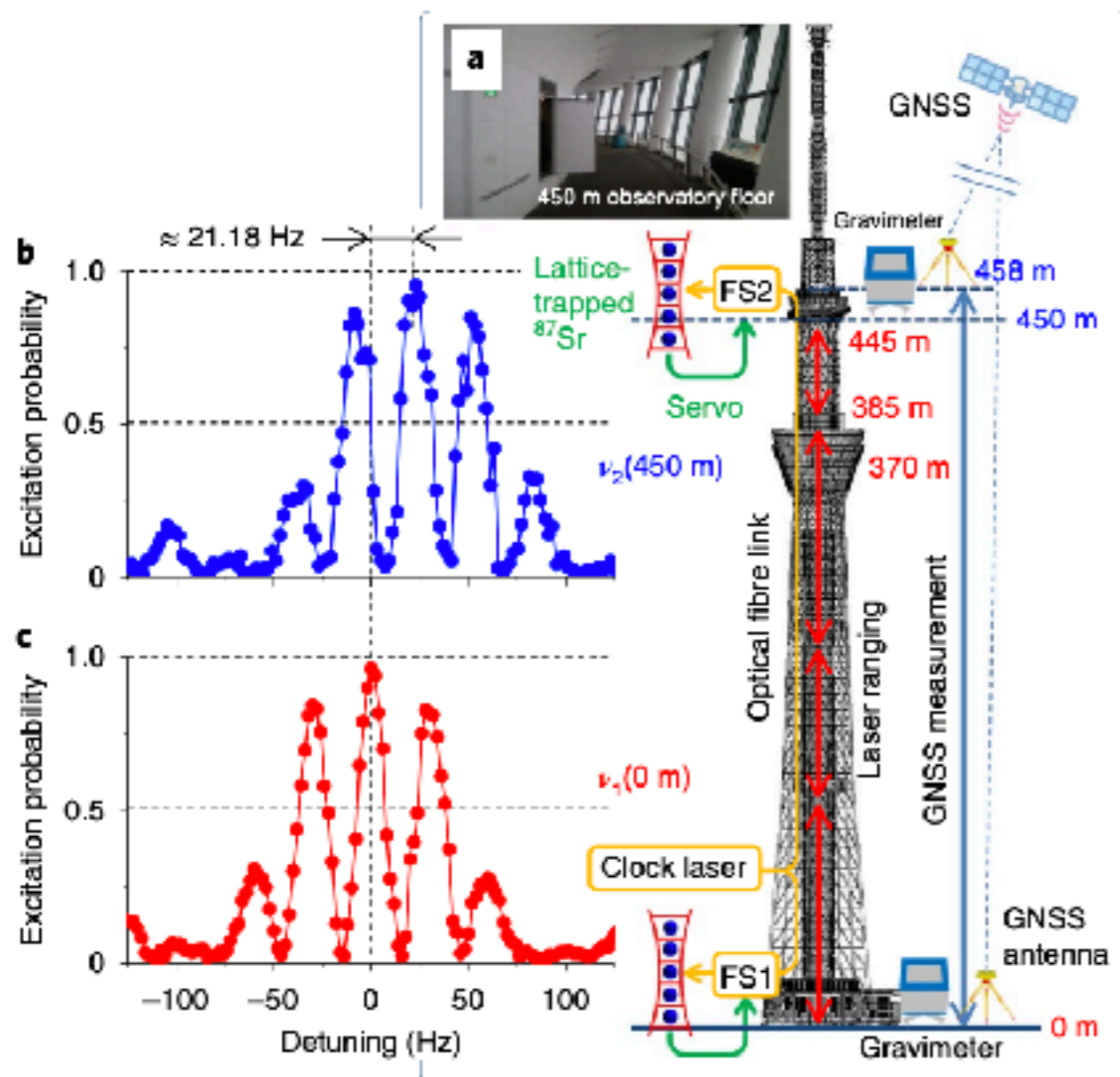
$10^{-18}$  の精度を実現  
(300億年ですれは1秒以内)

# スカイツリーの上下で時間の進み方が違う

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。



Nature Photonics, 14 (2020) 411

nature  
photonics

LETTERS

<https://doi.org/10.1038/s41566-020-0619-8>

Check for updates

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

Masao Takamoto<sup>1,2</sup>, Ichiro Ushijima<sup>3</sup>, Noriaki Ohmae<sup>1,2</sup>, Toshihiro Yahagi<sup>4</sup>, Kensuke Kokado<sup>4</sup>, Hisaaki Shinkai<sup>5</sup> and Hidetoshi Katori<sup>1,2,3</sup>✉

# スカイツリーの上下で時間の進み方が違う

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

1週間の計測。平均して、差が

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

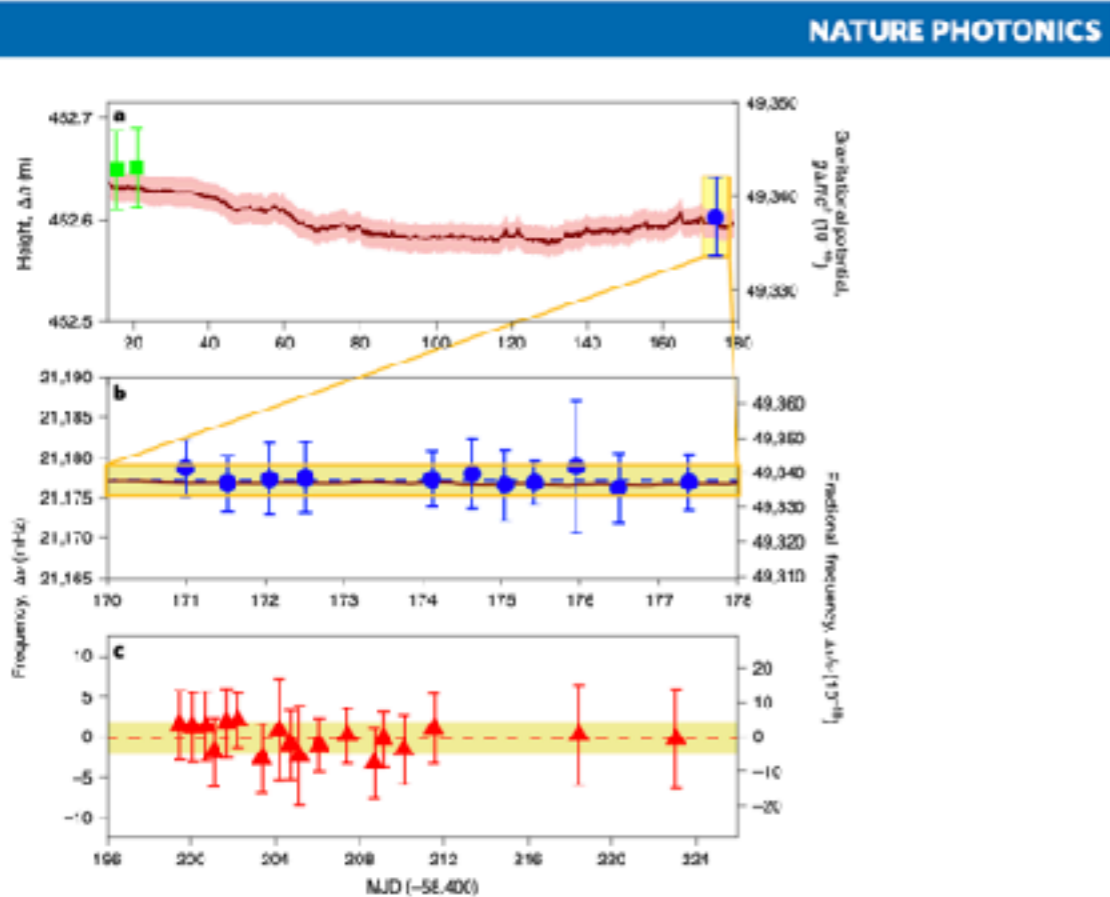
レーザー測距では

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

相対性理論の正しさを

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

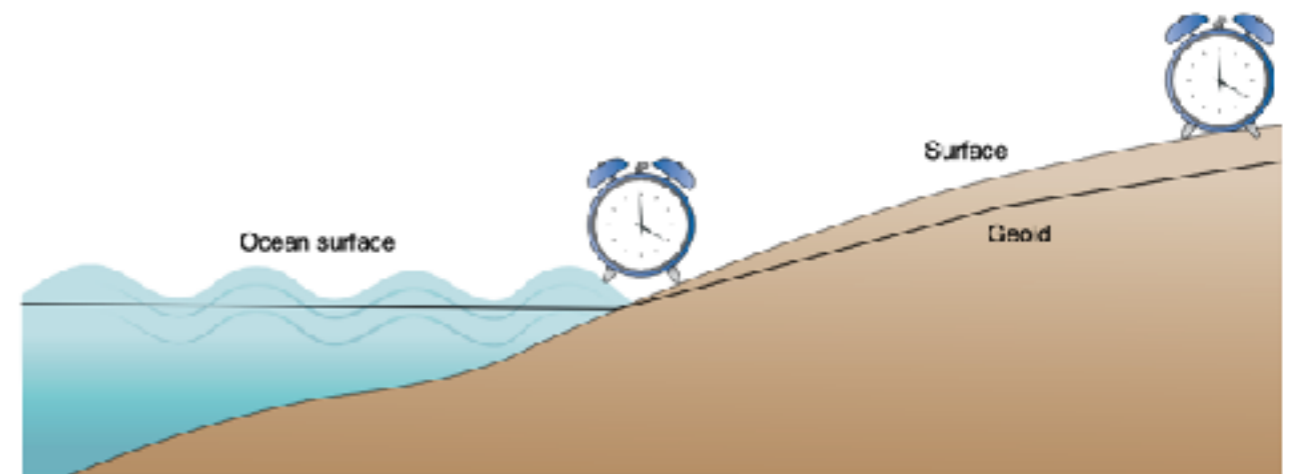
の精度で検証したことになる



# もっとも精密な時計＝光格子時計

冷蔵庫サイズの時計で、高度差450mを±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.

# 最近の宇宙研究の進展から

1. 太陽系内惑星探査
2. 太陽系外惑星探査                    2018年ノーベル物理学賞
3. ブラックホールの観測                2020年ノーベル物理学賞
4. 重力波観測の現状                    2017年ノーベル物理学賞
5. 時計を使った相対性理論の検証



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