

2018/12/2

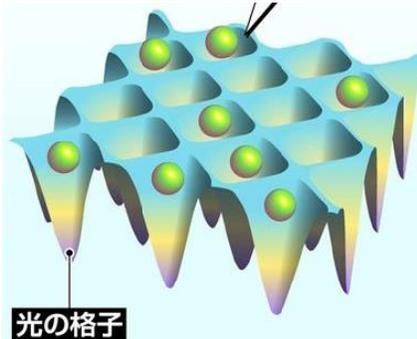
精密時空時計測が拓く 重力波天文学!

三代木伸二

東京大学宇宙線研究所・重力波観測研究施設

時計の精度と長さの精度

光格子時計の精度 原子が吸収する 安定な 光の周波数



光の格子

©日本産経新聞社より



$$\text{波長}(\lambda) \cdot \text{周波数}(\nu) = \text{光速}(\text{定義値})$$



長さの精度 安定な 光の波長 を物差しとして利用する

“安定な” とは、周波数(波長)の中心値の **ゆらぎ** の小ささ

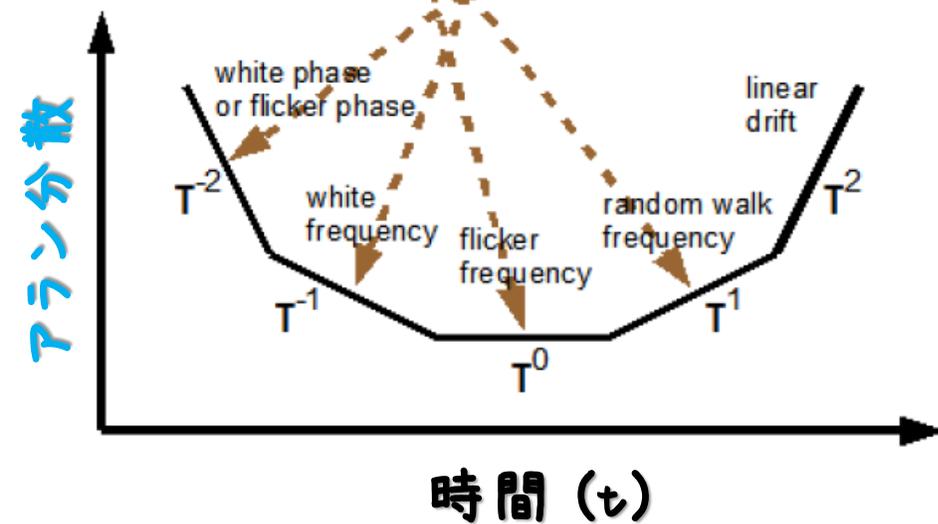
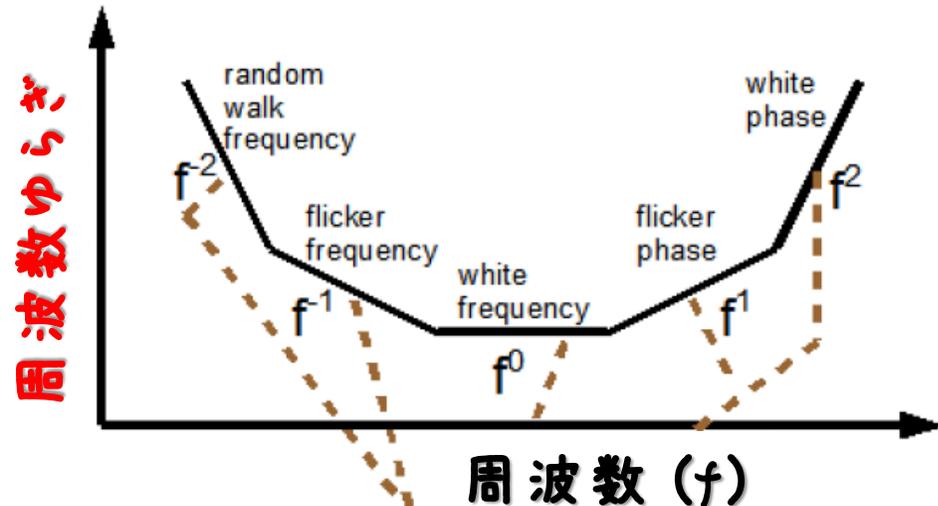
揺らぎの大きさは、揺らぐ周波数によって異なる!

100 Hz付近の揺らぎ比 ($\delta \nu / \nu = \delta \lambda / \lambda$) を

$\sim 10^{-20}$ に抑え込む \rightarrow 重力波望遠鏡

不確からしさという観点で ($\delta \nu / \nu$) を

$\sim 10^{-18}$ に抑え込む \rightarrow 光格子時計



レーザーの100 Hz付近の
波長ゆらぎ($\delta \lambda / \lambda$)を
~ 10^{-20} に抑え込んで、

かつ

多くの他の雑音も

この波長ゆらぎ並に抑え込んだら・・・

アインシュタインが
100年前に予言した

重力波が

ついにとらえられた!

重力波を発生した天体は？

2個のブラックホールの合体

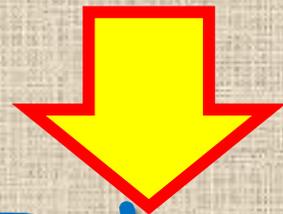


重力波検出の意義

「光」とその仲間の「電磁波」とは
性質が違う

重力波という

新しい自然の観察手段を手に入れた



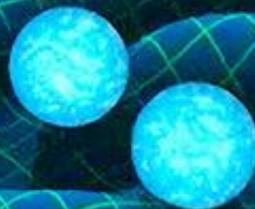
全く新しい世界・宇宙の姿がみえる可能性!

宇宙線研のお隣の
物性研のゆるキャラ

ぶっせい犬



重力波って・・・なに？



東大運動部全体の
マスコット・イチ公です

“重力”の“波”



“波”って・・・なに？



?

波

は、は、なみ

“波”って・・・なに？



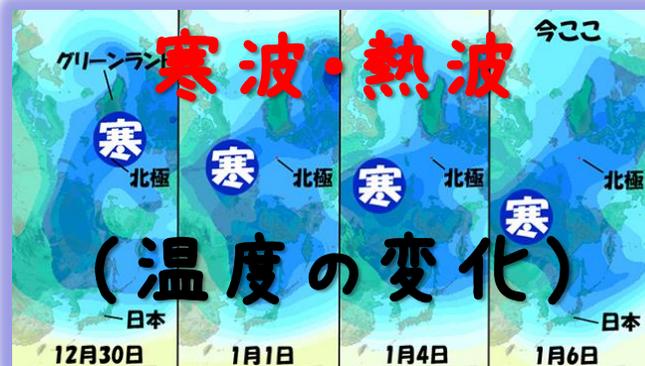
水面波

(海のような液体の波)



大波・小波・荒波・細波・・・

大気の波



(温度の変化)

音波

(空気の密度波)



低周波・高周波・疎密波

地震波



(固体中を通過)

電磁波の仲間

電波



赤外線、紫外線

X線、γ線

(電場と磁場の相互誘導)

光波

(可視光線)



光（電磁波）は振動は超ゆっくりから超速いまで

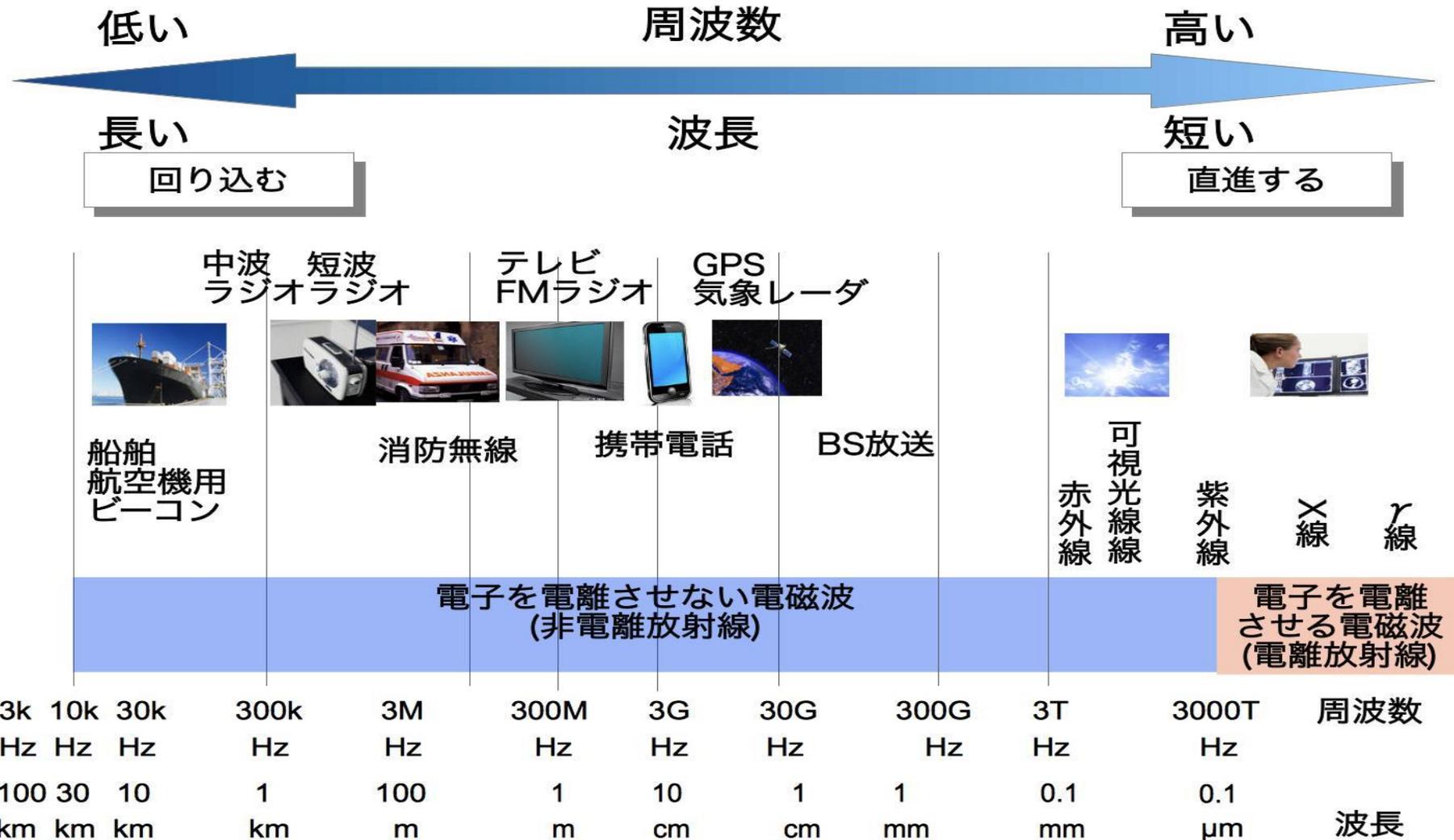
<http://pain0205.blog92.fc2.com/blog-entry-1260.html>

K:キロ:千

M:メガ:百万

G:ギガ:10億

T:テラ:1兆



重力波の振動も

超超ゆっくり

(~ 10 億秒の 10 億倍に一回)から

超超はやい

(~ 10 億分の 1 秒の 10 億分の 1 に一回)

まで“あり得る”

波の速度競争

重力波

299,792,458 [m/s]

定義値!!

地震波



~ 4,000 [m/s]

音波



~ 340 [m/s]

気象的な波



~ 10 [m/s]

“重力”って・・・なに？

重力は、バンジージャンプ



ニュートンさんが気づいた“重力”

万有引力の法則

イチコウは、地球から
引力を受けている

同時に

地球もイチコウから
引力を受けている



ニュートン
(1642-1727)

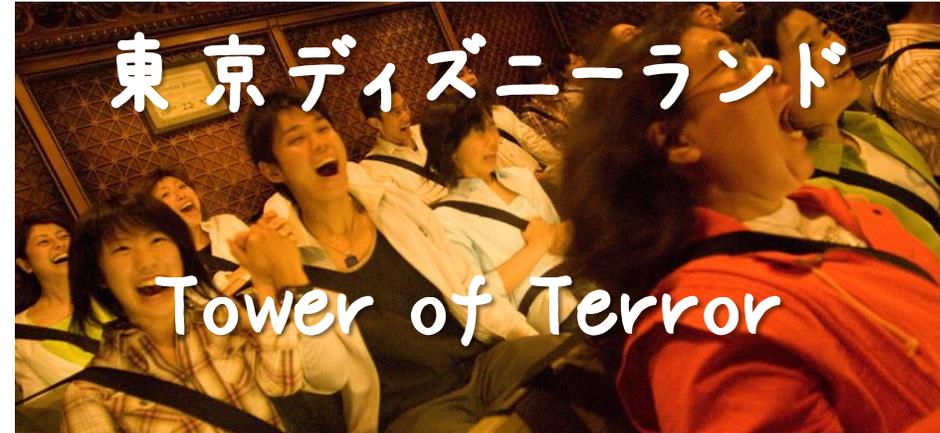
重力を“感じる”体験ってどんな時

真っ逆さま
に落ちる



バンジージャンプ

引用: 世界一の九州が始まる!



東京ディズニーランド

Tower of Terror

<http://www.tokyodisneyresort.jp/>

http://www.gizmodo.jp/2015/09/post_18279.html

坂を下る



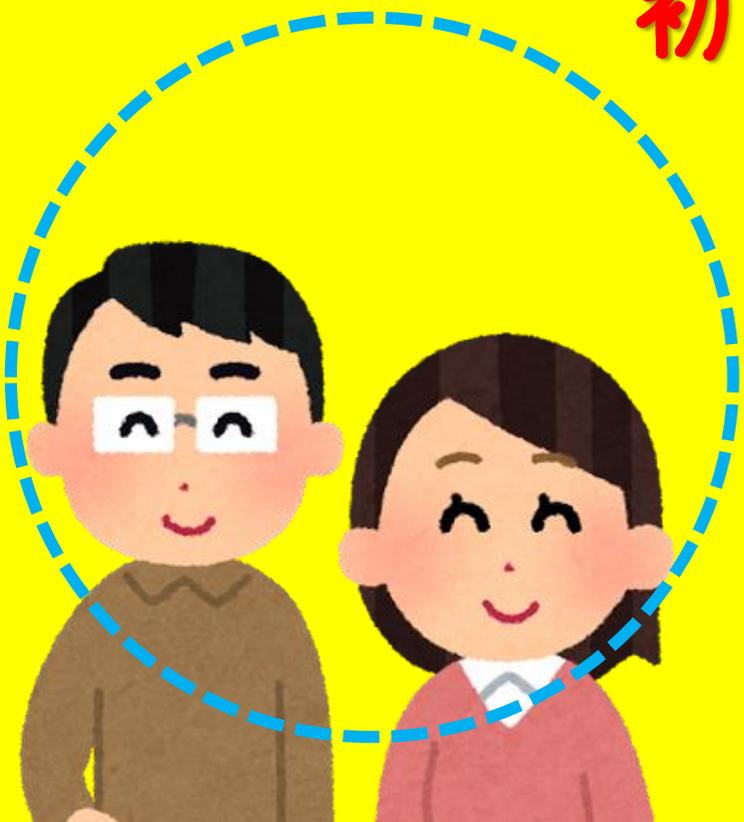
スキー



自転車で坂道を下る

重力を“感じる”体験ってどんな時

第三者が、落ちている人を見てみると
「支え」がなくなり、地面に向かって落ち始めて
初めて「重力がある」とわかる



重力を“感じる”体験ってどんな時

しかし!!

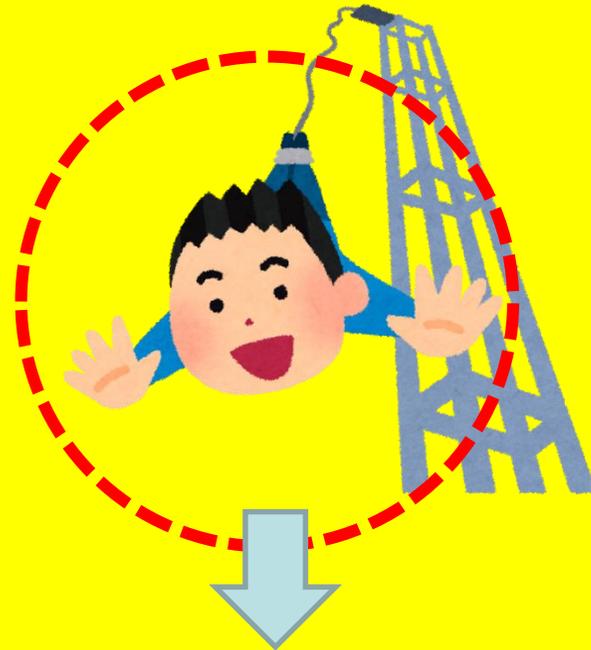
「落ちている」本人はどうかんじてる??



重力を“感じる”体験ってどんな時

体が浮いたような気がする。

ふわっとした感じがする。なんか、気持ち悪い。

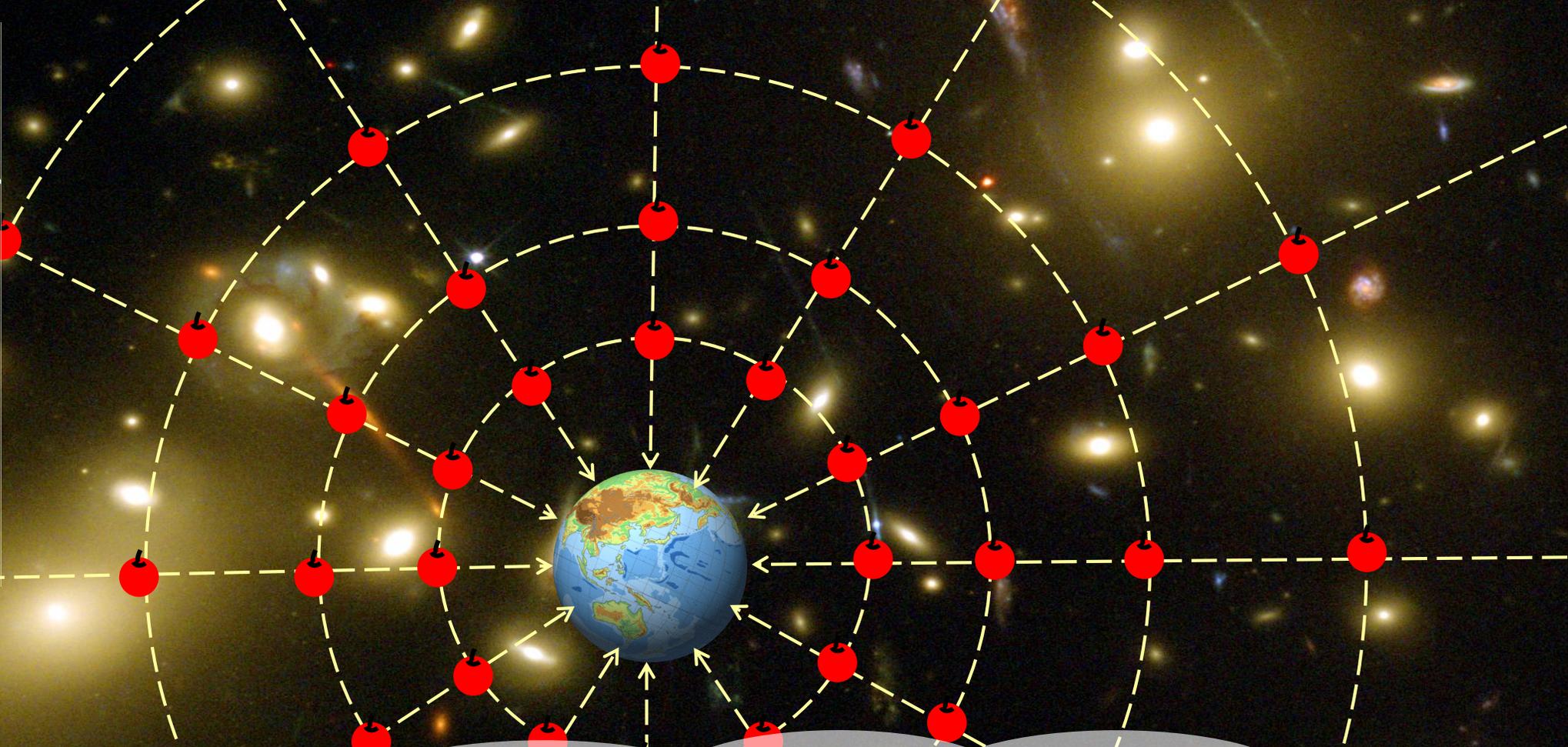
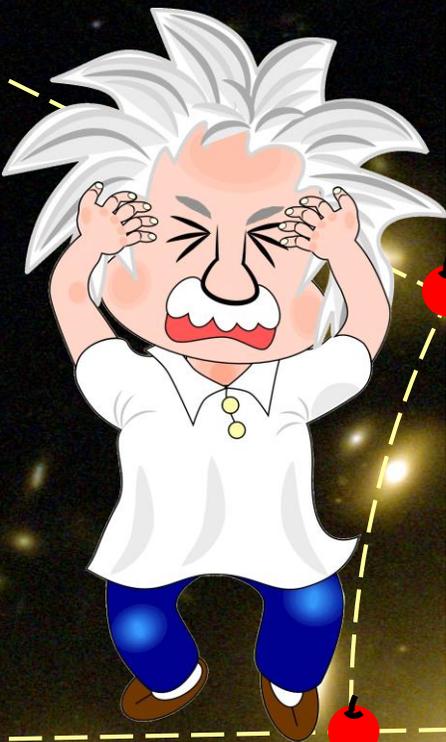


落ちている**本人は**、
落下している間は、「**無重力**」とか「**浮かんでいるみたい**」
とあって、「**重力が無い**」みたいな**表現**をします。

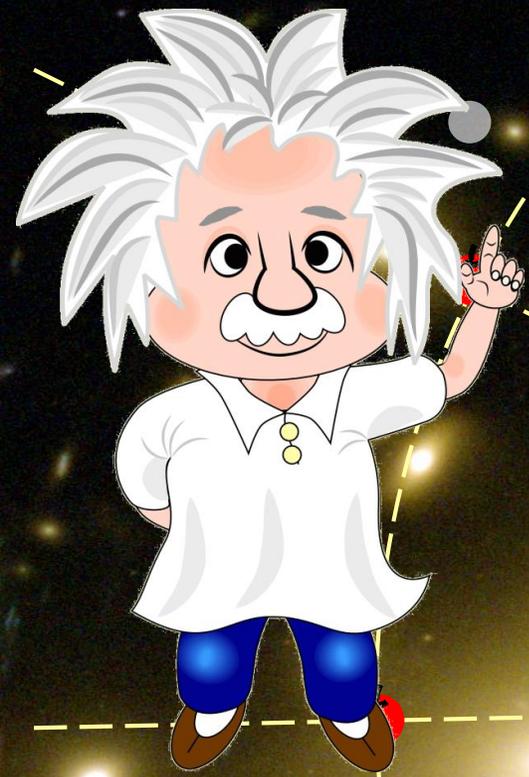


重力は
有るの?無いの?
どっち??



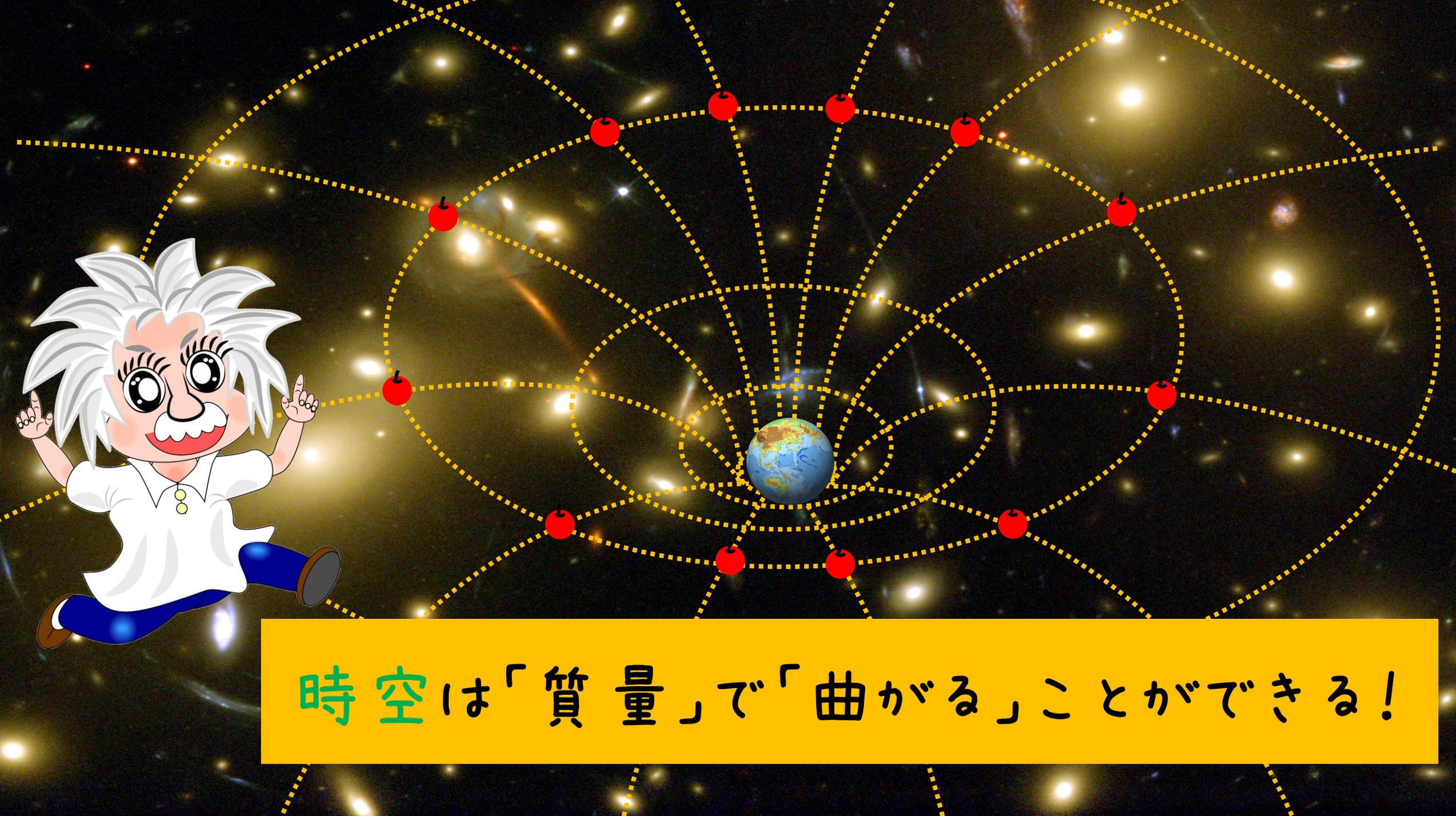


平面や空間だけを考えていては
「動かない」



そういえば、時間もあったな〜。

時間と空間は一見違うものに見えるけど、
区別しないで同じ仲間と考えると、
時空を考えてみよう…



時空は「質量」で「曲がる」ことができる！

重力は時空のありじごくだ!

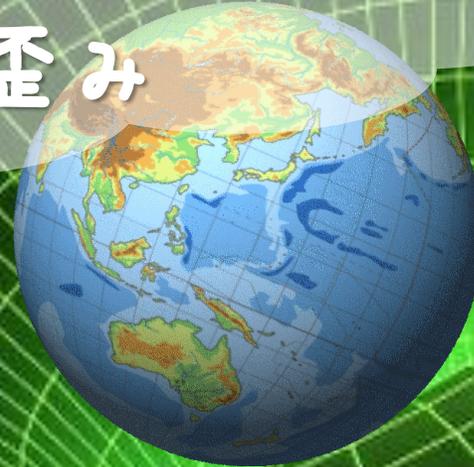
<https://www.youtube.com/watch?v=4ff1018vUK8>



アインシュタインが気づいた“重力”

Wikipedia

重力とは潮汐的な変化を起こす、
時空の歪み



イチコウも地球も自分の周囲の時空をゆがめて
いる。イチコウは、地球が作った時空の歪みにそって
「落ちている」だけ。

アインシュタイン
(1879-1955)

重力による運動

は

空間のゆがみに従って動く運動

と解釈し直すことができる！



空間のゆがみを

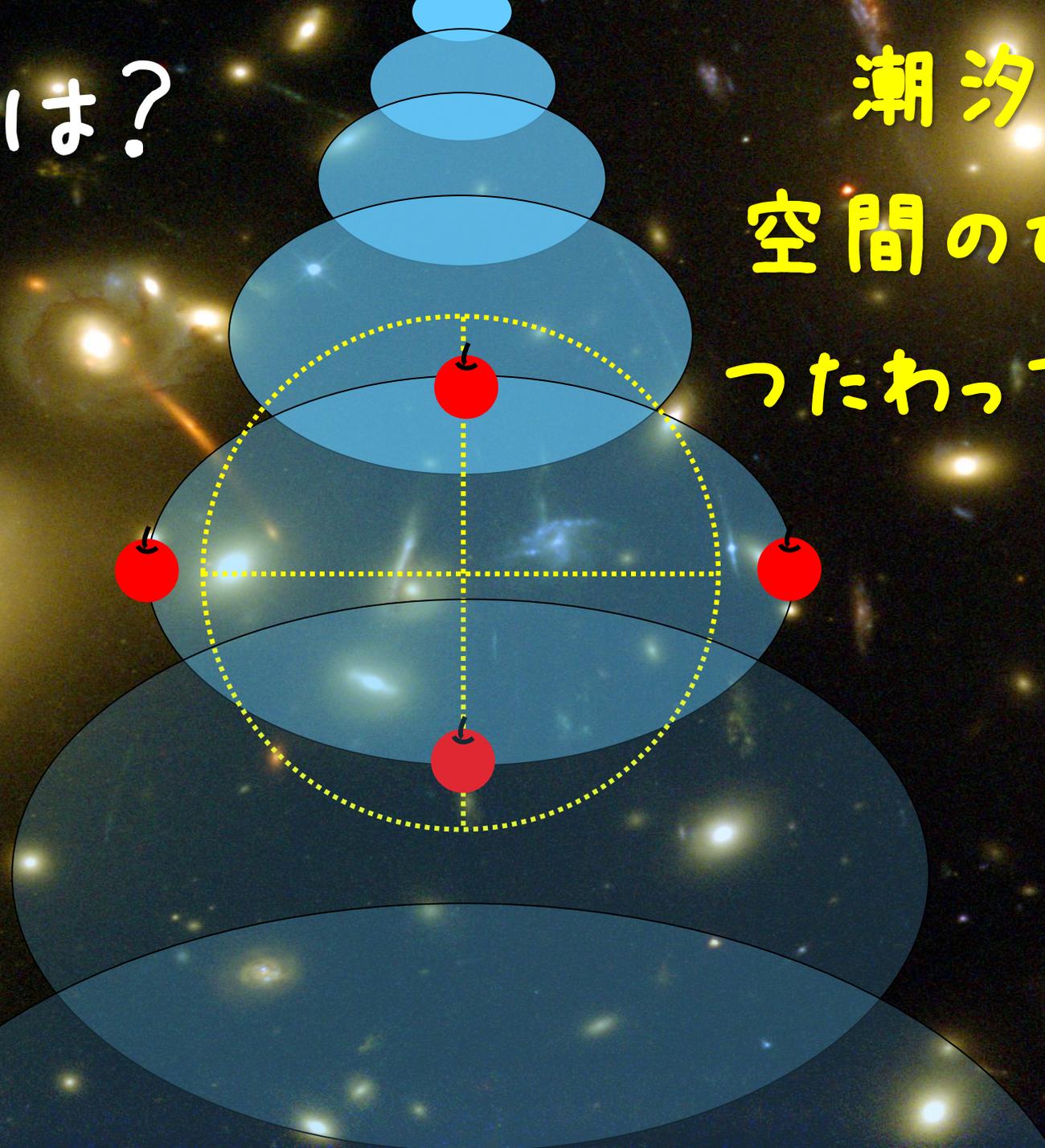
生む物は

もちろん「質量」



重力波とは?

潮汐的な
空間のひずみが
つたわっていく波



とくちょう

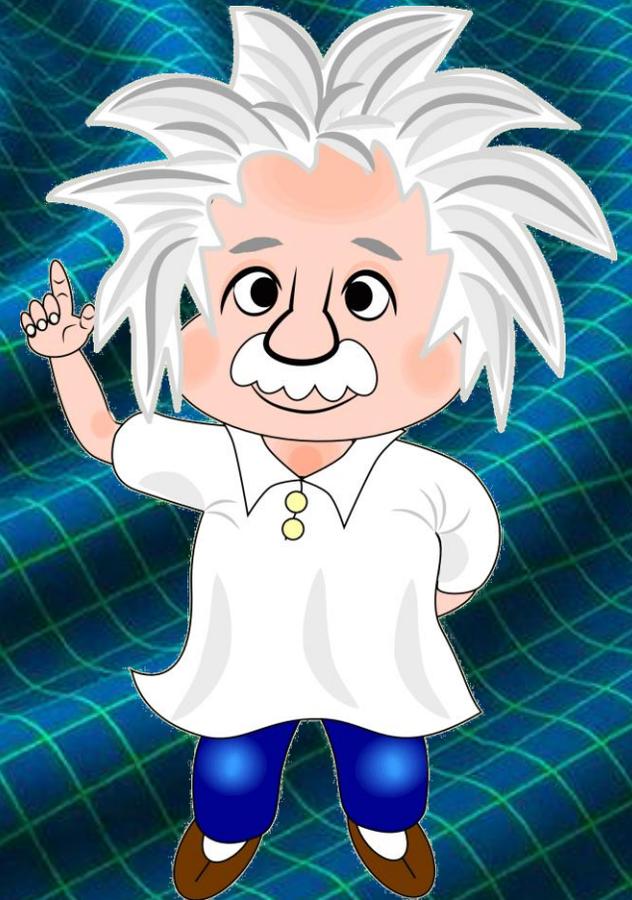
重力波の特徴

アインシュタイン

私が100年前に

一般相対性理論で予言。

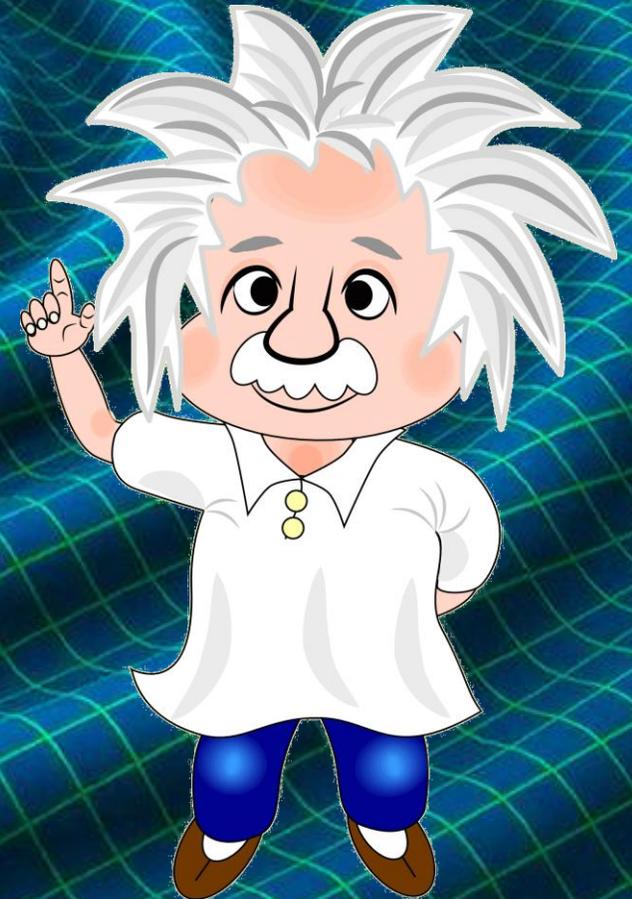
唯一、直接的に検証できなかった私からの最後の宿題。



とくちょう

重力波の特徴

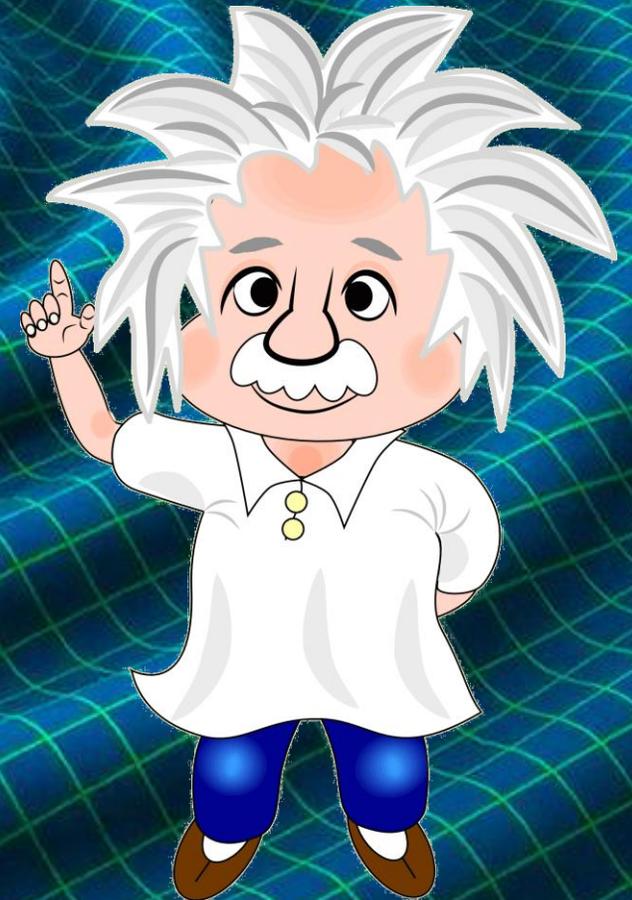
重力が万有引力で
あれば、ありえない現象



とくちょう

重力波の特徴

光と同じ速度で
伝搬する、と予想
されている



とくちょう

重力波の特徴

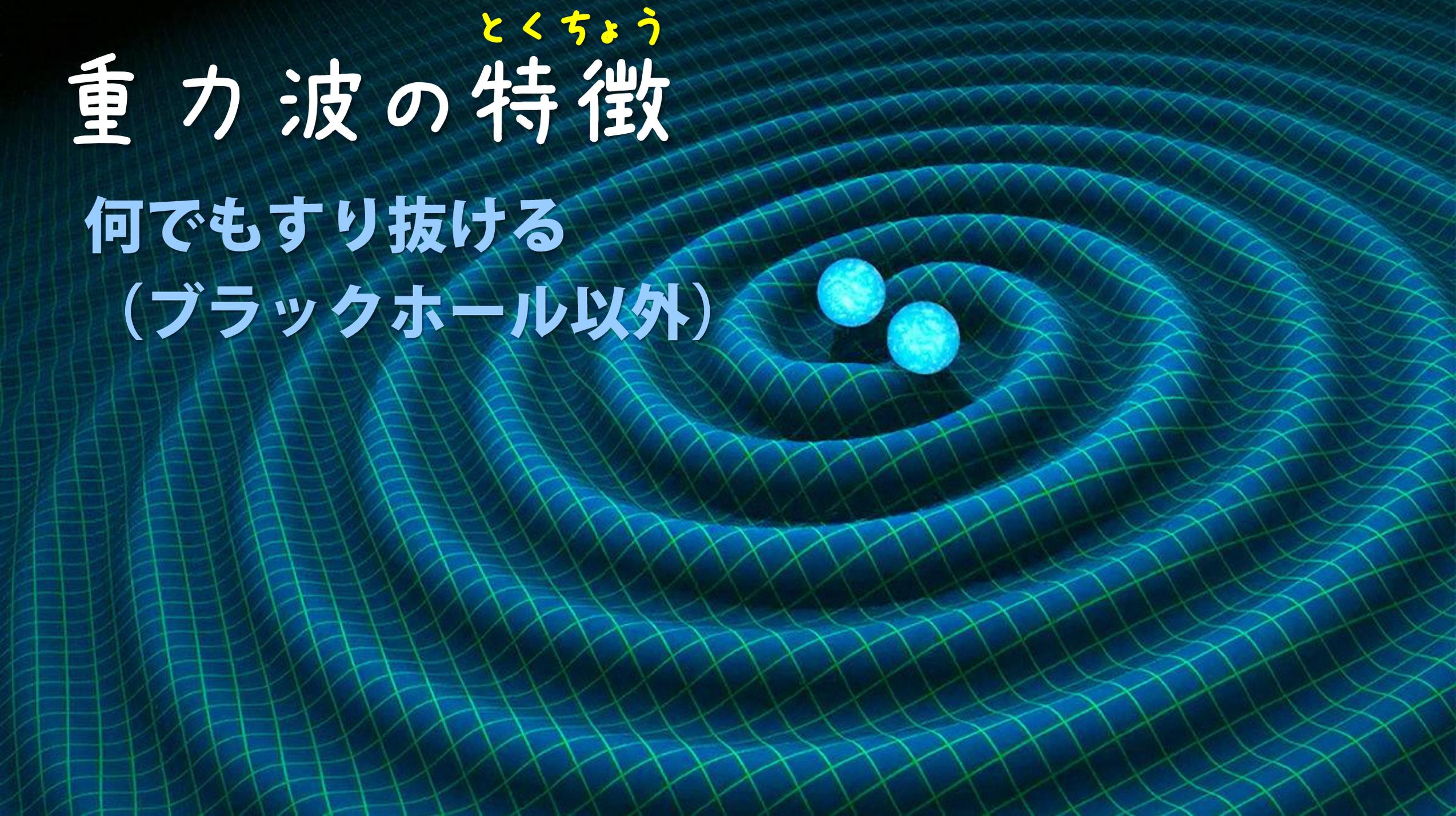
真空中でも伝わる

“時空”の振動だから
媒介物質は不要

とくちょう

重力波の特徴

何でもすり抜ける
(ブラックホール以外)



重力波は何かから出るか？

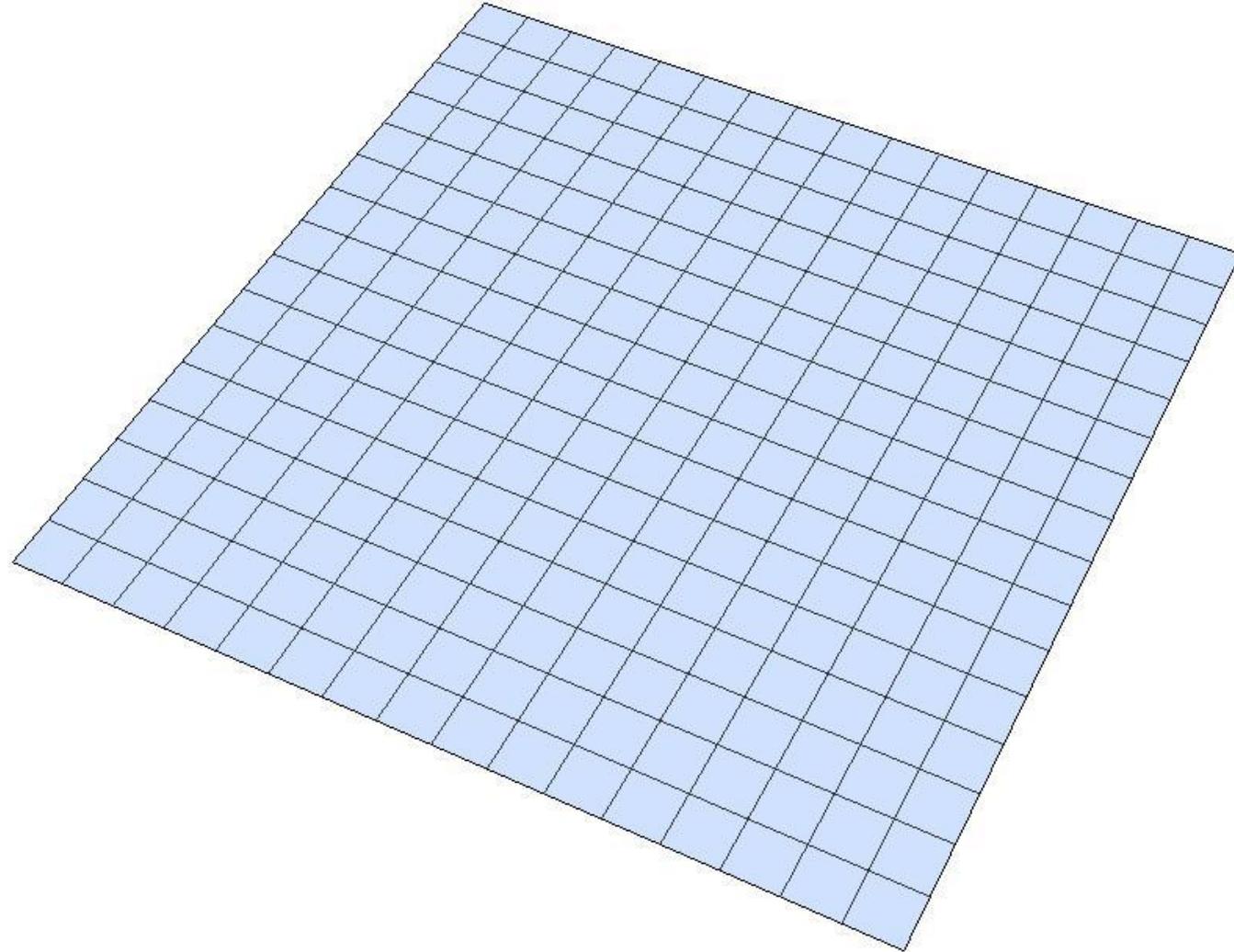
物理学者が見る、そぎ落とされた世界



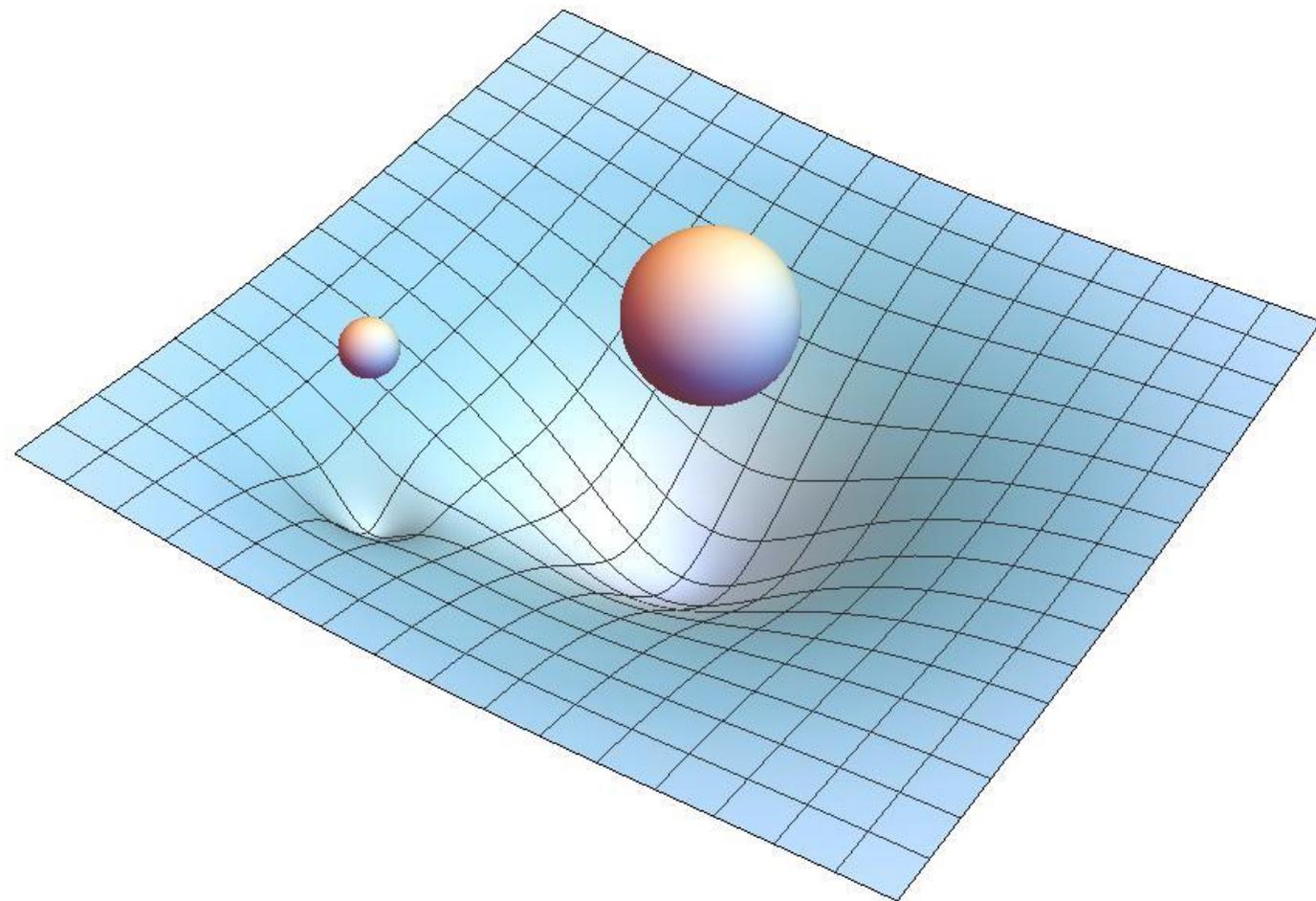
質量 (+)

質量のない平坦な空間

わかりやすさのため、立体ではなく平面と、時間で考える

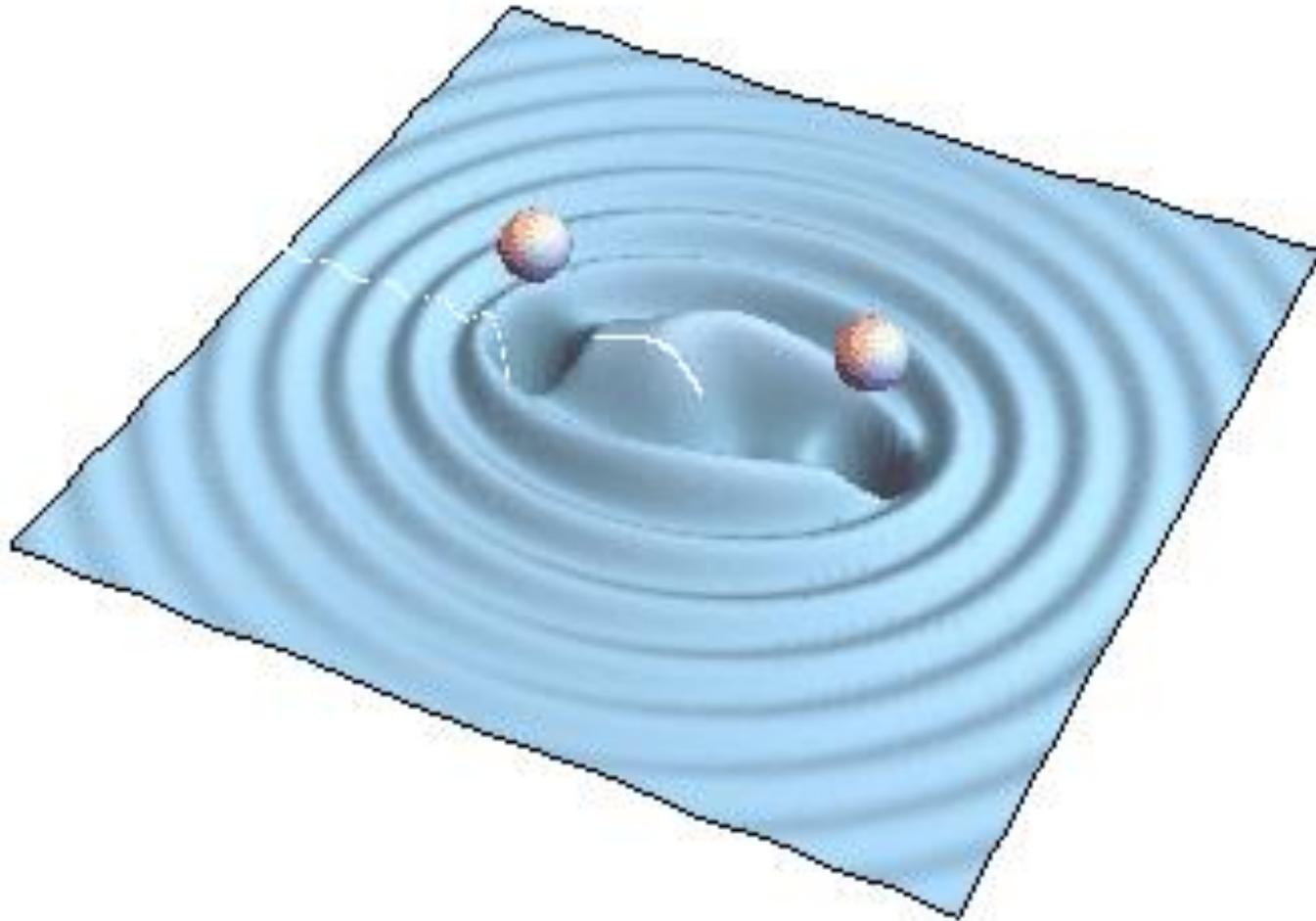


質量による空間の歪み



重力波（時空の歪み波）の仕方

- 非軸対称な運動・・・、例えば「連星」の公転運動で重力波が発生



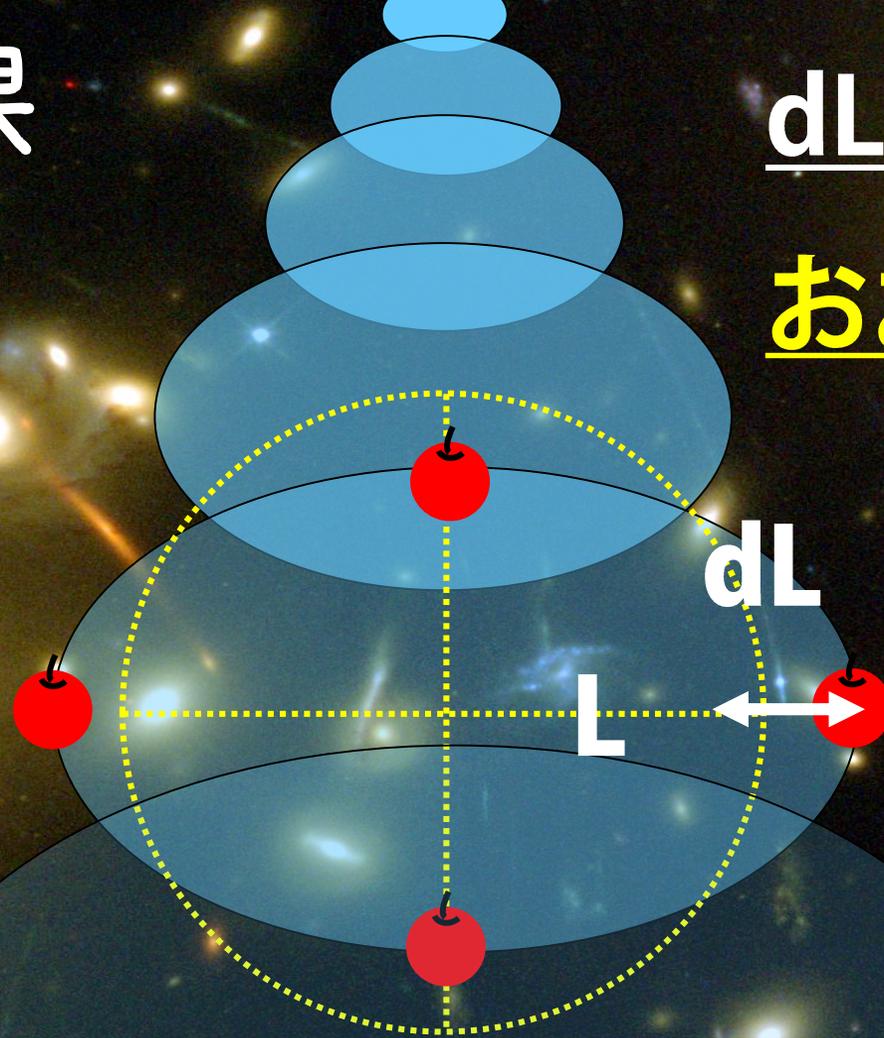
重力波の効果

と

計測単位

dL は L に比例して

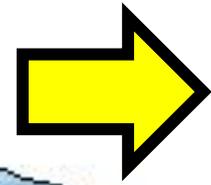
おおきくなる



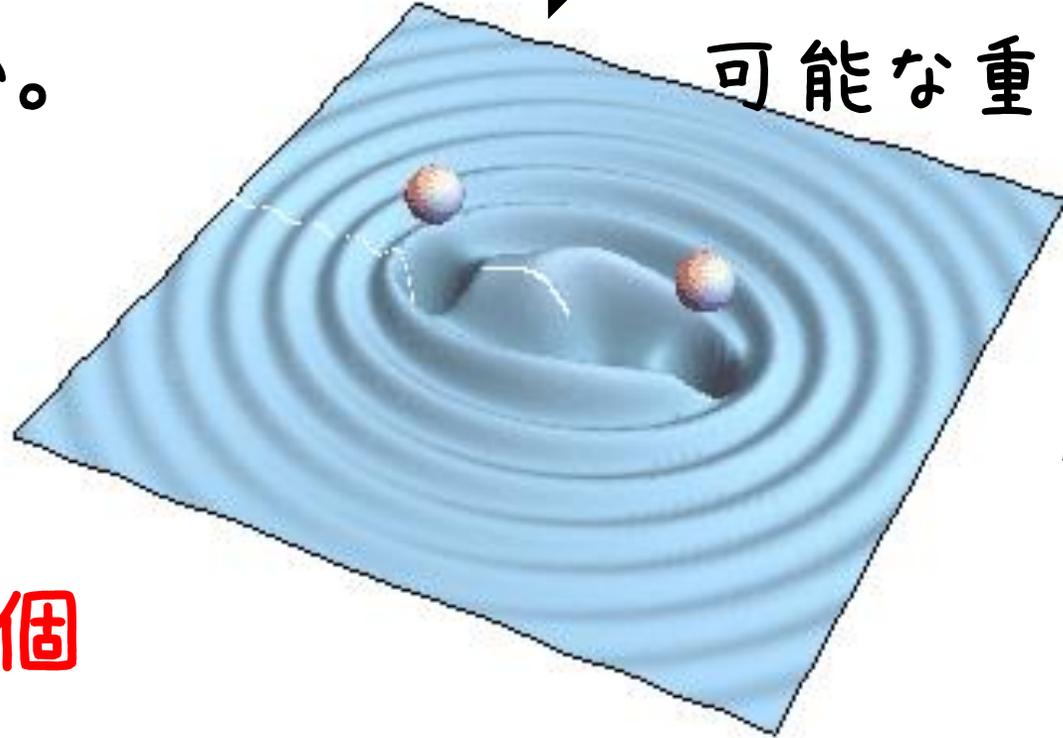
$$h = \frac{dL}{L} [\text{rms or } 1/\sqrt{\text{Hz}}]$$

重力波を出すには“星”が必要

腕をぐるぐる回しても重力波は出てますが、あまりにもその変化は小さい。



星ほどに重いものを想定し、かつ近接してないと人類が検出可能な重力波は出てこない。



$$h < \frac{1}{100\dots000}$$

ゼロが50個

$$h < \frac{1}{100\dots000}$$

ゼロが22個

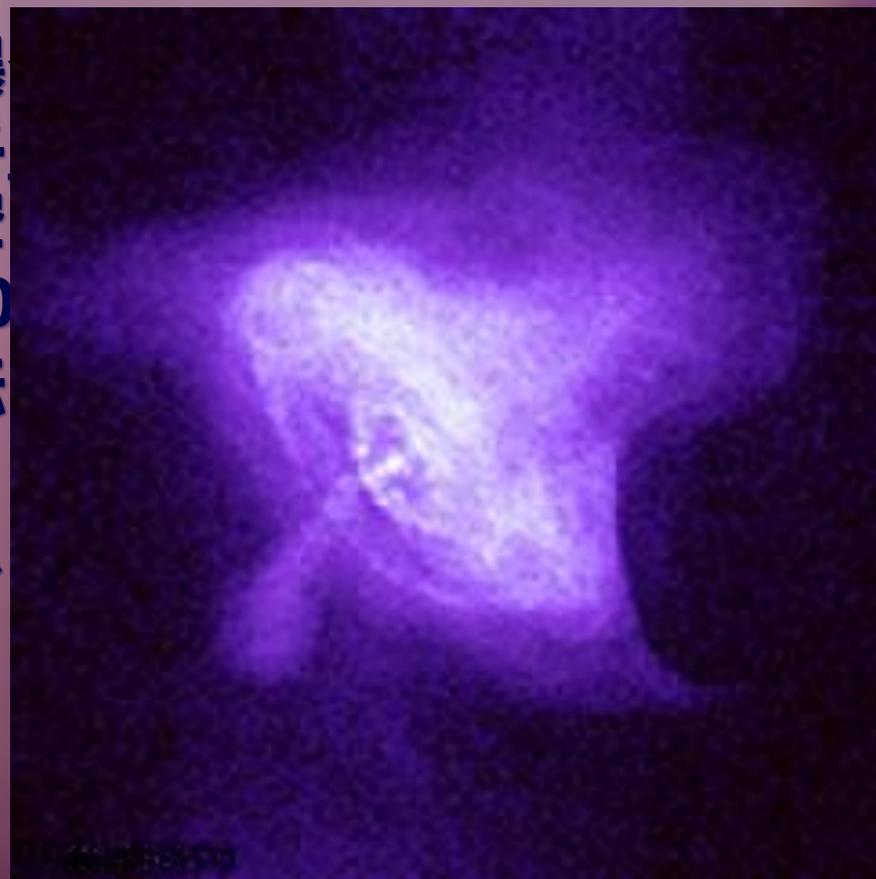
～ 10^{-22} ほどの程度の小ささか



太陽と地球の間の距離 (1億5000万km)が
水素原子一個分(100億分の1 m)動く距離

中性子星

- 重い星が超新星爆
- ほとんど「中性子」
いので、小さな空
- なので、直径~20
- 多くは高速で自転
(1秒に数十回)
- 電波などを放出し



電氣的に反発しな
る。

らい重くなれる
な回轉。

地球の直径：12,742 km

中性子星の直径：~20 km

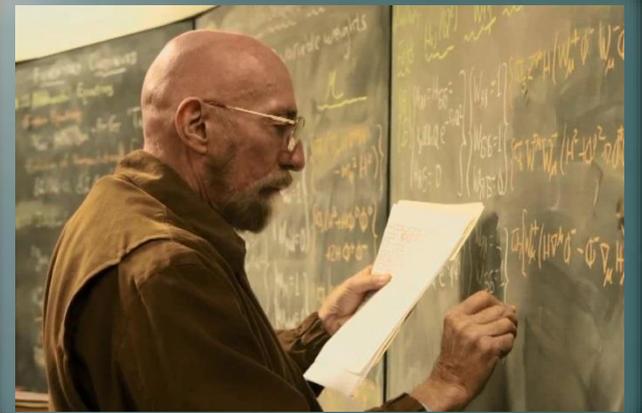
 太陽の $\frac{1}{109}$



ブラックホール

- 非常に重い星が超新星爆発を起こした後にできる星
- なんでも吸い込み、光すら逃げ出せない領域を持つ

映画「インターステラー」でブラックホールの映像監修をされた キップ・ソーン先生



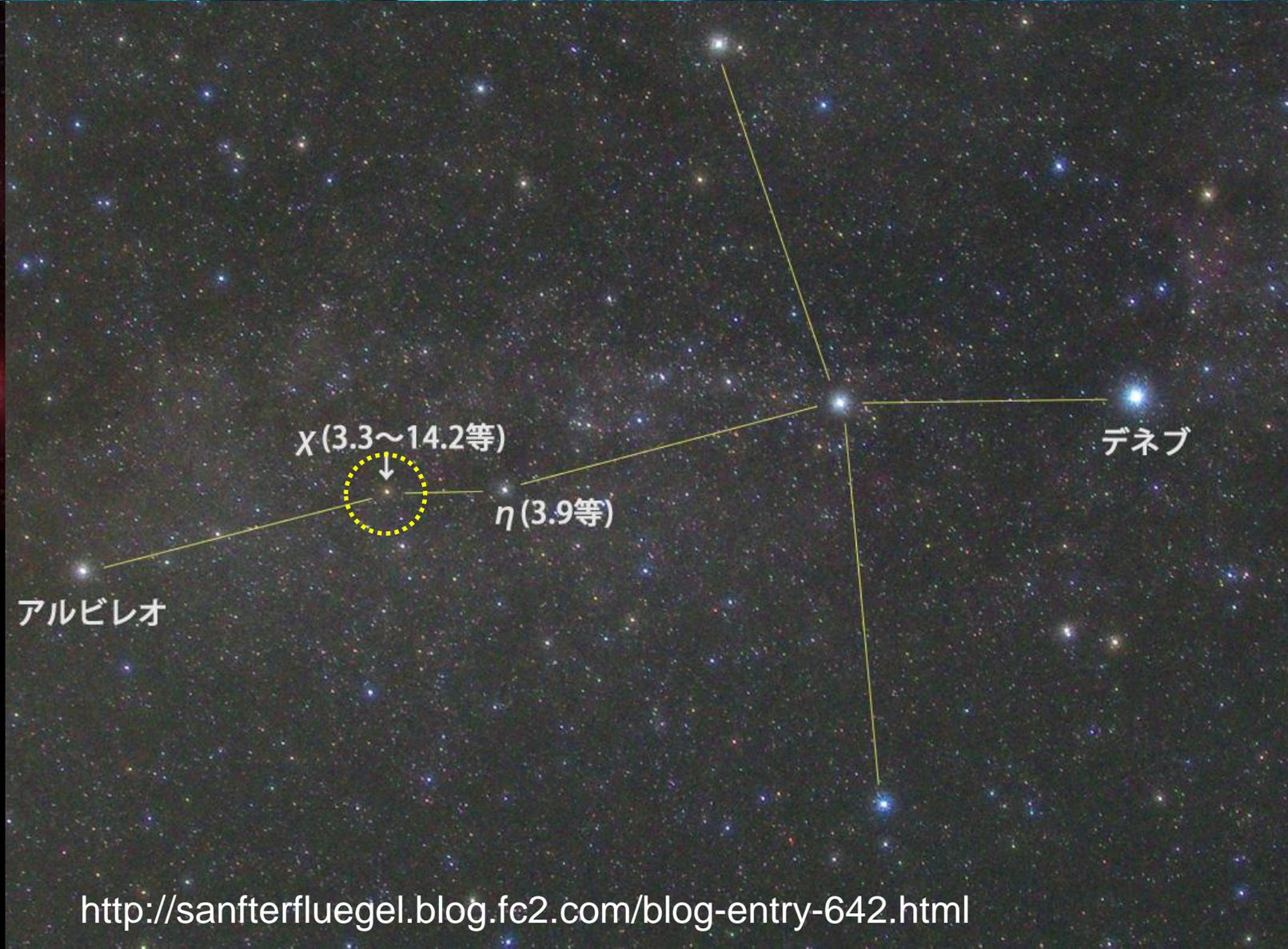
- 銀河の中心には太陽の100万倍以上重いブラックホールがあると考えられている。
- 光などでは直接見ることができない
- 重力波だけで直接見ることができる。

はくちょう座 X-1

想像図



**BHに向かって流れ込む
伴星のガスから出る
X線の強さから、
「間接的」に
ブラックホールを確認**



銀河中心にあるブラックホール



重力波は何かから出る？

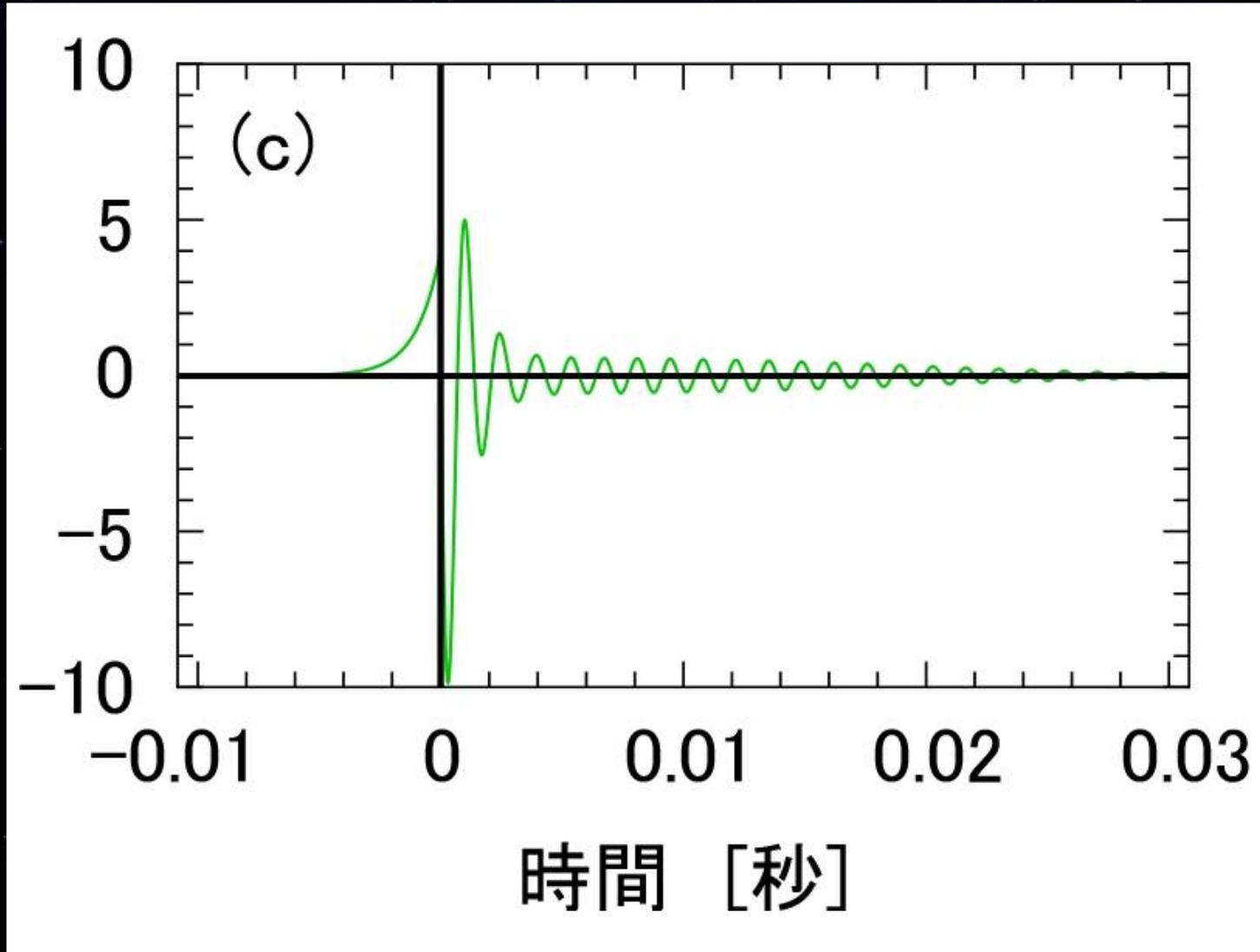
ビッグバン(宇宙の誕生)

<https://www.youtube.com/watch?v=gs-yWMuBNr4>

極微に存在していた時空の量子的揺らぎが
インフレーションで宇宙全体に広がったものが
原始重力波の起源

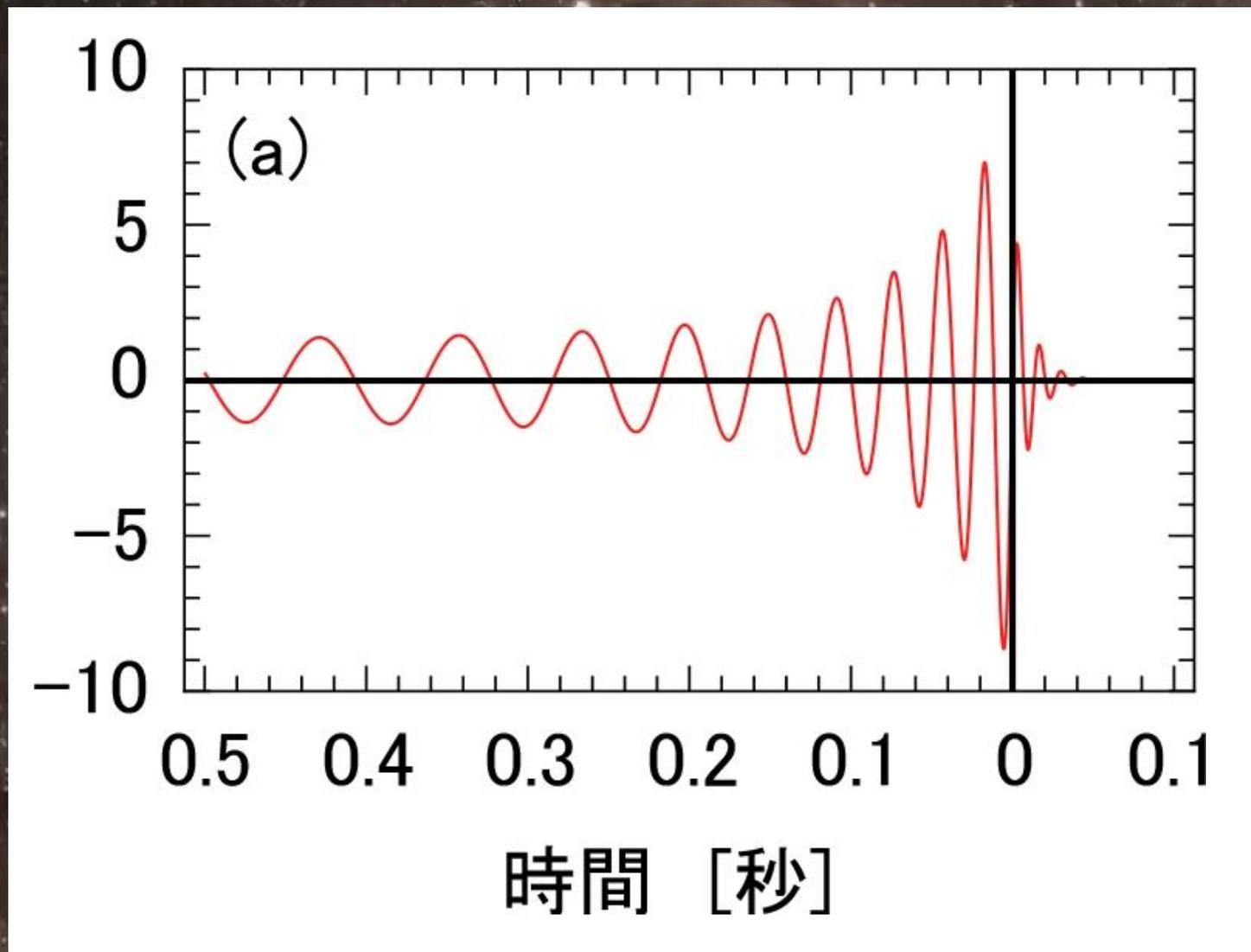
超新星爆発（星の大爆発）

<https://www.youtube.com/watch?v=aysiMbgml5g>



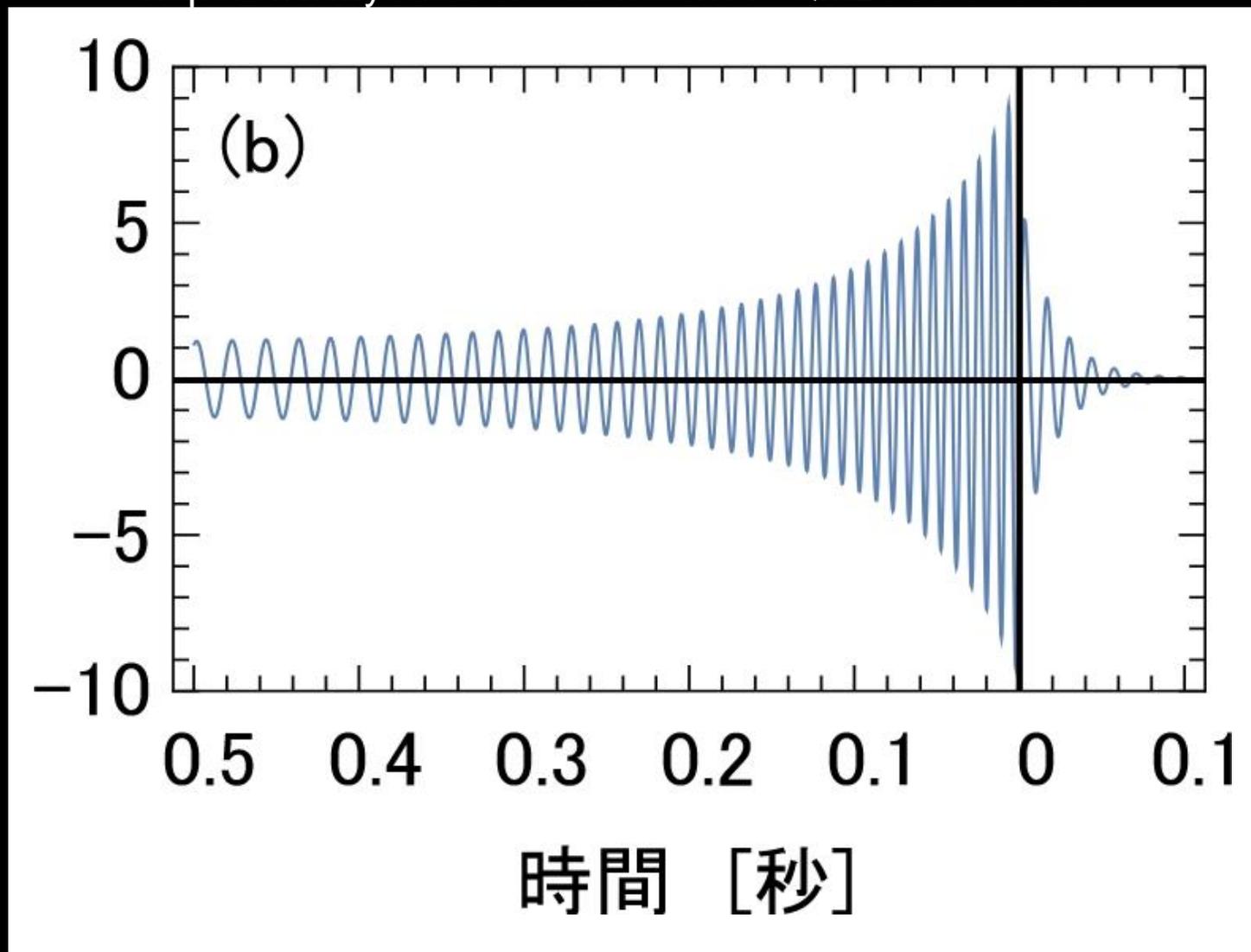
二つのブラックホールの合体

<https://www.youtube.com/watch?v=-vYJdh8wALg>



二つの中性子星の合体

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



重力波源とその発生頻度

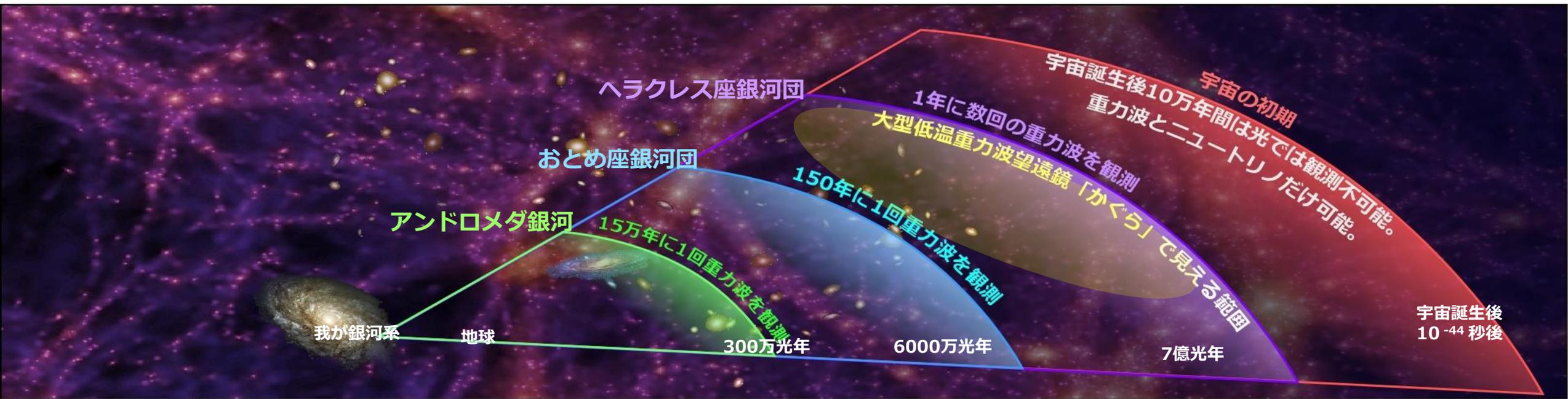
連星中性子星の合体：1銀河当たり10万年に1回

ブラックホール連星：頻度は少ないと思われていた（超新星爆発は100年に一回）



ならば、10万個以上の銀河を観測範囲にできる感度をもつ装置を作る。その感度が・・・

$\sim 3 \times 10^{-24}$ [1/ $\sqrt{\text{Hz}}$] @ 100Hz ($\sim 10^{-22}$ [rms])



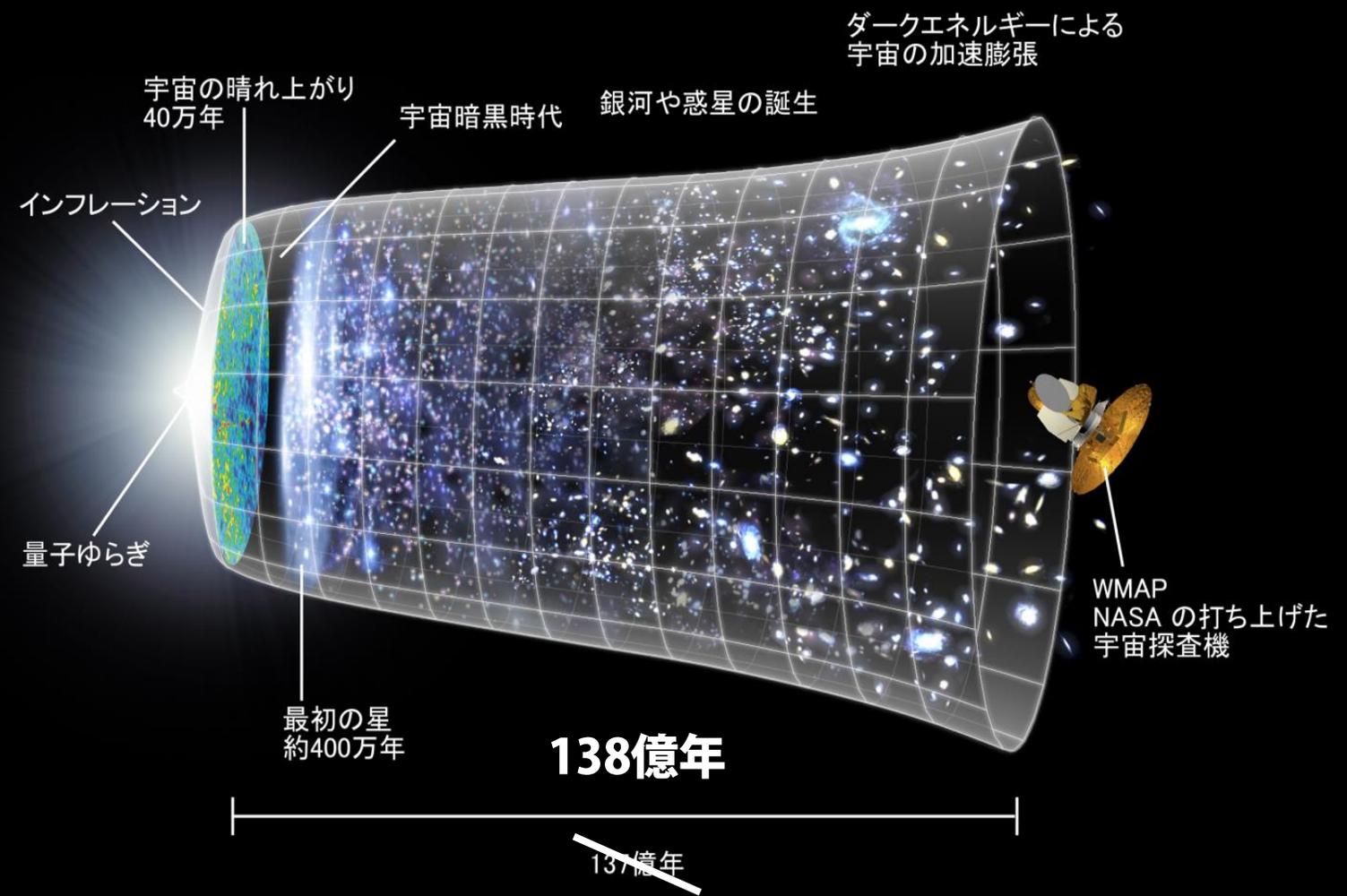
重力波って、

小さすぎ

頻度も少ない

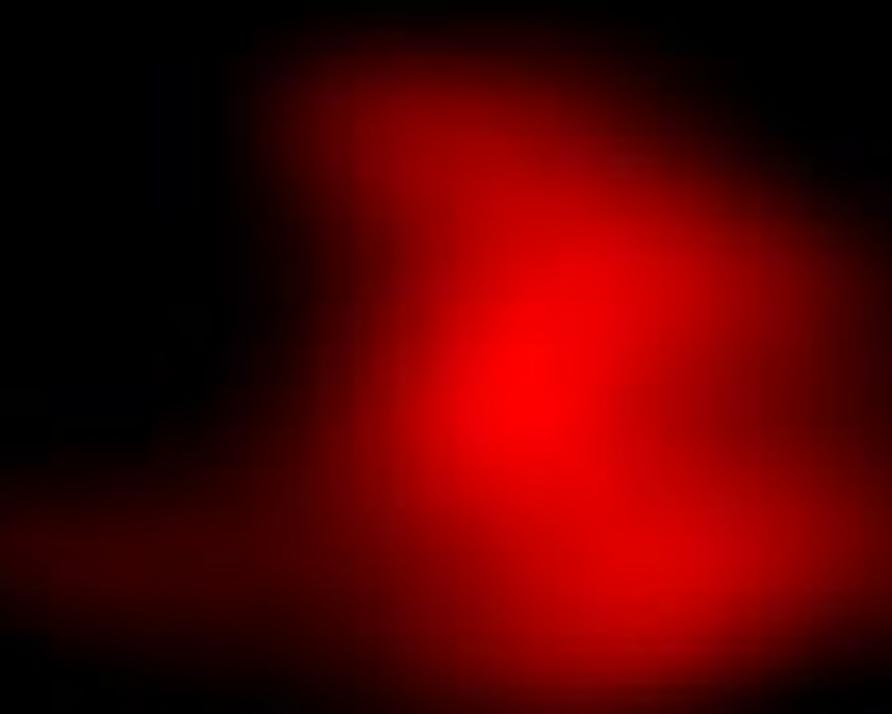
そんなマイナーなもの、
研究する価値あるの？

重力波で宇宙の始まり（遠い過去）を見る

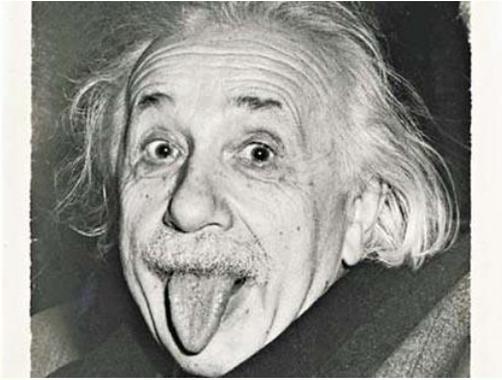


過去を見る = 宇宙の遠方を見る

130億年前の姿

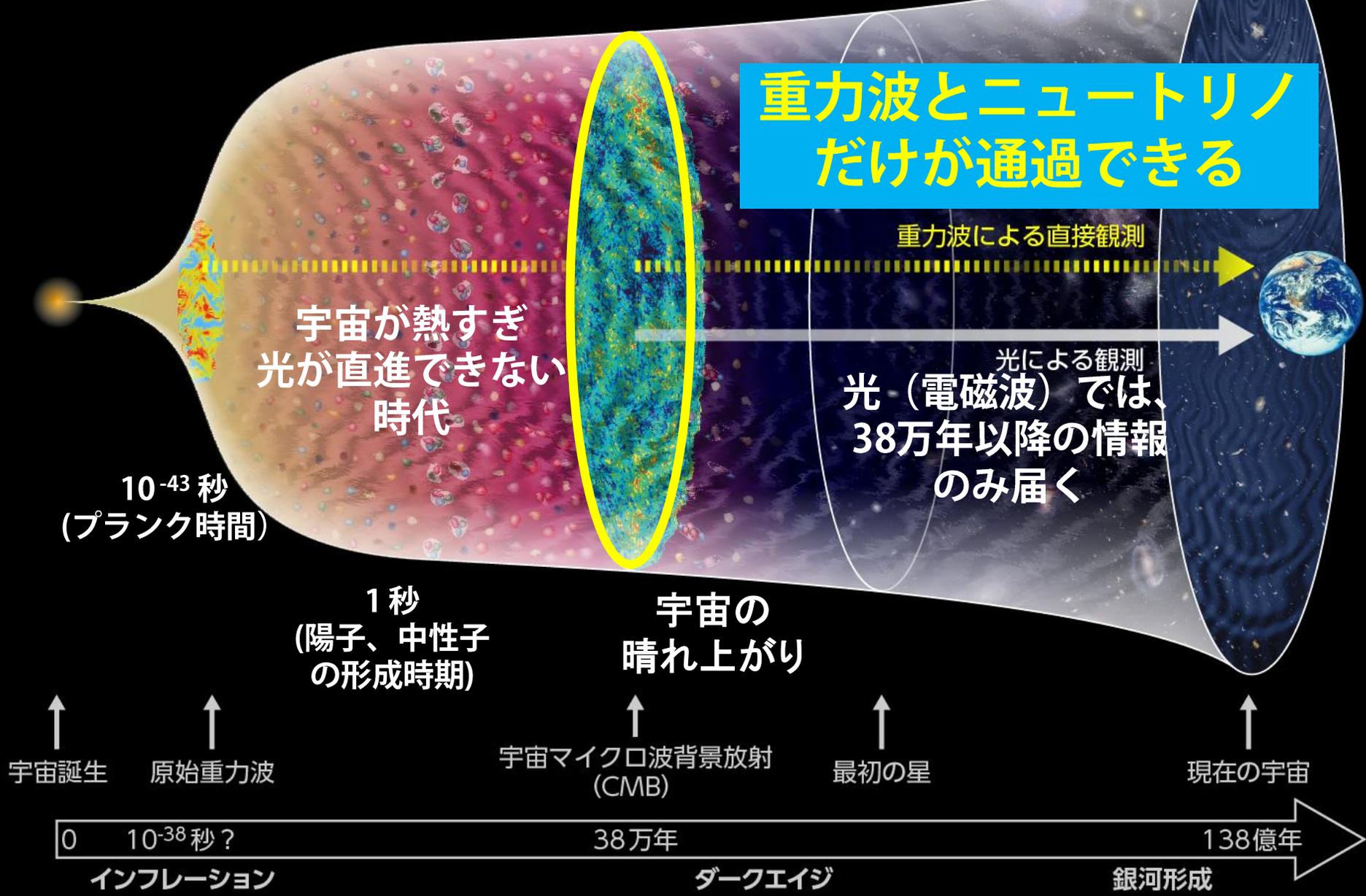


ビッグバンがあったなら
こんな風に見えないの??



残念 見えません。

宇宙誕生後38万年間は宇宙が熱い



重力波で見る宇宙

?

可視光で見る宇宙

<https://asd.gsfc.nasa.gov/blueshift/index.php/2015/07/22/how-many-stars-in-the-milky-way/>

M81



銀河

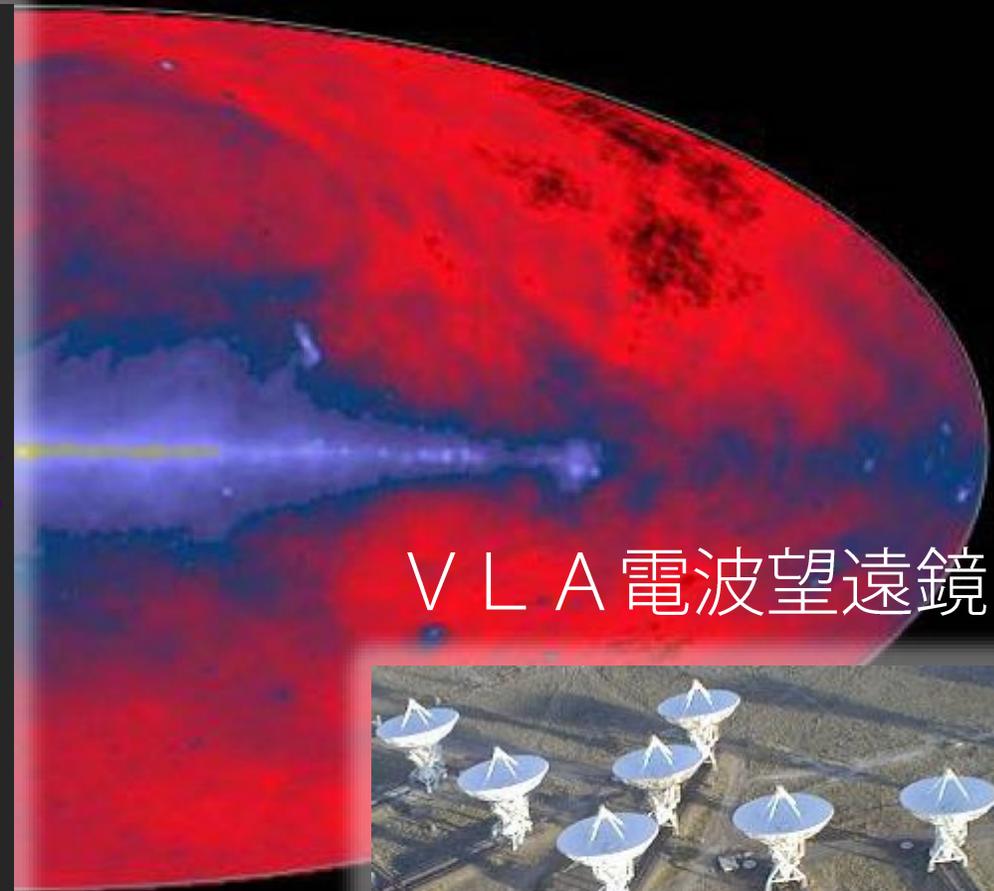
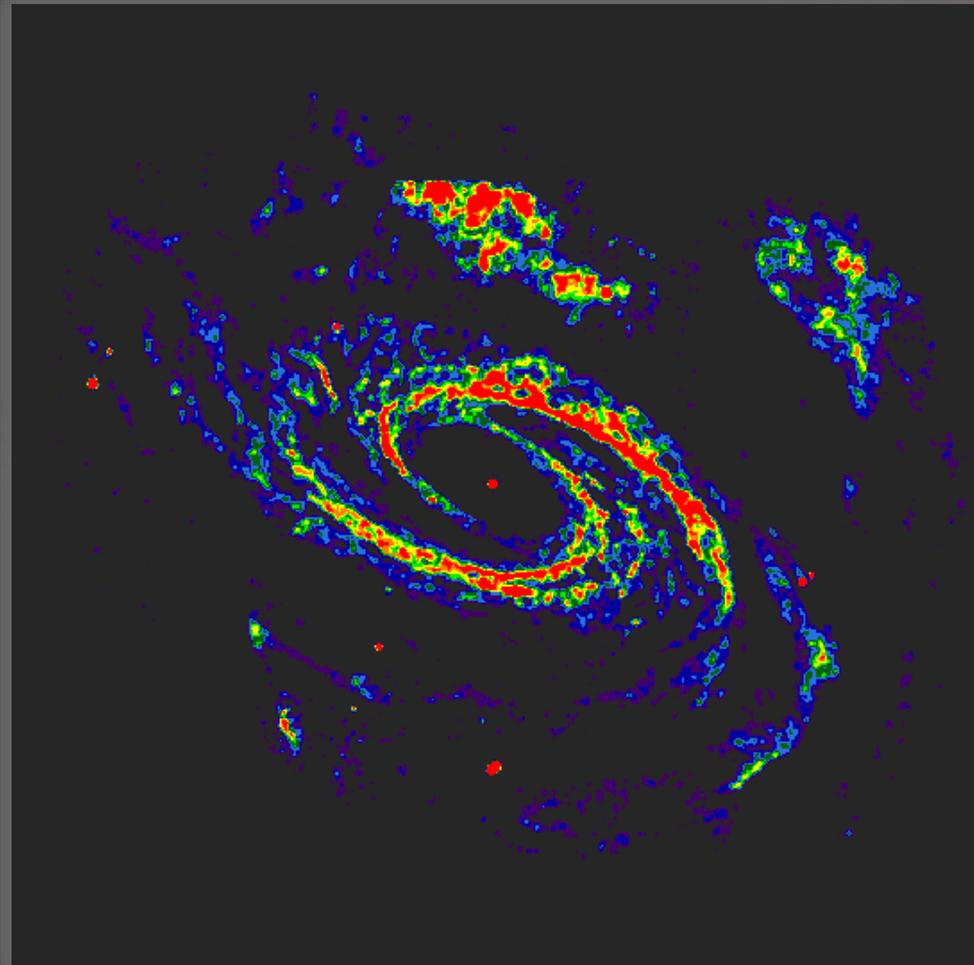
すばる望遠鏡



電波で見る宇宙

Max Planck Institute for Radio Astronomy, G. Haslam

銀河



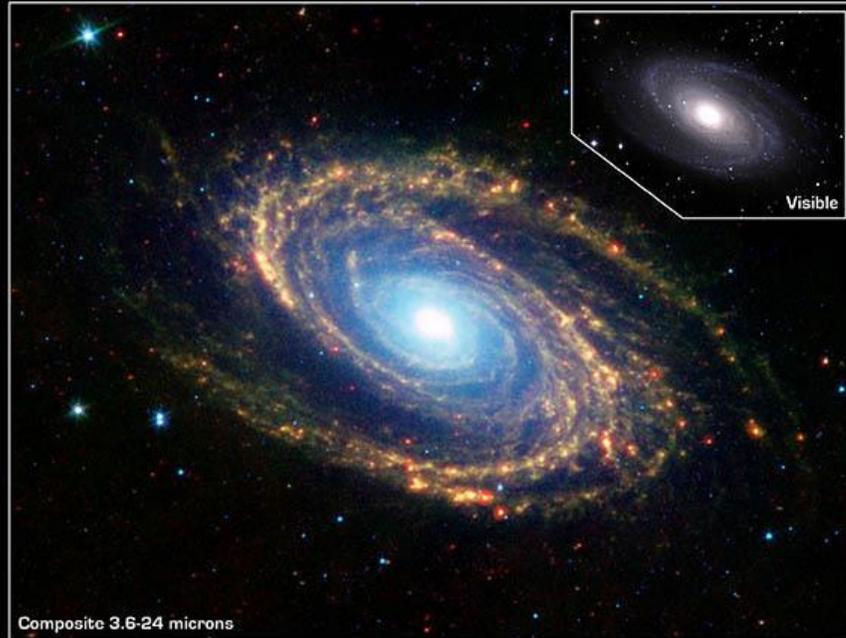
V L A 電波望遠鏡



赤外線で見える宇宙

NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

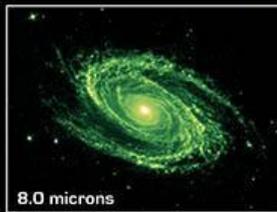
銀河



Composite 3.6-24 microns



24 microns



8.0 microns



3.6 microns

Spiral Galaxy M81

Spitzer Space Telescope • MIPS • IRAC

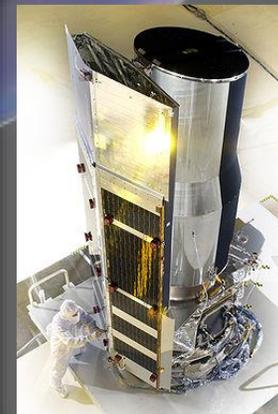
Inset: visible light (NOAO)

NASA / JPL-Caltech / K. Gordon (University of Arizona), S. Willner (Harvard-Smithsonian CfA)

ssc2003-06d



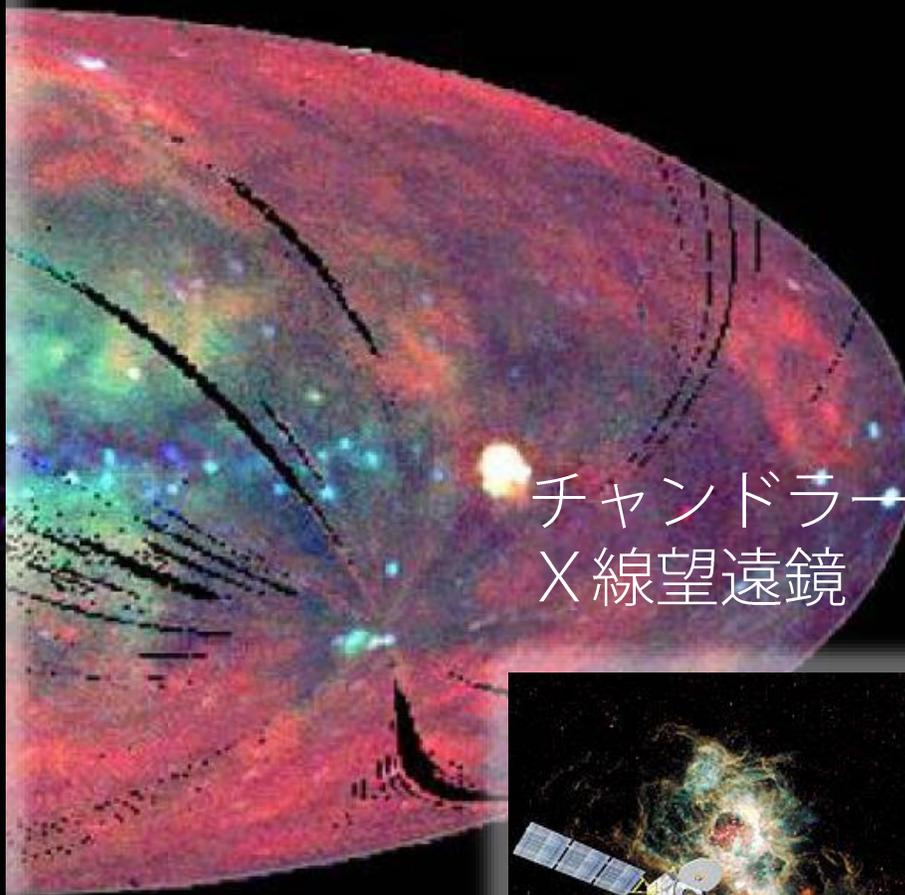
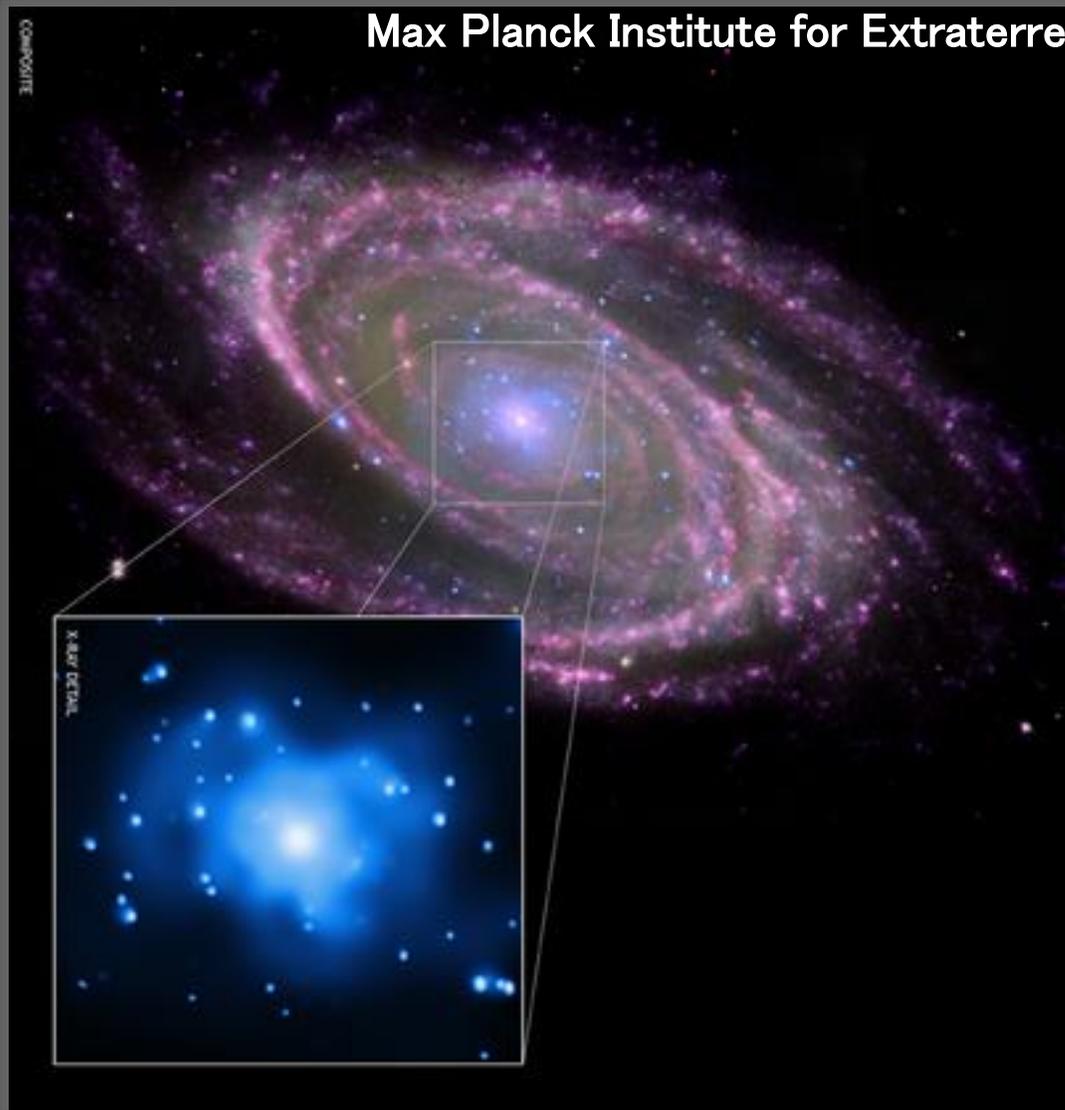
スピッツァー
赤外線望遠鏡



X線で見える宇宙

Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, S. L. Snowden

銀河



重力波で見る宇宙

?

光では

見えなかった

世界が見えるはず!

しかし・・・

かぐや姫



1兆分の1の100億分の1
の変化を測ってね
(かぐや姫より)



LIGO



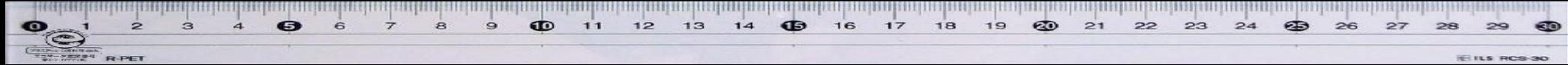
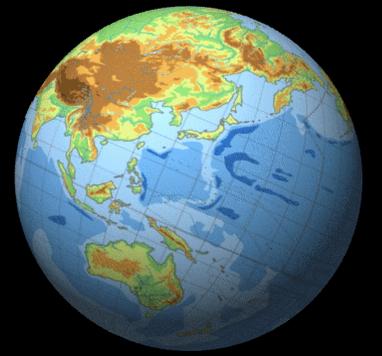
VIRGO



KAGRA



- アインシュタイン自身も「困難」と認識
- 相対性理論の予測する物理現象で100年たっても唯一検証されていないのが重力波
- 物理学で手を出したら、一生を棒にふるかも・・・



重力波望遠鏡
を作ろう!!

レーザー干渉計で検出する



レーザーの波長が長さの物差し

レーザー：波長が非常に安定している電磁波

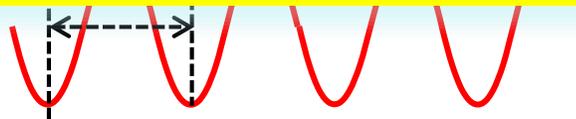
青いレーザー



1064.000000000000000000000001~2 ナノm
しか揺らがない物差しを用意する

(μm)
0 mm
 μm

~630 ナノm



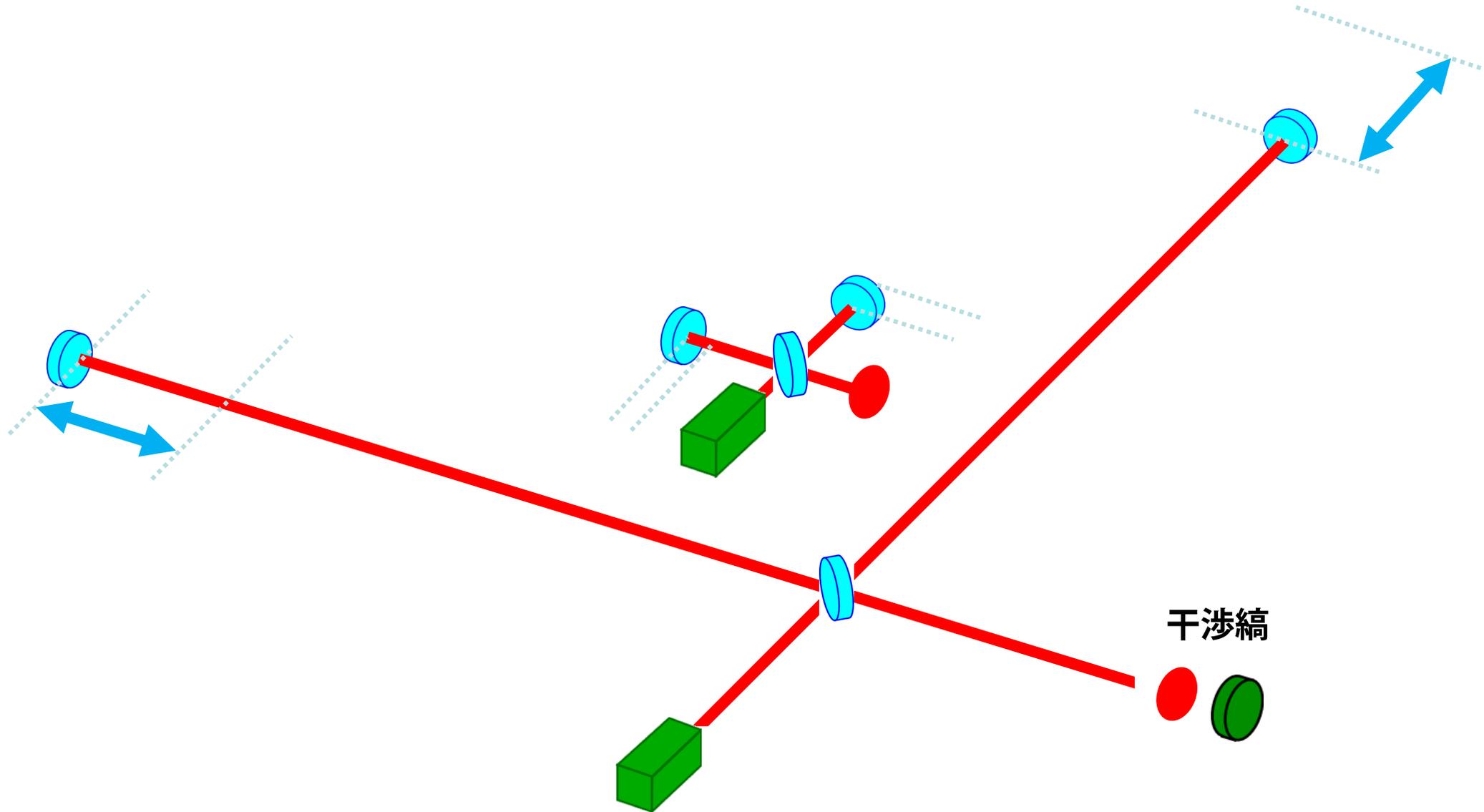
重力波望遠鏡
~1064 nm



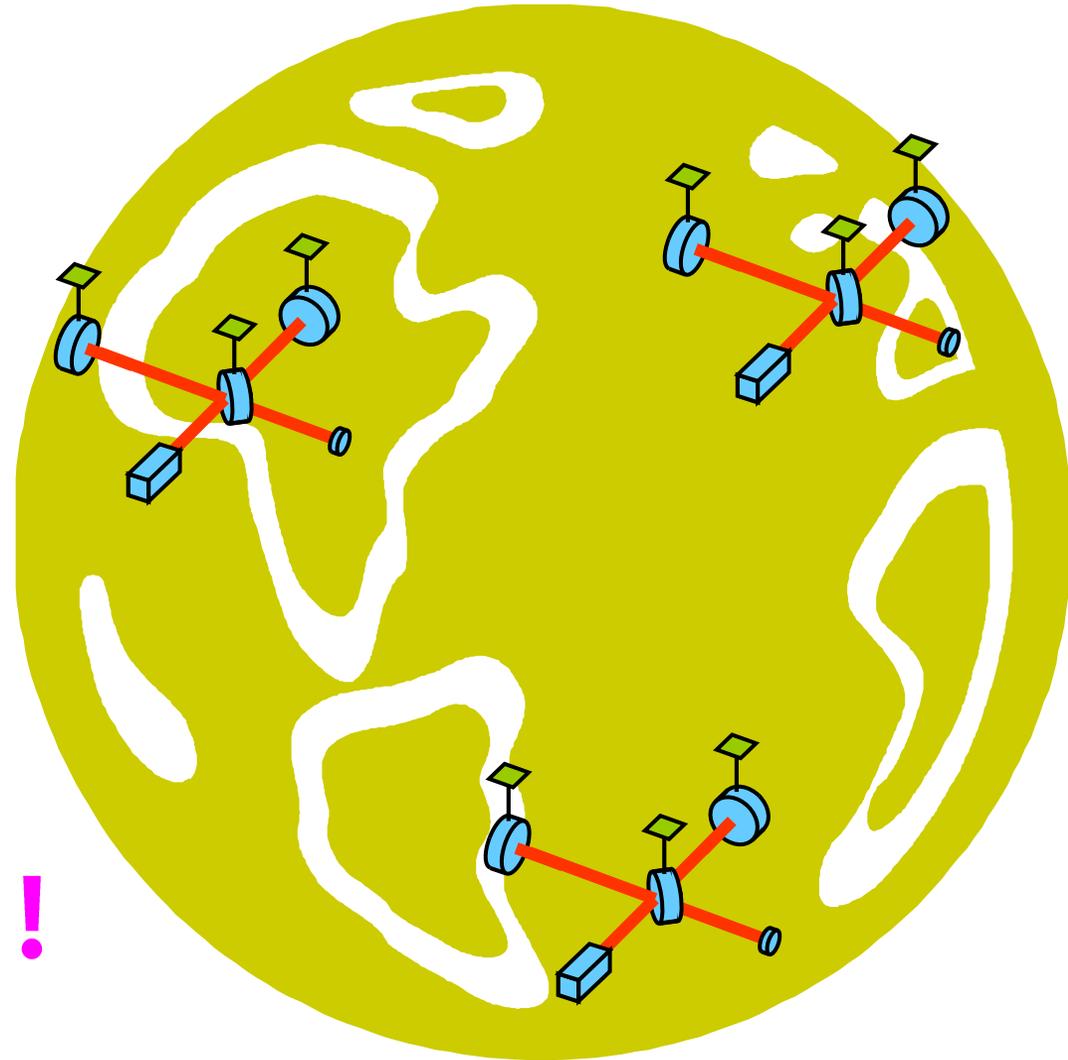
物差しの精度（人間の英知）
にも限界

重力波の影響を
より大きく
増幅できないか？

腕の長さが長いほど重力波の影響が大きい



重力波源の方向は？



時間差から
方向が分かる！

世界で重力波望遠鏡が建設

次世代重力波観測ネットワーク

Advanced-LIGO
(アメリカ)

GE0600-HF
(ドイツ・イギリス)
Advanced-VIRGO
(フランス・イタリア)

LIGO-India
(India)

(KAGRA)
(日本)

世界中で、重力波を受けようとしていた!



ワシントン州・砂漠

4km

4km

ルイジアナ州・森林・湿原

600m

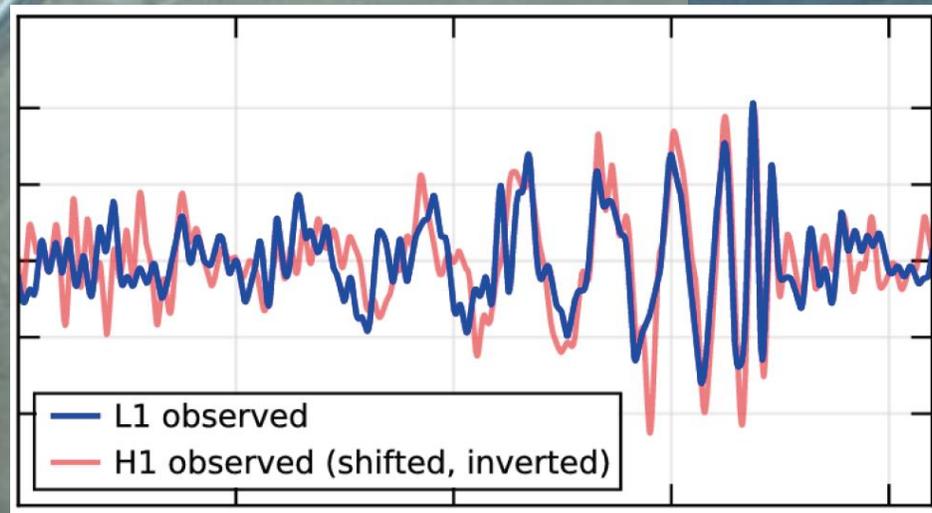
ハノーバー

3km

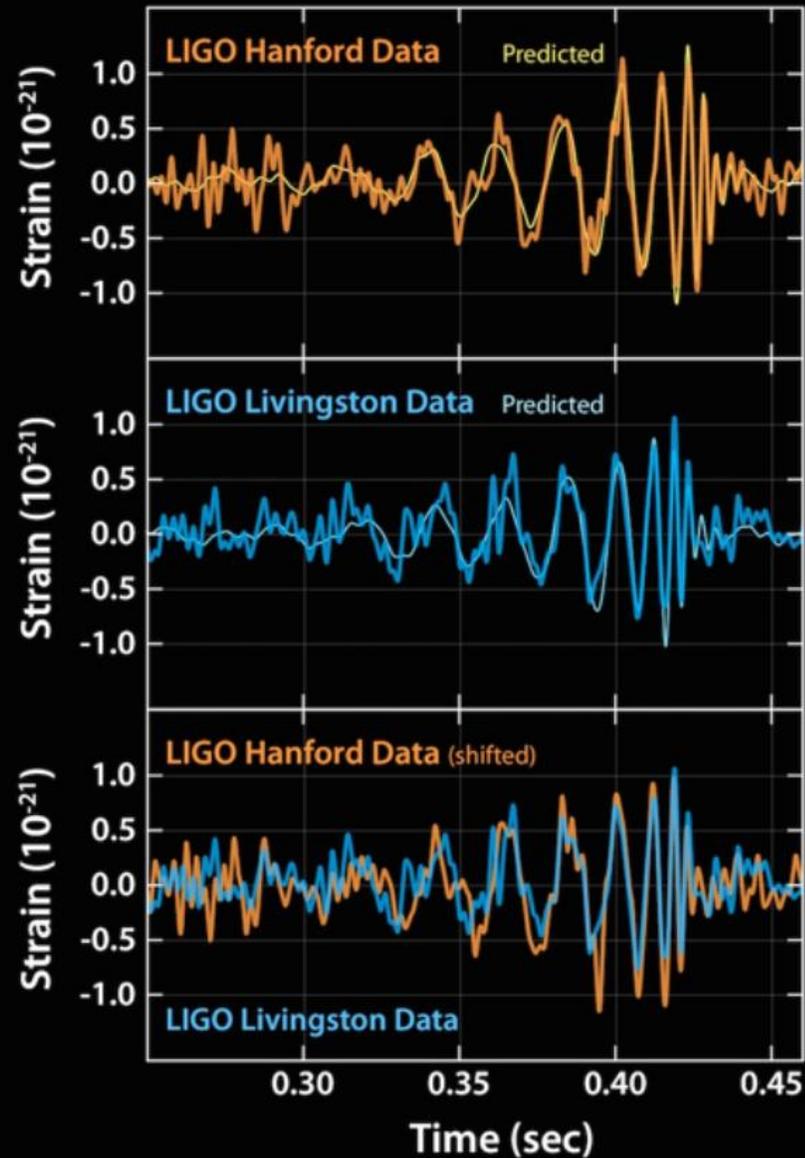
ピサ

2016年2月11日、ついに、この日が来ました!

we (LIGO) have
detected
gravitational waves.
we did it !!!



どんな重力波の信号だったか？



太陽の36倍の重さの
ブラックホール

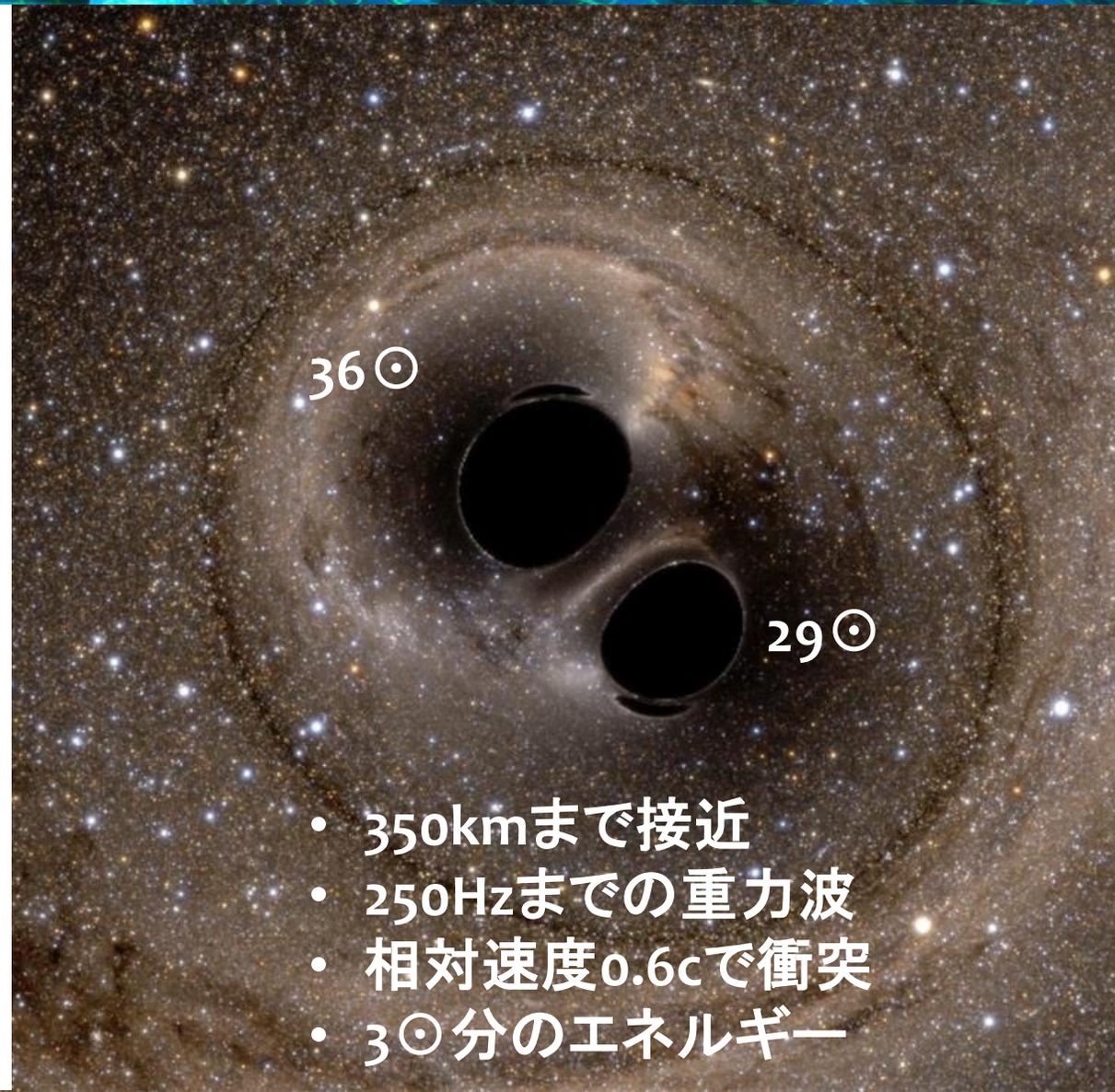
太陽の29倍の重さの
ブラックホール

重力波初検出!!!

- 人類史上初となる重力波の検出に成功
- ブラックホールの質量が直接出した重力波を受けたことで、ブラックホールの存在を直接確認
 - ・ 今までは周辺ガスの発するX線のエネルギーの説明や周辺天体の運動観測を説明する電磁波では見えない星という形でその存在が間接的に証明

上記だけでもノーベル賞に値する。

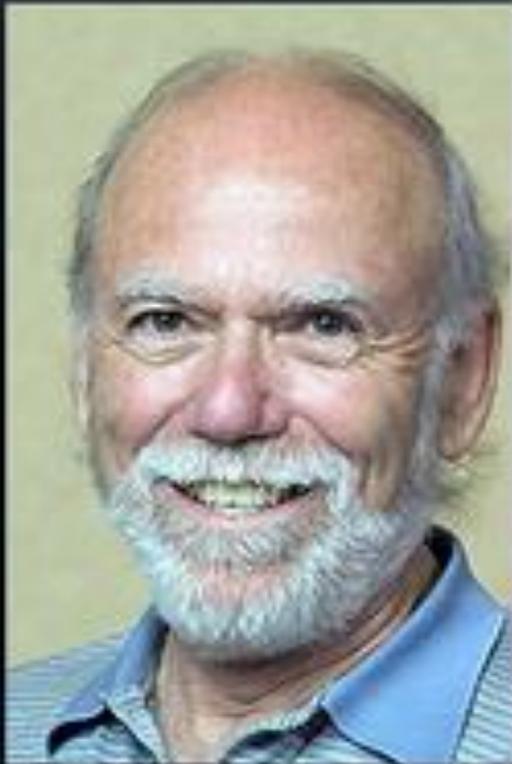
- 30という中質量ブラックホールが見つかった
- 連星ブラックホールの存在証明
- 連星ブラックホールが、宇宙年齢以内で合体することを発見
- 波形が一般相対性理論の予想波形とほぼ一致、つまり、強い重力場でも今のところ破綻なく、一般相対性理論の正さを証明



- ・ 350kmまで接近
- ・ 250Hzまでの重力波
- ・ 相対速度0.6cで衝突
- ・ 30分のエネルギー

重力波の初検出と多大なる重力物理学への貢献

Nobel Prize in Physics 2017



Barry C. Barish (Caltech)



Kip S. Thorne (Caltech)



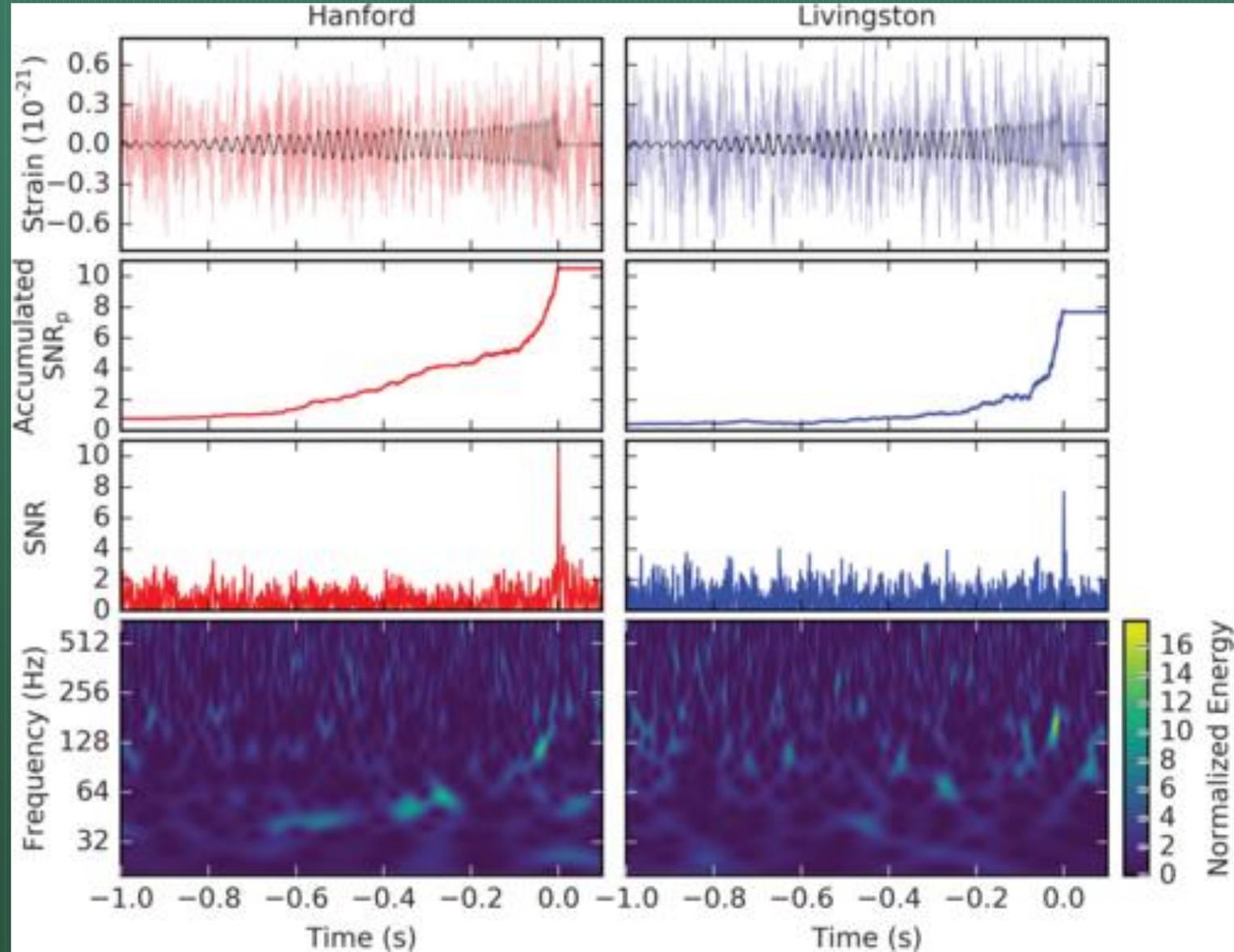
Rainer Weiss (MIT)



2017 Nobel Prize in Physics

連星ブラックホール合体からの重力波が続々検出

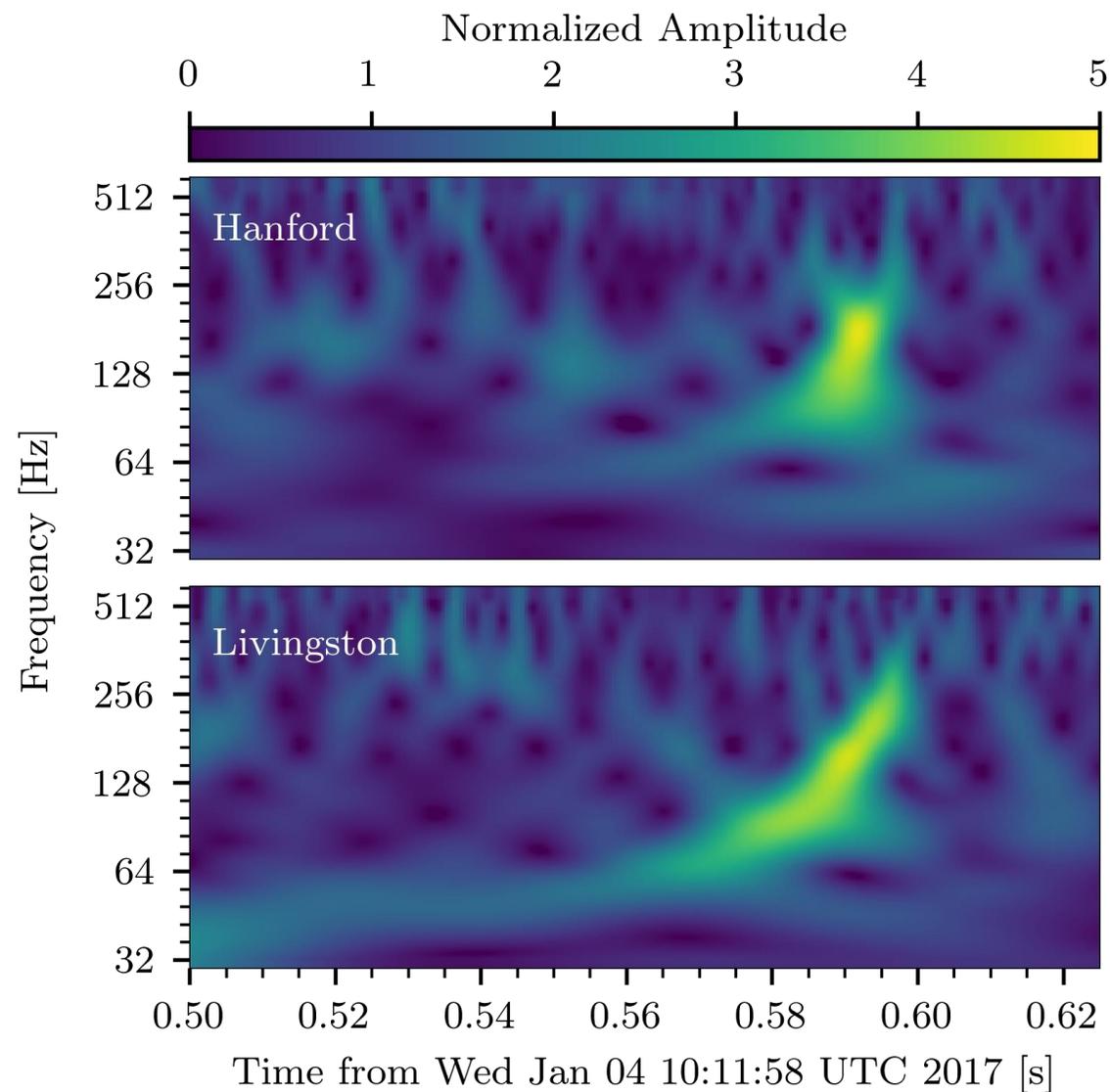
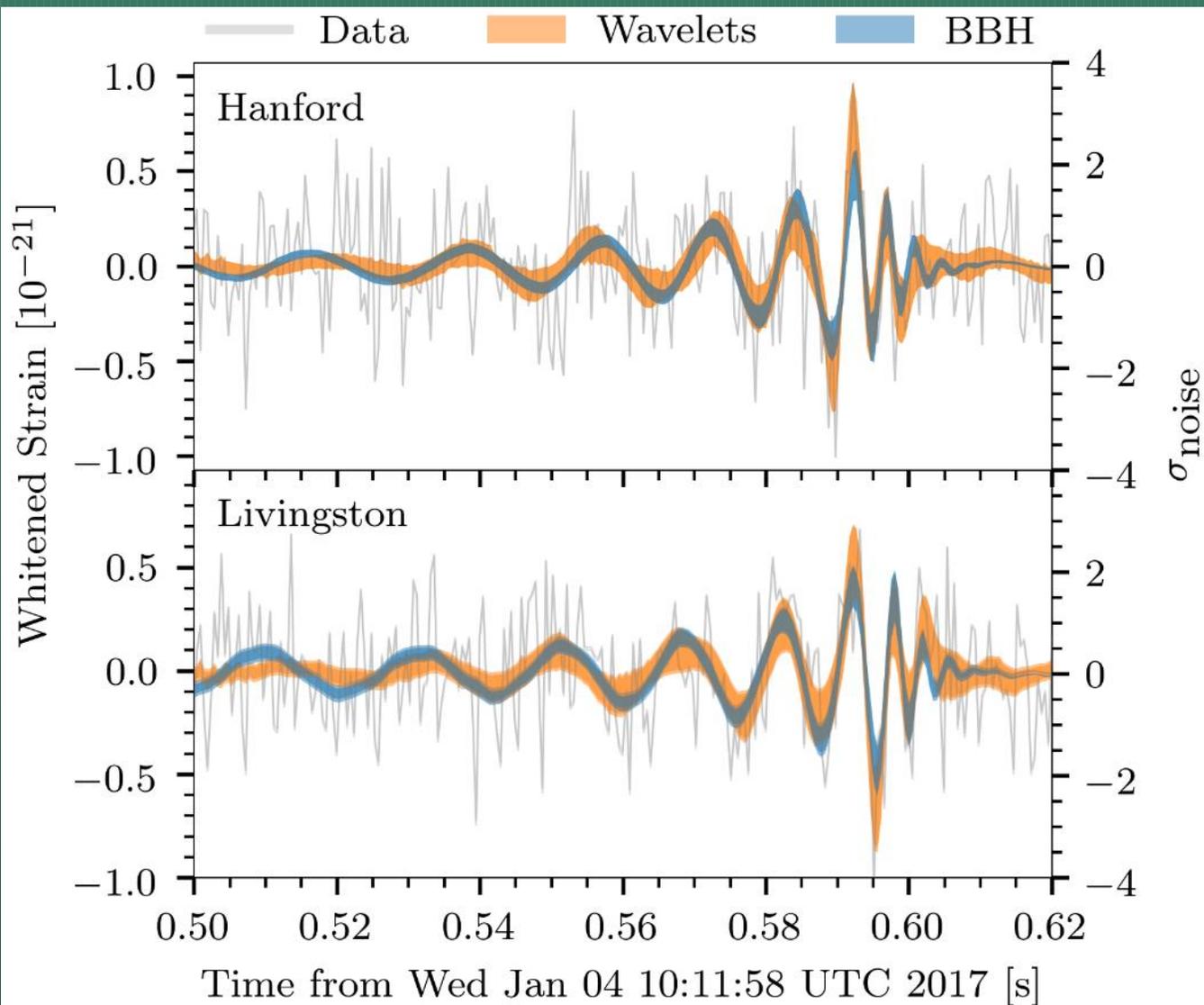
GW151226 ($14.2M_{\odot}-7.5M_{\odot}$) : SN \sim 13, D \sim 440Mpc



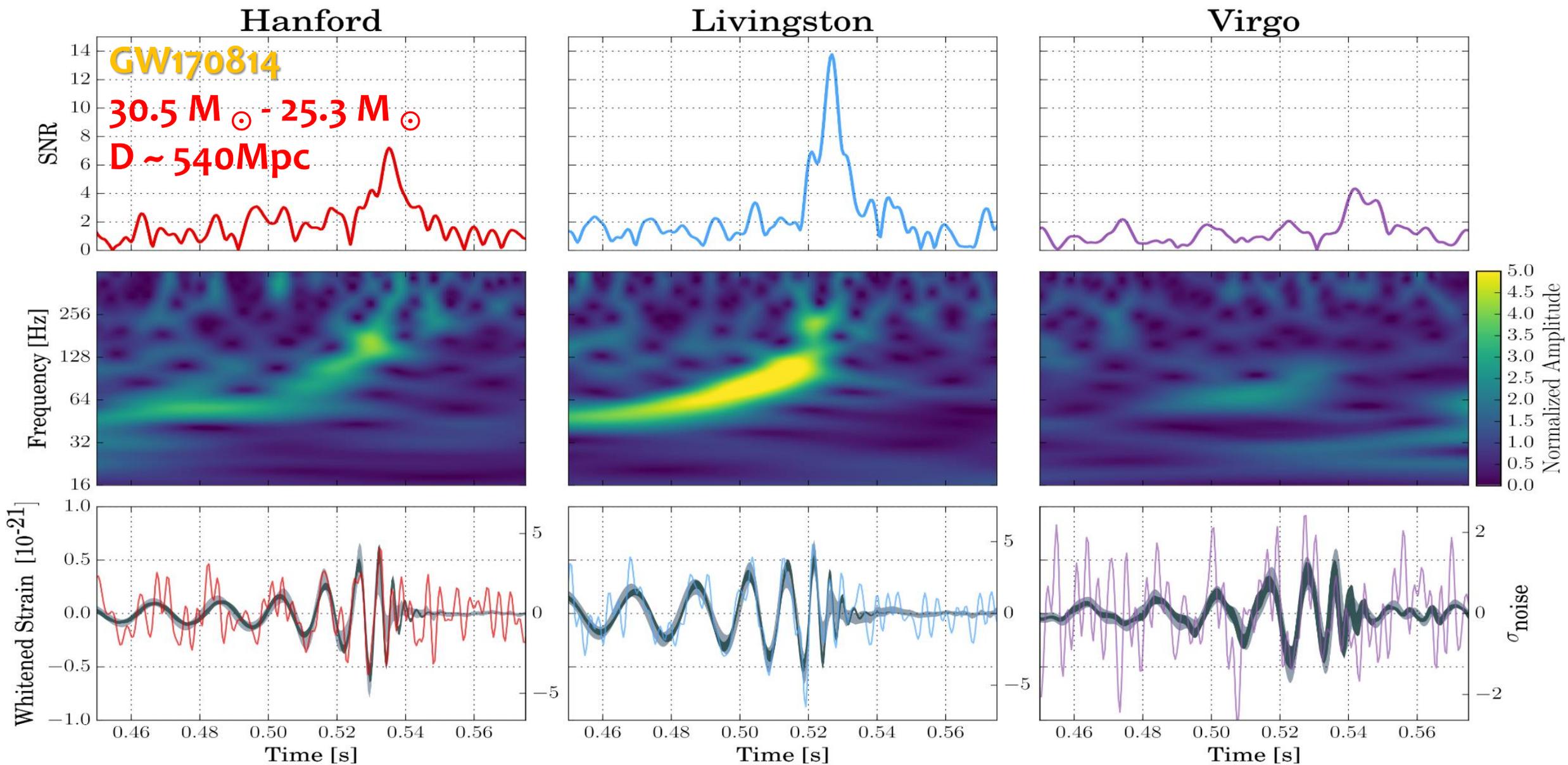
連星ブラックホール合体からの重力波が続き検出

GW170104 ($31.2M_{\odot} - 19.4M_{\odot}$) : SN~14, D ~ 880Mpc

GW170608 ($12M_{\odot} - 7M_{\odot}$)

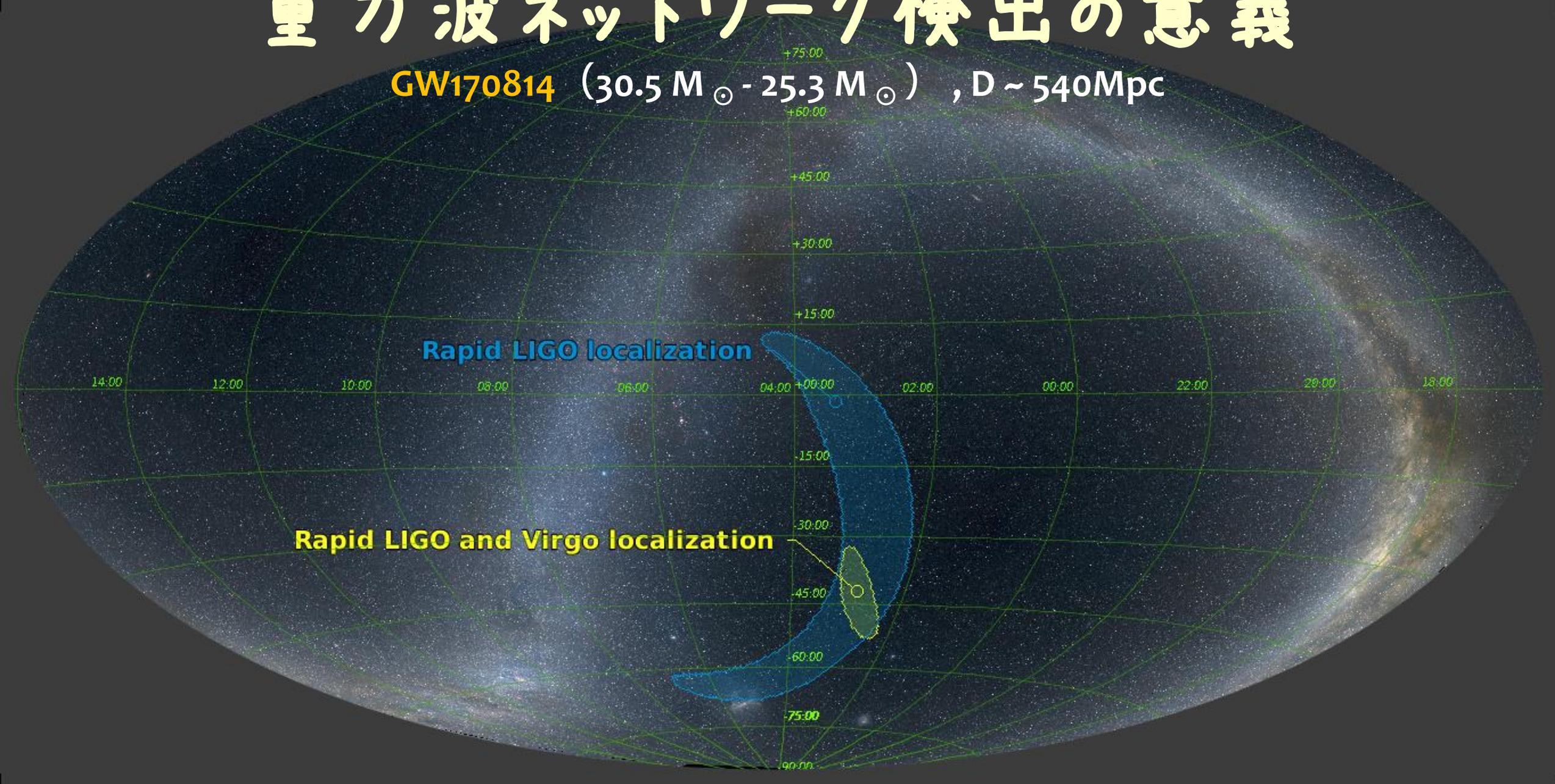


連星ブラックホール合体からの重力波が続き検出



重力波ネットワーク検出の意義

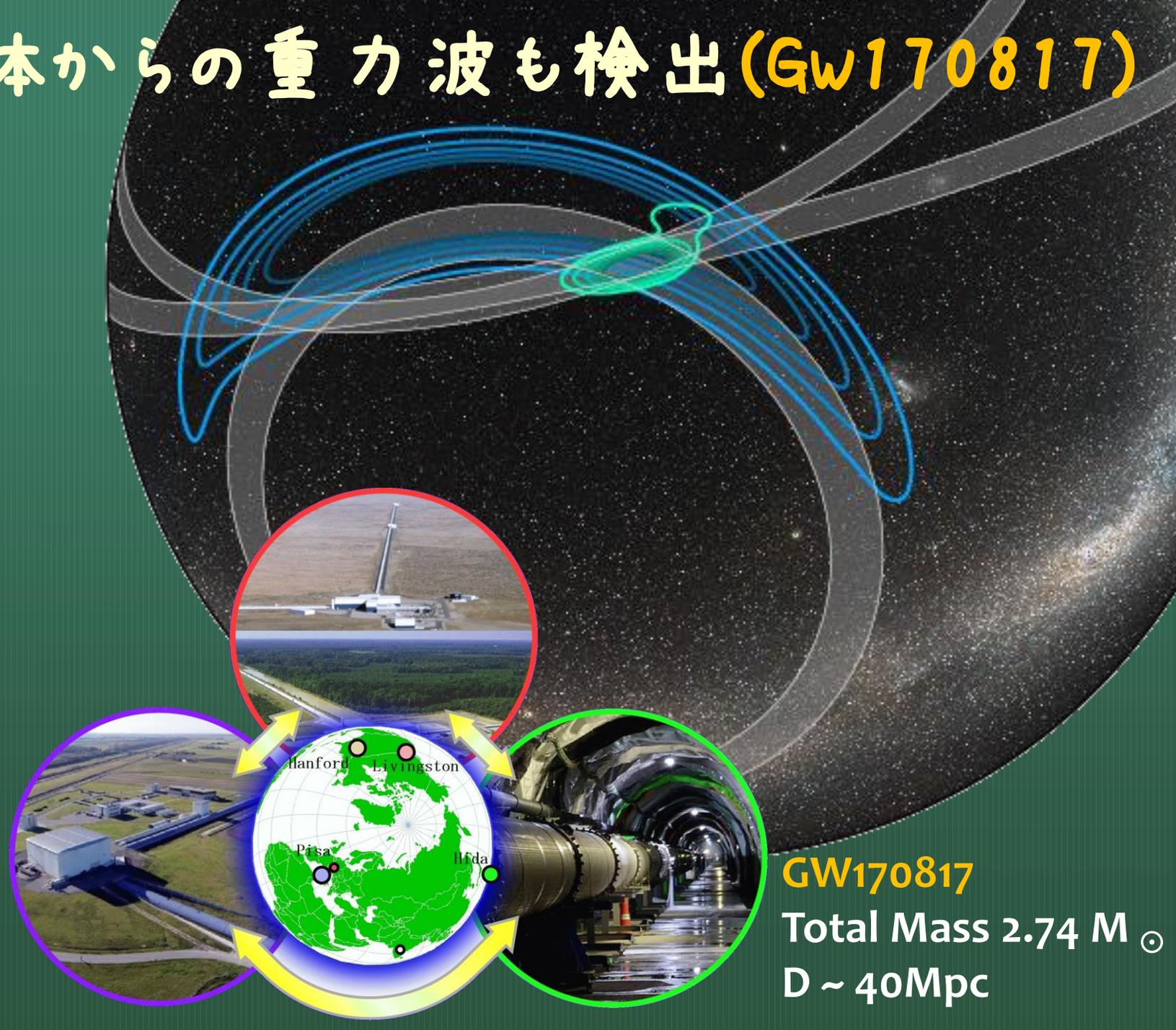
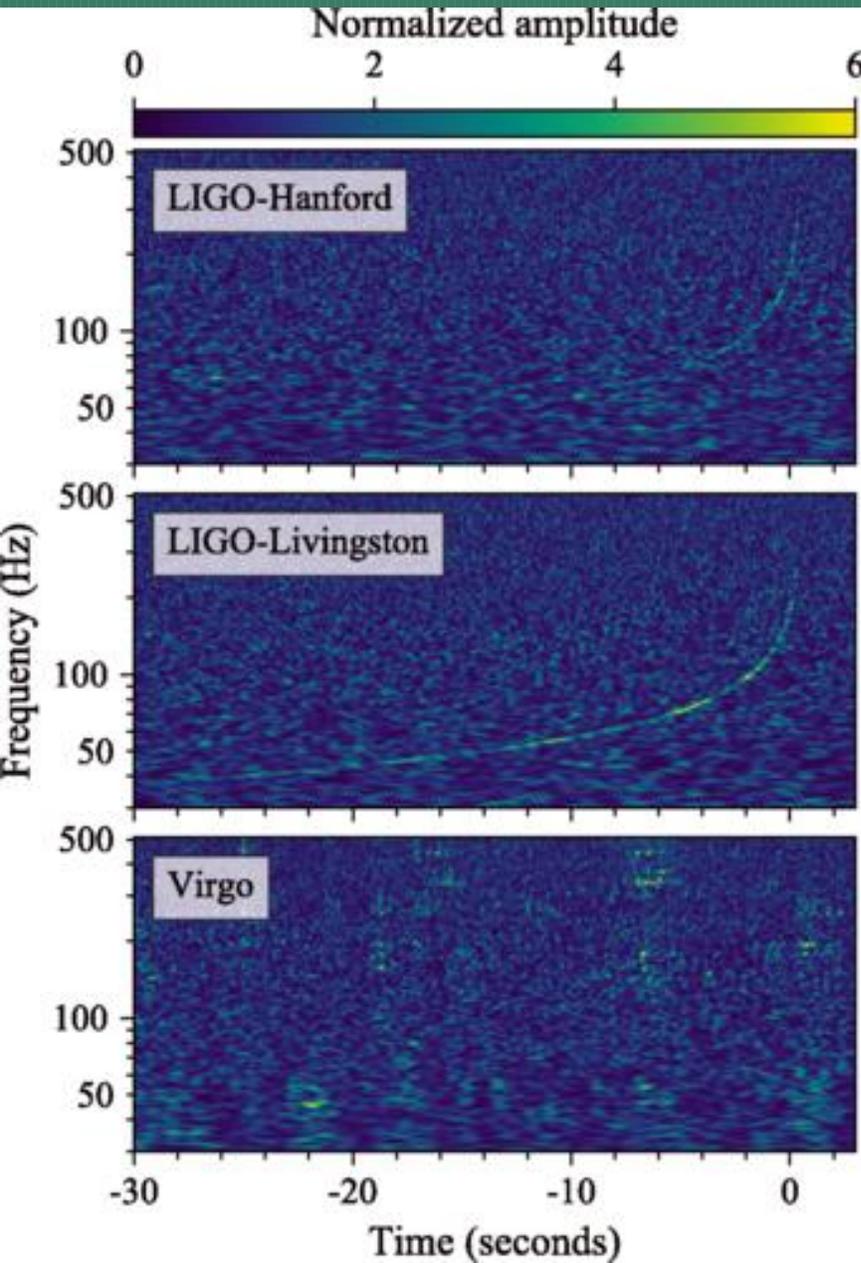
GW170814 ($30.5 M_{\odot} - 25.3 M_{\odot}$), $D \sim 540 \text{Mpc}$



Rapid LIGO localization

Rapid LIGO and Virgo localization

連星中性子星合体からの重力波も検出(GW170817)



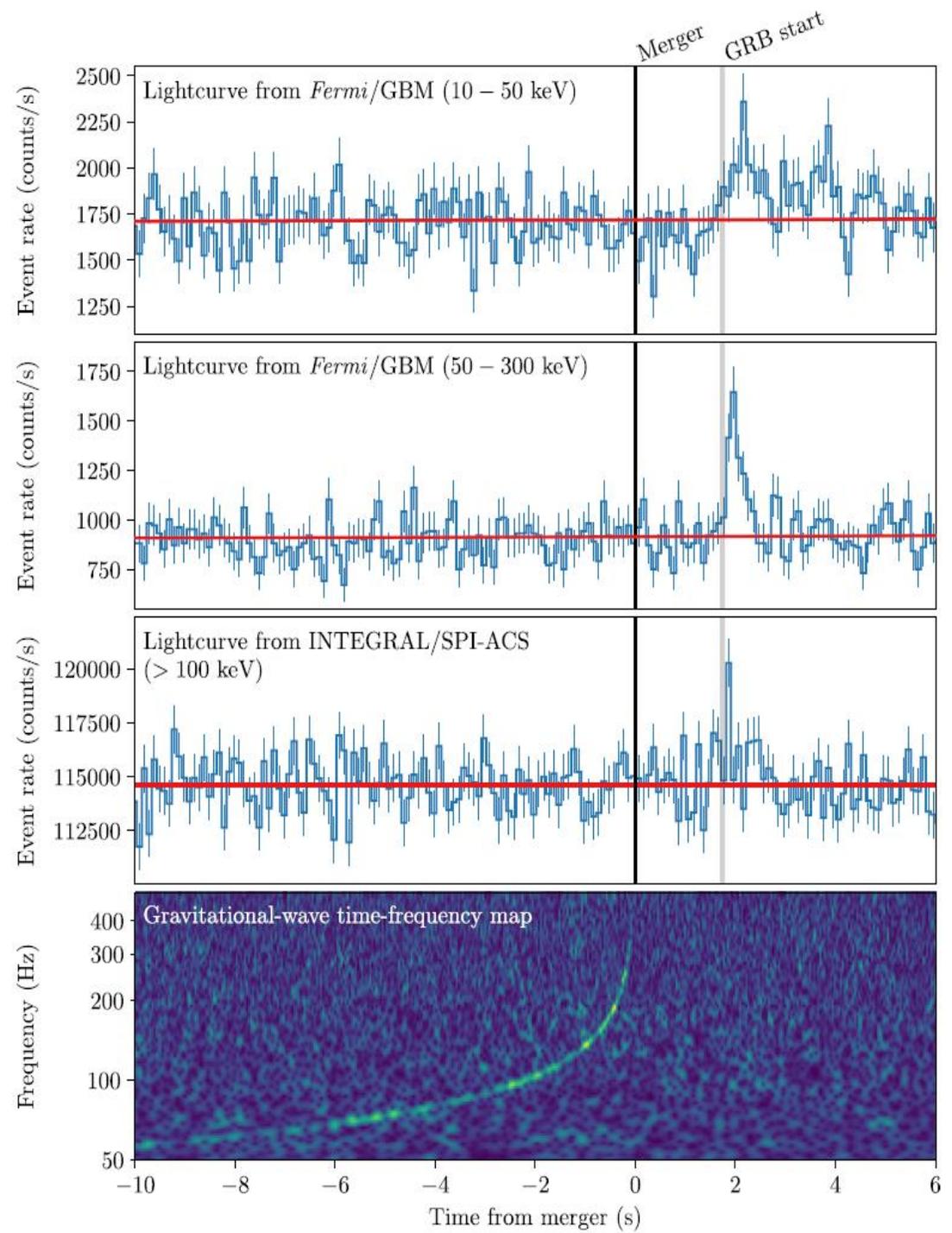
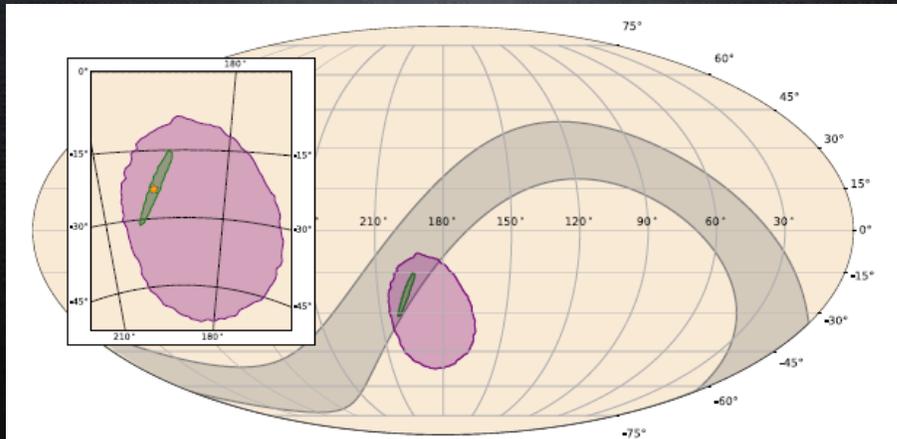
GW170817
Total Mass $2.74 M_{\odot}$
D $\sim 40\text{Mpc}$

連星中性子星合体の 発生場所と 続く電磁波観測にも成功

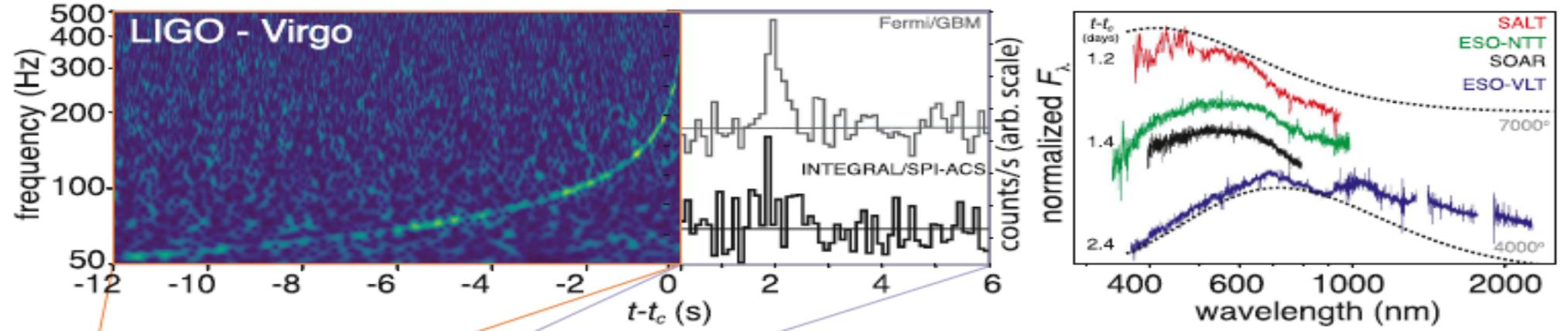


NGC4993

GW170817 and GRB170817A in NGC4993



電磁波 追尾観測



重力波

ガンマ線

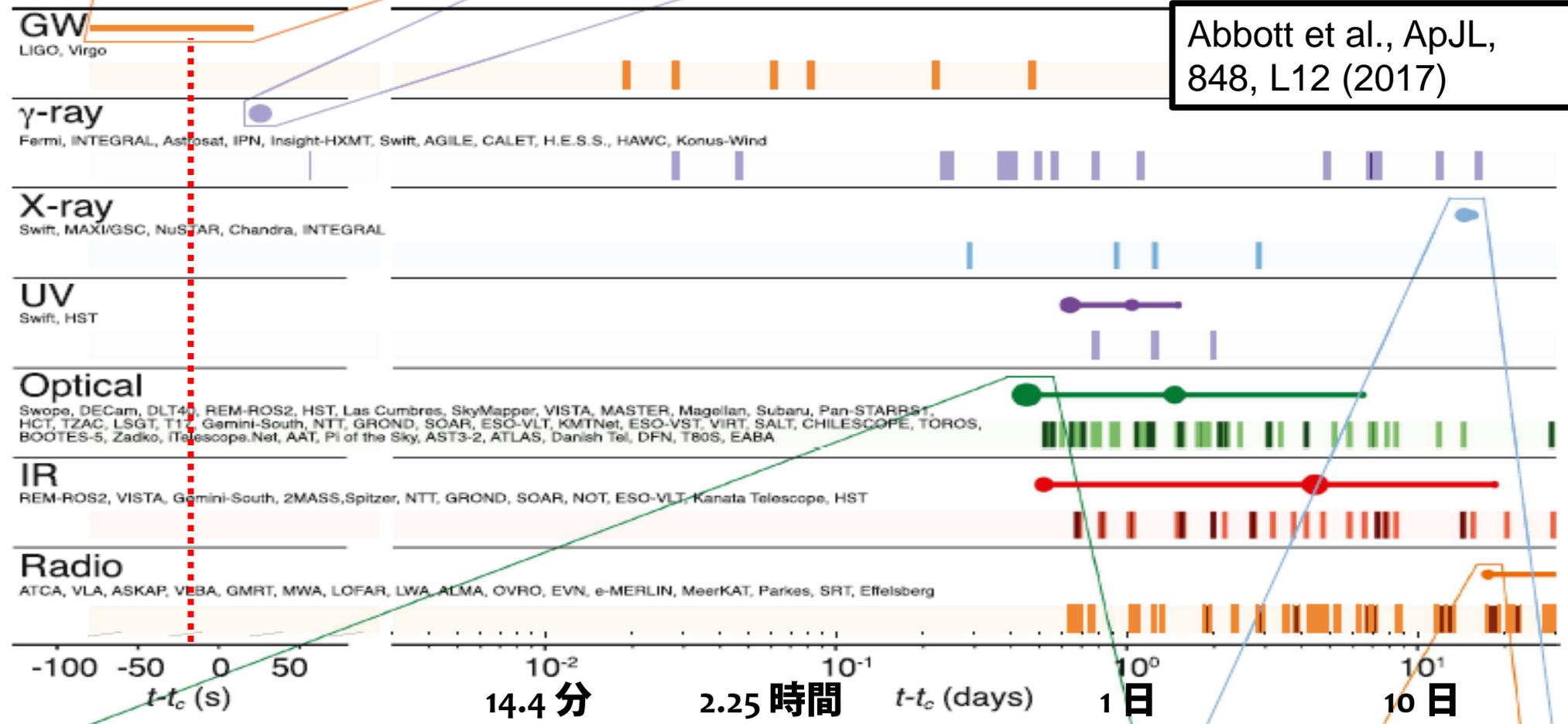
X線

紫外線

可視光線

赤外線

電波



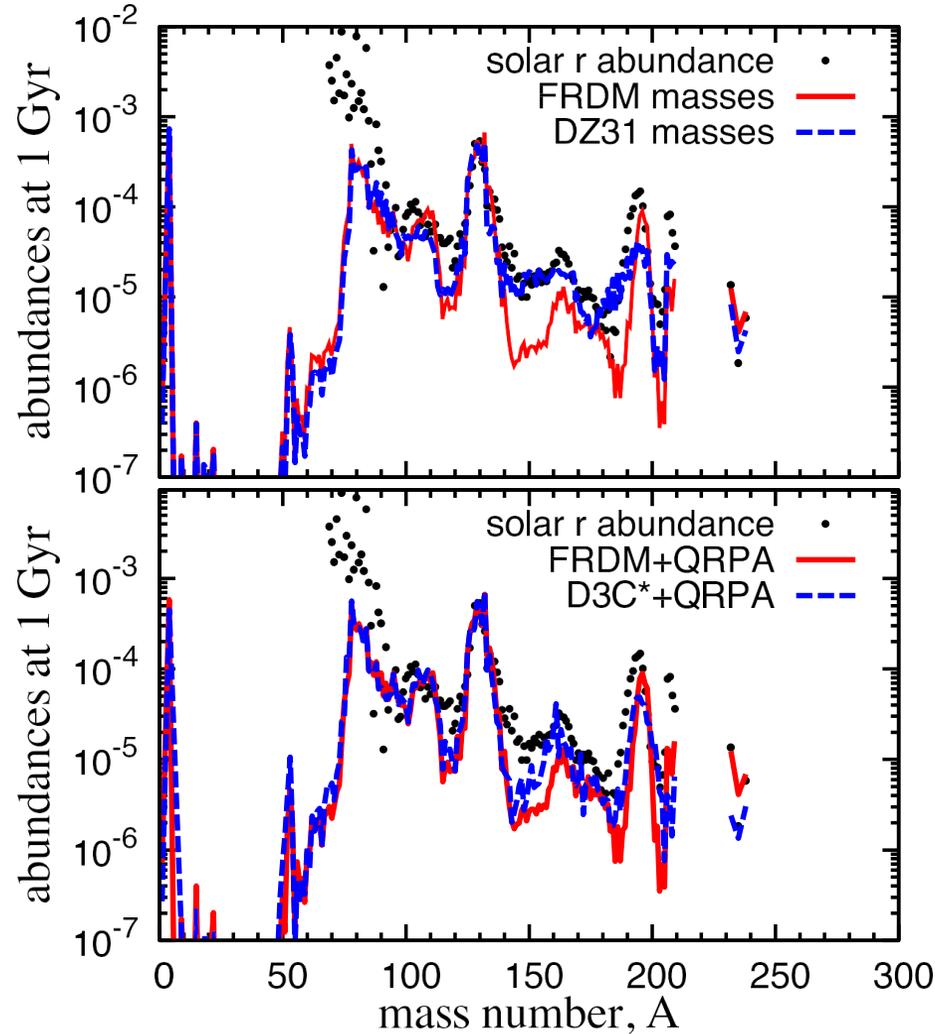
Abbott et al., ApJL,
848, L12 (2017)

-100 -50 0 50 $t-t_c$ (s) 10^{-2} 14.4 分 10^{-1} 2.25 時間 $t-t_c$ (days) 10^0 1 日 10^1 10 日

中性子連星合体で、宇宙において、金のような重元素が生成される理由と観測事実を説明可能

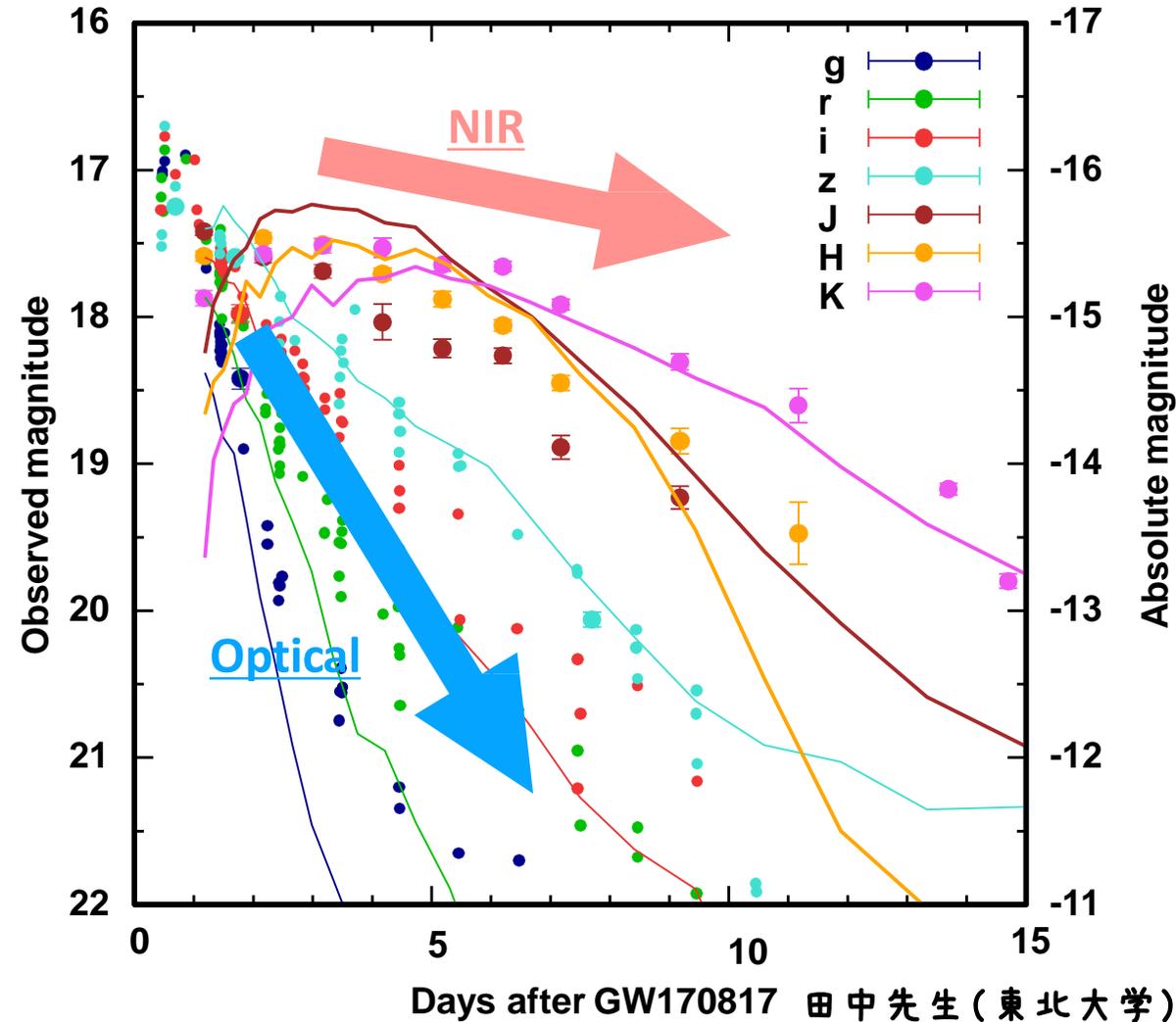
和南城先生(上智大学)

元素量と理論的予想値



Arcavi+17,
 Cowperthwaite+17,
 Diaz+17,
 Drout+17, Evans+17,
 Kasliwal+17,
 Pian+17,
 Smartt+17,
 Tanvir+17,
 Troja+17,
 Utsumi,
 MT+17,
 Valenti+17

赤外線と可視光線の観測光度変化と理論的予想



GW170817から得られた他の新発見

- 重力波とその後に発生したと思われるガンマ線の地球到着時間差が1.7秒しかなかったという事実から、重力波の速度は、光の速度と以下の精度で一致していることがわかった。

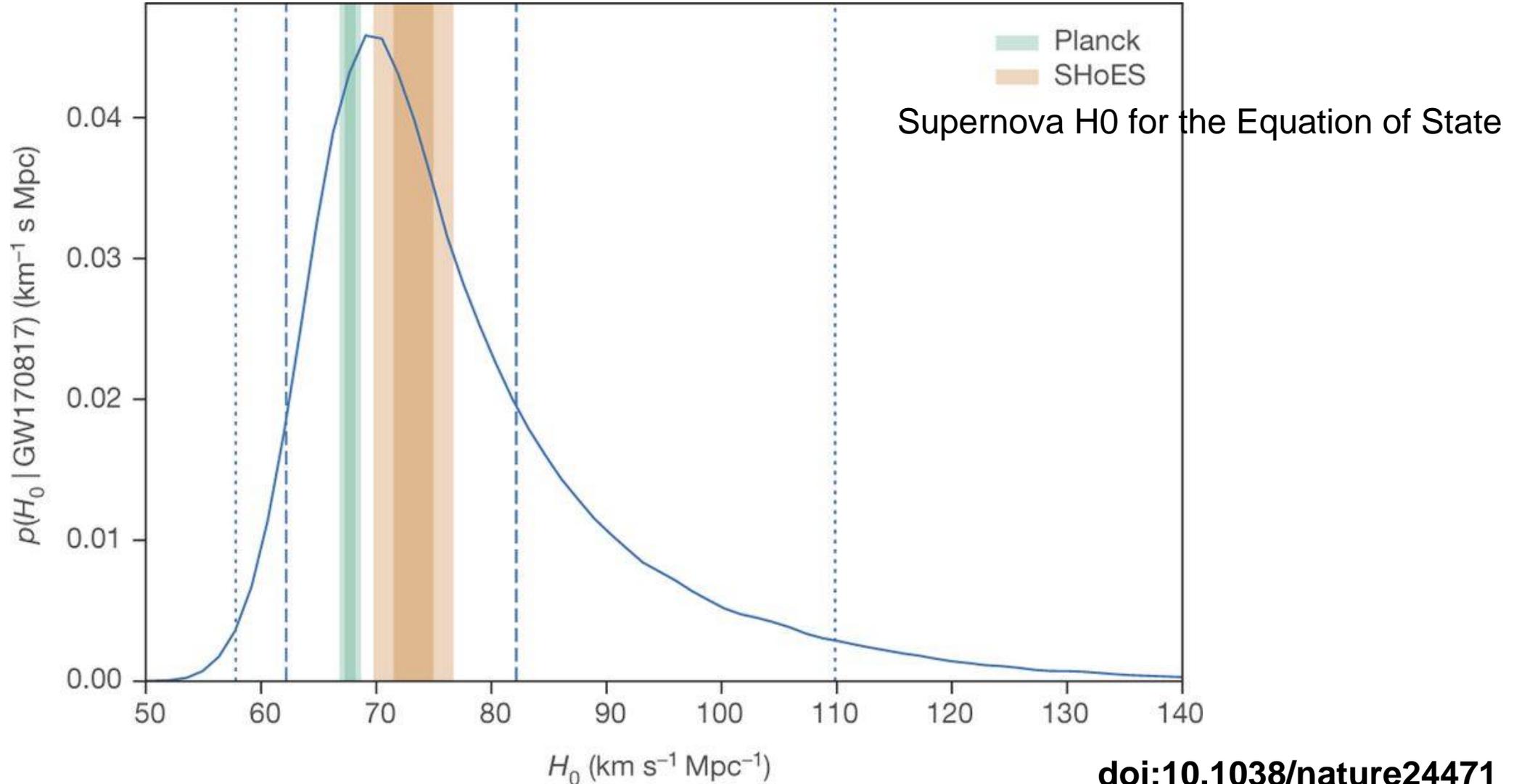
$$\Delta t = D/v_{\text{GW}} - D/v_{\text{EM}} \quad \Delta v := v_{\text{GW}} - v_{\text{EM}}$$

$$-3 \times 10^{-15} \leq \Delta v / v_{\text{EM}} \leq 7 \times 10^{-16}$$

$$299,792,458 \text{ [m/s]}$$

GW170817から得られた新知見

- 全く独立な方法で、ハッブルコンスタントに関する知見が得られた。



そして、今日12月2日午前1時に新たな発表がありました

Observation 1,2 のデータの精細な解析により02の観測中に、さらに4個の連星ブラックホール連星合体からの重力波が確認されました。

2つのBHの質量

自転の可能性

発生場所までの距離

Event	m_1/M_\odot	m_2/M_\odot	M/M_\odot	χ_{eff}	M_f/M_\odot	a_f	$E_{\text{rad}}/(M_\odot c^2)$	$\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	d_L/Mpc	z	$\Delta\Omega/\text{deg}^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$28.6^{+1.6}_{-1.5}$	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$3.6^{+0.4}_{-0.4} \times 10^{56}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	179
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$15.2^{+2.0}_{-1.1}$	$0.04^{+0.28}_{-0.19}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$3.2^{+0.8}_{-1.7} \times 10^{56}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.18^{+0.20}_{-0.12}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$3.4^{+0.7}_{-1.7} \times 10^{56}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$21.5^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.04^{+0.17}_{-0.20}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$3.3^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	$0.9^{+0.0}_{-0.1}$	$3.5^{+0.4}_{-1.3} \times 10^{56}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$35.7^{+6.5}_{-4.7}$	$0.36^{+0.21}_{-0.25}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$4.2^{+0.9}_{-1.5} \times 10^{56}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$25.0^{+2.1}_{-1.6}$	$0.07^{+0.16}_{-0.16}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$24.2^{+1.4}_{-1.1}$	$0.07^{+0.12}_{-0.11}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$3.7^{+0.4}_{-0.5} \times 10^{56}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$	≤ 2.8	≤ 0.89	≥ 0.04	$\geq 0.1 \times 10^{56}$	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$26.7^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.09^{+0.18}_{-0.21}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$3.4^{+0.5}_{-0.7} \times 10^{56}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$29.3^{+4.2}_{-3.2}$	$0.08^{+0.20}_{-0.22}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$3.6^{+0.6}_{-0.9} \times 10^{56}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

そして、今日12月2日午前1時に新たな発表がありました

Observation 1,2 のデータの中に、もしかしたら連星ブラックホール合体からの重力波かもしれないデータ14個も抽出(ただし、雑音とかぶっていたりしたので、宣言はせず)

重力波発生イベントではないかもしれないことを表す指標
(値が大きいほど、嘘である可能性が高まる)

Date	UTC	Search	FAR [y^{-1}]	Network SNR	M^{det} [M_{\odot}]	Data Quality
151008	14:09:17.5	PyCBC	10.17	8.8	5.12	No artifacts
151012A	06:30:45.2	GstLAL	8.56	9.6	2.01	Artifacts present
151116	22:41:48.7	PyCBC	4.77	9.0	1.24	No artifacts
161202	03:53:44.9	GstLAL	6.00	10.5	1.54	Artifacts can account for
161217	07:16:24.4	GstLAL	10.12	10.7	7.86	Artifacts can account for
170208	10:39:25.8	GstLAL	11.18	10.0	7.39	Artifacts present
170219	14:04:09.0	GstLAL	6.26	9.6	1.53	No artifacts
170405	11:04:52.7	GstLAL	4.55	9.3	1.44	Artifacts present
170412	15:56:39.0	GstLAL	8.22	9.7	4.36	Artifacts can account for
170423	12:10:45.0	GstLAL	6.47	8.9	1.17	No artifacts
170616	19:47:20.8	PyCBC	1.94	9.1	2.75	Artifacts present
170630	16:17:07.8	GstLAL	10.46	9.7	0.90	Artifacts present
170705	08:45:16.3	GstLAL	10.97	9.3	3.40	No artifacts
170720	22:44:31.8	GstLAL	10.75	13.0	5.96	Artifacts can account for

重力波の観測はもうやることが無いのか??

by Salvatore Vitale (MIT) in DAWN II Meeting (Renewed by Miyoki)

波源	連星中性子星	中性子星・ブラックホール	連星ブラックホール
初検出		$\geq O3$	
発生頻度	$\geq O3$	$\geq O3$	$\geq O2$
質量分布	$\geq O3$	$\geq O3$	Decent in O2
スピンの分布	$\geq O3$	$\geq O3$	$\geq O2$
形成過程の 説明	$\geq O3$	$\geq O3$	$\geq O2$
状態方程式	$> O3, A+, NF$	$> O3, A+, NF$??
電磁波との観測		$> O3$	O2 w/ Virgo
$z > 1$ より遠方からの重力波	NF	NF	O3
一般相対性理論の検証	$\geq O2$	$\geq O3$	

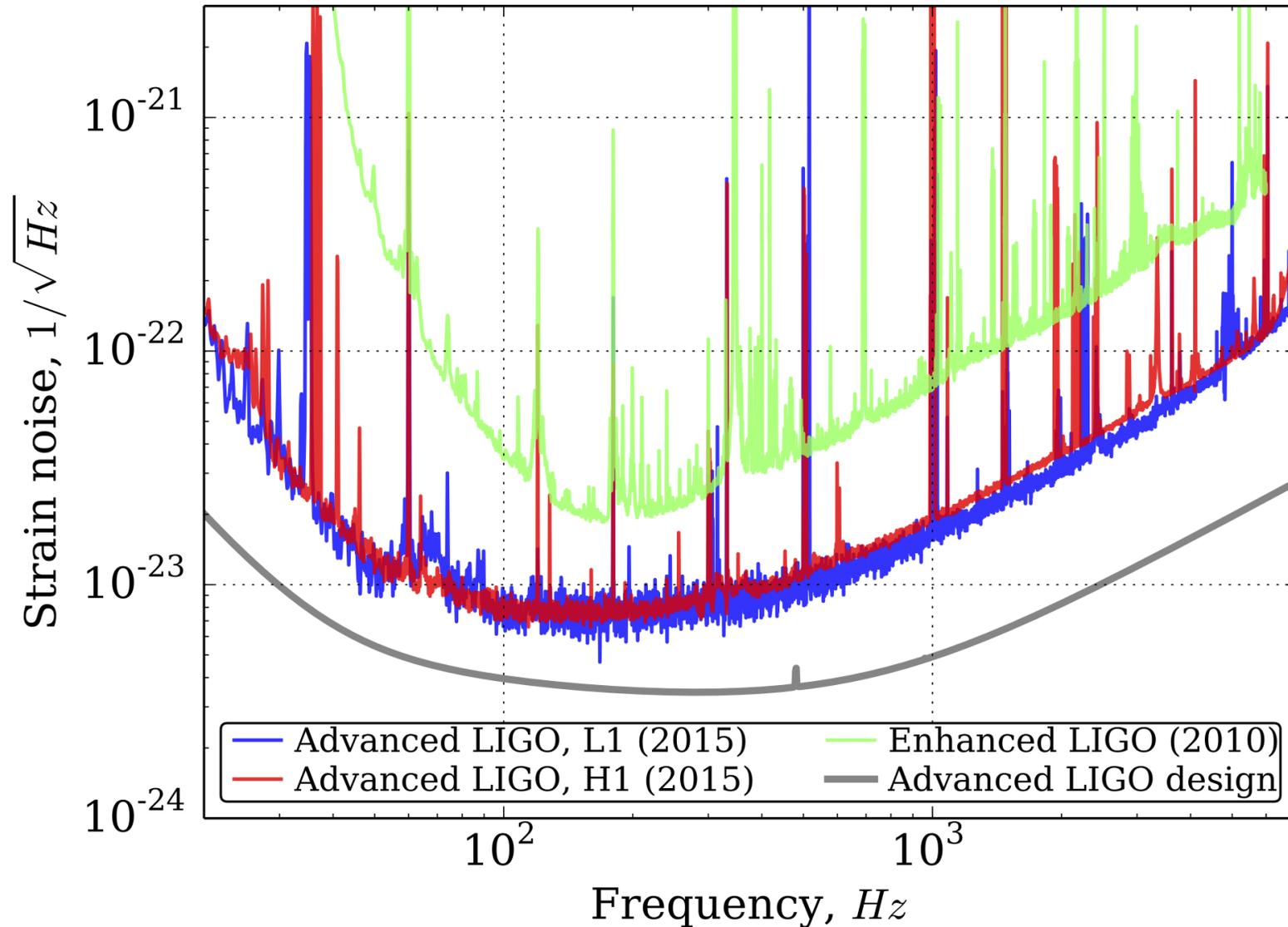
NF= new facilities (CE, ET)

波源	重力崩壊型超新星爆発	他のバースト的重力波発生現象
初検出	O2 - NF	O2- NF
発生原理の説明	From 1 st detection	??
重力波へ転嫁される質量の見積もり	From 1 st detection	??

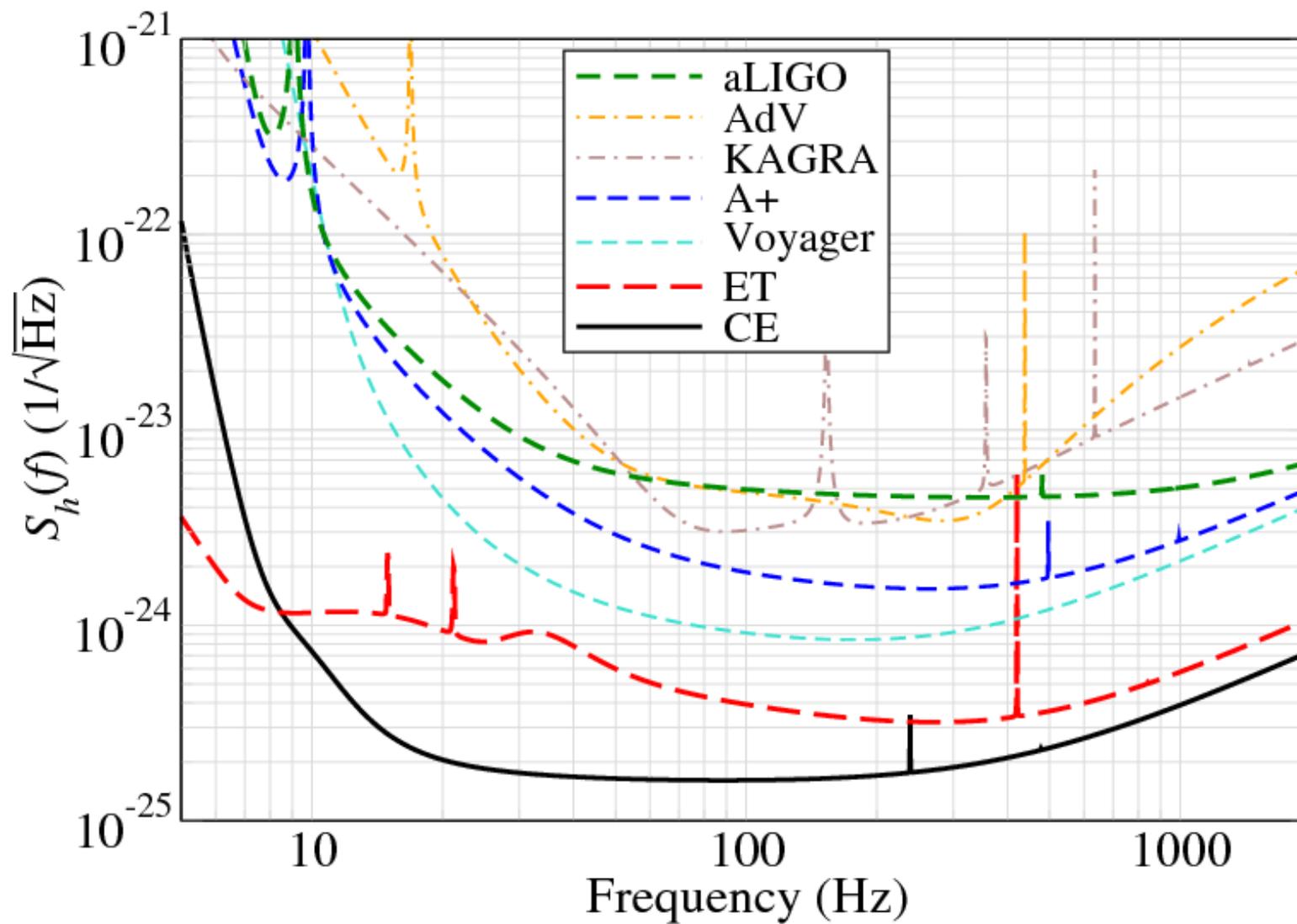
波源	BBH 背景重力波	原始重力波
初検出	O3, O4, A+, NF	\ggg NF
Population studies	A+, NF	Not Relevant

波源	既知の中性子星	見えない中性子星
初検出	$\geq O3$	$\geq O3$
Ellipticity/EOS	From 1 st detection	From 1 st detection
Population studies	Not relevant	A+, NF

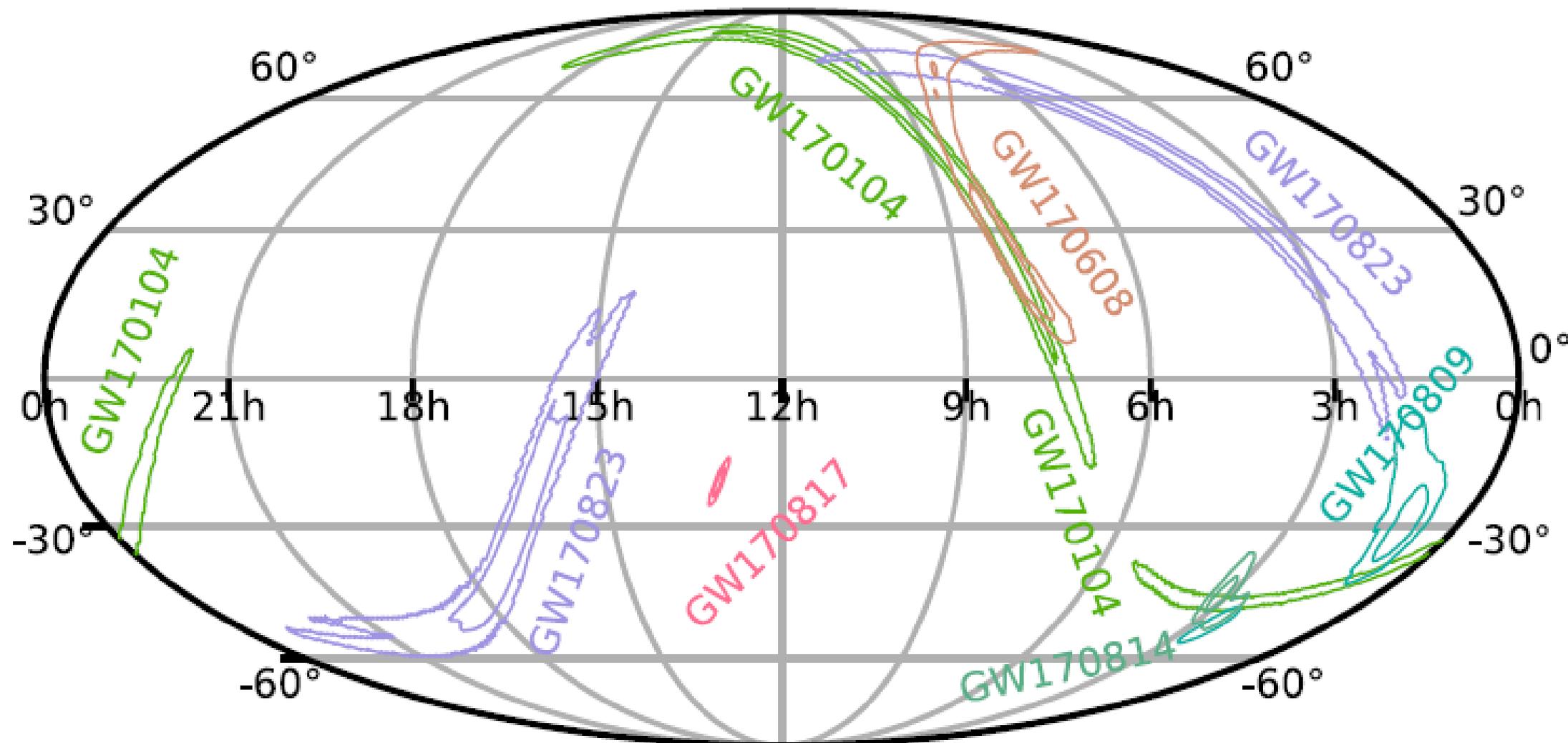
まずは、目標感度に到達するのが先決



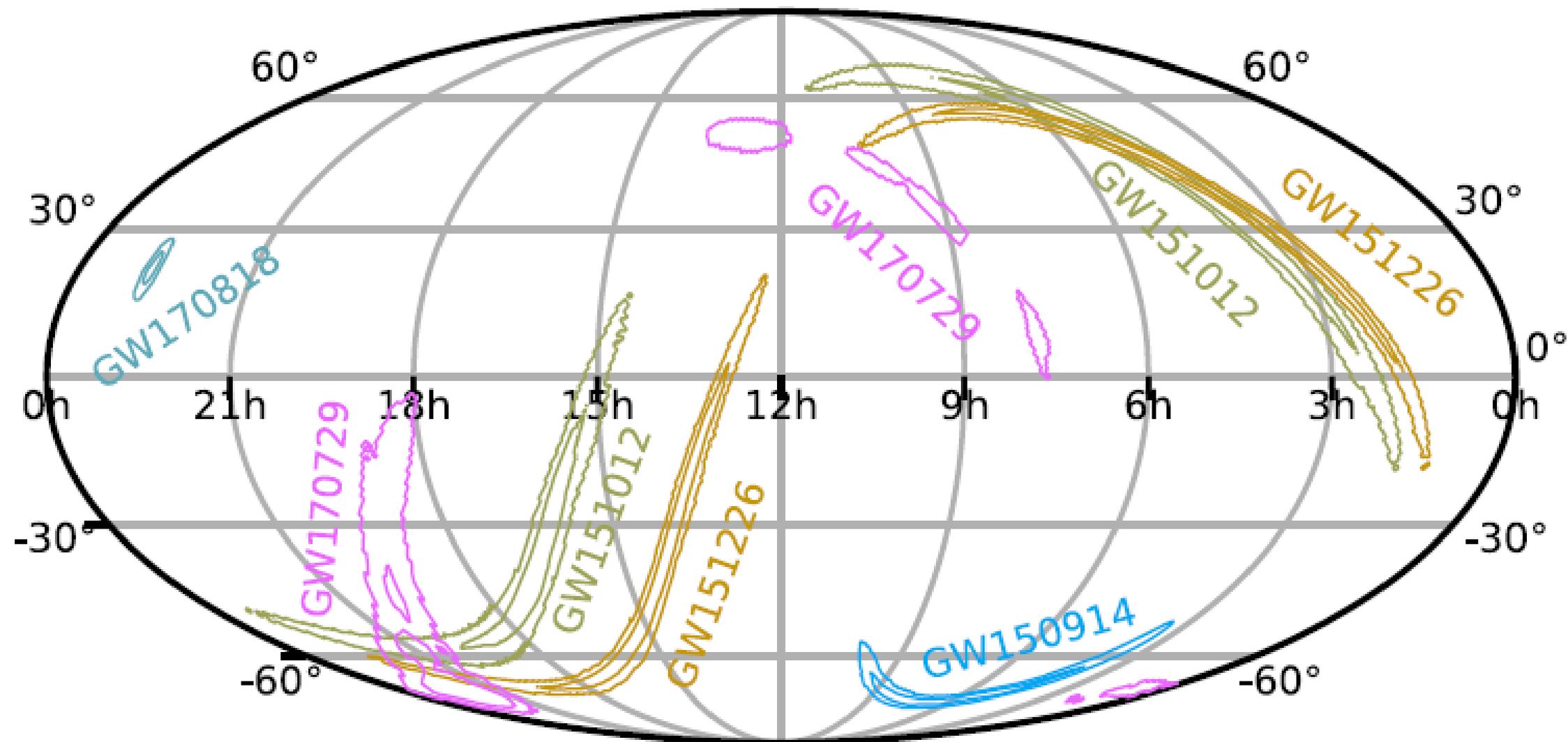
さらに10倍良い感度を持つ重力波望遠鏡の青写真



連星ブラックホール合体に対する
方向決定精度は、依然としてよくない



連星ブラックホール合体に対する
方向決定精度は、依然としてよくない

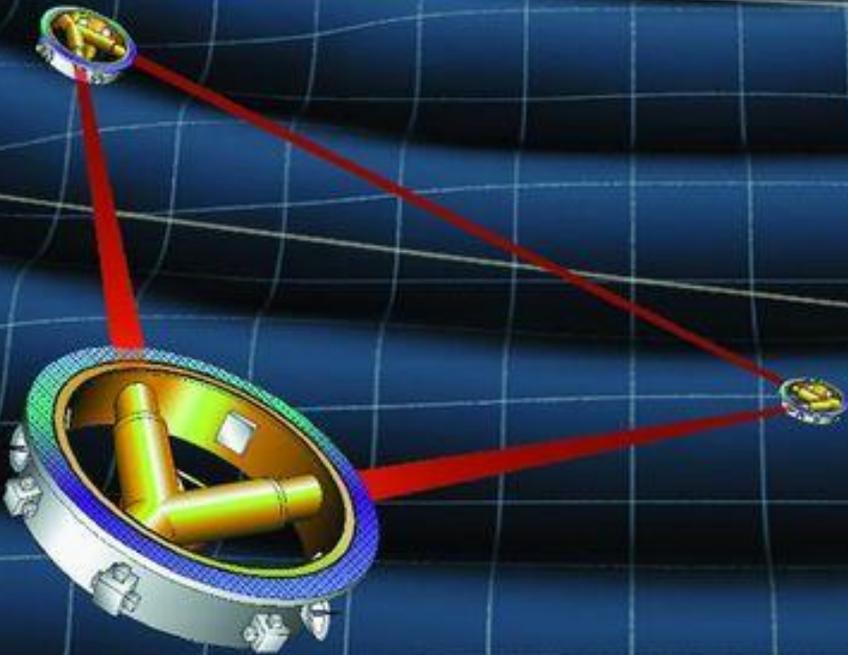


より多くの重力波望遠鏡があるのが望ましい

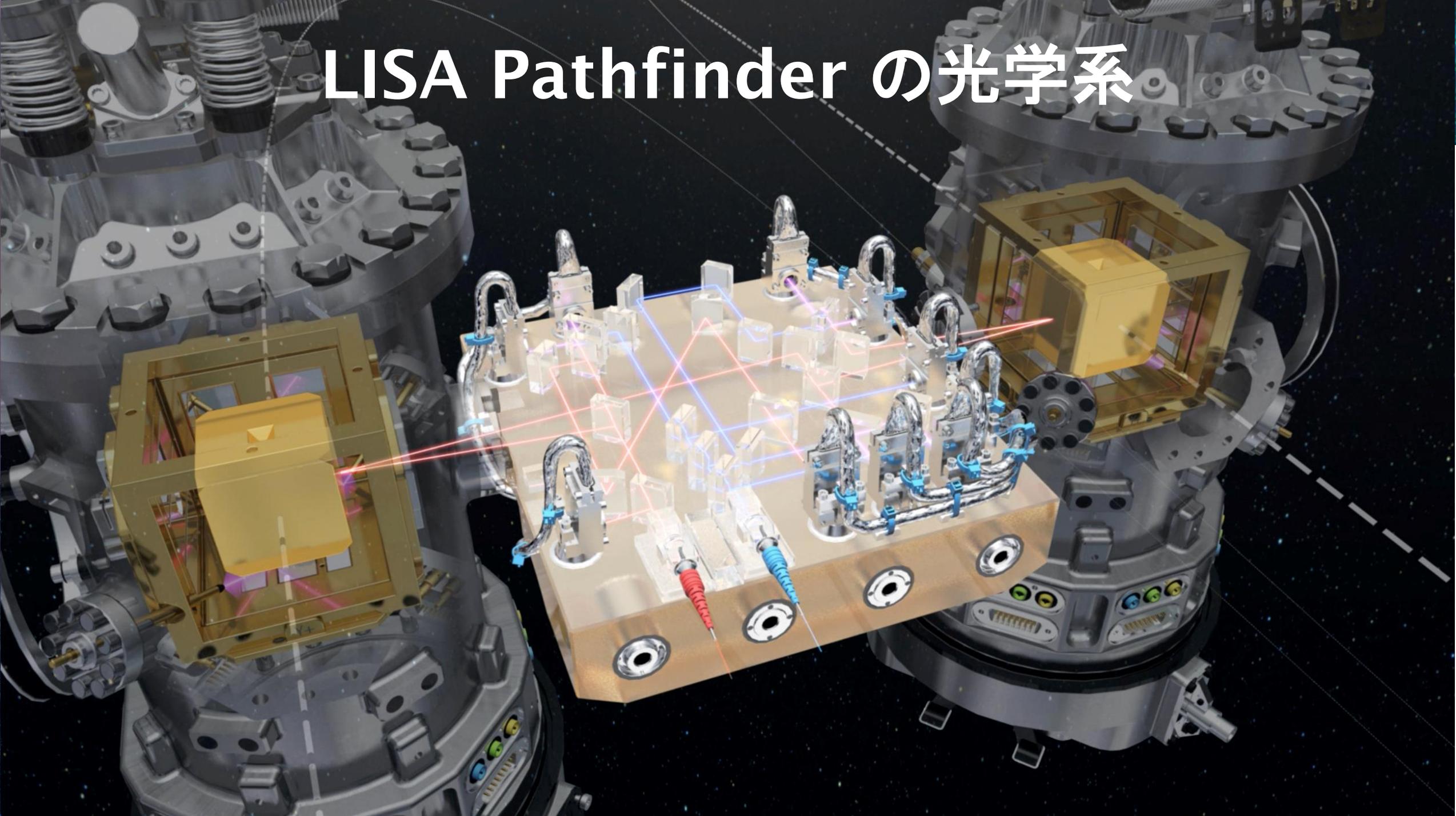


LISA Pathfinder
試験衛星打ち上げ
(2015年12月3日)

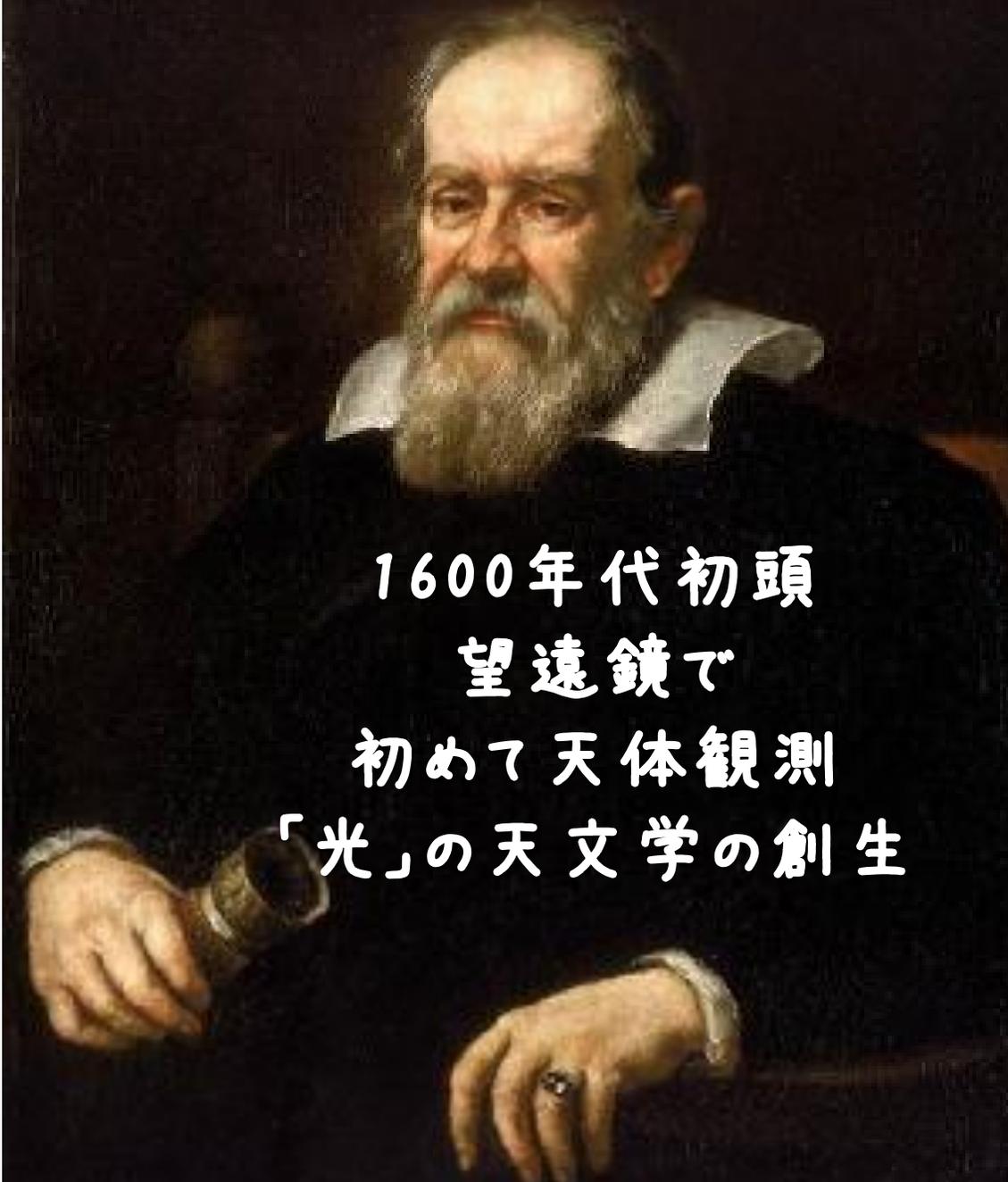
宇宙重力波望遠鏡



LISA Pathfinder の光学系



ガリレオ・ガリレイ



1600年代初頭

望遠鏡で

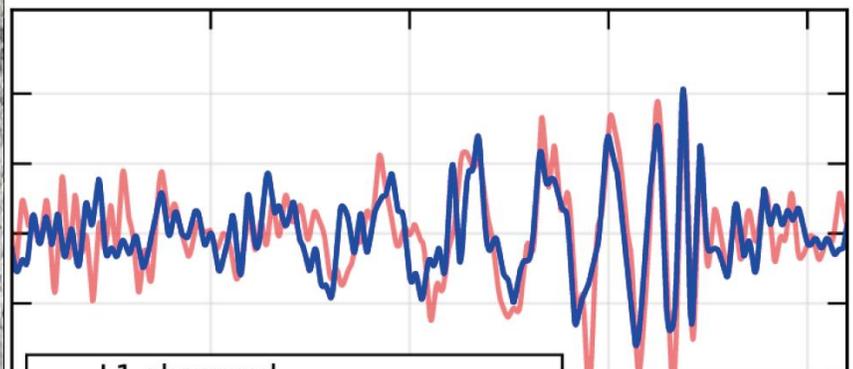
初めて天体観測

「光」の天文学の創生

月のスケッチ



重力波望遠鏡



LIGO Document Control Center

Author List by Author Id With LastName, FirstName, and Full Name

[A](#) [B](#) [C](#) [D](#) [E](#) [F](#) [G](#) [H](#) [I](#) [J](#) [K](#) [L](#) [M](#) [N](#) [O](#) [P](#) [Q](#) [R](#) [S](#) [T](#) [U](#) [V](#) [W](#) [X](#) [Y](#)
[Z](#)

BusM	Mey	M.	M. Busche
[A]	Last Name (or Company Name)	First Name	Full Name
AaroJ	Miya	Jules	Jules Aarons
AbboB	Abbott	Benjamin	Benjamin Abbott
AbboK	Abbott	Ken	Ken Abbott

[A]											
[B]											
[C]											
[D]											
[E]											
[F]											
[G]											
[H]											
[I]											
[J]											
[K]											
[L]											
[M]											
[N]											
[O]											
[P]											
[Q]											
[R]											
[S]											
[T]											
[U]											
[V]											
[W]											
[X]											
[Y]											
[Z]											

2015年
 延べ人数4000人近い
 研究者の

[A]											
[B]											
[C]											
[D]											
[E]											
[F]											
[G]											
[H]											
[I]											
[J]											
[K]											
[L]											
[M]											
[N]											
[O]											
[P]											
[Q]											
[R]											
[S]											
[T]											
[U]											
[V]											
[W]											
[X]											
[Y]											
[Z]											

22年の努力による
 重力波という新しい観測
 の窓による
 重力波天文学の創生

[A]	[A]	[A]
[B]	[B]	[B]
[C]	[C]	[C]

「重力波」がもたらす影響

学問的には、、、

- 重力波という**新しい観測手段**を得た
- 重力波は電磁波や粒子と**本質的に異なる手段**
- **全く新しい宇宙の真実**が発見できるかもしれない(たとえば、4次元以上の次元が発見されるとか、、、)
- アインシュタインの**相対性理論の正しさ**の追求
- **宇宙初期の星の進化**の研究
- **ブラックホール**の研究

産業への影響は？

今の物理学を信じる限り

重力波は、

人類が操れる道具として

直接役に立つことはありません。

理由は、大きな重力波を人工的に発生させられないから。

「重力波研究」が産業にもたらす影響

産業的には、先進的技術の先導役

- 超高真空技術 → すべての技術の基礎
- 安定化高出カレーザー光源 → 精密形状計測に必須
- 高感度傾斜計、加速度計と防振 → 減災への応用
- 超低損失光学素子の開発 → 半導体の微細化
- スーパークリーン環境 → 製造物の歩留まり向上高品質化
- 量子光学の限界を超える → 極限精度への挑戦
- 低振動な低温技術 → CTなどの医療機器への応用
- 究極の雑音「熱雑音」に関する知見の提供

まとめ

- 長さの精度の究極的な改善で、史上初となる重力波の直接検出がなされた。
- 計11個の重力波が発見され、重力波天文学が創生された！
まだ始まったばかり。
- 世界の重力波望遠鏡が同程度の性能を持ち、ネットワーク観測することが大事
- 重力波で想像を絶することが見つかることを期待
- 今は不要と思われる極限的な性能要求でも、いずれ産業が要求するレベルになる

Acknowledgement

This work was supported by MEXT, JSPS Leading-edge Research Infrastructure Program, JSPS Grant-in-Aid for Specially Promoted Research 26000005, MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Innovative Areas 2905: 17H06358, 17H06361 and 17H06364, JSPS Core-to-Core Program A. Advanced Research Networks, JSPS Grant-in-Aid for Specially Promoted Research (S) 17H06133, the joint research program of the Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, National Research Foundation (NRF) and Computing Infrastructure Project of KISTI-GSDC in Korea, the LIGO project, and the Virgo project.

