

自己紹介

東京科学大学 山本博章

東大では軟式テニス部



色々な先生に指導して頂いて、素粒子理論の学位



卒業後、渡米して素粒子実験に参加



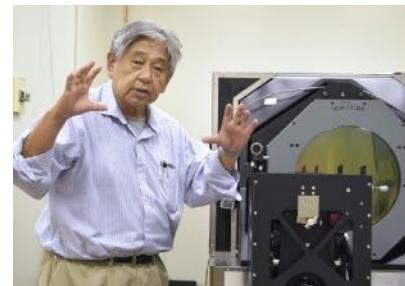
1993年に、超大超伝導加速器プロジェクトが中止



1994年、Barry Barish (2017年ノーベル賞) に誘われてLIGO (大型重力波干渉計) に参加



LIGOでは光学系の研究と干渉計デザインソフトの開発



イタリアのVirgoグループとの共同研究に参加



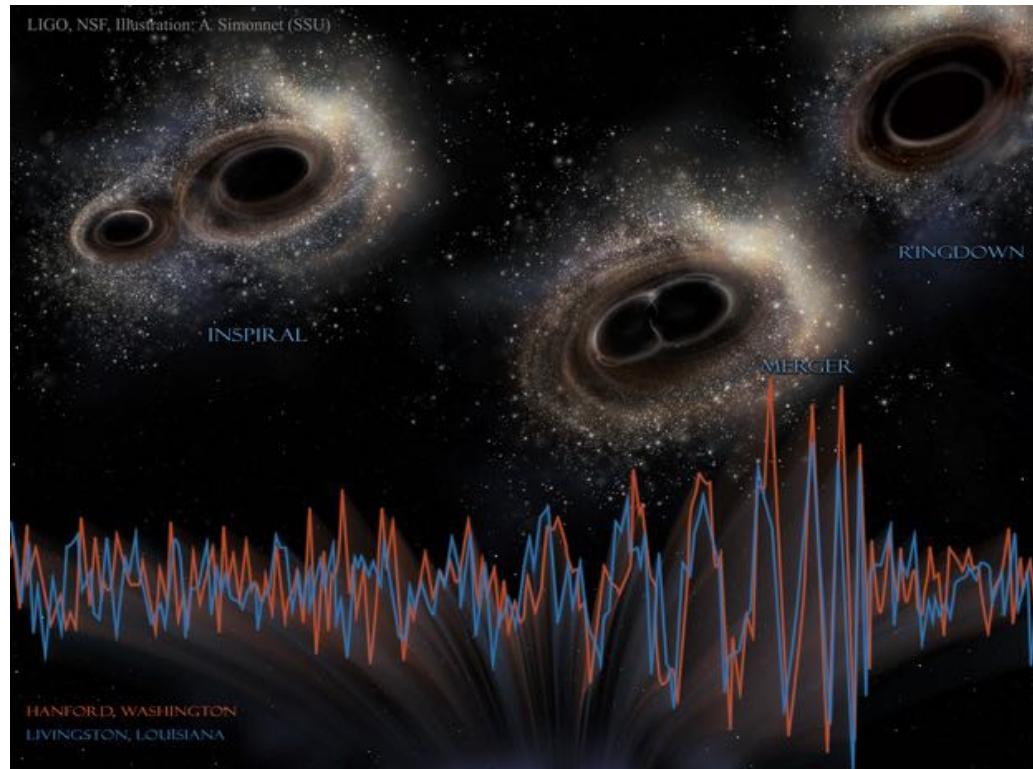
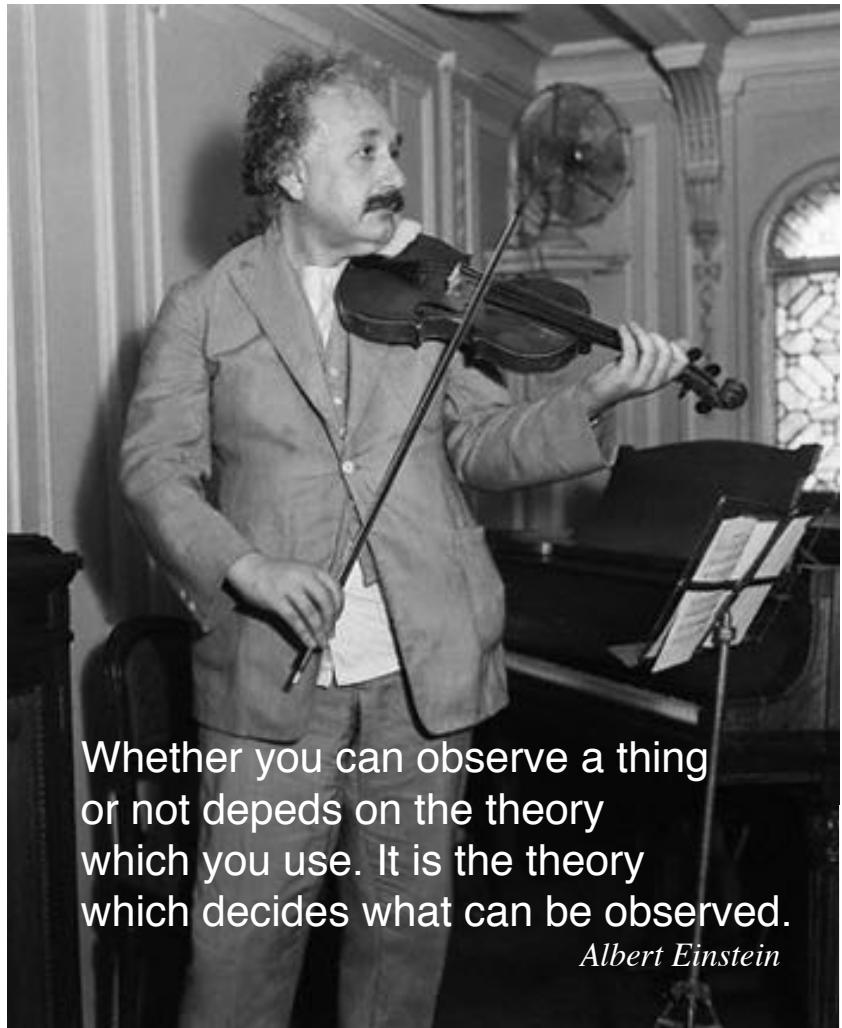
今年の6月に、35年勤いたCaltechを退職⇒東京科学大学



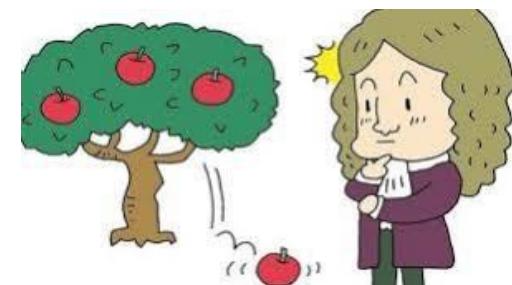
宇宙の彼方からの重力波の調べ ~最初の重力波観測から 10 年後の今と未来~

東京科学大学 理学院物理学系宗宮研究室 山本博章

ブラックホールの合体←一般相対性理論



林檎が落ちた⇒万有引力





今日のお話

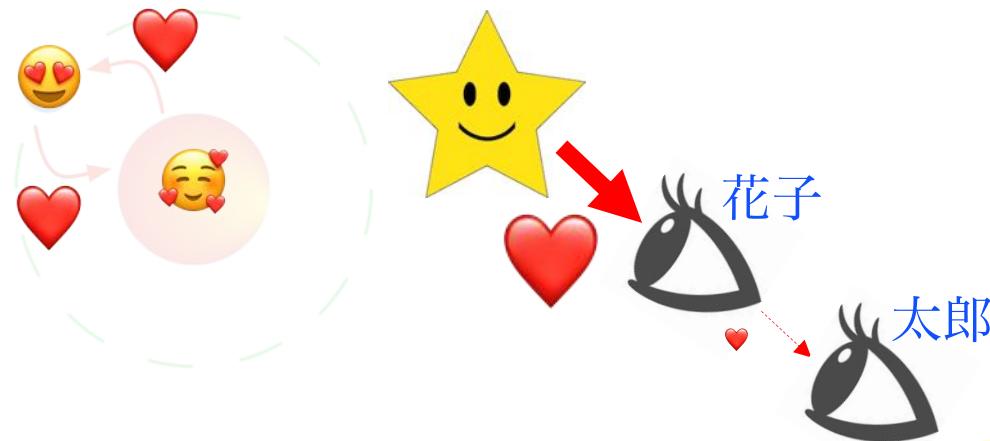


我孫子サイエンスカフェ2018年12月23日の続き

- これまでの観測結果とその意義
 - » ブラックホールと中性子星の合体の観測
 - ブラックホールと中性子星の重さと大きさ
 - 光と重力の違い
 - » どの位遠くまで見られるか
 - » 重力波の観測までの長い道のり
- 干渉計の働き
 - » 干渉計の原理
 - » 雑音源と対処方
- 将来計画
 - » Cosmic Explorer
 - » Einstein Telescope
- LIGOのデーター、その他の情報 : www.ligo.org
- 一部の図および内容は ChatGPT (GPT-5, OpenAI, 2025) の協力により作成した
- 重さの単位 : $1M_{\odot}$ =太陽の重さ= 2×10^{30} kg=地球の重さの33万倍
- 長さの単位 : $1\text{Mpc} = 326$ 万光年= 3.07×10^{19} km、天の川銀河= $0.03\text{Mpc} = 10$ 万光年

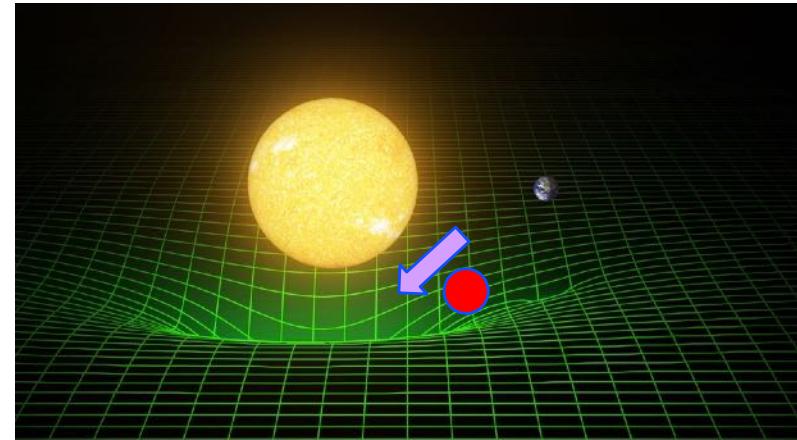
電気と重力

電気の力と電波：
光の波のキャッチボール



- 強い相互作用
 - 見つけやすい、早い減衰
- 夜空の星と宇宙の構造
- 宇宙の誕生から 40 万年以降の世界
(光が、今の地球に到達出来る時間)

重力と重力波：
物質の重さによる空間の
歪みとその歪みの伝搬



- 弱い相互作用
 - 見つけにくい、遅い減衰
- 光では見えない宇宙の構造
- 光では知る事の出来ない
宇宙の誕生から 10^{-44} 秒以降の世界



ブラックホールと中性子星

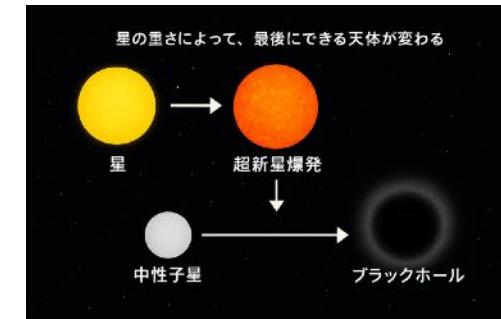
ChatGPTに教えて貰いました



星の一生の終わり方

星は最後に「燃料（核燃料）」がなくなると、自分の重力でつぶれていきます。このとき、星の重さ（質量）によって、最終的にどうなるかが決まります。

星の重さ（もとの星）	最後にできる天体
小さい星（太陽ぐらい）	白色矮星（はくしょくわいせい）
少し大きい星（太陽の8~20倍）	中性子星
もっと大きい星（太陽の20倍以上）	ブラックホール



■ ブラックホールとは？

ブラックホールとは、「とてもなく重い星」がつぶれてできた、なんでも強い重力で引き寄せてしまう天体のことです。ブラックホールからは、何も外に出られません。

⌚ どうやってできるの？

星の一生の最後に、燃料（核燃料）がなくなると、星は自分の重さに耐えきれなくなってしまい、とても大きな星（太陽の何十倍も重い星）の場合、このつぶれる力が強すぎて、中心が無限に近いほど小さくなってしまいます。

JGW-G2516939

⌚ 中性子星ってなに？

中性子星は、「とても重い星」のなれの果てです。星が一生を終えるときに爆発（超新星爆発）して、その後にぎゅーっとつぶれた残りが中性子星になります。

※ どうして「中性子」なの？

星の中の原子は、つぶれるときにすごい圧力で押しつぶされて、電子と陽子がくっついて中性子だけになります。だから「中性子星」なんです。



GW150915 : PRL
116,061102(2016)

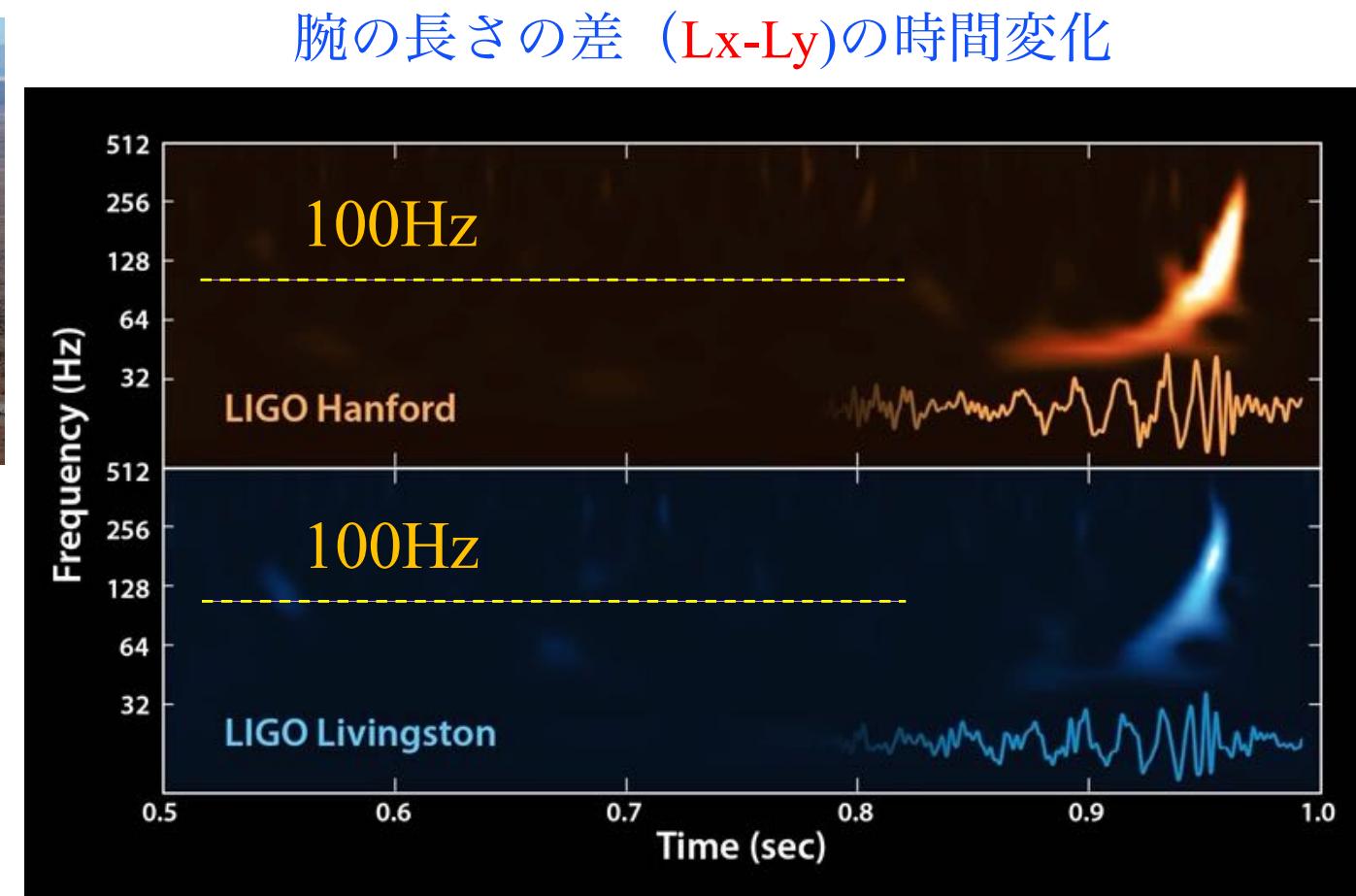
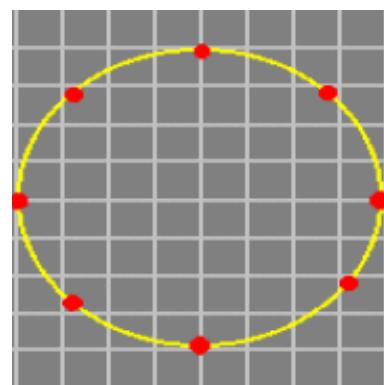
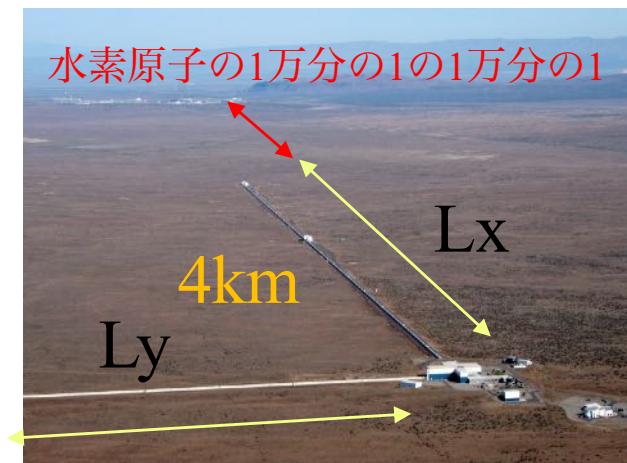
2015年9月14日に観測された

初めての重力波信号

2個のブラックホールの合体で放出



アインシュタインの一般相対論から100年の長い道のり

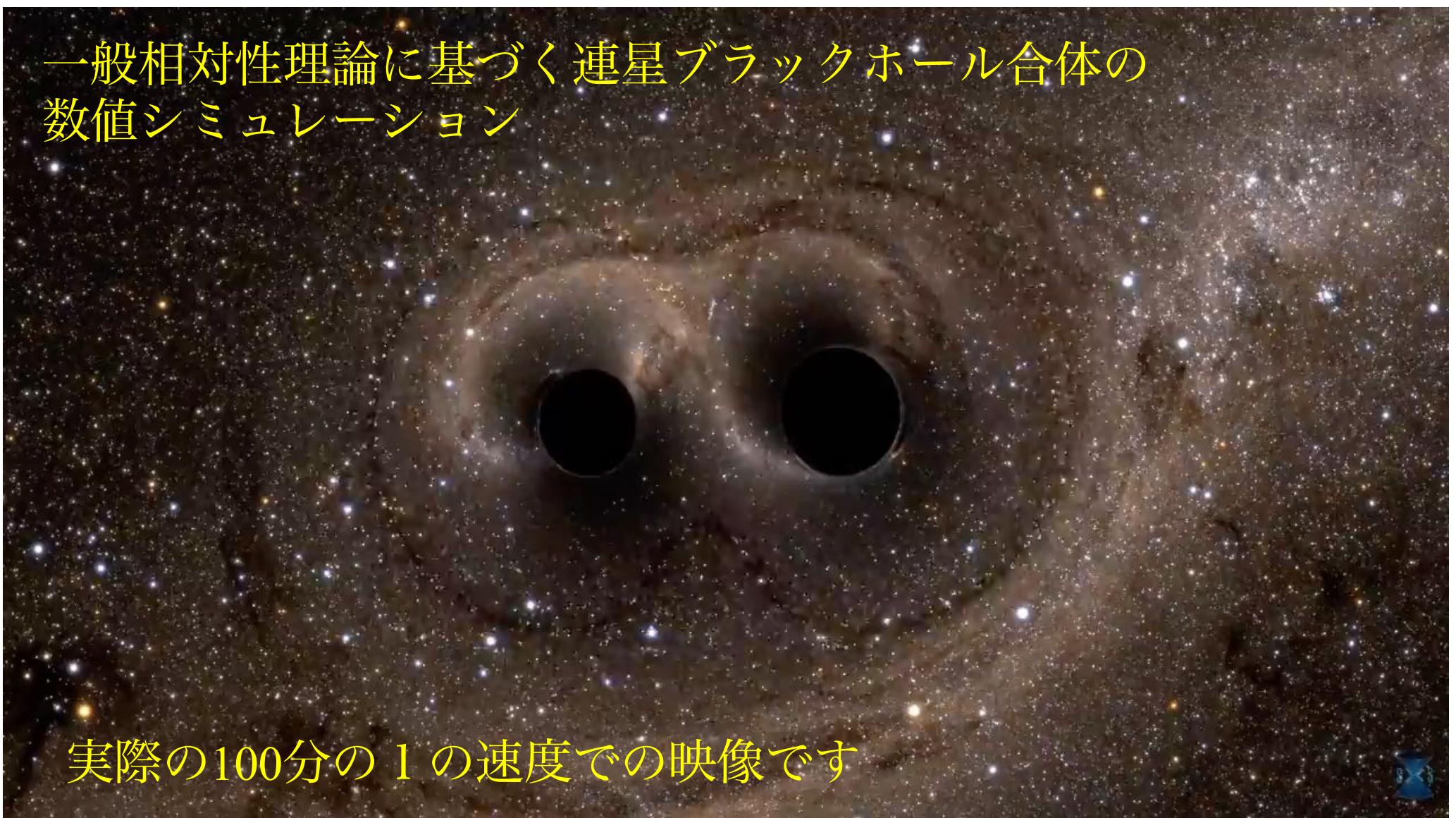


最初にリビングストン干渉計で、そして1000分の7秒後にハンフォード干渉計で信号が観測された



昔々、遠い宇宙の彼方での出来事です
– 13億年前に出た重力波が今地球に到着 –

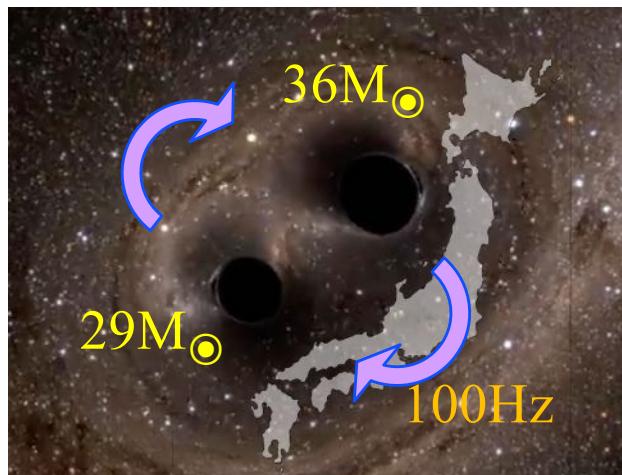
一般相対性理論に基づく連星ブラックホール合体の
数値シミュレーション





連星ブラックホール 合体の過程

(1) 涡巻き運動

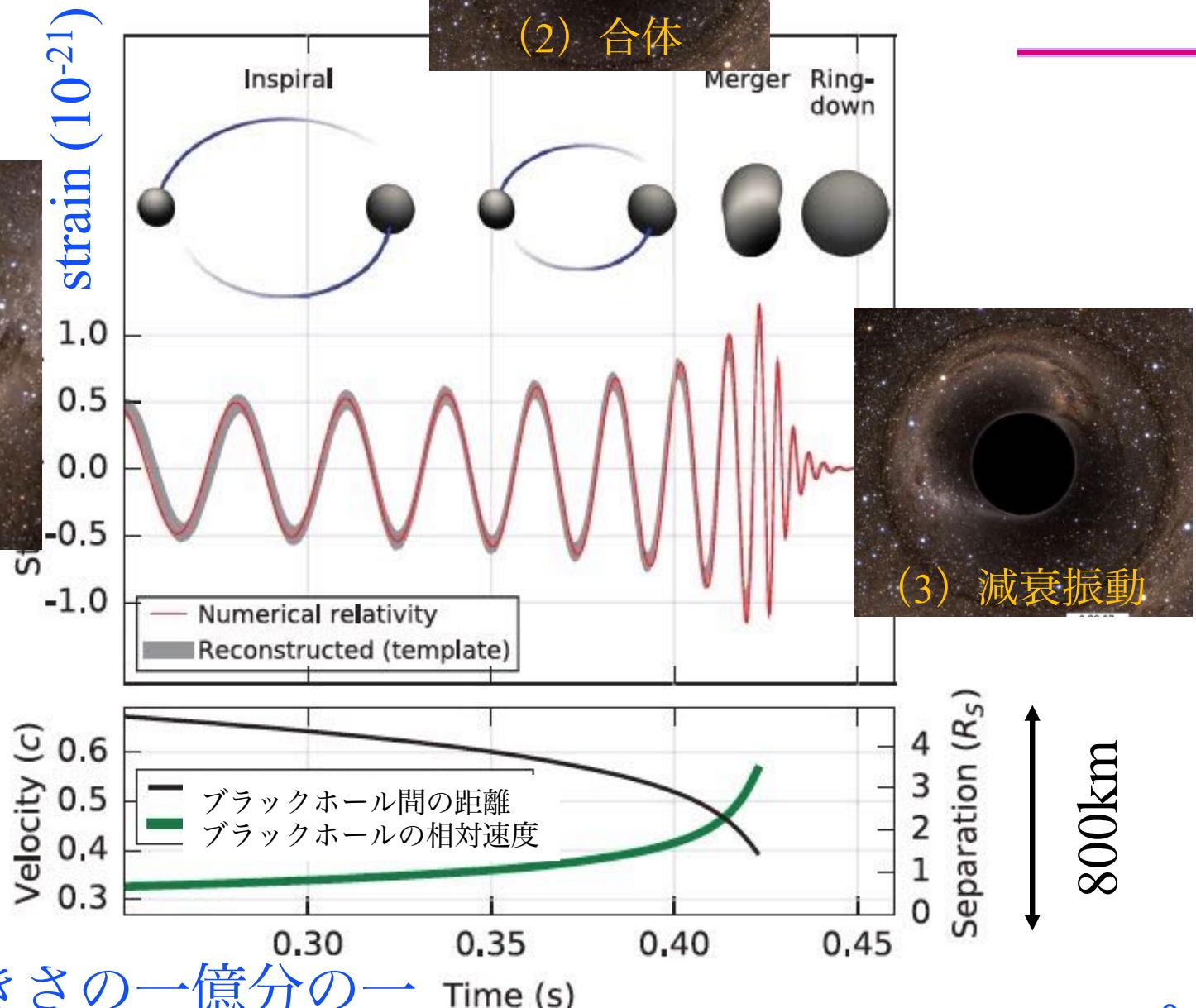


dL =腕の長さの伸び縮み

$$strain = \frac{dL}{L}$$

$$dL = 4000\text{m} \times 10^{-21} \\ = 4 \times 10^{-18} \text{ m}$$

= 水素原子の大きさの一億分の一





最初の重力波で聞こえた 宇宙の大演奏



NHK 2017年12月10日 サイエンスZERO
「ノーベル物理学賞 重力波が切り開く新天文学」

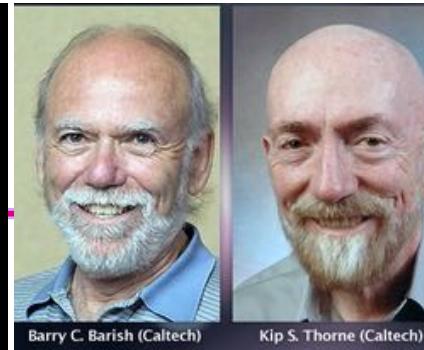
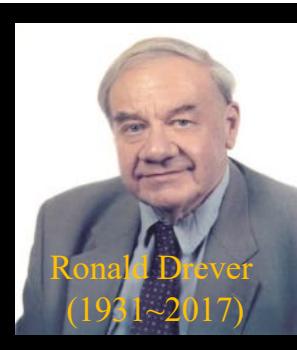
我孫子サイエンスカフェ 2025年11月

JGW-G2516939





重力波観測への道



2017 Nobel Prize in Physics

● 情熱を持った人達

- » 一般相対論の意味を探った人達
- » 重力波を見つける実験手法を追い求めた人達
 - 今のLIGOは、DreverとWeissのアイデアの結晶
- » 大型プロジェクトを組織し (Caltech, Glasgow, MIT)、手探りで予算を獲得
- » 高エネルギーで培った大型実験の手法を重力波観測実験で生かした人達

● NSF (米国の文科省に相当) の長年に亘る財政面の援助

- » 1970年代から継続した援助
- » 1990年に入っての大型援助の決断 (合計2000億円)

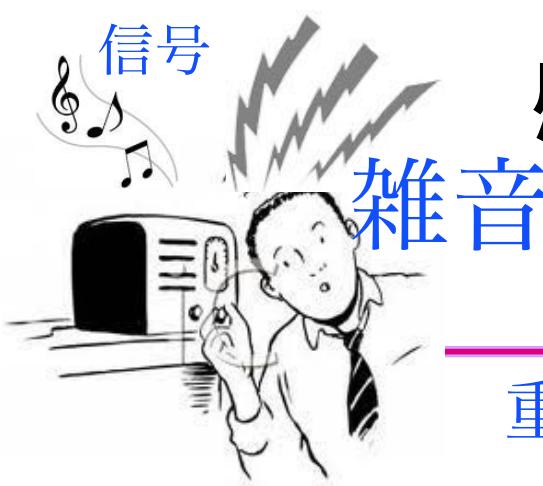
● 時間をかけての準備

- » 黎明期 (1970年~)、第一期 (開発、1994年~2008年) から第二期 (観測、2008年~) へ
 - 第一期は、200億円かけての、技術検証 — 信号の観測ではなく、設計感度で1年運転出来るか、目標
 - 最初の重力波信号は、第二期の準備運転の時、見つかった
 - 本物である事の確認に、半年かかった — 箱口令: 家族にも話すな
- » 注意深い技術開発と選択
- » 第一期での失敗や経験を第二期で生かす事が出来た

● 情熱と努力へのご褒美のグッドラック

- » 非常に強い最初のブラックホール合体の信号、直ぐ側で起こった中性子合体

～ドジャーズの山本が、ワールドシリーズの第6戦が終った後で、第7戦に備えて肩を作つておいたので、優勝出来た。



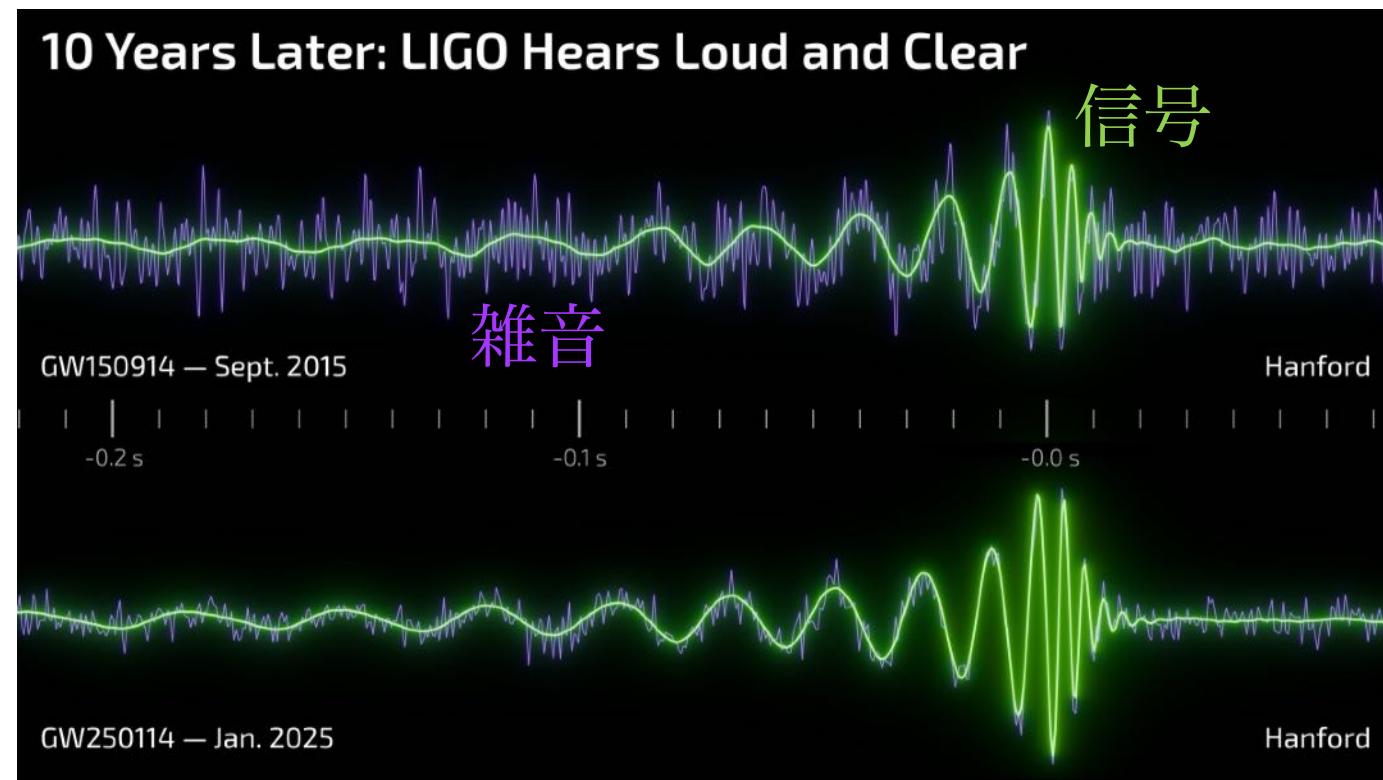
感度曲線と信号強度

Phys. Rev. X 6, 041015 (2016)



重力波観測の限界を決める雑音

2015年の最初の重力波信号



10年後の綺麗な重力波信号

我孫子サイエンスカフェ 2025年11月16日 山本博章



LIGOはどの位 遠くまで見られるのか

- 位置特定には複数の観測が必要。LIGOは2台。
Virgo、KAGRAが参加する事で、改善。
 - 観測距離： $1.4M_{\odot}$ の中性子星の対合体がはっきり(S/N>8)観測出来る距離

- 1994 ~ Initial LIGO : 実証運転

» 2005年11月4日 ~ 2007年9月31日

- 実証運転 5 @ 15 Mpc
 - 設計感度で一年間運転：NSFとの契約
 - 実証運転 6 @ 18 Mpc
 - Advanced LIGOの新しい技術の試験

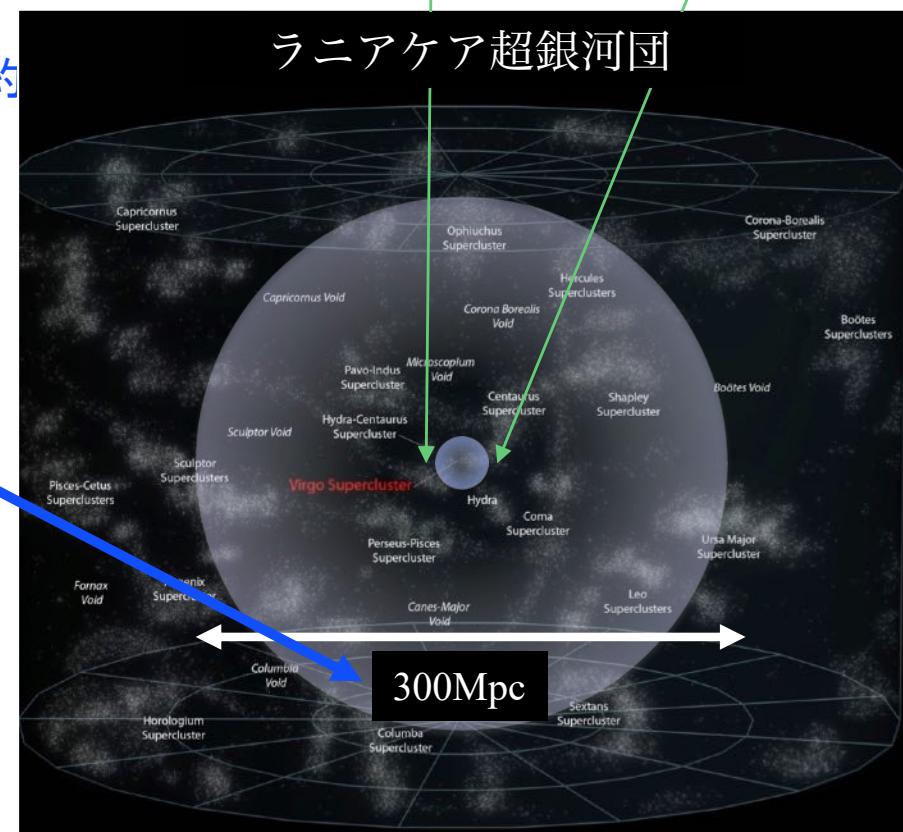
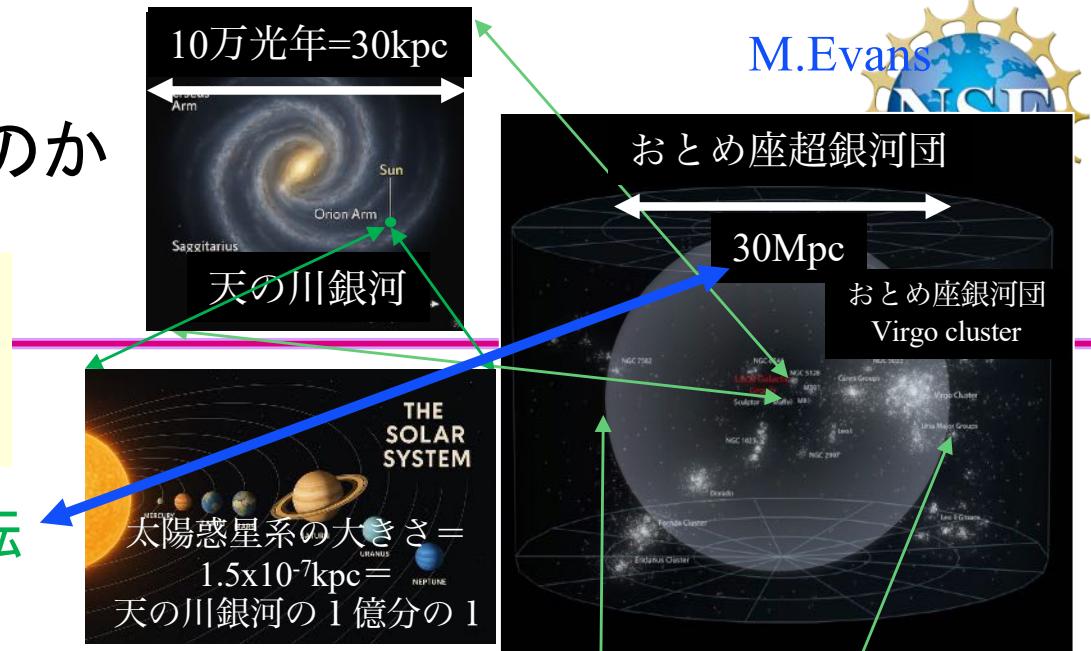
- 2008 ~ Advanced LIGO : 觀測運轉

» 2015年9月12日 ~ 2016年1月19日

- 觀測運転 1
 - @ L1 60Mpc, H1 80Mpc
 - GW150914

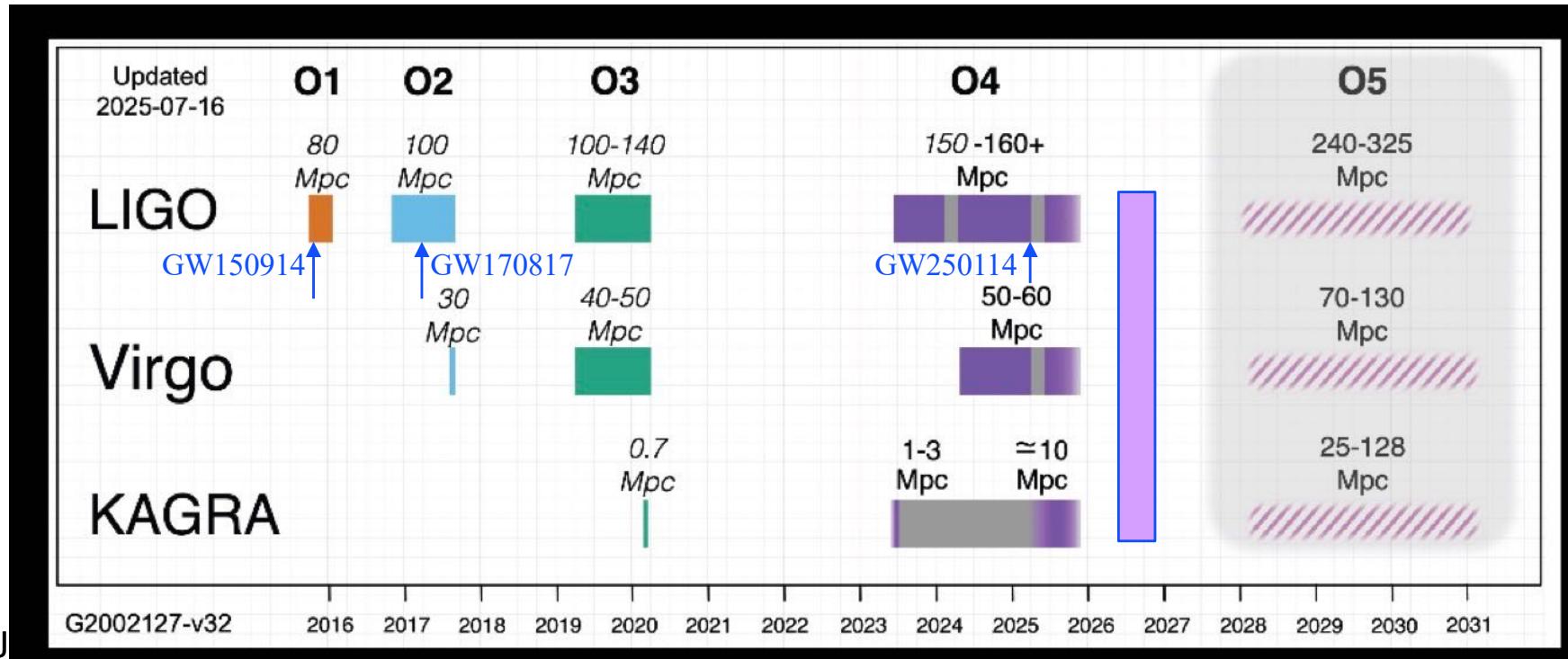
» 2023年5月24日 ~ 2025年11月18日

- 観測運転 4a,b,c
 - @ L1 177Mpc, H1 165Mpc
 - ~220の重力波信号



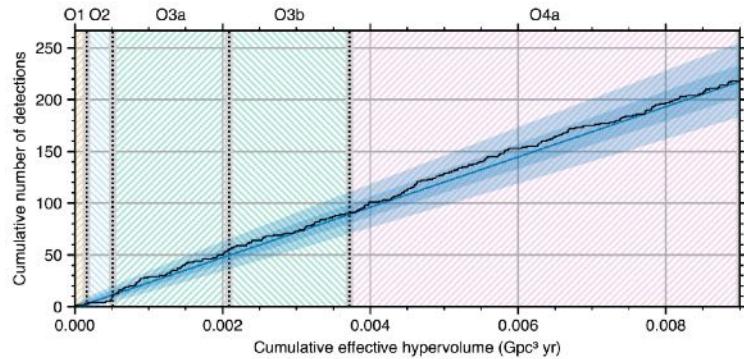
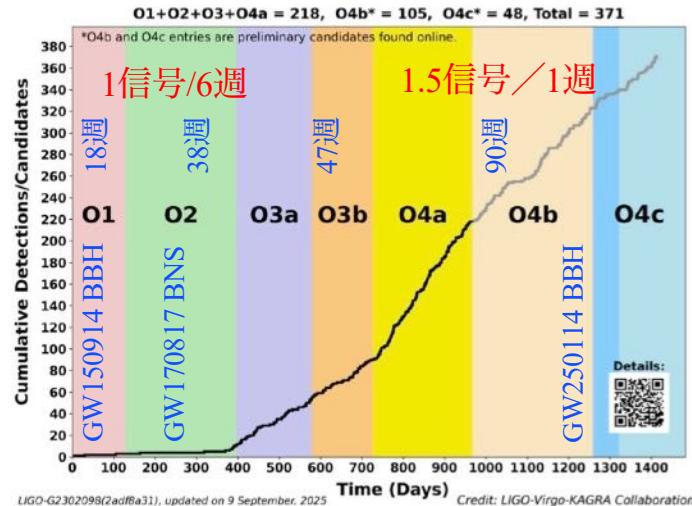
重力波観測

- 観測距離： $1.4M_{\odot}$ の中性子星の対合体がはっきり観測出来る距離
- 重い星からの信号が強いので、ブラックホール合体は、中性子星の約10～20倍遠くからでも検出出来る。
- 距離が大きいと、探せる体積が大きいので、遠くの信号を捕まえやすい





信号のプロフィール

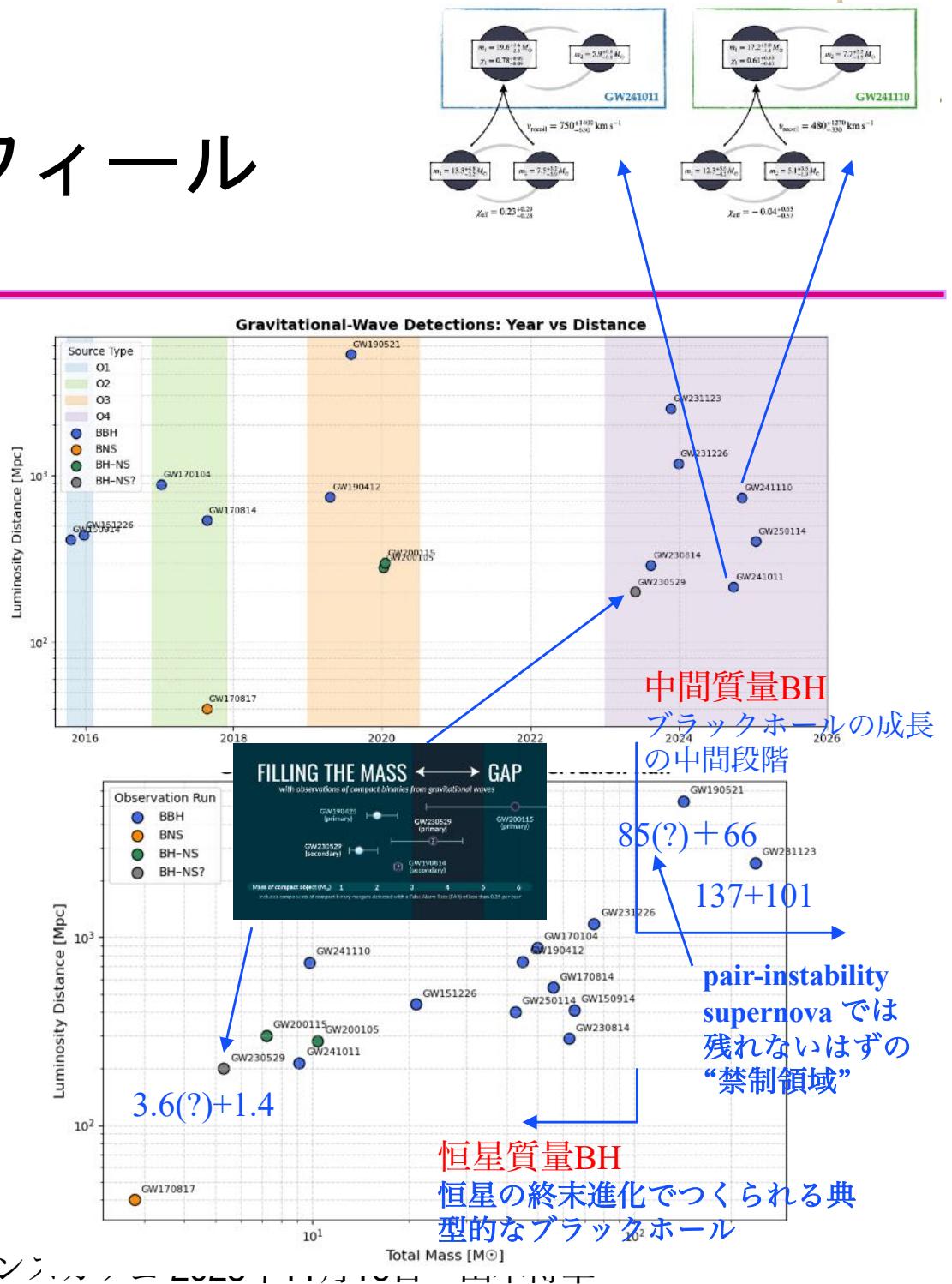


$T (4\pi/3)R^3$ の積算 vs 信号数の積算
→合体頻度はポアソン分布

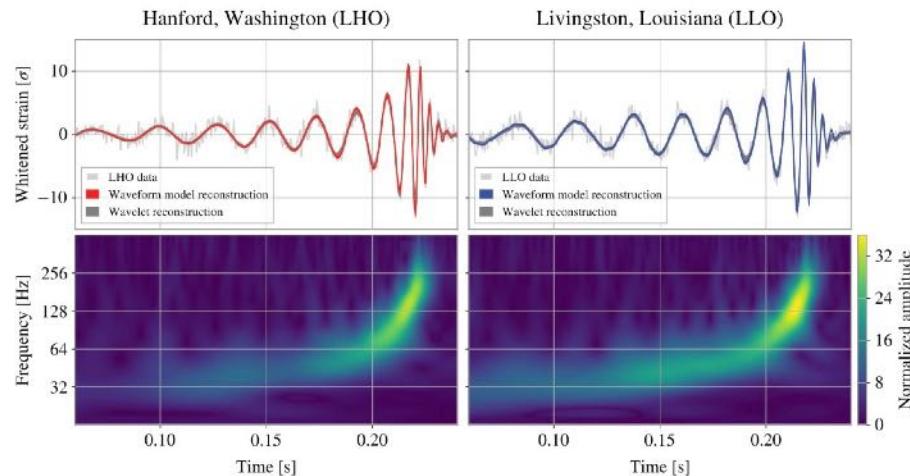
arXiv:2508.18080v2

JGW-G2516939

我孫子サイエンス



非常に高 SNR(77–80)のブラックホール連星合体

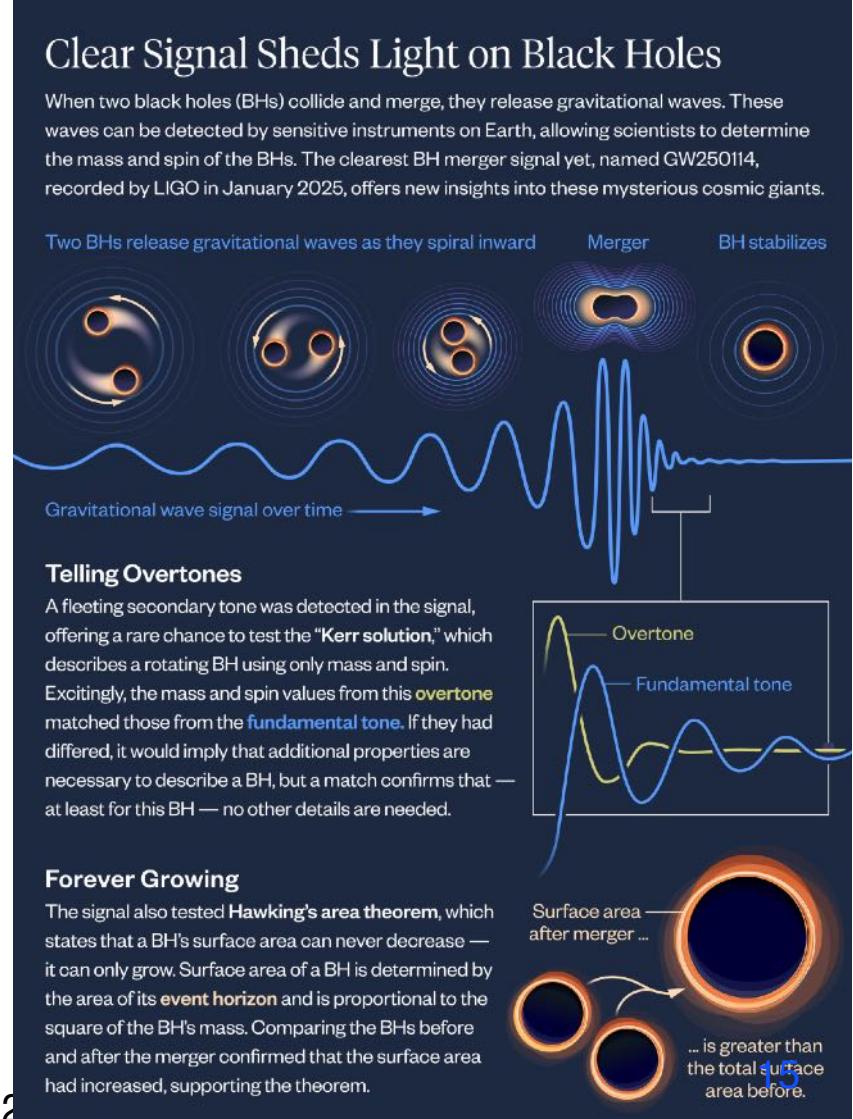


Kerr ブラックホール “no-hair theorem” の直接検証
 生成された BH の質量、スピン、リングダウン周波数
 衰減時間から、Kerr 計量の遷移モードと一致するかをき
 わめて高精度で検証可能。

Kerr ブラックホールとは、回転しているブラックホールの
 一般相対論解のことです。無毛定理 (no-hair theorem) の
 基礎は、KerrBHは、質量と角運動量だけによる。

Hawkingの“面積定理”の厳密テスト
 事象の地平面の面積が減少しない (area theorem) という
 Hawking の予言を、この信号により高精度で確認

事象の地平面とは、一度入るとどんなものでも二度と外へ出
 られない境界面。非回転ブラックホールの半径は $r_s = \frac{2GM}{c^2}$

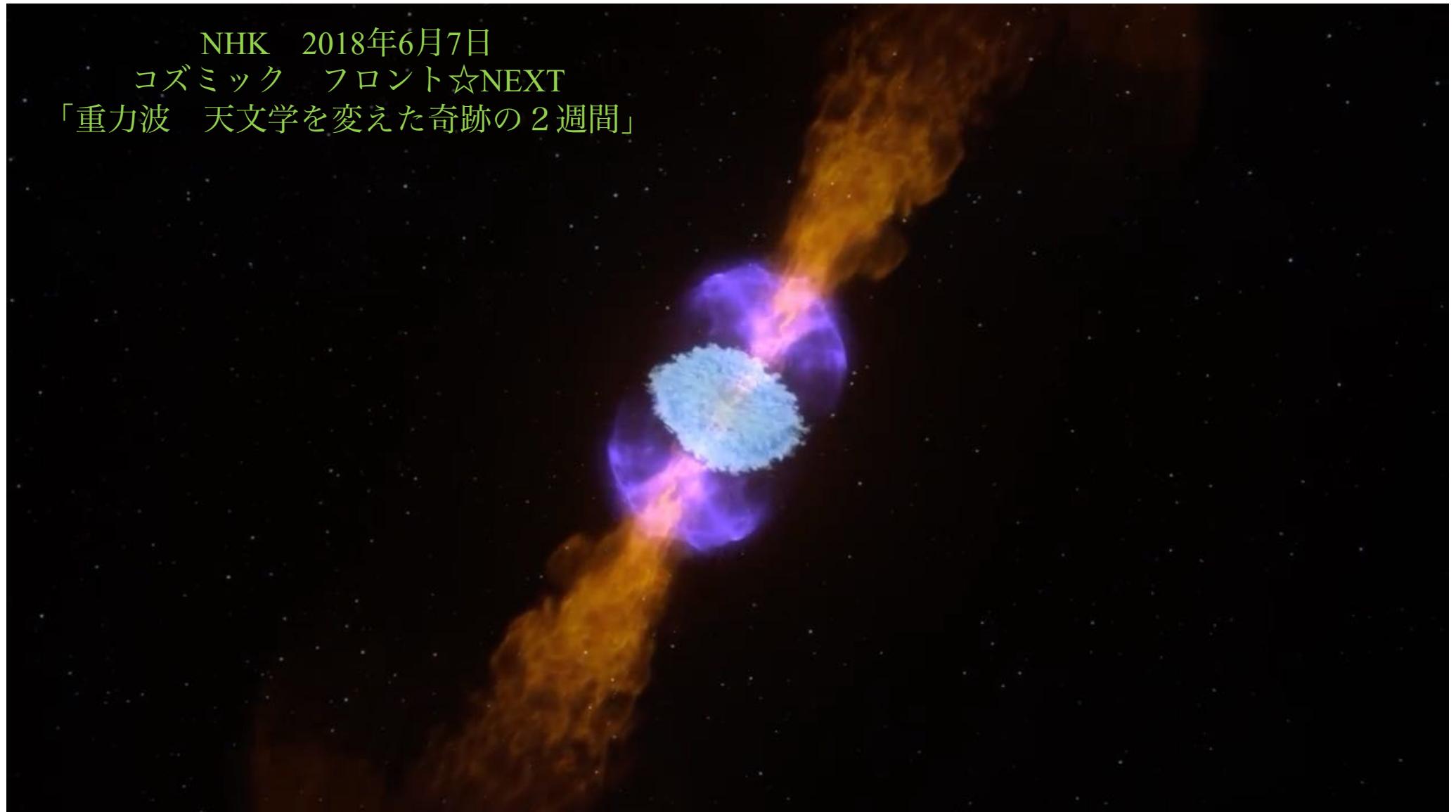


2017年8月17日に始まった 連星中性子星合体の観測と、 新たな天文学の夜明け

NHK 2018年6月7日

コズミック フロント☆NEXT

「重力波 天文学を変えた奇跡の2週間」

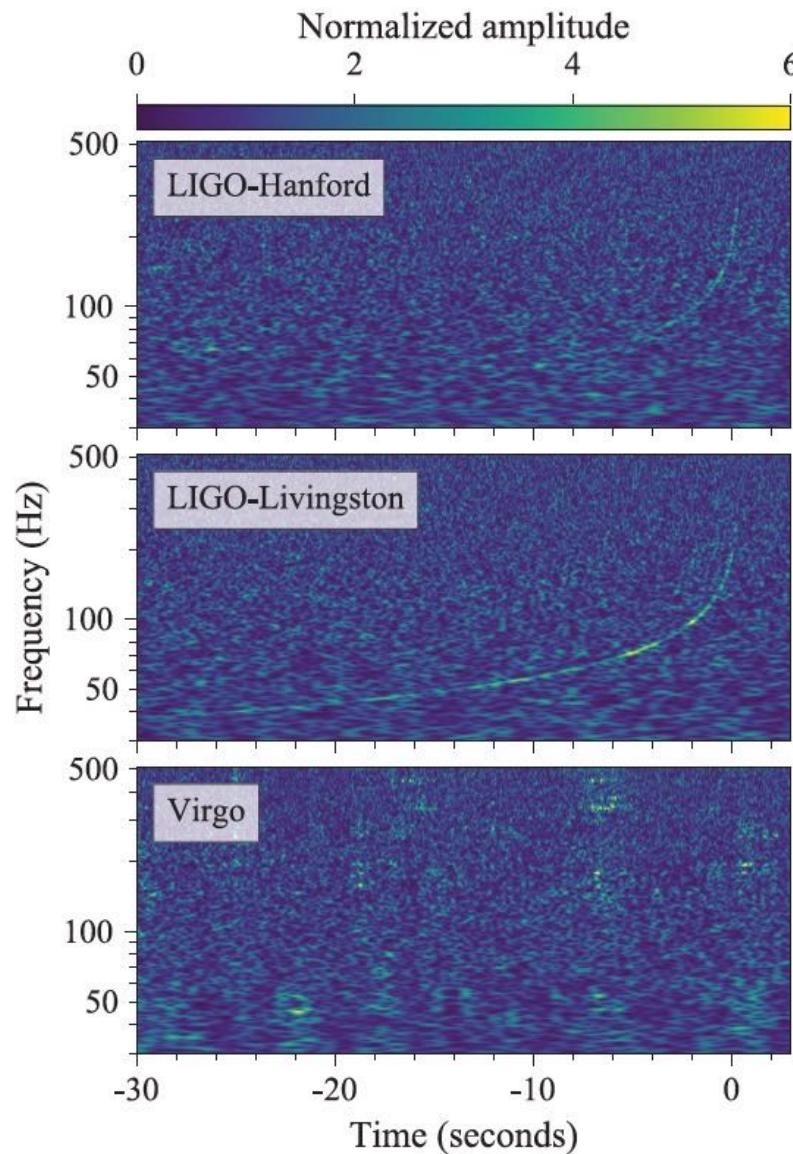




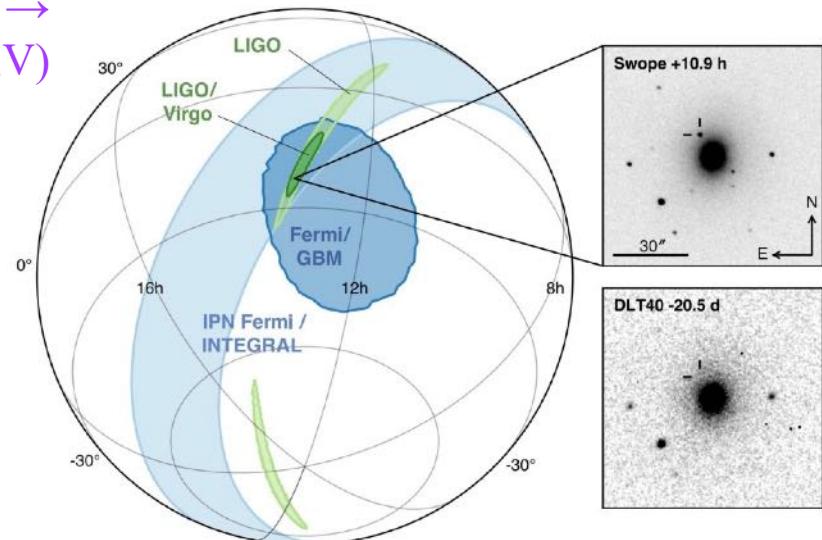
2017年8月17日に観測された信号



PRL 119, 161101 (2017), Astrophys. J. Lett. 848, L12 (2017)



190 deg^2 (L,H) \rightarrow
31 deg^2 (L,H,V)





GW170817+GRB170817A

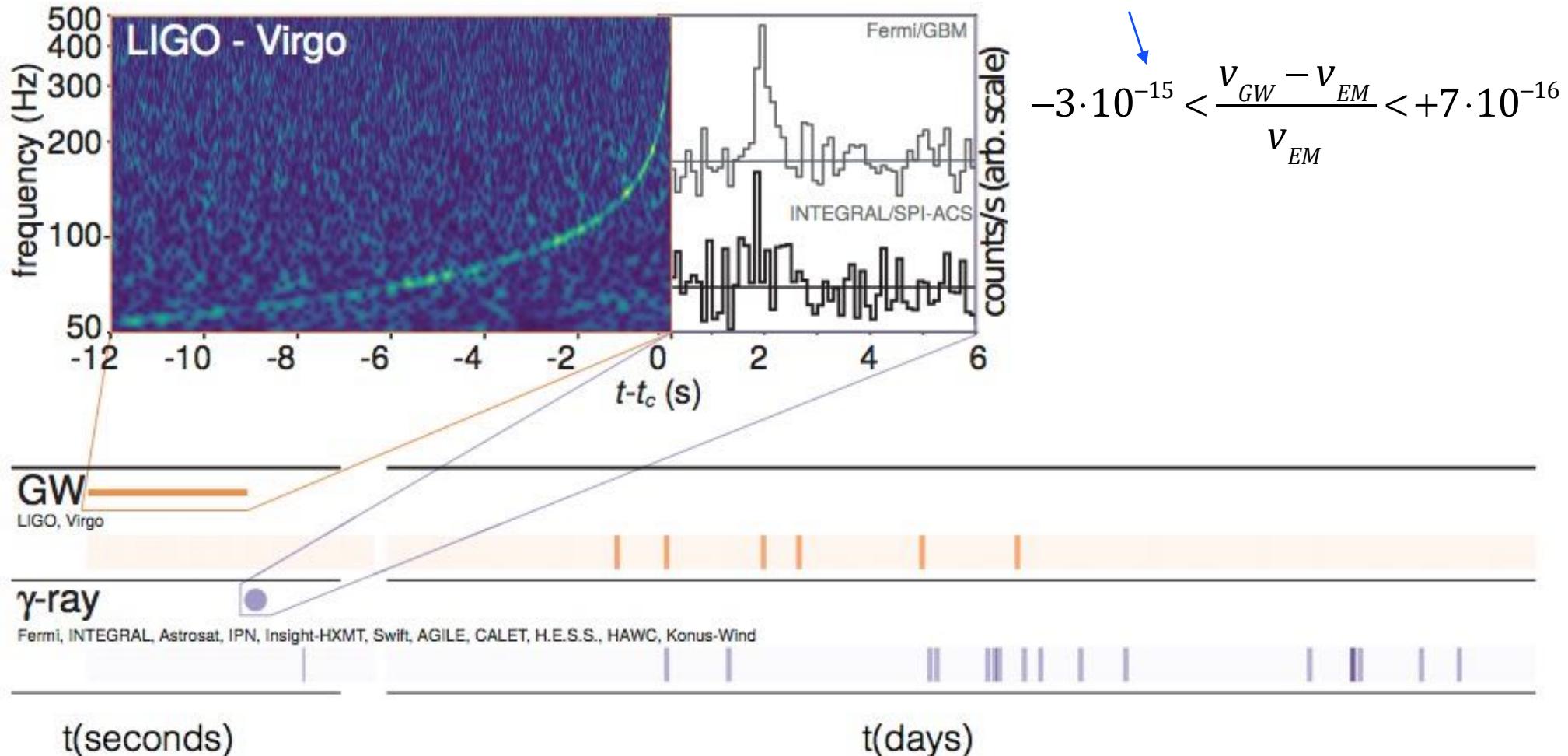
LIGOの重力波と
Fermi Gamma-ray Burst Monitorの信号



Astrophys. J. Lett. 848, L13 (2017)

$$L = 1.23 \times 10^{24} \text{ m}$$

$$\longleftrightarrow 1.734 \pm 0.054 \text{ seconds}$$

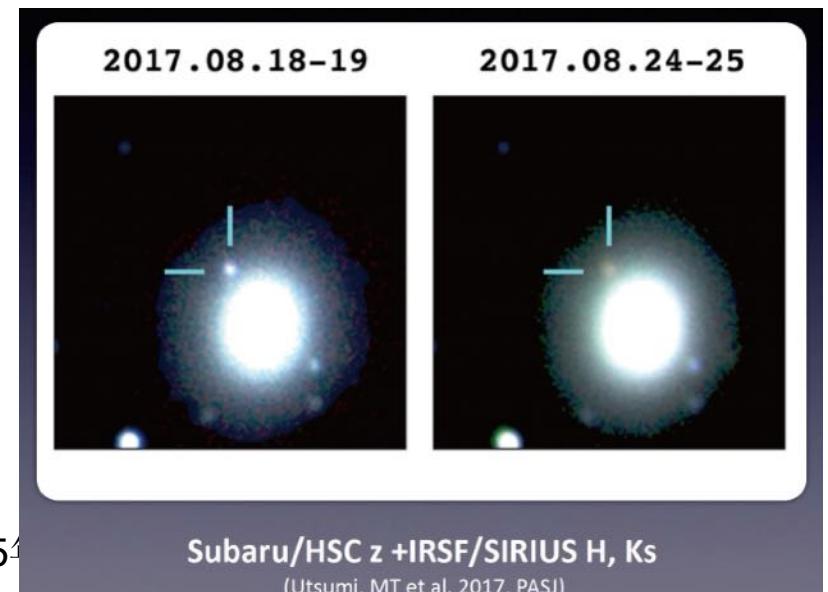
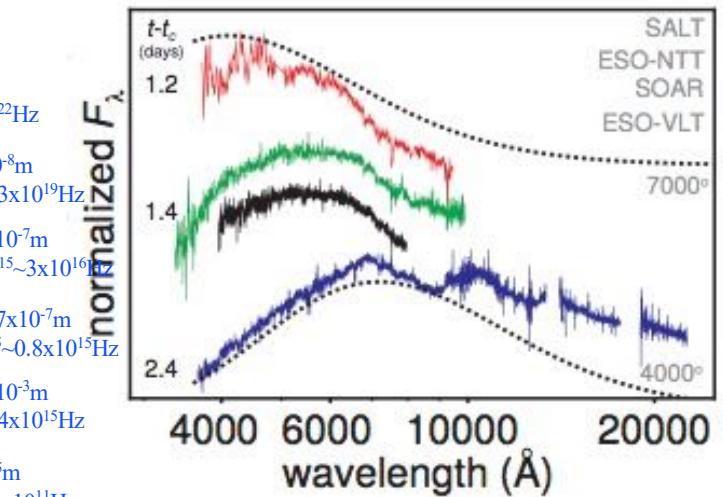
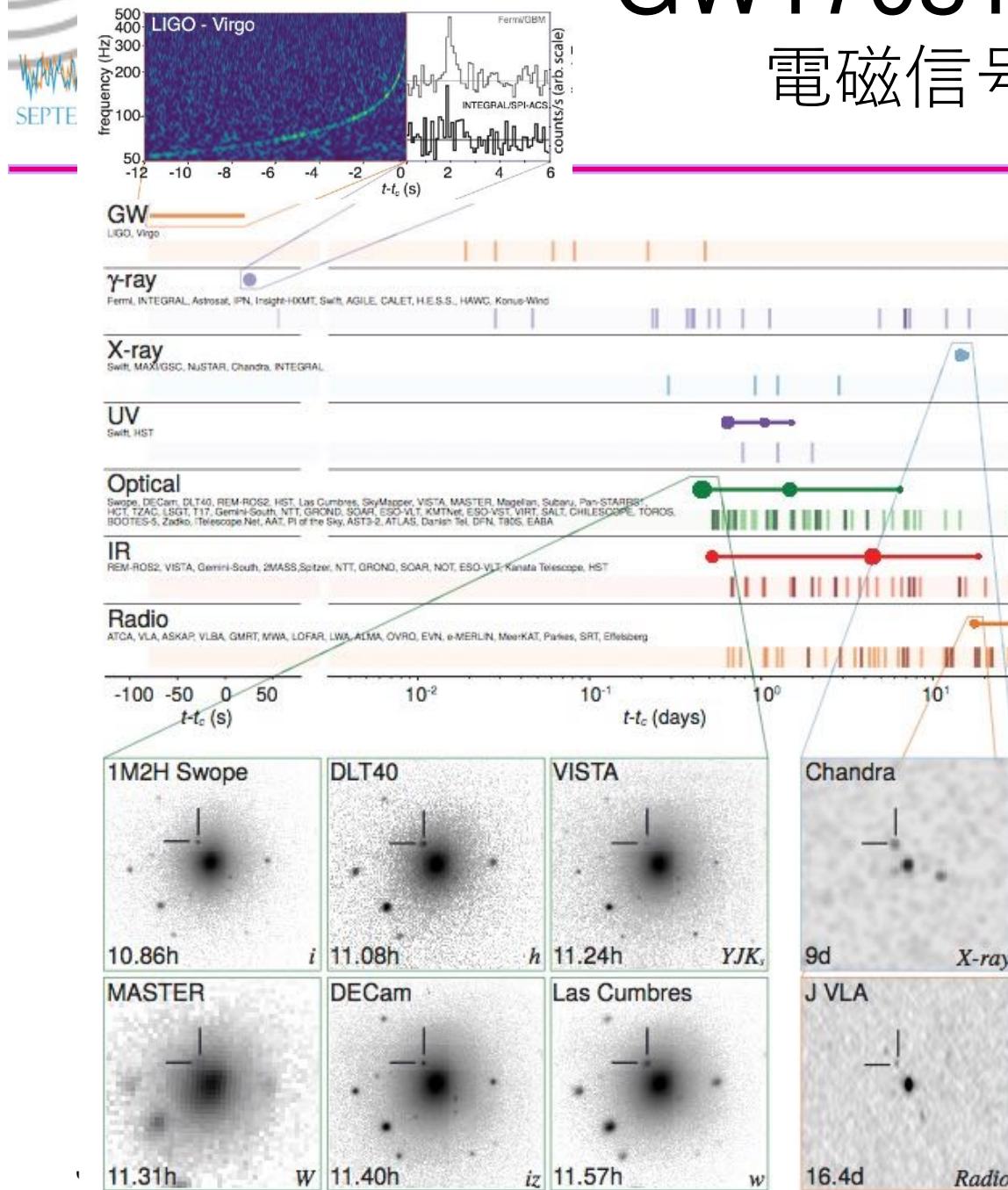




GW170817+GRB170817A

電磁信号による経過観測

Astrophys. J. Lett. 848, L12 (2017)



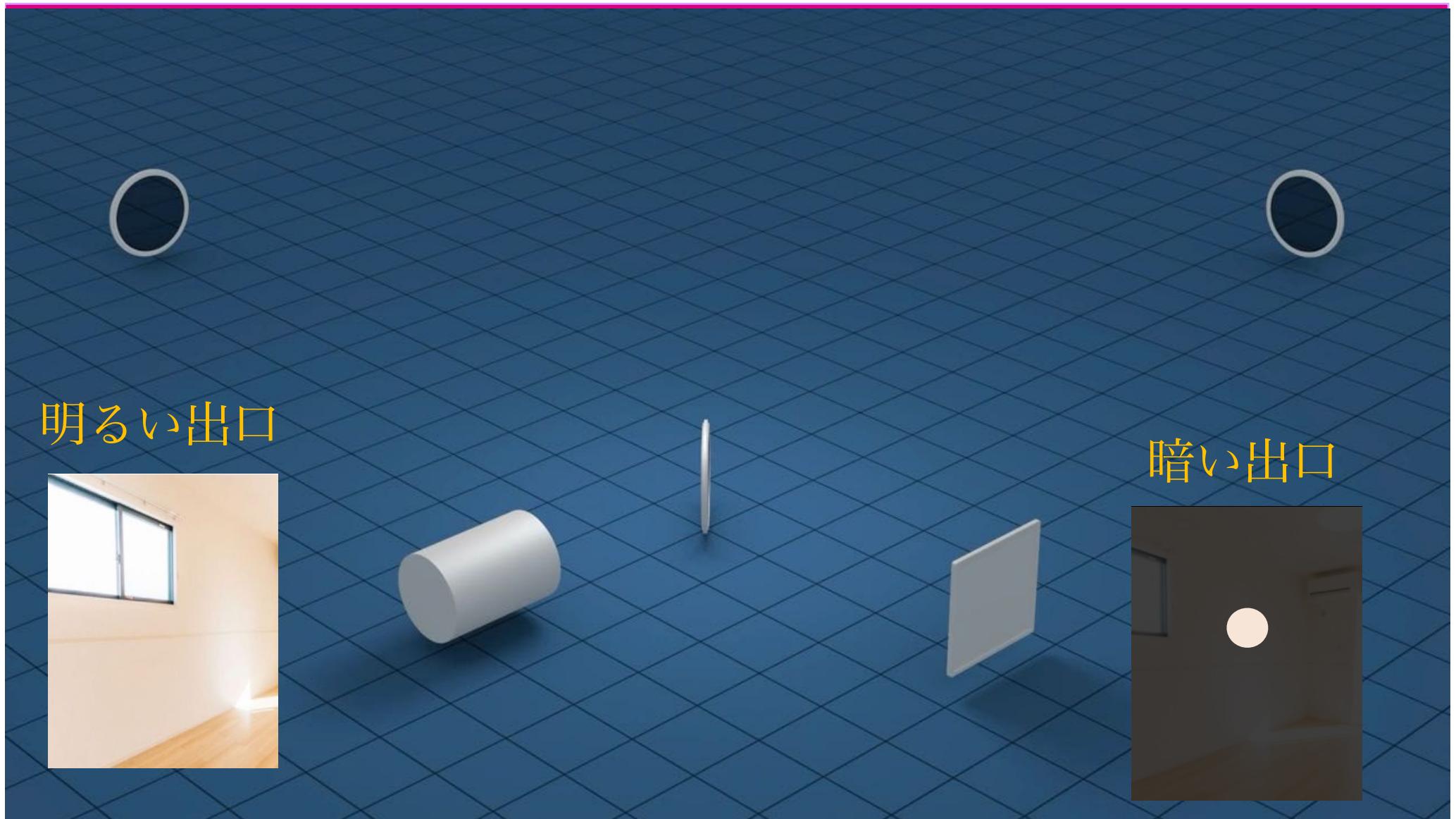


2017年8月17日に観測された 連星中性子星合体で放出された 重力波と電磁波信号



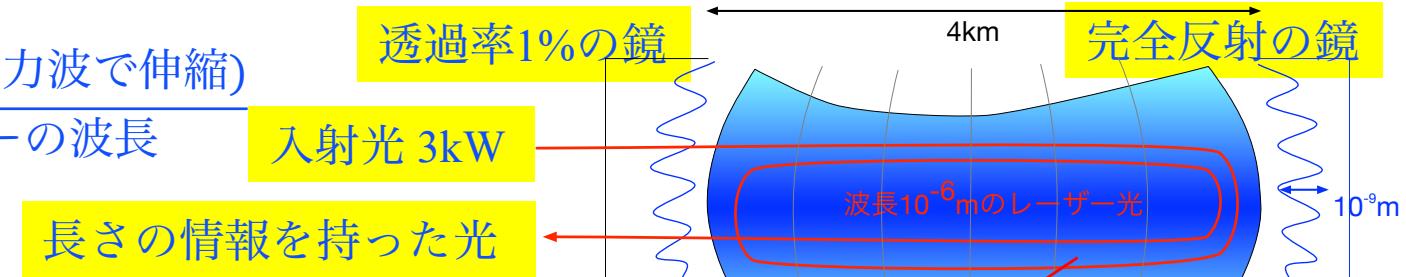
- 連星中性子星合体の初観測
 - » $(1.36\sim2.26)M_{\odot} + (0.86\sim1.36)M_{\odot} \Rightarrow (2.73\sim3.29)M_{\odot}$
 - » 40Mpc ~ 1.3億光年
- 重力波を起点とするマルチメッセンジャー天文学の始まり
- 連星中性子星合体とショートガンマ線バーストの関連
- 鉄より重い重元素合成を起こすr過程とそれに伴う合成された元素の放射性崩壊熱による電磁波放射（キロノバ）の観測
- 今までとは独立なハッブル定数の測定：
- 一般相対性理論の検証
 - » 重力波信号が、理論予言と1000サイクル以上で一致
 - » 重力波の速度と光の速度が 10^{-15} の精度で一致
 - » 等

干渉計を使った微小変化の測定

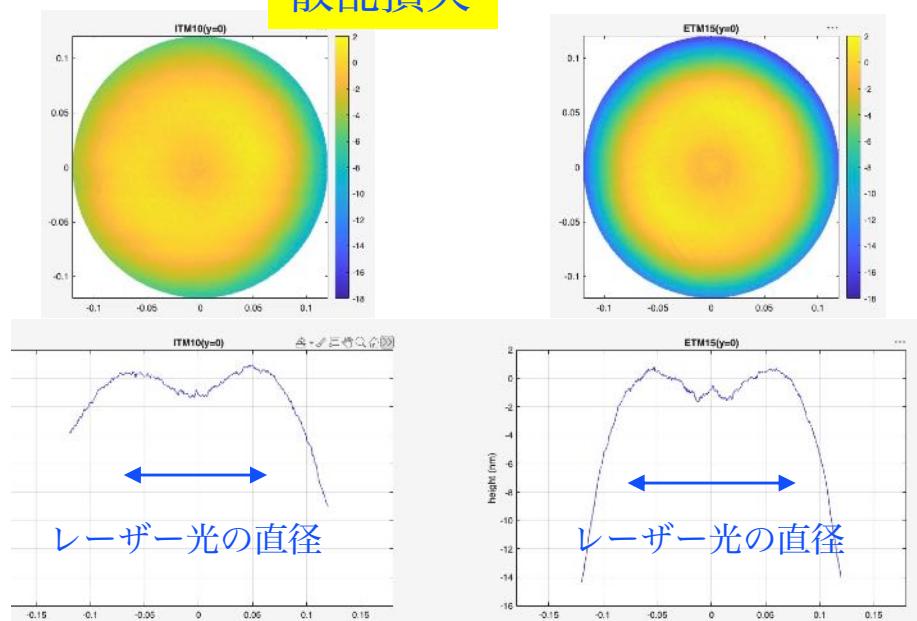


干渉計の腕の長さの測定精度

$$\text{反射光の位相} \sim \frac{\text{腕の長さ(重力波で伸縮)}}{\text{レーザーの波長}}$$



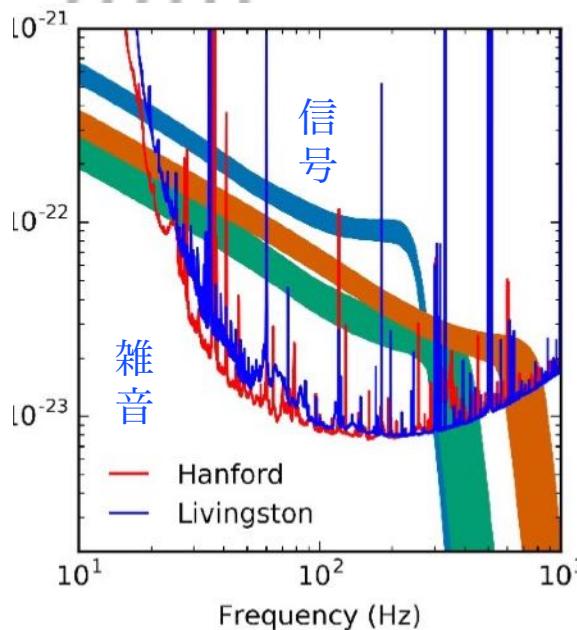
- 面偏光のレーザーを使って、反射光の位相に含まれる腕の光路長を測定する
- 腕の中に1MWのレーザー光 = 10^{25} 個の光子
- 一個の光子は、腕の中を～300回往復
- 位相のずれを使って光子1個が測れる長さの精度 $\sim 10^{-6} \text{ m} / 300$
- 多数の光子の情報を合わせると、統計的に $1/\sqrt{\text{光子の数}}$
- ⇒ 腕の長さの測定精度は 10^{-20} m
～水素原子の大きさの100億分の1
- 鏡の表面形状 ($\sim 10^{-9} \text{ m}$) は、腕の中に溜まるレーザー光の形と散乱ロスに影響するが、直接の長さの測定精度には影響しない



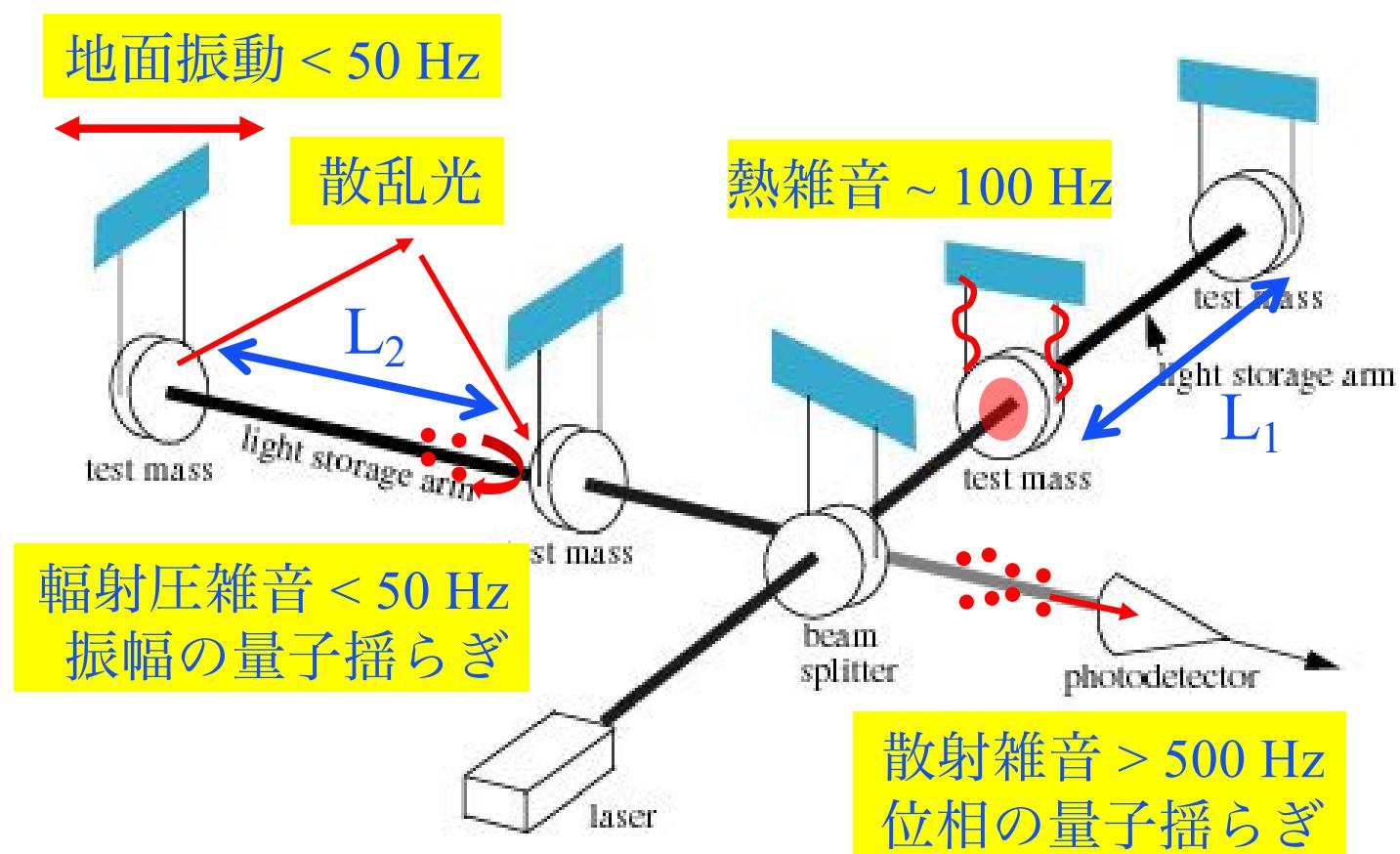


重力波干渉計の雑音

二つの腕の長さの差の厳密測定を妨げる要因



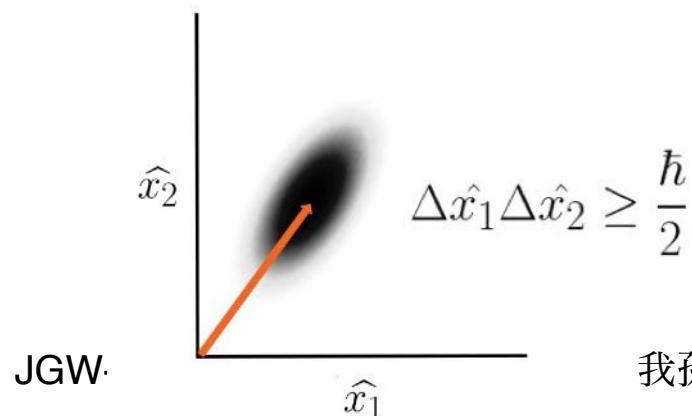
雑音源	雑音を下げるには
散射雑音	レーザーパワー
熱雑音	重い鏡、低温
地面振動	防振系、地震動
輻射圧	振動の不確実性を下げる
散乱光	非反射の壁



雑音源に対する改良

	iLIGO	aLIGO
レーザーパワー (腕内)	6W (15kW)	60W (300kW)
鏡の重さ	10kg	40kg
懸架系	一段振り子	4段振り子
量子雑音 (位相と振幅)		Squeezer
散乱光雑音		非反射の壁の追加

不確定性理論

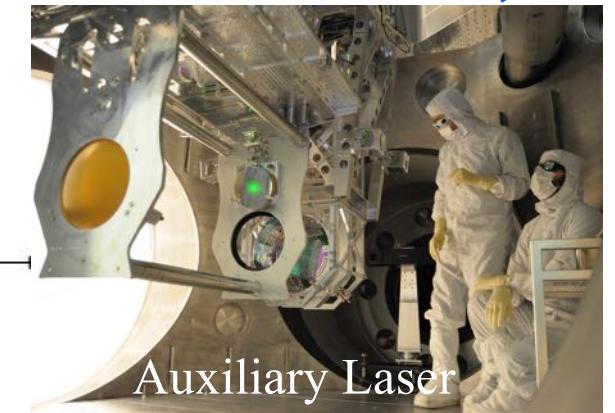
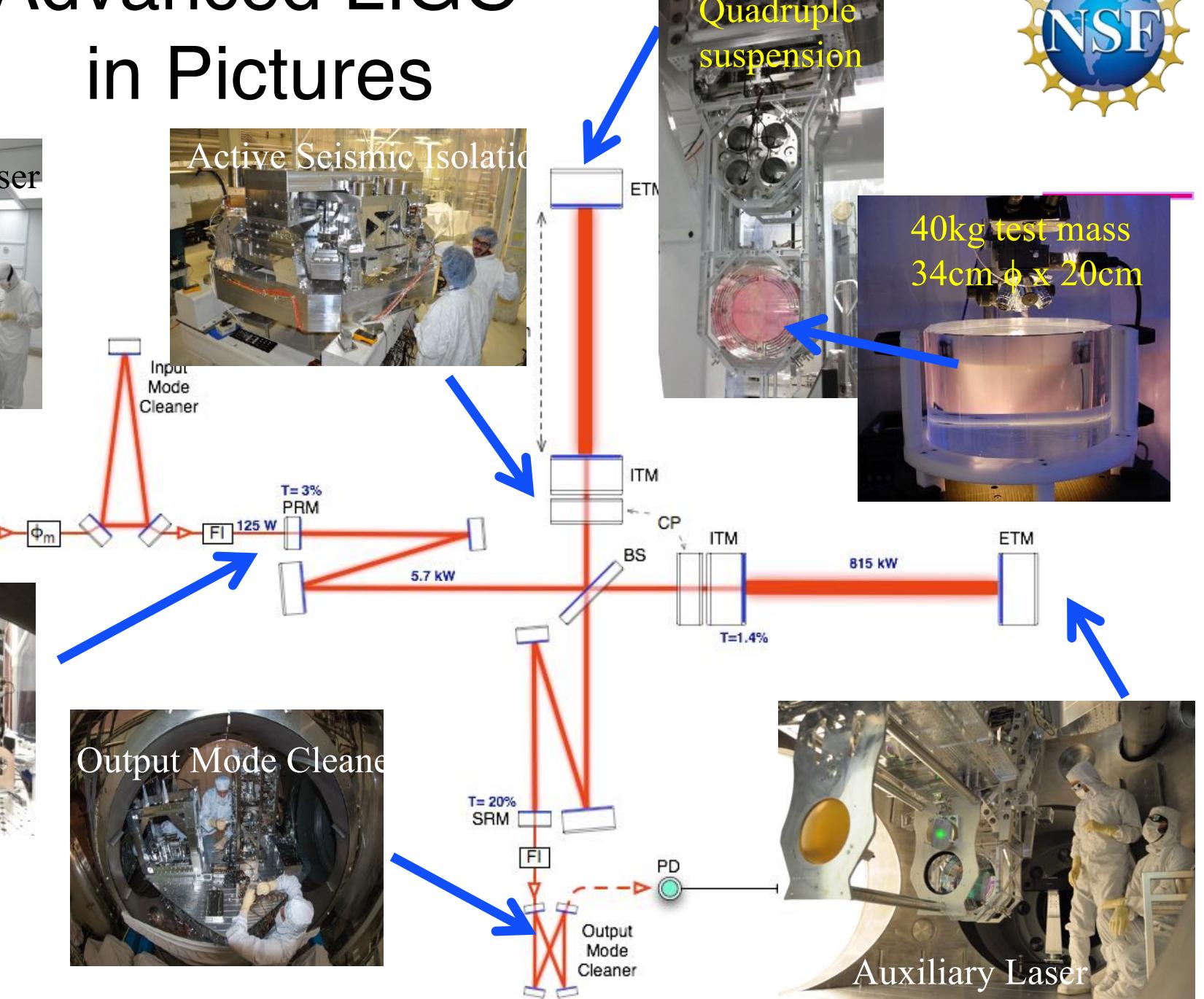
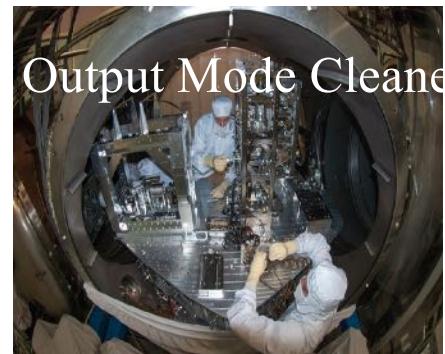
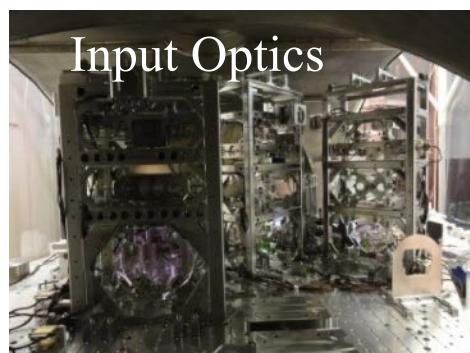
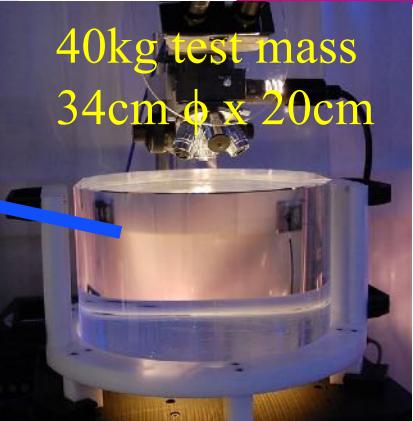
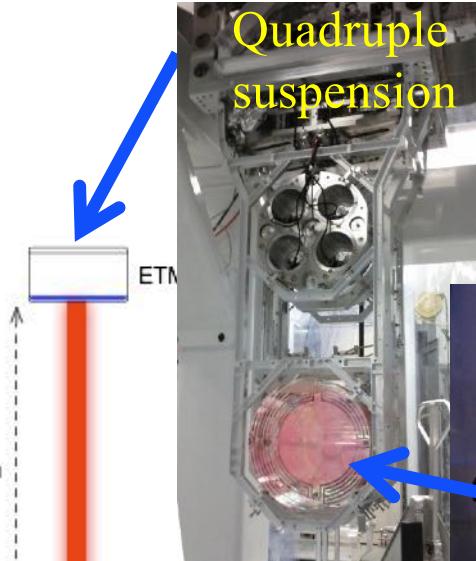


散乱光





Advanced LIGO in Pictures

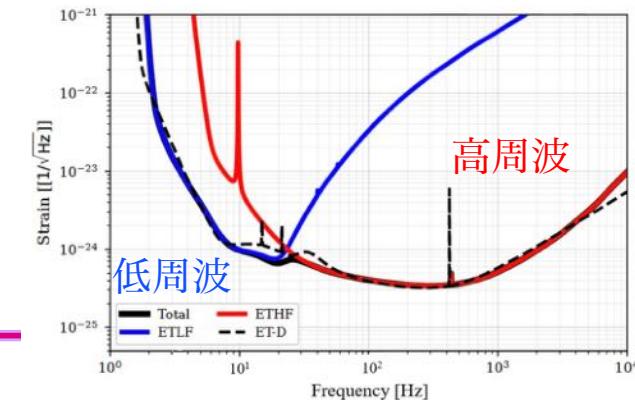




- 保守的な設計
- 稼働する事を重視
- 地表で常温

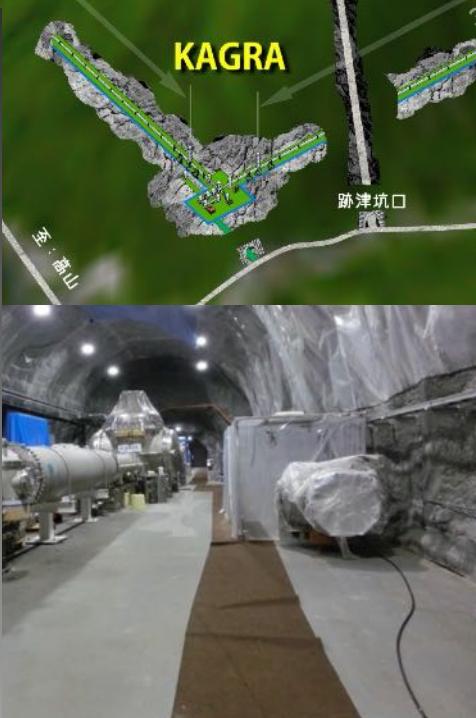
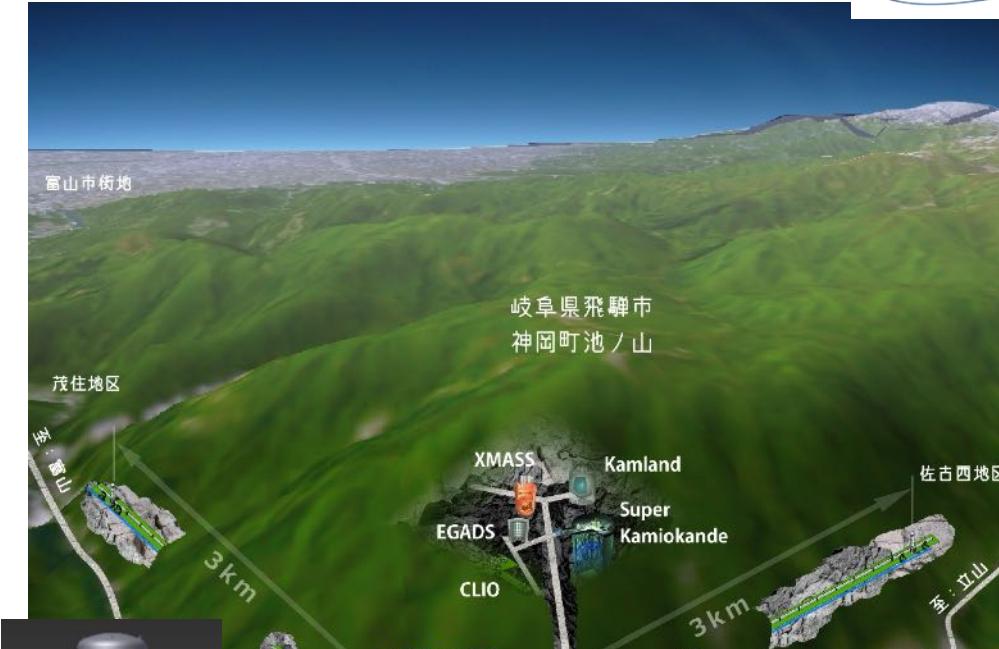
- 次の世代に向けての設計
- 地下で低温 ⇒ 雜音の低減

色々な干渉計



干渉計	場所	腕の長さ、様式	腕の温度	特徴
LIGO	アメリカ	4km FP	常温	保守的な設計
Virgo	イタリア	3km FP	常温	低周波に強い、高い8段振り子の防振計
KAGRA	日本	3km FP 地下	低温	地震動が静かな神岡鉱山の地下、熱雑音を抑える低温
GEO	ドイツ	600m Delay Line	常温	将来を目指した新技術の開発、aLIGOの技術の基礎
LIGO-India	インド	4km FP	常温	aLIGOのコピー、LIGOと同じ感度の干渉計が離れた場所にある事で、重力波源の特定
Cosmic Explorer	アメリカ	40km,20km FP	常温	保守的な設計、10倍の感度で宇宙の果てまで見る
Einstein Telescope	？イタリア オランダ ドイツ	三角形の10km FP 地下	低温と常温	低周波に特化した低温干渉計と高周波に特化した常温干渉計

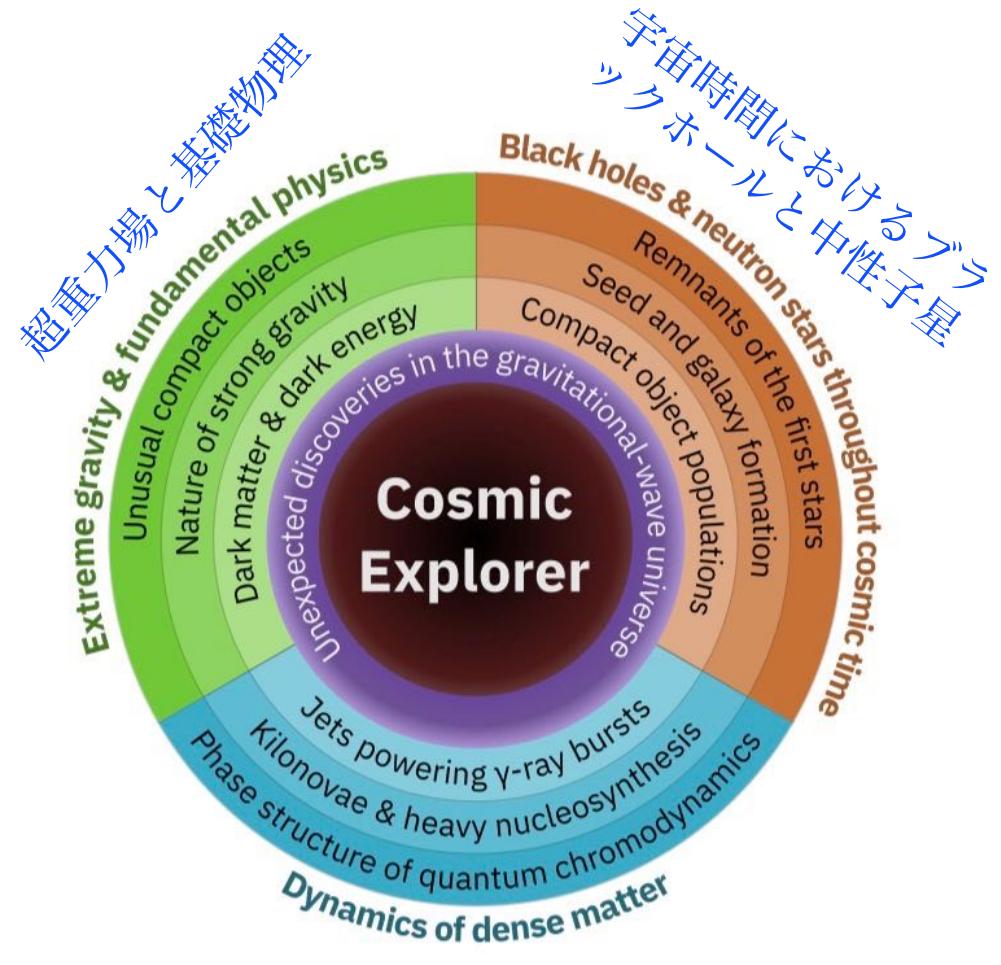
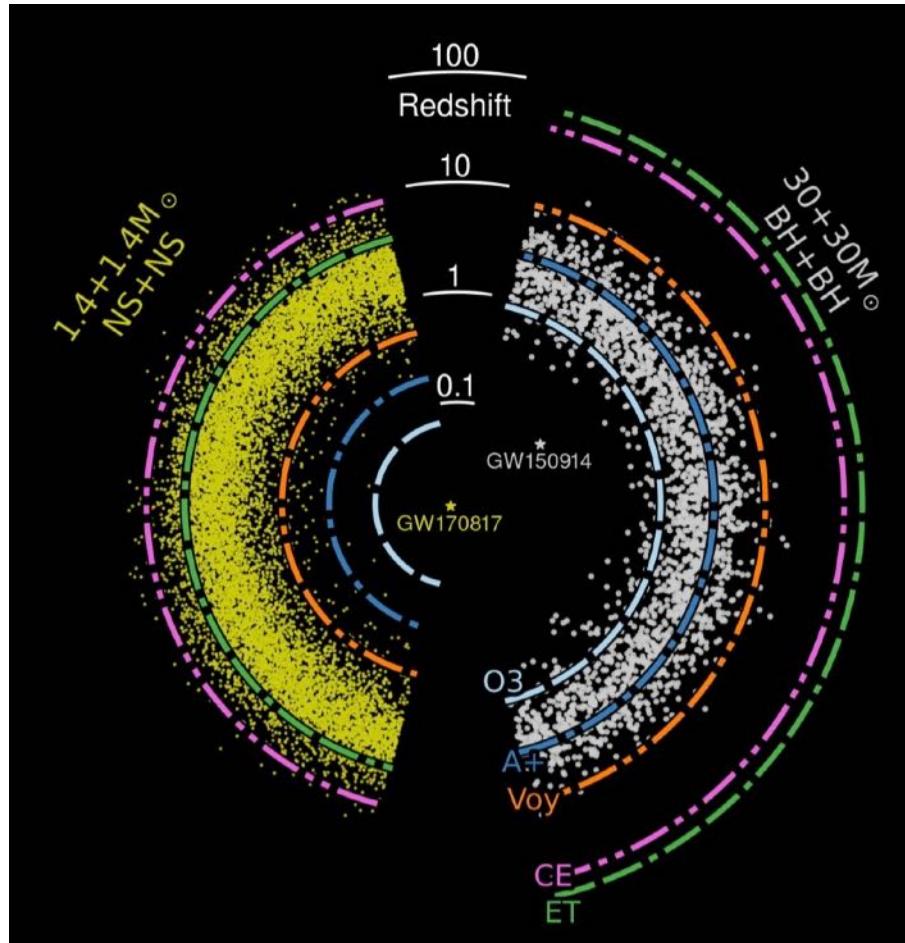
- 東大宇宙線研を中心に、高工研、天文台等100余りの研究機関が参加
- 韓国台湾中国等、国際的プロジェクト
- 岐阜県飛騨市神岡鉱山（ニュートリノ測定器カミオカンデの側）
- 3キロの基線長の干渉計
- 地下に作る事と高い防振装置を採用する事で地面震動の影響を軽減
- 鏡を低温にする事で熱雑音を軽減
- 2023年末からLIGO、Virgoの重力波観測ネットワークに参加



観測限界と物理



<https://arxiv.org/abs/2109.09882>



Cosmic Explorer Timeline

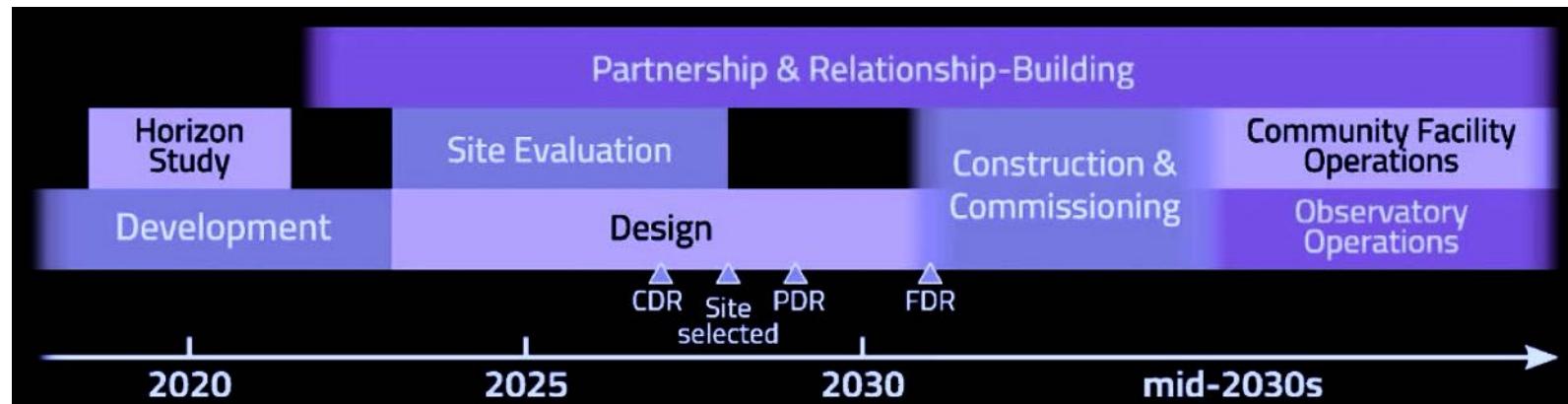


Stefan Ballmer @ 2025 LVK

- Plan for Project evolution

- Conceptual Design (3+years)
- Preliminary Design ~\$75M (2-3 years)
- Final Design ~\$100M (2 years)
- Construction ~\$1-2B (5 years)
- Operations ~\$60M / year (50 years?)
- Decommissioning/Divestment

LIGO A#	Cosmic Explorer
4 km long arms	40 km and maybe 20 km long arms
1.5 MW arm power	1.5 MW arm power
10 dB frequency dependent SQZ	10 dB frequency dependent SQZ
100 kg fused silica test mass	440 kg fused silica test mass
Redesigned QUADs, 160 cm total length, 400 kg total mass, 1.6 GPa fiber stress	Nominally QUADs, 4 m total length, ~2000 kg total mass, 1.6 GPa fiber stress
2× reduction in CTN over A+ coating goal	A+ coating goal
Improved seismic isolation	Improved seismic isolation
2× suppression of Rayleigh wave Newtonian noise	10× suppression of Rayleigh wave Newtonian noise

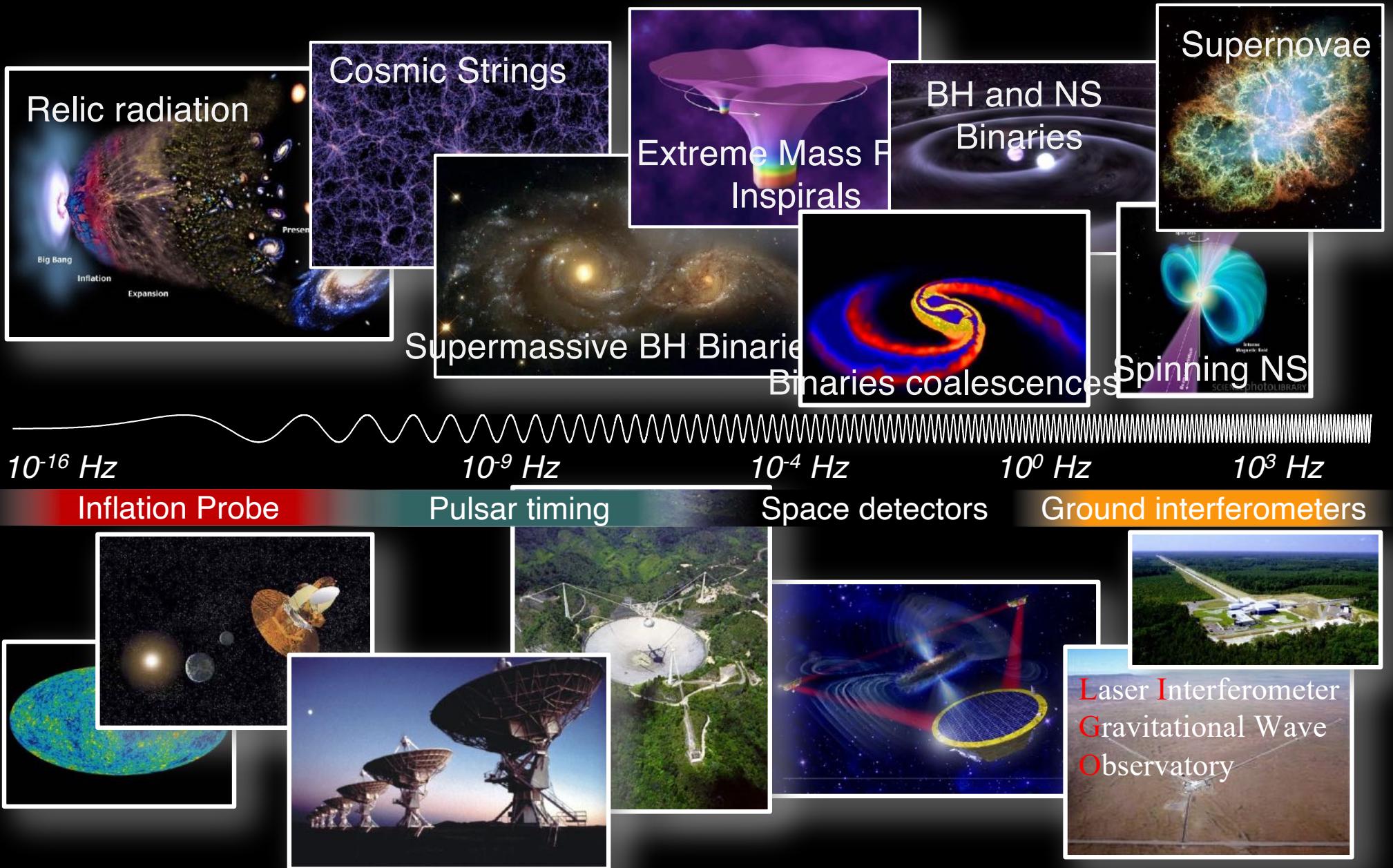


NSF RIG: https://www.nsf.gov/publications/pub_summ.jsp?ods_key=nsf21107

仕様場所についての認識

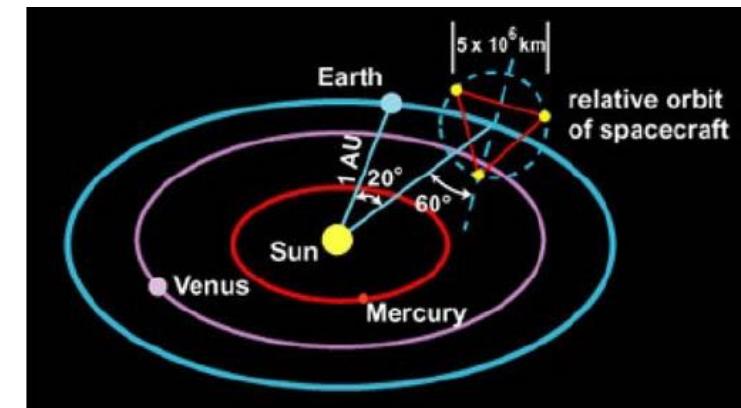
Consmic Exploerer チームは、土地や水や空と、そこに住む人々の間の固有のつながりを認識しています。私たちは、これらの場所を今迄大切にし、今も大切に守り、これからも守り続ける先住民コミュニティとのつながりとパートナーシップを育むことを約束します。私たちは、科学を行うやり方とそれが土地やそこに住む人々に及ぼす影響について責任がある事をしっかりと認識しています。

The Gravitational Wave Spectrum



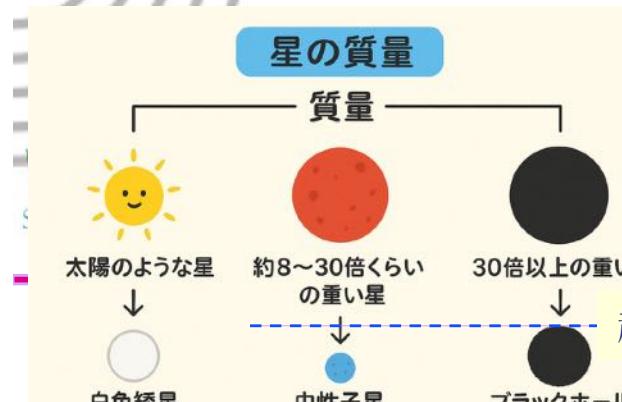
おわりに

- 大勢の人達の100年にわたる努力で、やっと宇宙のざなみを聞く事が出来ました。
- 地上の干渉計の改良と、新たな宇宙に浮かべる干渉計で、もっと面白い事探る事が出来ます。
- 400年前、ガリレオが開いた光を使った天文学に、今それに相当する様な大きなページが追加されました。今まで白黒画像で見ていた夜空を、総天然色で楽しむ事が出来る様になるでしょう。



End of slides

ブラックホールと中性子星 重さと大きさ



M_{\odot} : 太陽の重さ = 2×10^{30} kg = 地球の33万個

	質量	半径	R_s	備考
太陽	2×10^{30} kg ~ 地球の33万倍	70万km ~ 地球の109倍	3km	水素とヘリウム
白色矮星	$0.6 \sim 2.4 M_{\odot}$	6千~1万km	~2km	炭素と酸素
中性子星	$1.2 \sim 2.0 M_{\odot}$	10~12km	4.2km	中性子 電荷は0で、陽子より少し重く、時間がたつと、陽子に崩壊

7 M_{\odot} のブラックホール

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

ブラックホール

ボールを上に投げ上げた時、星の大きさが小さいと、どんなに強く放り上げても、強い重力で引き戻される

$$F = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

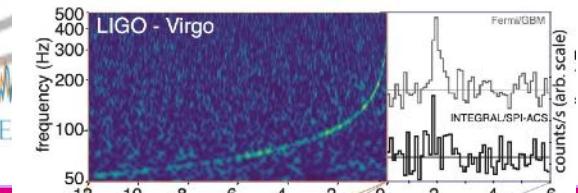
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

シュワルツシルド半径

G : 重力定数 $6.7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

ブラックホールの種類	質量 (太陽質量)	半径 (おおよそ)	備考
恒星質量 BH	3 ~ 10	9 ~ 30 km	超新星の残骸など
中間質量 BH	$10^3 \sim 10^5$	3,000 ~ 300,000 km	星団中心など
超大質量 BH	$10^6 \sim 10^{10}$	3百万 ~ 300億 km	銀河中心 (例 : Sgr A*、M87*)

LIGO



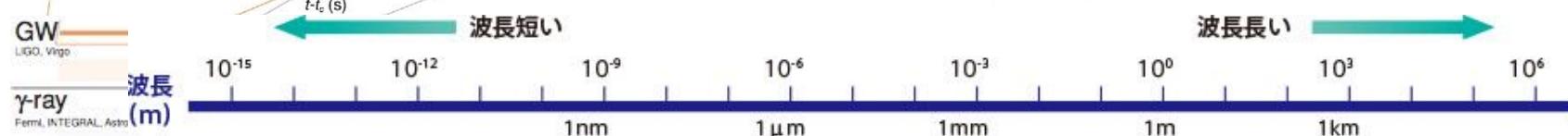
1.7秒

重力波信号名 ガンマ線バースト信号名 GW170817+GRB170817A

電磁波信号を使った詳細な探求



Astrophys. J. Lett. 848, L12 (2017)



X-ray
Swift, MAXI/GSC, NuSTAR

UV
Swift, HST

Optical
Swope, DECam, DLT40, HST, T2AC, LSST, T17, BOOTES-5, ZTF, Telit

IR
REDS-ROS2, VISTA, Ge

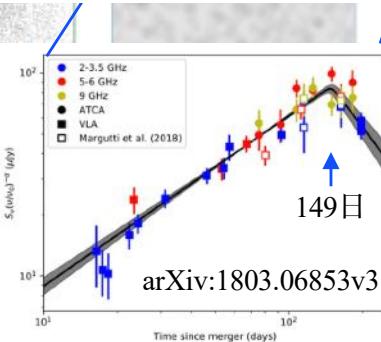
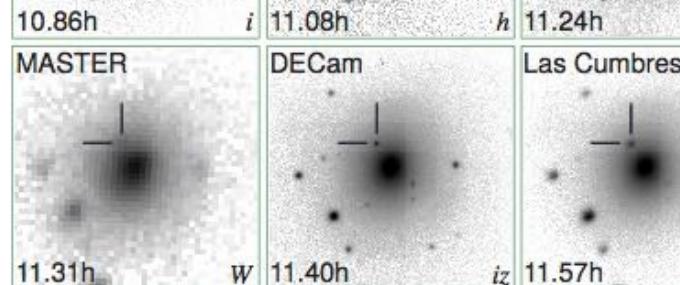
Radio
ATCA, VLA, ASKAP, VLBI

-100 -50
 $t - t_c$

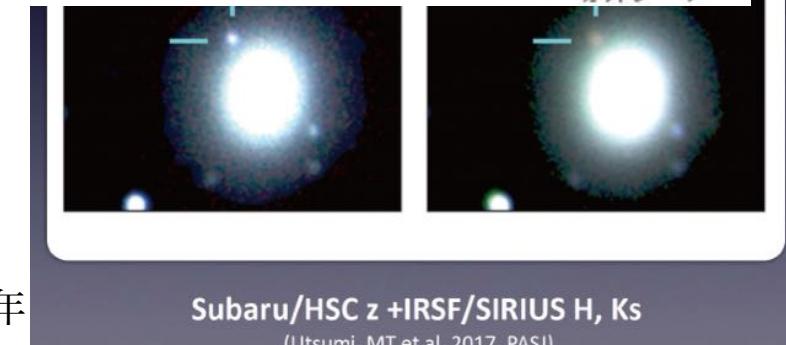
1M2H Sw



ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社
<https://www.sony-semicon.co.jp/>



25年





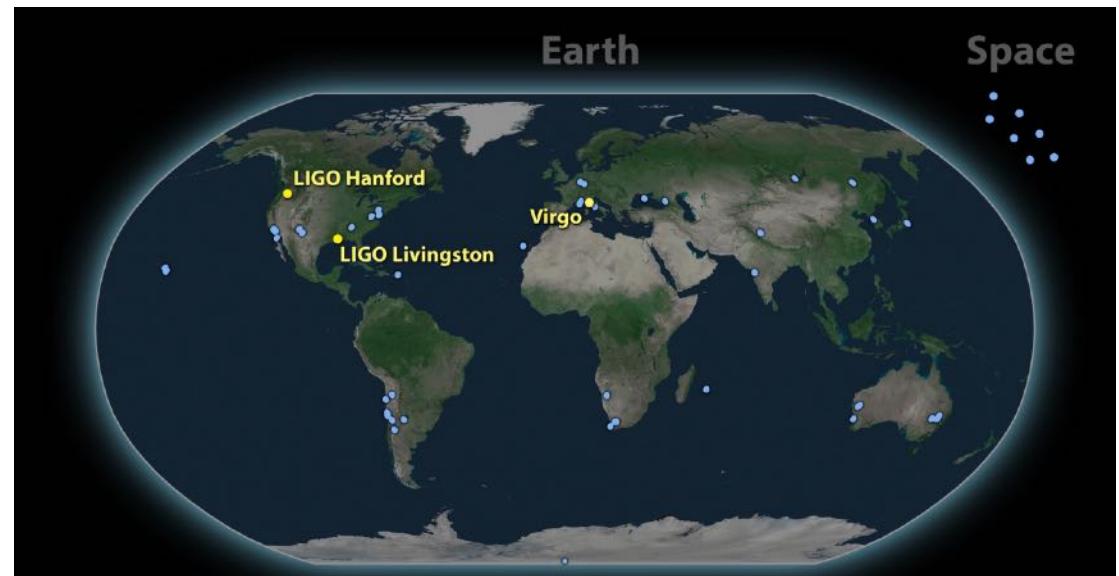
始めての中性子星合体からの重力波



2017年8月17日

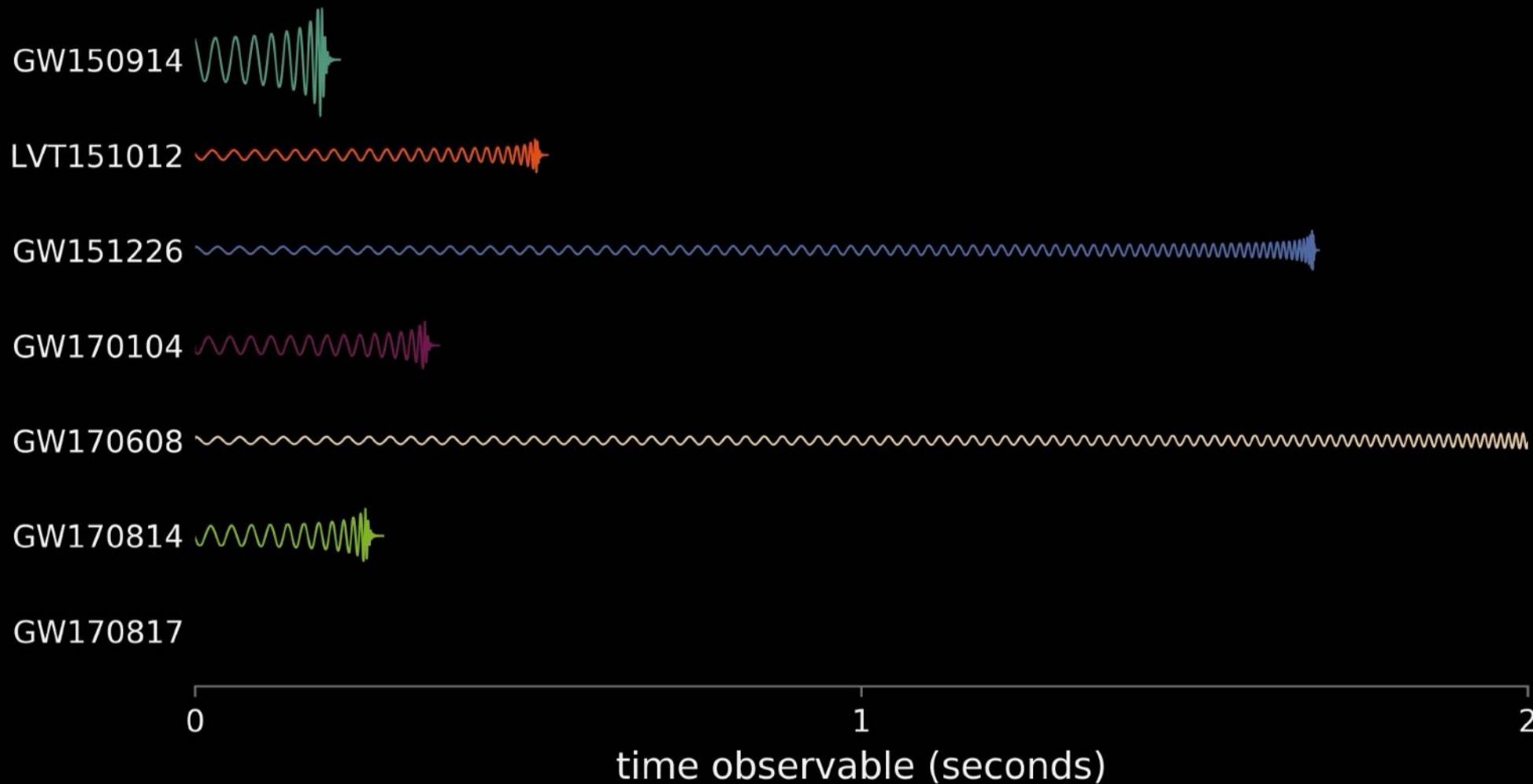
マルチメッセンジャ一天文学の夜明け

- マルチメッセンジャ一天文学とは：電波、重力波、荷電粒子、ニュートリノを使った天文現象の観測と解析
 - » 400年前にガリレオが望遠鏡を使って夜空を見て、光を使った天文学が始まった。
- GW170817
 - » 中性子星合体からの重力波と電波
 - » LIGO、Virgoは90以上のグループと覚え書きを交換して、この観測に備えた。
- IceCube-170922A
 - » ブレーザーからのニュートリノと電波

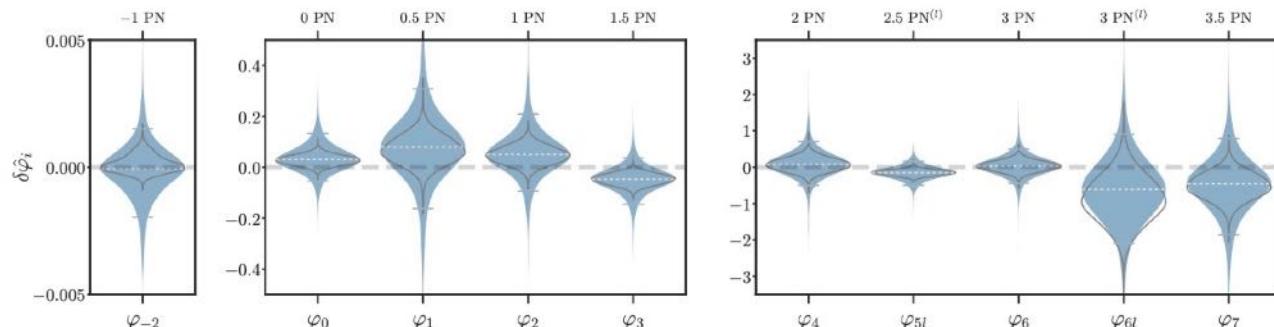




中性子星対合体 (GW170817) と ブラックホール対合体 軽く小さいから、小さい信号を長く出し続ける



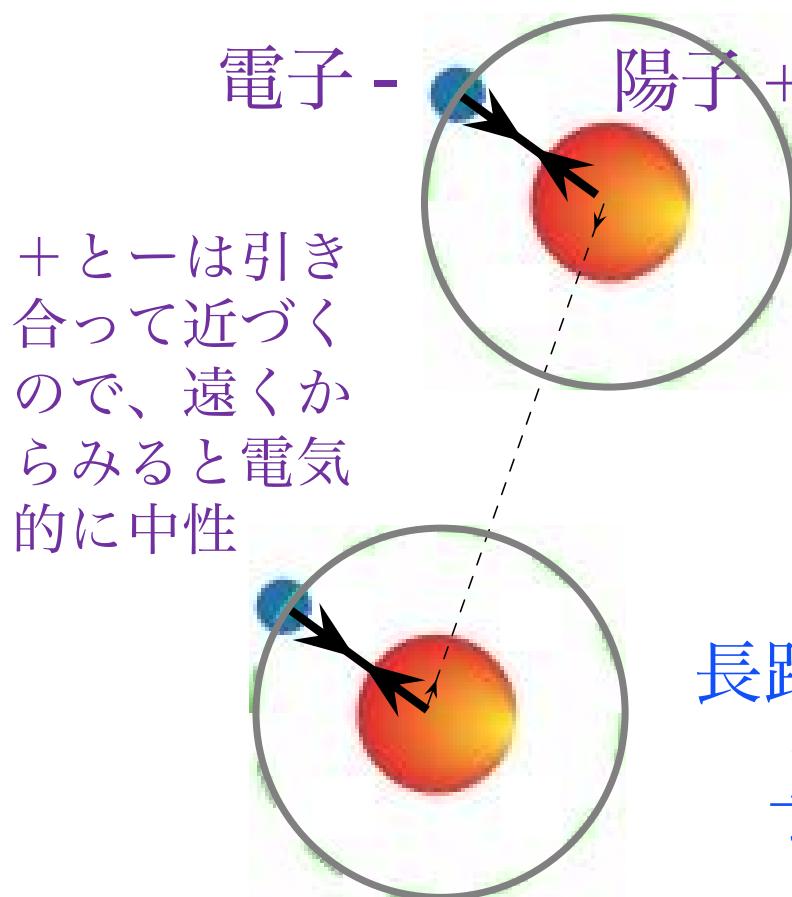
- 一般相対性理論の予言する重力波の直接観測
- 連星ブラックホールの分布とその結合過程
- ブラックホールの質量と自転の速さと向き
- 宇宙論的情報
 - » 宇宙の膨張率 : ハッブル定数
- 一般相対性理論の検証
 - » 重力波の伝搬速度 : $v_g/v_c = 1 \pm 10^{-15}$
 - » ニュートン近似からのずれ



とても弱い重力が、宇宙では一番大事

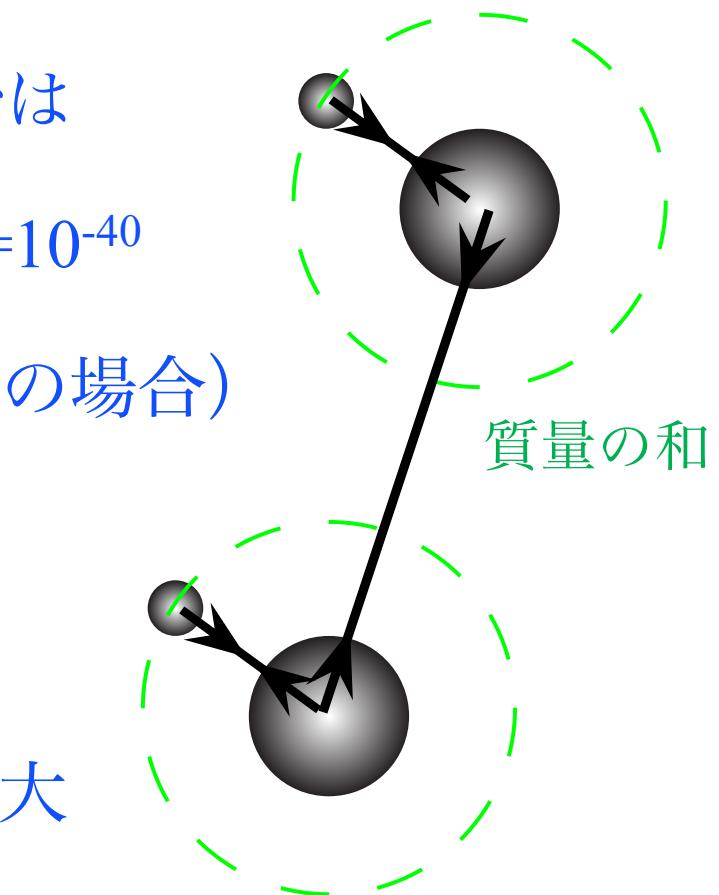
電気の力～電荷の積 / 距離の二乗

重力～重さの積 / 距離の二乗



短距離では
 $\frac{\text{重力}}{\text{電気}} = 10^{-40}$
 (水素原子の場合)

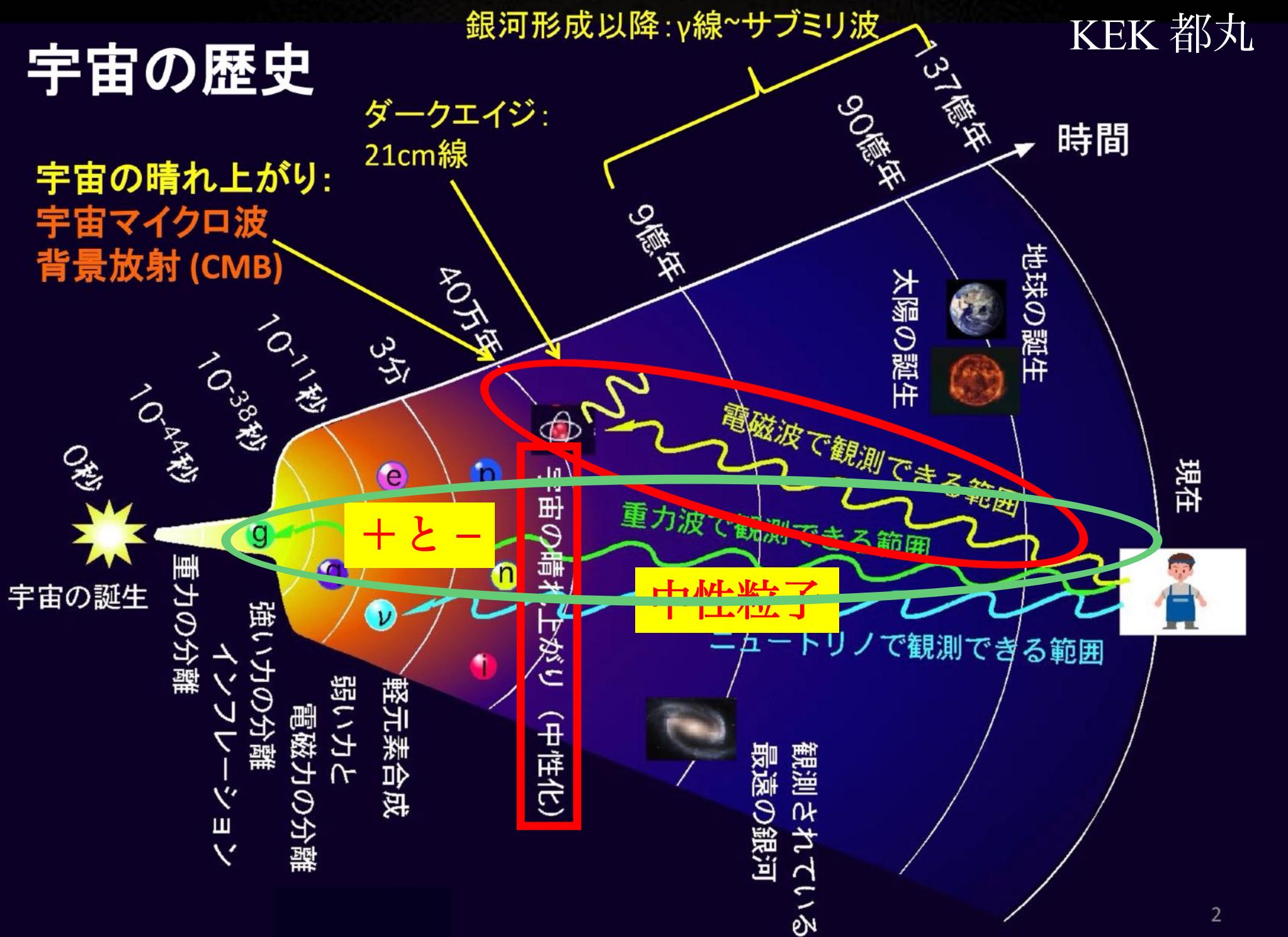
長距離では
 $\frac{\text{重力}}{\text{電気}} = \text{無限大}$

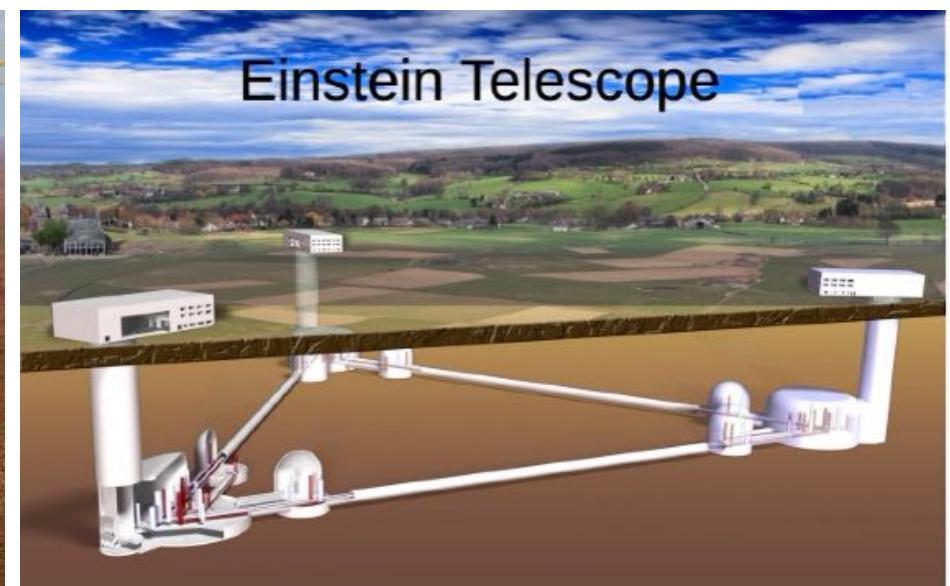
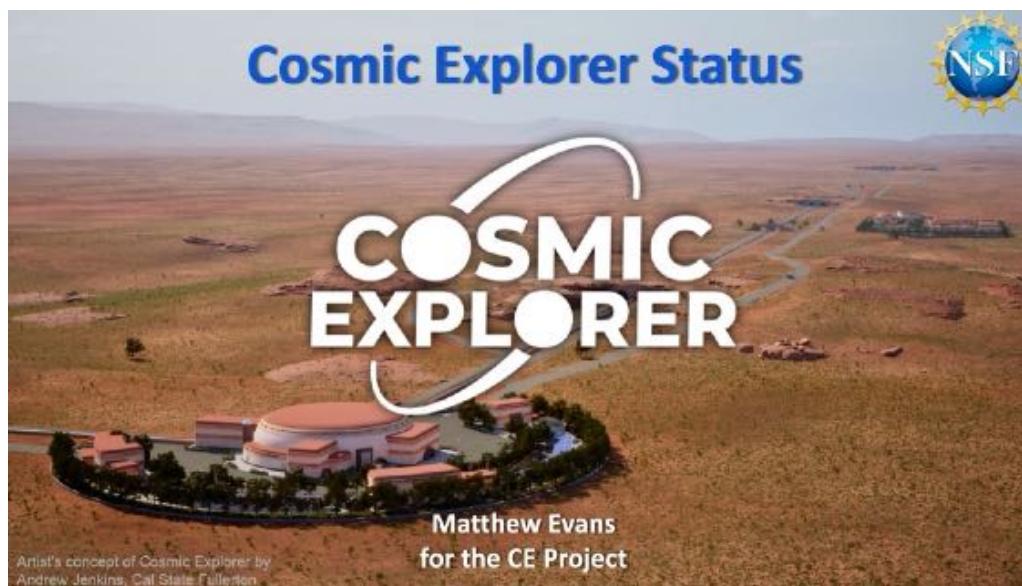


宇宙の歴史

銀河形成以降: γ 線~サブミリ波

KEK 都丸





How to detect small variation?

Basic idea

