

文部科学省と国立大学附置研究所・センター 個別定例ランチミーティング

第118回 東京大学 宇宙線研究所 (2025.6.6)

12:05 – 12:10(5分) : 宇宙線研究所の概要
所長 荻尾 彰一

12:10 – 12:25(15分) : 「 大型低温重力波望遠鏡KAGRAと重力波観測の最前線 」
宇宙基礎物理学研究部門
准教授 牛場 崇文

12:25 – 12:45(20分) : 質疑応答

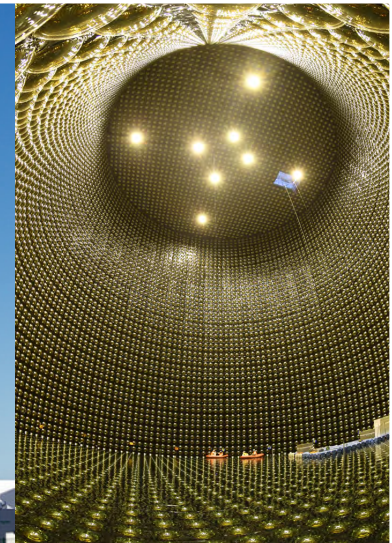
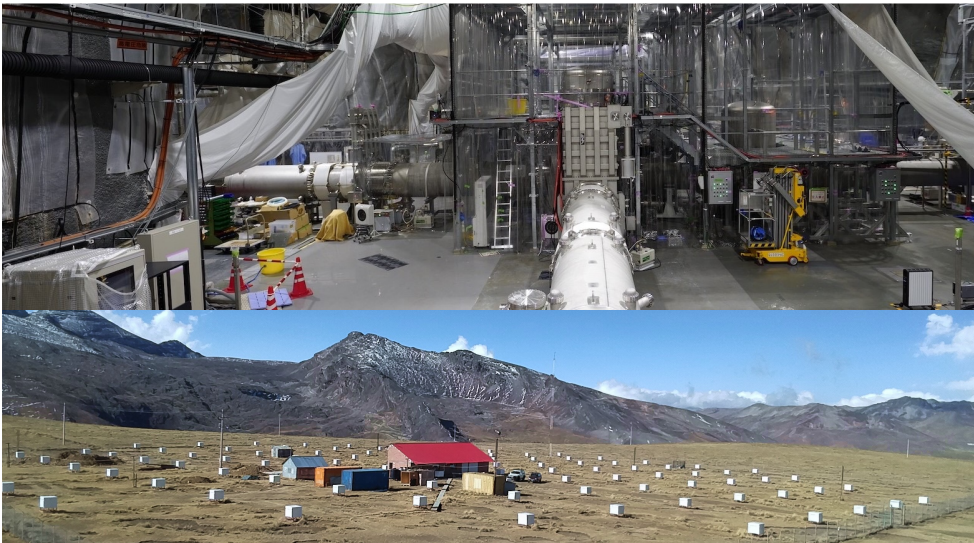
東京大学宇宙線研究所の概要

宇宙線物理学における世界の中核機関

宇宙線・ガンマ線・ニュートリノ・重力波研究などを国際的な共同利用・共同研究体制により推進



宇宙線国際研究拠点



宇宙線研究所：宇宙線物理学における世界の中核機関

ミッション

宇宙からのさまざまな「メッセンジャー」を観測する多角的な手段と理論的研究の両方を駆使し、激烈な天体現象、宇宙の進化、など宇宙の謎を解明するとともに、宇宙を支配する物理学の基本法則を研究することで、世界をリードする。

宇宙線研究拠点の重要性

大型国際共同研究を主体として運営し、研究者の国際的規模の協力、全世界的な研究グループの編成、世界的な積極的人的交流、次世代研究者の育成に寄与し、学術研究の発展に貢献する。

沿革

1950年 乗鞍岳に宇宙線観測施設「朝日の小屋」設置
1953年 東京大学宇宙線観測所となる
(我が国初に全国共同利用施設)
1976年 東京大学宇宙線研究所となる
1983年 神岡地下観測所設立、カミオカンデ実験開始
1996年 スーパーカミオカンデ実験開始
1997年 チベット $As\gamma$ 実験開始
2000年 柏キャンパスに移転
2008年 テレスコープアレイ実験開始
2018年 CTA大型望遠鏡1号機完成
2020年 KAGRA 運転を開始
2021年 ハイパーカミオカンデ着工

組織

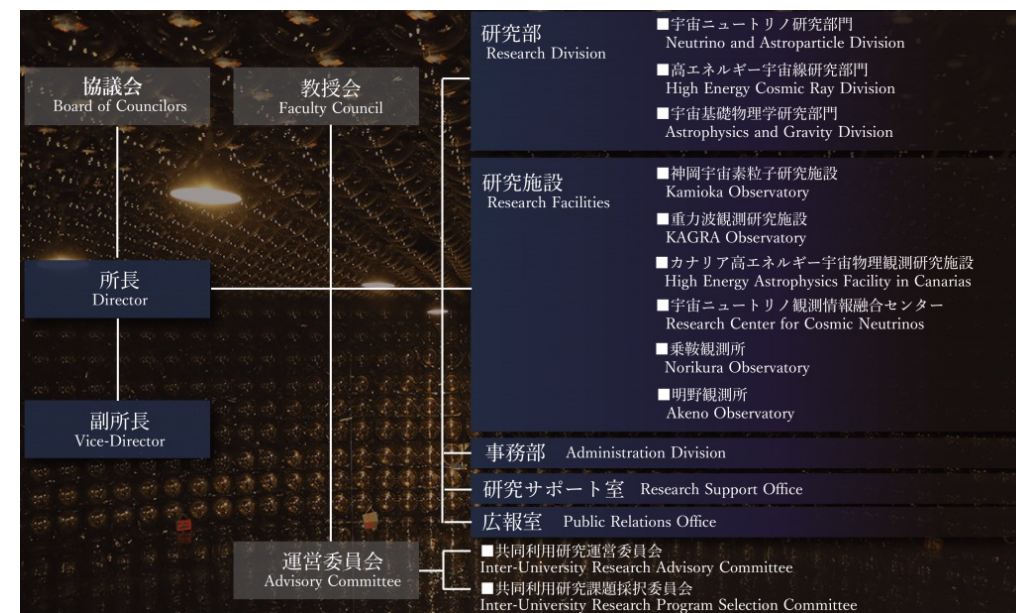
教職員：約160名

【教授13、准教授16、助教31(2)<5>、研究員17(2)<5>、技術職員7(1)、事務職員26(8)、非常勤職員49(37)】2024年4月1日現在、
()内は女性、<>内は外国人(それぞれ内数)

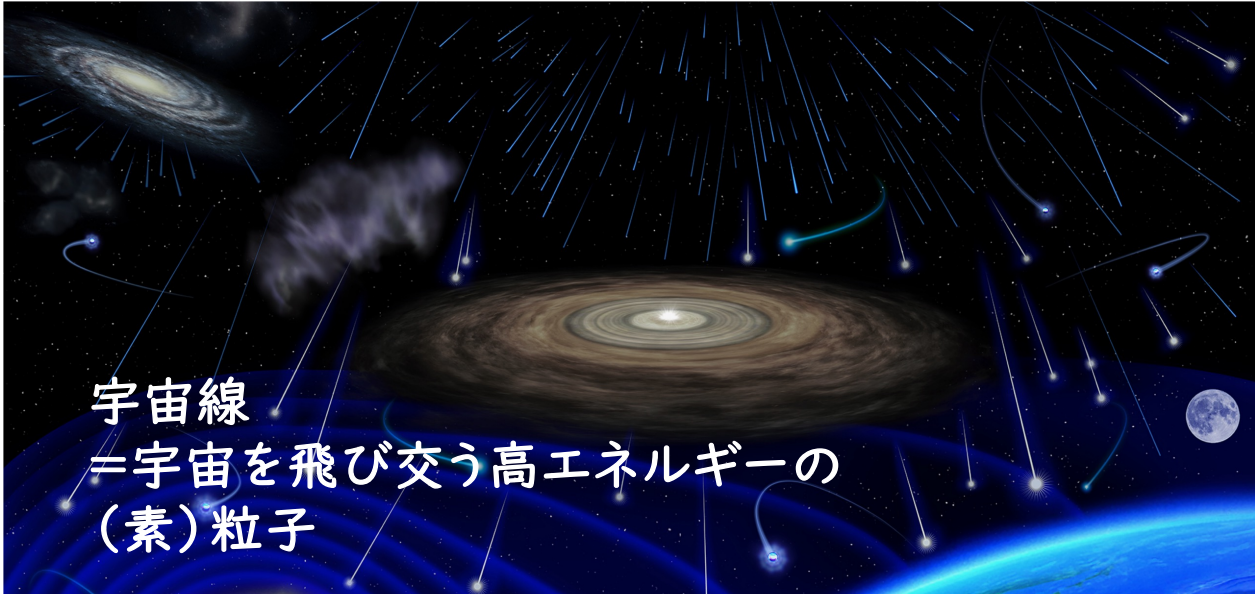
大学院生：48名(3)

【博士課程26(3)、修士課程22(0)】

協議会、運営委員会などを通じて国内外の研究者コミュニティとの密接な連携によって組織運営されている。



宇宙線



宇宙線
=宇宙を飛び交う高エネルギーの
(素)粒子



狭義には
電荷を持った(素)粒子を指す言葉だが...

宇宙線は宇宙を飛び交う高エネルギー（一粒あたりのエネルギーは可視光の一粒（=光子）の100億倍以上）の（素）粒子。主成分は水素原子核（=陽子）で、1912年に発見された。

宇宙線研究所は宇宙からのさまざまな形態の放射を広い意味の「宇宙線」と定義して、宇宙からのさまざまな「メッセンジャー」を検出し、ブラックホールなどが関係した宇宙の高エネルギー現象の研究、宇宙を支配する基本法則の研究で世界をリードする。

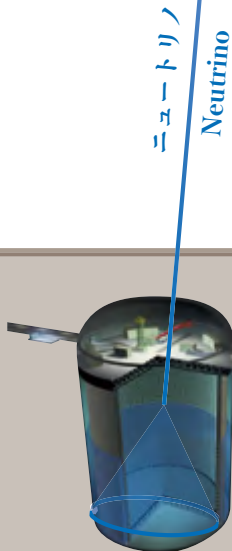


宇宙からのさまざまな形態の放射
=宇宙からの「メッセンジャー」

さまざまなタイプの宇宙線と検出原理

ニュートリノ Neutrino

超新星爆発や太陽などの星の中、地球の大気や内部など、さまざまなところで生じる素粒子。人も地球も何でもすりどおり抜けて、ほとんどは宇宙の遠くへ飛び去る。



水チェレンコフ望遠鏡

暗黒物質 Dark matter

現在知られている物質では説明できない正体不明の物質。まだ直接検出されたことがない。宇宙に存在すると計算される物質の大半を占めている。

地下



暗黒物質検出装置

重力波 Gravitational wave

アインシュタインの相対性理論によって提唱された時空の波。重たい天体やブラックホール同士の合体や超新星爆発など、時空が急激に変化するとき大きな波が生じる。



重力波検出装置

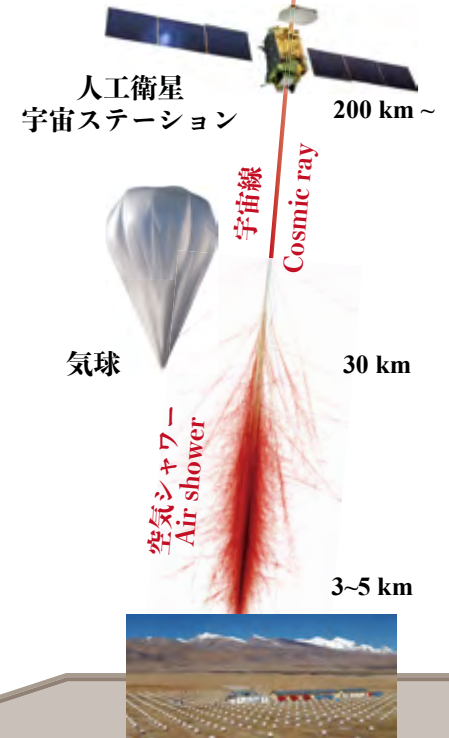
ガンマ線 Gamma ray



空気チェレンコフ望遠鏡

最もエネルギーの高い領域の電磁波。宇宙で起こるさまざまな超高エネルギー現象で生成される。

宇宙線 Cosmic ray



空気シャワー検出器

宇宙を高エネルギーで飛び交うとても小さな粒。90%が陽子でできた水素原子核で、9%がヘリウム原子核、残りはより重たい原子核や素粒子。

東京大学宇宙線研究所

高エネルギーガンマ線



極高エネルギー宇宙線



銀河系宇宙線・ガンマ線



高エネルギー天体理論

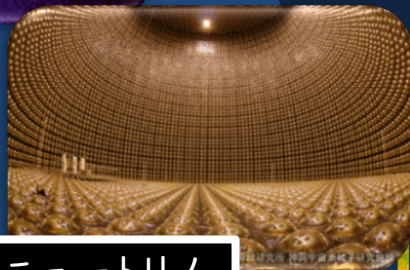


宇宙線・ガンマ線・ニュートリノ・重力波・
ダークマター等の観測から
✓ ブラックホールなどが関係した宇宙
の高エネルギー現象を研究
✓ 宇宙を支配する基本法則を研究

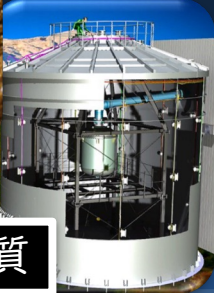


重力波

ニュートリノ



暗黒物質



宇宙論、素粒子論

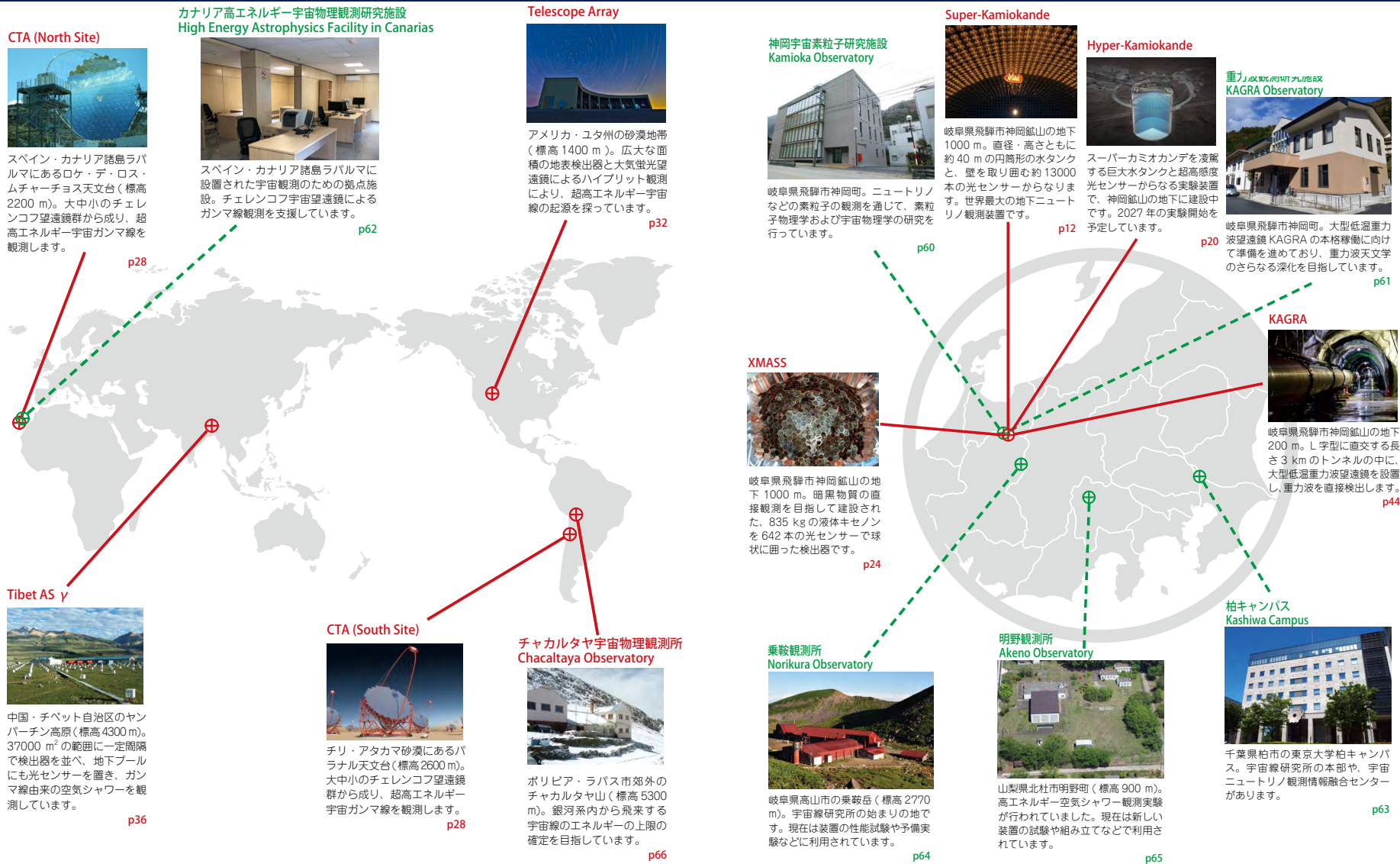


観測的宇宙論



- 宇宙線研究所は世界最高感度のさまざまな宇宙線観測装置をホスト・運用している。
- 電波～可視光の観測による初期宇宙の研究、素粒子物理、宇宙論、高エネルギー天体理論などの理論的研究、シミュレーション研究のエキスパートも多数おり、観測・理論の両面から研究している。

宇宙線研究所の国内・国外研究施設



1953年に日本初の共同利用研究所である「宇宙線観測所」から改称された乗鞍観測所、2つのノーベル物理学賞を産んだ神岡宇宙素粒子研究施設などの国内施設、世界最高地の宇宙線観測施設（ボリビアのチャカルタヤ）、世界最大級の装置（CTA、テレスコープアレイ）などの国外施設をホスト・運用している。

大型低温重力波望遠鏡KAGRAと 重力波観測の最前線

牛場崇文

東京大学附属宇宙線研究所

重力波

重力波:

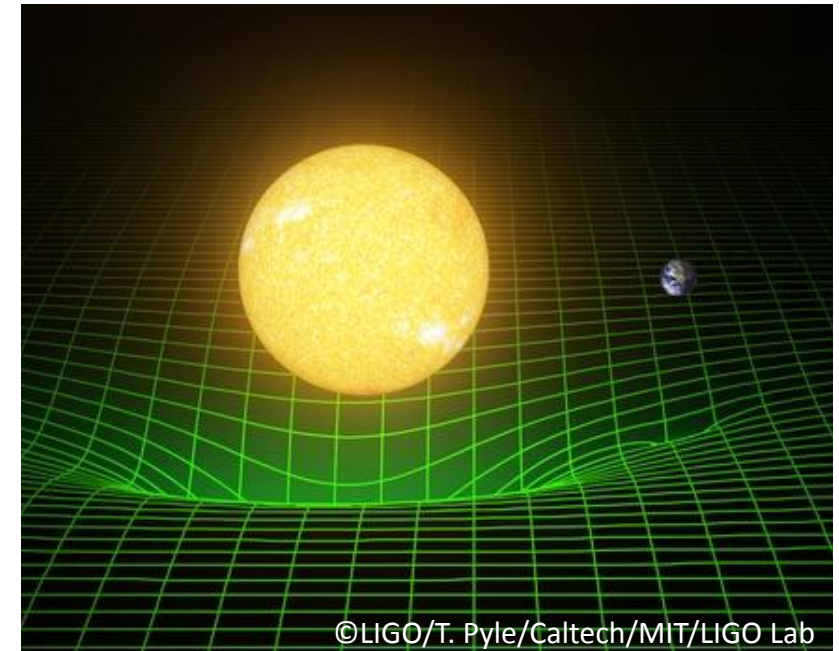
- 質量をもつ物体が加速度運動することによって生じる時空の歪みが波として伝播する現象
- アインシュタインの一般相対性理論から1916年に理論的に予言された。
- パルサーの公転周期の精密測定により、間接的に存在が証明された⇒1993年ノーベル物理学賞
- 理論的予言から約100年を経て2015年に直接観測に成功⇒2017年ノーベル物理学賞

重力波の性質:

- 非常に微弱 ⇒ 重い星の劇的な運動(合体・爆発など)が観測可能な重力波を放出
- 高い透過性 ⇒ 光が直進できないような環境(星の内部・初期宇宙など)でも伝播する。
- 潮汐的な変動 ⇒ 時空を潮汐的(一方が縮むと他方が伸びる)に歪ませる。

高い透過性によって光学観測では観測が難しい現象を見ることができるため、宇宙を観測する新しい手法として注目されている。

星が時空を歪めるイメージ図



©LIGO/T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab

重力波の発生源

初期宇宙起源背景重力波: 宇宙の誕生直後に発生した重力波

- 初期宇宙での物理現象の解明

超新星爆発*¹: 星の寿命が尽きたさいに起きる大爆発

- 超新星爆発のメカニズムの解明

パルサー: 強い磁場を持って回転する中性子星*²

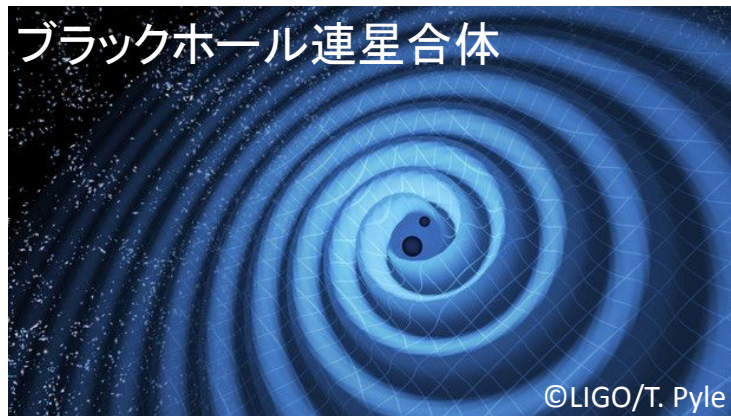
- パルサーの非対称性に関する情報

中性子星連星合体: 中性子星同士の合体

- 超高密度での核物理学・宇宙の元素合成の解明

ブラックホール連星合体: ブラックホール同士の合体

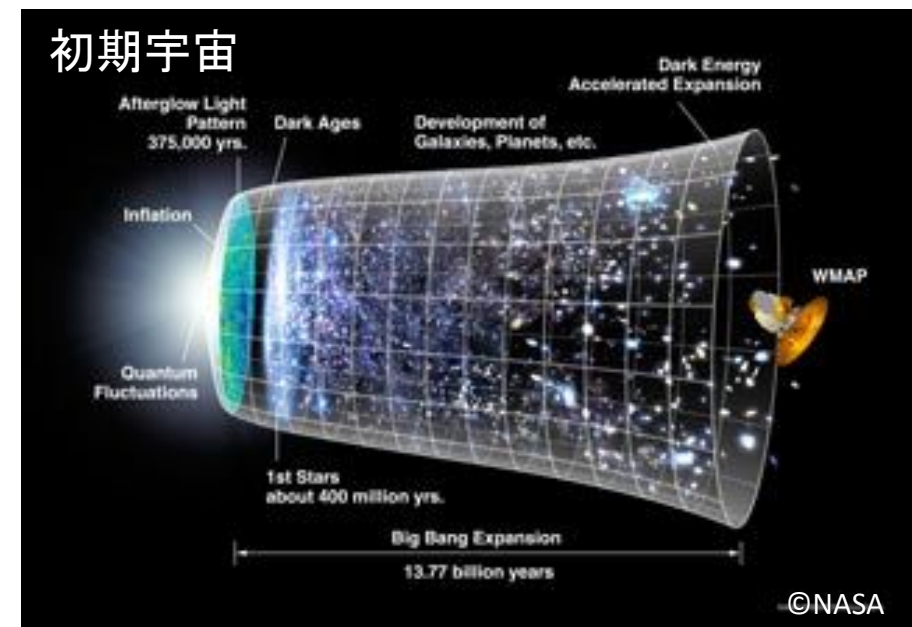
- 星形成・銀河形成のメカニズムの解明



*¹: 質量の大きな星の最期に起こる大爆発。

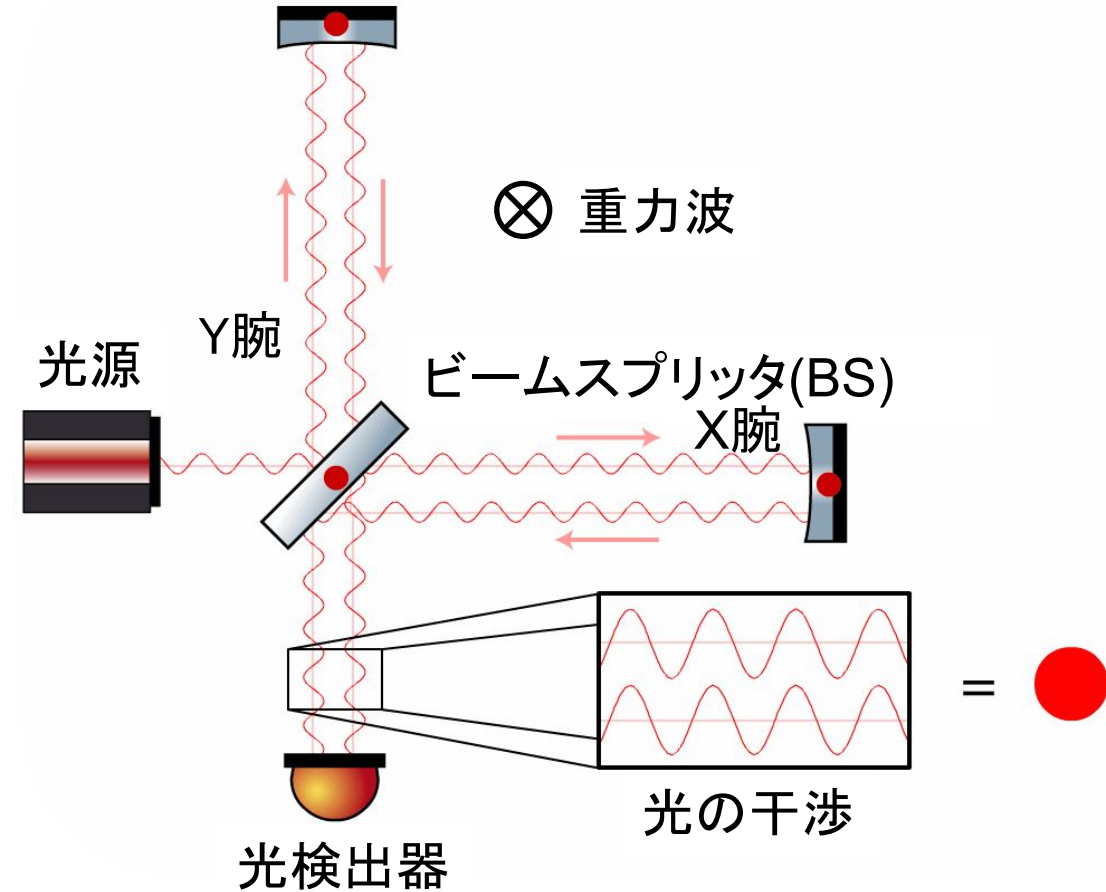
*²: 主に中性子で構成される太陽と同程度の質量で直径が20km程度しかないコンパクトな星

2025/6/6



重力波の観測原理

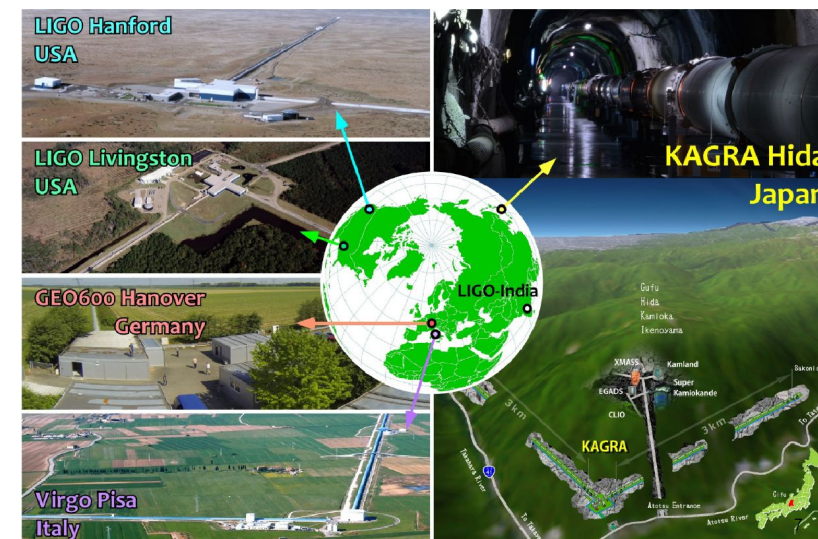
- レーザー干渉計を用いて非常に微弱な時空のゆがみによって動く鏡の動きを精密に測定する。
- 重力波による時空のゆがみの潮汐性により、腕の長さが差動で動くため、光の干渉状態が変わる。
- X腕とY腕の差を観測するため、両方に共通して現れるレーザー光源に起因する雑音などの影響が小さい。
- 重力波の波形を直接観測できる。
⇒どのような天体がどのように運動していたかがわかる。
- 腕の長さが長いほど鏡の動きが大きくなるため、キロメートル級の巨大な干渉計が観測には必要となる。



重力波望遠鏡ネットワークと国際共同観測

世界の重力波望遠鏡:

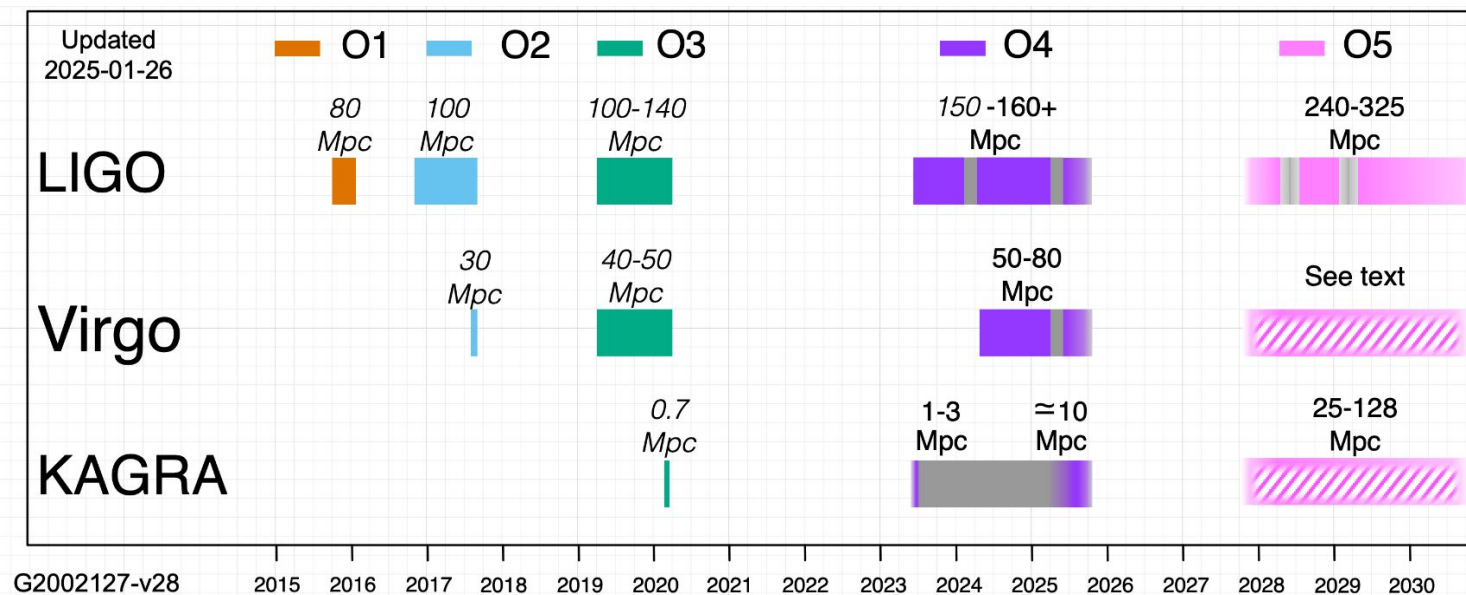
- GEO600(ドイツ): ハノーファーの南に位置する600m干渉計
- LIGO(アメリカ): ハンフォードとリビングストンの4km干渉計
- Virgo (イタリア): トスカーナ州ピサ県カッシーナの3kmの干渉計
- KAGRA (日本): 岐阜県飛騨市神岡町の3km干渉計
- LIGO India (インド): 建設中



国際共同観測: 複数台の検出器による重力波検出器の観測運転

共同観測の重要性:

1. 観測の信頼性の向上
⇒ 遠方の2地点での観測で雑音と区別
2. 重力波の到来方向(波源)の決定
⇒ 3台以上の検出器で精度向上
3. 新しい重力理論の検証
⇒ 重力波の偏波の解析



大型低温重力波望遠鏡KAGRA

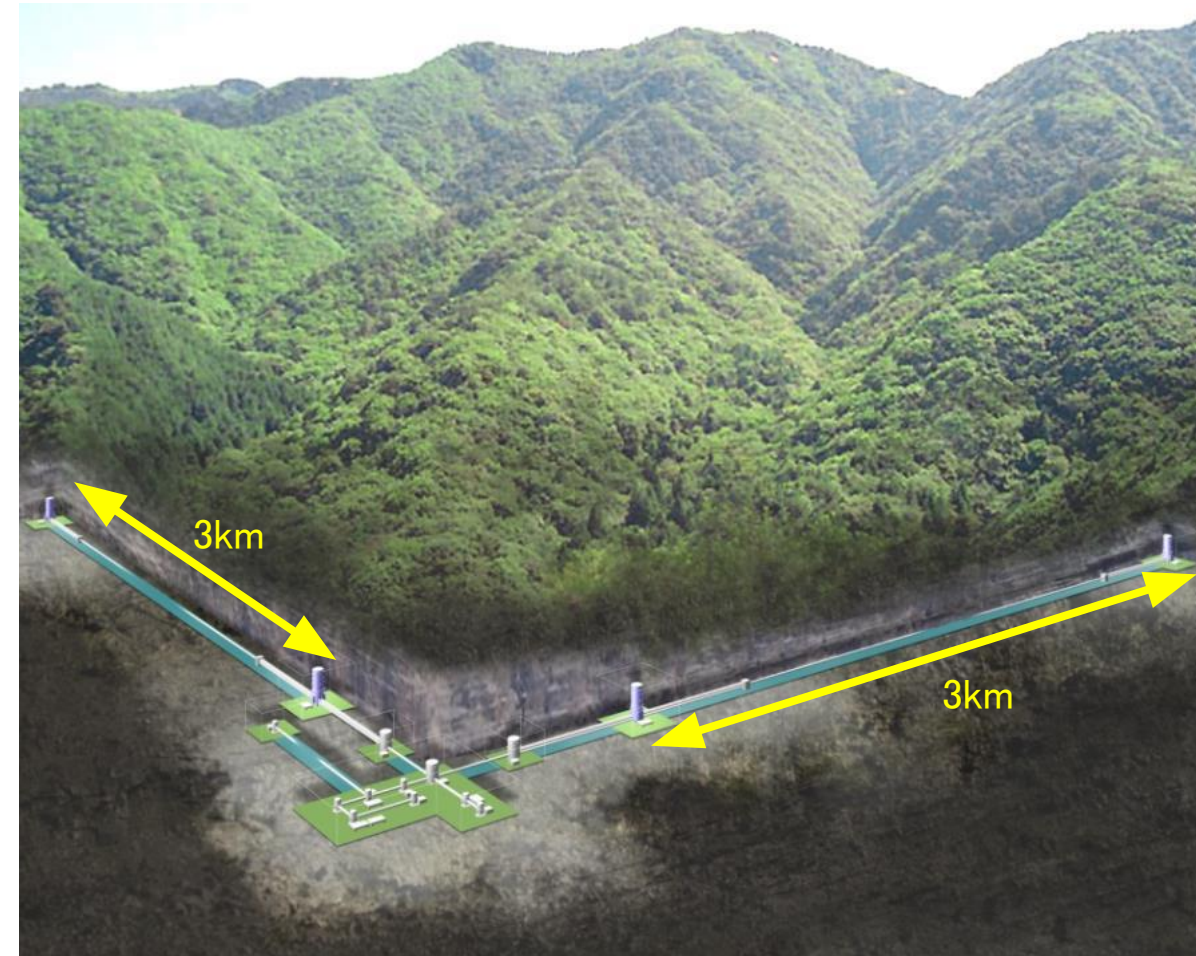
岐阜県飛騨市に建設された3kmの腕共振器を持つ干渉計型重力波望遠鏡

KAGRAのイメージ図

重力波検出器として2つの挑戦的な試み

- 地下サイトの利用 ⇒ 地面の揺れによる雑音の低減
- 鏡の低温化 ⇒ 鏡を構成する原子の熱振動の低減

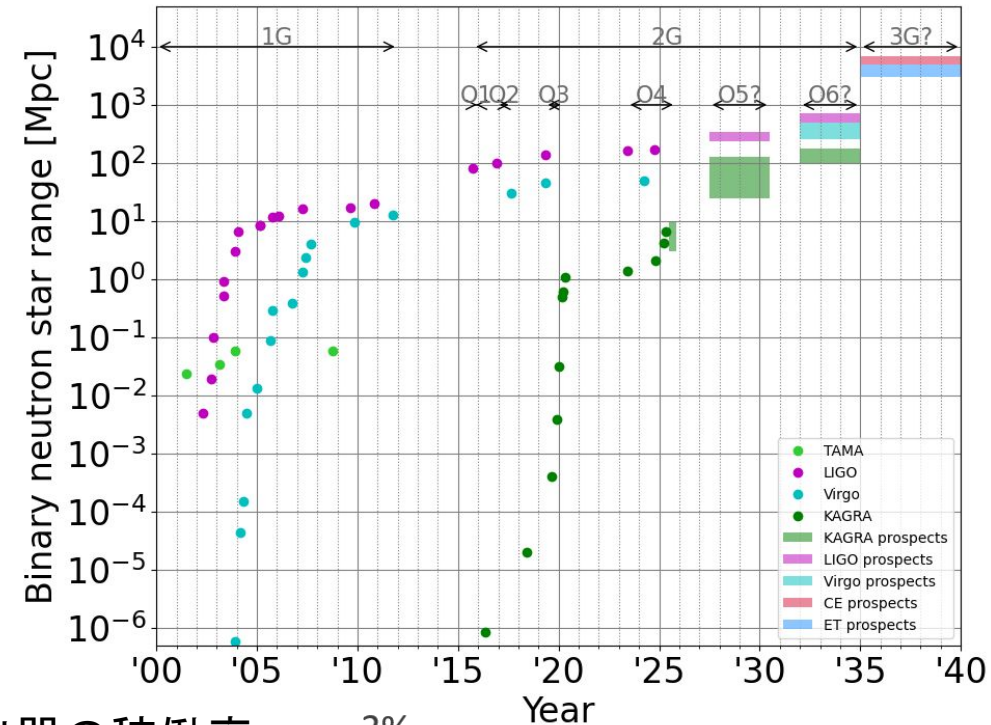
上記の二つの技術は重力波検出器の次世代計画
Einstein Telescope (欧州)、Cosmic Explorer (アメリカ)
においても重要な要素となっており、
重力波の検出はもとより、次世代検出器の
要素技術開発という観点でも重要な役割をはたす。



KAGRAの運用実績

- 2010年: LCGT(KAGRA)の予算化
- 2012年: トンネル掘削開始
- 2014年: トンネル掘削完了
- 2016年: 常温での試験運転(マイケルソン干渉計)
- 2018年: 低温での試験運転(マイケルソン干渉計)
- 2019年: 施設完成⇒LIGO-Virgo-KAGRAコラボレーション結成
- 2020年: 第三次国際共同観測参加(GEO600)
- 2023年: 第四次国際共同観測O4aに参加(LIGO)
- 2024年: 能登半島地震により被災
- 2025年6月: 第四次国際共同観測O4cに復帰(LIGO, Virgo)

運転・観測がない期間は干渉計の性能(感度・安定性)向上のための作業(コミッショニング)を行っている。
O4a観測ではO3GKの約2倍の感度・30%増しの稼働率を達成

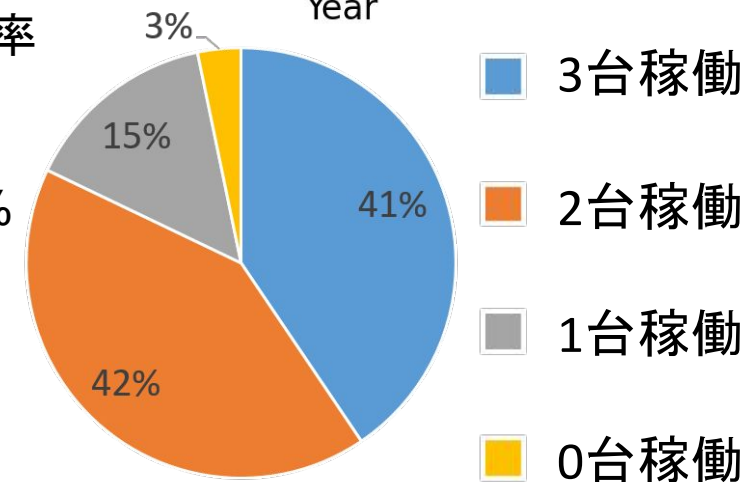


各検出器の稼働率

LLO: 82.5%

LHO: 53.1%

KAGRA: 82.4%



2023年5月25日0:00から

2023年6月21日8:00の検出器の稼働率

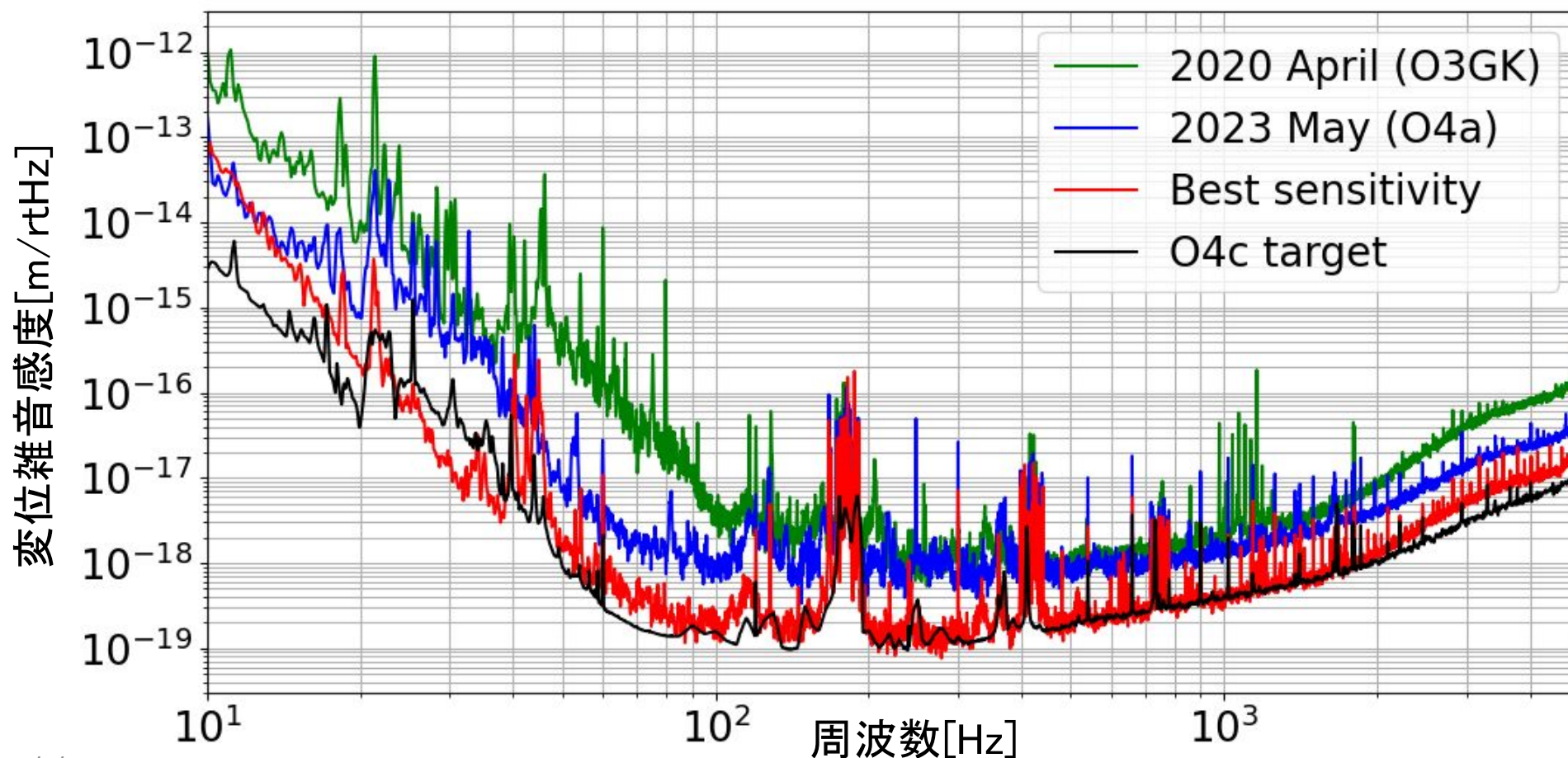
KAGRAのコミッショニング

O3GKからO4aへ: 懸架装置の調整による低周波感度の向上と

干渉計アライメントの向上による高周波感度の向上と安定度向上

O4aからO4cへ: 懸架装置の更なる調整、レーザーの高出力化(1W→10W)、

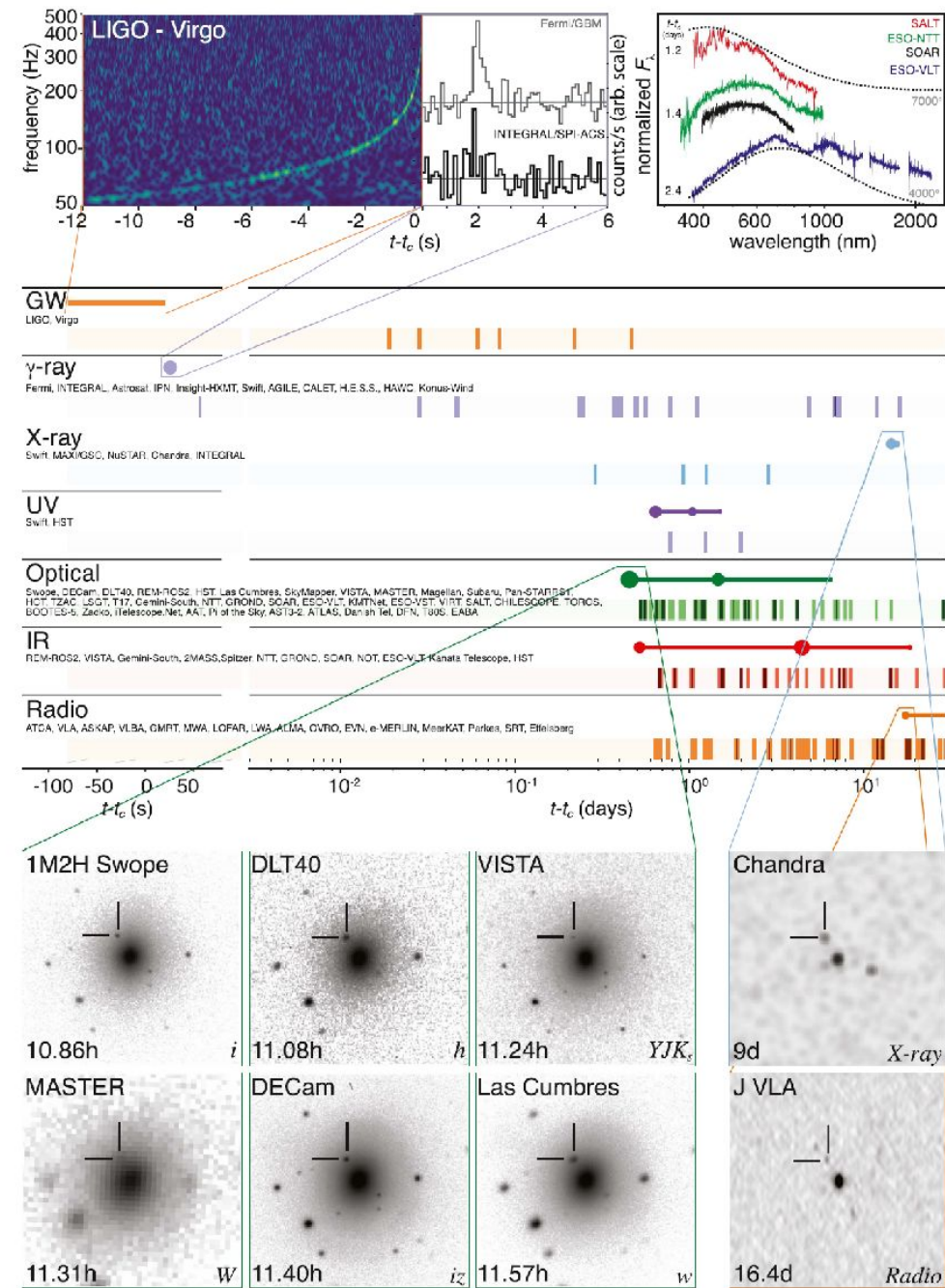
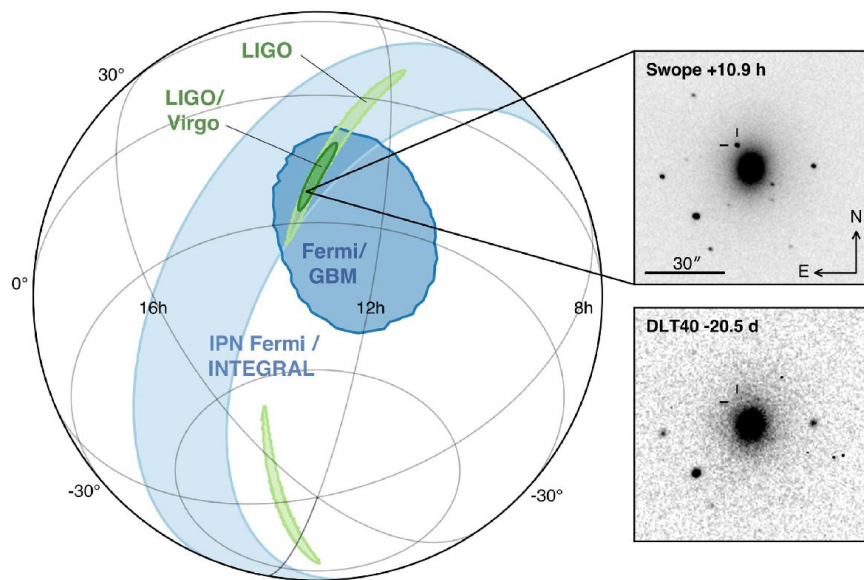
鏡の低温化(250K→90K)、音響雑音の低減



重力波観測による成果①

1. 重力波を含むマルチメッセンジャー天文学
2. ショートガンマ線バーストの起源が中性子星連星合体であることの発見
3. キロノバ*の起源が中性子星連星合体であることの発見⇒宇宙の元素合成に中性子星連星合体が大きな寄与
4. 宇宙の加速膨張速度の新しい計測手法の実証

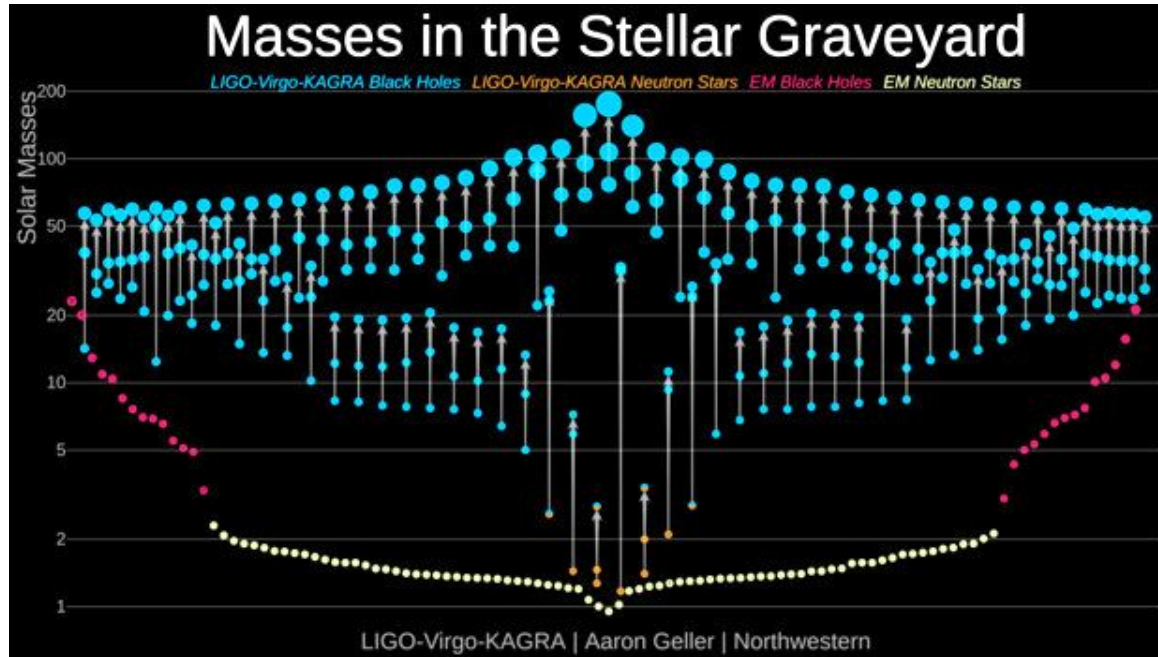
*: 宇宙での元素合成にともなう特徴的な発光現象



重力波観測による成果②

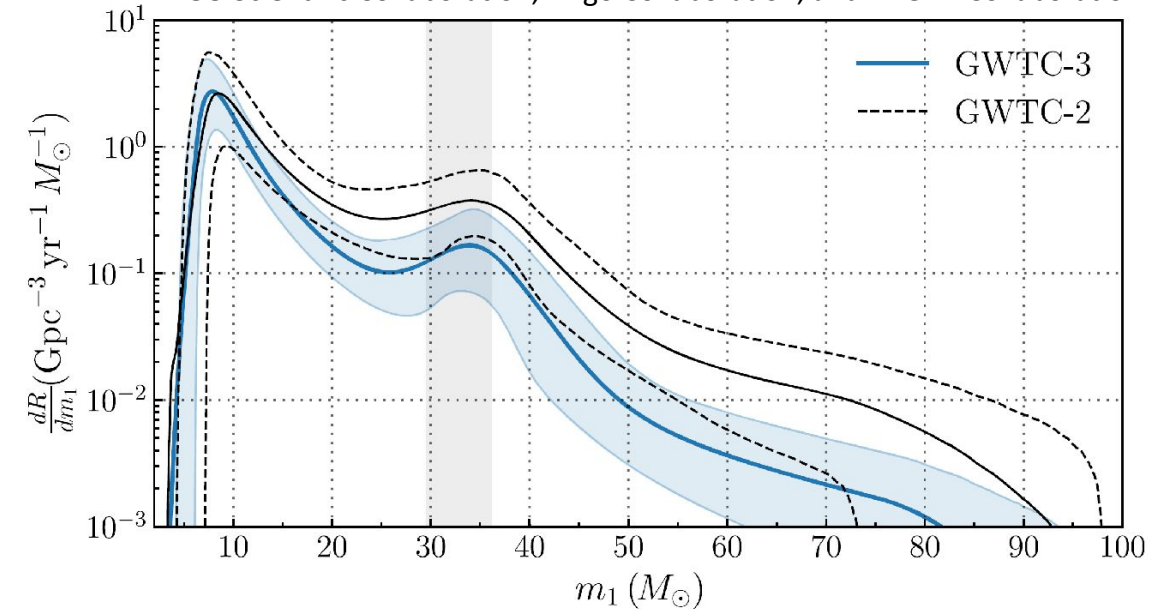
1. 電磁波観測で現在までに見つかったブラックホールを上回る数のブラックホールの発見
2. 電磁波観測で見つかった恒星質量ブラックホール*¹よりも重いブラックホールの発見
3. マスギャップ帯でのブラックホール*²の発見
4. ブラックホールの分布の観測 ⇒ 太陽質量の35倍程度にピークが存在

©LIGO-Virgo / Aaron Geller / Northwestern University



Phys. Rev. X **13**, 011048 (2023)

LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, and KAGRA Collaboration



*1: 1– 100倍の太陽質量程度の重さのブラックホール。超新星爆発によって形成されられている。

*2: 超新星爆発によって生成することが難しいとされている太陽質量の50倍から120倍の質量のブラックホール

まとめ

- 岐阜県飛騨市神岡町に重力波検出器KAGRAが建設されている。
 - 2010年に予算化し、建設を開始
 - 2019年に建設が完了し、LIGO-Virgo-KAGRAコラボレーションを結成
 - 2020年と2023年に国際共同観測に参加
 - 2024年の能登半島地震で被災したが、復旧を行い2025年6月から観測を再開
- 2015年の初検出から約10年で重力波観測は多くの成果をあげている。
 - ショートガンマ線バーストの起源天体の特定
 - 宇宙の元素合成に中性子性連星合体が大きく寄与していることを発見
 - 宇宙の加速膨張速度を計測する新たな手法の実証
 - 数多くのブラックホールの観測によるブラックホールの質量分布の測定
 - 超新星爆発では生成の難しいマスギャップ帯でのブラックホールの発見
- さらなる宇宙の謎の解明に向けて、観測と感度向上を続けている。