

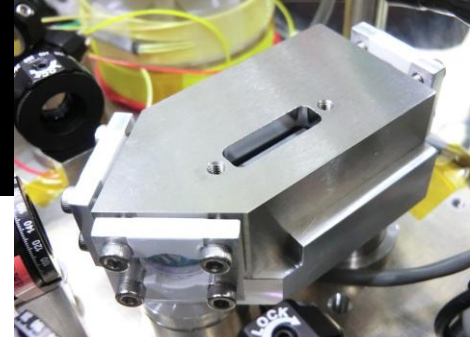
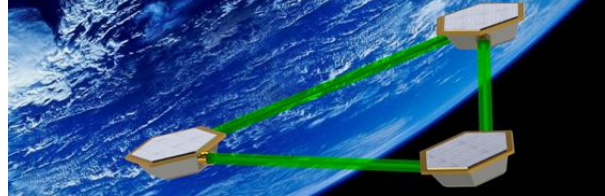
レーザー干渉計で 宇宙の見えないものを探る

道村 唯太

東京大学 大学院理学系研究科附属
ビッグバン宇宙国際研究センター
michimura@resceu.s.u-tokyo.ac.jp



自己紹介



1987 神奈川県横浜市

2014
2015 ← 博士(理学)



東京大学大学院理学系研究科
物理学専攻 助教



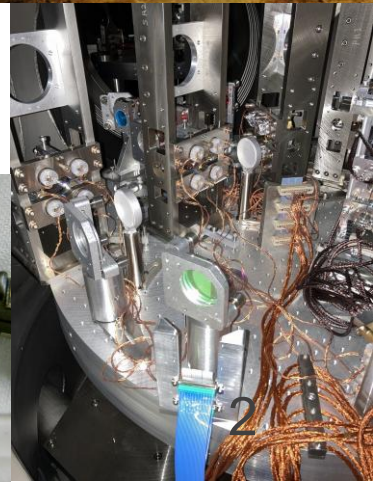
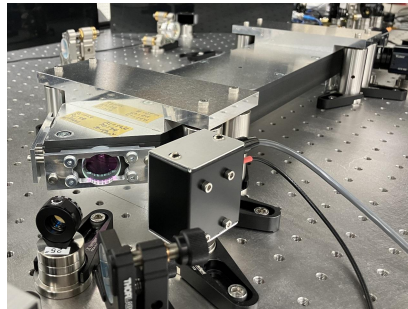
2022 カリフォルニア工科大学



2024 LIGO研究所 Research Scientist



2024 東京大学大学院理学系研究科
附属ビッグバン宇宙国際研究センター
Today 准教授









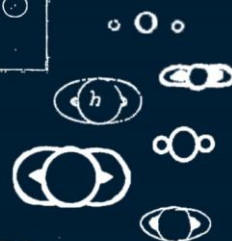
1609年 ガリレオが望遠鏡を作る



月面



金星



土星 →

ガリレオが望遠鏡を
見ながら描いたスケッチ



すばる
↙

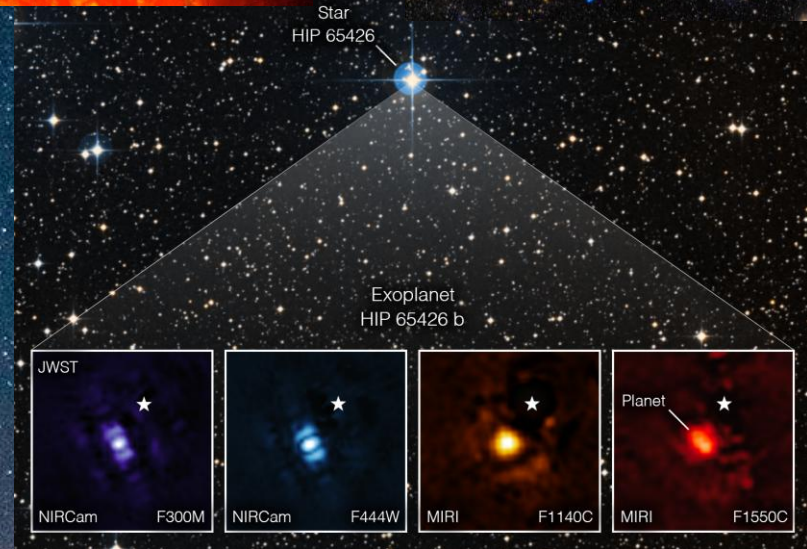
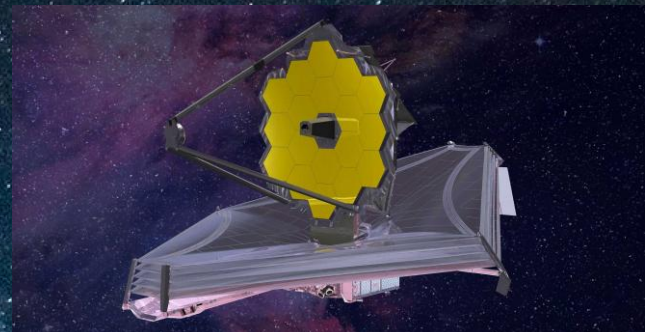
なんじゃこりやーっ!!

とさげんだかもしれない…
レンズ越しに見た脅威の世界



5

ガリレオ・ガリレイ 1564-1642



1609年 ガリレオが望遠鏡を作る



月面



金星



土星

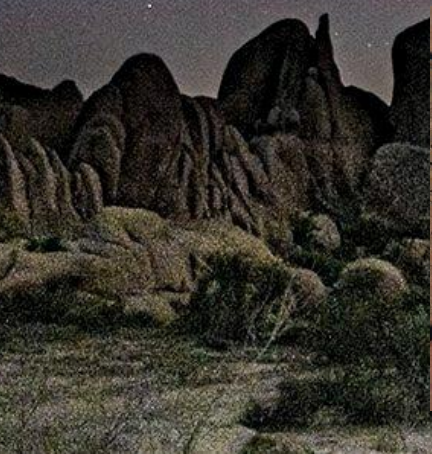
ガリレオが望遠鏡を
見ながら描いたスケッチ



なんじゃこりやーっ!!

とさけんだかもしれない...
レンズ越しに見た脅威の世界

すばる



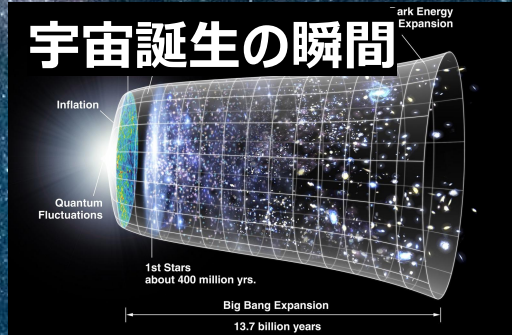
Credit NAOJ

宇宙には見えないものもたくさん

ブラックホール



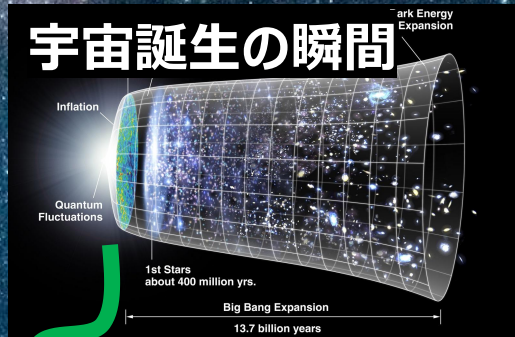
宇宙誕生の瞬間



ダークマター



宇宙の見えないものを探しています

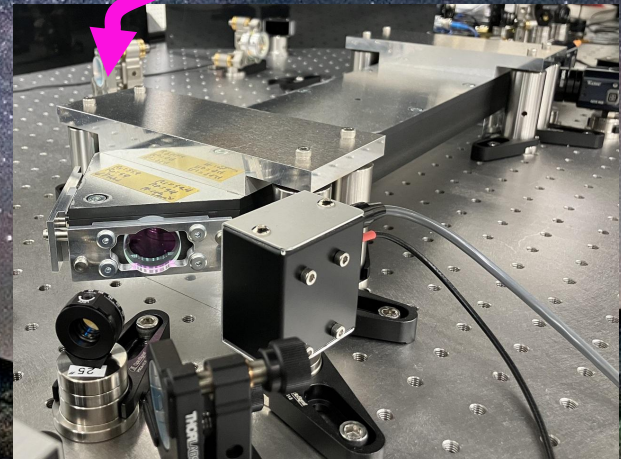


重力波



大型レーザー干渉計を使った
重力波望遠鏡

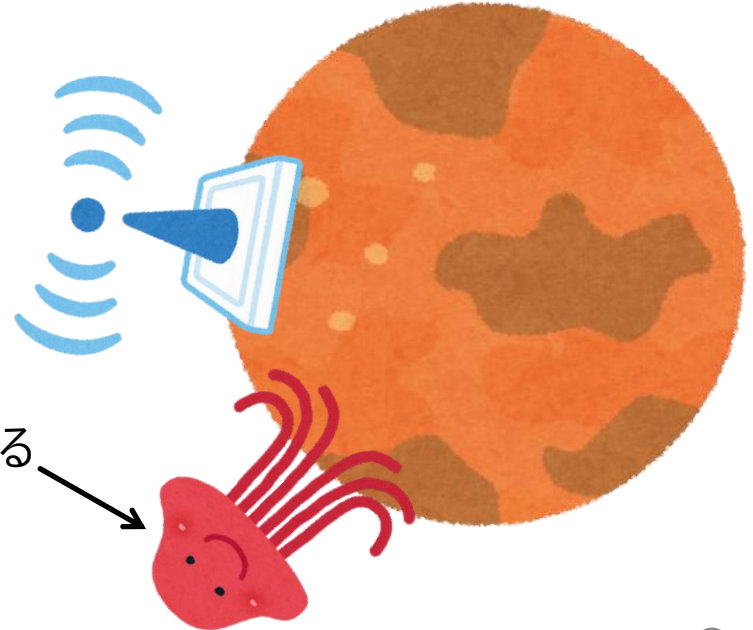
微弱な相互作用



レーザー干渉計を用いた
テーブルトップ実験

宇宙人に左右は伝わるか？

- 宇宙人と電話ができるようになったとする
- 宇宙人と左右の概念を共有することはできる？



宇宙のどこかにいる
知的な存在

辞書をひいてみると...

<https://www.yomiuri.co.jp/culture/20220703-OYT8T50003/>

辞書別に見た「右」の語釈例

「南を向いた時、西にあたる方」

（広辞苑）

「この辞典を開いて読む時、偶数ページのある側」

（岩波国語辞典）

「アナログ時計の文字盤に向かった時に、一時から五時までの表示のある側」

（新明解国語辞典）

「『一』の字では、書き終わりのほう。『リ』の字では、線の長いほう」

（三省堂国語辞典）

「人体を対称線に沿って二分したとき、心臓のない方」

（明鏡国語辞典）

「東に向かって南のほう。大部分の人にとって、はしを持つ手のあるほう」

（新選国語辞典）



宇宙は基本的には左右対称

- 宇宙は右と左を区別しない
鏡の世界に迷い込んだとしても、区別できない
宇宙人に左右を教えるのは難しい...



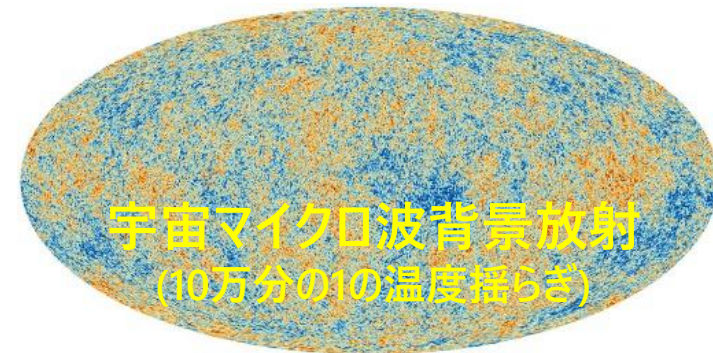
モナリザ



シオマネキ

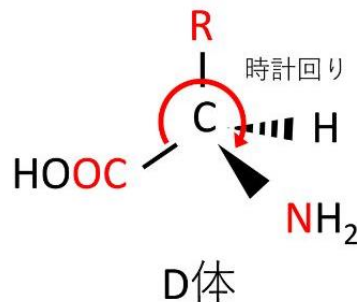
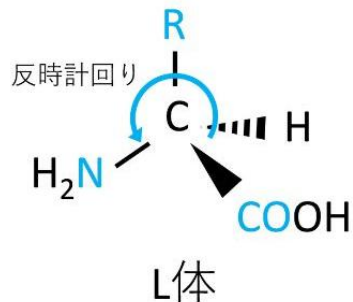


アサガオ



宇宙マイクロ波背景放射
(10万分の1の温度揺らぎ)

L-アミノ酸



星空

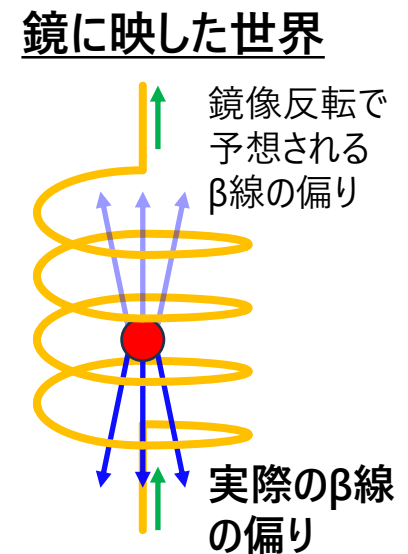
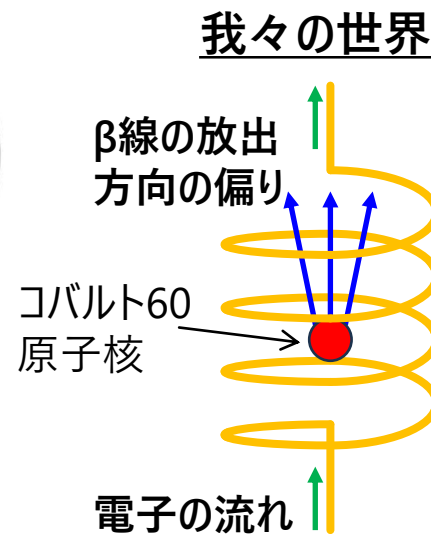
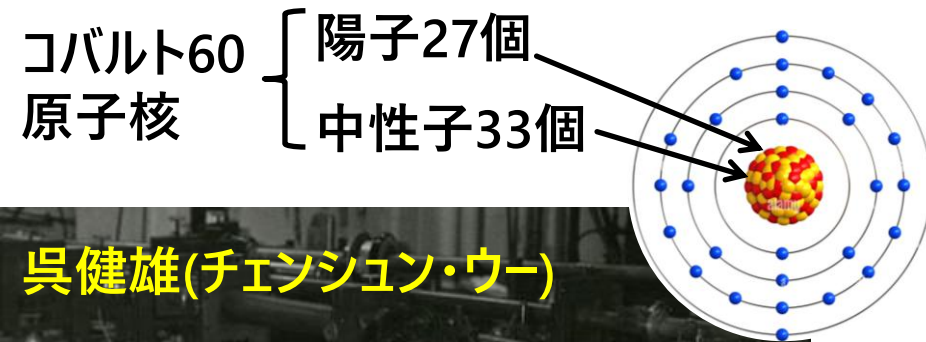


ミクロな世界では対称ではない

- 1956年 パリティ対称性の破れの発見
- コバルト60のベータ崩壊での、
ベータ線の放出方向の偏り
- これで宇宙人とも左右を共有することができる！

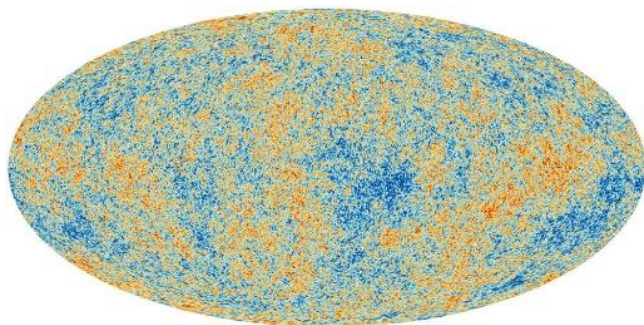


1957年ノーベル賞

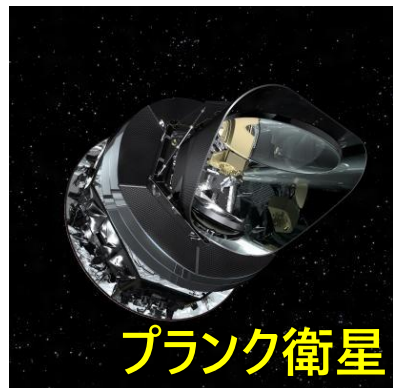


宇宙規模での左右非対称性？

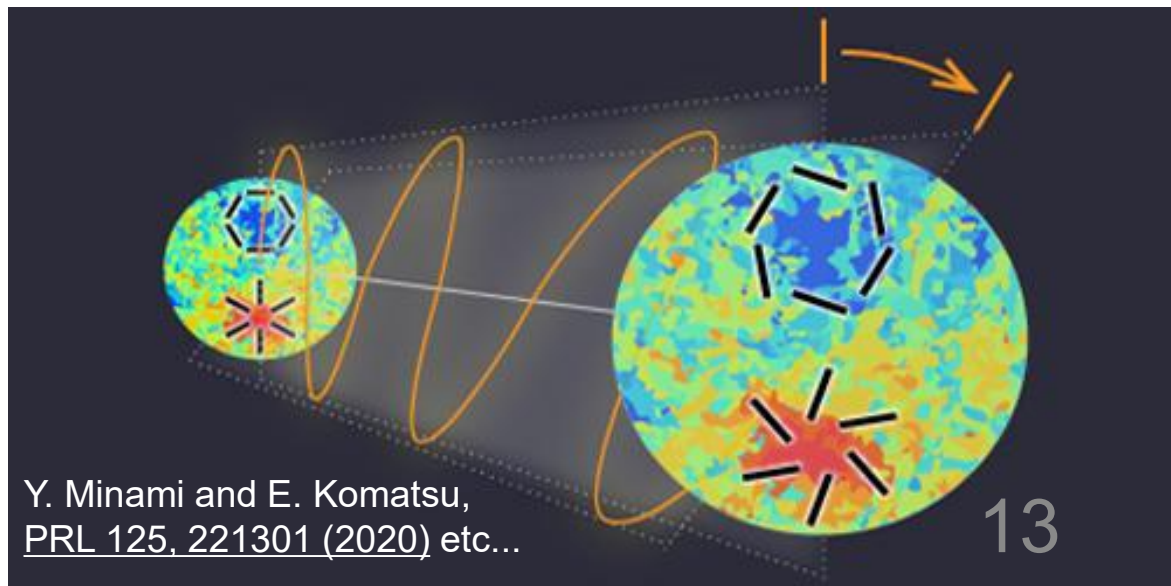
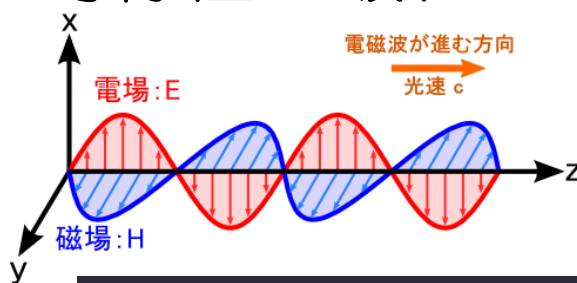
- 最近、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測から、宇宙の長い歴史の中で光の偏光が
わずかに右に回転している可能性が見つかった
- 宇宙規模でも、対称性が破れている可能性



全天からやってくるマイクロ波



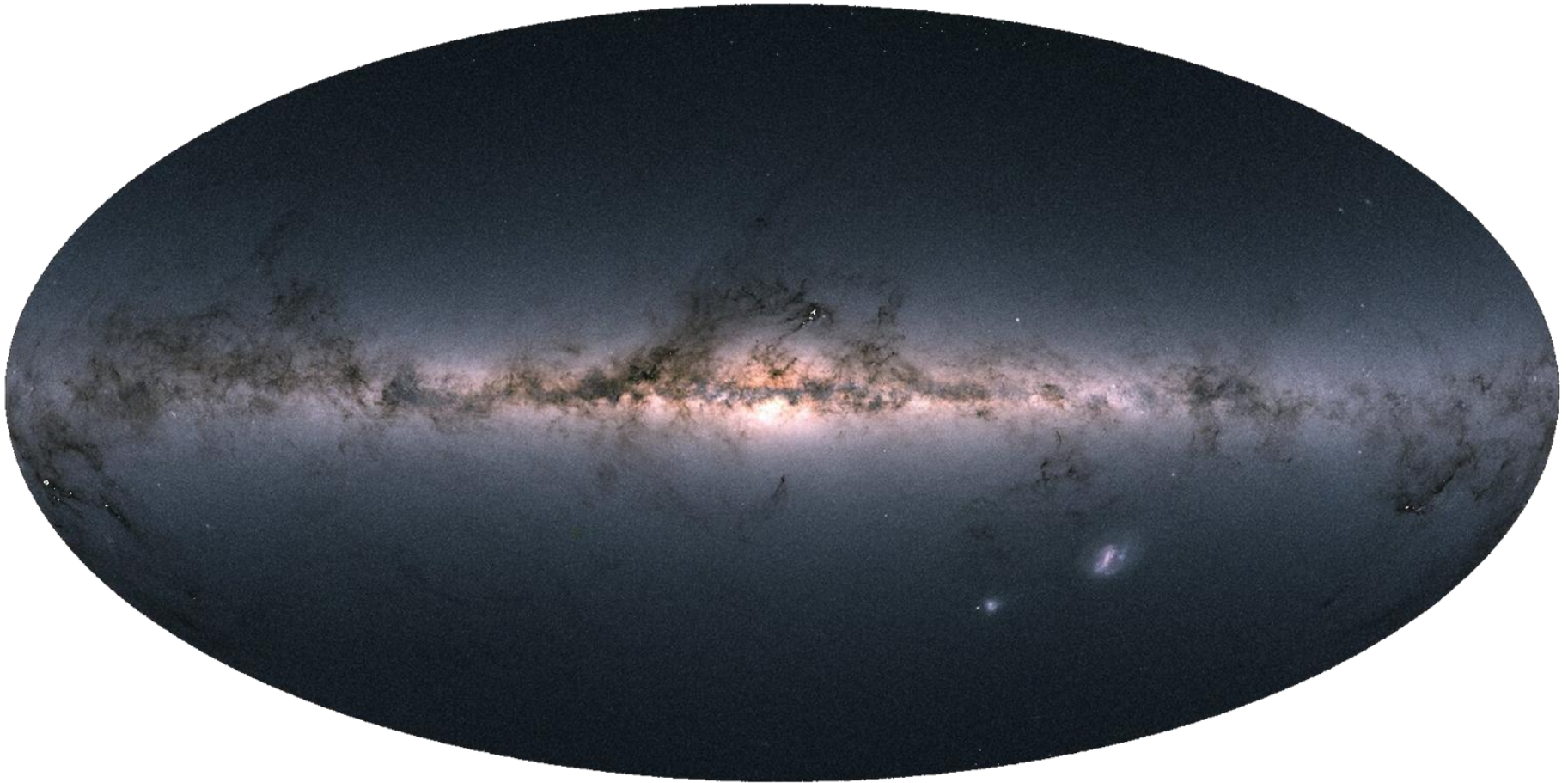
プランク衛星



Y. Minami and E. Komatsu,
PRL 125, 221301 (2020) etc...

宇宙マイクロ波背景放射とは？

- 宇宙の全天からほぼ一様に来るマイクロ波



宇宙マイクロ波背景放射とは？

- 宇宙の全天からほぼ一様に来るマイクロ波
- 1964年に偶然発見



1978年ノーベル賞

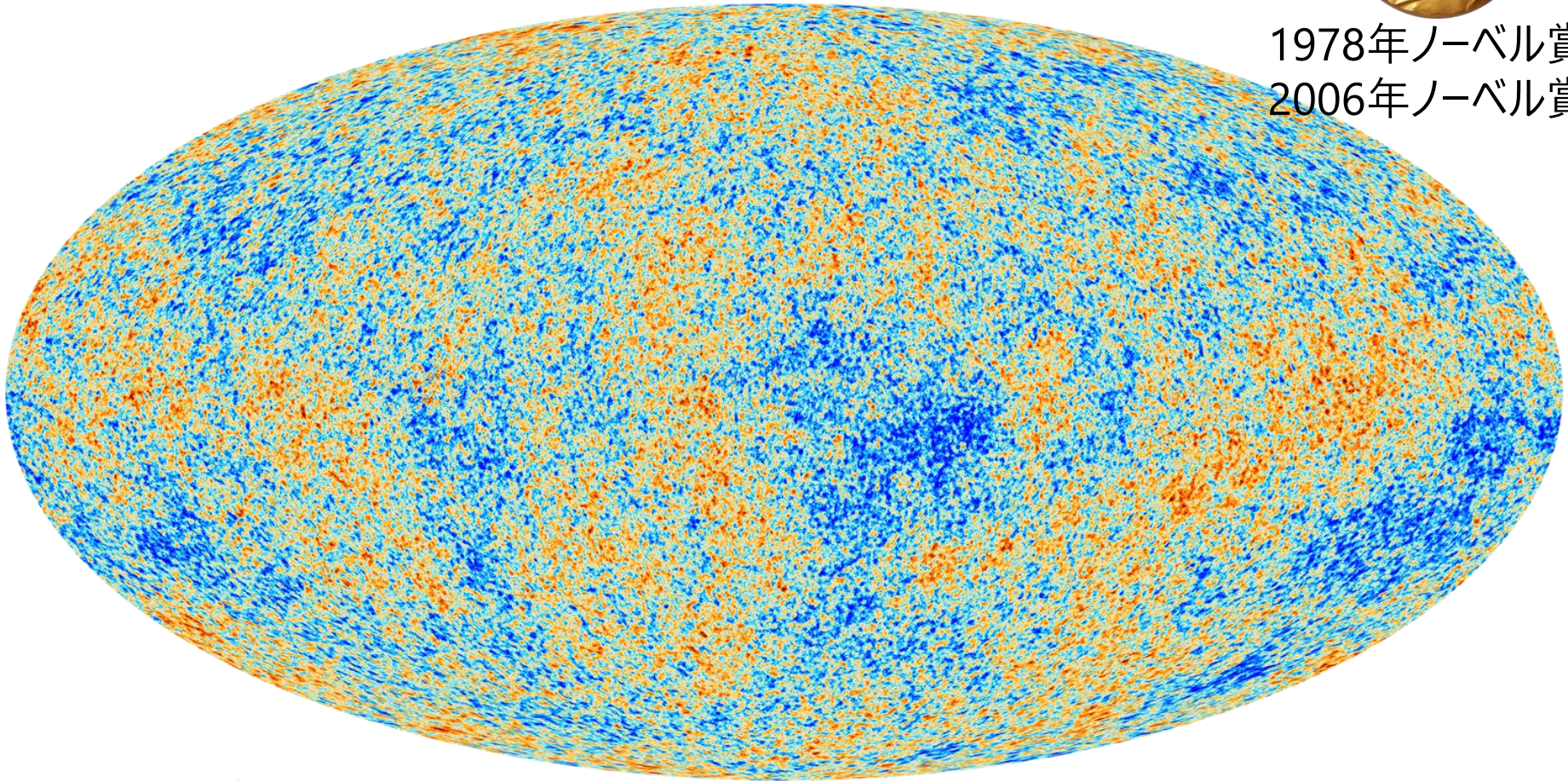
マイクロ波で見るとほぼ一様

宇宙マイクロ波背景放射とは？

- 宇宙の全天からほぼ一様に来るマイクロ波
- 1990年代、わずかな揺らぎを発見



1978年ノーベル賞
2006年ノーベル賞



宇宙マイクロ波背景放射とは？

- 宇宙の全天からほぼ一様に来るマイクロ波
- 1990年代、わずかな揺らぎを発見



1978年ノーベル賞
2006年ノーベル賞

ほぼ全天2.725 K (-270.425°C)
わずかに10万分の1の揺らぎ

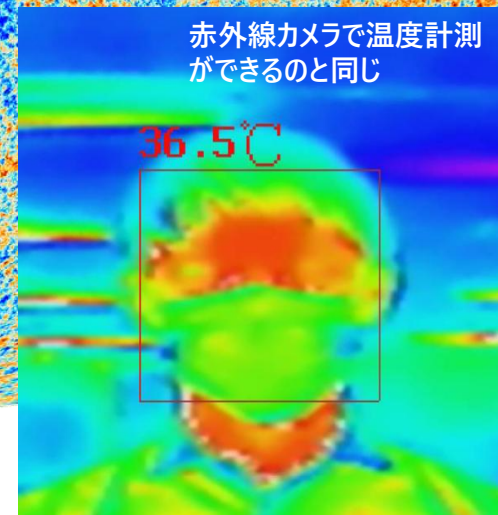
宇宙マイクロ波背景放射とは？

- 宇宙の全天からほぼ一様に来るマイクロ波
- 1990年代、わずかな揺らぎを発見



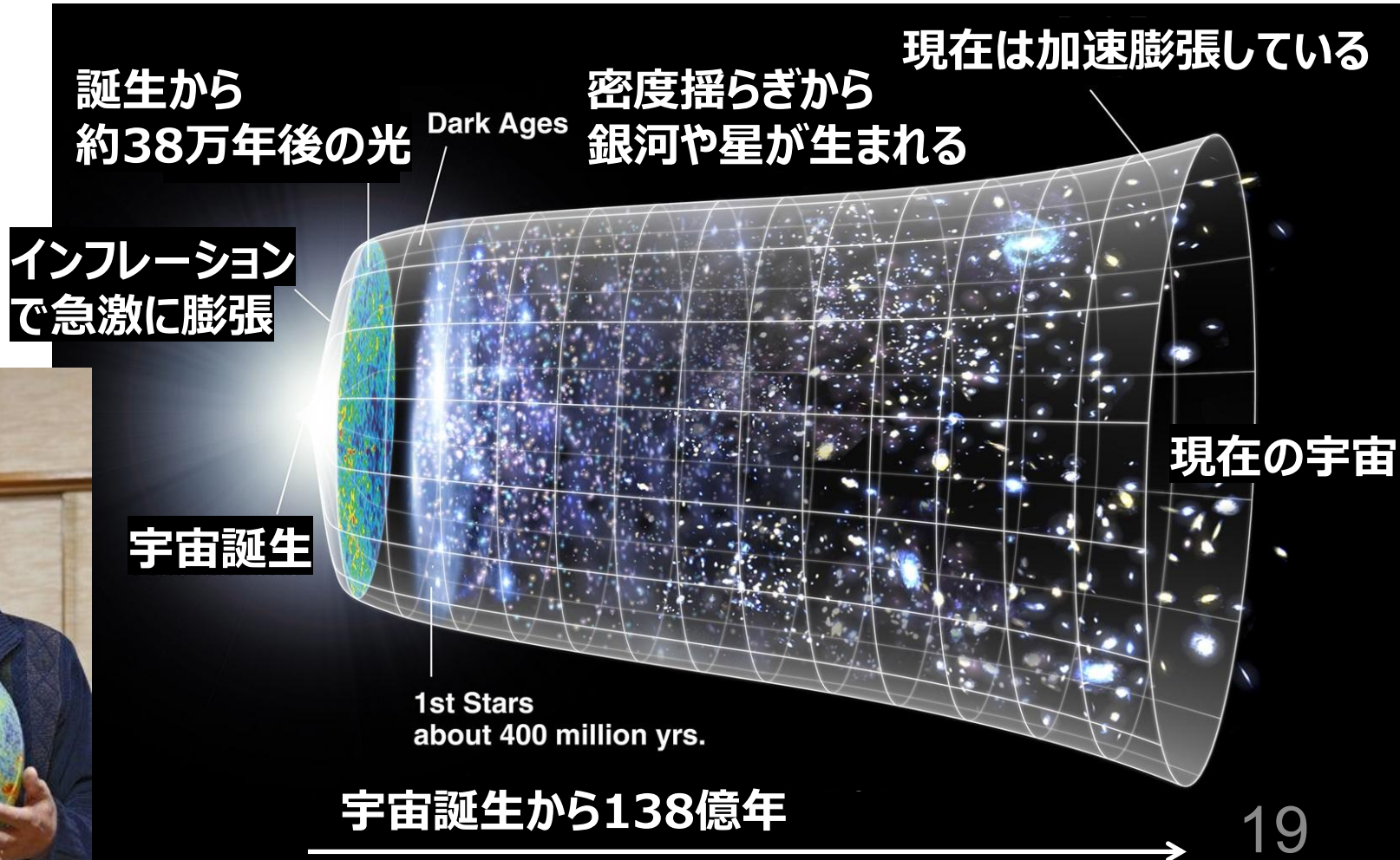
1978年ノーベル賞
2006年ノーベル賞

ほぼ全天2.725 K (-270.425°C)
わずかに10万分の1の揺らぎ



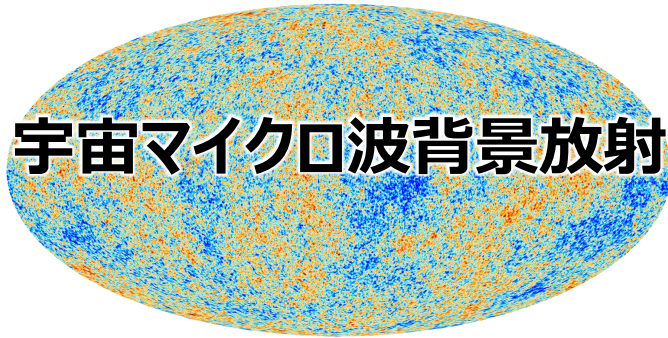
宇宙はもともと小さかった

- 一様性はインフレーション理論で説明できる
- その後も膨張して、熱い宇宙は2.725 Kまで冷えた

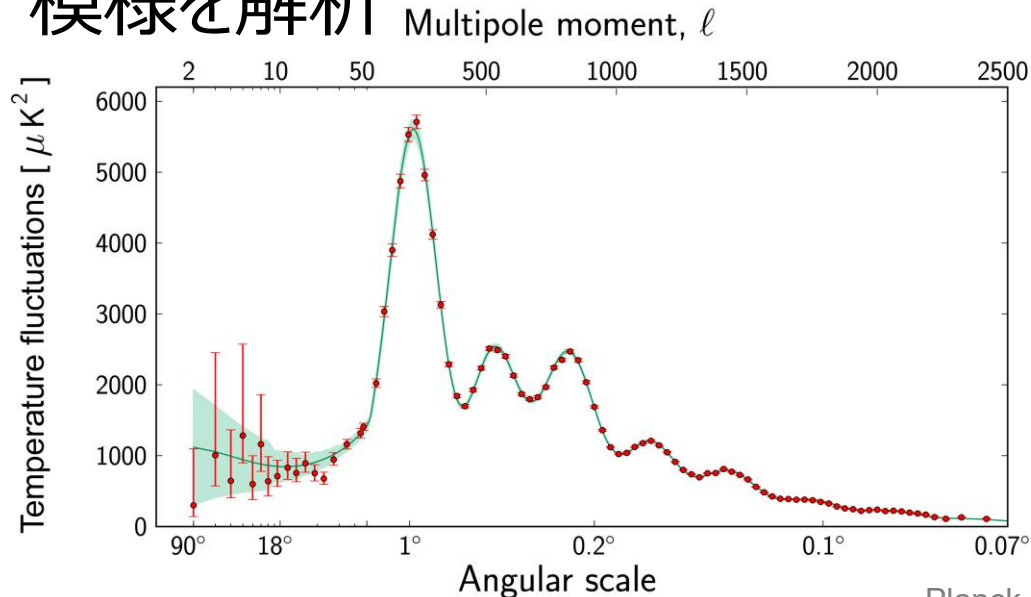


佐藤勝彦

宇宙を構成する成分もわかる

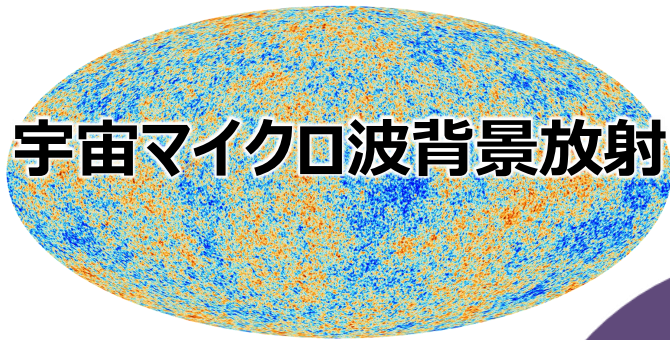


揺らぎの
模様を解析

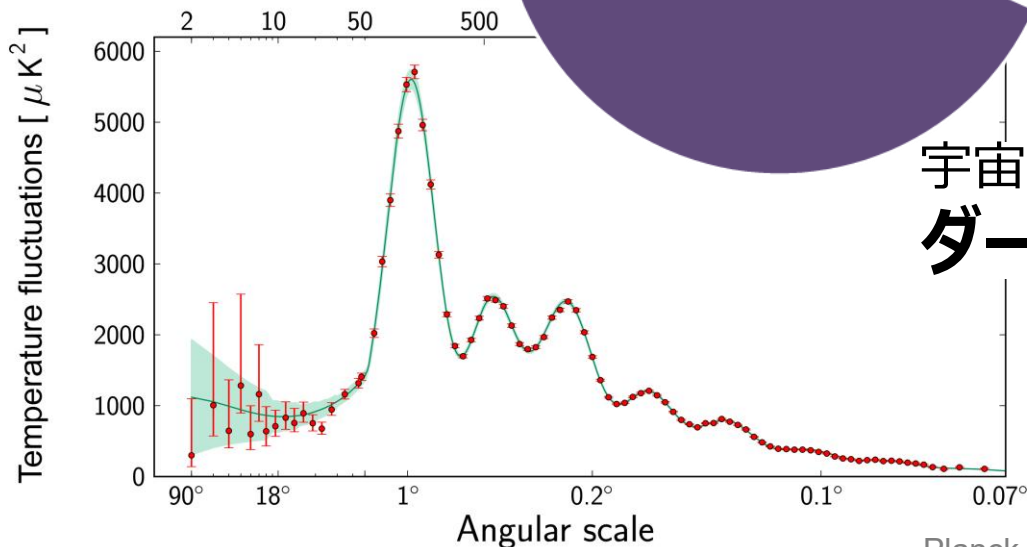


Planck Collaboration, *A&A* 641, A6 (2020)

宇宙を構成する成分もわかる



揺らぎの
模様を解析



原子など我々がよく知っている
通常物質 (~5%)

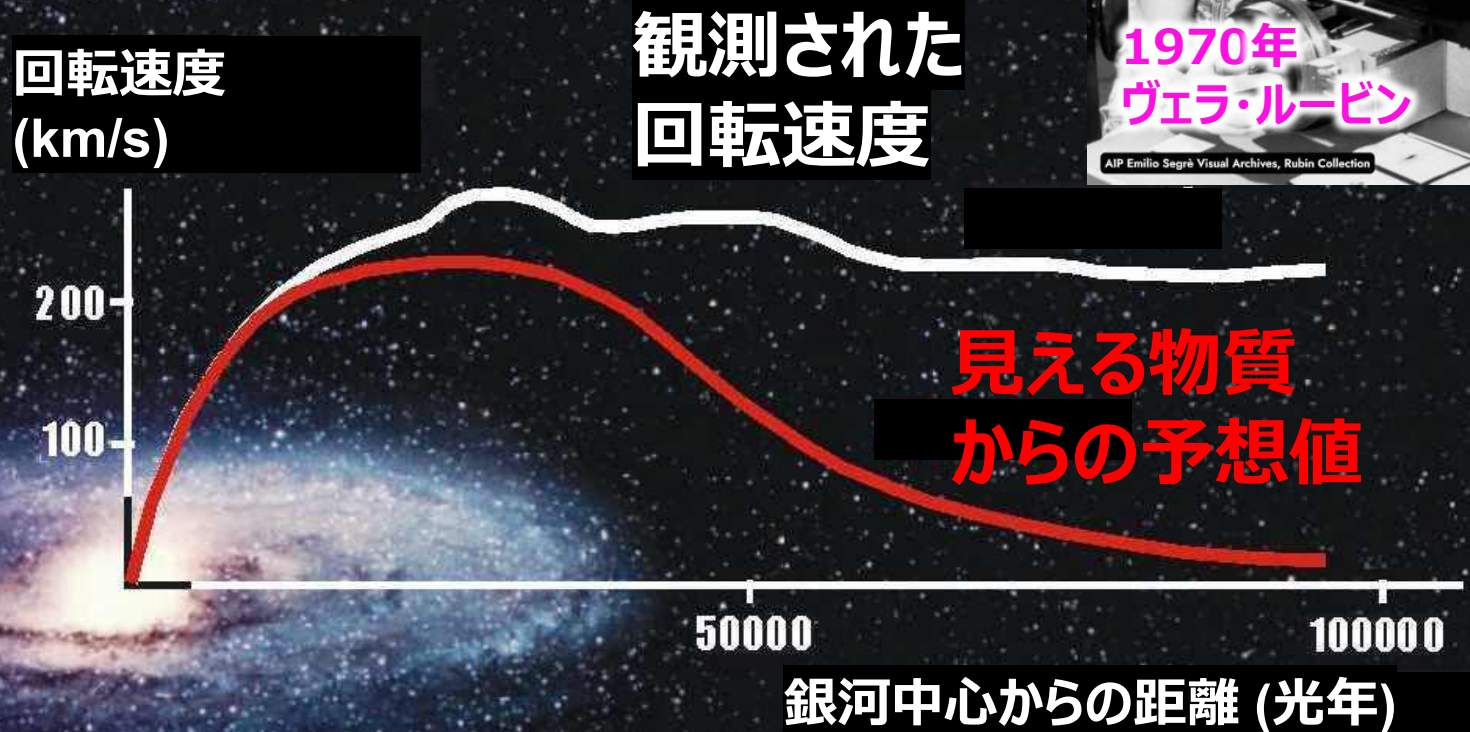
質量を持ち、重力は及ぼすが
正体不明の物質
ダークマター (~27%)

宇宙の加速膨張を支える
ダークエネルギー (~68%)

ダークマター存在の証拠1



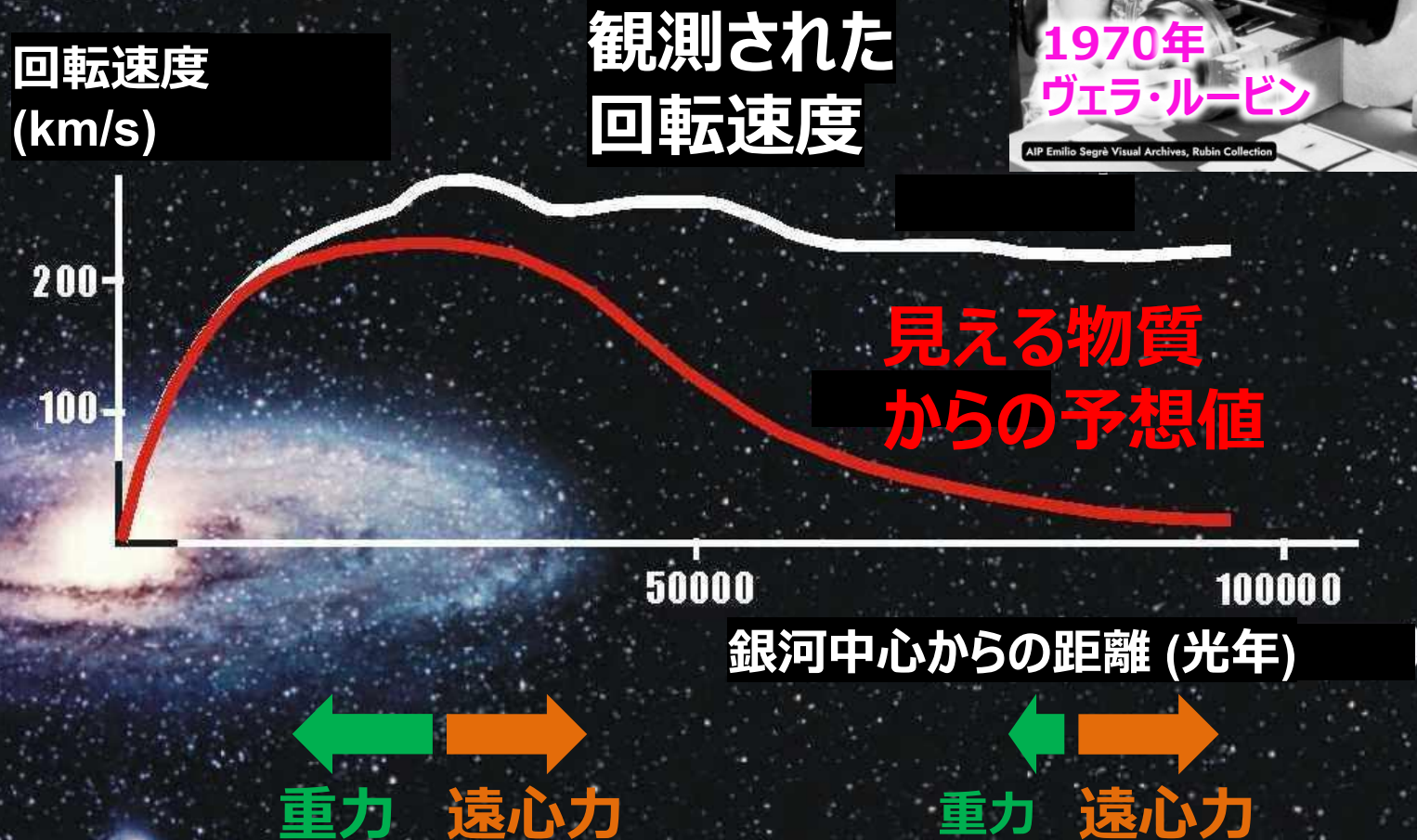
銀河の回転曲線



ダークマター存在の証拠1



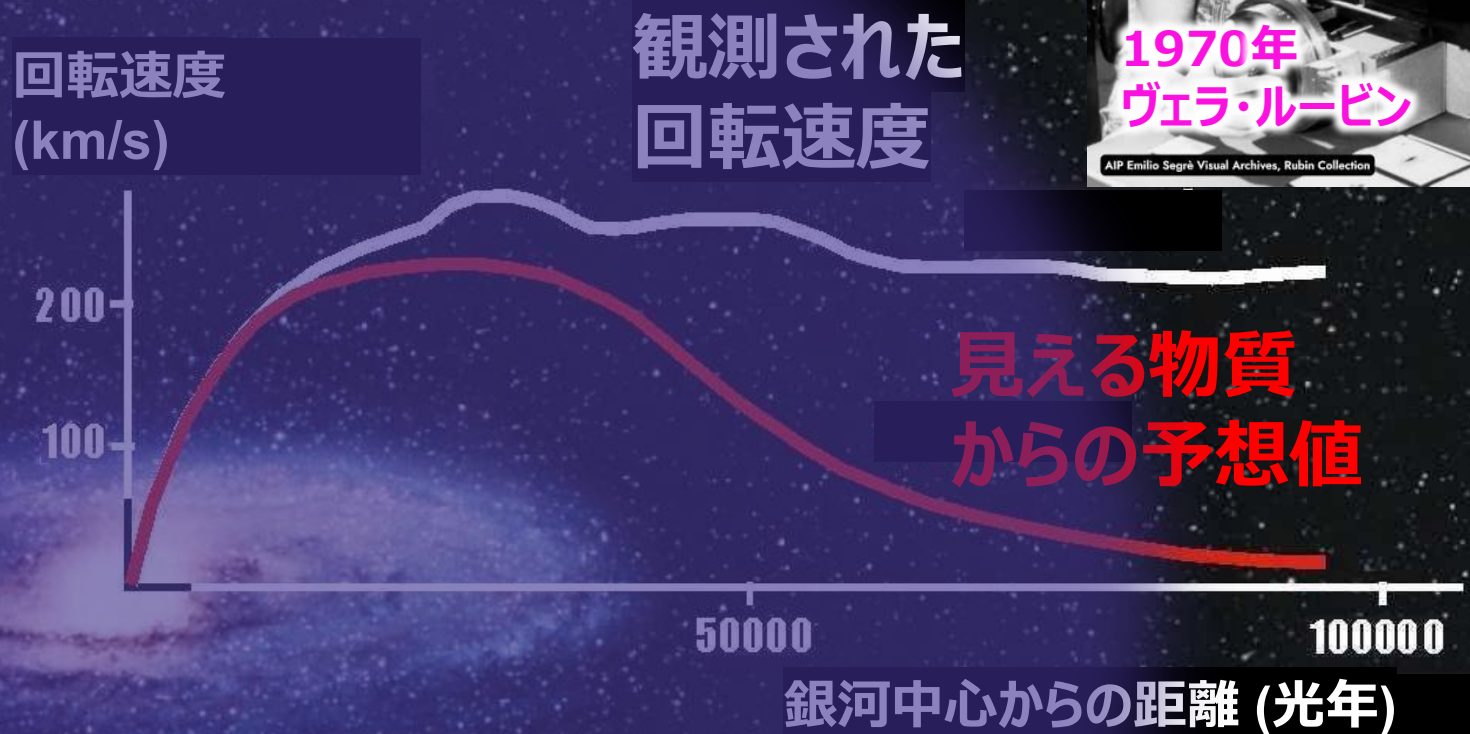
銀河の回転曲線



ダークマター存在の証拠1



銀河の回転曲線



← 重力 遠心力 →

← 重力 遠心力 →

見えない物質からの重力？ ←

ダークマター存在の証拠2

弾丸銀河団

重力レンズ効果から推定される
質量分布

X線で観測された
ガス分布

1.5' 25



ダークマター存在の証拠2

弾丸銀河団



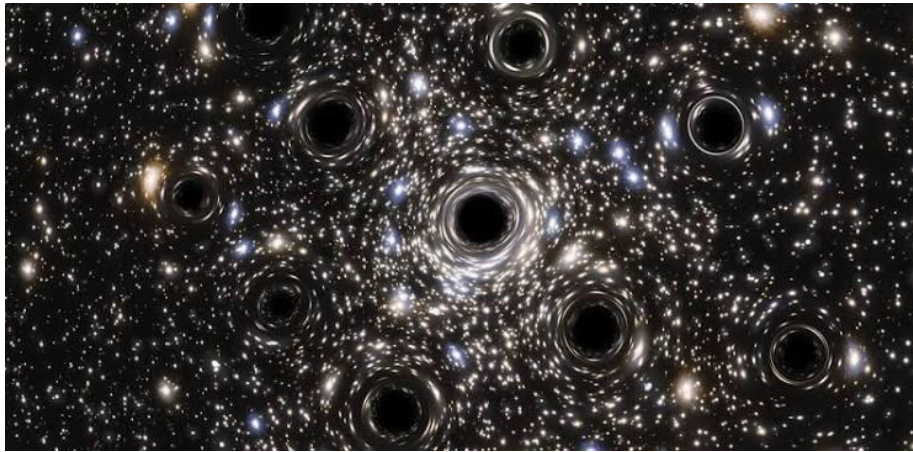
X線で観測された
ガス分布

重力レンズ効果から推定される
質量分布

ダークマターの候補はいろいろ

- 総量はわかるが、**個々の質量は不明**(90桁の不定性)

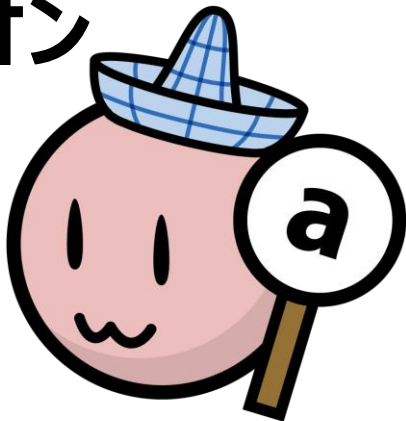
原始ブラックホール



WIMP



アクシオン



ダークフォトン



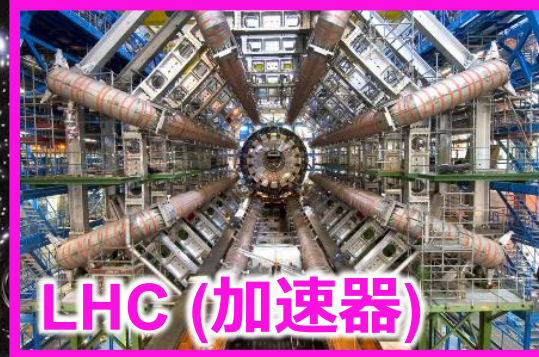
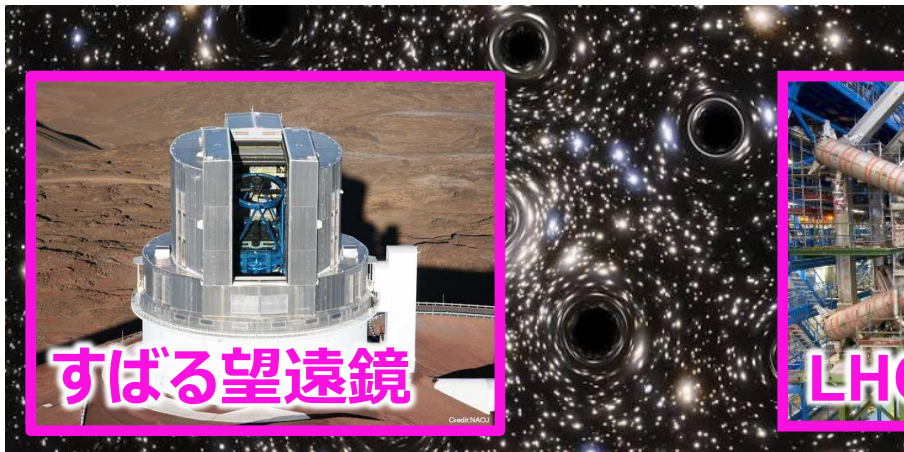
その他
未発見の
粒子？
複合物質？

ダークマターの候補はいろいろ

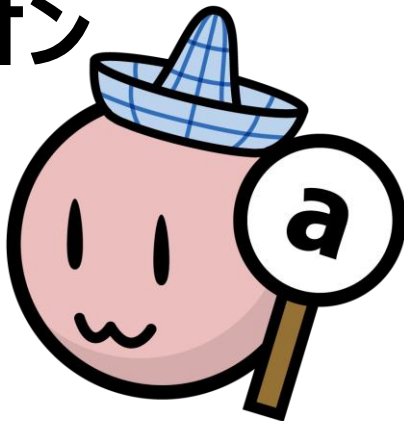
- 総量はわかるが、**個々の質量は不明**(90桁の不定性)

原始ブラックホール

WIMP



アクシオン



ダークフォトン



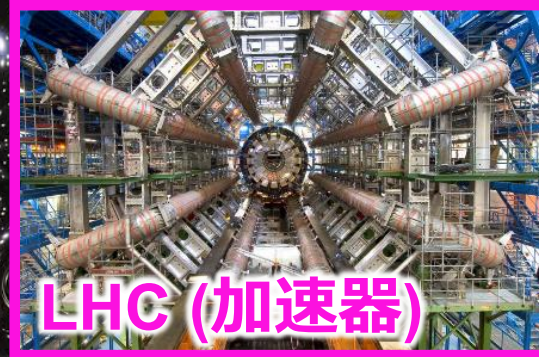
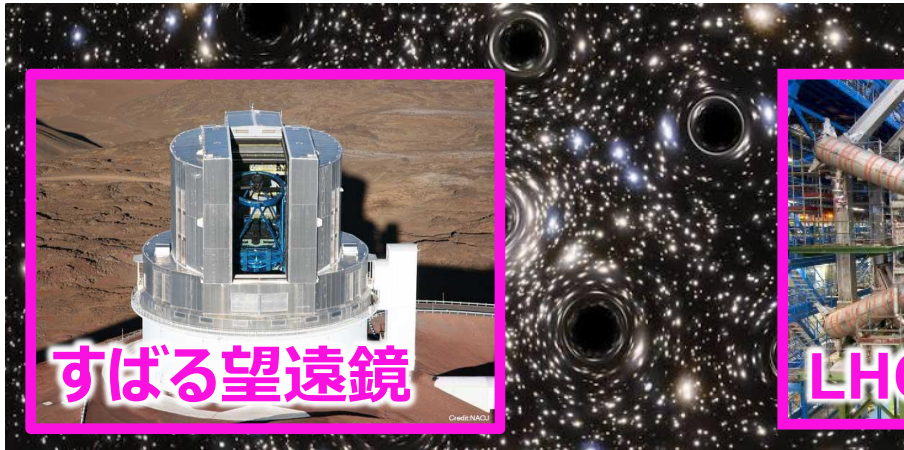
その他
未発見の
粒子？
複合物質？

ダークマターの候補はいろいろ

- 総量はわかるが、**個々の質量は不明**(90桁の不定性)

原始ブラックホール

WIMP



アクシオン

今回のお話



ダークフォトン

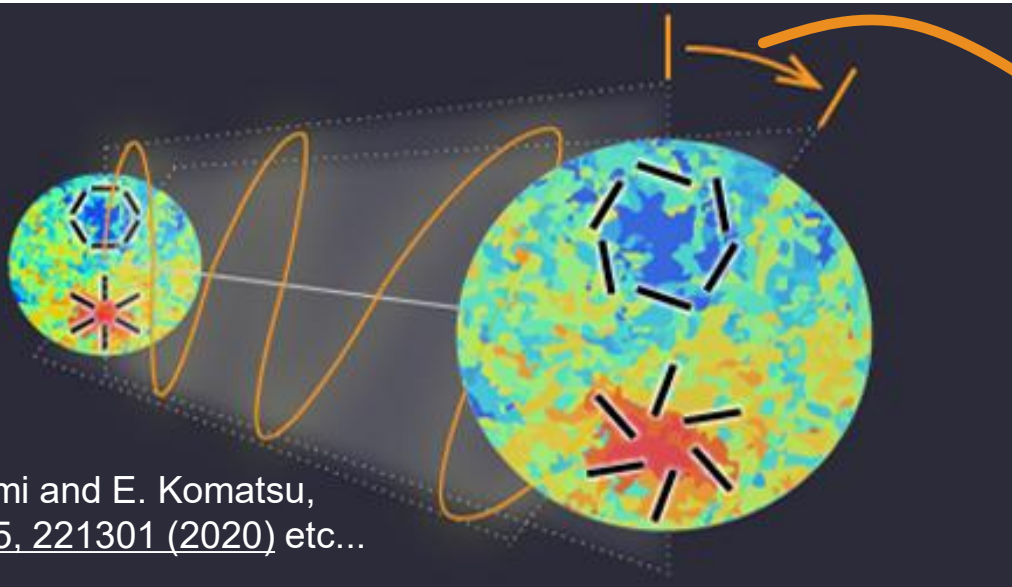


その他
未発見の
粒子？
複合物質？

アクシオンとは



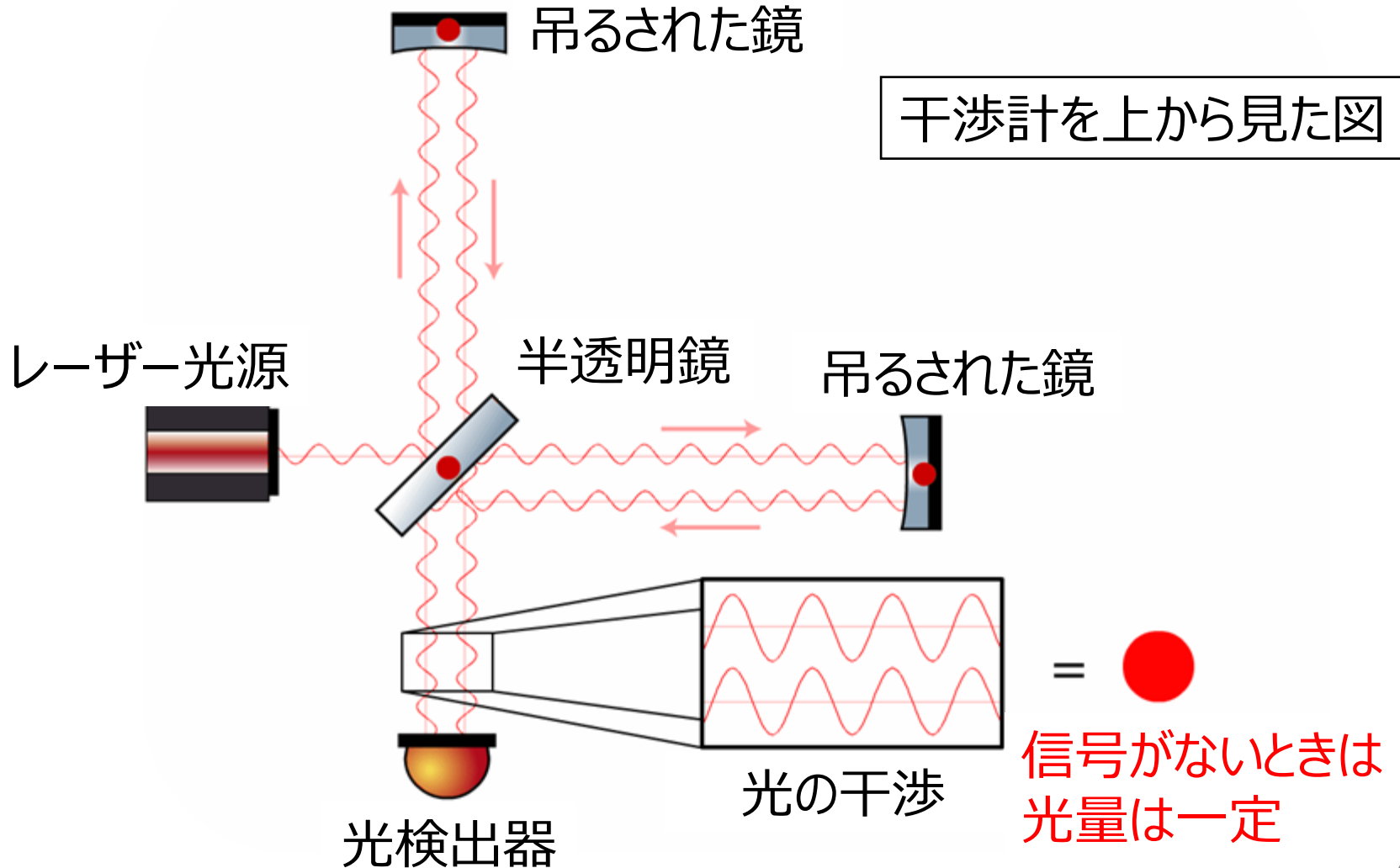
- 超弦理論などが予想する**未発見**の粒子
- ダークマターの**有力な候補**として近年高い注目
- 質量が小さく、**波**のようにふるまう
- 普通の物質との相互作用が**極めて小さい**
- 光とわずかに相互作用して**偏光を回転**させる
宇宙マイクロ波背景放射の偏光回転の原因かも



138億光年で
0.2度

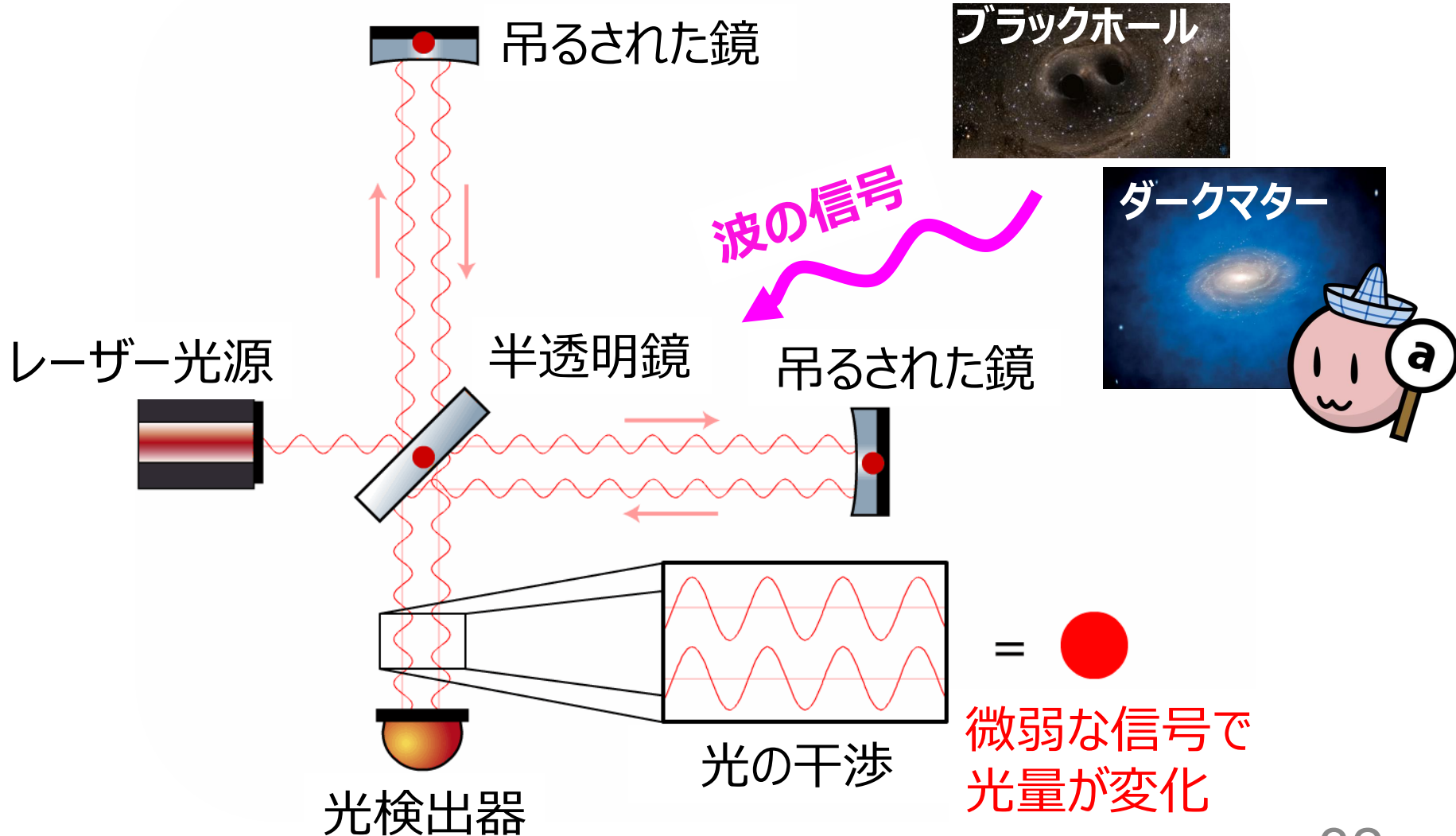
微弱な信号をレーザー干渉計で測る

- 光の位相の差を干渉縞の変化として測定



微弱な信号をレーザー干渉計で測る

- 光の位相の差を干渉縞の変化として測定



重力波の初検出

- 2015年 アメリカのLIGO実験が重力波を初検出
- アインシュタインが一般相対性理論を発表してから100年
- ブラックホールが合体する時に生じた時空のゆがみの波



2017年ノーベル賞



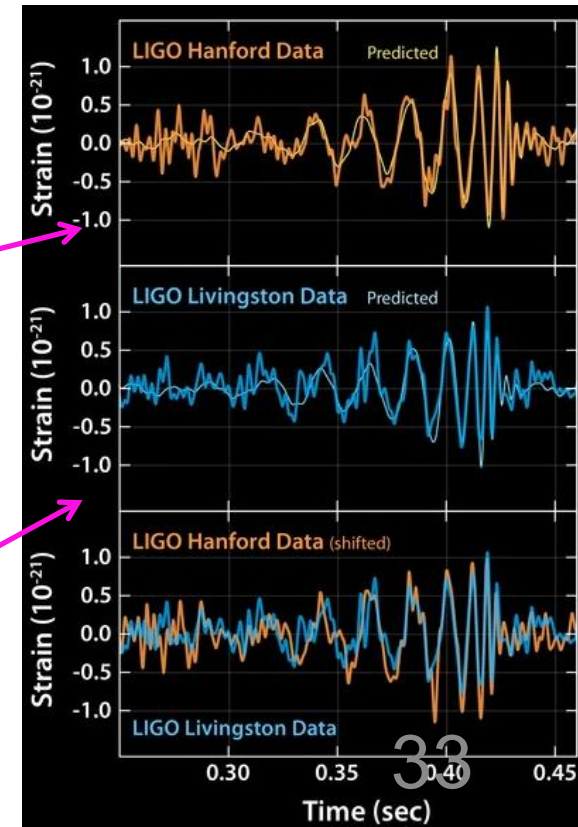
重力波



LIGOハンフォード

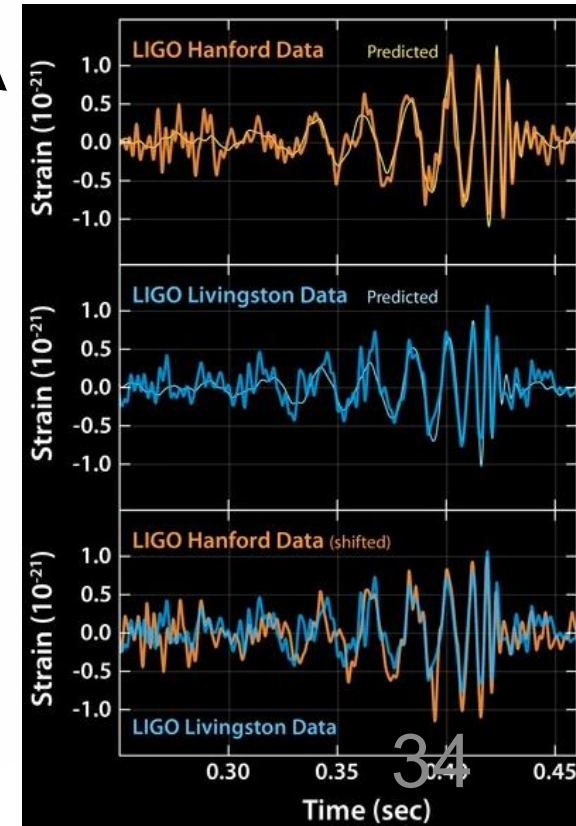
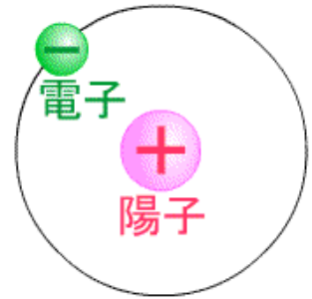
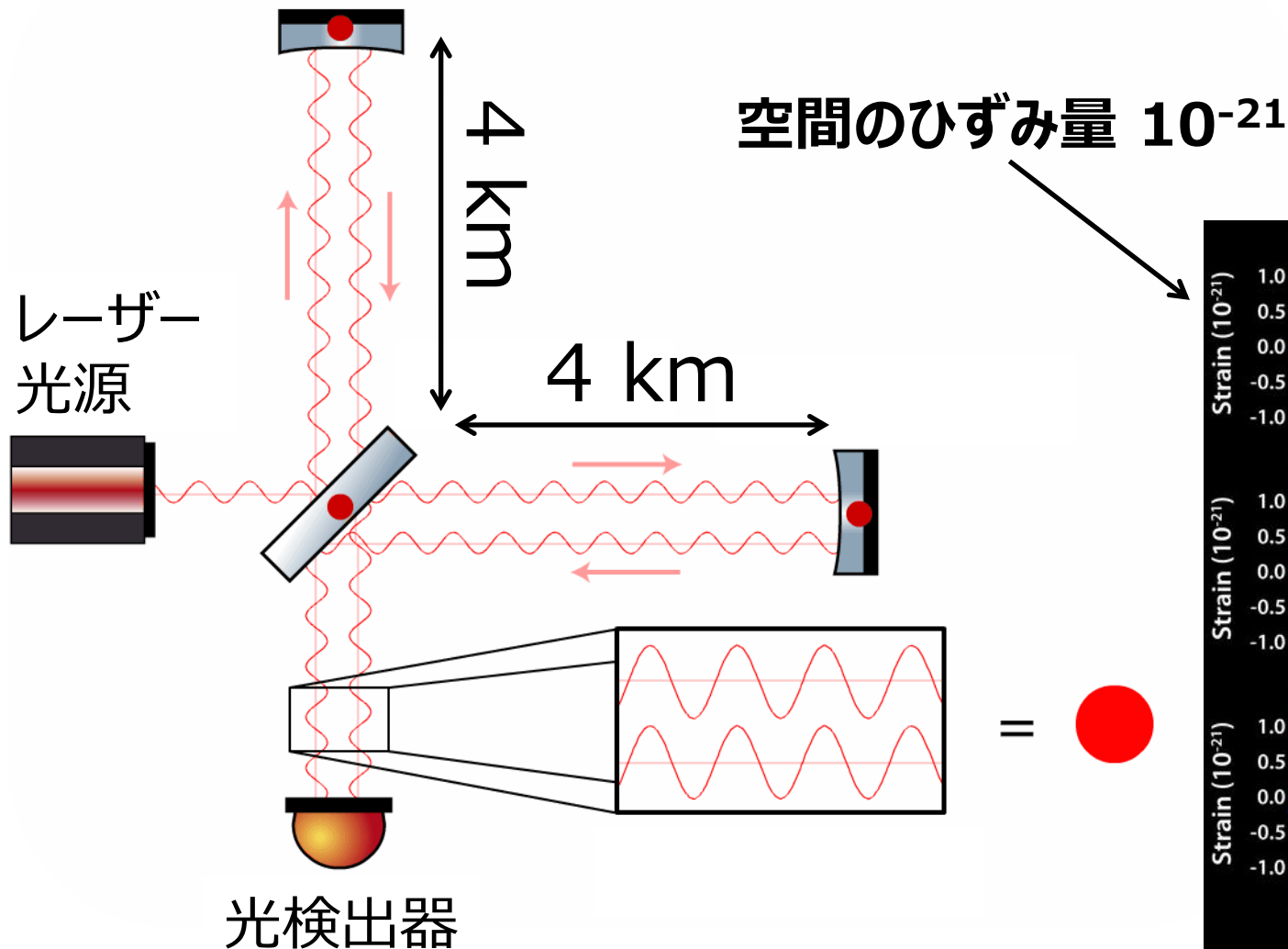


LIGOリビングストン



重力波の振幅は極めて小さい

- LIGOの4 kmの腕の長さが 10^{-18} mだけ変化
陽子の大きさの1/1000

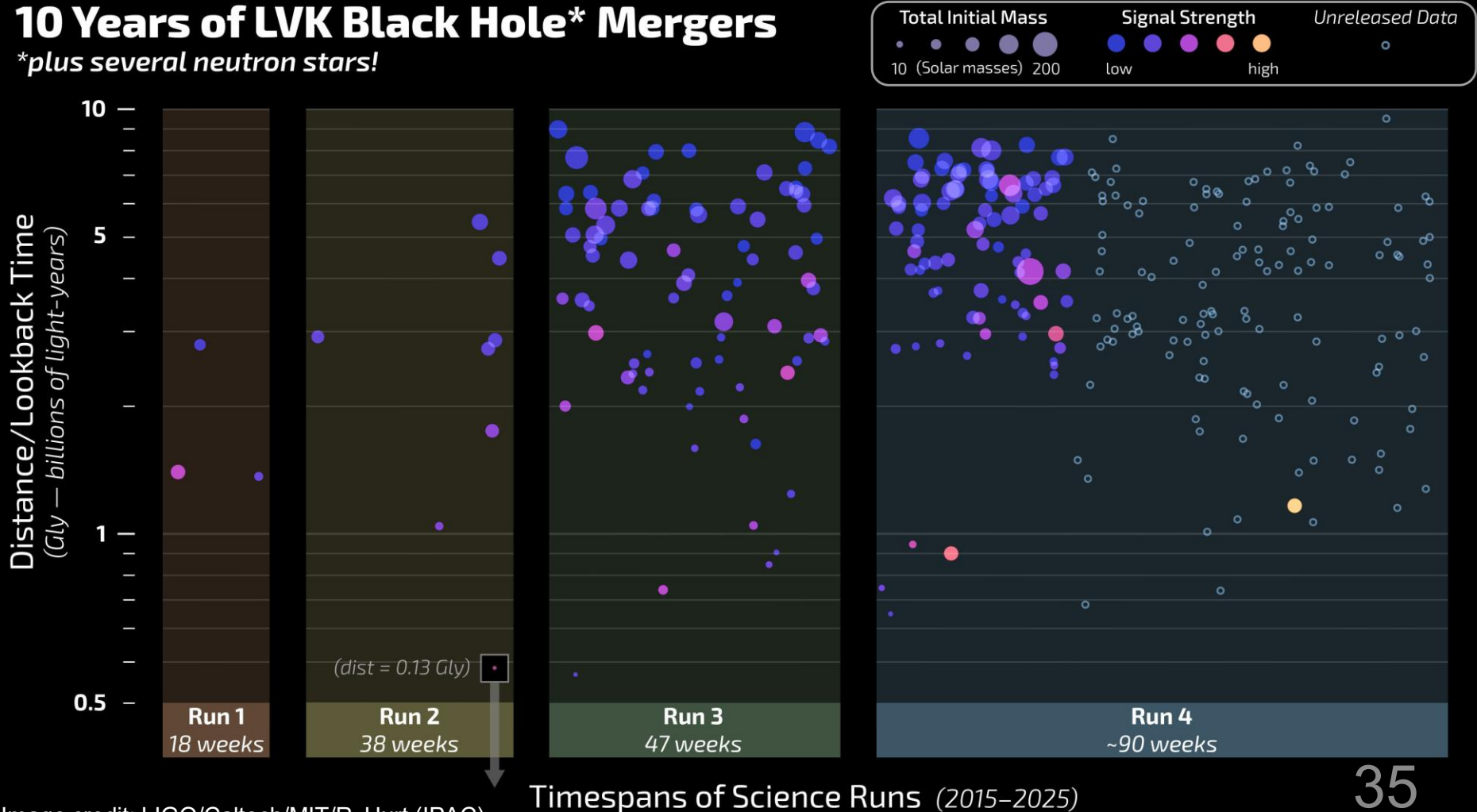


初検出から10年で300例以上観測

- 初検出まで100年、計測技術の着実な進展

10 Years of LVK Black Hole* Mergers

*plus several neutron stars!



国際重力波観測ネットワーク



大型低温重力波望遠鏡KAGRA

- 2010年にプロジェクトスタート
- 愛称: かぐら(神岡 + gravitational wave)
- 岐阜県の神岡鉱山地下に建設
- 14ヶ国、~130研究機関、~420名



2015年
ノーベル賞



プロジェクト代表:
梶田隆章



KAGRA

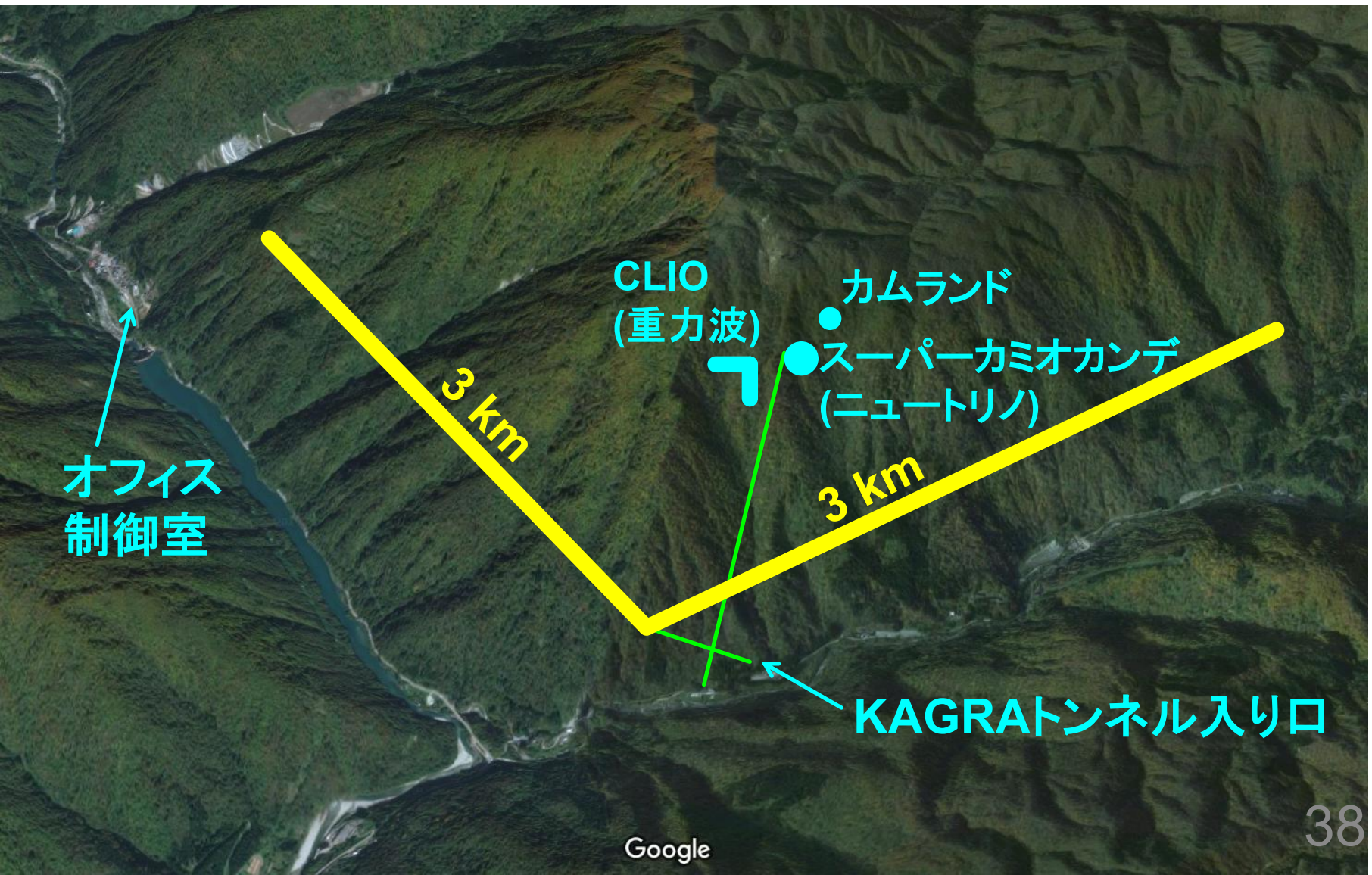


KAGRA The 36th KAGRA Face-to-Face Meeting
Date: December 15-17, 2025 Venue: Yonsei University, Seiwon Campus, Lee-Yeul Jee Hall

2025年12月の
コラボレーション会議

KAGRAの所在地

- 岐阜県飛騨市 池ノ山の中にある



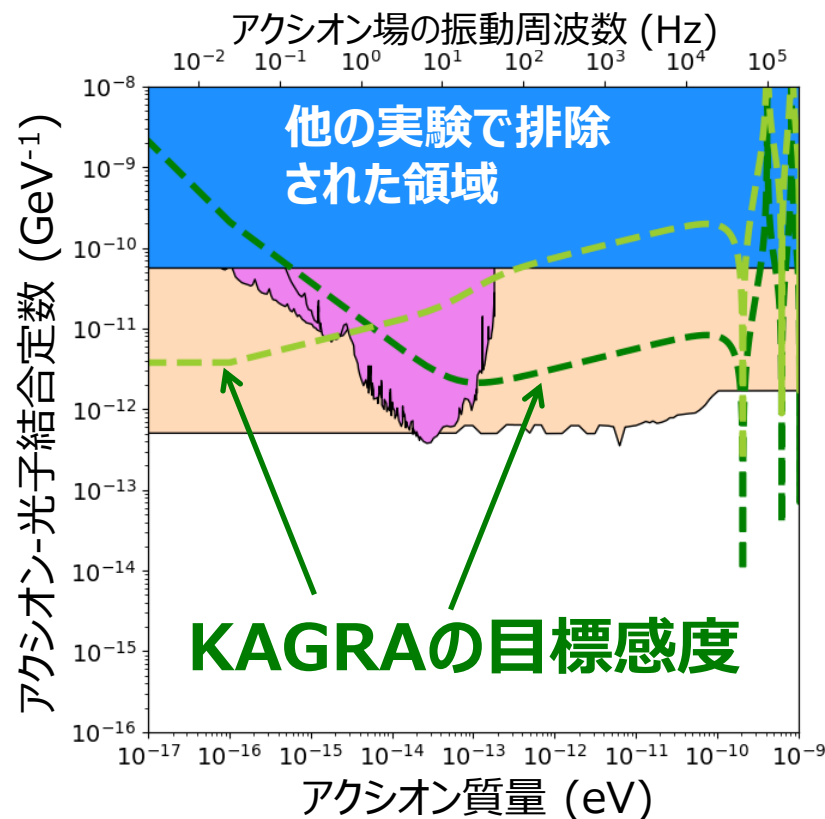
かぐらトンネル

- 2本の3km真空パイプの中をレーザー光が往復



重力波望遠鏡でアクシオン探索

- KAGRAの巨大なレーザー干渉計、高い感度を利用するとアクシオンも探索可能
- 重力波は長さの変化
アクシオンは偏光の変化
→ 同時に観測可能
- 2019年 提案



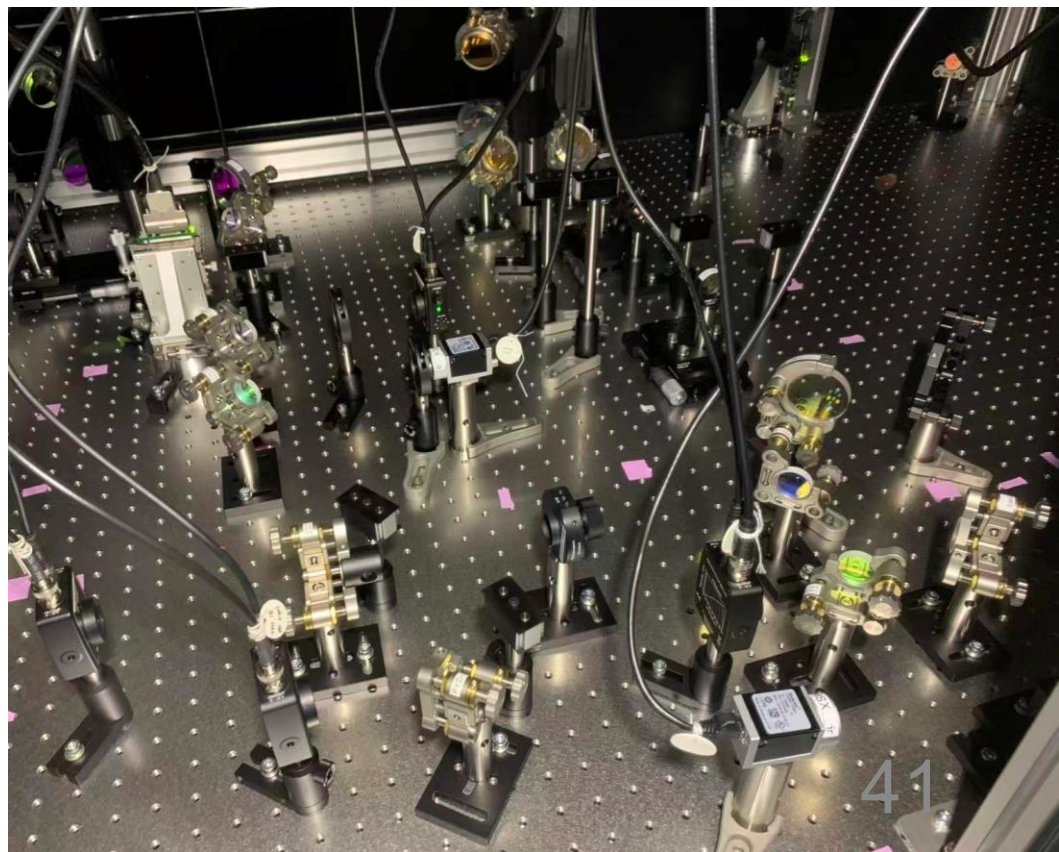
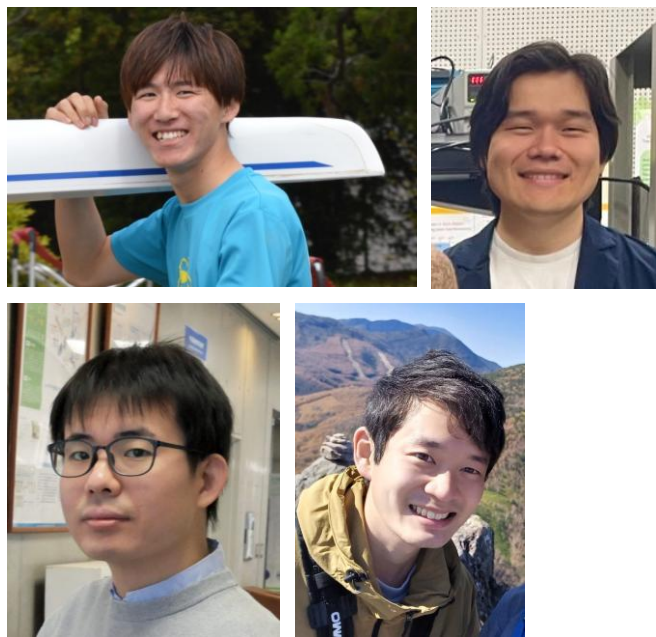
K. Nagano, T. Fujita, Y. Morisaki, I. Obata
PRL **123**, 111301 (2019)

K. Nagano, H. Nakatsuka, S. Morisaki, T. Fujita, Y. Morisaki, I. Obata
PRD **104**, 062008 (2021)

KAGRAでのアクシオン探索の現状

- 2021年 偏光光学系設置
- 2025年6-8月 重力波とアクシオンの
世界初の同時観測を実施
- 現在、データ解析中

撮影: Haoyu Wang

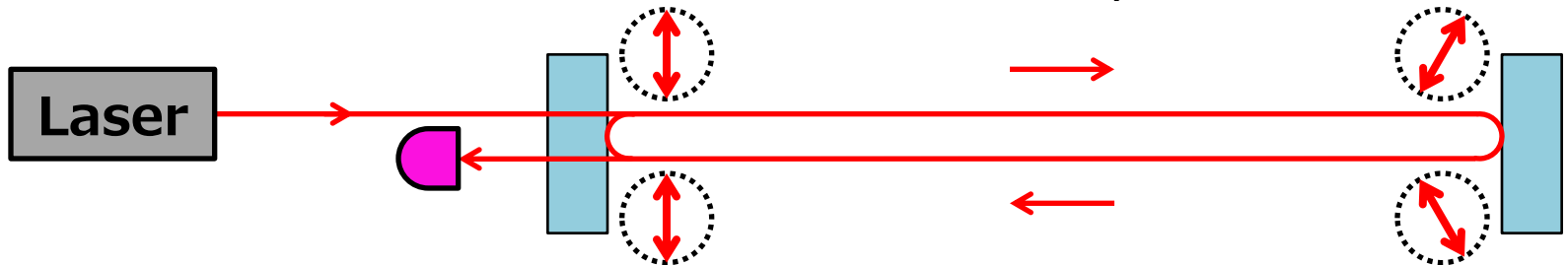


アクションに特化した実験

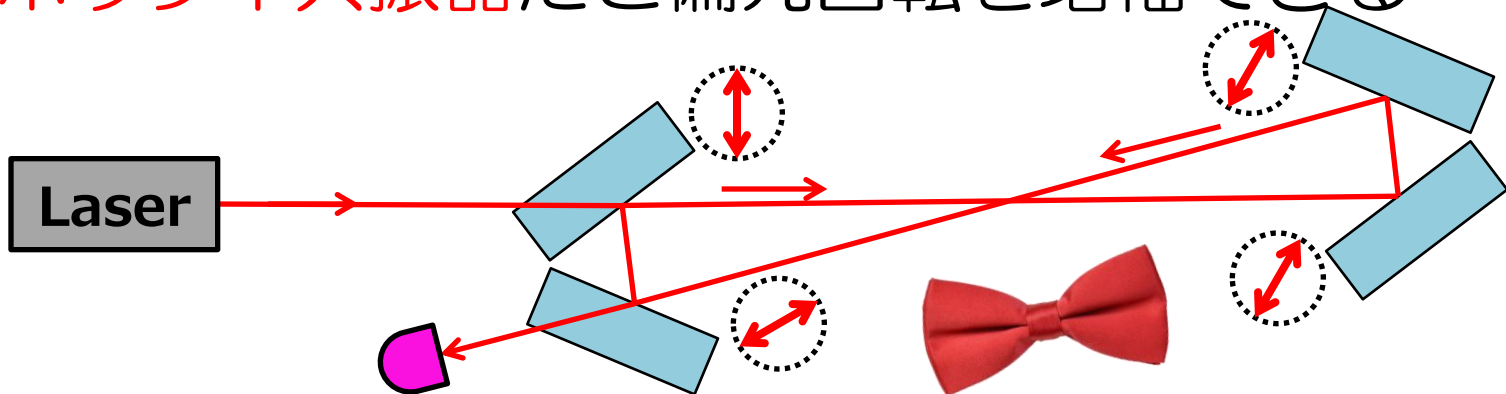
- 短い距離では偏光の回転角が小さい



- 光共振器で距離を増幅することはできるが、鏡の反射で偏光が反転してしまう(KAGRAの場合)



- ボウタイ共振器だと偏光回転を増幅できる

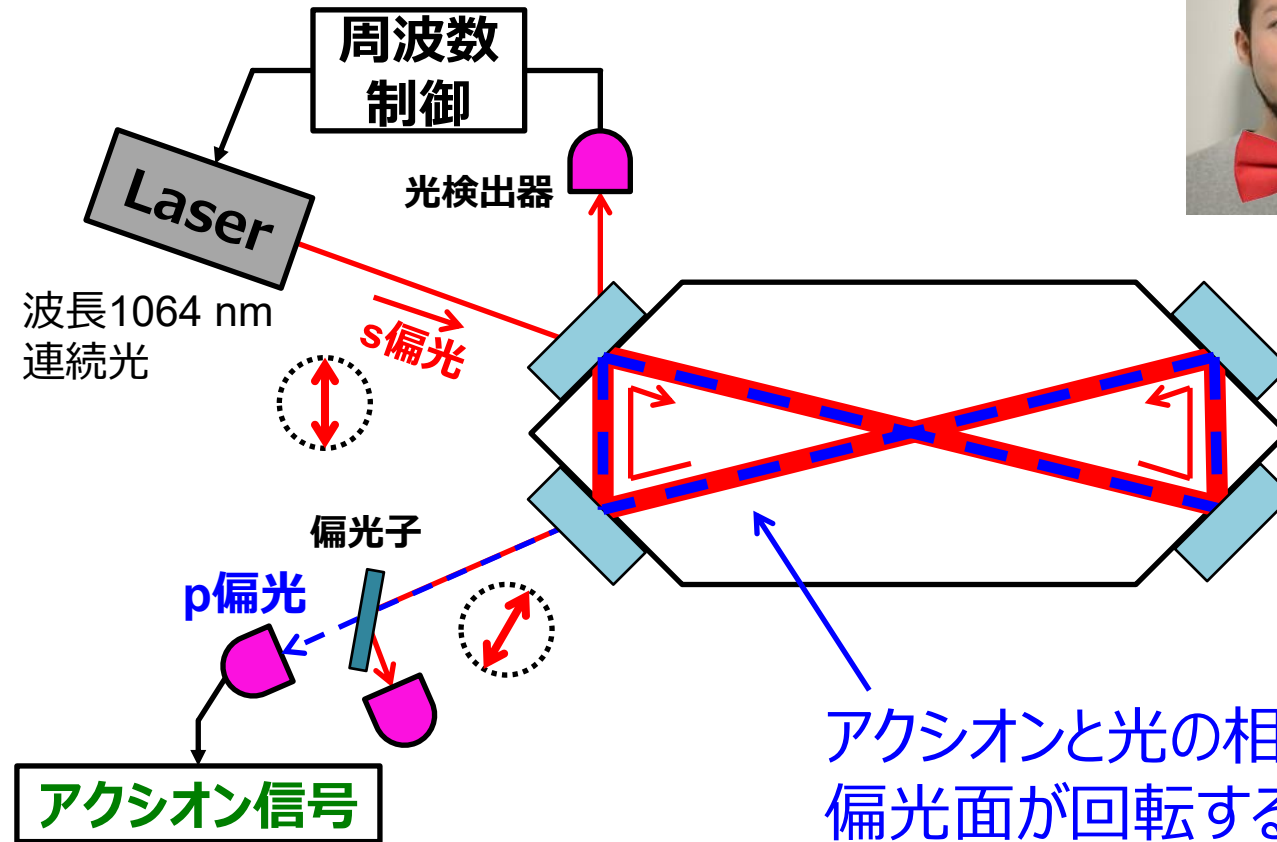


DANCEのセットアップ

Dark matter Axion search with riNg Cavity Experiment



I. Obata, T. Fujita, YM,
PRL 121, 161301 (2018)



アクシオンと光の相互作用によって
偏光面が回転する(p偏光が生じる)



DANCEの現状

- 東京大学本郷キャンパス理学部1号館で実験中

- 2021年に初実証

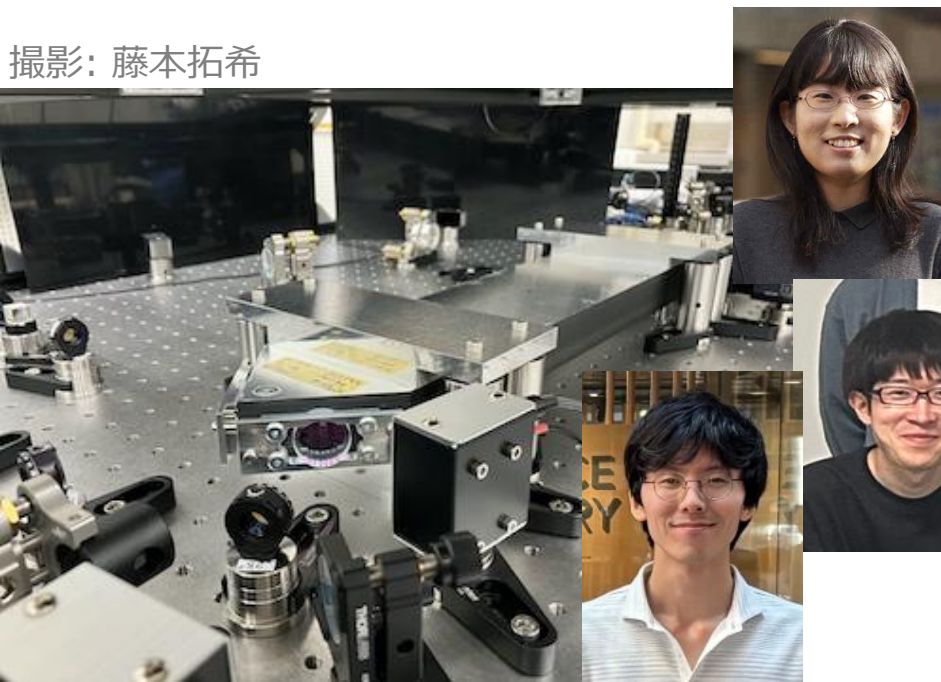
Y. Oshima+, PRD 108, 072005 (2023)

- それから約5桁の改良

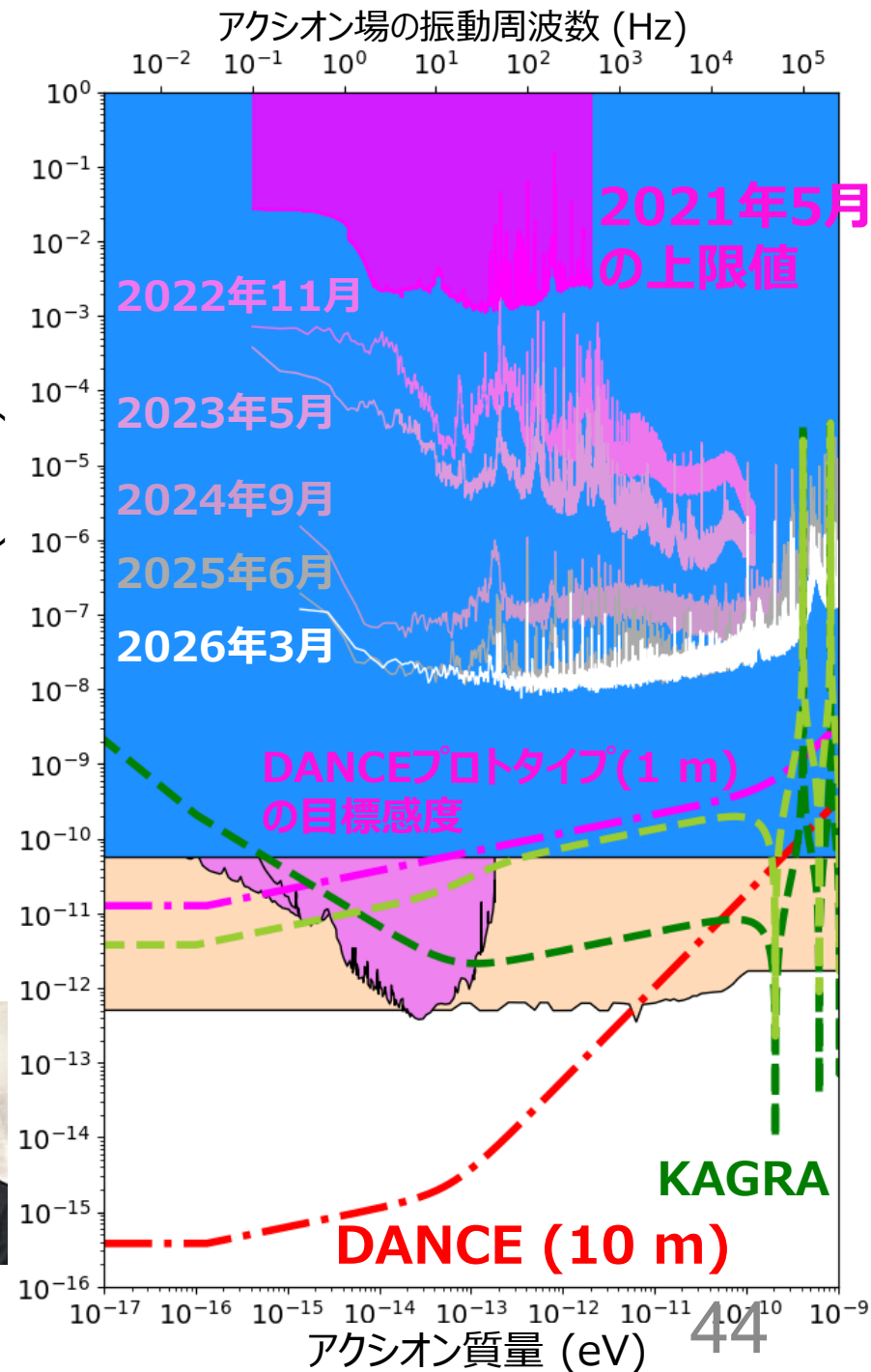
H. Takidera+, PRD 112, 063048 (2025)

H. Fujimoto, PhD thesis (UTokyo 2025)

撮影: 藤本拓希

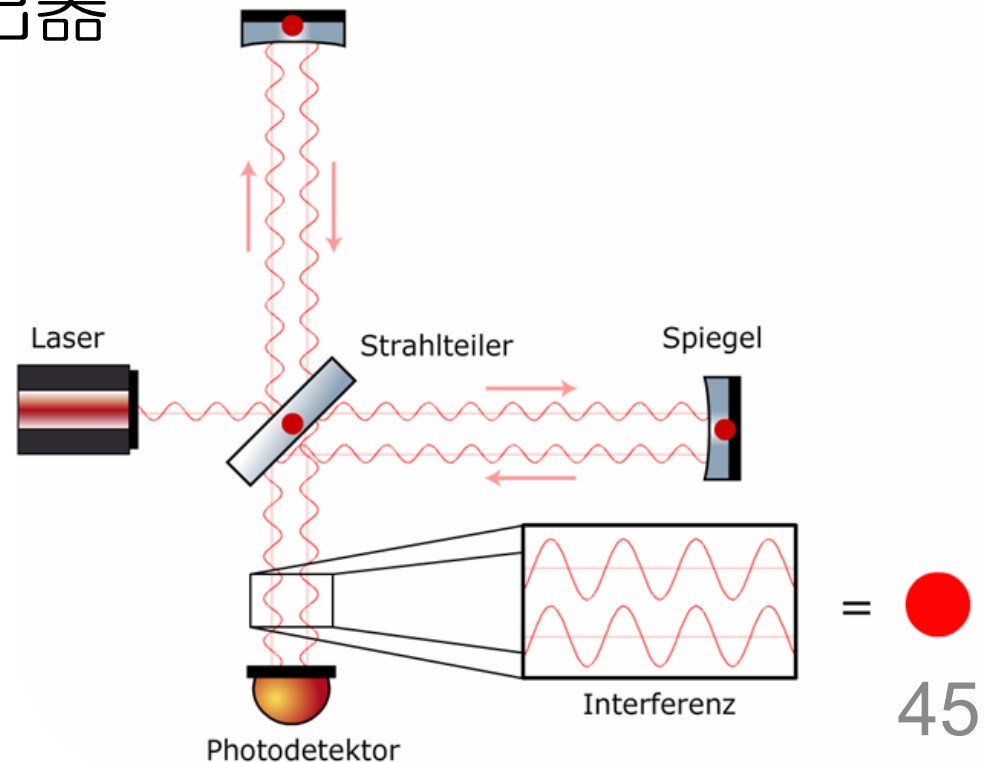


アクシオン-光子結合定数 (GeV^{-1})



鍵となる計測技術

- 高安定・高出力なレーザー光源
- 複屈折(偏光依存性)の少ない光学素子
複屈折の波長依存性を使った調整もしている
- 振動の抑制(地面振動、音響など)
- 低雑音回路・光検出器
- 真空・低温
- 量子計測

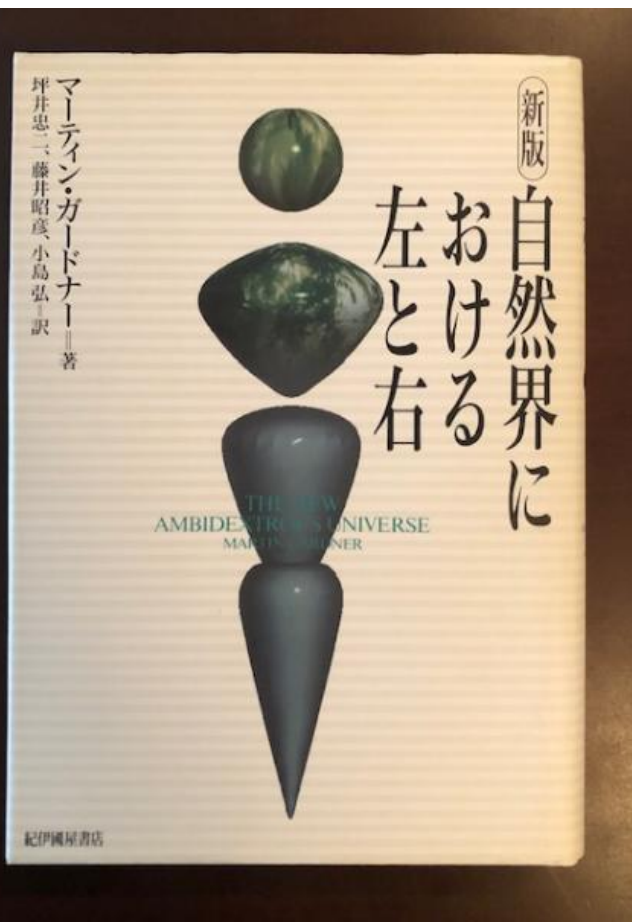


参考文献

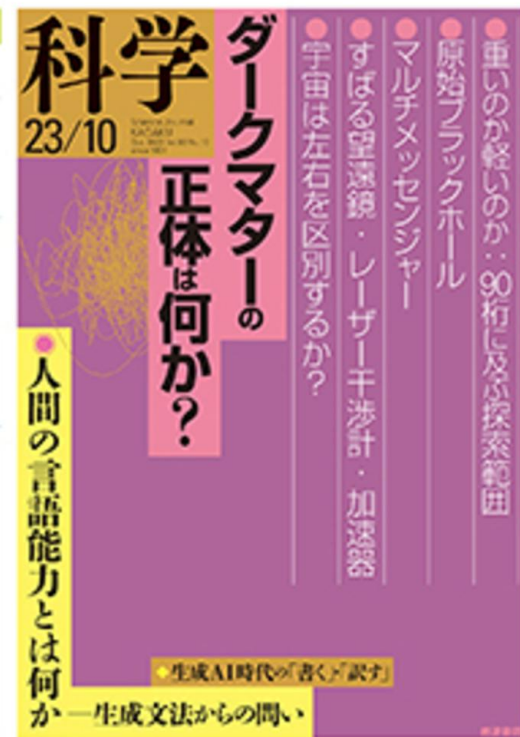
宇宙人に左右を伝える話の元ネタ

高校3年生の頃読んで、衝撃を受けた
まさかアクションの研究をやることになるとは...

マーティン・ガードナー
『自然界における左と右』



『科学 2023年10月号』

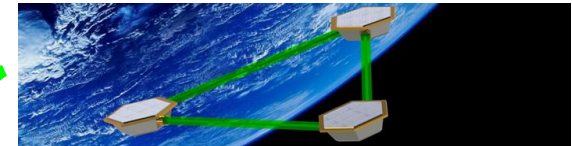
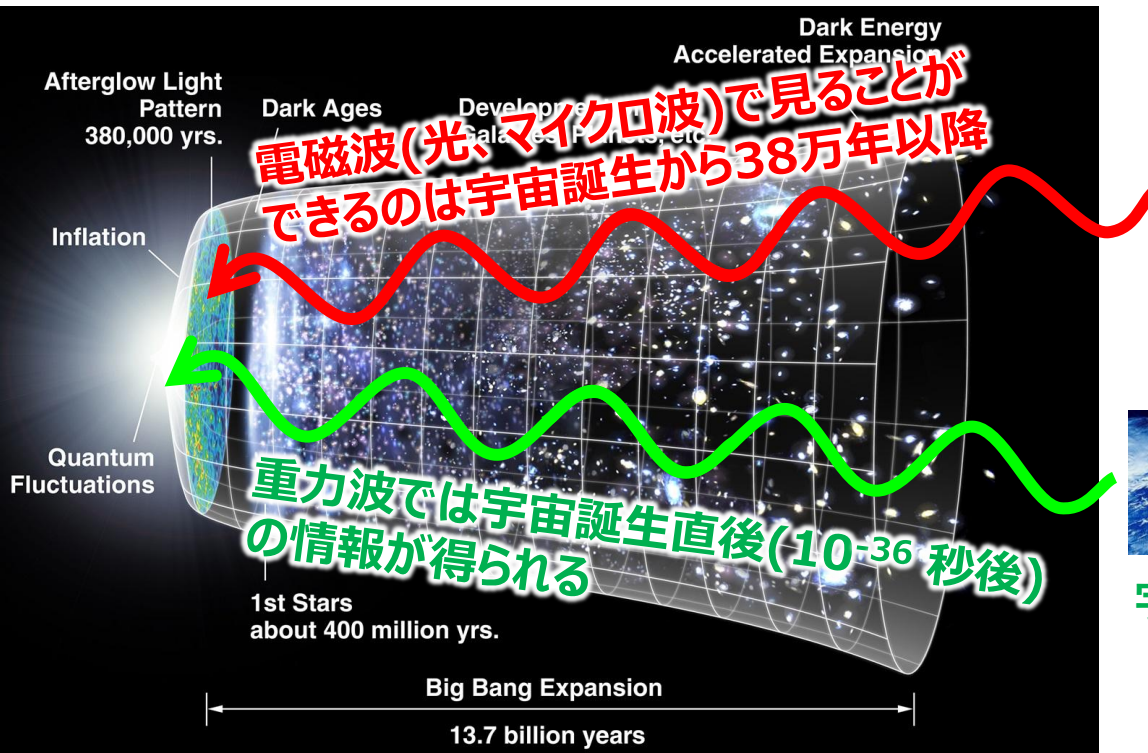


『Newton別冊
宇宙の未解決問題』



今回話せなかったこと

- ダークフォトン(ベクトル粒子)の探索もやっている
KAGRAのサファイア鏡を活かした探索
- 重力波の研究もおもしろい
宇宙膨張の速度 (ダークエネルギーの解明)
宇宙誕生の瞬間を「聞く」 (インフレーションの解明)



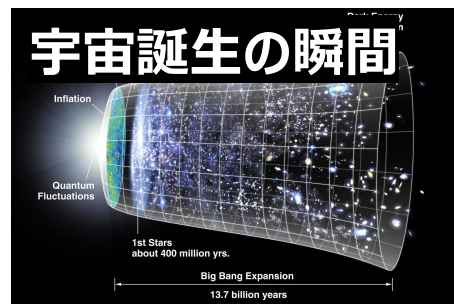
宇宙重力波望遠鏡DECIGO

まとめ

スライドダウンロード



- 宇宙の約95%は正体がわかっていない
- 重力波で用いられるレーザー干渉計には
極限的な計測技術が使われている
- **レーザー干渉計**を用いてこの正体不明なものに
迫る研究を行っている



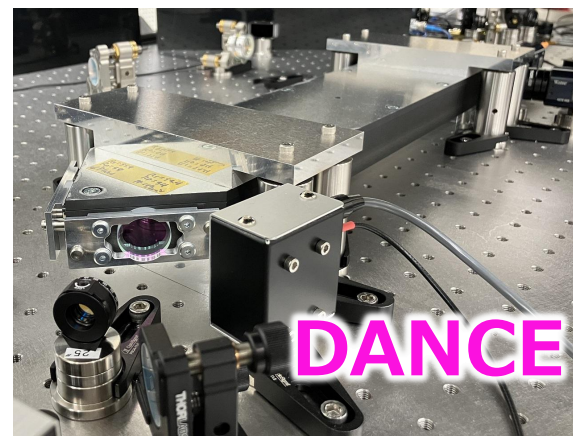
創発的研究支援事業
Fusion Oriented R&D search for disruptive Science and Technology

公益財団法人 三菱財団
THE MITSUBISHI FOUNDATION

科研費
KAKENHI

宇宙創生の物理法則はなにか？
理論・観測・実験の融合によるスケールを超えた挑戦

What is the physical mechanism of the origin of the Universe?



NEXUS
Networked Exchange, United Strength for Stronger Partnerships between Japan and ASEAN

日ASEAN科学技術・
イノベーション協働連携事業

48