

重力波検出器開発のこれから

Caltech

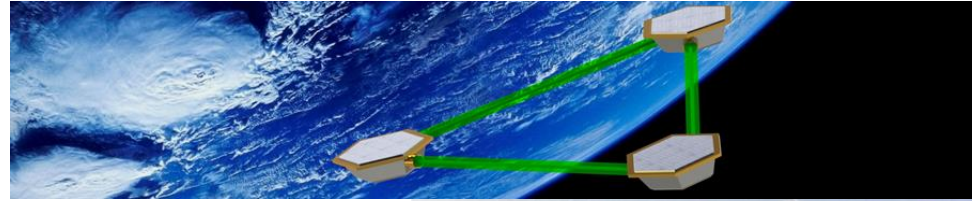
道村唯太

カリフォルニア工科大学 LIGO研究所

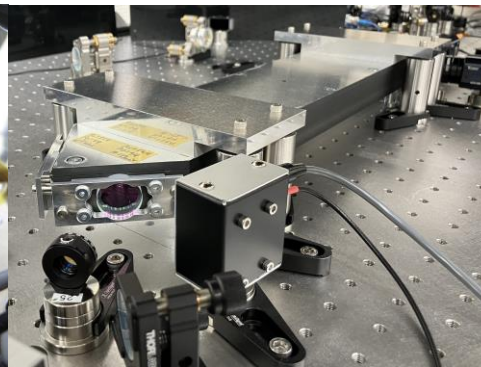
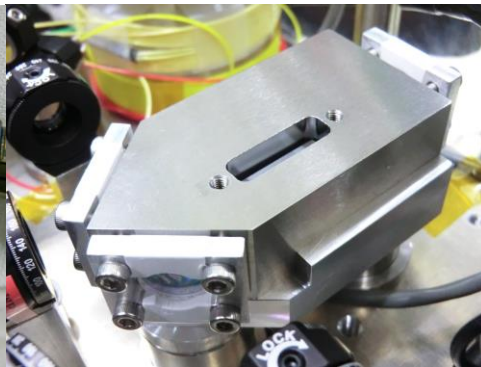
東京大学大学院理学系研究科附属 ビッグバン宇宙国際研究センター



自己紹介

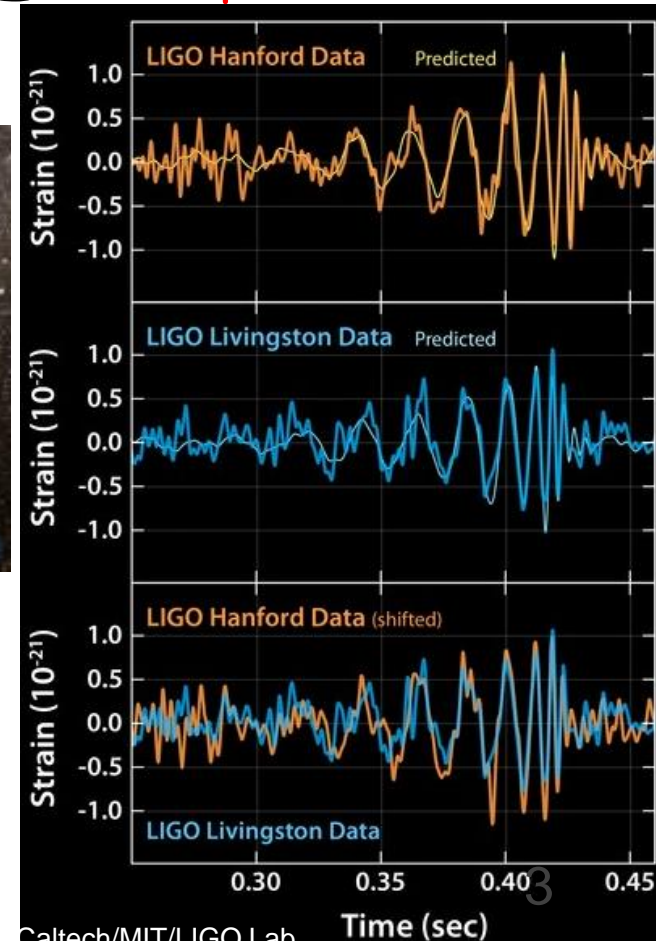
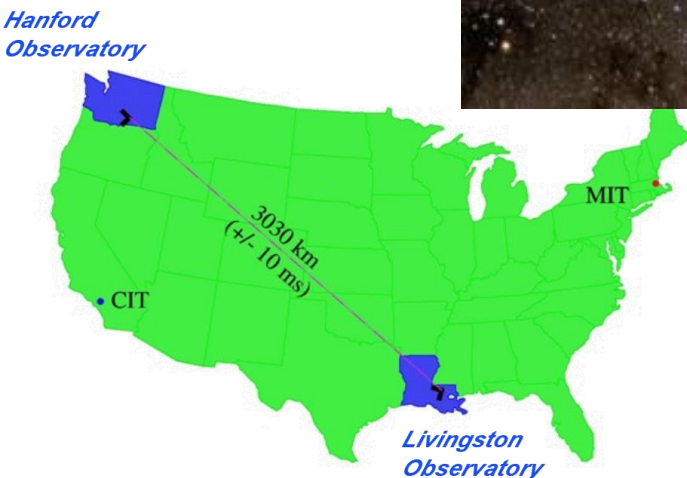


- 道村唯太 (みちむら ゆうた)
- 1987年生まれ 神奈川県横浜市出身
刈谷総合病院で生まれる
- 2015年に東京大学で博士(理学)取得
- 2014-2022年 東京大学 物理学専攻 助教
- 2022年4月からカリフォルニア工科大学
Research Scientist at LIGO Laboratory
- 重力・相対論実験
地上・宇宙の**重力波検出器**
テーブルトップ実験



重力波の初検出

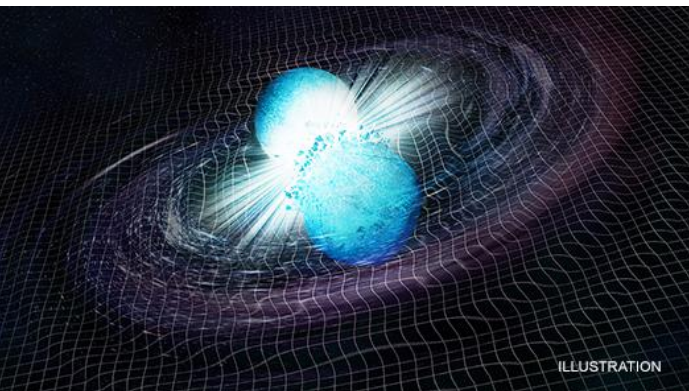
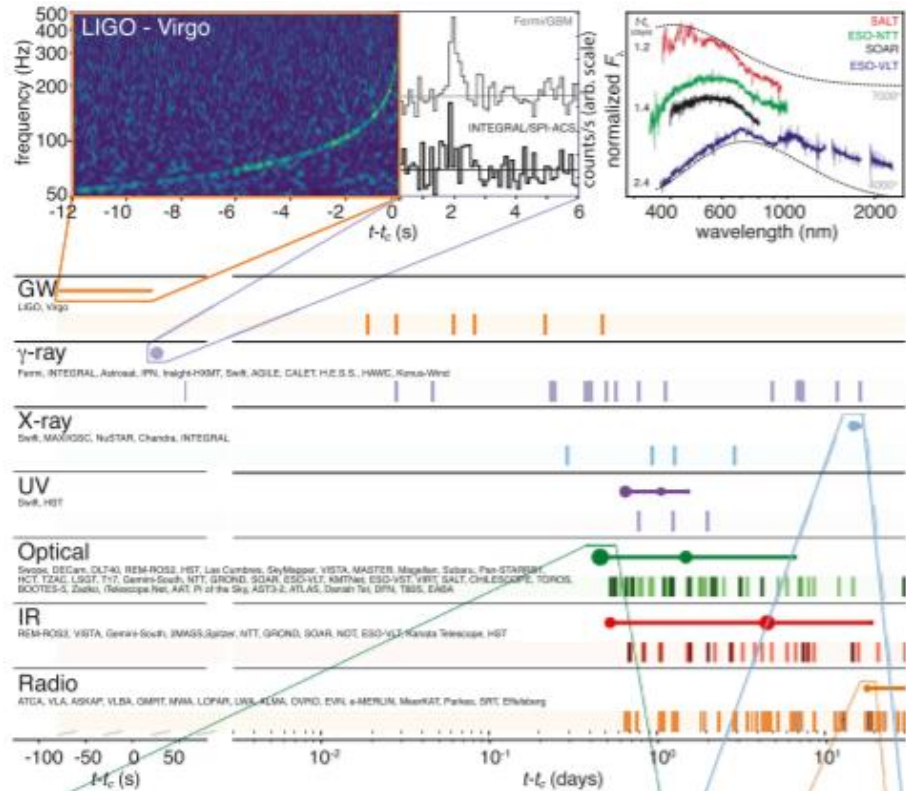
- 2015年9月14日にアメリカの2台のLIGOで同時検出
 - **ブラックホール連星**の合体からの重力波
- アインシュタインによる予言から**100年**
- 宇宙を見る**新しい手段**



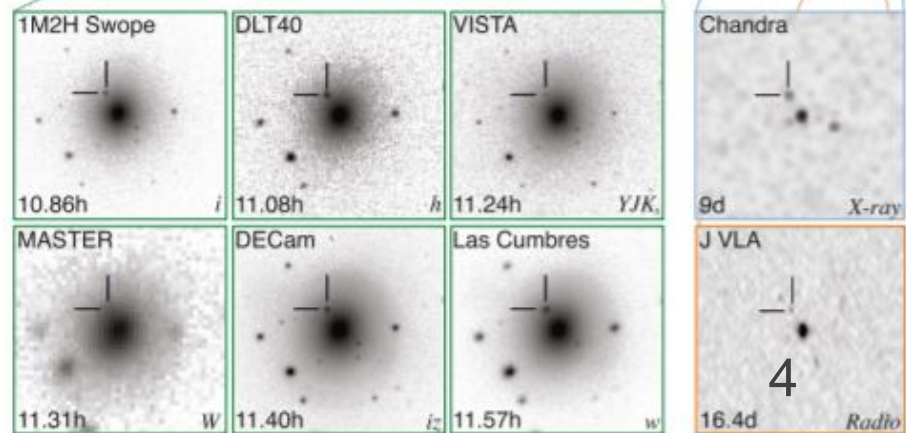
PRL 116, 061102 (2016)
<https://www.ligo.caltech.edu/>

連星中性子星合体からの重力波

- 2017年8月17日に初検出
- ほぼ同時に
ガンマ線バーストを観測
その後も様々な
電磁波の波長や
ニュートリノで観測
- マルチメッセンジャー
天文学の幕開け



[ApJL, 848:L12, \(2017\)](https://doi.org/10.1088/1361-6382/aa608c)





2017年 ノーベル物理学賞

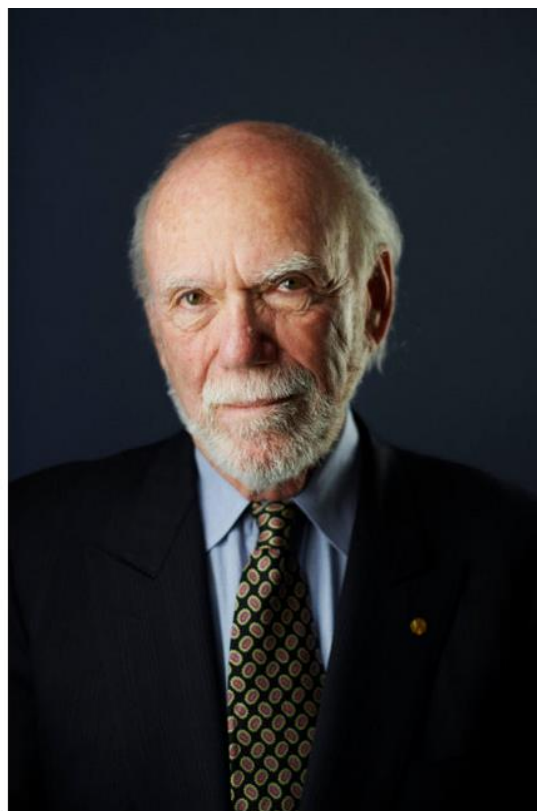
- LIGO検出器および重力波の観測への決定的な貢献



© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

Rainer Weiss

Prize share: 1/2



© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

Barry C. Barish

Prize share: 1/4



© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

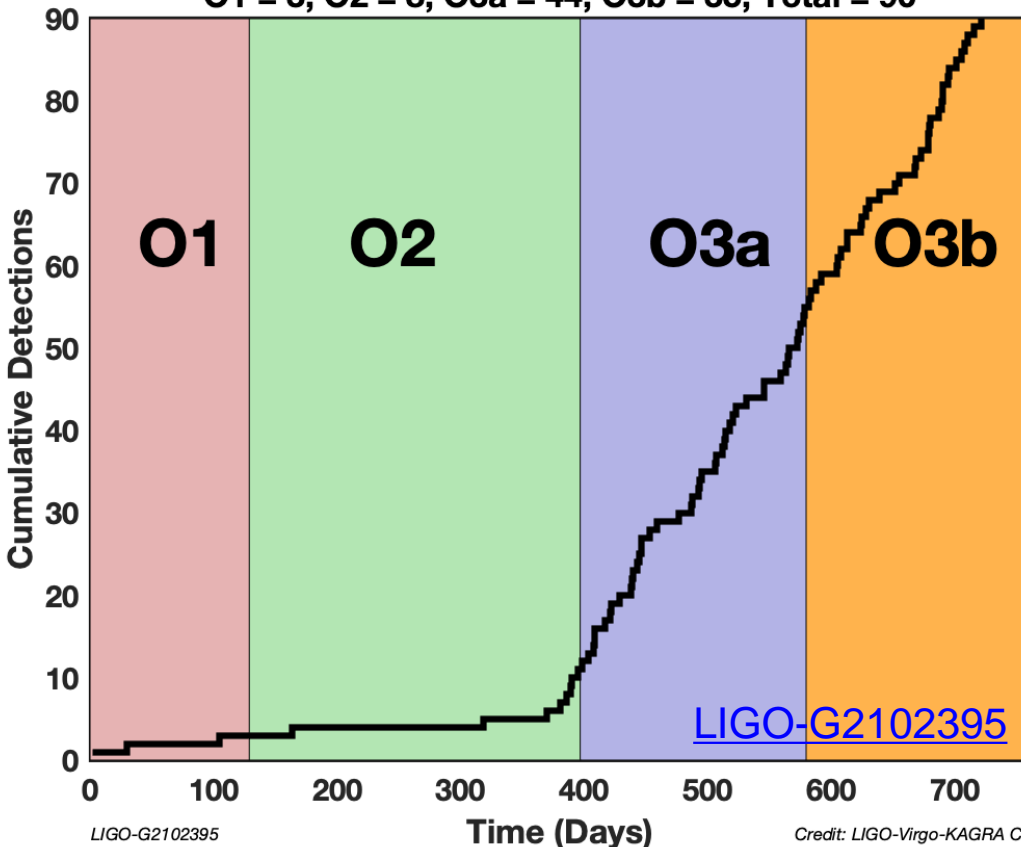
Kip S. Thorne

Prize share: 1/4

その後も続々と重力波を検出

- 2020年3月に終了したO3観測までに**90イベント**
- 情報は1分以内に公開、iPhoneアプリも登場
- 2023年5月24日に**観測再開**予定(O4)

O1 = 3, O2 = 8, O3a = 44, O3b = 35, Total = 90



<https://apps.apple.com/jp/app/gravitational-wave-events/id1441897107>

今回のお話

- **重力波とは？**

 - 一般相対性理論と重力波

 - これまでの観測でわかってきたこと、わからないこと

- **地上重力波検出器**

 - レーザー干渉計による検出の原理

 - 国際観測ネットワークの今後の観測計画

 - 特にLIGOの現状とこれから

- **宇宙重力波検出器**

 - 重力波の多波長観測

 - 特にDECIGOの現状とこれから

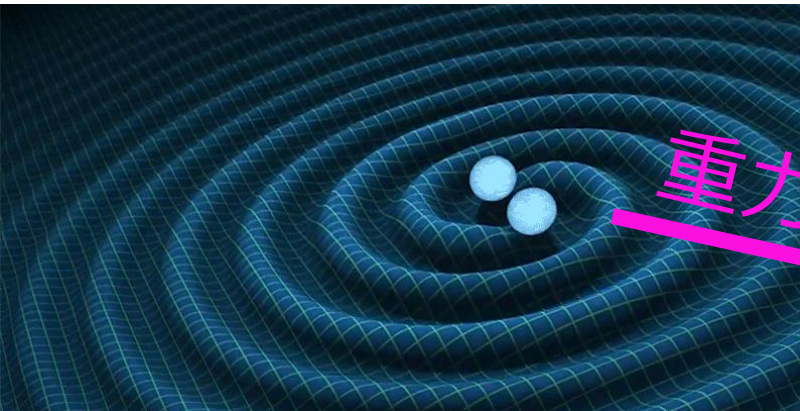
- **重力波検出器を利用したダークマター探索**

 - ゲージボゾン探索、アクシオン探索

重力波検出器の開発はこれからが面白い！ 7

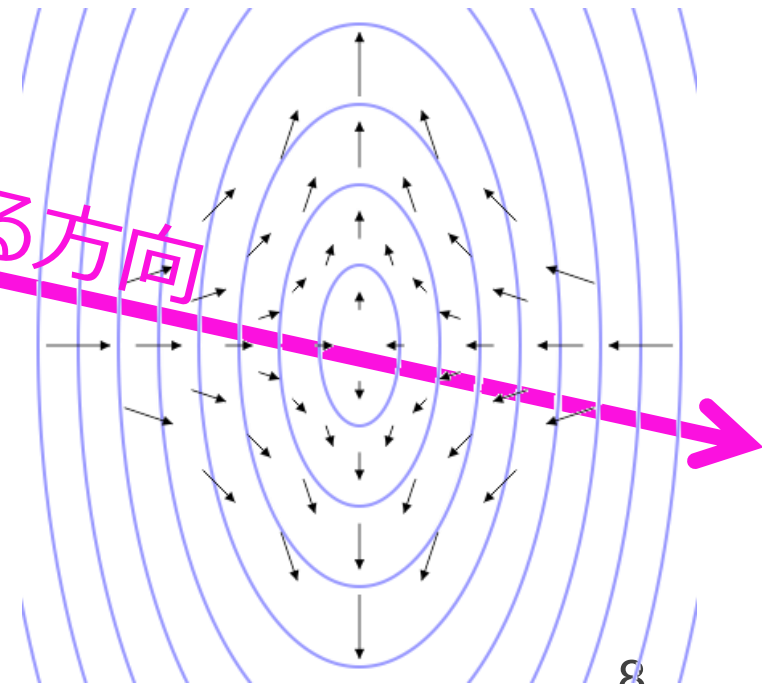
重力波とは？

- 光速で伝搬する時空のさざ波
- 物体の加速度運動で生じる
- 四重極放射、2つの偏極(+モードとxモード)
- 透過性が高い \leftrightarrow 相互作用が弱い



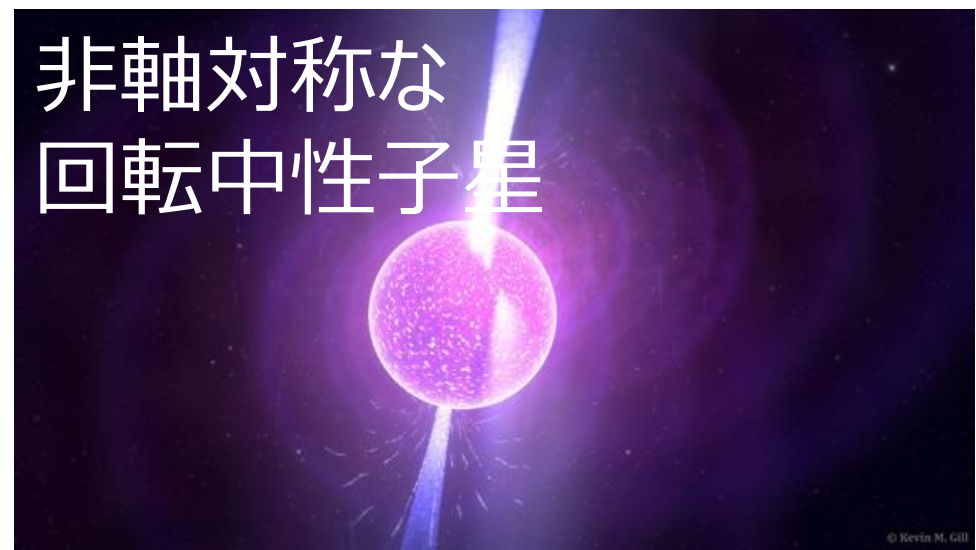
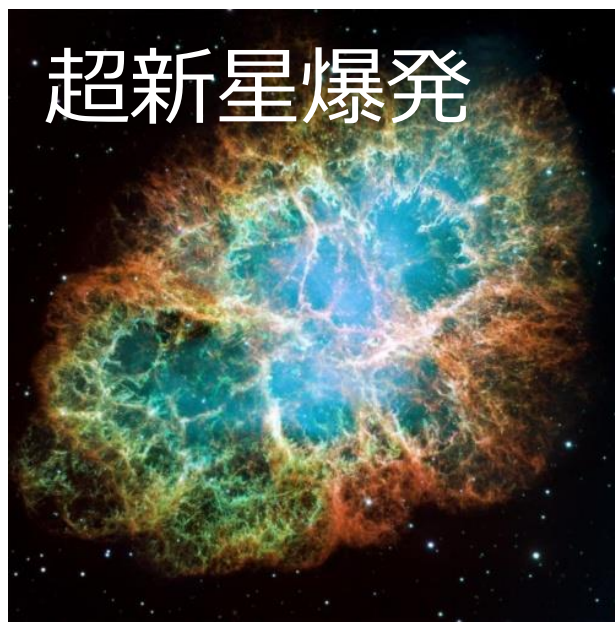
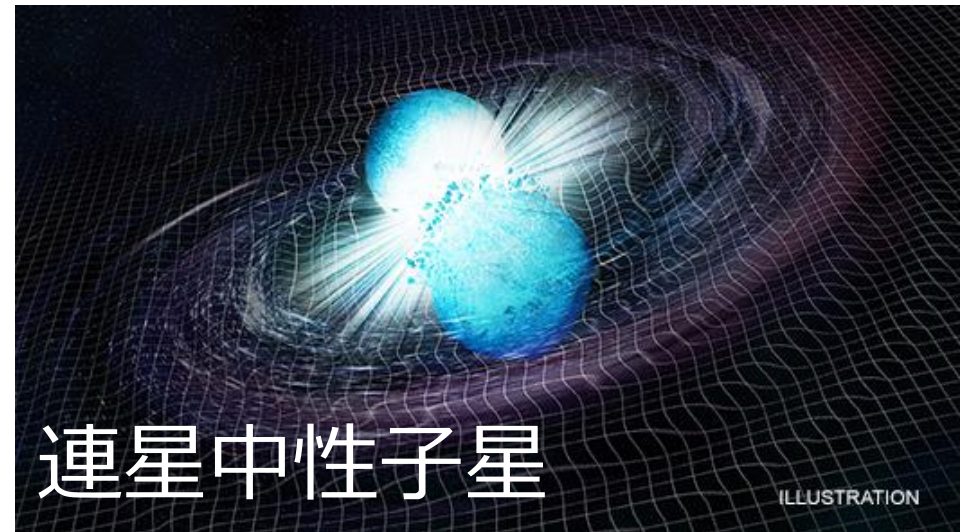
重力波の伝わる方向

- 質量と加速度が大きいほど大きな振幅の重力波



重力波源となり得る天体現象

- とても重く、とても速く動く天体



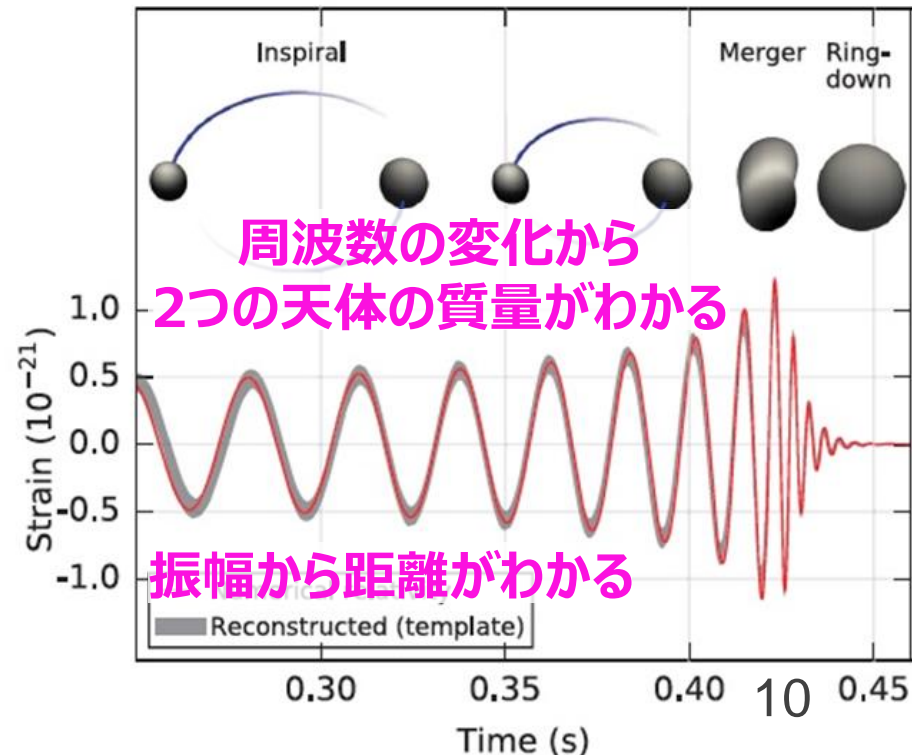
重力波観測でなにがわかるか

- 星の中(中性子星の状態方程式)を見ることができる
- 光で見ることができない天体を見ることができる
ブラックホール、ダークマター、未知の天体？
- 連星合体の場合、距離、質量、スピンがわかる

重力波で内部が見える



光では表面しか見えない

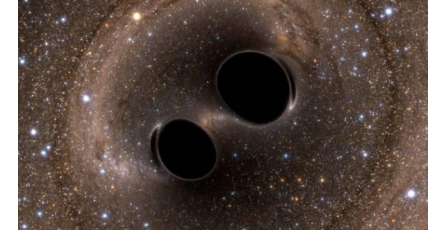


これまでに見つかった重力波

- **ブラックホール連星**の合体

GW150914が初検出

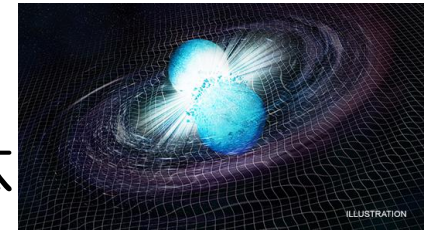
これまでにたくさん見つかった
最大で合計質量**150太陽質量**まで



- **中性子星連星**の合体

GW170817が初検出

これまでに**2例**報告されている



- **中性子星・ブラックホール連星**の合体

GW200105とGW200115が初検出

これまでに**3例(+2?)**報告されている

中性子星かブラックホールかわからない連星も

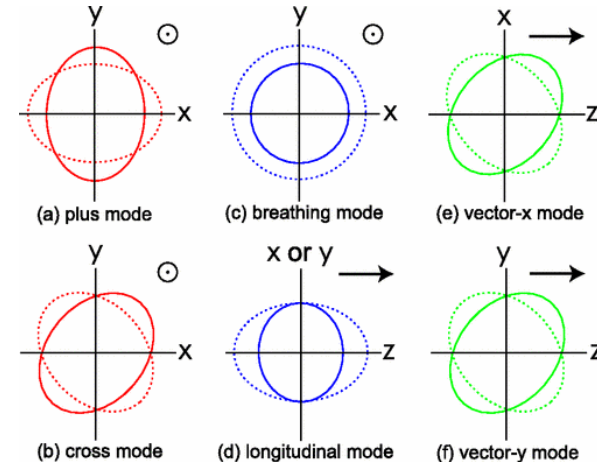
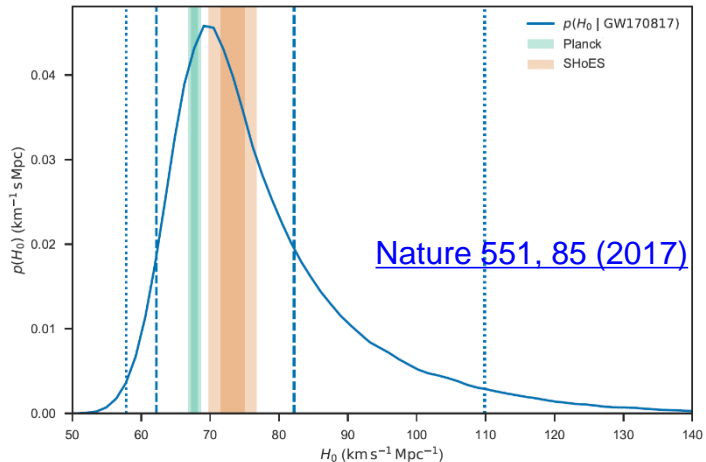


- 重いブラックホールの起源など、
新たなわからないことが見つかった

- 超新星爆発やパルサーからの重力波、
宇宙初期からの原始背景重力波は**未検出**

宇宙論、一般相対性理論の検証

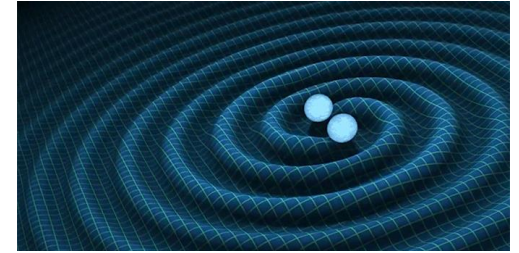
- 宇宙の膨張率であるハッブル定数が測定された宇宙マイクロ波背景放射からの値と超新星爆発からの値の不一致を説明できるか？



- 一般相対性理論のほころびは見つかっていない
波形が予想と一致(と無矛盾)
重力波の伝播速度も光速と一致(と無矛盾)
偏極もテンソルモードっぽいが、
他のモードがあるかどうかはまだわからない

(地上)重力波検出器のこれから

- 複数の高感度な重力波検出器による観測が重要
- 複数台の観測により



- 偏極の分離
 - 距離決定精度の向上
 - 相対論検証

H. Takeda, A. Nishizawa, YM+

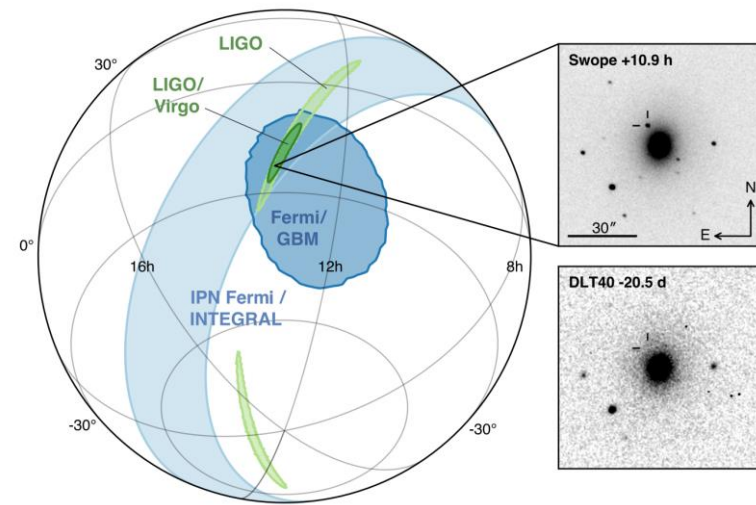
- 方向決定精度向上 [PRD 98, 022008 \(2018\)](#)
- マルチメッセンジャー観測

- 高感度化により

- パラメータ決定精度の向上
 - 1桁の感度向上で
 - 1桁の決定精度向上

マルチメッセンジャー観測

- より多くのイベントから、天体の起源に迫る
 - 1桁の感度向上で3桁の観測体積増大



国際重力波観測ネットワーク

LIGO Hanford



GEO600



KAGRA



LIGO Livingston



LIGO-India



Virgo

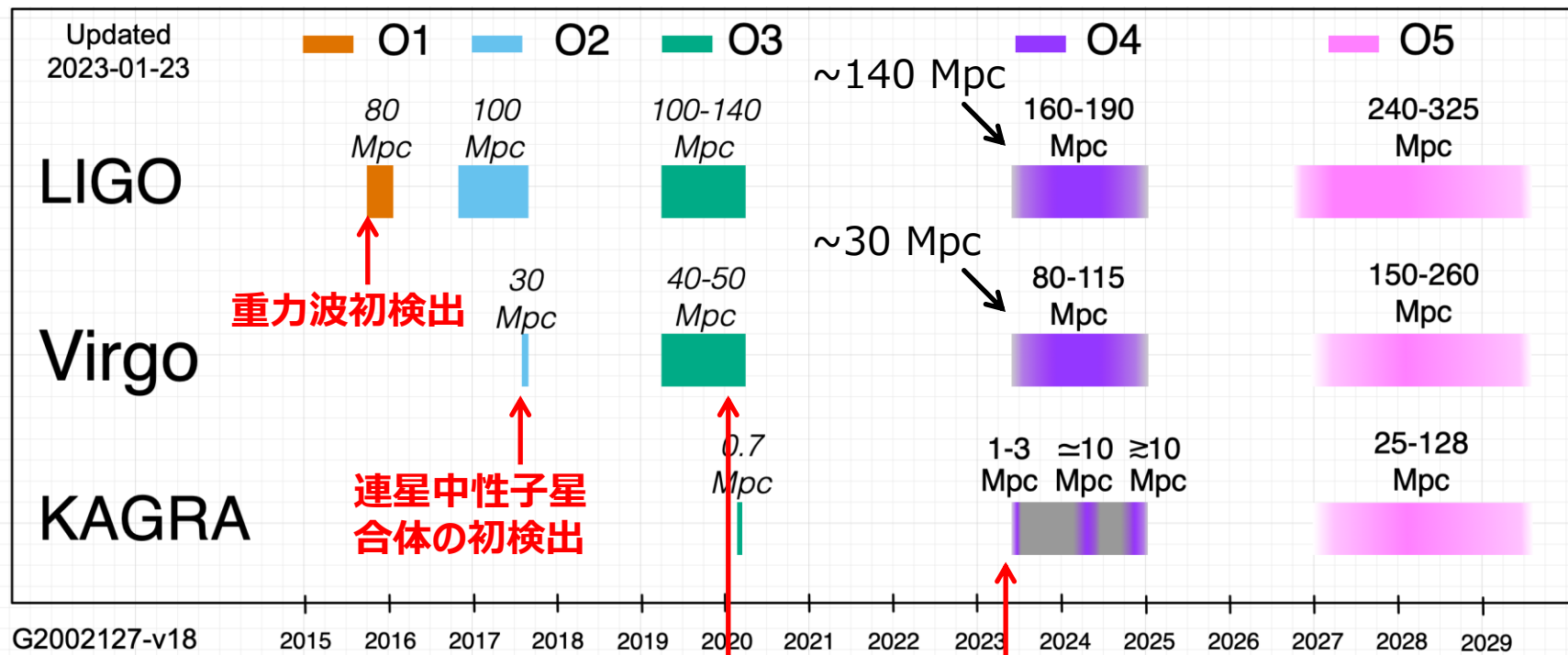


どれも

レーザー干渉計型

国際重力波観測計画

- 高感度化をしながら、LIGO-Virgo-KAGRAコラボレーションで**複数台同時観測の体制**を作っている



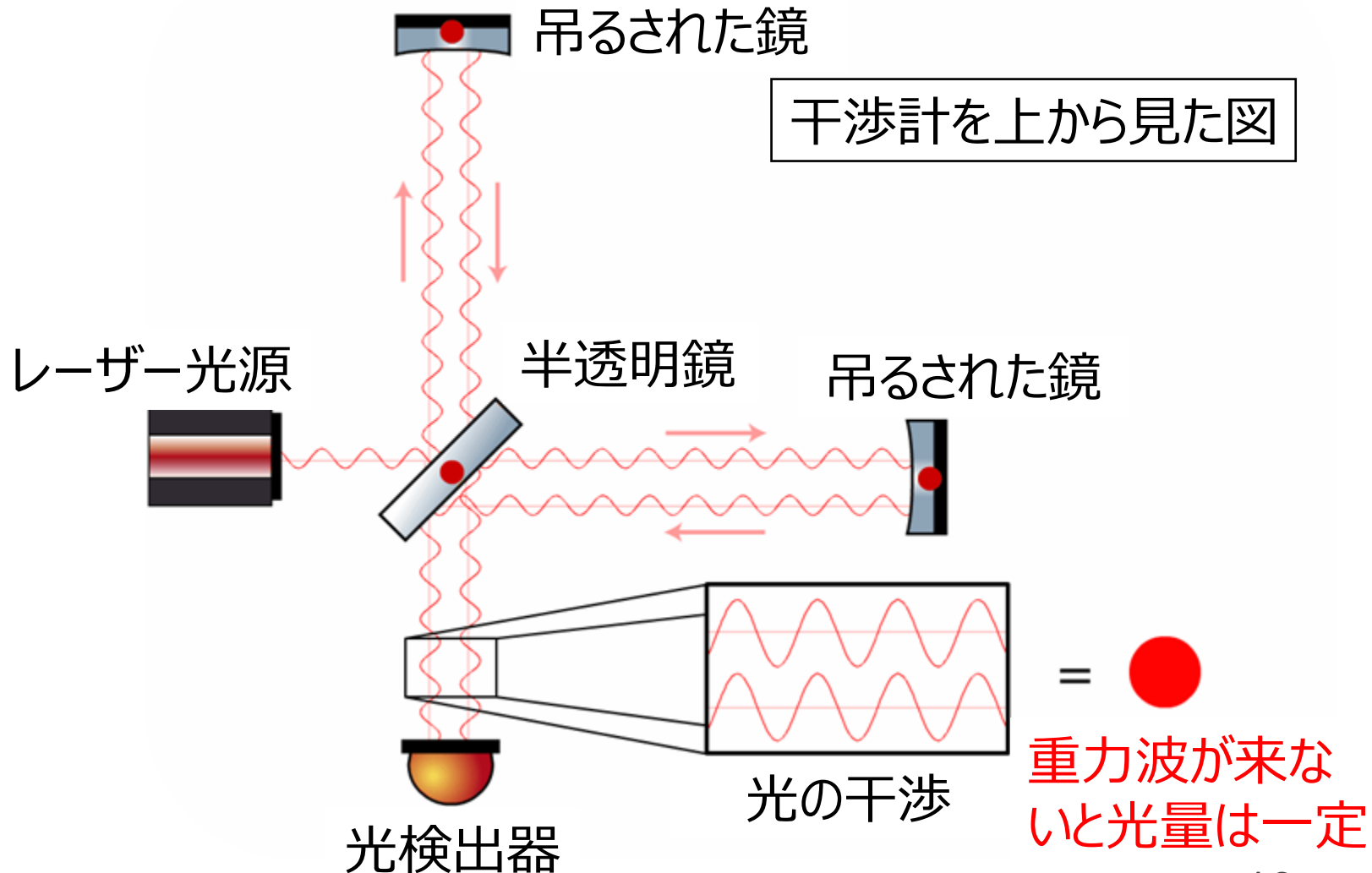
**中性子星-ブラックホール
連星合体の初検出**

**2023年5月24日に
観測再開予定**
(KAGRAは6月21日まで、
Virgoは5月11日に延期を発表)

LIGO India
2023年4月に約430億円承認
2030年までに観測開始予定

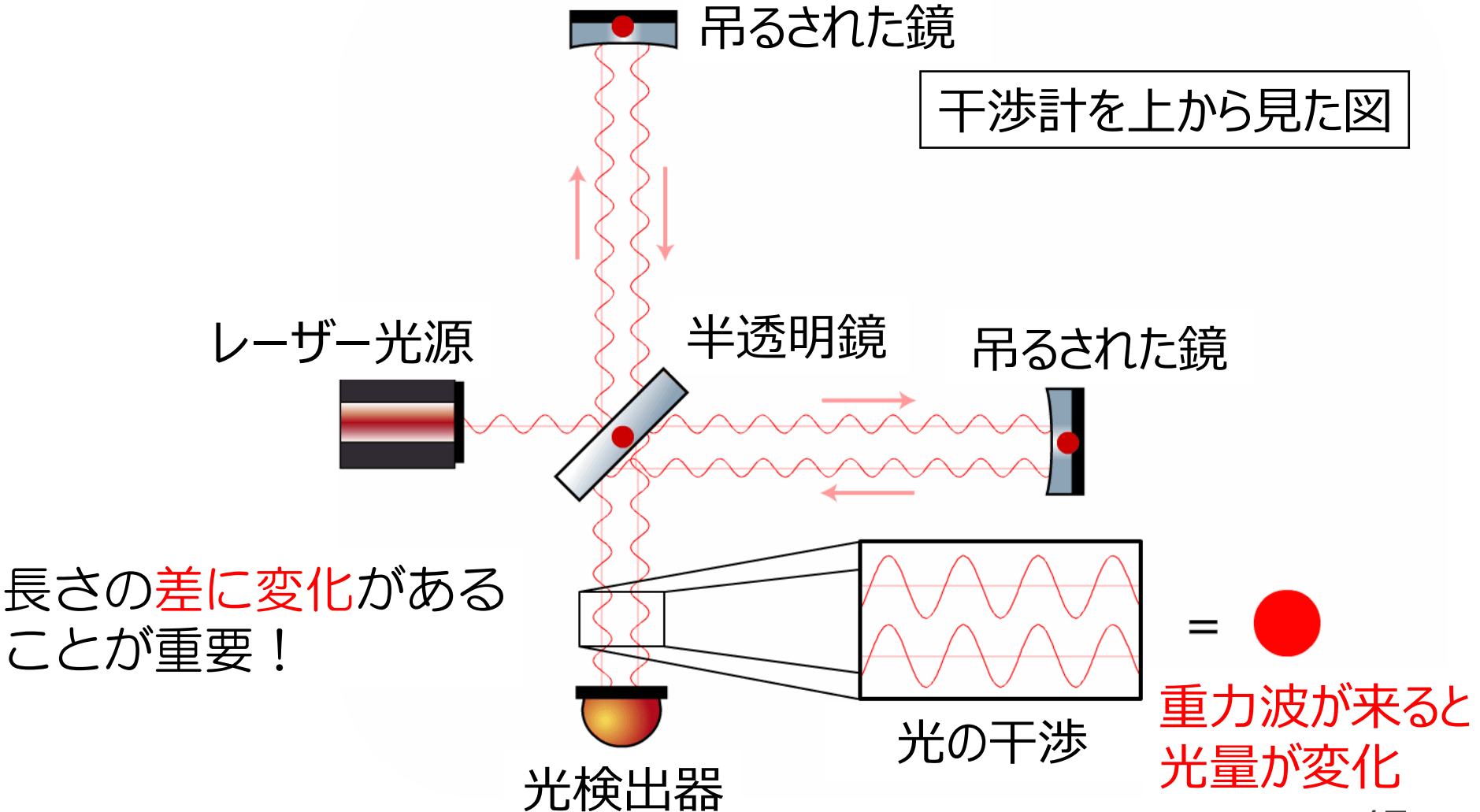
レーザー干渉計型重力波検出器

- 両腕の長さの差を干渉縞の変化として測定



レーザー干渉計型重力波検出器

- 両腕の長さの差を干渉縞の変化として測定



重力波による空間の歪み量

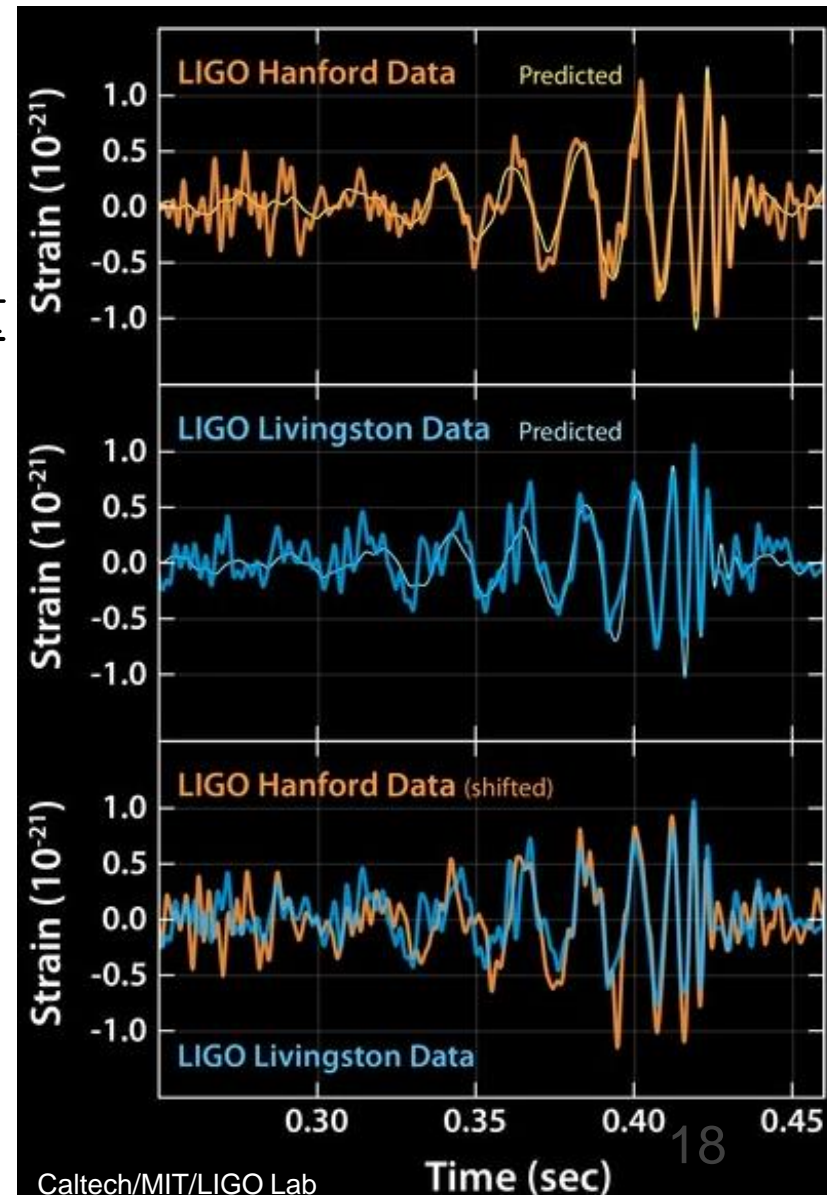
- 距離の変化割合で表す

$$h = \frac{\delta L}{L}$$

- GW150914の空間の歪み量
 $h \sim 10^{-21}$

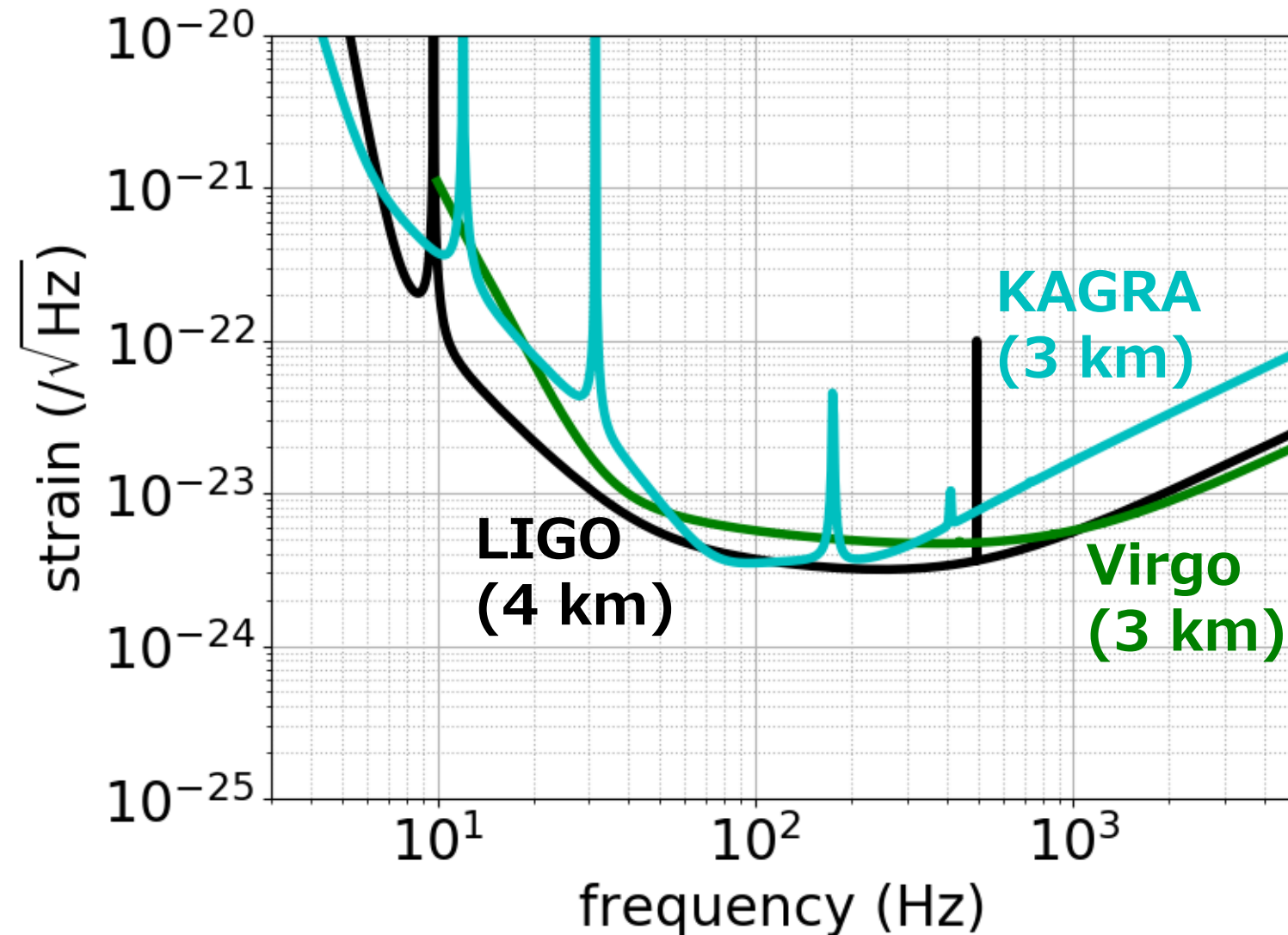
- LIGOの場合 $L=4$ kmなので
 $\delta L = 4e-18$ m
陽子の大きさの1/1000

- どのくらい小さな h を測定できるかで検出器の性能、どこまで遠くの天体を観測できるかが決まる



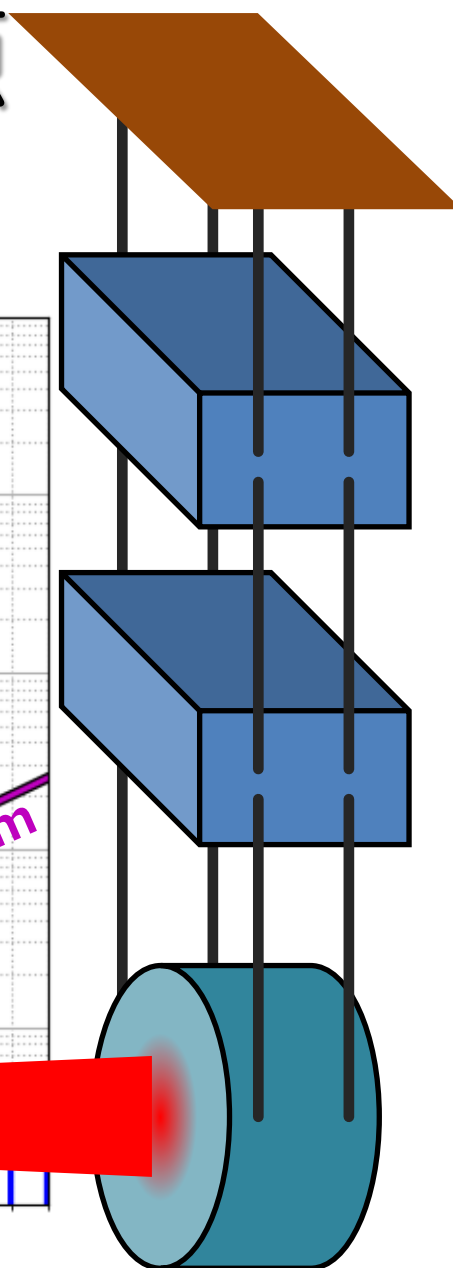
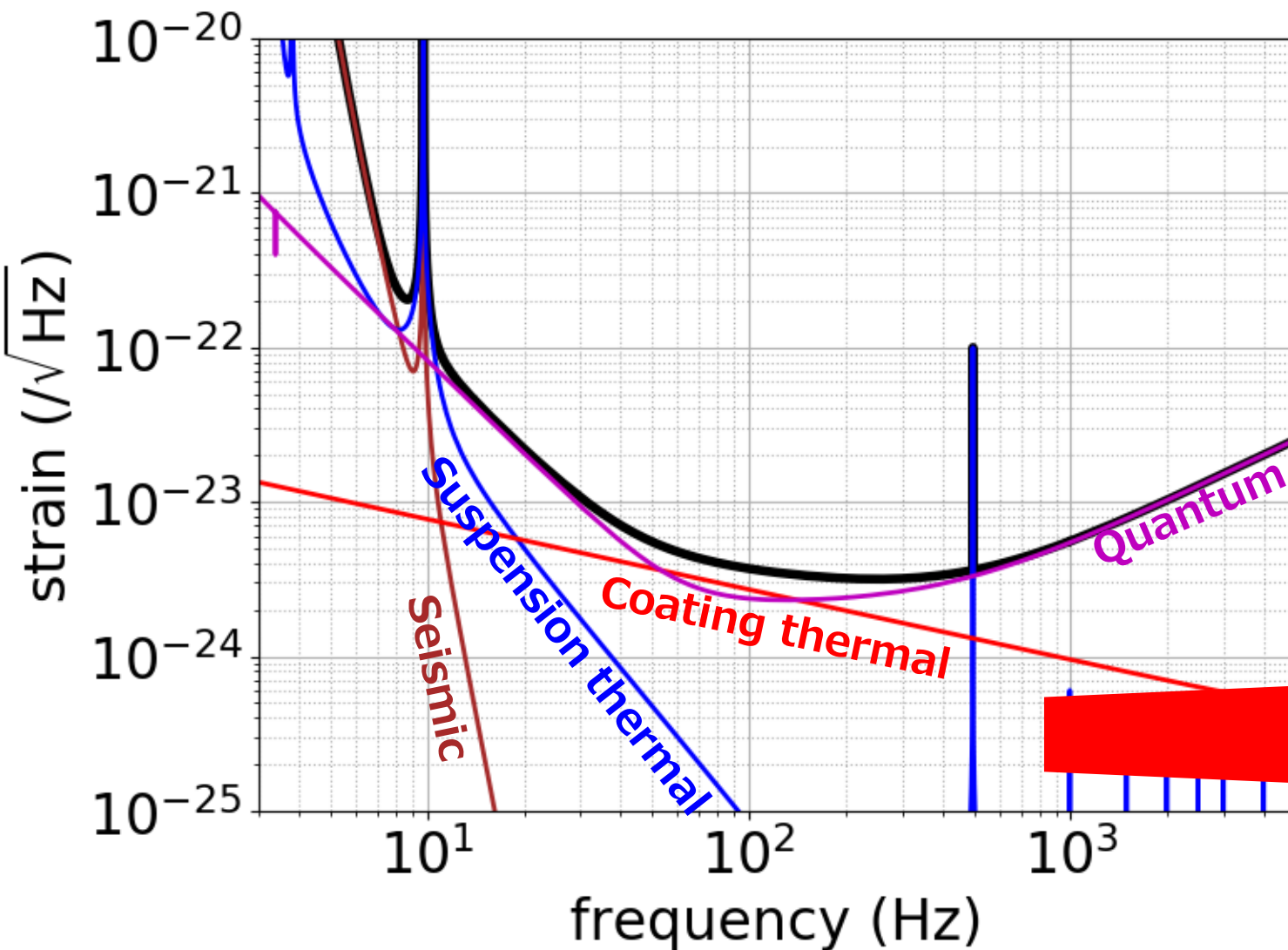
LIGO-Virgo-KAGRAの設計感度

- どれもほぼ同等の設計感度



LIGOの原理的な雑音源

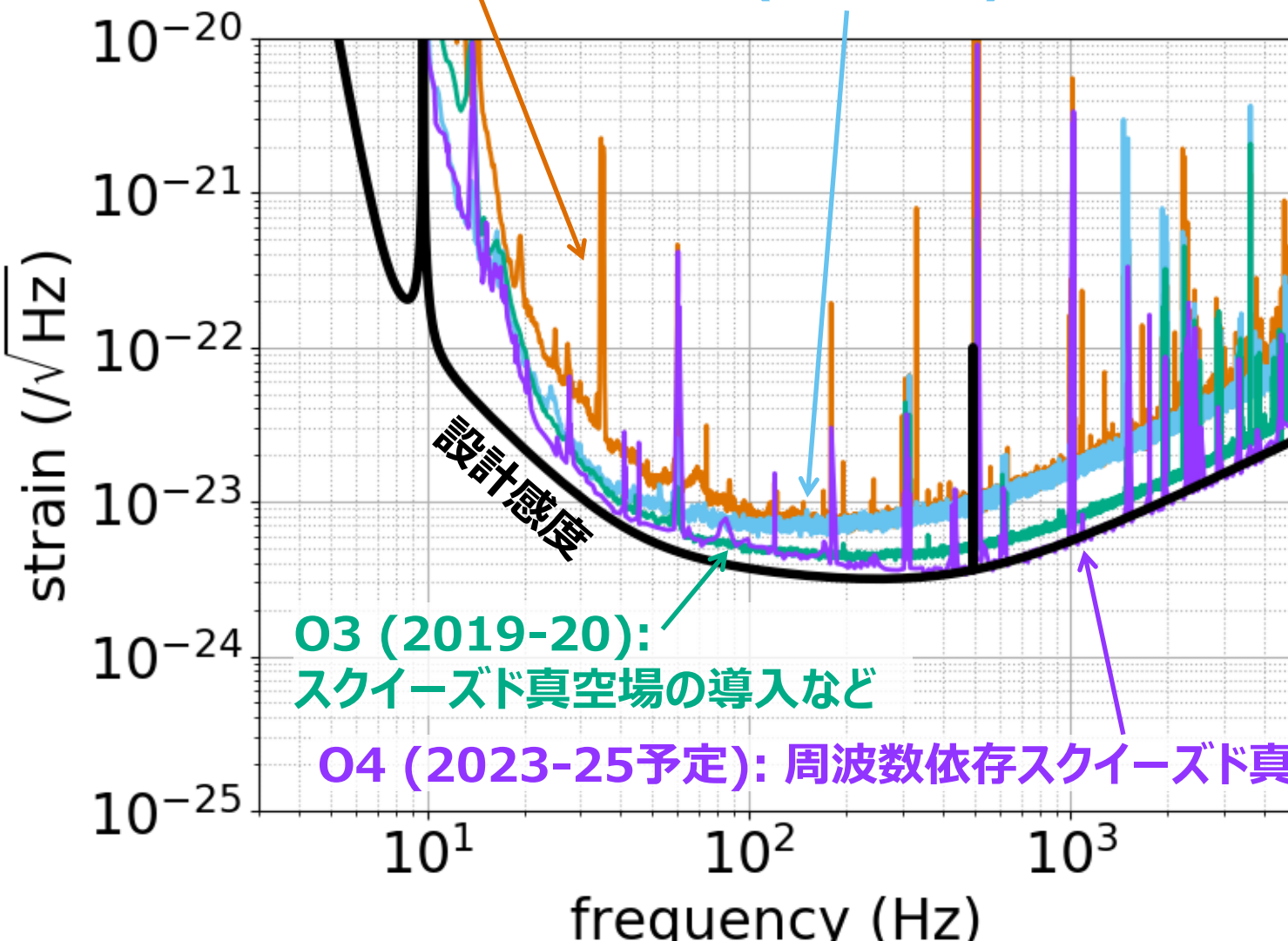
- ほぼ全帯域が量子雑音



LIGOのこれまでの感度向上

O1 (2015-16): 重力波の初検出

O2 (2016-17): 散乱光雑音の低減など



O3 (2019-20): スクイズド真空場の導入など

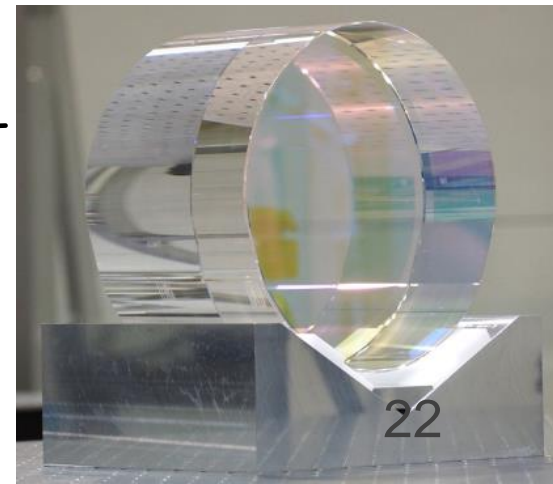
O4 (2023-25予定): 周波数依存スクイズド真空場の導入など

VirgoとKAGRAの状況



- 5月11日にVirgoはO4参加延期を発表
 - これまでの半分程度の感度しか出ていない
 - 鏡の交換が必要
 - シグナルリサイクリングの調整が必要
 - 秋頃に参加予定

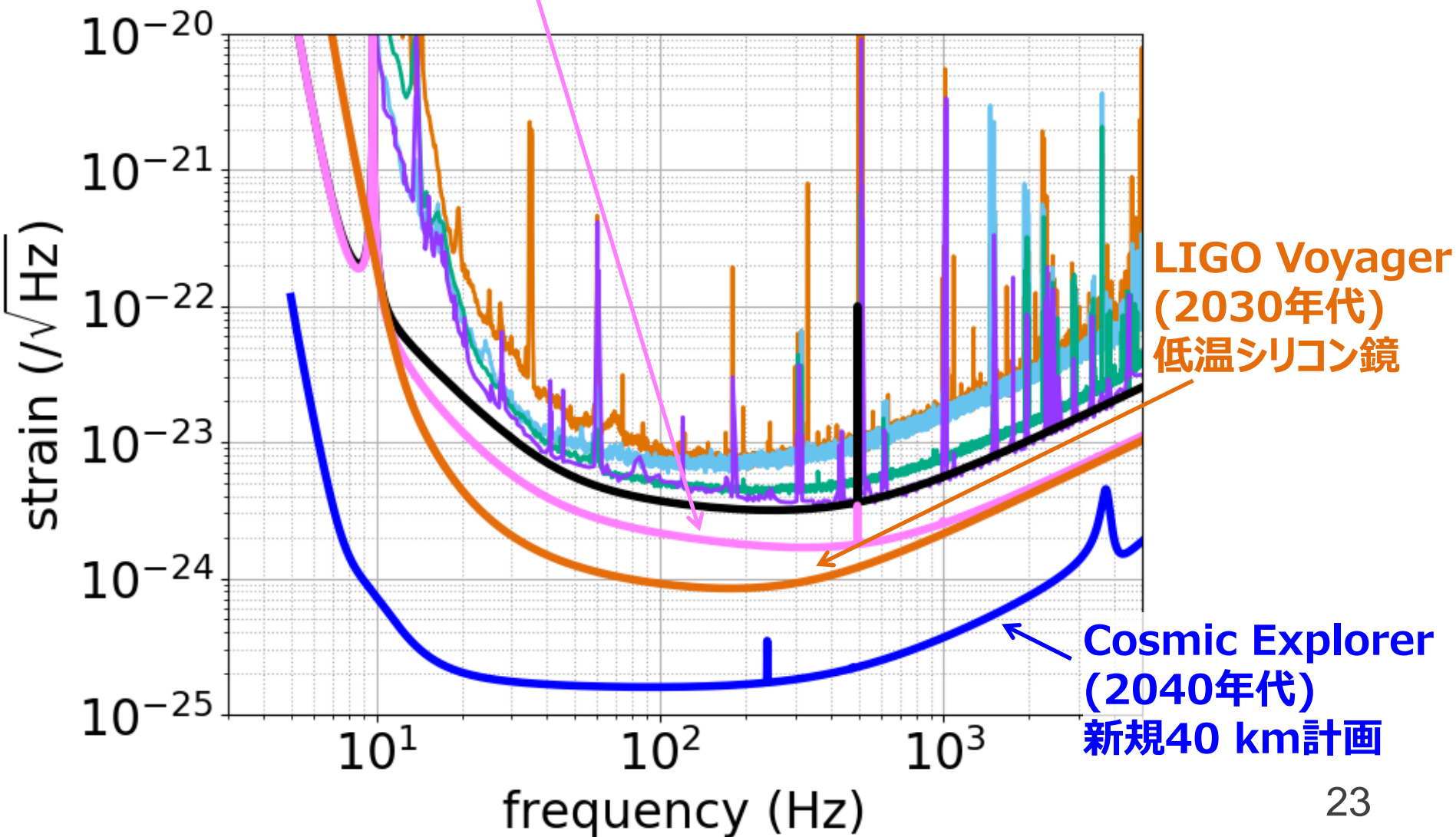
<https://www.ego-gw.it/blog/2023/05/11/virgo-postpones-entry-into-o4-observing-run/>
- KAGRAは5月24日-6月21日に観測し、再び調整に
 - サファイア鏡の複屈折など
 - これまでの最高感度を達成
 - 今年中に10 Mpcの達成を目指す



LIGOの今後の感度向上計画

A+ アップグレード

05 (2027-29?): コーティング改良、バランス型ホモダイン検出の導入など

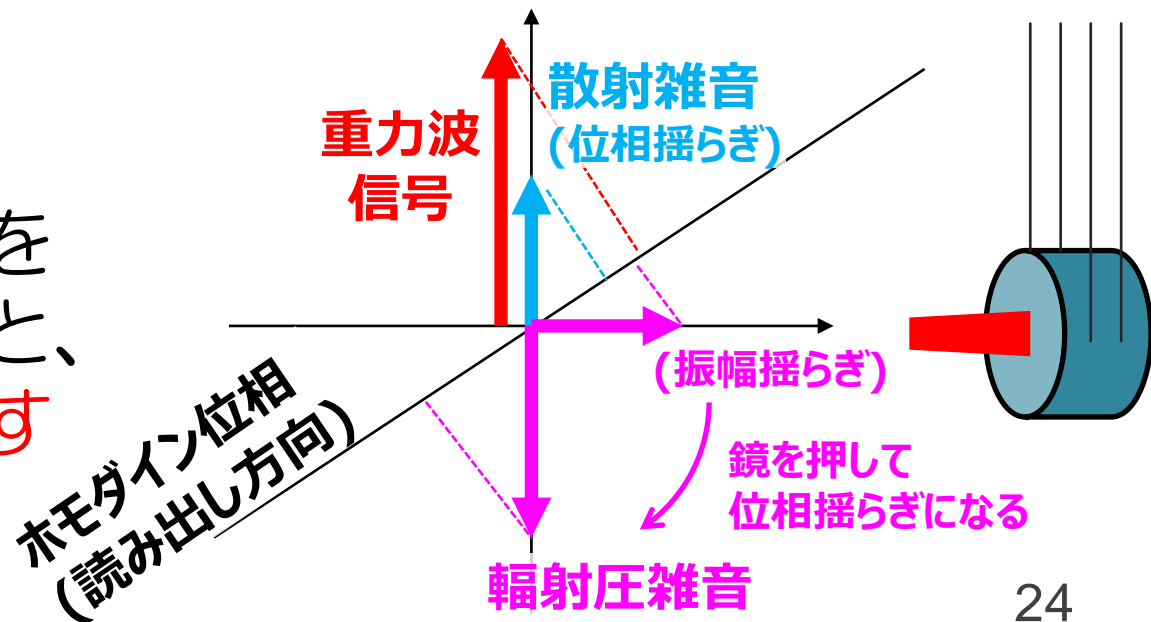
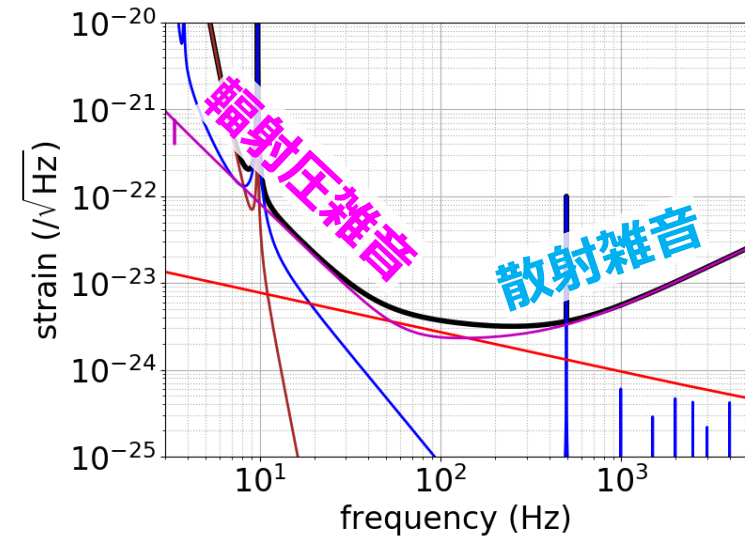


バランス型ホモダイン検出

- 量子雑音には2種類ある
 - 輻射圧雑音
 - 散射雑音(ショットノイズ)
- 光の位置(位相)と運動量(振幅)の不確定性から来る

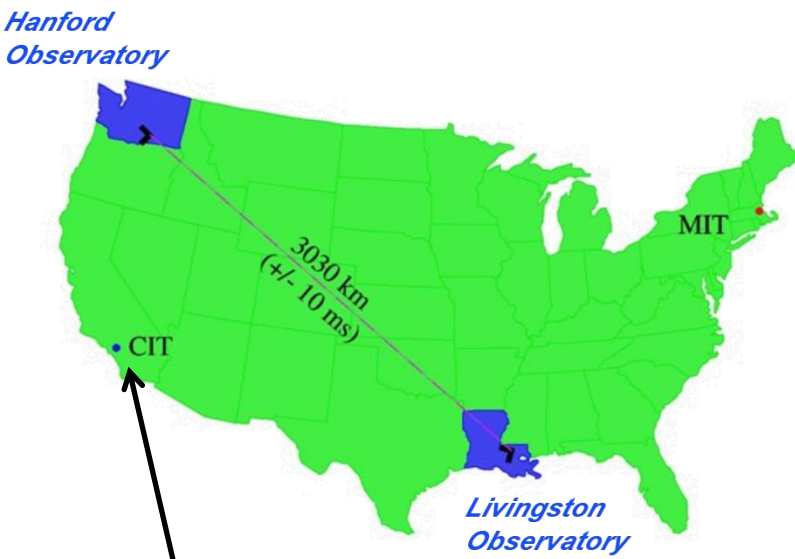
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

- ホモダイン位相をうまく調整すると、**輻射圧雑音を消す**ことができる

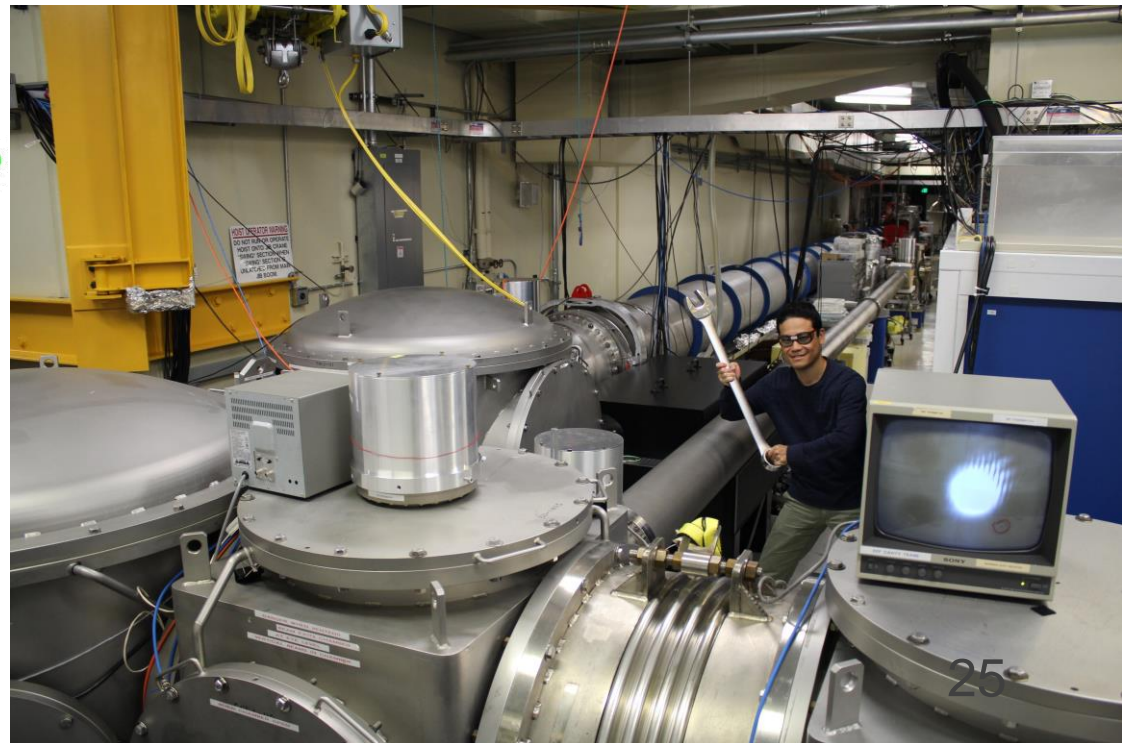


Caltech 40mプロトタイプ干渉計

- 4 kmのLIGOを40 mにしたような干渉計
- O5に向けた**バランス型ホモダイン検出の実証**
制御手法、様々な雑音の調査
- 2023年中にはLIGO Voyagerに向けた改造を開始予定



ロサンゼルス郊外の
パサデナにある



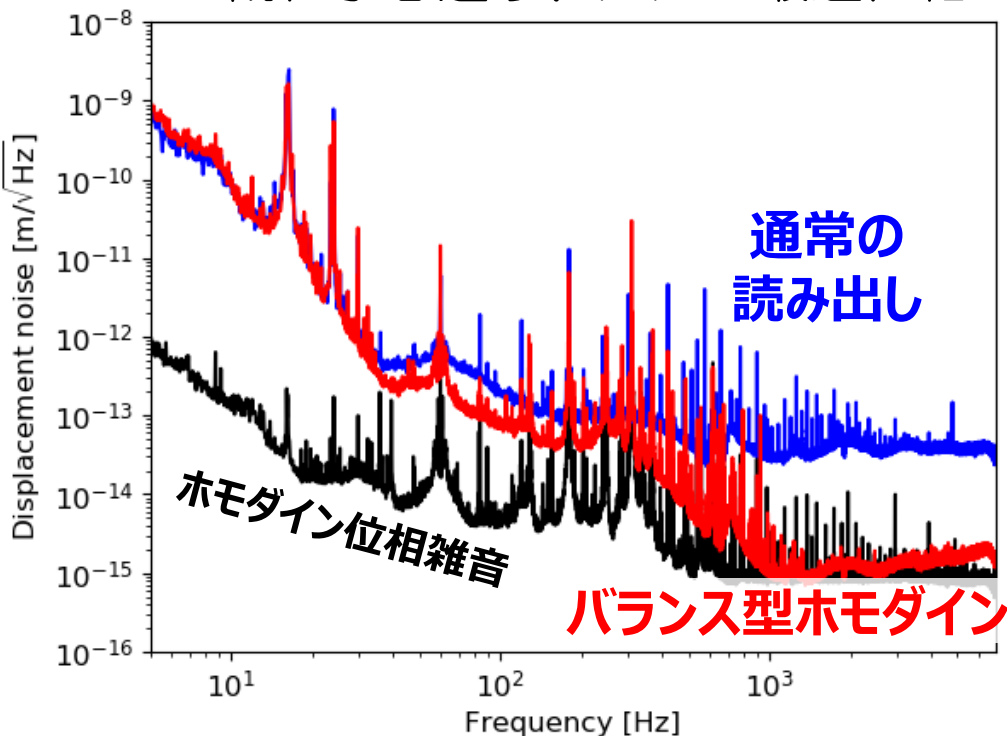
バランス型ホモダイン実験の現状

- FPMIの構成での**制御実証に成功**

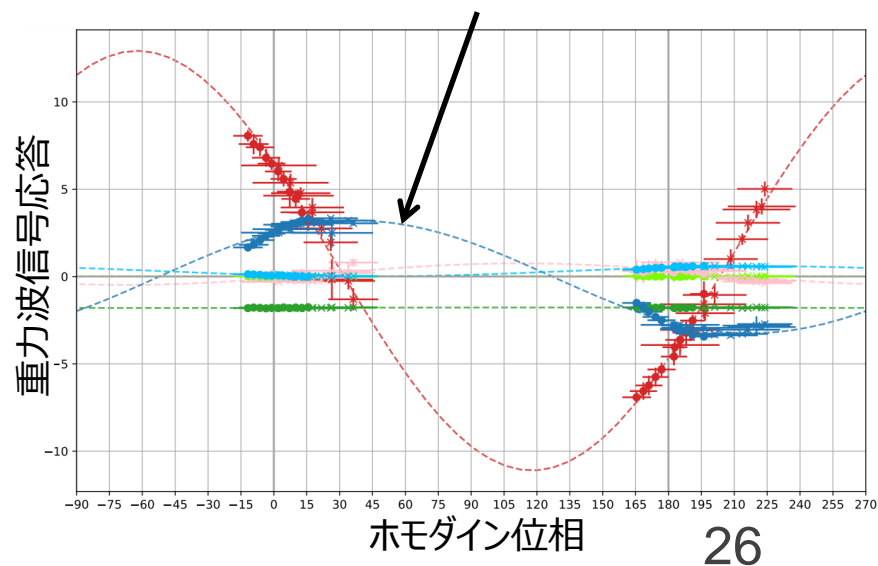
様々な雑音を調査中、
月曜日にPRMIでの制御実証にも成功

- ホモダイン位相を変えると**重力波**
に対する応答が変わることを確認

概ね予想通り、ただし最適位相にオフセット、原因調査中

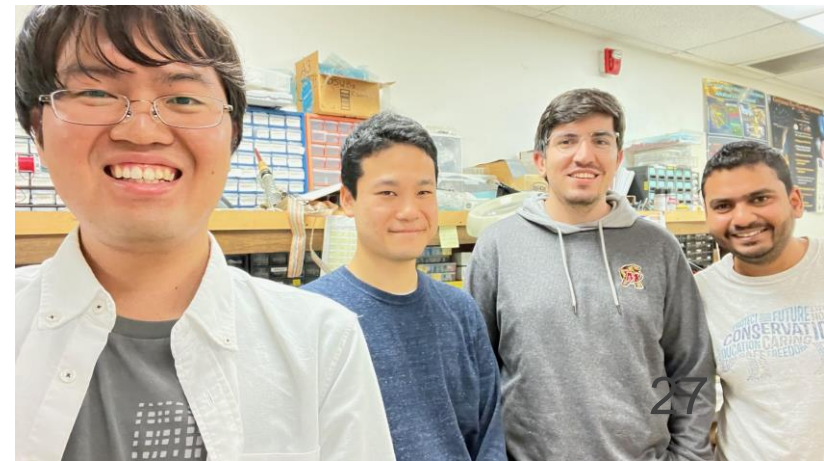
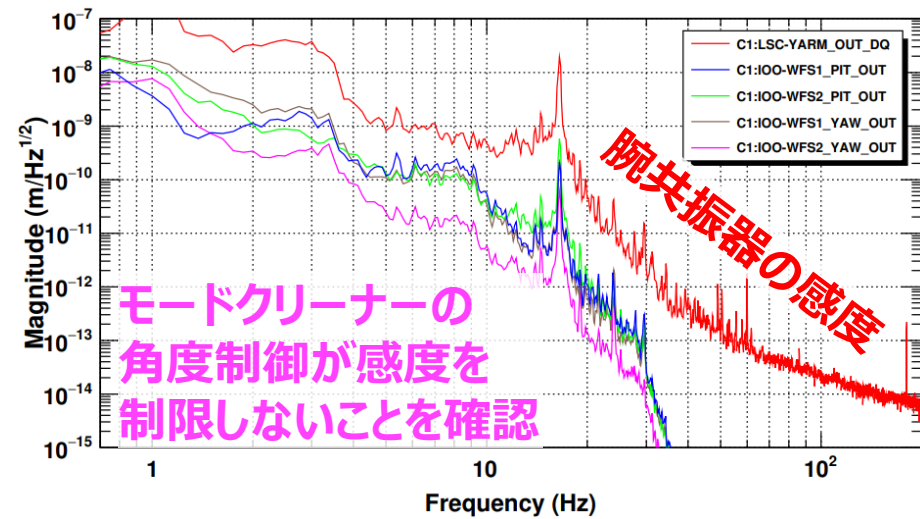
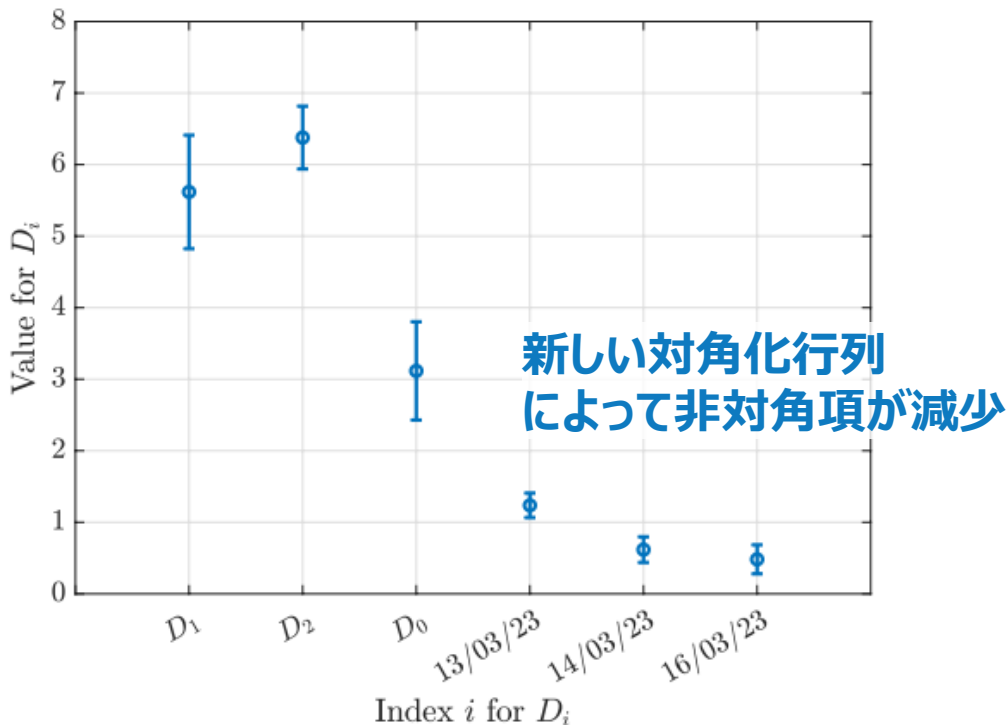


ホモダイン位相を変えると
応答が変わる



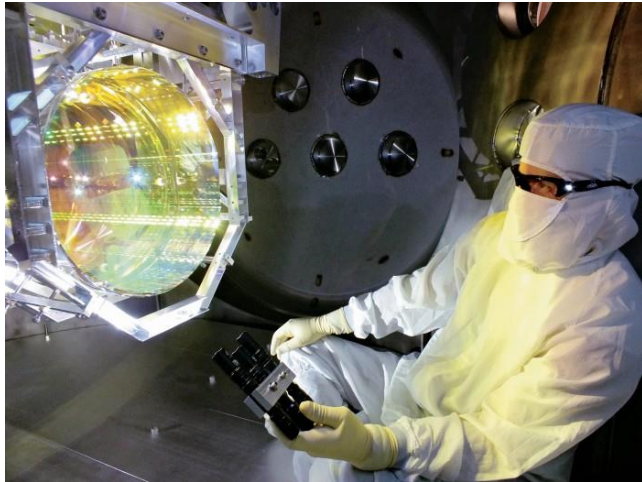
バランス型ホモダイナ実験の現状

- 2月には石川智浩くんが来てくれました
 - モードクリーナーの鏡の角度制御の対角化
などに大きく貢献
- 10月には岩口翔輝くんが訪問予定



LIGO Voyager計画

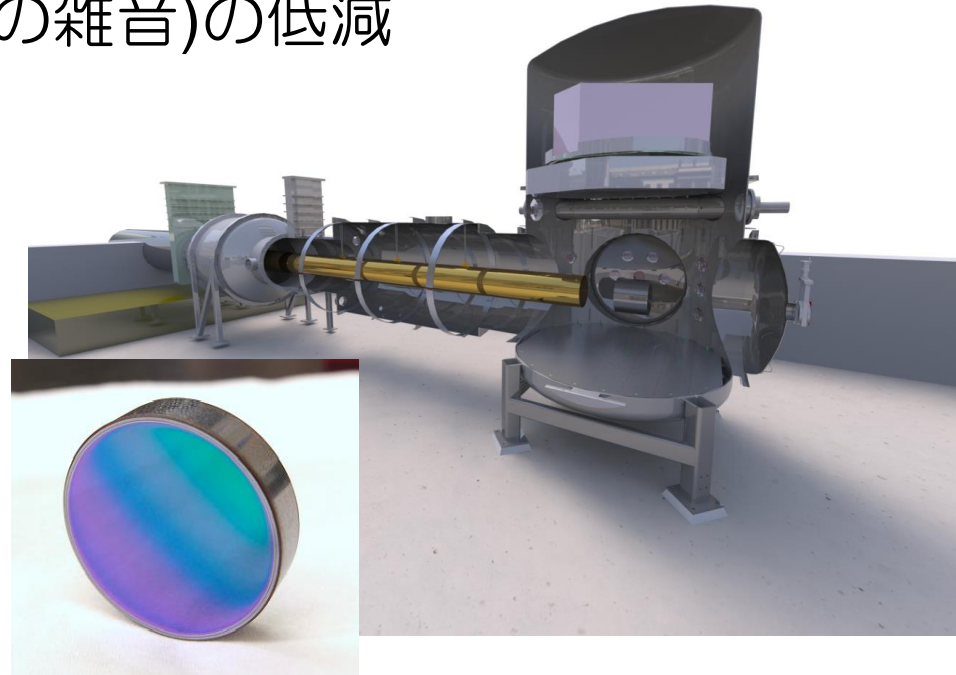
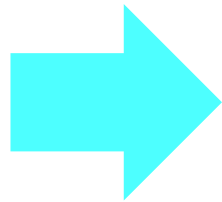
- 現在のLIGOを改造し、感度を0.5のさらに倍に
- 低温(120 K)シリコン鏡を用いる
 - 熱雑音(特に熱膨張からの雑音)の低減



LIGO

常温・石英鏡

常温で特性の良い非晶質の鏡
レーザー波長 1064 nm



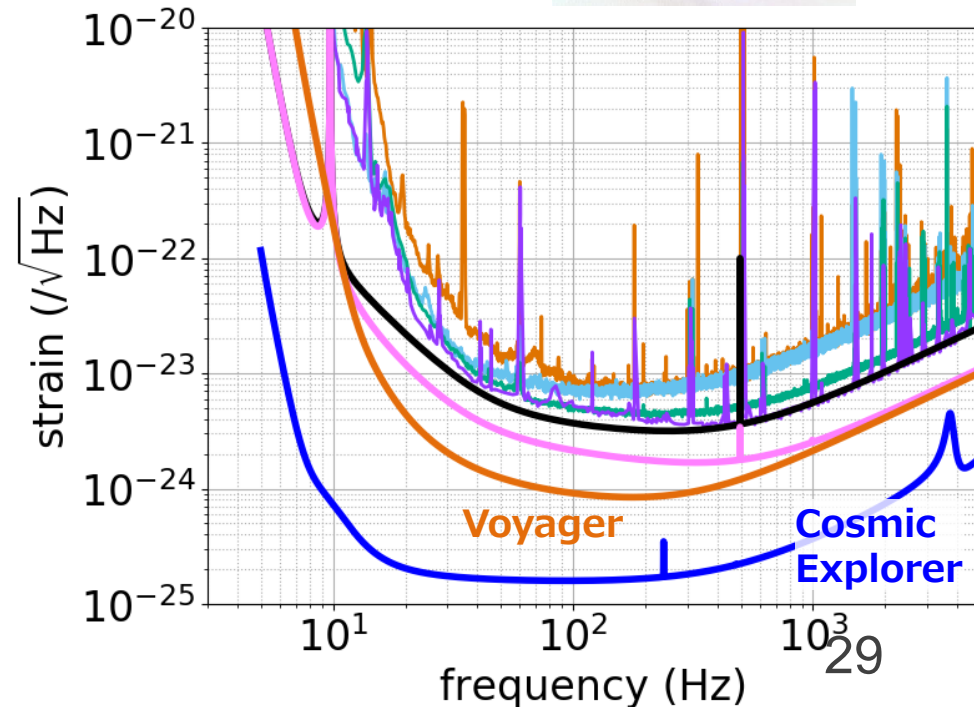
LIGO Voyager

低温(120 K)・シリコン鏡

低温で特性の良い結晶性の鏡
レーザー波長 2050 nm

Voyagerに向けた研究開発

- 2 μm レーザー光源の開発
 - 大型シリコン鏡の開発(直径45 cm, 200 kg)
 - 複屈折
 - 特にその非一様性・時間変動
 - Caltechで測定実験を開始
 - 低吸収
 - 2 μm 光検出器の開発
 - 腕共振器の補助的制御手法の開発
- などなど...



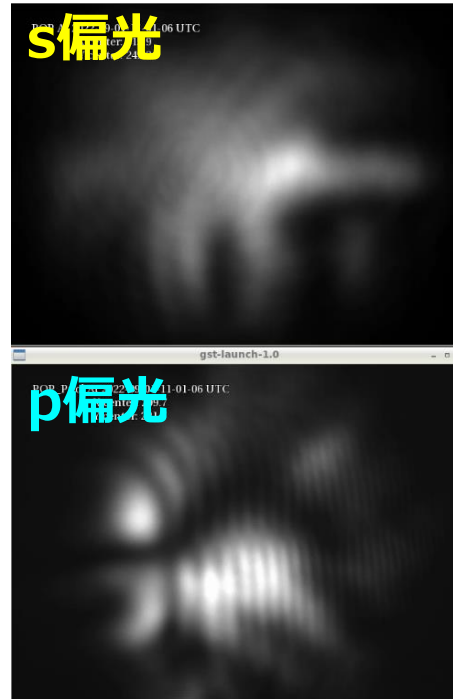
たくさんの開発項目！

シリコン鏡の複屈折

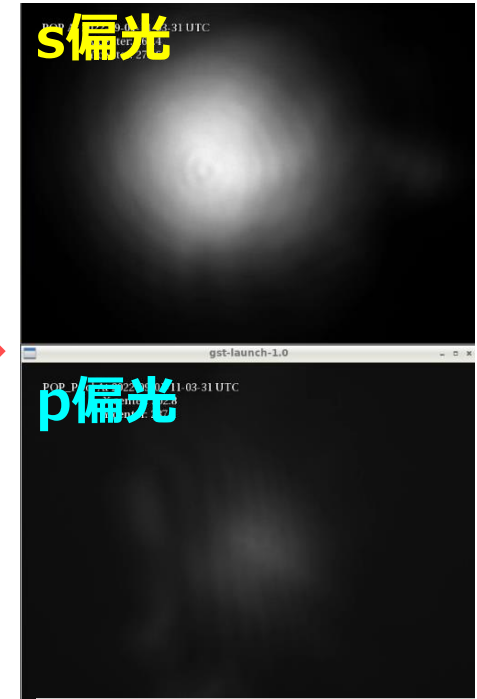
- これまでは平均的な複屈折($\Delta n \sim 10^{-7}$)が注目
- **複屈折の時間変動**($\delta(\Delta n) < 10^{-15}/\text{rtHz}$)が感度を制限する可能性を指摘

KAGRAでの測定

- 干渉計の複屈折に対する応答を考慮に入れる必要がある
- KAGRAのサファイア鏡からの経験



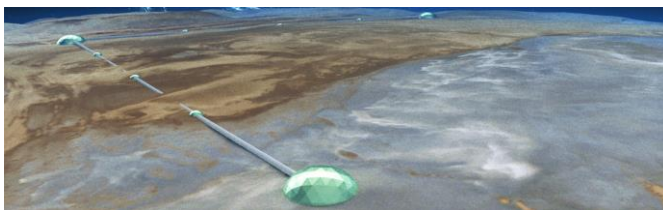
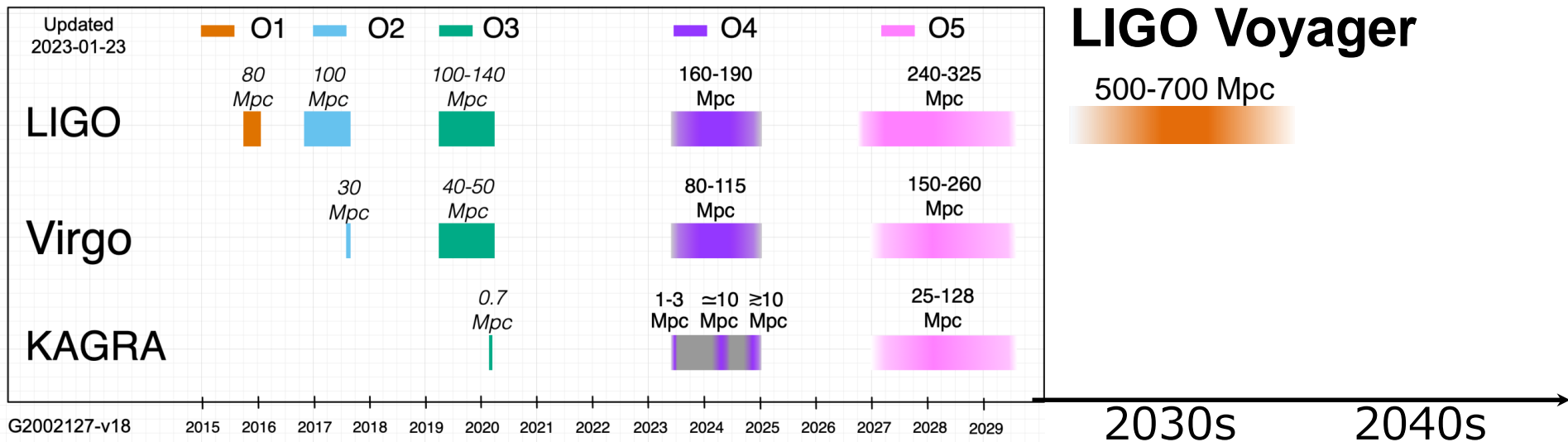
腕共振器制御前
非一様な複屈折により
p偏光が生じている



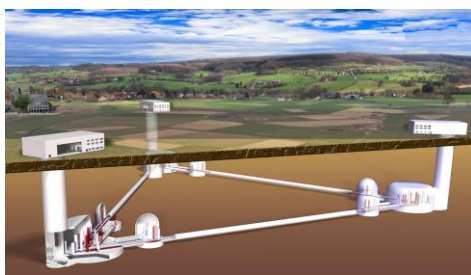
腕共振器制御制御後
p偏光が大幅に減っている

次世代重力波観測計画

- 低温シリコン鏡に加え、大型化によりほぼ全宇宙の連星合体を観測可能に



LIGO India  z~7 for BNS
z>10 for BBH

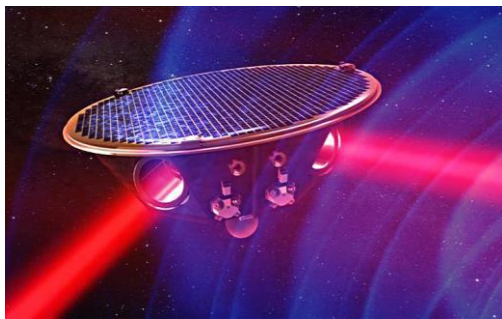
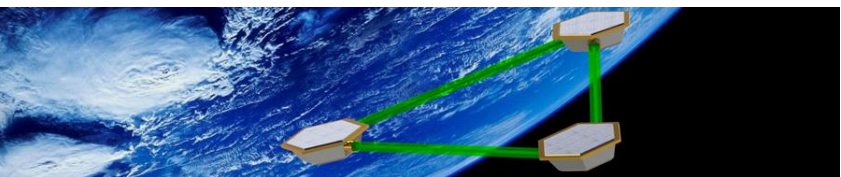
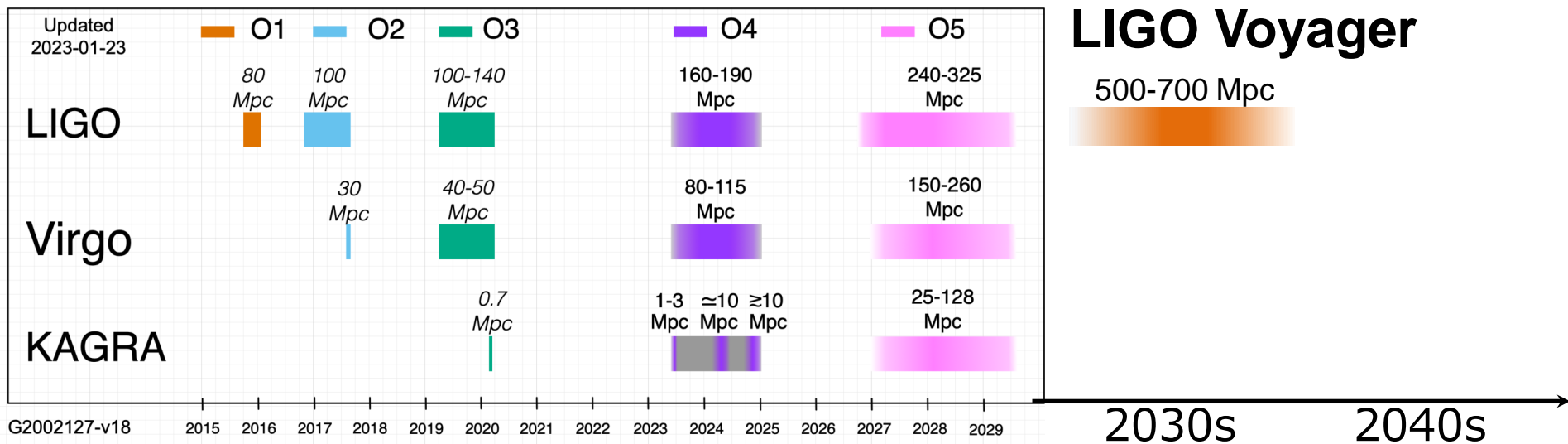


Cosmic Explorer
(アメリカ、シリコン、40 km) 

Einstein Telescope
(ヨーロッパ、シリコン、10 km) 

2030年代には宇宙重力波検出器も

- 地上では検出できない **10 Hz以下の重力波** を狙う



LIGO India

Cosmic Explorer

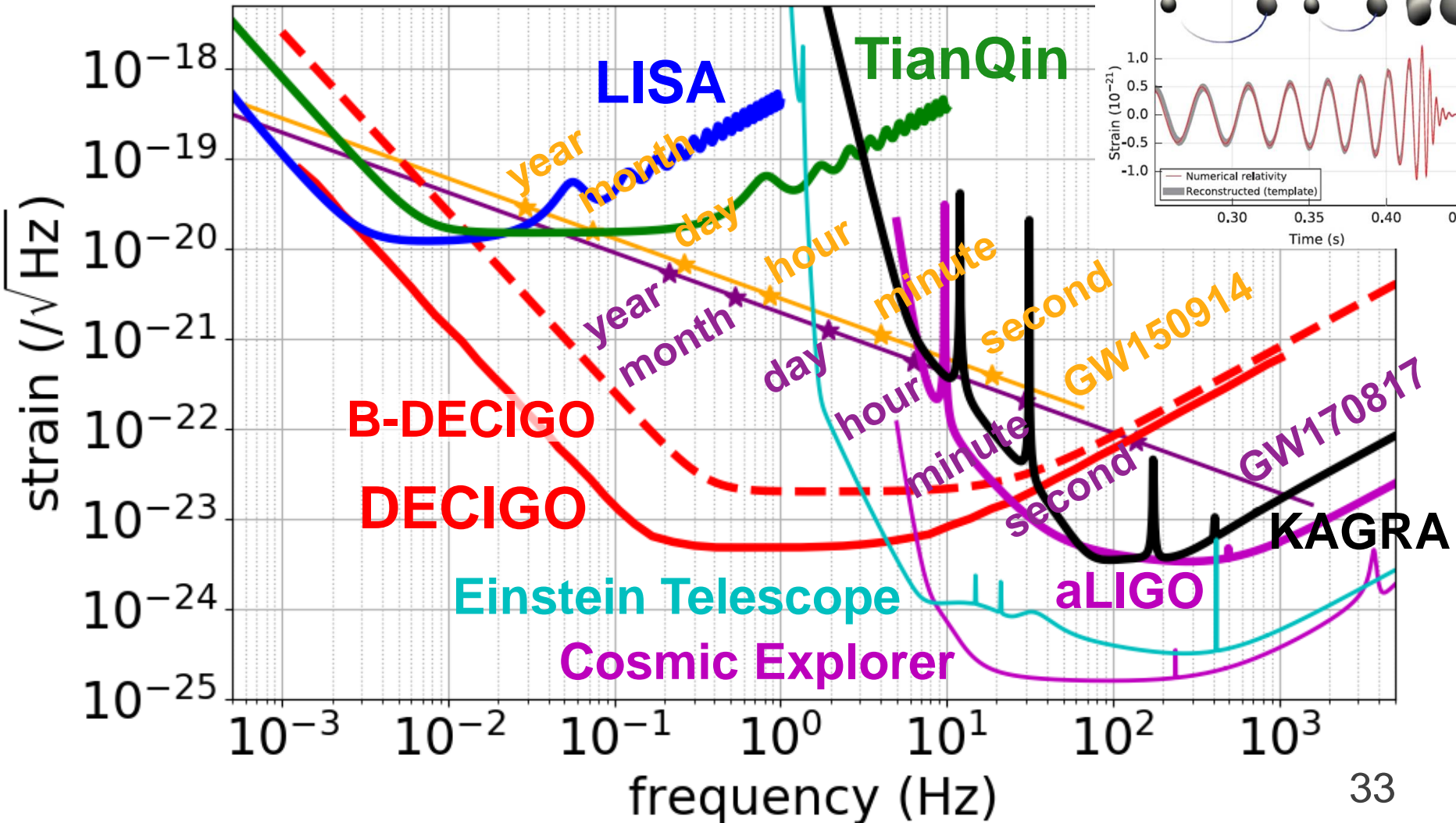
Einstein Telescope

B-DECIGO

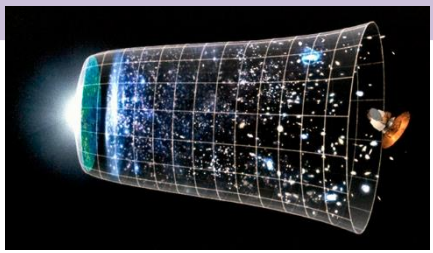
LISA

連星合体の多波長観測

- LIGO帯で連星が合体する前に電磁波望遠鏡や重力波検出器にアラートが出せる



周波数によってターゲットが異なる

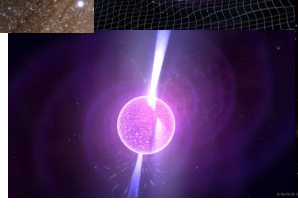
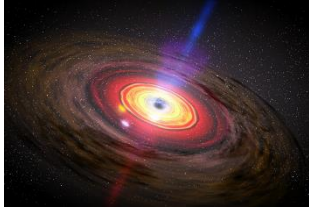
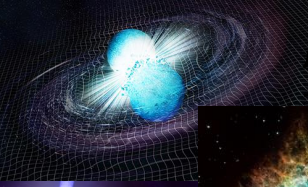


原始重力波

質量大



質量小



周期 宇宙年齢

年

時間

秒

ミリ秒

周波数 Hz

10^{-15}

10^{-12}

10^{-9}

10^{-6}

10^{-3}

1

10^3

Pulsar timing



Doppler tracking



地上干渉計

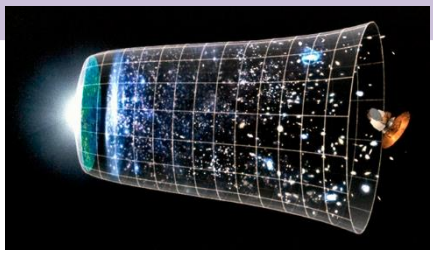
宇宙干渉計

共振型

CMB B-mode



電磁波/PHzに例えると...

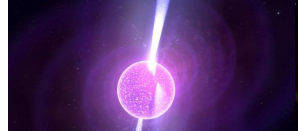
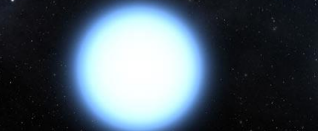
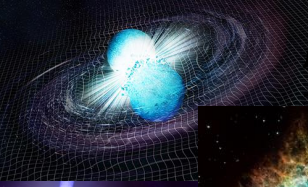


原始重力波

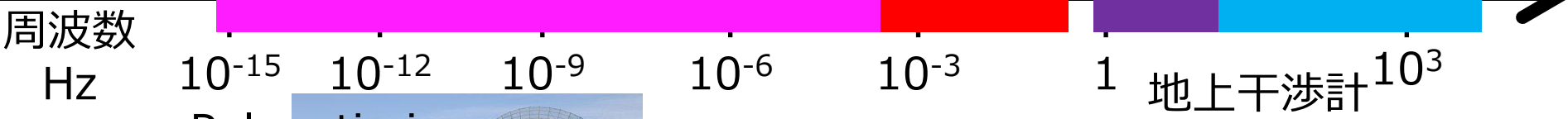
質量大



質量小



周期 宇宙年齢 電波 年 赤外線 紫外線 X線



CMB B-mode

Pulsar timing

Doppler tracking

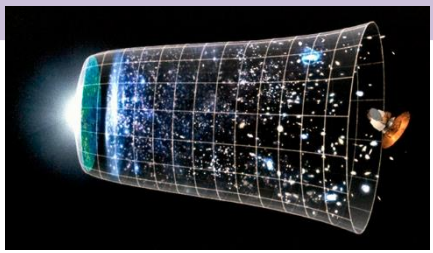
宇宙干渉計



共振型



電磁波/PHzに例えると...

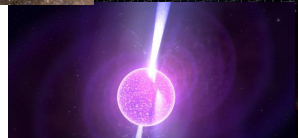
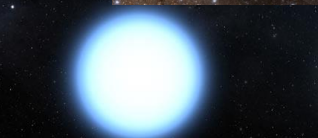
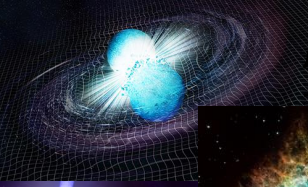


原始重力波

質量大



質量小



周期 宇宙年齢 電波 年 赤外線 紫外線 X線

周波数 Hz 10^{-15} 10^{-12} 10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 1 地上干渉 10^3

Pulsar timing



LISA

Doppler tracking

宇宙干渉計



LIGO

共振型

CMB B-mode

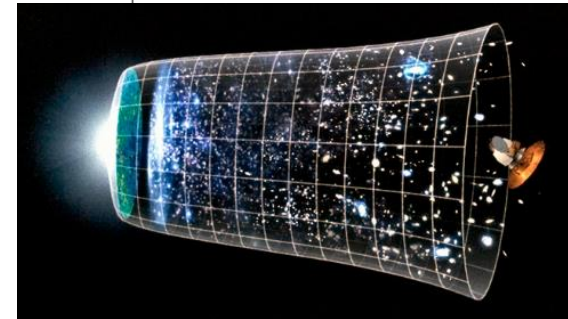
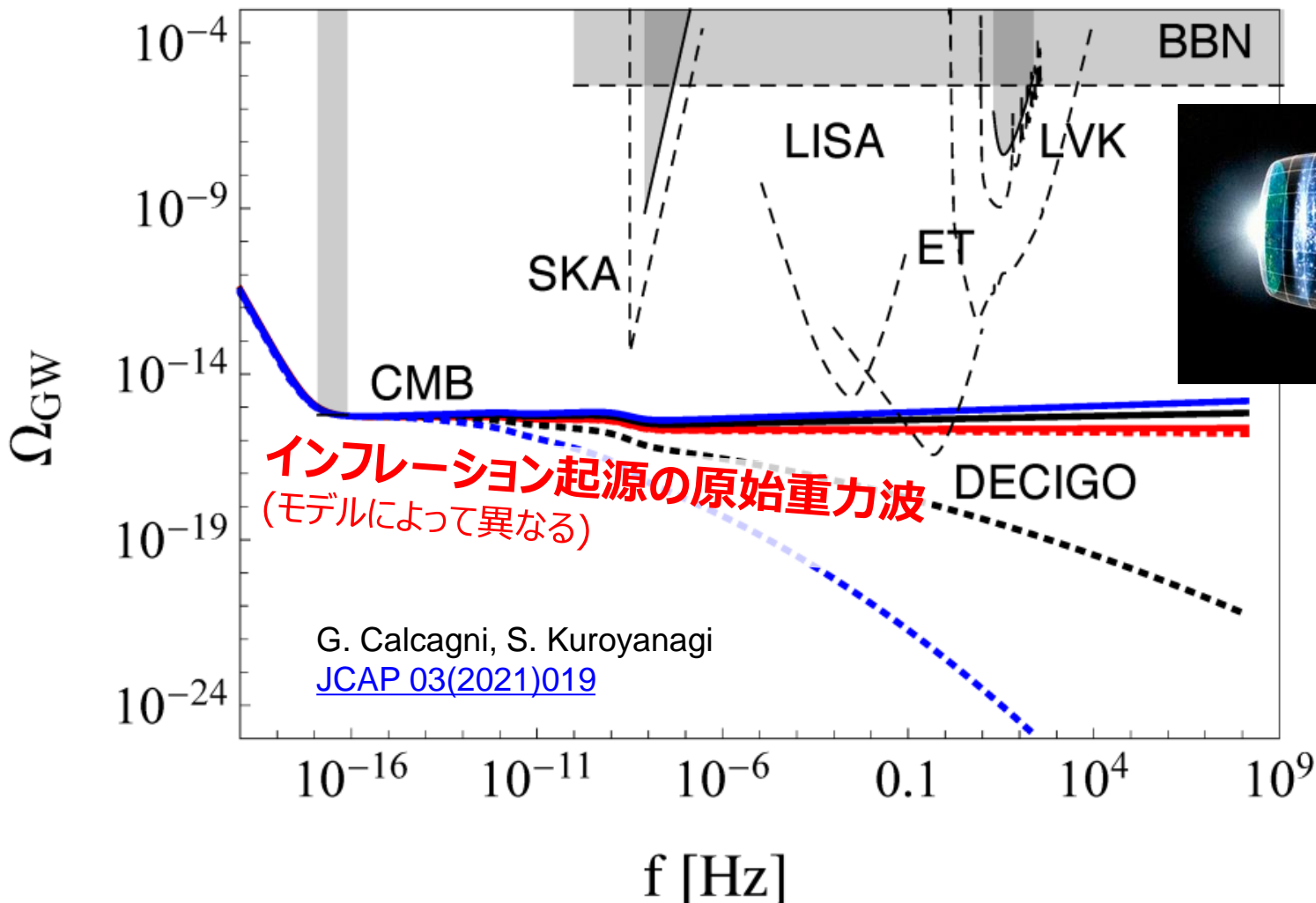


DECIGO



DECIGOで原始重力波

- インフレーション起源の重力波に高感度
- CMBやSKAなど多波長観測で初期宇宙に迫る

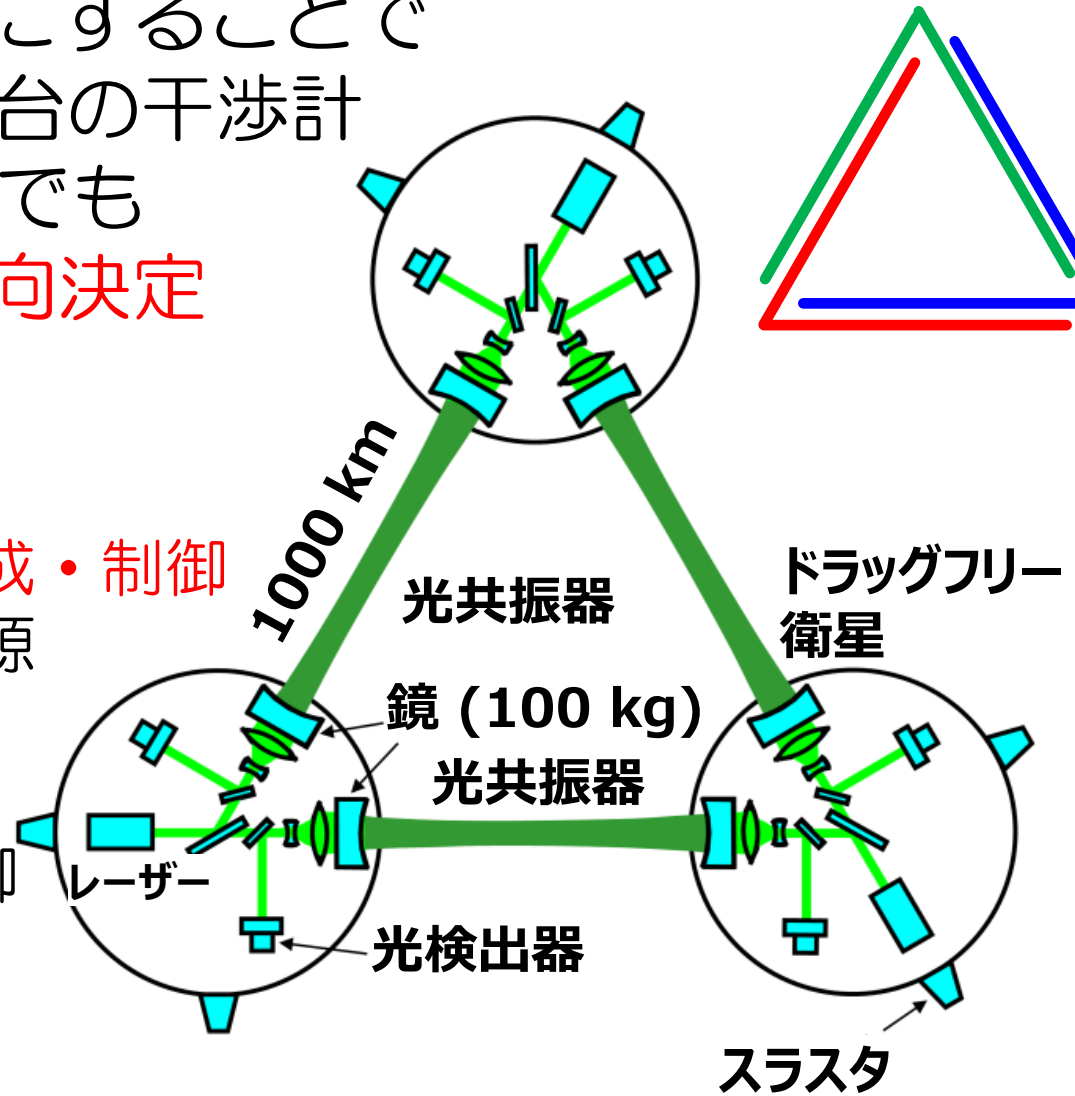


DECIGOの構成と開発項目

- 双方向の光共振器にすることで
1つの正三角形で3台の干渉計
- 1のクラスターでも
偏極分離や方向決定
が可能

- 様々な開発項目

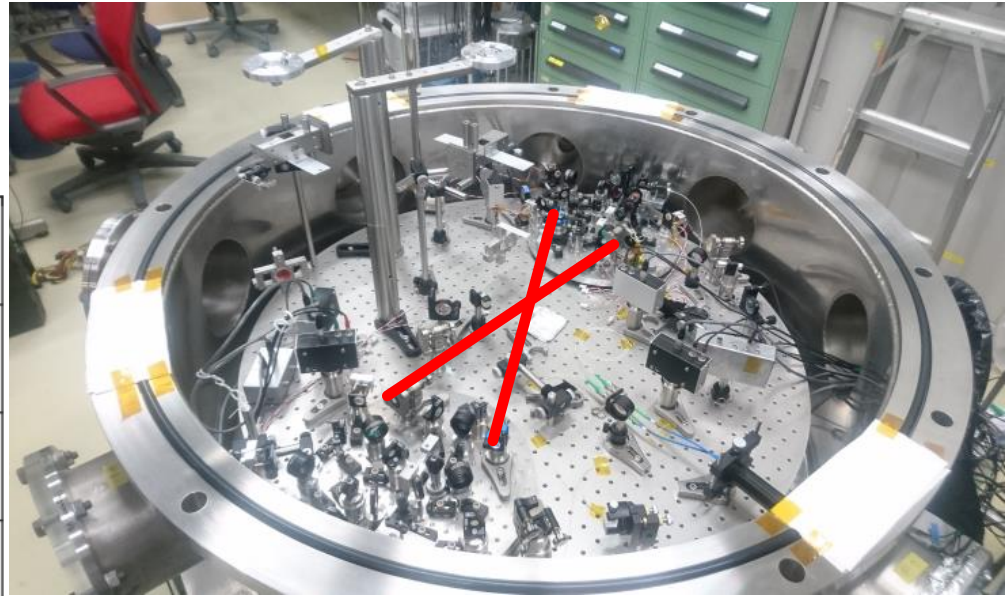
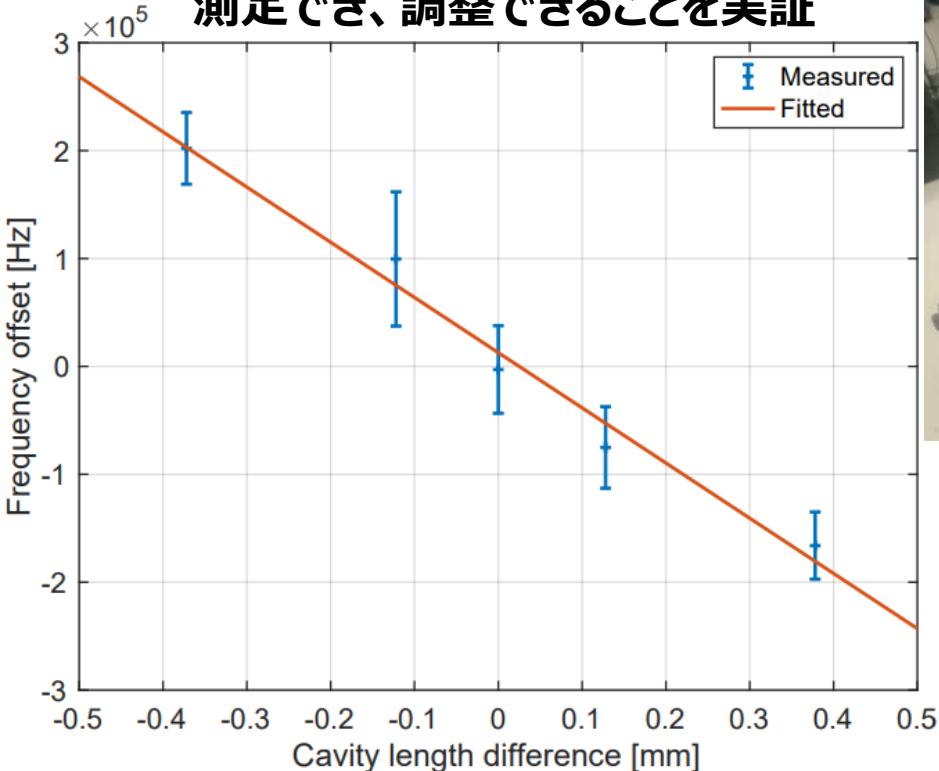
- レーザー干渉計構成・制御
- 安定化レーザー光源
- 初期捕捉システム
- 低雑音スラスタ
- ドラッグフリー制御
- 軌道・制御系



DECIGOの双方向光共振器

- 双方向の光共振器では絶対長の調整が必要
- 55 cmのプロトタイプ干渉計を製作し、干渉計制御と絶対長調整が可能であることを実証

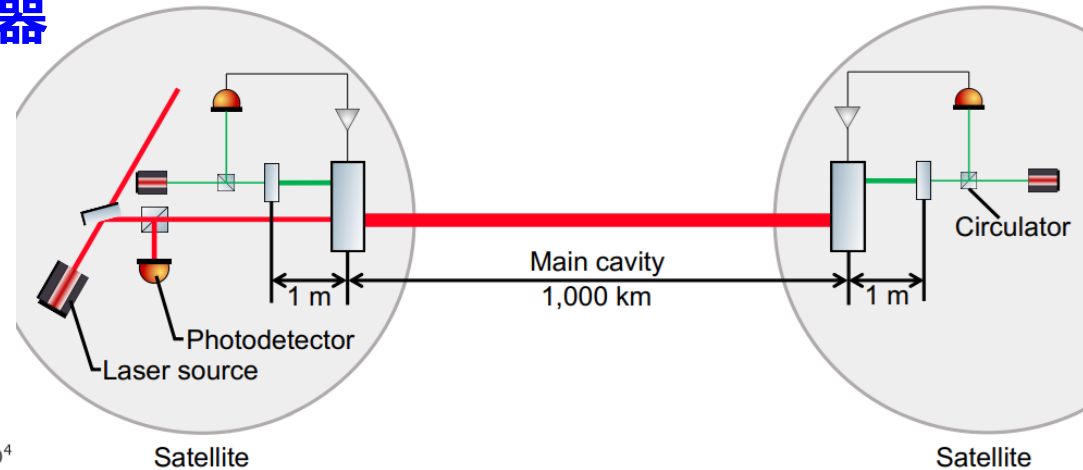
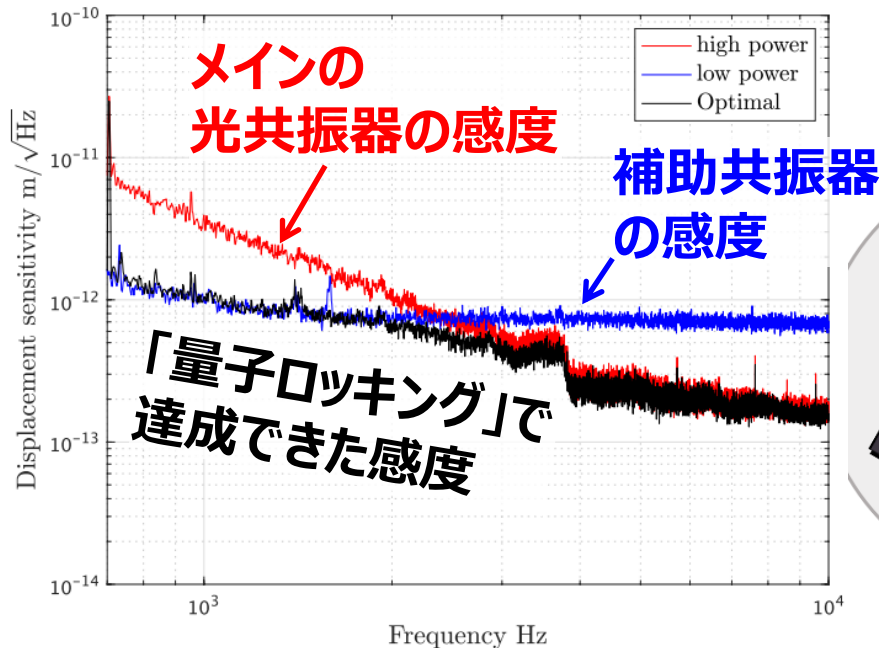
周波数差を利用して絶対長の差が測定でき、調整できることを実証



K. Nagano, H. Takeda, YM+
[CQG 38, 085018 \(2021\)](#)

DECIGOの高感度化に向けた実験

- 補助共振器を用いることでメインの共振器で生じる輻射圧雑音を打ち消す(量子ロッキング)
- 33 cmのプロトタイプ干渉計を製作し、量子雑音を模擬した古典雑音の打ち消しを実証



SILVIA計画



- Space Interferometer Laboratory Voyaging towards Innovative Applications

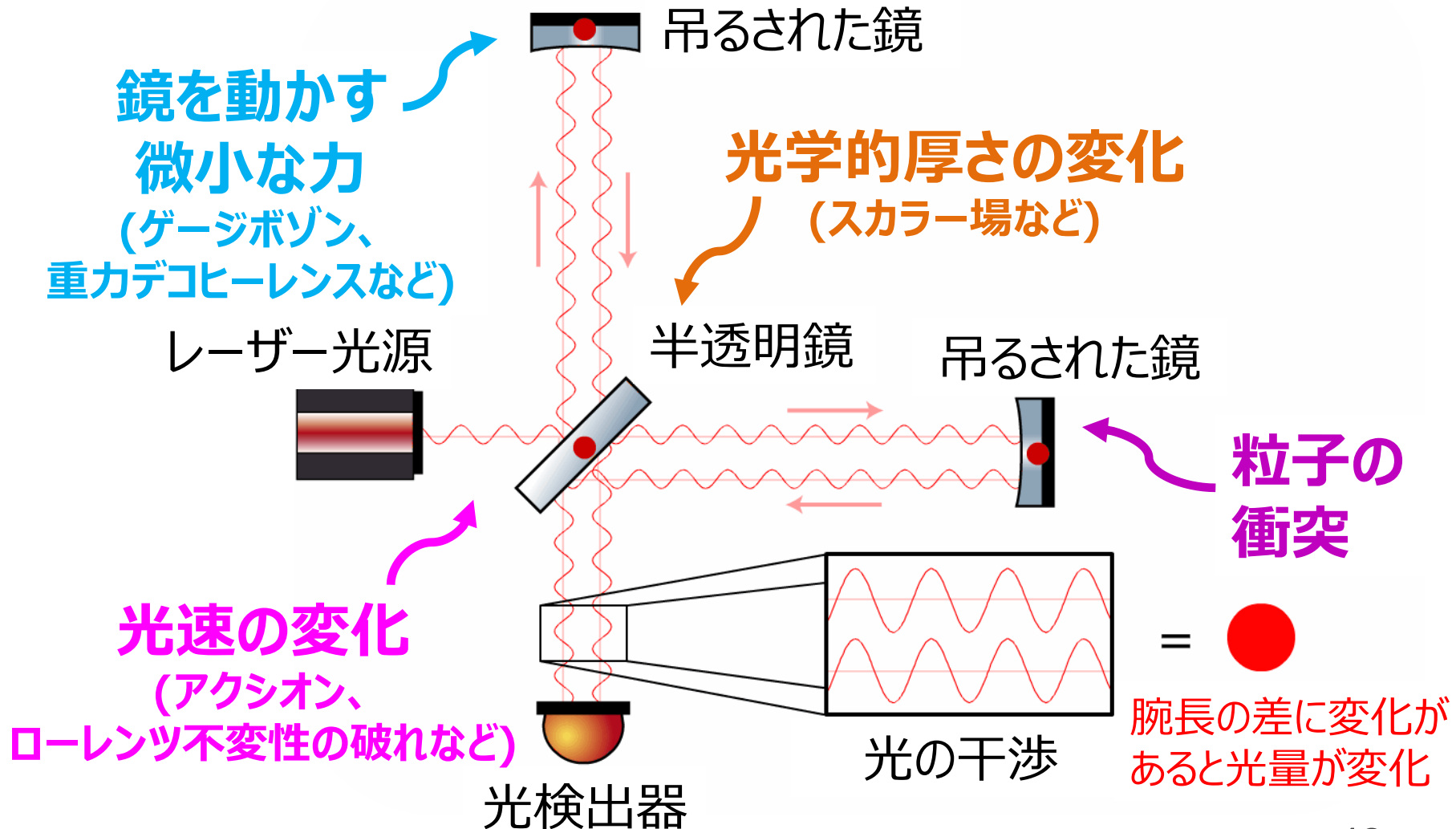
- 宇宙干渉計(重力波、赤外線など)の実現に向けた宇宙工学ミッション
- 複数の衛星間でレーザー干渉計を用いた精密測距を行い、高精度フォーメーションフライト技術、ドラッグフリー技術を軌道実証



- 2020年2月 JAXA/ISASに公募型小型計画として提案
- 2020年8月 アイディア実現加速フェーズへ承認
- 2022年12月 ミッション定義フェーズへ承認

重力波検出器で素粒子実験？

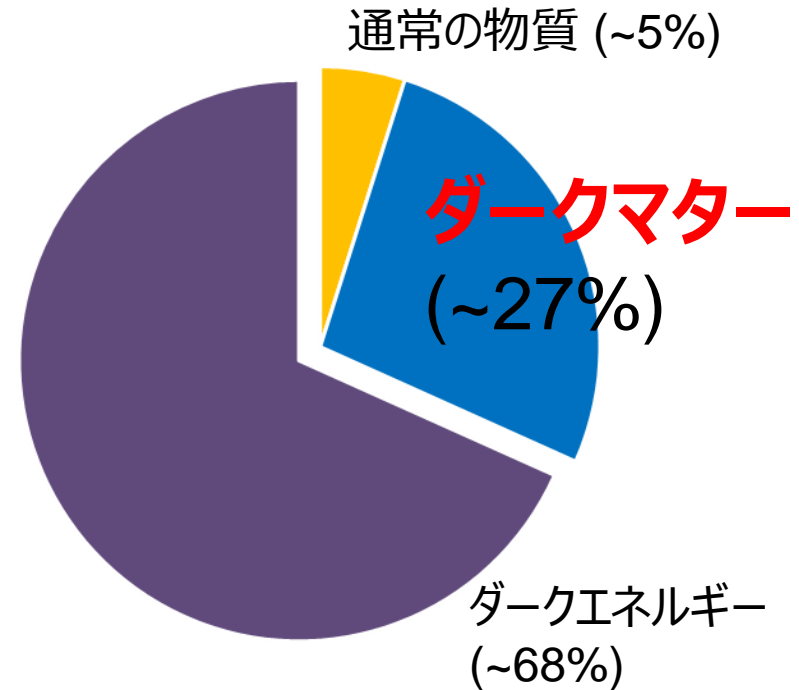
- 重力波検出器は**重力波以外の波**にも感度がある



ダークマター探索

- 全物質の約80%を占める、**正体不明**の物質
- 10^{-30} GeVから 10^{60} GeVまで様々な候補
- 特に**超軽量ダークマター**は宇宙論から高い注目
- **古典的な波**としてふるまう

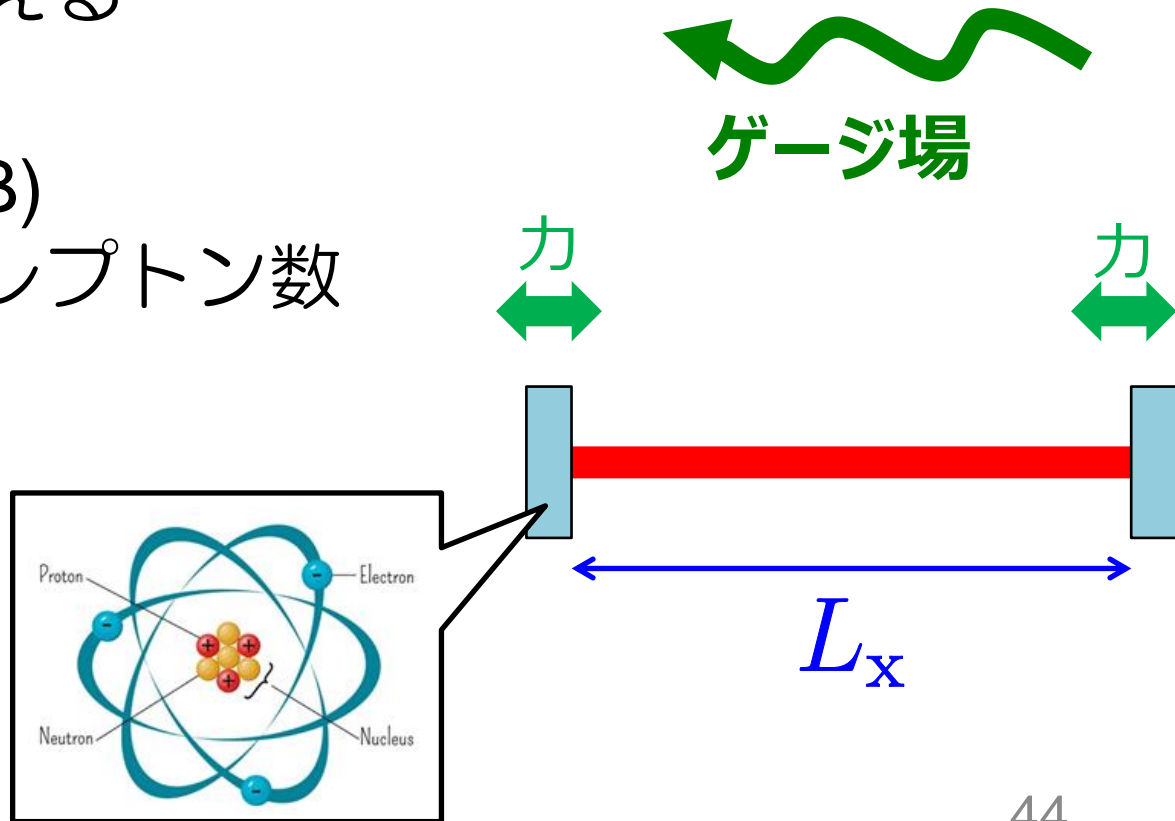
$$f = 242 \text{ Hz} \left(\frac{m_{\text{DM}}}{10^{-12} \text{ eV}} \right)$$



- **レーザー干渉計**は周期的な変化の検出が得意
 - **ゲージボゾン**ダークマター探索
 - **アクシオン**ダークマター探索

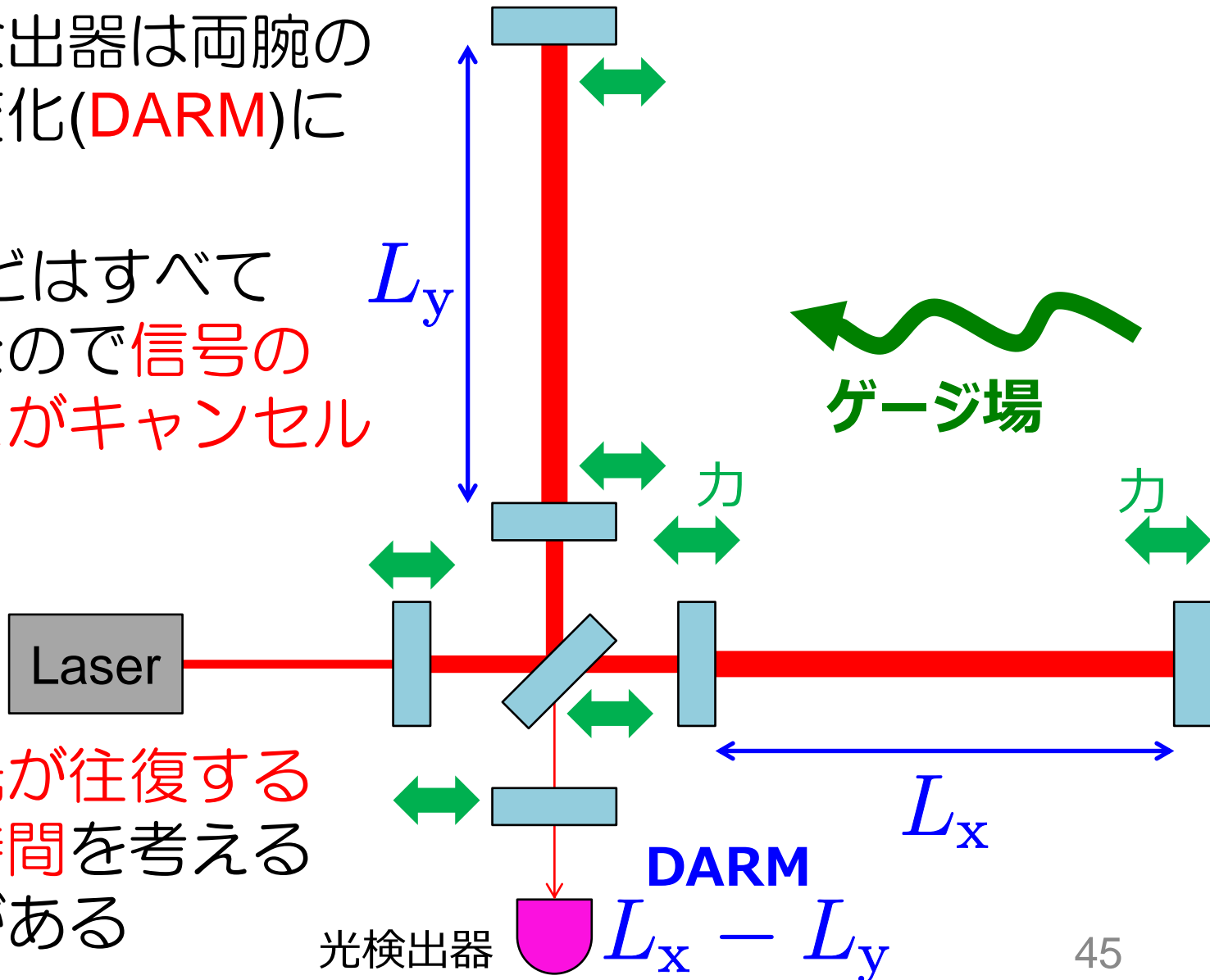
ゲージボゾンダークマター

- 標準理論を超える新しいゲージ場がダークマターかもしれない
- 物質の「電荷」と結合して、**材質に依存した周期的な力**を与える
- 「電荷」の例
 - バリオン数(B)
 - バリオン数-レプトン数(B-L)
- 対称共振器の場合、共振器長が長くないとほとんど信号が出ない



重力波検出器による探索

- 重力波検出器は両腕の差動長変化(DARM)に高感度
- LIGOなどはすべて石英鏡なので信号のほとんどがキャンセル



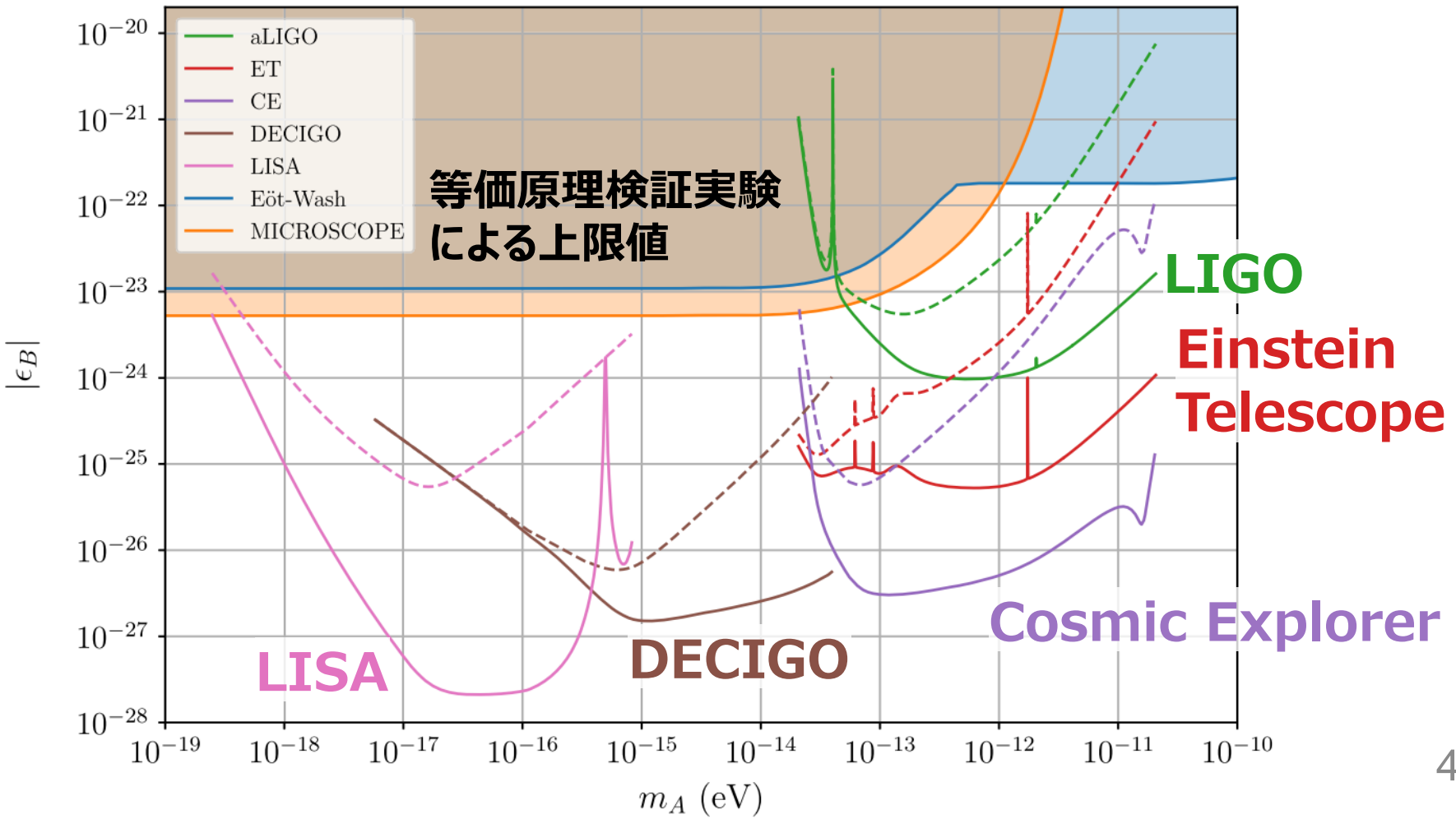
- しかし光が往復する有限の時間を考えると感度がある

重力波検出器による探索感度

- 光の往復時間を考慮に入れて感度が大幅に向上

設計感度で
1年間観測を仮定

S. Morisaki, T. Fujita, YM+ [PRD 103, L051702 \(2021\)](#)



LIGO/Virgoを使った探索

- **03データ**を利用した探索により、
等価原理検証実験を**更新する上限値**

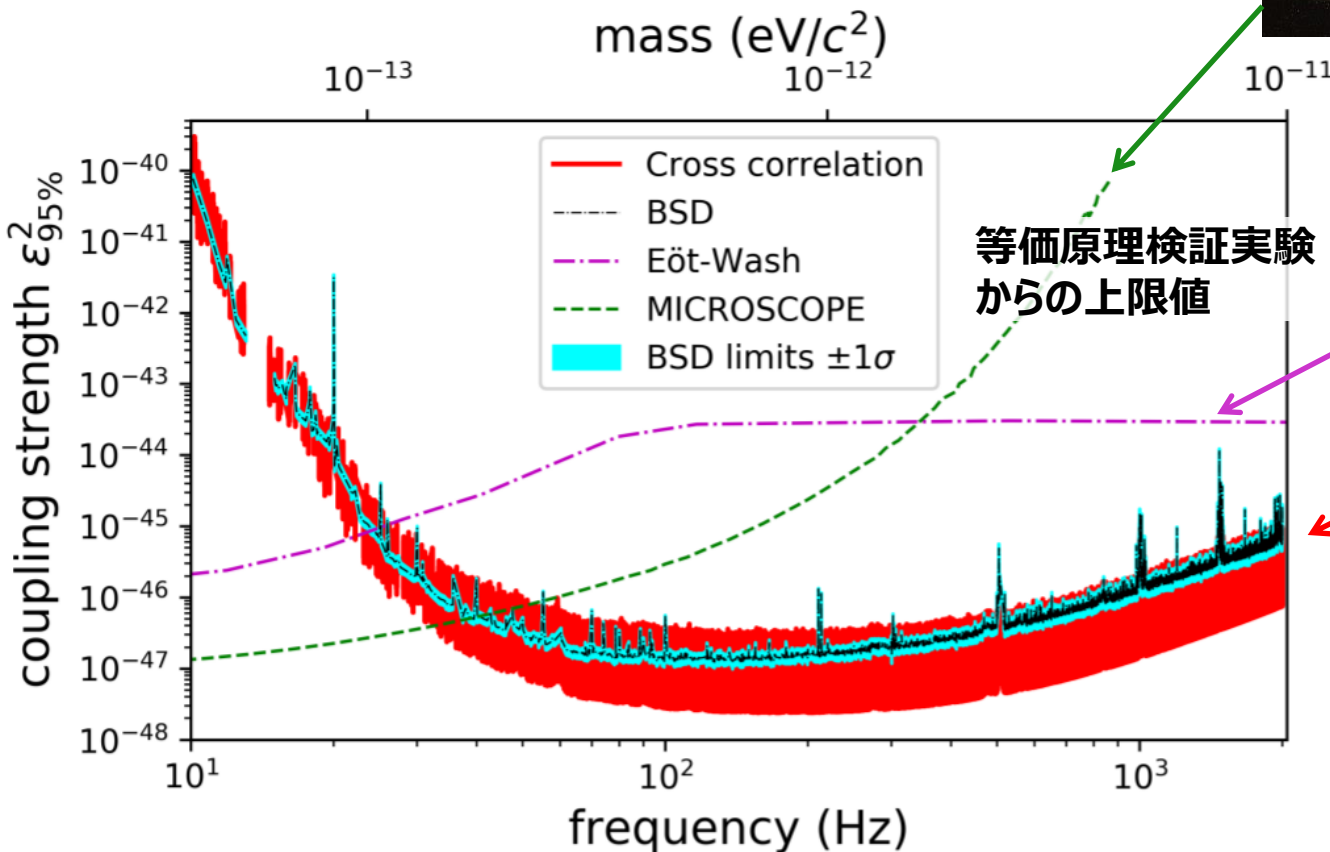
MICROSCOPE
衛星



Eöt-Wash
ねじれ振り子実験



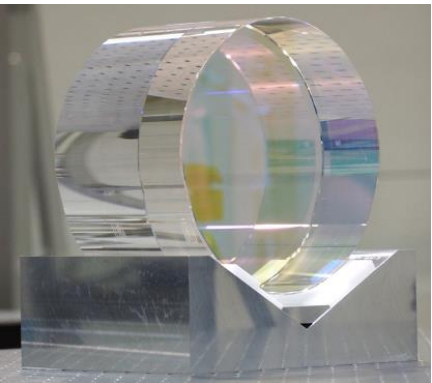
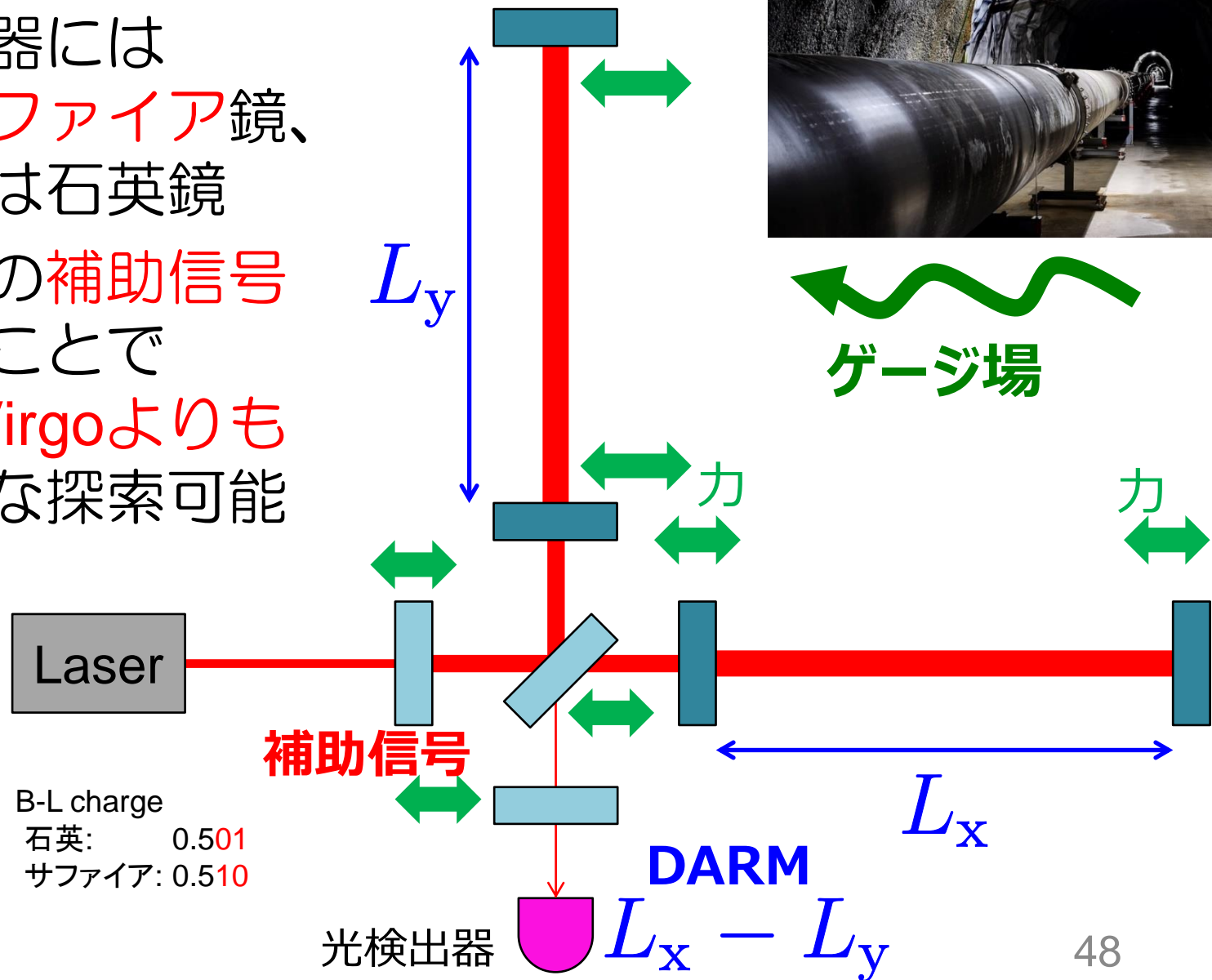
LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration,
[PRD 105, 063030 \(2022\)](#)



LIGO/Virgoによる
 $U(1)_B$ ゲージボゾン
への上限値

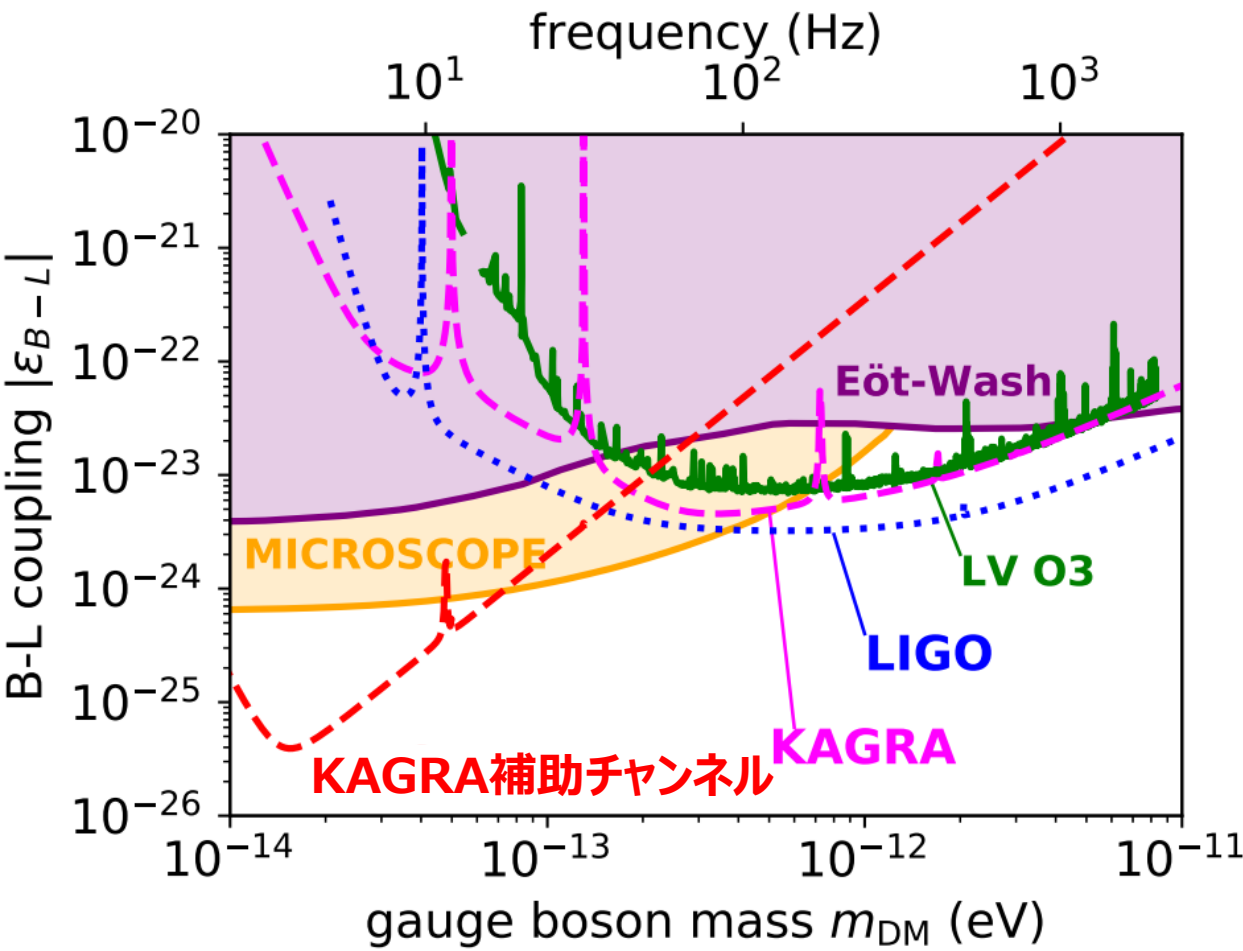
KAGRAを使った探索

- 腕共振器には低温サファイア鏡、その他は石英鏡
- 干渉計の補助信号を使うことでLIGO/Virgoよりも高感度な探索可能



KAGRAのB-Lゲージボゾン感度

- 低質量側でDARMより補助チャンネルの方が高感度
- KAGRAのO3データを利用した解析を実施中
2023年6月にLVKレビューを経て公開予定



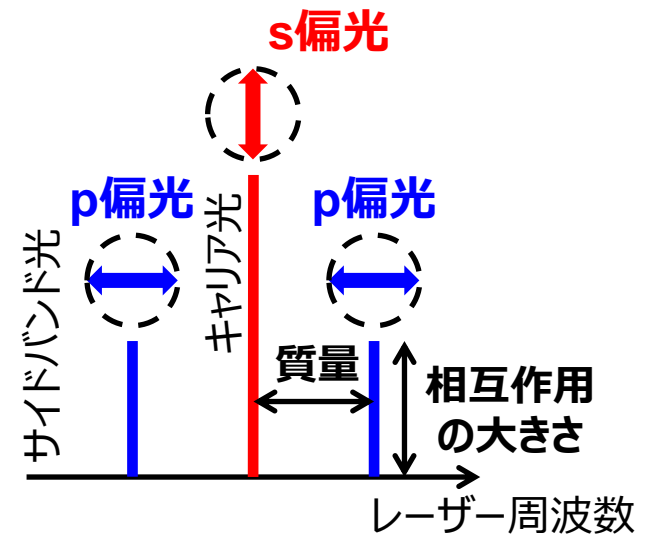
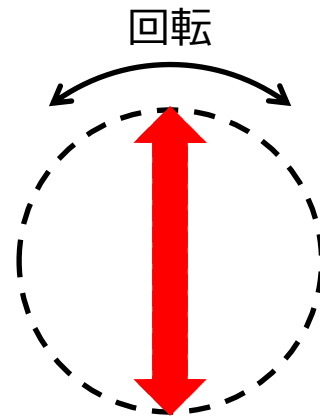
YM, T. Fujita, S. Morisaki,
H. Nakatsuka, I. Obata,
[PRD 102, 102001 \(2020\)](#)

設計感度で
1年間観測を仮定

アクシオンダークマター

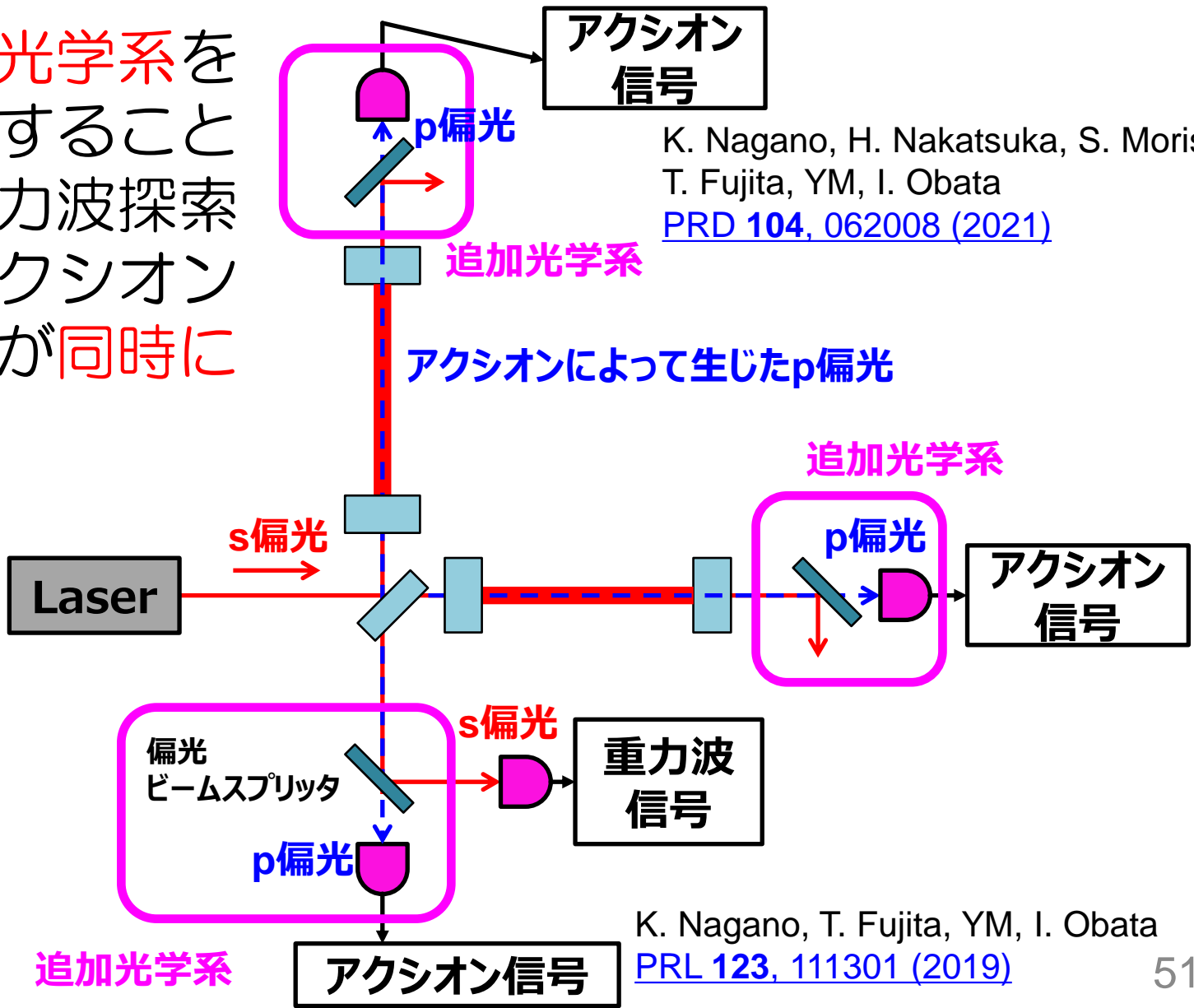
- 強いCP問題を解決するために導入された未発見粒子(QCDアクシオン)
- 超ひも理論なども様々なアクシオンに似た粒子 (Axion-like particles; ALPs)を予言
- 光子-アクシオン相互作用があると**光の偏光面が周期的に回転**

- 干渉計に入射した偏光と直交した偏光を探索することでアクシオン探索が可能



重力波検出器によるアクシオン探索

- 偏光光学系を追加することで重力波探索とアクシオン探索が同時に可能

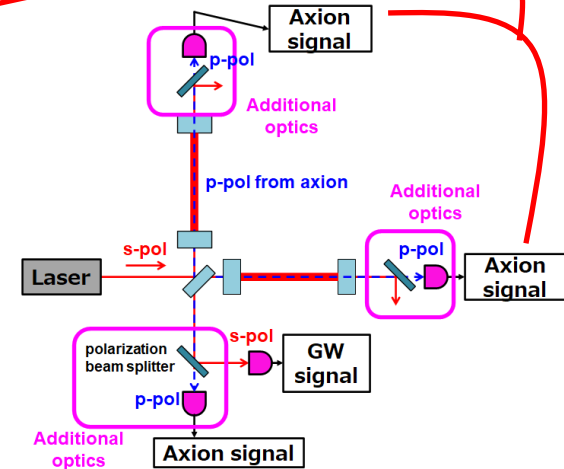
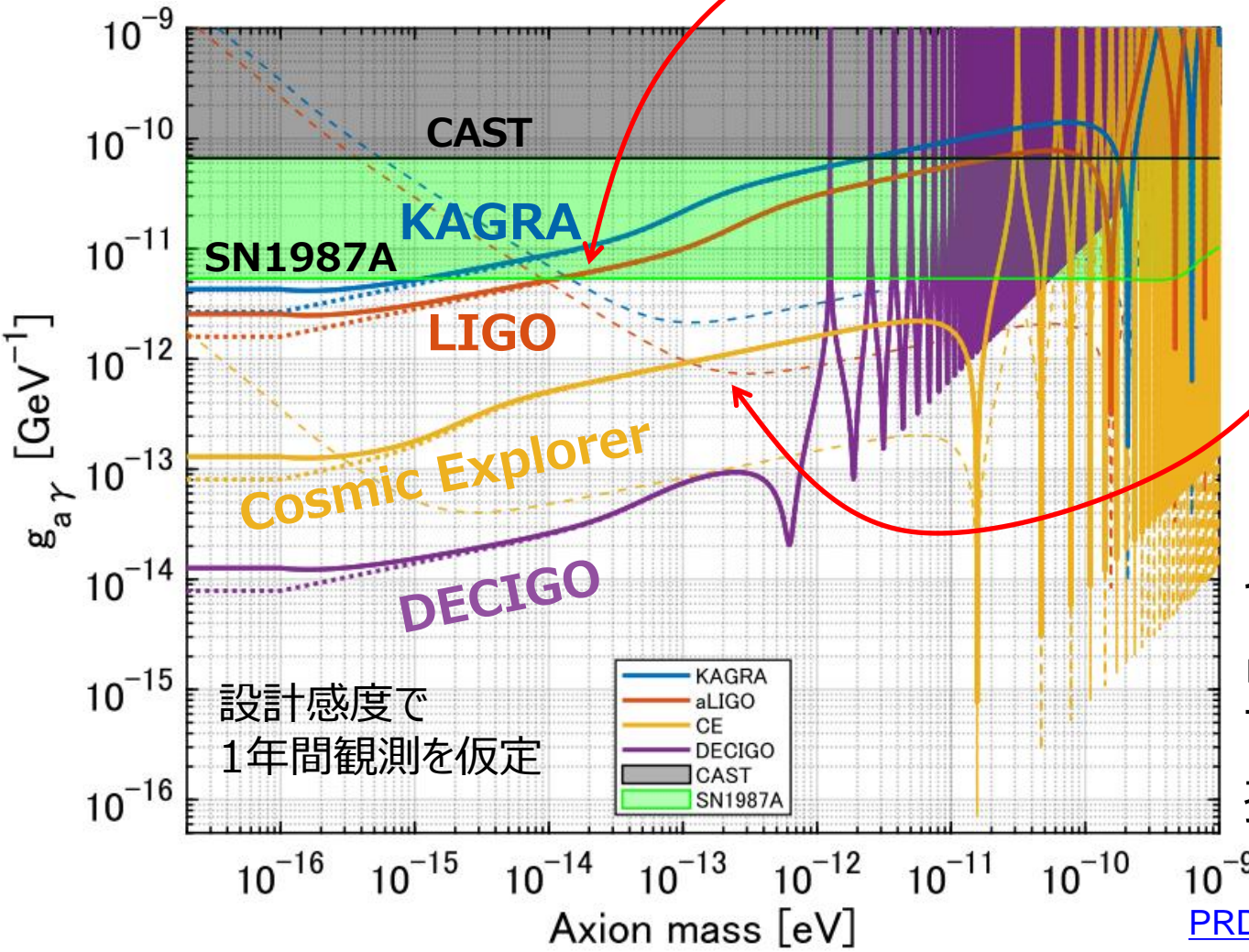


K. Nagano, H. Nakatsuka, S. Morisaki,
T. Fujita, YM, I. Obata
[PRD 104, 062008 \(2021\)](#)

K. Nagano, T. Fujita, YM, I. Obata
[PRL 123, 111301 \(2019\)](#)

重力波検出器のアクシオン感度

腕共振器の
透過光ポート



重力波検出ポート

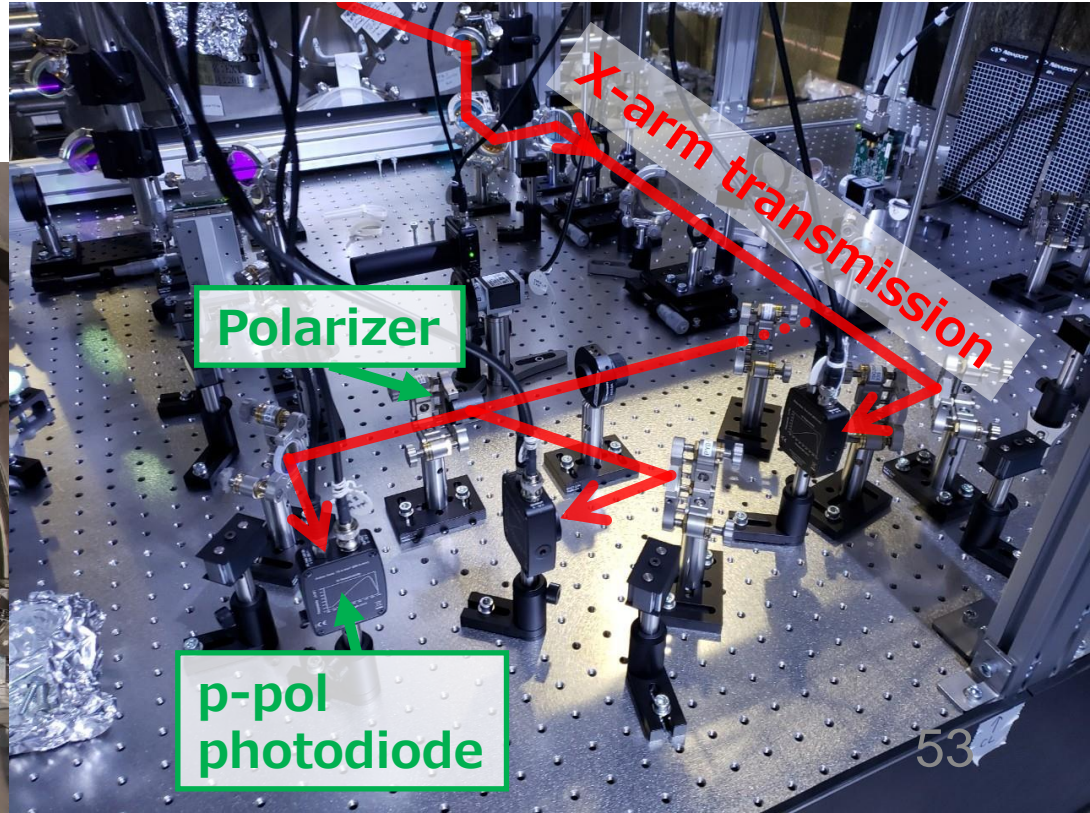
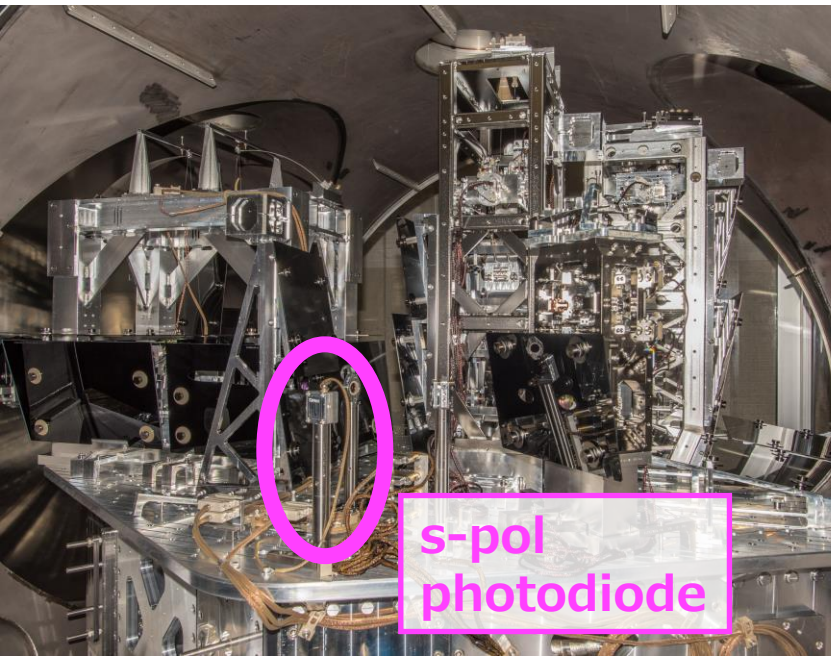
それぞれの干渉計
出力ポートを利用
することで相補的な
探索が可能

偏光光学系は導入済み

- KAGRAへは腕共振器透過光ポートに導入済み
O4では初のアクシオンデータが取れる見込み
- LIGOでは重力波検出ポートの偏光モニタを利用予定(O4から導入された)
 - ただし信号校正手法を要検討

ダークマターの正体は何か？
広大なディスカバリースペースの網羅的研究
What is dark matter? - Comprehensive study of the huge discovery space in dark matter

文部科学省
科学研究費助成事業
学術変革領域研究
(2020-2024)



第2特集
人体に生も40兆のバクテリア

世界が目にする「日本酒」の科学
あっと驚く世界の最新建築
ダークマターをKAGRAで探せ

感動する数学

1,190円

Newton 2022年12月号

ダークマター探索に 新展開

重力波観測装置などを使う新たな手法で悲願の検出なるか

宇宙に広く分布するといわれる謎の物質「ダークマター（暗黒物質）」その存在は確実視されており、長年探索が行われている。しかし、ダークマターの存在を示す直接的な証拠は得られておらず、その正体はいまだに不明だ。そこで近年、重力波観測装置を使う方法など、これまでとはちがうやり方でダークマターを探索する動きが活発になっている。今度こそダークマターの正体を明らかにできるだろうか。ダークマター探索の新展開を追う。

監修 道村唯太 カリフォルニア工科大学 LIGO 研究所リサーチ・サイエンティスト
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客員共同研究員

WHAT IS DARK MATTER?

ダークマターの正体は？

長年探索が行われているものの、ダークマターの正体はいまだに不明だ。未知の素粒子や、宇宙誕生初期に生じた「原始ブラックホール」など、さまざまな候補がダークマターである可能性が残っている。

目には見えず、地球だろうが私たちの体だろうが、あらゆる物質をすり抜けてしまう。しかし、質量をもち、宇宙のそこかしこに存在している。それが「ダークマター（暗黒物質）」だ。

1930年代にはじめてその存在が示されて以来、さまざまな観測結果がダークマターの存在を支持している。研究者の多くは、ダークマターの存在を確実視しているのだ。

ダークマターの正体として、さまざまな説が提唱されてきた。たとえば、ビッグバン直後に生まれた「原始ブラックホール」だという説や、周囲の物質とほとんど反応しない未知の素粒子ではないかという説だ。

世界の数々の望遠鏡や巨大加速器

などを使って、ダークマターの正体をさぐるための観測や実験が行われてきた。ところが、いまだにダークマターの正体は明らかになっていない。みつかるのは間接的な証拠ばかりで、ダークマターそのものを観測できたという直接的な証拠はみつかっていないのだ。存在するのはほぼ確実だが、どんなにさがしてもみつからないという状態が、もう何十年もつづいているのである。

「目に見えない物質」を仮定しないと説明できない

研究者たちはなぜダークマターが存在すると考えているのだろうか。それはダークマターが存在すると仮定

しなければ説明のつかない現象が、数多くみつまっているからだ。

ダークマターの存在を示す有名な例が、1970年代にアメリカの天文学者ヴェラ・ルービン（1928～2014）が観測した渦巻銀河の回転速度だ。渦巻銀河を構成する星々やガスは、銀河の中心のまわりを同じ方向に高速で回転している。

渦巻銀河と同じように、私たちの太陽系でも惑星や小惑星、ガスなどが、中心にある太陽のまわりを同じ方向に回転（公転）している。惑星などの回転速度は、太陽に近いほど速い。たとえば、太陽に最も近い惑星である水星は、秒速約47キロメートルで公転している。少し遠い地球は、秒速約30キロメートルだ。最も

太陽から遠い惑星である海王星に至っては、秒速約5キロメートルまで遅くなる。

太陽系において圧倒的に大きな質量をもつ太陽に近くなるほど、太陽の重力は強くなる。そのため太陽に近い惑星は、速く回転して強い遠心力（外側に向かう力）を生じさせなければ、太陽の重力（内側にひっぱる力）と釣り合いを保てなくなるのだ。もし何らかの原因で回転速度が遅く（遠心力が弱く）なれば、太陽に引き寄せられてしまうだろう。

渦巻銀河の星々の多くは中心付近に集まっている。つまり、太陽系と同様に中心部に質量が集中している。そのため、渦巻銀河の回転速度も、基本的に中心に近いほど速く、中心か

らはなれるほど遅くなっていくはずだ。ところがルービンらによって観測された結果はちがっていた。渦巻銀河の回転速度は、内側も外側あまり変わらなかったのである。

この観測事実は、目に見える星々の質量だけでは説明がつかない。何らかの目には見えない物質が渦巻銀河をおおるように広く存在し、その質量によって中心からはなれた領域にも重力の影響をあたえていると考えられることで、ようやくうまく説明できるのだ。この目には見えない物質がダークマターである。現在、各銀河には、目に見える星やガスから計算される質量の数倍から数十倍にも上る大量のダークマターが含まれていると考えられている。

ダークマターが存在すると考えたほうが自然

ダークマターの存在を示す証拠は、渦巻銀河の回転速度だけにとどまらない。何らかの重力源の影響で光の進路が曲がって見える「重力レンズ」という現象や、銀河の集合体である銀河団どうしが衝突したときのようすを観測した結果を説明するときにも、ダークマターなしではうまく説明できないことが多いのだ。

約138億年前に宇宙が誕生してから現在までに、さまざまな星や銀河、銀河団、すなわち宇宙の構造がつくられてきた。実はダークマターなしでは、138億年という短い時間で現



まとめ

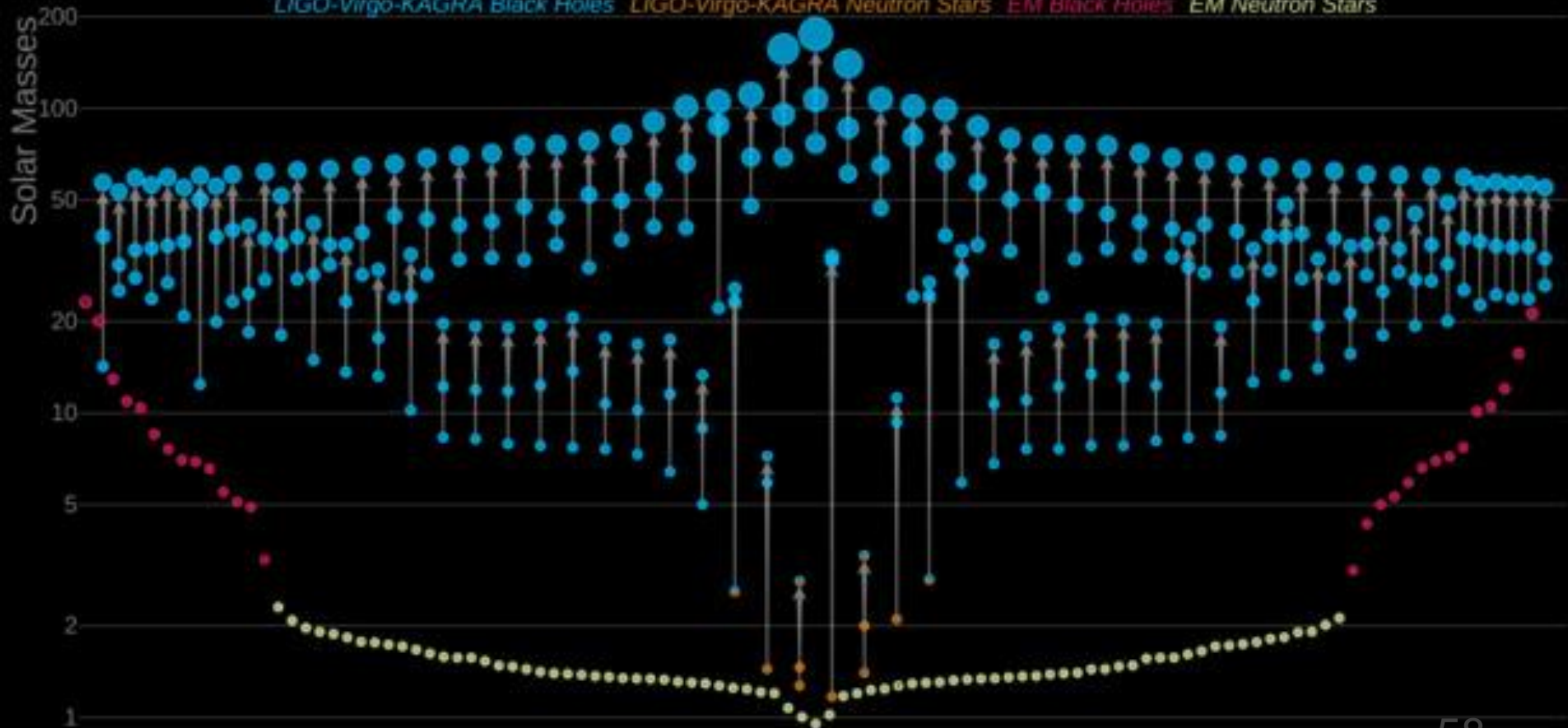
- 重力波天文学・物理学は始まったばかり
- 検出器開発がサイエンスに直結する時代
- LIGOもさらに感度を上げていく計画
- 次世代地上検出器では
全宇宙の連星合体を観測可能に
- 宇宙検出器DECIGOでは
多波長観測や
インフレーション起源の原始重力波
- 重力波検出器を利用して
重力波以外のサイエンスも可能

おまけ

検出された連星合体一覧

Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



検出された連星合体一覧

重い恒星質量ブラックホールがたくさん見つかった
これらはどこから来たのか？

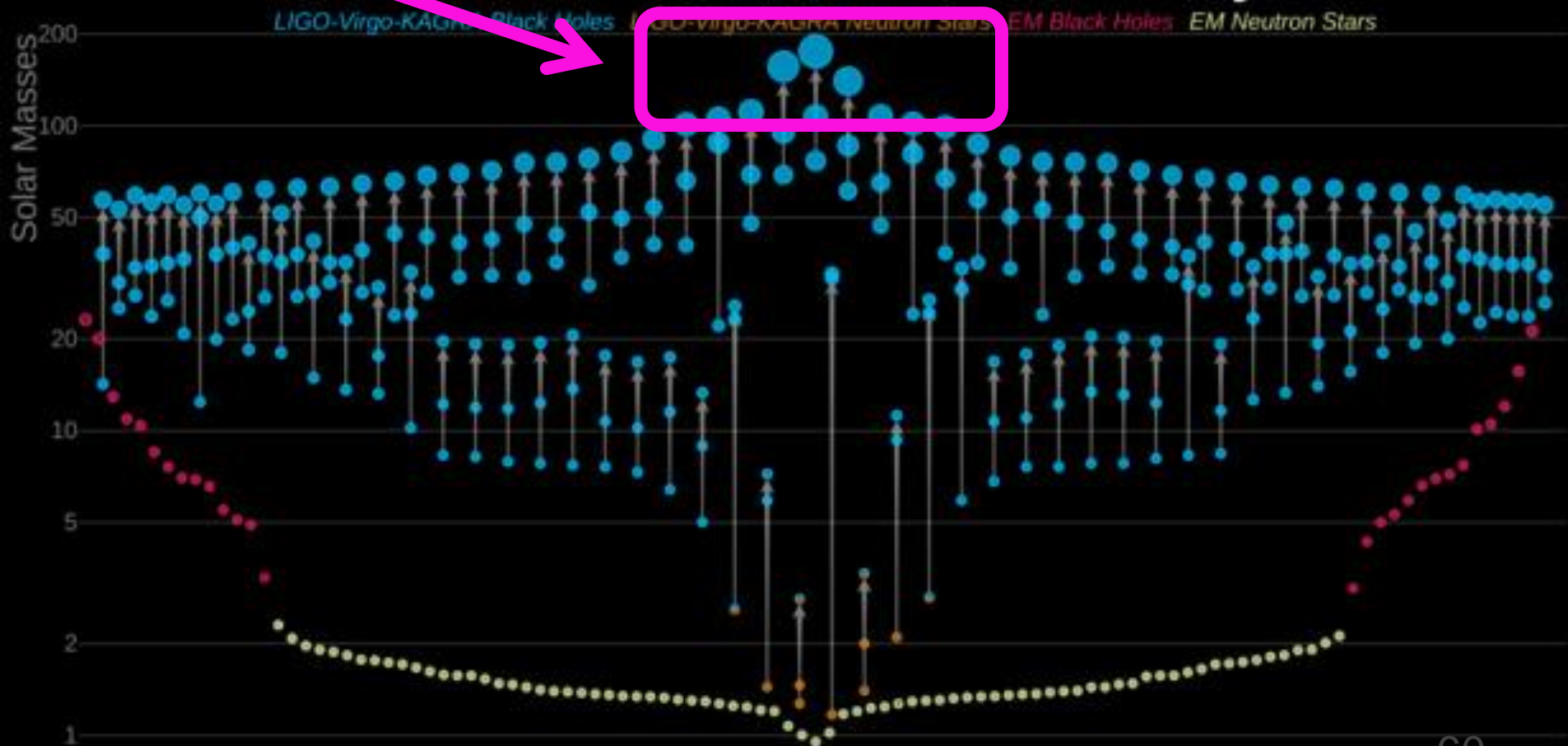


検出された連星合体一覧

中間質量ブラックホールも見つかった

これらもどこから来たのか？ 種となったBHもどこから来たのか？

Masses in the Stellar Graveyard



検出された連星合体一覧

2-5太陽質量の天体も見つかった

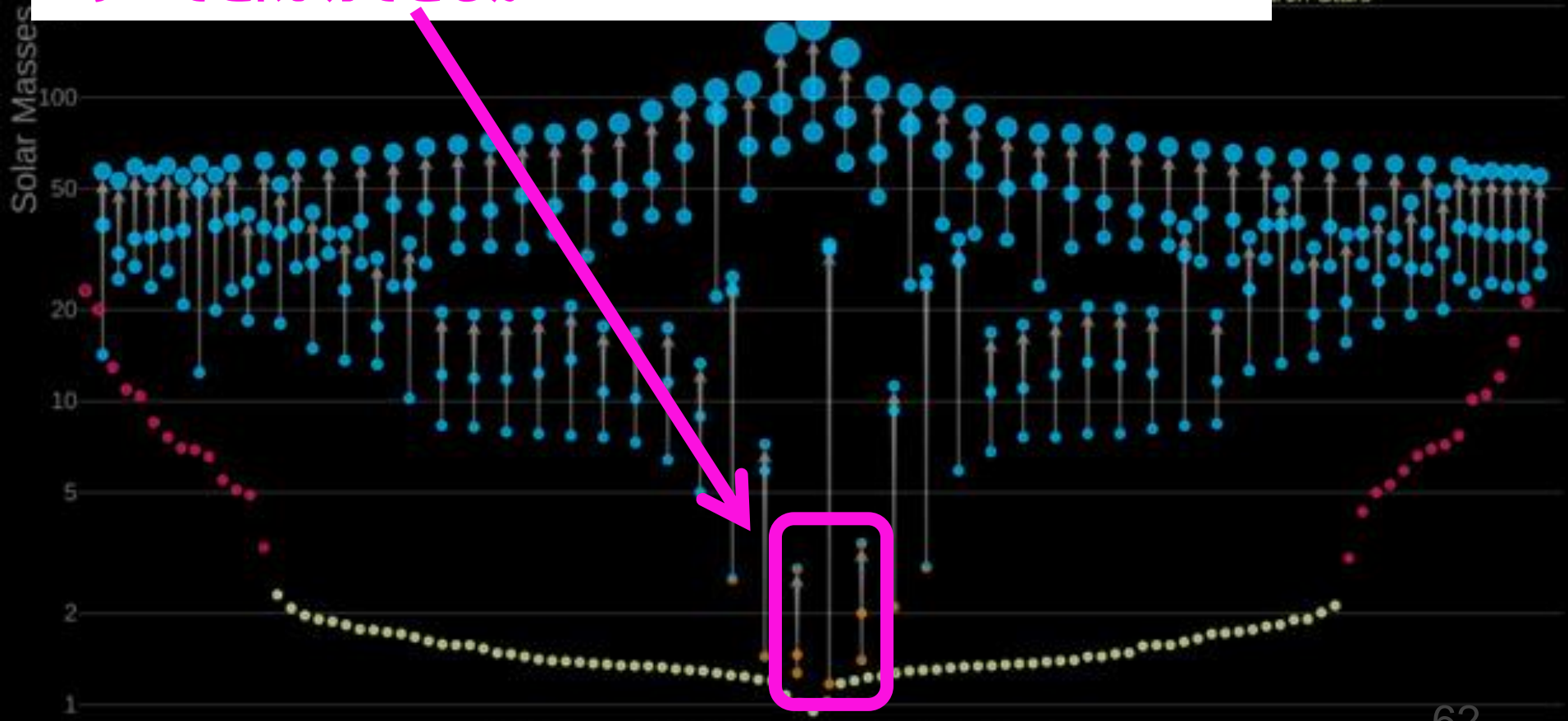
最も重い中性子星？ 最も軽いブラックホール？



検出された連星合体一覧

連星中性子星合体で潮汐変形率や半径に制限がついた
合体後は何になったのか？ 状態方程式は？
重元素合成の現場であることがわかってきた
すべてを説明できるか？

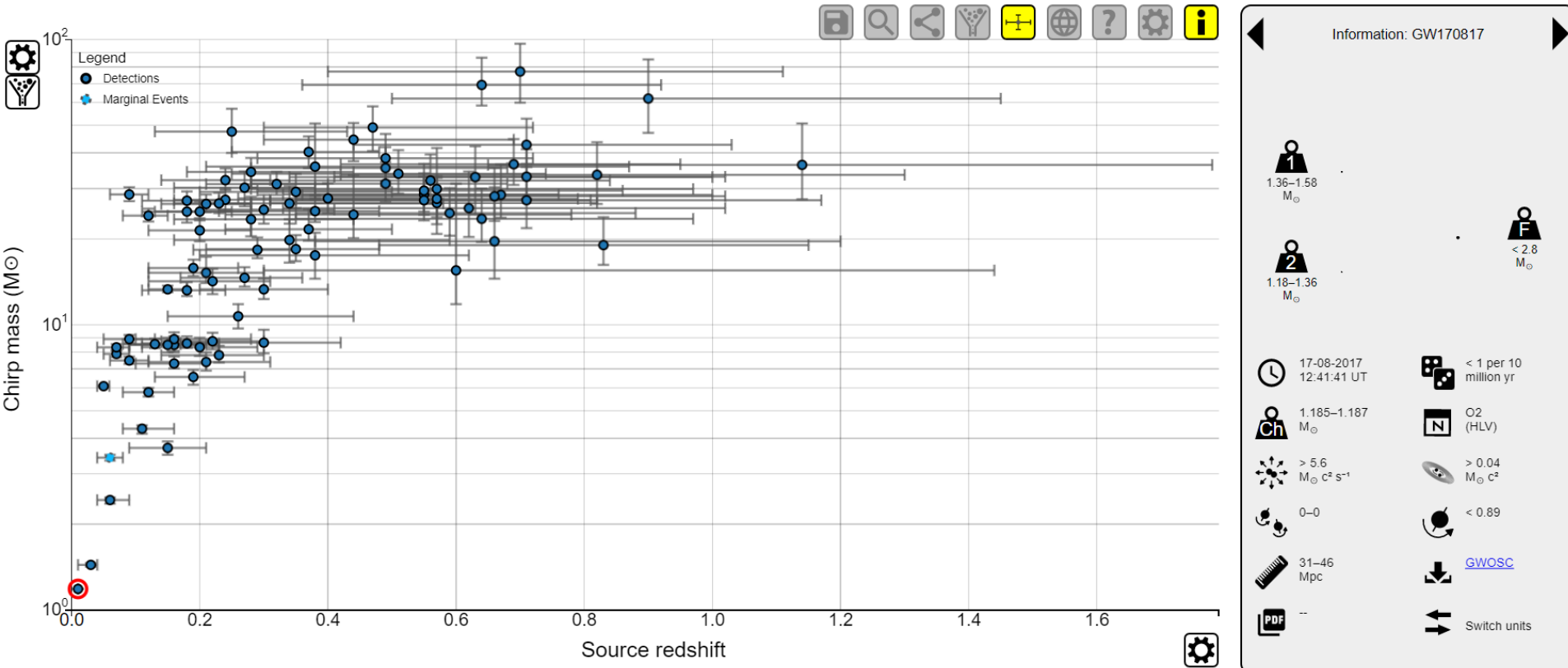
ard
tron Stars



検出された連星合体一覧

- 連星のパラメータ分布を調べると天体の起源に迫ることができる

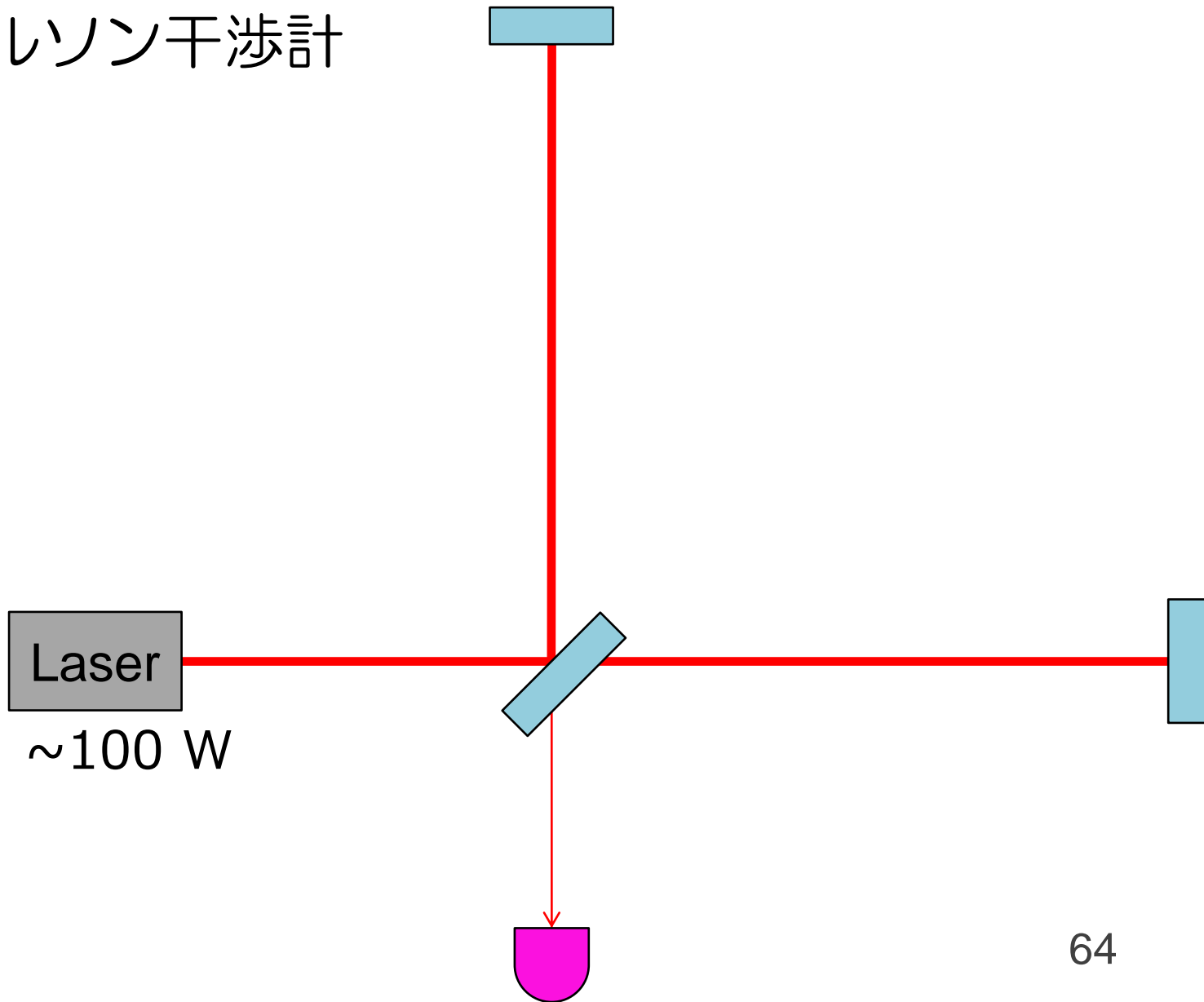
LIGO-Virgo Compact Binary Catalogue



<https://catalog.cardiffgravity.org/>

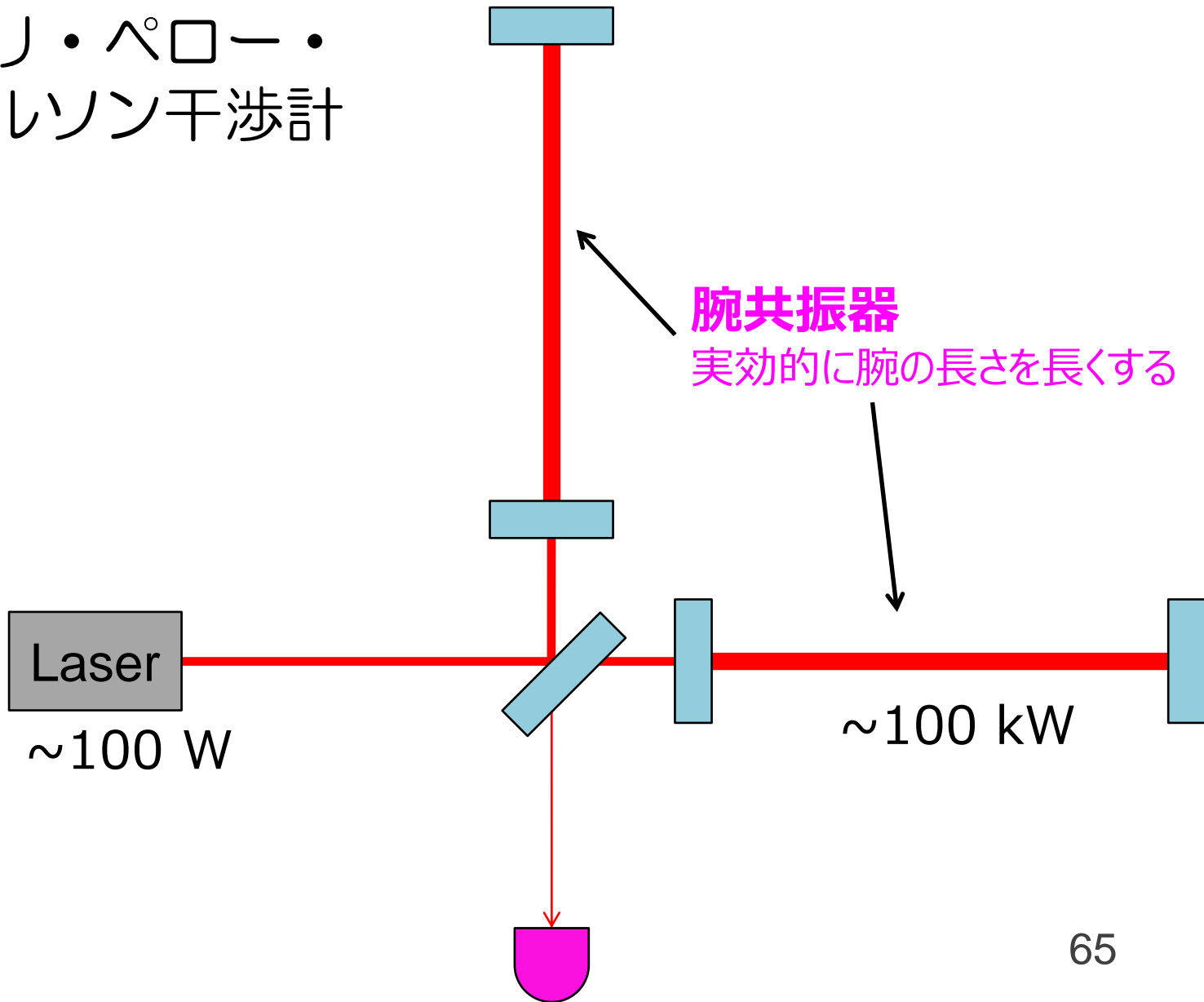
実際はもう少し複雑

- マイケルソン干渉計



実際はもう少し複雑

- ファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計 (FPMI)

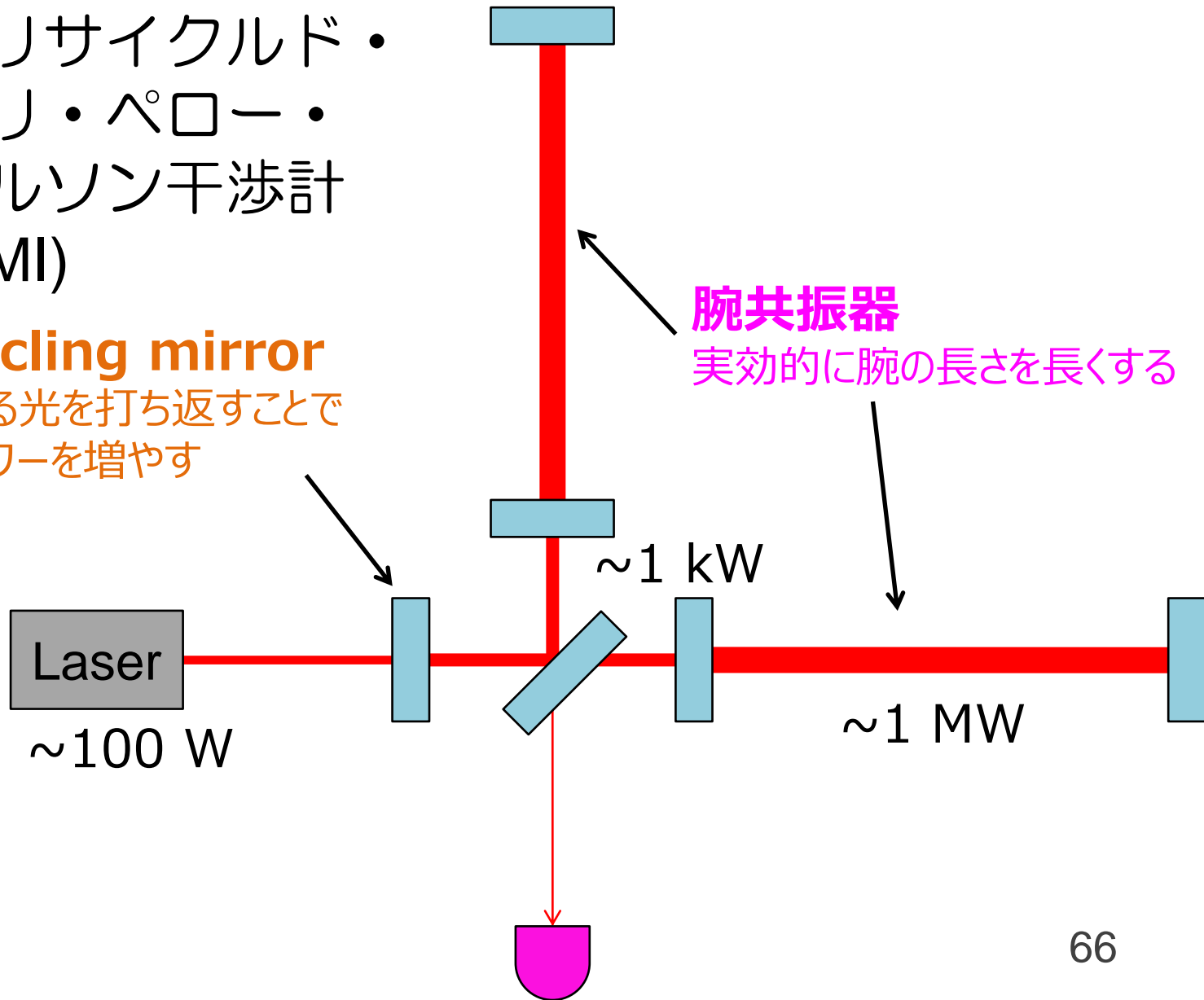


実際はもう少し複雑

- パワーリサイクルド・
ファブリ・ペロー・
マイケルソン干渉計
(PRFPMI)

Power recycling mirror

光源側に戻ってくる光を打ち返すことで
実効的に入射パワーを増やす

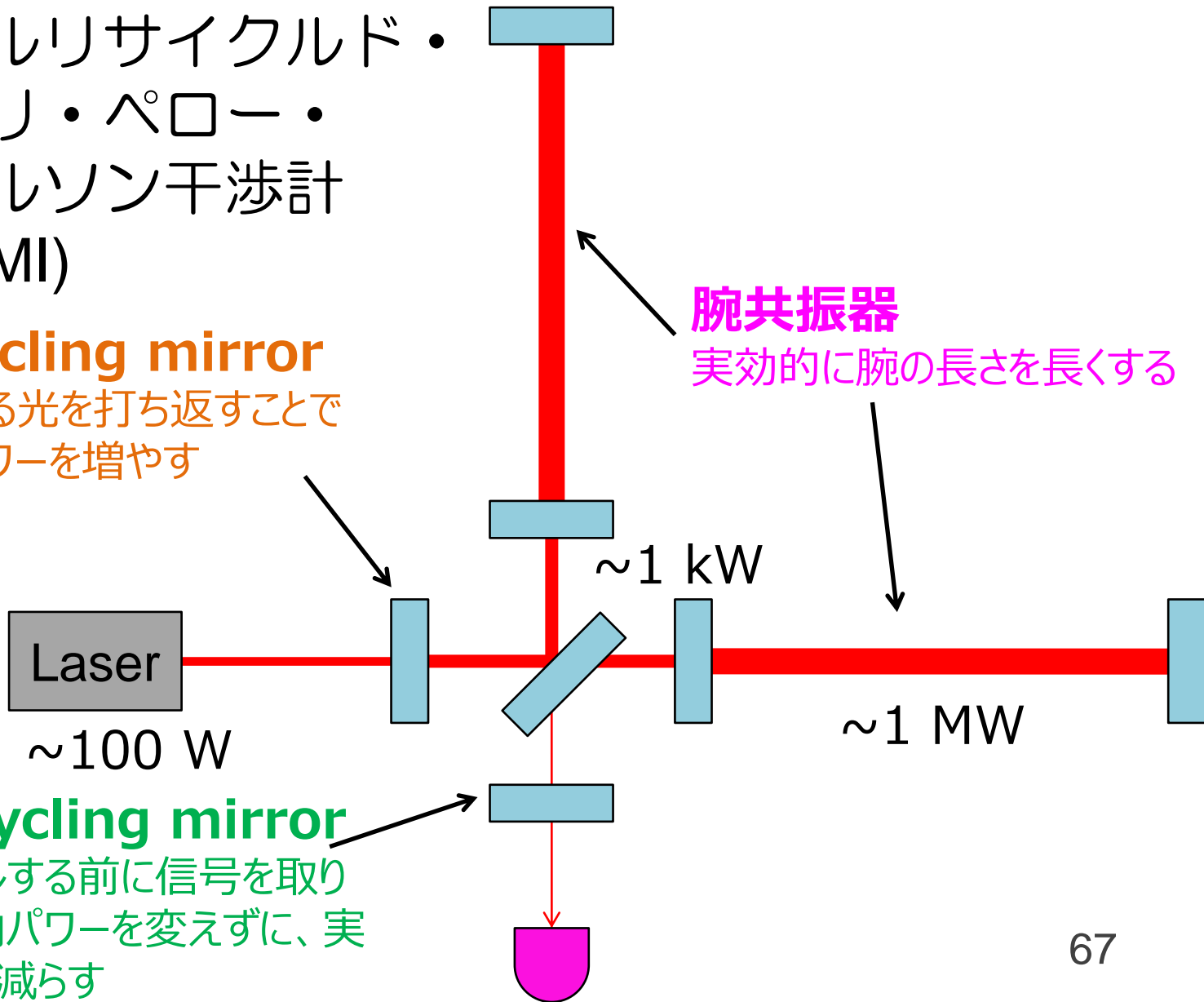


実際はもう少し複雑

- デュアルリサイクルド・
ファブリ・ペロー・
マイケルソン干渉計
(DRFPMI)

Power recycling mirror

光源側に戻ってくる光を打ち返すことで
実効的に入射パワーを増やす

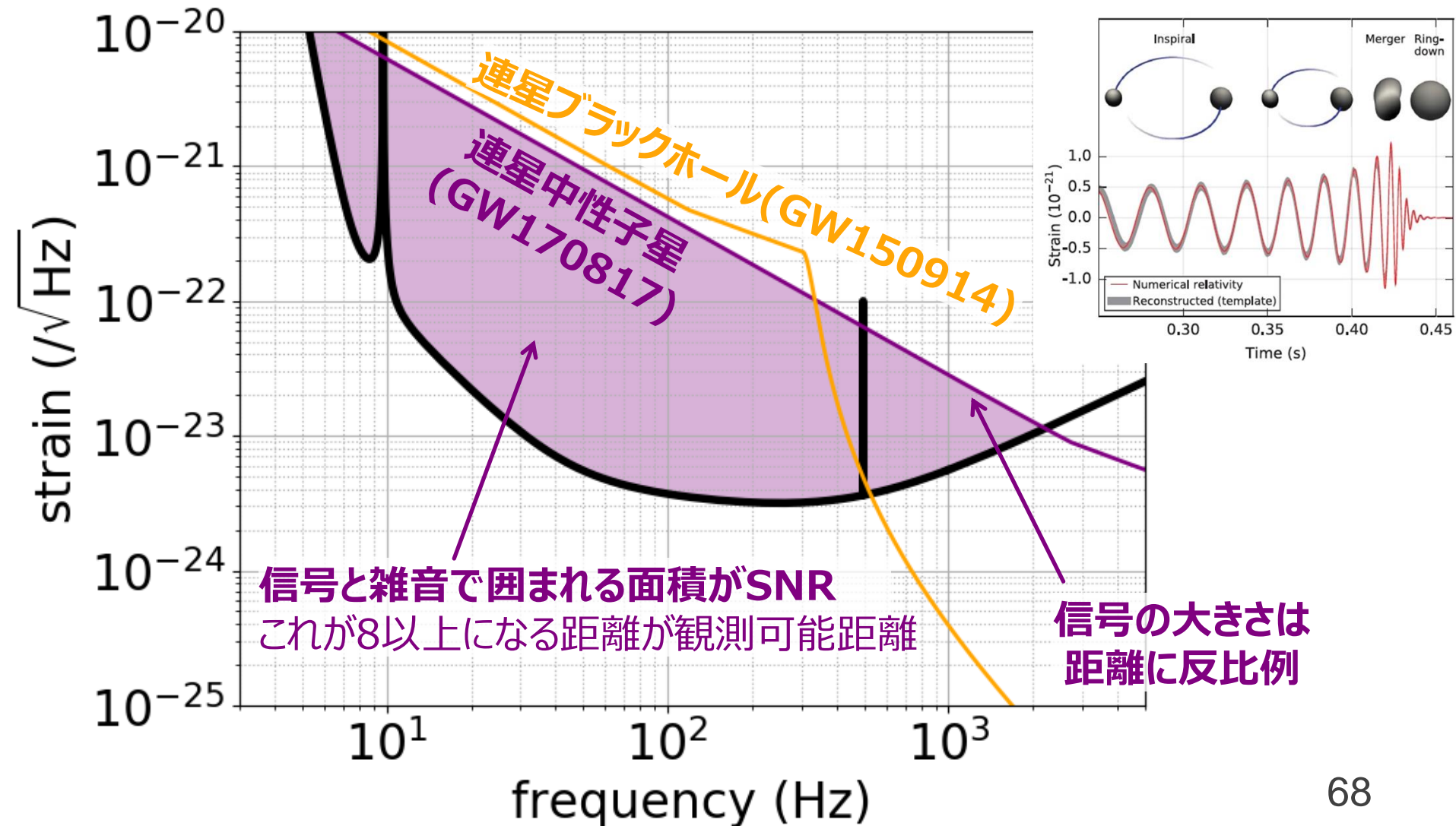


Signal recycling mirror

信号がキャンセルする前に信号を取り
出すことで、腕内パワーを変えずに、実
効的にフィネスを減らす

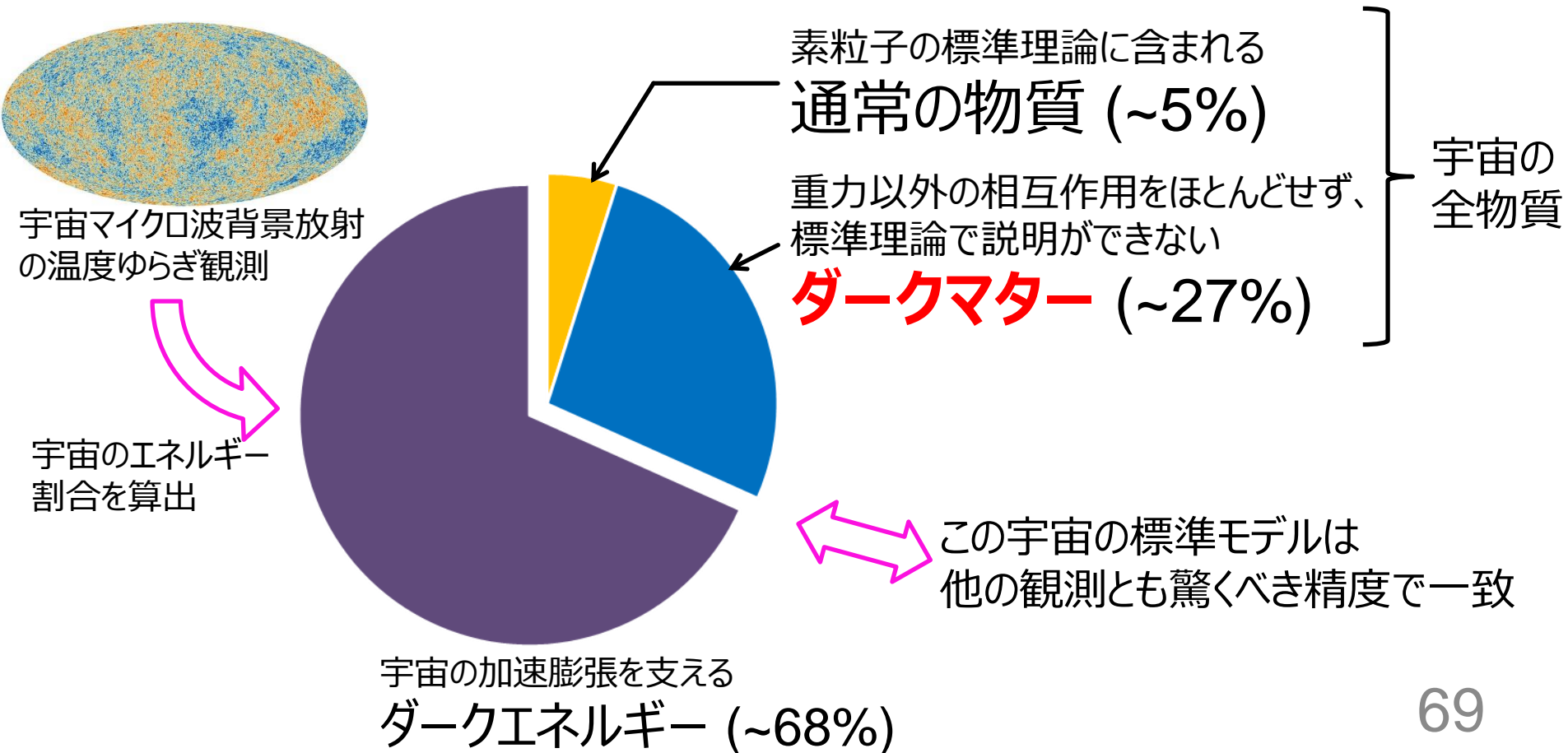
重力波検出器の性能指標

- 連星中性子星の観測可能距離で表すことが多い



ダークマターとは？

- 1930年代に銀河の回転速度の観測から存在指摘
- 現代では全物質の約80%を占めることが明らかに
- 依然として正体は不明

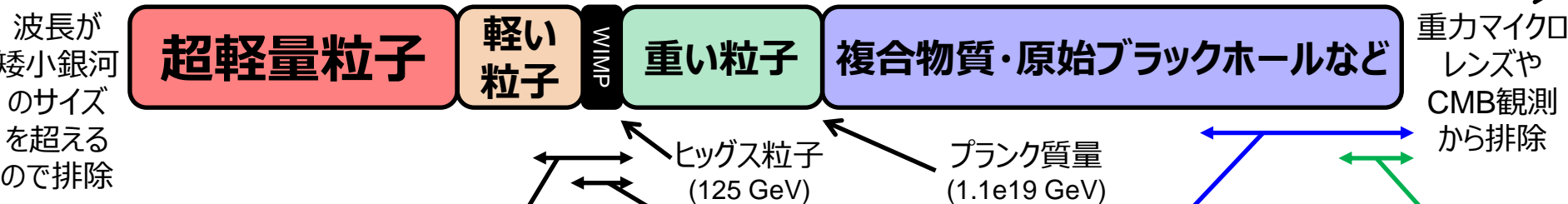
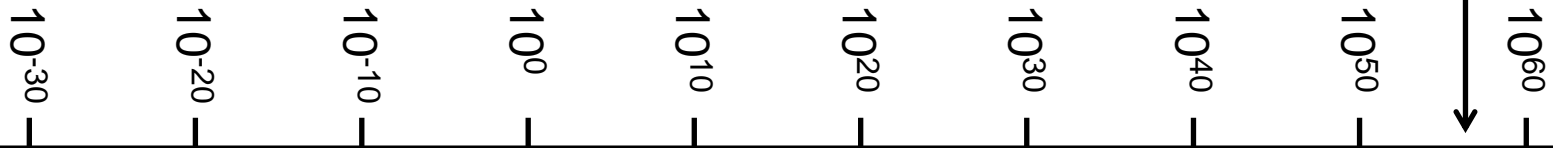


ダークマター探索

- 長年の間**WIMP**に探索が集中するも**未発見**
 近い将来、太陽・大気ニュートリノのバックグラウンドで検出限界に
- より網羅的な、**新発想の探索**が求められている

ダークマターの質量 (GeV)

太陽質量
($1.1e57$ GeV)



波長が矮小銀河のサイズを超えるので排除

重力マイクロレンズやCMB観測から排除

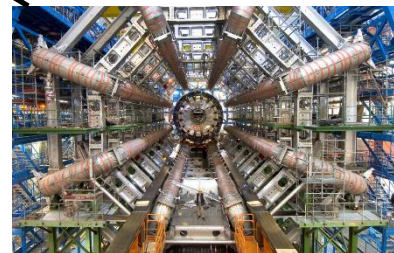
ヒッグス粒子
(125 GeV)

プランク質量
($1.1e19$ GeV)

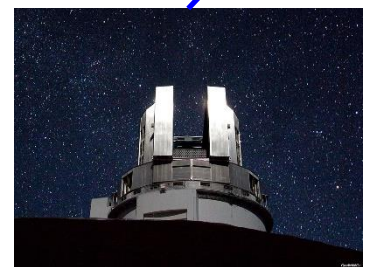
2.4 Hz ~ 2.4 kHz
($1e-14$ ~ $1e-11$ eV)
**レーザー干渉計
が得意な領域**



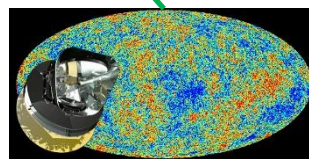
XENON1Tなど
地下実験



LHC
巨大ハドロン加速器



すばる望遠鏡など



宇宙マイクロ波
背景放射観測

干渉計で超軽量ダークマター

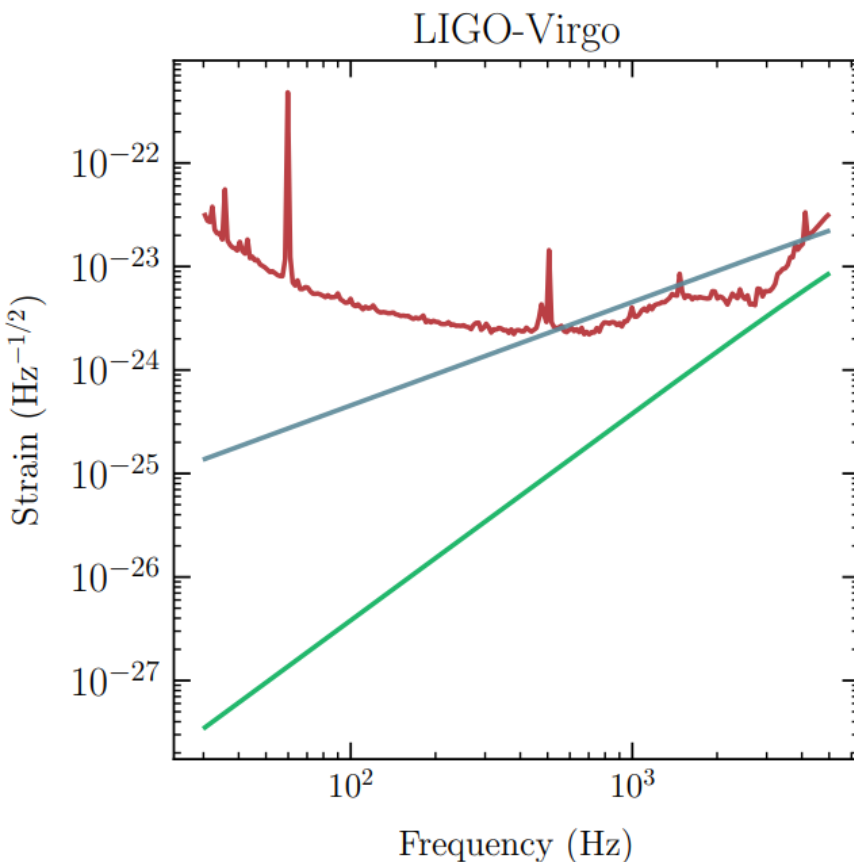
- 超軽量ボゾン場(<~1 eV)が特に宇宙論から高い注目
- 古典的な波としてふるまう

$$f = 242 \text{ Hz} \left(\frac{m_{\text{DM}}}{10^{-12} \text{ eV}} \right)$$

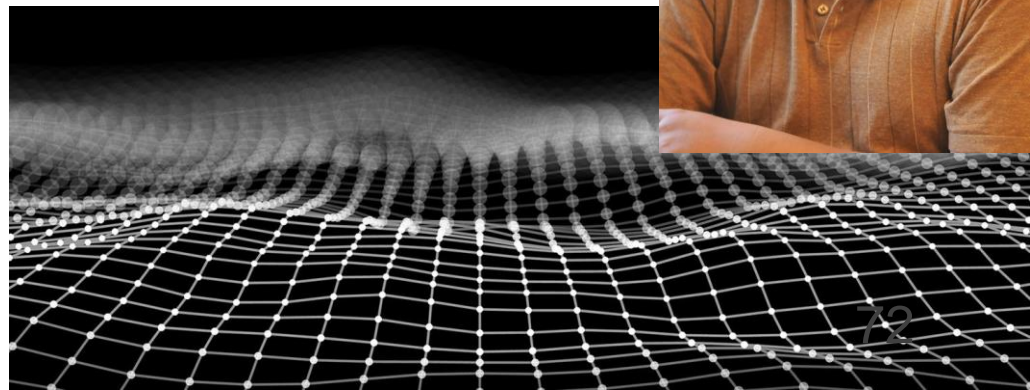
- レーザー干渉計はこうした周期的な変化の検出が得意
- ここでは下記を紹介
 - ゲージボゾンダークマター探索
YM+, [PRD 102, 102001 \(2020\)](#)
S. Morisaki, T. Fujita, YM+, [PRD 103, L051702 \(2021\)](#)
 - アクシオンダークマター探索
I. Obata, T. Fujita, YM, [PRL 121, 161301 \(2018\)](#)
K. Nagano, T. Fujita, YM, I. Obata, [PRL 123, 111301 \(2019\)](#)
K. Nagano, ... , YM, I. Obata, [PRD 104, 062008 \(2021\)](#)

重力波検出器で量子重力検証

- 重力も空間も量子化されているはず
- レーザー干渉計を利用すると空間の「ピクセル」が見える



D. Li+
[PRD 107, 024002 \(2023\)](#)



LIGOの高周波チャンネルを利用

- O4から重力波信号が**512 kHz**で記録されている (これまででは16 kHz)
- 腕共振器の共振を利用した信号探索が可能に
量子重力、ダークマター、背景重力波...

