

宇宙の謎を解き明かす精密測定

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻
博士課程3年 大島由佳
修士課程1年 杉岡達哉

講演者 自己紹介

大島 由佳

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻
安東研究室 博士3年



経歴

東京都出身

国立 筑波大学附属高校



東京大学 理科二類



理学部物理学科



現在

研究内容

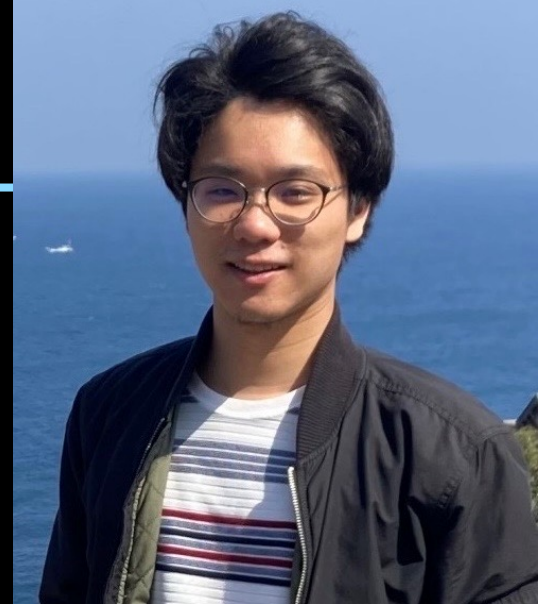
低周波重力波望遠鏡の開発

アクシオンダークマターの探索実験

ファシリテーター 自己紹介

杉岡 達哉

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻
安東研究室 修士1年



経歴

兵庫県出身

私立 洛星高校



北海道大学 工学部応用理工系学科



現在

研究内容

B-Lベクトルダークマターの
探索実験

質問を受け付けています

学生講演「宇宙の謎を解き明かす精密測定」

講演者：物理学専攻 博士3年 大島由佳

ファシリテーター：物理学専攻 修士1年 杉岡達哉

【質問受付時間】 2024年8月6日(火) 10:05-10:55

【質問方法は2通り】

1. YouTube概要欄にあるslidoのURLをクリックしてアクセスコード#3653099を入力
2. 右のQRコードをスマートフォンで読み取る

Join at
slido.com
#3653 099





物理学科と物理学専攻の紹介

研究紹介

- 低周波重力波望遠鏡の開発
- アクシオンダークマターの探索実験

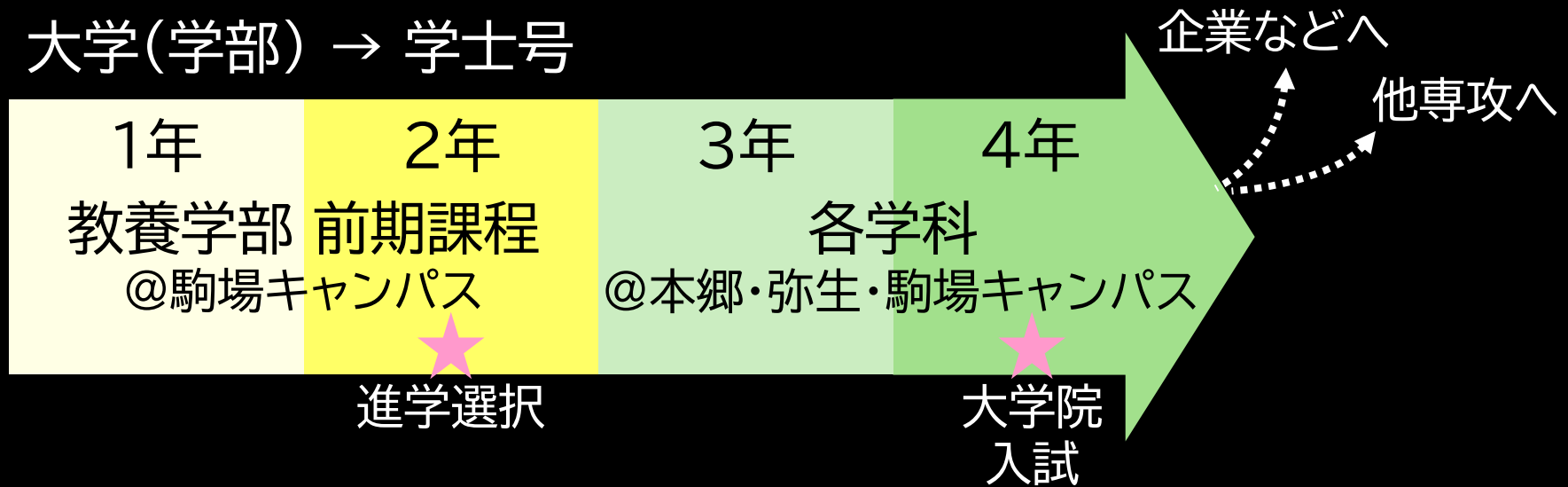
質問への回答

東大の学部と大学院の流れ

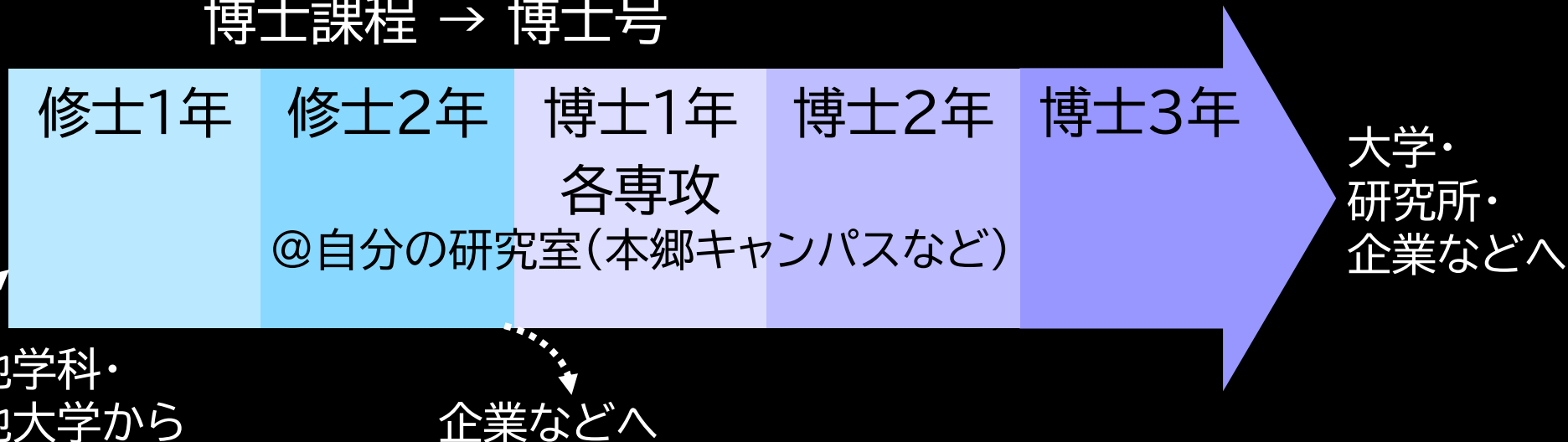
Join at
slido.com
#3653 099



大学(学部) → 学士号



大学院 修士課程 → 修士号
博士課程 → 博士号



東大理物とは？

Join at
slido.com
#3653 099



通称
理物(りぶつ)

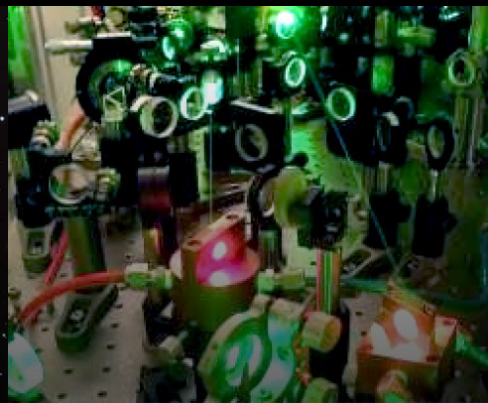
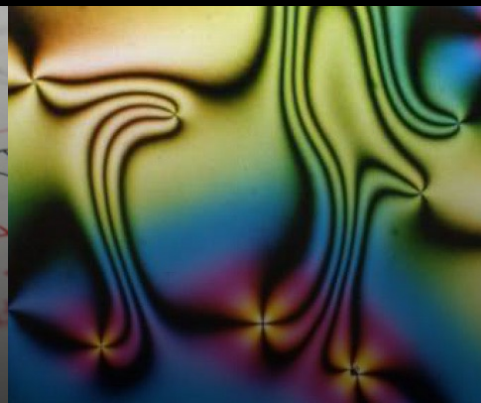
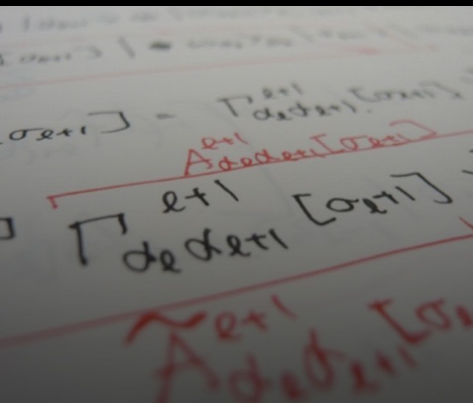
東大 理学部物理学科

1学年70人

東大 大学院理学系研究科 物理学専攻

修士課程：1学年110人

博士課程：1学年60人

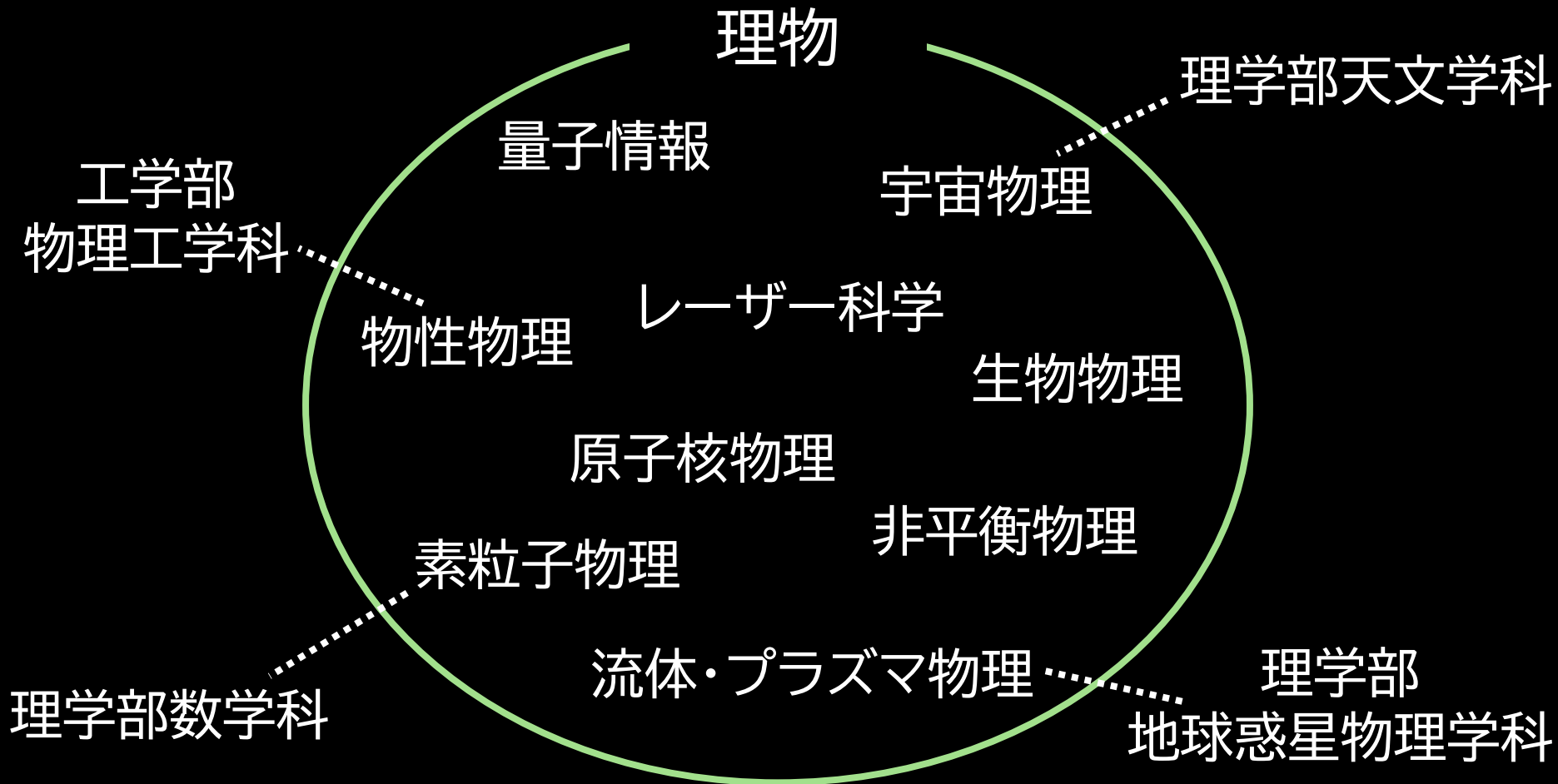


理物と他学科

Join at
slido.com
#3653 099



理物では物理に関するほぼ全ての分野を学べる



※ 私の友人が進学選択で迷ったり
大学院進学で行き来したりしていた学科

理物の授業

Join at
slido.com
#3653 099



2年後期

講義

解析力学 / 量子力学 /
電磁気学 / 物理数学

演習

3年前期

統計力学 /
流体力学

電気回路 / 真空 /
放射線 / X線回折

プログラ
ミング

問題を
解いて
黒板で
発表

実験

3年後期

固体物理学 /
生物物理学

分光 / 電子回折 /
相転移 / 原子核散乱

論文
読み

4年前期

一般相対論 /
場の量子論

研究室配属 (半年×2回)

実験 / 理論

4年後期

プラズマ /
非平衡物理学

物性 / 宇宙 / 素粒子 / 原子核 /
生物物理 / レーザー / プラズマ

理物の授業

Join at
slido.com
#3653 099



2年後期

講義

解析力学 / 量子力学 /
電磁気学 / 物理数学

演習

問題を
解いて
黒板で
発表

2年後期の時間割(私の例)

	月	火	水	木	金
1					
2	電磁気学	物理 実験学		物理数学	地球惑星 物理学
	昼休み				
3	量子力学	演習		物理数学	
4					
5	教職	天文地学 概論		演習	教

4年後期

非平衡物理学

生物物理 / レー



理物の授業

Join at
slido.com
#3653 099



2年後期

講義

解析力学 / 量子力学 /
電磁気学 / 物理数学

演習

3年前期

統計力学 /
流体力学

電気回路 / 真空 /
放射線 / X線回折

プログラ
ミング

問題を
解いて
黒板で
発表

3年前期の時間割(私の例)

3年後期

	月	火	水	木	金
1	地球流体力学	応用数学	現代実験学	宇宙空間物理学	代数学
2	電磁気学	量子力学	プログラミング	統計力学	流体力学
	昼休み				
3	実験 (隔週)	演習	実験 (隔週)	実験 (隔週)	演習
4					
5					

4年後期

理物

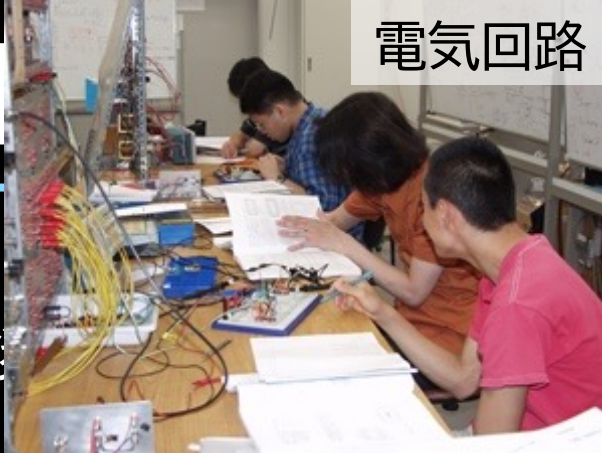
電気回路

真空

Join at
slido.com
#3653 099



2年後



演習

3年前期

統計力学 /
流体力学

電気回路 / 真空 /
放射線 / X線回折

プログラ
ミング

問題を
解いて
黒板で
発表

実験

3年後期

固体物理学 /
生物物理学

分光 / 電子回折 /
相転移 / 原子核散乱

論文
読み

4年前期

一般相対論
場の量子論

分光

(半年×2回)

4年後期

プラズマ
非平衡物理



素粒子 / 原子核 /
レーザー / プラズマ

4年前期の時間割(私の例)

	月	火	水	木	金
1					プラズマ物理学
2	一般相対論	場の量子論			宇宙物理学
	昼休み				
3	天体物理学	研究室	研究室	研究室	
4					教職
5					

グラ
ンク

文
読み

演習

問題を解いて
 黒板で発表

4年前期

一般相対論 /
 場の量子論

4年後期

プラズマ /
 非平衡物理学

研究室配属 (半年×2回)

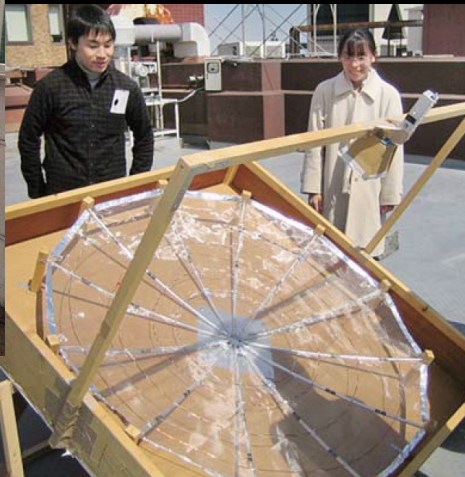
実験 / 理論

物性 / 宇宙 / 素粒子 / 原子核 /
 生物物理 / レーザー / プラズマ



五月祭

- 学部生が中心となり
大々的な学術企画を行う



ニュートン祭

- ニュートンの誕生日を祝う
理物のクリスマスパーティ
- 今年140回目を迎える



ニュートン祭の歌

- 地軸傾く冬の夜を
木枯らし吹くを他所にして
今宵暖かき此のまどひ
開かれぬニュートン祭
興ぜずや君
興ぜずや君
理学の偉業讃ふべく
理学の偉業讃ふべく
- 節面白く足踏みして
赤き林檎のまろぶ迄に
全ての分子斯くし揺らぎ
開かれぬニュートン祭
興ぜずや君
興ぜずや君
理学の偉業讃ふべく
理学の偉業讃ふべく

理物の研究機関

Join at
slido.com
#3653 099



宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設

高エネルギー
加速器研究機構

理化学研究所

駒場キャンパス

- 総合文化研究科
- 生産技術研究所

宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
宇宙科学研究所

柏キャンパス

- 物性研究所
- 宇宙線研究所
- 新領域創成科学研究科
- カブリ数物連携研究機構 (Kavli IPMU)

本郷キャンパス

- 物理学教室
- 原子核科学研究センター
- ビックバン宇宙国際研究センター
- 素粒子物理国際研究センター
- フォトンサイエンス機構
- 生物普遍性連携研究機構
- 知の物理学研究センター

理物の研究機関

Join at
slido.com
#3653 099



リガクル ©東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報委員会/教務委員会

本郷キャンパス

- 物理学教室
- 原子核科学研究センター
- ビックバン宇宙国際研究センター
- 素粒子物理国際研究センター
- フォトンサイエンス機構
- 生物普遍性連携研究機構
- 知の物理学研究センター

大学院での生活

Join at
slido.com
#3653 099



勉強

- 授業(学部よりずっと少ない)
- 本・論文
- 研究室セミナー

研究

- 机に向かって計算・解析
- 実験室でものづくり・測定
- 研究室ミーティングで議論
- 大きな実験施設への出張

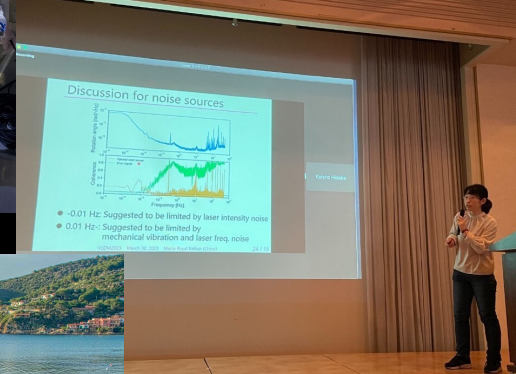
発表

- 国内外の学会
- 論文執筆

安東研究室
集合写真



重力波望遠鏡
KAGRA@岐阜県



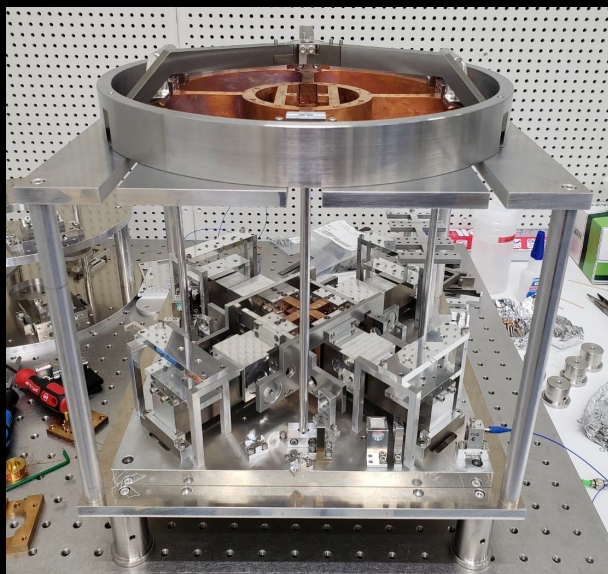
学会発表
@長野県

学会 集合写真
@イタリア エルバ島

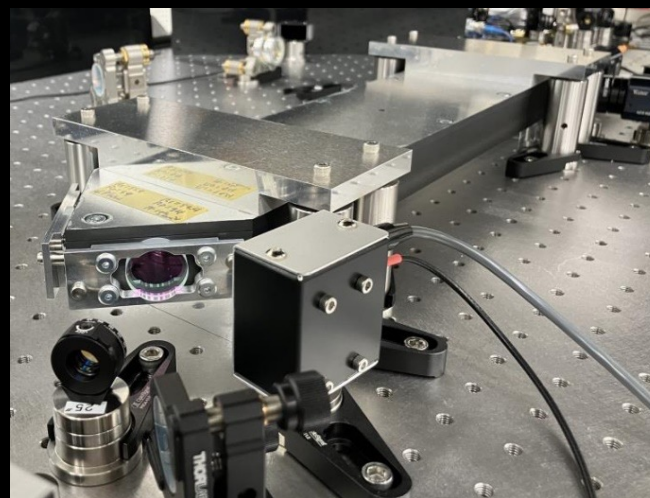


宇宙物理実験：
宇宙の謎を解明するために精密な装置を作って測定する

ねじれ振り子を使った
低周波重力波望遠鏡の開発



光共振器を使った
アクシオンダークマターの
探索実験



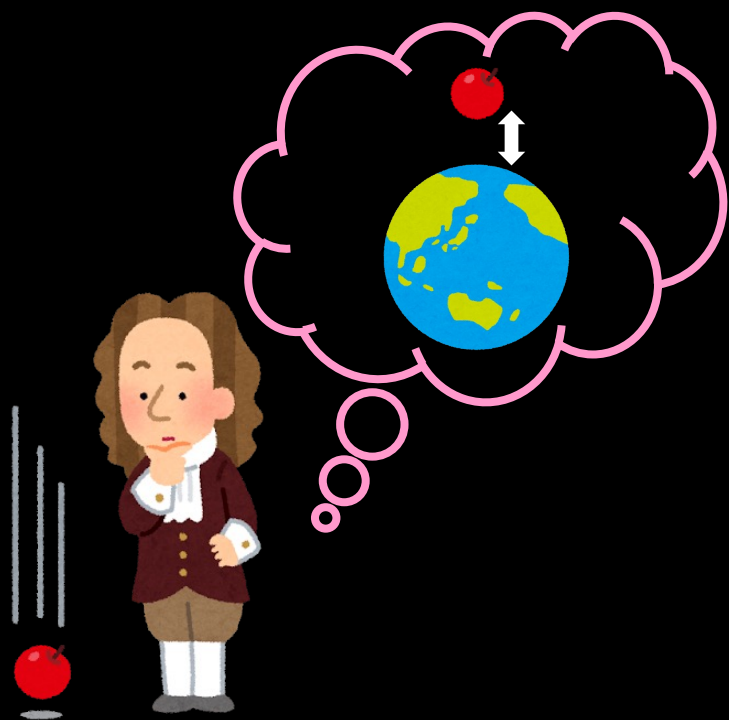
一般相対性理論における重力

Join at
slido.com
#3653 099



1665年 ニュートン
万有引力:
万物はお互いに引き合う

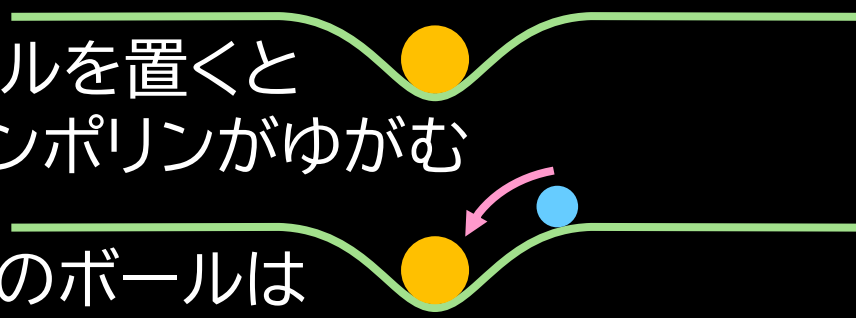
1915年 アインシュタイン
一般相対性理論:
物体があると空間がゆがむ



何もないトランポリンは平ら

ボールを置くと
トランポリンがゆがむ

近くのボールは
ゆがみに沿って引きつけられる



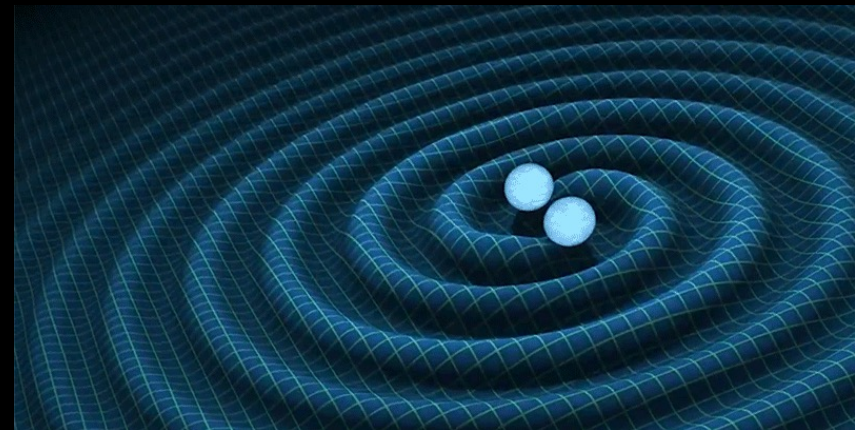
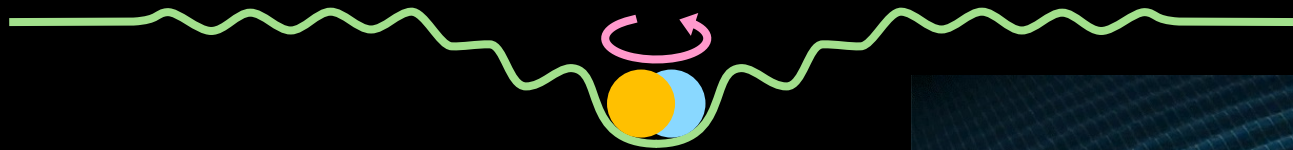
重力波

Join at
slido.com
#3653 099



物体が動くと空間のゆがみが変化する

重力波：空間のゆがみの変化が波として伝わる現象



©Caltech/JPL

重力波は何にも遮られない

→ 光では見ることができない天体現象をとらえられる

例) ブラックホール合体・超新星爆発の内部・宇宙の始まり

現在の重力波望遠鏡

Join at
slido.com
#3653 099



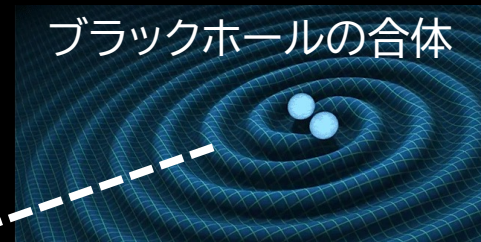
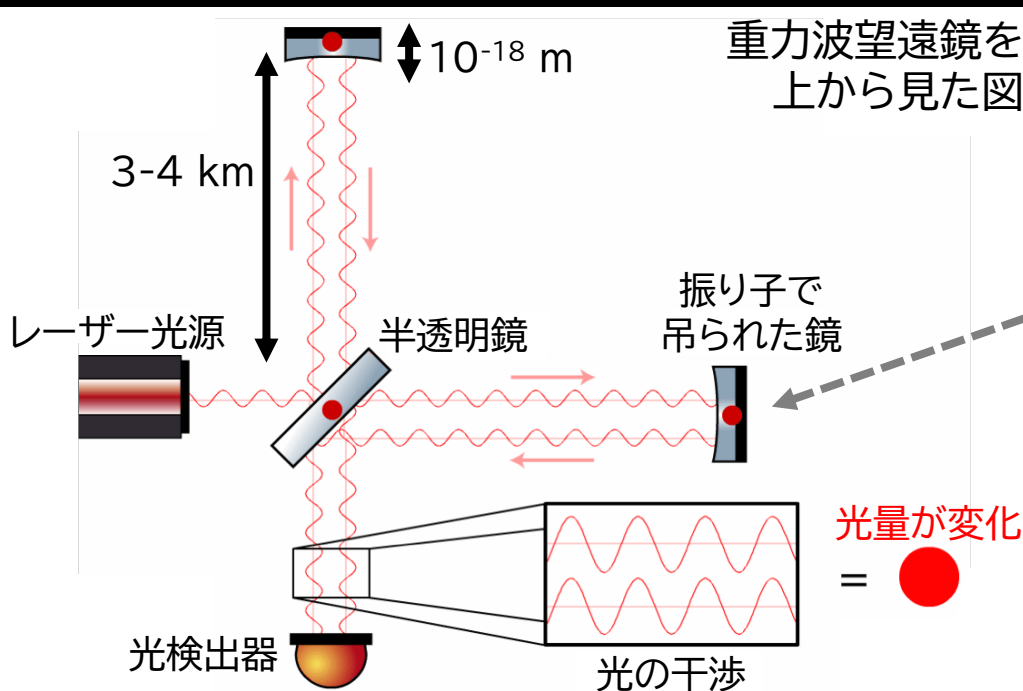
マイケルソン干渉計：鏡の動きをレーザー光の干渉で検出する

重力波信号はとても小さい

→ 鏡間の距離を長くして鏡が動く距離を大きくする

重力波以外の原因による鏡の揺れは雑音になる

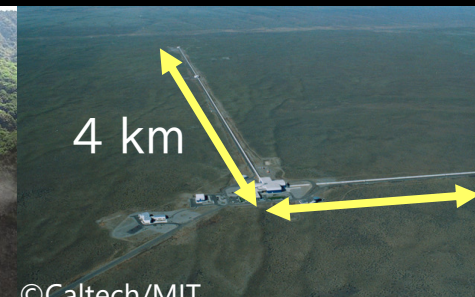
→ 鏡を振り子で吊ることで地面の揺れを防振する



KAGRA@岐阜県



LIGO@アメリカ

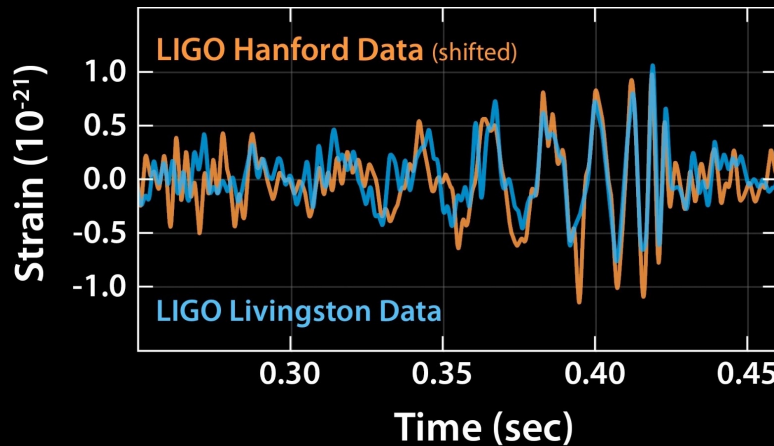


これまでの重力波観測

Join at
slido.com
#3653 099

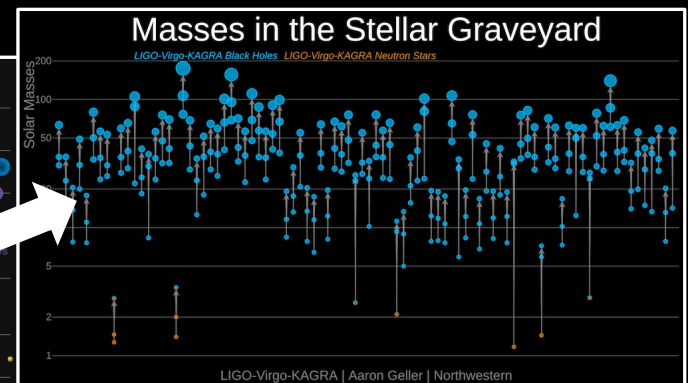
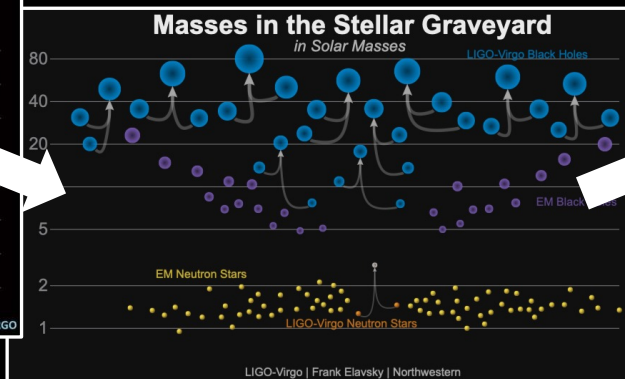
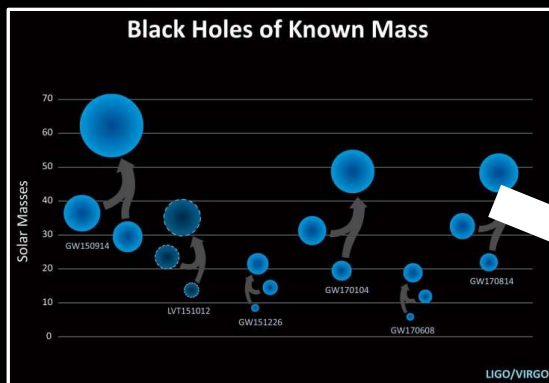


2015年 アメリカの重力波望遠鏡LIGOが初めて重力波を観測
太陽の30倍の質量のブラックホールの合体からの重力波
重力波をとらえたこと自体がものすごいこと → ノーベル賞



B. P. Abbott+, *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016)

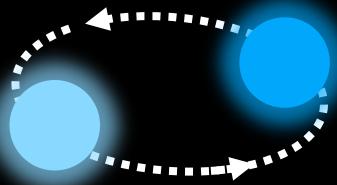
2020年までに重力波が90回観測された



超巨大ブラックホール形成の謎

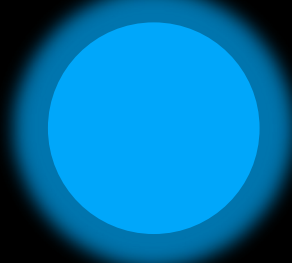
恒星質量ブラックホール

- 太陽の質量の10倍-100倍
- 重力波で観測された



超巨大ブラックホール

- 太陽の質量の100万倍以上
- 電波で観測された



©EHT Collaboration

楕円銀河M87の中心に位置する
太陽の65億倍の質量のブラックホール

Join at
[slido.com](https://www.slido.com)
#3653 099



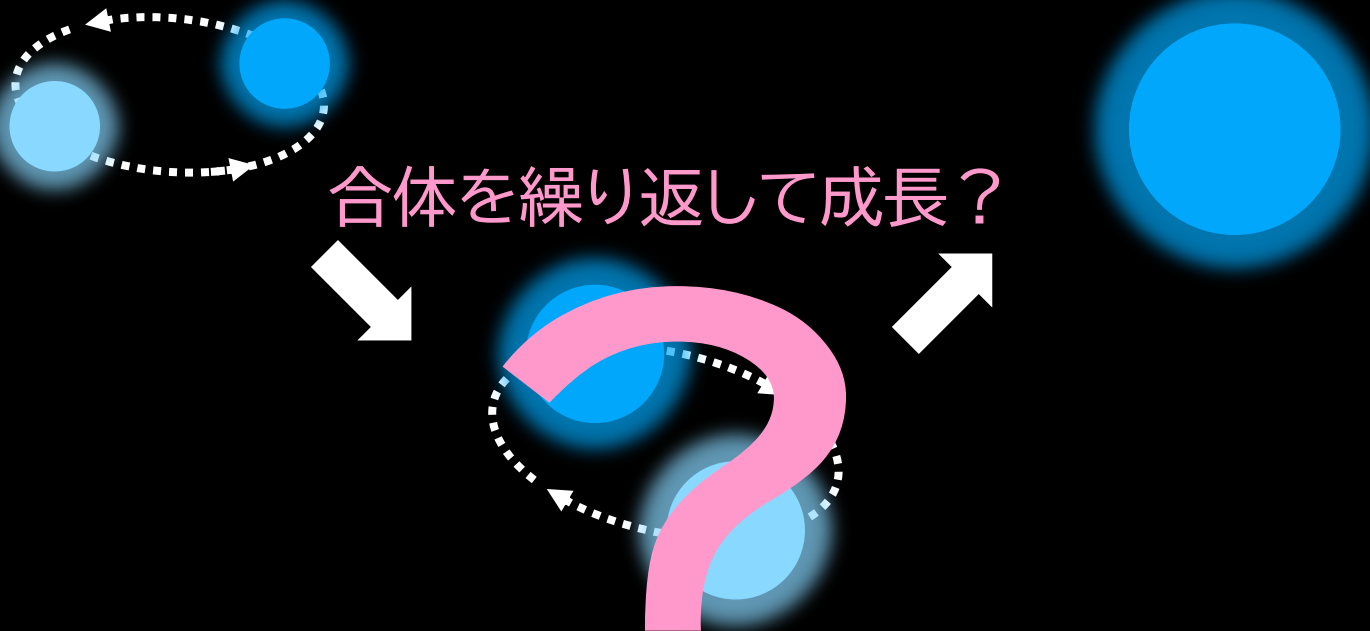
超巨大ブラックホール形成の謎

恒星質量ブラックホール

- 太陽の質量の10倍-100倍
- 重力波で観測された

超巨大ブラックホール

- 太陽の質量の100万倍以上
- 電波で観測された



中間質量ブラックホール

- 太陽の質量の1000倍-10万倍
- ほとんど見つかっていない

Join at
[slido.com](https://www.slido.com)
#3653 099



これからの重力波観測

Join at
slido.com
#3653 099

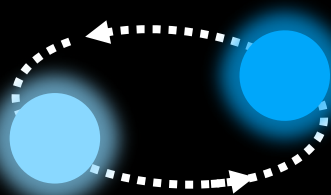


中間質量ブラックホール合体からの
低い周波数の重力波の観測を目指す

→ 低周波数の地面の揺れをどのように防振するかが課題

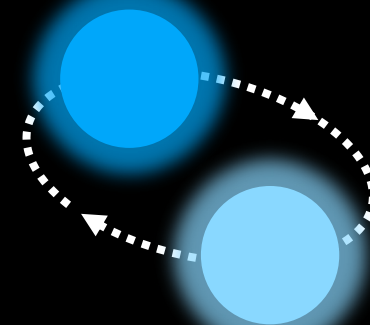
恒星質量
ブラックホール

観測成功



中間質量
ブラックホール

未観測



質量

太陽の10倍-100倍

太陽の1000倍-10万倍

重力波の周波数

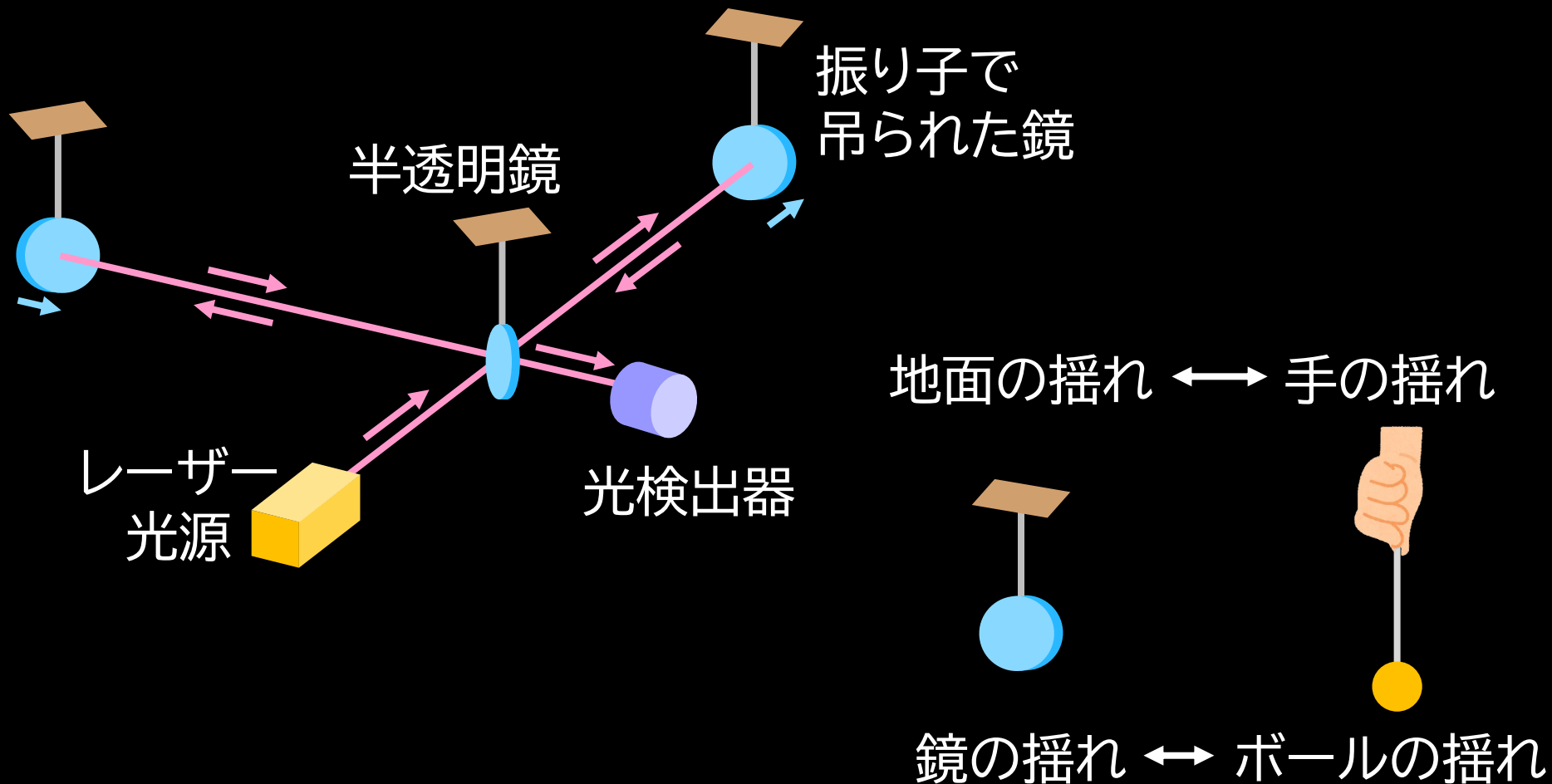
約100 Hz

約0.1 Hz

振り子で地面の揺れを防振する

LIGOやKAGRAでは振り子で鏡を吊って
高周波数での地面の揺れを防振している

Join at
slido.com
#3653 099

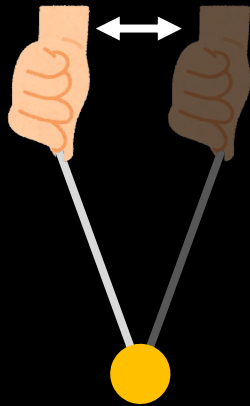


振り子の共振周波数

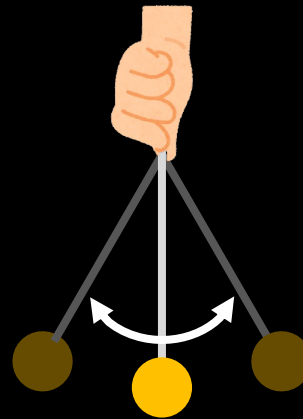
Join at
slido.com
#3653 099



地面の揺れが速い
(高い周波数)



振り子の
共振周波数



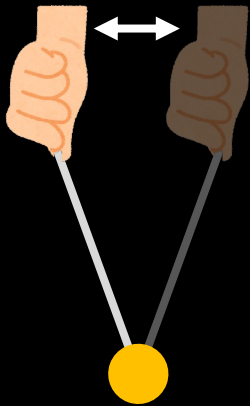
○ 鏡はほぼ揺れない
→ 防振できる

振り子の共振周波数

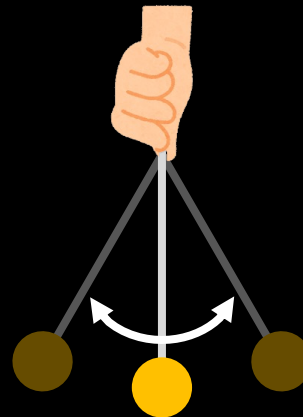
Join at
slido.com
#3653 099



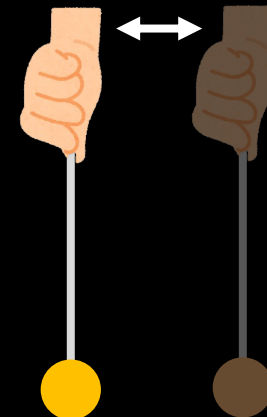
地面の揺れが速い
(高い周波数)



振り子の
共振周波数



地面の揺れがゆっくり
(低い周波数)



○ 鏡はほぼ揺れない
→ 防振できる

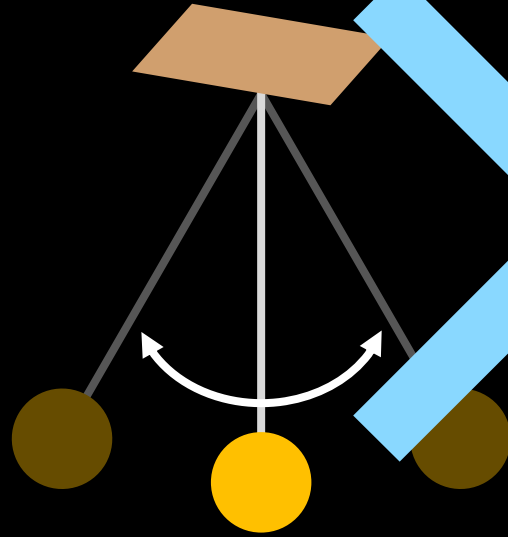
✗ 鏡は大きく揺れる
→ 防振できない

低周波数の防振には振り子の共振周波数を低くすることが必要

普通の振り子 vs. ねじれ振り子

糸を長くすれば共振周波数を低くできる

Join at
slido.com
#3653 099



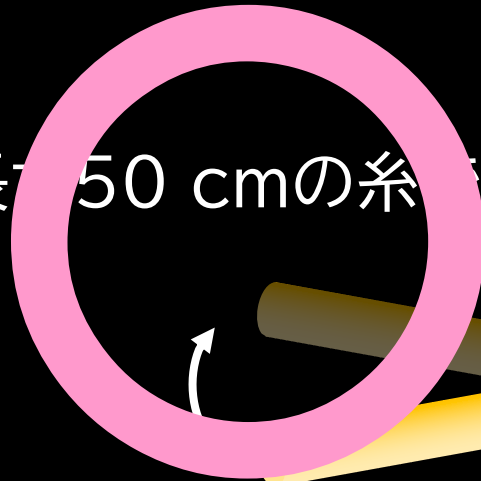
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

糸の長さ25 cmのとき1 Hz

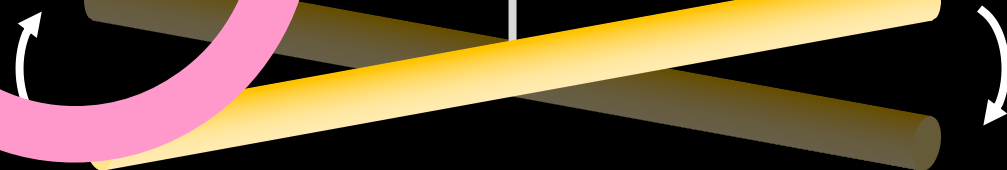
0.01 Hzまで低くしたい

→ 糸の長さ2.5 km !

長さ30 cmの棒と長さ50 cmの糸
共振周波数0.01 Hz



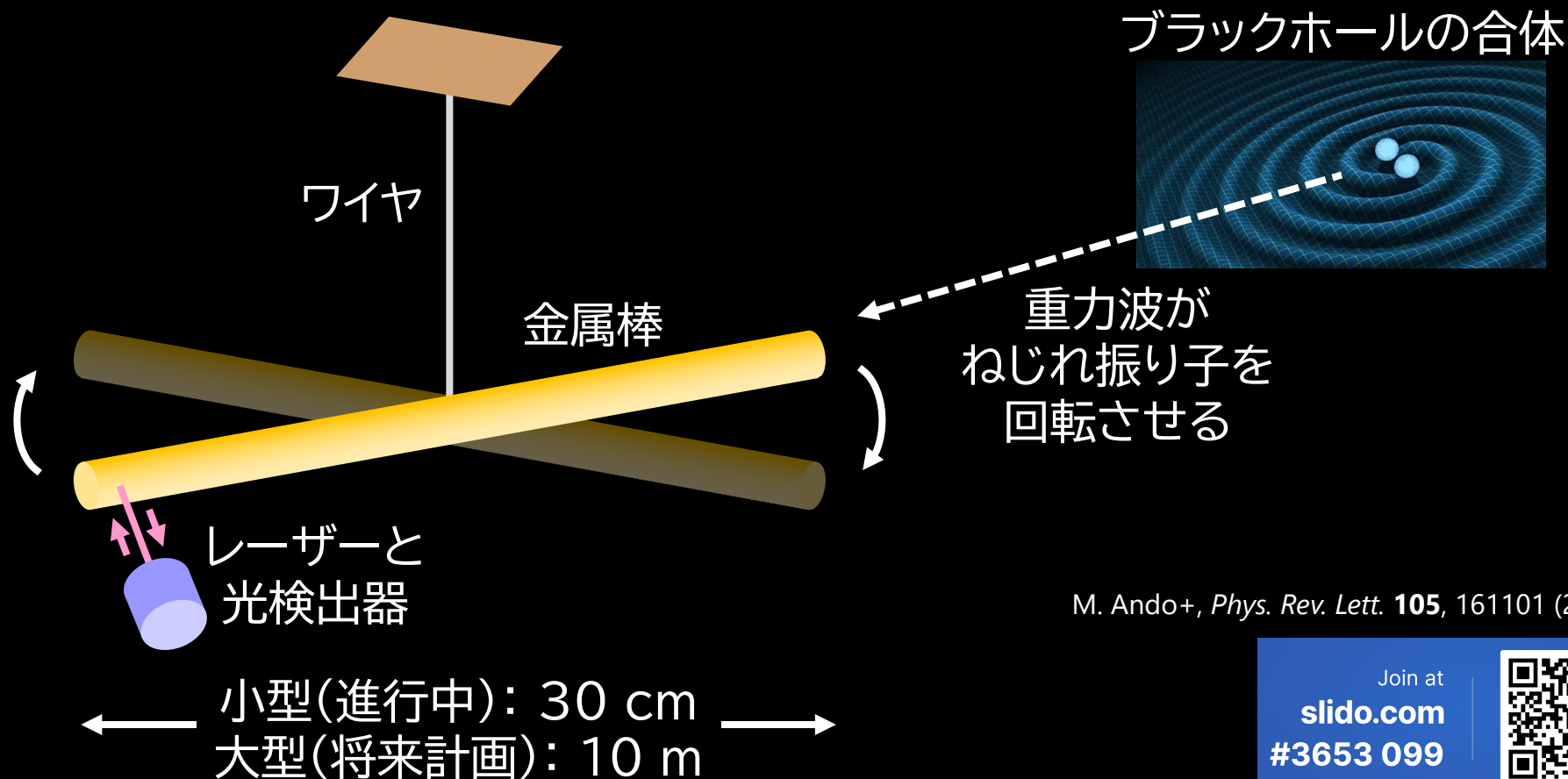
ねじれ振り子



ねじれ振り子を使った低周波重力波望遠鏡

TOBA: TOrsion-Bar Antenna

ねじれ振り子: 普通の振り子よりも低い共振周波数をもつため
低い周波数まで地面の揺れを防振できる



M. Ando+, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 161101 (2010)

Join at
[slido.com](https://www.slido.com)
#3653 099



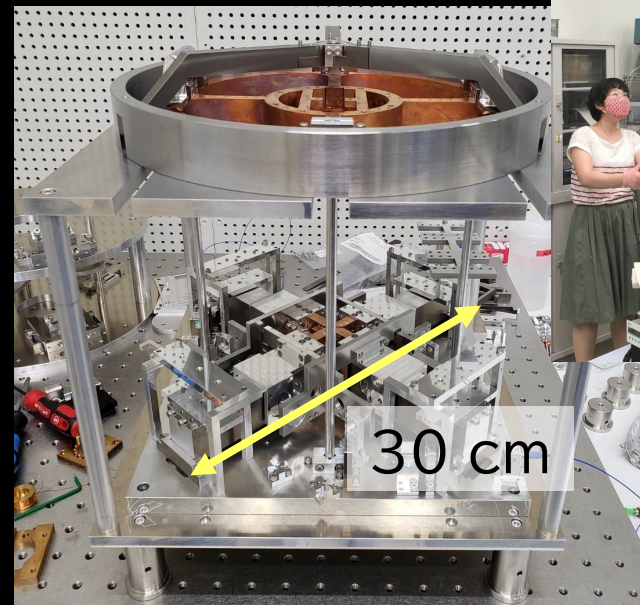
TOBA開発の現状

Join at
slido.com
#3653 099



重力波望遠鏡の開発は雑音との闘い

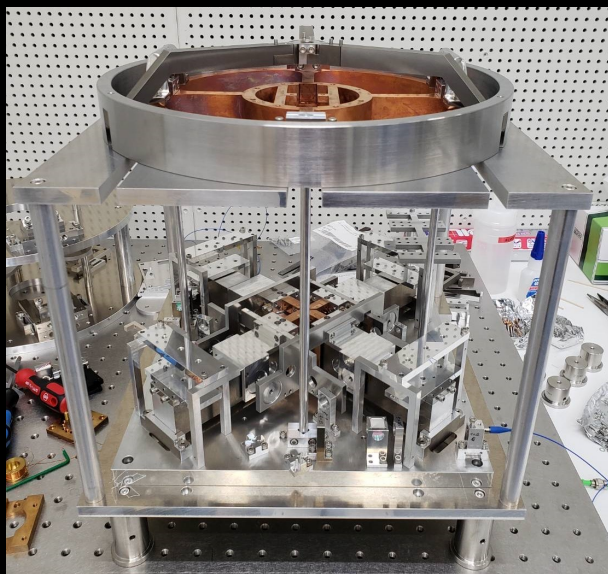
- 夜は装置が安定に稼働
- 地震で装置の運転がストップ



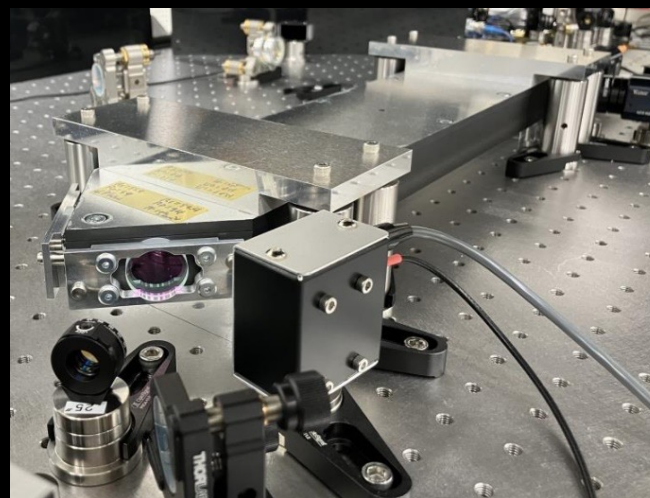


宇宙物理実験：
宇宙の謎を解明するために精密な装置を作って測定する

ねじれ振り子を使った
低周波重力波望遠鏡の開発



光共振器を使った
アクシオンダークマターの
探索実験



万物は元素でできている？



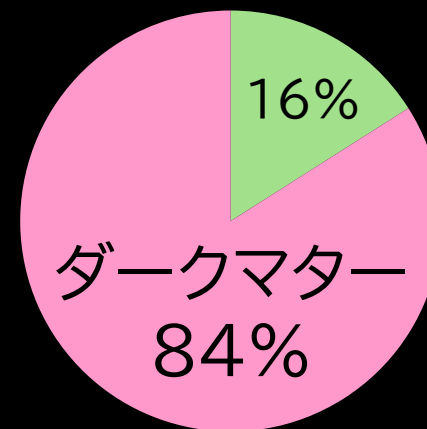
昔は or 高校の理科までは
正しい

ダークマター(暗黒物質):
正体不明の物質

元素の周期表

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89-103 Ac-Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn						
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

原子・分子でできた
ふつうの物質



宇宙の物質構成

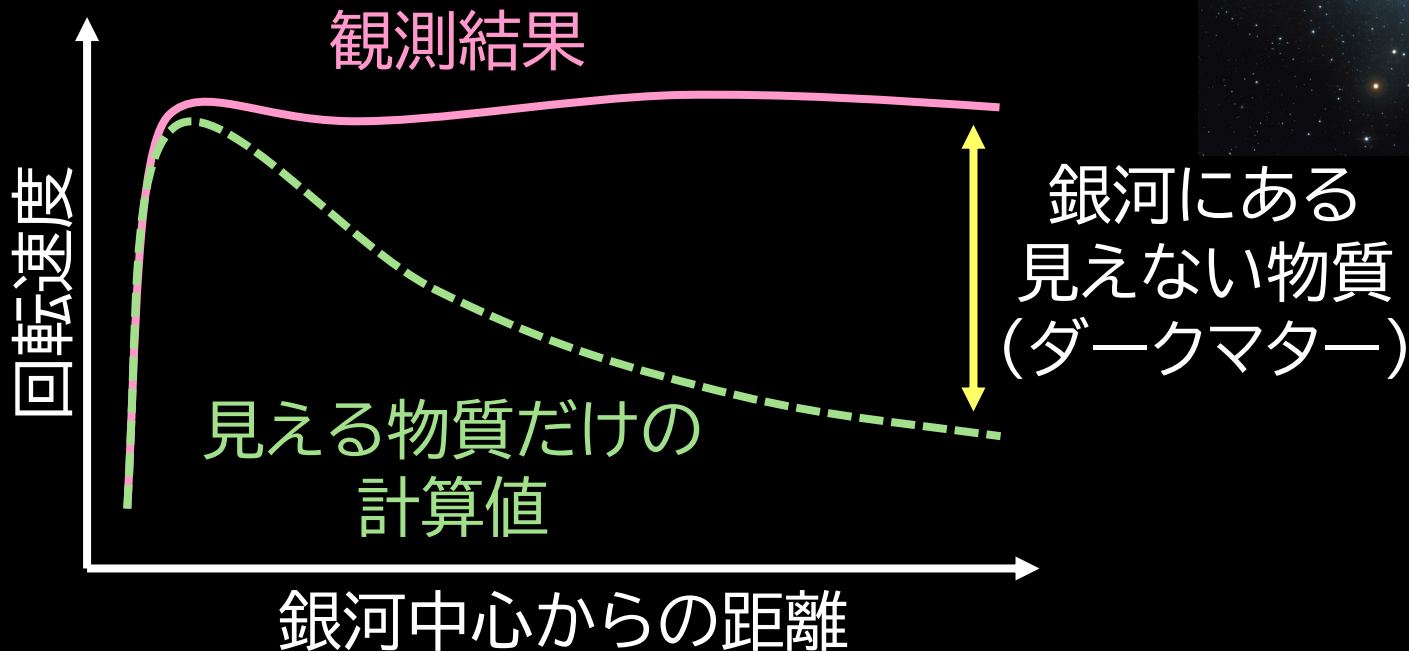
ダークマター存在の証拠

Join at
slido.com
#3653 099



銀河の回転曲線の観測結果がダークマターの存在を強く支持

銀河にダークマターが存在 = 私たちのすぐそばにも存在



©NAOJ

ダークマターの候補

Join at
slido.com
#3653 099

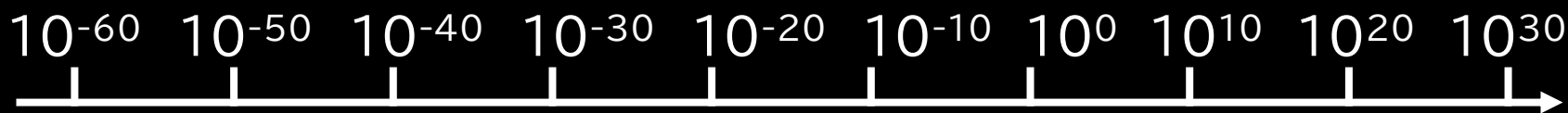


理論研究により多くのダークマターの候補が考えられた

ダークマターの条件:

電荷をもたない・壊れにくい・宇宙初期にできた など

ダークマターの質量 [kg]



軽い粒子

アクシオン など

重い粒子

WIMP など

重い物体

原始ブラックホール など

これまでのダークマター探索

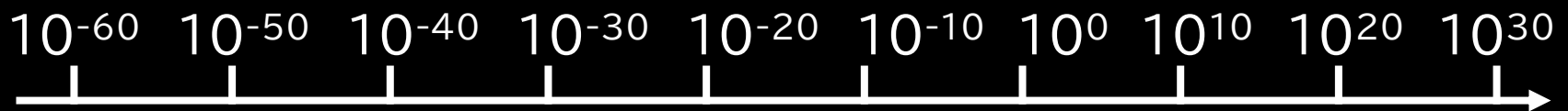
Join at
slido.com
#3653 099



最有力候補WIMPを探す多くの実験が行われたがいまだに見つかっていない

近年アクシオンが注目されている

ダークマターの質量 [kg]



軽い粒子

アクシオン など

重い粒子

WIMP など

重い物体

原始ブラックホール など

CAST

XENON

XMASS

LHC

すばる望遠鏡



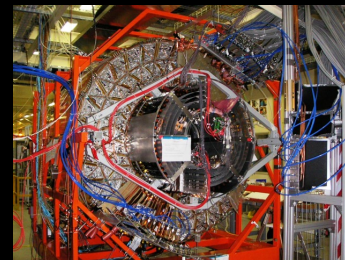
©CERN



©XENON



©ICRR



©CERN ATLAS



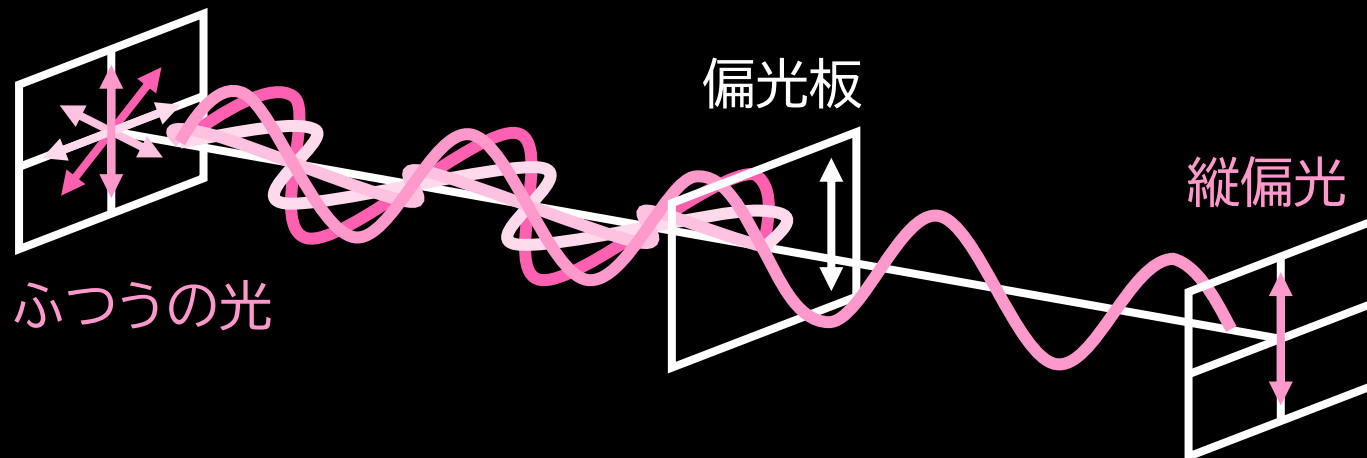
©NAOJ

アクシオンと偏光の反応

Join at
slido.com
#3653 099



偏光板を通った光は1方向にだけ振動する



パソコンの画面に偏光板を貼った様子

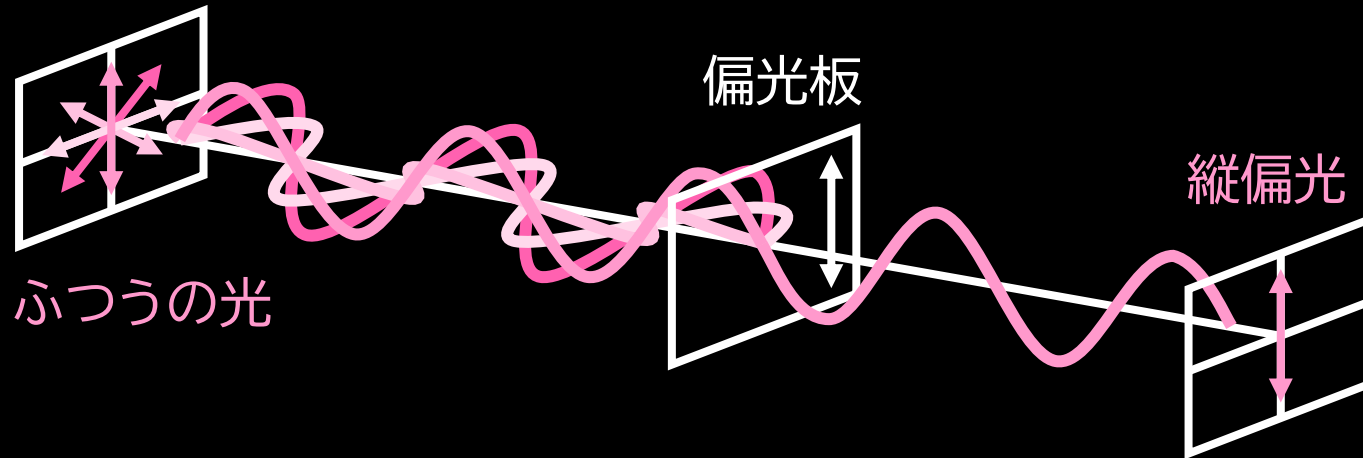


アクシオンと偏光の反応

Join at
slido.com
#3653 099



偏光板を通った光は1方向にだけ振動する

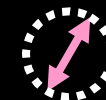
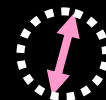
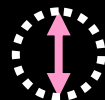


もしアクシオンがあると偏光がわずかに回転する

偏光の回転角度はとても小さい

→ 偏光を長い距離とばして検出する必要がある

レーザー光源



光検出器



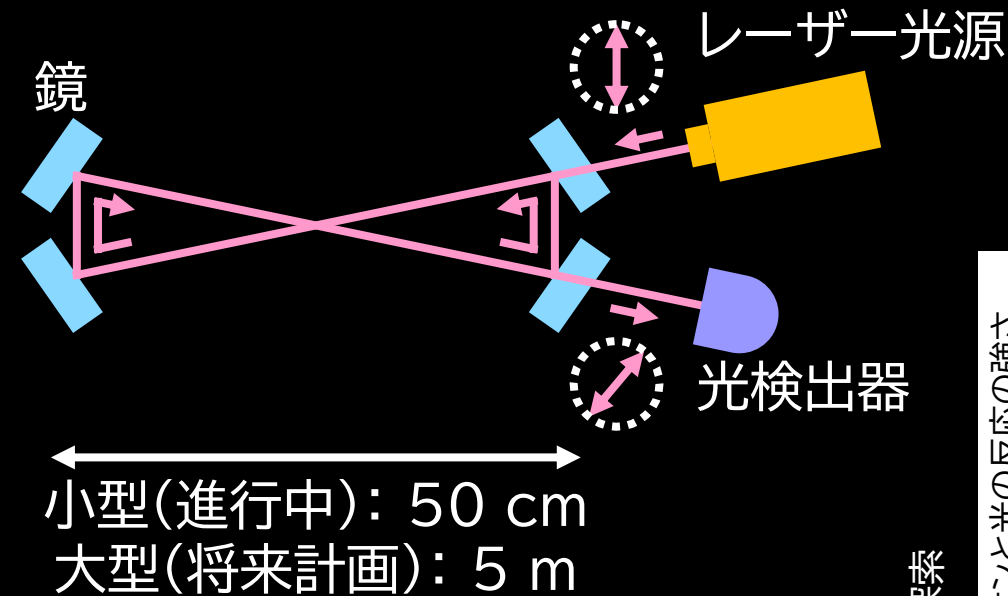
光リング共振器を使ったアクシオン探索

DANCE: Dark matter Axion search
with riNg Cavity Experiment

Join at
slido.com
#3653 099

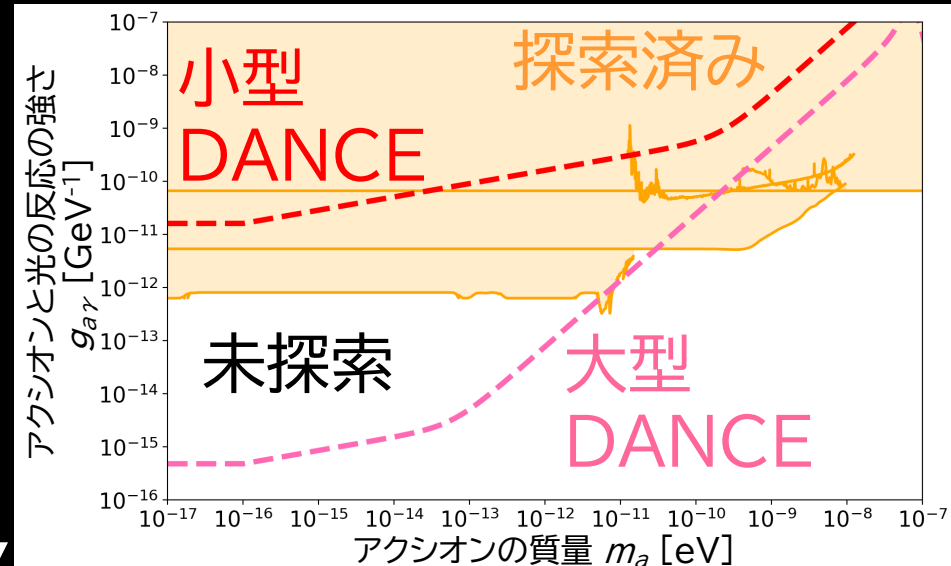


光リング共振器: 鏡の中で光を何度も周回させて
光をとばす距離を長くする



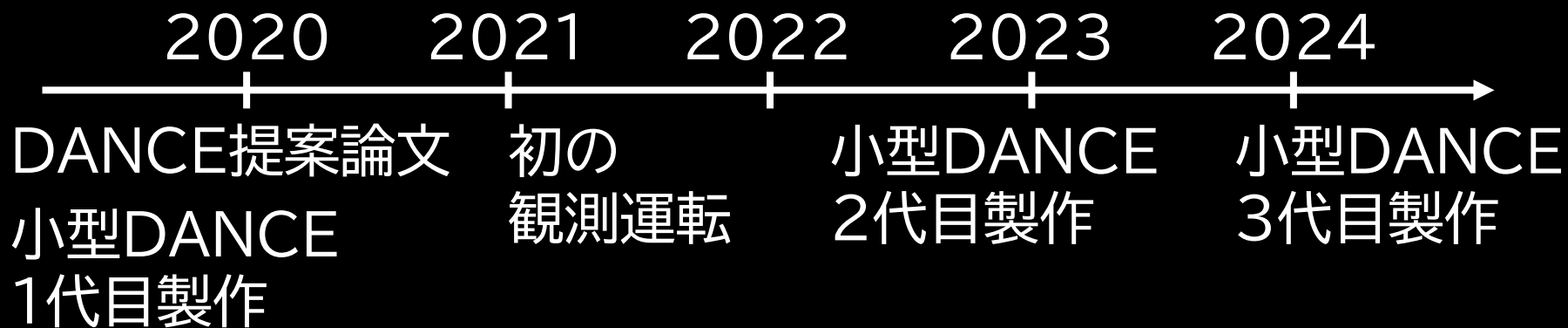
I. Obata+, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 161301 (2018)

反応が弱い
= 高感度の探索

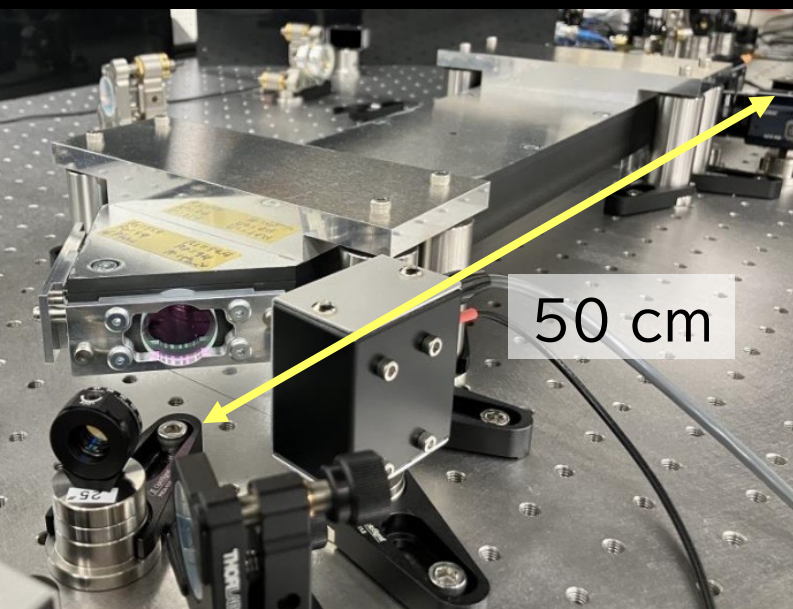


DANCE実験の現状

Join at
slido.com
#3653 099

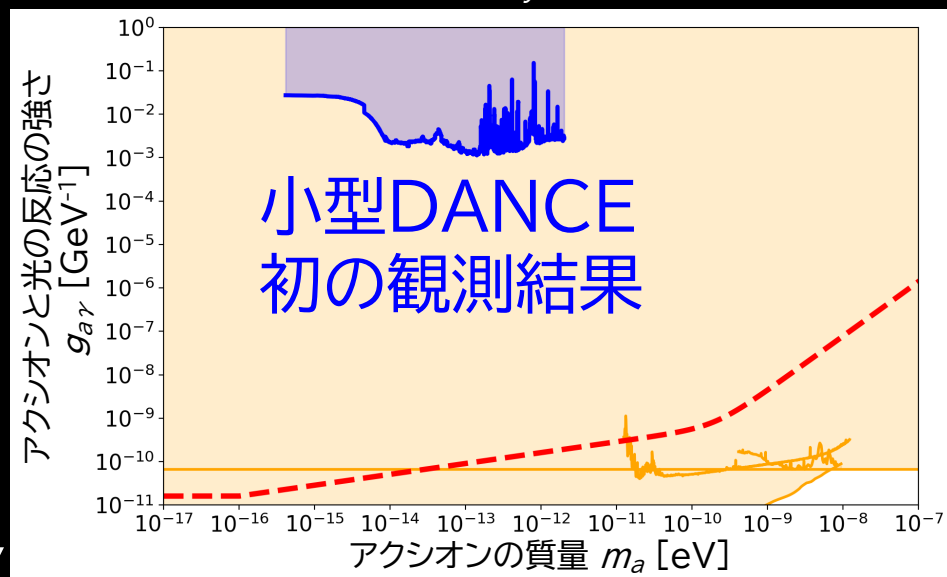


重力波望遠鏡の開発と同じく
高感度なダークマター探索には雑音の低減が必要



反応が弱い
= 高感度の探索

Y. Oshima+, *Phys. Rev. D* **108**, 072005 (2023)

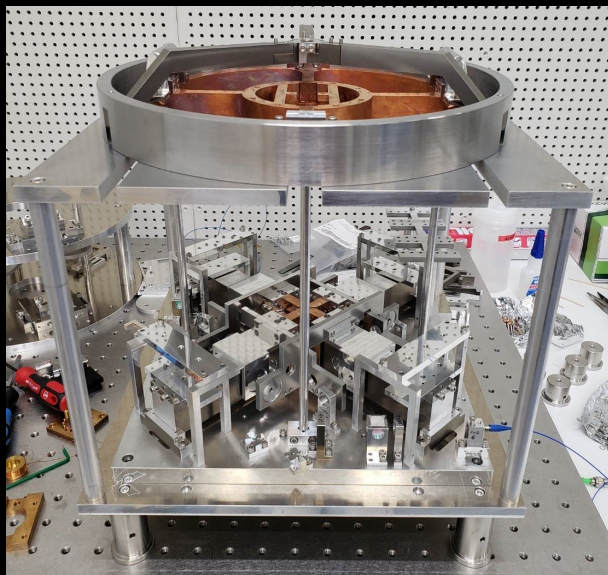




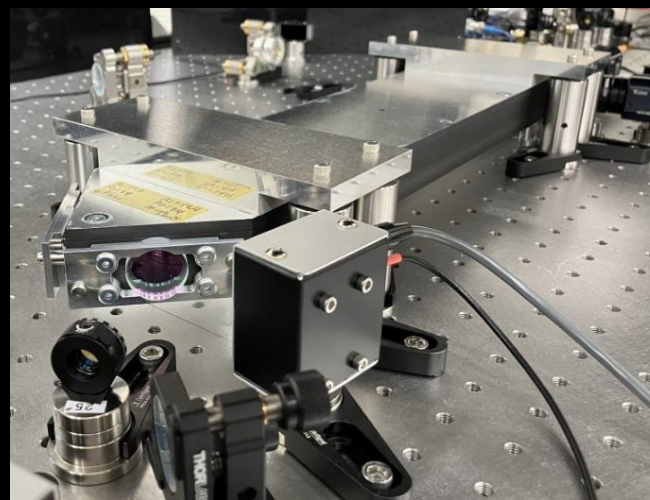
物理学科では授業や実験を通して物理を幅広く学べる
物理学専攻では様々な研究機関で最先端の研究をできる

研究紹介：宇宙の謎を解明する精密測定

ねじれ振り子を使った
低周波重力波望遠鏡の開発



光共振器を使った
アクシオンダークマターの
探索実験



質問を受け付けています

学生講演「宇宙の謎を解き明かす精密測定」

講演者：物理学専攻 博士3年 大島由佳

ファシリテーター：物理学専攻 修士1年 杉岡達哉

【質問受付時間】 2024年8月6日(火) 10:05-10:55

【質問方法は2通り】

1. YouTube概要欄にあるslidoのURLをクリックしてアクセスコード#3653099を入力
2. 右のQRコードをスマートフォンで読み取る

Join at
slido.com
#3653 099



補助スライド

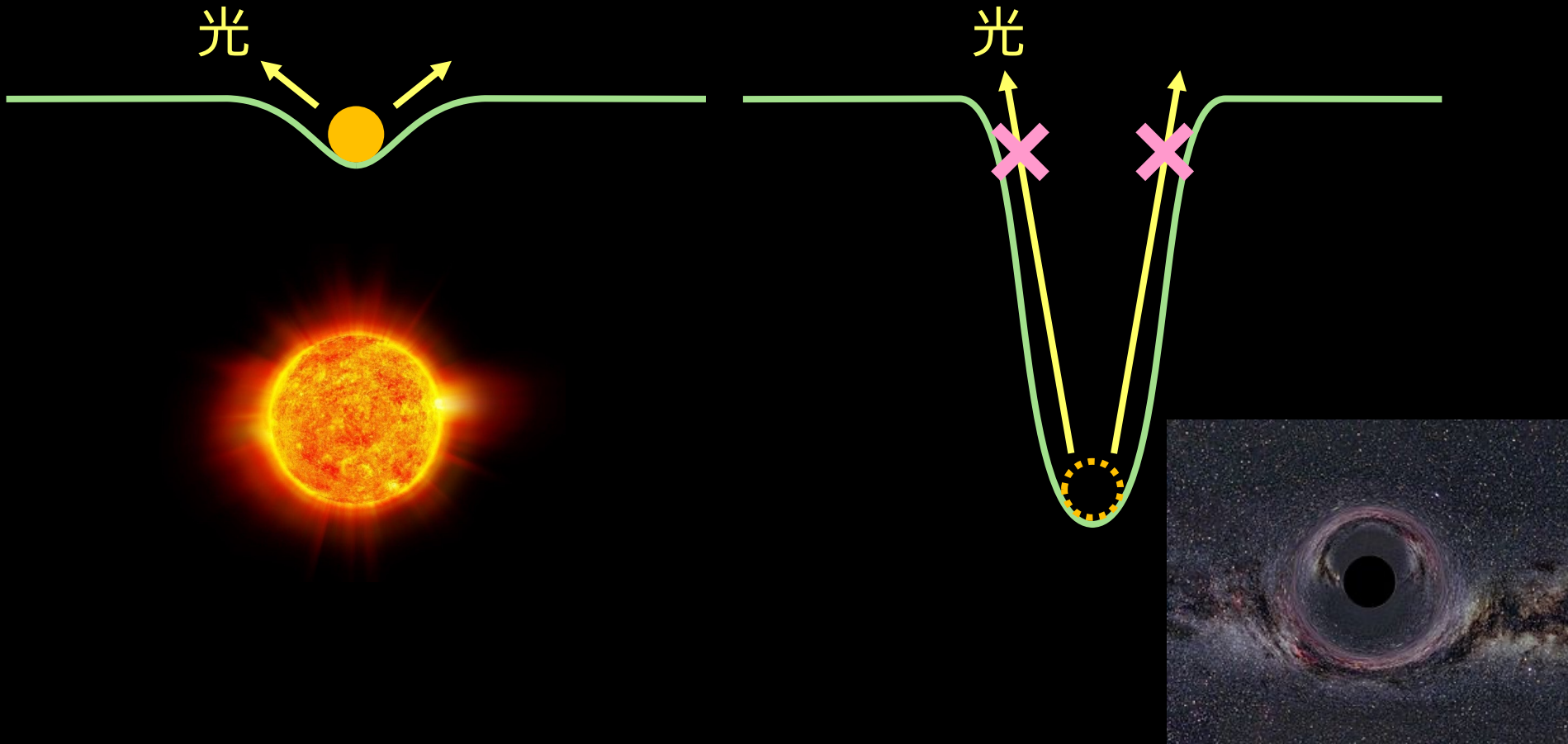
ブラックホール

Join at
slido.com
#3653 099



極端に小さく重い天体

空間が歪みすぎて光も何も脱出できない
→ 光で見ることができない



2017年 ノーベル物理学賞

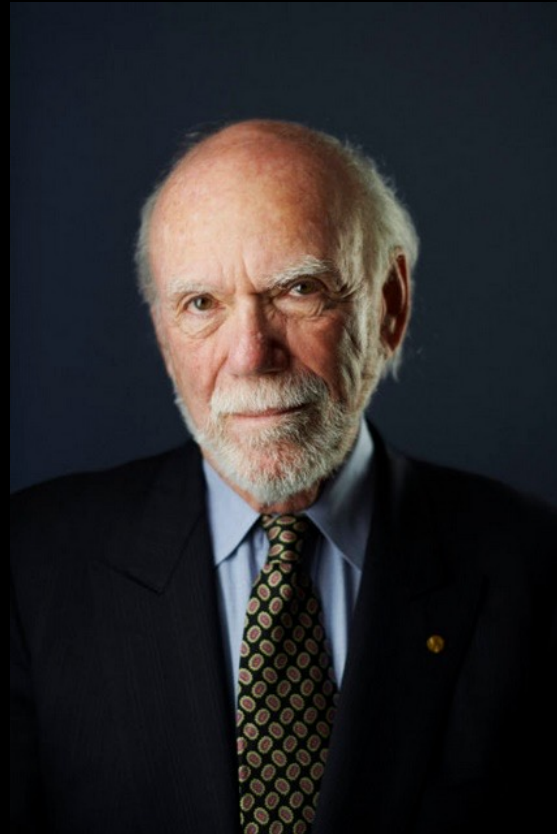
Join at
slido.com
#3653 099



LIGO検出器および重力波の観測への決定的な貢献
「重力波天文学の幕開け」



Rainer Weiss



Barry C. Barish



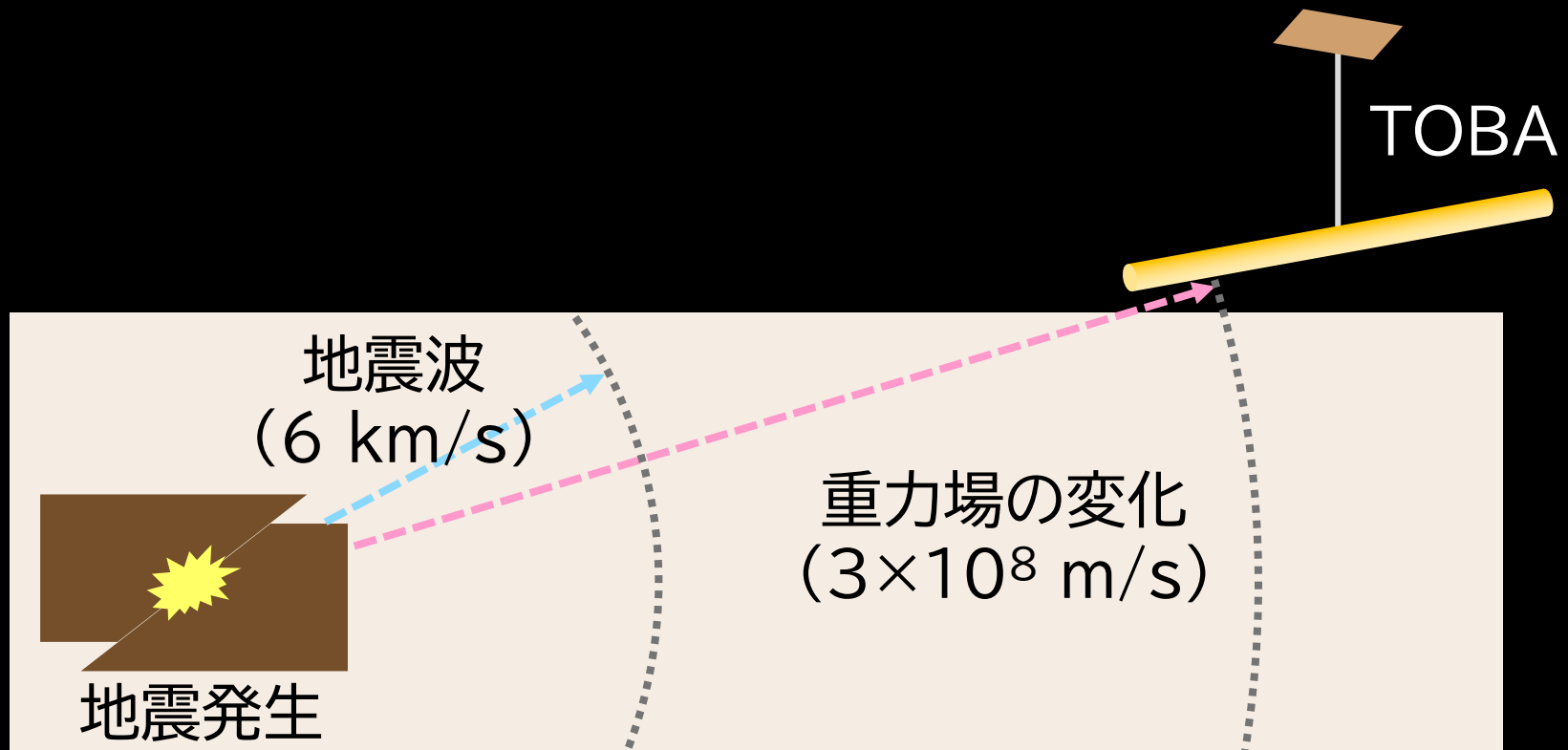
Kip S. Thorne

TOBAの地震速報への応用

Join at
slido.com
#3653 099



TOBAを使うと今よりも10秒ほど早く警報を出せる見込み

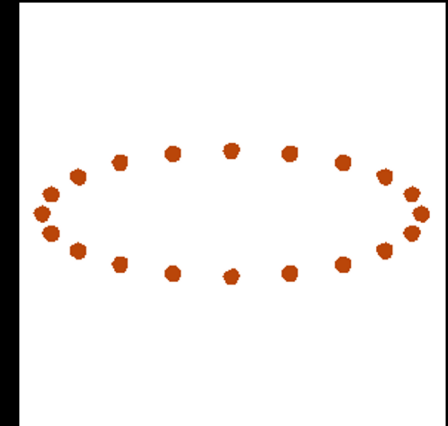
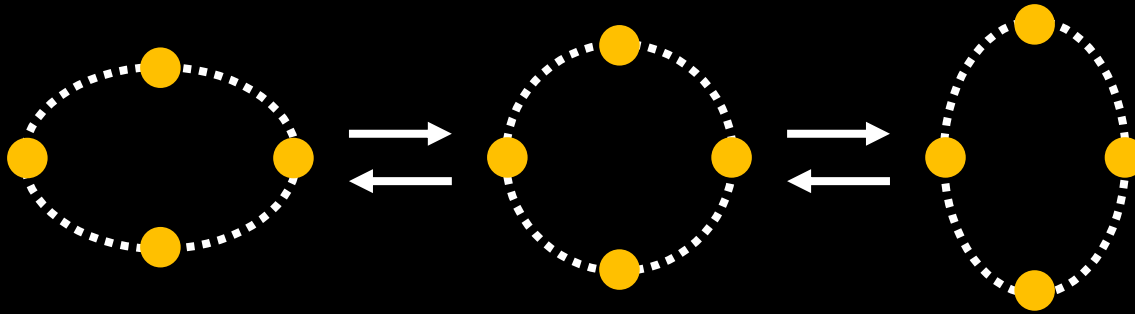


重力波望遠鏡の原理

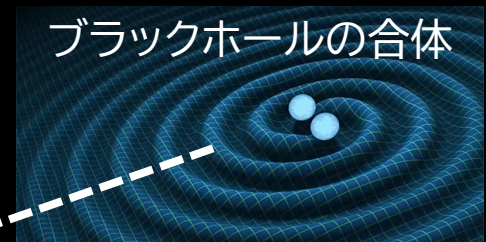
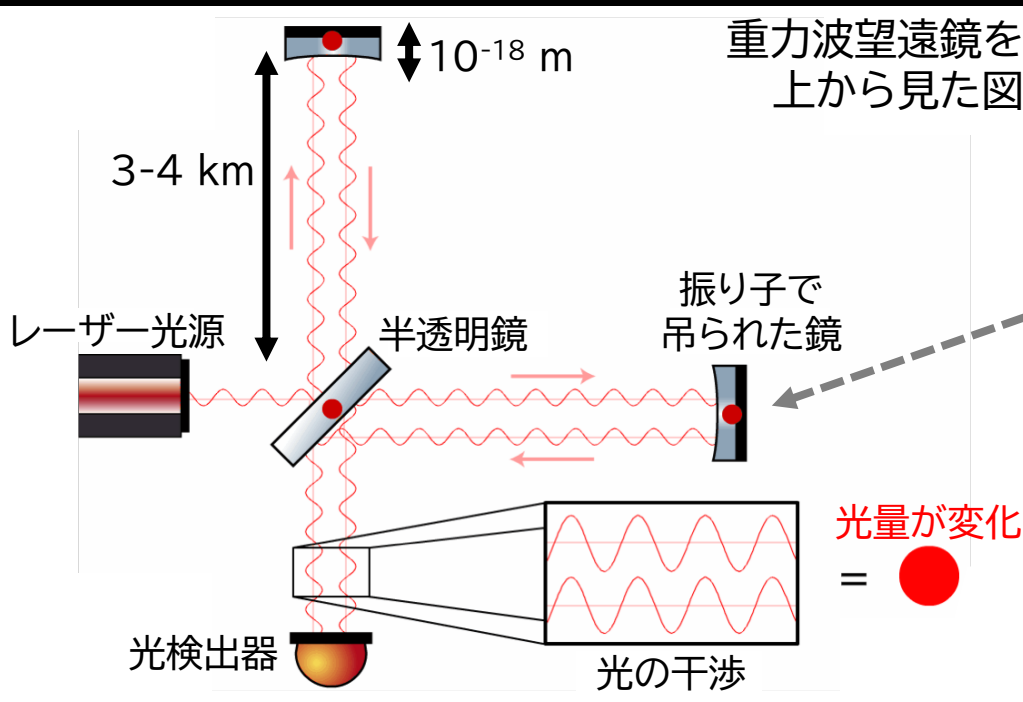
Join at
slido.com
#3653 099



重力波が来ると空間が縦横に伸び縮みする



マイケルソン干渉計：鏡の動きをレーザー光の干渉で検出する



重力波が鏡を揺らす

光量の変化
= ●

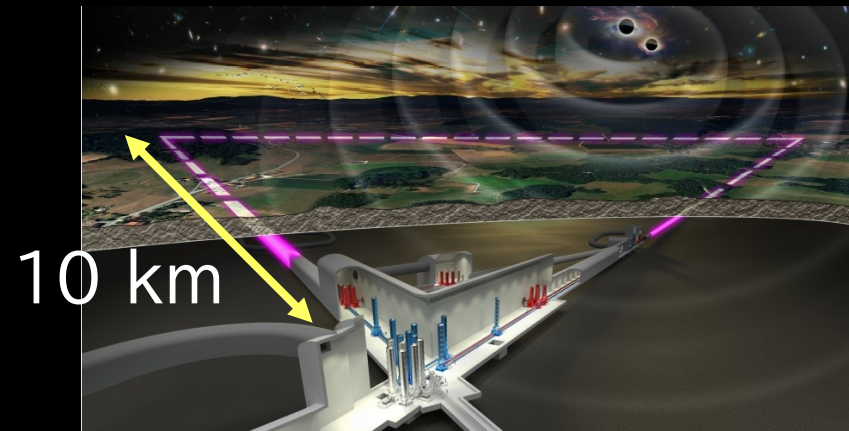
次世代の重力波望遠鏡

Join at
slido.com
#3653 099



LIGOより感度を良くする

例) Einstein Telescope・Cosmic Explorer



LIGOとは異なる周波数を観測する

例) ねじれ振り子: TOBA

例) 宇宙望遠鏡: LISA・DECIGO



重力波による空間のゆがみ量

Join at
slido.com
#3653 099



距離の変化の割合で表す

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

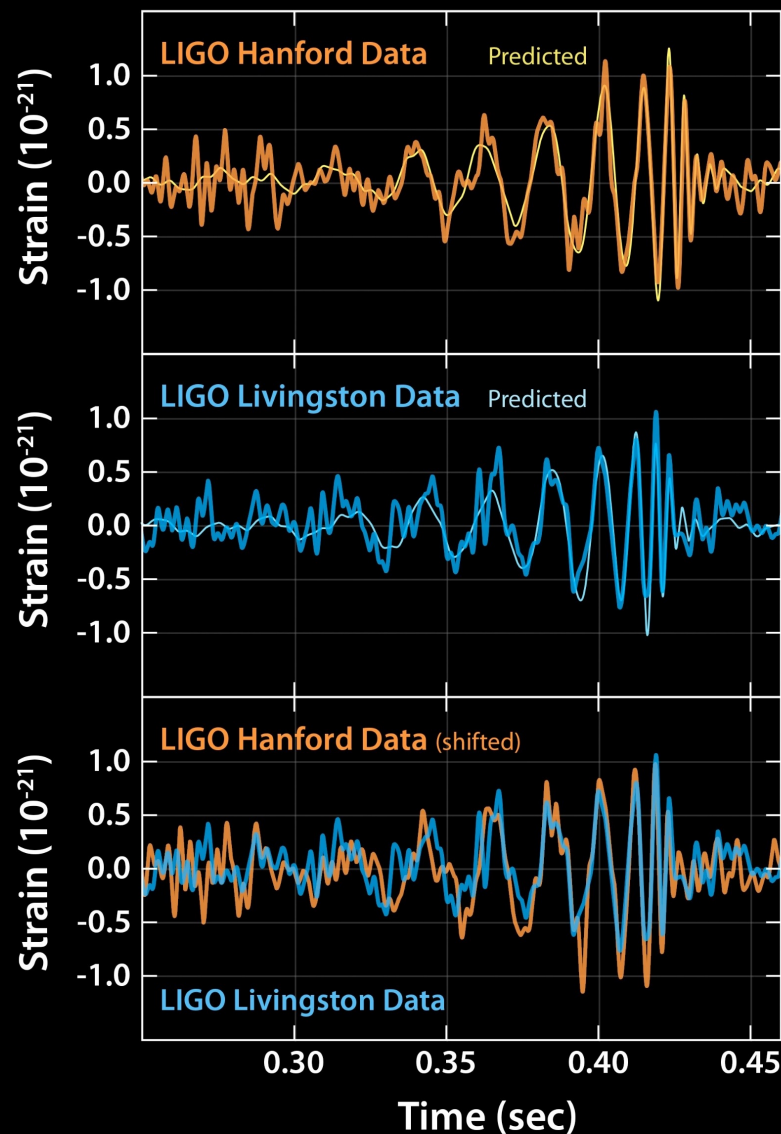
重力波による空間のゆがみ量

$$h \sim 10^{-21}$$

LIGOの場合 $L = 4 \text{ km}$ なので

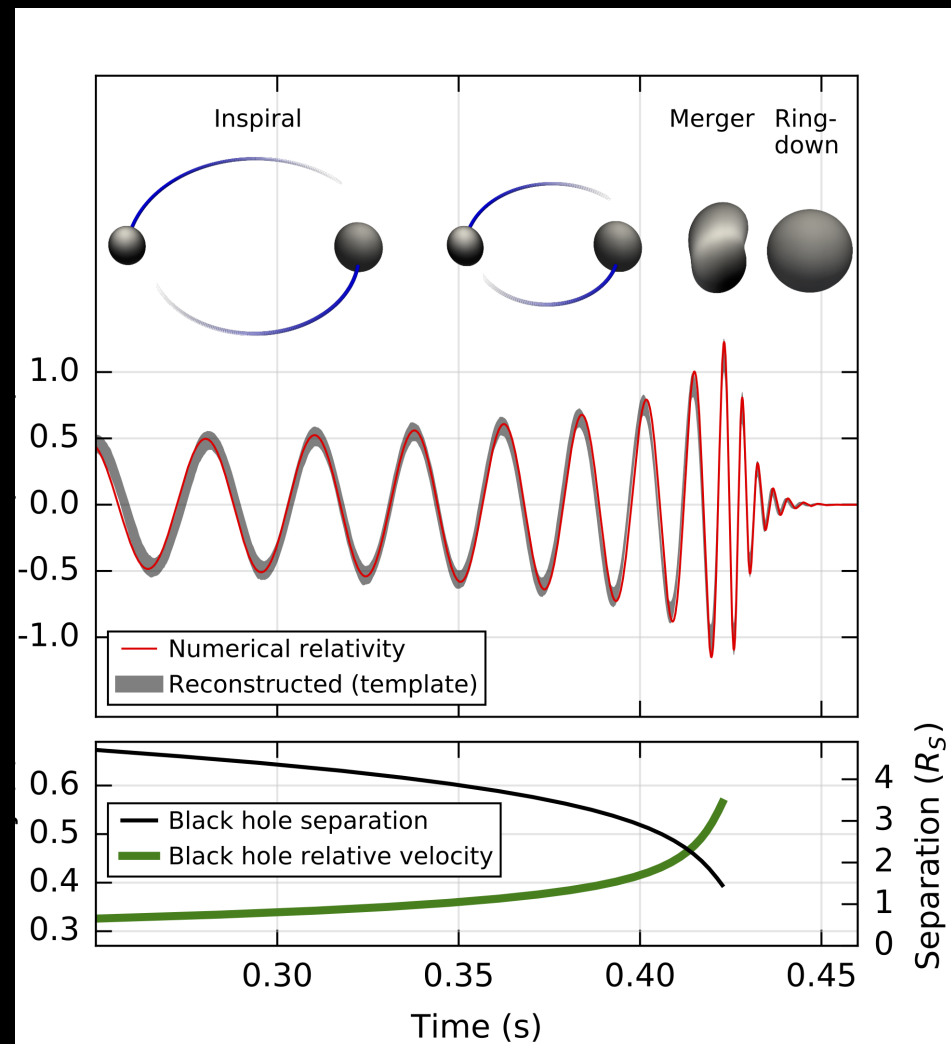
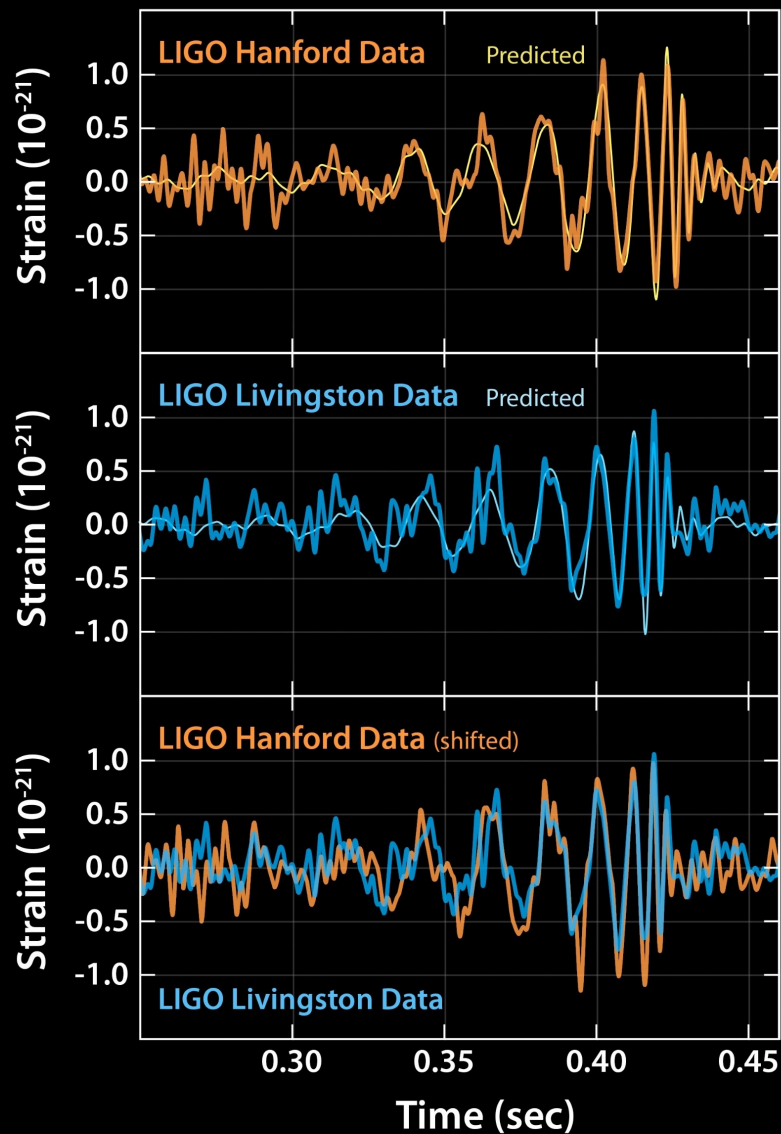
$$\delta L = 4 \times 10^{-18} \text{ m}$$

どのくらい小さな h を
検出できるかで
望遠鏡の感度が決まる



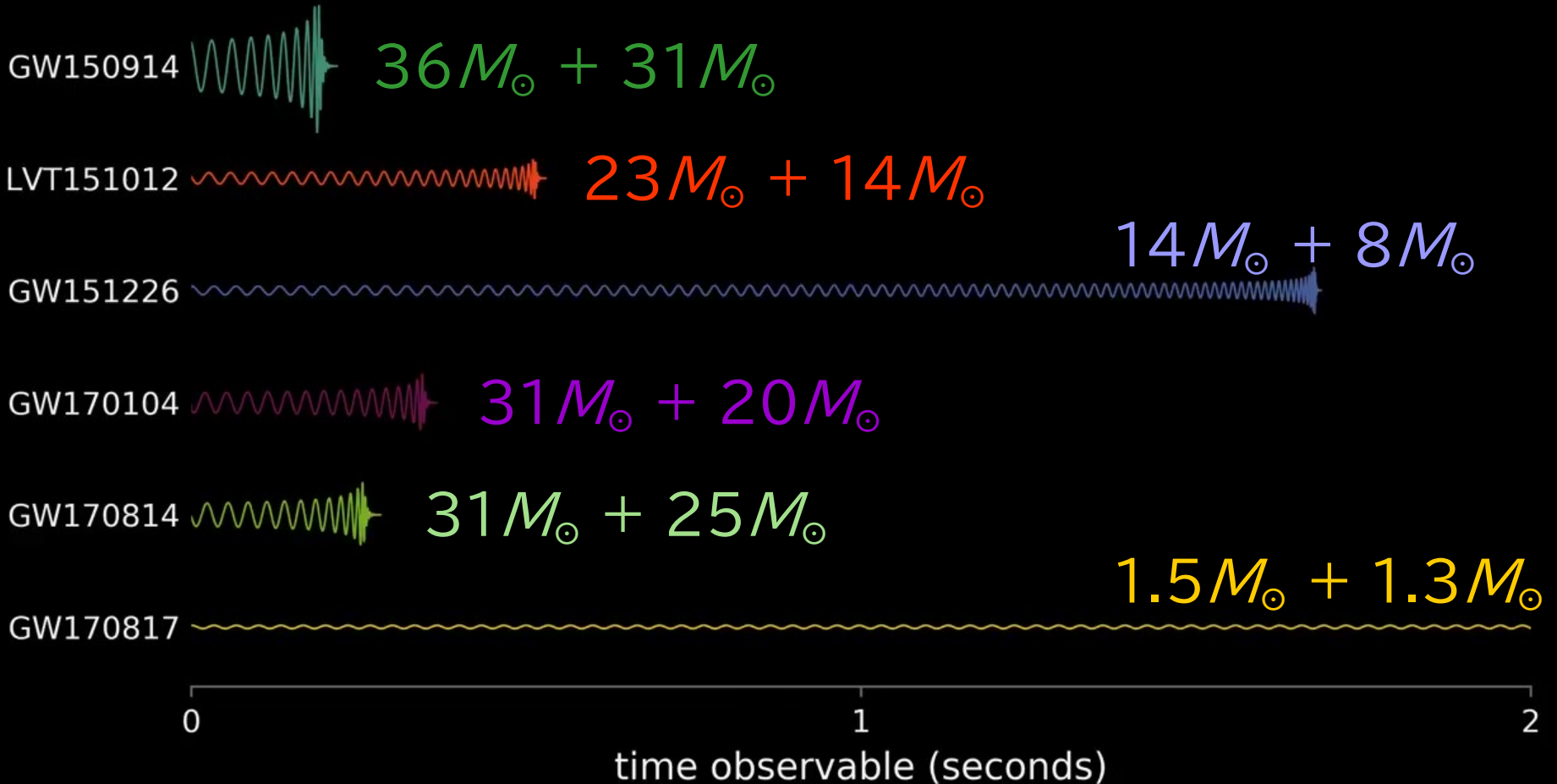
重力波の波形

Join at
slido.com
#3653 099



いろいろな重力波の波形

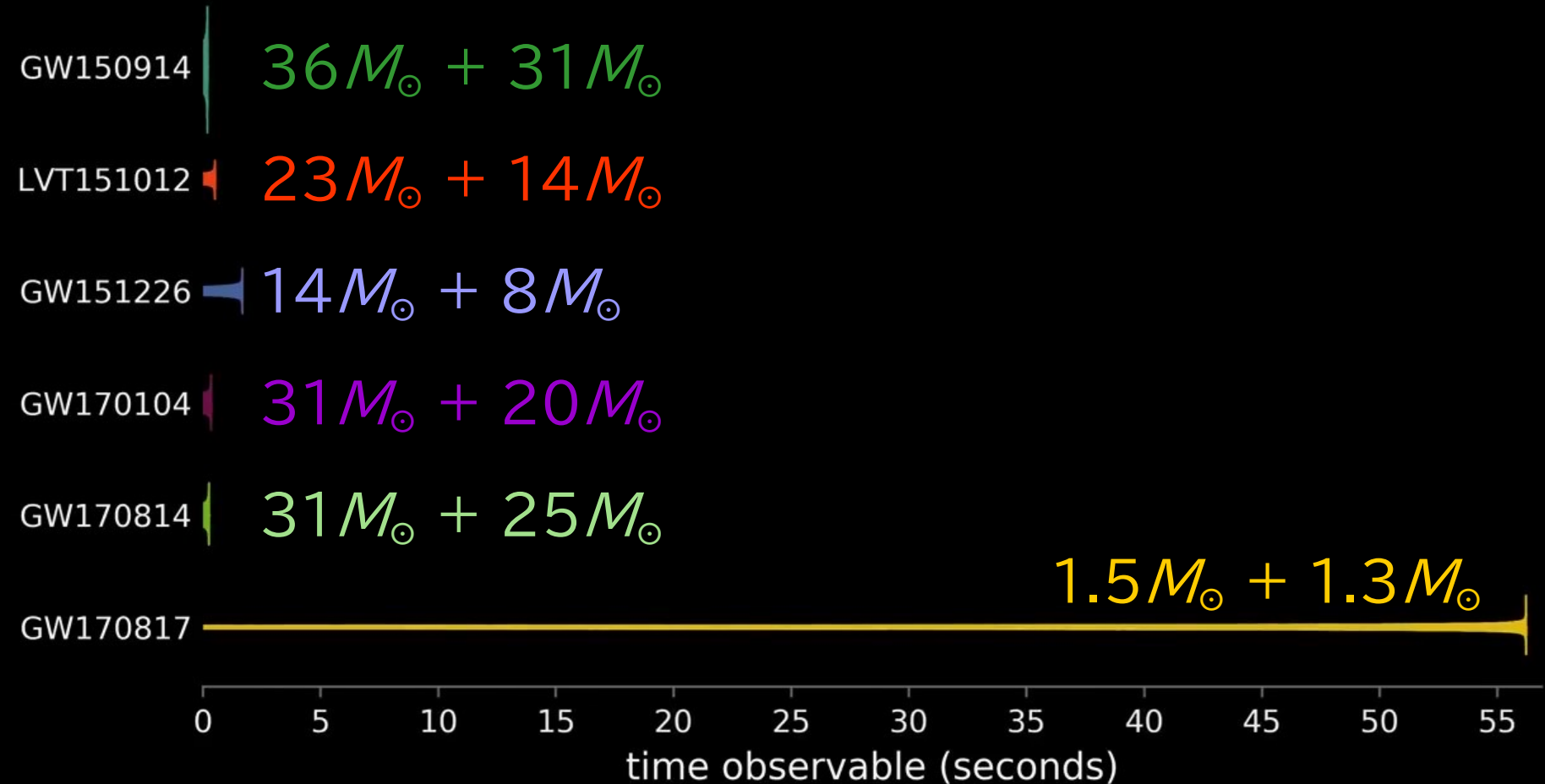
Join at
slido.com
#3653 099



LIGO/University of Oregon/Ben Farr

いろいろな重力波の波形

Join at
slido.com
#3653 099



LIGO/University of Oregon/Ben Farr