重力波・宇宙の研究最前線
-重力波望遠鏡KAGRAにて-

小坂井千紘　（国立天文台）

2019/12/18 ＠入善高校

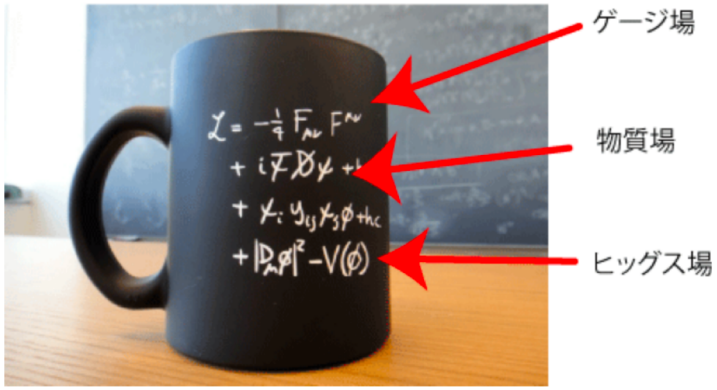
自己紹介

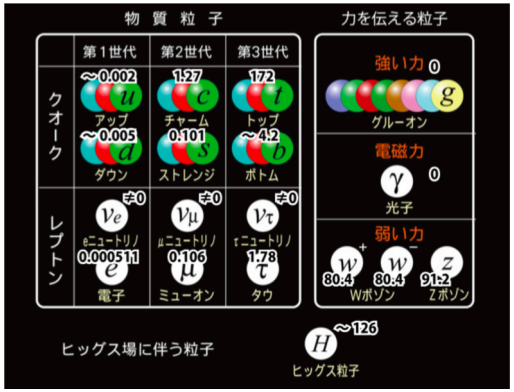
- 小坂井千紘 (こざかい　ちひろ)
  - 東京都立小石川高校出身
    - 物理の勉強は高 2 から。シャボン玉の研究などもやってました。
    - 小石川フィルハーモニーオーケストラ部所属。
  - 東京大学理科一類入学、物理学科へ進学
    - 受験勉強は高校の授業と進研ゼミを中心にやっていました。
  - 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻に進学
    - 駒宮研究室に所属。素粒子物理学実験の研究。
      - ILC ：ヒッグス粒子や新粒子の研究のための実験装置の開発
      - ATLAS：未発見の超対称性粒子を探索するために、スイスの研究所CERNでデータ解析
  - 現在、KAGRA で研究者として仕事をしています。
    - KAGRA=Kamioka (神岡) GRAvitational wave (重力波) から命名

物理学の目指すところ

- **世界は何でできているのか？**
- **どんな法則に従っているのか？**　　を知ること
  - なるべくシンプルな原理から理論を作りたい
  - 理論が本当に正しいか実験して確かめる
  - 実験事実を説明できるような理論を作る

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} + \Lambda\, g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$





重力の物理：万有引力

- 人類は昔から疑問に思っていた。どうしてものは落ちるのか？
- **1665 年：ニュートンの万有引力**

F: 力 ↓　　↓ M, m: 2つの物体のそれぞれの質量

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

G: 万有引力定数 ↑　↑ r: ２つの物体間の距離

- 2つの物体の間には、物体の質量に比例し、２物体間の距離の２乗に反比例する引力が作用する

重力の物理：万有引力

✓ どんなものでも重力による運動の仕方は同じことが説明できる！

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

M: 地球の質量、 m: 落ちる物体の質量

$F = ma$ と比べると、加速度は

$$a = G\frac{M}{r^2}$$

→ m:落ちる物体の質量には関係ない

→ どんなものでも同じ加速度で落ちる

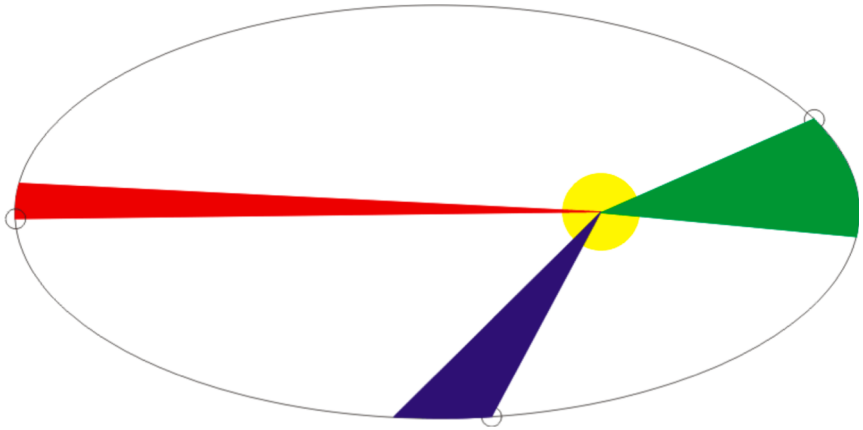
ガリレオのピサの斜塔の実験と一致！

(1589 ?)

重力の物理：万有引力

- ✓ 地上だけでなく、天体の動きも説明できる！
- ケプラーの法則(1609, 1618年)も、万有引力から計算できる！

1. **惑星は太陽を１つの焦点とする楕円軌道を描く。**
2. **惑星と太陽とを結ぶ線分が単位時間に描く面積は一定である。**
3. **惑星の公転周期 T の2乗は、楕円軌道の半長軸 a の3乗に比例する。**

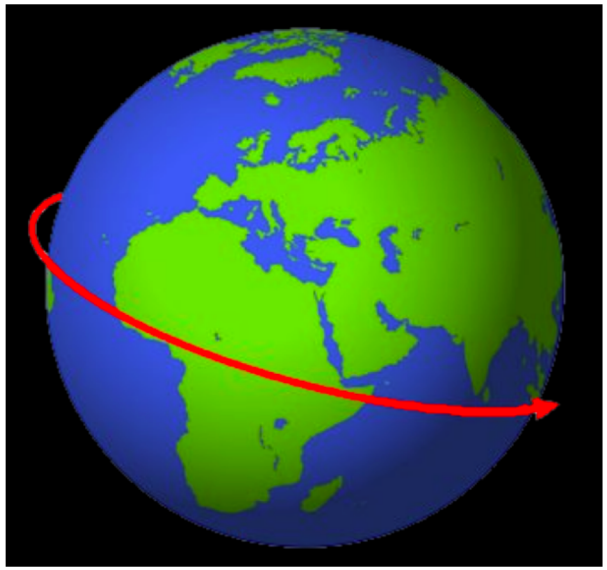


重力の物理：光速

- 1887 年、人類は新たな疑問にぶつかる。
  - **光の速度は誰から見ても一定になっている？**

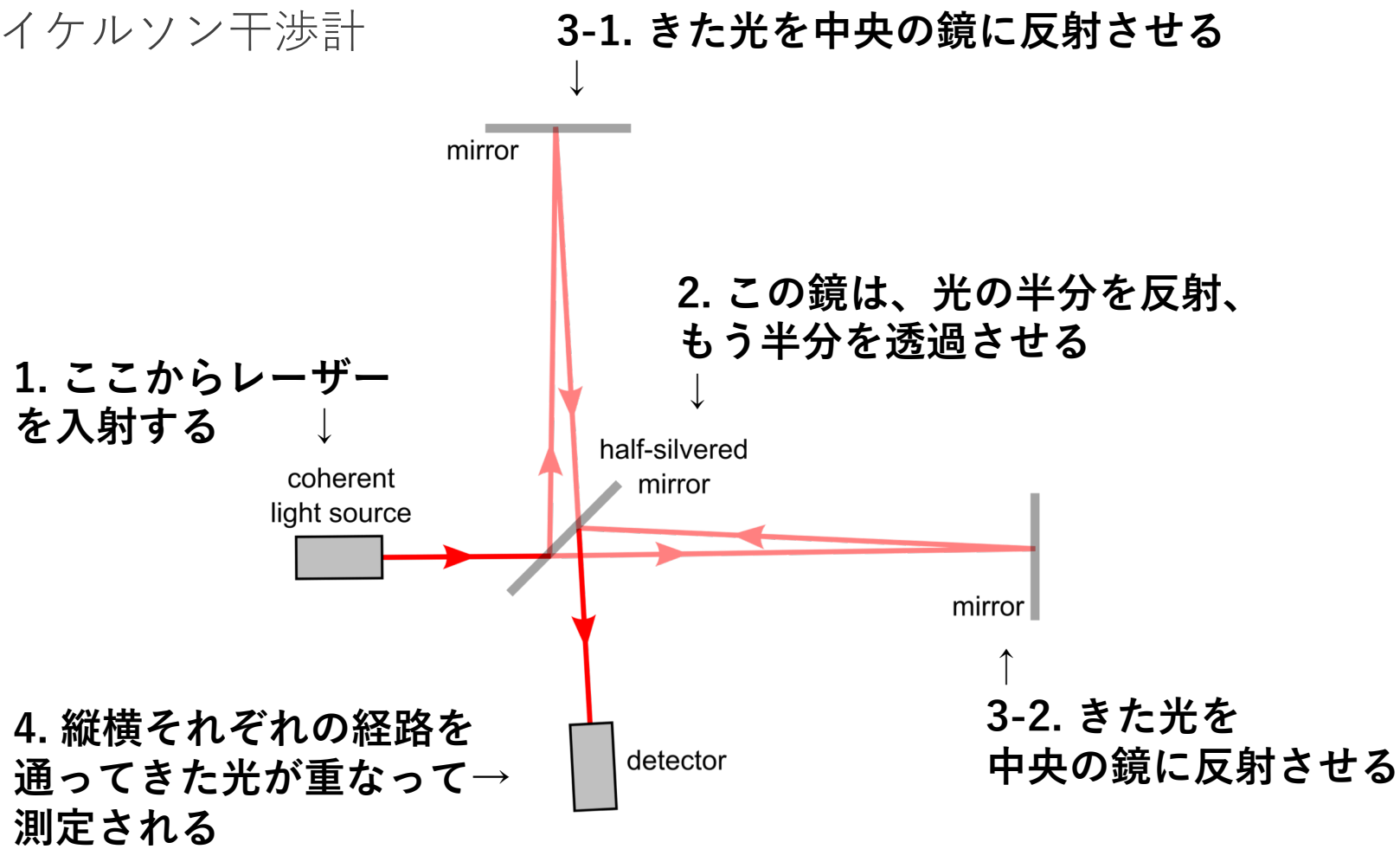
■ マイケルソン・モーリーの実験

地球の自転を考えると、東西方向は自転の速度の分だけ光速がズレるはず。これを測定しよう！



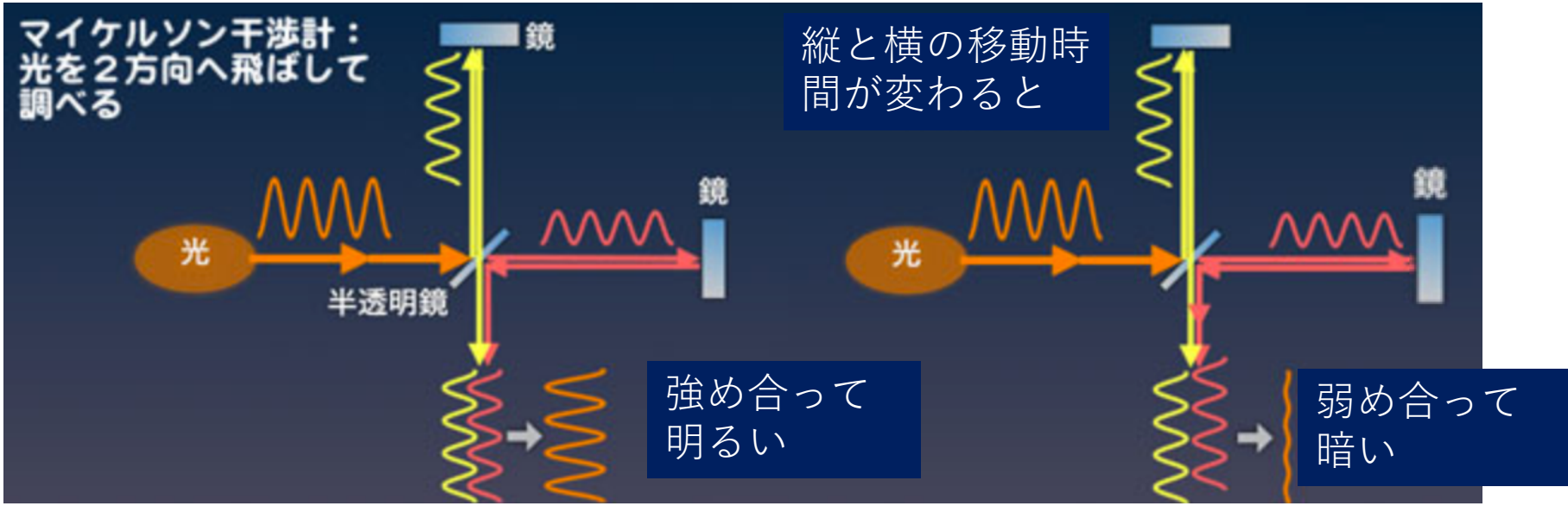
重力の物理：光速

- マイケルソン干渉計



重力の物理：光速

- 光の干渉：光は電磁波＝波なので、干渉によって強めあったり弱めあったりする。
- でも、実験の結果、**地球の自転の速度から計算されるほど縦横の光速の差がない**ことがわかった。



重力の物理：相対性理論

- **アインシュタインの特殊相対性理論(1905年)、一般相対性理論(1915年)**

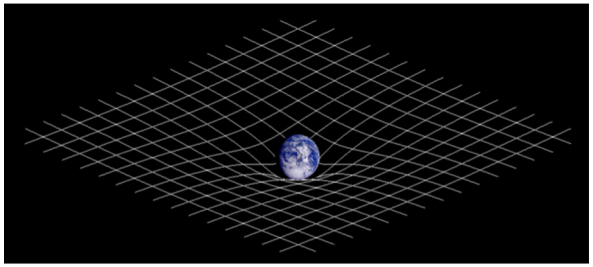
- 特殊相対性理論
  - 光速度不変の原理
  - 相対性原理：等速運動する慣性系の間において物理法則は互いに不変である

- 一般相対性理論
  - 光速度不変の原理
  - 相対性原理：等速運動する慣性系の間において物理法則は互いに不変である
  - 等価原理：加速度と重力場は等価

重力の物理：相対性理論

- 一般相対性理論では、**重力とは時空の歪み**である。
- 時空の歪みは、質量・エネルギーの存在によって起こる。
- アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} + \Lambda\, g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

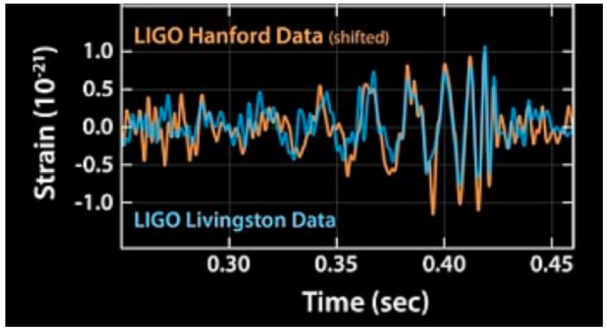


左辺：時空の歪みに関する式　　右辺：質量・エネルギーに関する式

✓ GPS を正しく動作させるには、一般相対性理論が必要！

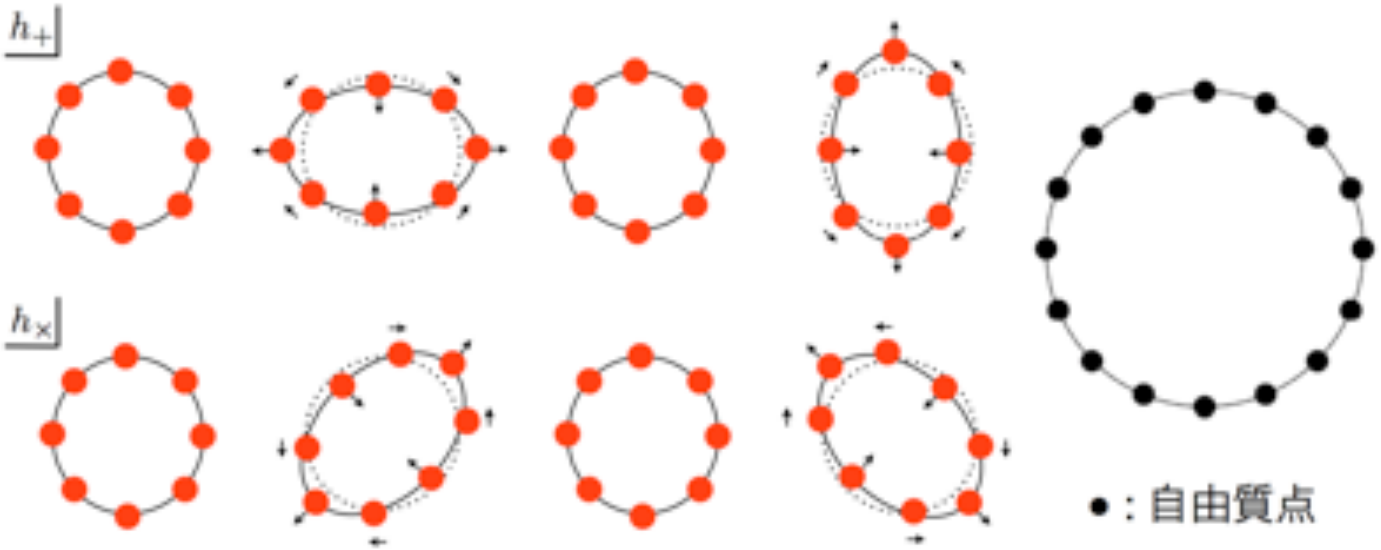
✓ **重力波を予言、2015年に LIGO で初検出！**

🏅2017 年ノーベル賞



重力波とは？

- 一般相対性理論では、質量やエネルギーによって時空が歪むと説明されている。**時空の歪み方が変化すると、これが波となって伝わっていく。これが重力波！**
- 重力波は、空間を縦横に伸び縮みさせる。



重力波とは？

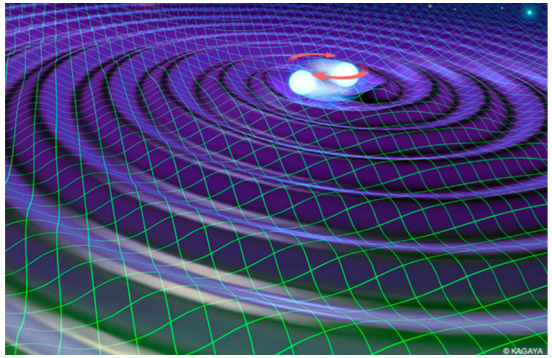
- ものが少し動くだけでも実は重力波は発生します。
- でも、重力波はとても小さいので、地球上で人工的に測定できるような大きさの重力波を発生させるのは不可能…

→天体現象を使えば、大きな重力波が発生する！

- ブラックホール連星合体・中性子星連星合体
  - どちらも質量による重力の歪みが大きい。
  - ２つがお互いの周りを回転することによって、時空の歪みの変化がとても大きくなる。→大きな重力波が発生
  - それでも重力波はとても小さい！

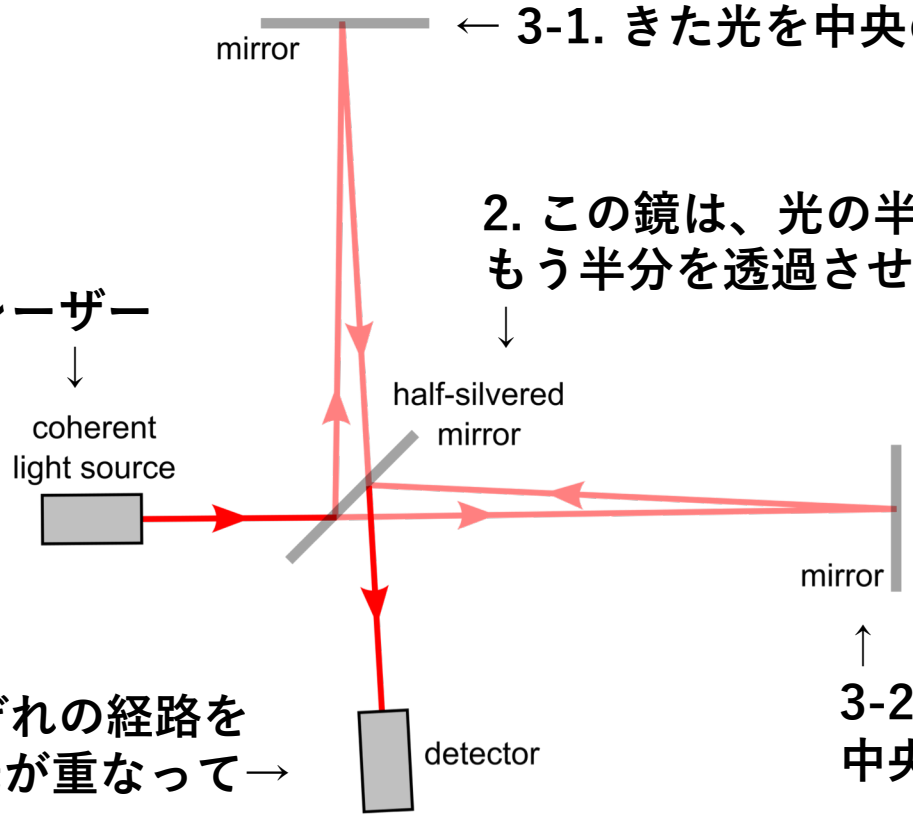
地球と太陽の間の距離に対して、原子１個分程度

こんなに小さな重力波、どうやったら測れる？



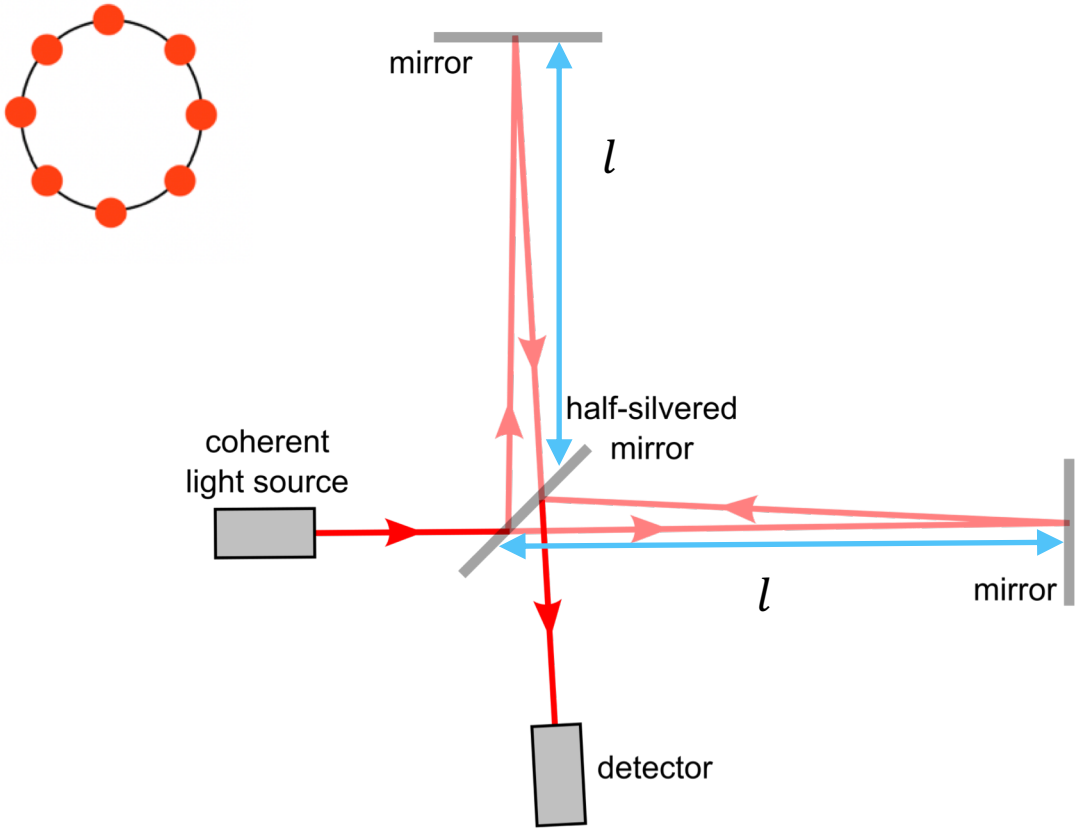
KAGRAの重力波検出原理

- KAGRA では、マイケルソン干渉計をさらに発展させた装置で重力波の検出を目指しています。



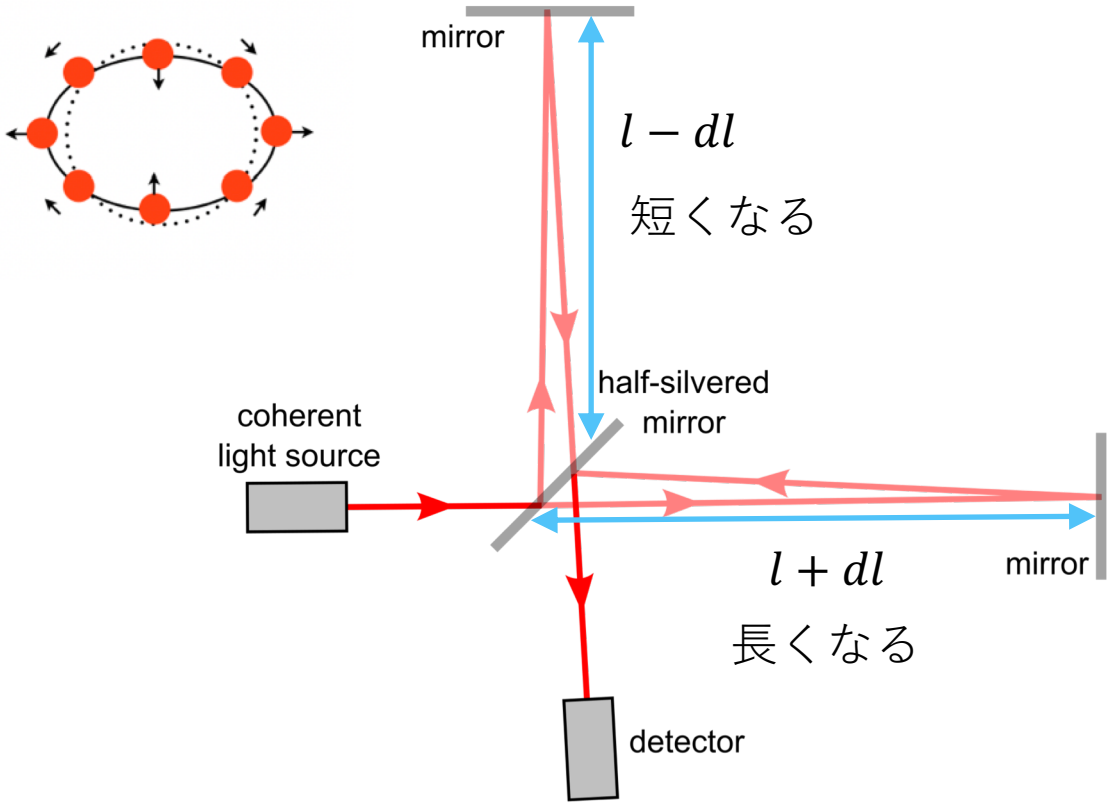
KAGRAの重力波検出原理

- 重力波が来ると、空間が伸び縮みするので、縦横の長さが変わる



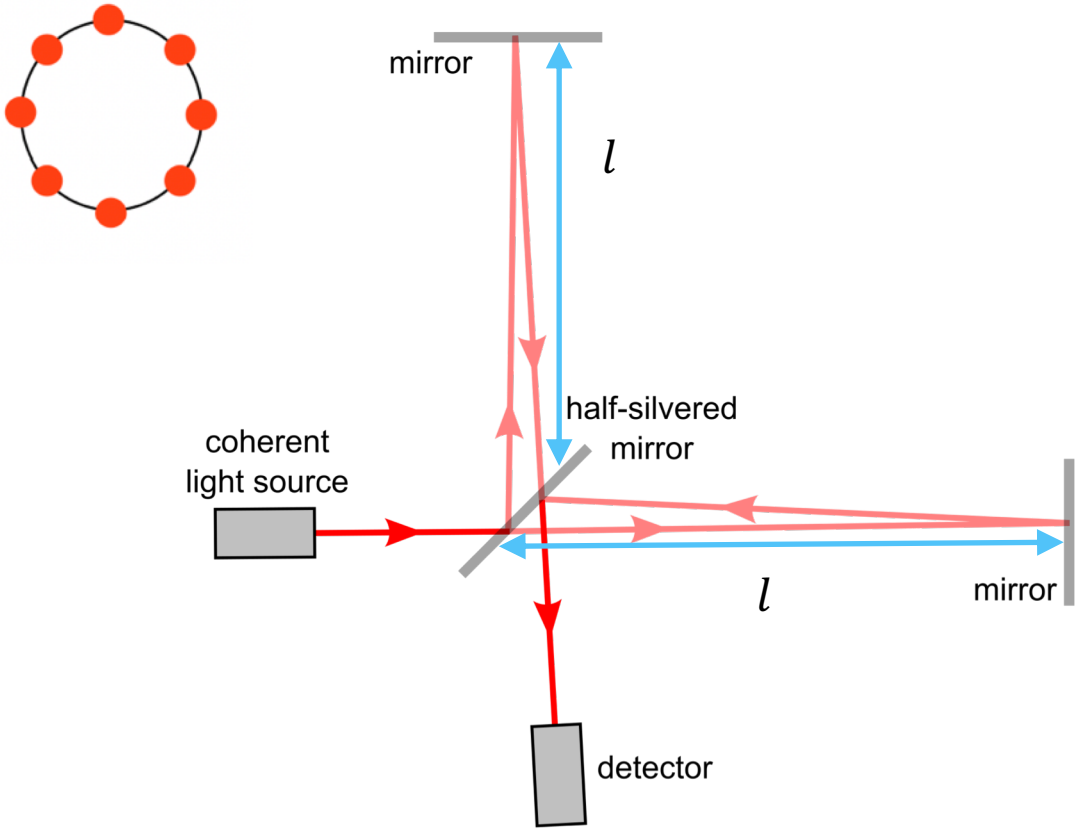
KAGRAの重力波検出原理

- 重力波が来ると、空間が伸び縮みするので、縦横の長さが変わる



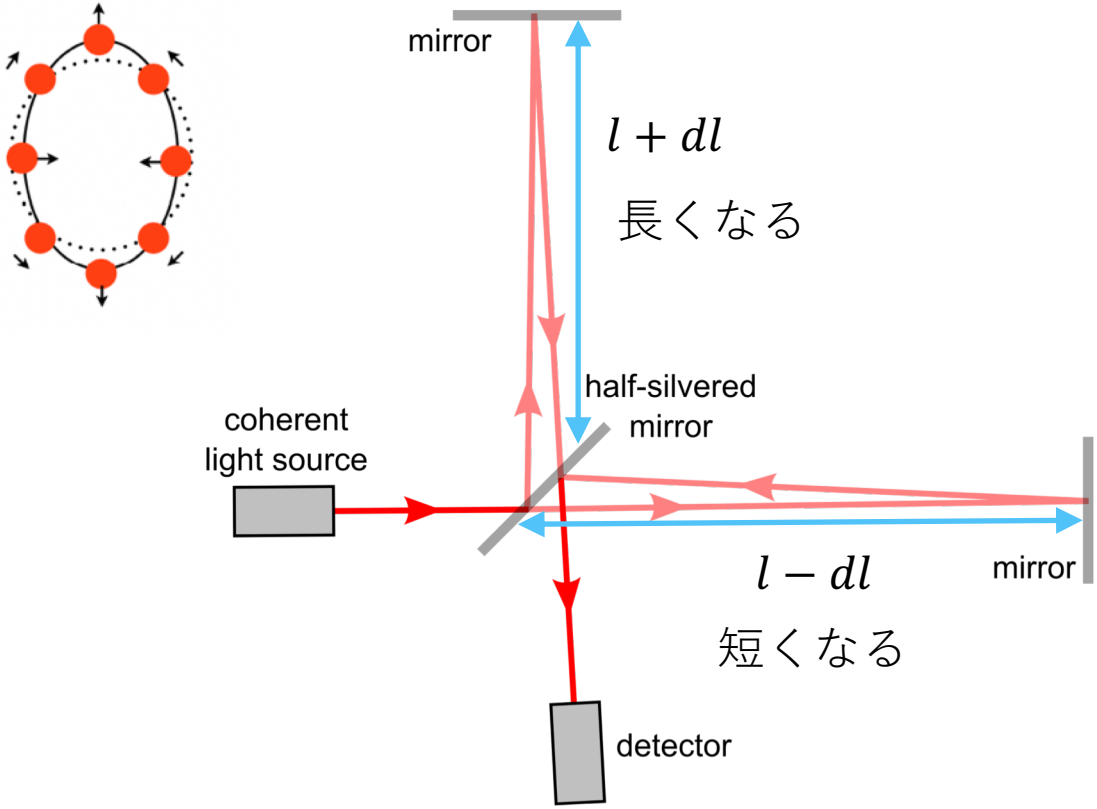
KAGRAの重力波検出原理

- 重力波が来ると、空間が伸び縮みするので、縦横の長さが変わる



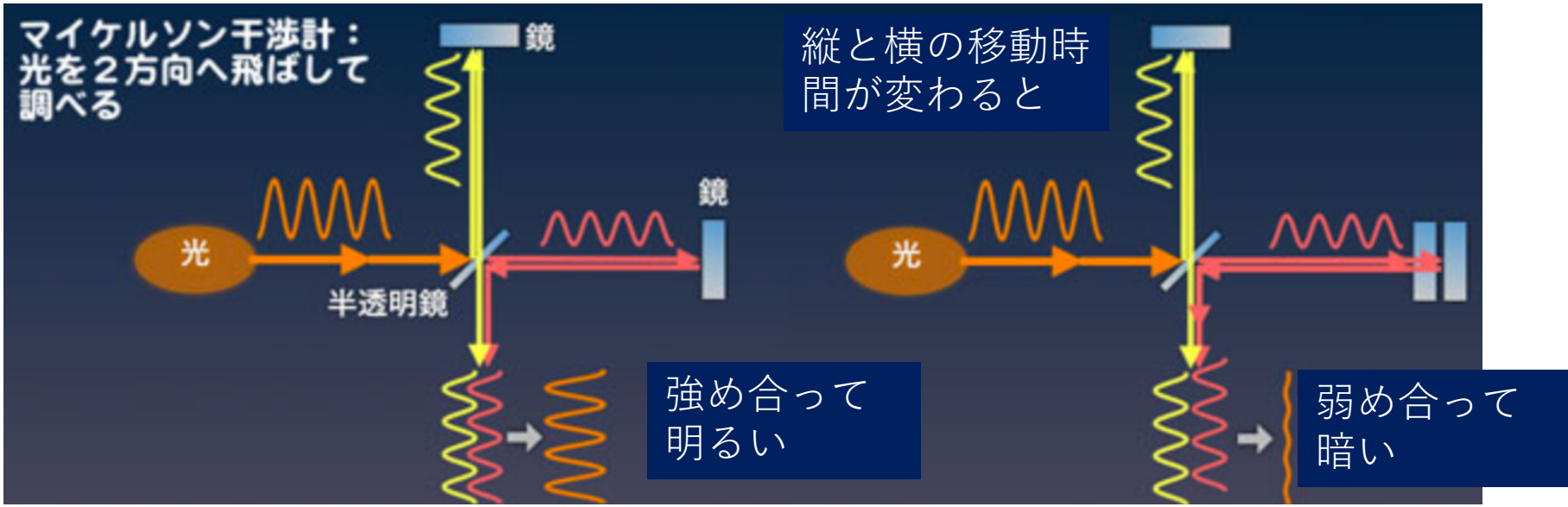
KAGRAの重力波検出原理

- 重力波が来ると、空間が伸び縮みするので、縦横の長さが変わる



KAGRAの重力波検出原理

- 重力波によって縦横の距離が変化するのを、光の干渉を使って測定することができる！



KAGRA を作る：ノイズとの戦い

- 重力波の測定では、地球と太陽の間の距離に対して、原子１個分程度の変化を検出しなければいけません。

- 実際の実験では、重力波以外にも、光の干渉の大きさを変えてしまう原因になるものがいろいろあります。これらはノイズと呼ばれます。
  - 鏡の位置が動いてしまう
  - レーザーにふらつきがある　など…

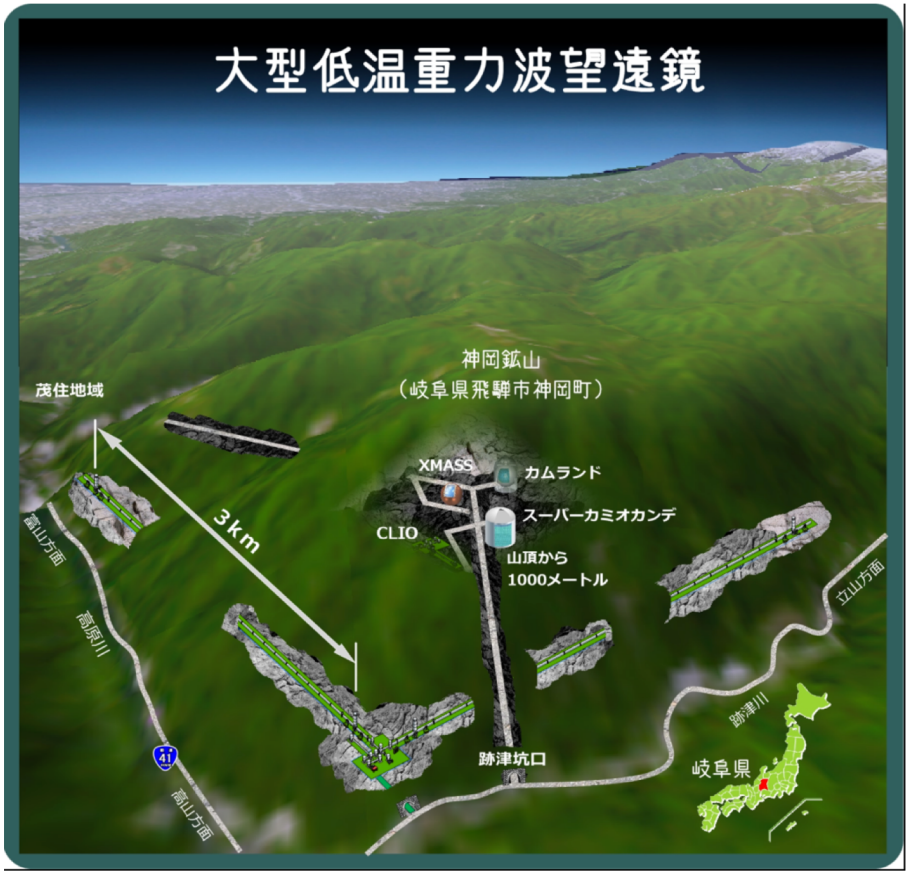
- これらのノイズの原因をなくしたり、影響しなくなるようにするために、様々な工夫があります。

KAGRAの工夫：地下での実験

- KAGRA は神岡町の池ノ山の地下にトンネルを掘って、そこで実験をしています。

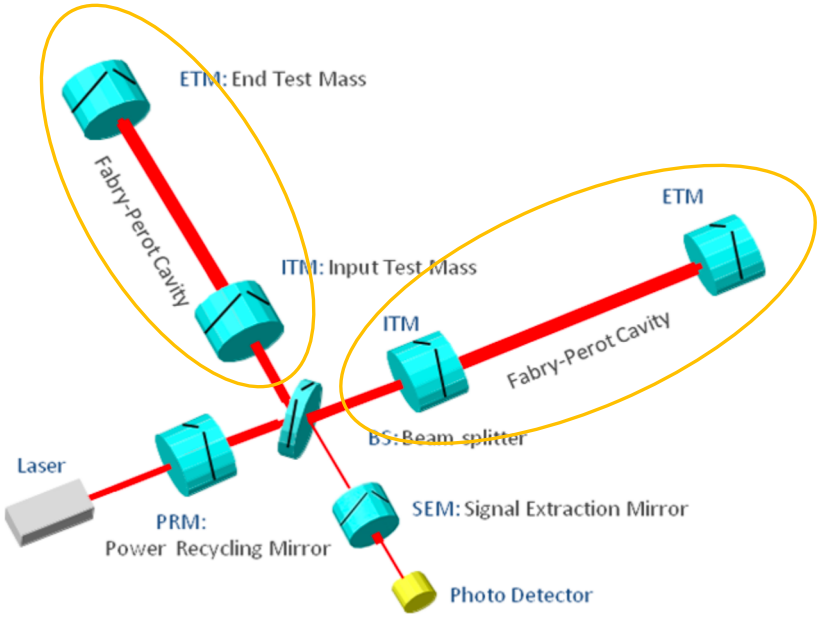
✓ 静かな環境で、人工的な振動・騒音や雨風などの影響を避けられる

✓ 硬い地盤で、地面振動が少ない
  - 実験装置が揺れていると、重力波が見えたのか揺れの影響なのかがわからなくなります。
  - 観測中は、研究者も含めてトンネルには立ち入り禁止になります。



KAGRAの工夫：装置の大きさ

- 光が往復する長さに比例して、重力波による空間の歪みが大きくなります。そこで、**光が往復する部分を 3km** の長さにしています。
- 3 km でもまだ短い！合わせ鏡 (ファブリ・ペロー共振器)を使って、実質的に 3000 km 以上の長さの装置になっています



レーザーが
1000 往復以上する！

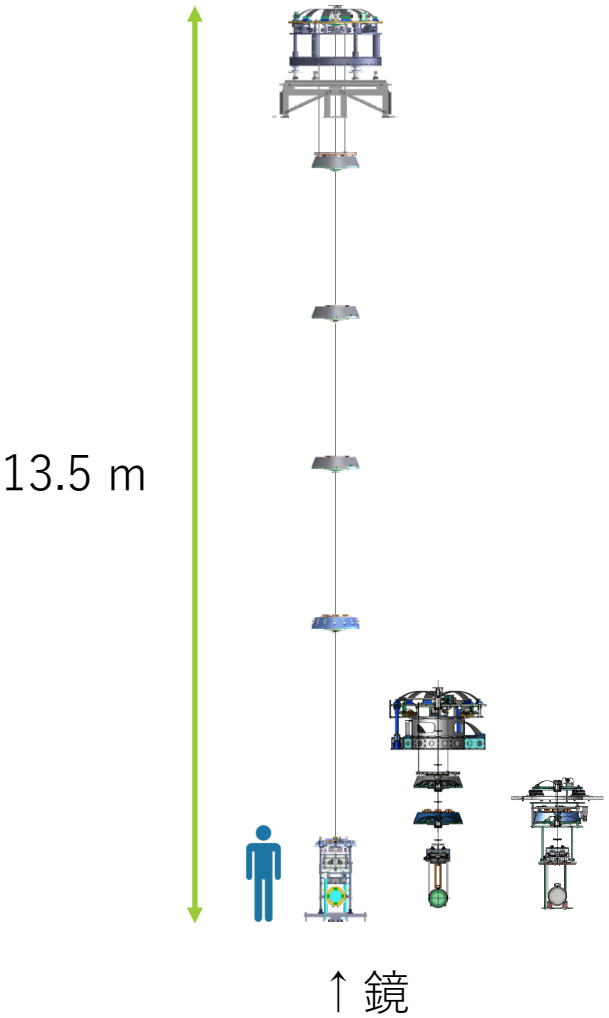
KAGRAの工夫：鏡を静止させる

- 地下の静かな環境でも、重力波を測定する精密実験ではまだ小さな地面振動が問題になる…

✓ 13.5 m の 9段のふりこを使って、鏡が振動の影響を受けないようにする。

- 鏡が熱雑音で、勝手に振動してしまう

✓ 20 K (-253度) の低温にして、鏡自体が振動しないようにする。

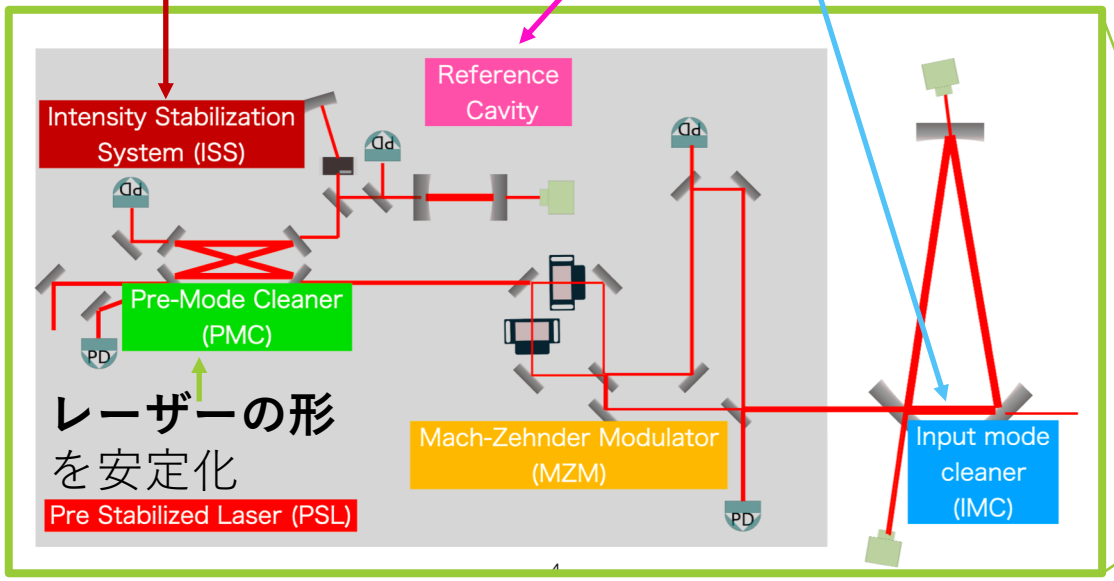


KAGRA の工夫：レーザー安定化

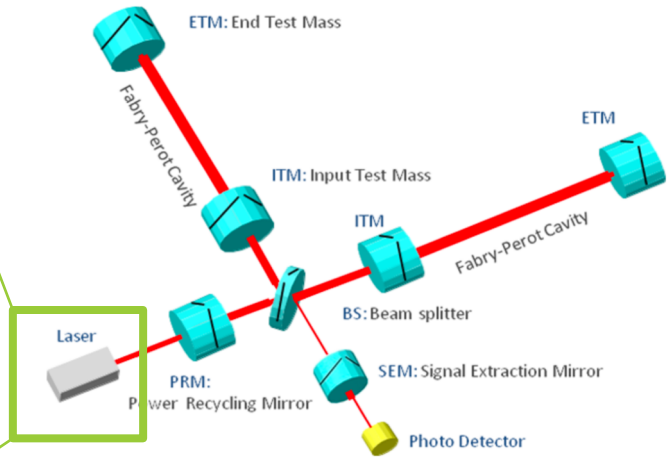
- 干渉計で使うレーザーが不安定だと、干渉した光もその分不安定になります。様々な光学装置を利用して、安定化させています。

レーザーの強さ
を安定化

レーザーの周波数
を安定化

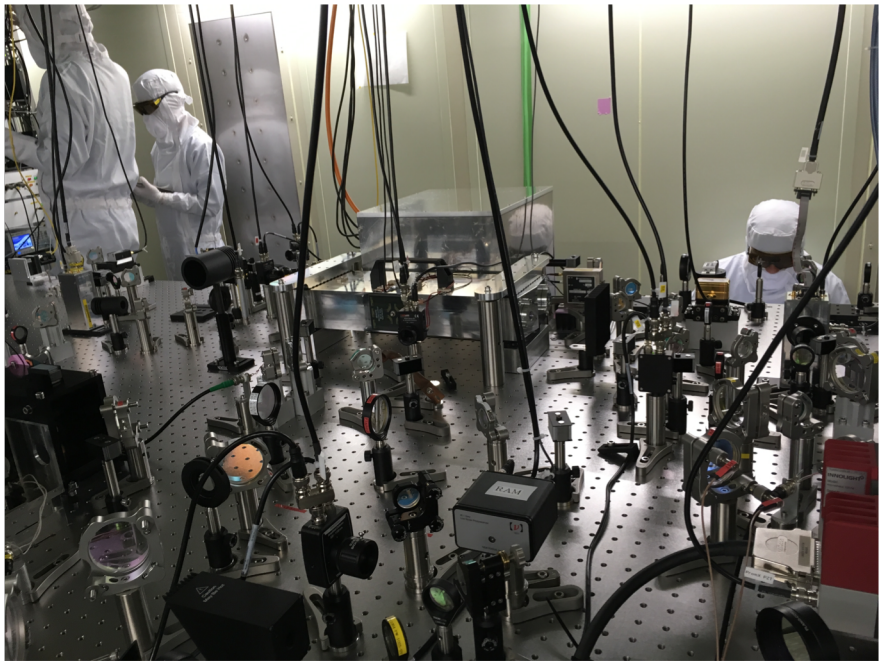


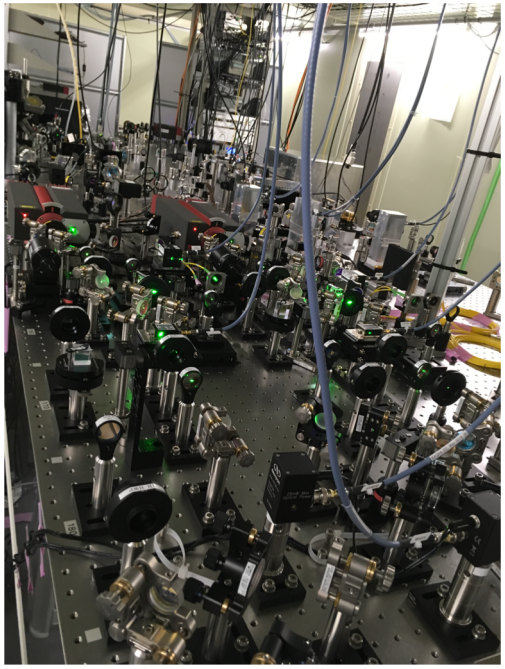
レーザーの形
を安定化



KAGRA の工夫：環境測定

- 重力波干渉計は、とても繊細な装置。物音、地震、雷などの影響で、重力波のように見えてしまうことも。
- **KAGRA の各所に、地震計・加速度計・磁束計・マイクなどを設置。いつも通りの静かな環境だったか、常にモニターします！**





重力波研究でできること

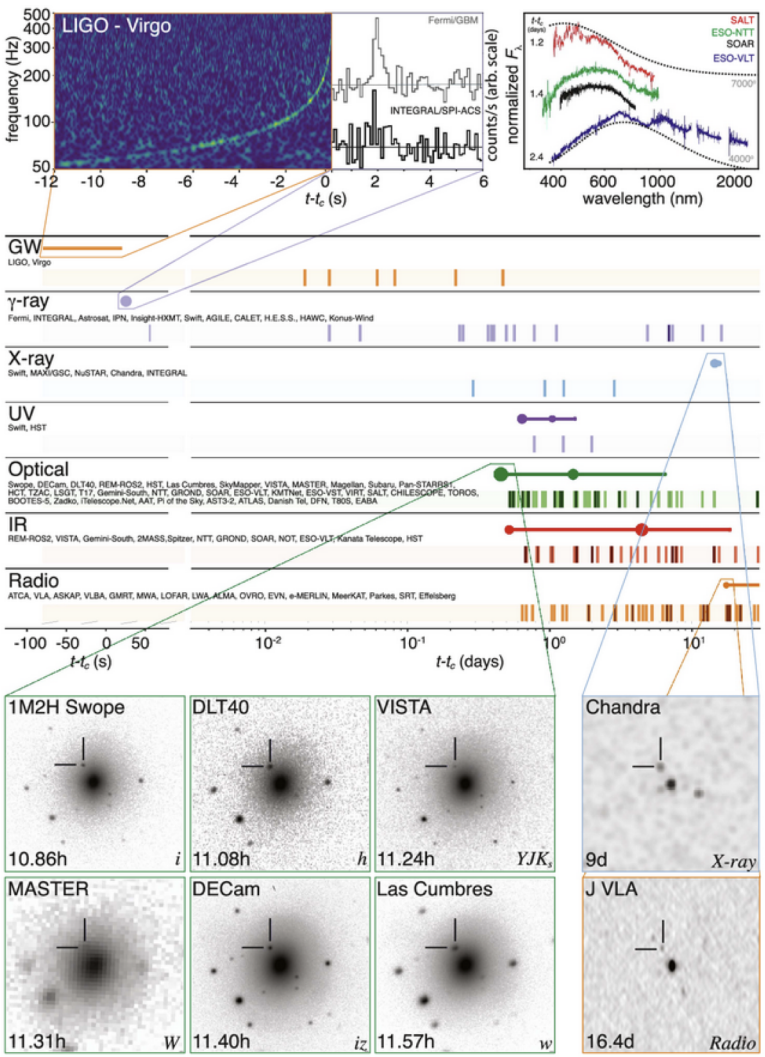
- ブラックホール連星合体
  - 近年の重力波研究によって、**宇宙には予想以上に多くのブラックホール連星が存在する**ことが判明。
  - ブラックホールがどうやってできたのか、観測を続けることで解明できるかもしれません。

世界中の研究者と連携

- 重力波干渉計実験は、別の場所の実験データと組み合わせることでもっと面白いことができます！

1. 複数の実験データを組み合わせて、天体の場所を特定
2. 世界中の様々な望遠鏡で、この天体を観測
3. どんなことが起きたか、重力波だけじゃわからないことがわかる！

- 2017 年には、中性子星連星合体で金などが生まれることが判明



超新星爆発

- 超新星爆発とは、大きな恒星がその一生を終えるときに起こる現象。
- これがどんな現象か、実際に測定して調べたい！
- もし発生したら、重力波や世界中の望遠鏡を使って観測を行います！

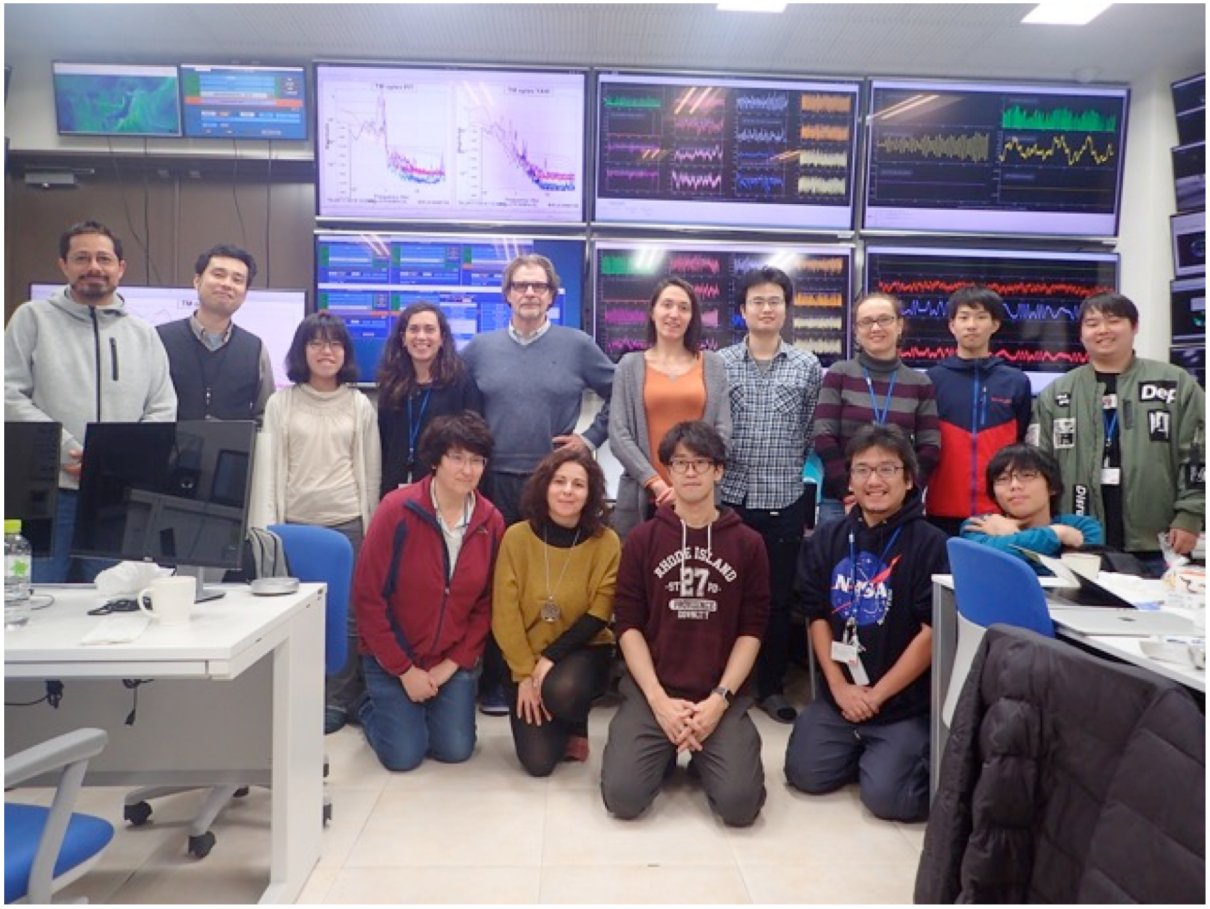
未知の現象も見つかるかも？

- 重力波観測はまだまだ始まったばかりの新しい研究方法です。
  - これまで知られていなかった新しい天体現象が見つかるかも！
  - 重力理論についてもっと詳しいことがわかるかも！
- 新しい発見を目指して、

  世界中の研究者が重力波観測をしています！

実際の研究活動

- コントロールルームにて、KAGRA・Virgo・LIGO の研究者



- 重力波１つを測るのに、たくさんのモニターを使います

(c) Enrico Sacchetti

- KAGRA へ続くトンネル。1年中14度ぐらいの気温。

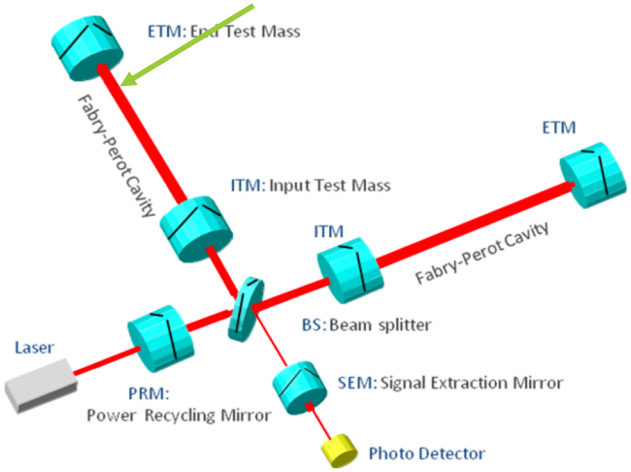
- 重要な部分はクリーンルームになっています。

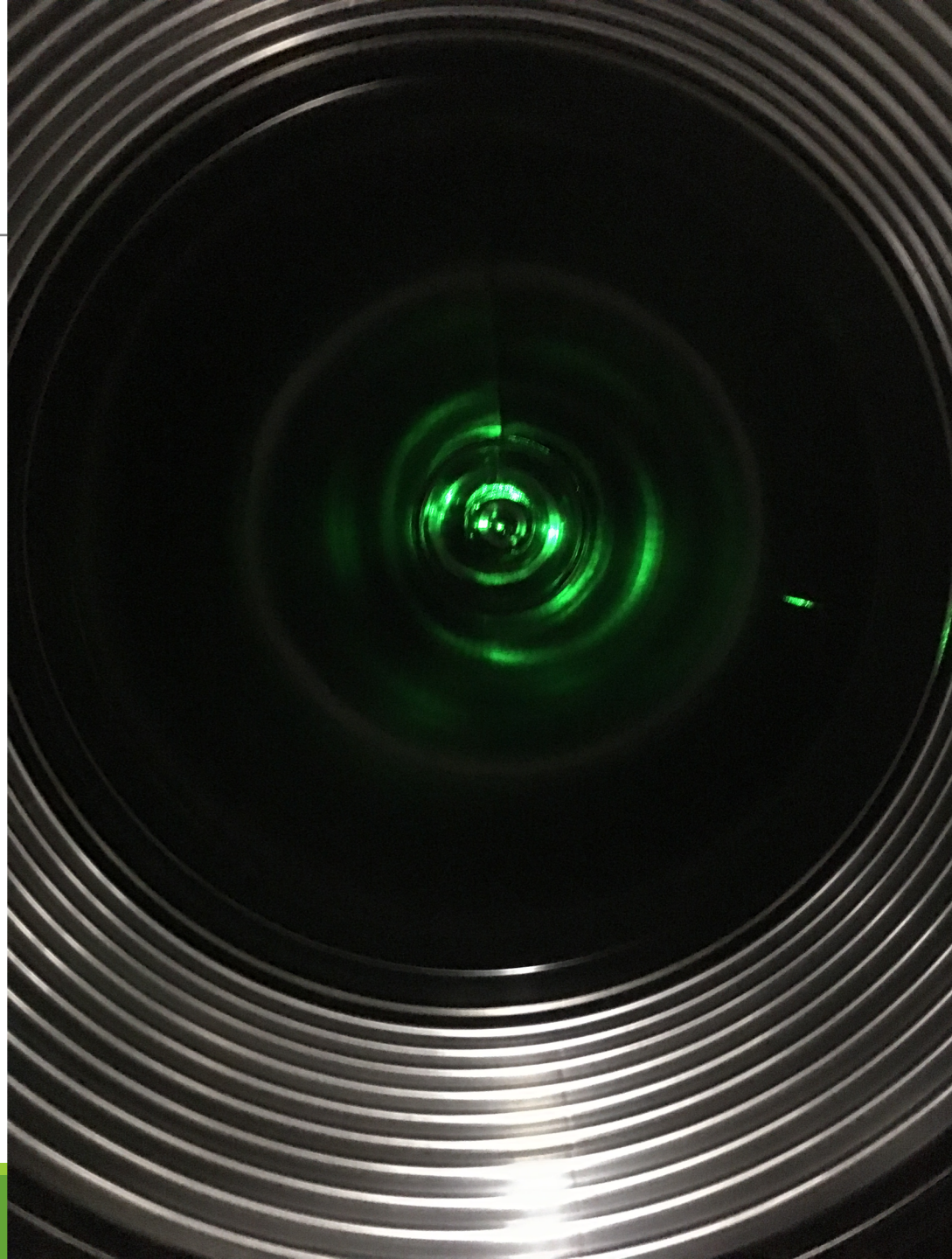
- 重いものを運ぶためのクレーンもあります。

- ビームダクトの中。

* 研究者でも滅多に見れないレアな写真

このあたり

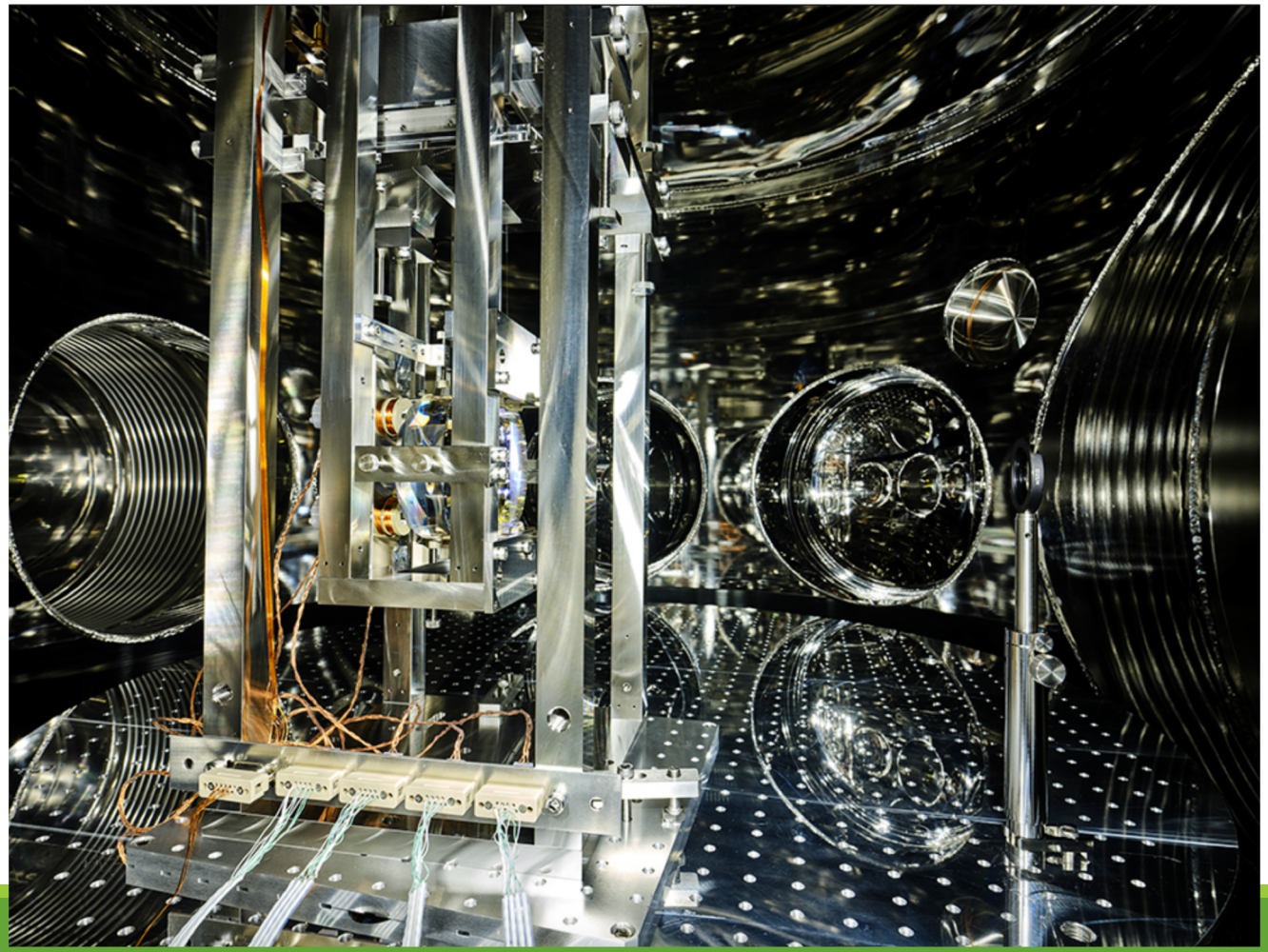




- 干渉計の鏡をインストール中。

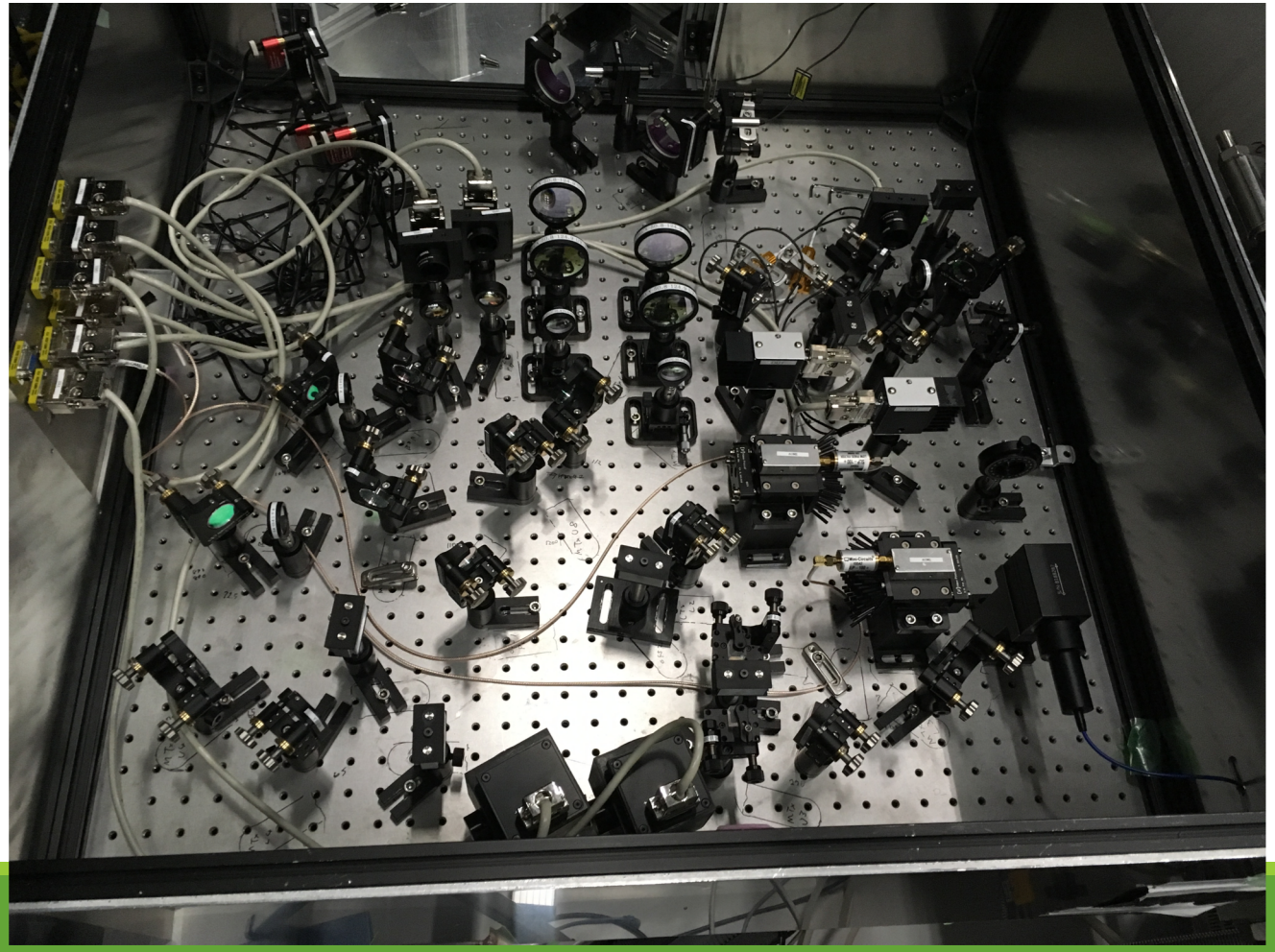
(c) Enrico Sacchetti

- 鏡は真空槽の中に設置。

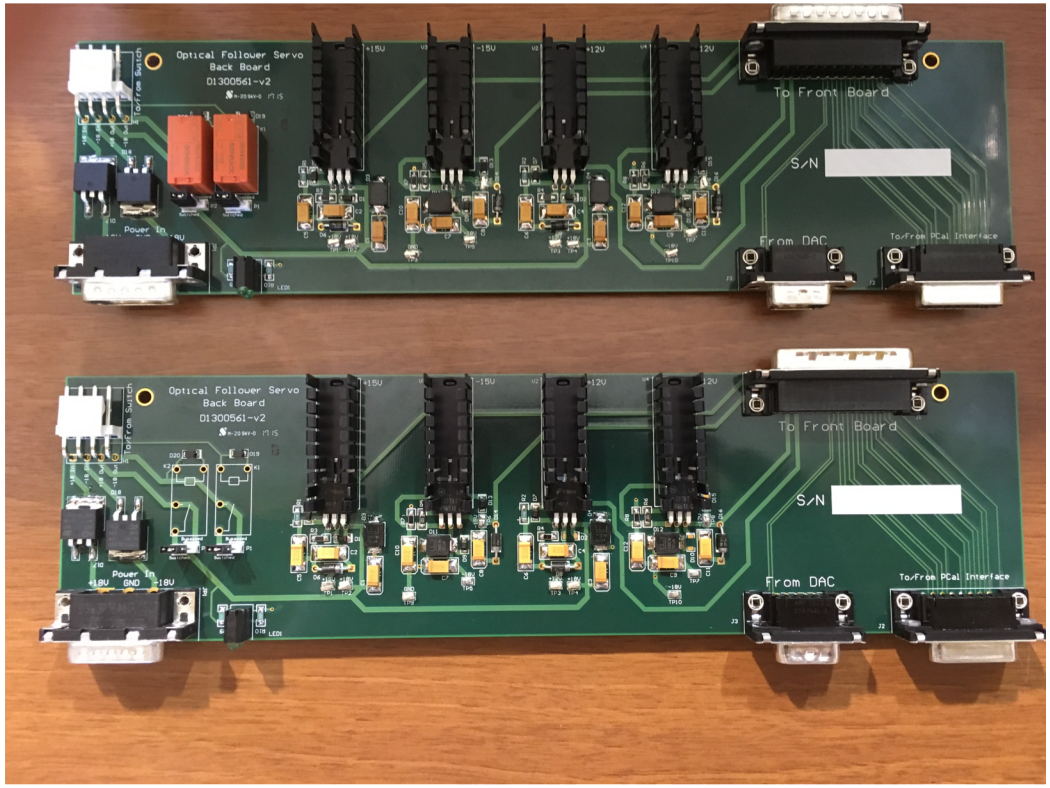


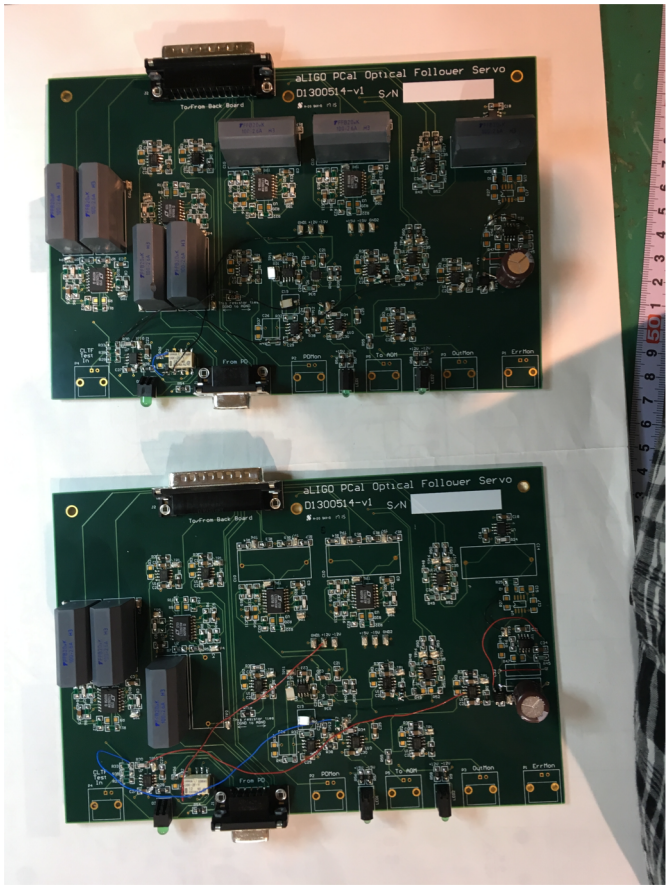
(c) Enrico Sacchetti

- 鏡を「レーザーで押す」装置の一部。重力波の大きさを測る基準。

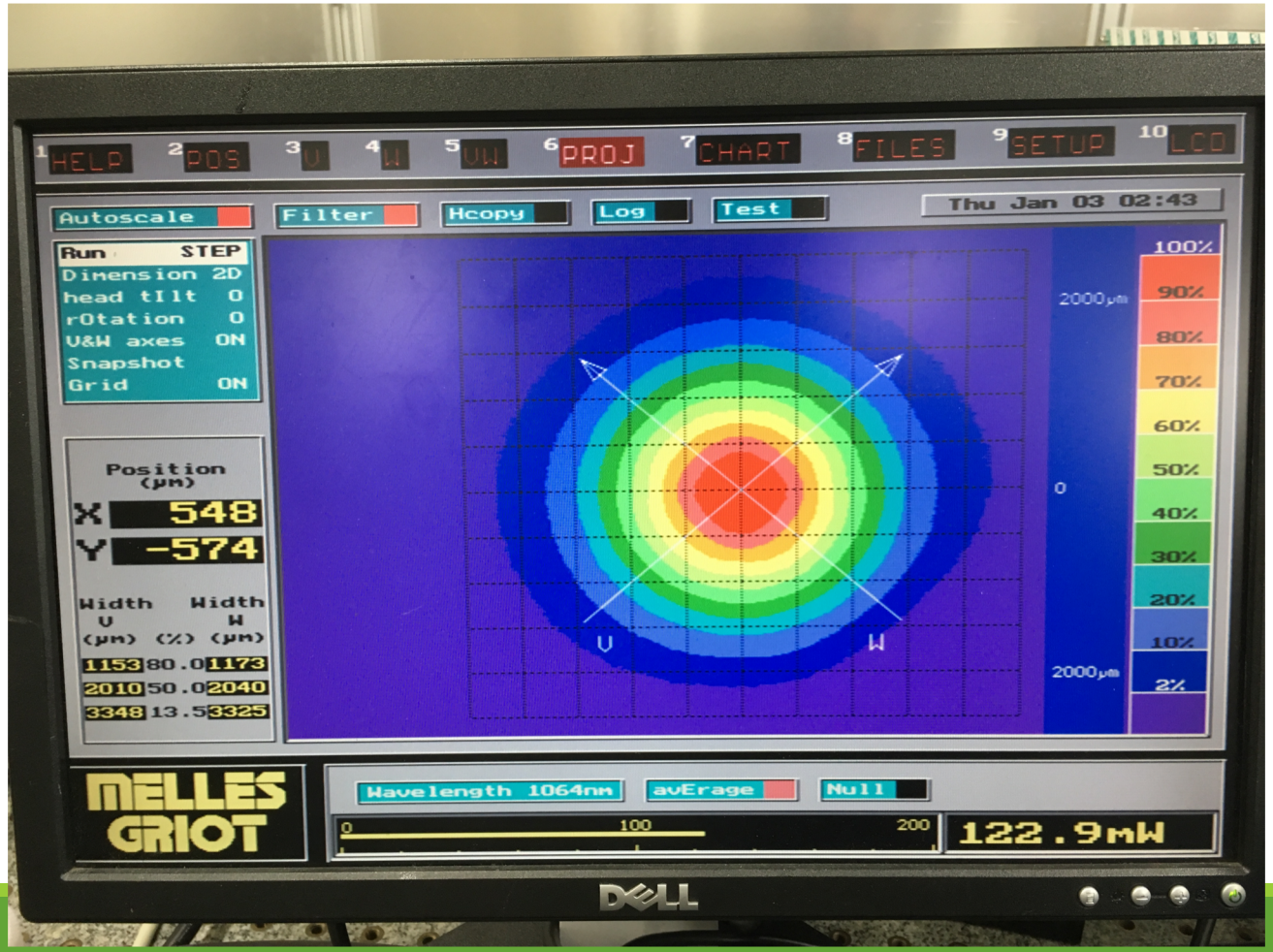


- コントロールに使う回路も半田付けして作ります

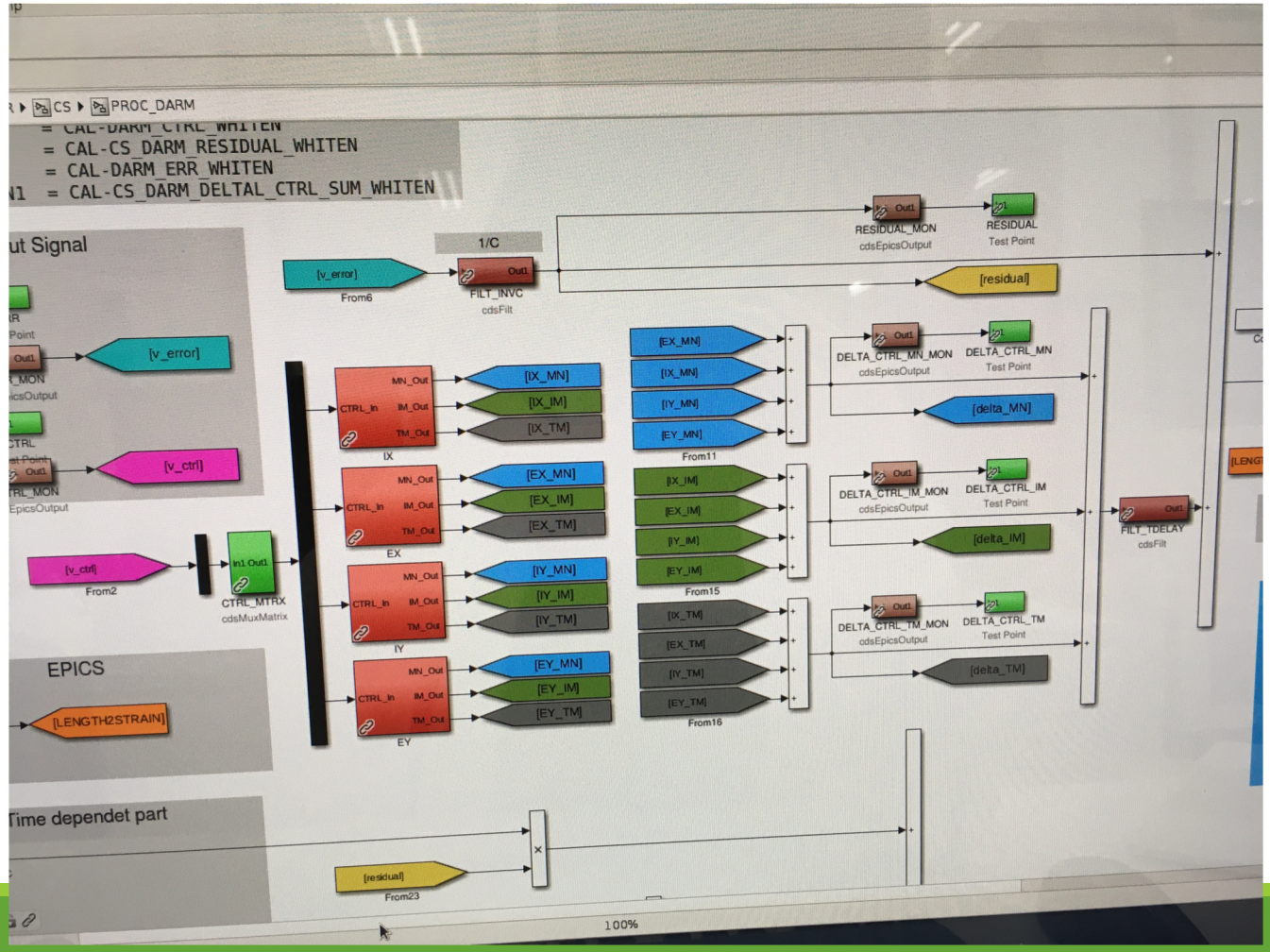




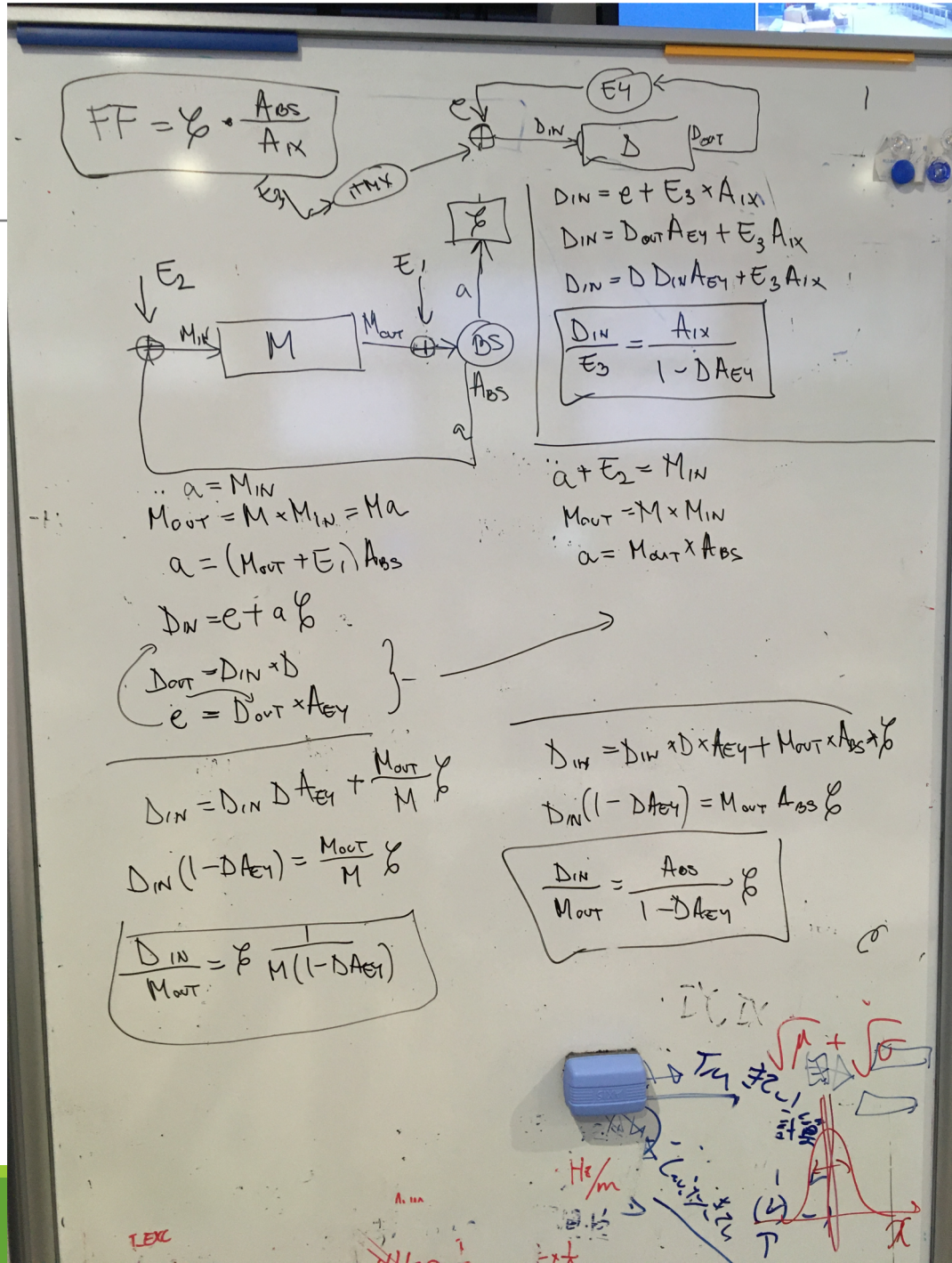
- レーザーの形・大きさを測っています



- 干渉計の測定結果から、重力波の大きさを計算するソフト。



- ホワイトボードで、制御に使う式を議論。



- 気になるノイズをリスト。重力波検出感度を上げるために重要！

KAGRA summary

GlitchPlot channel GRD PSL IMC OMC VIS PEM CAL GlitchPlot JST : 20191114

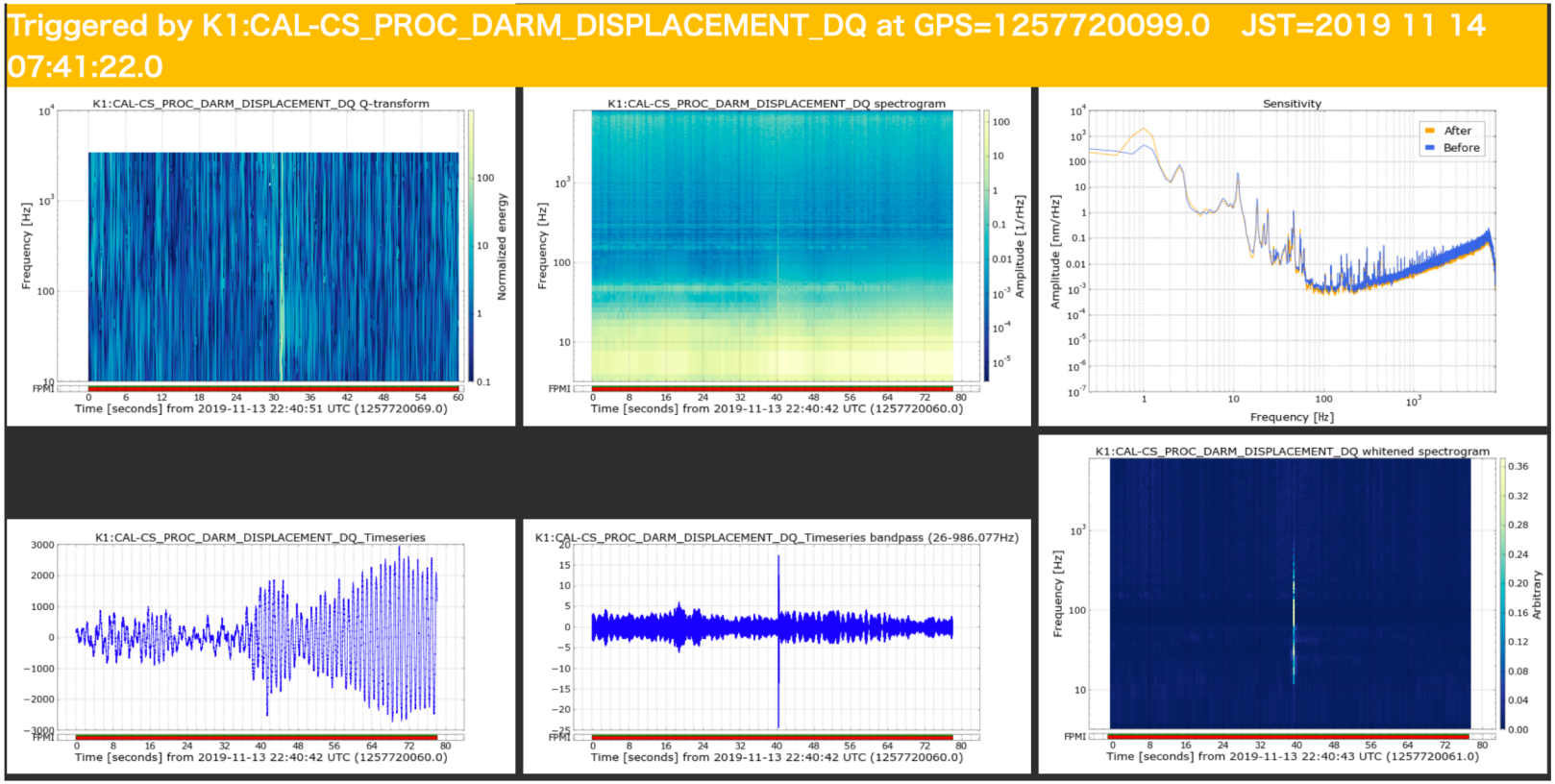
<< Previous day(20191113) List of Date(all) Latest Next day(20191115)>>

GlitchPlot Catalog GlitchPlot introduction GlitchPlot wiki

GlitchPlot-all channel all lockloss glitch other cbc burst

index	JST time	GPS time	Interferometer	max SNR	frequency [Hz] @ max SNR	duration [s]	trigger channel
1	2019 11 14 07:41:22.0	1257720099.0	during_lock	1389	95.4	3.750	K1:CAL-CS_PROC_DARM_DISPLACEMENT_DQ
2	2019 11 14 07:41:27.2	1257720104.25	during_lock	21	41.4	0.375	K1:CAL-CS_PROC_DARM_DISPLACEMENT_DQ
3	2019 11 14 07:43:01.1	1257720198.125	during_lock	20	97.2	0.031	K1:CAL-CS_PROC_DARM_DISPLACEMENT_DQ
4	2019 11 14 07:43:57.0	1257720254.03125	lockloss	43987	95.4	3.969	K1:CAL-CS_PROC_DARM_DISPLACEMENT_DQ
5	2019 11 14 07:52:02.0	1257720739.0	lockloss	1377	6.3	12.000	K1:CAL-CS_PROC_DARM_DISPLACEMENT_DQ
	2019 11 14						K1:CAL-

- 一つのデータを、様々な方向から見て調べます。



- KAGRA のミーティング中に開催されたポスターセッション

KAGRA での研究に必要なもの

- どんな重力波が発生するか？

  →物理、数学、数値計算
- 干渉計を作る

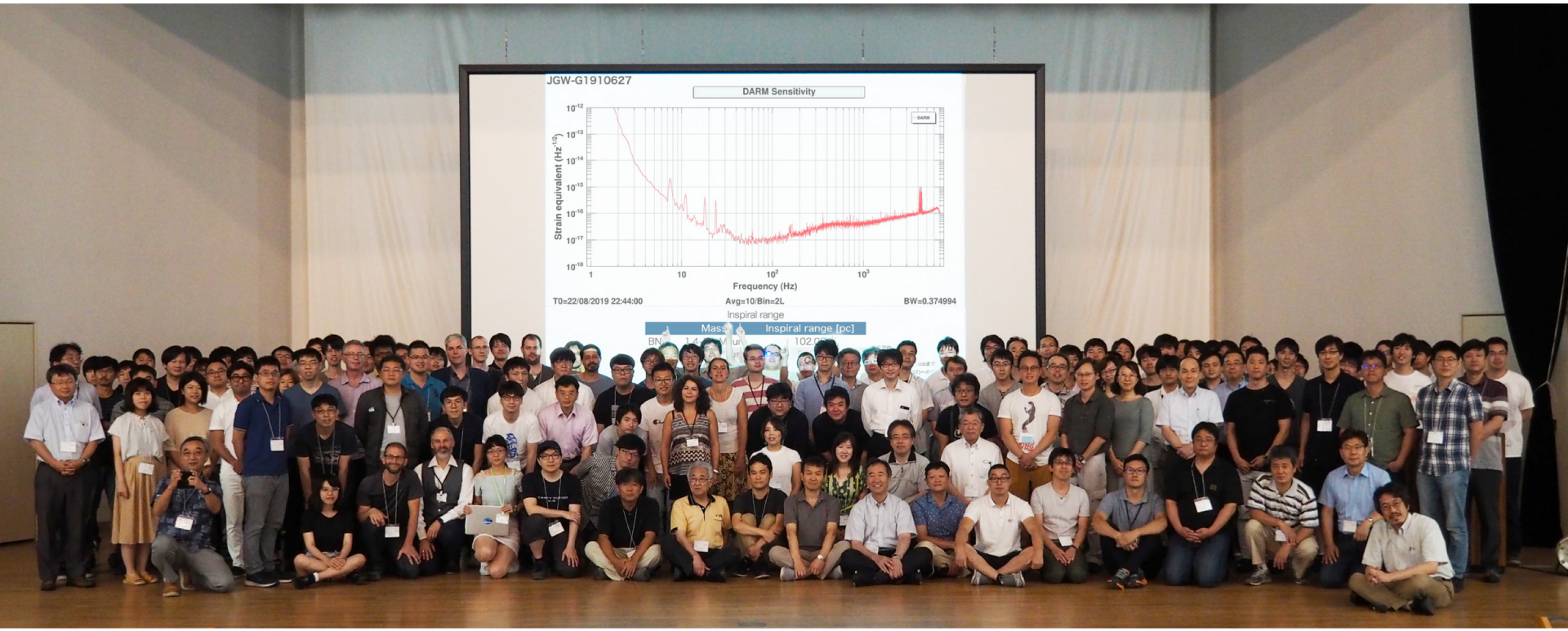
  →装置の設計、電気工学、低温工学、レーザー物理
- 干渉計で重力波がどう見えるか？

  →制御工学、レーザーの物理、鏡の運動の物理、数学
- 重力波の測定結果の解析

  →重力波物理、宇宙物理、天文学、プログラミング、数学
- 世界中からくる研究者と共同研究

  →コミュニケーションスキル、英語
- 論文を書く・学会での発表

  →英語、文章力、表現力

- KAGRA では、360人以上の研究者がそれぞれの得意分野を使って協力して、重力波の観測に挑んでいます。
  - 高校でやる勉強は基本になるので頑張ってください！
  - 富山大の学生など、地元の研究者も活躍しています！
- 必要なものは色々ありますが、技術は後からついてきます！
  - 研究をする上では、**何がやりたいか**を常に意識して進めることが大事。

入善高校の皆様、ご拝聴ありがとうございました！