


# 重力波検出器KAGRA

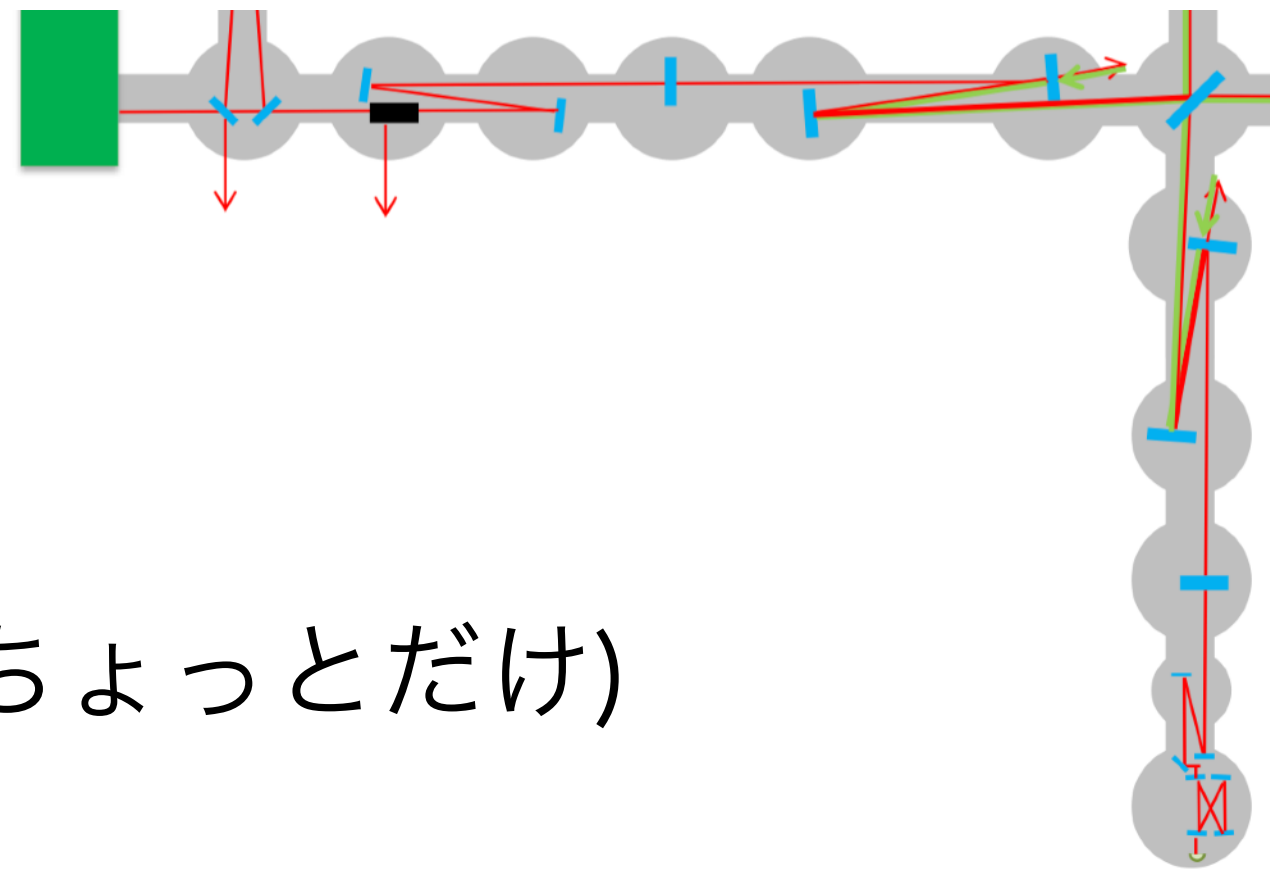


飛騨神岡高校オンライン講義

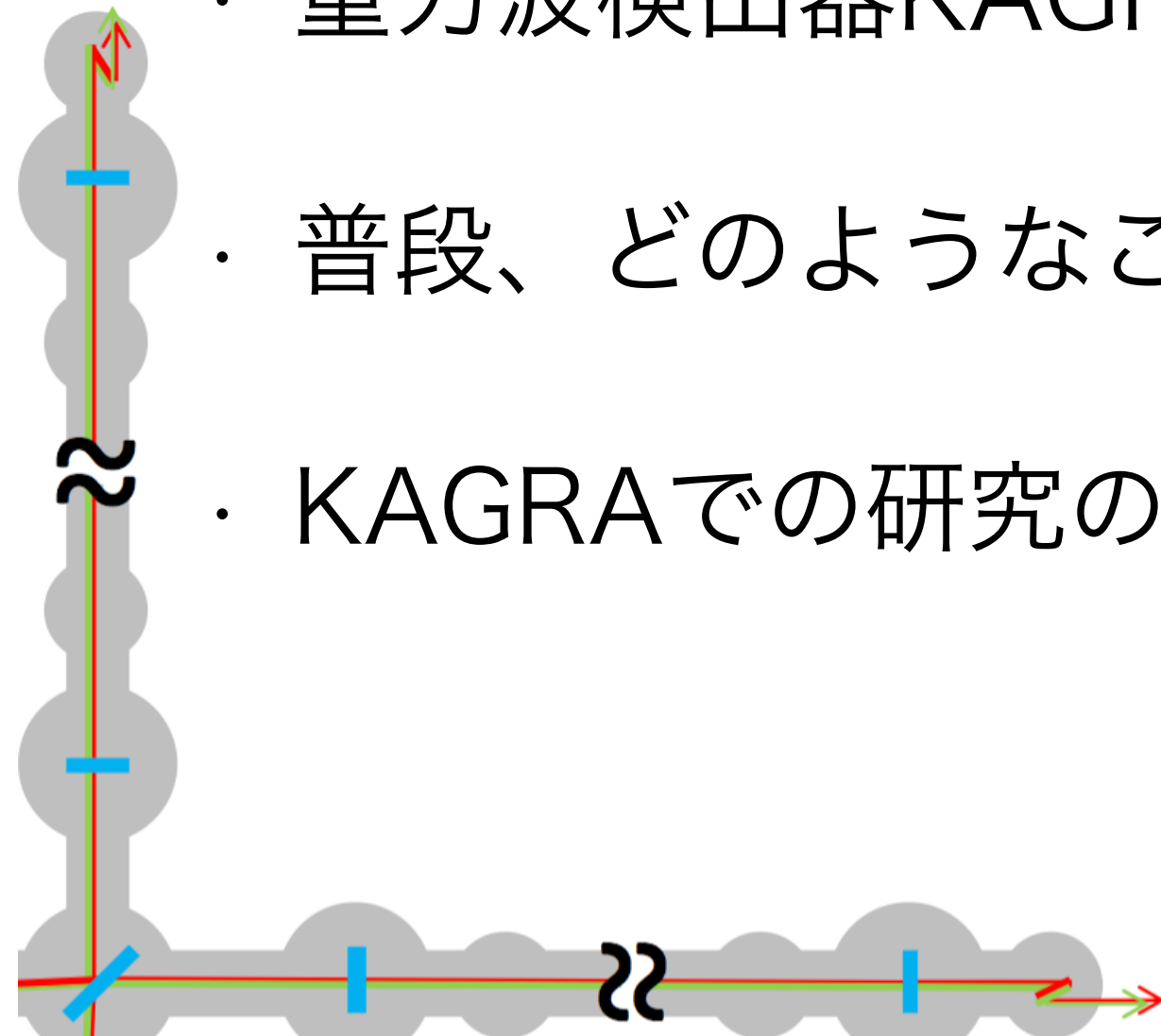
2022/10/11(火)

東京大学宇宙線研究所 横澤孝章

# もくじ



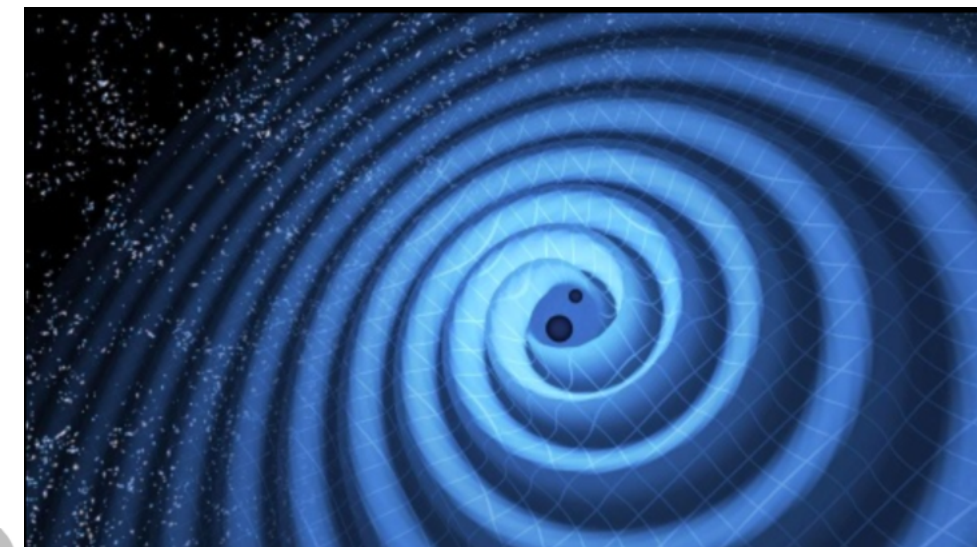
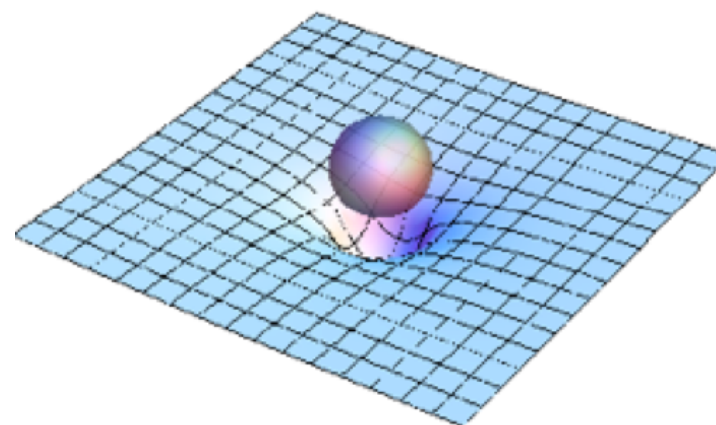
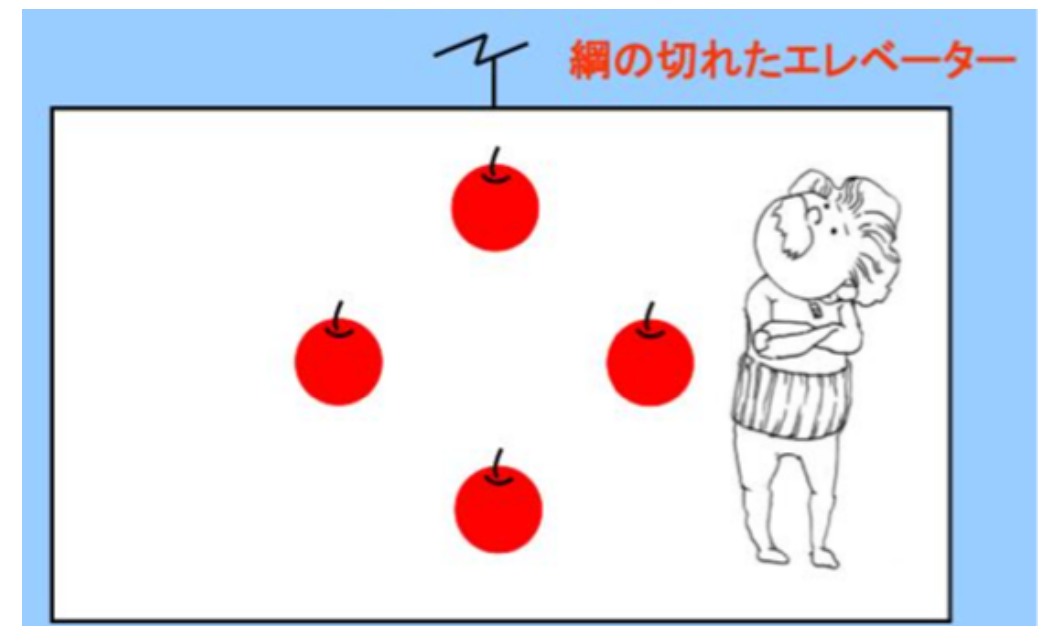
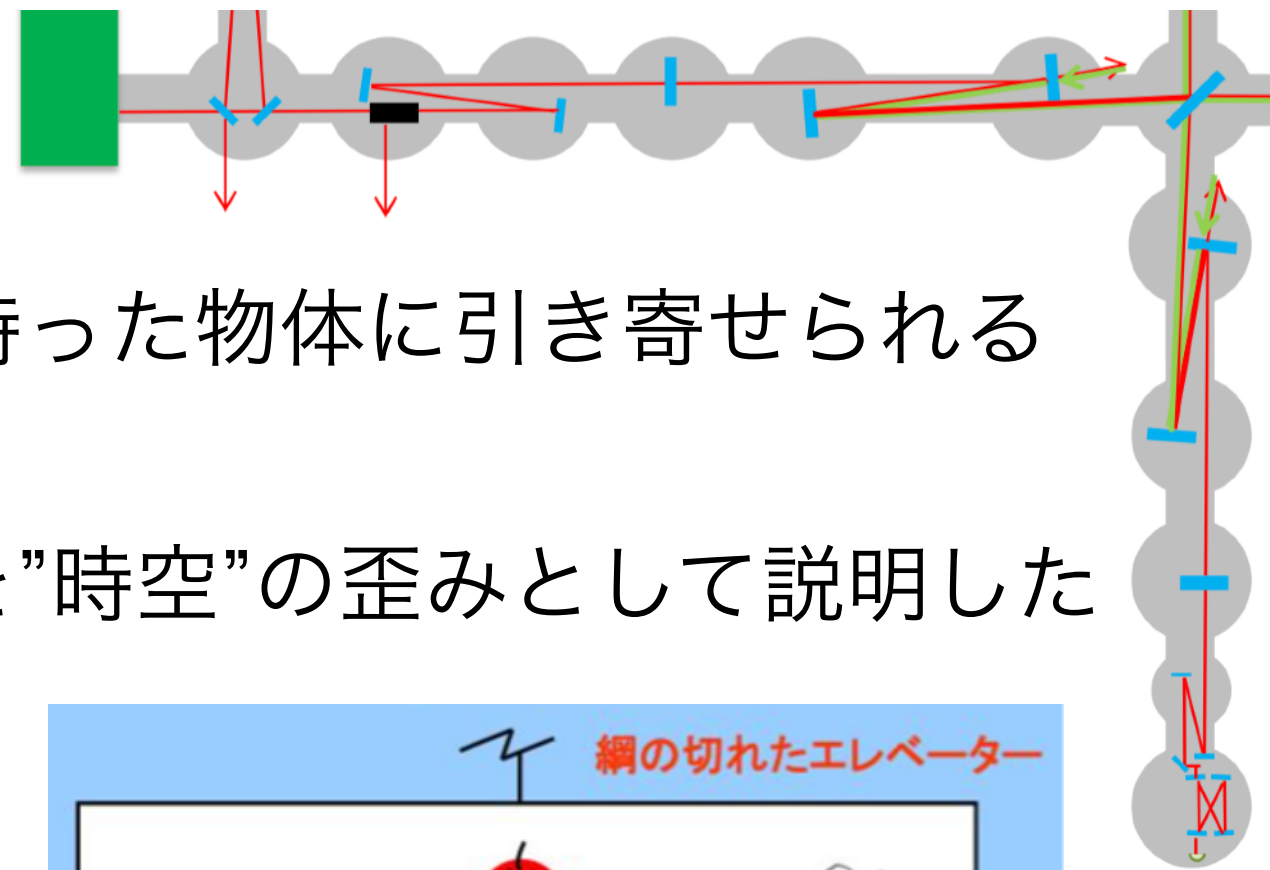
- ・ 重力波と重力波天文学(ちょっとだけ)
- ・ 重力波検出器KAGRA
- ・ 普段、どのようなことを研究しているのか？
- ・ KAGRAでの研究の意義





# 重力とは？

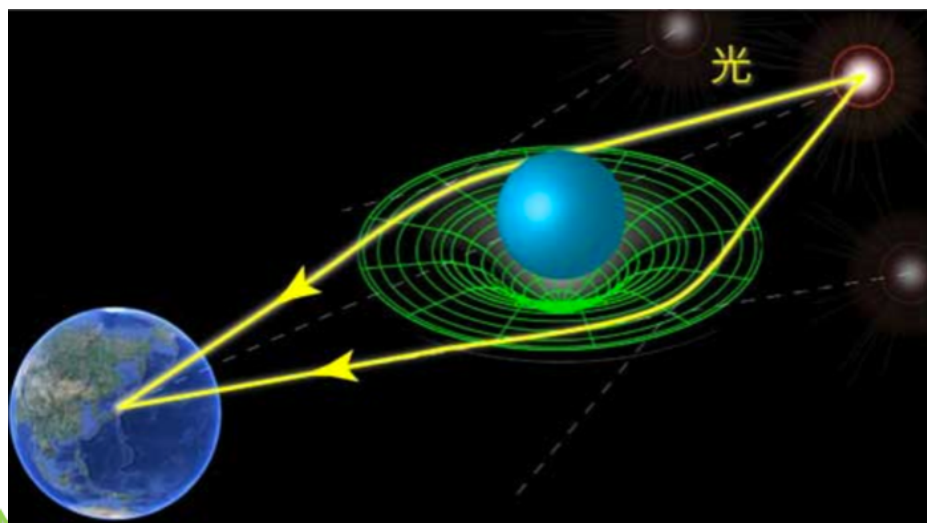
- 質量の持つ物体が、他の質量を持った物体に引き寄せられる現象の呼称。
- アインシュタインは、この現象を”時空”の歪みとして説明した
- >一般相対性理論
  - 時間と空間(3次元)を同時に扱う概念
  - よくトランポリンに例えられる



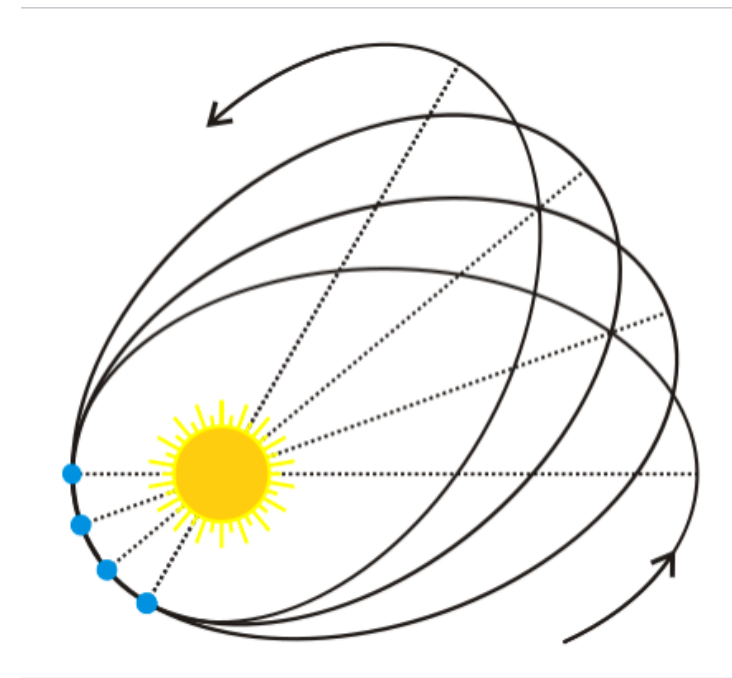


# 時空の揺らぎ??

重力レンズの効果：



水星の近日点移動：



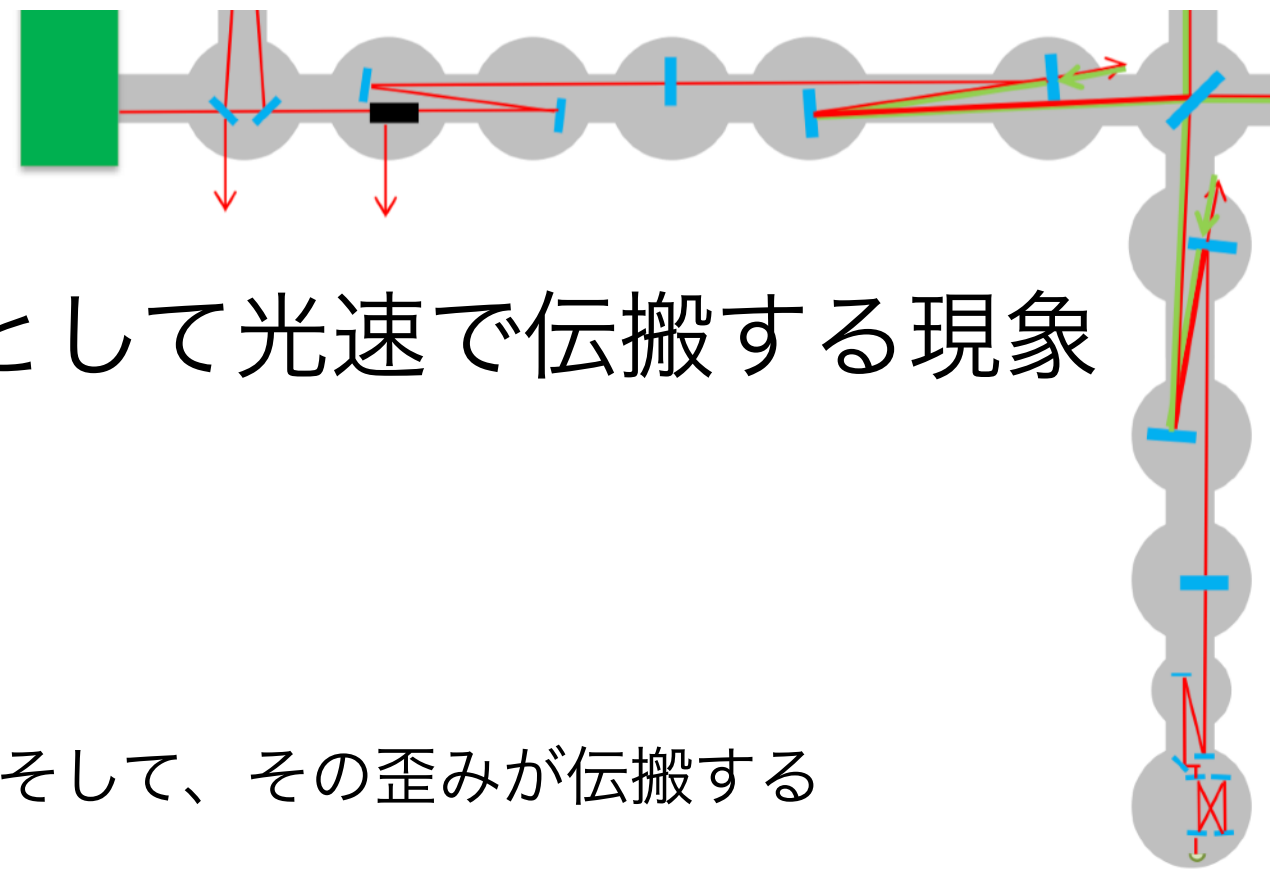
GPSにおける一般相対論による補正：



カーナビやポケモンGO(GPS)の位置計算に入っている

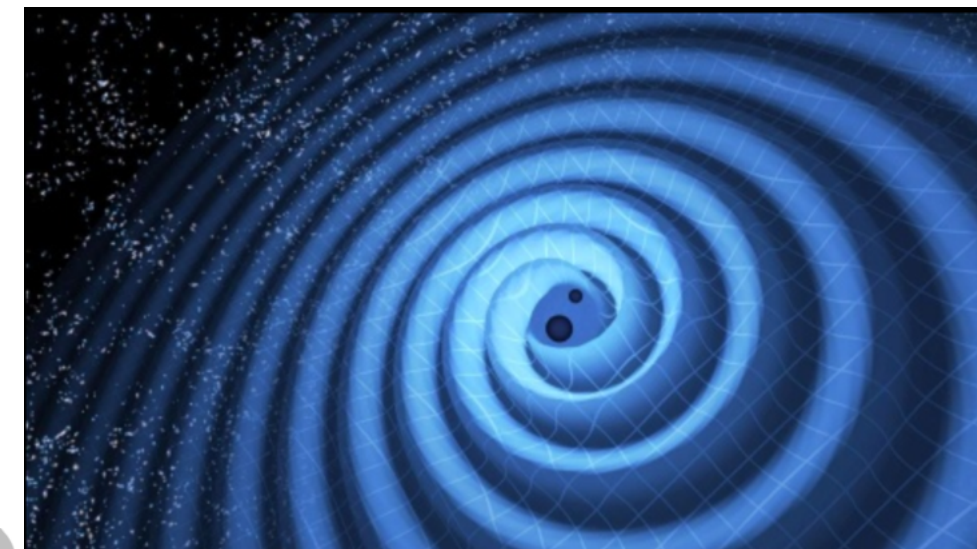
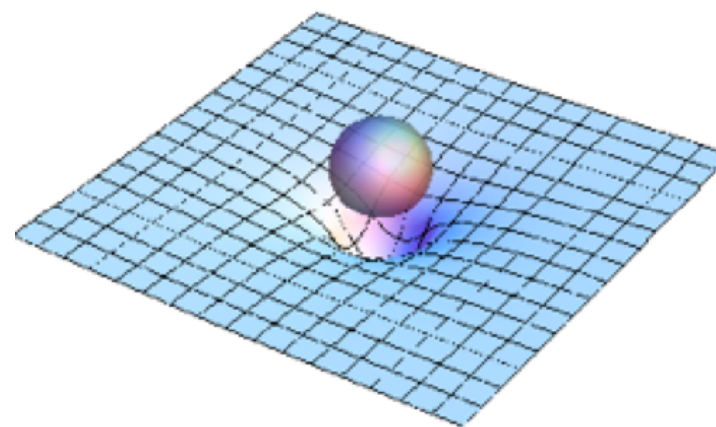
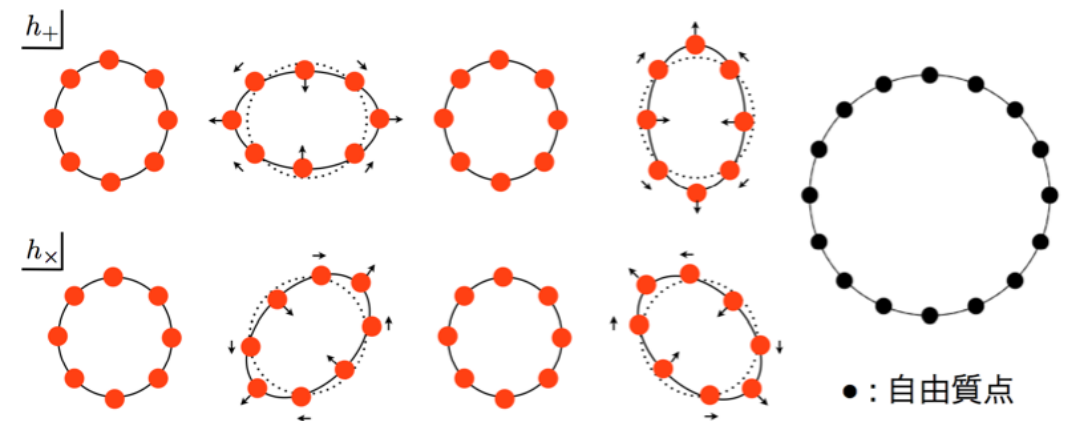


# 重力波とは？



時空の歪みの時間変化が波動として光速で伝搬する現象  
(Wikipedia)

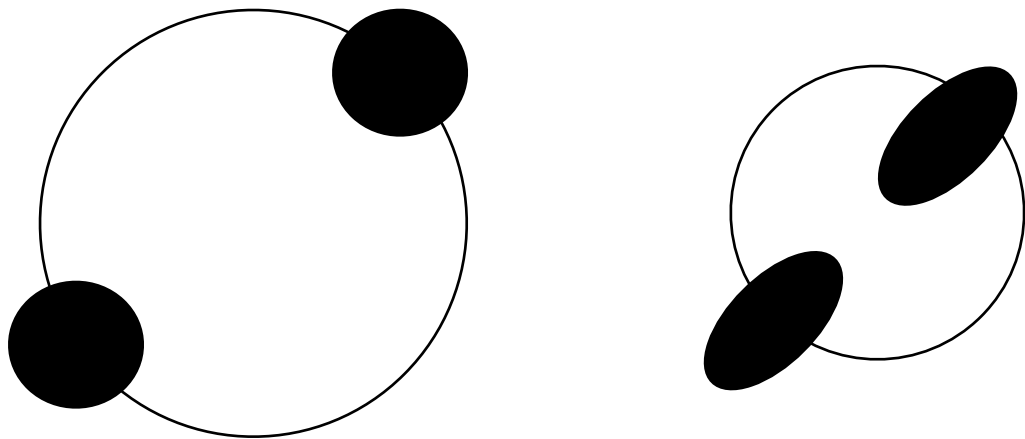
- すごく噛み砕いたイメージとしては  
トランポリンの上で跳ねる。そして、その歪みが伝搬する





# 色々な重力波源

## - コンパクト連星合体

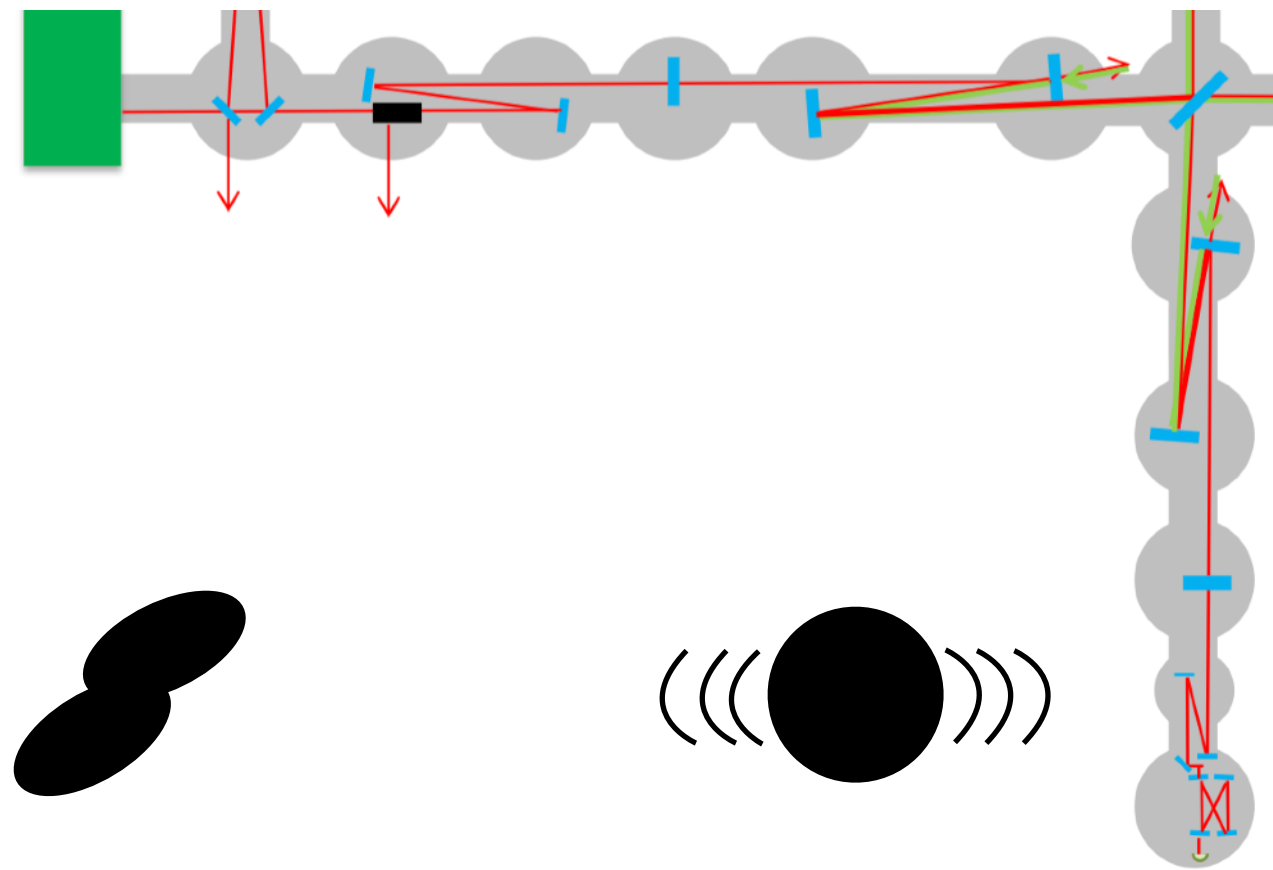


最初はお互いの重力で引っ張り合いながら、重力波を放出。そうすると、どんどんエネルギーを失っていき距離が短くなり、速く回転するようになっていく。波形の予測が可能。

-> **インスパイラル期**

近づいてくると互いの重力のせいで、星が変形する。->潮汐効果

ブラックホールは変形しないが、スピ  
ンが軌道を歪ませる

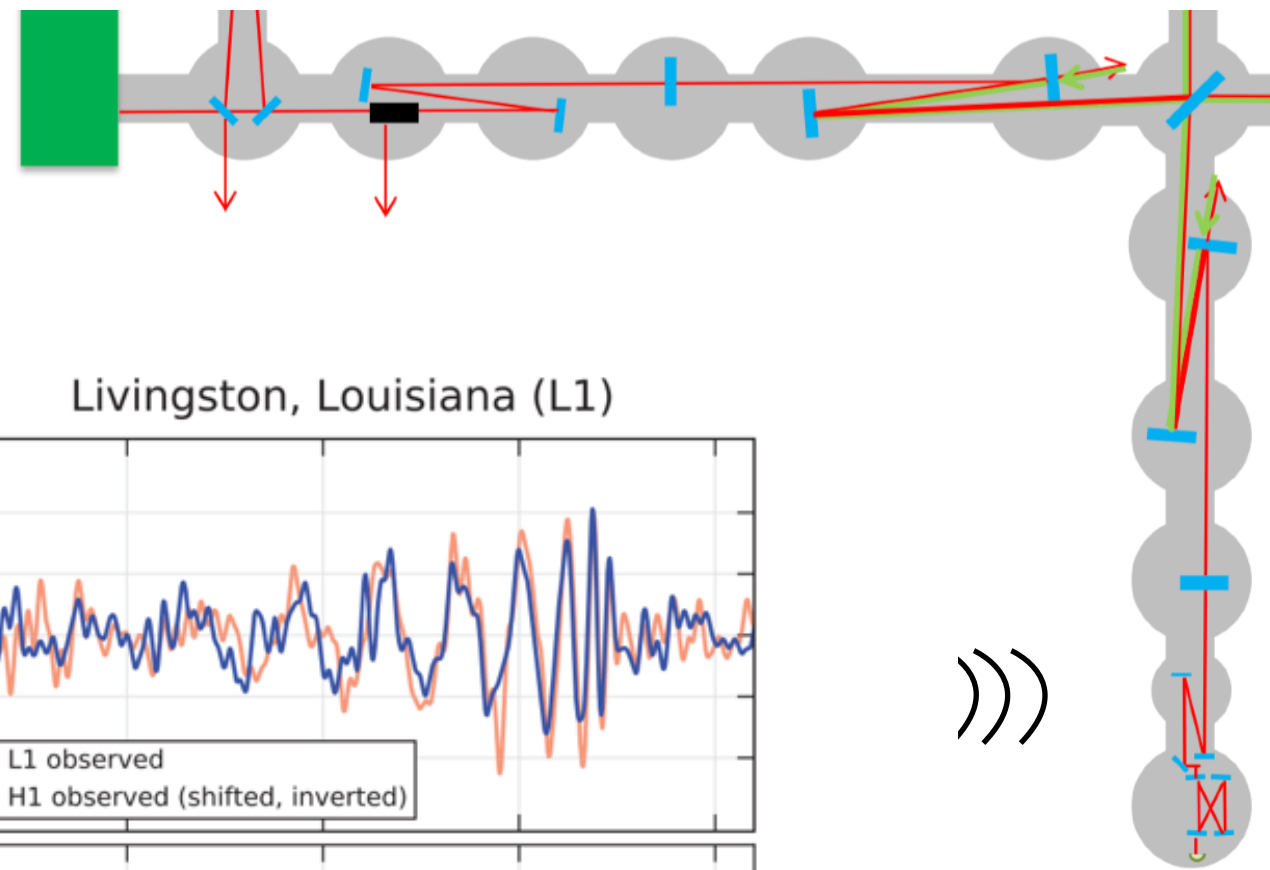


ついに2つの星は合体し、大きな重力波が放出される。その際に合体によっては大量の光が放出されたりが预期されている。-> **連星合体期**

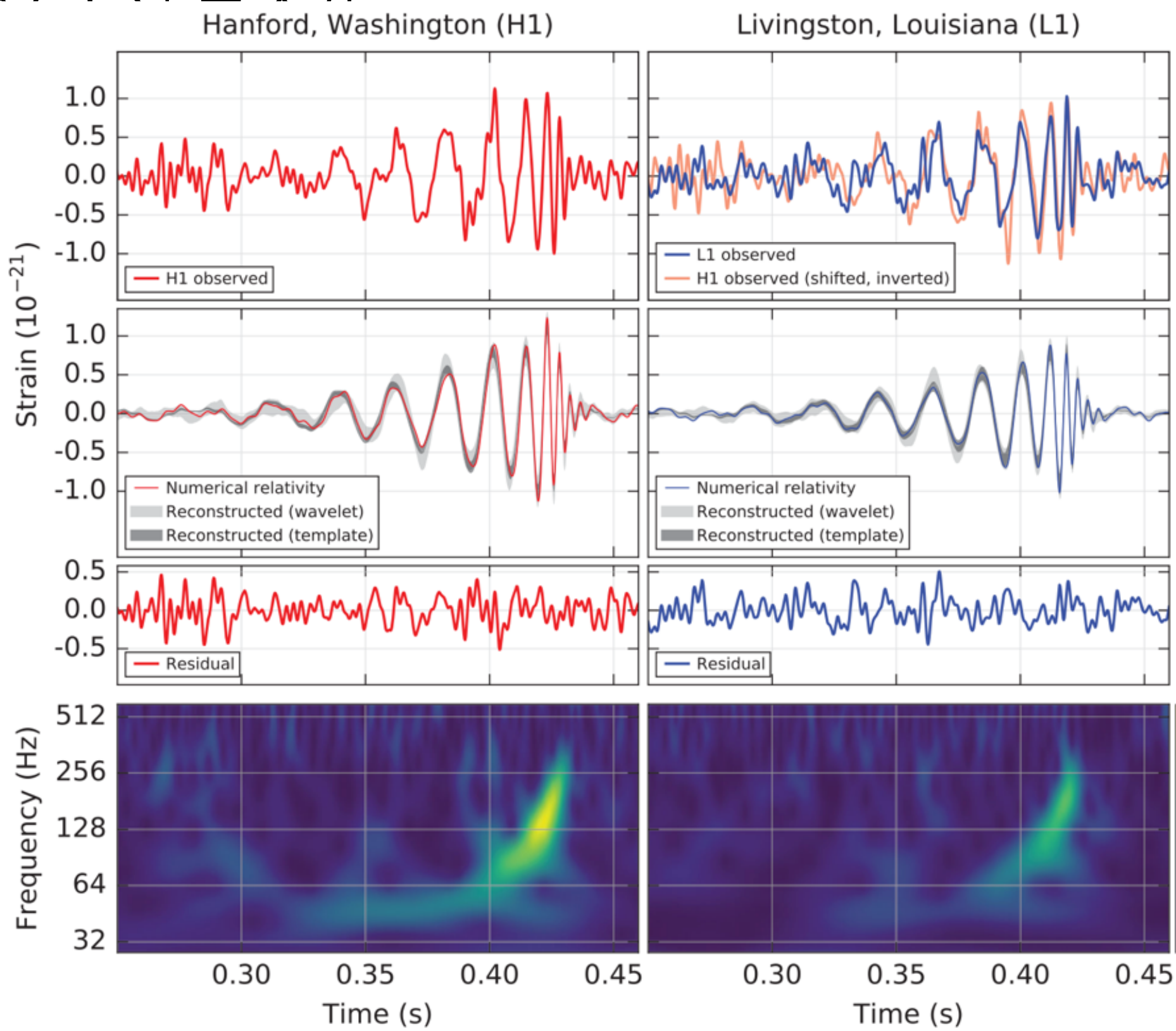
合体後は、ボヨボヨと揺れているとか、ブラックホールになってしまうのか?! など様々な議論が行われている。-> **リングダウン期**



# 色々な重力波源



- コン



)))

重力波  
って  
され  
  
と  
うの  
い

最初  
がら、  
んど  
短くな  
いく。  
->イン  
近づい  
星が多  
ブラッ  
ンが車

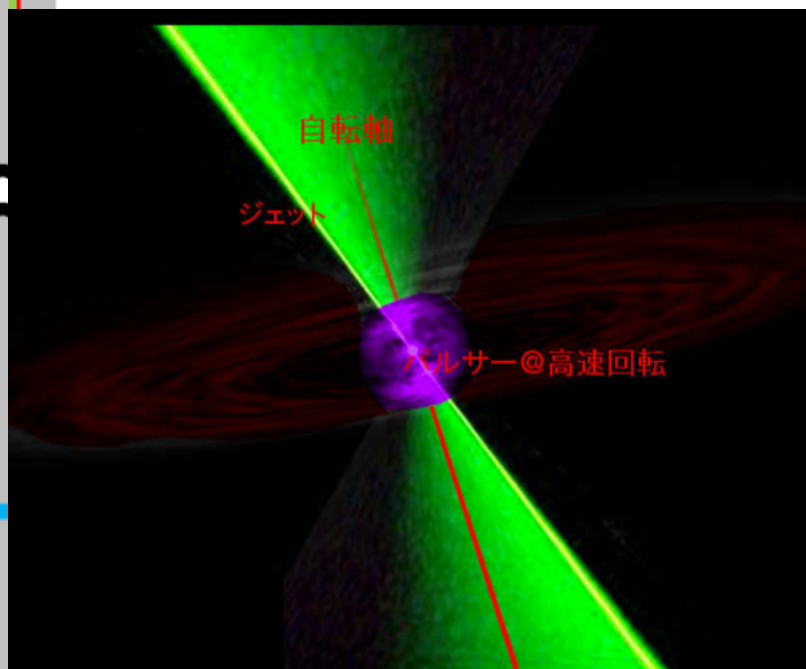
# 色々な重力波源

## - 超新星爆発



- 重たい星がその最期に引き起こす大爆発。
- 大まかな爆発メカニズムは、確立されているが、詳細なメカニズムはマルチメッセンジャー観測が鍵となる
- 爆発後、中心に重たくてコンパクトな天体(ブラックホール or 中性子星)を残す。
- 重力波源の重力波源。

## - 高速回転パルサー

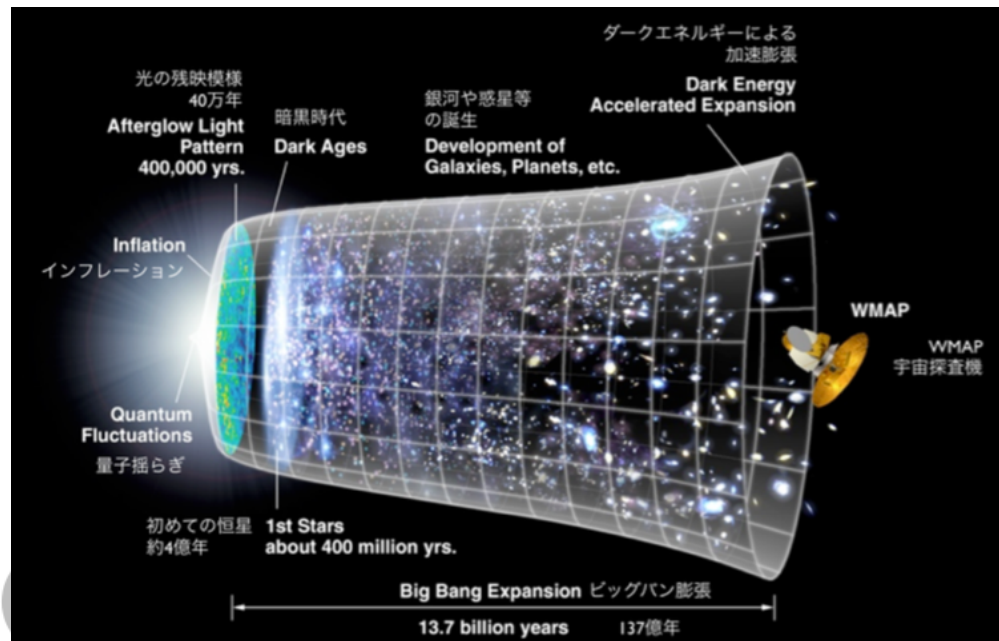


- 中心に高速で回る中性子星があり、ジェットと呼ばれる光を放出している。
  - 地球に到達する光がパルスのように見え、その周期はほとんどの時計よりも正確。
- 中性子星にわずかに山があると重力波源となる
  - 振幅は小さいが、反永続的に放出されているので長時間観測で見えるようになってくる。



# 色々な重力波源

## - 背景重力波



- インフレーション起源の原始重力波含む、様々な方向からランダムに到来する重力波
- 複数の重力波検出器にて相関をとって(同じような波形の波が到来しているのかをチェックするイメージ)観測を目指す。

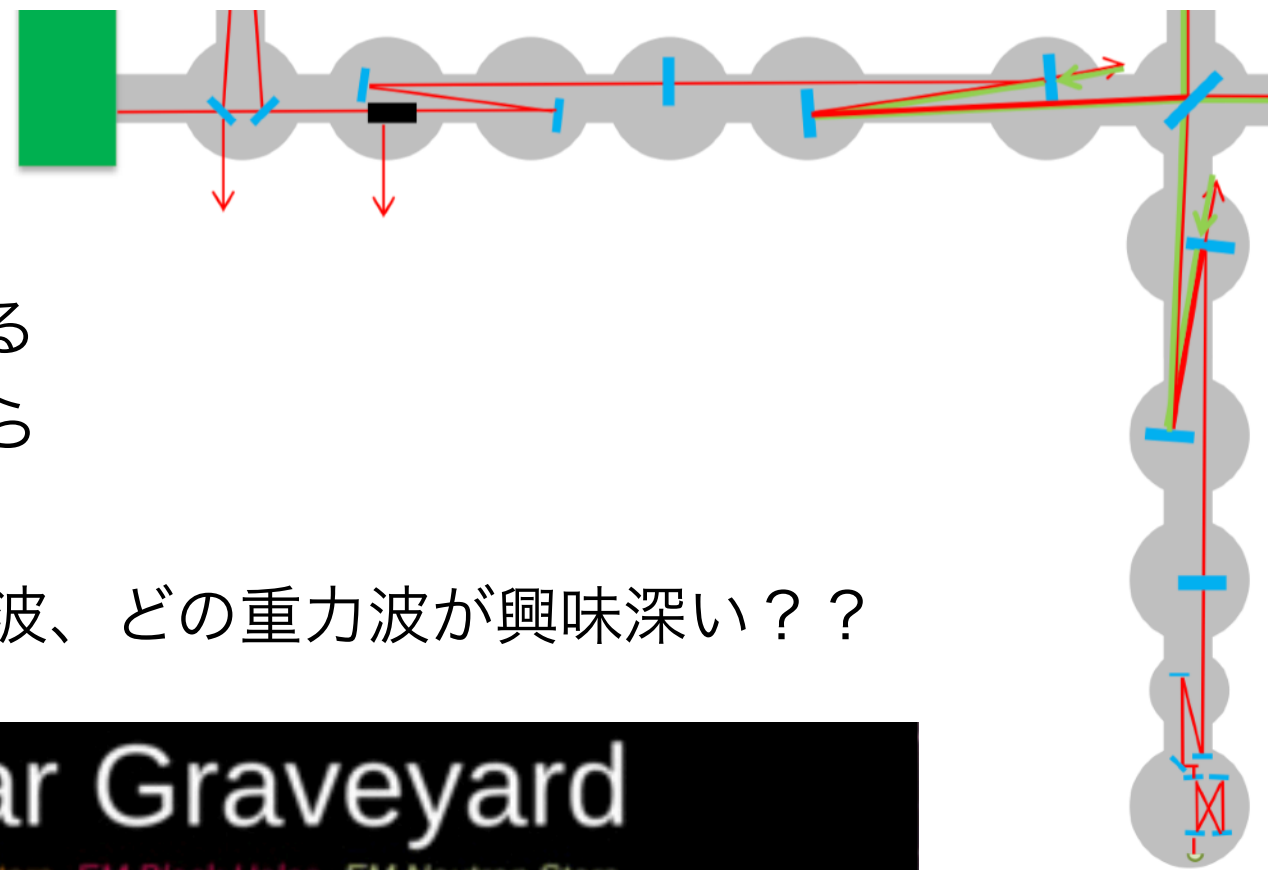
## - その他、unexpected unknown

?

- 光学観測やニュートリノ感想と同様に、重力波観測でも、我々が予想していなかった重力波源からの重力波や、予想せぬ特徴を持った重力波が見つかるかもしれない。全てが予想通りだったらつまらない。



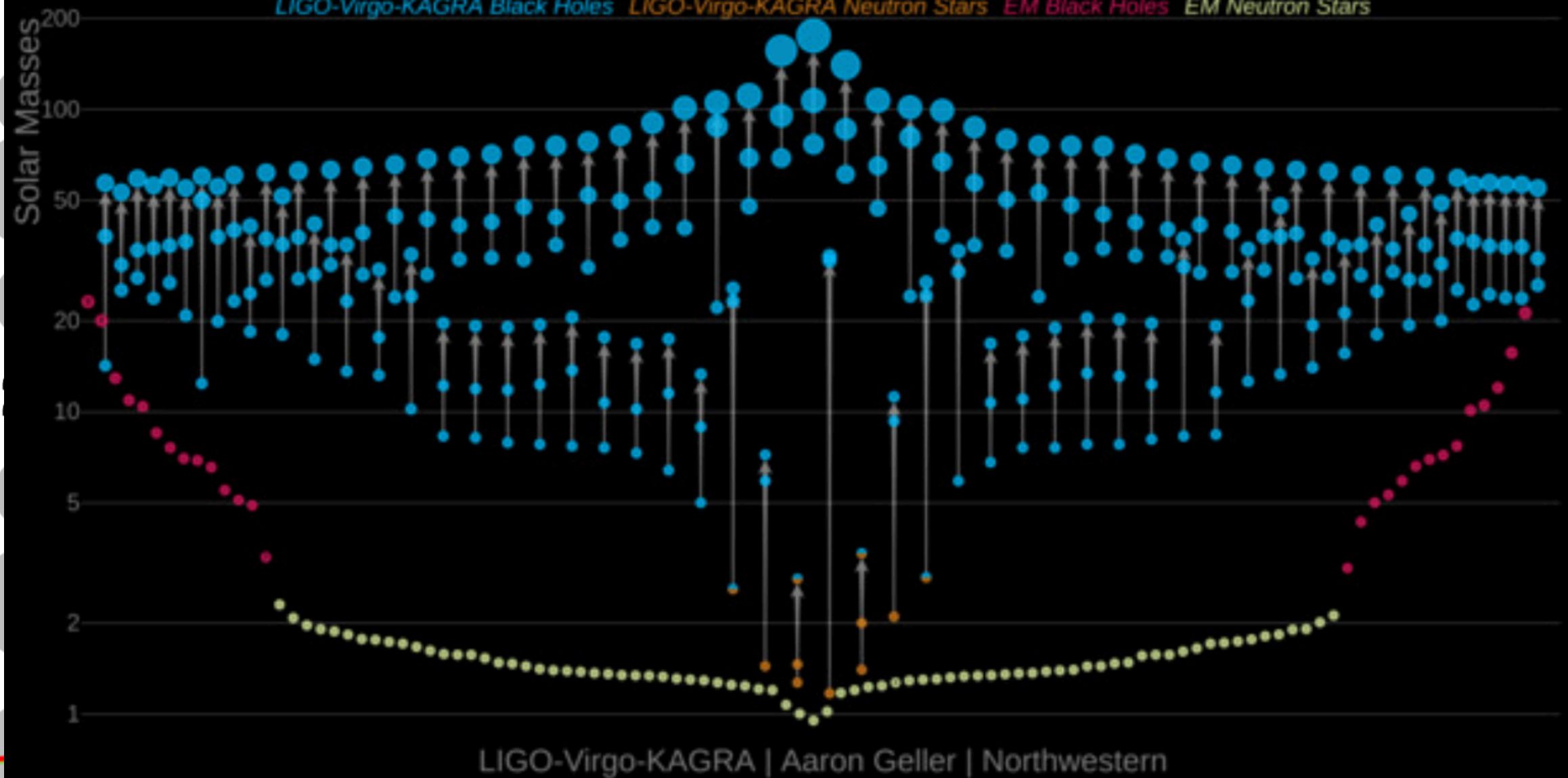
# これまで観測された重力波



- これまで3度の国際共同観測が実施されている
  - 次の国際共同観測O4は2023年3月から
- これまでに90個の重力波が観測されている
  - すべてコンパクト連星合体からの重力波、どの重力波が興味深い??

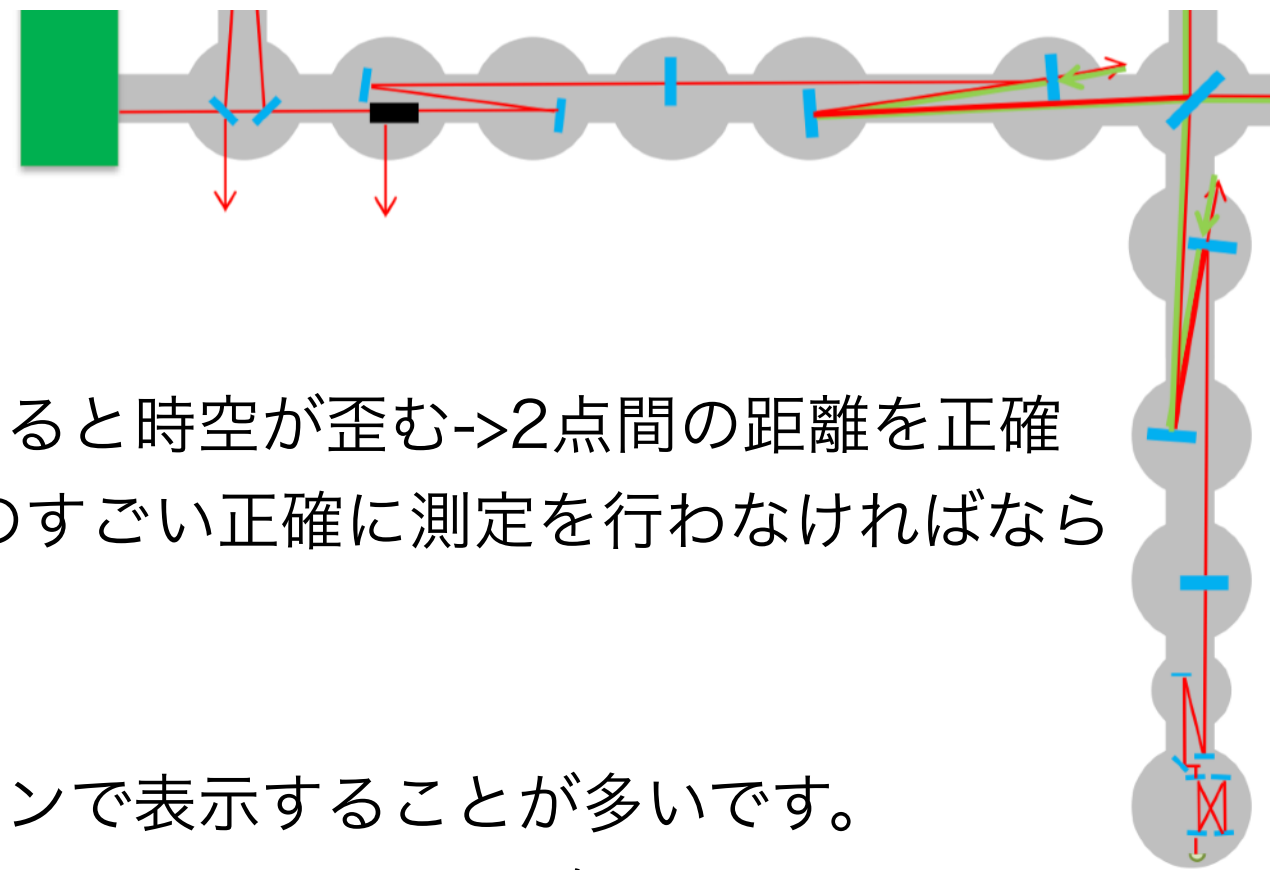
## Masses in the Stellar Graveyard

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



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

# 重力波をとらえる



- 最初のほうで説明した通り、重力波が到来すると時空が歪む→2点間の距離を正確にはかることにより観測できる。ただし、ものすごい正確に測定を行わなければならない。

- 重力波の大きさを示すのに通常振幅ストレインで表示することが多いです。  
- これはLメートルの物差しが何メートル縮むかというのを示す無次元量です。

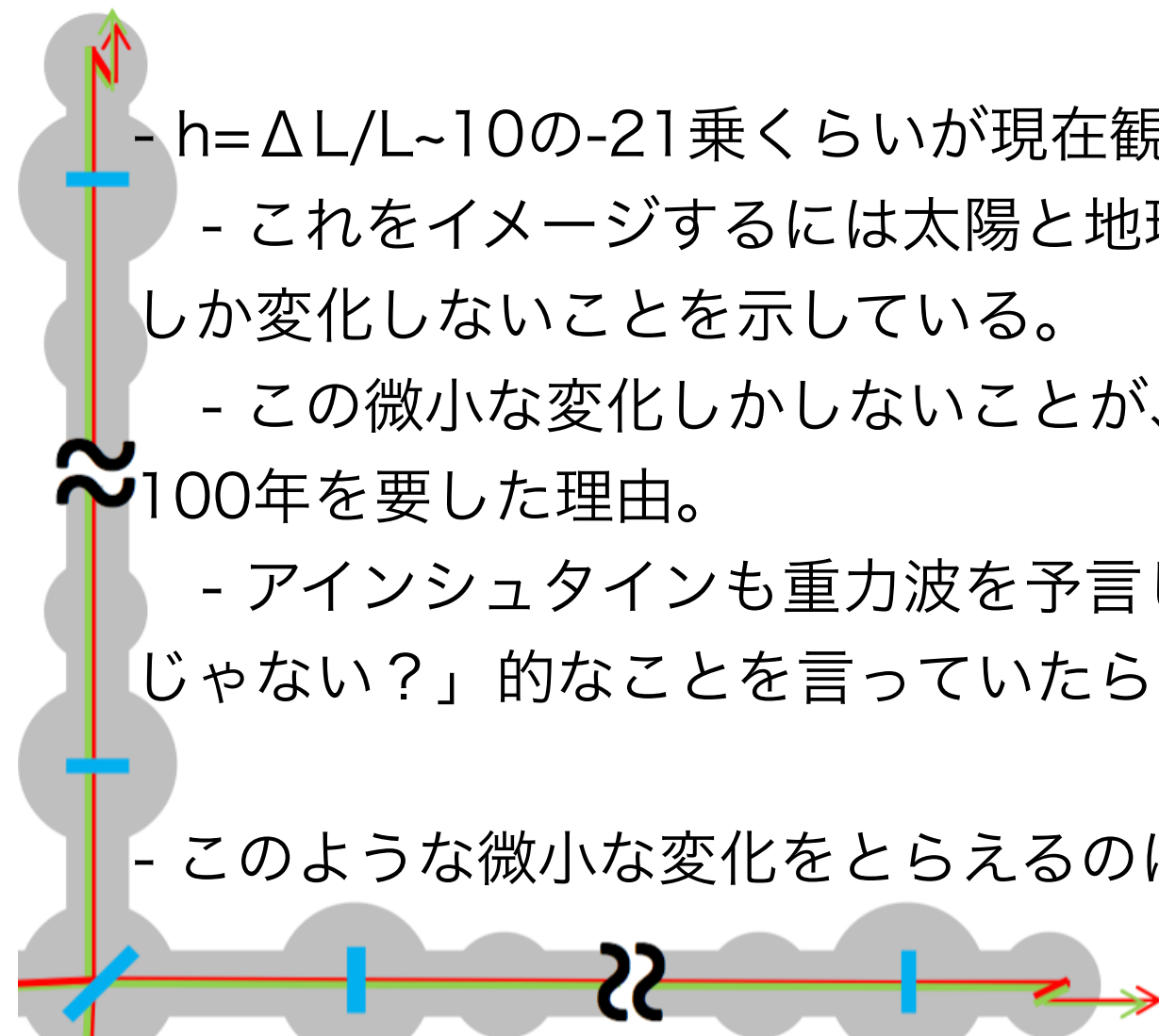
-  $h = \Delta L / L \sim 10^{-21}$  くらいが現在観測可能な重力波の大きさ。

- これをイメージするには太陽と地球の距離が原子核1個分変化するくらいの長さしか変化しないことを示している。

~ この微小な変化しかしないことが、重力波が予言されてから発見されるまでに  
~ 100年を要した理由。

- アインシュタインも重力波を予言した際に、「こんな微小な変化観測するの無理じゃない？」的なことを言っていたらしいです。

- このような微小な変化をとらえるのにはどういう検出器を作ればいいのでしょうか？



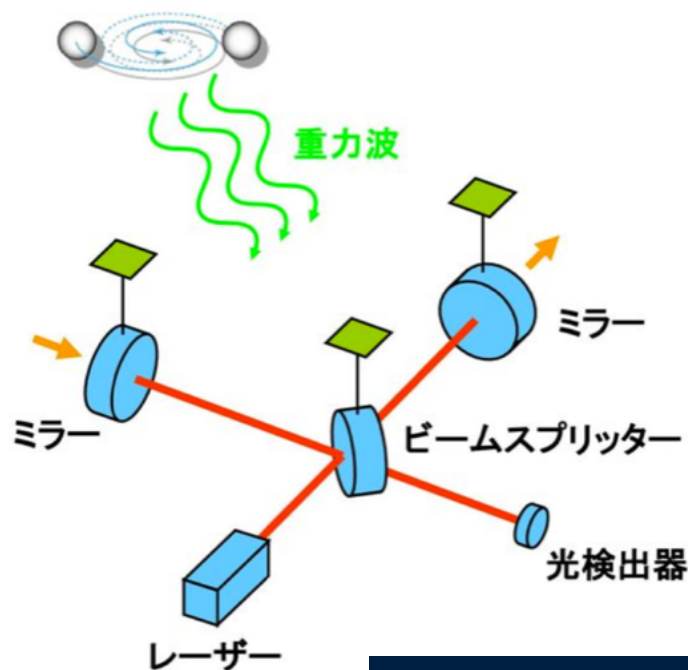




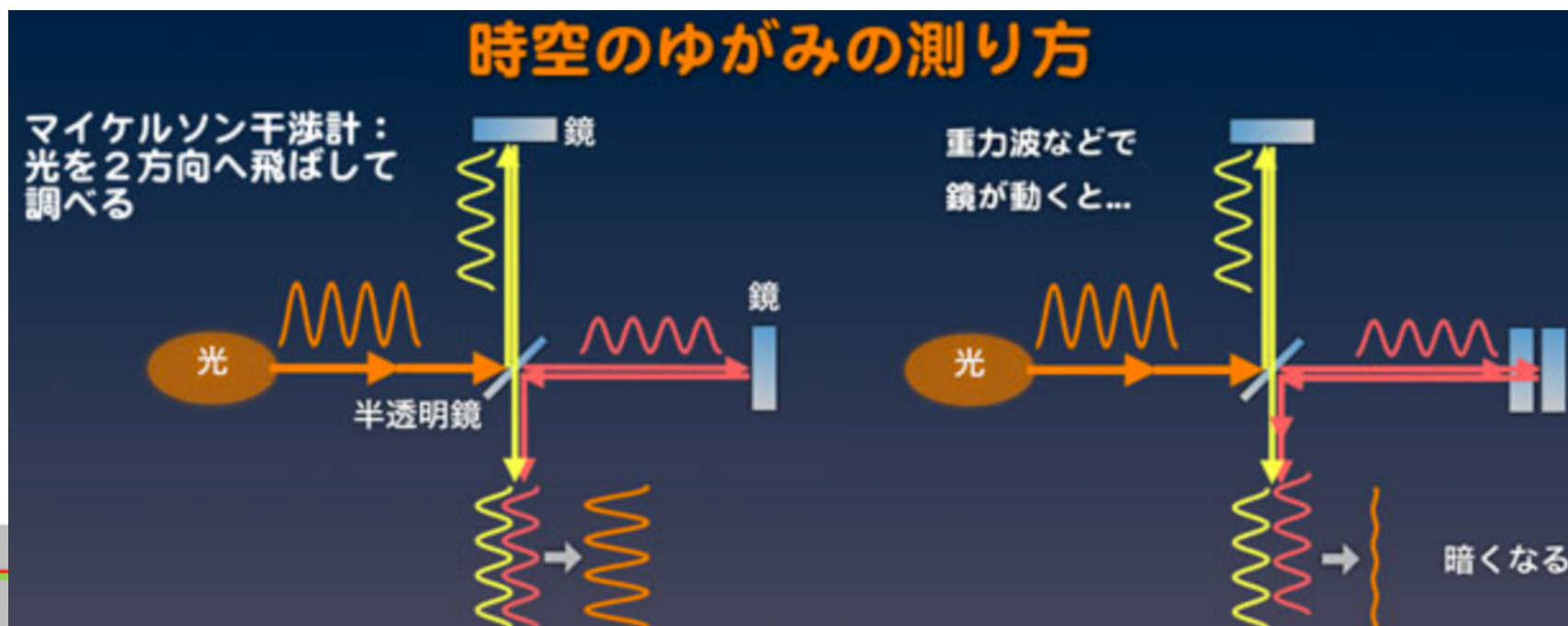
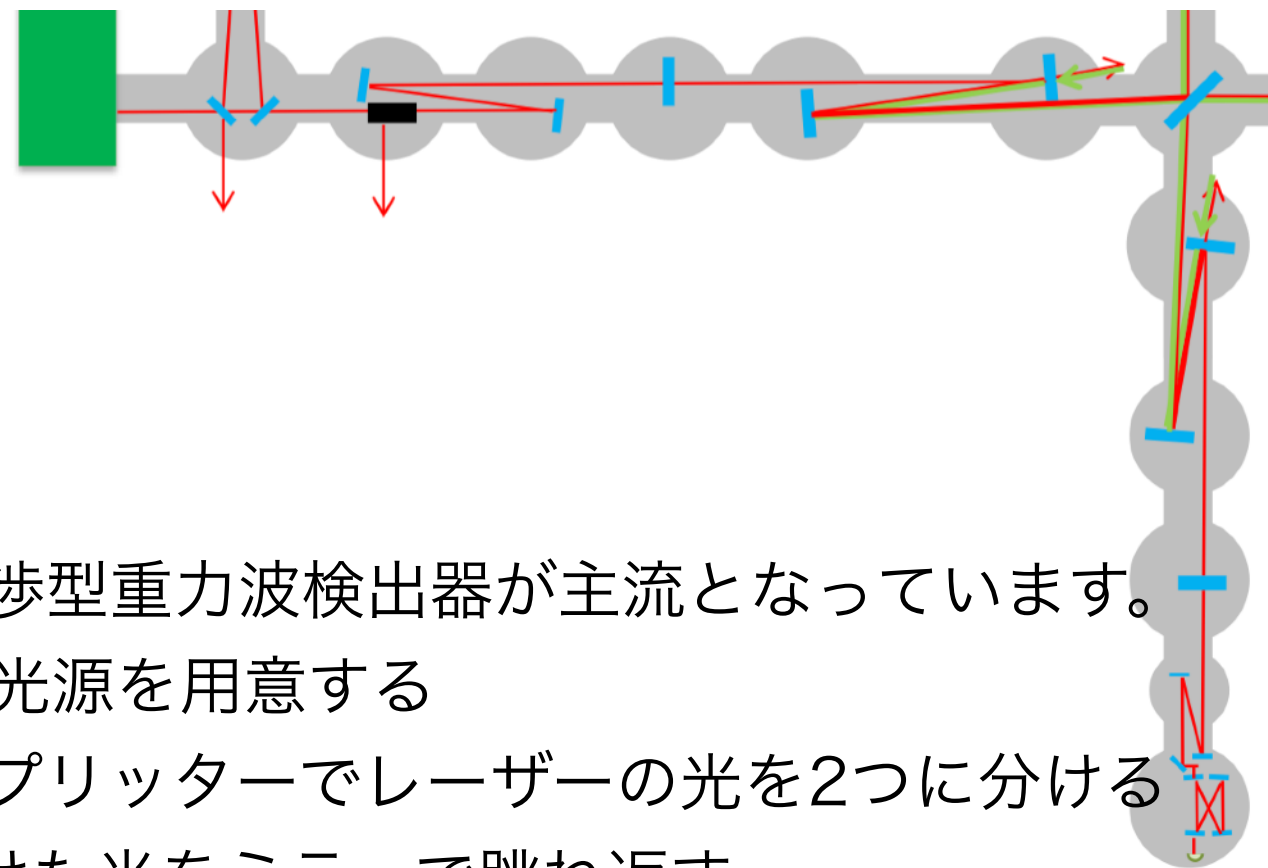
# 重力波をとらえる

## 干渉型重力波検出器

### レーザー干渉計による重力波検出



- 現在では干渉型重力波検出器が主流となっています。
  - レーザー光源を用意する
  - ビームスプリッターでレーザーの光を2つに分ける
  - 2つに分けた光をミラーで跳ね返す
  - かえってきた光を光検出器で観測する
- すると、2つの光の干渉の具合によって、2つの光の通ってきた距離の差を観測することができます。

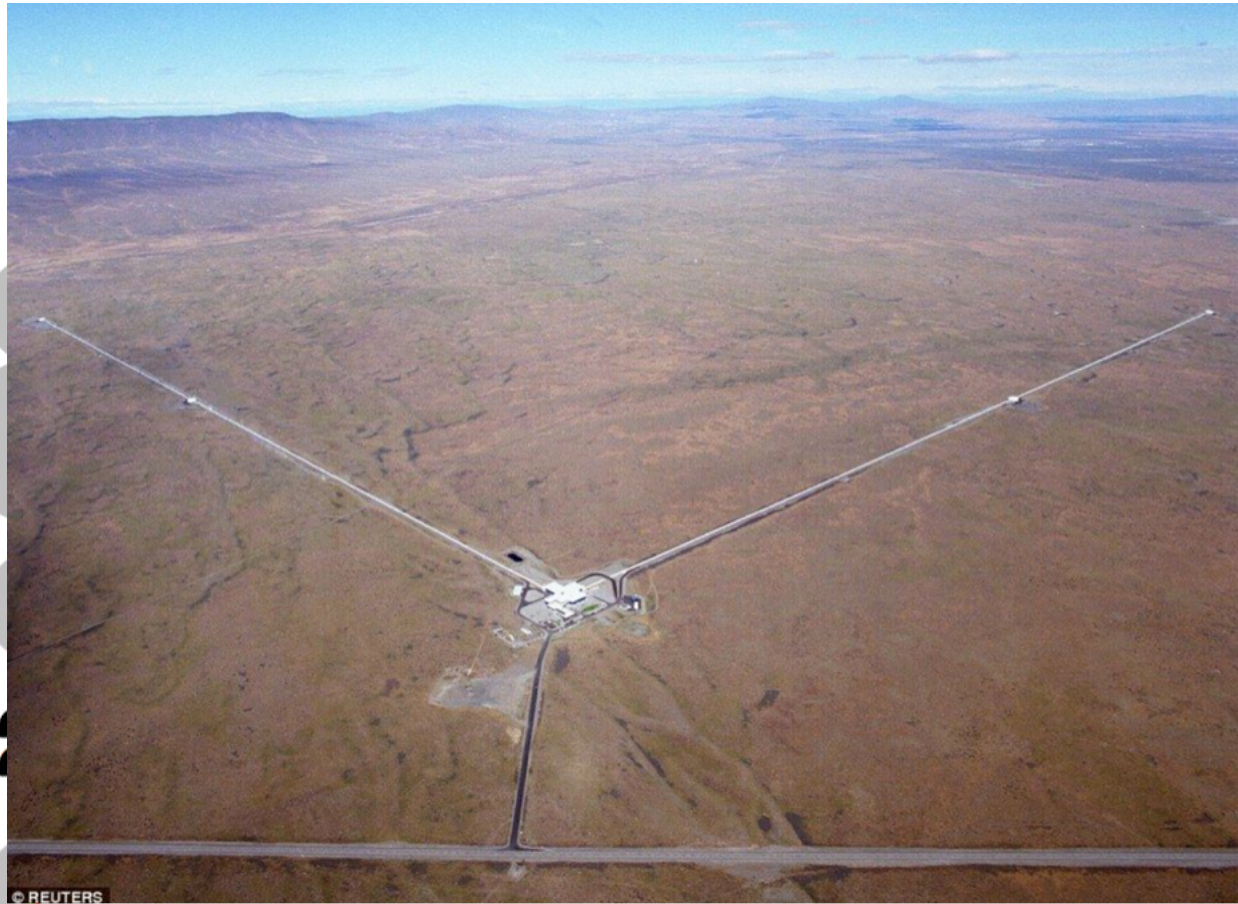




# 世界の重力波検出器

## LIGO

- アメリカに設置されている2台の検出器(Large Interferometer Gravitational-Wave Observatory)



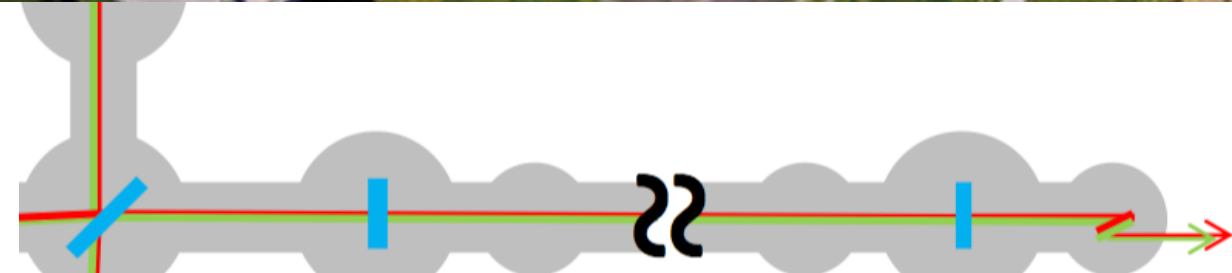
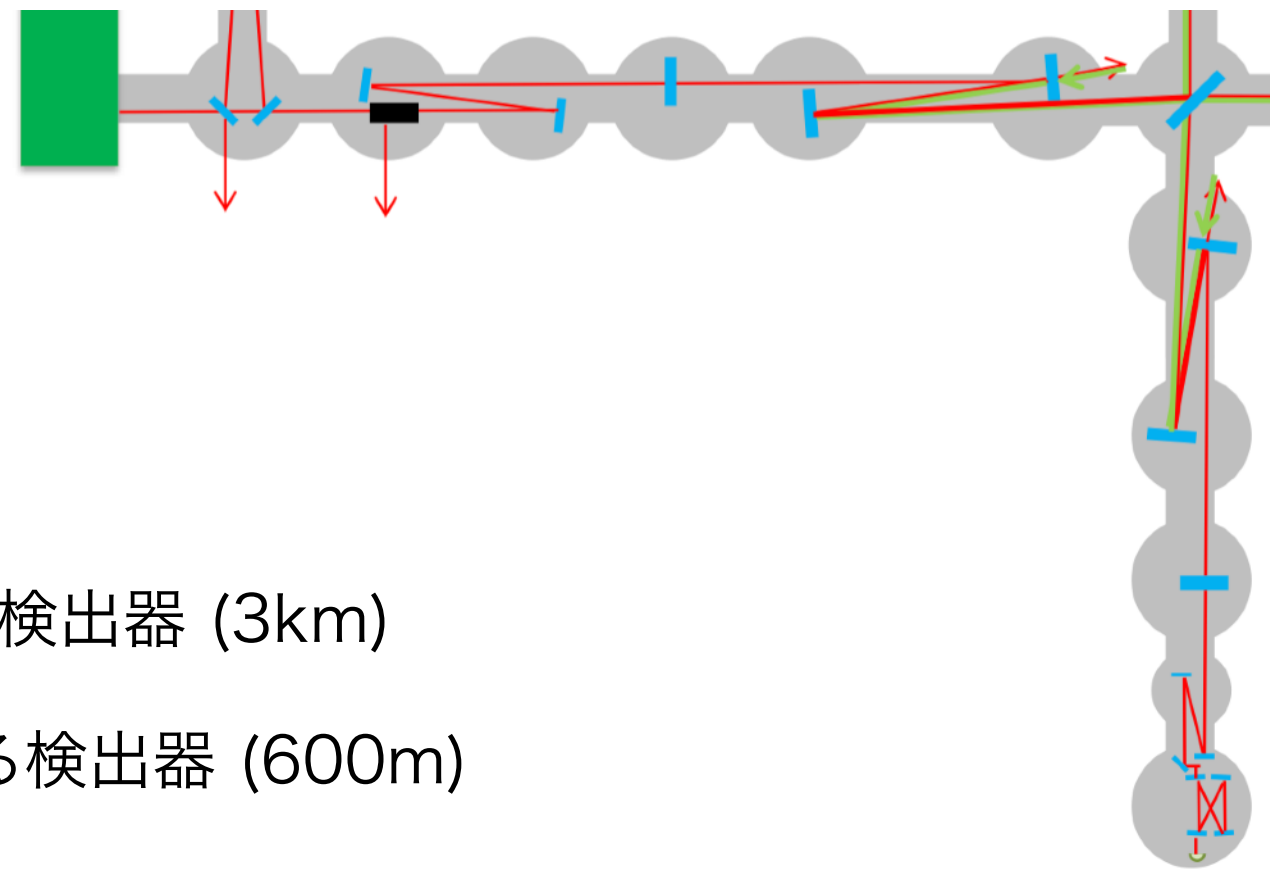
- ひとつは砂漠(Hanford)、もうひとつはジャングル(Livingston)に設置されている。



# 世界の重力波検出器

## Virgo, GEO

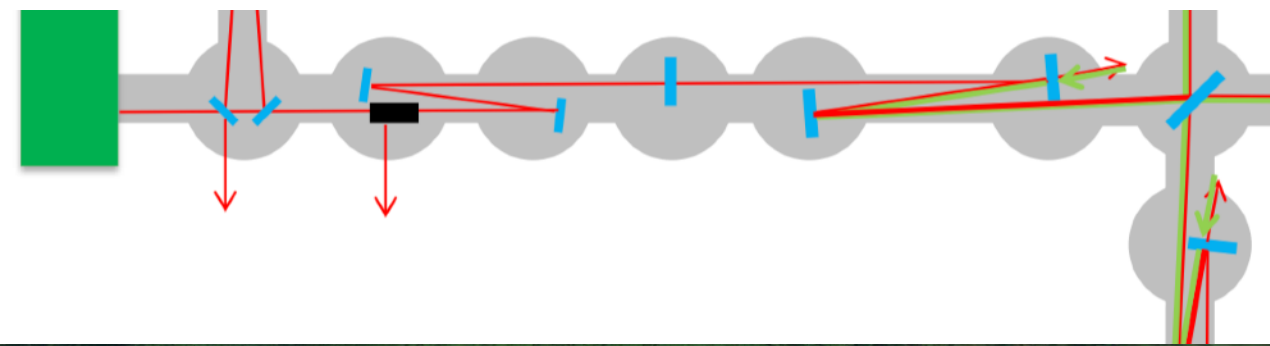
- Virgo : イタリアのピサ郊外に設置されている検出器 (3km)
- GEO600 : ドイツハノーバーに設置されている検出器 (600m)







# 世界の重力波検出器



## KAGRA

Kamioka Gravitational wave detector

(岐阜県飛騨市神岡町)



- 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA
- 岐阜県 神岡鉱山地下に設置
- 片腕3kmのL字型レーザー干渉計
- 低温鏡と地下建設
- 次回の共同観測運転(O4)に向けて干渉計アップグレード作業中

## 地下 (山の中)

池ノ山  
(標高1368m)

に建設

KAGRA 研究棟  
(茂住)

3 km

3 km

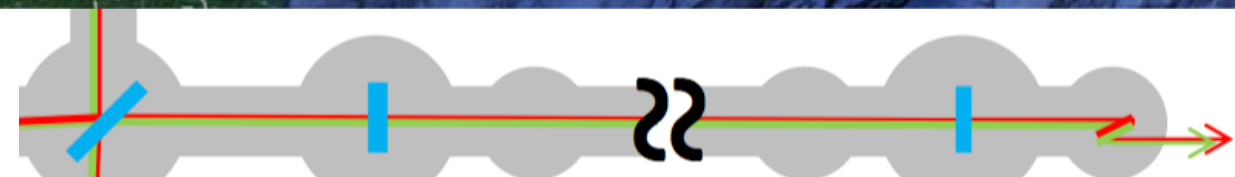
入口

©Google



## トンネル内部 (X-arm)

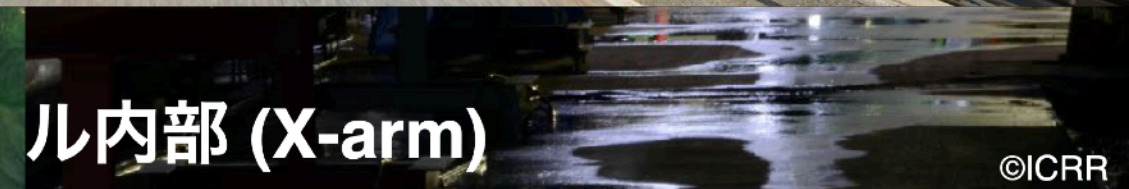
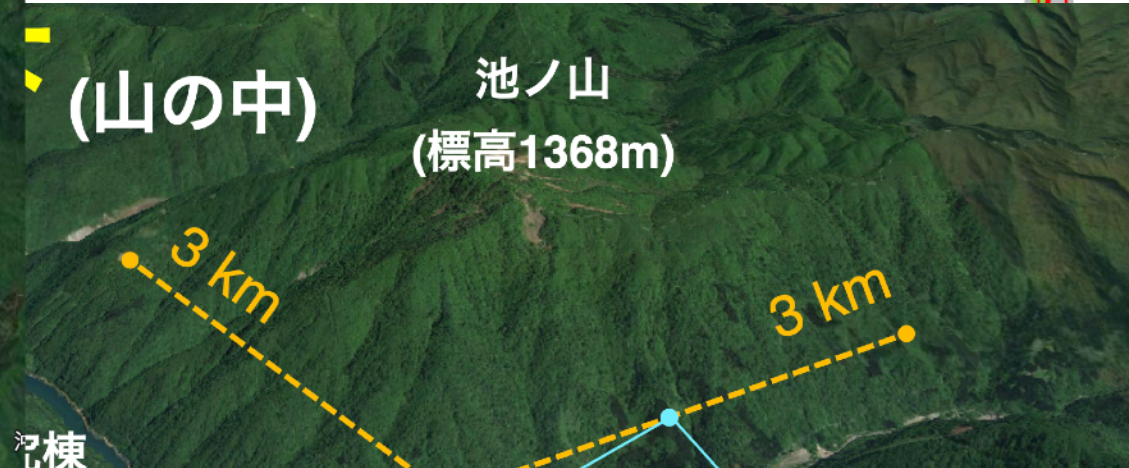
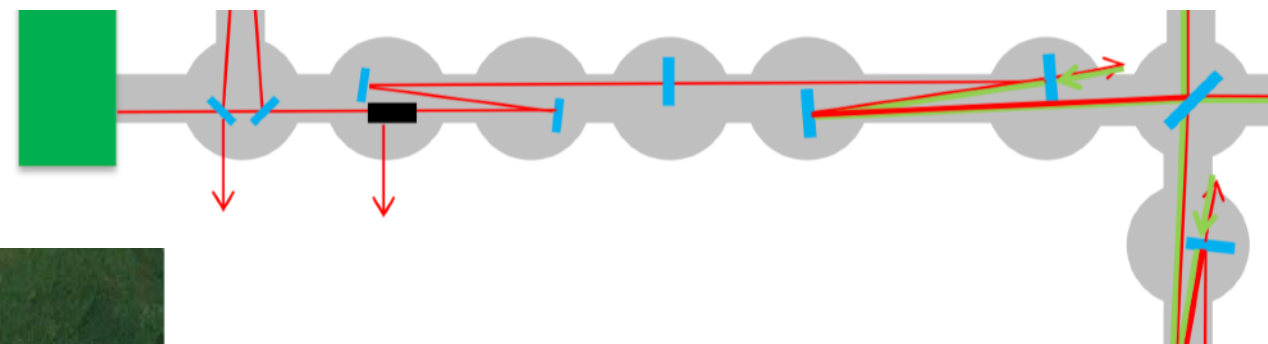
©ICRR







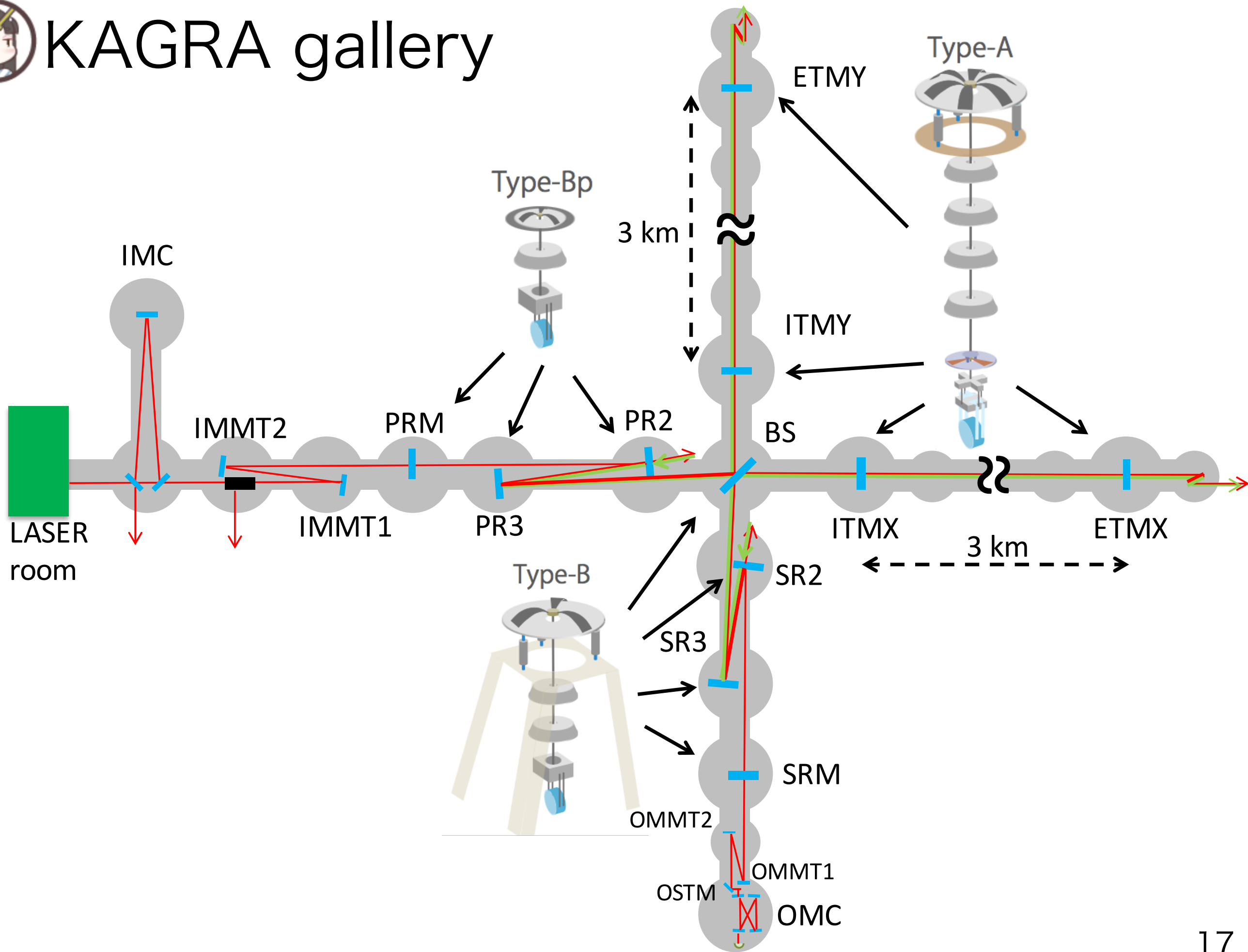
# 世界の重力波検出器







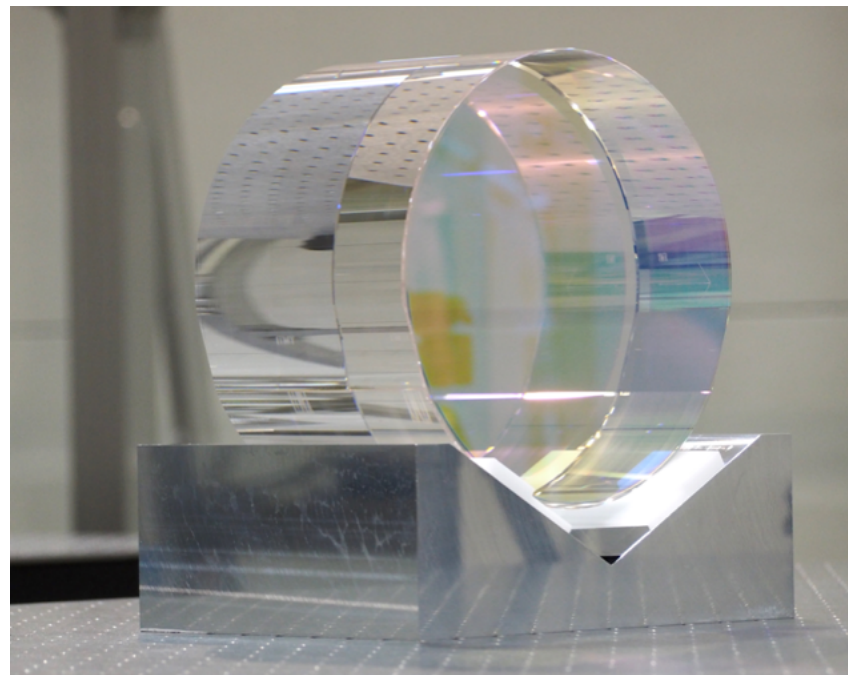
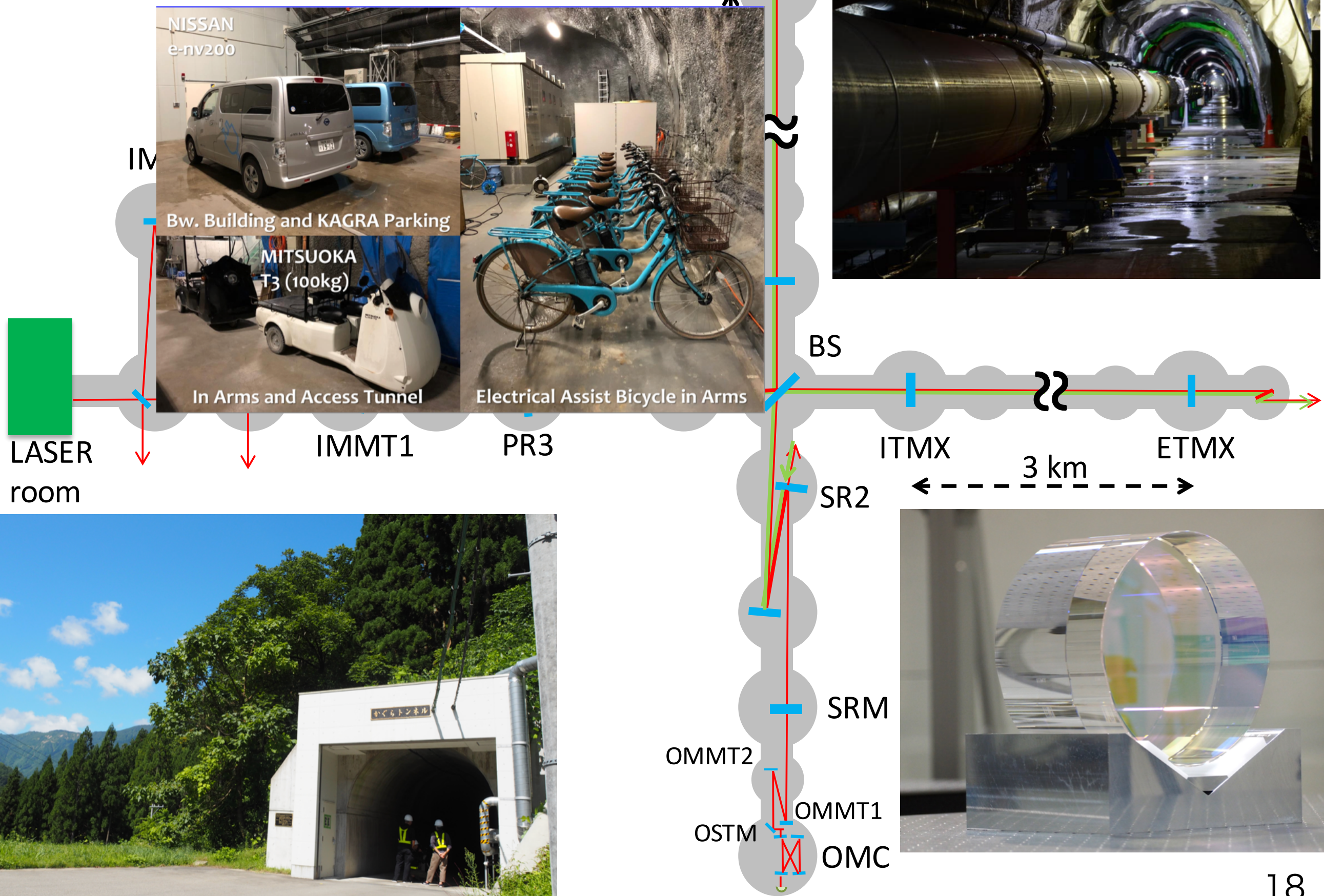
# KAGRA gallery







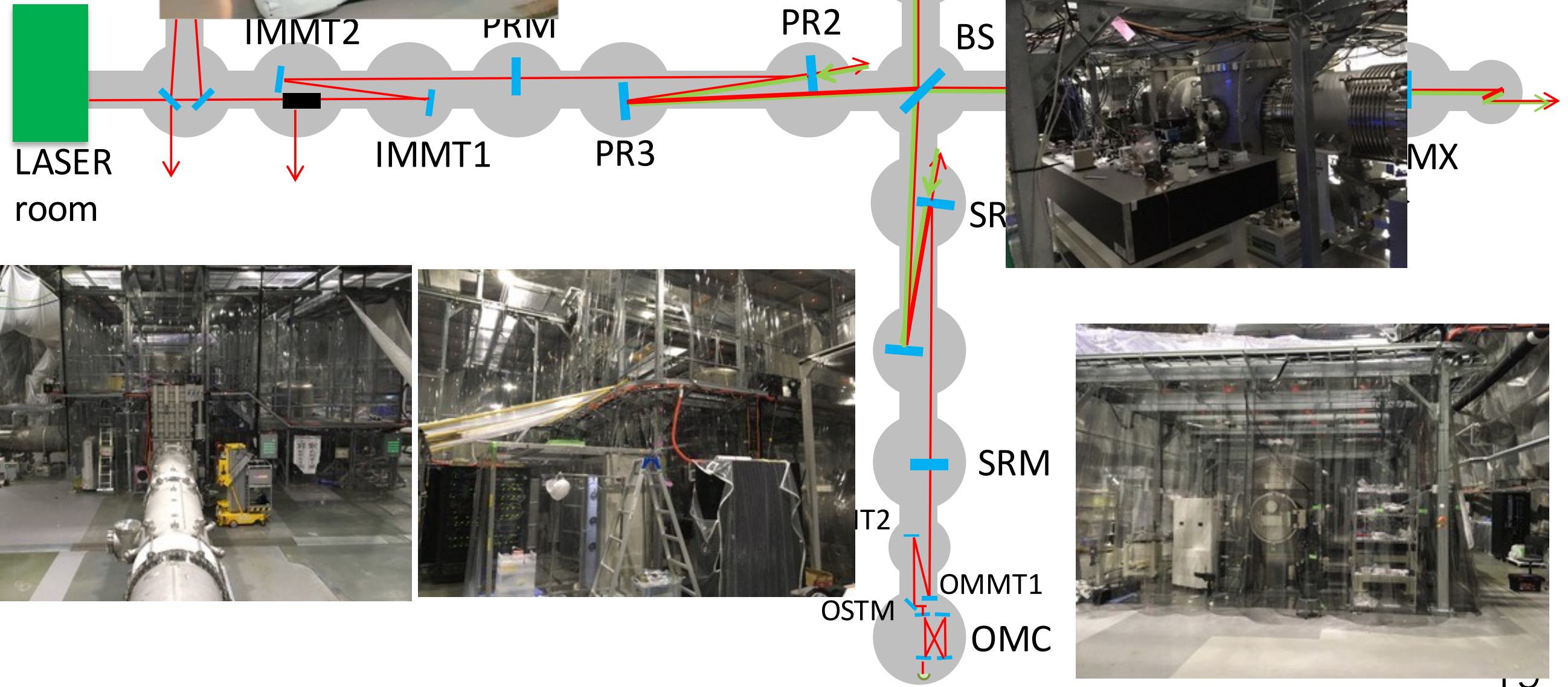
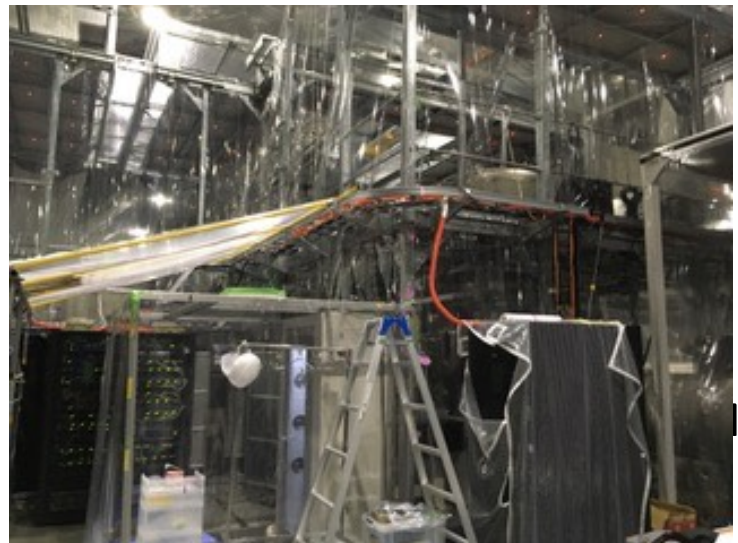
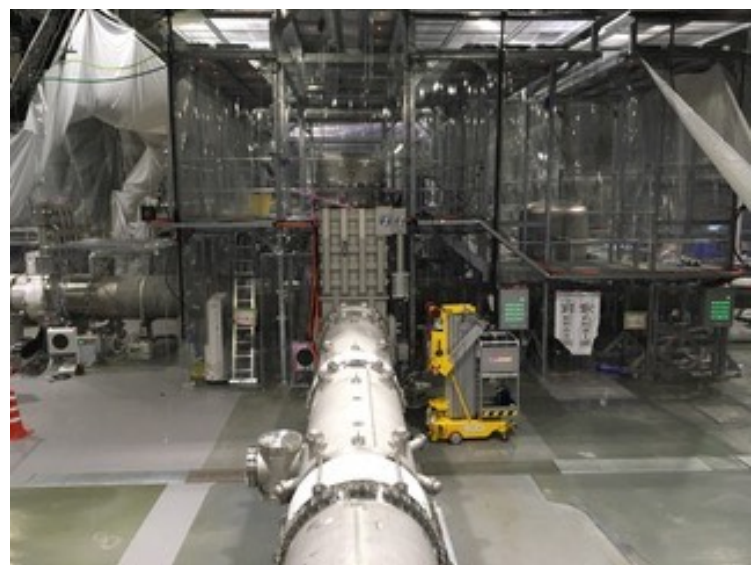
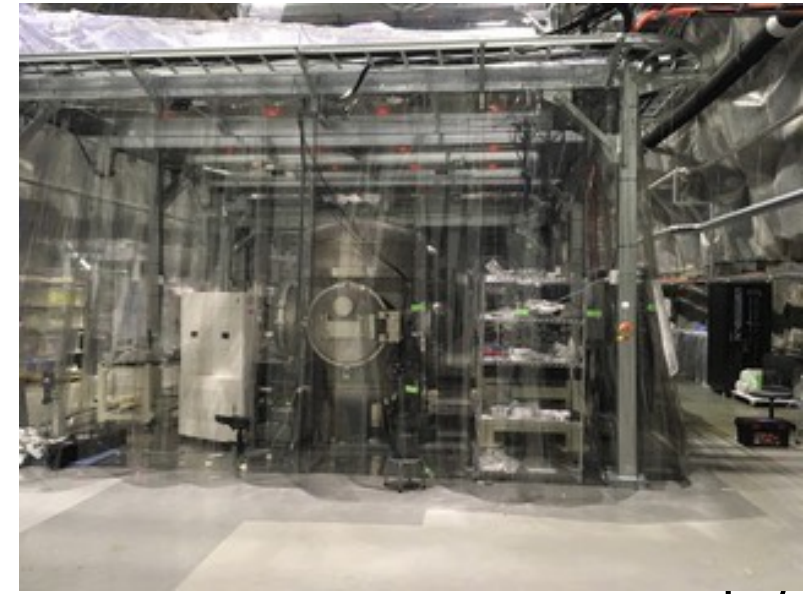
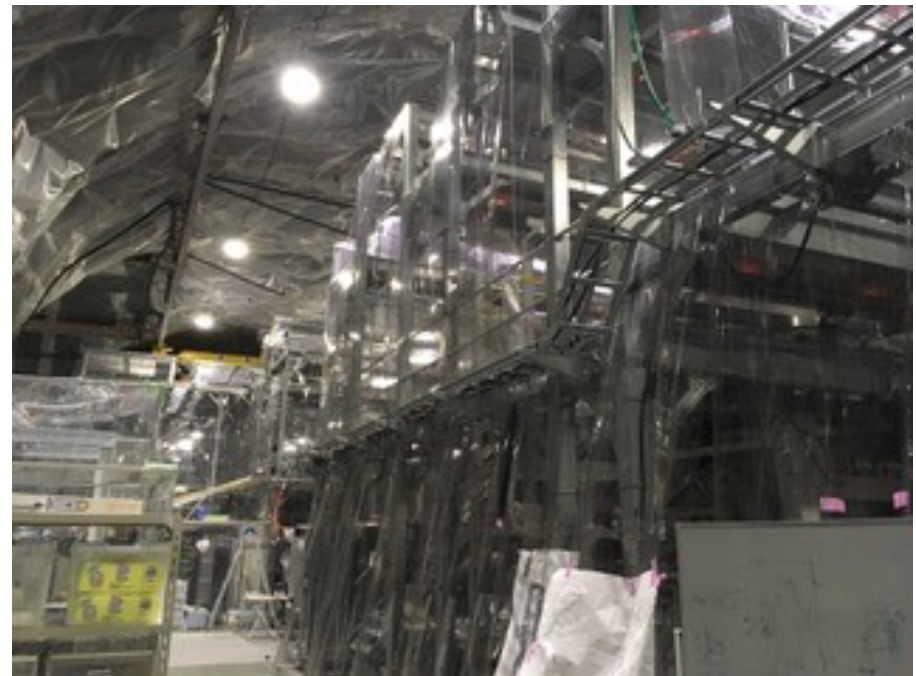
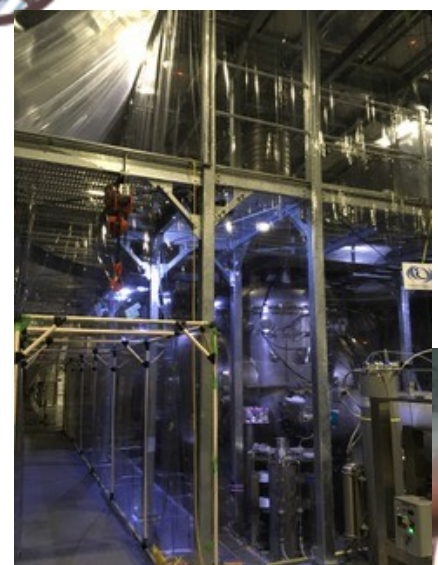
# KAGRA gallery





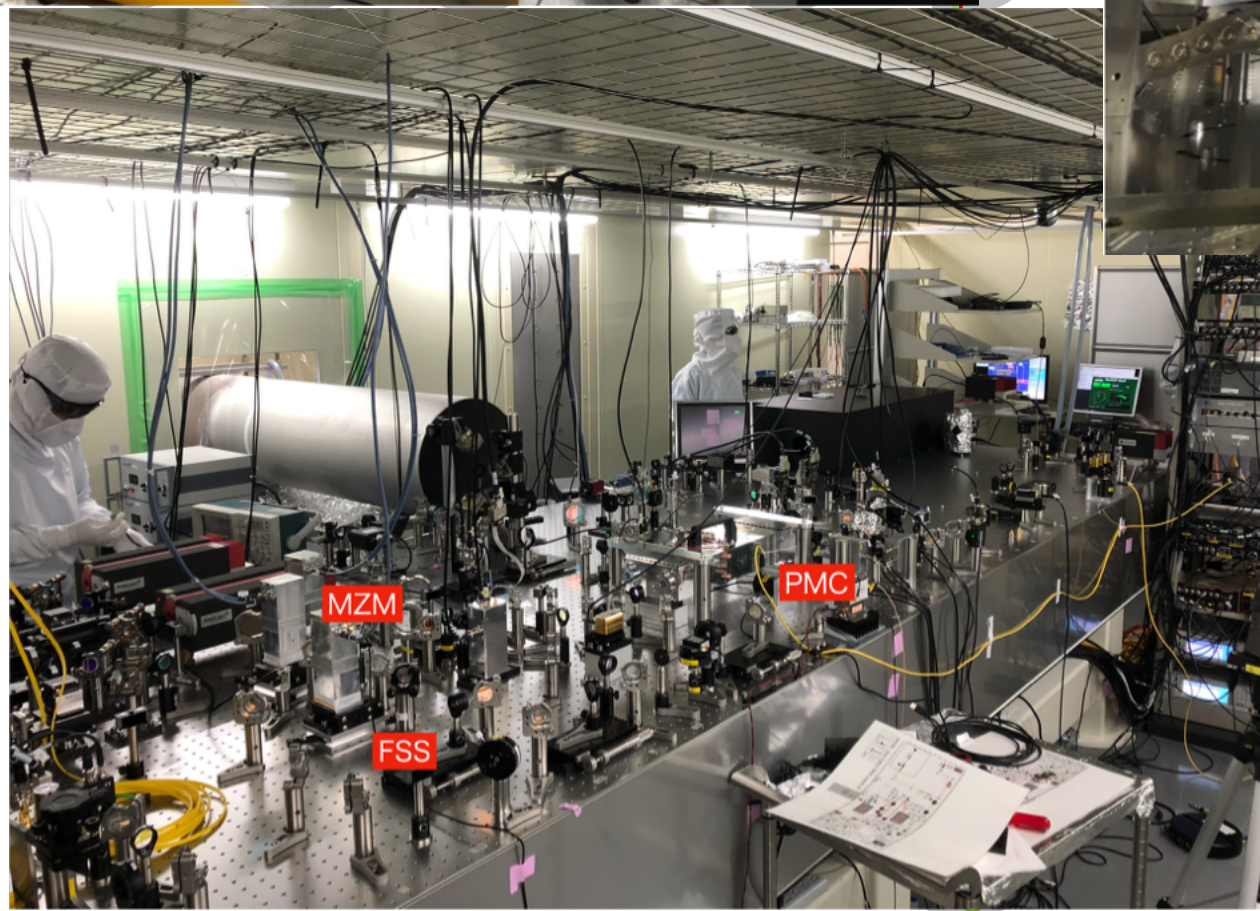
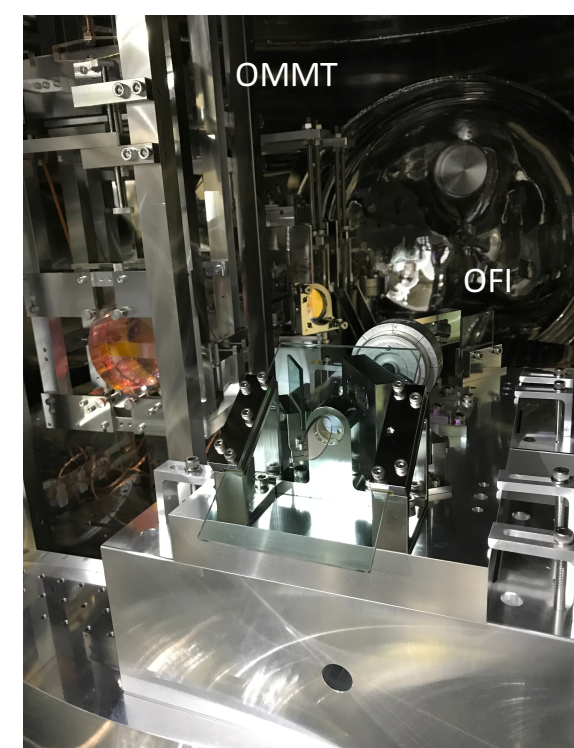
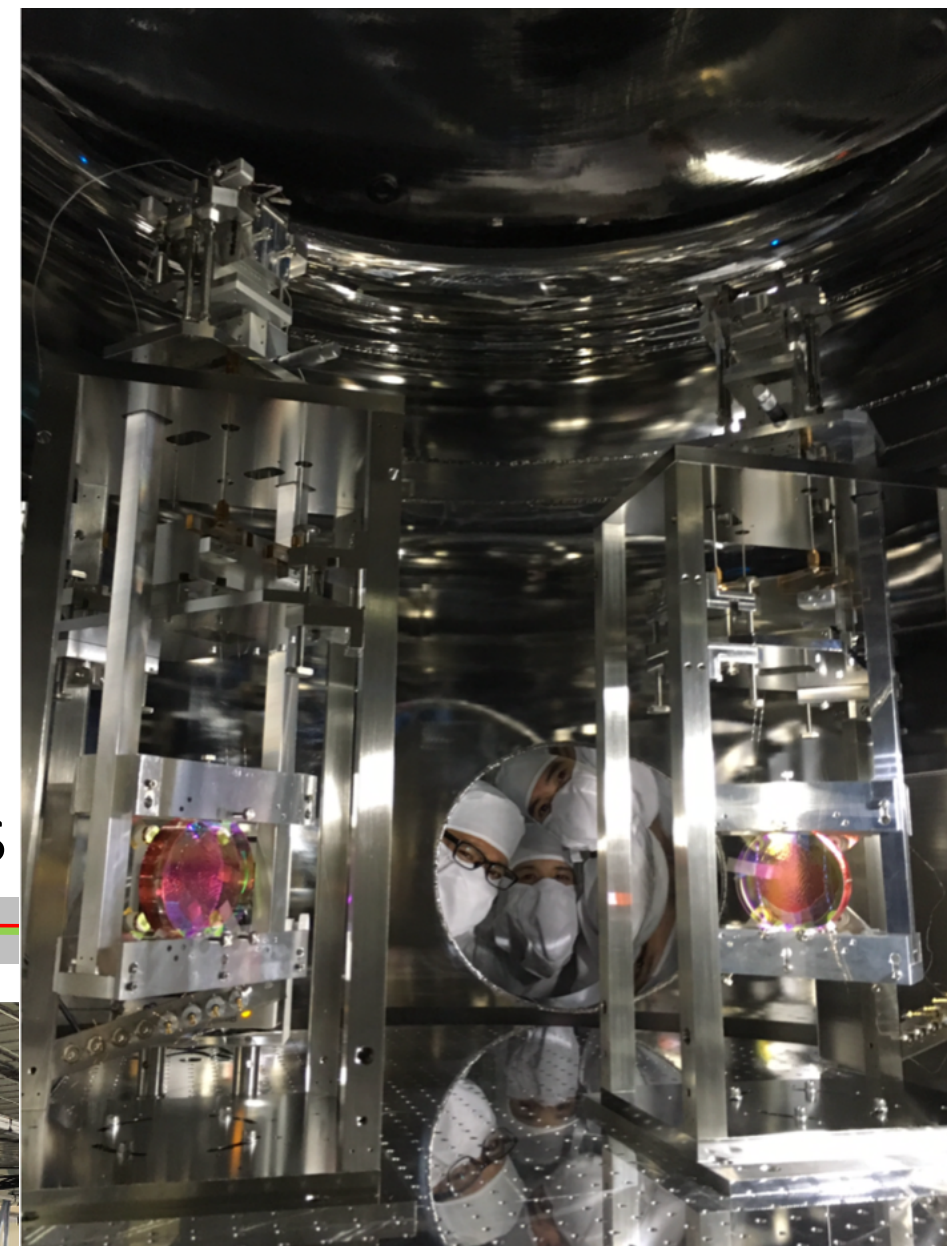
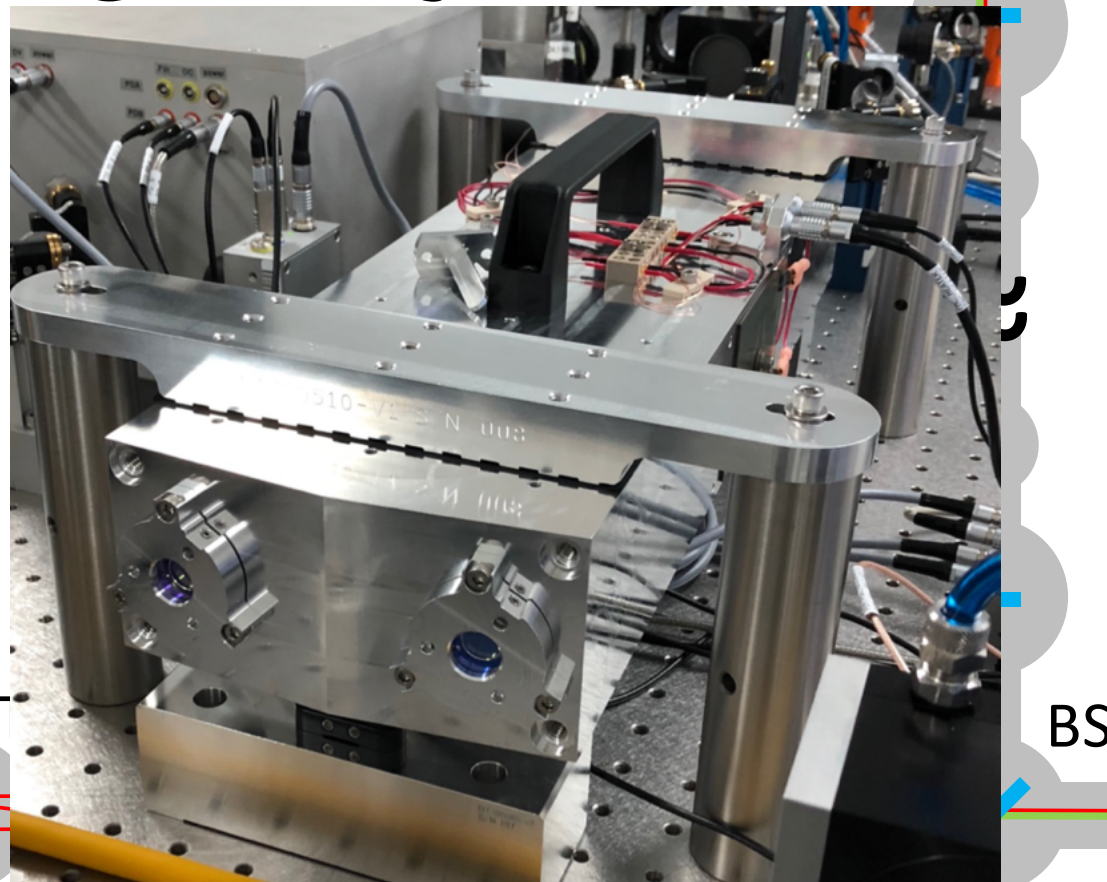
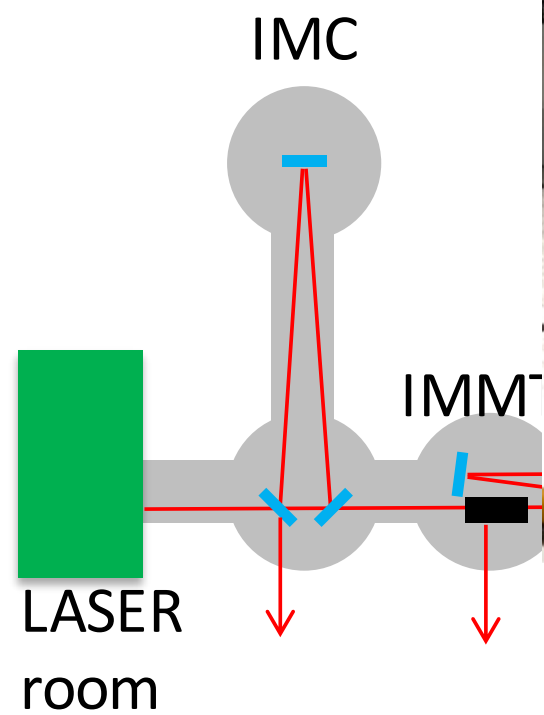


# KAGRA gallery



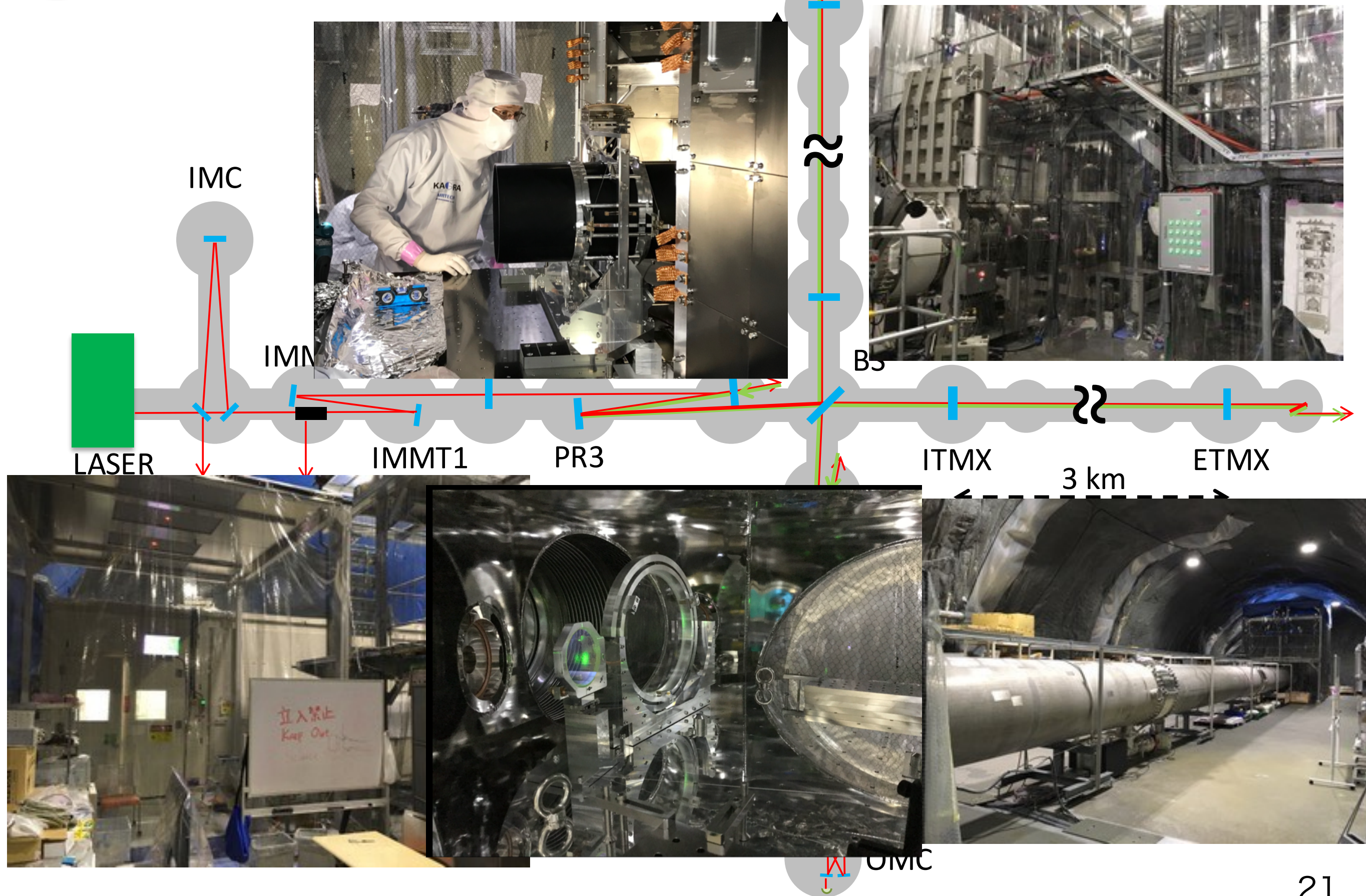


# KAGRA gallery

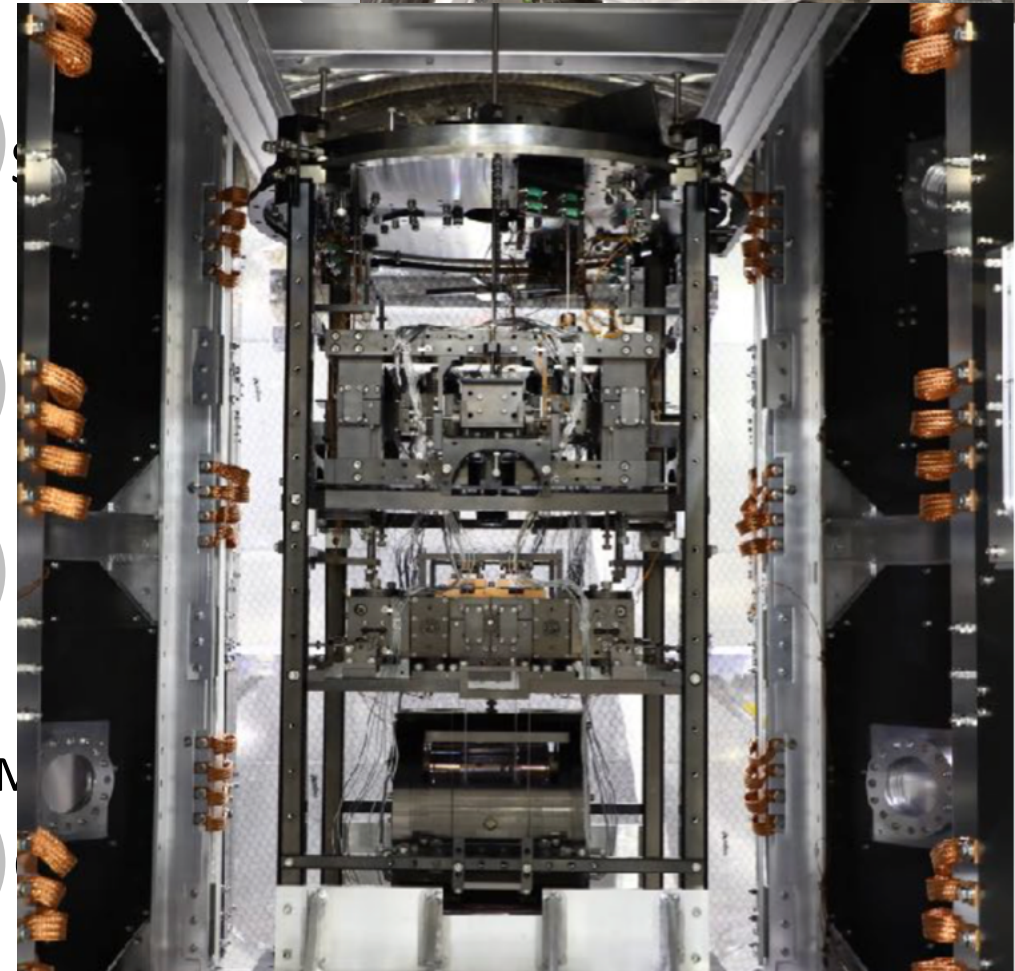
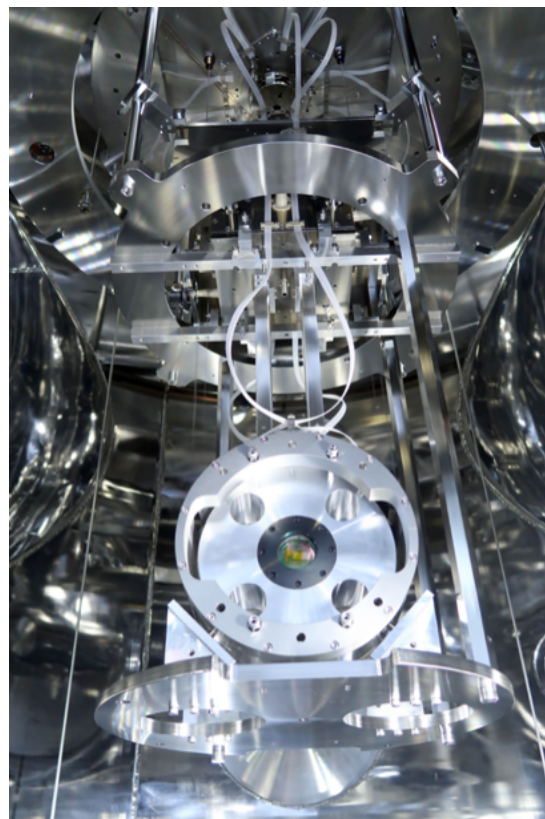
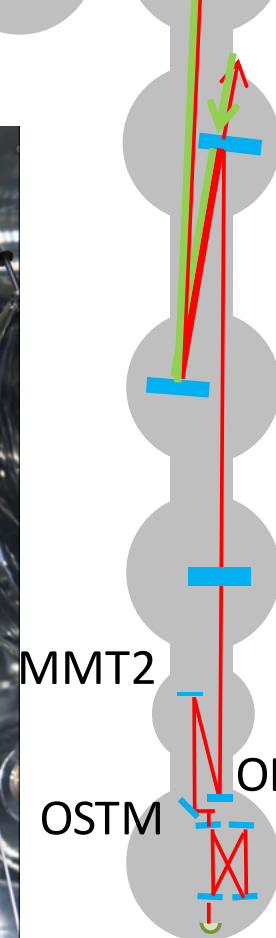
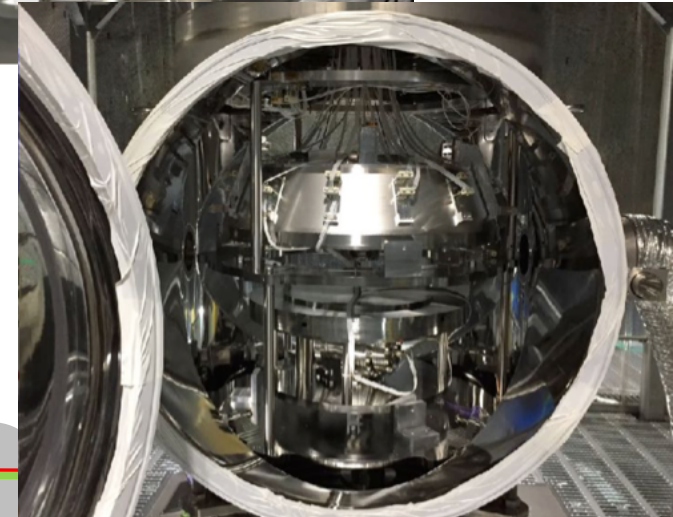
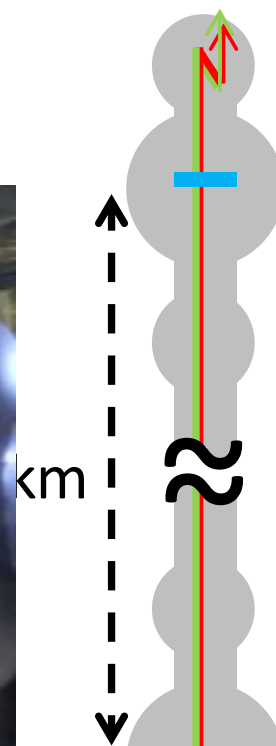




# KAGRA gallery

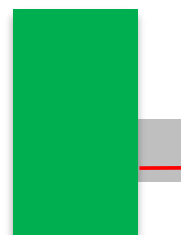
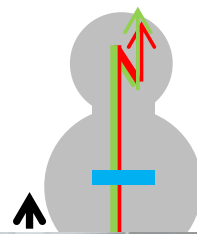








# KAGRA gallery

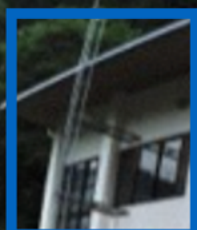


LASER  
room

kitchen  
+refresh room

Large office  
+TV conference room

Stuff office



Stuff office

Stuff office

Circuit room

Secretary office  
+ refresh room

Control room

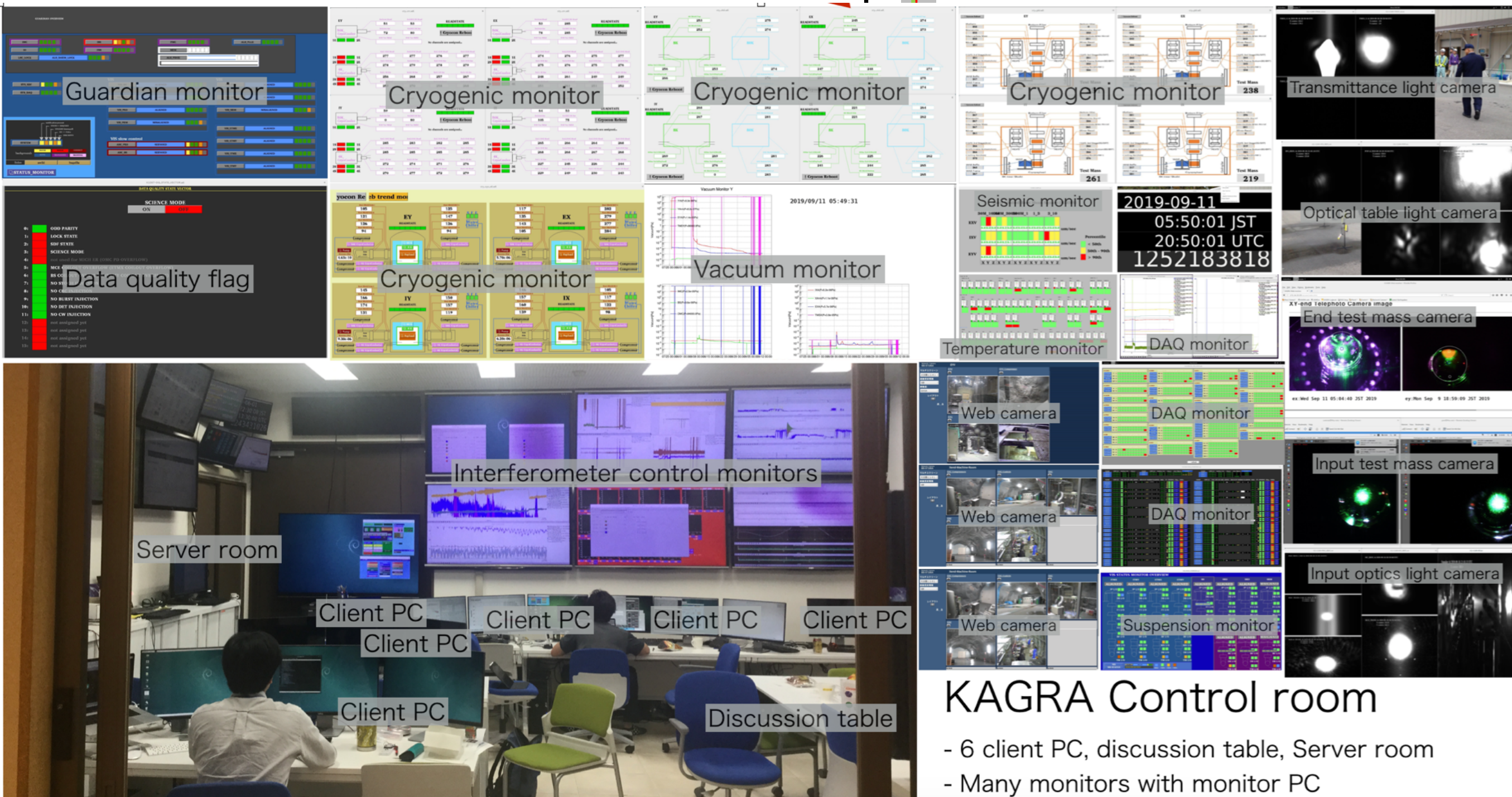
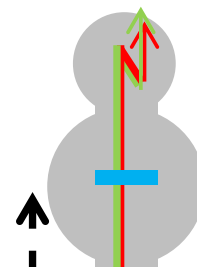
Pic by N.Kanda

OSTM

OMC

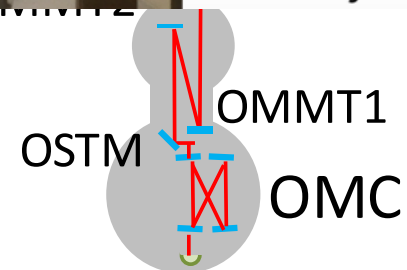


# KAGRA gallery



## KAGRA Control room

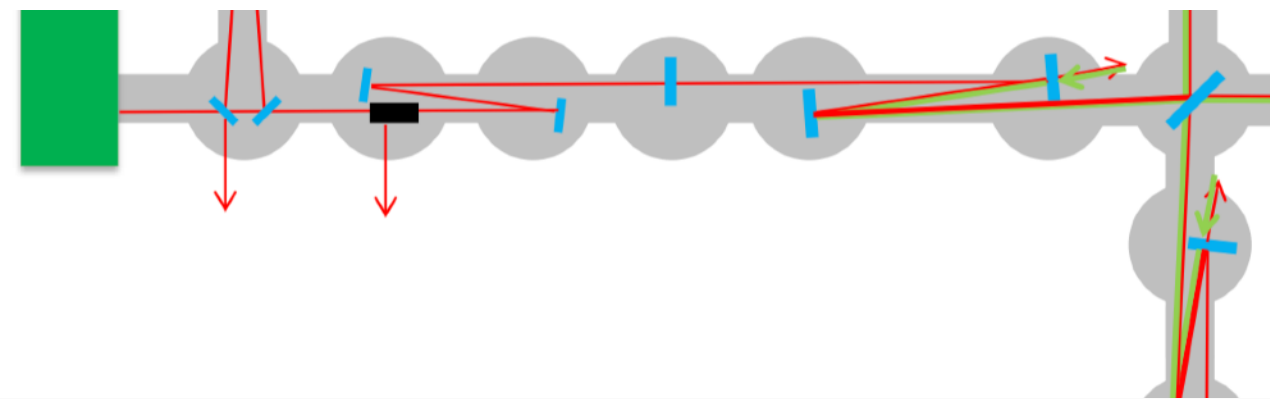
- 6 client PC, discussion table, Server room
- Many monitors with monitor PC



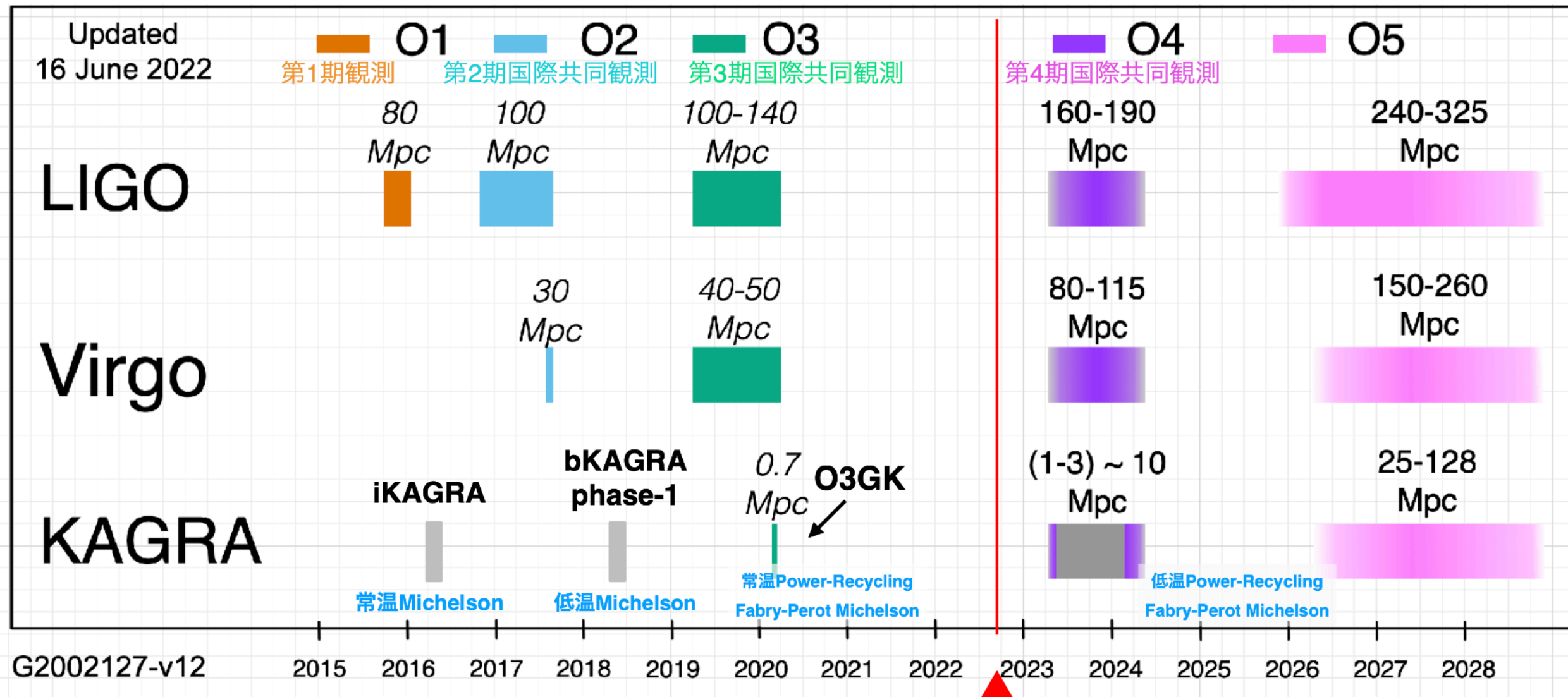




# 今後の予定



## 観測スケジュール（これまでと今後の予定）



- ・ 次回の観測運転(O4)のスケジュールが2022年6月に発表
- ・ 前期観測(O4a) : 2023年3月～ 6ヶ月の観測期間、後期観測(O4b) : 2023年10月～ 6ヶ月の観測期間
- ・ KAGRAのプラン : 1ヶ月間観測運転 → 感度向上を目指したコミッショニング → 3ヶ月間観測運転

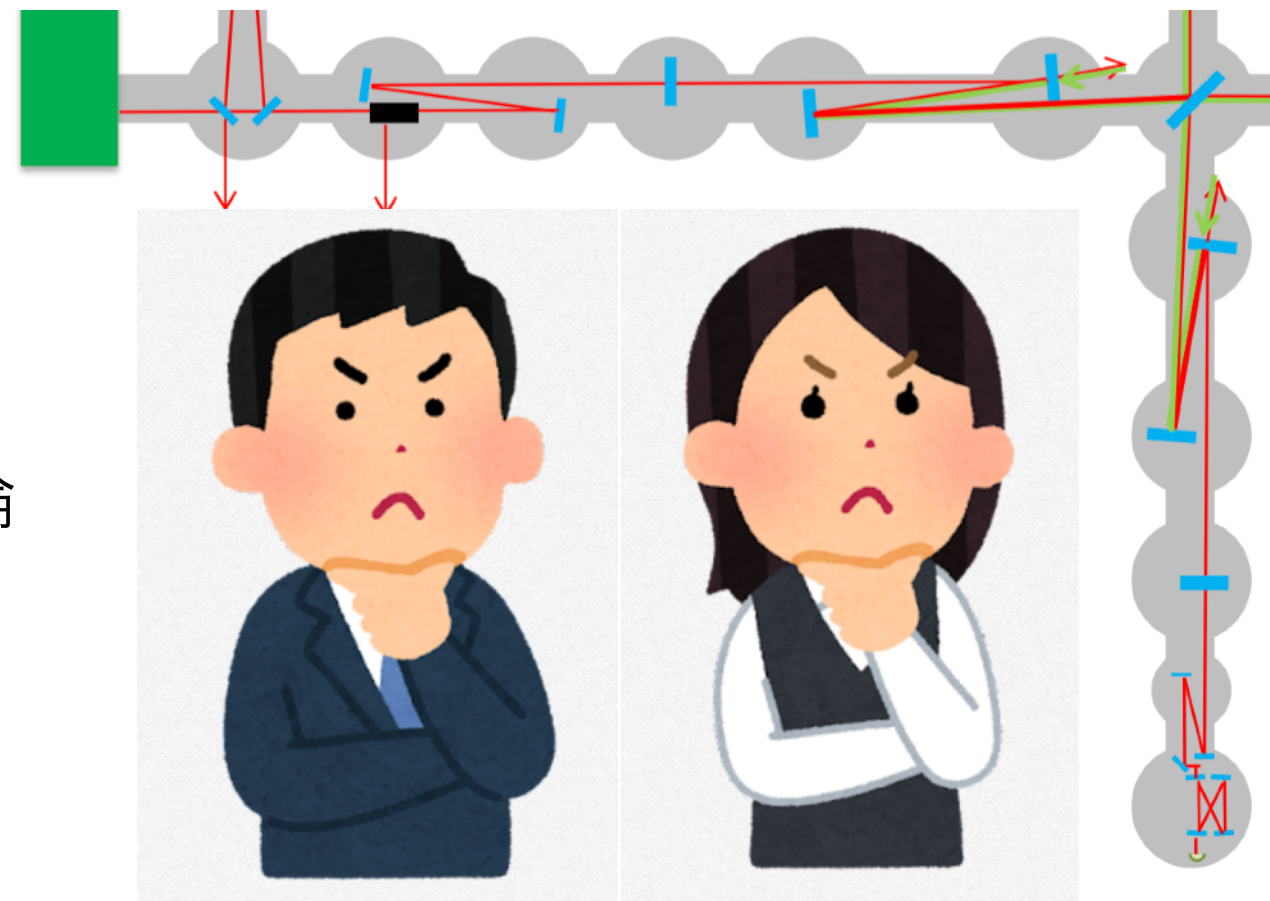




# KAGRAでのさまざまなお仕事

研究者の中でも…

- 新たなものを考える人
  - アインシュタインを超えるような理論
  - 新たな重力波源
  - 新たな重力波の検出方法
  - 重力波観測から基礎物理への応用
  - など



- データを解析する人
  - 重力波を見つけるアルゴリズムを考える
  - たくさんのデータからノイズを見つける
  - 機械学習を用いた分類分け
  - 画像解析
  - データが綺麗なもののか判別する
  - 重力波信号へと変換する
  - など

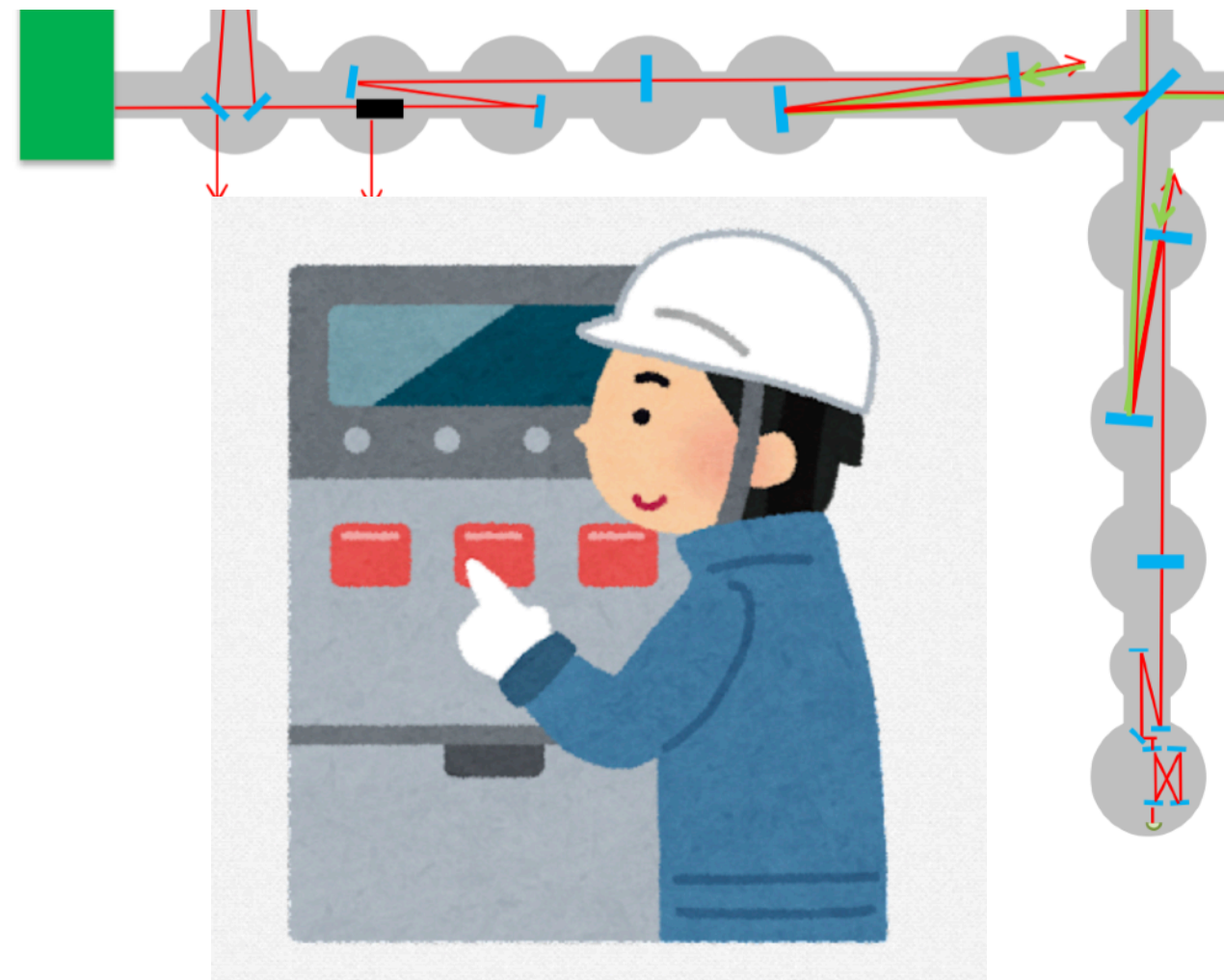




# KAGRAでのさまざまなお仕事

研究者の中でも…

- 検出器をアップグレードする人
  - いい防振装置、レーザーを作ろう
  - 地下に建設しよう
  - 極低温まで冷やそう
  - もっと大きな装置を作ろう
  - いっそ、検出器を宇宙へ飛ばそう

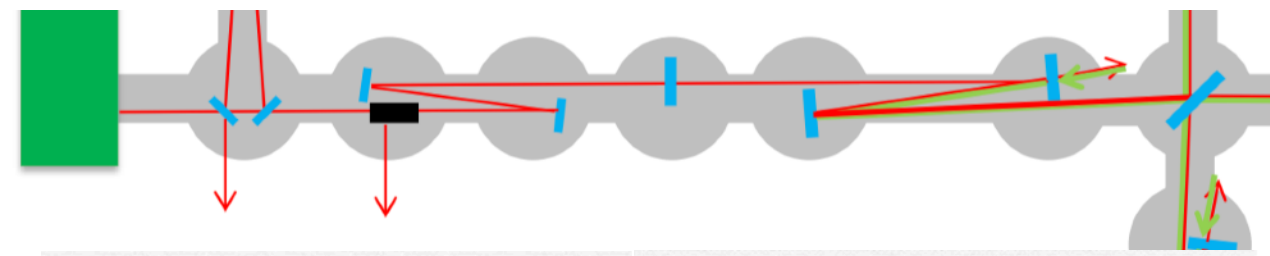


- 大きなプロジェクトをマネジメントする人
  - 安全な実験室を作ろう
  - 数百人が働くプロジェクトをよくしていこう
  - 今週の作業予定を立てよう
  - 今年度の目標を立てよう
  - KAGRAをもっとアピールしよう
  - 研究費をもらおう





# KAGRAでのさまざまなお仕事



研究者以外の方々もたくさん働いています!

- KAGRAの事務をしてくれる方々
  - たくさんのお金が動くのでその伝票処理
  - 出張関係
  - 他機関とのやりとり
  - 見学やオンライン講義のサポート
  - など



- 坑内の安全を管理してくれる方々
  - 安全点検
  - 装置のメンテナンス(クーラー、ポンプ、etc)
  - クレーン作業
  - エマージェンシーモニターの管理
  - 必要装置の組み立て、移動
  - 電気関係
  - など



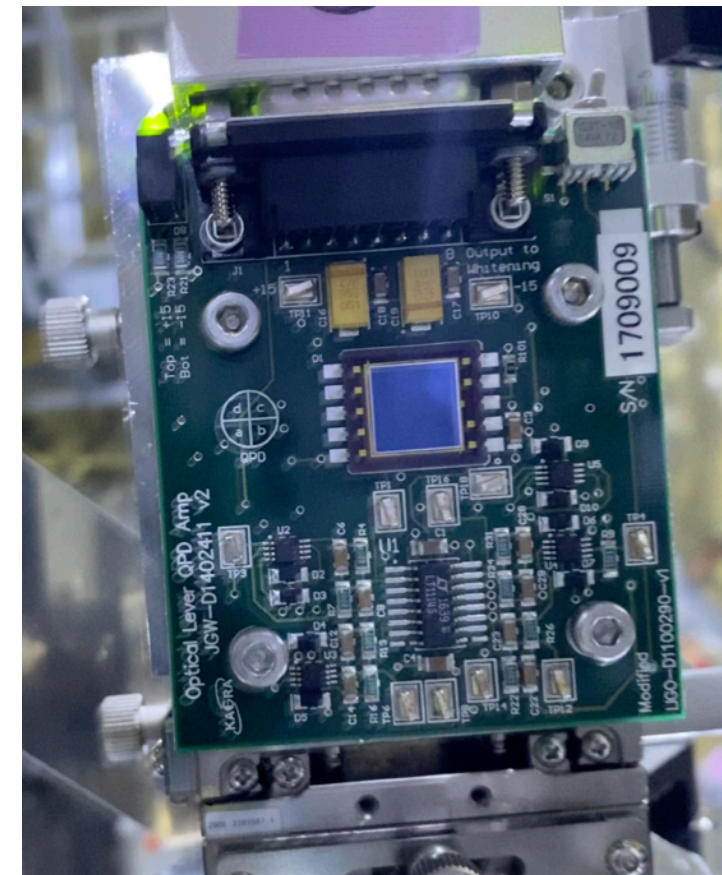
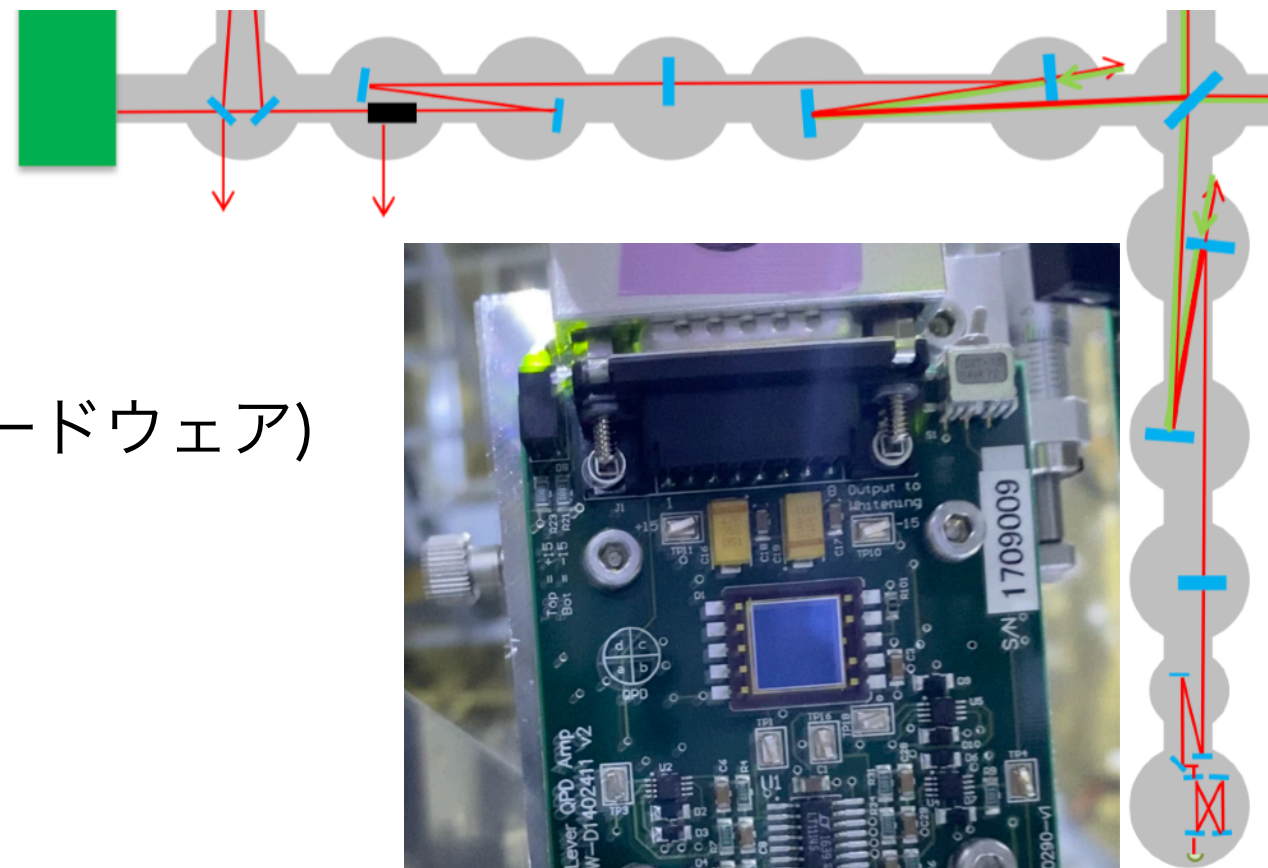




# KAGRAでのさまざまなお仕事

研究者以外の方々もたくさん働いています!

- 研究者とともに作業をしてくれる方々(ハードウェア)
  - 実験装置の組み立て
  - 必要回路の制作、点検
  - 装置の高さや設置位置の測定
  - 真空のリーク試験
  - 清掃やメンテナンス
  - 環境測定
  - ケーブルの配線
  - 解析棟・坑内・宿泊等の清掃、食事
- 研究者とともに作業をしてくれる方々(ソフトウェア)
  - CADなどの装置の図面の作成
  - LINUXなどのコンピュータメンテナンス
  - 回路図の作成
  - 安全に関するモニターやメンテナンス
  - DAQ(データ取得系)の管理
  - などなど

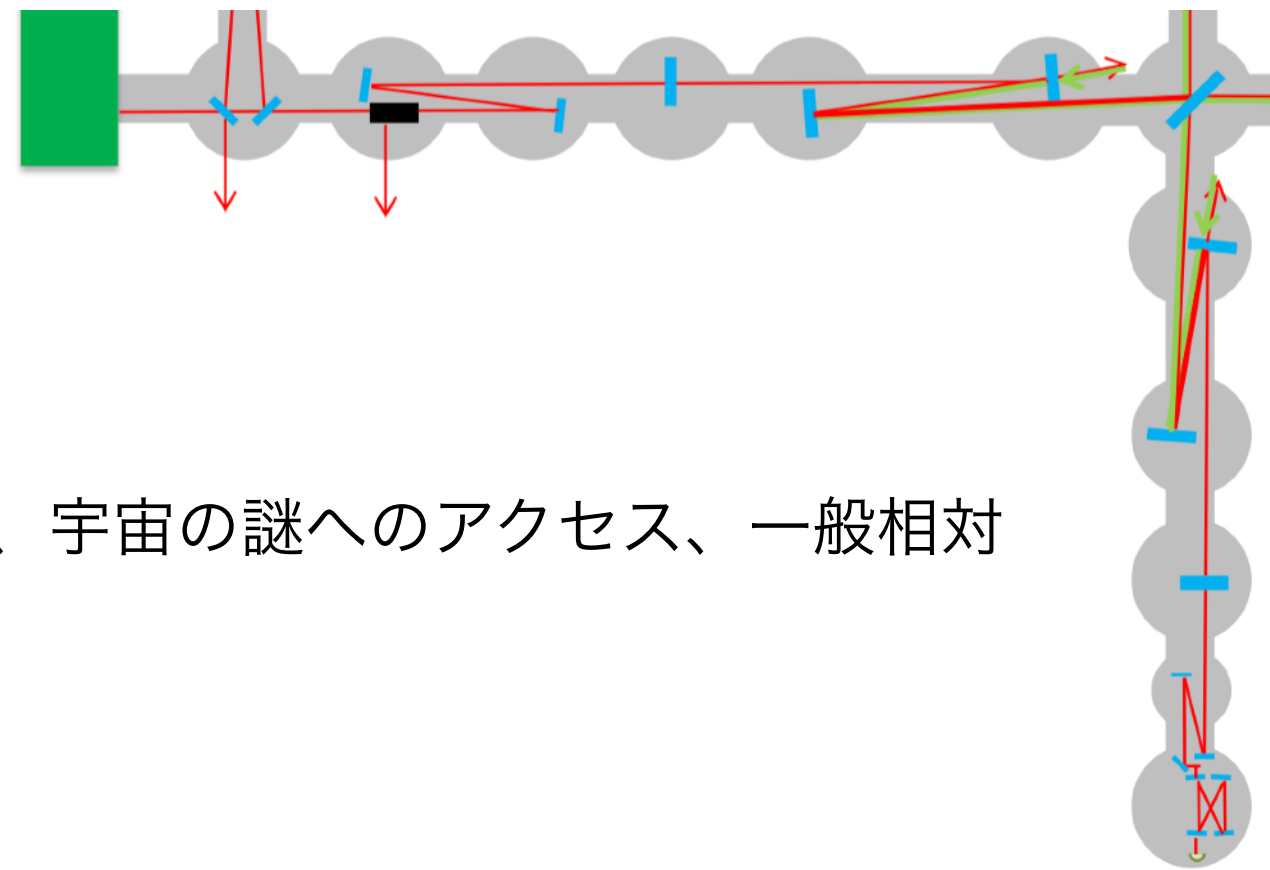


```
アクティビティ 2016年10月16日 14:14
nexmag-ubuntu@nexmag-ubuntu: ~$ sudo lscpu
Architecture: x86_64
CPU op-mode(s): 32-bit, 64-bit
Byte Order: Little Endian
CPU(s): 2
On-line CPU(s) list: 0,1
Core(s) per socket: 1
Socket(s): 2
NUMA node(s): 1
Vendor ID: AuthenticAMD
CPU family: 16
Model: 6
Model name: AMD Athlon(tm) II P360 Dual-Core Processor
Stepping: 3
CPU MHz: 2300.000
CPU max MHz: 2300.0000
CPU min MHz: 800.0000
BogoMIPS: 4580.18
Virtualization: AMD-V
L1d キャッシュ: 64K
L1i キャッシュ: 64K
L2 キャッシュ: 512K
NUMA ノード 0 CPU: 0,1
フラグ: fpu vme de pse tsc msr pae mce cx8 apic sep mtrr pge mca cmov pat pse36 clflush mmx fxsr sse sse2 ht syscall
all nx mwait fxsr_opt pdpe1gb rdtscp lm 3dnowext 3dnow constant_tsc rep_good nopl nonstop tsc cpuid extd_apicid pni monitor cx16 popcnt lahf_
lm cpl_legacy svm extapic cr8_legacy abm sse4a 3dnowprefetch osvw lbr skinit wdt nodeid_msr hw_pstate vmcall npt lbrv svm_lock nrip_save
nexmag-ubuntu@nexmag-ubuntu: ~$
```

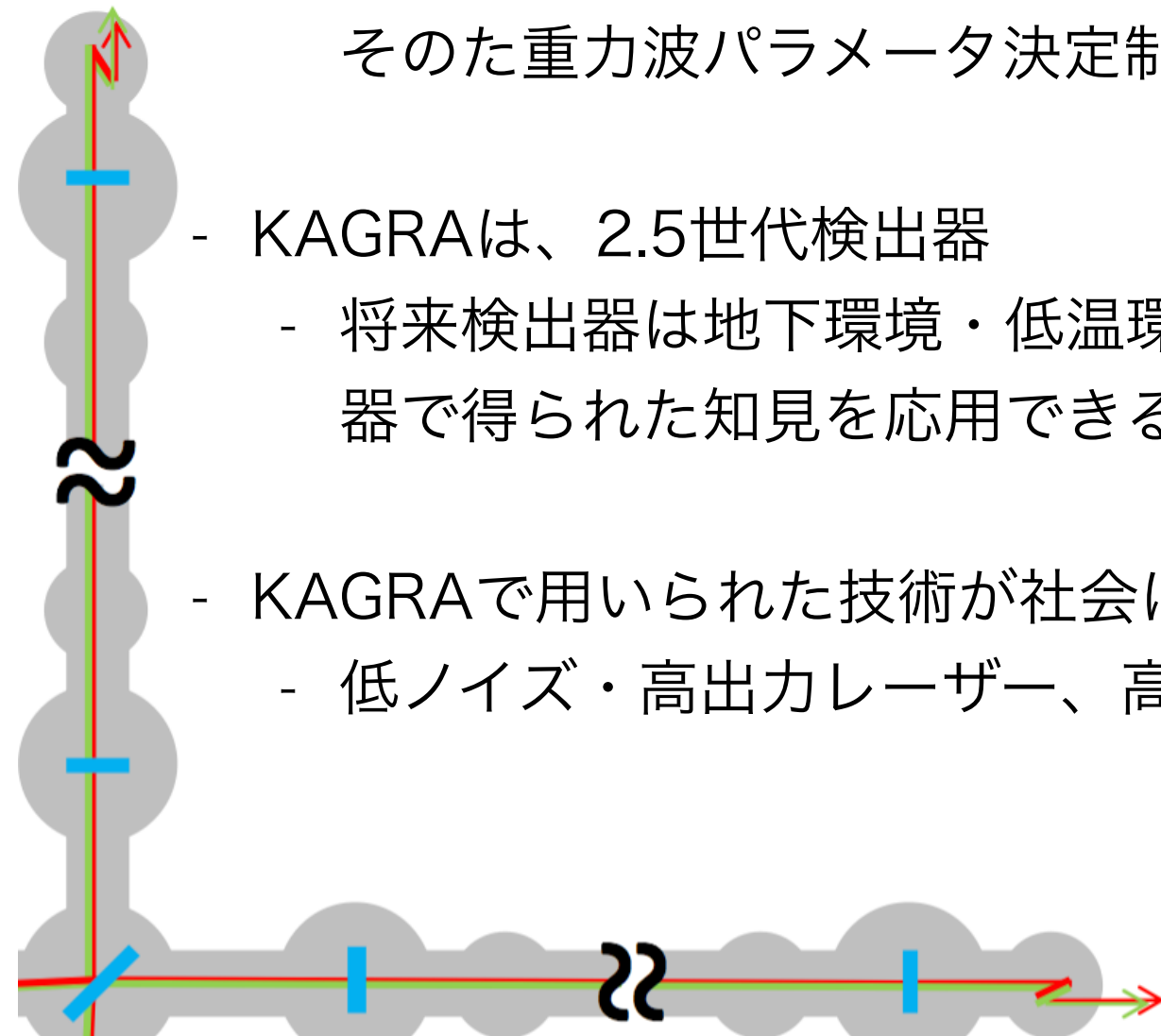




# KAGRAの研究の意義

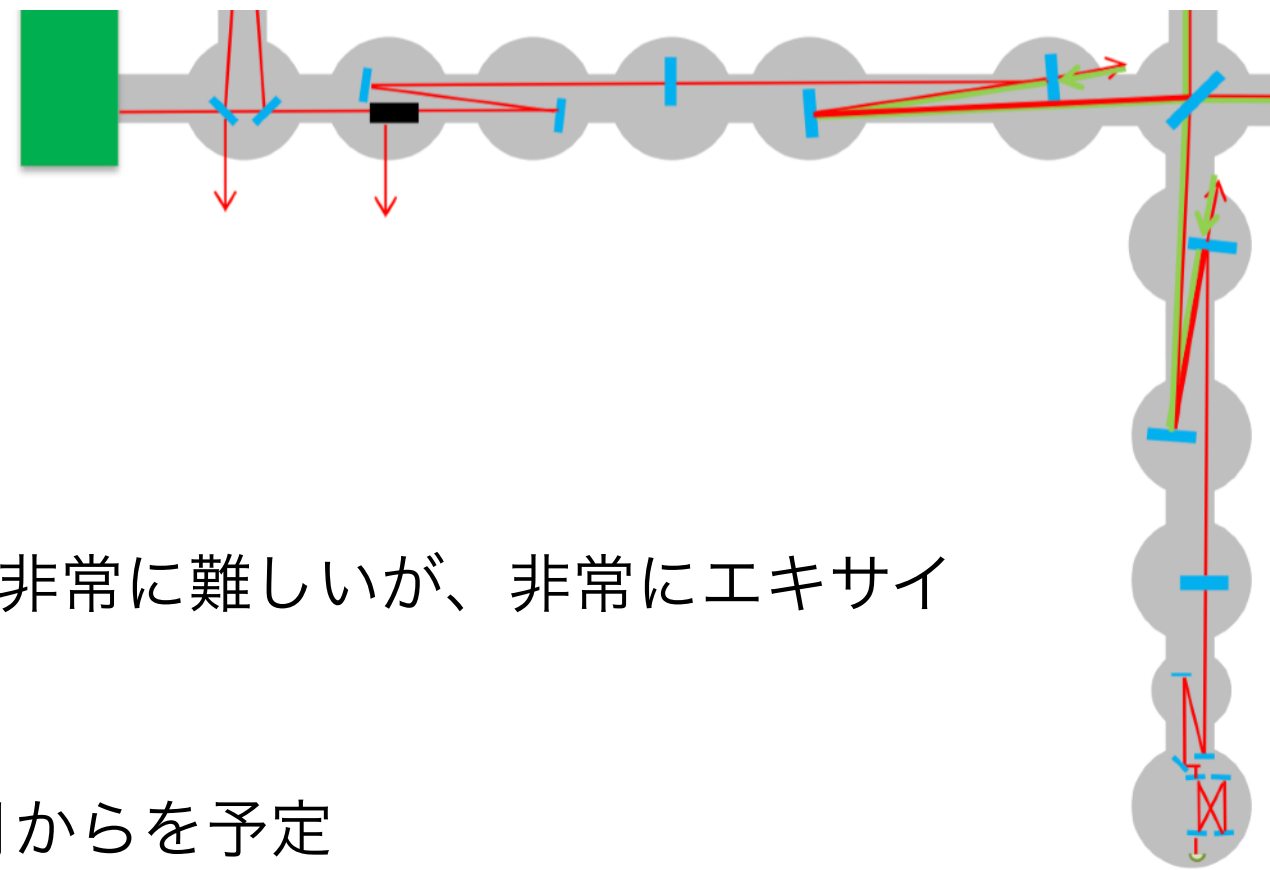


- 宇宙や物理の理解を深めたい
  - 宇宙からの重力波を捉えることにより、宇宙の謎へのアクセス、一般相対論からのずれの観測など
- 重力波検出器は世界に複数必要
  - 方向の決定(一台では決められない、検出器の感度は方向依存性がある)、そのた重力波パラメータ決定制度の向上
- KAGRAは、2.5世代検出器
  - 将来検出器は地下環境・低温環境が必須の技術となるため、KAGRA検出器で得られた知見を応用できる
- KAGRAで用いられた技術が社会に貢献
  - 低ノイズ・高出力レーザー、高精度懸架系の開発、制御理論の発展など





# まとめ



- ・ 重力波を捉えることや、重力波天文学は非常に難しいが、非常にエキサイティングな分野である
  - ・ 次回の国際共同観測O4は2023年3月からを予定
- ・ KAGRAは、岐阜県飛騨市に設置されている日本の大型重力波検出器
  - ・ 3kmの腕、地下環境、低温環境
- ・ KAGRAでは、さまざまな方が研究に携わってくださっている
  - ・ コンピュータ整備、回路設計、電気配線、…
- ・ 今後とも、KAGRAに興味を持ってくださると嬉しいです

