

Status of the KAGRA

(Pictures for multi-messenger astronomy)

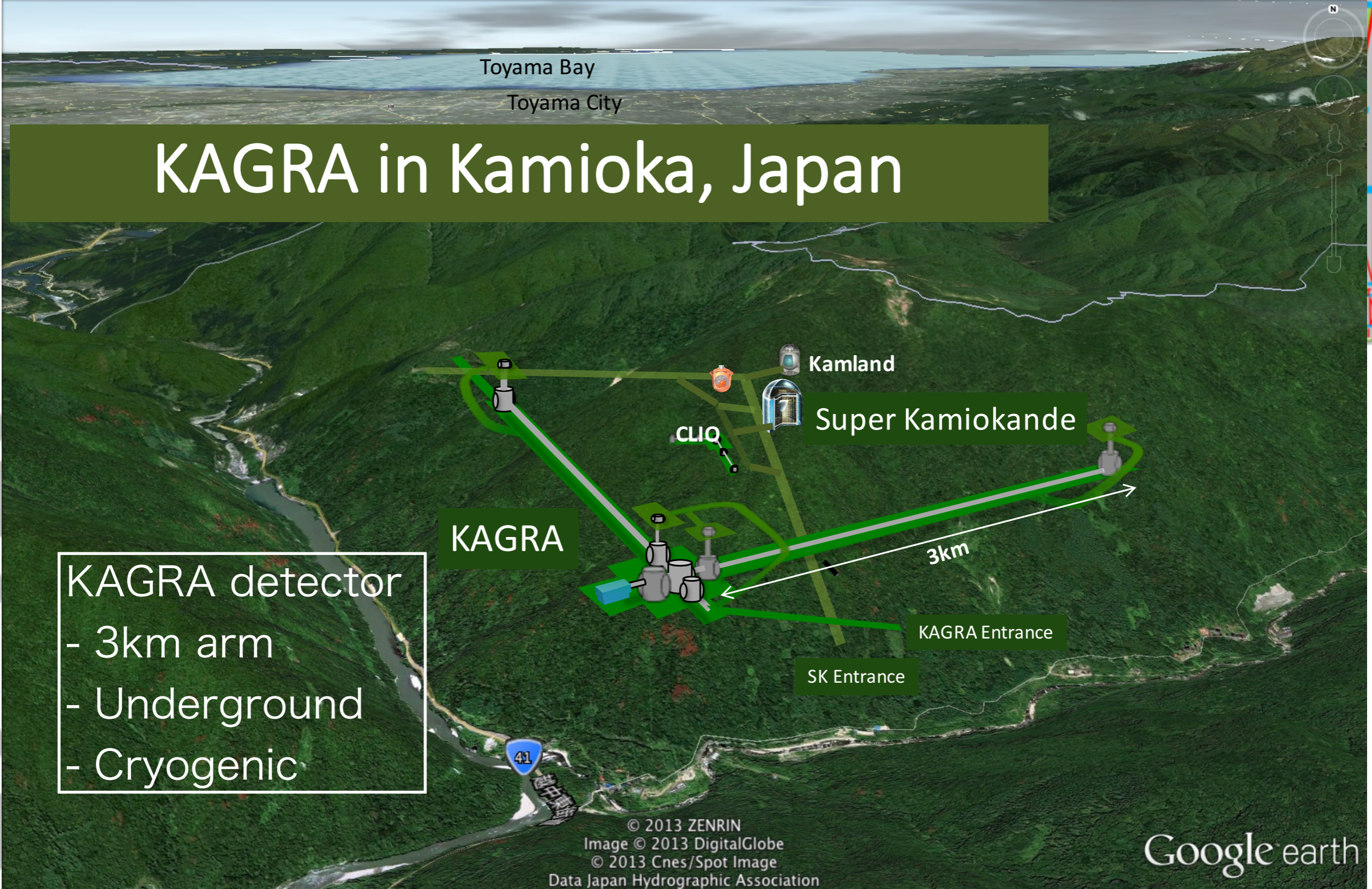
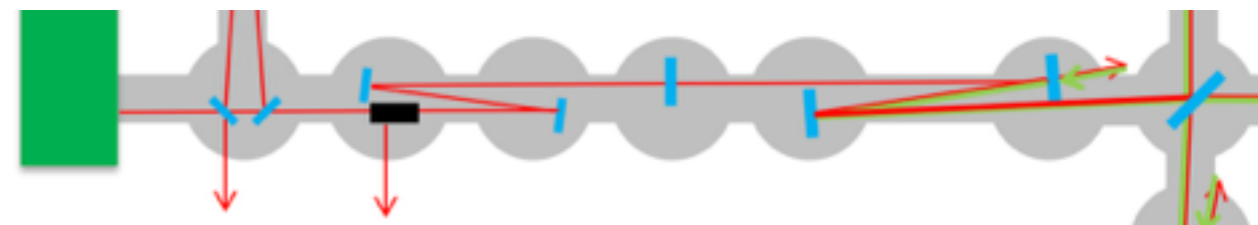
物理学特別講義(重力波)

2019/12/16(月)

東京大学宇宙線研究所 横澤 孝章



KAGRA detector



Toyama Bay
Toyama City

KAGRA in Kamioka, Japan

- KAGRA detector
- 3km arm
 - Underground
 - Cryogenic

KAGRA

Kamland

Super Kamiokande

CUO

3km

KAGRA Entrance

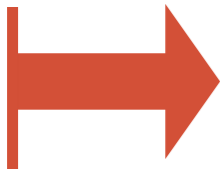
SK Entrance

© 2013 ZENRIN
Image © 2013 DigitalGlobe
© 2013 Cnes/Spot Image
Data Japan Hydrographic Association

Google earth



Schedule



Project start



Tunnel excavation

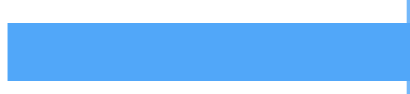


iKAGRA and its operation

Adv. suspension, optics, ...



Cryogenic system



Completed!

bKAGRA phase I operation

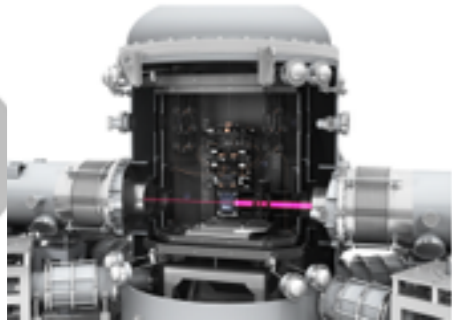


★ Today

Commissioning and join the O3 run



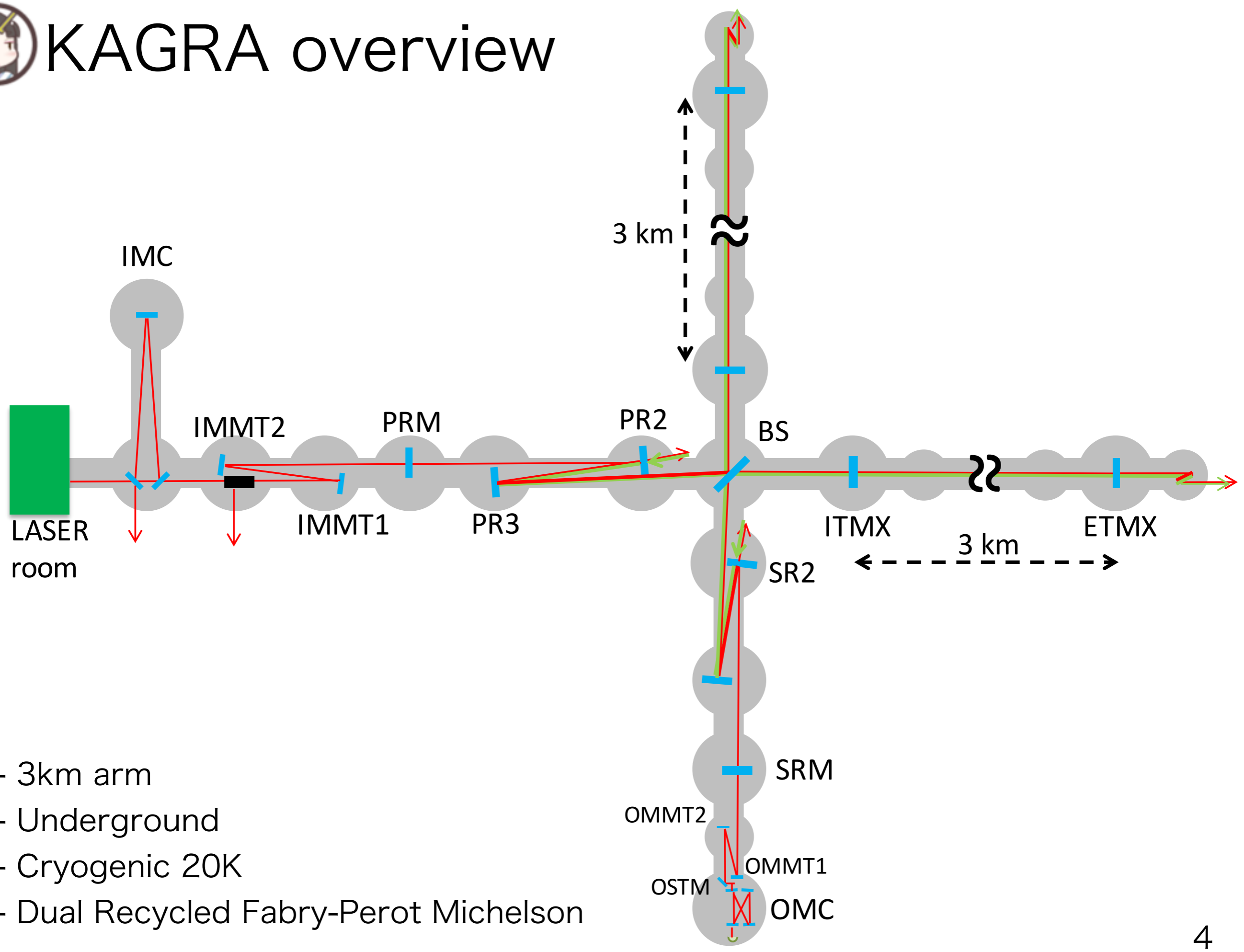
Future upgrade



- Completed the installation toward the O3 at the Spring 2019
- Commissioning toward the DRFP Michelson with better sensitivity is ongoing
- We "must" join the O3 joint observation as soon as possible!

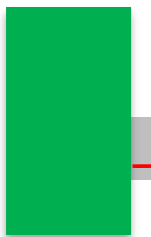
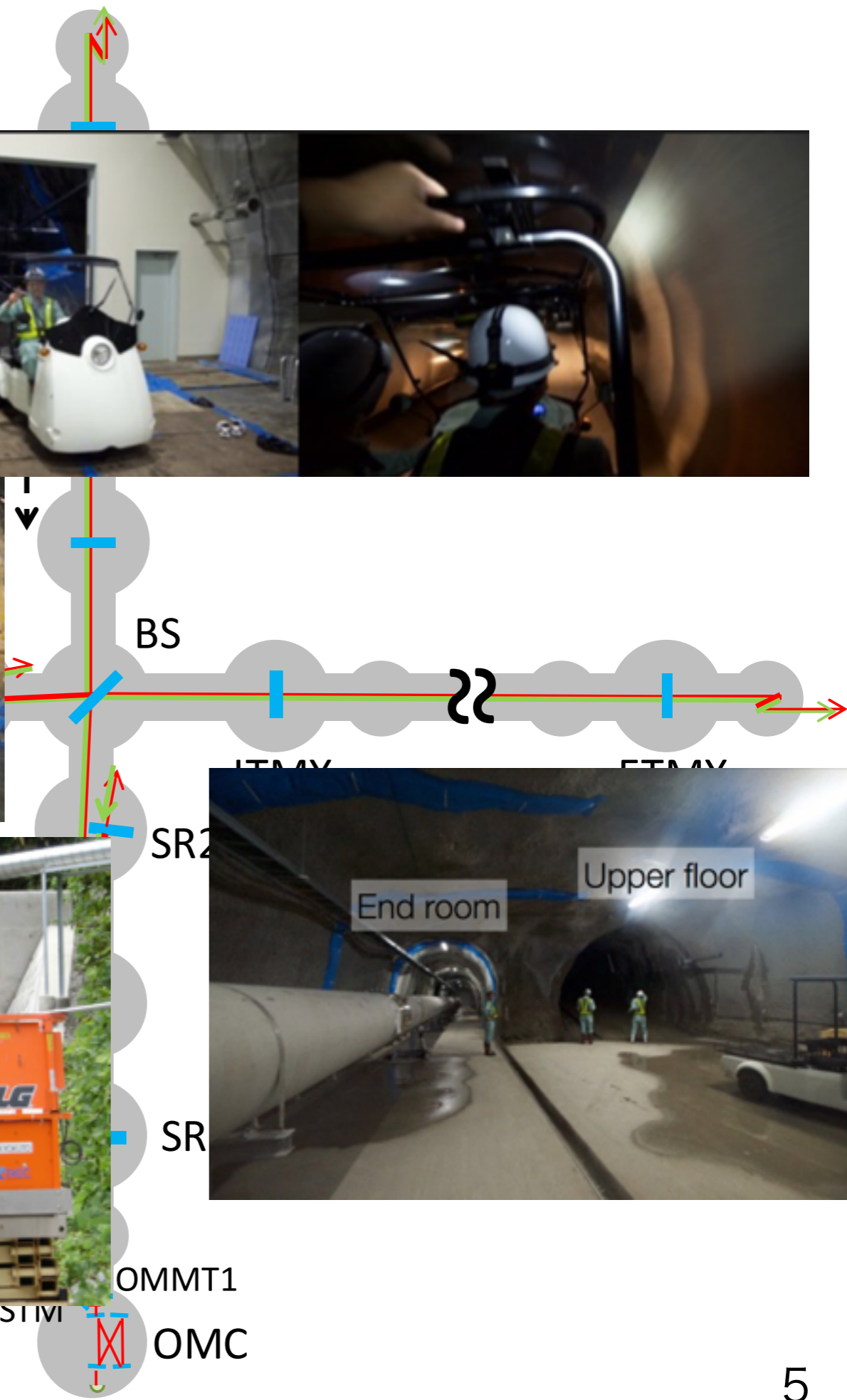
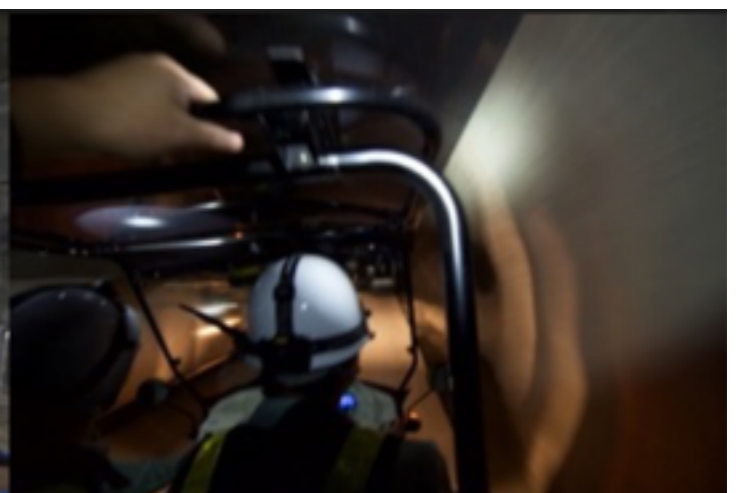
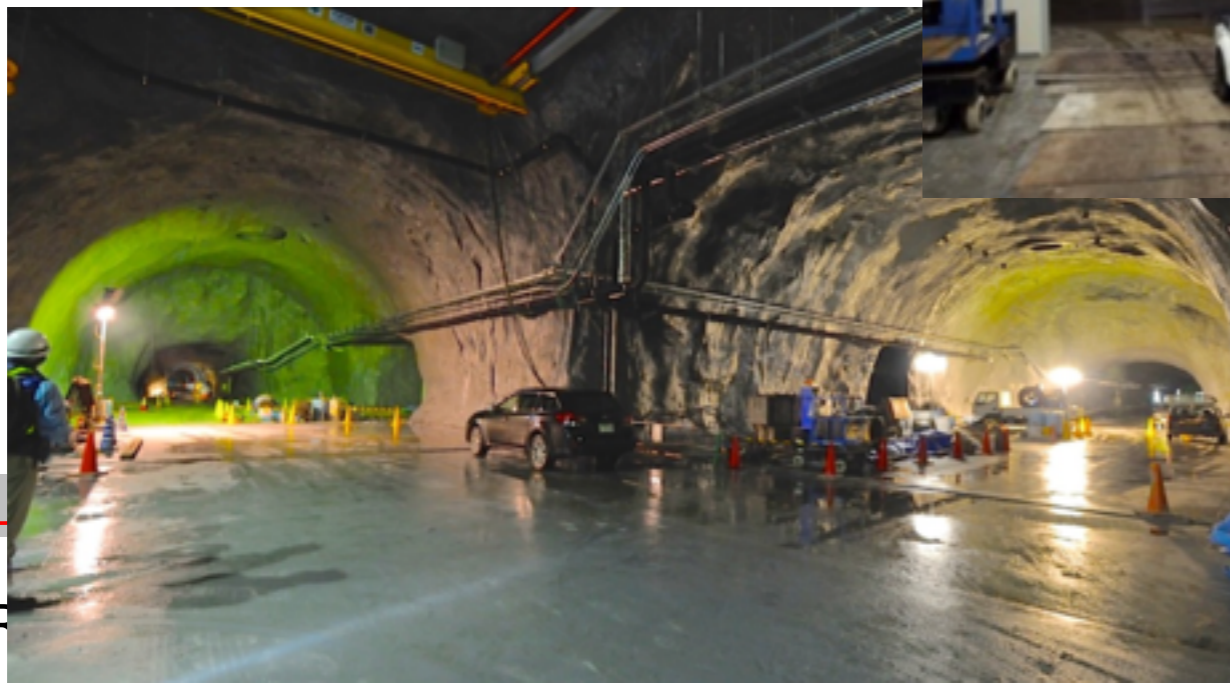


KAGRA overview



- 3km arm
- Underground
- Cryogenic 20K
- Dual Recycled Fabry-Perot Michelson

KAGRA tunnel



LASER room

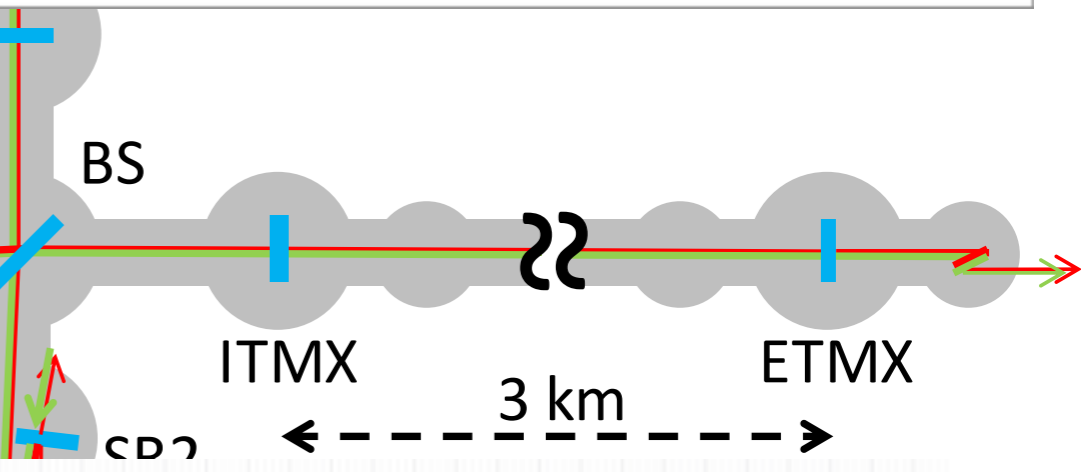
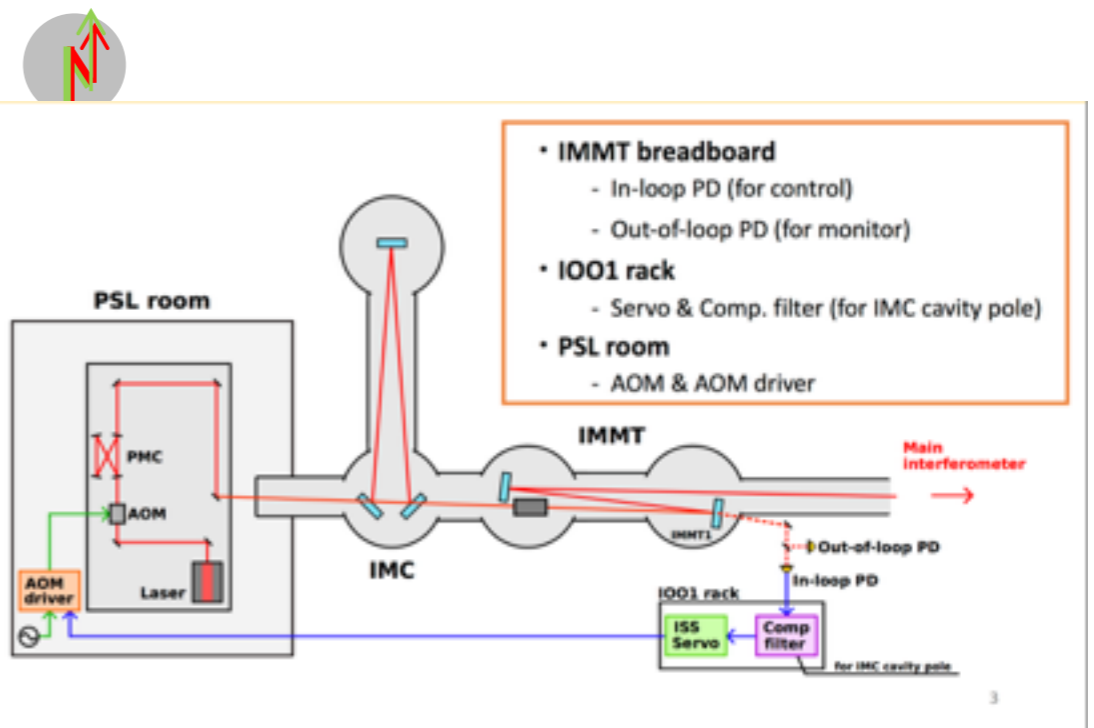


- 3km arm
- Underground
- Cryogenic 20K
- Dual Recycled Fabry-Perot Michelson

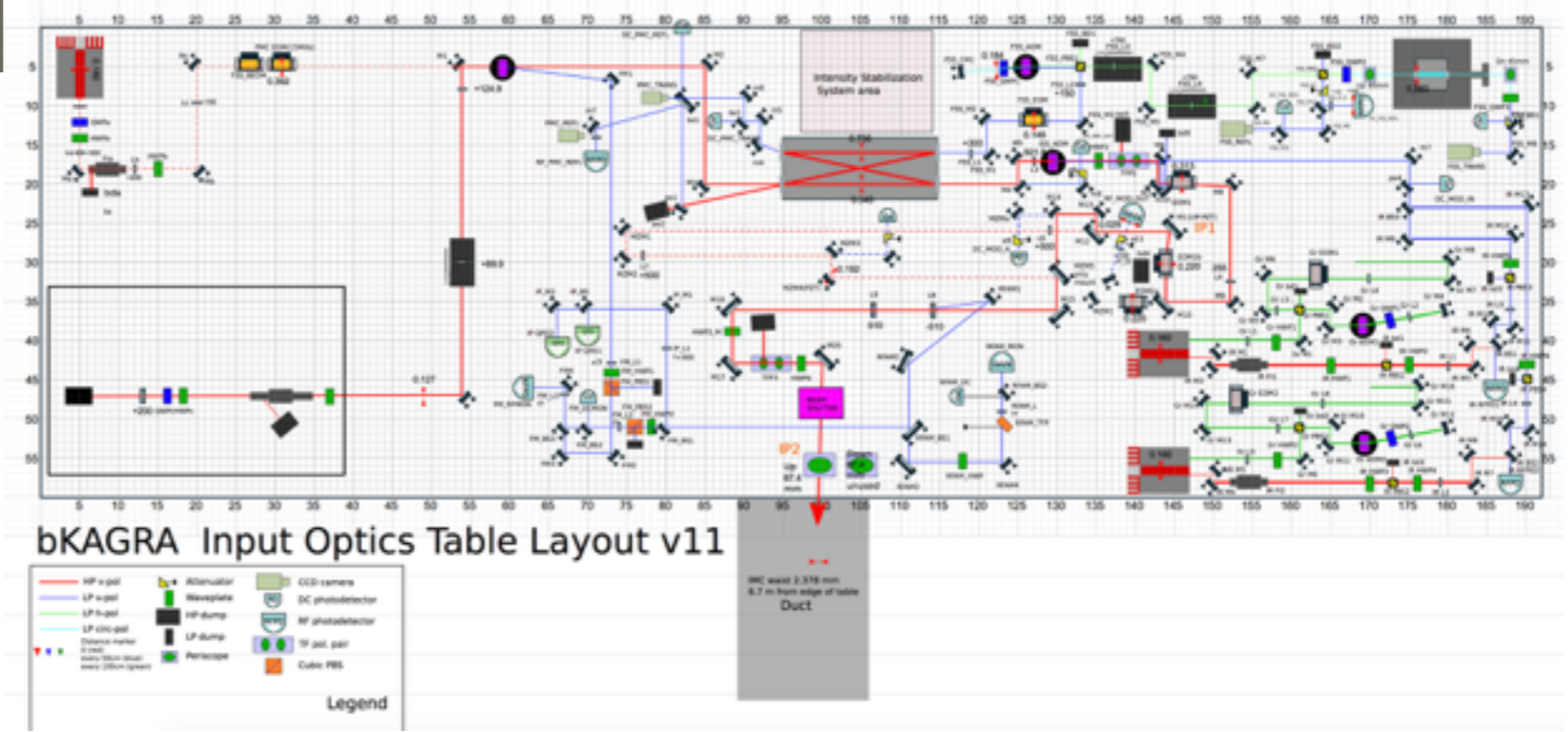
KAGRA Laser



LASER room

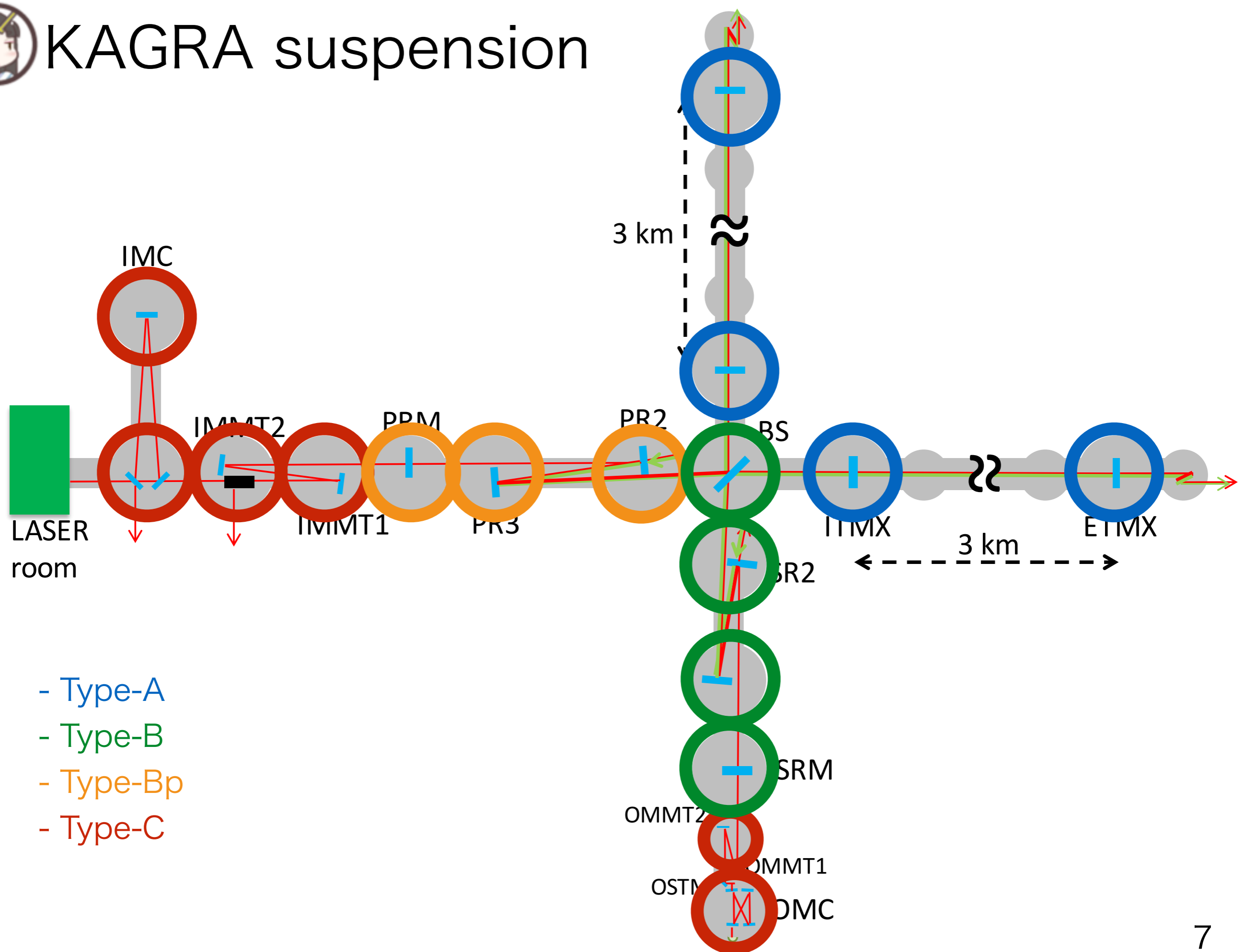


- Laser stabilization
- Mode clean
- Intensity stabilization
- Frequency stabilization
- Laser modulation



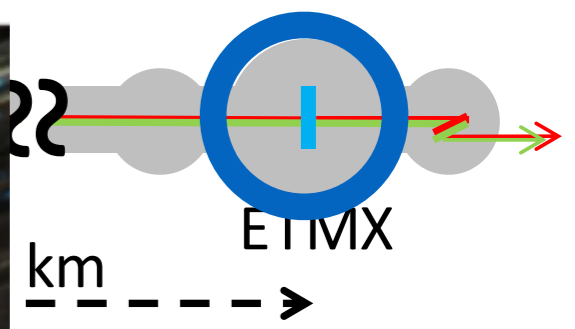
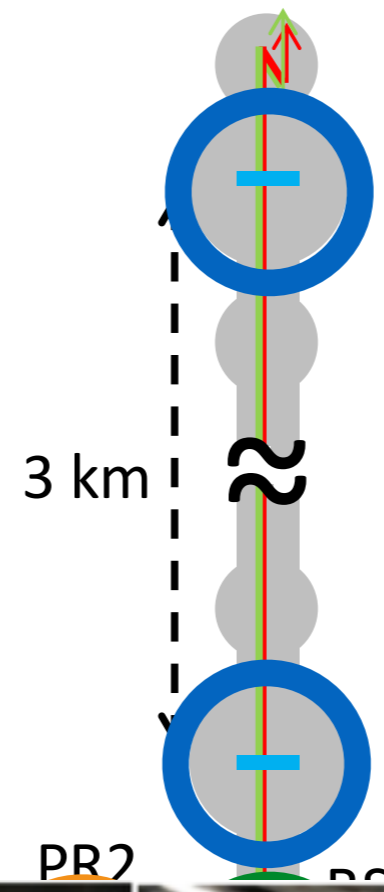
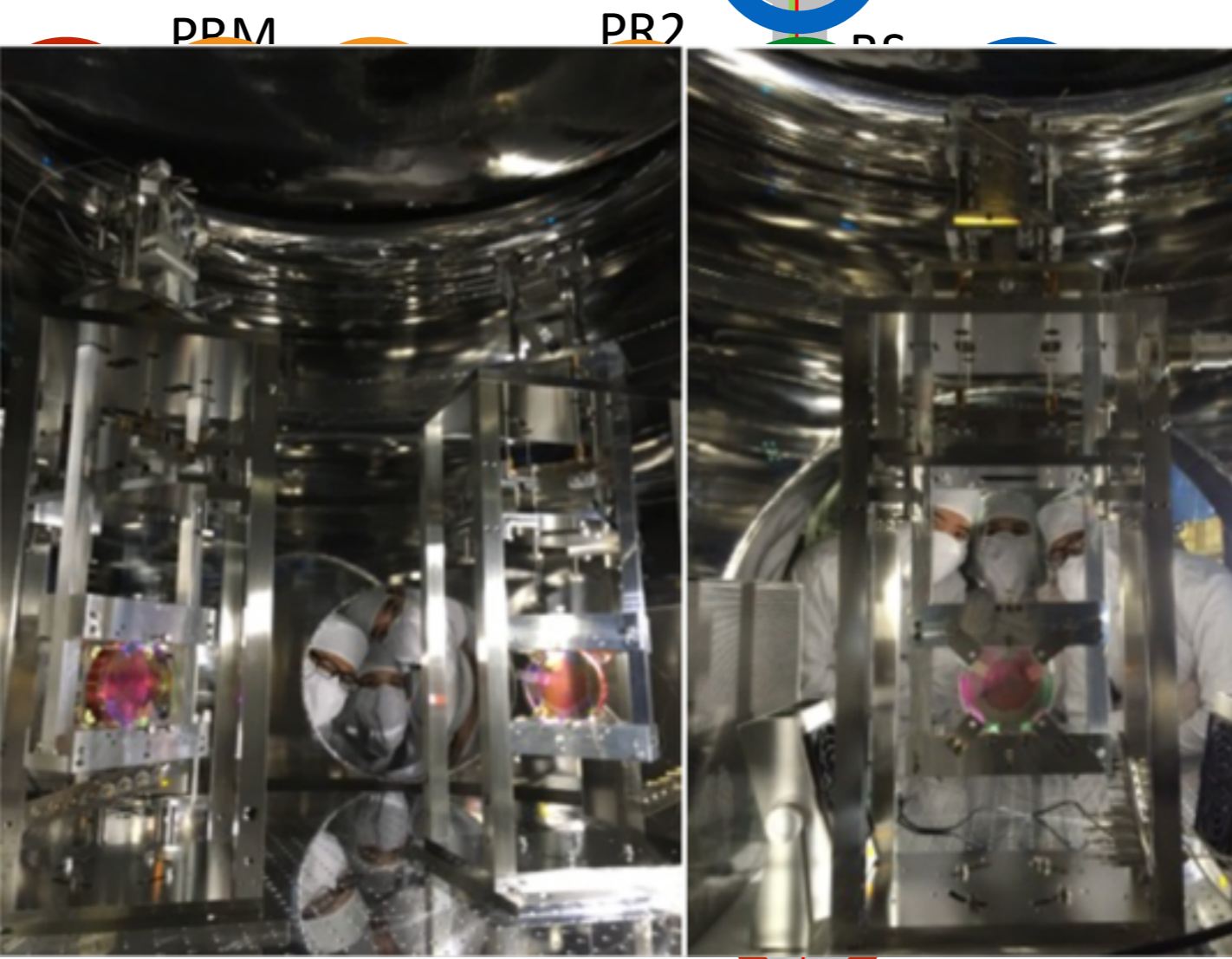
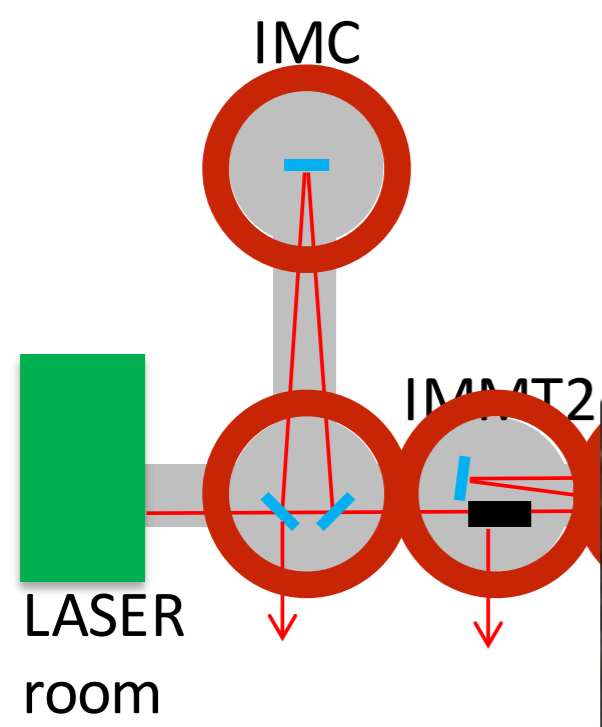


KAGRA suspension



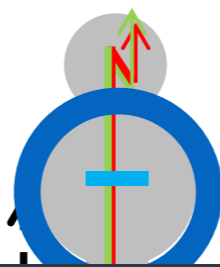
- Type-A
- Type-B
- Type-Bp
- Type-C

KAGRA suspension



- Type-A
- Type-B
- Type-Bp
- Type-C

KAGRA suspension



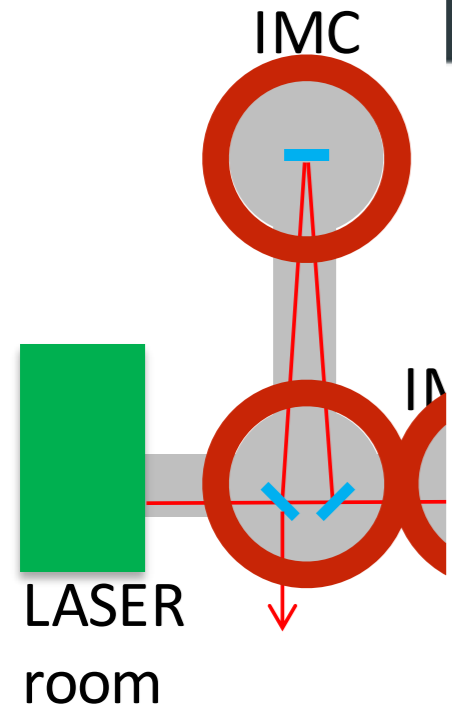
Vibration Isolation Systems

in KAGRA

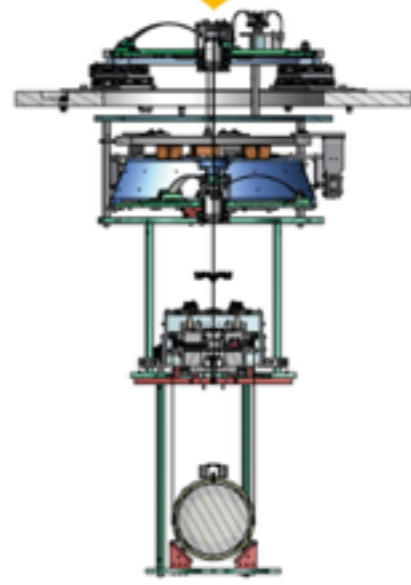
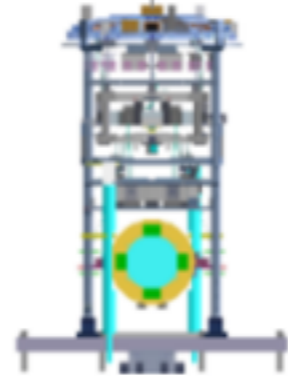
TYPE-A

TYPE-B

TYPE-BP



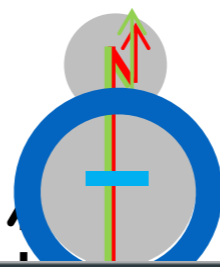
- Type-A
- Type-B
- Type-Bp
- Type-C



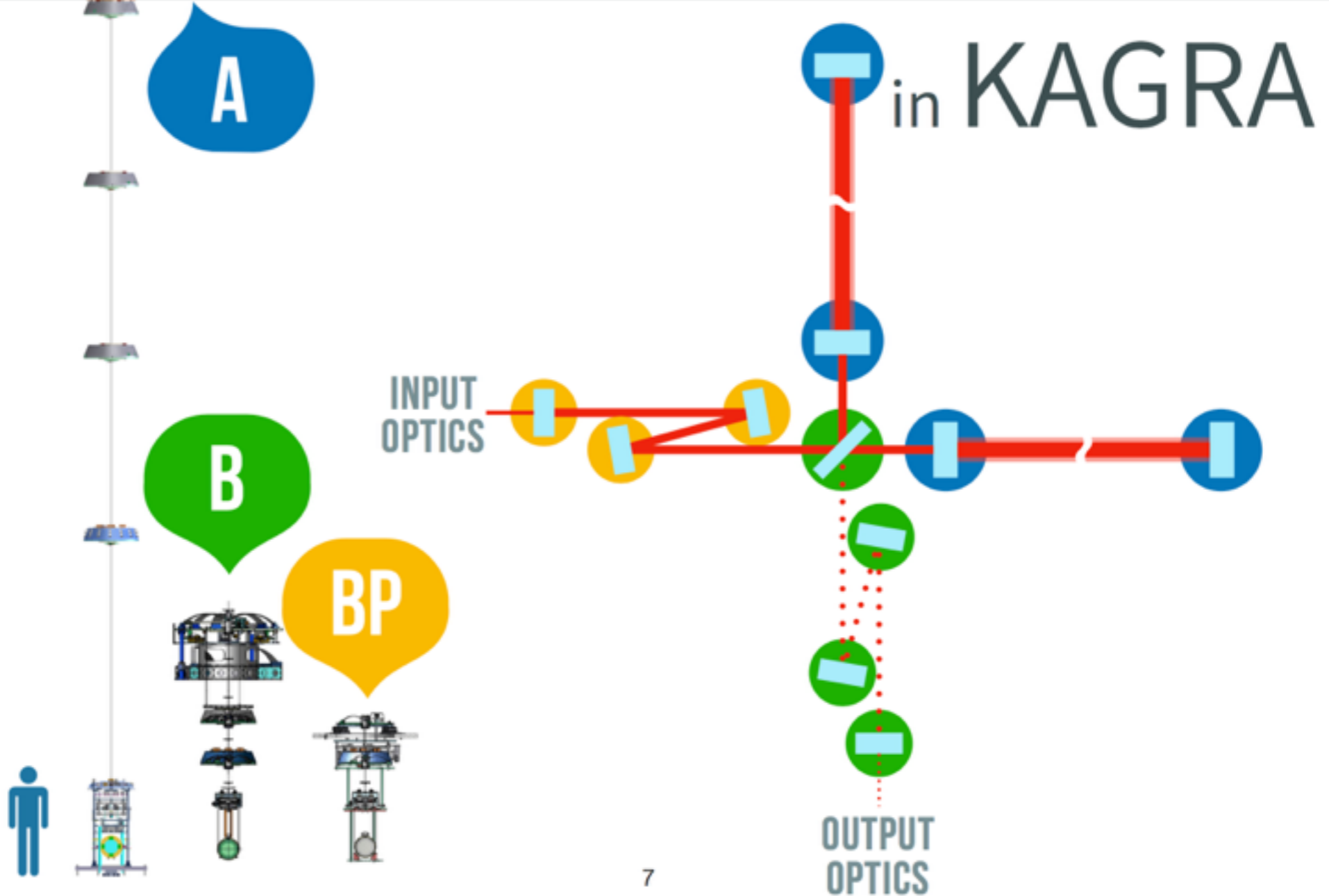
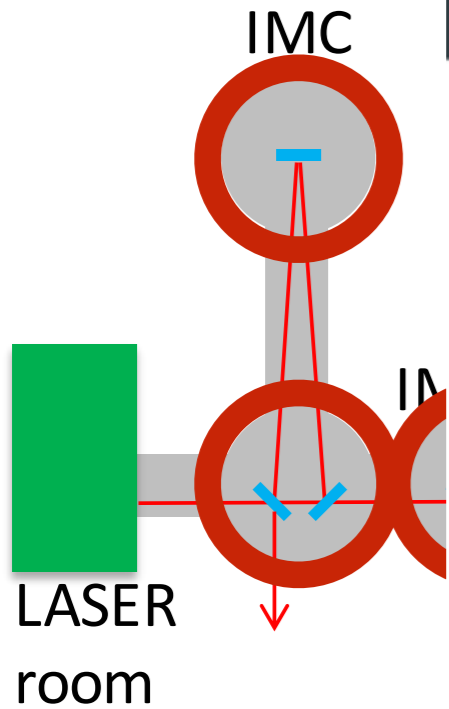
6



KAGRA suspension



Vibration Isolation Systems

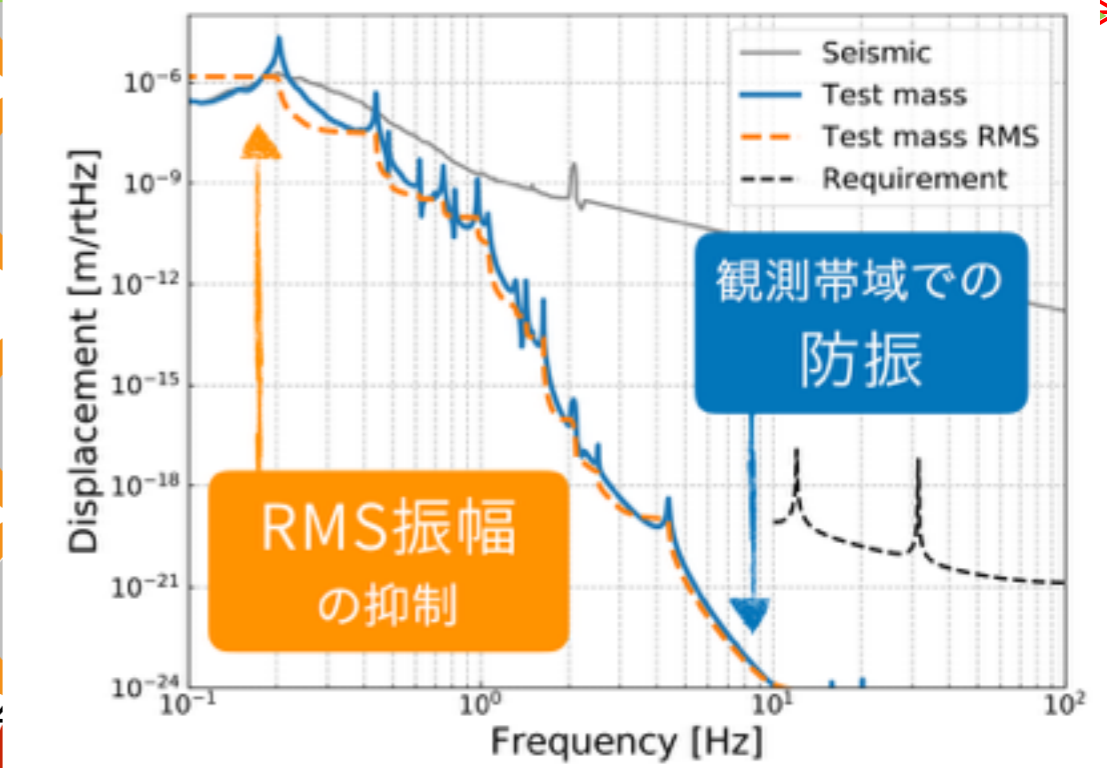
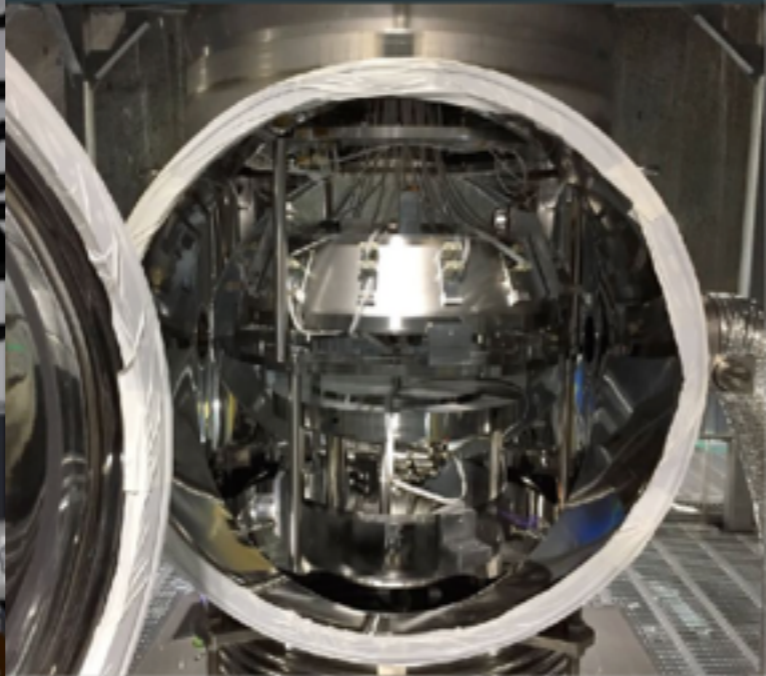
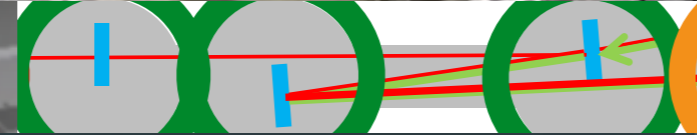
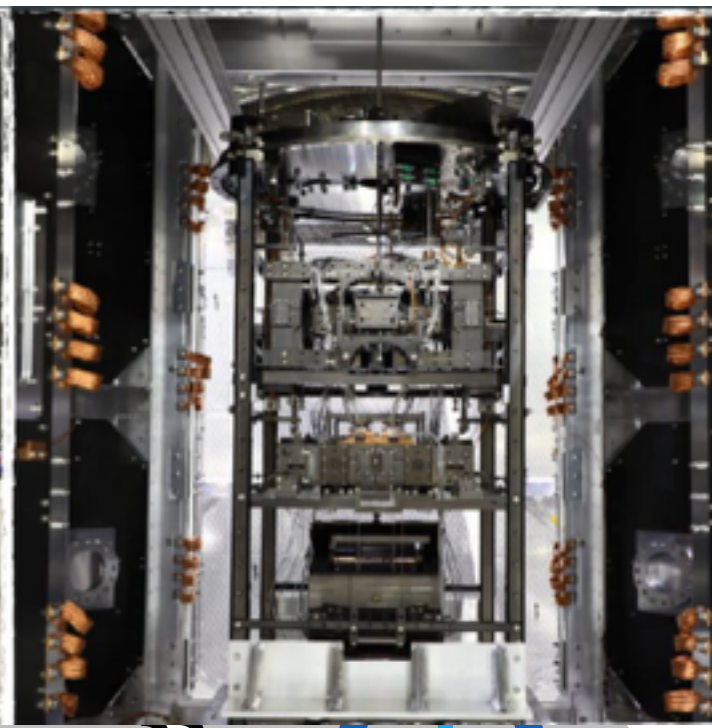
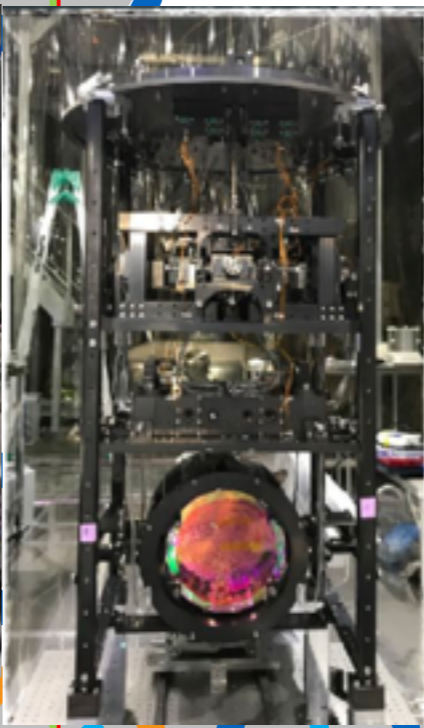
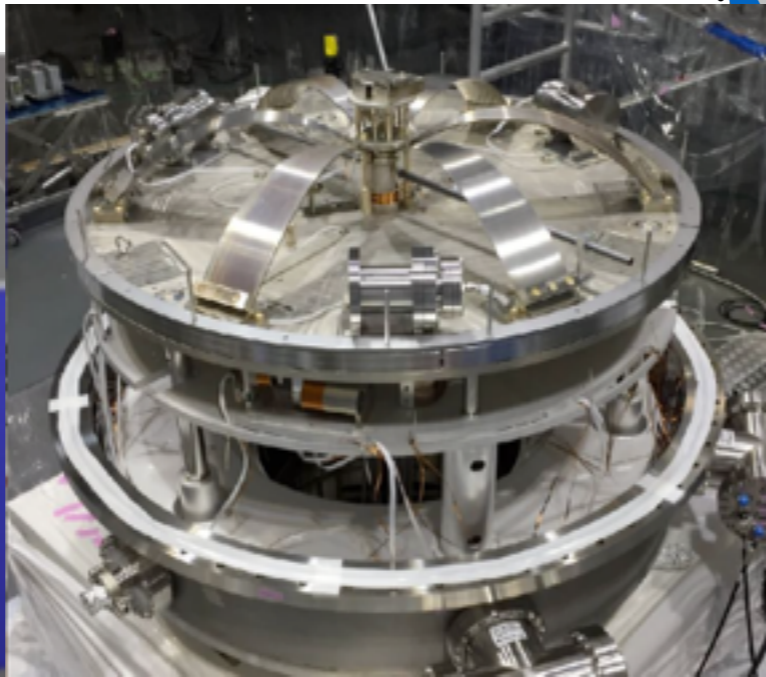
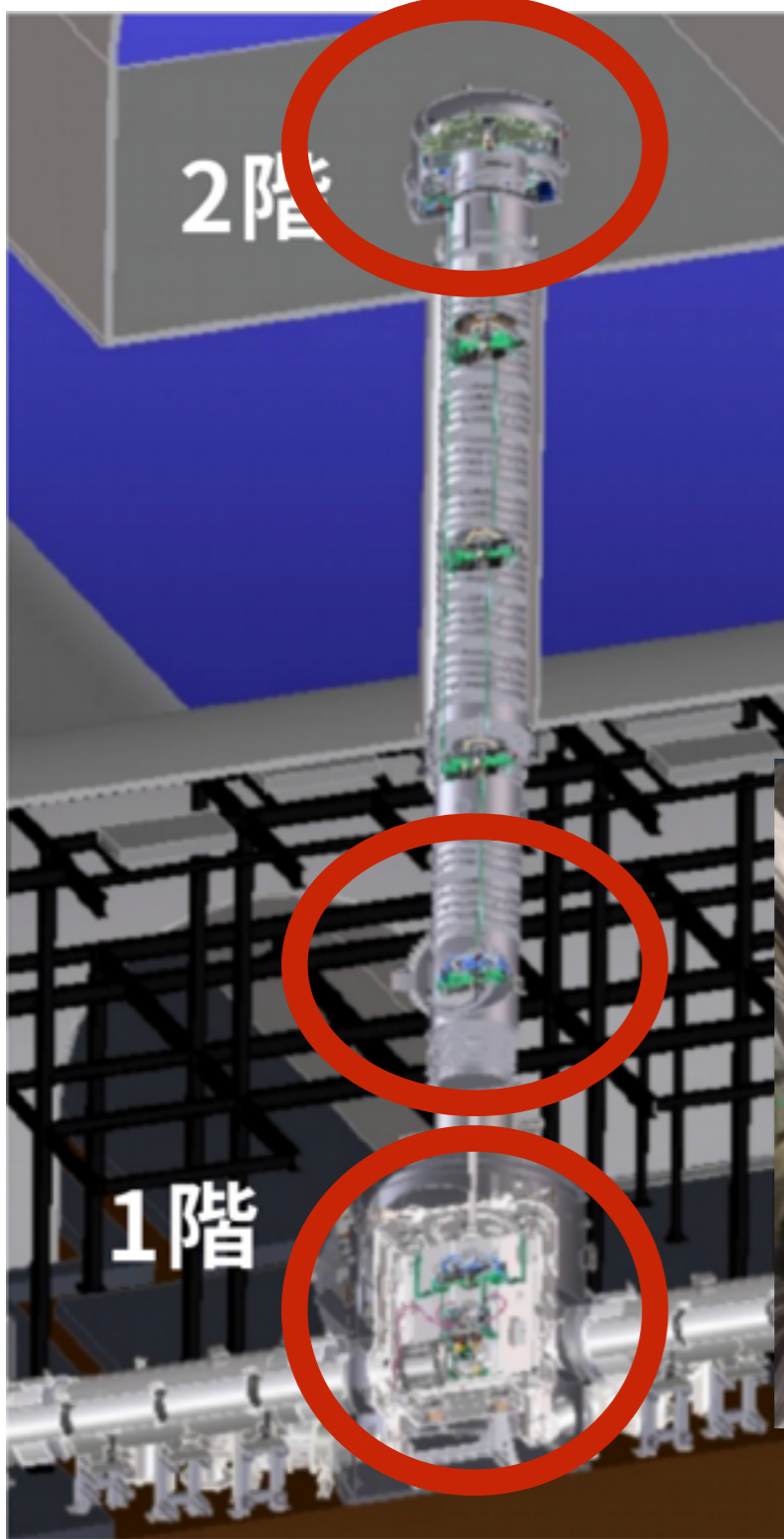
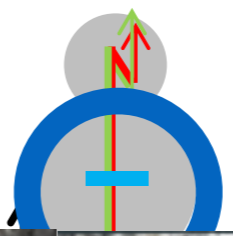


- Type-A
- Type-B
- Type-Bp
- Type-C

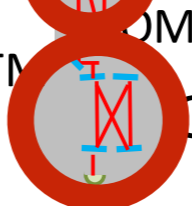




KAGRA suspension



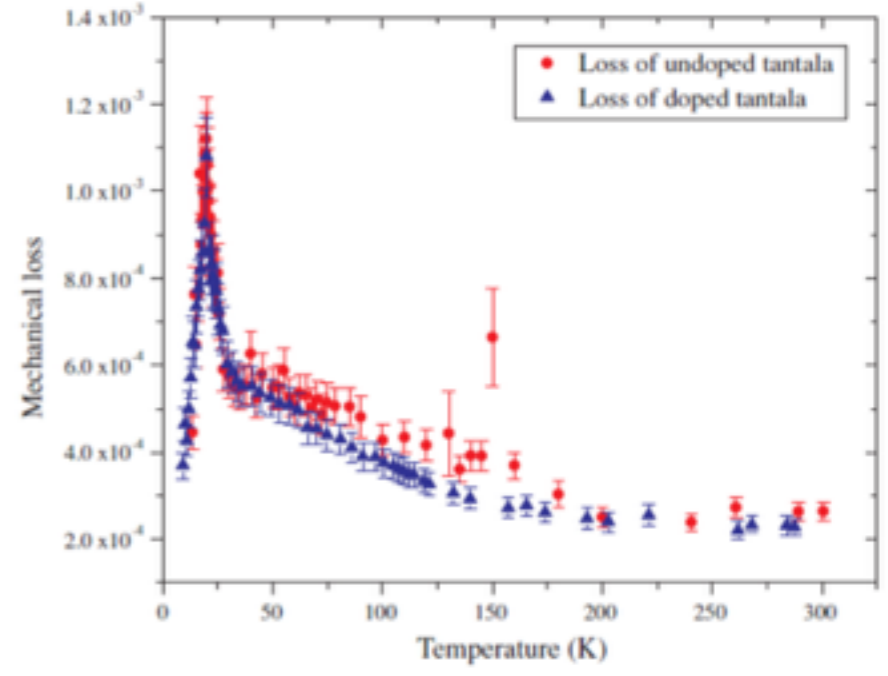
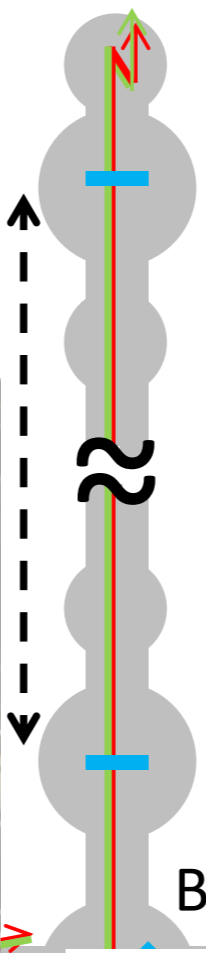
OSTM OMMT1 DMC





KAGRA cryogenic

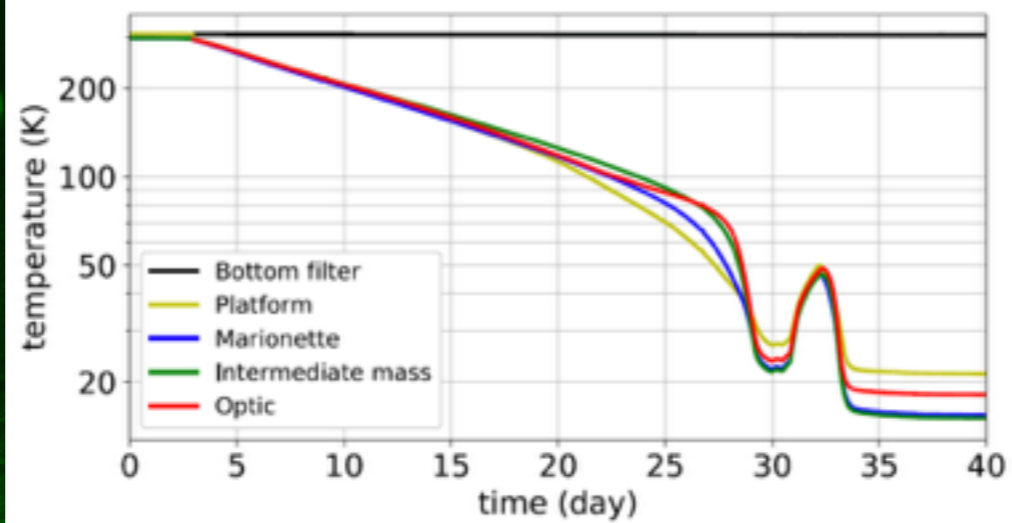
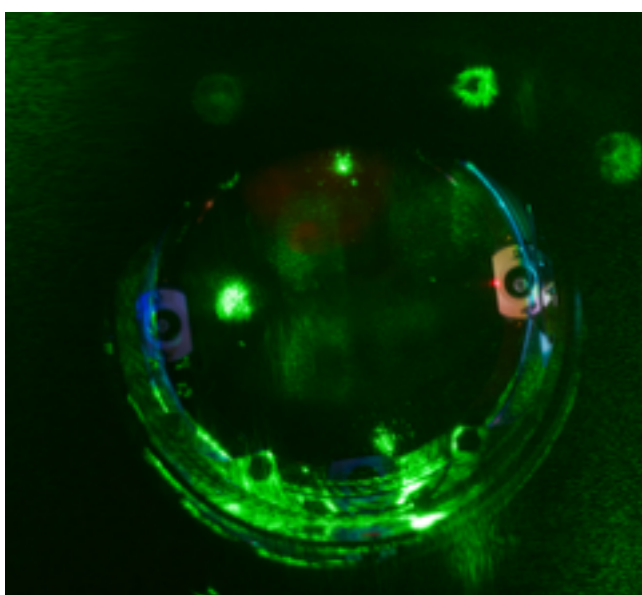
- Cryogenic system



低温でのコーティングロス増加

BS

- 修士論文のテーマ
 - ヒートリンク線の性能評価
 - 低温センサーの開発
 - Q値測定
 - 熱伝導率測定
- 博士論文のテーマ
 - 低温懸架系のヒートリンク防振開発
 - 低温GASフィルターの開発
 - サファイア懸架系のQ値改善
 - 低温懸架系の制御&干渉計動作(MI)
 - 低温懸架系の制御&干渉計動作(FPMI)
 - 低温鏡のコンタミネーションに関する研究
 - 低温鏡の局所加熱法に関する研究

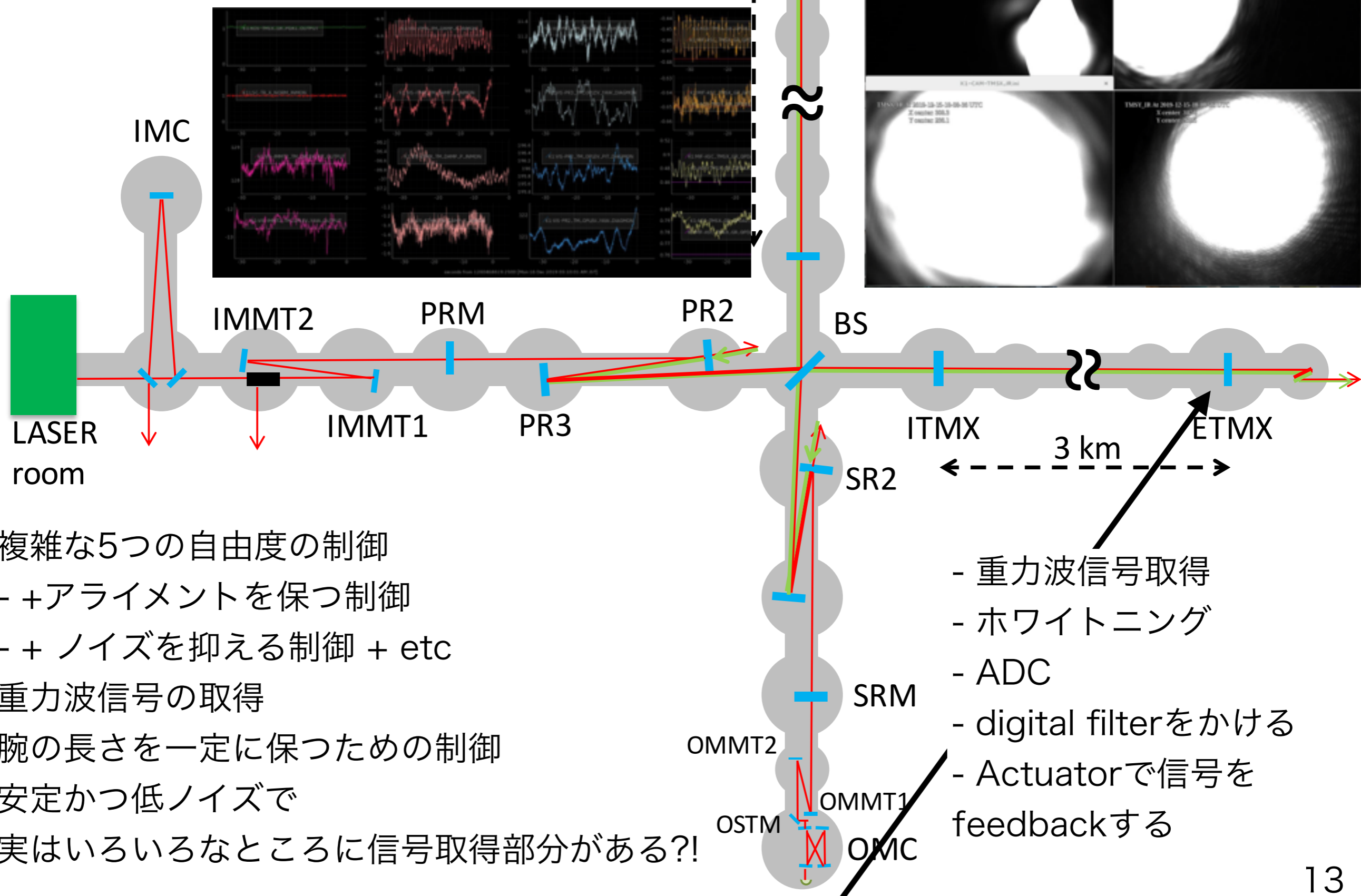


OMC



KAGRA interferometer

- Interferometer control



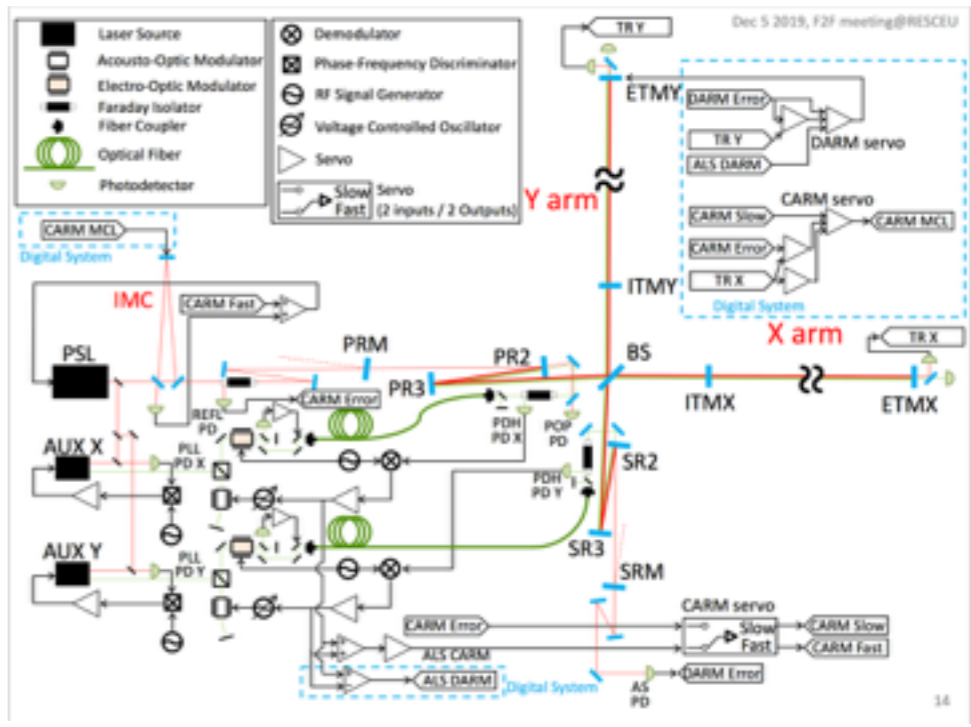
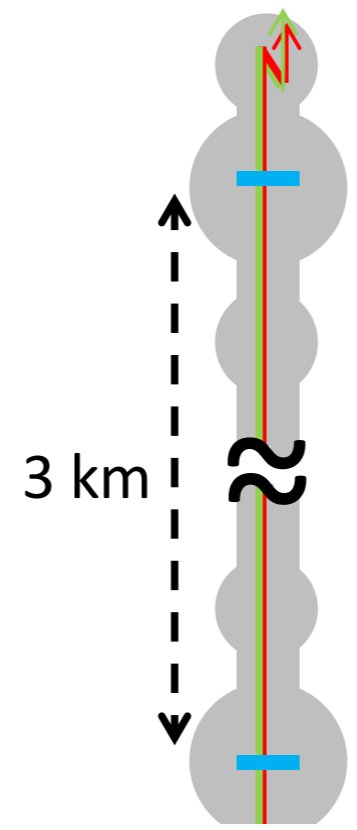
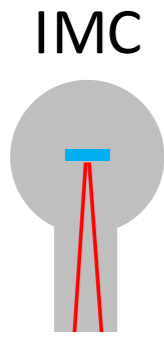
- 複雑な5つの自由度の制御
 - +アライメントを保つ制御
 - +ノイズを抑える制御 + etc
- 重力波信号の取得
- 腕の長さを一定に保つための制御
- 安定かつ低ノイズで
- 実はいろいろなところに信号取得部分がある?!

- 重力波信号取得
- ホワイトニング
- ADC
- digital filterをかける
- Actuatorで信号をfeedbackする



KAGRA interferometer

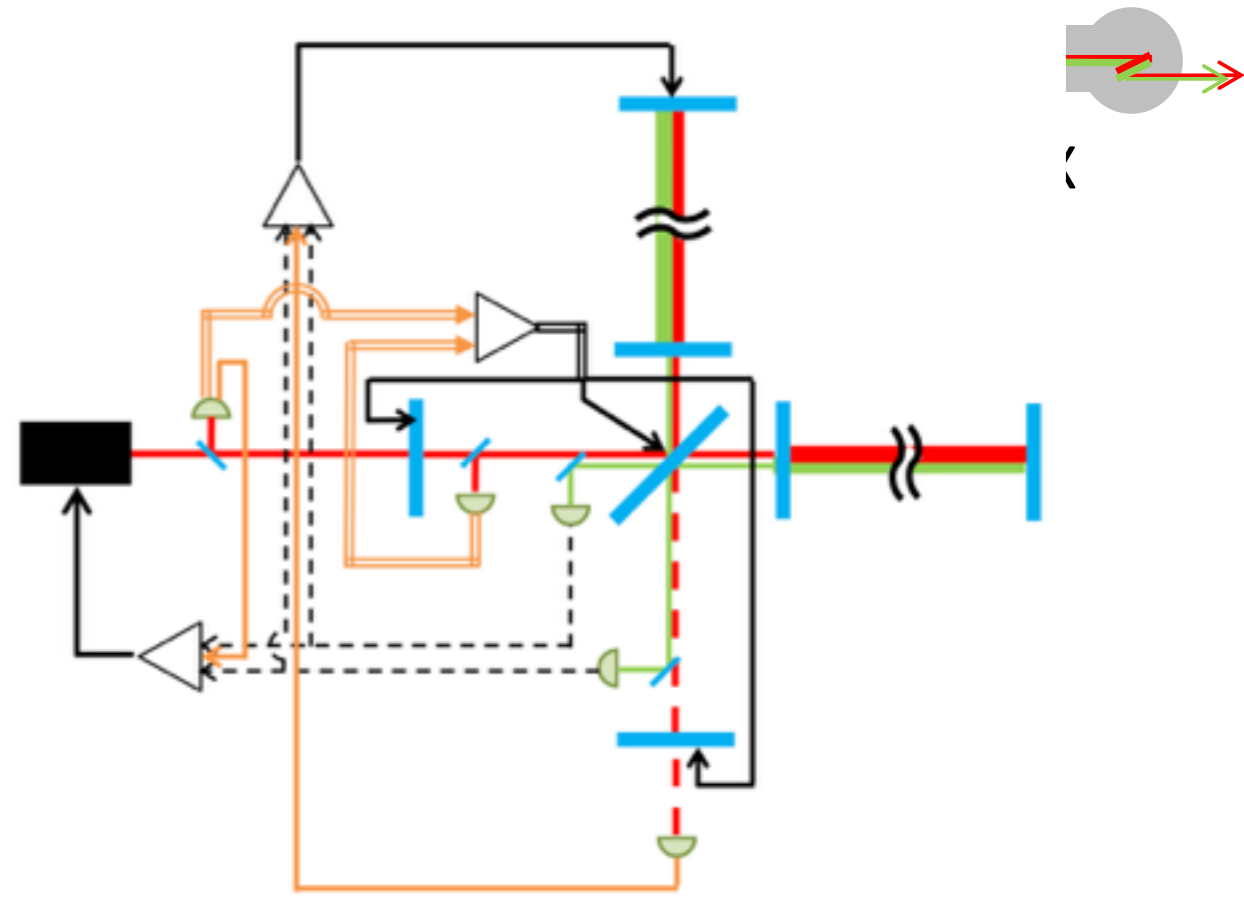
- Interferometer control



◎ 全5自由度の読み出しを
1 (X ARM) + 1 (Y ARM) + 3 (PRC, MI, SRC) に分離。

読み出し グリーンx2 メインレーザー

- 0. **メインレーザー**は動作点にいない。
グリーンレーザーを腕に追従させる。
- 1. **グリーン**の信号で腕の1+1自由度を安定化
- 2. **中央部分**の3自由度のロック
- 3. 腕の自由度も動作点へ
- 4. 信号の切り替え → 引き込み完了



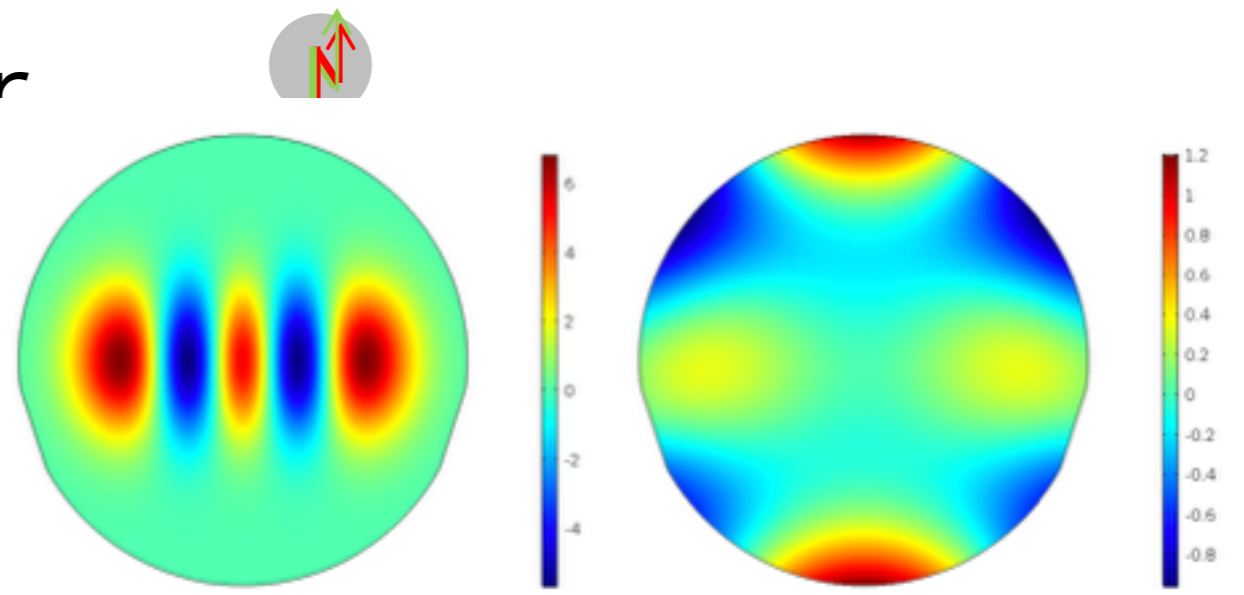
Auxiliary Laser
Main Laser

OSIM



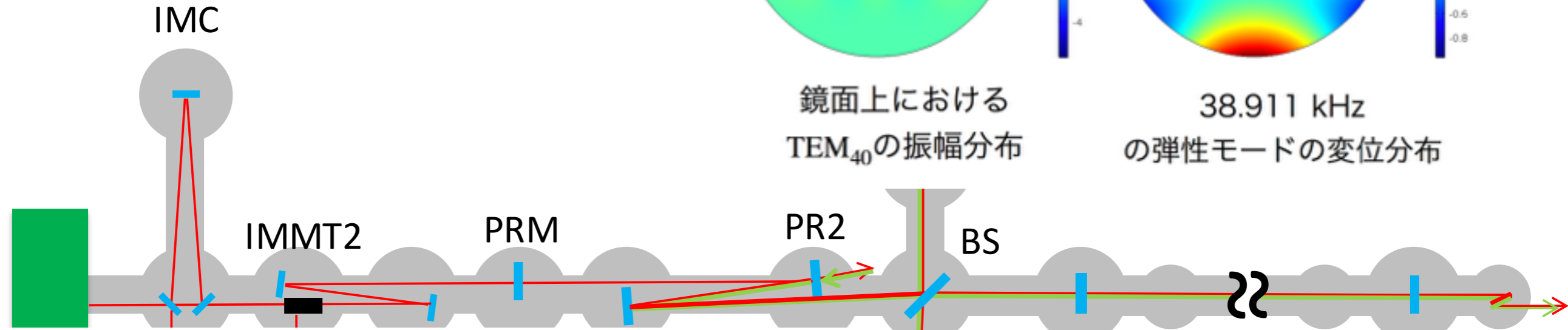
KAGRA interferometer

- Parametric instability



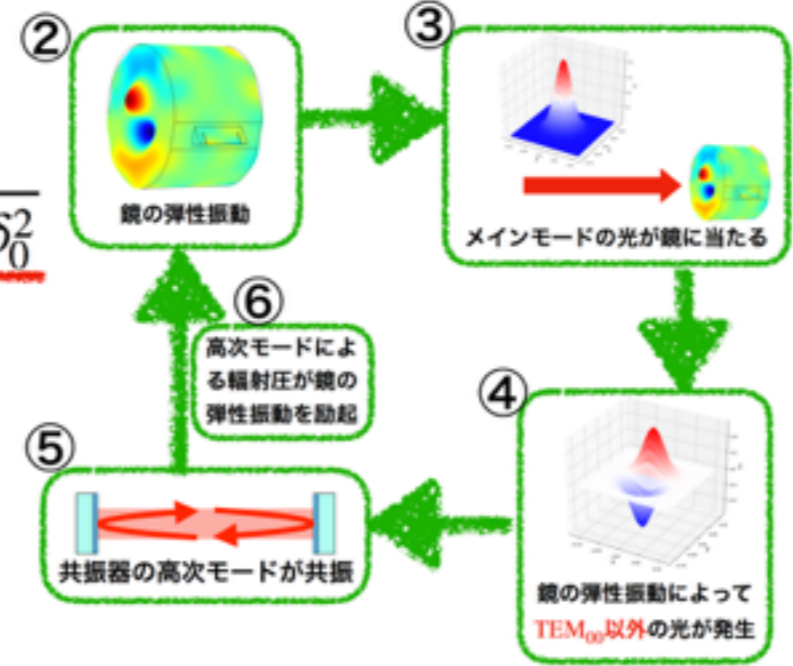
鏡面上における TEM₄₀の振幅分布

38.911 kHz の弾性モードの変位分布



②～⑥のループのゲインをパラメトリックゲインと言う。

$$\mathcal{R} = \frac{4PQ_mQ_o}{McL\omega_m^2} \frac{\Lambda}{1 + \Delta\omega^2/\delta_0^2}$$



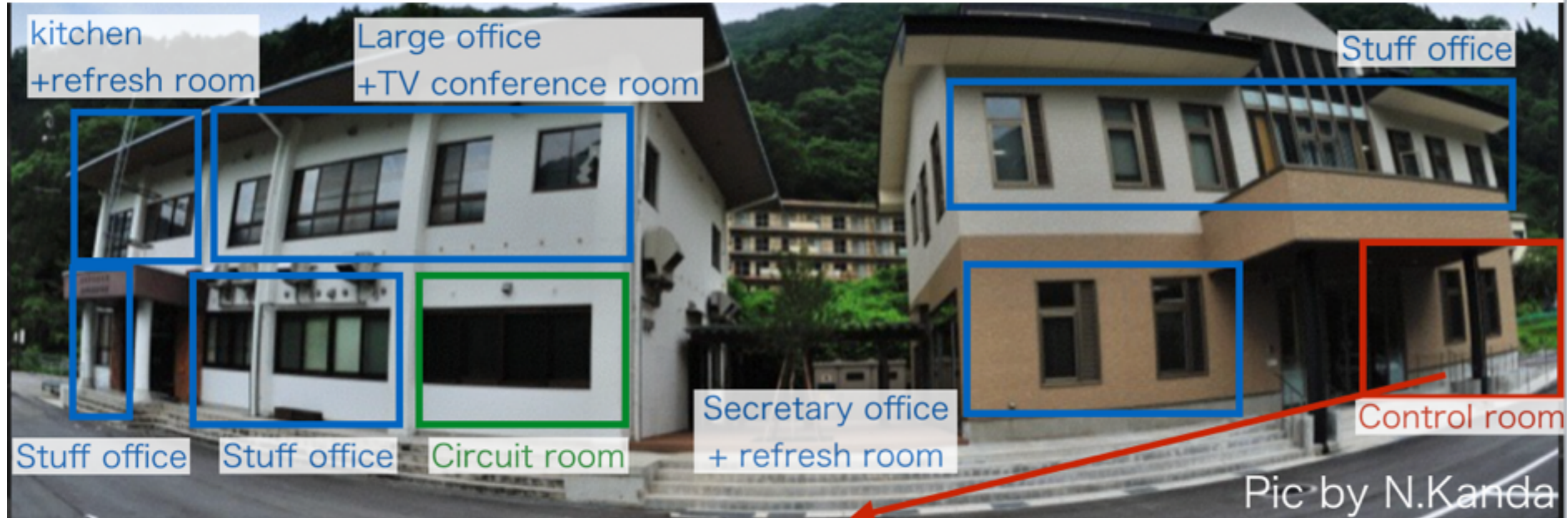
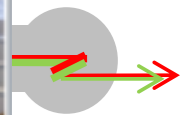
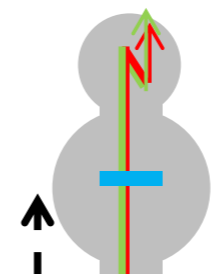
1を超えると共振状態が不安定になる。共振器の制御が困難になる。

- L : 共振器の長さ
- M : 鏡の質量
- P : 共振器内循環パワー
- Q_m : 鏡の弾性振動のQ値
- Q_o : 光共振器のQ値
- ω_m : 鏡の固有角周波数



KAGRA interferometer

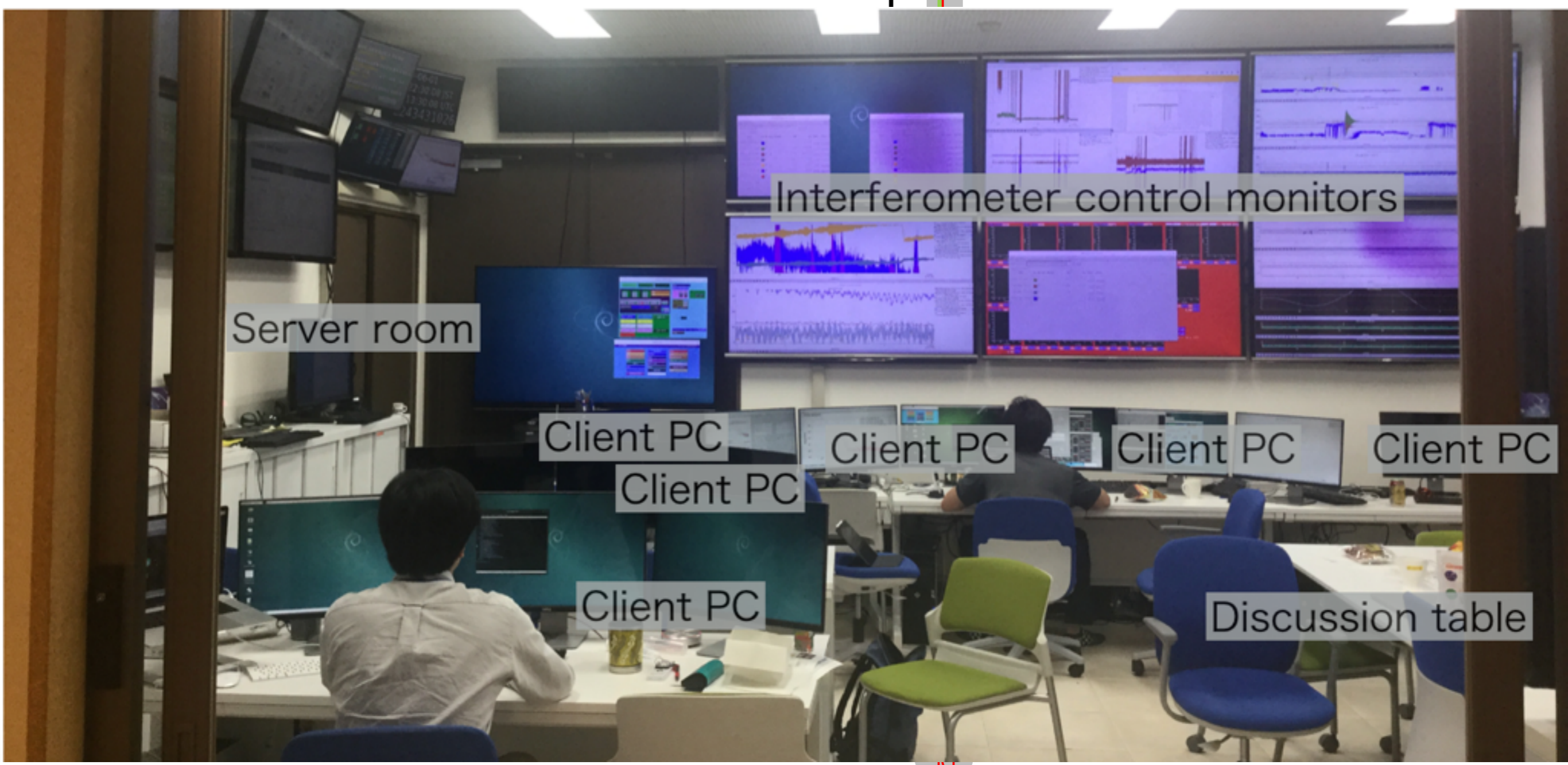
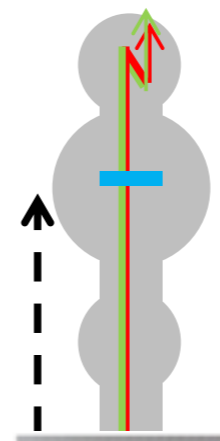
- Interferometer control





KAGRA interferometer

- Interferometer control



Interferometer control monitors

Server room

Client PC

Client PC

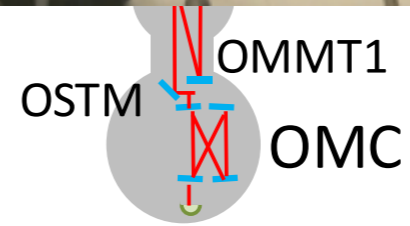
Client PC

Client PC

Client PC

Client PC

Discussion table



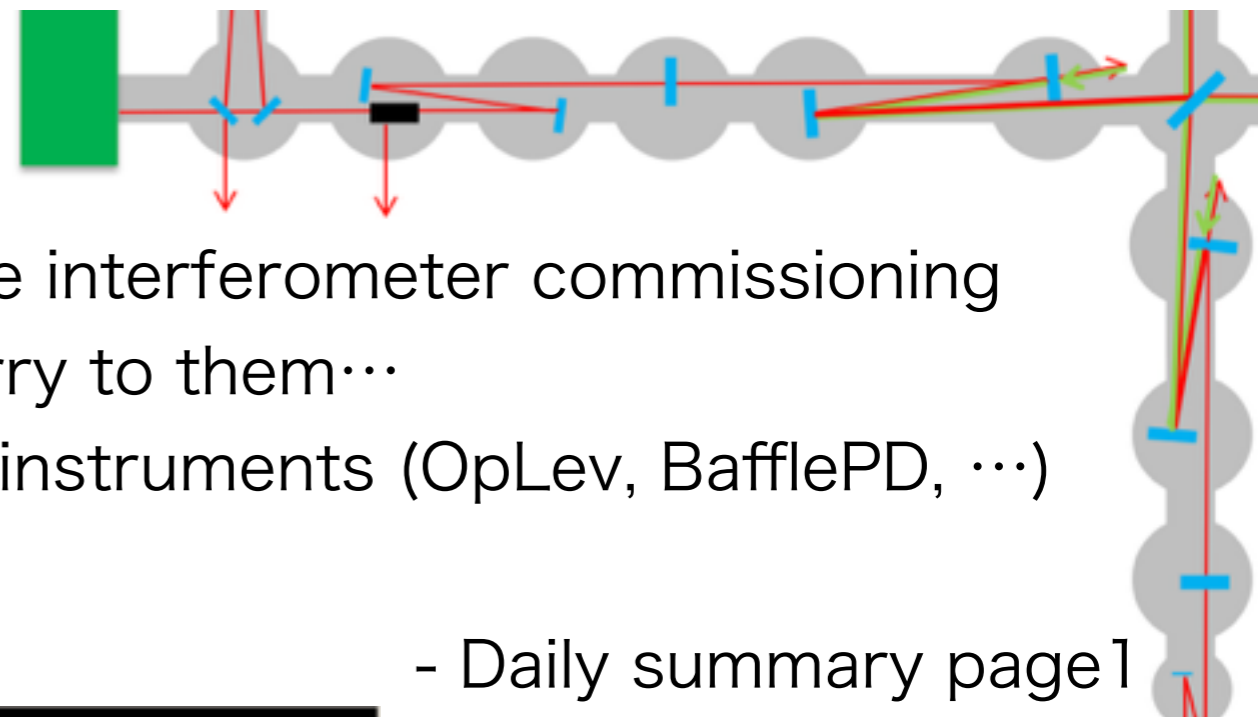


Server room



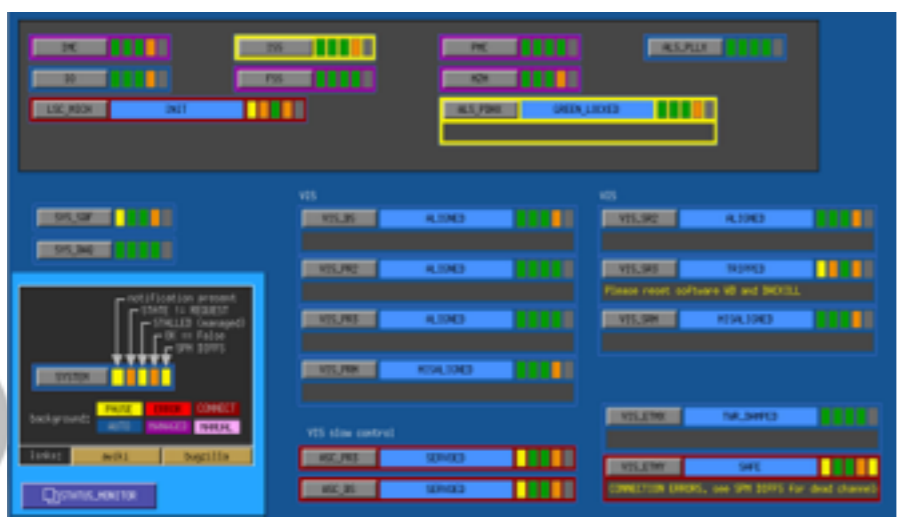


Commissioning supporters

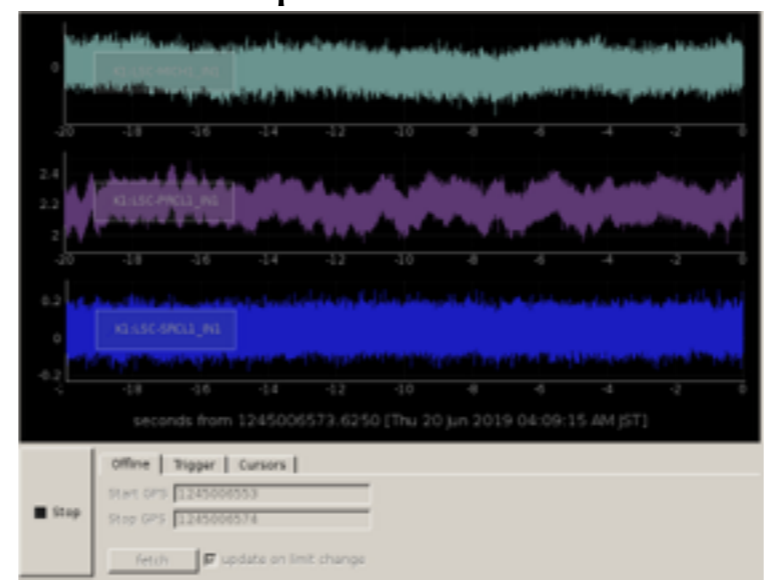


- There are so many tools prepared for the interferometer commissioning
- Some tools are introduced, if failed, sorry to them...
- Ofcourse, there are so many hardware instruments (OpLev, BafflePD, ...)

- Guardian



- ndscope



- Daily summary page 1

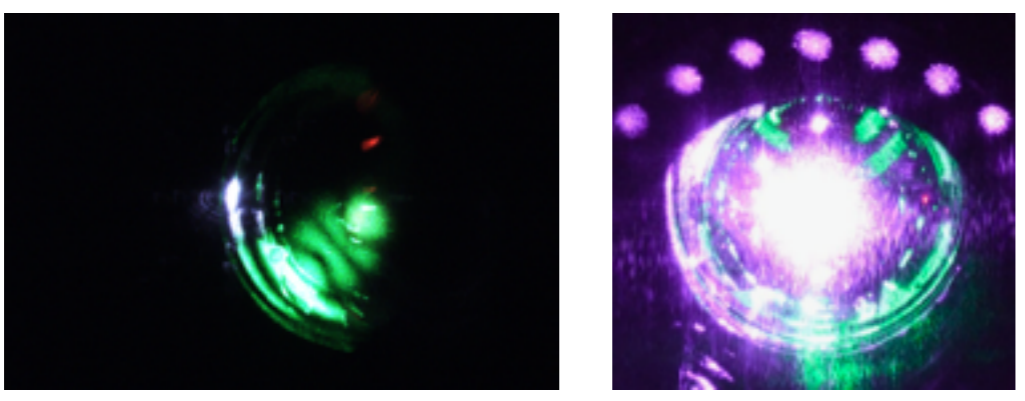
KAGRA summary

GlitchPlot channel General PSL IMC VIS PEM GlitchPlot JST : 20190617

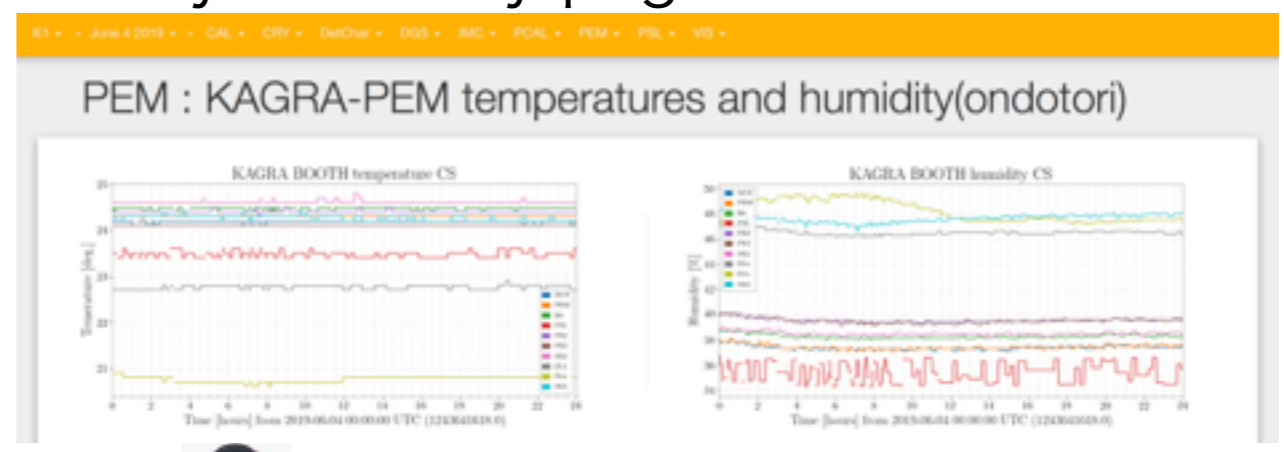
<< Previous day(20190616) List of Date(s) Latest Next day(20190618)>>

Index	JIT time	GPS time	max SNR	frequency [Hz]	max SNR	duration [s]	trigger channel
1	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	7.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
2	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLIMC_CAV_TRANS_OUT_DO
3	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
4	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLIMC_CAV_TRANS_OUT_DO
5	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLIMC_CAV_TRANS_OUT_DO
6	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLIMC_CAV_TRANS_OUT_DO
7	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLIMC_CAV_TRANS_OUT_DO
8	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
9	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
10	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
11	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
12	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
13	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
14	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
15	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
16	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
17	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
18	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
19	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO
20	2019-06-17 23:26:11.0	124478031.0	205.234	4.3794	4.0	0.0000	KLPSL_PMC_TRANS_OUT_DO

- Telephoto camera



- Daily summary page 2



movie

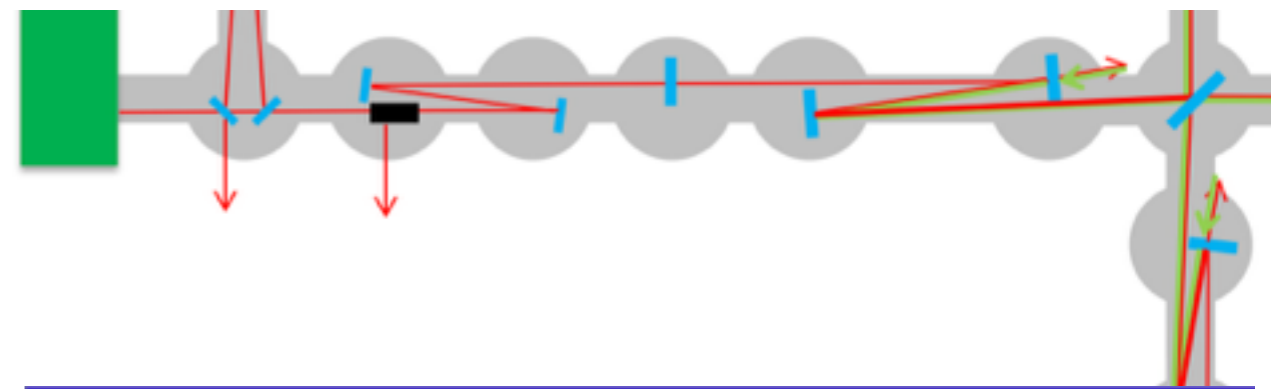
camera



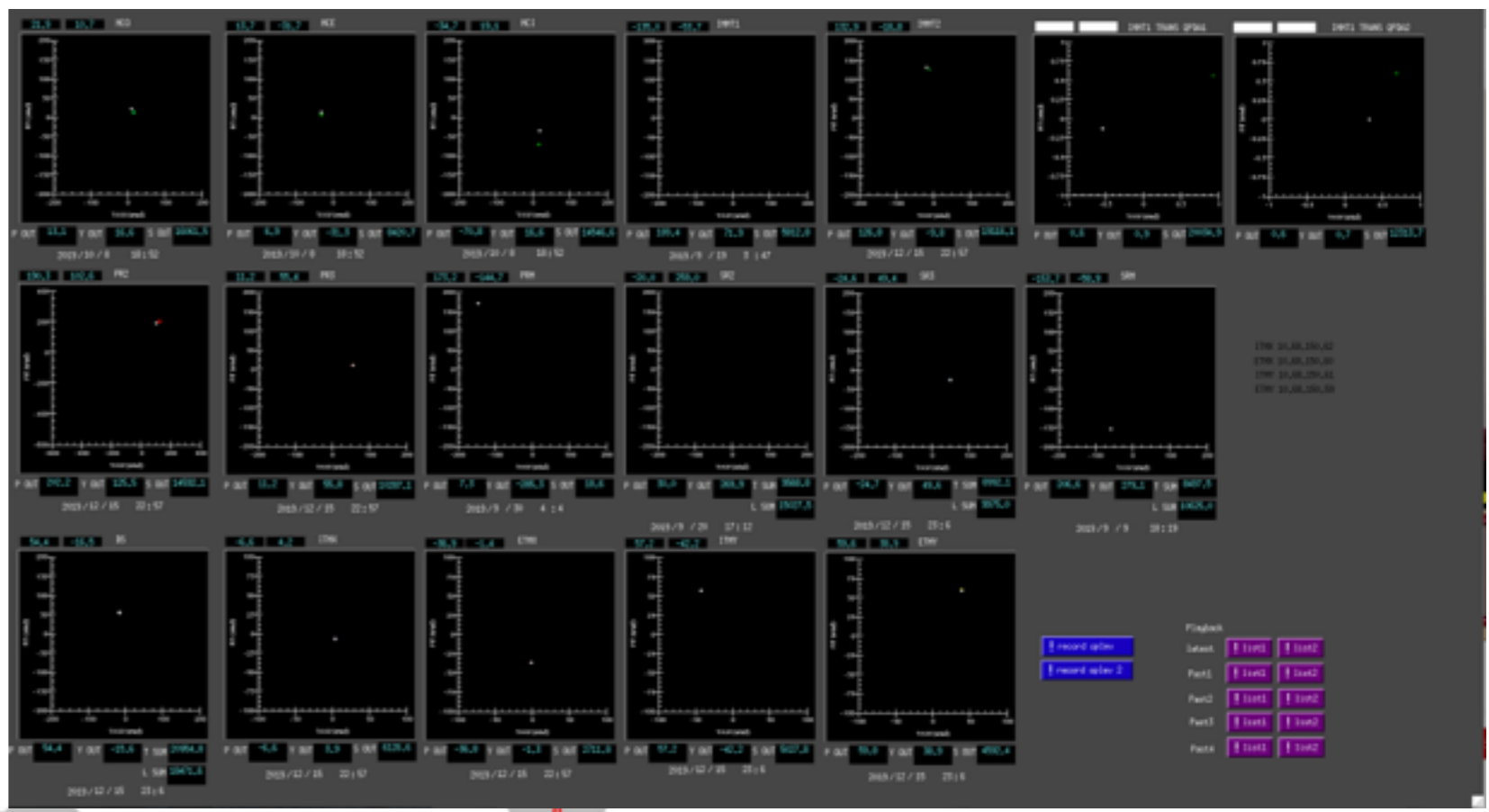


Commissioning supporters

- commissioning dock



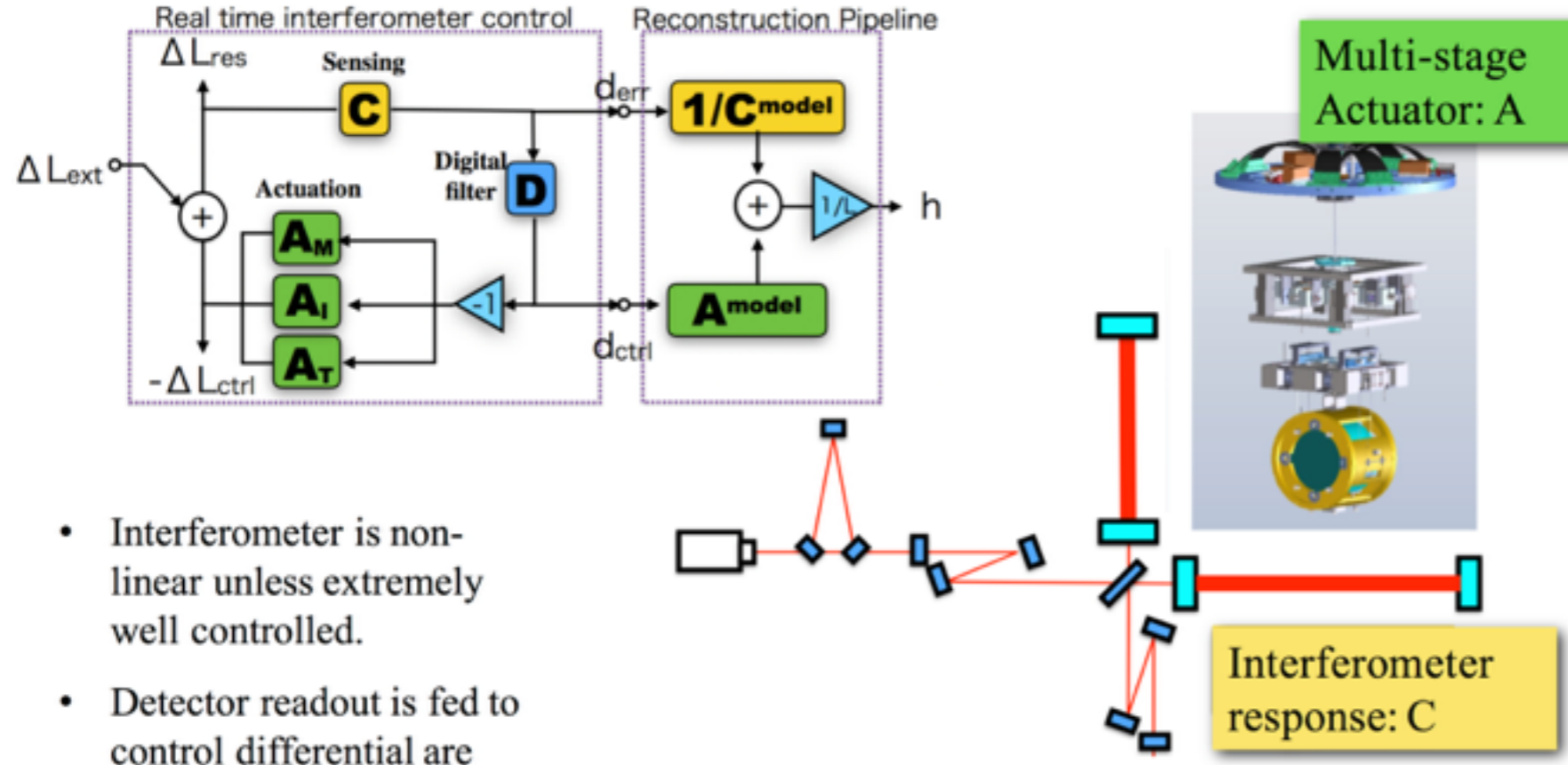
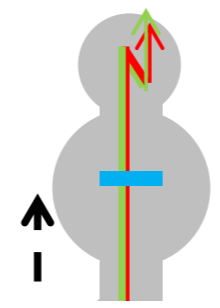
- Collect the commissioning tools
 - TM optic align
 - OpLev signal with reference
 - timeseries tools
 - laser shutter
 - Guardian information
 - etc...



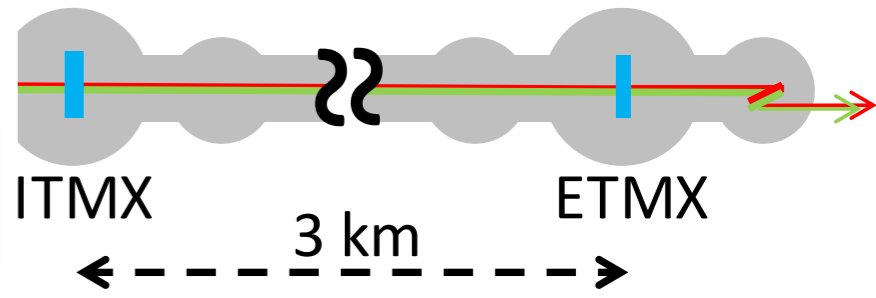


KAGRA detector

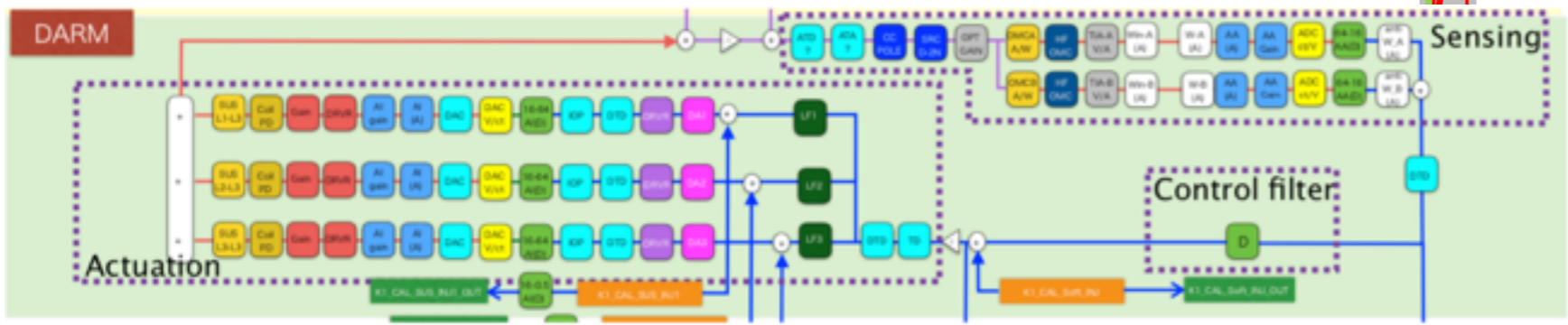
- Calibration



- Interferometer is non-linear unless extremely well controlled.
- Detector readout is fed to control differential are length.



$$h(t) = \frac{\Delta L_{ext}(t)}{L} = C^{-1} * d_{err}(t)/L + A * d_{ctrl}(t)/L$$



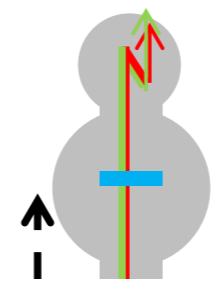
$$C^{(model)}(f, t, \vec{\lambda}_C) = \frac{\kappa_C(t) H_C}{1 + if/f_{CC}} C_R(f) e^{-2\pi if \tau_C} \times \frac{f^2}{f^2 + f_S^2 - if f_S Q_S^{-1}}$$

$$A^{(model)}(f, t, \vec{\lambda}_A) = \kappa_T(t) F_T(f) H_T A_T(f) + \kappa_{PU}(t) (F_P(f) H_P A_P(f) + F_U(f) H_U A_U(f)) e^{-2\pi if \tau_A}$$

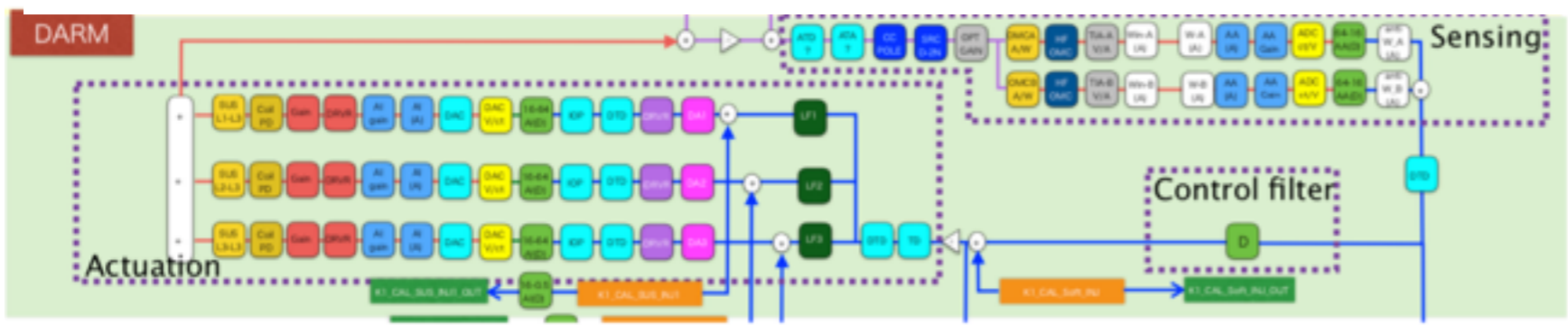
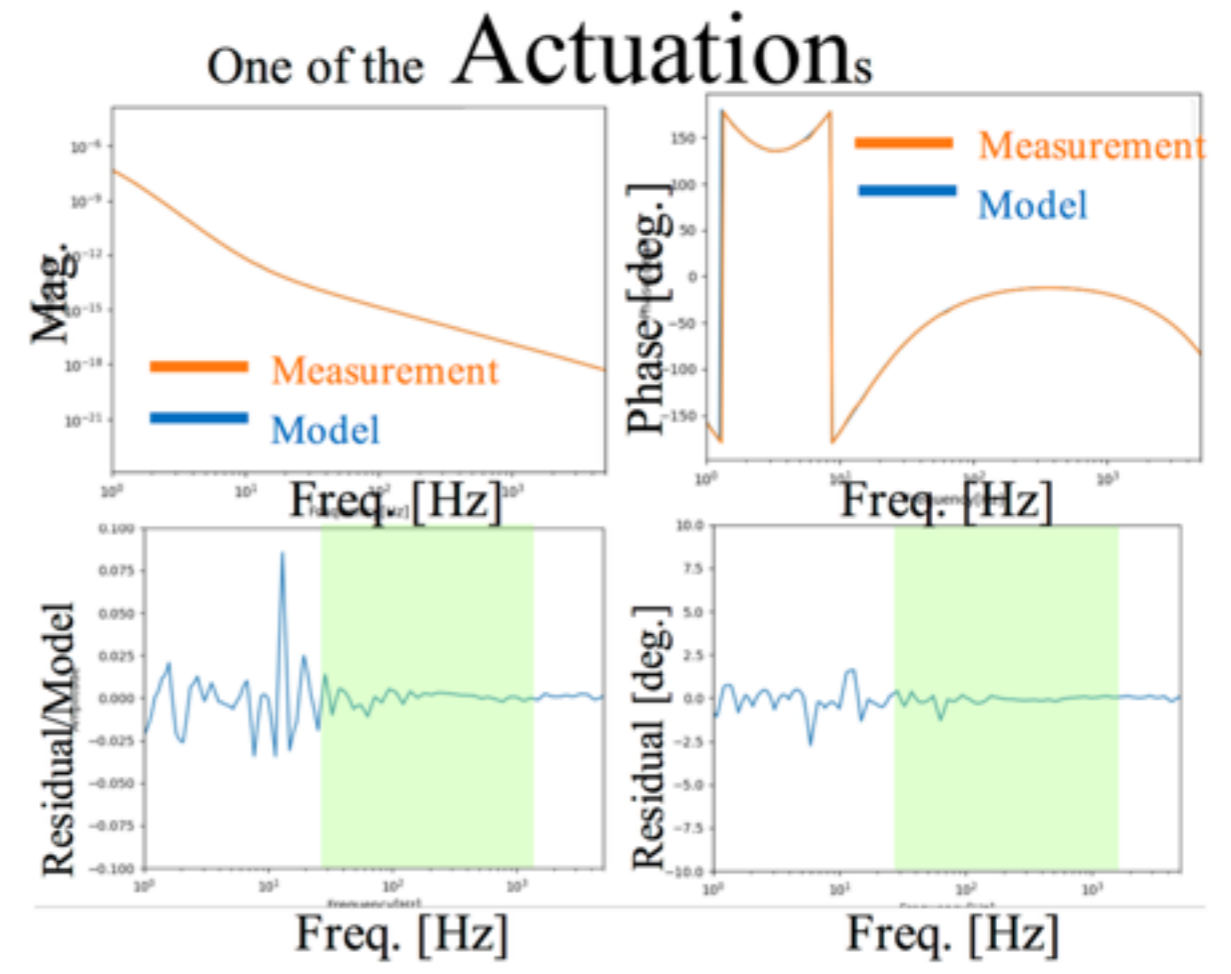
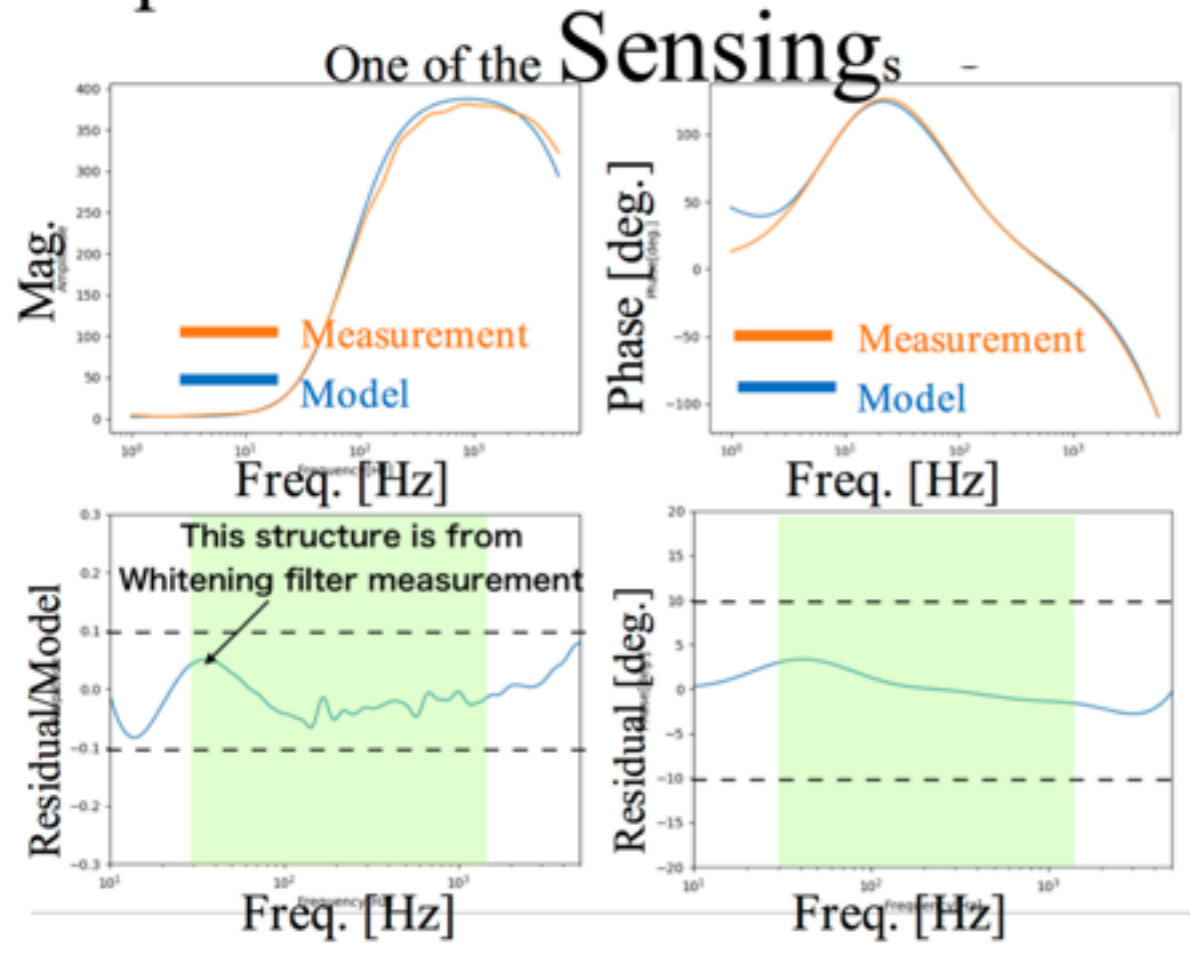


KAGRA detector

- Calibration



Example:



$$C^{(\text{model})}(f, t, \vec{\lambda}_C) = \frac{\kappa_C(t) H_C}{1 + if/f_{CC}} C_R(f) e^{-2\pi if \tau_C} \times \frac{f^2}{f^2 + f_S^2 - if f_S Q_S^{-1}}$$

$$A^{(\text{model})}(f, t, \vec{\lambda}_A) = \kappa_T(t) F_T(f) H_T A_T(f) + \kappa_{PU}(t) (F_P(f) H_P A_P(f) + F_U(f) H_U A_U(f)) e^{-2\pi if \tau_A}$$

IM

T1

AC

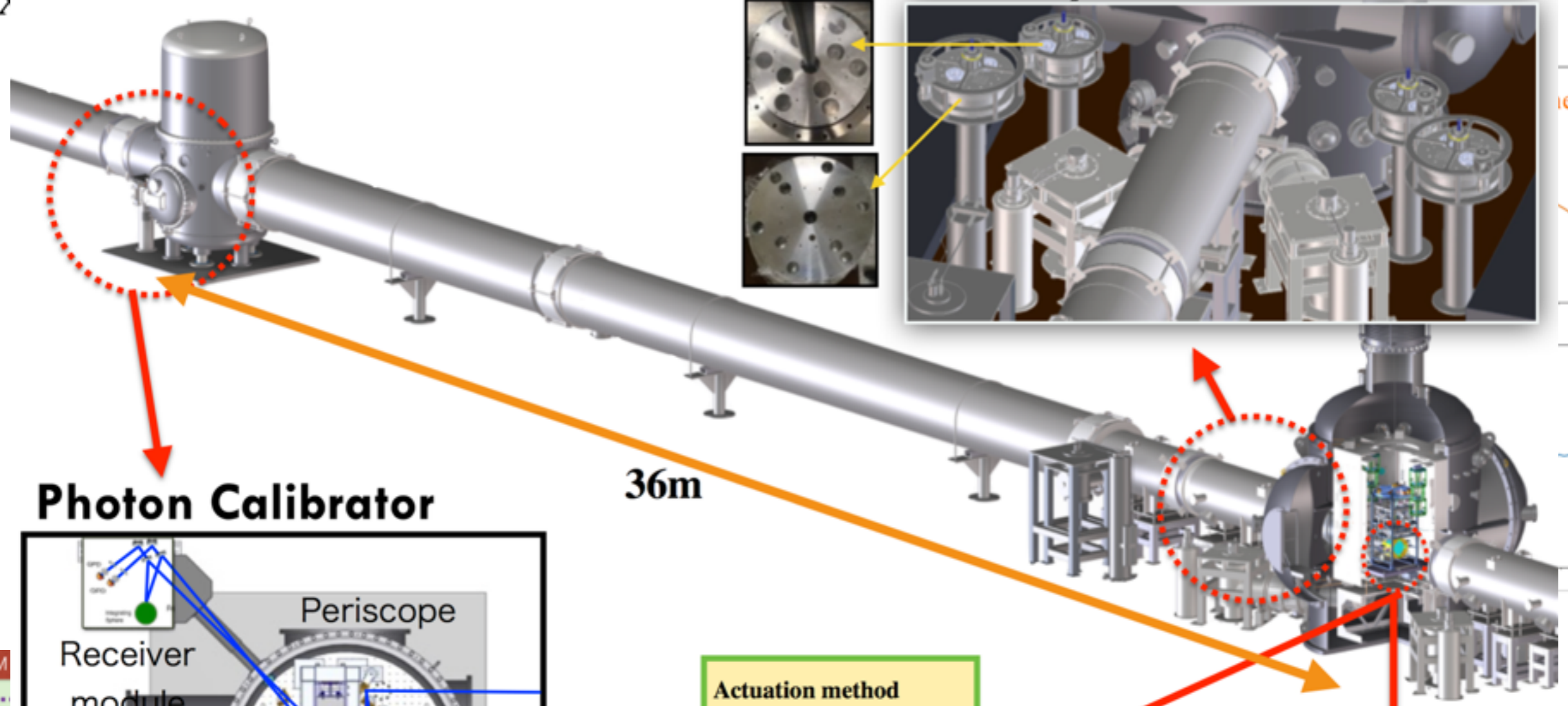


KAGRA detector

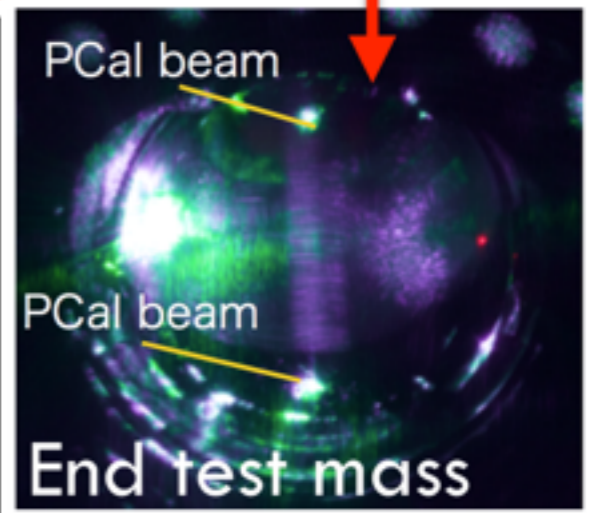
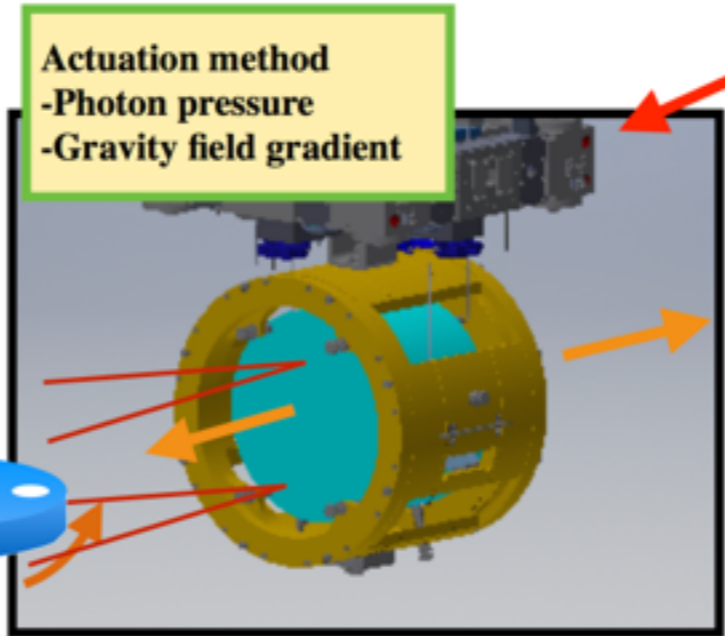
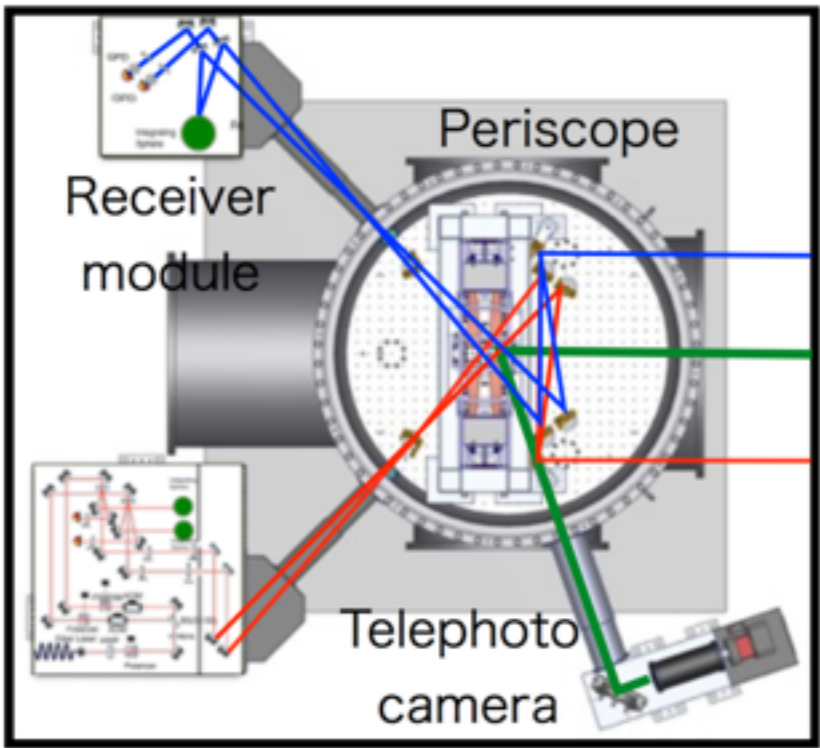


KAGRA Calibration instruments

Gravity Field Calibrator



Photon Calibrator



DARM

As

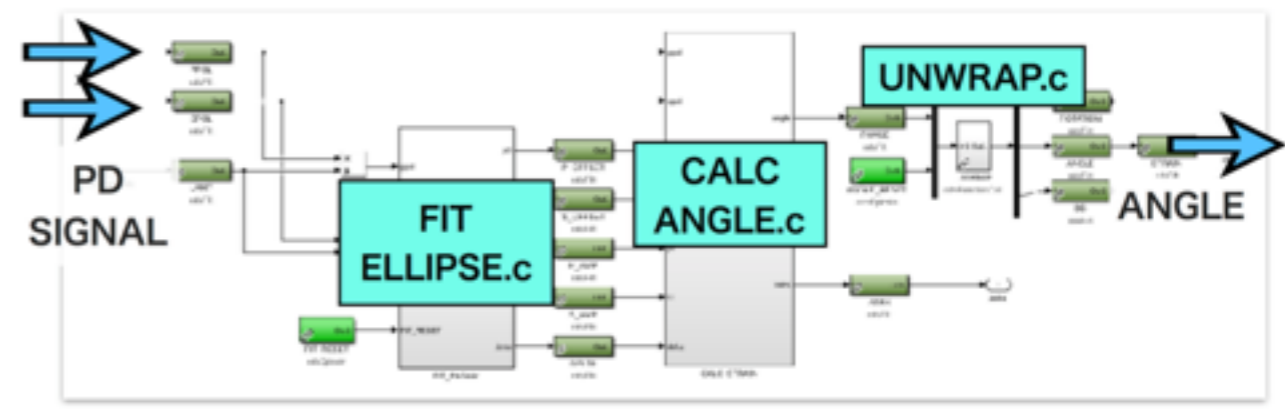
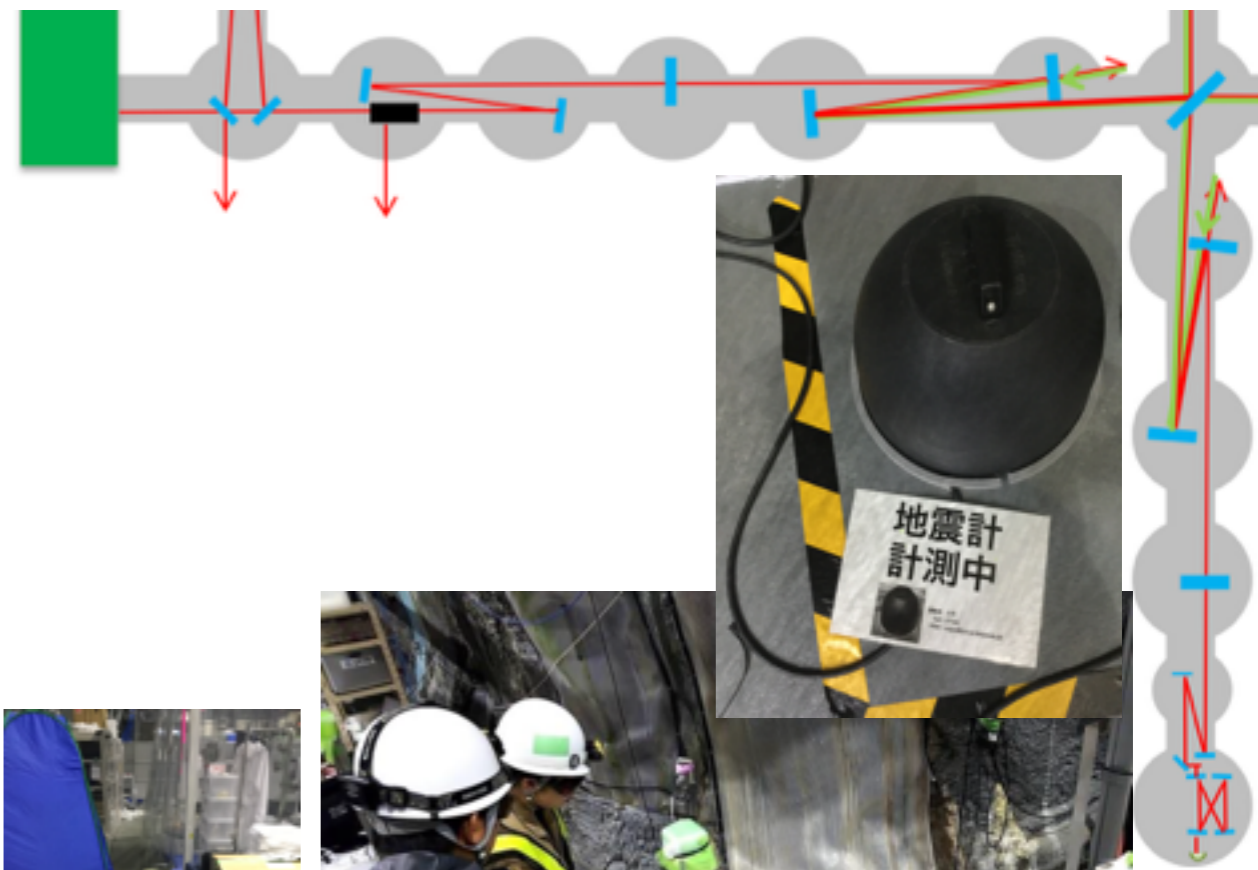
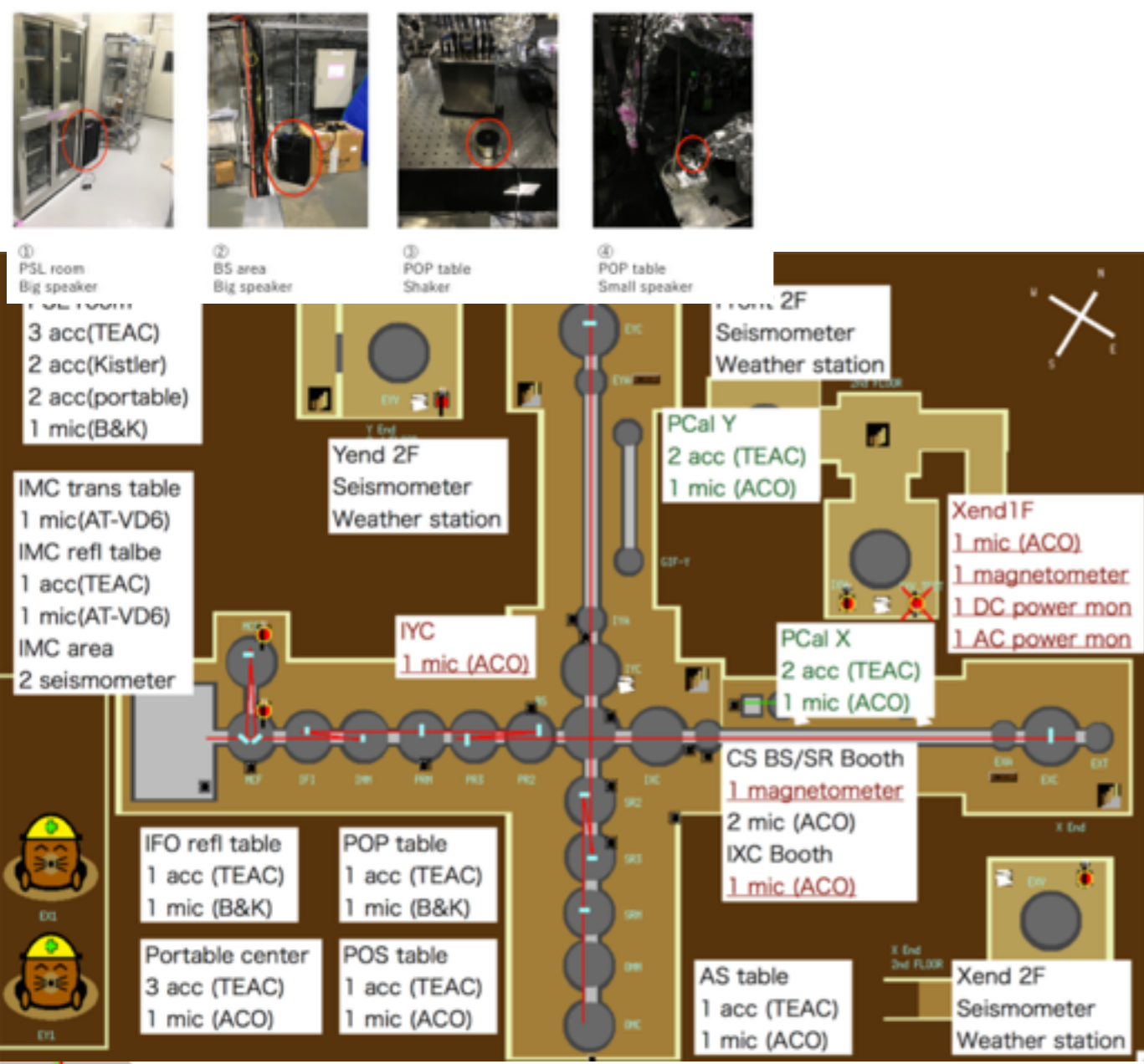
$C^{(mo)}$

ent

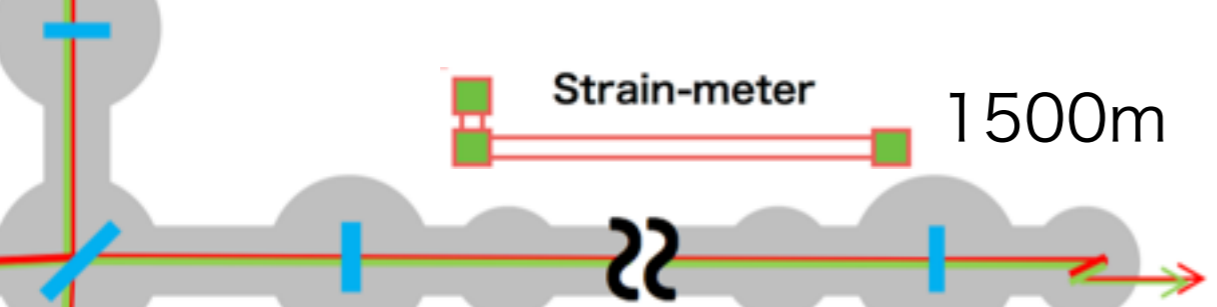
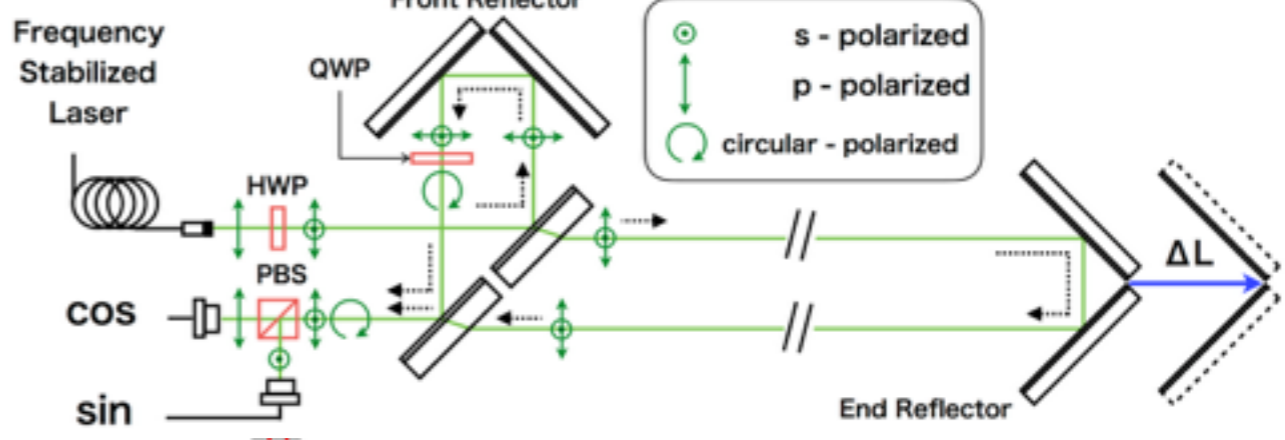


KAGRA detector

- Physical environmental monitor
- Geophysics interferometer

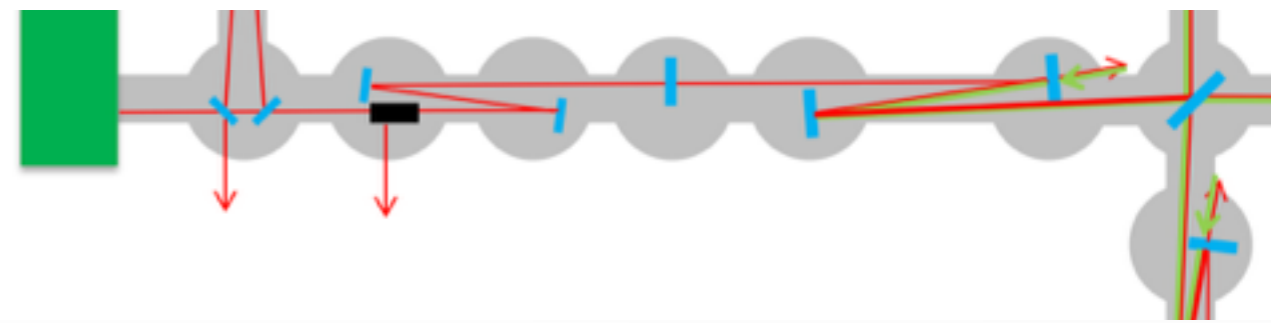


Calculating every 1 clock

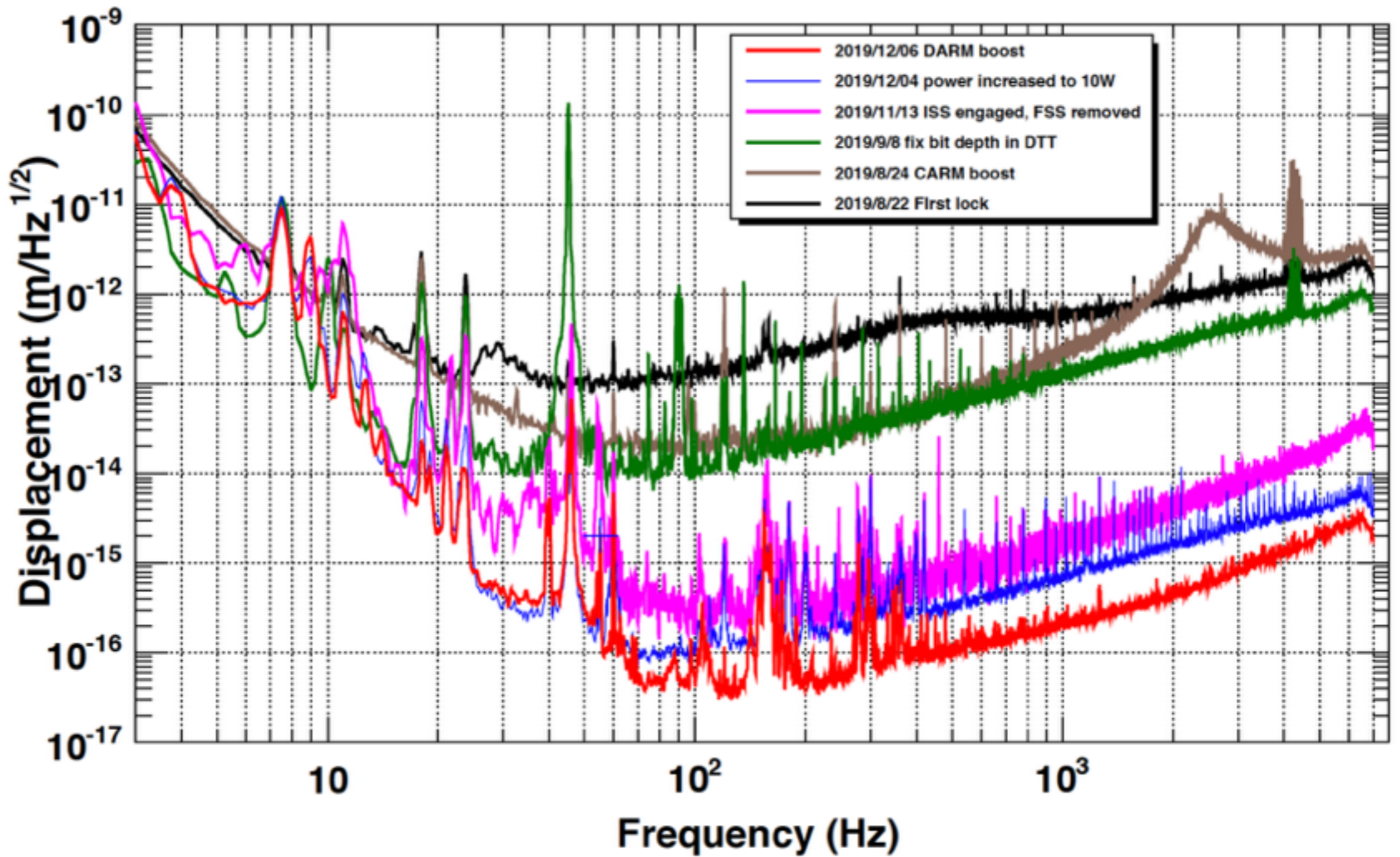




KAGRA sensitivity



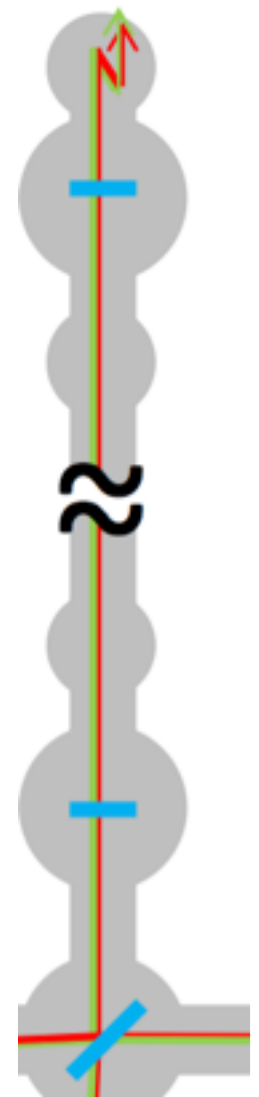
FPMI Sensitivity



*T0=06/12/2019 13:12:24

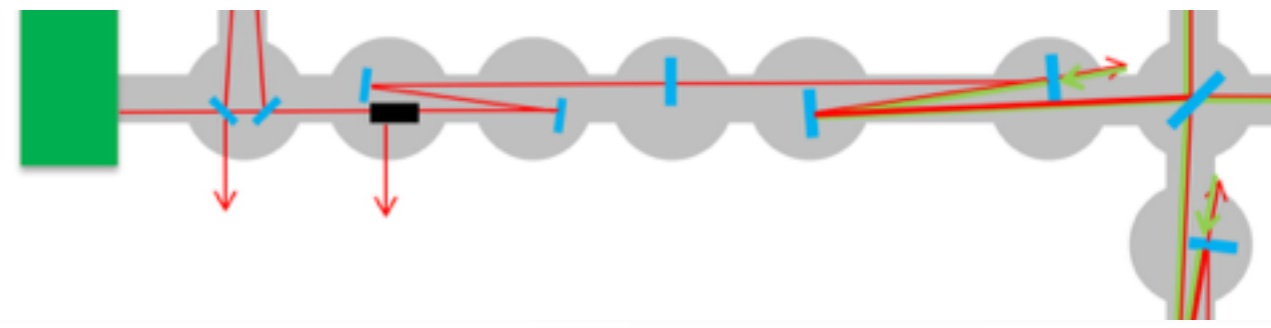
Avg=50/Bin=2L

BW=0.374994

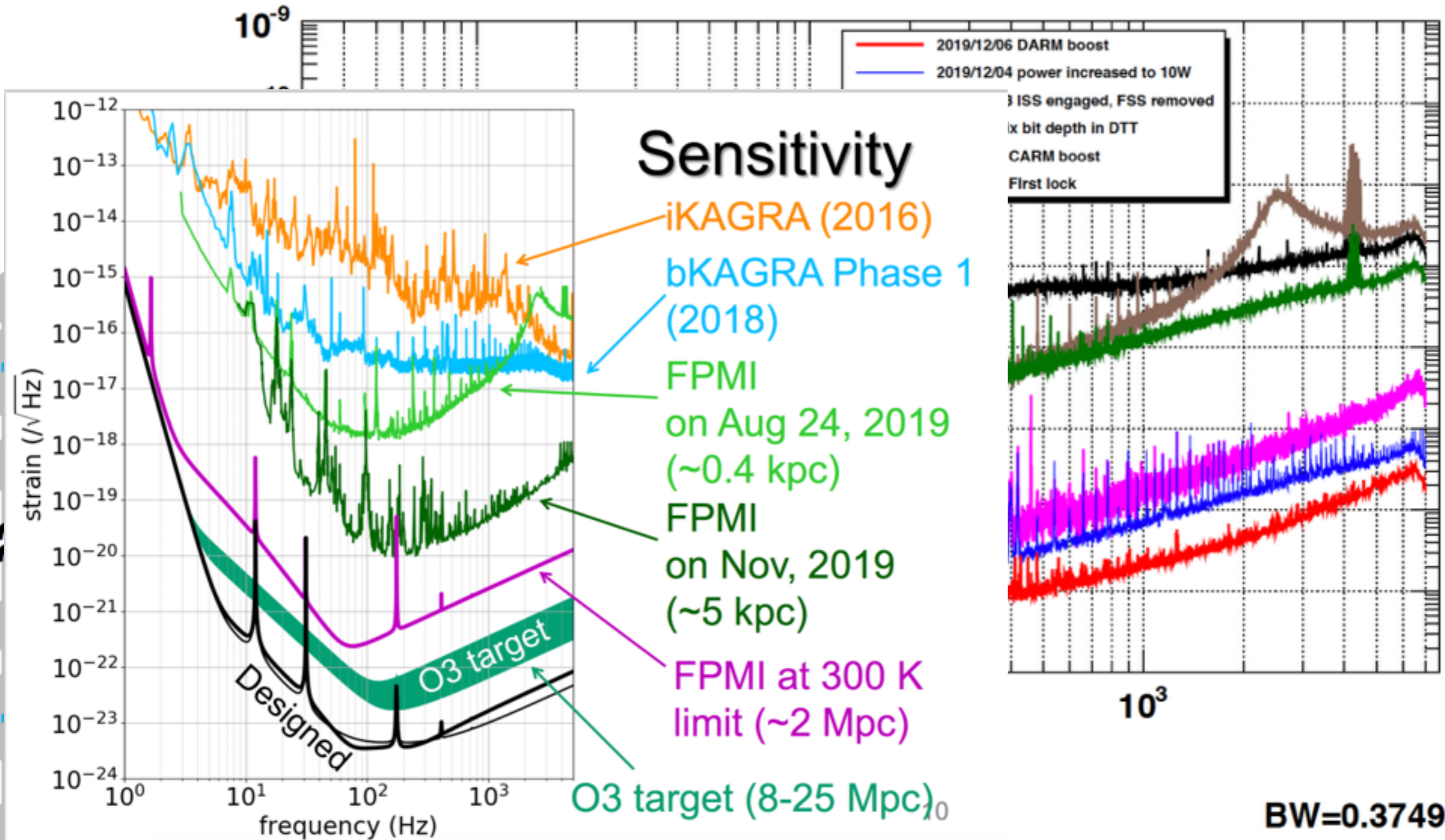




KAGRA sensitivity

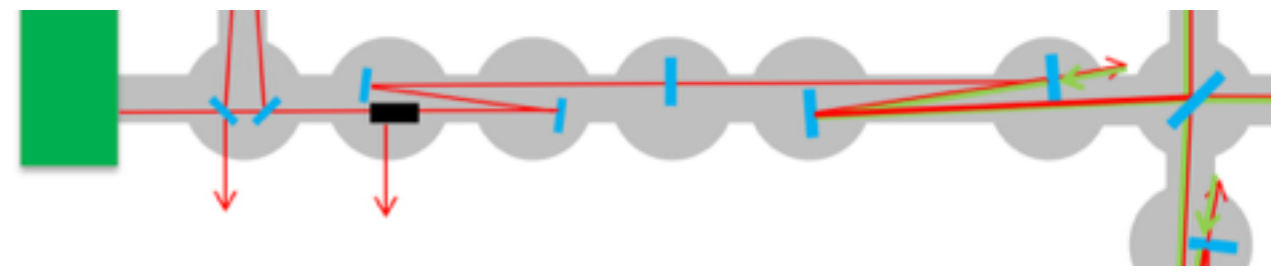


FPMI Sensitivity

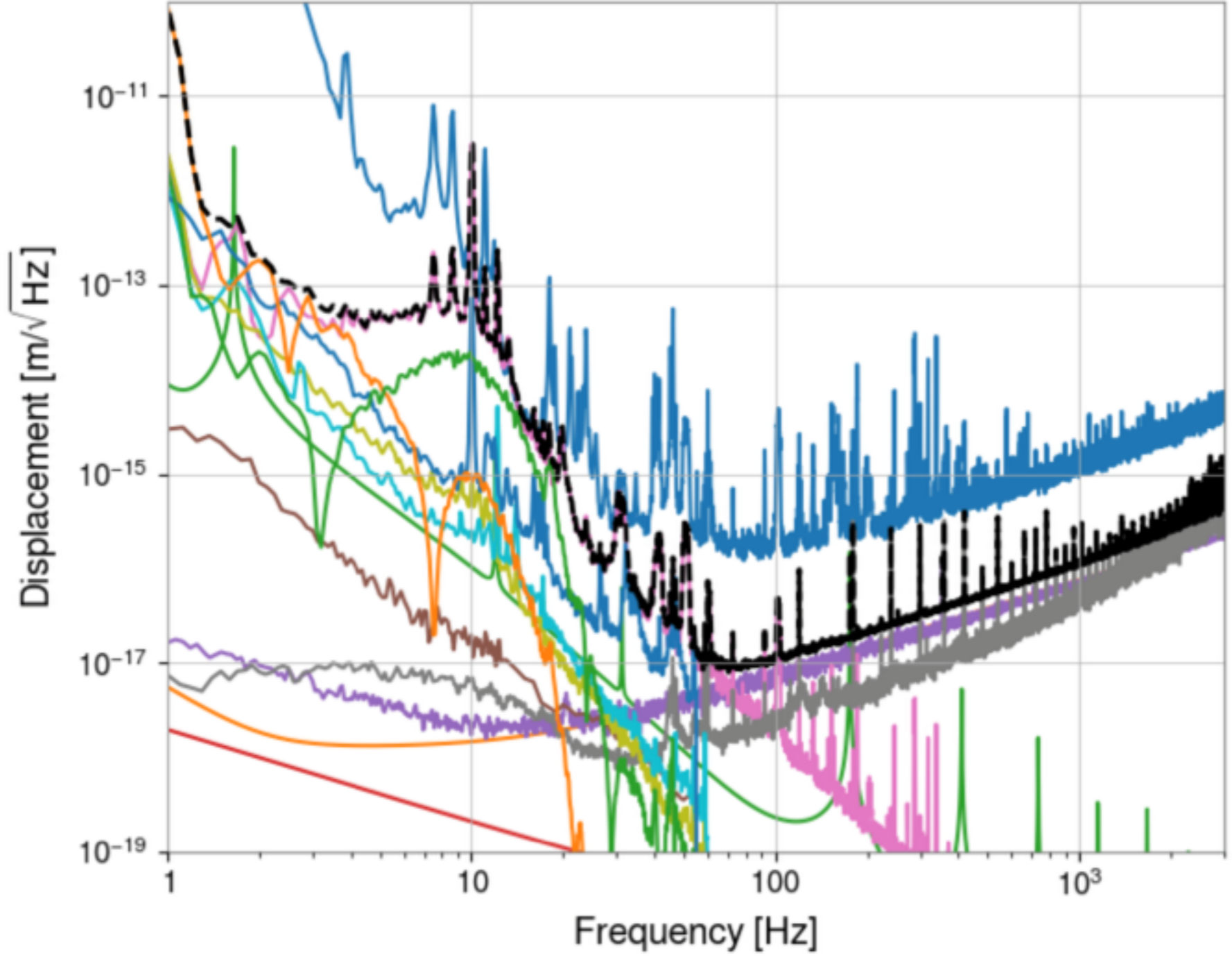




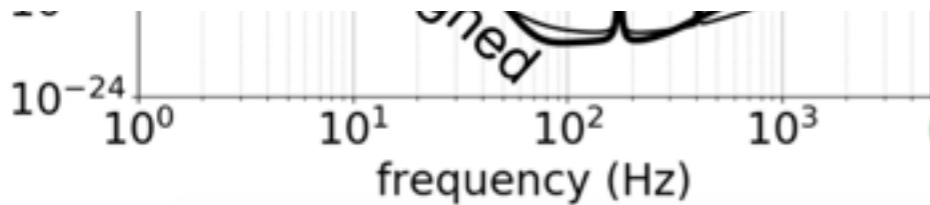
KAGRA sensitivity



NB from 2019 Nov 29 23:00:00 to 2019 Nov 29 23:02:00



- DARM
- Quantum noise (lossy)
- Suspension thermal
- Mirror thermal
- Dark noise (1 stage whitening)
- ITMX TML CoilDriv
- MICH control
- Intensity noise
- BS TML
- BS TMP
- BS TMY
- ITMX IMP
- ITMX IMY
- total

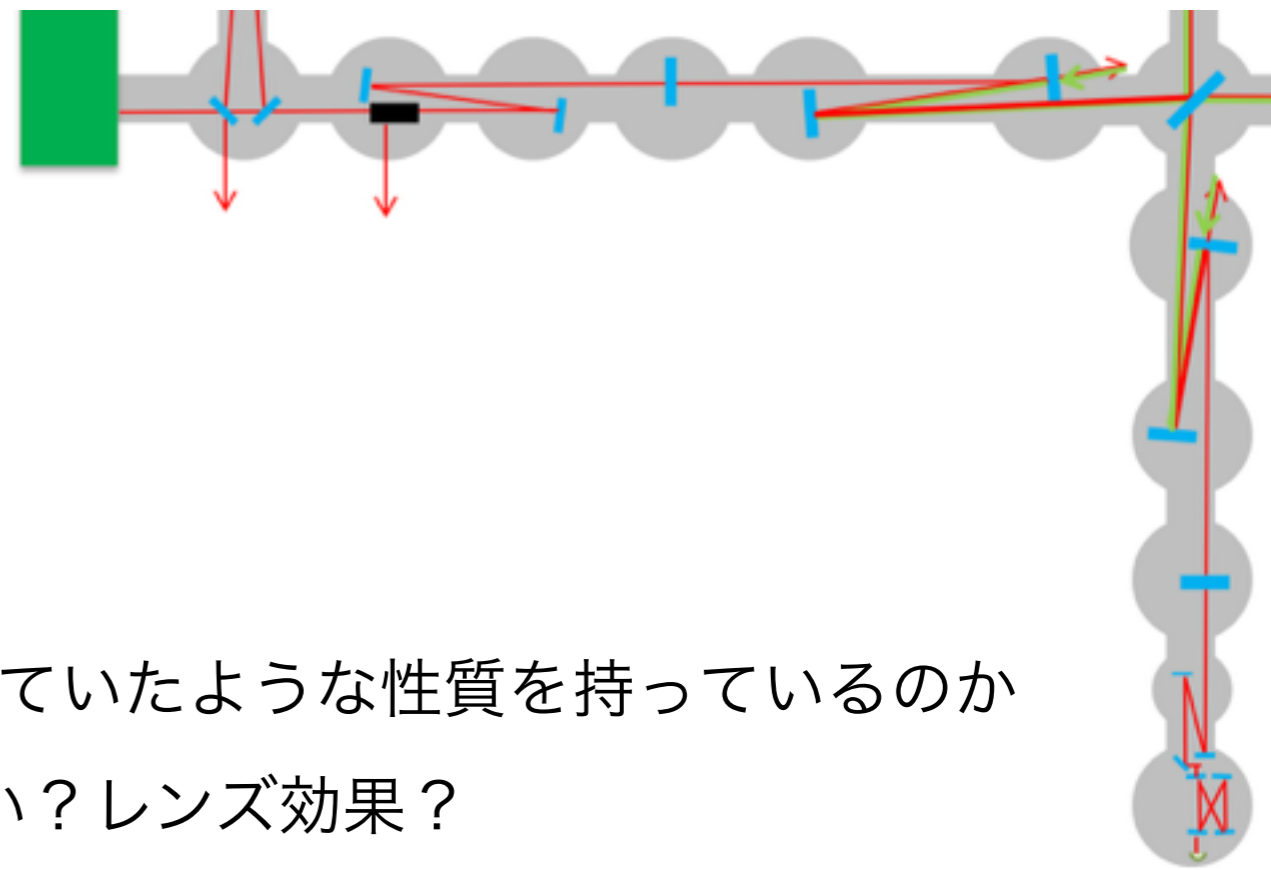


O3 target (8-25 Mpc)₀

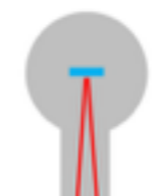
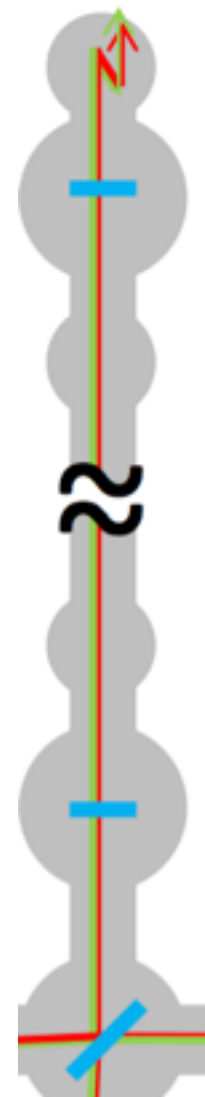
BW=0.374994



重力波天文学

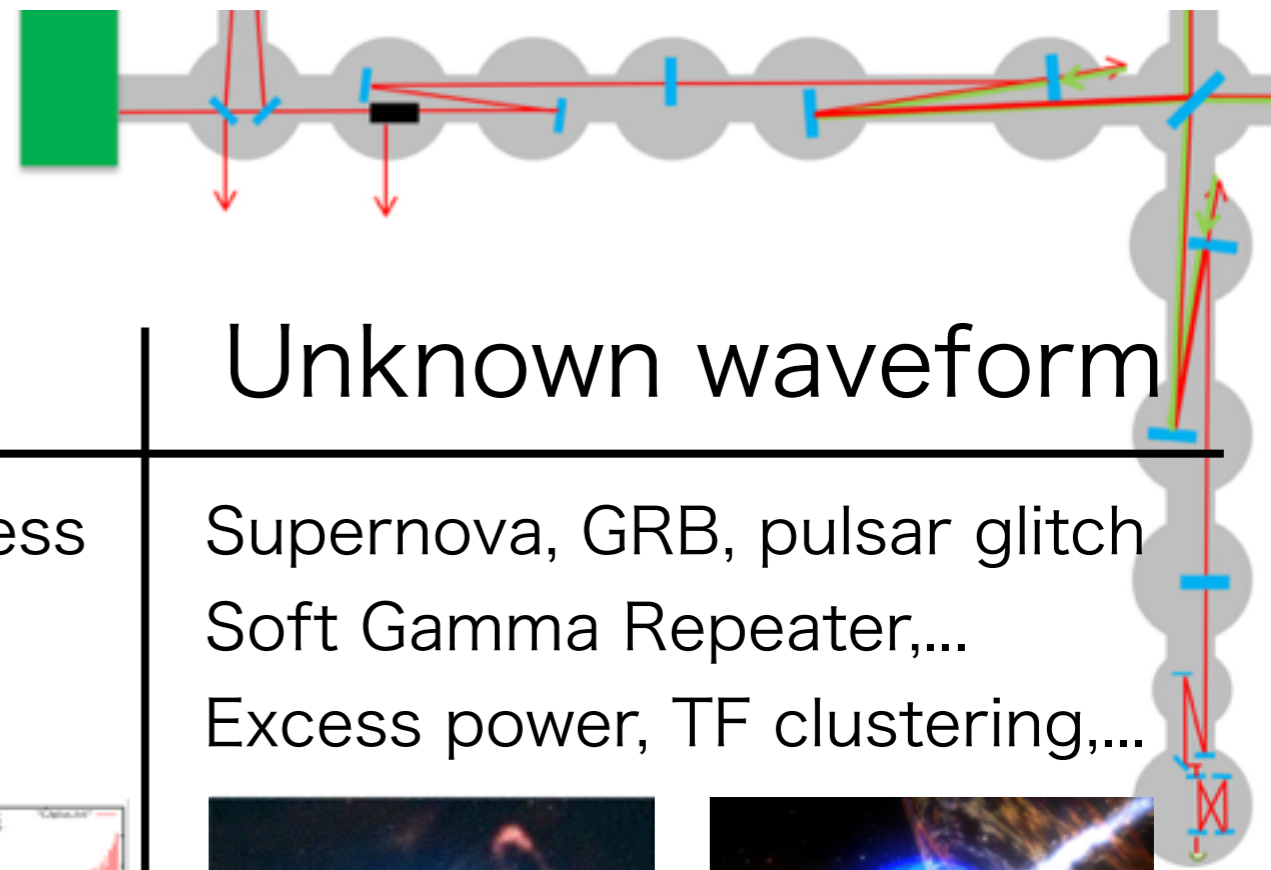


- ・ 一般相対論の検証
 - ・ 強い重力場での性質
 - ・ 重力波は本当に一般相対論で予言されていたような性質を持っているのか
 - ・ 光速？ 余剰次元に信号が逃げてない？ レンズ効果？
 - ・ 2つの偏極というのは正しい？
- ・ コンパクト連星合体、回転パルサー
 - ・ どんな星が連星を形成している？ その起源は？
 - ・ 中性子星自身の物理、高温高圧での状態方程式
 - ・ ニュートリノや電磁波も出てくる？
 - ・ 金などの重元素はどのようにできる？
- ・ インフレーション起源の重力波観測
- ・ 超新星爆発の爆発メカニズム解明





重力波天文学



Known waveform

Unknown waveform

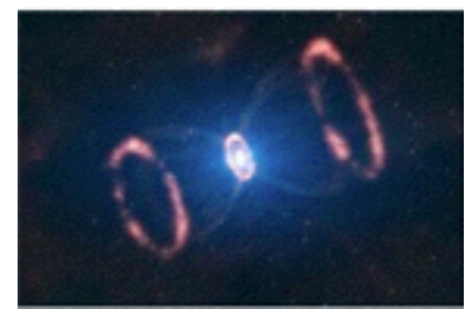
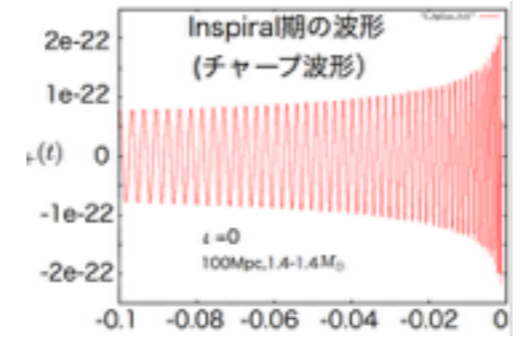
Short duration

Compact Binary Coarseness
NS-NS, NS-BH, BH-BH, ...
Matched filtering

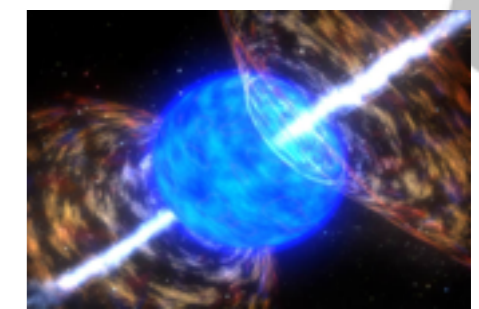
Supernova, GRB, pulsar glitch
Soft Gamma Repeater, ...
Excess power, TF clustering, ...



<http://www.nasa.gov>



<http://www.eso.org>

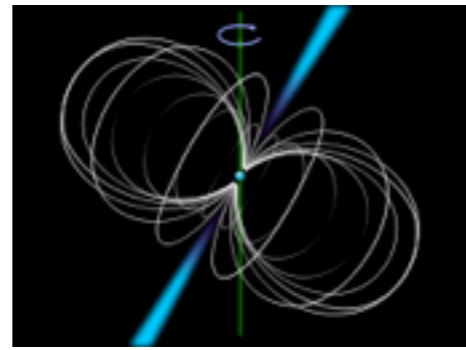


<http://www.nasa.gov>

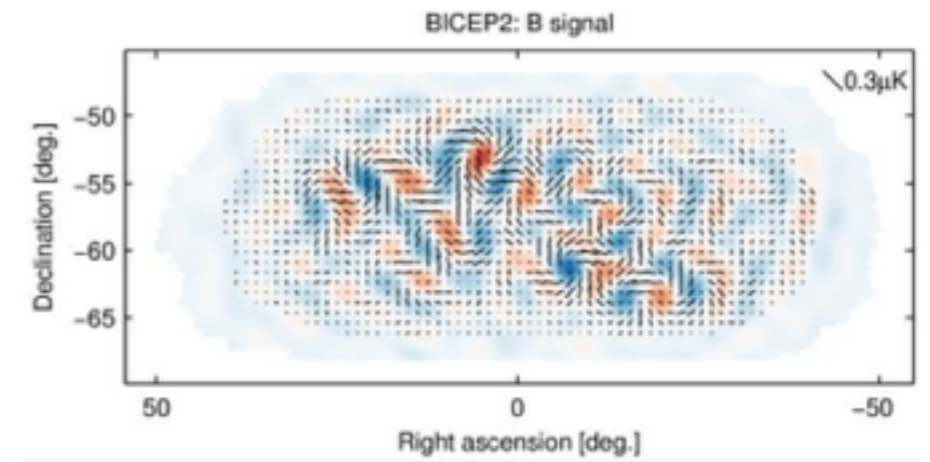
Long duration

mili-second pulsar,
radiometry LMXB search
F-statistics, performance
GPGPU

Stochastic GW,
Cosmic string GW, ...



[Wikipedia](http://en.wikipedia.org)



<http://bicepkeck.org>



重力波天文学

- 宇宙でenergeticな現象の一つ
 - トータル 10^{53} ergのエネルギーが放出される
 - 99%のエネルギーがニュートリノとして放出
- 大まかな爆発シナリオは解明されつつあるが、詳細な部分で不明瞭な箇所がある
 - 親星の初期コンディション(質量、回転等)
 - 衝撃波停滞から復活のメカニズム(neutrino driven explosion mechanism?)

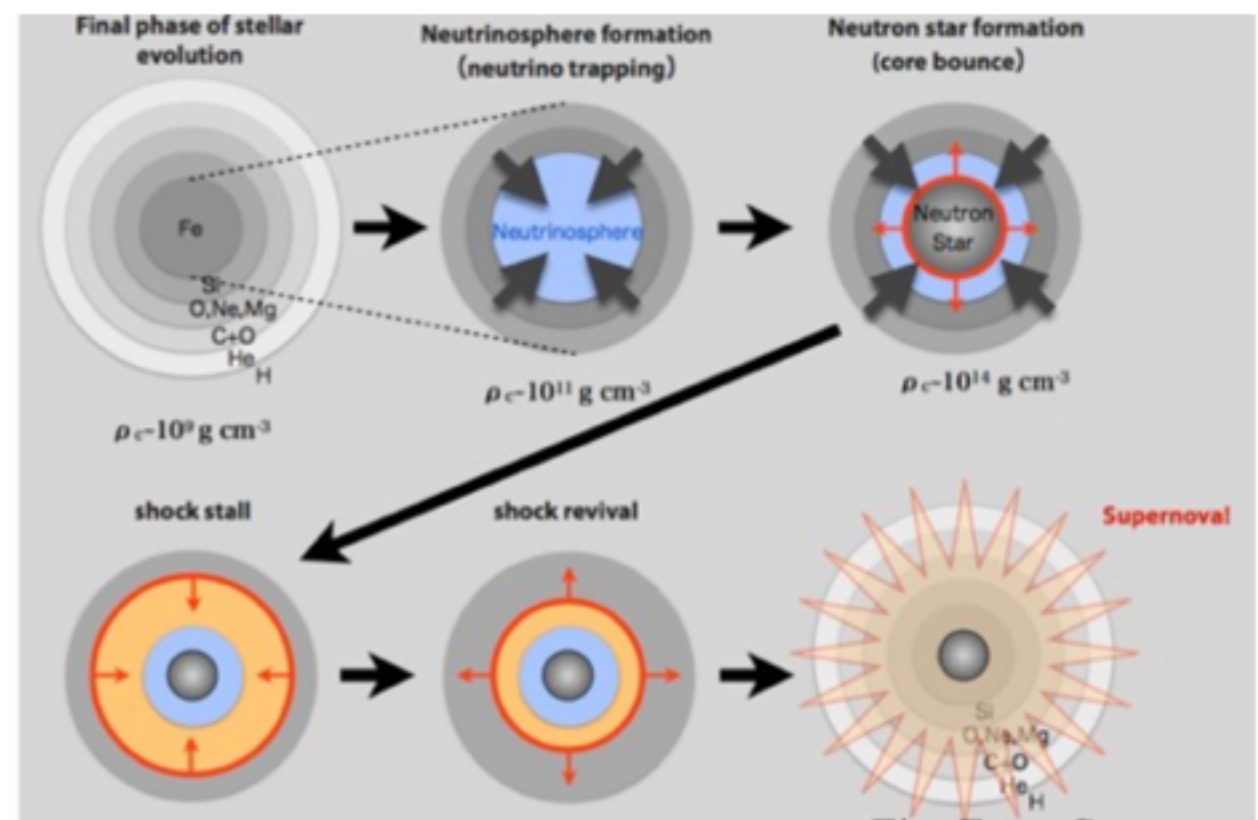


Fig: From Suwa-san

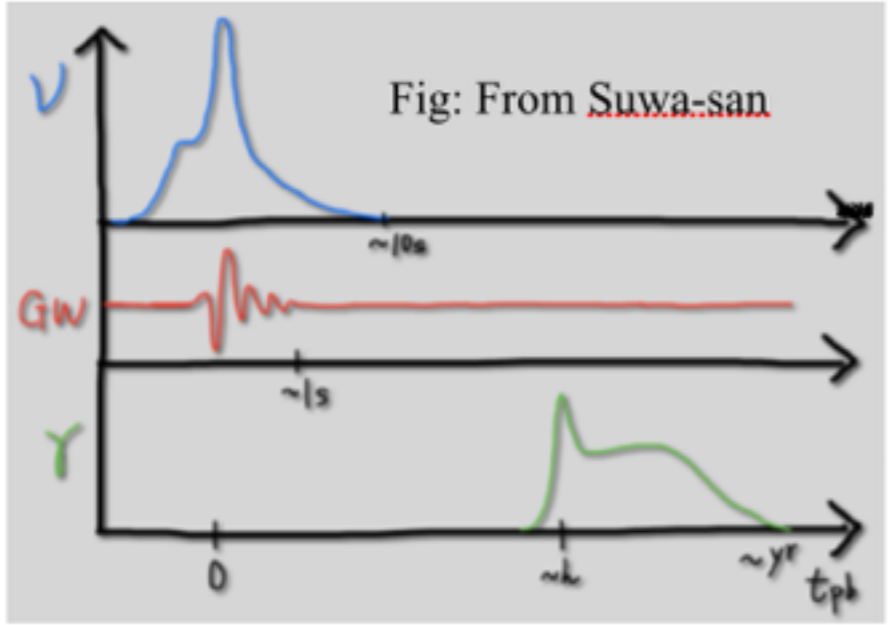


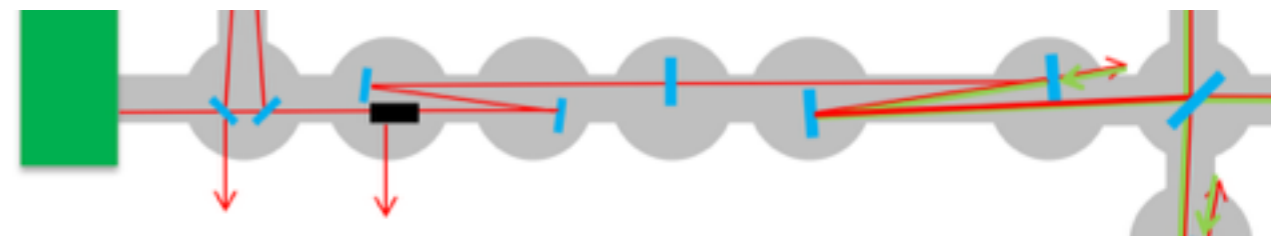
Fig: From Suwa-san

- 重力波・ニュートリノ共に中心コアの情報を運んでくる
 - 爆発メカニズム解明に向けた鍵となる物理現象
 - コアバウンス
 - 衝撃波の停滞と復活; SASI、対流、etc..
- Time-domain Multi-Messenger Astronomy
 - Broadband photons (radio to gamma)
 - Multi-energy neutrinos (MeV to PeV)
 - Multi-frequency GWs (Hz to kHz)
 - 物理現象の特徴信号抽出と特徴時間の取得





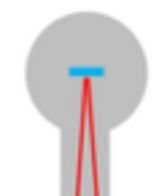
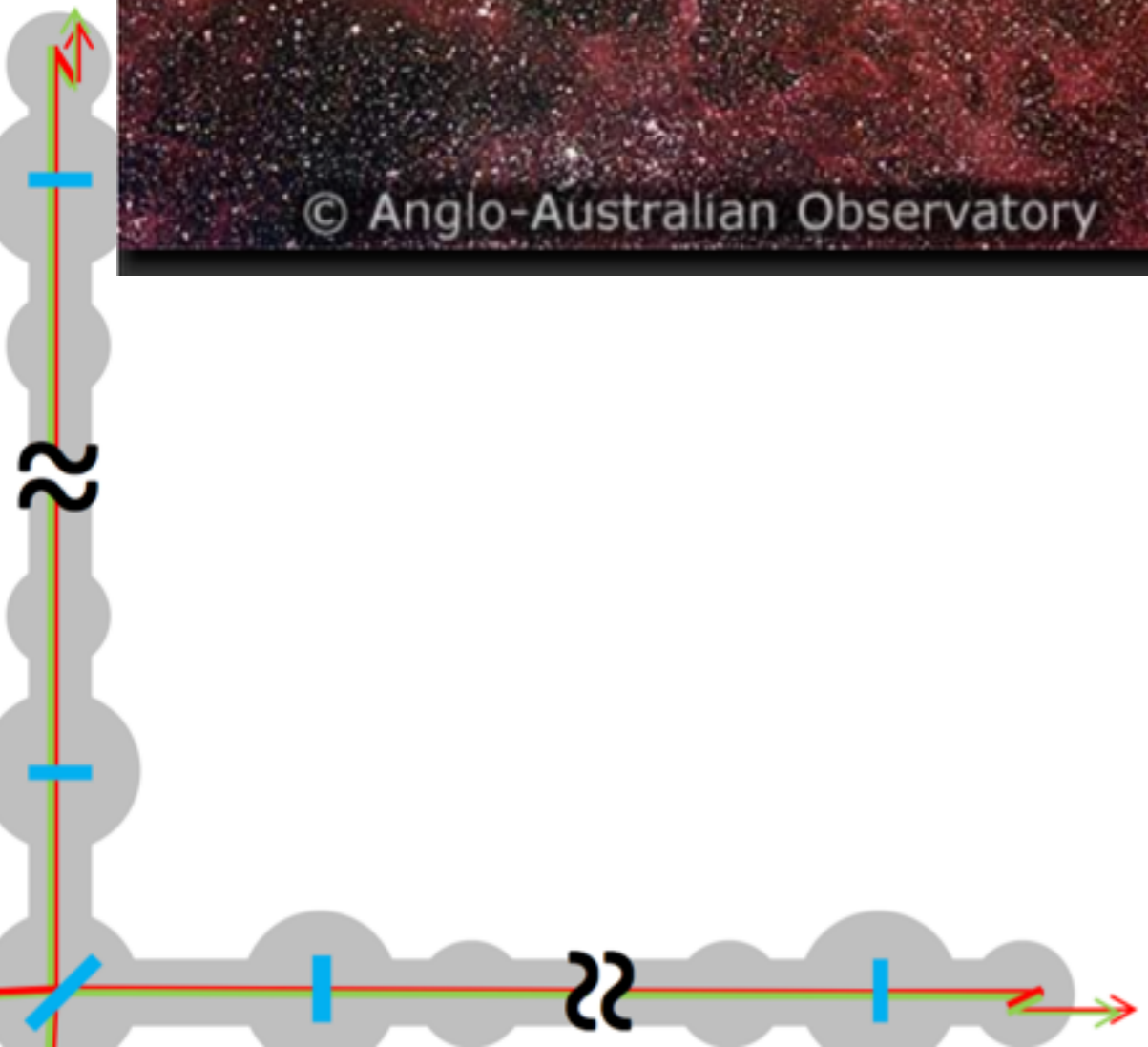
重力波天文学



© Anglo-Australian Observatory

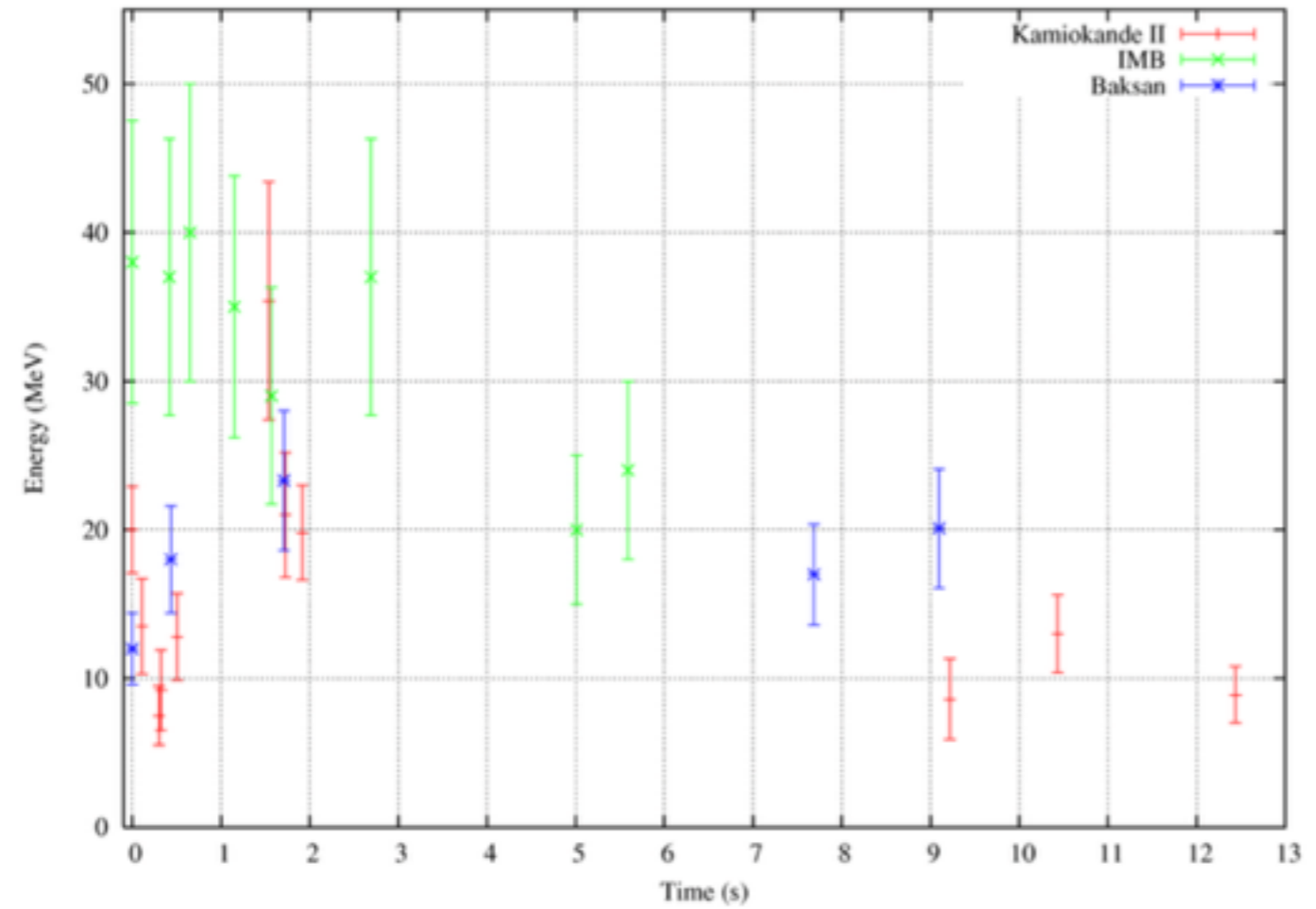
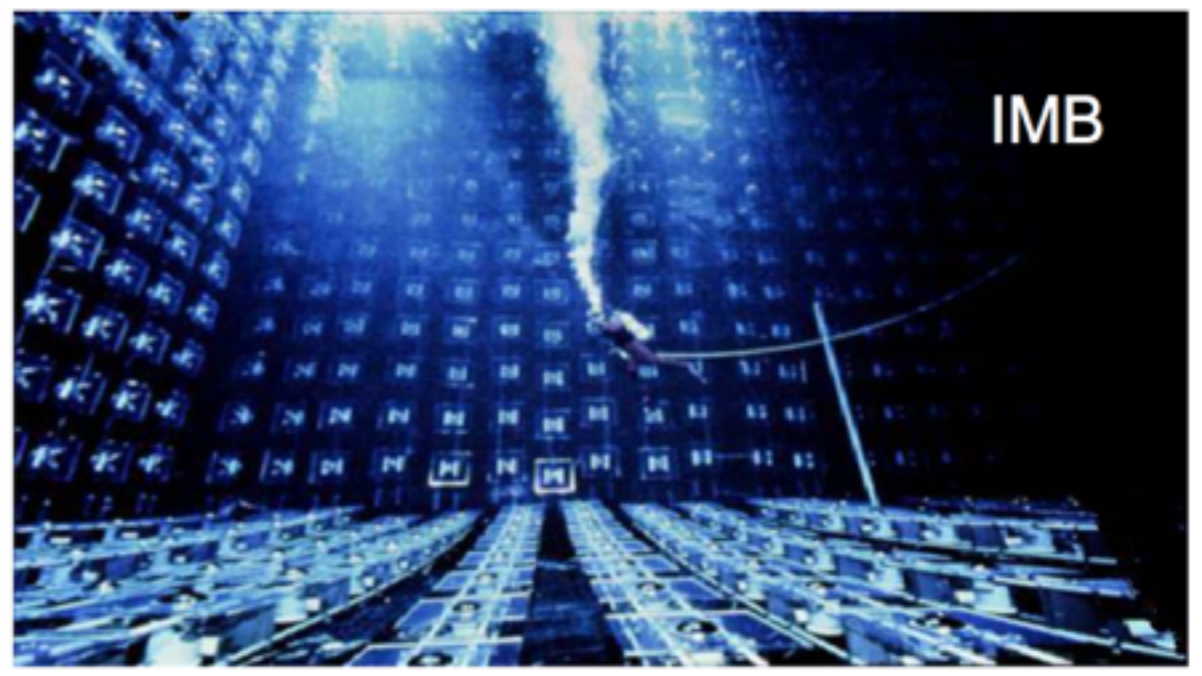
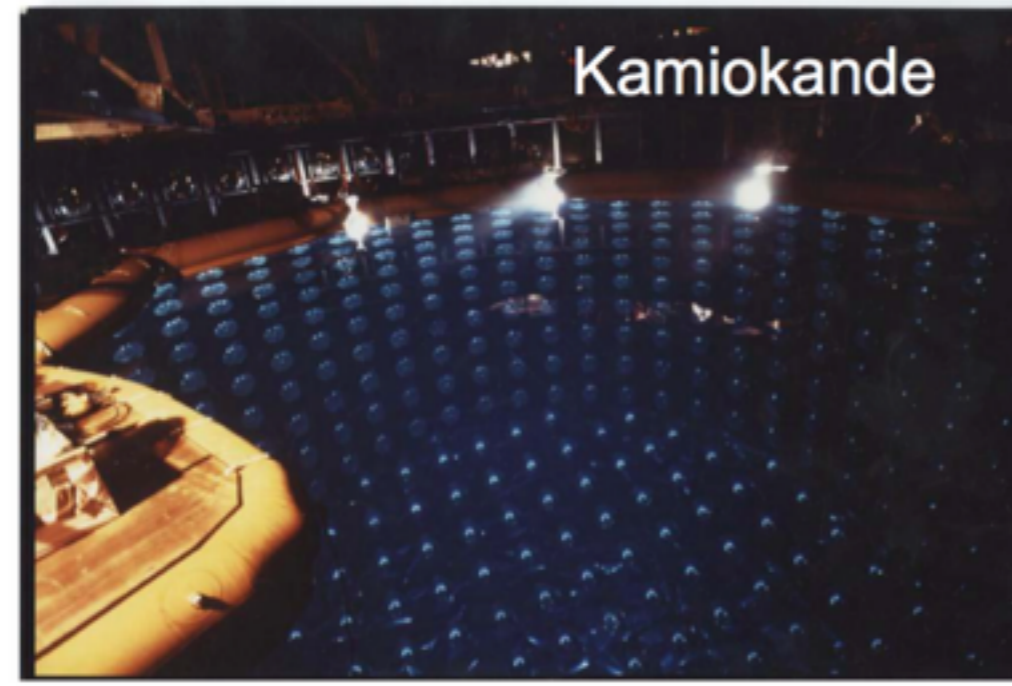
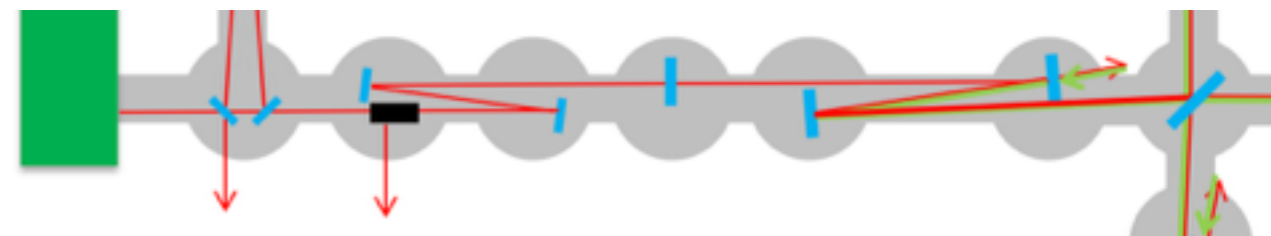


© Anglo-Australian Observatory



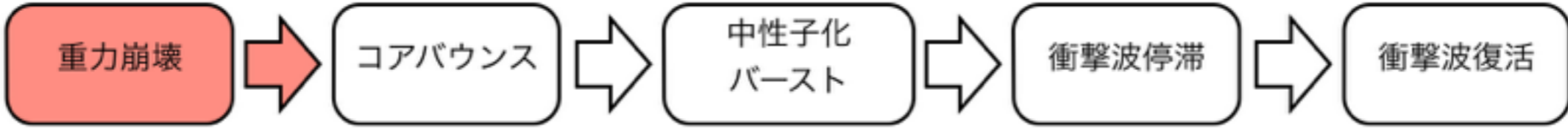
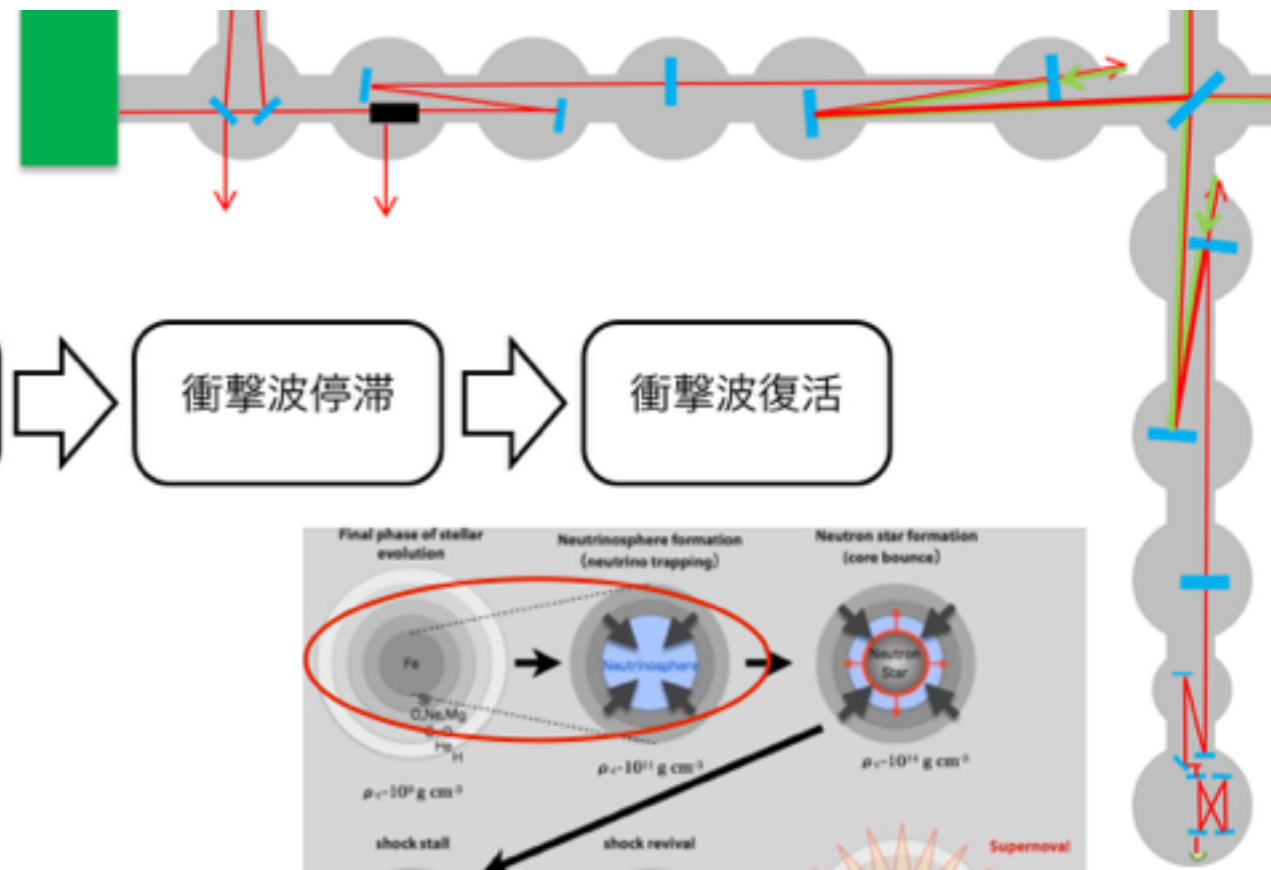


重力波天文学



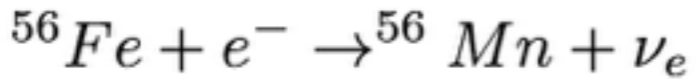


重力波天文学



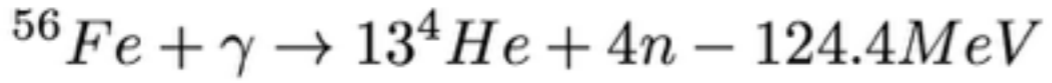
重力崩壊

- 電子捕獲反応



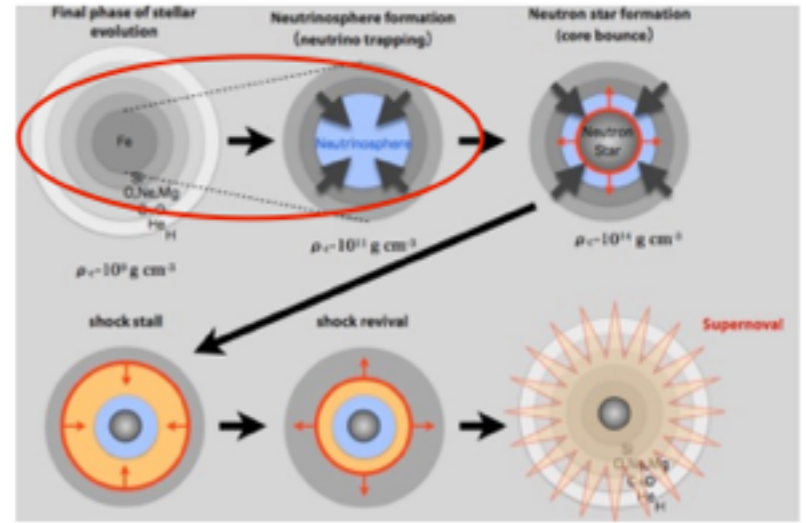
ニュートリノが自由に逃げれる程度の密度 (10^9g/cm^3)
→ 重力崩壊が進む方向の反応

- 鉄光分解反応



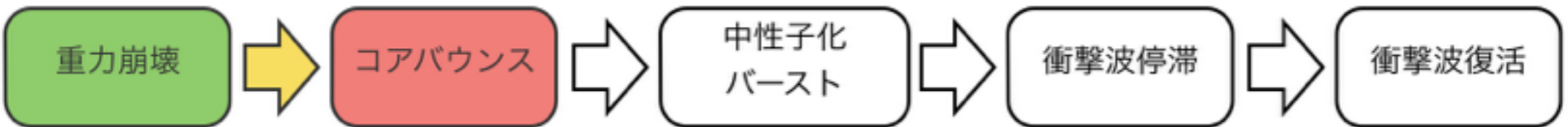
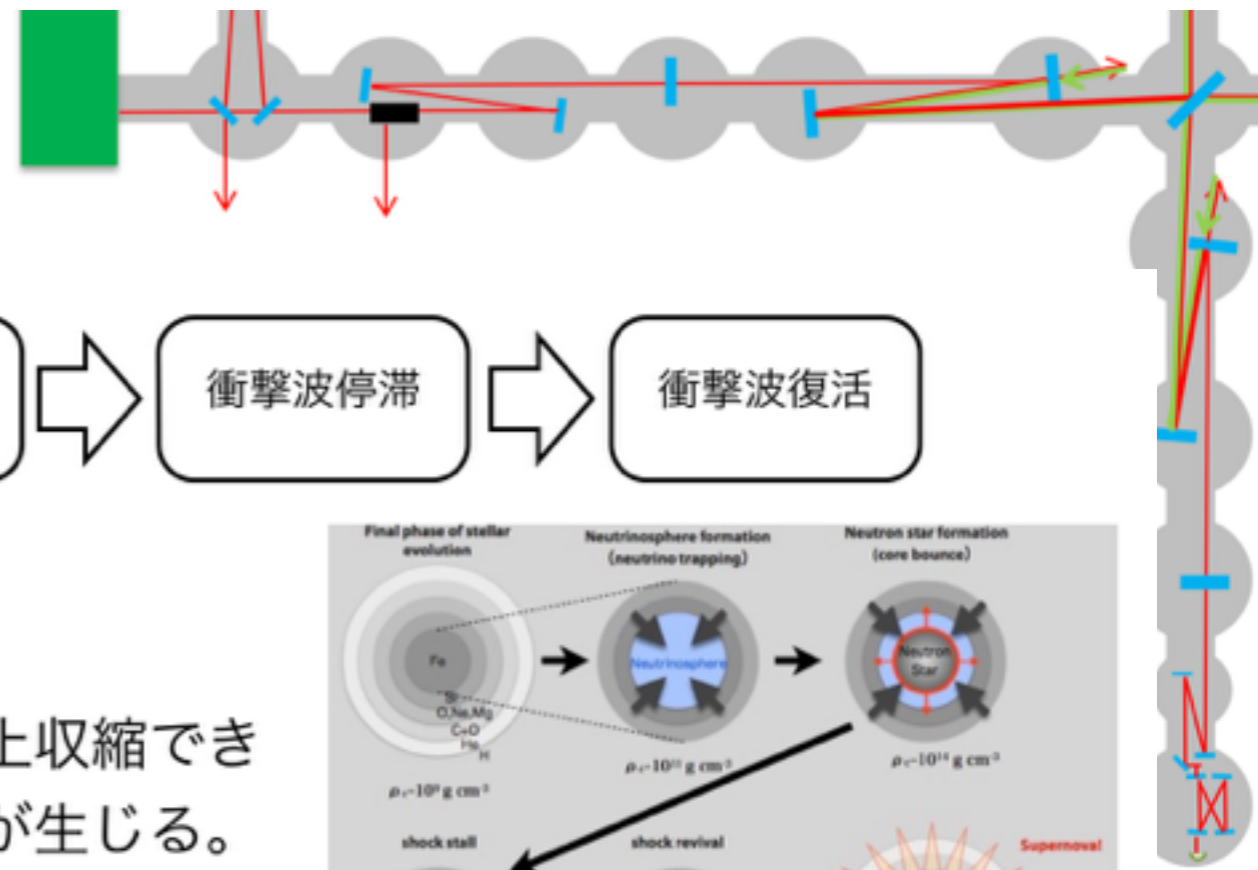
恒星中心部が中性子リッチになっていく。この反応は吸熱反応
→ こちらも重力崩壊が加速する反応

中心コア密度が $\rho > 10^{12} \text{g/cc}$ となると、ニュートリノの平均自由行程が短くなり、自由に抜けられなくなる。→ ニュートリノ球を生成する。





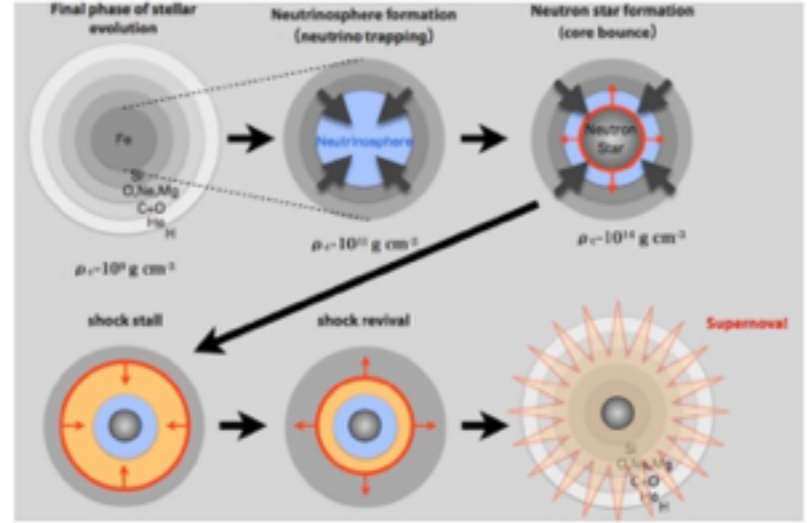
重力波天文学



コアバウンス

コア中心密度が $\rho > 10^{14} \text{ g/cc}$ を超えると、これ以上収縮できなくなりコアがバウンスする。その際に衝撃波が生じる。

高密度での状態方程式(Equation of State, EoS)や原始中性子星(Proto Neutron Star)の初期回転、親星の初期条件によって、強い重力波が出てくる。



$$I_{\mu\nu} = \int \rho(\vec{r})(x_\mu x_\nu - \frac{1}{3} \delta_{\mu\nu} r^2) d^3x$$

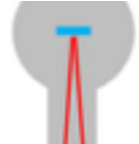
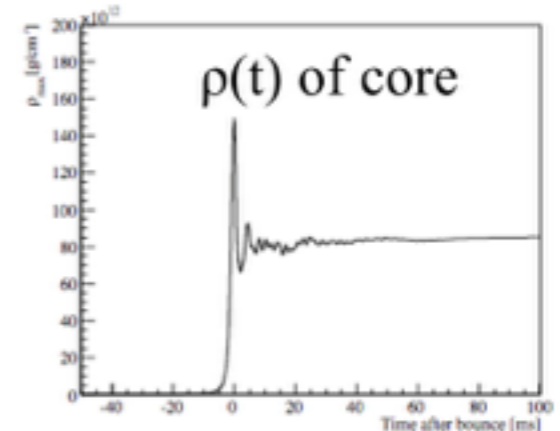
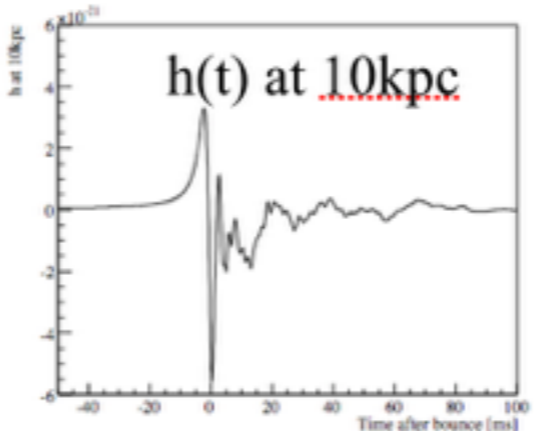
$$\mathcal{L}_{gw} = \int_{r \rightarrow \infty} T_i^{0gw} n^i r^2 d\Omega$$

$$= \frac{G}{5c^5} \langle \ddot{I}_{\mu\nu} \ddot{I}^{\mu\nu} \rangle$$

$$h_{\mu\nu} \simeq \frac{2G}{rc^4} \ddot{I}_{\mu\nu}$$

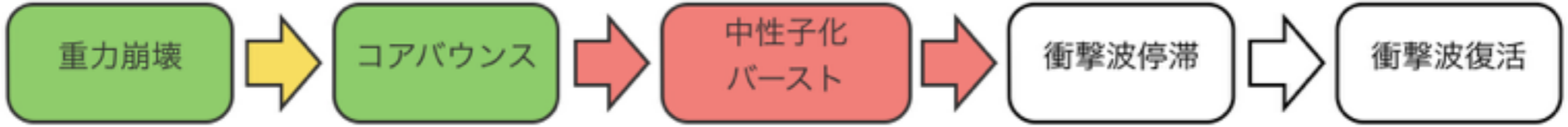
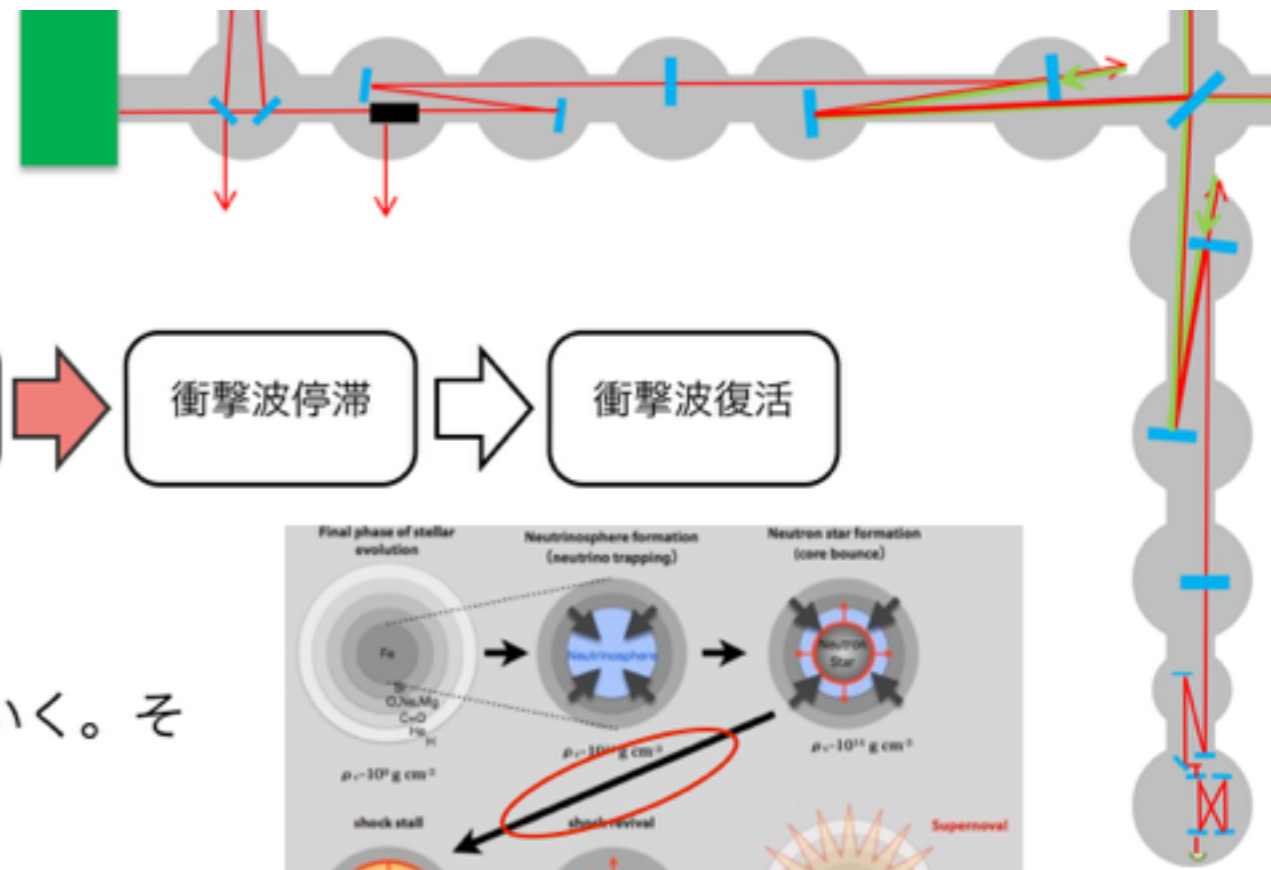
Mass quadrupole moment
axis asymmetry

重力波波形と中心密度の時間変化の一例 (DFM波形)



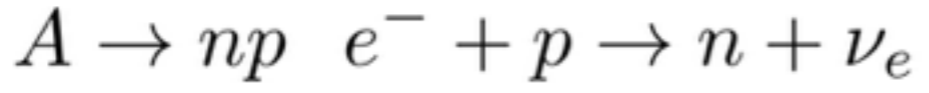


重力波天文学



中性子化バースト

生じた衝撃波が以下の反応をしながら広がっていく。その際にどんどんエネルギーを失う。

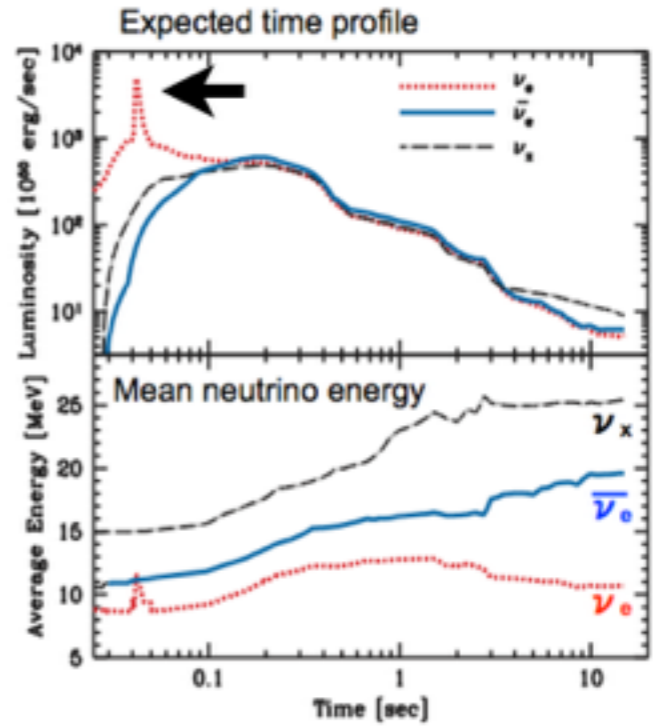
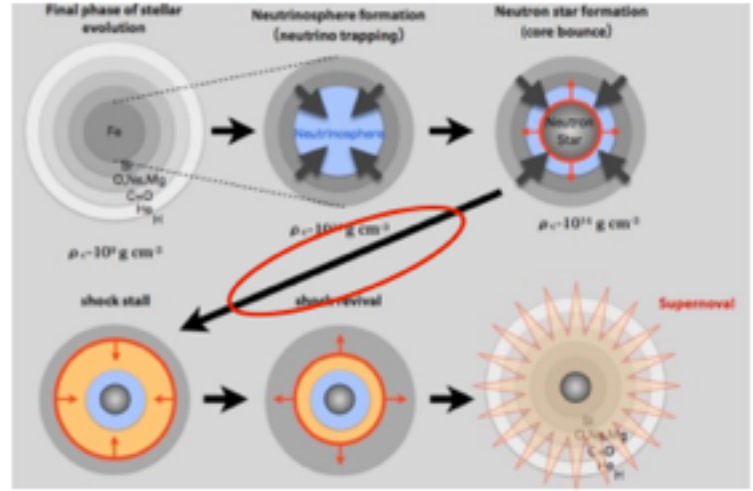


不透明さの原因である原子を分解していく。

$r(\text{shock wave}) < r(\text{neutrino sphere})$:
上反応で生成された ν はトラップされている。

$r(\text{shock wave}) > r(\text{neutrino sphere})$:
不透明さが解消されて ν がバースト的に放出される
-> 中性子化バースト

初期の陽電子不足により anti- ν はあまり生成されない。

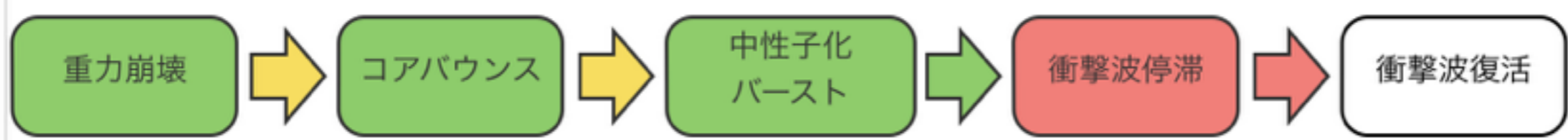
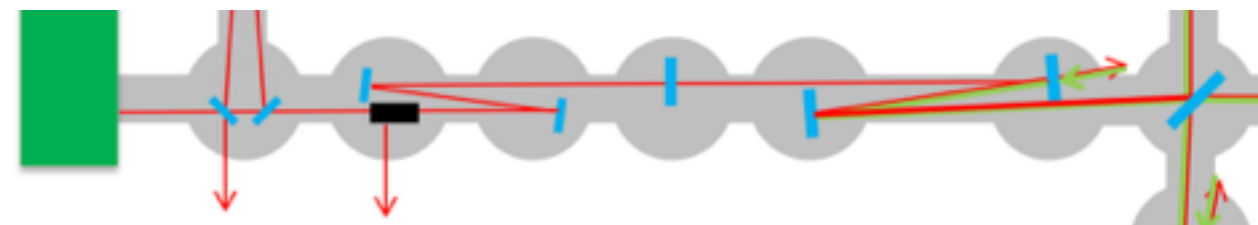


Luminosity and mean energy estimated by Livermore group (Astrophys. J 295(1985)14)





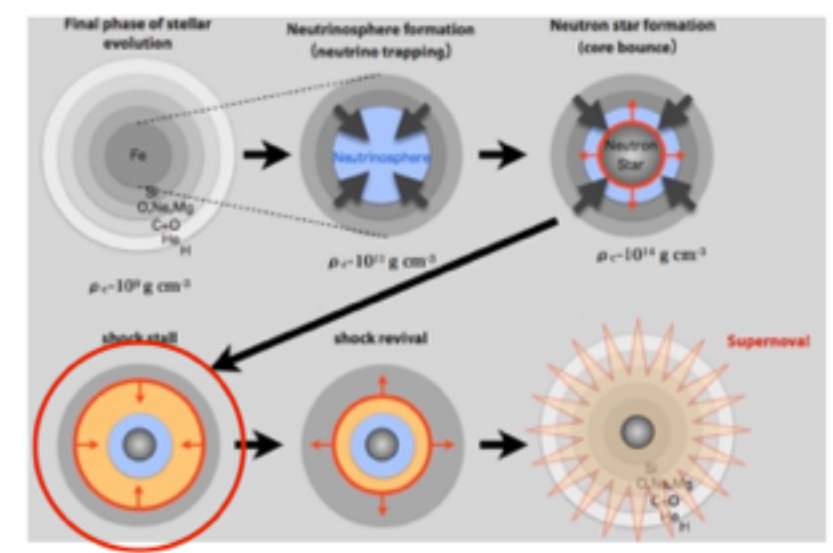
重力波天文学



衝撃波停滞

衝撃波が物質を進むにつれてエネルギーを失い、一度停滞をする(delayed explosion model)

- PNS周辺では、対生成反応により全フレーバーのニュートリノが生成される。
- ニュートリノ駆動型モデルでは、このニュートリノのエネルギーの一部が衝撃波に与えられ、衝撃波が復活する。



Key of shock revival : heating v.s. mass accretion

τ_{heat} : time scale of neutrino heating
 τ_{adv} : time scale of matter flow

$$\tau_{\text{heat}} \sim \frac{GM_{\text{core}}m_u}{q_\nu r} \sim 80\text{ms} \left(\frac{M_{\text{core}}}{1.5M_\odot}\right) \left(\frac{L_\nu}{10^{53}\text{erg s}^{-1}}\right)^{-1} \left(\frac{\langle\epsilon^2\rangle}{(15\text{MeV})^2}\right)^{-1} \left(\frac{r}{200\text{km}}\right)^{-1}$$

$$\tau_{\text{adv}} \sim \frac{r_{\text{shock}} - r_{\text{gain}}}{v_r} \sim 50\text{ms} \left(\frac{r}{100\text{km}}\right) \left(\frac{v_r}{2 \times 10^8\text{cm s}^{-1}}\right)^{-1}$$

Explosion condition : $\tau_{\text{heat}} > \tau_{\text{adv}}$

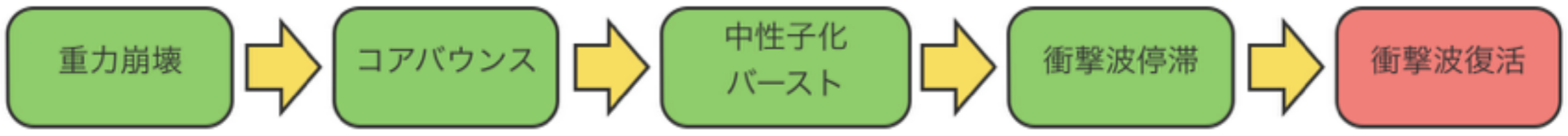
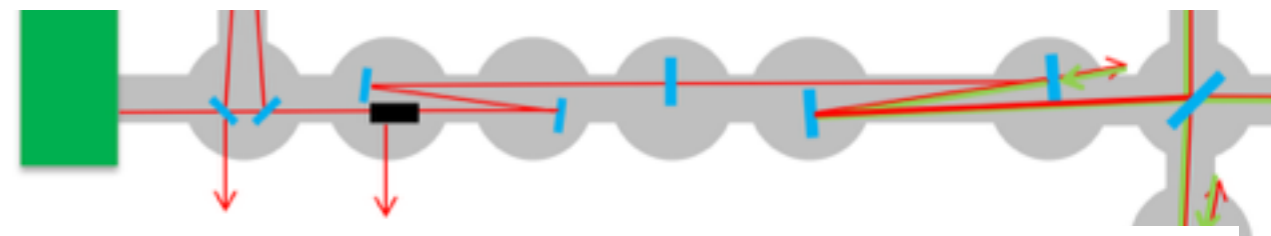
SASI, convection can be introduced by success of multi-dimensional numerical simulation

Both SASI and convection phenomenon makes longer!
 → Next slide



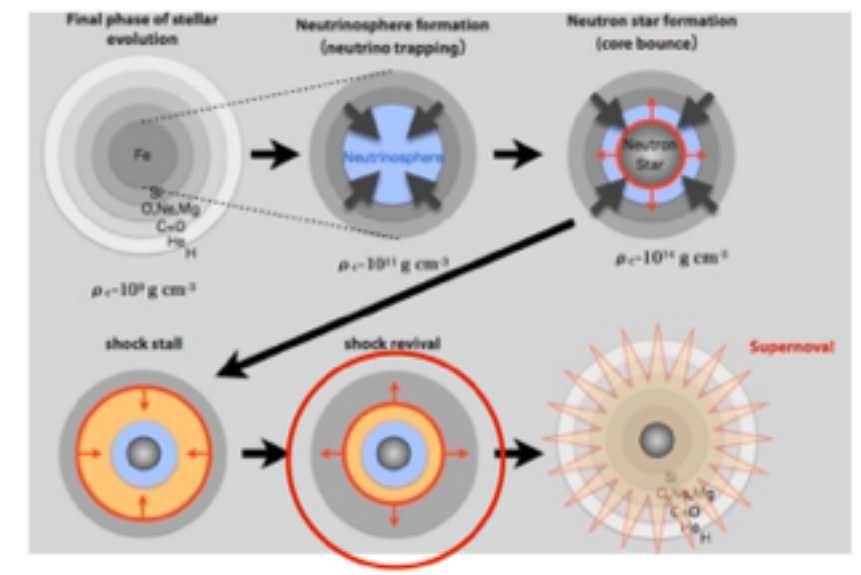
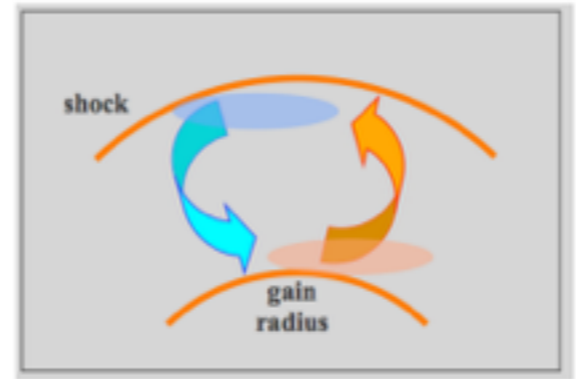
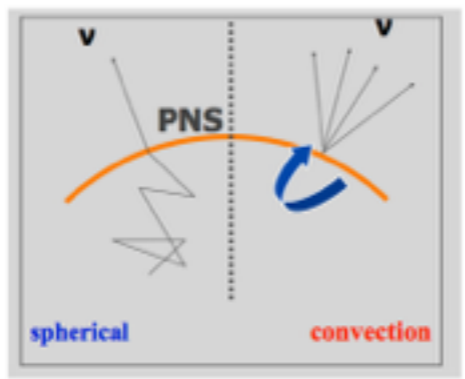


重力波天文学



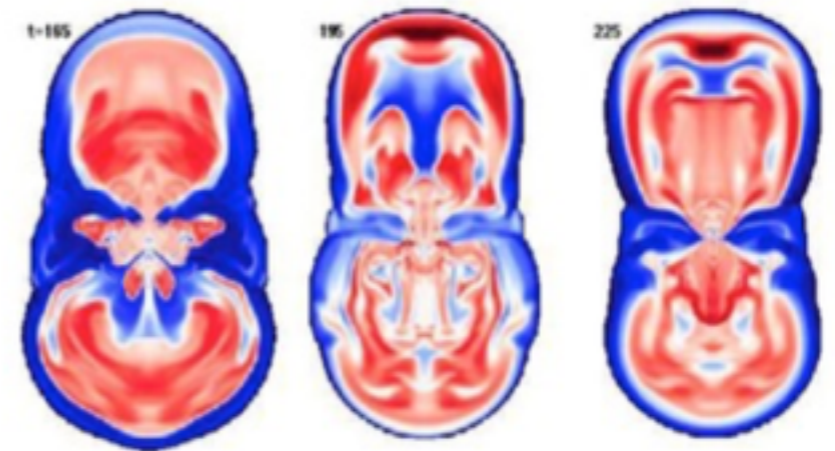
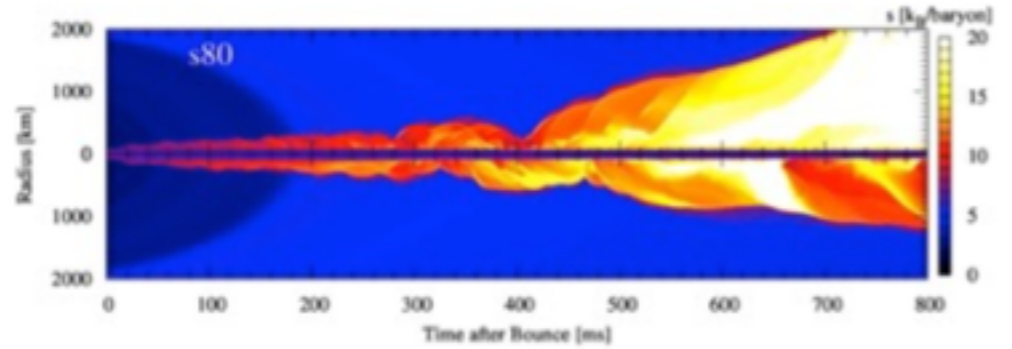
衝撃波復活

Convection
not only radial
direction moment



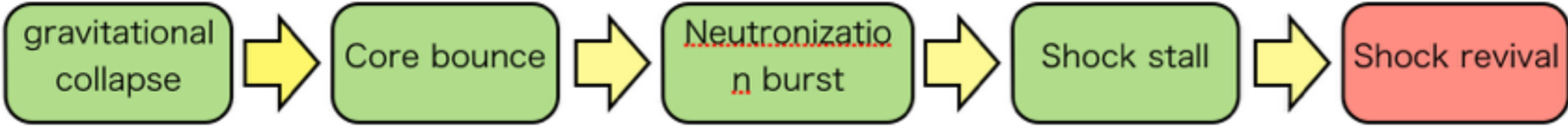
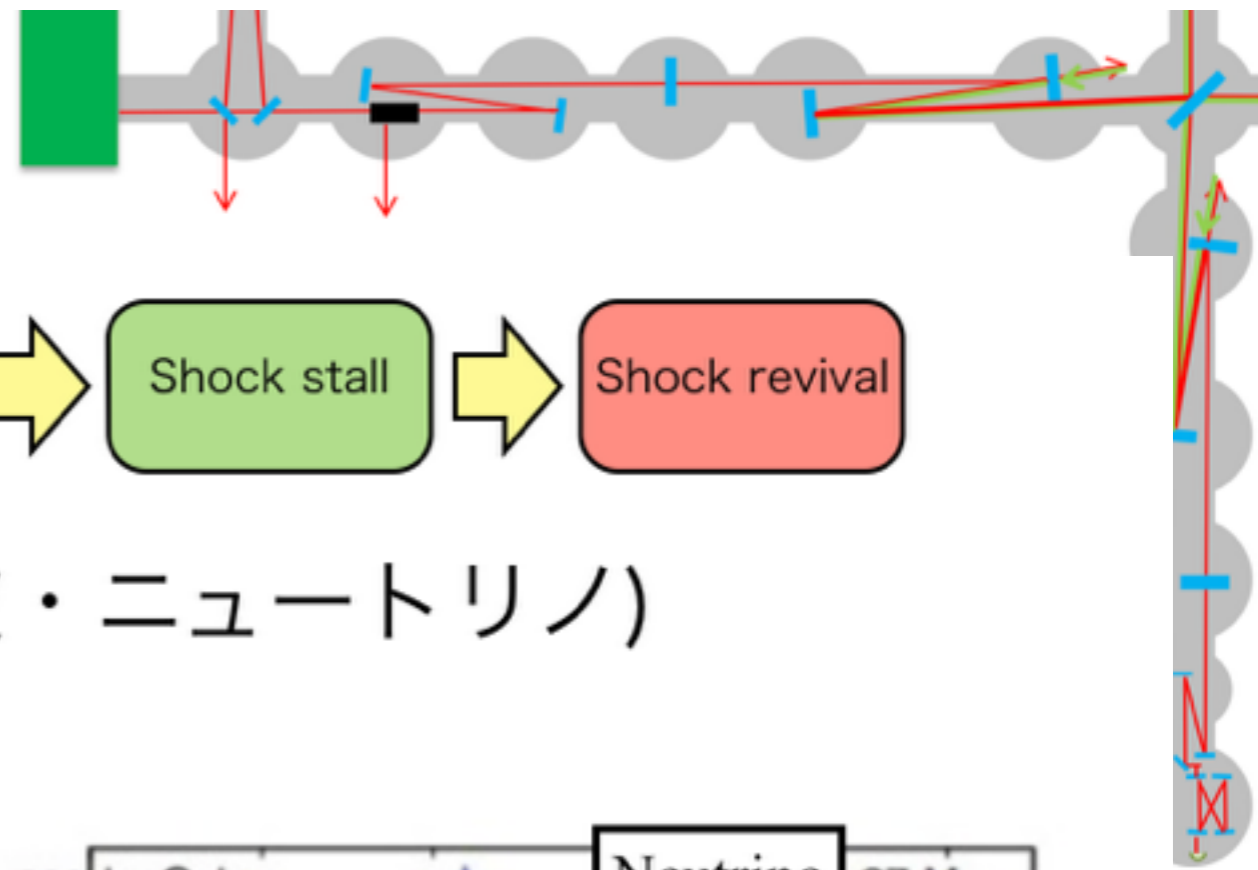
Standing Accretion Shock Instability (SASI)

- 非球対称で、低次($l=1,2$)の衝撃波の不安定な成長
- PNS(Proto Neutron Star)付近で降着物質がheat upされニュートリノが放出
- 非球対称なheat upによりニュートリノルミノシティの時間変化(up to 10%?)が期待される

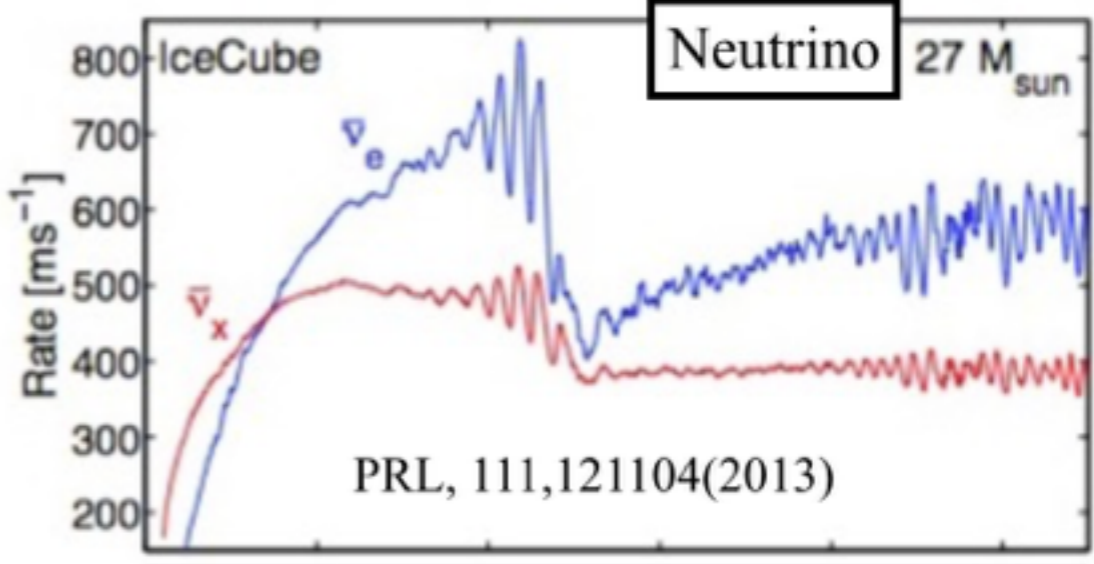
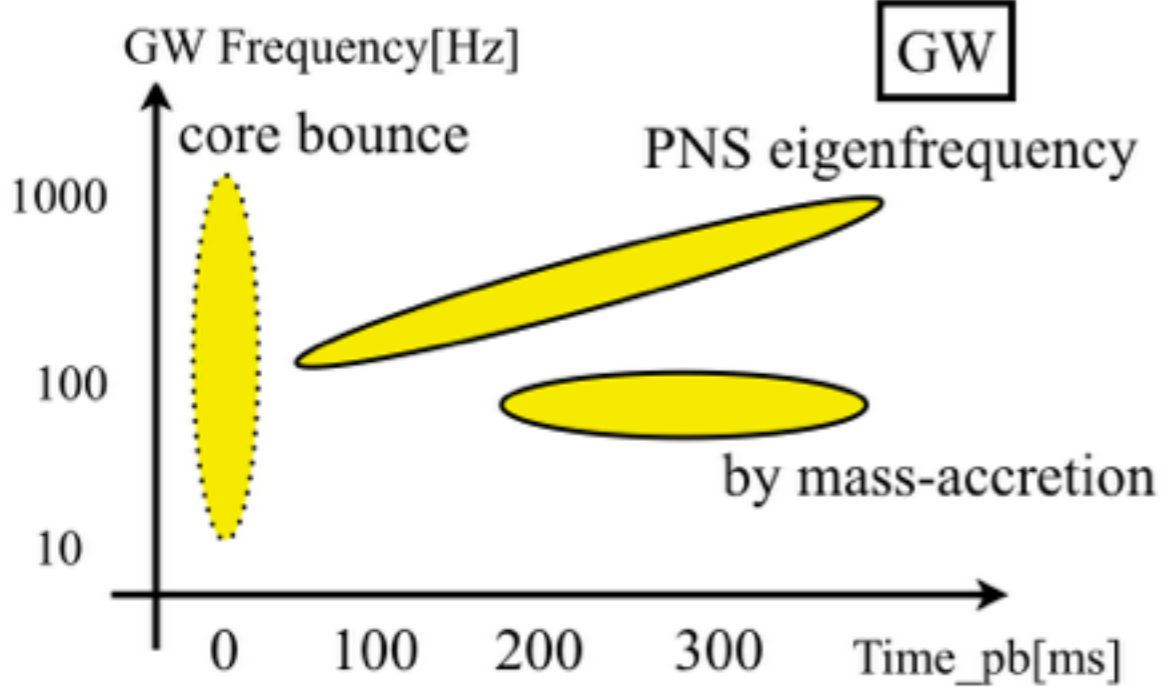




重力波天文学



SASIからの特徴的な信号(重力波・ニュートリノ)



GW(1) : 100-1000 [Hz] increase frequency by PNS eigenfrequency

$$f_p = \frac{N}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{GM}{R^2} \sqrt{\frac{(\Gamma - 1)m_n}{\Gamma k_b T}} \left(1 - \frac{GM}{Rc^2}\right)^{3/2}$$

GW(2) : ~100 [Hz] frequency by mass-accretion rate fluctuation

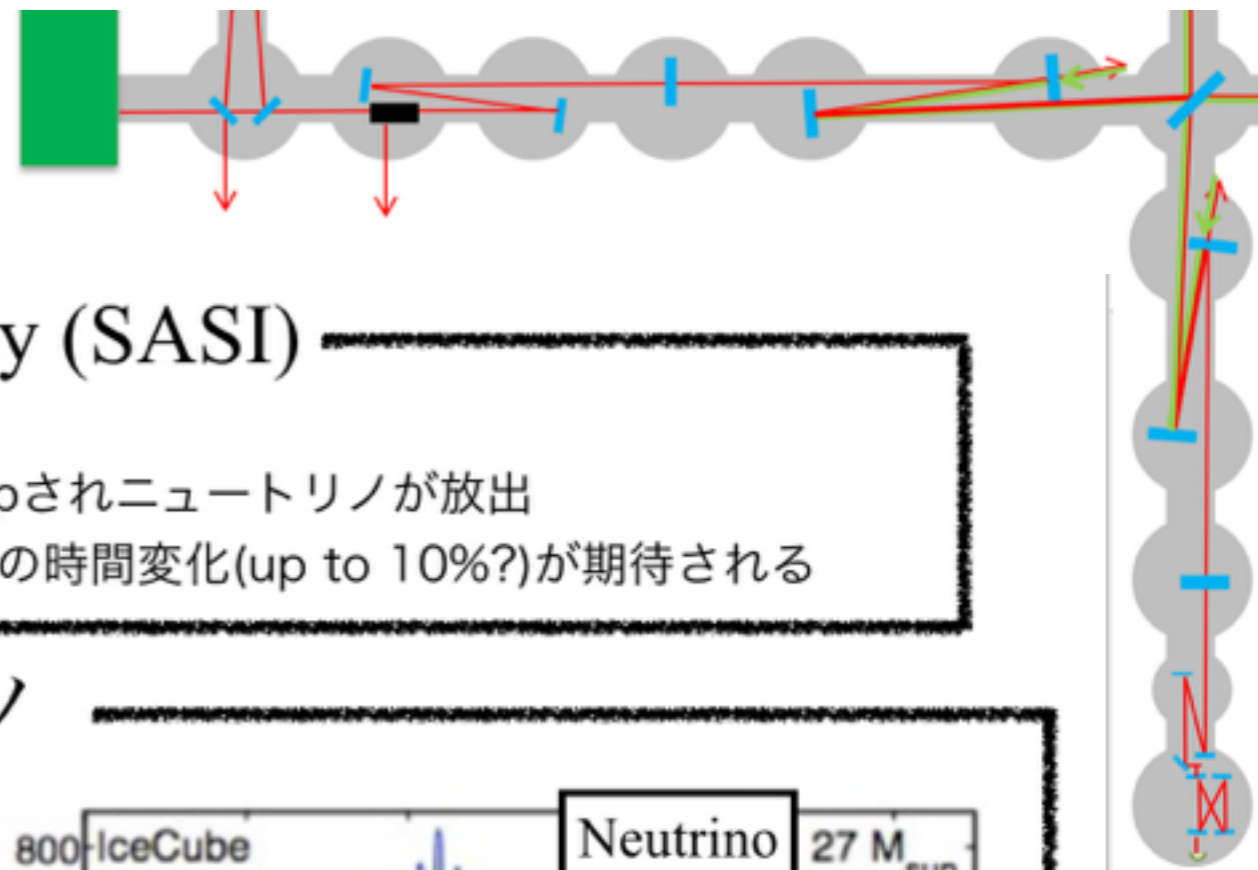
Neutrino : ~100 [Hz] flux fluctuation

How to reconstruct signal??

- Extract ~100 [Hz] from both neutrino and GW signals
- Signal correlation???



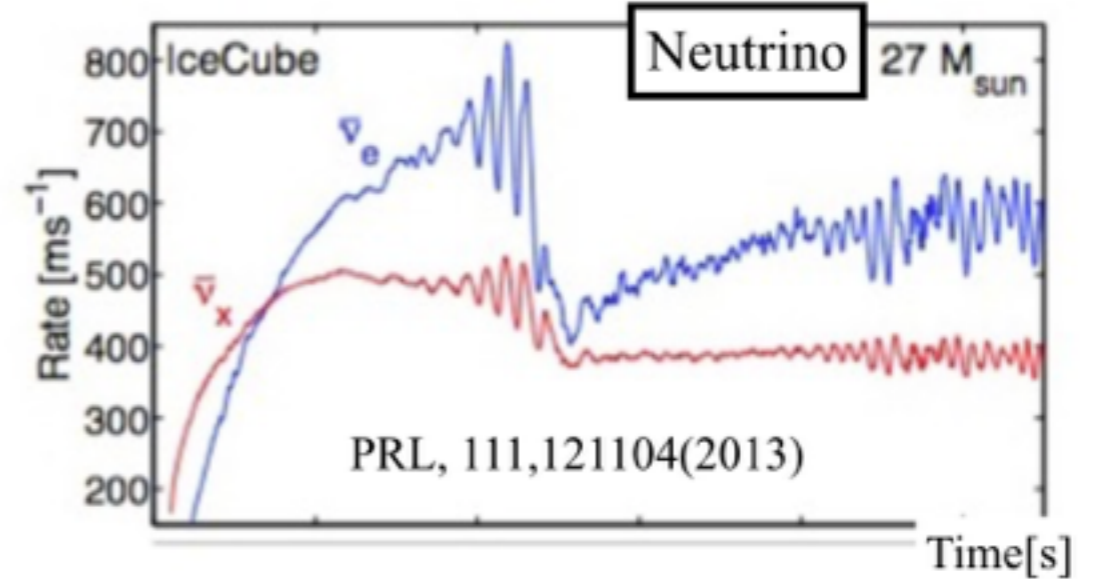
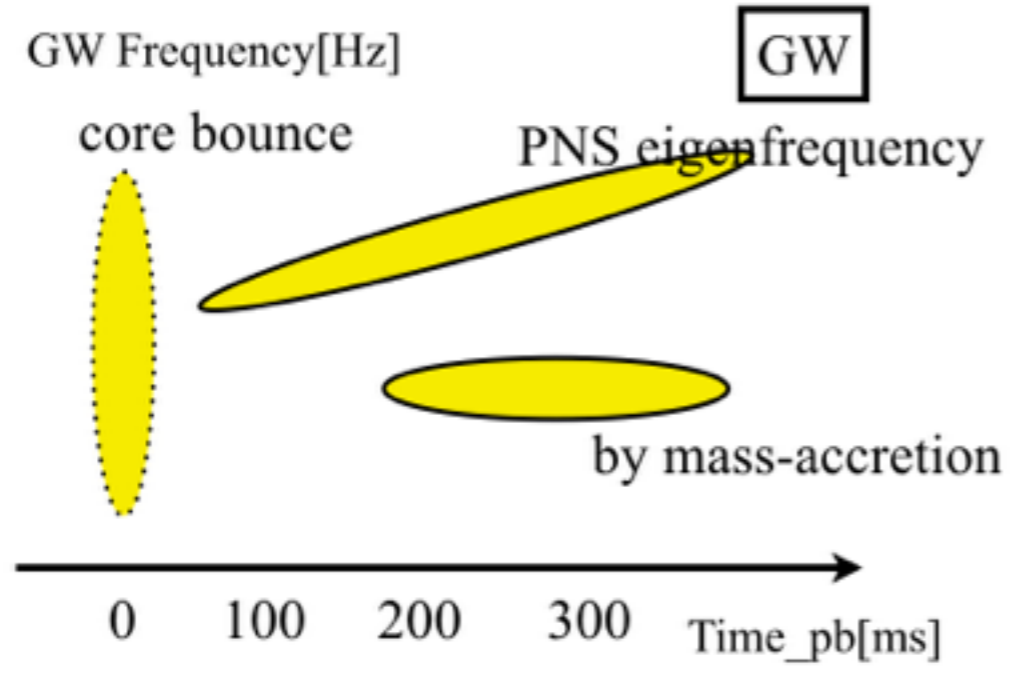
重力波天文学



Standing Accretion Shock Instability (SASI)

- 非球対称で、低次(l=1,2)の衝撃波の不安定な成長
- PNS(Proto Neutron Star)付近で降着物質がheat upされニュートリノが放出
- 非球対称なheat upによりニュートリノルミノシティの時間変化(up to 10%?)が期待される

SASI起源の重力波とニュートリノ



GW(1) : 100-1000 [Hz]重力波、PNSの固有振動数による。

$$f_p = \frac{N}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{GM}{R^2} \sqrt{\frac{(\Gamma - 1)m_n}{\Gamma k_b T}} \left(1 - \frac{GM}{Rc^2}\right)^{3/2}$$

GW(2) : ~100 [Hz] のGW、降着物質の非球対称な動きから発せられる

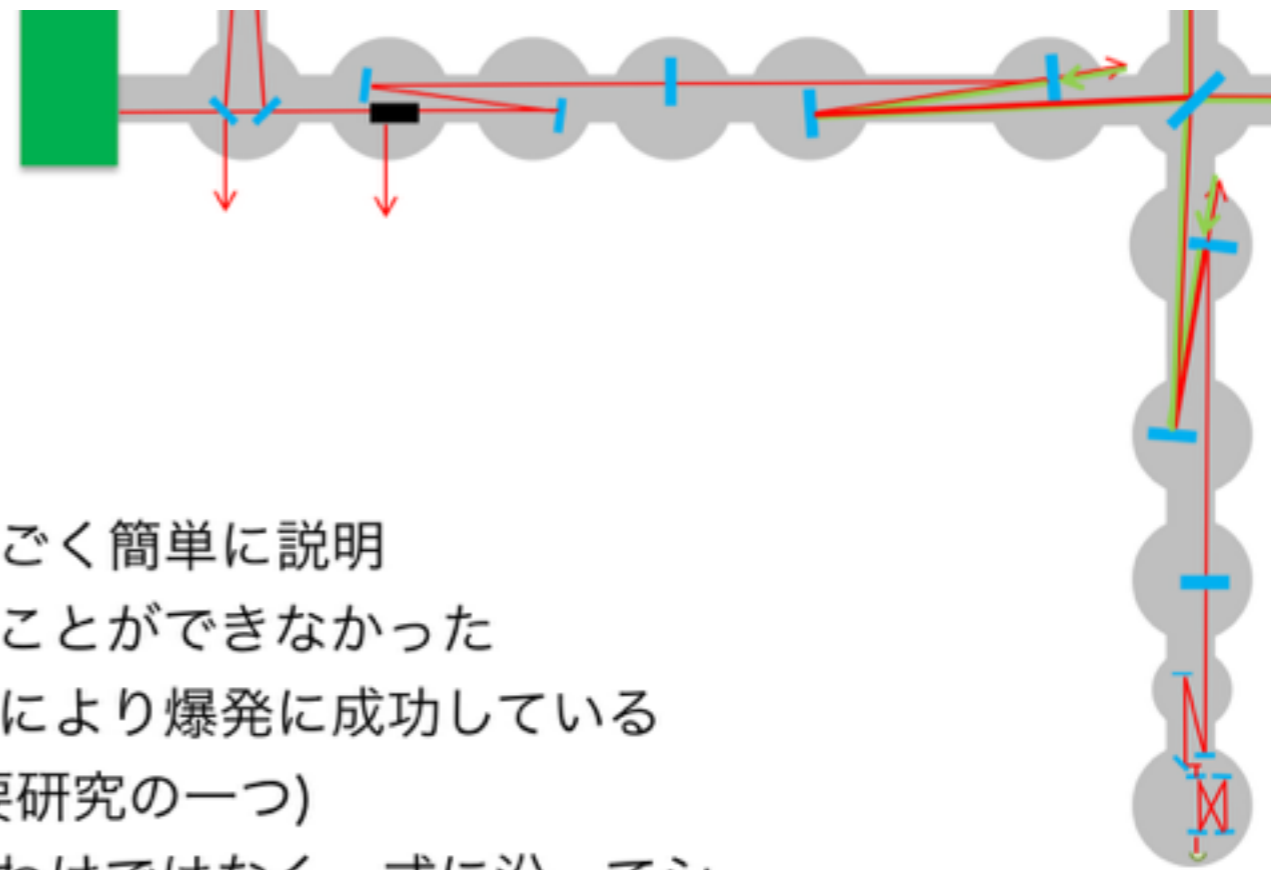
Neutrino : ~100 [Hz]ルミノシティの揺らぎ

How to reconstruct signal??

- Extract ~100 [Hz] from both neutrino and GW signals
- Signal correlation???



重力波天文学



超新星爆発数値シミュレーション

- とても複雑ですし、これが本職ではないのですごく簡単に説明
- 一次元シミュレーションでは長らく爆発させることができなかった
- 近年複数次元シミュレーションを実行することにより爆発に成功している
- とても大きな計算コスト(京コンピュータの重要研究の一つ)
- 先ほど紹介した特徴的な信号は手で与えているわけではなく、式に沿ってシミュレーションを行うことにより出てくる
- 超新星親星の初期条件、近似、爆発エネルギーなどの問題

Mass conservation	$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$
Moment conservation	$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla P - \rho \nabla \Phi,$
Energy conservation	$\frac{de^*}{dt} + \nabla \cdot [(e^* + P)\mathbf{v}] = -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + Q_E,$
Electron fraction evolution	$\frac{dY_e}{dt} = Q_N,$
Poisson equation	$\Delta \Phi = 4\pi G\rho,$

Fig: From Suwa-san

Numerical Simulations

Hydrodynamic equations

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla P - \rho \nabla \Phi$$

$$\frac{\partial e^*}{\partial t} + \nabla \cdot [(e^* + P)\mathbf{v}] = -\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \Phi + Q_v,$$

$$\Delta \Phi = 4\pi G\rho$$

Neutrino Boltzmann equation

$$\frac{df}{cdt} + \mu \frac{\partial f}{\partial r} + \left[\mu \left(\frac{d \ln \rho}{cdt} + \frac{3v}{cr} \right) + \frac{1}{r} \right] (1 - \mu^2) \frac{\partial f}{\partial \mu}$$

$$+ \left[\mu^2 \left(\frac{d \ln \rho}{cdt} + \frac{3v}{cr} \right) - \frac{v}{cr} \right] E \frac{\partial f}{\partial E}$$

$$= j(1 - f) - \chi f + \frac{E^2}{c(hc)^3}$$

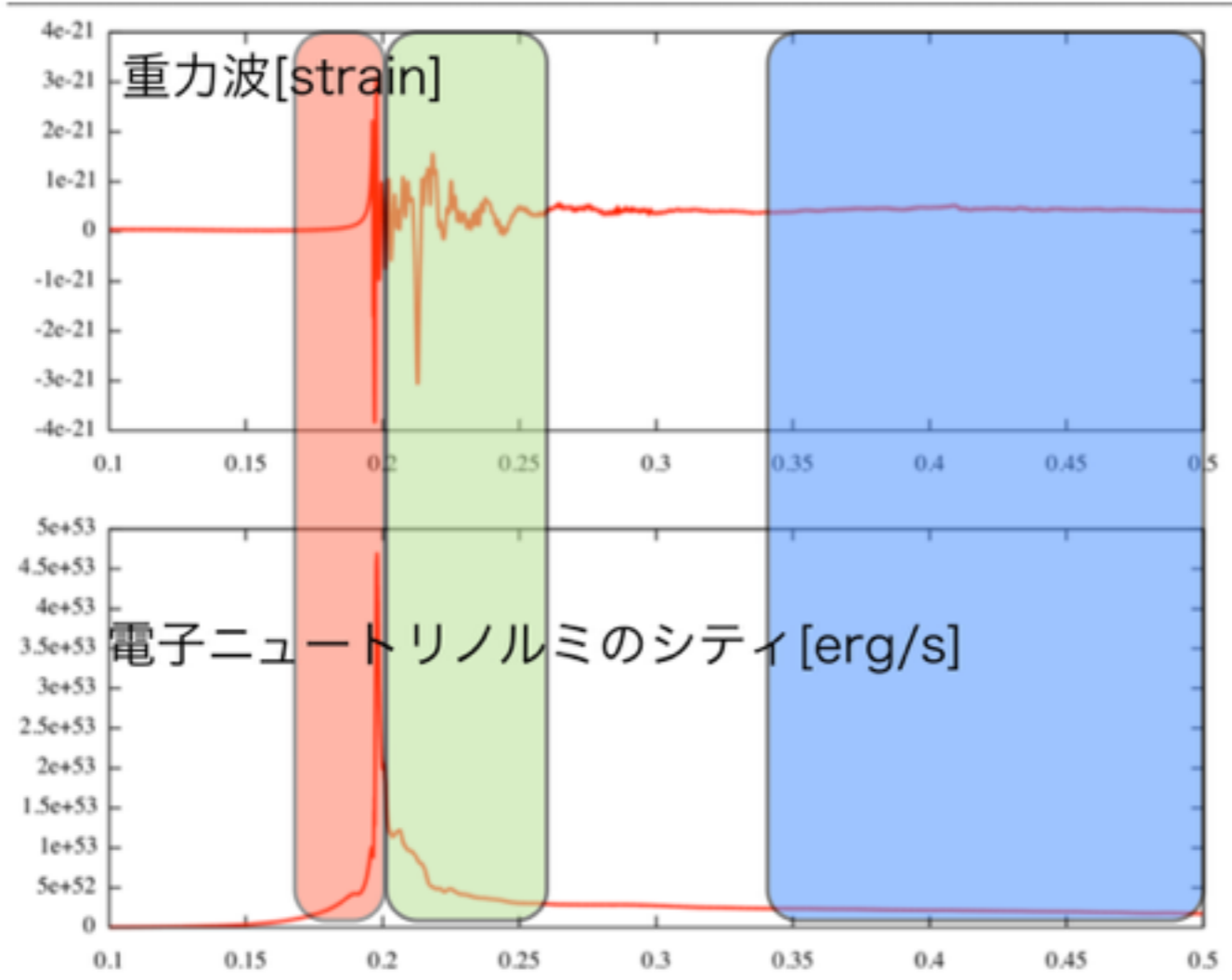
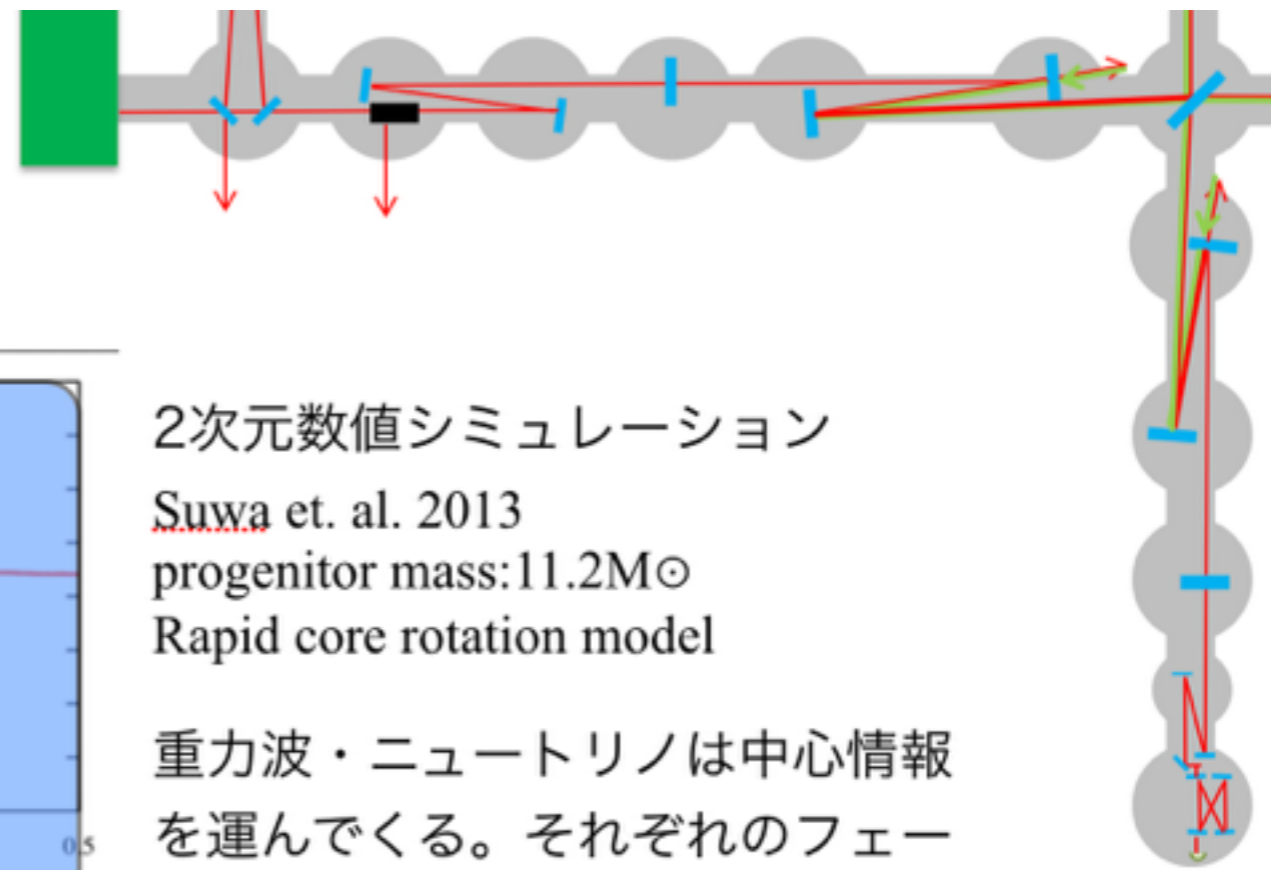
$$\times \left[(1 - f) \int R f' d\mu' - f \int R (1 - f') d\mu' \right].$$

Solve simultaneously





重力波天文学



2次元数値シミュレーション
 Suwa et. al. 2013
 progenitor mass: $11.2 M_{\odot}$
 Rapid core rotation model

重力波・ニュートリノは中心情報を運んでくる。それぞれのフェーズで特徴的な信号が現れることが期待されている。

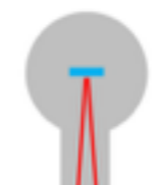
ニュートリノ: thermal motion
 重力波: matter motion

Strong GW from core bounce?

Characteristics of prompt convection phase?

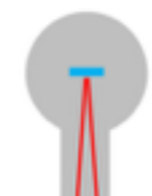
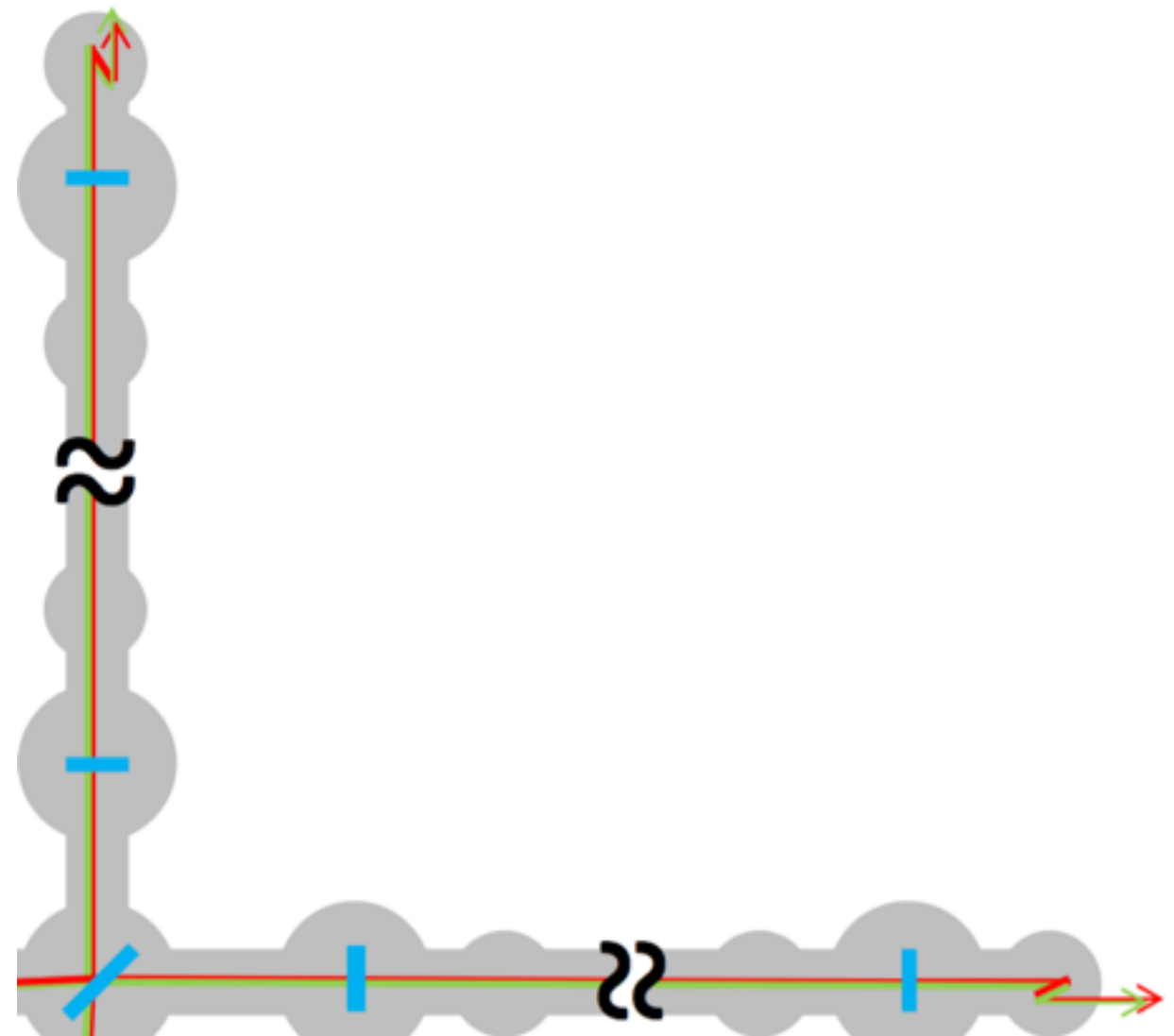
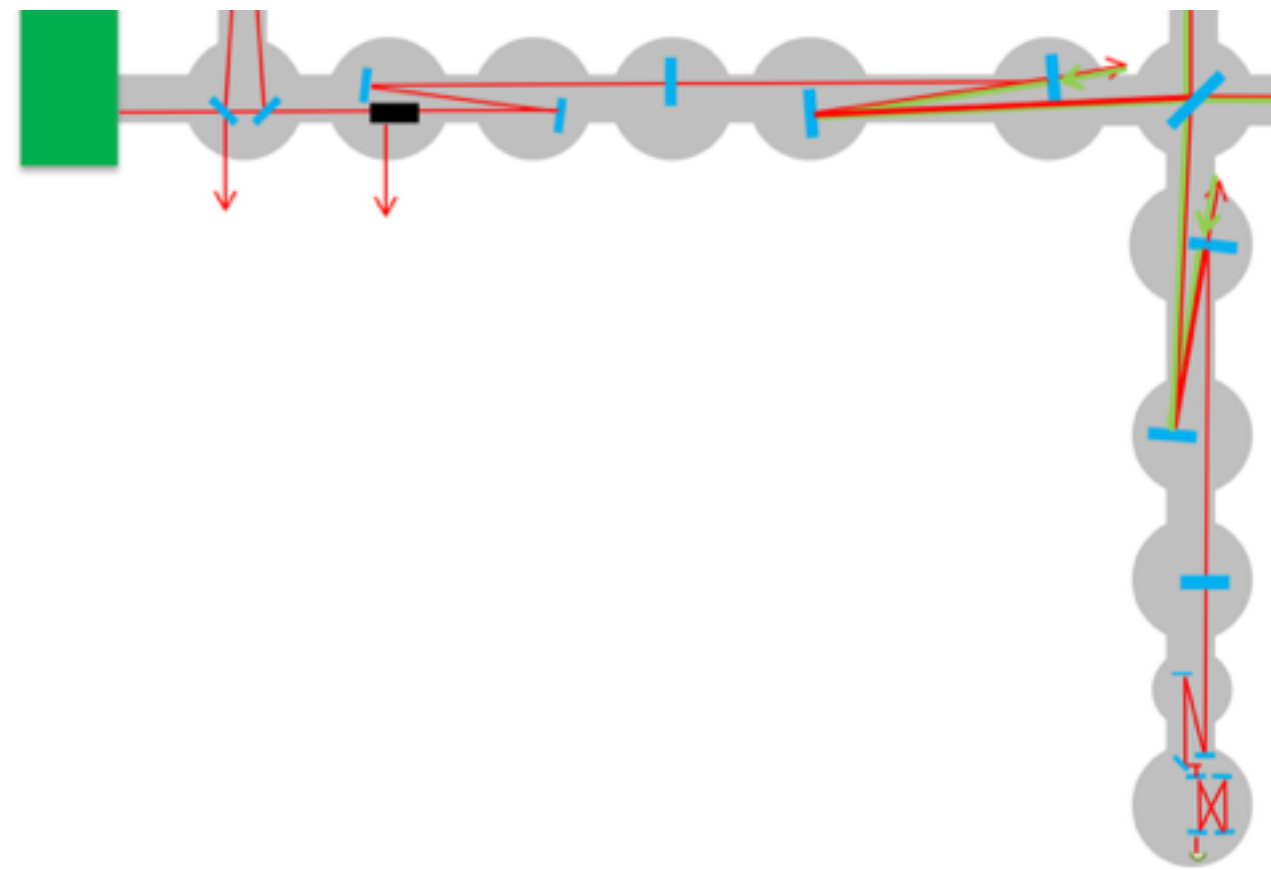
Is there signals from shock stall phase?

Characteristics of SASI/convection phase?



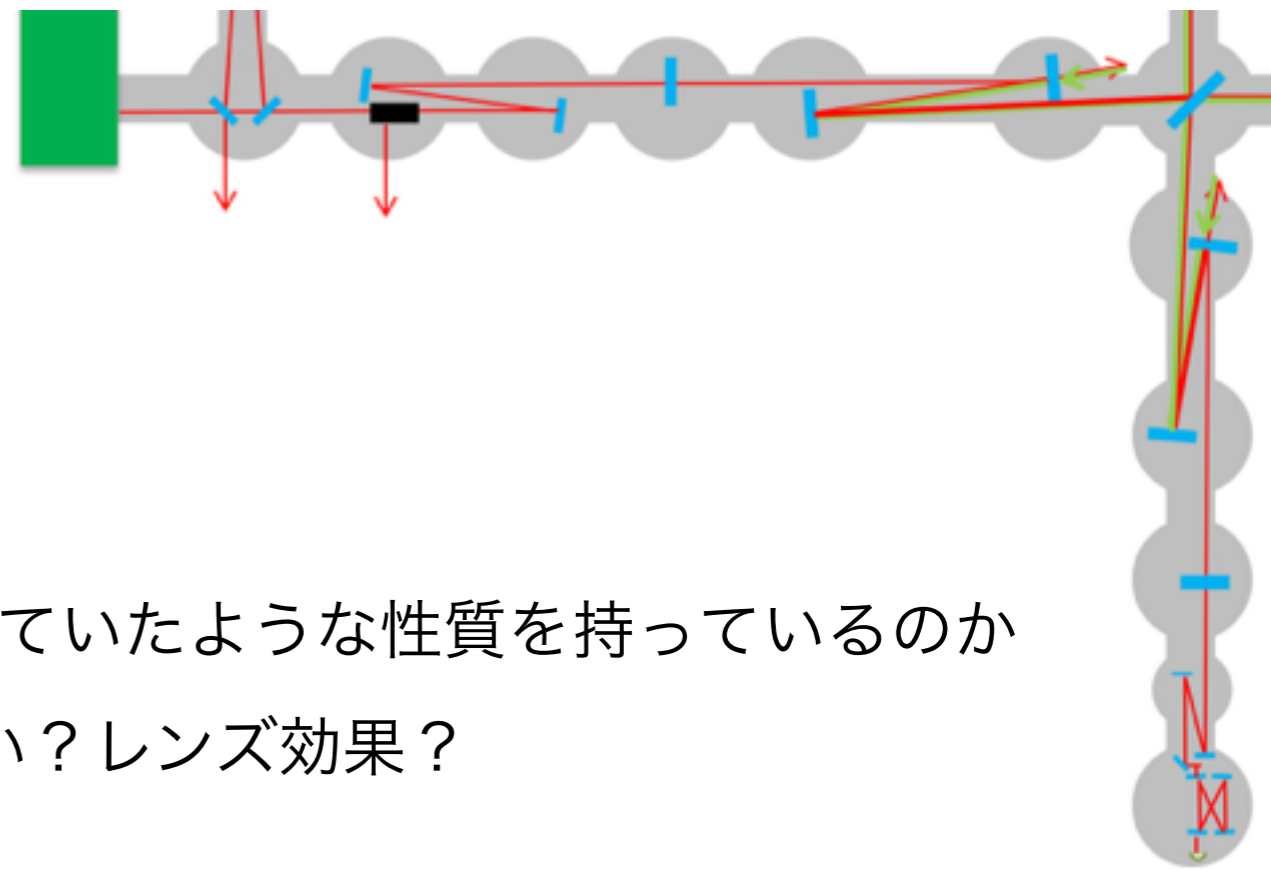


重力波天文学





重力波天文学



- ・ 一般相対論の検証
 - ・ 強い重力場での性質
 - ・ 重力波は本当に一般相対論で予言されていたような性質を持っているのか
 - ・ 光速？ 余剰次元に信号が逃げてない？ レンズ効果？
 - ・ 2つの偏極というのは正しい？
- ・ コンパクト連星合体、回転パルサー
 - ・ どんな星が連星を形成している？ その起源は？
 - ・ 中性子星自身の物理、高温高圧での状態方程式
 - ・ ニュートリノや電磁波も出てくる？
 - ・ 金などの重元素はどのようにできる？
- ・ インフレーション起源の重力波観測
- ・ 超新星爆発の爆発メカニズム解明
 - ・ 次の銀河内爆発が待ち遠しい！

