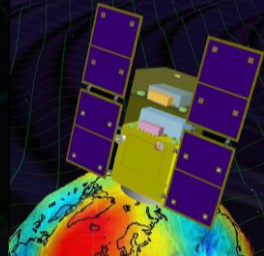
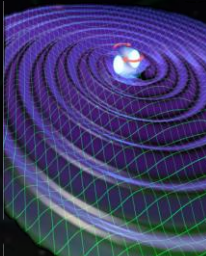


共通基礎天文学

重力波天文学

安東 正樹 (国立天文台)



講義の予定

第1回 重力波による天文学

第2回 観測技術と観測結果

第3回 次世代重力波望遠鏡

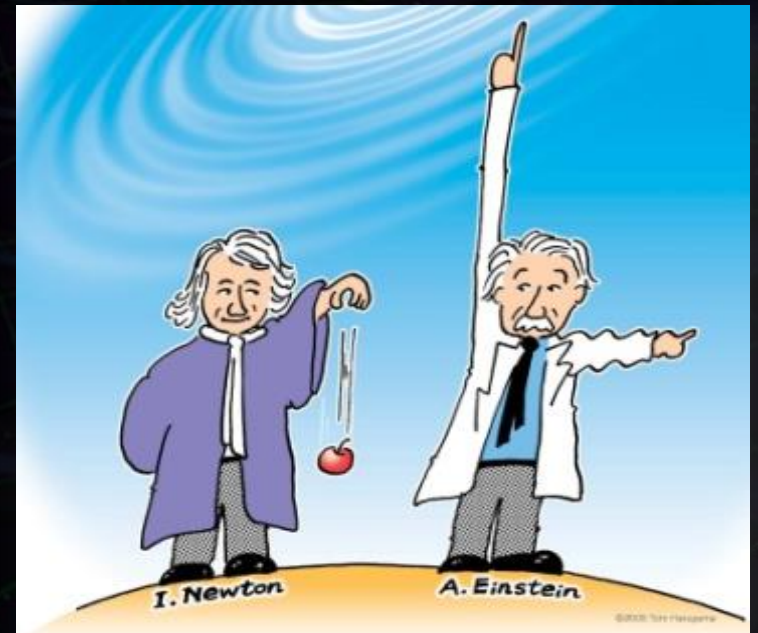


イラスト Tom Haruyama

第1世代 重力波検出器

検出の試み：1960年代より行われる

2000年前後より、大型干渉計型検出器が観測を開始

レーザー干渉計型：6台, 共振型検出器：3台



国際的観測ネットワーク：1年を超える観測データ

→ 科学的成果（上限値, 理論モデルへの制約など）

連星中性子星合体イベント：50kpc~20Mpcの観測レンジ

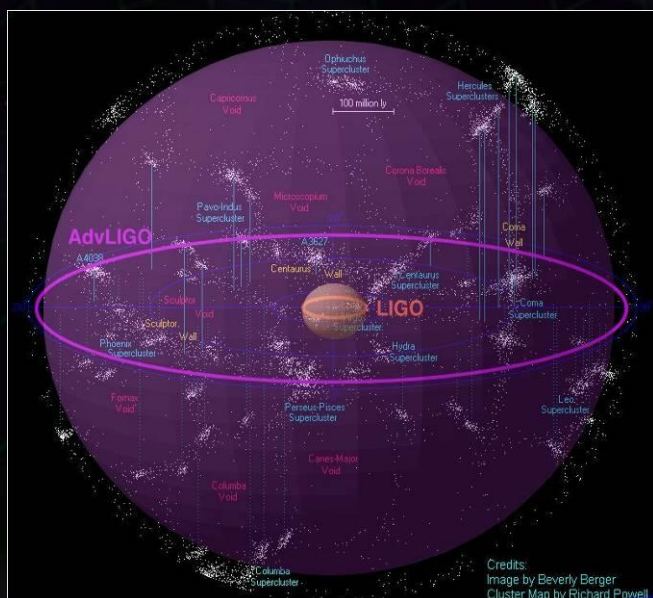
→ 我々の銀河, 近傍銀河でイベントがあれば検出可能

現在の検出器 --- 近傍銀河までの観測範囲を持つ

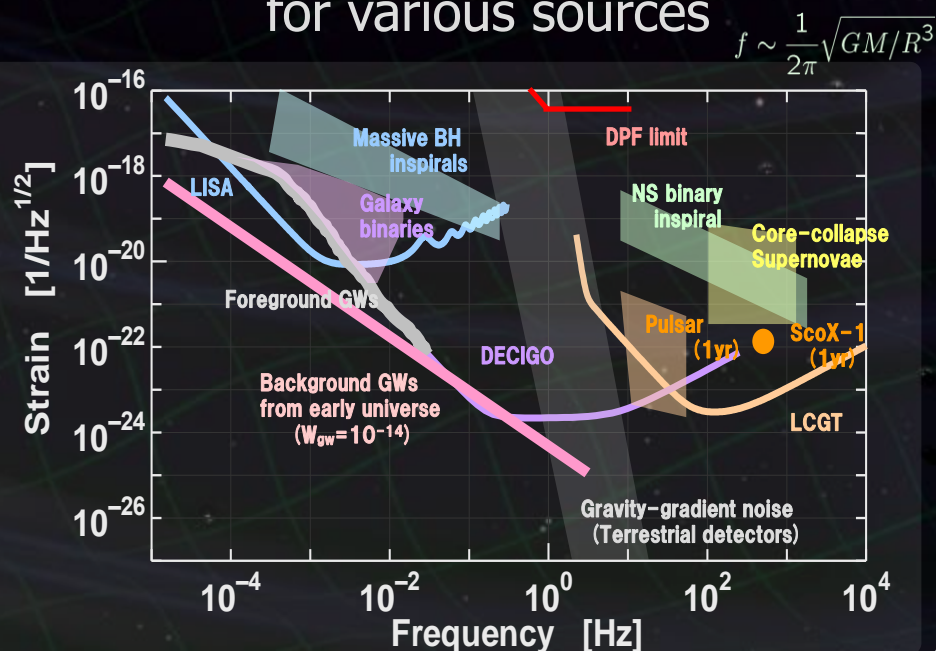
ただ... そのような重力波イベントは稀 (10^{-4} - 10^{-2} event/yr)

⇒ 約1桁感度を向上した 次世代の重力波望遠鏡

Better sensitivity
to cover more galaxies



Wider observation band
for various sources



地球上の重力波望遠鏡の感度を向上させる。

⇒ 10Hz – 1kHzの重力波イベントの観測を目指す。

高感度化→より多くの銀河をカバーする

(重力波の振幅) $\propto 1/(\text{波源までの距離})$

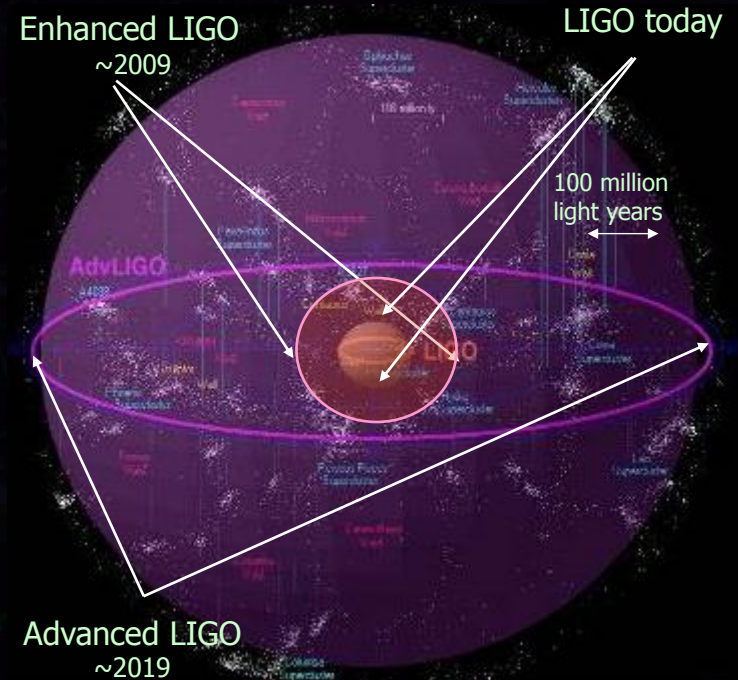


感度が10倍向上 → イベントレートは 10^3 倍

得られるサイエンス

Initial LIGO 1年間の観測

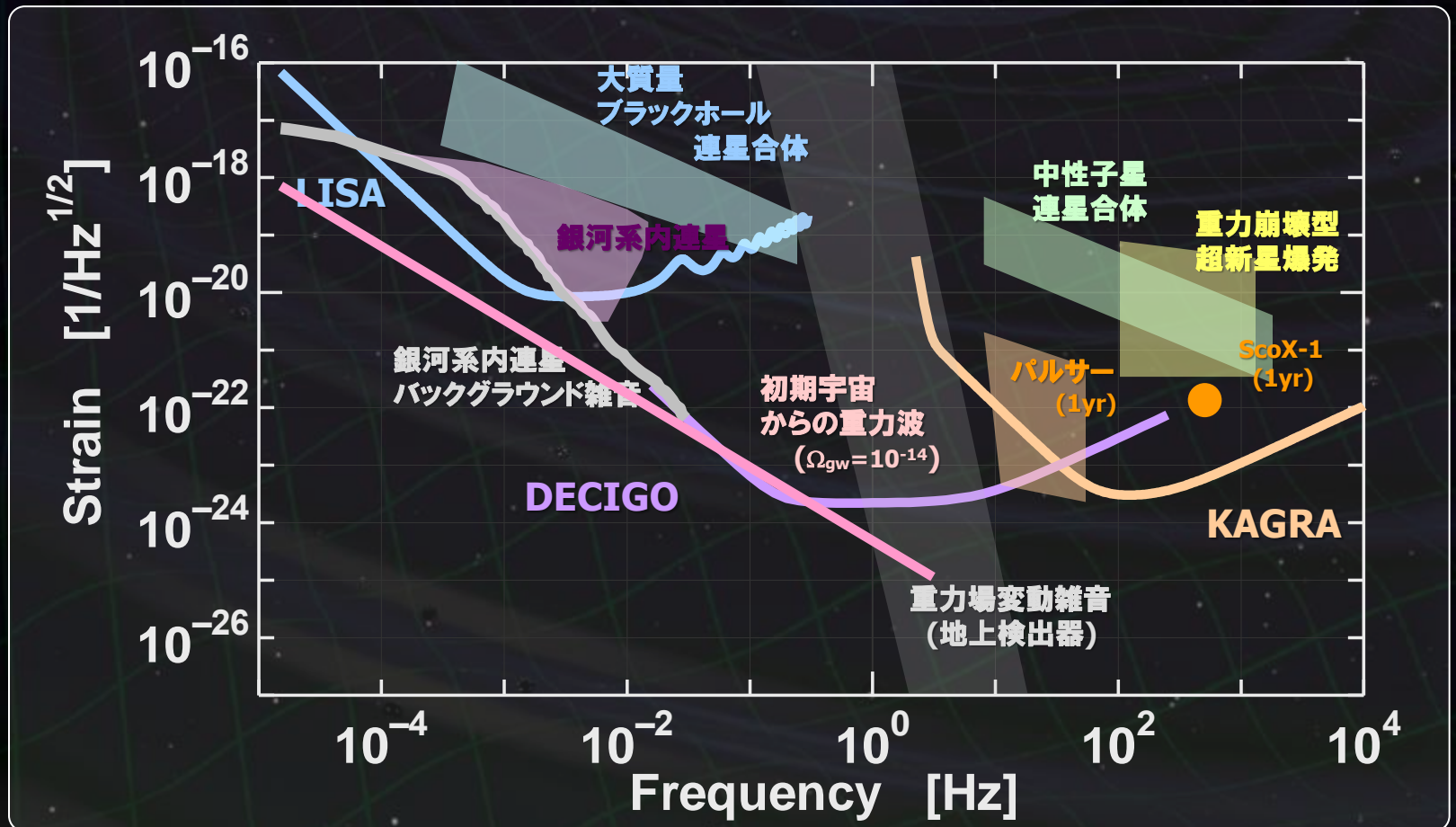
~ Advanced LIGO 9時間の観測



第2世代望遠鏡では、検出頻度 ~ 10 event/year

低周波数帯への観測領域の拡大

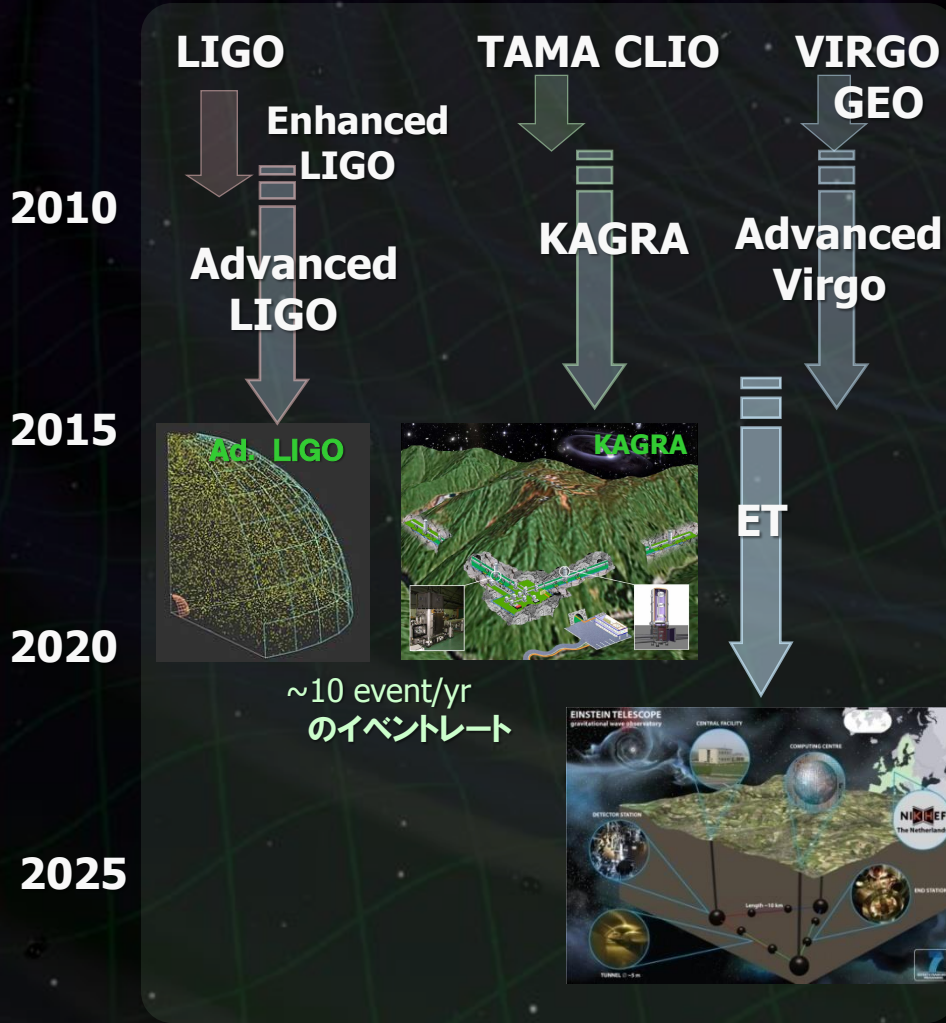
- 準定常的な重力波源 → イベントを待つ必要はない.
- 大質量BHに関連する, 大振幅の重力波.



重力波天文学のロードマップ

地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測



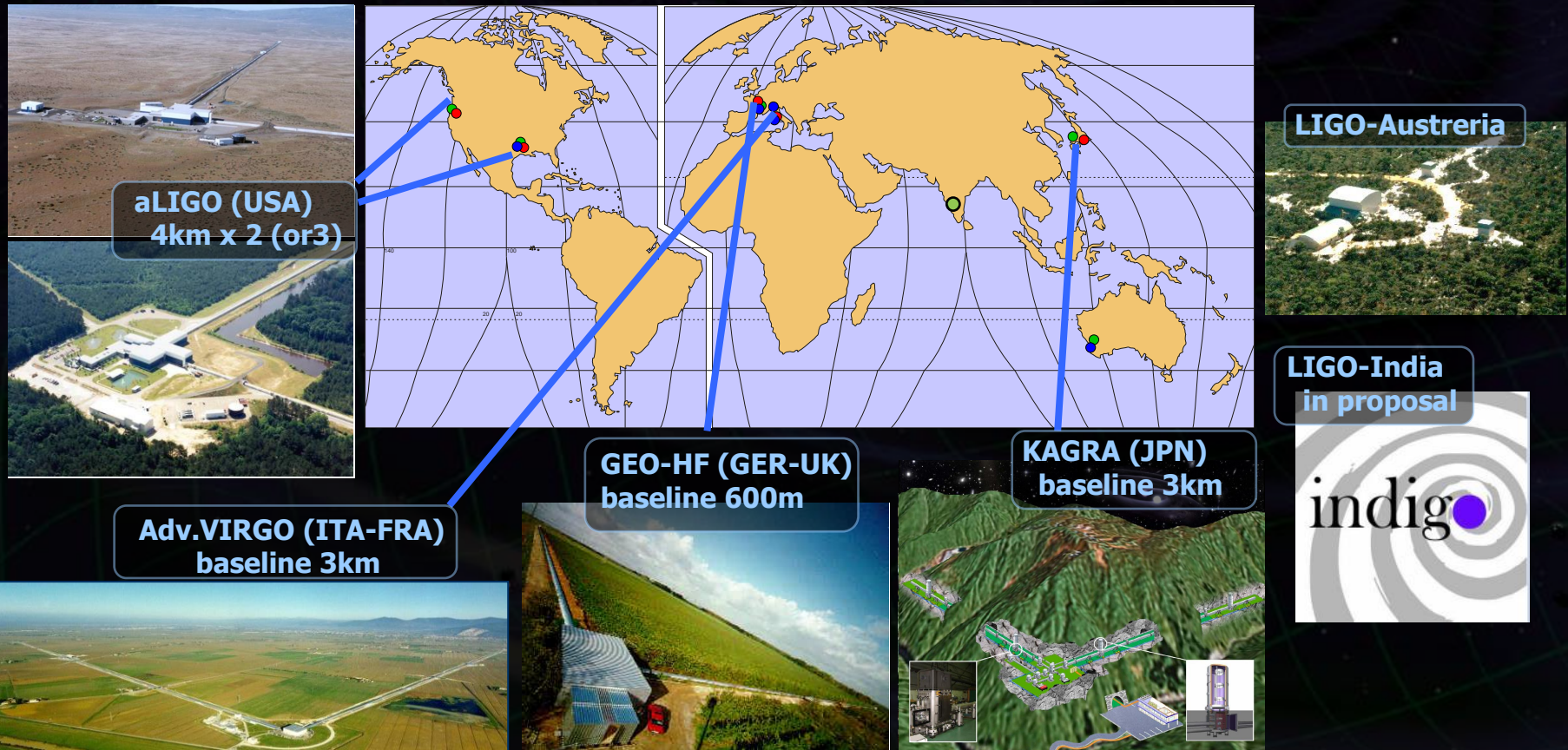
より高感度に!!!

- 雑音との闘い -



第2世代 重力波望遠鏡

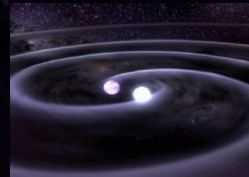
より感度を向上させた第2世代の重力波望遠鏡
→ 国際観測ネットワークの形成.



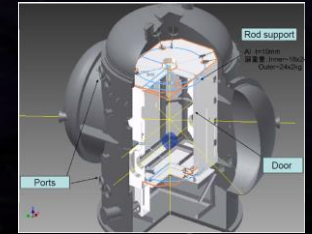
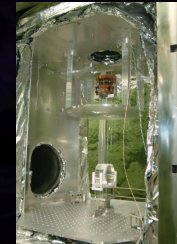
重力波望遠鏡の高感度化

重力波源の理解

理論・解析的計算
数値相対論
データ解析手法

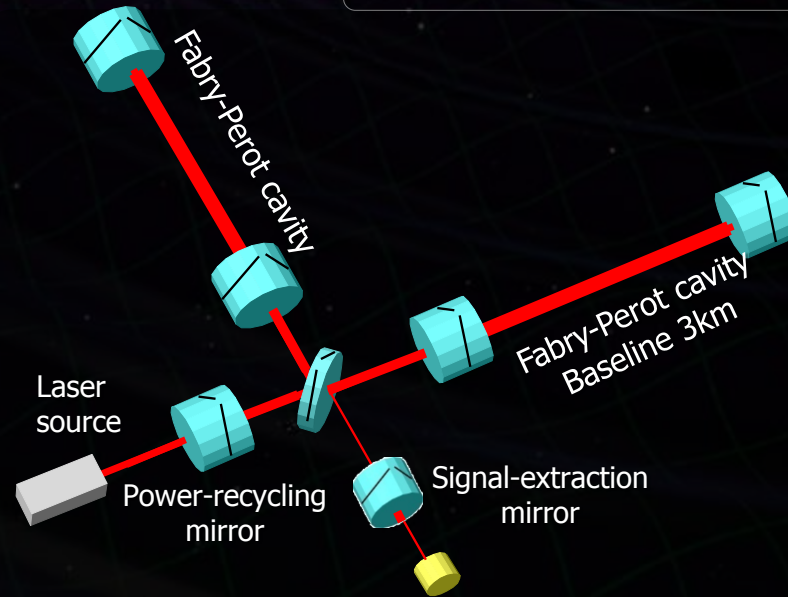


鏡・振り子の熱雑音
鏡・振り子の低温化
材質の機械損失



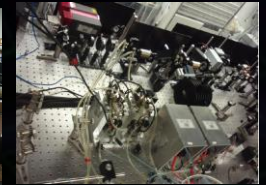
地面振動の影響

静寂な地下サイト
高性能防振装置



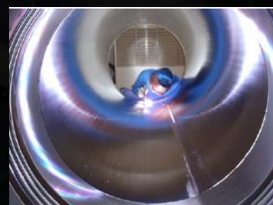
光の量子雑音

大型干渉計
干渉計方式の工夫
高出力レーザー光源
高性能鏡



真空システム

光路長の揺らぎ
音響雑音などの低減

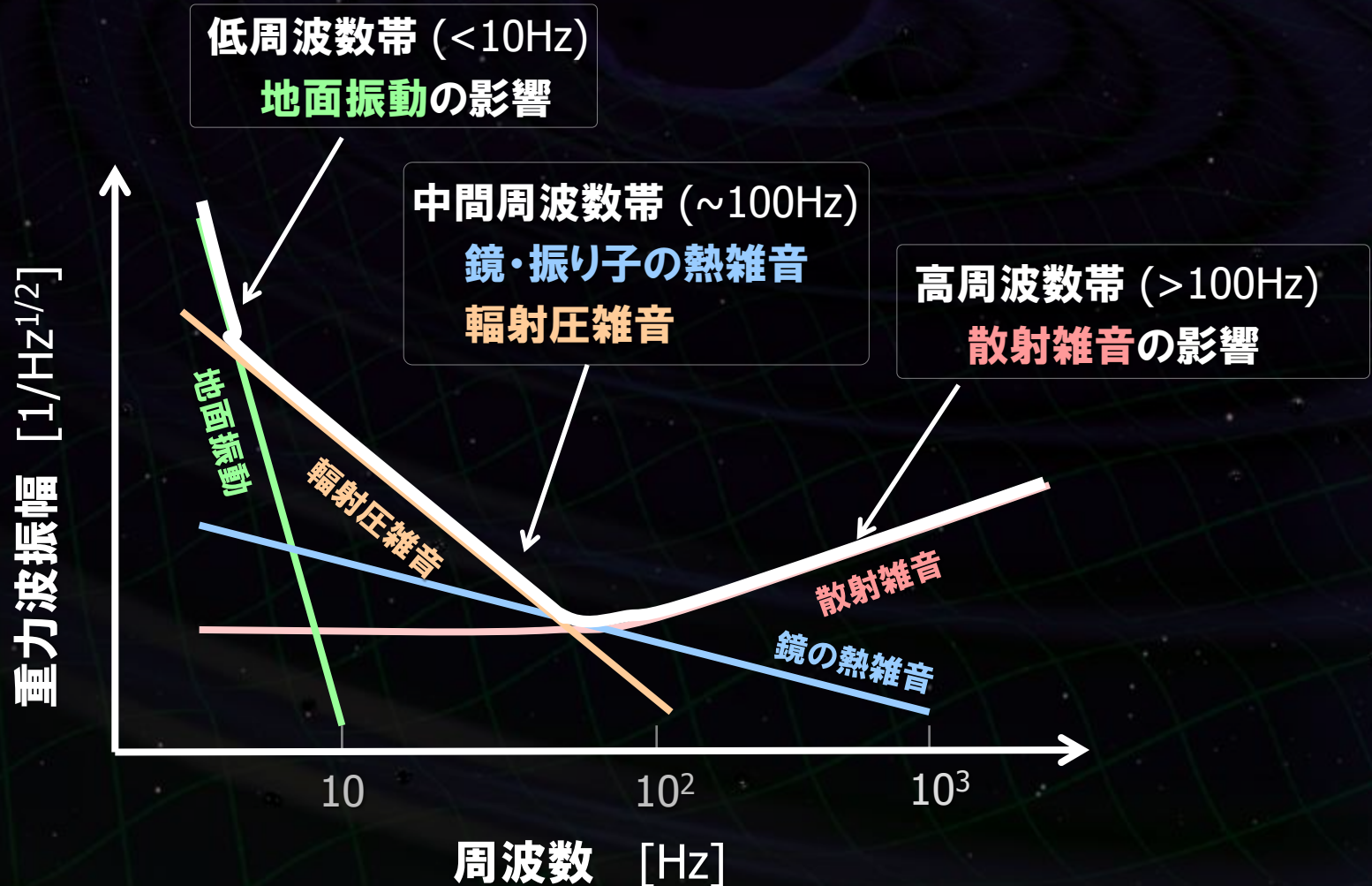


長期・連続観測

デジタル制御・データ取得系
環境モニタ, データ保管・分配



重力波検出器の感度



光の量子雑音 --- 干渉計における原理的な雑音 光が光子の集合であることに起因した統計揺らぎ。

- **散射雑音** (Shot Noise)

光検出時の光子数計数誤差

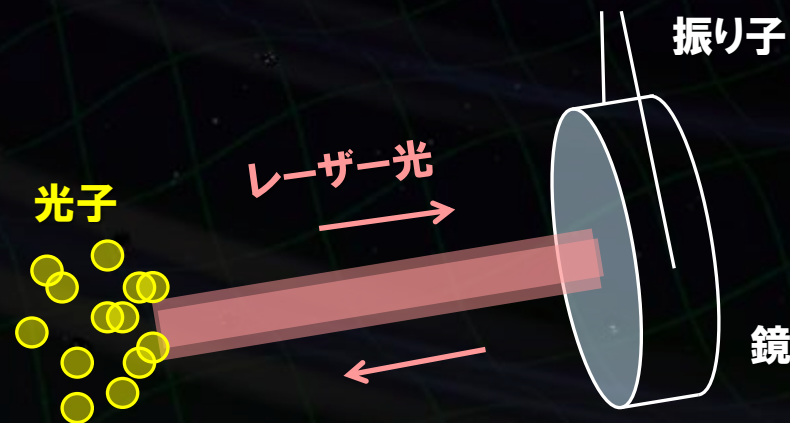
$$h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

- **輻射圧雑音** (Radiation Pressure Noise)

鏡での反射時の光子反跳雑音

$$h_{\text{RPN}} \propto \sqrt{P}$$

[P : 干渉計入射光パワー]



光 (輻射場) の不確定性関係

散射雑音：光の位相雑音

$$\delta h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

輻射圧雑音：光の振幅雑音

$$\delta h_{\text{rad}} \propto \sqrt{P}$$

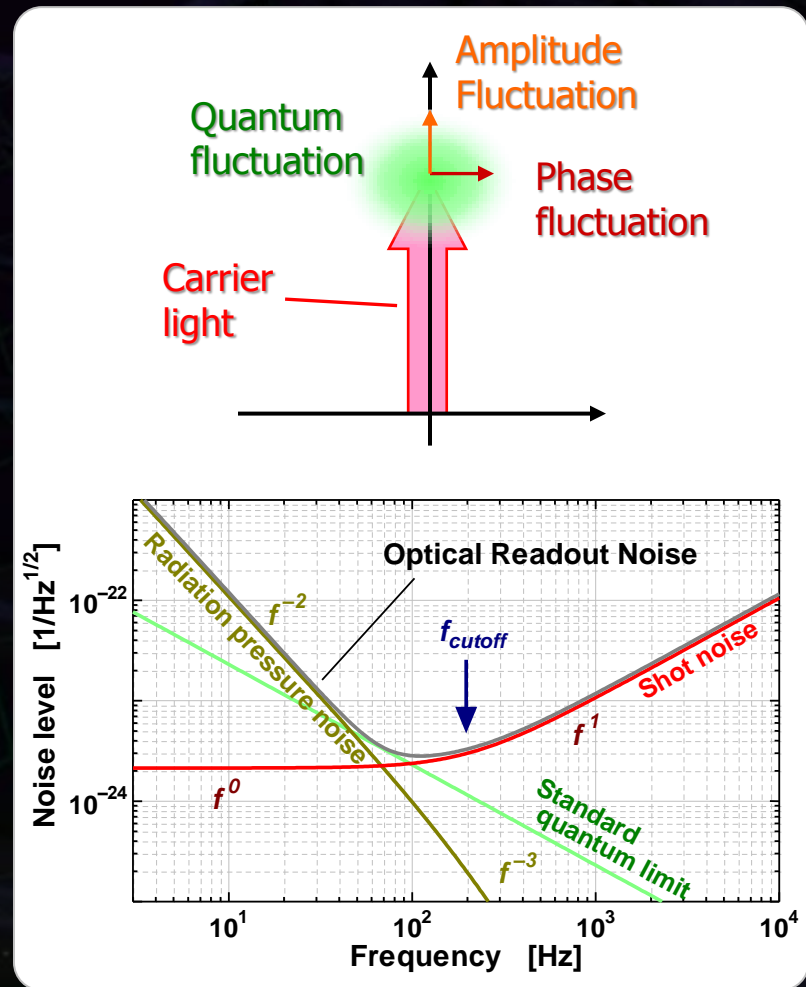


二乗和を最小にする光パワー

標準量子限界

(SQL : Standard Quantum Limit)

$$h_{\text{SQL}} = \frac{1}{2\pi L f} \sqrt{\frac{8\hbar}{m}}$$



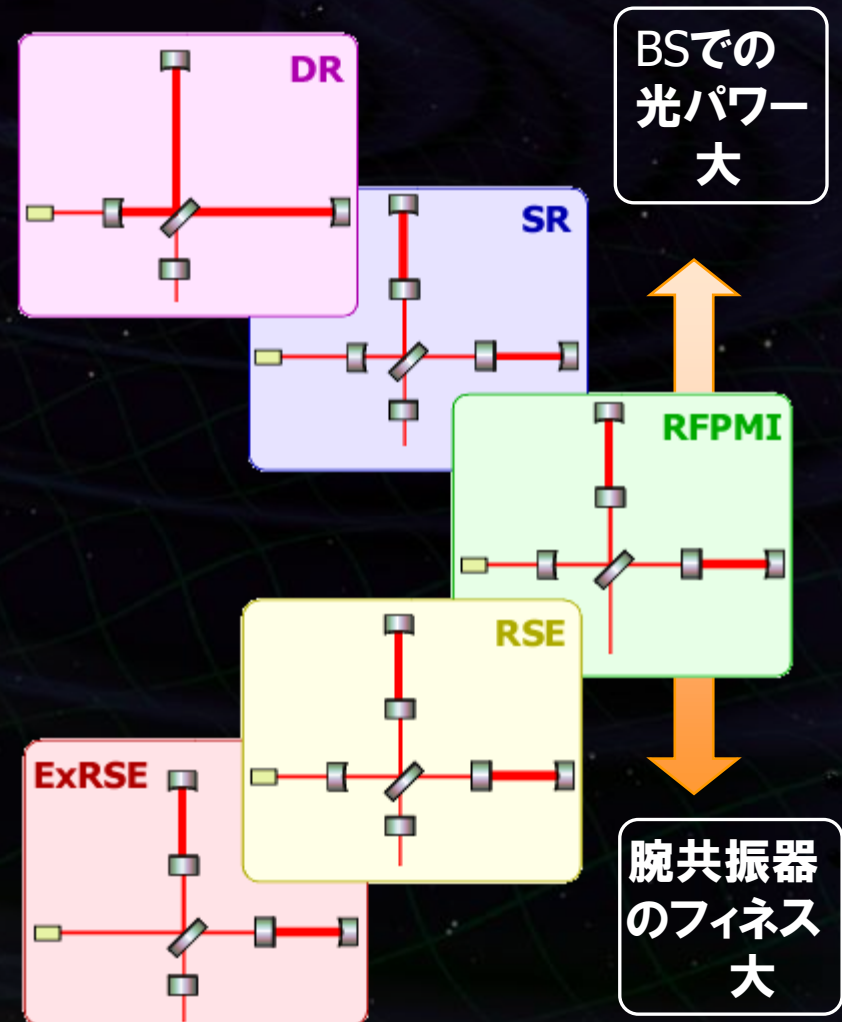
干渉計方式を工夫

→ 標準量子限界を実現

原理的には、どの方式でも
同じ光パワーと信号帯域を実現可。

実際上の問題を考慮して選択される

- 光のロス (鏡のロス、コントラスト)
- 鏡などの熱変形
- 制御の容易さ (制御すべき自由度)



干渉計方式の工夫

RSE (Resonant-Sideband Extraction)

J.Mizuno (1993)

- 干渉計内の高レーザー光量の蓄積.
- 観測周波数帯の可変性・狭帯域化を可能にする.

⇒ KAGRA, aLIGO, Ad.Virgoで用いられる.



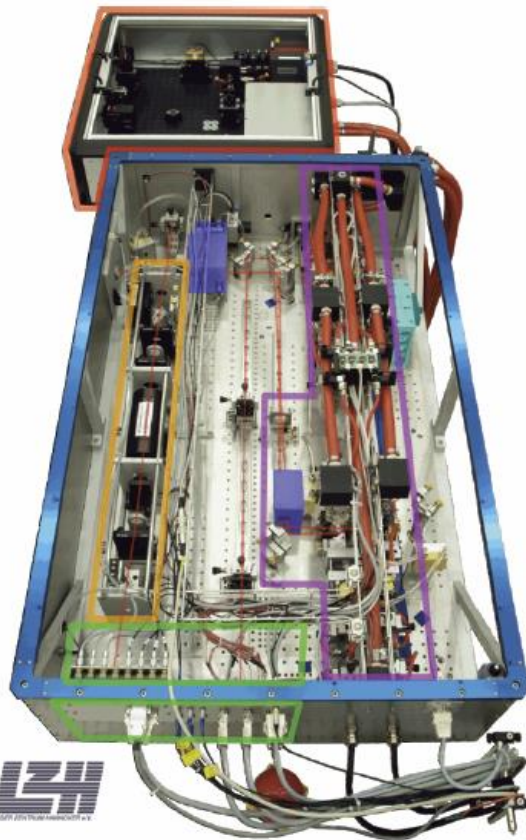
・腕共振器内に高いレーザーパワーを実現
光のロスの影響を受けにくい.

・鏡基材での熱吸収を低減
ITMでの熱吸収の影響を低減.

・観測周波数帯域を調整可能.
観測対象に応じて干渉計応答を最適化.



200W Nd:YAG laser,
stabilized in power and frequency



LIGO-G1300027-v1



- Designed and contributed by Max Planck Albert Einstein Institute
- Uses a monolithic master oscillator followed by injection-locked rod amplifier

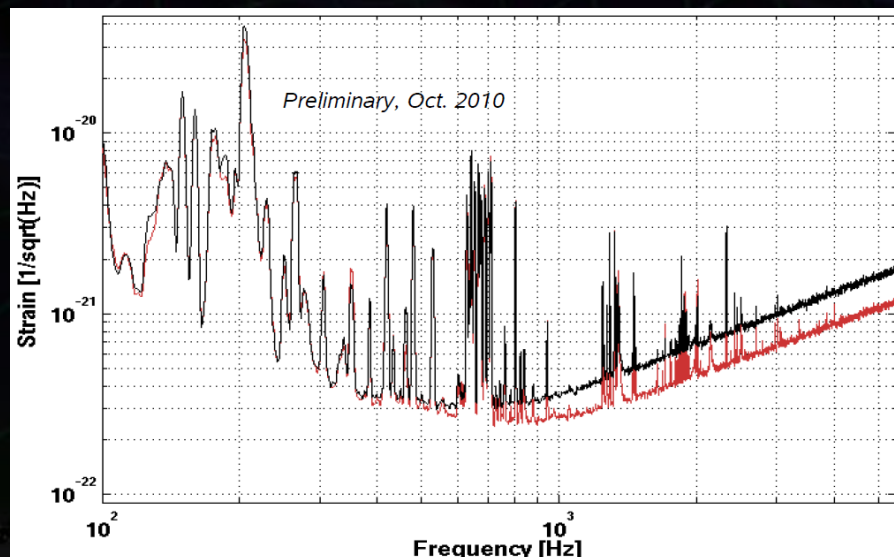
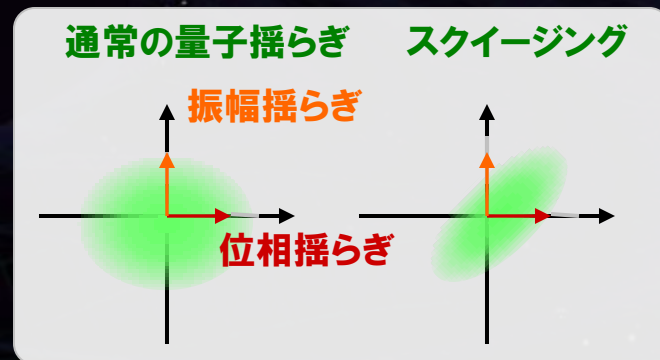
15

標準量子限界を超える測定

スクイーピング (光の量子状態を変える)

- スクイズされた真空場を導入
- 狭帯域化によるスクイーピング (Ponderomotive squeezing)

⇒ 感度の向上を確認.



Hartmut Grote
for the LSC

LSC-Virgo meeting
Arcadia, March, 2011
LIGO-G1100206



Leibniz
Universität
Hannover



CARDIFF
UNIVERSITY



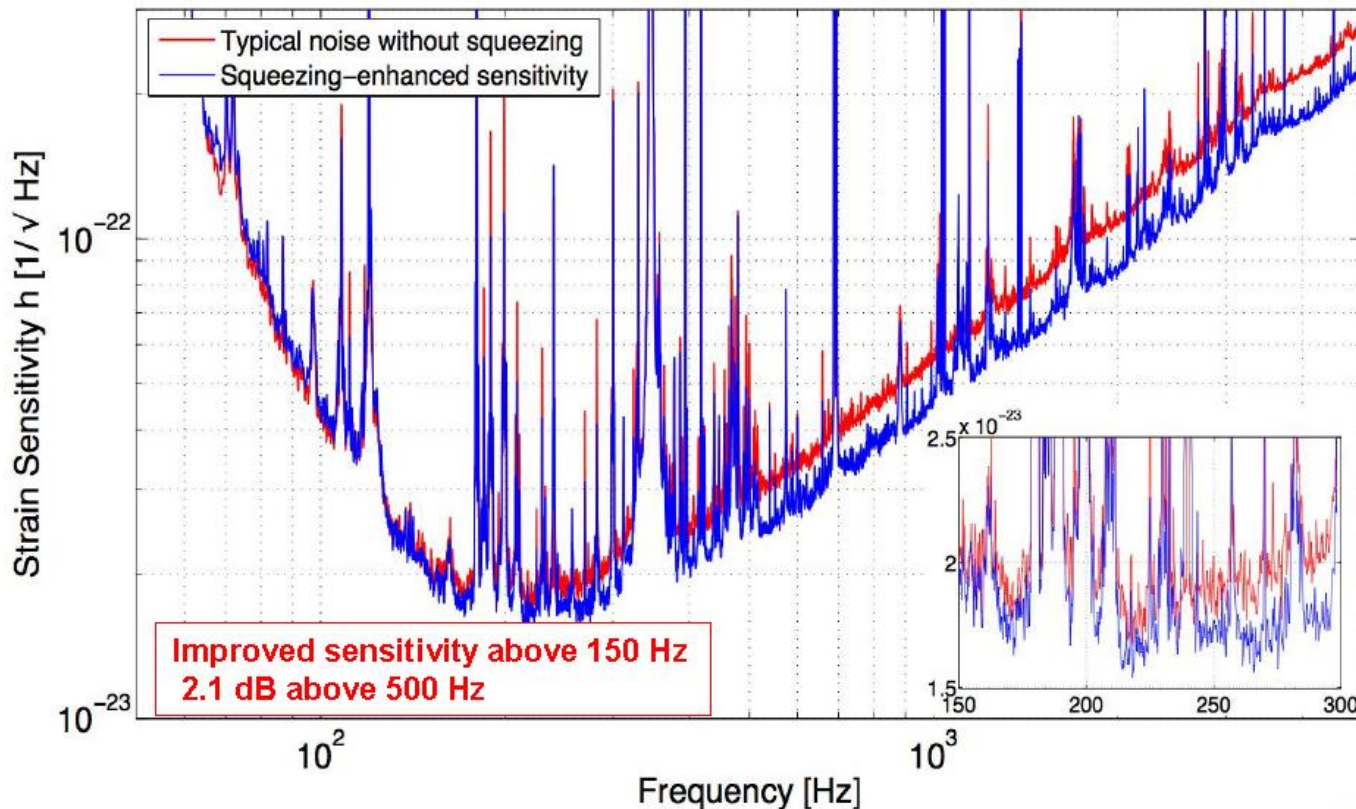
Universitat de les
Illes Balears



Hartmut Grote, LV meeting March 2011

Using Squeezed Light to Improve LIGO Sensitivity

LSC, "Enhancing the astrophysical reach of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light", in preparation



Marcel Grossman 13, Stockholm, 4 July 2012

熱雑音 --- 干渉計の原理的雑音

干渉計の構成コンポーネントの機械損失

→ 揺動力 (揺動散逸定理)

熱雑音

$$\text{Thermal noise} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

T : 温度 [K]
 Q : 機械損失の逆数

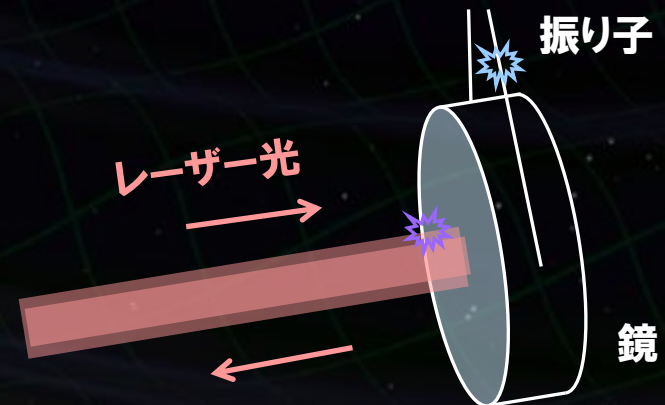
温度を下げる
良い材質を選ぶ
低減する干渉計構成

鏡の熱雑音

鏡基材, コーティング面の損失.

振り子の熱雑音

鏡の懸架ワイヤ等での損失.



機械的振動 → 調和振動子

運動方程式 (ランジュバン方程式)

$$m\ddot{x} + \gamma\dot{x} + kx = f_n$$

機械損失

熱揺動力

(揺動散逸定理)

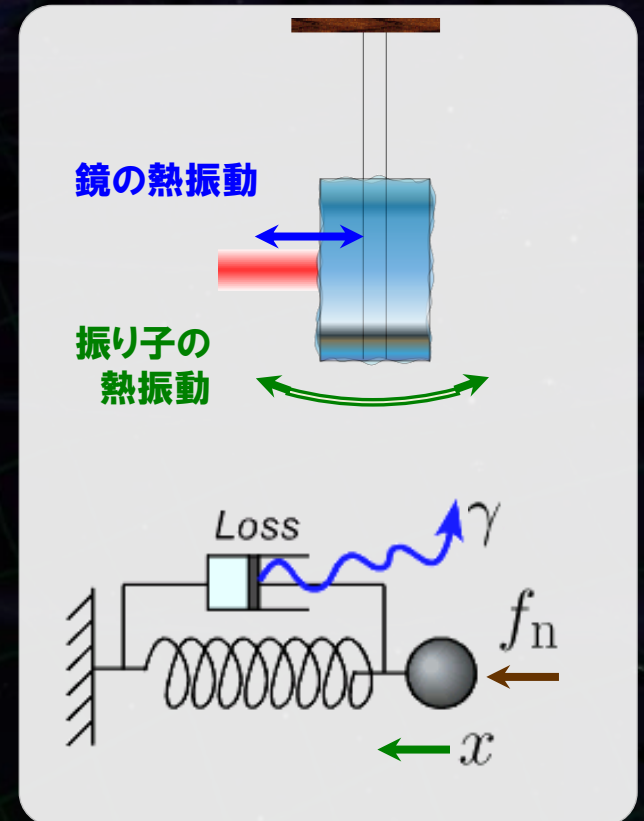
$$\langle f_n^2 \rangle = 2k_B\gamma T \quad (\text{白色雑音})$$

共振の鋭さ : Q値

$$Q = \frac{m\omega_0}{\gamma}$$

変動のスペクトル

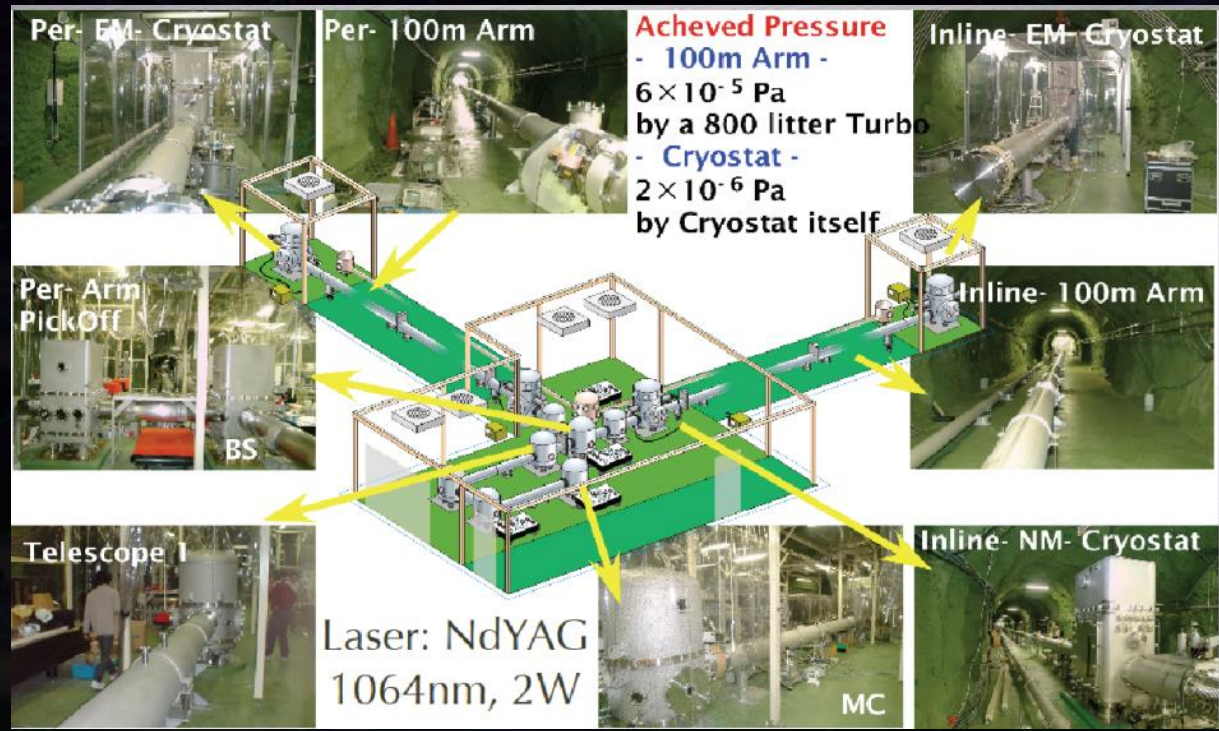
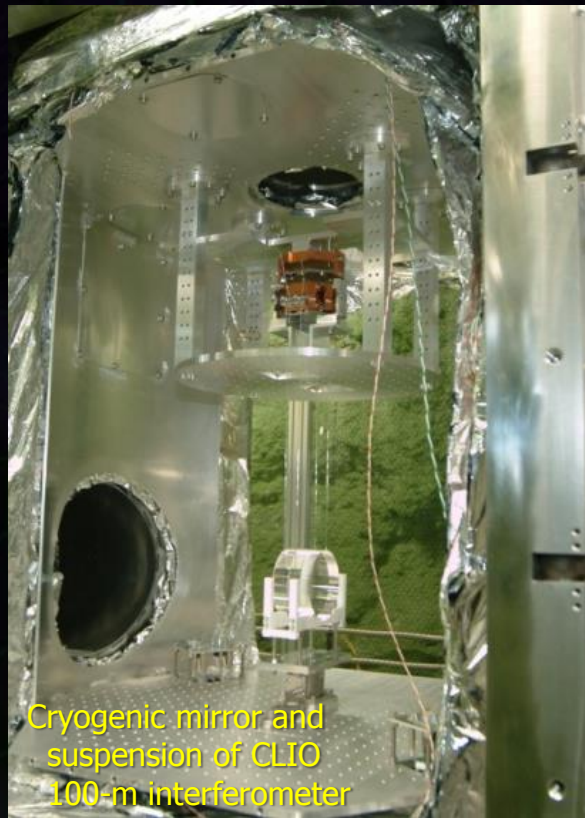
$$\sqrt{\langle f_n^2 \rangle} \propto \sqrt{T/Q}$$



- Q値を上げる (機械損失を下げる)
 - 使用する材質を選ぶ
(鏡基材, 懸架ファイバー, 鏡コーティング)
- 工夫により影響を抑える.
 - 鏡の熱雑音 – 鏡にあたるビーム径を大きくする.
 - 振り子の熱雑音 – 制御で抑えるなど.
- 冷却する.
 - 鏡, 振り子の温度を下げる.

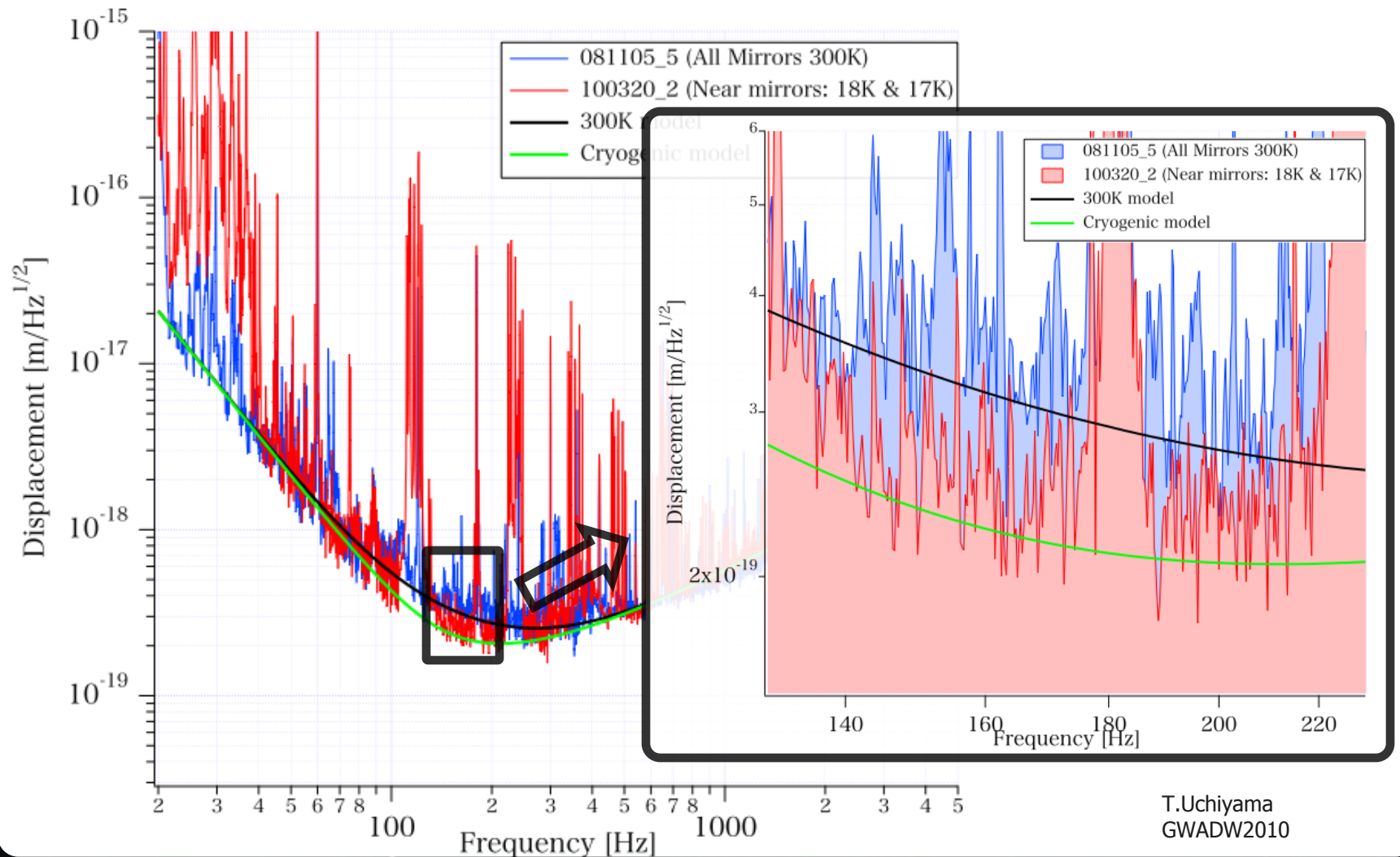
CLIO : 基線長100m 低温プロトタイプ干渉計

- 神岡の地下サイト → 長時間の安定動作.
- 鏡・振り子を冷却 → 熱雑音の軽減を確認.



CLIO 低温動作時の感度

Sensitivity improvement with cryogenic operation



地面振動 --- 地上干渉計の低周波観測帯域と安定度を制限

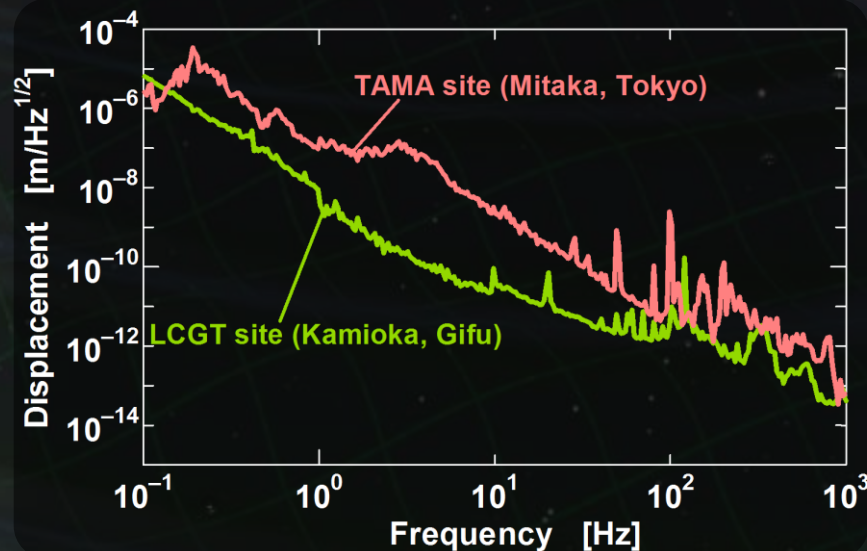
- **常微動** : 準定常的な変動. 干渉計の観測帯域を制限.
- **非定常変動** : 地震, 気象変動, 人工的な励起など.
干渉計の安定度, 観測のデューティサイクルに影響.

地面振動レベル

- 地下サイトでは2-3桁小さい
- 高周波数で低減.

$$\delta x_{\text{seis}} \sim \frac{10^{-9}}{f^2} \text{ [m/sqrtHz]}$$

(神岡サイトでの値, f : 周波数,)



振り子を基本構成とする

1段振り子の防振比
(プラットフォームと質量の振幅比)

$$\frac{x}{x_0} = \frac{1 + \frac{i}{Q} \frac{f}{f_0}}{1 + \frac{i}{Q} \frac{f}{f_0} - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$$

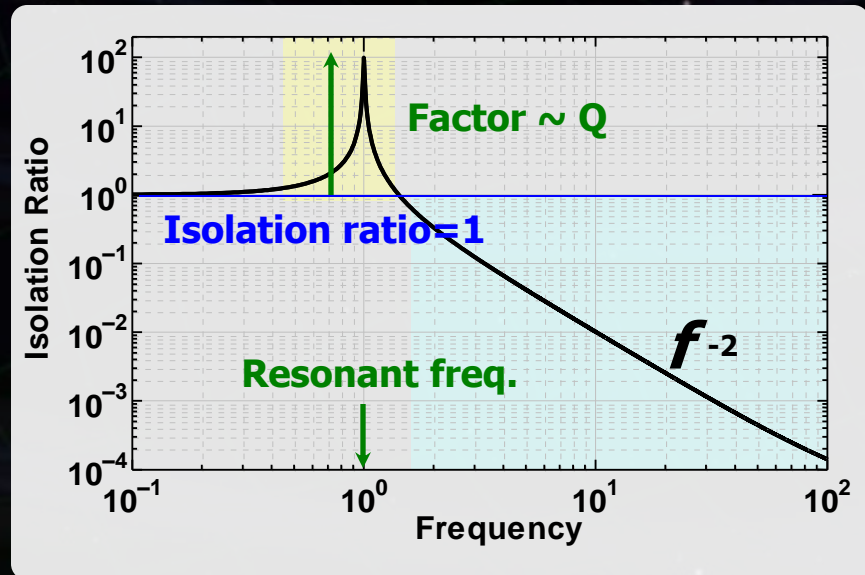
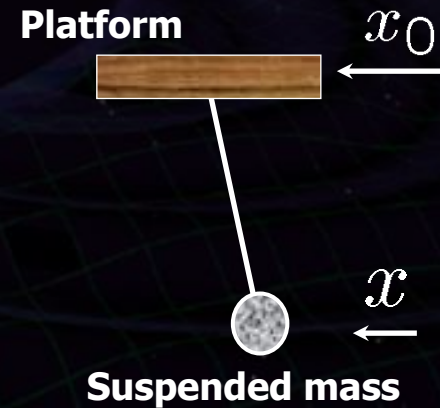
f : Frequency

f_0 : Pendulum frequency

Q : Q-value

(sharpness of resonance)

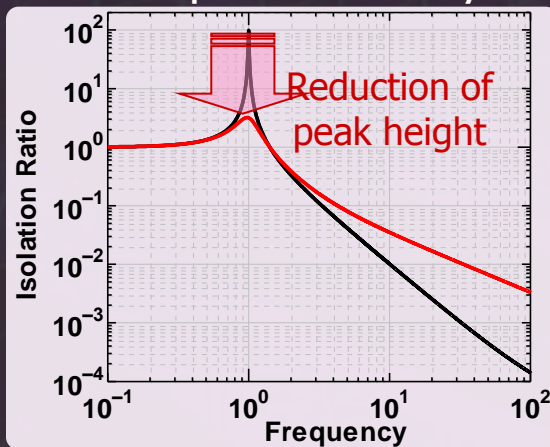
→ 共振周波数 f_0 より高周波数で防振



防振装置の高性能化 → 高い防振比・安定度

ダンピング

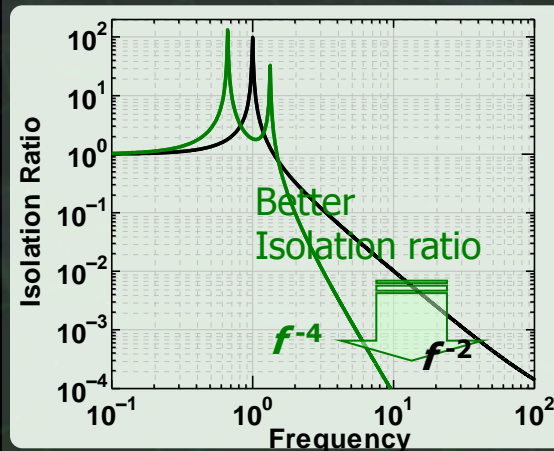
Reduce Q-value
→ improve stability



Degraded isolation

多段化

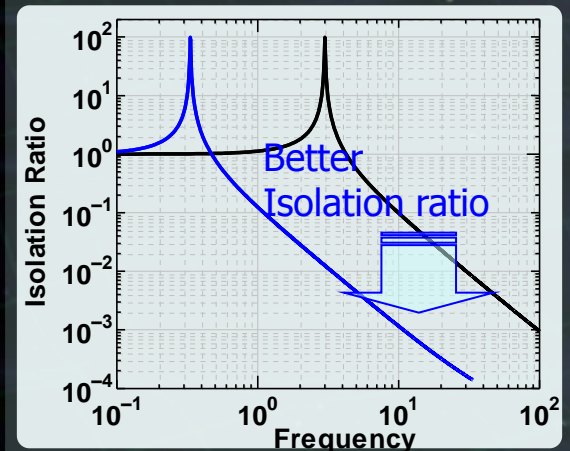
More steep reduction
→ Better isolation



Resonant peaks

低共振周波数化

Low-freq. cut-off
→ Better isolation



Drift by environment

⇒ これらの構成要素を組み合わせる。

振り子等の低共振周波数化

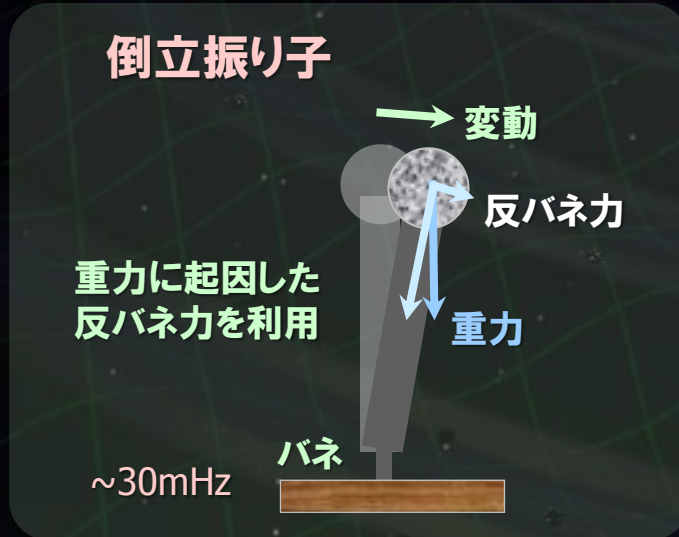
共振周波数：防振系の大きさに制限

⇒ 工夫が必要：反バネの利用
(変動を増加させる向きの方)

振り子 (横防振) $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$

バネ (縦防振) $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l_0}}$

およそ 1Hz → 25cm



柔らかい系になる → ドリフトに影響されやすくなる

防振装置の多段化

理想的な n 段振り子の防振比

$$\frac{x}{x_0} \sim \left(\frac{f_0}{f}\right)^{2n}$$

段数が多いほど急峻な防振特性
段数分の共振のピーク

多くの共振がカップルした複雑な応答



ダンピングにより安定動作.

応答が複雑になる

→ 制御系の設計に注意が必要.

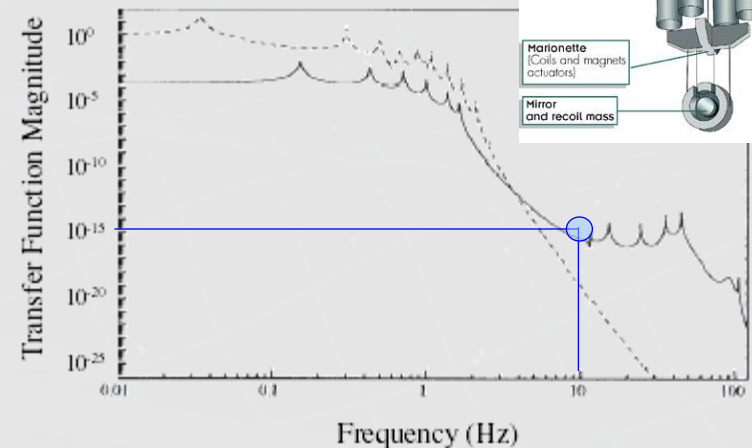
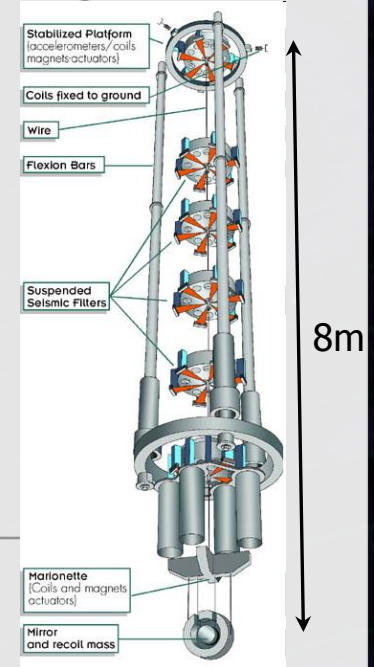
VIRGO (Super Attenuator)

高さ 8m

水平方向 9段
鉛直方向 6段

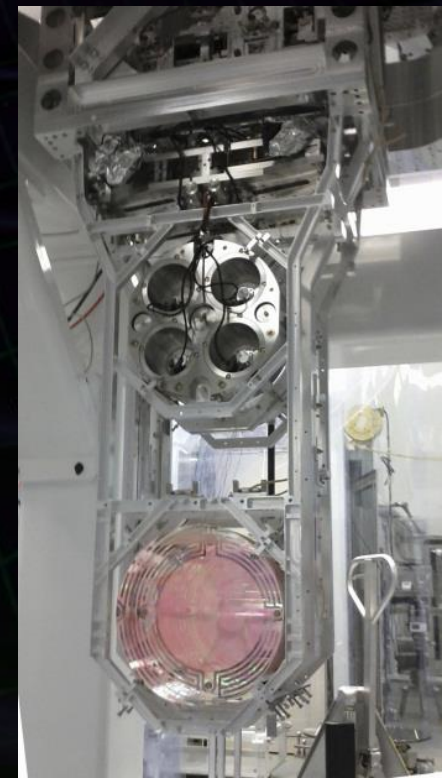
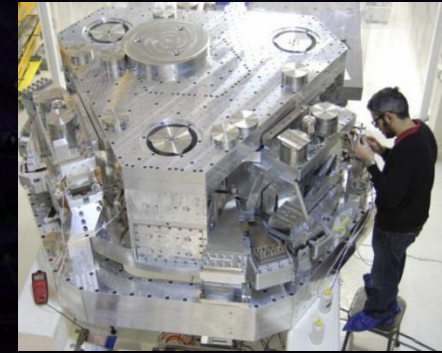
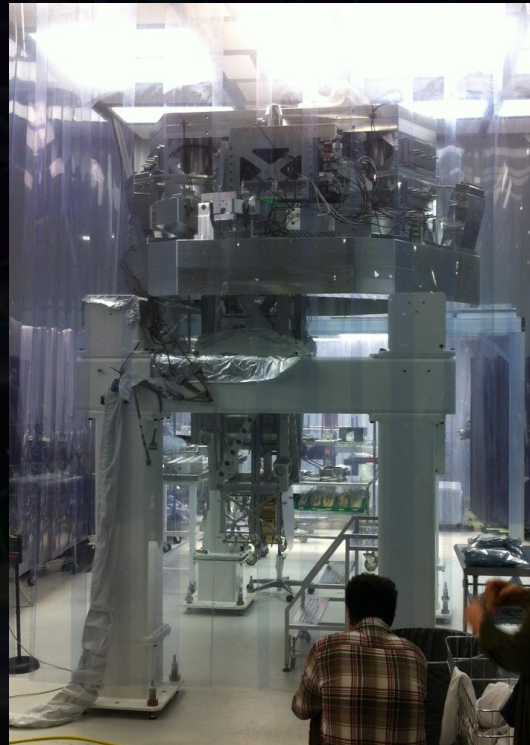
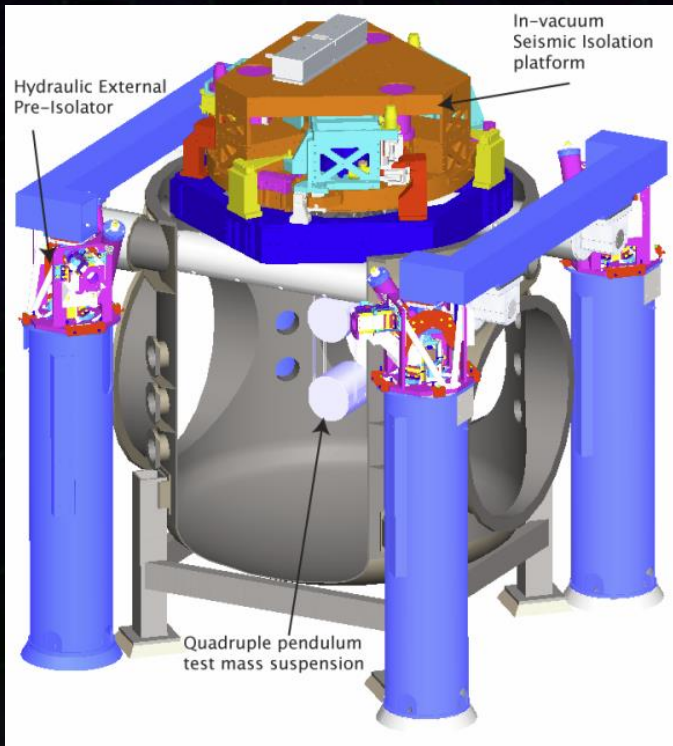
最上部でダンピング
鏡と鏡上部で位置制御

10Hzで15桁程度の防振



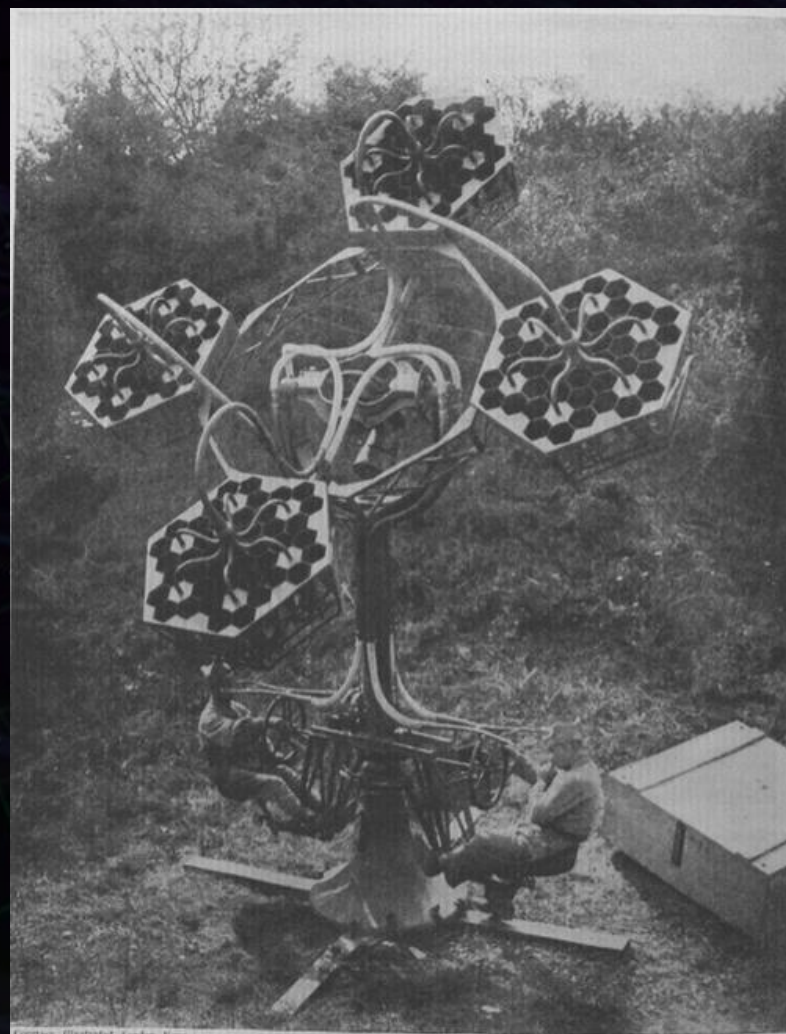
aLIGO鏡防振装置

- 能動・多段防振装置
- シリカファイバー振り子



遠くまで聴く!!!

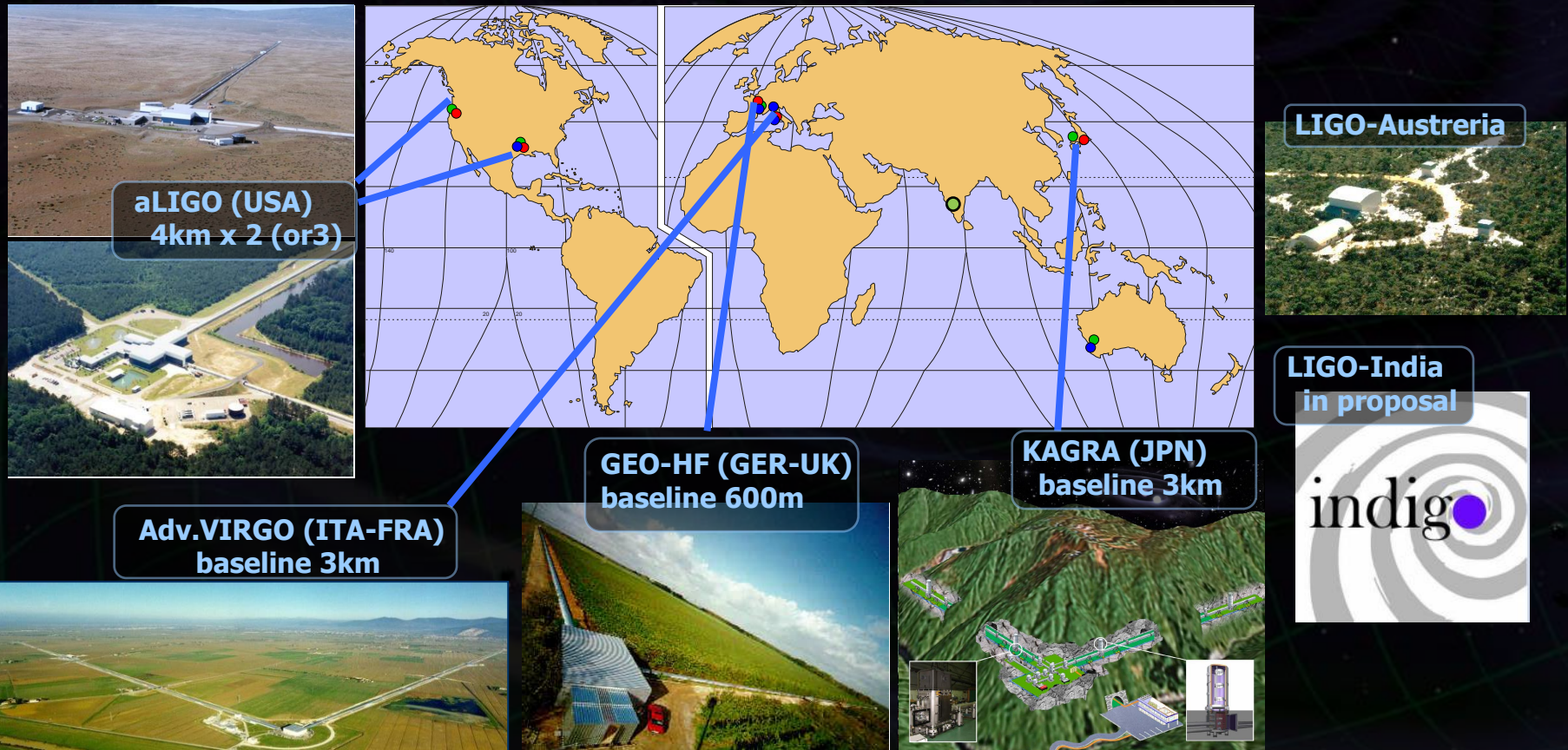
- 次世代の重力波望遠鏡 -



<http://noiseforairports.com/post/243891819/machines-to-enlarge-the-ears>

第2世代 重力波望遠鏡

より感度を向上させた第2世代の重力波望遠鏡
→ 国際観測ネットワークの形成.



地球上の重力波望遠鏡の感度を向上させる。

⇒ 10Hz – 1kHzの重力波イベントの観測を目指す。

高感度化→より多くの銀河をカバーする

(重力波の振幅) $\propto 1/(\text{波源までの距離})$



感度が10倍向上 → イベントレートは 10^3 倍

得られるサイエンス

Initial LIGO 1年間の観測

~ Advanced LIGO 9時間の観測

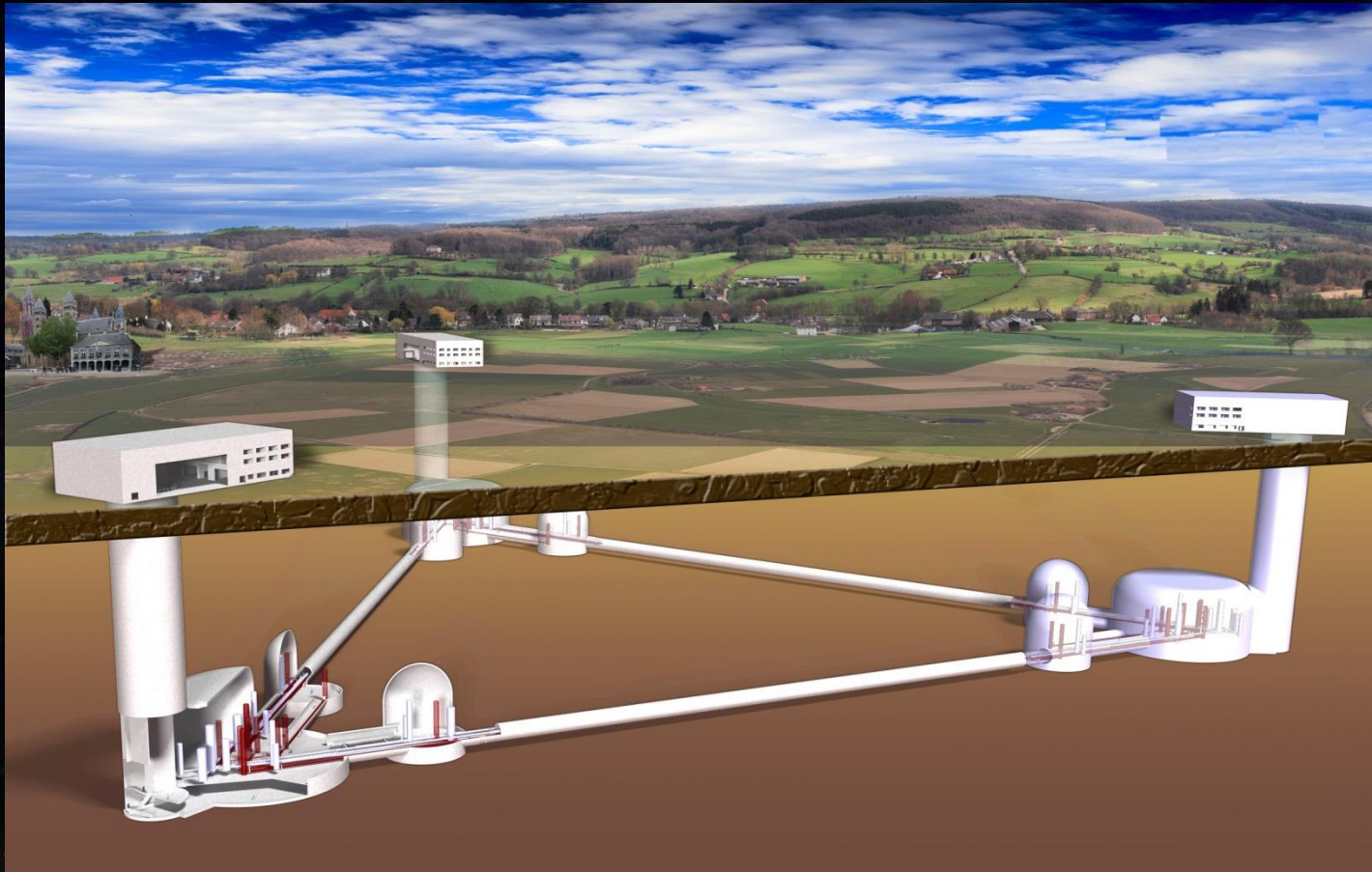


第2世代望遠鏡では、検出頻度 ~ 10 event/year

第3世代 重力波望遠鏡

3rd-generation detector : ET (Einstein Telescope)

感度：さらに一桁の改善, 2026年頃観測開始.
長基線長 ~10km, 地下サイトに建設, 低温干渉計



第2世代 重力波望遠鏡

David Shoemaker, LV meeting March 2011

•aLIGO

- 基線長 4km、施設・真空系: そのまま利用
- 光学系・防振系・制御系など: ほぼ取り換え
- スクイーミングのテスト実験
6dBのSqueezing → 感度向上を目指す.

インストール作業進行中

•Advanced VIRGO

- 基線長 3kmのまま, 干渉計構成変更(RSE).
- 光源の変更 → ファイバーレーザー.
- 鏡の熱補償, 出射光学系変更.

インストール作業進行中

LIGO Big News since we last met:
The start of Installation

- 20 October 2010: Handoff of Observatories to aLIGO
- A very significant transition for aLIGO
- Most chambers now empty
- First new parts going in now

21:43:45e
03/01/11

Y ARM
CAM-002 M

The slide contains two photographs: one showing a large cylindrical component being lowered into a chamber by a crane, and another showing a person in a cleanroom environment working on a large piece of equipment.

Advanced Virgo **ADVANCED VIRGO**

GIOVANNI LOSURDO - INFN Firenze
Advanced Virgo Project Leader

for the VIRGO Collaboration

VIR-0152A-11
LIGO-G1100311-v1

The slide features an aerial photograph of the Virgo interferometer facility, showing the long arms extending into the landscape.

G. Losurdo LV meeting March 2011

第2世代 重力波望遠鏡

Hartmut Grote, LV meeting March 2011

•GEO-HF: GEOのアップグレード

- 基線長 600m → 高周波数感度を向上.
- 高出力光源, スクイーミング
→ 最大3.5dBの効果確認.

AstroWatch進行中



•LIGO-India (LIGO-Austreria)

aLIGOの1台を移設 → 角度分解能を上げる.

- Established in August 2009 to coordinate the Indian GW community to participate in GW research!
- Funding received for a 3m prototype interferometer at the Tata Institute for Fundamental Research.

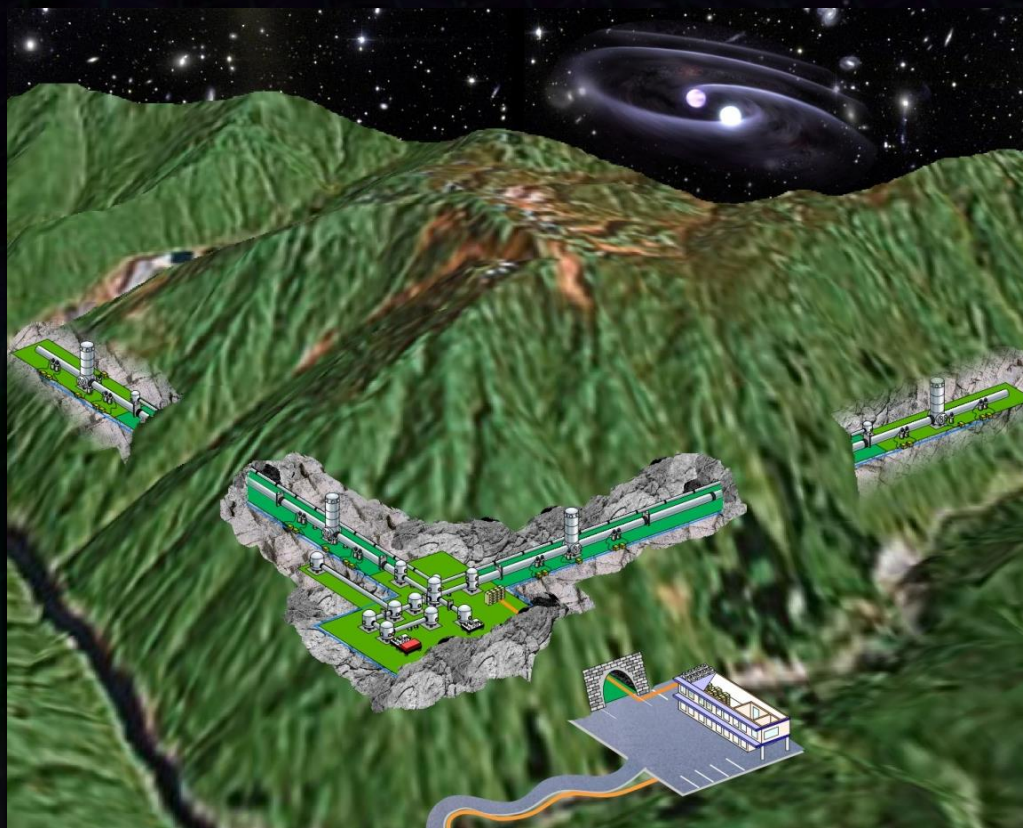


かぐら (KAGRA)

日本の次世代重力波検出器 (本格観測 2017年-)
海外の望遠鏡 (Ad. LIGOなど) と同等の感度



重力波天文学の創成



大規模な重力波天文台

- Baseline length: 3km
- High-power Interferometer

低温干渉計

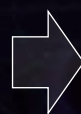
- Mirror temperature: 20K

地下の安定・静寂な環境

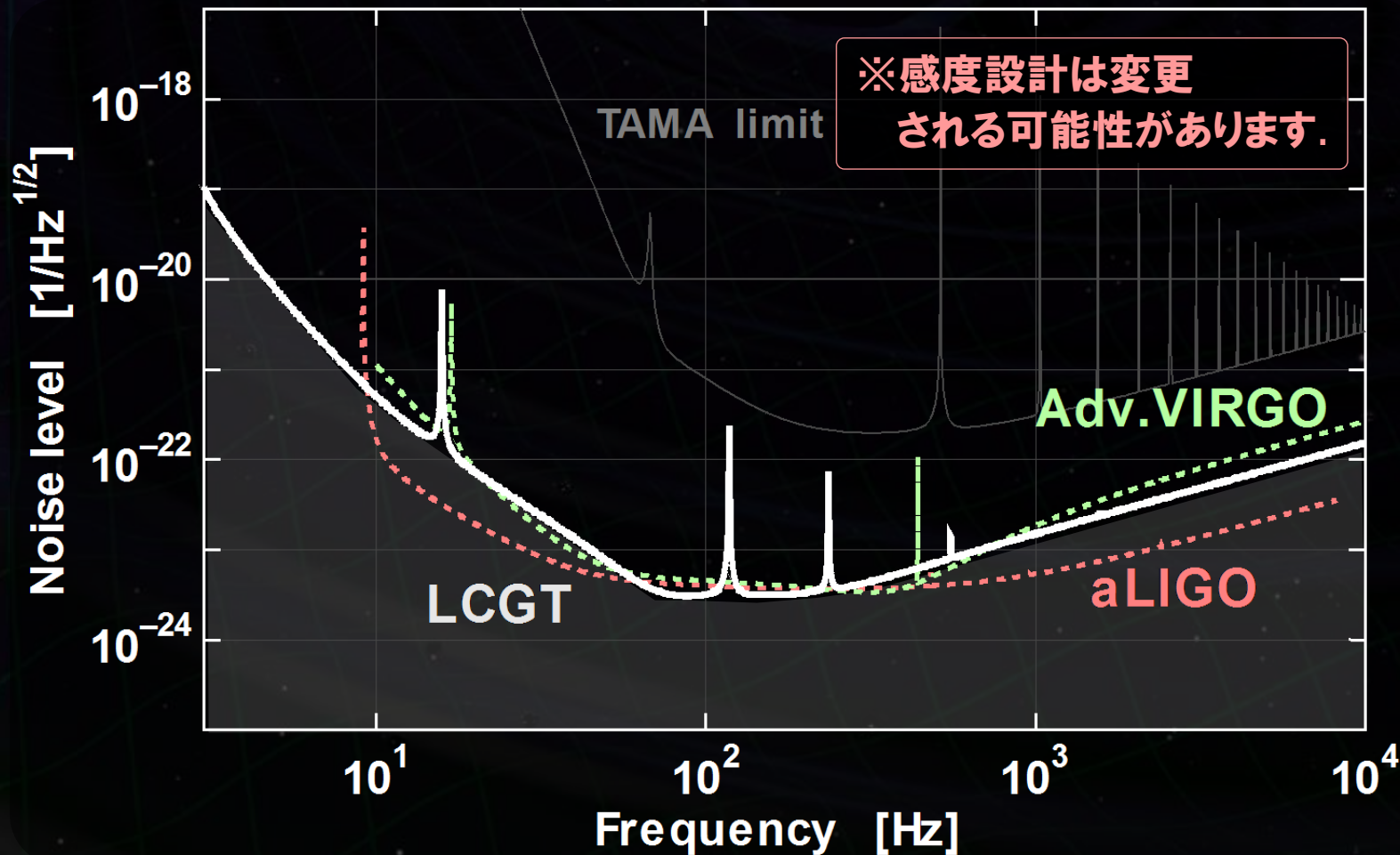
- Kamioka mine,
1000m underground

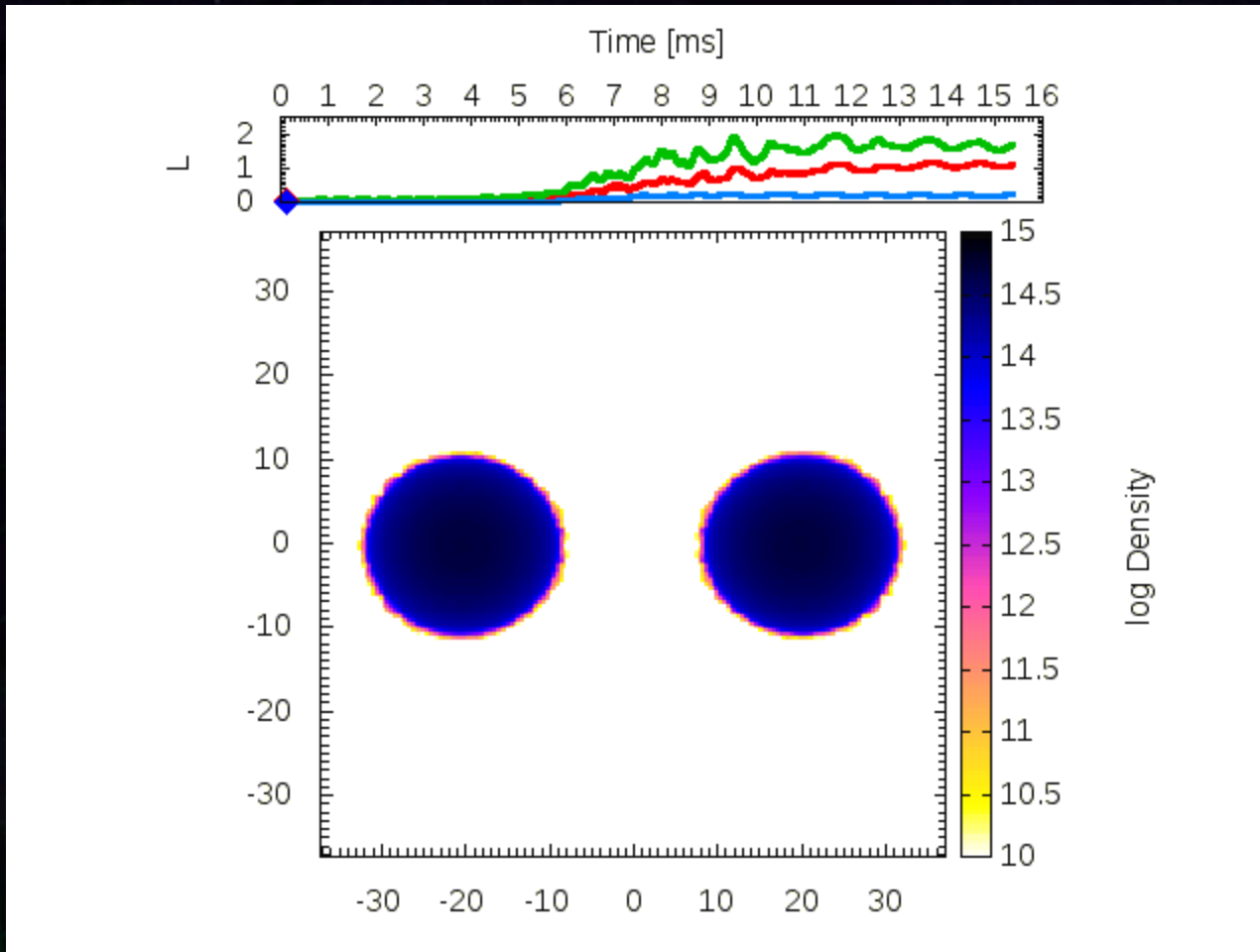
KAGRAの感度限界

主要な雑音源で決まる限界感度
aLIGO や Ad.VIRGOと同等



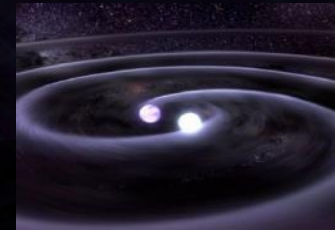
国際観測網を形成
年間1回以上の重力波信号検出





連星中性子星の合体数値シミュレーション by 関口氏

第一目標: 連星中性子星合体からの重力波の検出



観測レンジ

感度曲線 → 観測可能距離 270 Mpc (目安)

(SNR 8, 最適方向・偏波)

銀河の個数密度:

$$\rho = 1.2 \times 10^{-2} \text{ [Mpc}^{-3}\text{]}$$

R. K. Kopparapu et.al.,
ApJ. 675 1459 (2008)

銀河あたりのイベントレート:

$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} \text{ [events/Myr]}$$

V. Kalogera et.al.,
ApJ, 601 L179 (2004)



KAGRAの観測レート **9.8 events/yr**

(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

海外望遠鏡との比較

	2 nd -generation detectors		3 rd generation	
	aLIGO	Ad. VIRGO	KAGRA	ET
観測開始	~ 2016	~ 2016	~ 2017	~ 2026
サイト	地上 Hanford 2台 Livingstone 1台	地上 Pisa 1台	地下 Kamioka 1台	地下 3台
基線長	4 km	3 km	3 km	10 km
観測レンジ (*1)	306 Mpc	243 Mpc	273 Mpc (*2)	3 Gpc
干渉計方式	RSE広帯域	RSE狭帯域	RSE可変帯域	RSE Xylophone
熱雑音の低減	大ビーム径, 低機械損失鏡 熱レンズ効果の補正		低温化	低温化
防振系	能動防振系	受動防振系	受動防振系	受動防振系

(*1) 連星中性子性合体现象に対する観測可能距離, 最適方向, 最適偏波, SNR>8.

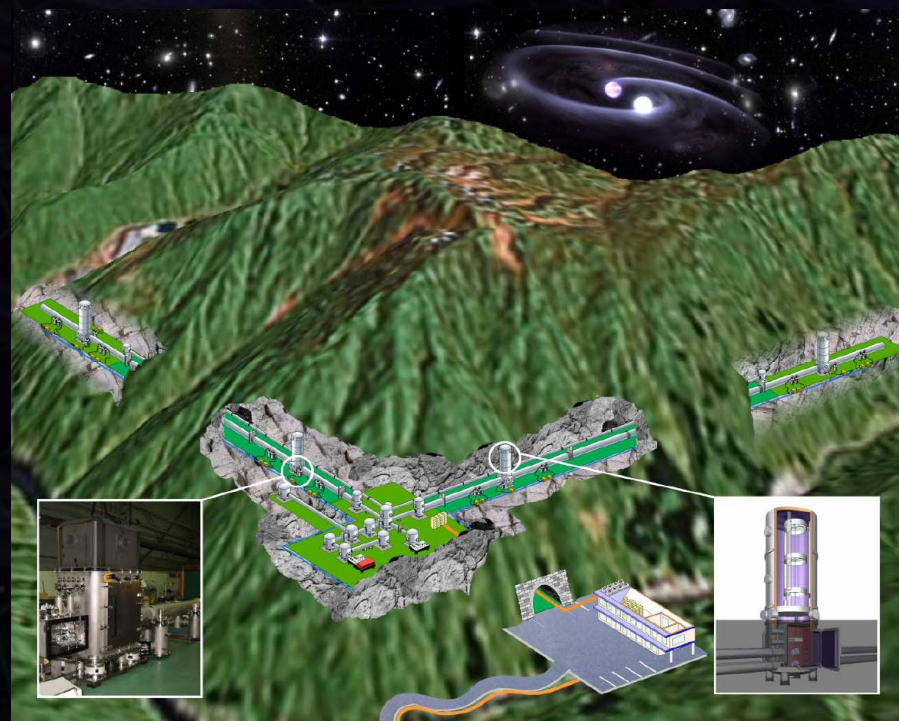
(*2) 現在、設計の更新作業が進められており, 変更の可能性がある.

地上重力波望遠鏡のロードマップ



KAGRA (かぐら)

- 大型低温重力波望遠鏡 -



•重力波の検出と重力波天文学の創生

- 1年間の観測で複数回の重力波信号の検出が期待できる。
→ 重力波天文学の幕開け, 相対性理論の検証.
- 国際観測網における重要な拠点
波形, 偏波などの情報 → 天体现象の情報.
波源の位置の特定 → 電磁波観測も含めた波源の理解.

•先進的な干渉計技術の実証

- KAGRAの特徴 : 低温干渉計, 地下サイトに設置.
→ 第3世代望遠鏡 (Einstein Telescope) に必須の技術.
⇒ KAGRAには、第2.5世代の望遠鏡としての役割もある.

・光の量子雑音 --- 干渉計における原理的な雑音

- **散射雑音** (Shot Noise)

光検出時の光子数計数誤差

$$h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

- **輻射圧雑音** (Radiation Pressure Noise)

鏡での反射時の光子反跳雑音

$$h_{\text{RPN}} \propto \sqrt{P}$$

[P : 干渉計入射光パワー]

標準量子限界 (Standard Quantum Limit)

$$h_{\text{SQL}} \propto \frac{1}{\sqrt{M L^2}} \left[\begin{array}{l} M : \text{鏡の質量} \\ L : \text{基線長} \end{array} \right]$$



長い干渉計基線長
大質量鏡

KAGRA : 大型・大光量干渉計

基線長 3km, 鏡質量 22kg, 干渉計内光パワー ~800kW

・熱雑音 --- 干渉計の原理的雑音

干渉計の構成コンポーネントに 機械損失 → 揺動力 (揺動散逸定理)

- 鏡の熱雑音 : 鏡基材, コーティング面などでの損失.
- 振り子の熱雑音 : 鏡の懸架ワイヤ等での損失.

熱雑音

$$\text{Thermal noise} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

T : 温度 [K]
 Q : 機械損失の逆数

温度を下げる
良い材質を選ぶ
低減する干渉計構成

KAGRA : 低温干渉計 → 熱雑音を低減するクリアな方法.

- 鏡 ~20K, 振り子 ~16K
- 付加的な効果 : 機械損失の低減, 熱レンズ効果の低減, パラメトリック不安定性の低減.

・地面振動 --- 地上干渉計の低周波観測帯域と安定度を制限

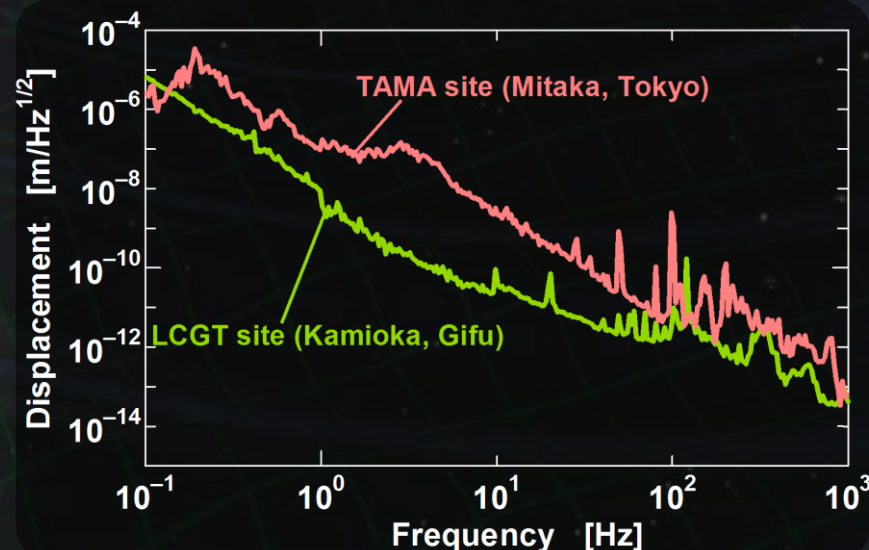
- **常微動** : 準定常的な変動. 干渉計の観測帯域を制限.
- **非定常変動** : 地震, 気象変動, 人工的な励起など.
干渉計の安定度, 観測のデューティサイクルに影響.

地面振動レベル

- 地下サイトでは2-3桁小さい
- 高周波数で低減.

$$\delta x_{\text{seis}} \sim \frac{10^{-9}}{f^2} \text{ [m/sqrtHz]}$$

(神岡サイトでの値, f : 周波数,)



KAGRA : **地下サイトに建設** → 2-3桁小さい常微動, 長期安定な環境.

高性能防振装置 SAS : 多段・低周波の防振装置.

基線長3kmの低温干渉計

2017年頃本格的な観測開始 → 重力波天文学の創成.



・ホスト機関：

東京大学 宇宙線研究所

・副ホスト機関：

国立天文台

高エネルギー加速器研究機構

・国内外の研究機関

東京大, 大阪市大, 東工大,
大阪大, 京都大, 産業技術総
合研究所, 情報通信研究機構,
電気通信大, 山梨英和大 など.

岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

Facility of the Institute of Cosmic-Ray Research (ICRR), Univ. of Tokyo.



Neutrino

Super Kamiokande, Kamland

Dark matter

XMASS

Gravitational wave

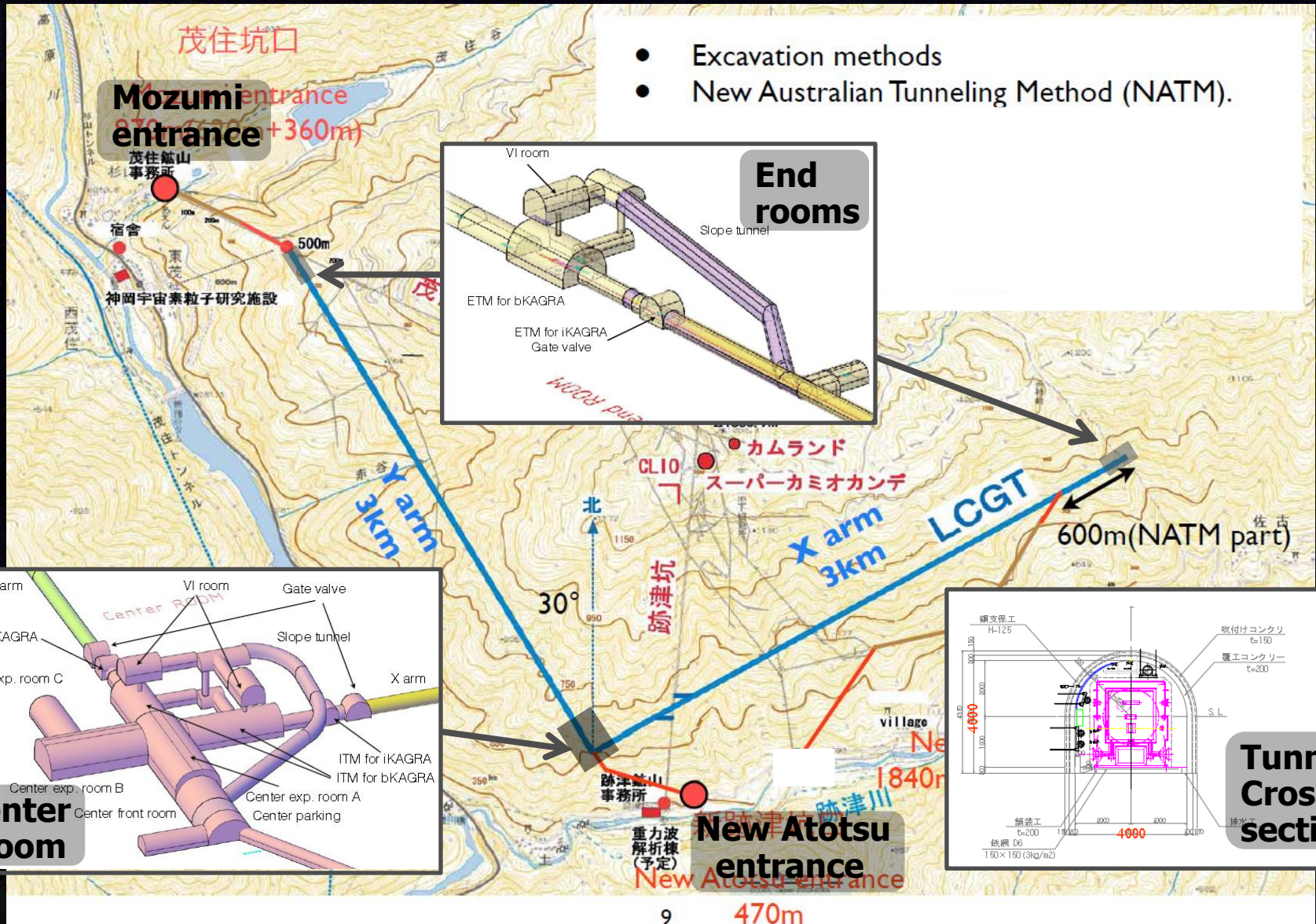
CLIO, **KAGRA**

Geophysics

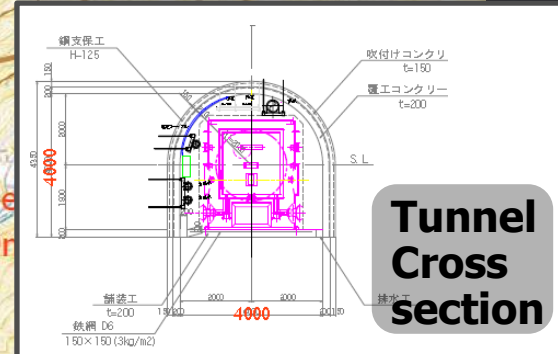
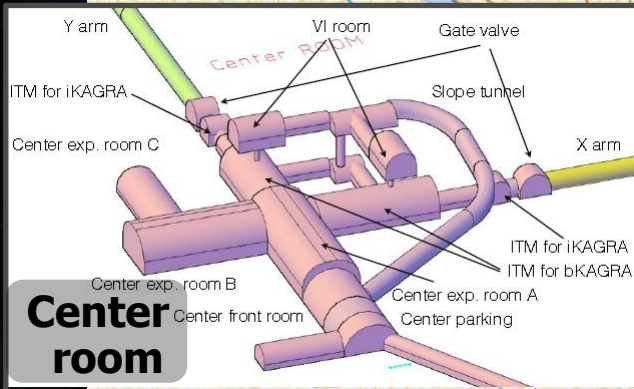
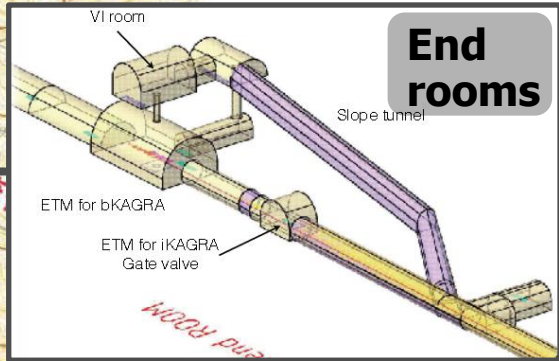
Strain meter

- 220km away from Tokyo
- 1000m underground from the top of the mountain. (Near Super Kamiokande)
- 360m altitude
- Hard rock of Hida gneiss (5 [km/sec] sound speed)

KAGRAトンネル設計



- Excavation methods
- New Australian Tunneling Method (NATM).

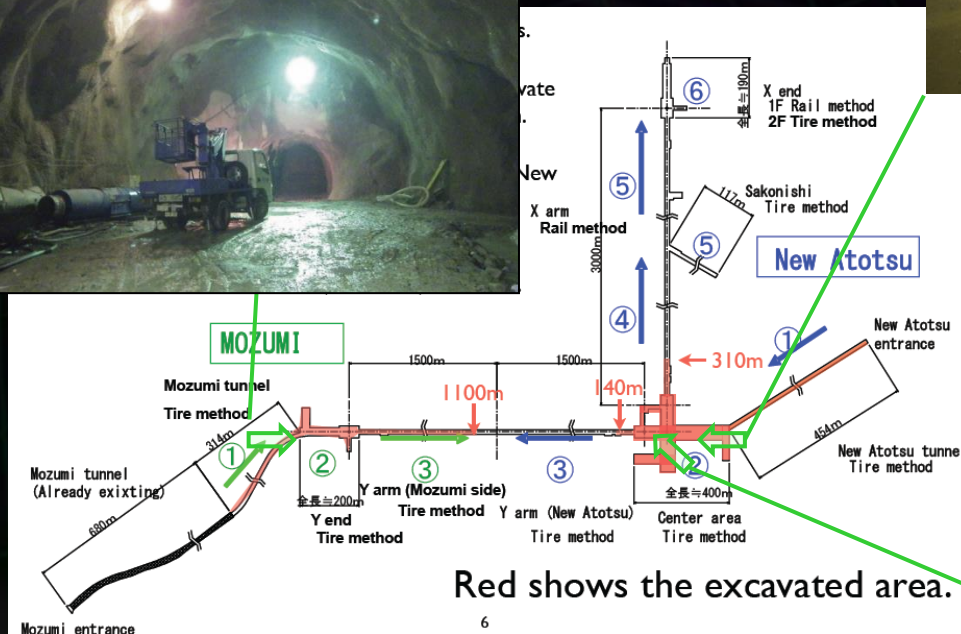


9 470m

茂住口: Y腕トンネル



新跡津口:センタールーム



現地の研究拠点

地元の協力により北部会館(公民館)の一部(140m²)を無償貸与。
→ 改築して、研究拠点(研究室4室, 実験室2室)として使用予定。



2012年8月29日 内覧会
地元の方々(茂住地区住民、
飛騨市役所、飛騨市議会等)を招待。



真空ダクトの製作・現地納品

3km x 2本の真空ダクト

12m, $\Phi 800\text{mm}$ を478本接続. → 納品済.



Press to form a duct



Bellows for each duct



Presentation
By Y.Saito (KEK)



Baking at MIRAPRO Co.
Noda/MESCO, Kamioka



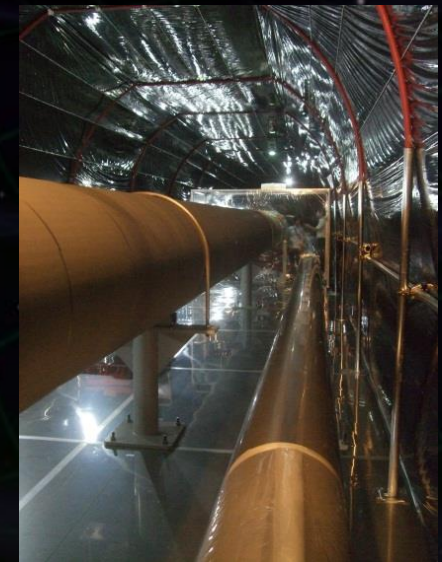
Test at MIRAPRO Co. Noda



Transportation to Kamioka

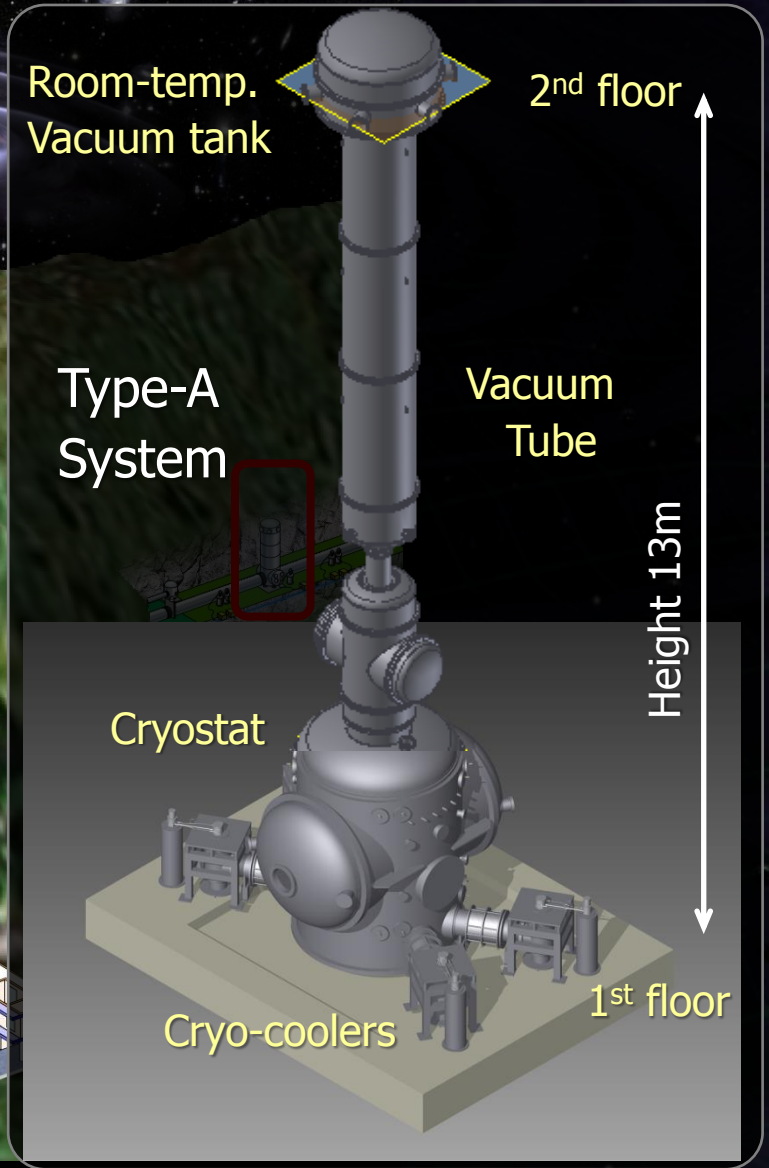
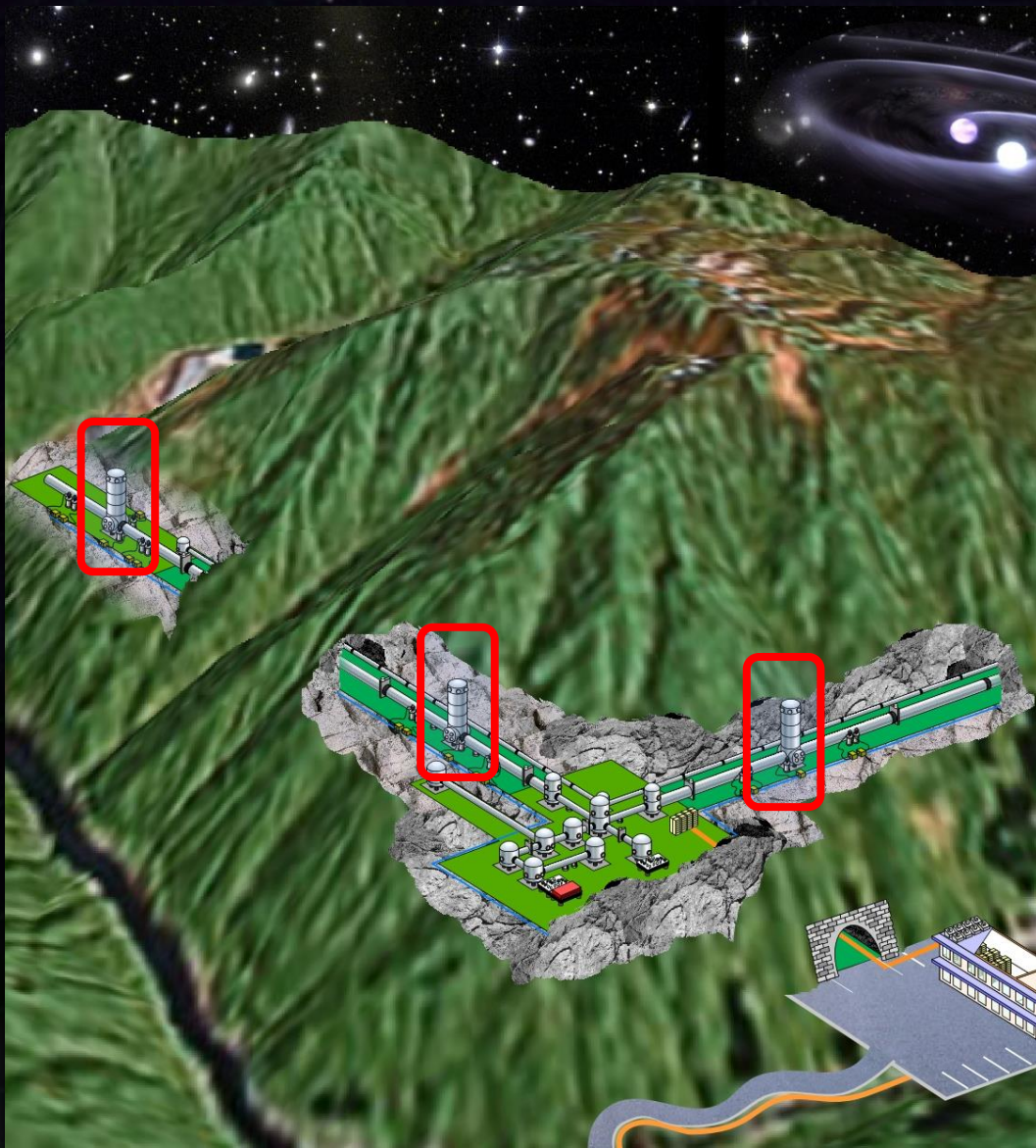
KAGRA模擬トンネル・ビームライン設置試験場

(ミラプロ・野田工場)

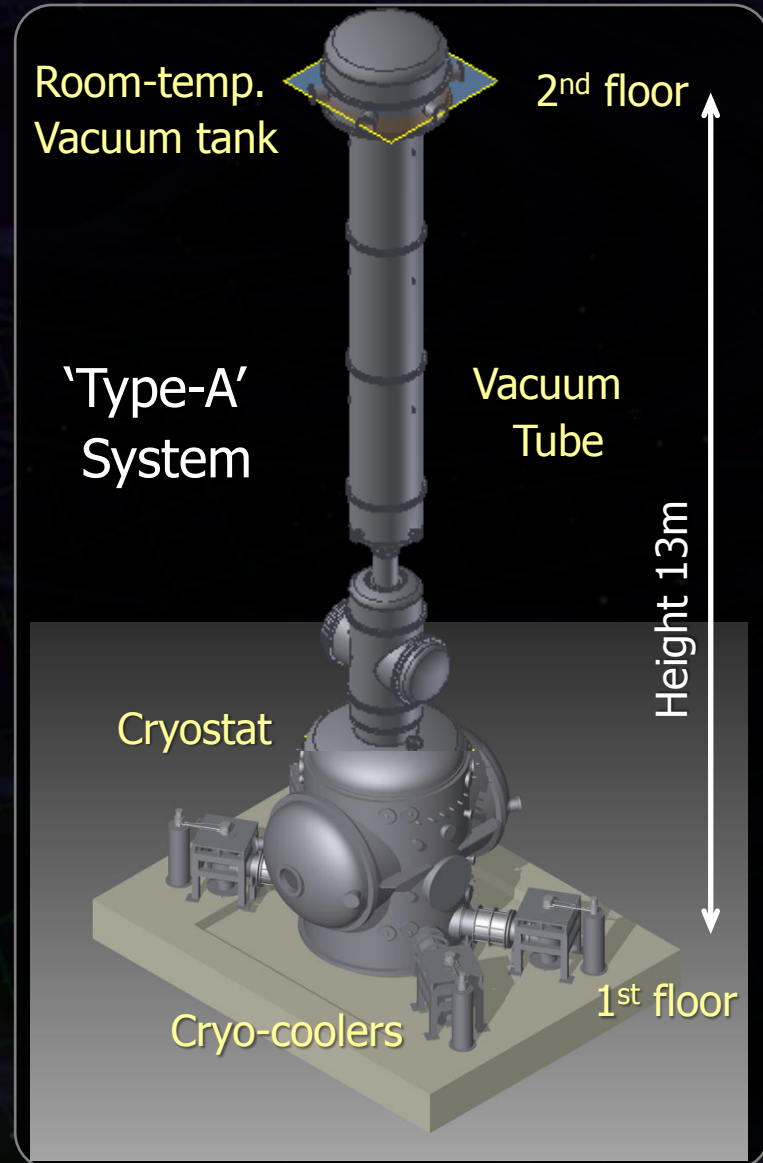
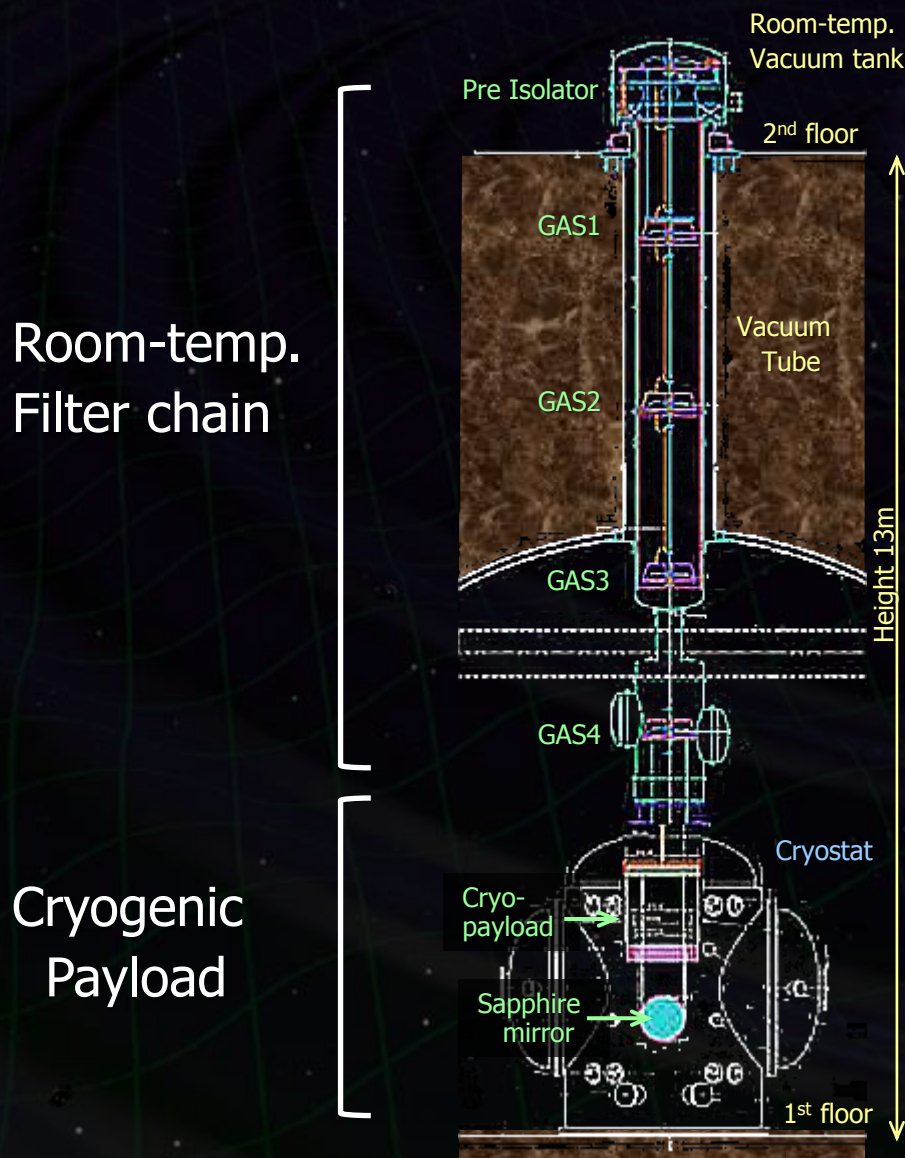


June 28, 2012, Photo by Kamiizumi and Iwasaki (ICRR)

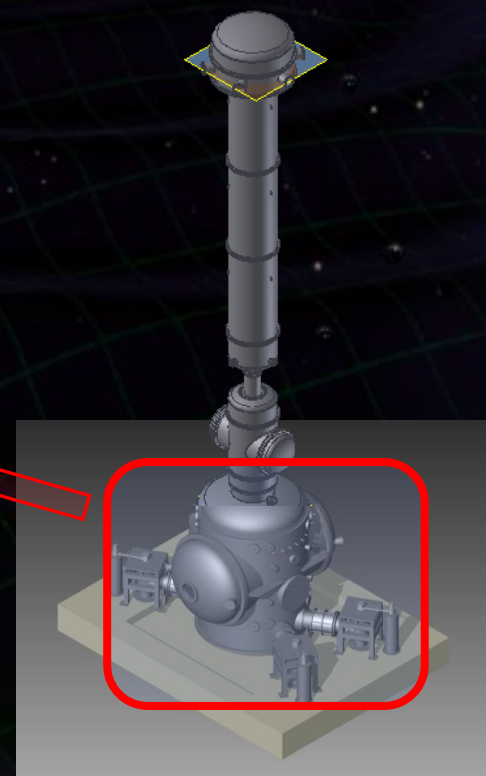
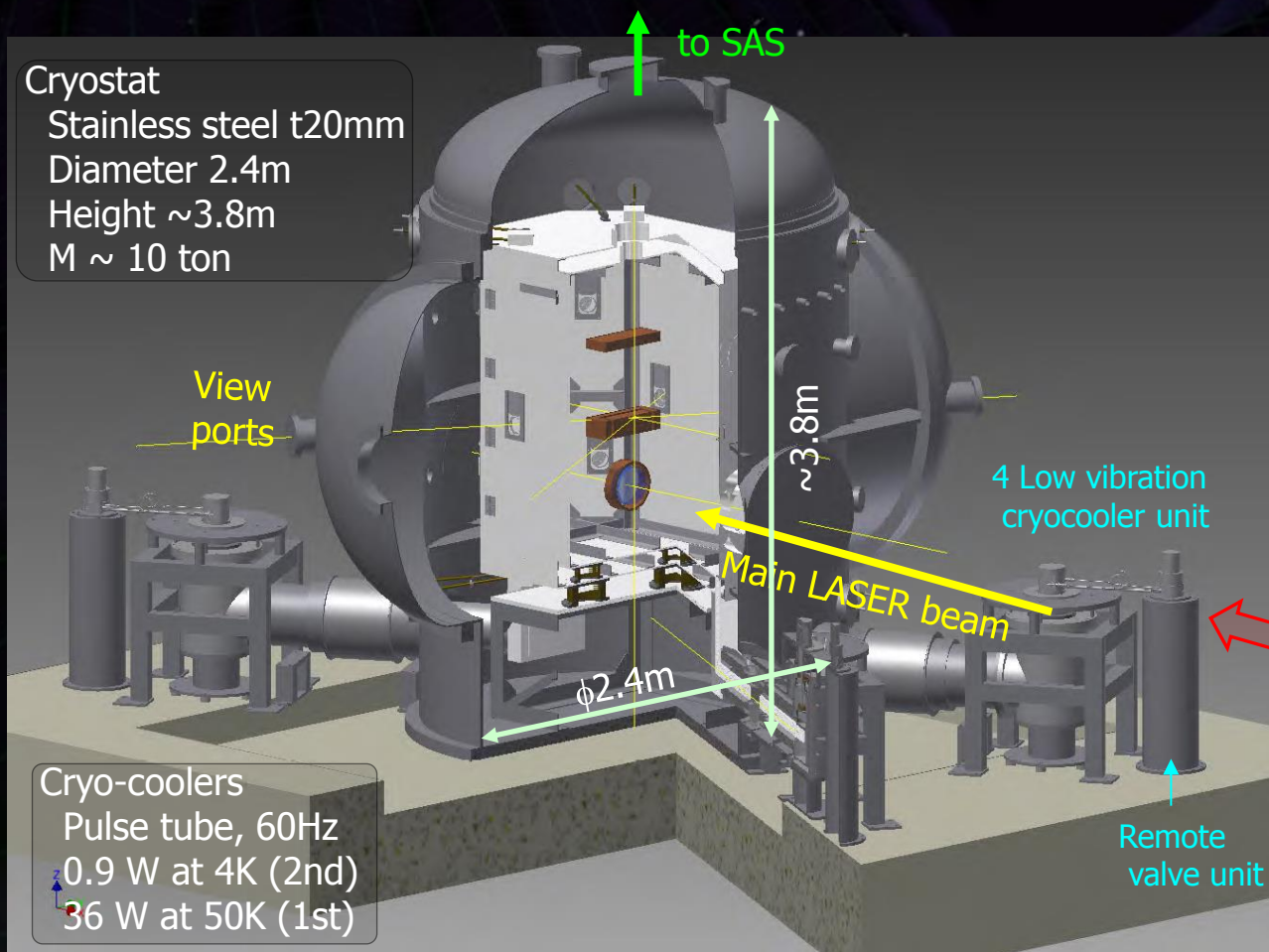
低温鏡 懸架・防振装置



低温鏡 懸架・防振装置



- 4 Cryostats and 9 cryo-coolers in FY2012.



クライオスタットの製作

クライオスタット用真空槽 (4台) 完成

→ ラディエーションシールドのインストール

冷凍機ユニット接続 → 冷却試験.



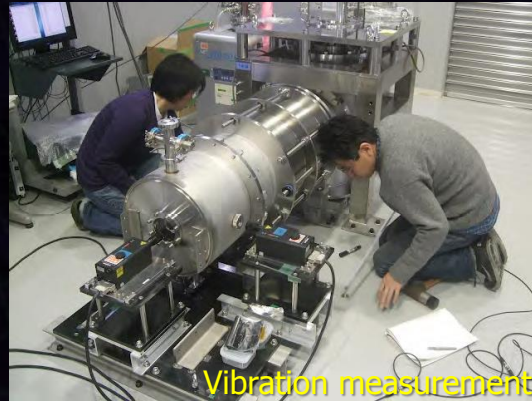
Inside the Rad. Shield



低振動冷凍機ユニット



Cryo-cooler units
at ICRR (Kashiwa)

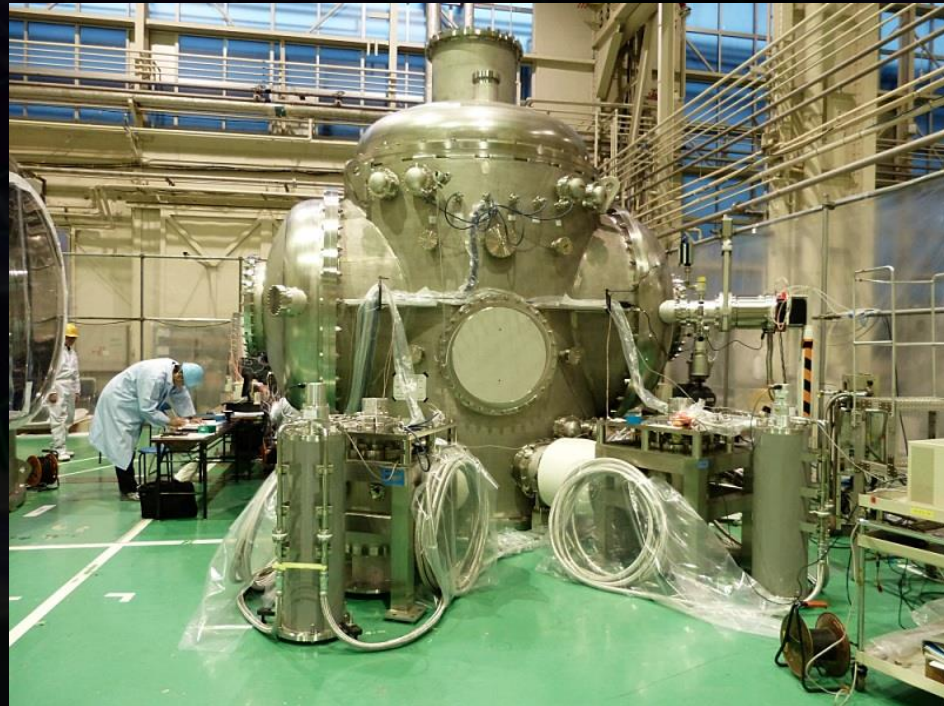


Vibration measurement



Storage at
ICRR (Akeno)

Cooling Test
(2013.2.5 Toshiba Kehin Factory)

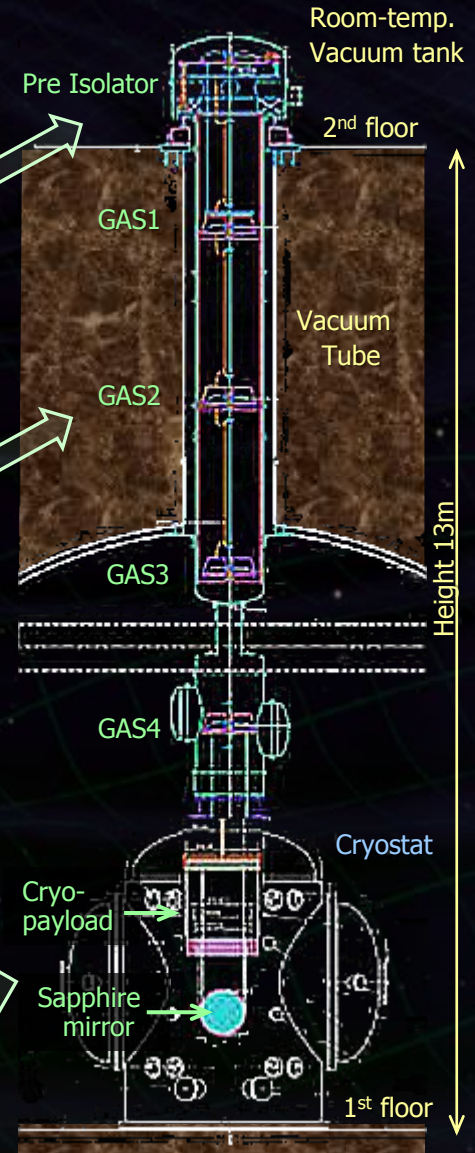
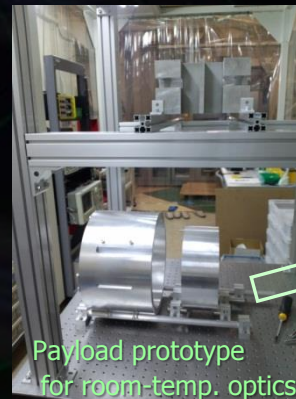
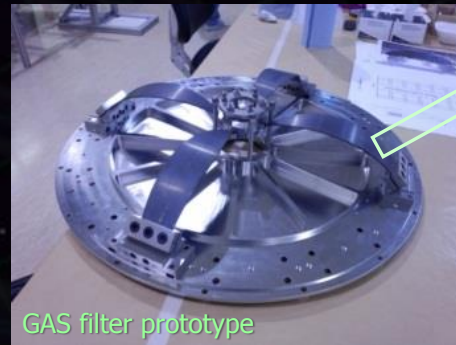


試験マス防振系

- TAMA300に導入された TAMA-SASをもとに設計。
→ シミュレーションにより防振性能・低周波安定性など評価.

- 構成要素のプロトタイプ試験進行中.

- Pre-isolator (ICRR)
- 常温ペイロード (NAOJ)



Pre-isolator試験



GASフィルター



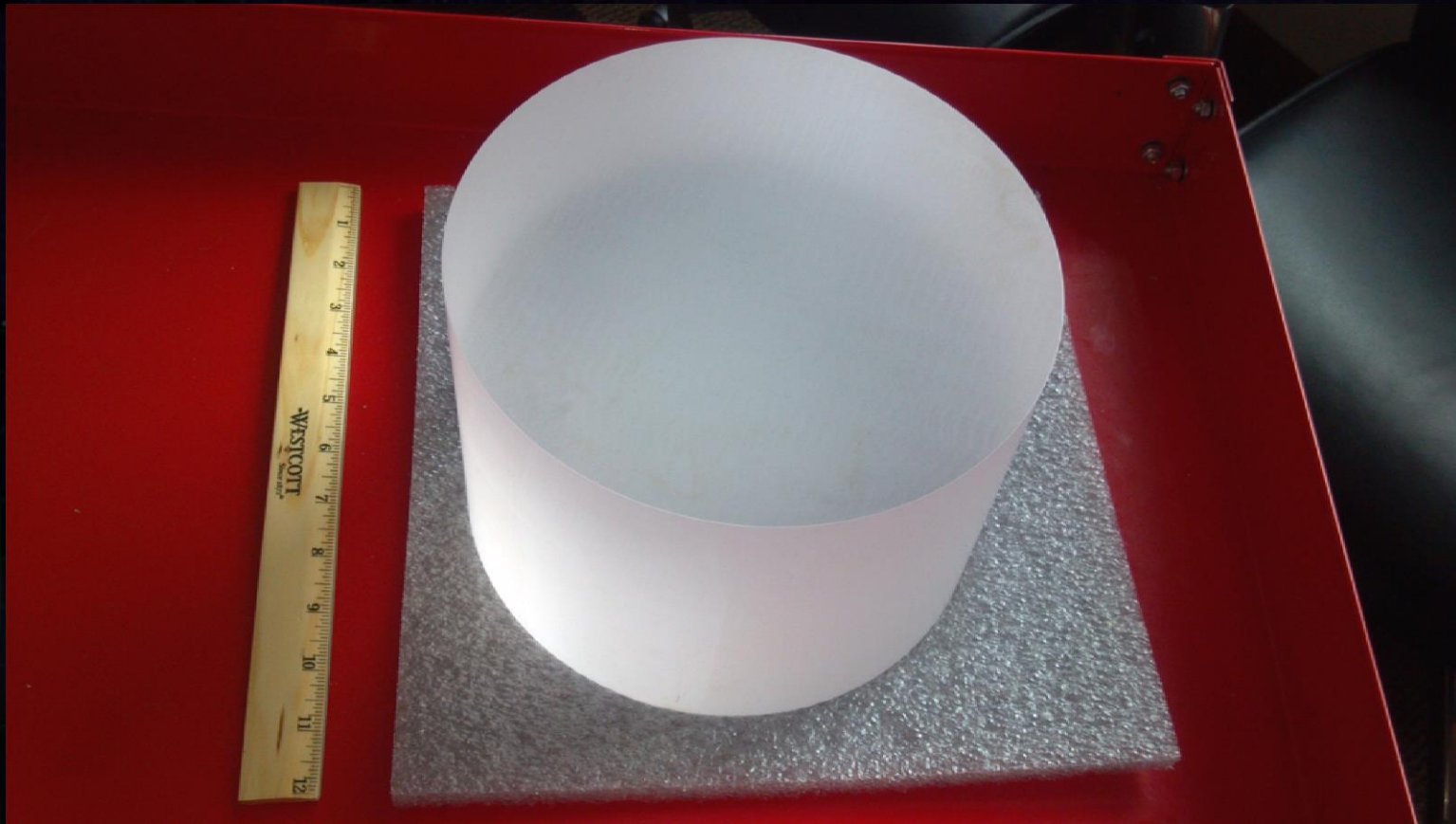
上段マス



架台支柱試験品



ペイロードプロトタイプ



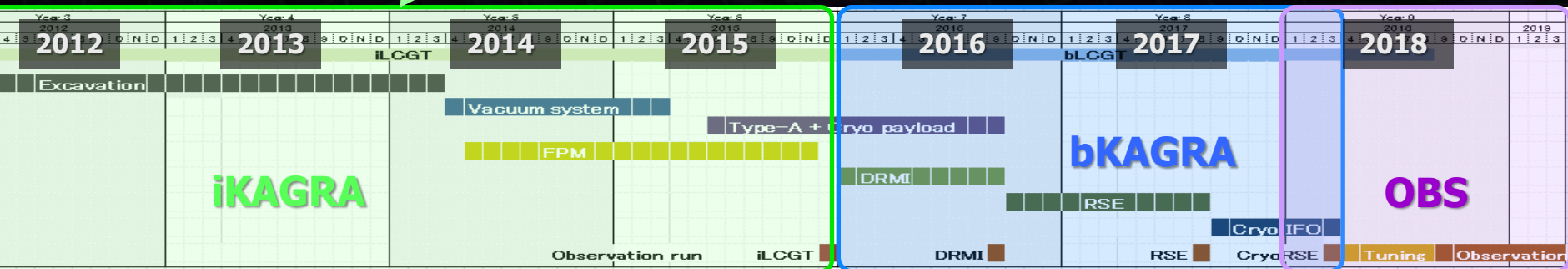
2 Sapphire substrates were delivered
($\Phi 220\text{mm}$, t 150mm, c-axis)

KAGRAスケジュール

• **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

3-km FPM interferometer

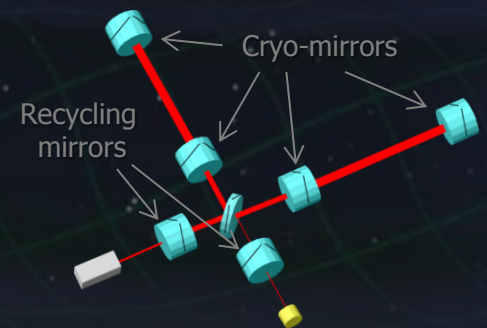
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



• **bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

Operation with full config.

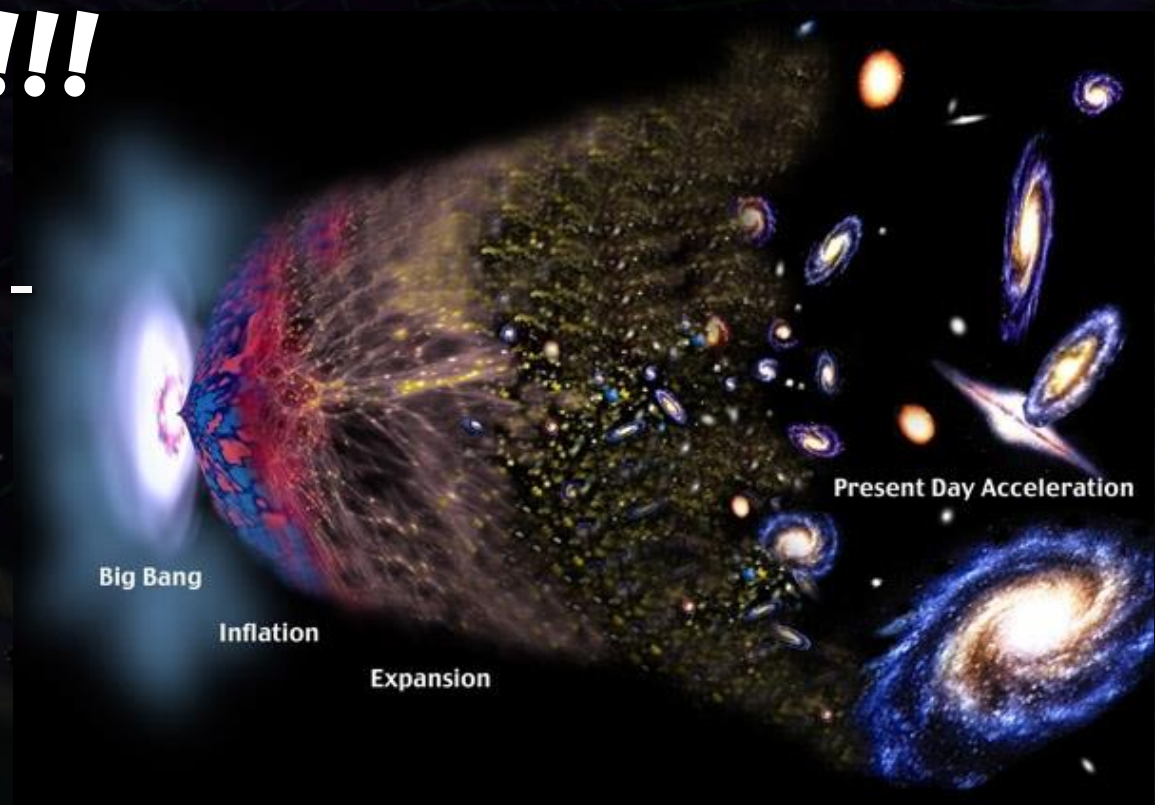
- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.



http://www.redorbit.com/news/space/1343180/gravity_wave_big_bang_theory_fizzles/

広い周波数帯!!!

- 宇宙重力波望遠鏡 -



宇宙重力波望遠鏡の意義.

- 地球に起因する雑音がない.
地面振動, 重力勾配場雑音.
- より長い基線長.
(観測周波数帯) $\propto 1$ / (光の滞在時間) $\propto 1$ / (基線長)

変位雑音の影響を相対的に抑えることができる.

$$(\text{歪み感度}) \sim (\text{変位雑音}) / (\text{基線長})$$

宇宙重力波望遠鏡が困難な点.

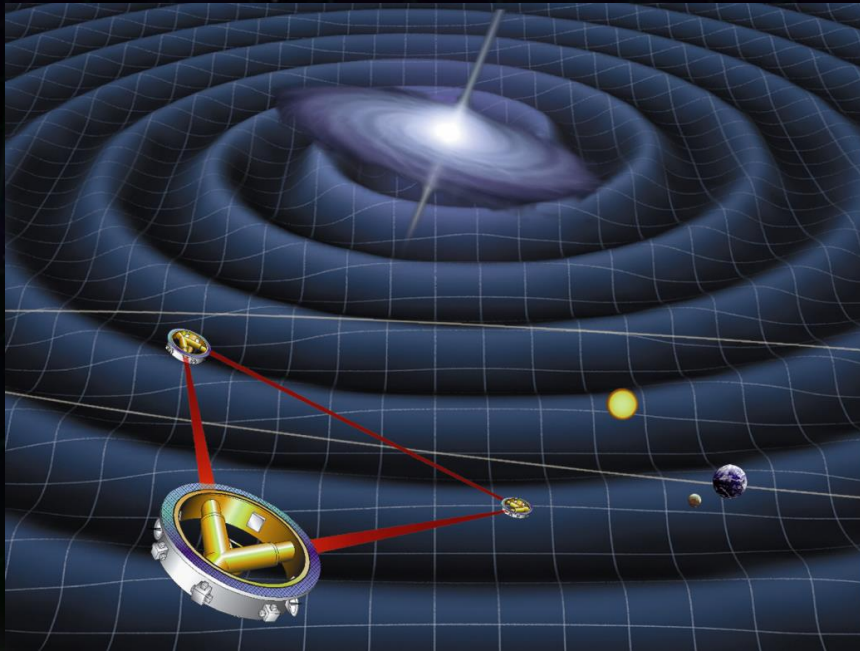
- コスト, 開発期間.
- 打ち上げ後の改良、修理.

宇宙重力波望遠鏡計画

LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

Obs. band around 1mHz

~Million km baseline length

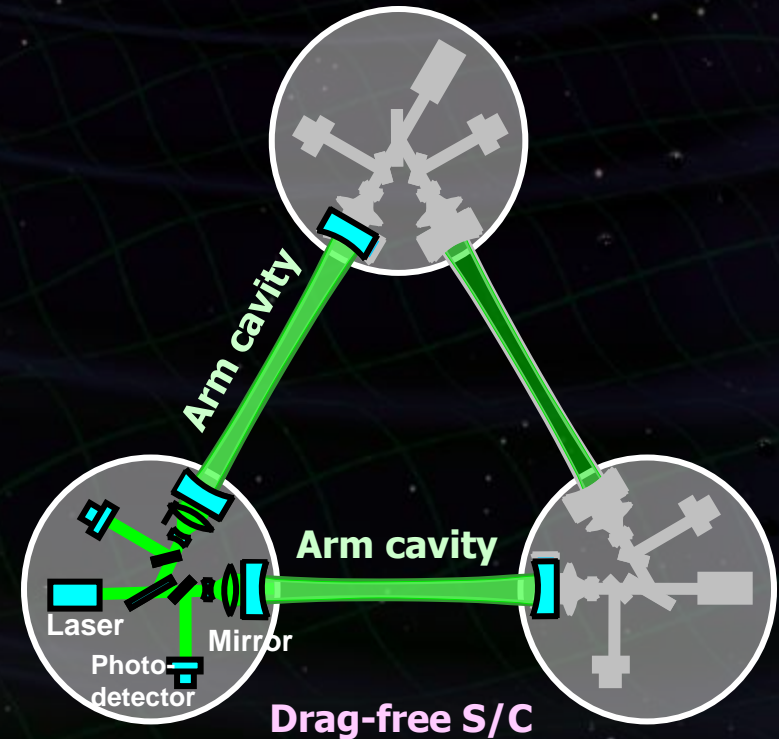


DECIGO

(Deci-hertz Interferometer
Gravitational Wave Observatory)

Obs. Band around 0.1Hz

1000km baseline length



光トランスポンダ構成

Long baseline (~ 1 million km) \rightarrow power loss by diffraction

Each S/C has laser source \rightarrow Phase-lock to incoming beam

LISA web page : <http://sci.esa.int/lisa>

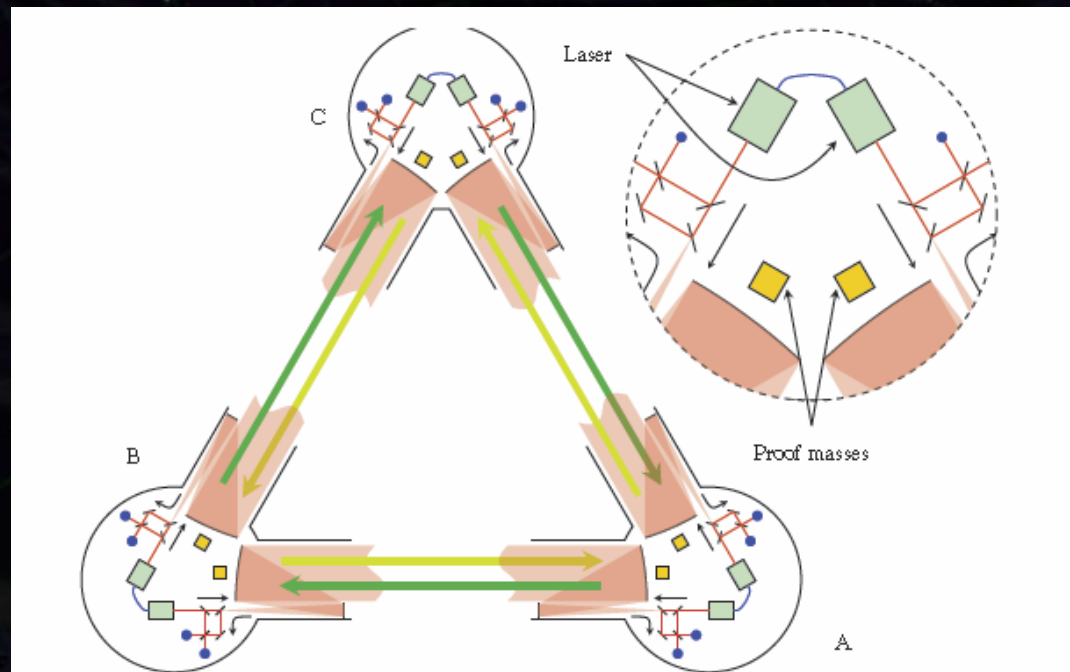
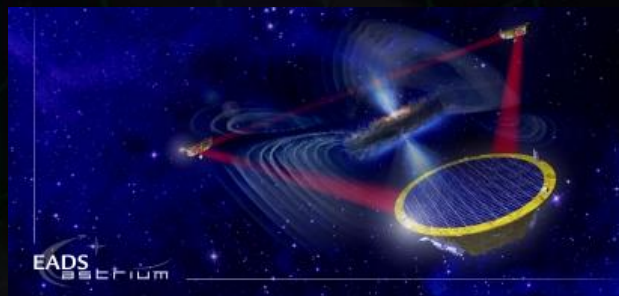
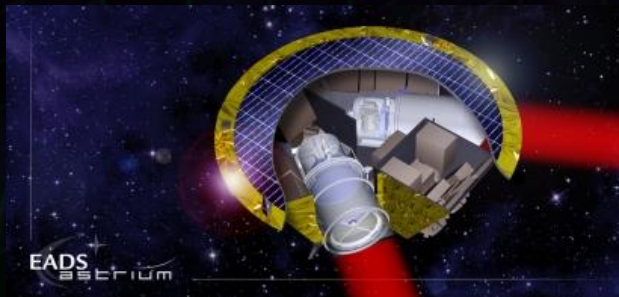


Figure 3.2.: A constellation of three identical LISA spacecraft constitutes the science instrument. There are six identical, send/receive laser ranging terminals (two per S/C) with associated test masses and a comparison of signals at each apex. The sketch leaves out the test mass interferometers for clarity.

LISA assessment study report (Yellow Book), ESA/SRE (2011) 3, February 2011

LISA Pathfinder

- Technical test for LISA
 - Obtain the best geodesic motion possible
 - Differential acceleration of the two TMs
 - $3 \times 10^{-14} \text{ m s}^{-2}$ at 1 mHz
 - Determine best configuration by experiments
 - Develop a noise model of the system
 - Allows the projection of the performance of technologies to LISA
- Status
 - Most of the hardware is there.
 - Awaiting thrusters and launch lock.
 - Most of the experiments are already defined.
- Launch in 2014/15



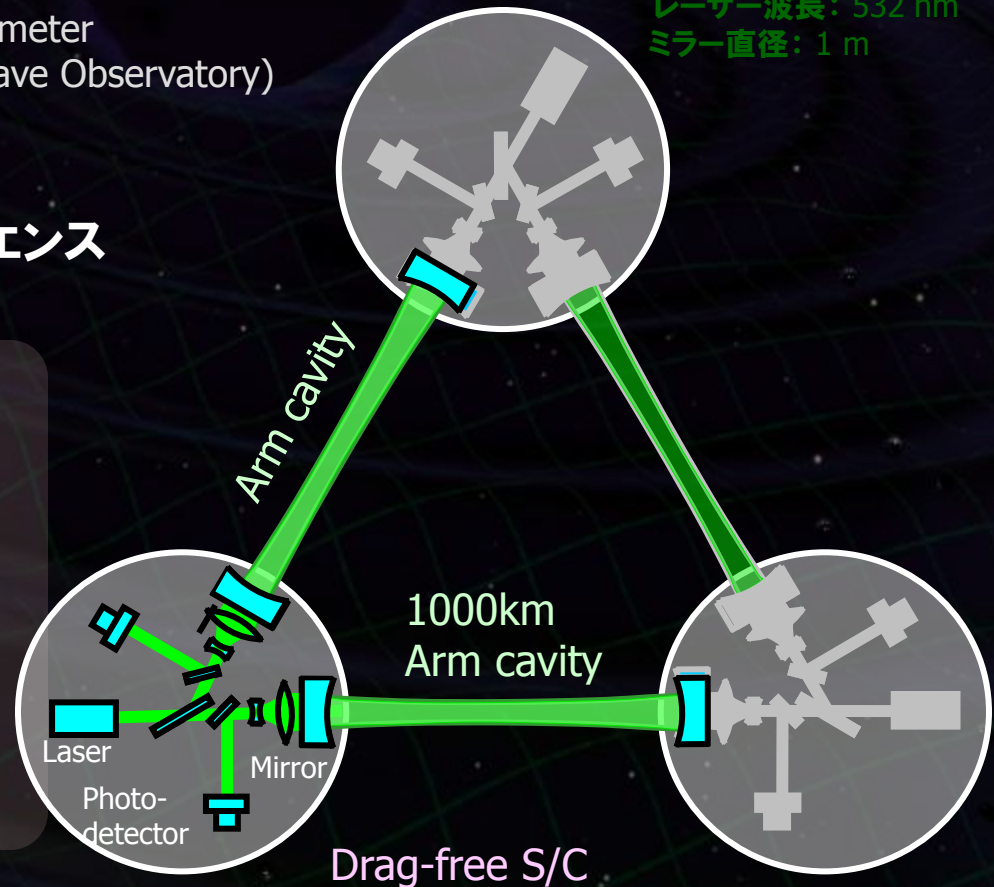
M Hewitson for the LPF team, AMALDI, July 15th 2011

光共振型マイケルソン干渉計
アーム長: 1000 km
レーザーパワー: 10 W
レーザー波長: 532 nm
ミラー直径: 1 m

DECIGO (DECI-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

宇宙重力波望遠鏡 (~2027)
→ 他では得られない豊富なサイエンス

宇宙の成り立ちに関する知見
インフレーションの直接観測
ダークエネルギーの性質
ダークマターの探査
銀河形成に関する知見
ブラックホール連星の観測
宇宙の基本法則に関する知見



互いに1000km離れた3機のS/C
非接触保持された鏡間距離を
レーザー干渉計によって精密測距

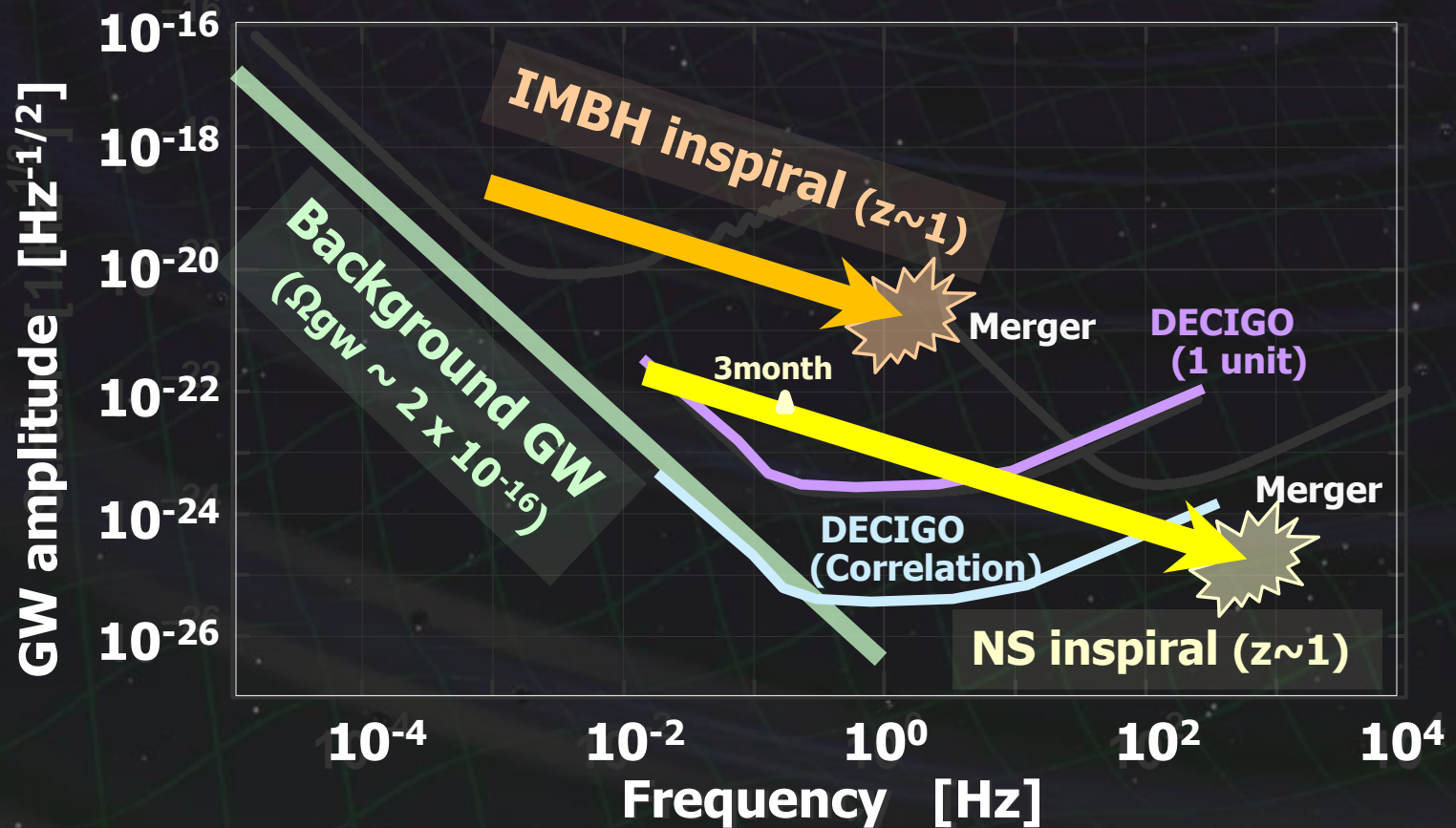
太陽公転軌道
最大4ユニットで相関をとる

DECIGOの観測対象

中間質量BH 連星の合体
中性子星 連星の合体
宇宙背景重力波



宇宙の成り立ちと進化
銀河・超巨大BHの形成



初期宇宙の観測



Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

DECIGOのロードマップ

Figure: S.Kawamura



DECIGOパスファインダー (DPF)

将来の宇宙重力波望遠鏡のための前哨衛星

小型衛星 1 機 (重量 400kg)

地球周回軌道 (高度 500km)

非接触保持された試験マスの変動を
レーザー干渉計を用いて精密計測



宇宙・地球の観測

→ 銀河の成り立ち, 地球環境モニタ

先端科学技術の確立

→ 宇宙・無重力環境利用の新しい可能性

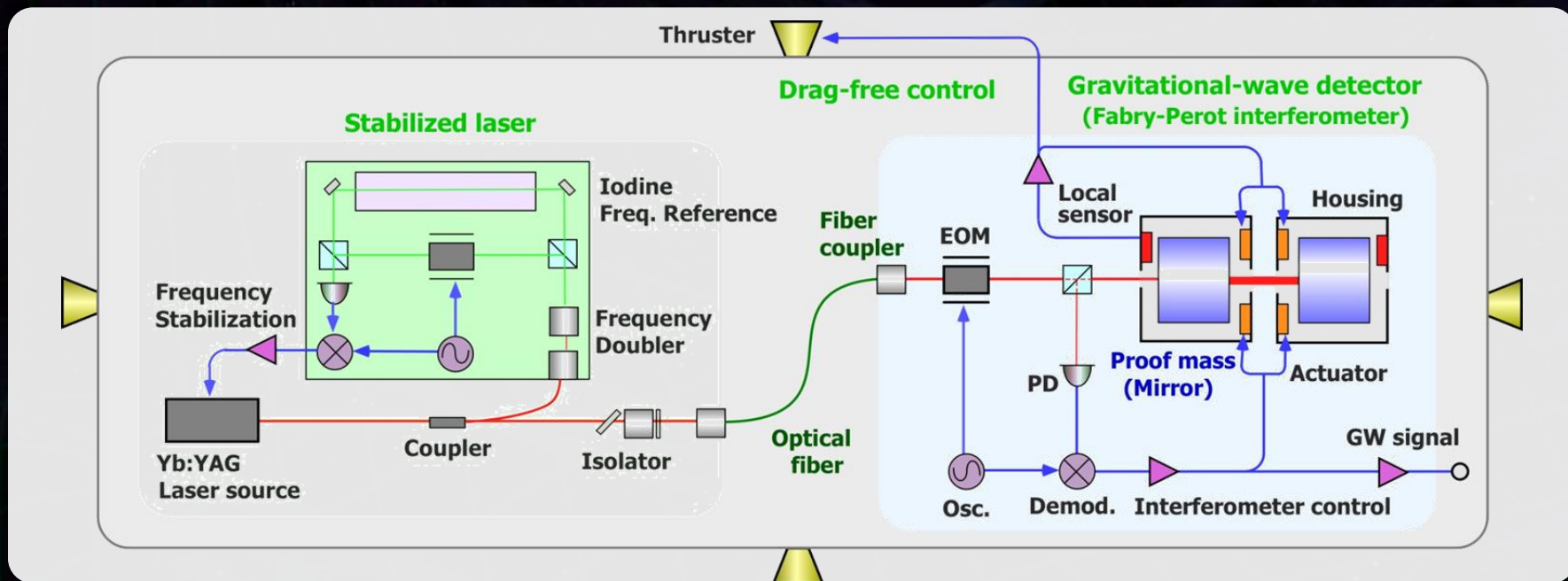
小型科学衛星3号機 としての実現を目指す

Earth Image: ESA

DPFミッション機器構成

ミッション機器重量 : ~200kg
ミッション機器空間 : 95 cm立方

ドラッグフリー
ローカルセンサで相対変動検出
→ スラスタにフィードバック



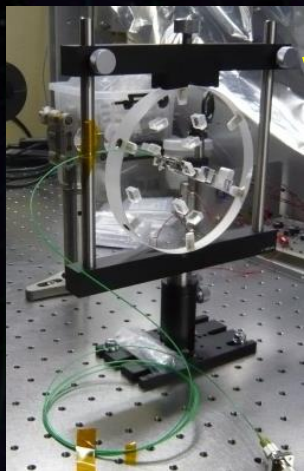
安定化レーザー光源
Yb:YAGレーザー
出力 25mW
ヨウ素飽和吸収による
周波数安定化

ファブリー・ペロー共振器
フィネス : 100
基線長 : 30cm
試験マス : 質量 数kg
PDH法により信号取得・制御

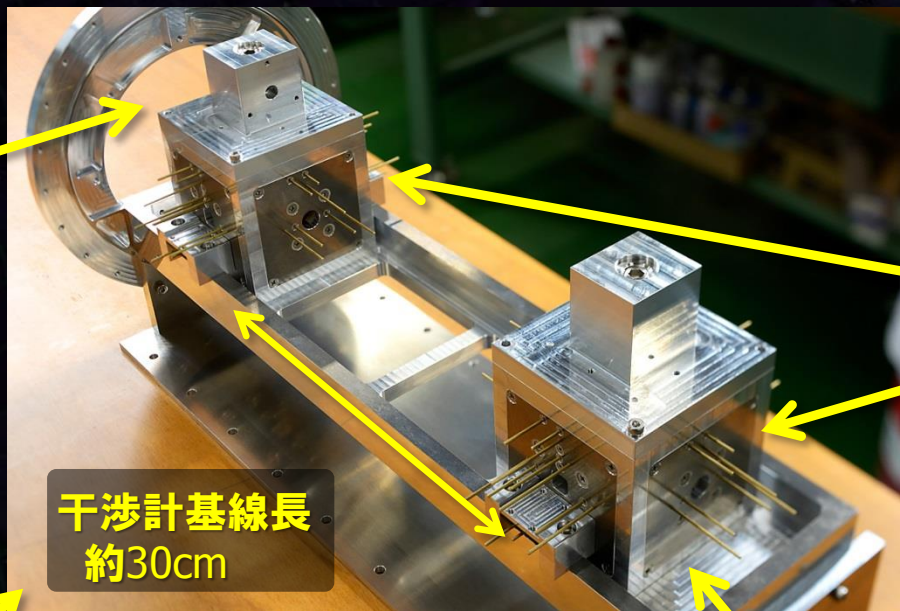
干渉計モジュールEM

入出射光学系

シリケートボンディングにより一体化



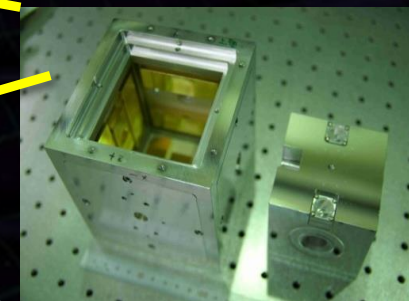
干渉計モジュール



干渉計基線長
約30cm

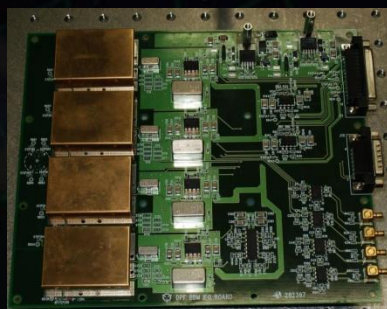
試験マスモジュール

試験マス、静電センサ・アクチュエータ、ローンチロック



4分割RF フォトディテクタ

4分割PD + 復調回路
干渉計基線長・角度の
変動を取得



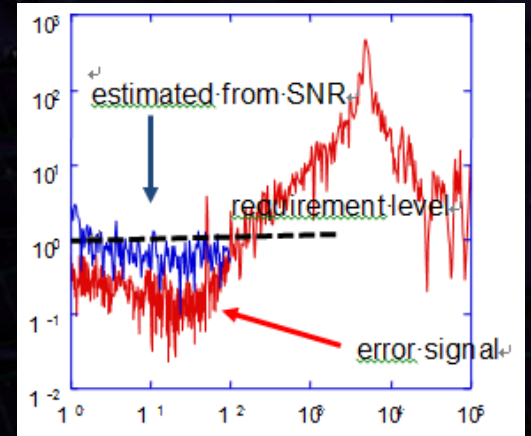
SpW信号処理・ 制御ボード

SpW FPGA +
16bit AD/DA
干渉計の制御

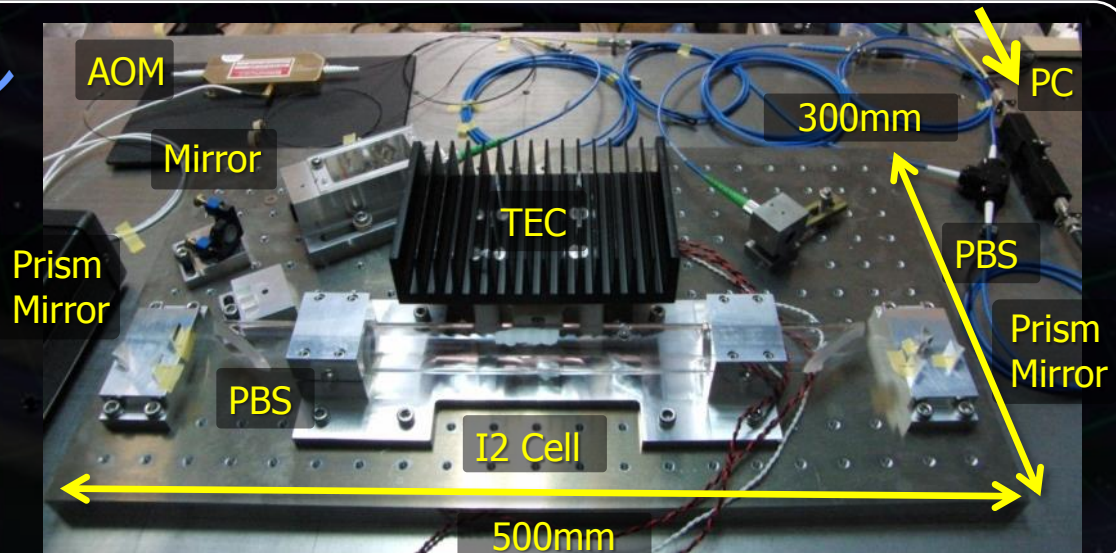
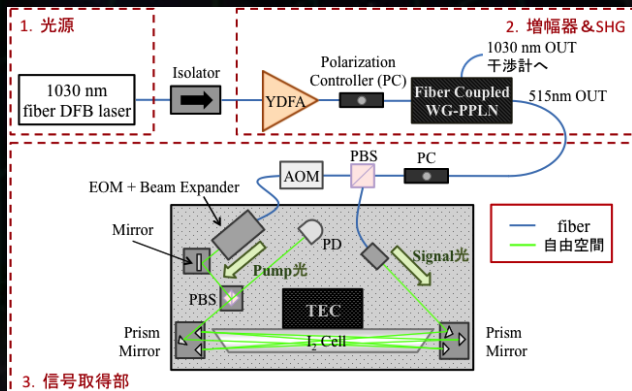


・周波数安定化モジュールBBM2

- ヨウ素セルを用いた周波数安定化.
- 安定度要求 ($0.5 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$)を満たす.
- ファイバ素子を用い,小型・軽量・堅牢化.
- SpWデジタル制御ボードによる動作.



レーザー周波数安定化モジュール



SWIMによる宇宙実証

Photo:
JAXA

SDS-1搭載のSWIM (Space wire demonstration module)

2009年1月打ち上げ, 2010年9月運用停止

⇒ 世界で最初の 宇宙重力波検出器



「いぶき」搭載カメラによる
衛星分離の様子
(2009年1月23日) ©JAXA

SpaceCube2: Space-qualified Computer

CPU: HR5000
(64bit, 33MHz)

System Memory:
2MB Flash Memory
4MB Burst SRAM
4MB Asynch. SRAM
Data Recorder:
1GB SDRAM
1GB Flash Memory
SpW: 3ch

Size: 71 x 221 x 171
Weight: 1.9 kg
Power: 7W



Photo by JAXA

SWIM_{μv} : User Module

Processor test board
GW+Acc. sensor
FPGA board
DAC 16bit x 8 ch
ADC 16bit x 4 ch
→ 32 ch by MPX
Torsion Antenna x2
~47g test mass

Data Rate : 380kbps
Size: 124 x 224 x 174
Weight: 3.5 kg
Power: ~7W

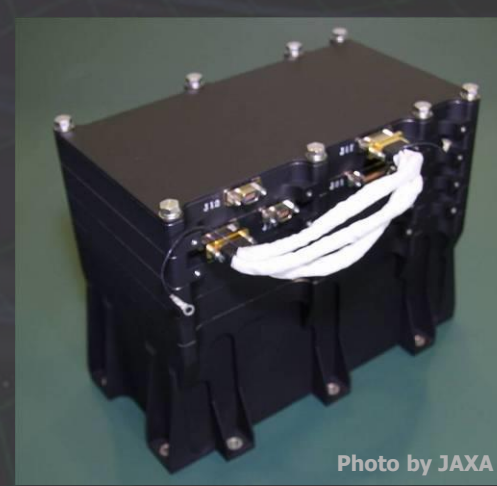


Photo by JAXA

SDS-1
Bus System

Power +28V
RS422 for CMD/TLM
GPS signal

Power ±15V, +5V
SpW x2 for CMD/TLM

超小型宇宙重力波検出器

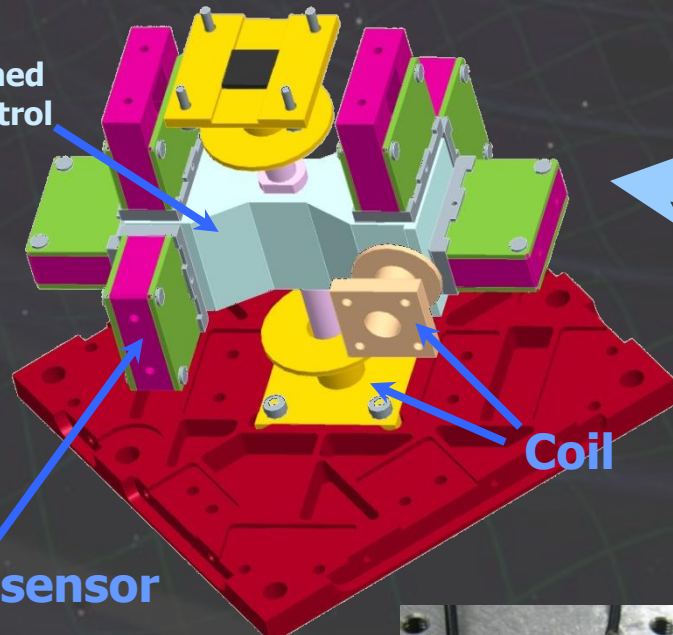
⇒ 世界で最初の 宇宙重力波検出器

Photo:
JAXA

TAM: Torsion Antenna Module with free-falling test mass
(Size : 80mm cube, Weight : ~500g)

Test mass

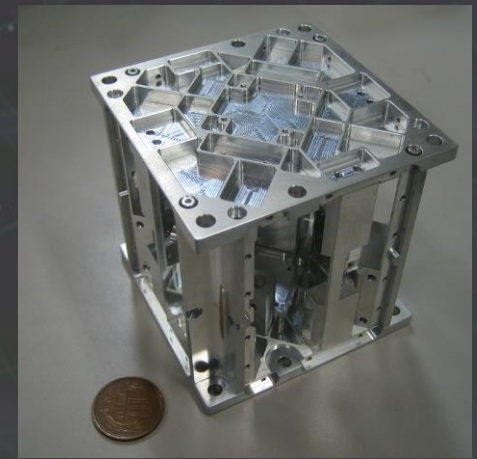
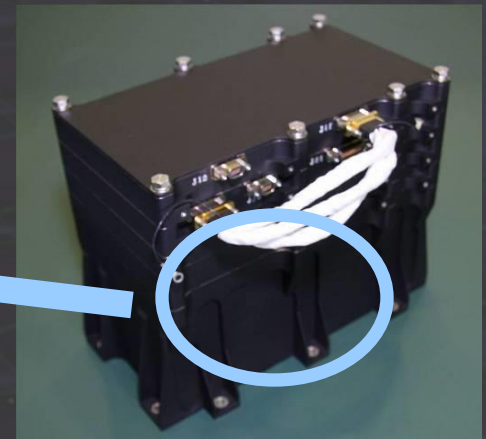
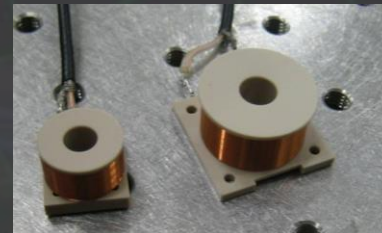
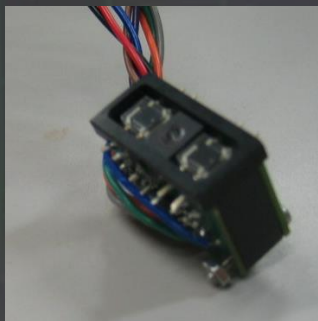
~47g Aluminum, Surface polished
Small magnets for position control



Coil

Photo sensor

Reflective-type optical displacement sensor
Separation to mass ~1mm
Sensitivity ~ 10^{-9} m/Hz^{1/2}
6 PSs to monitor mass motion



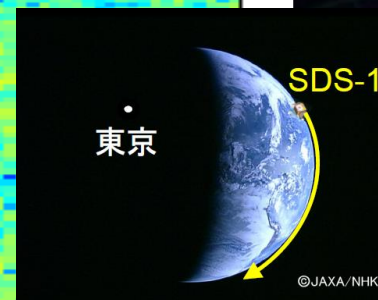
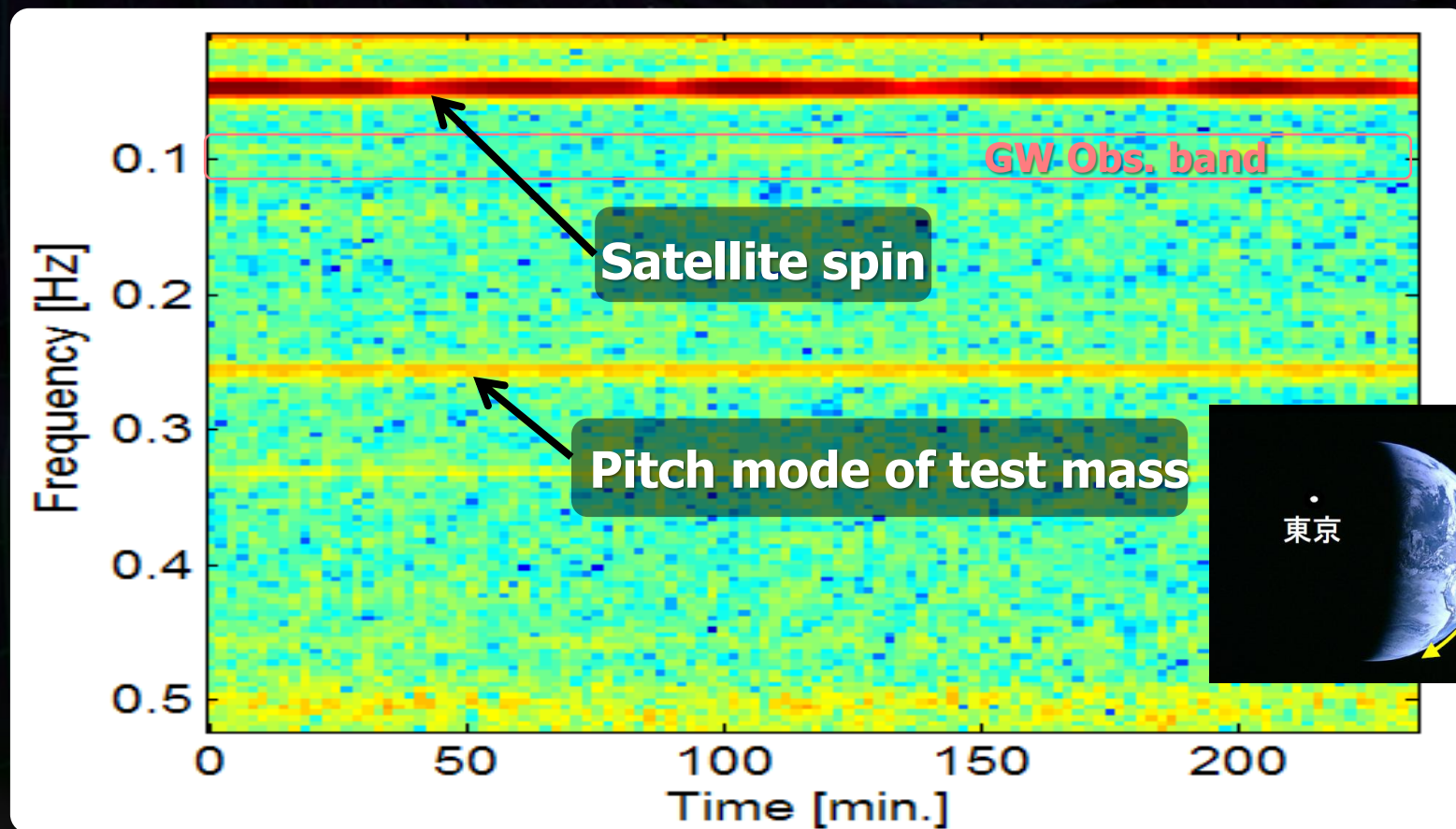
長時間データ取得

Jun 17, 2010 ~120 min.

July 15, 2010 ~240 min.



宇宙背景重力波に対する上限値



重力波天文学のロードマップ

地上望遠鏡

より遠くを観測 (10Hz-1kHz)



宇宙望遠鏡

低周波数帯の観測



まとめ

- 重力波望遠鏡は様々な雑音の影響を受ける。
 - 先進的なレーザー計測技術・外乱抑圧技術
それら自身も興味深い物理研究の対象に成り得る。
- 第2世代地上重力波望遠鏡では、年間10回以上のイベント観測が期待できる。2017年頃本格観測開始。
- そのさらに先には、第3世代地上重力波望遠鏡、宇宙重力波望遠鏡の計画もある。
 - 宇宙全体を見渡す感度、初期宇宙の直接観測。

講義の予定

第1回 重力波による天文学

第2回 観測技術と観測結果

第3回 次世代重力波望遠鏡

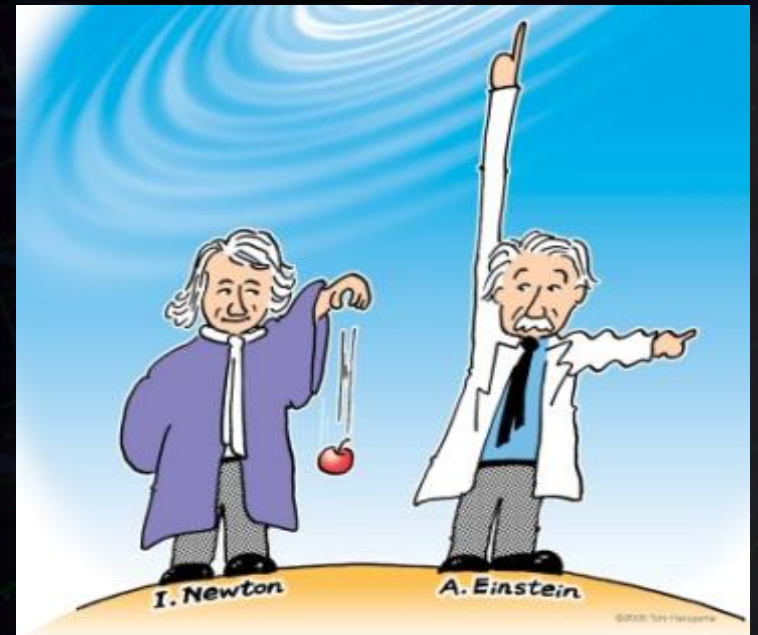


イラスト Tom Haruyama

第3回 終わり