

重力波検出器における 散乱光対策

阿久津智忠（国立天文台）

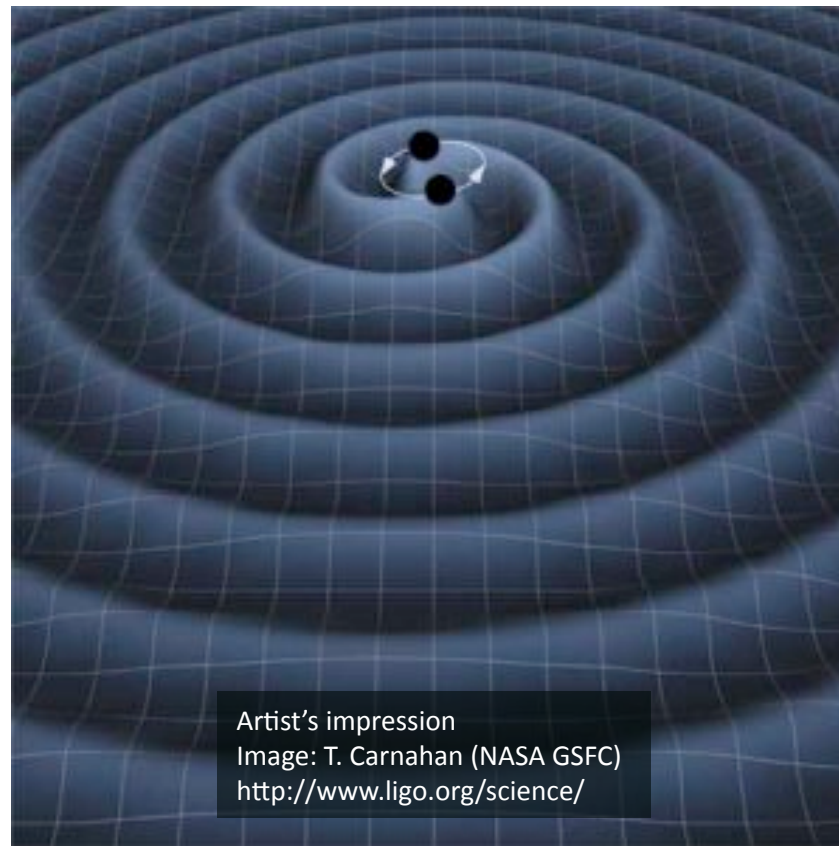
ほか、KAGRA補助光学系グループ

もくじ

- イントロ: 重力波検出器の紹介
- KAGRAの散乱光対策
- 現状について
- まとめ

重力波

一般相対性理論によれば・・・
重たい物体が激しい運動をすると、**時空のしわしわ（ゆがみ）が
周囲に伝わっていく、と予想される。→重力波**



Artist's impression
Image: T. Carnahan (NASA GSFC)
<http://www.ligo.org/science/>

1993年のノーベル物理学賞



The Nobel Prize in Physics 1993
Russell A. Hulse, Joseph H. Taylor Jr.



KUNGL.
VETENSKAPSAKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES

Press Release

13 October 1993

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize Physics for 1993 jointly to **Russell A. Hulse** and **Joseph H. Taylor, Jr**, both of Princeton University, New Jersey, USA for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation



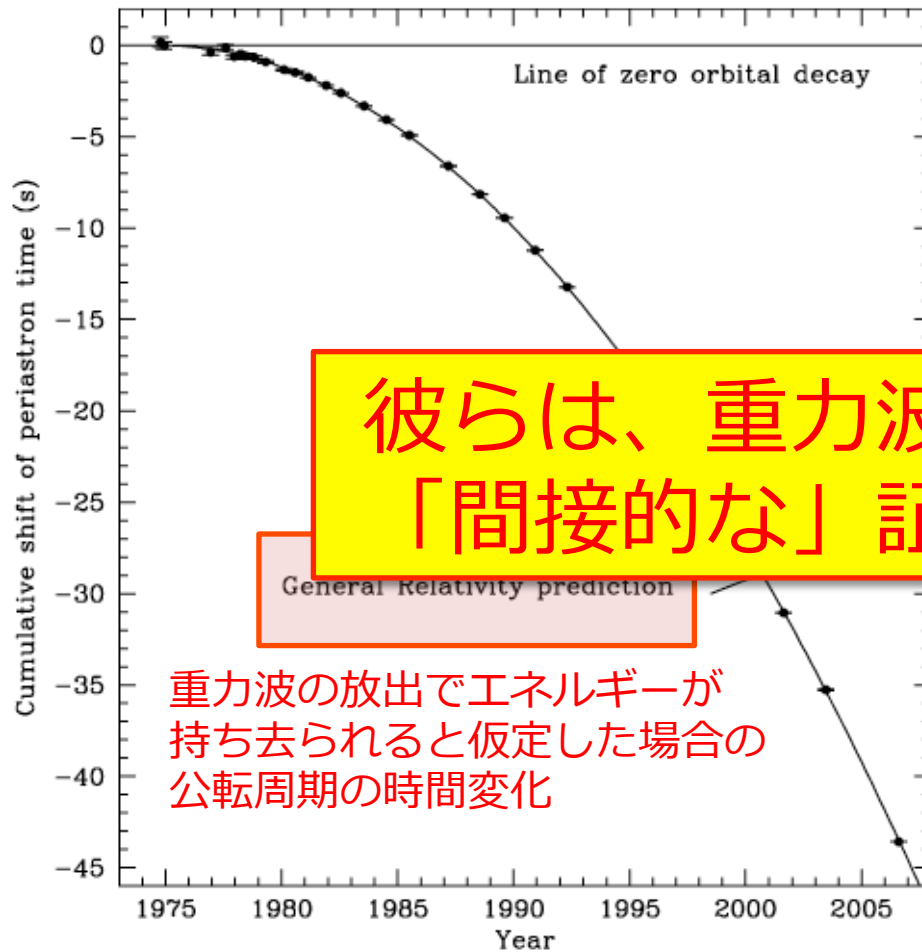
ラッセル・ハルス
F (1950 -)



ジョゼフ・テイラー
(1941 -)

“The good agreement between the observed value and the theoretically calculated value of the orbital path can be seen as **an indirect proof of the existence of gravitational waves.**” 「重力波の存在を間接的に証明したといえる。」

重力波の放出による効果



←先ほどの連星パルサーの発見から、現在までの公転周期の変化。

彼らは、重力波が存在するという「間接的な」証拠を発見した！！

(誤差0.2%程度)

重力波の放出でエネルギーが持ち去られると仮定した場合の公転周期の時間変化

Weisberg, Nice, Taylor, ApJ **722**, 1030 (2010)

重力波がやってくると？

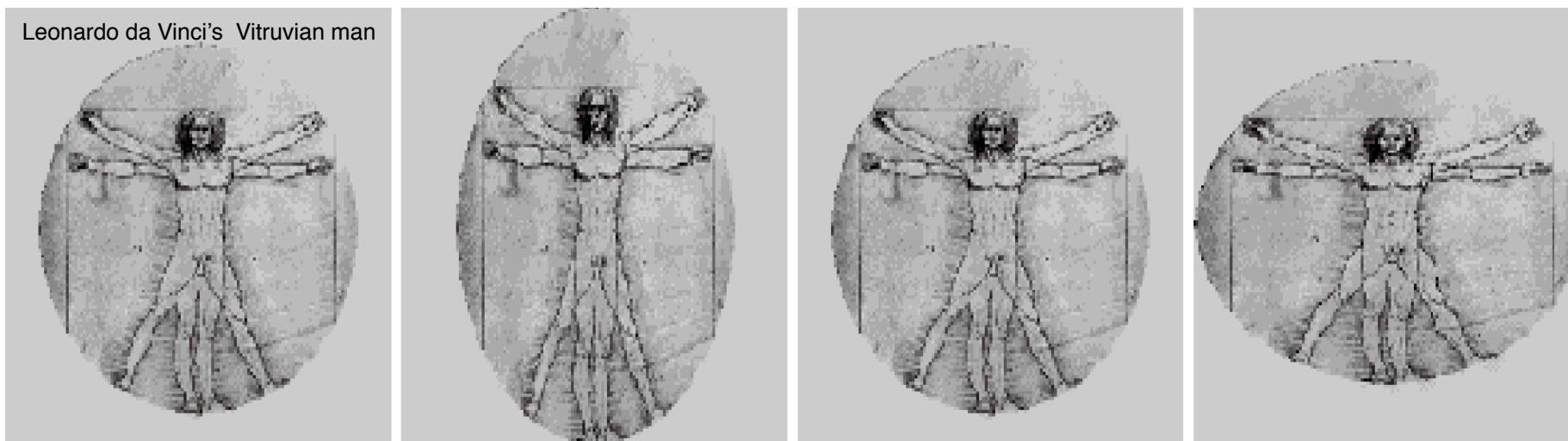
我々の真っ正面から重力波がやってきているとすると、

伸び縮み

が発生する。

ただし、小さすぎて普段は認識できない。

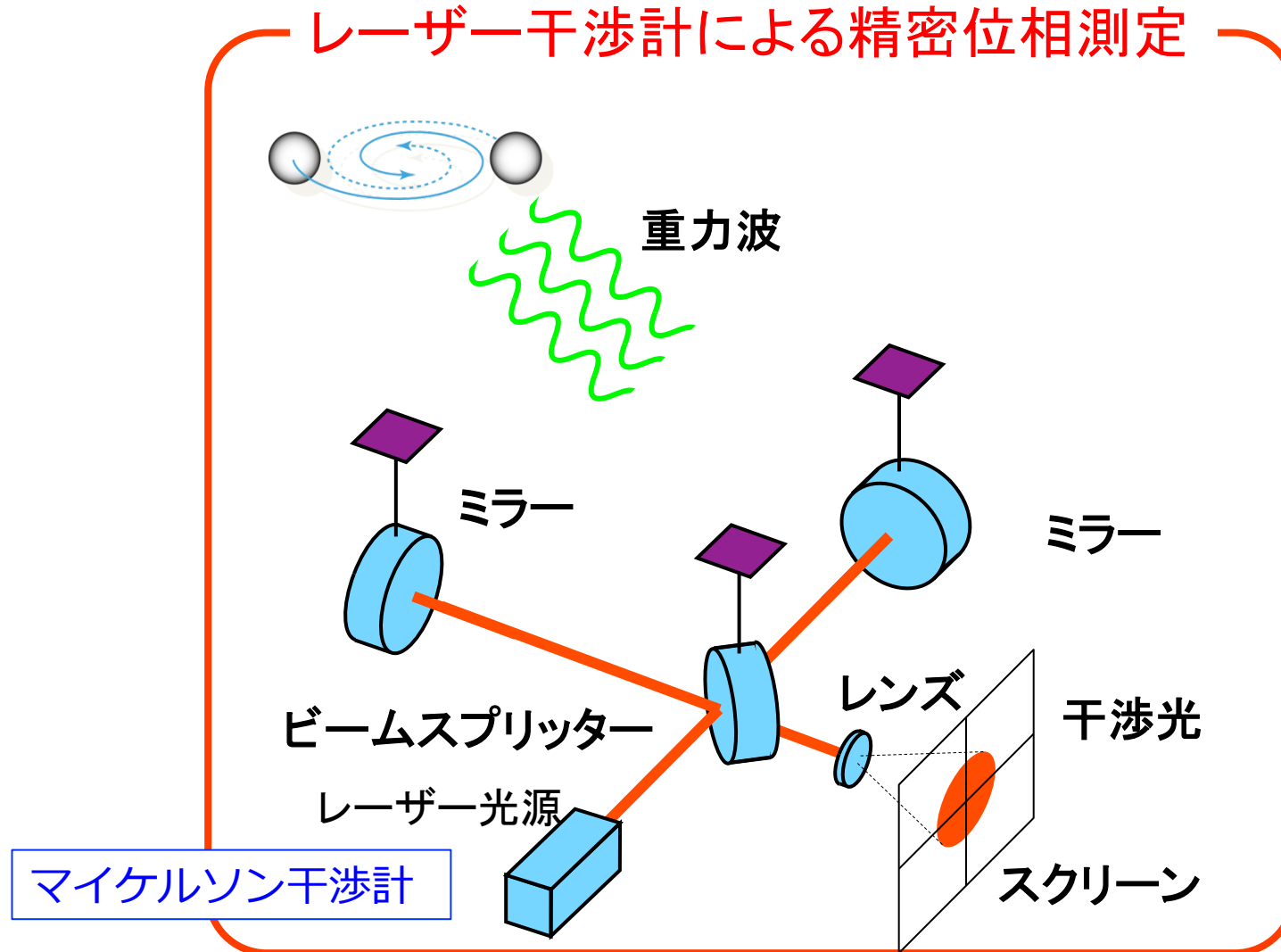
Leonardo da Vinci's Vitruvian man



From LIGO-G070251 by L. Cadonati

光干渉計をもちいた重力波検出器

レーザー干渉計による精密位相測定

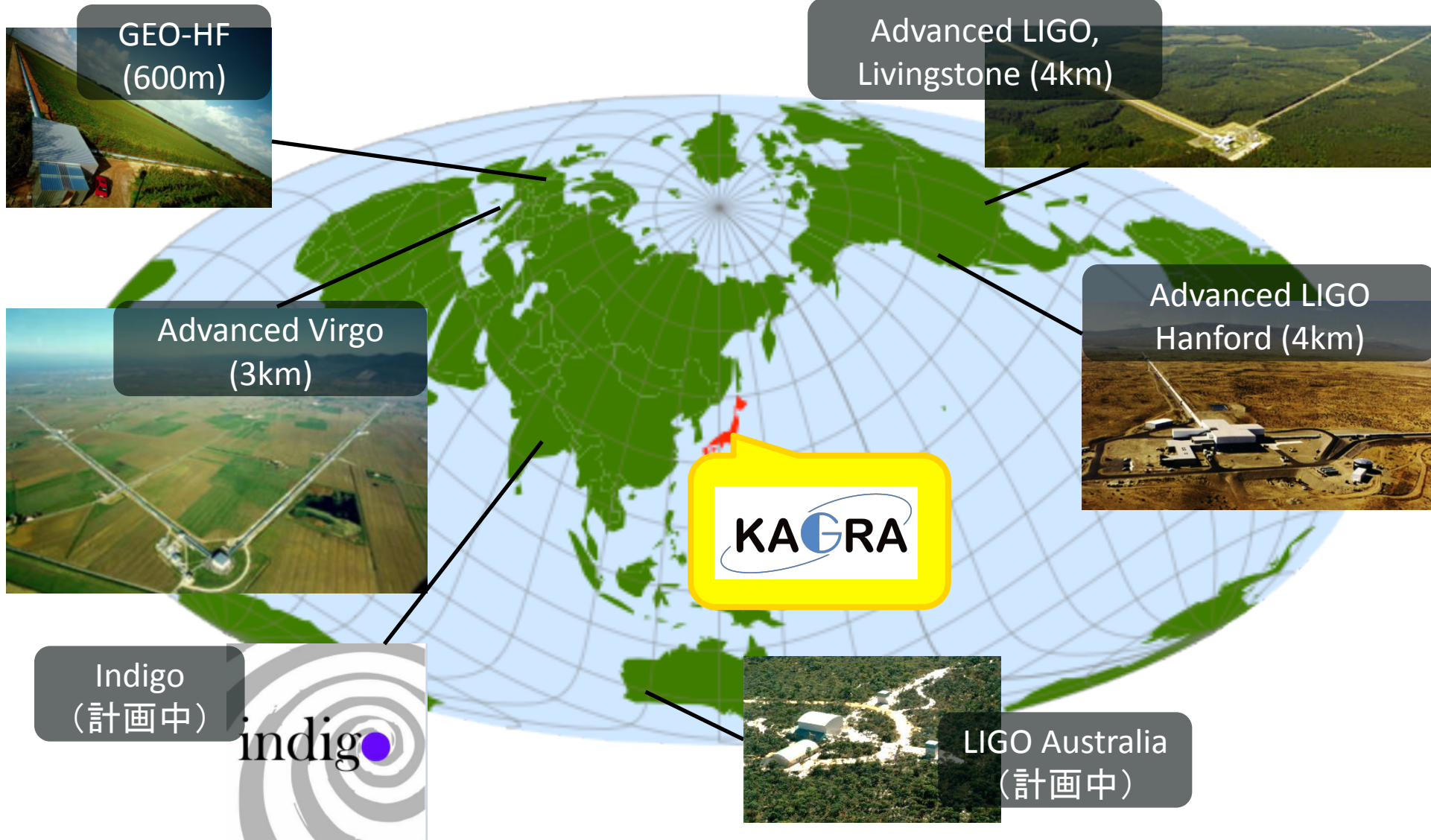


大型低温重力波望遠鏡 ^{かぐら}KAGRA

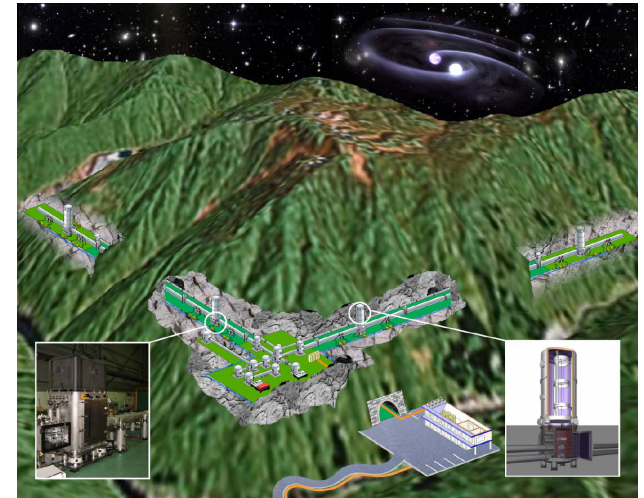


第2世代

重力波望遠鏡のネットワーク



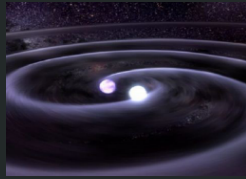
KAGRA



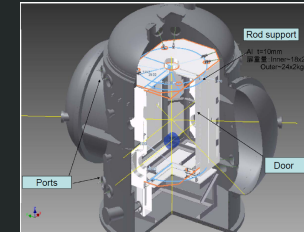
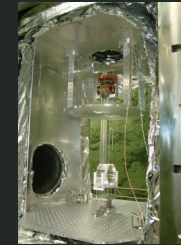
- 日本の次世代検出器
 - 現在建設中！！
 - 本格観測 2017年～
 - 海外の望遠鏡（Advanced LIGOなど）と同程度の感度
 - 国際観測網への参加
- 特徴
 - 鏡を低温に冷やす（ $\sim 20\text{K}$ [-250°C くらい]）
 - 地下の安定・静寂な環境に設置（神岡鉱山）

必要な技術

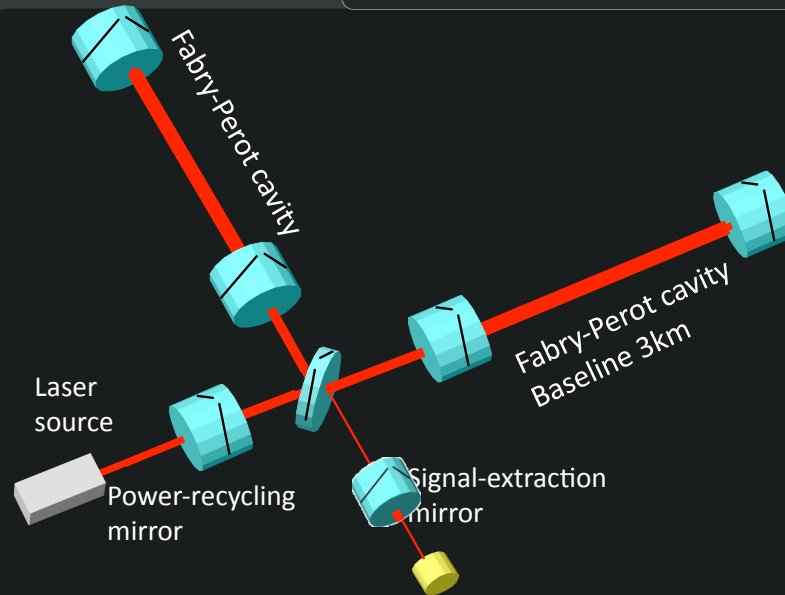
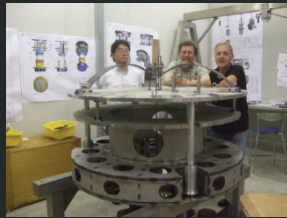
- ・重力波源の理解
理論・解析的計算
数値相対論
データ解析手法



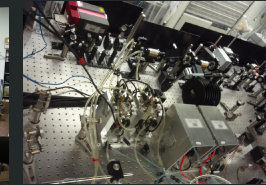
- ・鏡・振り子の熱雑音
鏡・振り子の低温化
材質の機械損失



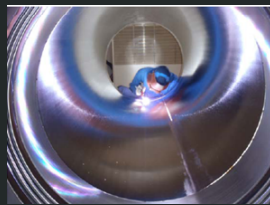
- ・地面振動の影響
静寂な地下サイト
高性能防振装置



- ・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



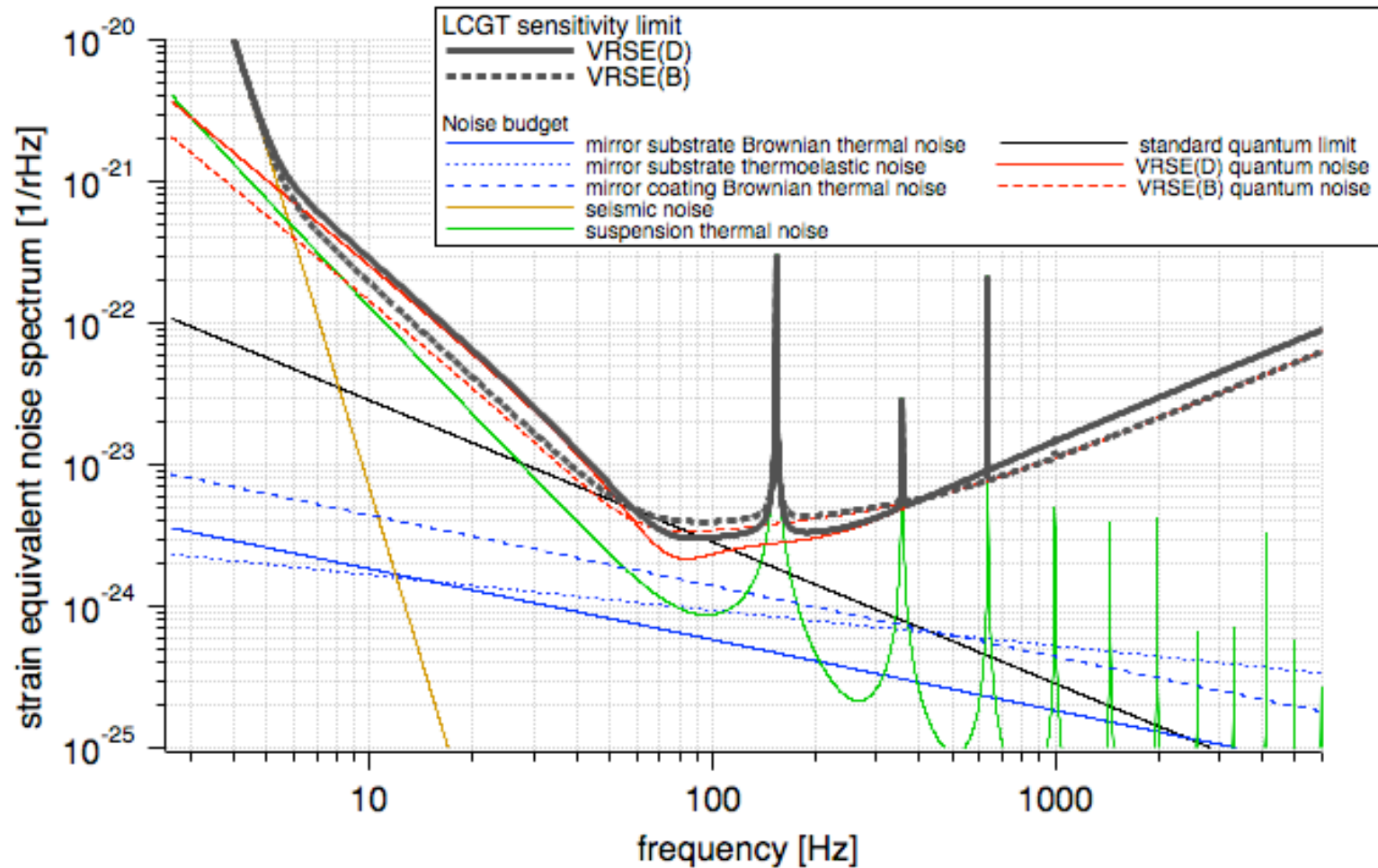
- ・真空システム
光路長の揺らぎ
音響雑音などの低減



- ・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

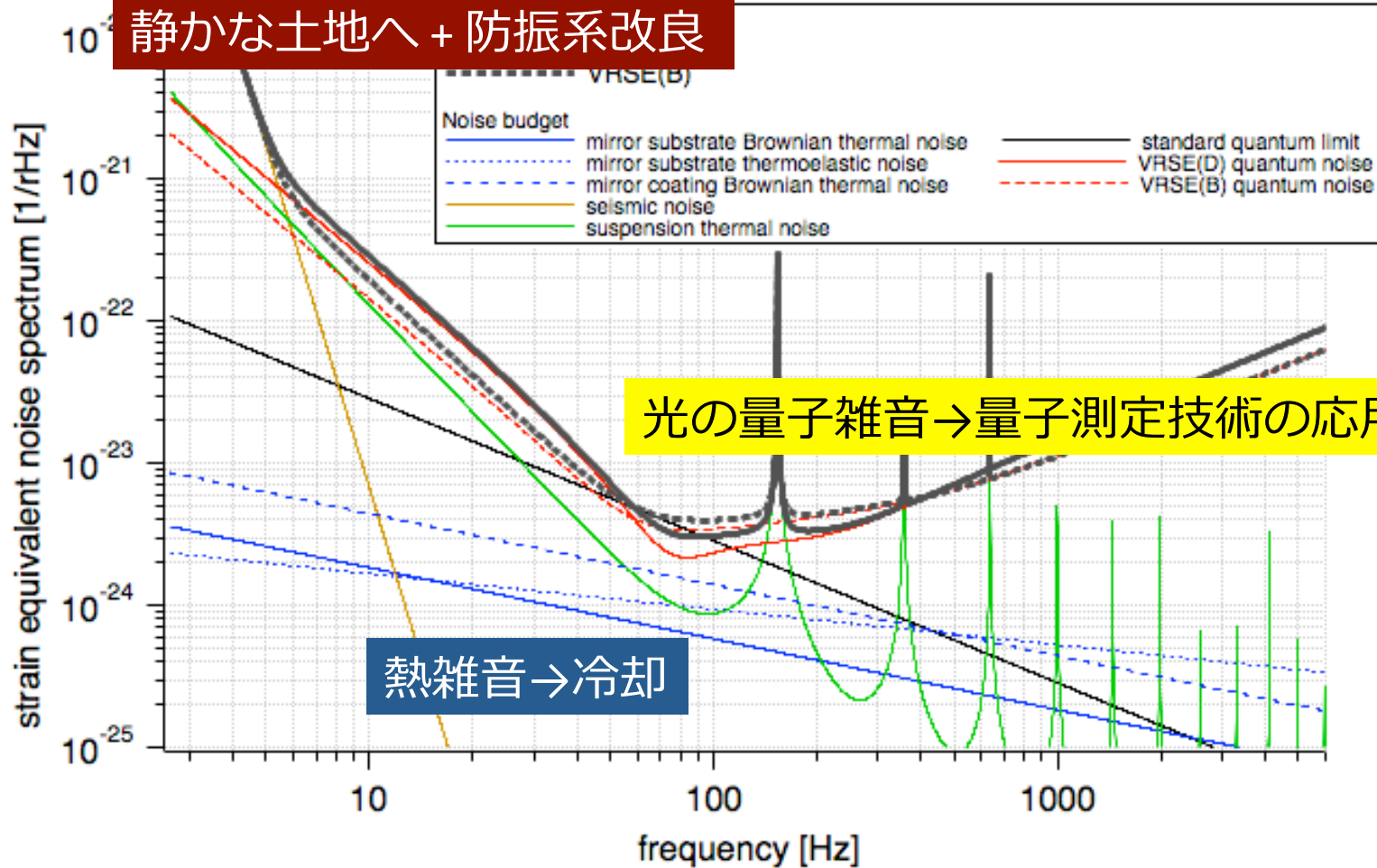


雑音とのたたかい



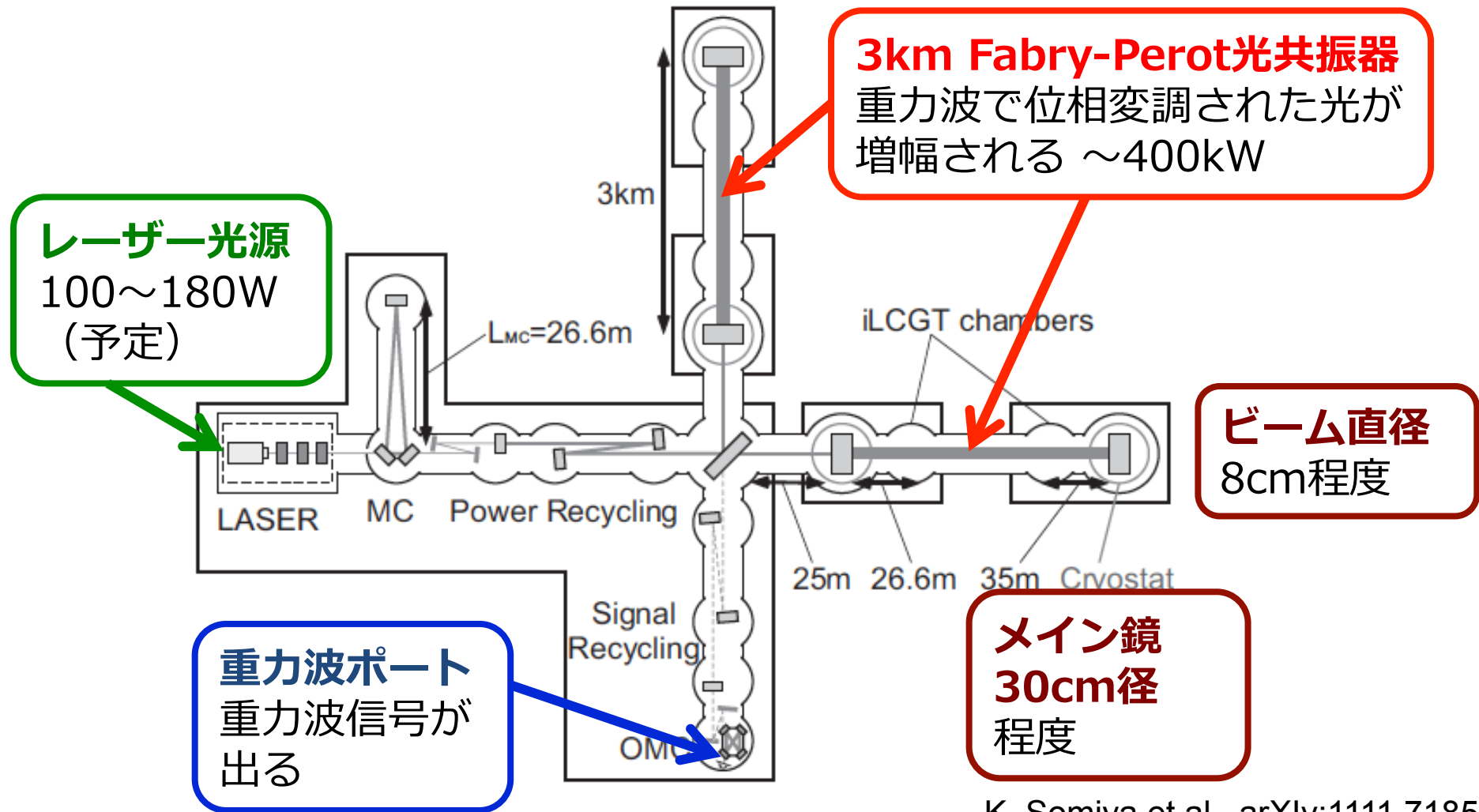
雑音とのたたかい

地面振動→そもそも
静かな土地へ + 防振系改良



- イントロ: 重力波検出器の紹介
- **KAGRAの散乱光対策**
- 現状について
- まとめ

KAGRA概観

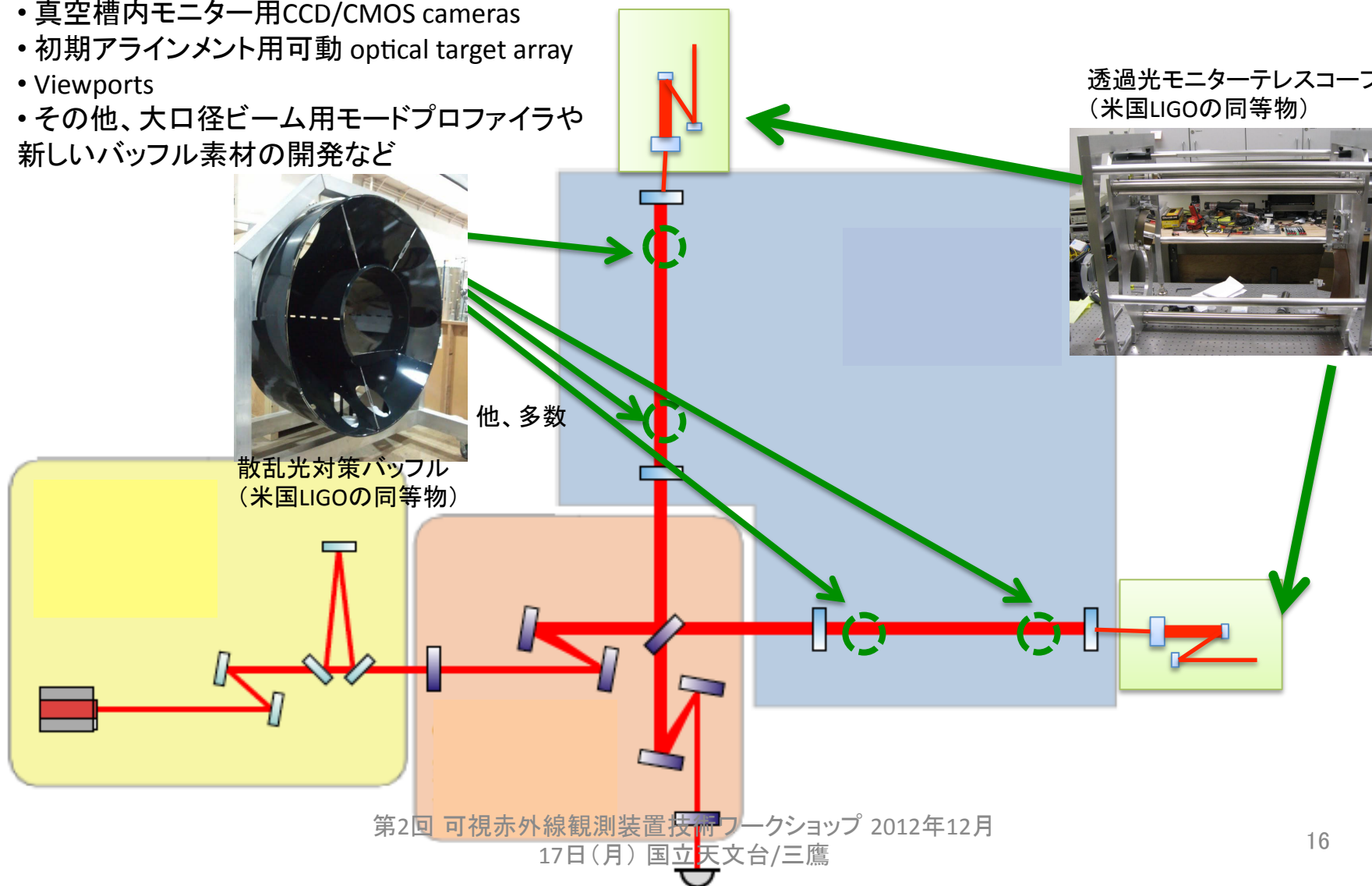


K. Somiya et al., arXiv:1111.7185

KAGRAの補助光学系

さまざまな開発項目のあつまり

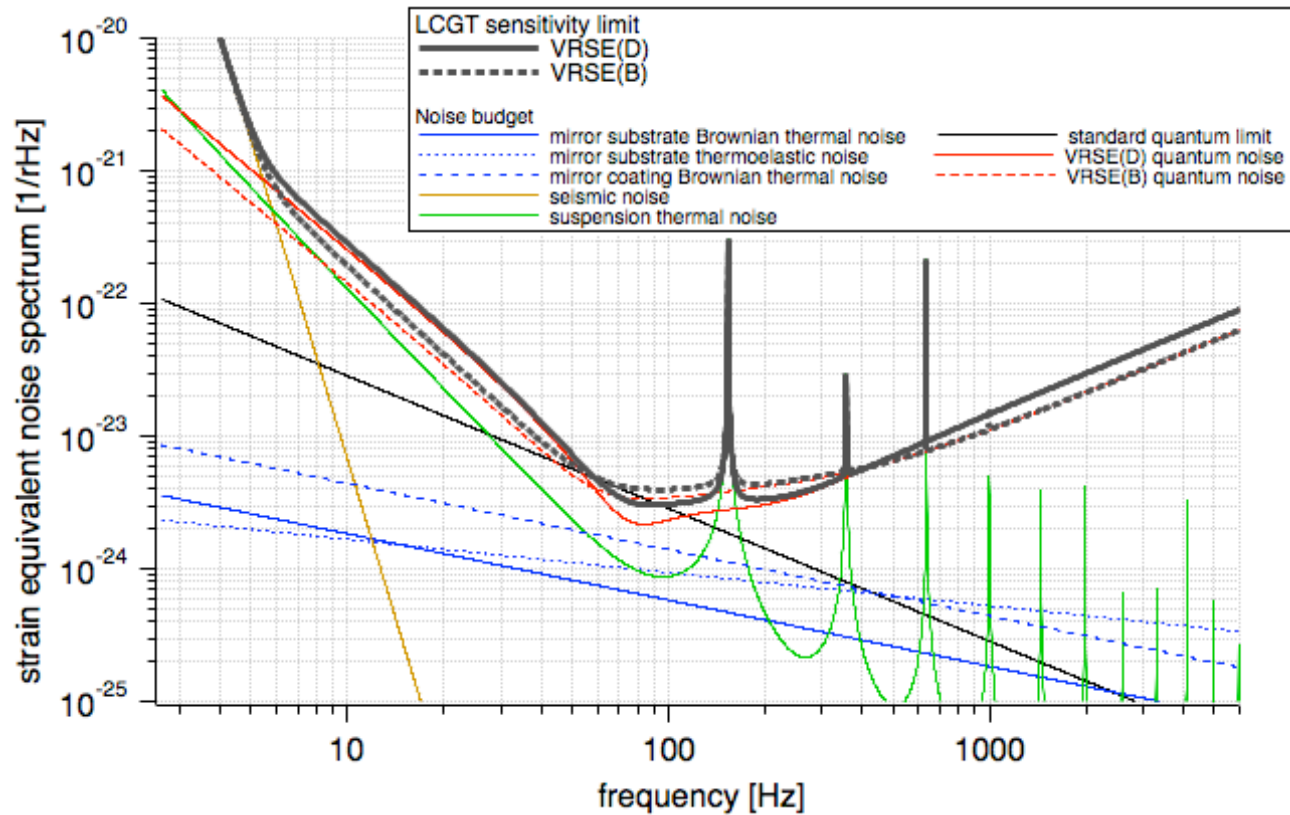
- 散乱光対策(バッフルなどの設置)
- 透過光モニター用テレスコープ
- 光テコ(吊られた鏡の動きをモニター)
- 真空槽内モニター用CCD/CMOS cameras
- 初期アライメント用可動 optical target array
- Viewports
- その他、大口径ビーム用モードプロファイラや新しいバッフル素材の開発など



散乱光対策

目的: 散乱光によるノイズがKAGRAの感度に寄与しないようにする

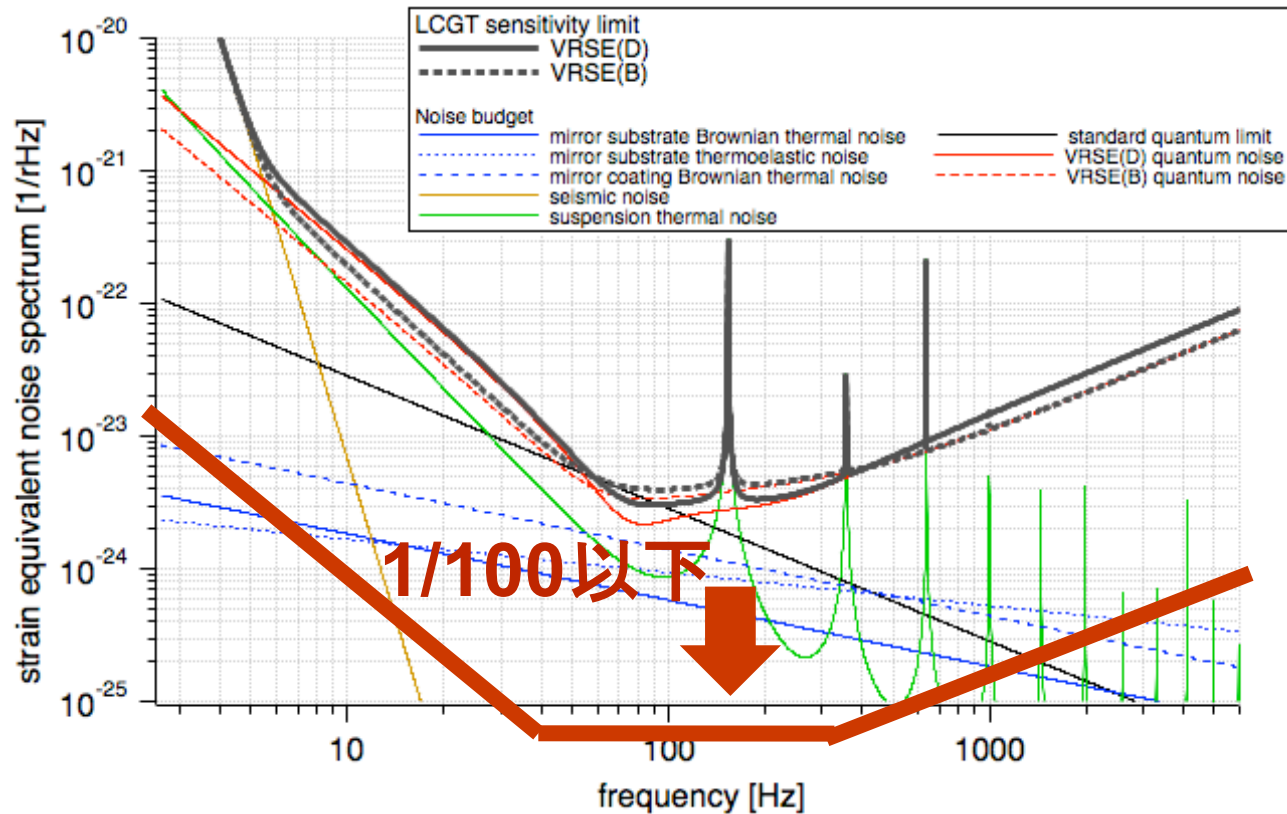
より具体的な要求: 散乱光によるノイズ寄与 < KAGRA最終目標ノイズの1/100という設計を最低ラインとする。が、散乱光雑音の混入経路は不定性が高く、その推定の誤差は大きいと考えられるため、バッフル反射率を下げるなど、それが様々な観点からfeasibleと判断されればできるだけ寄与が少なくなる設計とすること。



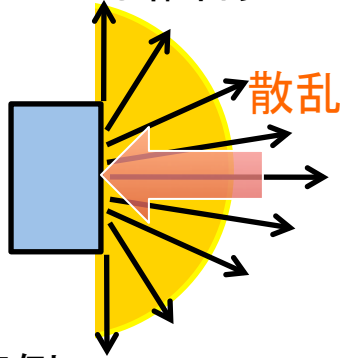
散乱光対策

目的: 散乱光によるノイズがKAGRAの感度に寄与しないようにする

より具体的な要求: 散乱光によるノイズ寄与 < KAGRA最終目標ノイズの1/100という設計を最低ラインとする。が、散乱光雑音の混入経路は不定性が高く、その推定の誤差は大きいと考えられるため、バッフル反射率を下げるなど、それが様々な観点からfeasibleと判断されればできるだけ寄与が少なくなる設計とすること。

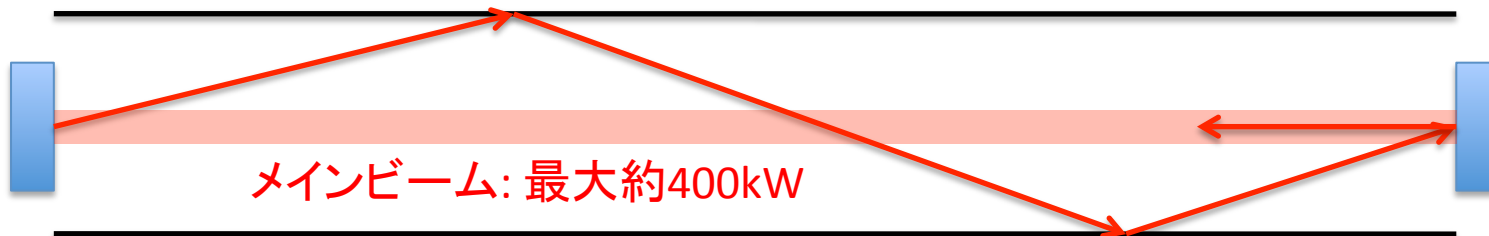


散乱光による雑音発生

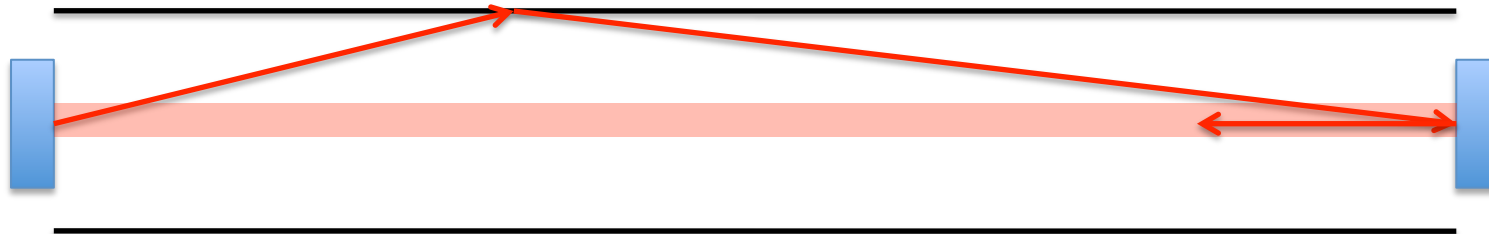


メインビームを取り囲む真空ダクトは地面振動などで揺れている。
この揺れの周波数は観測対象の重力波と同じくらい。
このような揺れを拾った散乱光が以下のようにメインビームへ再結合してしまうと、
重力波信号と区別がつかない→雑音となる

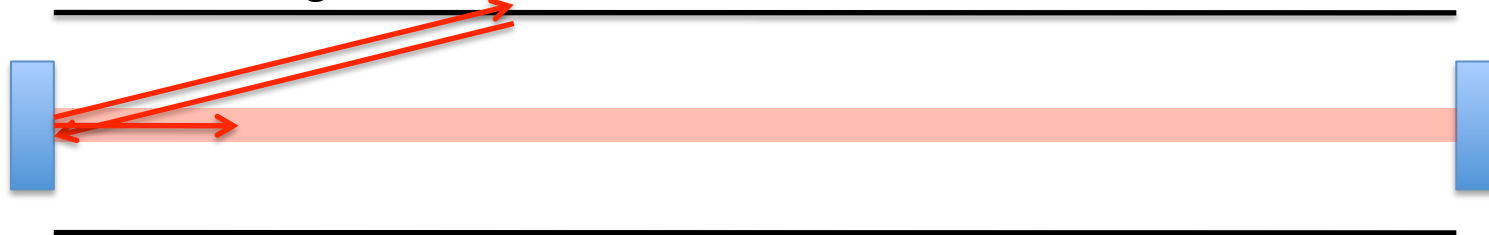
事例1: Specular reflection: 壁面を多重反射して再結合



事例2: Forward scattering: 壁面で散乱され反対側の鏡に飛びこんで再結合



事例3: backscattering: 同じく壁面で散乱され、散乱元の鏡に帰って再結合



定量的な推定

重力波振幅換算
(strain)

散乱光の再結合量

$$h = \frac{1}{L} G \frac{\sqrt{P_{\text{scatter}}}}{\sqrt{P_{\text{in}}}} \phi_{\text{scatter}}$$

散乱体によって光の位相が揺らされたぶん

必要に応じて散乱体=バツフルを**防振**

腕長さ(3 km)

伝達関数

不明な量:

散乱光の再結合量

- ・ バツフルなどの配置、形状、材質による
- ・ 推定が必要

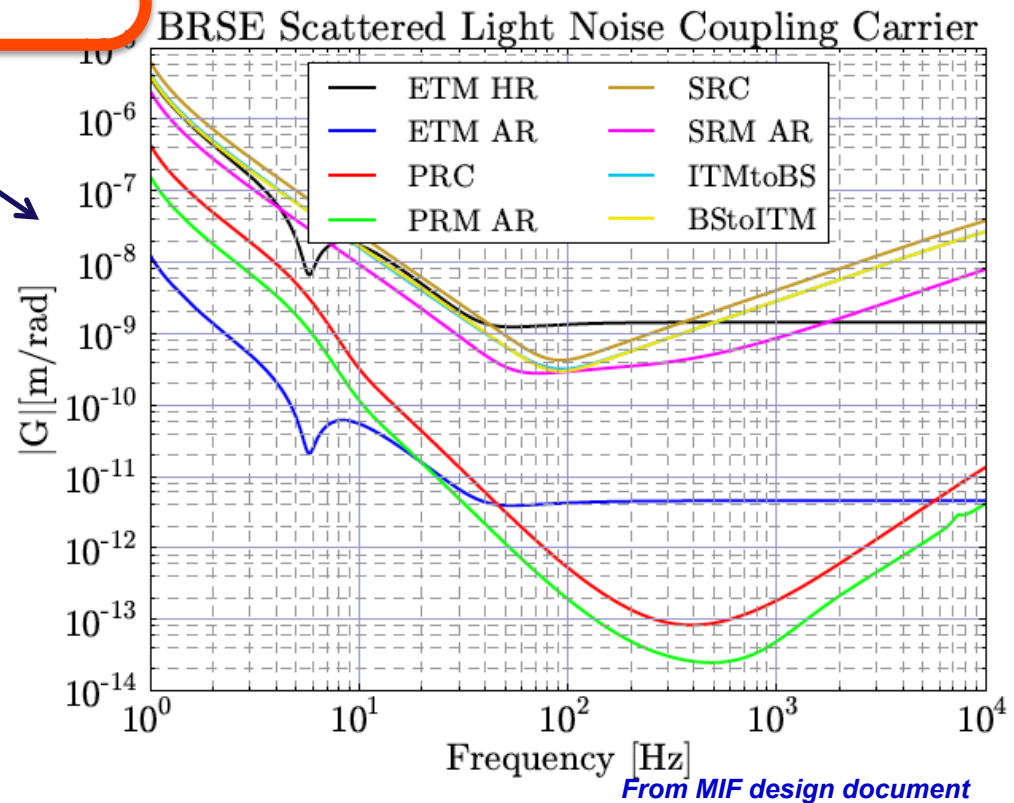
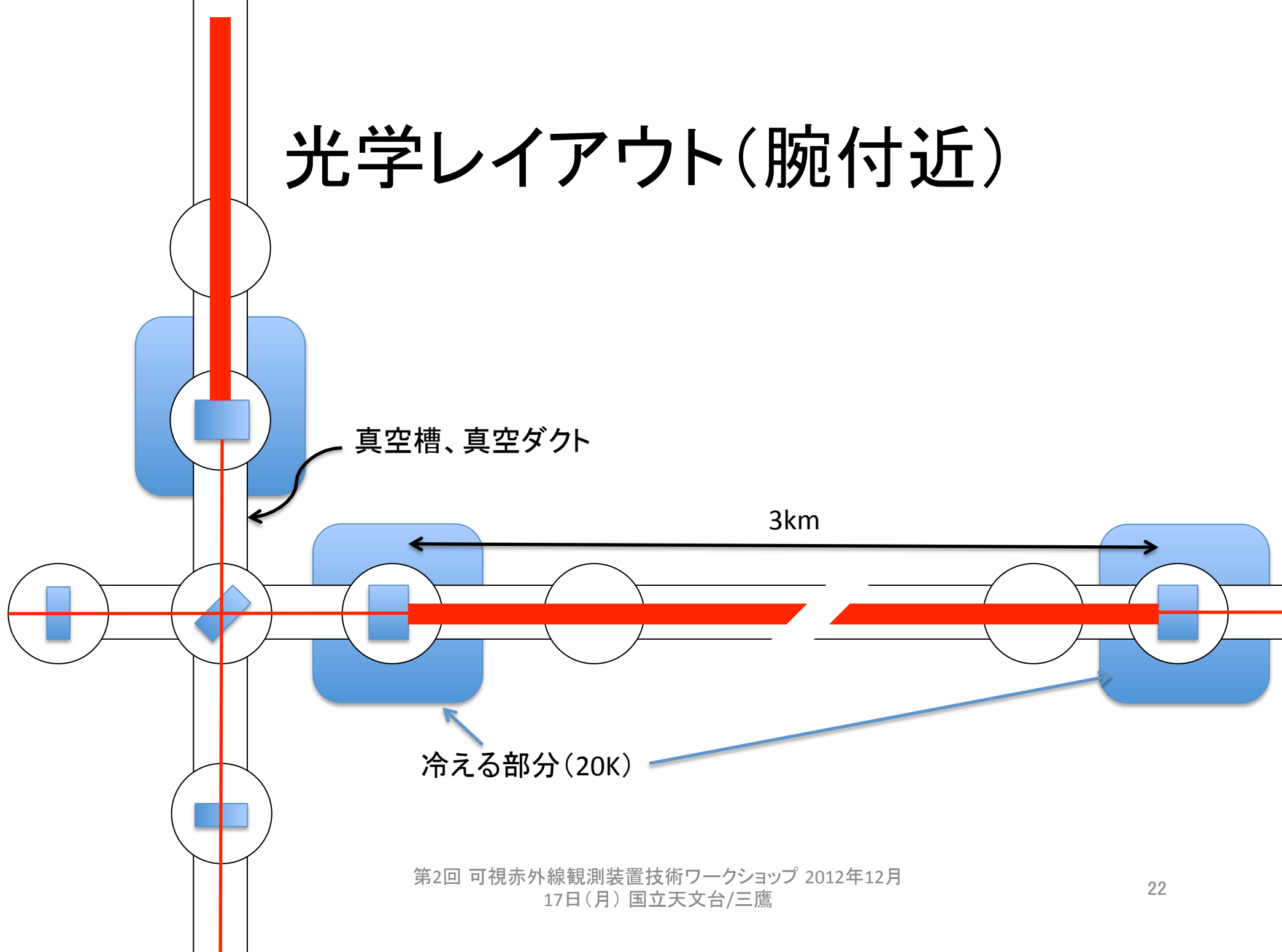


Figure 4.20: Coupling coefficients of scattered light for the carrier: BRSE

散乱光対策について

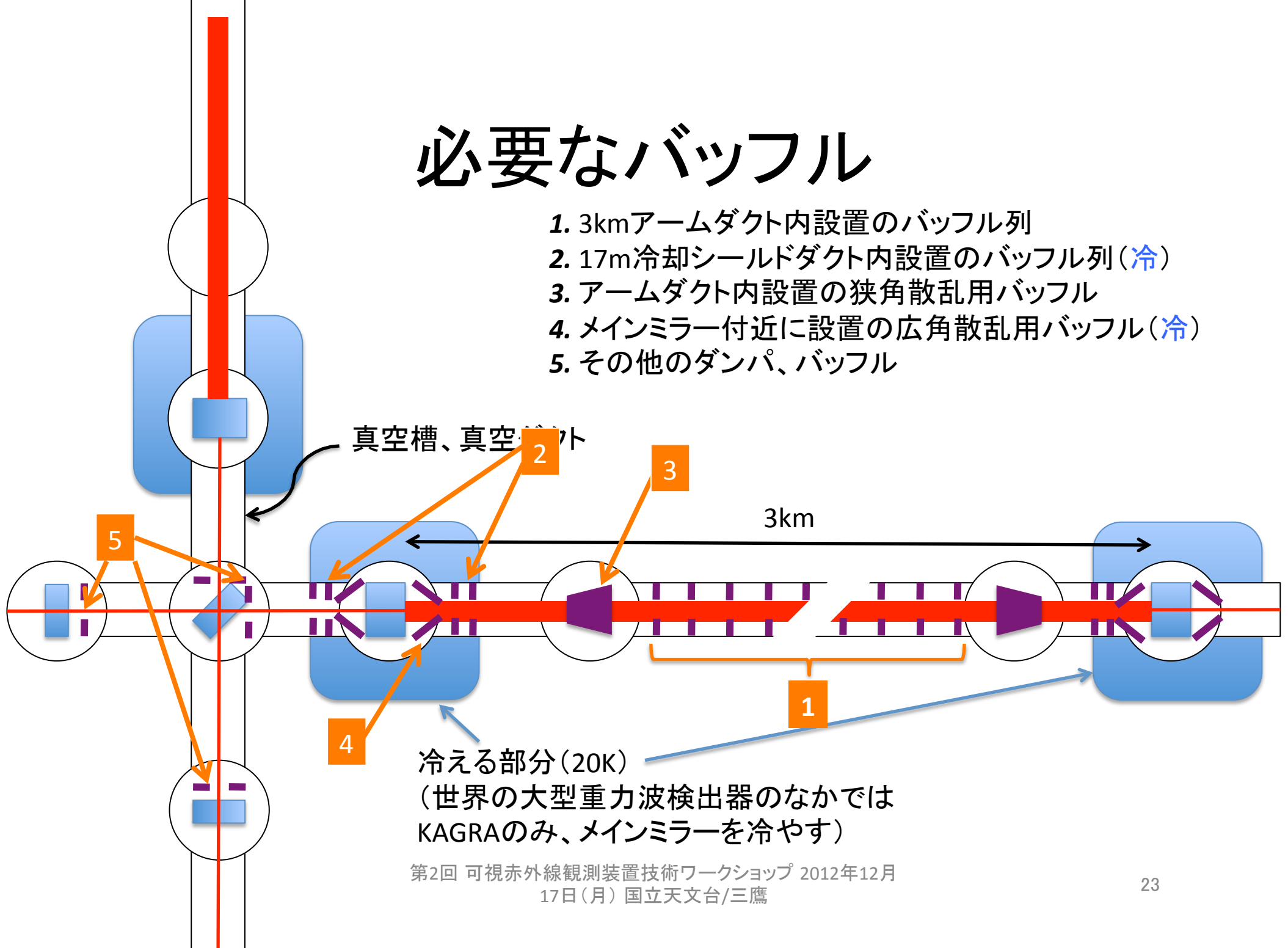
- 様々なバツフルを用意して
 - Ghost beamとscattered lightの両方を遮断する
- 特徴
 - バツフルは必要に応じて**防振**する(懸架する)
 - **超高真空**中に設置される
 - 箇所によっては**耐熱性**を要求される
 - 箇所によっては**低温**で使われる
- 最終目標: 散乱光が重力波信号を汚さないレベルにまで対策を行う。安全を見込んで、かぐらの目標ノイズレベルの1/100になるようデザインする(現状)。

光学レイアウト(腕付近)



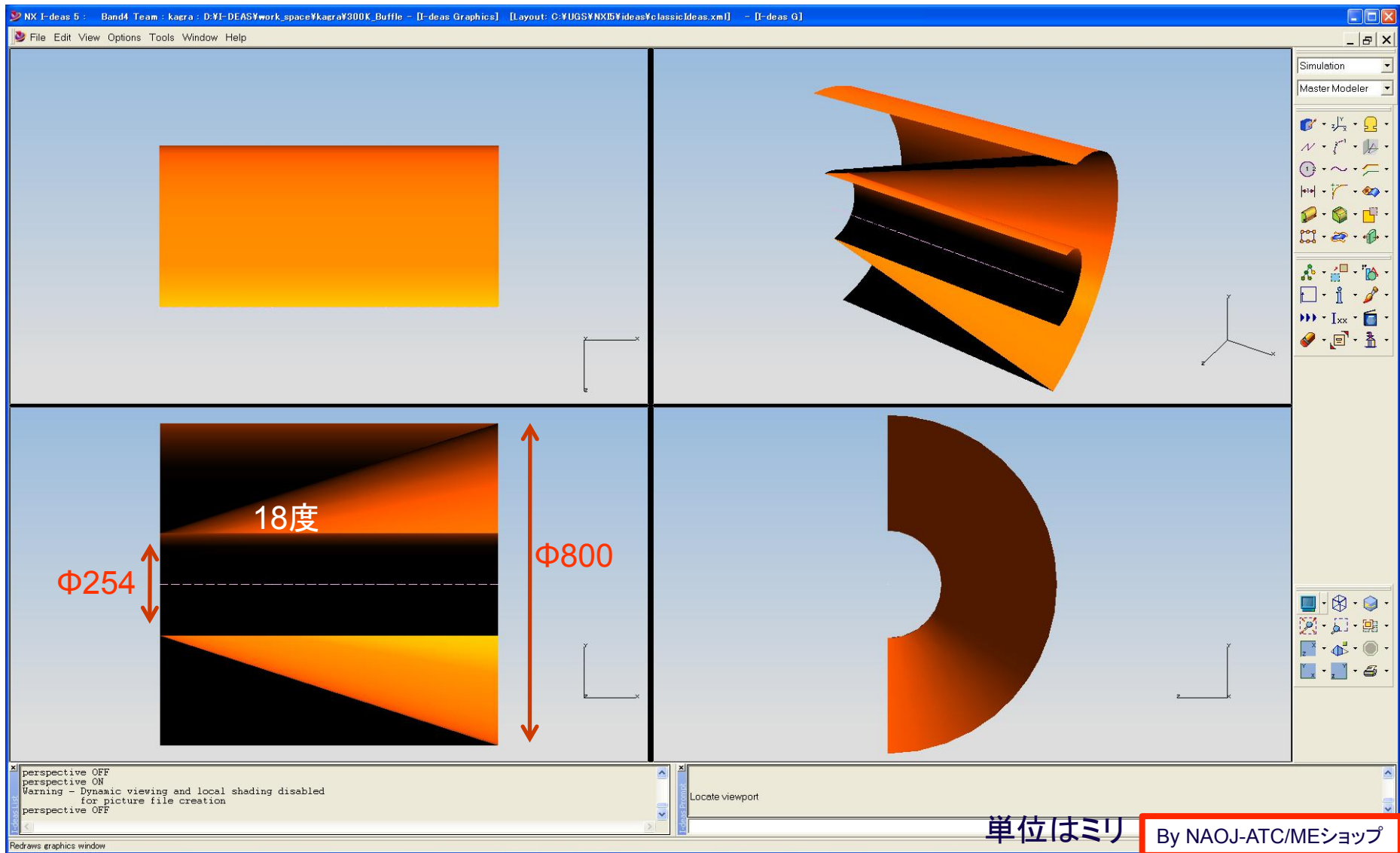
必要なバッフル

1. 3kmアームダクト内設置のバッフル列
2. 17m冷却シールドダクト内設置のバッフル列(冷)
3. アームダクト内設置の狭角散乱用バッフル
4. メインミラー付近に設置の広角散乱用バッフル(冷)
5. その他のダンパ、バッフル



-
- イントロ: 重力波検出器の紹介
 - KAGRAの散乱光対策
 - 現状について
 - まとめ

バッフル#3 形状 (候補)



Ray-tracing

Zemax 12 EE - 33816 - C:\Users\dechertz\Documents\Zemax\SAMPLES\wide_baffle_20120817v31.zmx

File Editors System Analysis Tools Reports Macros Extensions Window Help

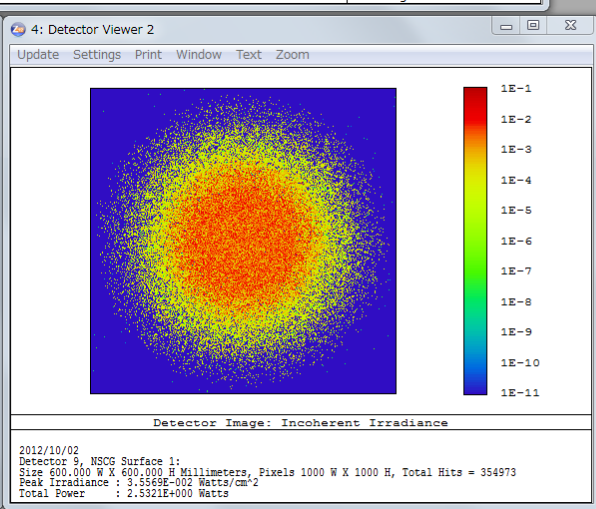
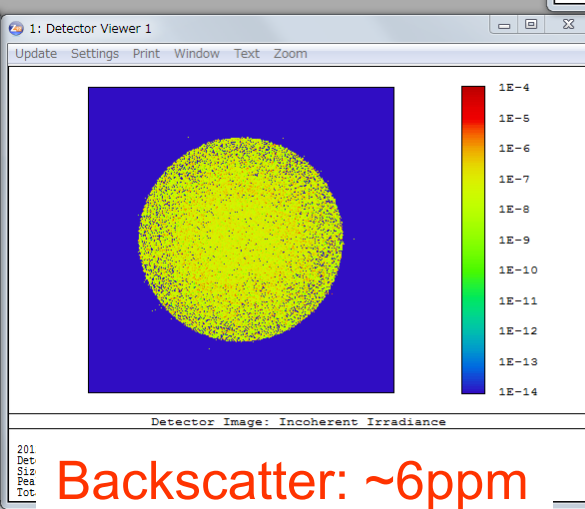
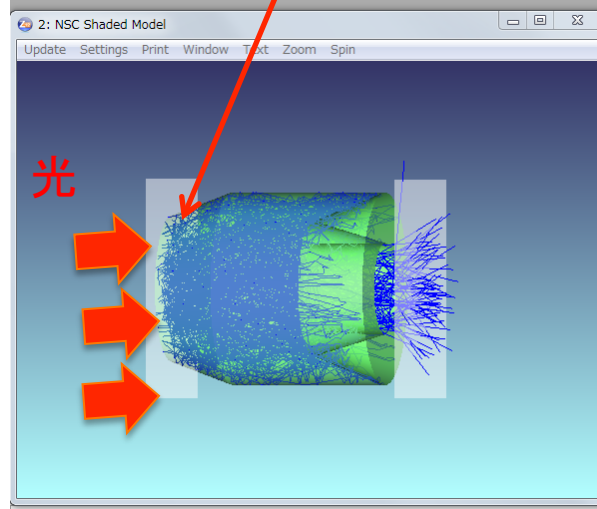
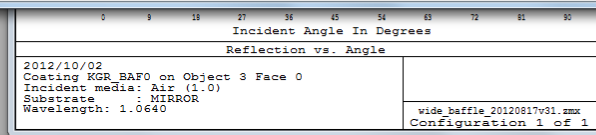
New Ope Sav Sas Bac Res NCE MFE MCE TDE Upd Upa Gen Wav L3n L5n Obv Rtc Dvr Rdb Dis Gmp Opt Glb Ham Tol Gla ABg Sfr Xis Len Pre Chk Vop

Non-Sequential Component Editor

Object Type	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	# Layout Rays	Power (Watts)	Wavenumber	Color #	X Half Width	Y Half Width	Source I
1 Source Ellipse	0.000	0.000	0.000	0.000	-		40.000	0	0	125.000	125.000	
2 Cylinder Pipe	0.000	0.000	0.000	0.000	MIRROR		264.150					
3 Cylinder Pipe	171.700	0.000	0.000	0.000	MIRROR		264.150					
4 Cylinder Pipe	400.000	0.000	0.000	0.000	MIRROR		264.150					
5 Cylinder Pipe	400.000	0.000	0.000	0.000		200.000	125.000					
6 Cylinder Pipe	400.000	0.000	0.000	0.000		200.000	125.000					
7 Annulus	600.000	0.000	0.000	0.000		264.150	264.150	125.000	125.000			
8 Detector Rectangle	-1.000	0.000	0.000	0.000		300.000	300.000	1000	1000	0	0	0
9 Detector Rectangle	700.000	0.000	0.000	0.000		300.000	300.000	1000	1000	0	0	0

Preliminary!!

「鏡」の散乱を模す。



Backscatter: ~6ppm

光学シミュレーションについて

■ 必要なこと

- ◆ 表面の散乱を仮定した光線追跡
- ◆ メイン光軸（ガウシアンTEM00）への再結合量の推定
- ◆ バッフルエッジでの回折の影響の推定

■ 現状

- ◆ 光線追跡→市販ソフトなど
 - ◆ 再結合量推定: 手計算
 - ◆ 回折影響の推定: 手計算
- } シミュレーションでできないか？

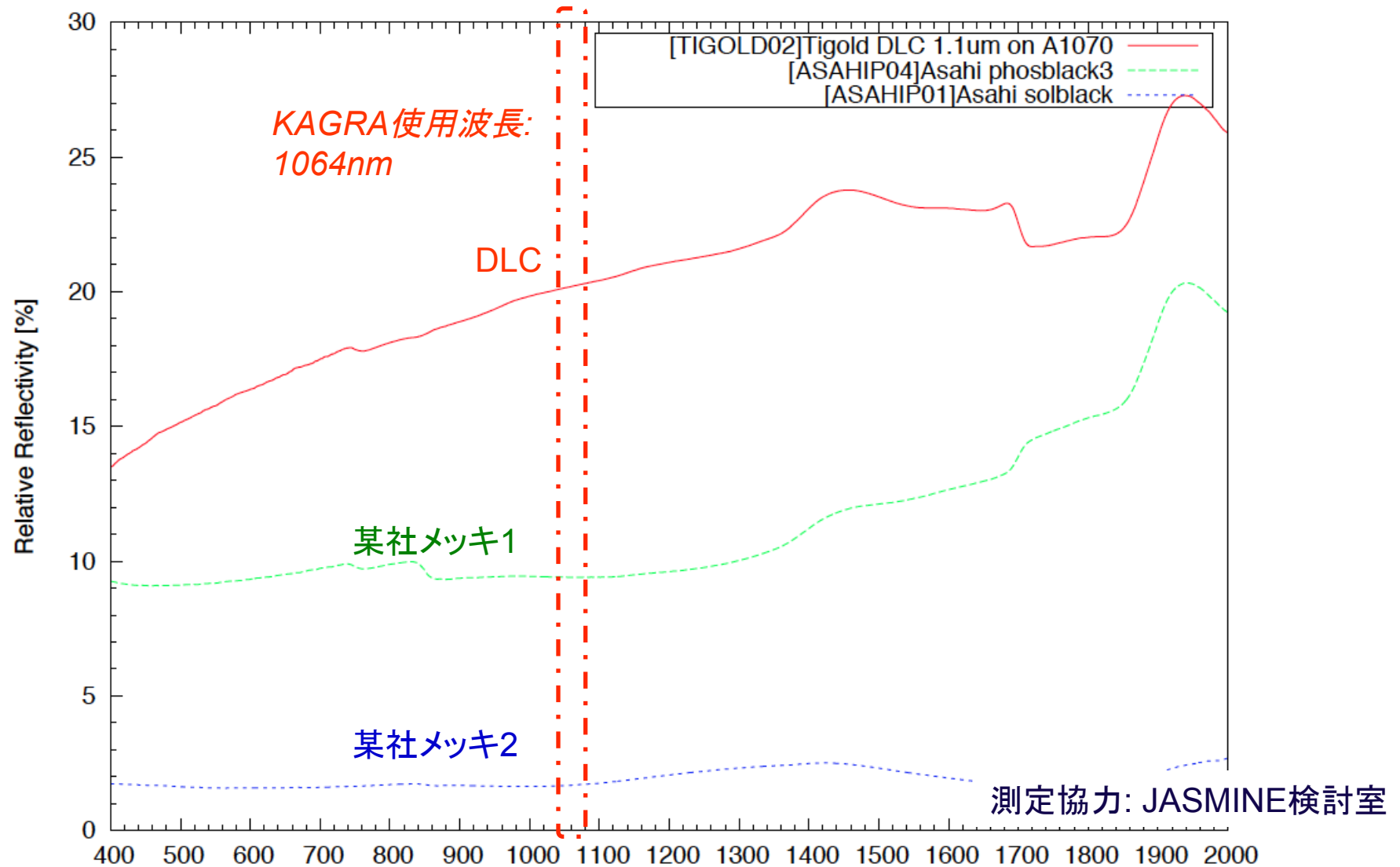
バッフルの表面

- 必要な性能
 - ◆ できるだけ黒いこと
 - ◆ 高真空 (10^{-7} Pa) を汚さないこと
 - ベーキングにも耐える事 (百数十度)
 - ◆ 場所によっては耐冷却性 (20K)
 - ◆ 場所によっては耐熱性 (入力100Wクラス)
- 検証実験中
 - ◆ 半球反射率、散乱角度分布→場所: NAOJ
 - ◆ 耐真空性、耐冷却性→場所: KEK
 - ◆ など

検討中の素材

- ◆ Diamond-like Carbon (DLC)
 - TAMA300 (KAGRA前哨機) で使用
 - 耐真空、耐冷却確認済み
 - 散乱少ない (下地による)
 - 難点: 反射率が高い (~40%)、大型のものを処理困難
- ◆ メッキ類
 - 反射率低いものあり (数%@1064nm)
 - 大型表面を処理可能なものあり
 - 光学特性などを測定中 (天文台内の他プロジェクトのご厚意で装置をお借りしている)
 - 耐真空などをKEKや宇宙線研で確認予定

サンプル半球反射率 (8度)



Diamond-like Carbon (DLC)

コーティングの厚みや下地の状態によってさまざま変わるが、一例として。

R. Takahashi, Y. Saito et al., Vacuum 73, 145 (2004)

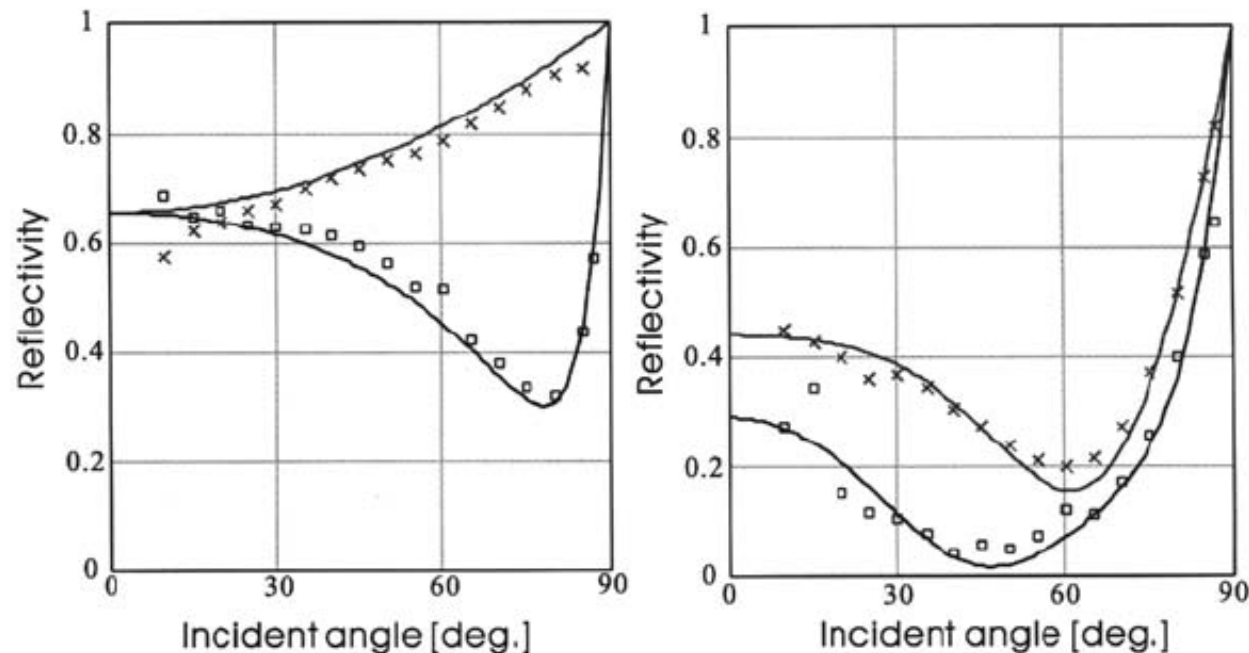


Fig. 3. Measured reflectivities of SS-ECB surfaces without coating (left) and with a DLC coating (right) for Nd:YAG laser ($\lambda = 1064$ nm) light. The measured energy reflectivities are indicated by \times for s-polarization and \square for p-polarization. The solid lines show the fitted theoretical equations.

耐真空 (脱ガス)

都丸, 真空 vol.48, 301 (2005)

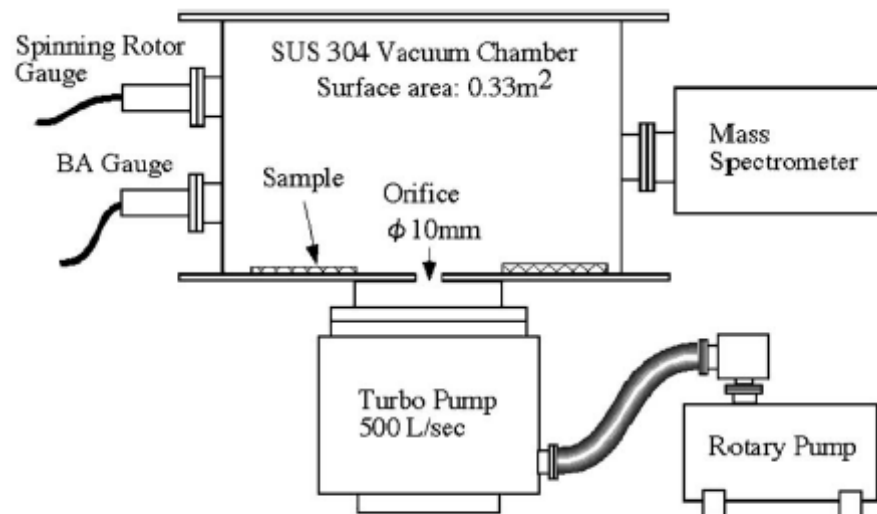
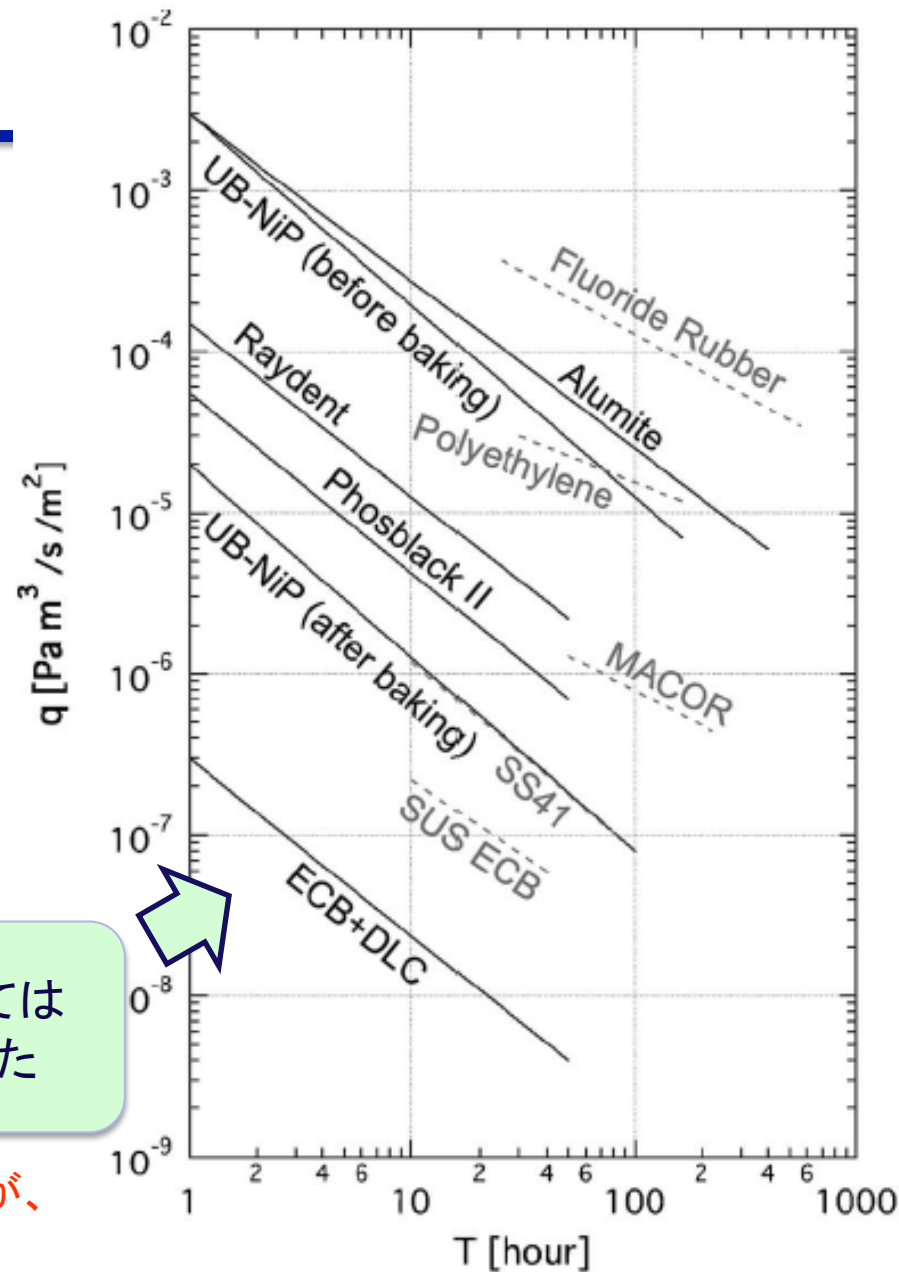


Fig. 2 Measurement apparatus for the orifice method.

DLCは下地の処理によっては脱ガス性能がすぐれていた



真空中でバブル表面が壊れないこと、も重要だが、脱ガスで光学素子が汚染されないことも重要。

まとめ

- 大型重力波望遠鏡KAGRA
 - ◆ 2017年～本格稼動
 - ◆ 世界初の重力波検出をめざす
- 散乱光対策
 - ◆ 散乱光による雑音がKAGRAの性能を落とさないようにする目的。
 - ◆ 黒いだけでなく、構造的に安定かつ真空や低温環境に耐えうるもの かつ安い
 - ◆ 表面素材開発を急ピッチで行っている