LCGTによる
重力波天文学の創成

ICRRセミナー
@東京大学宇宙線研究所
平成23年12月21日
川村静児(東大宇宙線研)

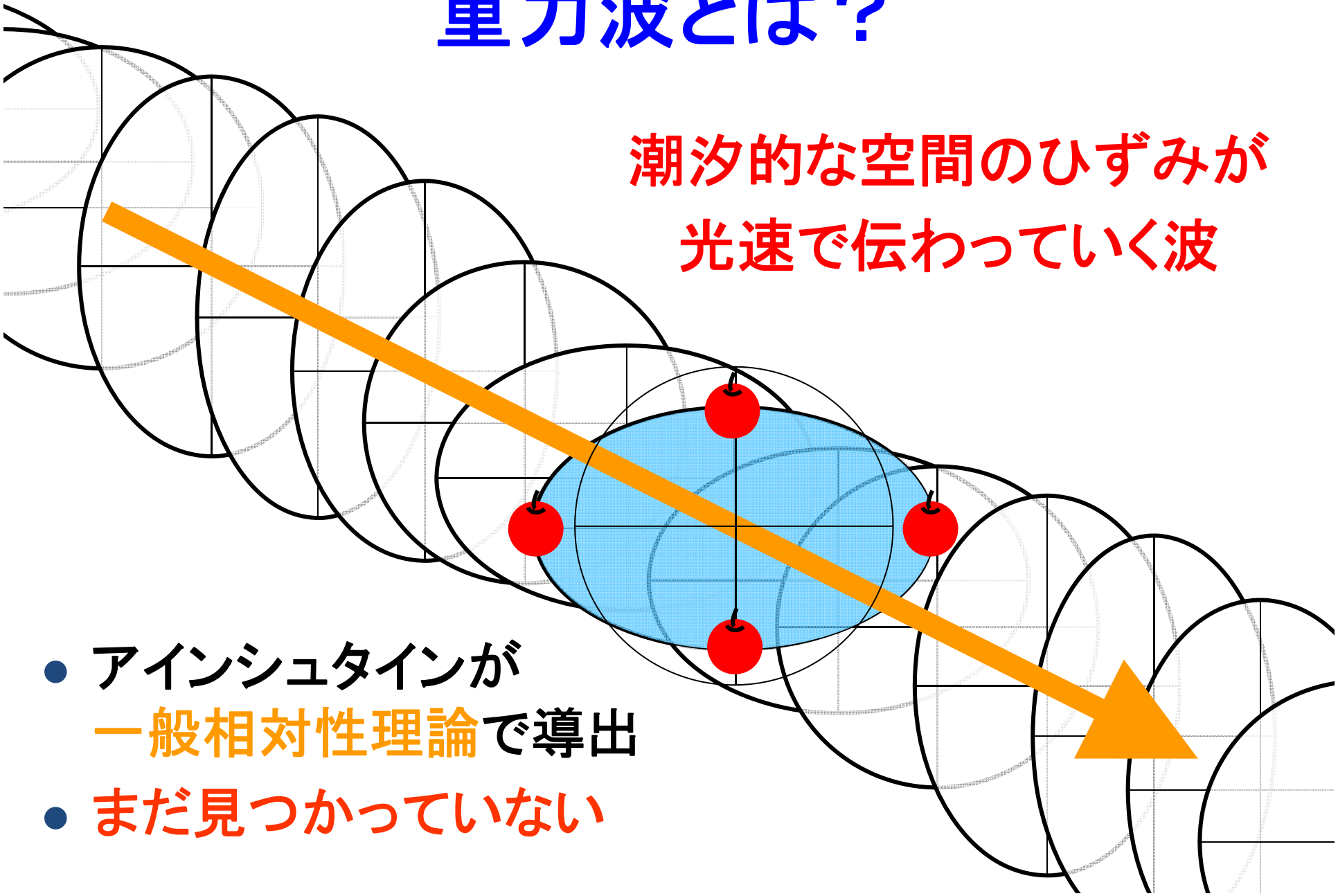
JGW-G1200775-v2

イラスト:Sora

話の内容

1. 重力波とその検出
2. 第1世代検出器と得られたサイエンス
3. LCGT
   ① 目指すサイエンス
   ② 検出器について
   ③ スケジュール・組織
4. まとめ

重力波とは？



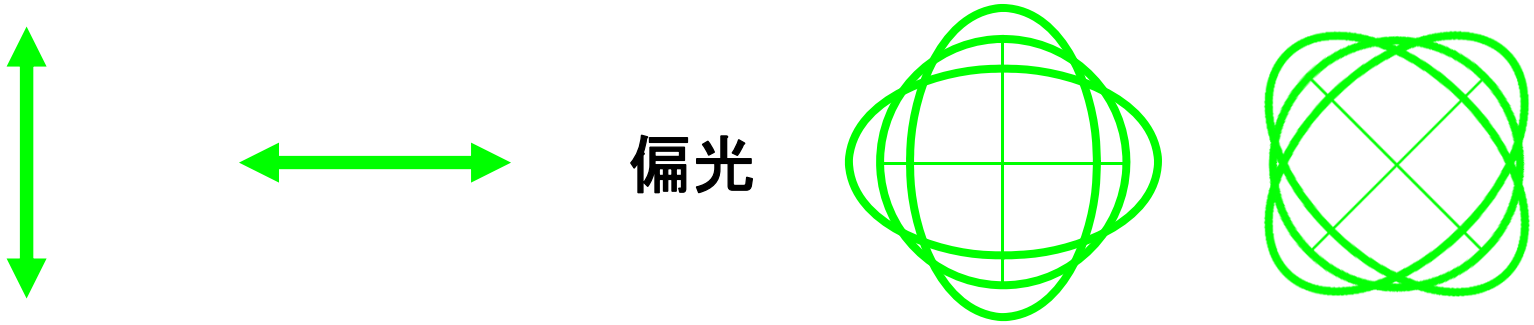
潮汐的な空間のひずみが
光速で伝わっていく波

- アインシュタインが
  一般相対性理論で導出
- まだ見つかっていない

重力波と電磁波の違い

電磁波（ベクトル）

重力波（テンソル）



電荷（双極子放射）

質量（四重極子放射）

重力波は存在する！

- テイラー、ハルスの連星パルサー（PSR1913+16）の観測
- 重力波を放出してエネルギーを失い、軌道周期が変化
- 1993年ノーベル賞

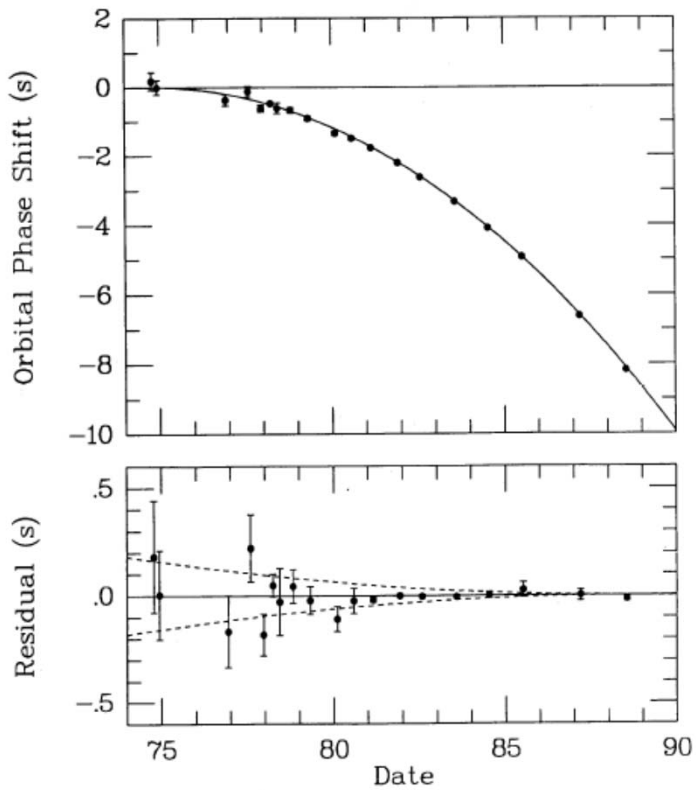


FIG. 5.—*Top:* Cumulative shift of the times of periastron passage relative to a nondissipative model in which the orbital period remains fixed at its 1974.78 value. *Bottom:* Differences between the locally measured periastron times and those expected according to the DD(1) parameter set. Dashed curves illustrate differential trends that would be expected (relative to epoch 1988.54) if the rate of orbital decay $\dot{P}_b$ were 2% larger or 2% smaller.

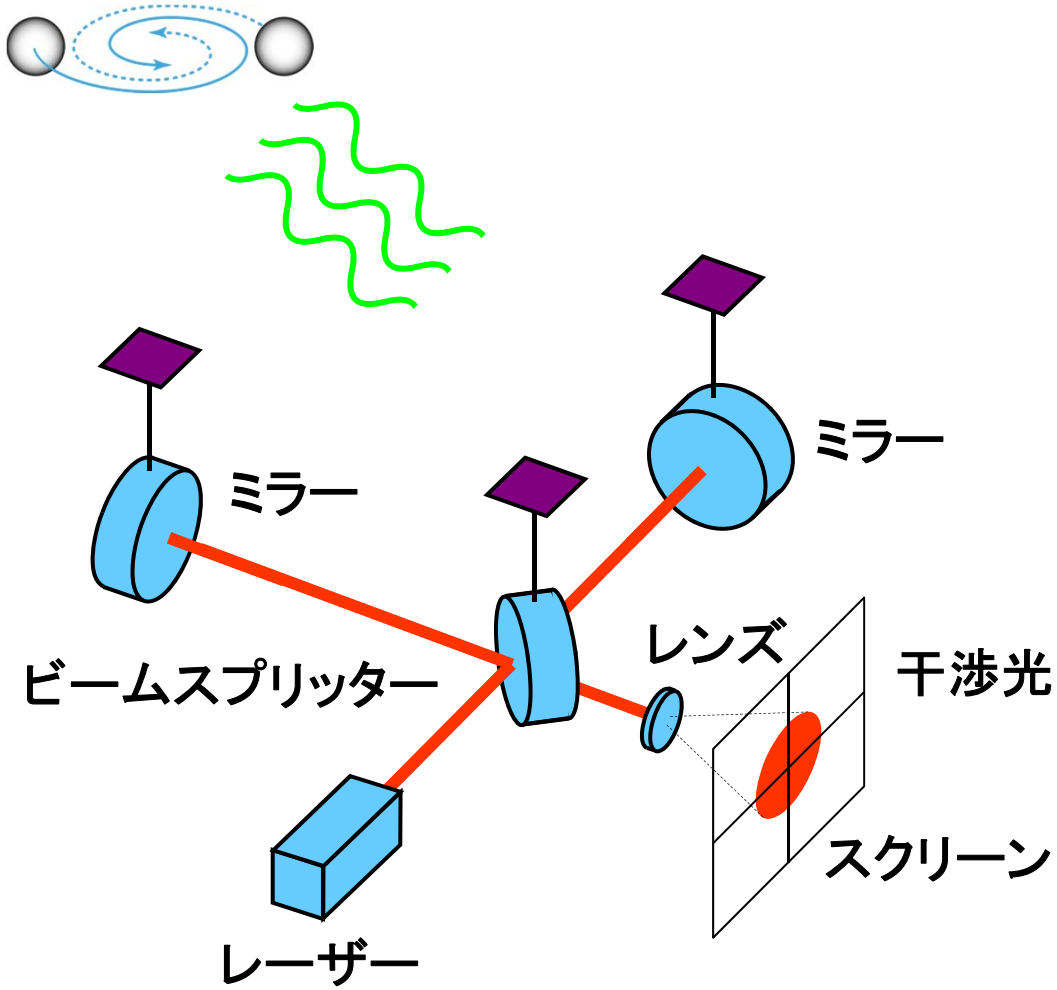
Taylor et al., ApJ.345(1989) p435

重力波を出す天体現象

- 中性子星やブラックホールの連星運動とその合体
- 超新星爆発
- パルサー
- 宇宙初期
- 未知なる天体

重力波天文学

レーザー干渉計による重力波検出



本当に測れるのか？

キャンセルして測れないのでは？？？

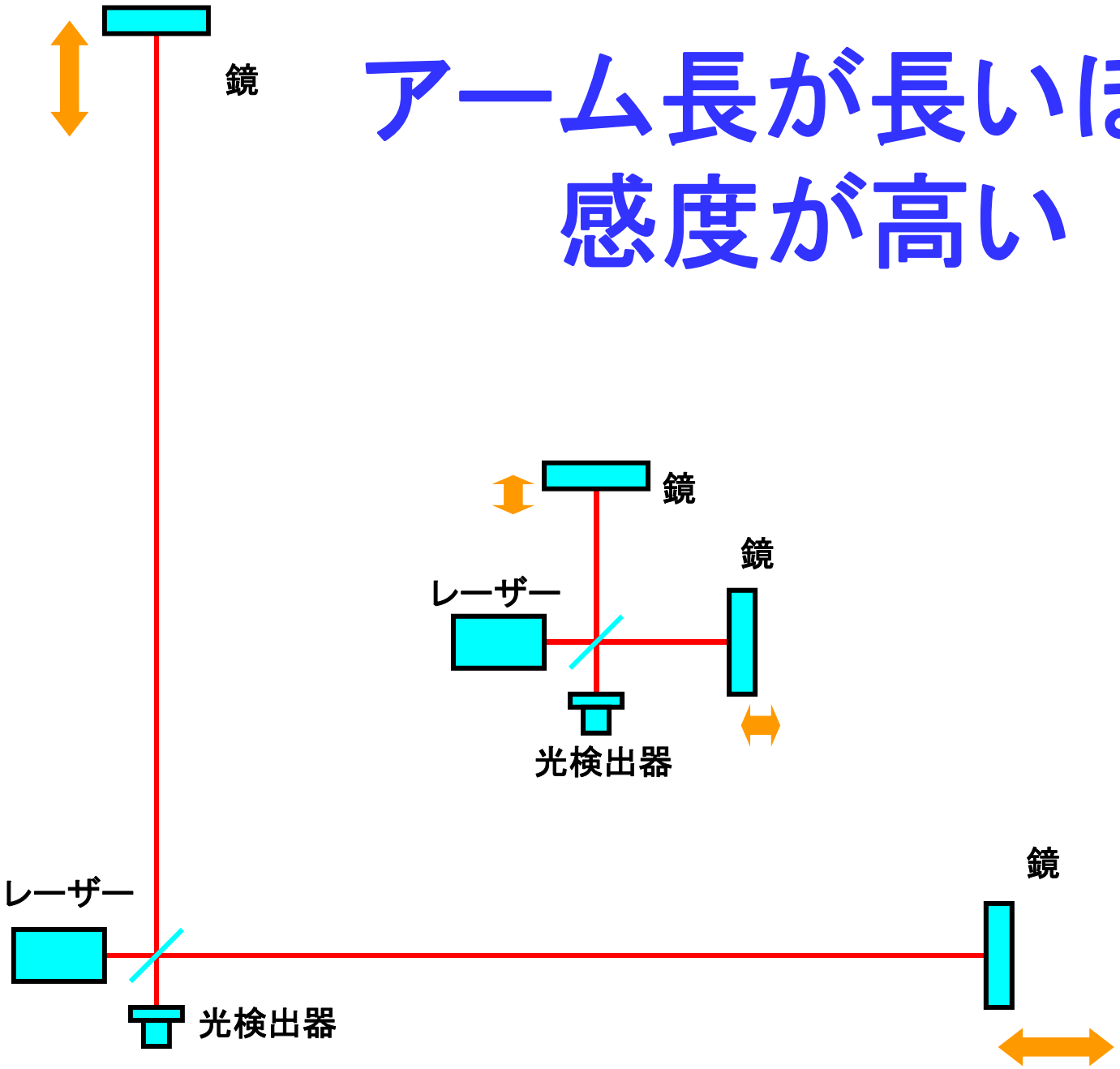
測れます！

（1）局所慣性系

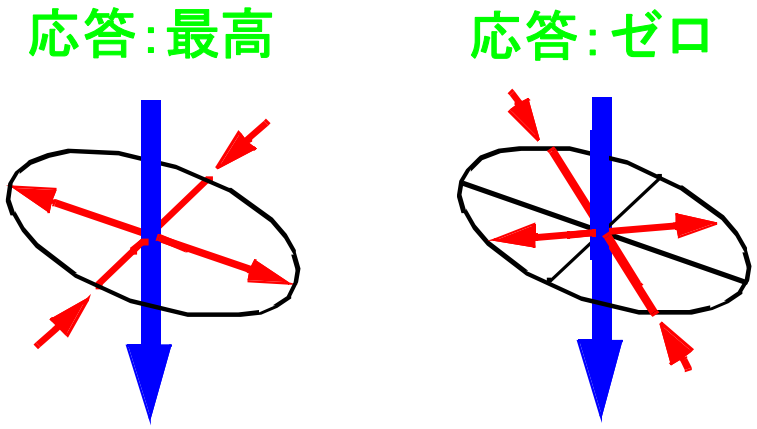
（2）TT座標系

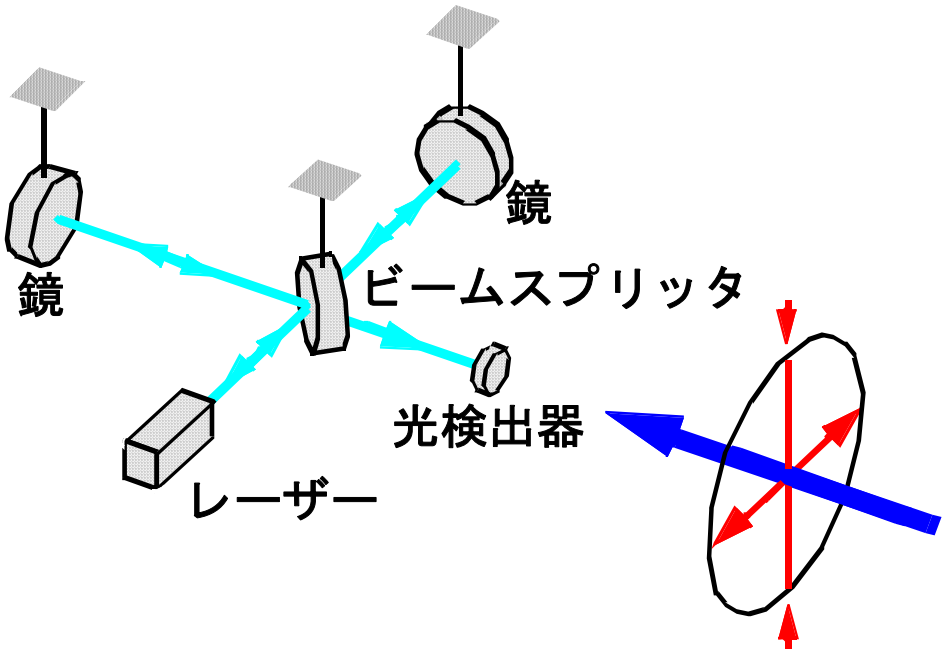
いずれの座標系においても光の伝播時間は変化する！

アーム長が長いほど感度が高い



干渉計の指向性

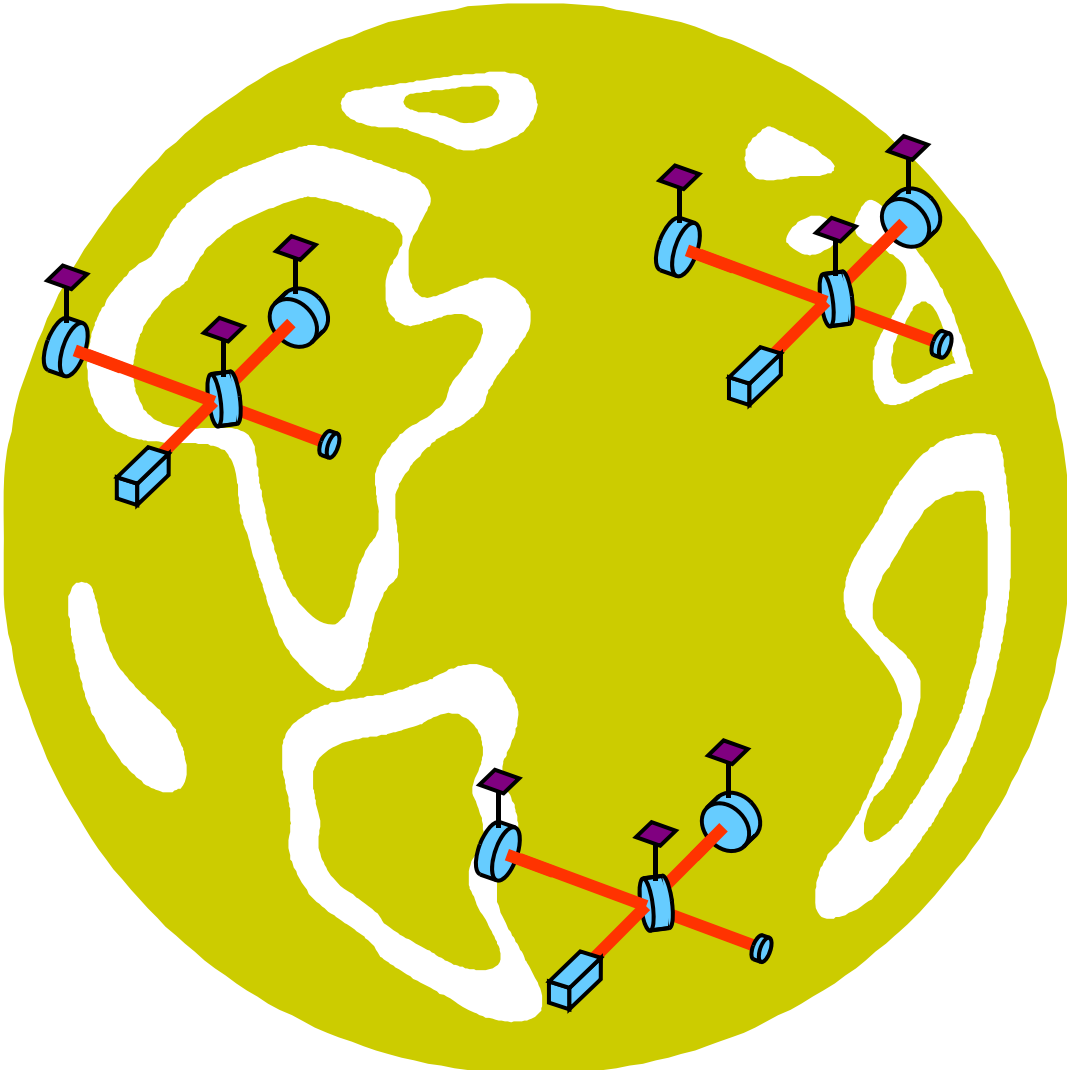




応答:最高の半分

重力波の方向や偏極によって応答が違う

重力波源の方向は？



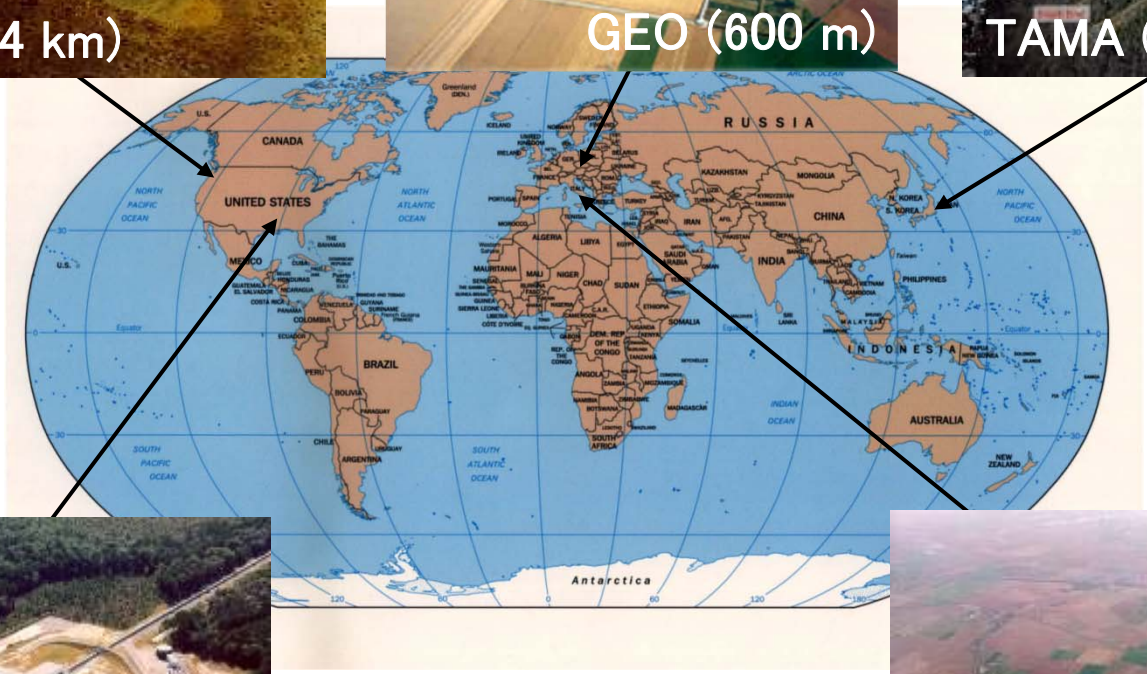
3台あれば
時間差から
方向が分かる！

世界の第1世代検出器

LIGO (4 km)

GEO (600 m)

TAMA (300 m)


CANADA
UNITED STATES
RUSSIA
CHINA
INDIA
BRAZIL
AUSTRALIA
Antarctica

LIGO (4 km)

VIRGO (3 km)

目的:
1. LCGTのためのプロトタイプ
2. 可能なら重力波検出

アーム長:300 m

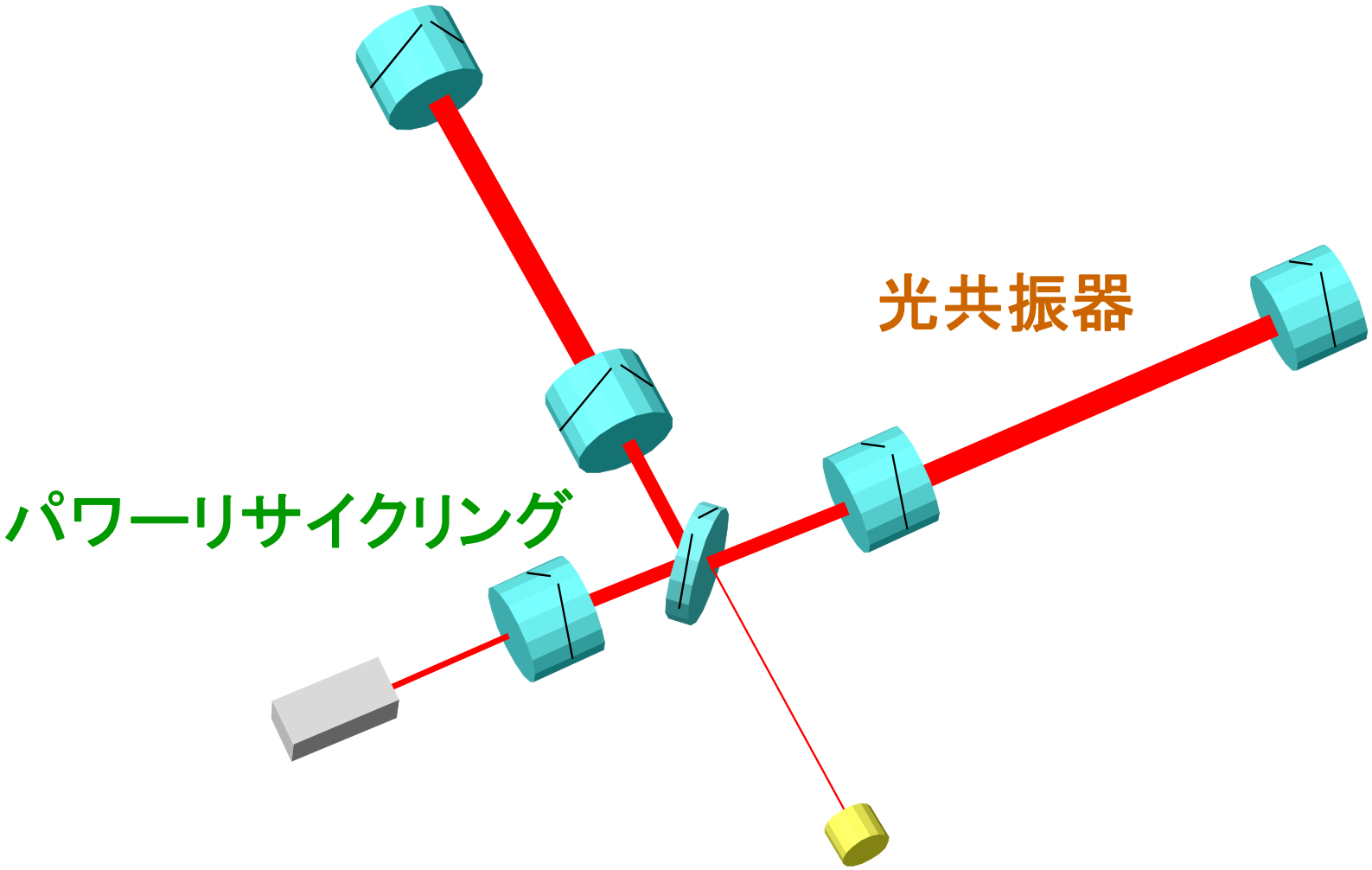
TAMA300

TAMA300

２０００年世界最高感度達成！
２年間トップ
世界最長観測（１，０００時間）

現在の感度：10^{-20}
２３万光年かなたの中性子星連星の合体からの重力波が検出可能

TAMA300の基本構成

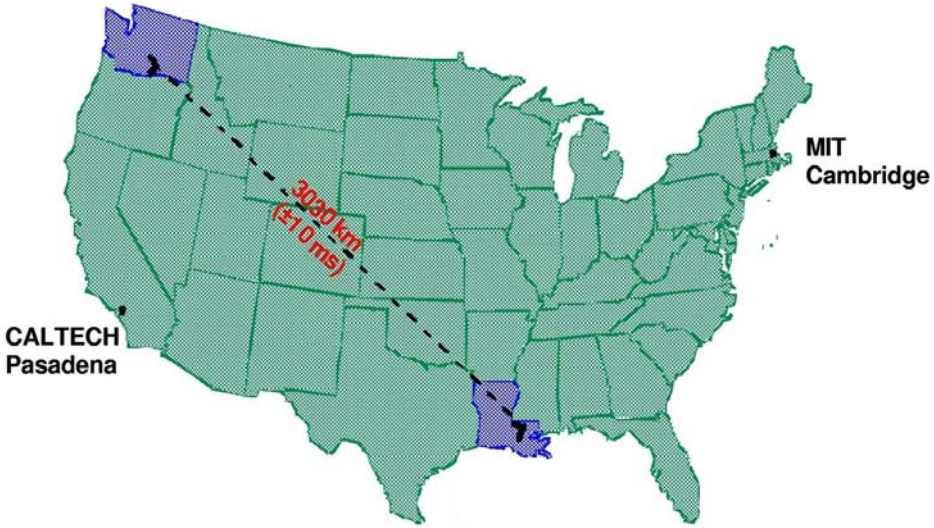


LIGO

アーム長:4 km & 2 km

Hanford, Washington

アーム長:4 km

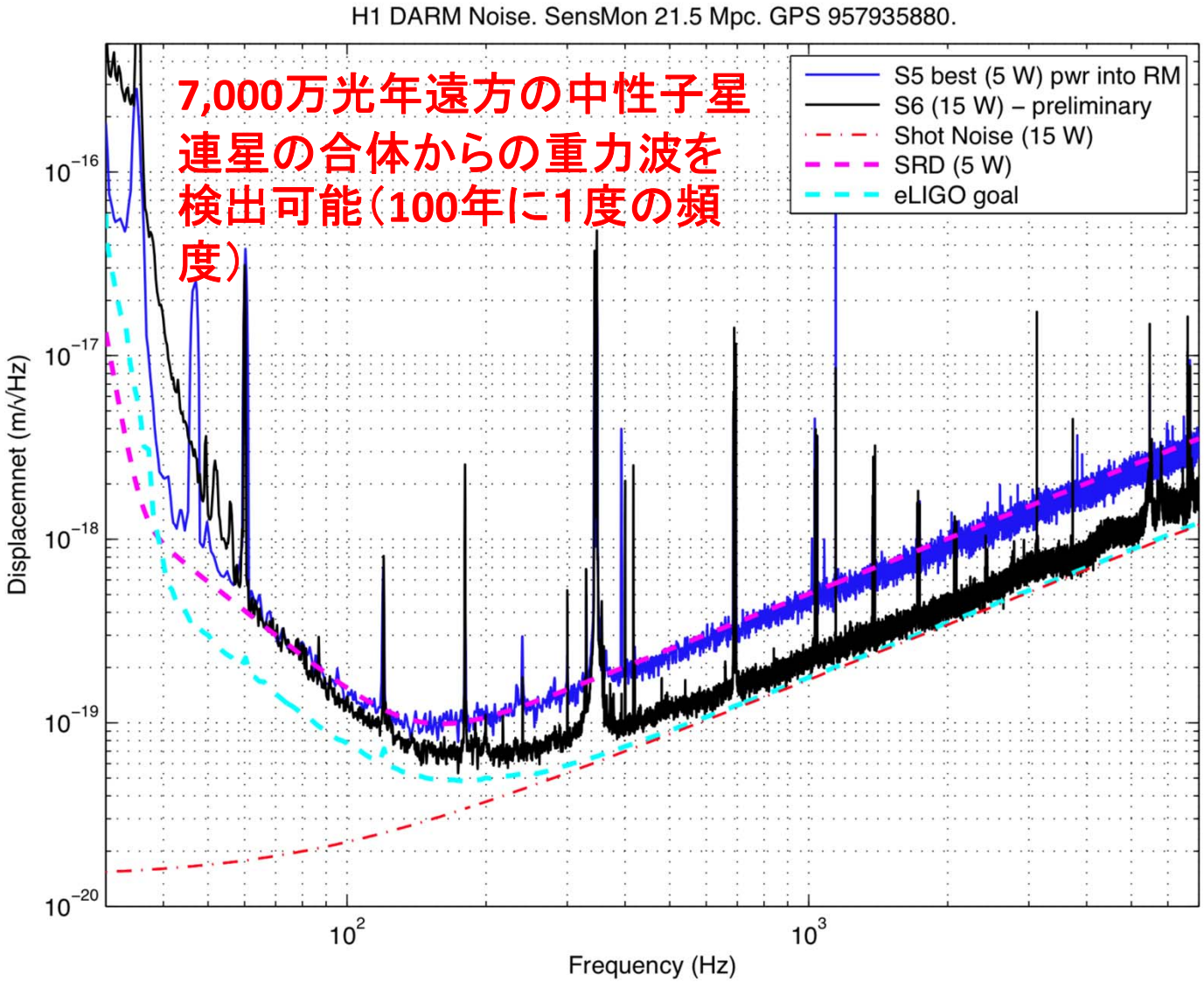


Livingston, Louisiana

LIGO

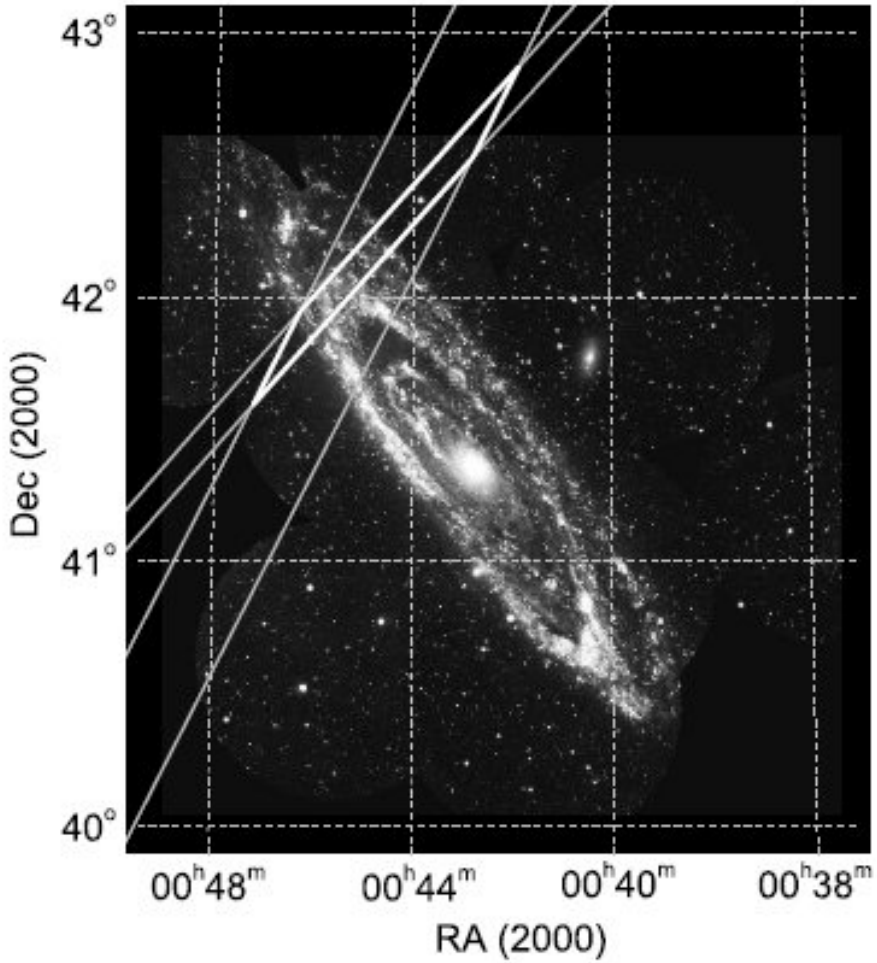
- 目的
  - Initial LIGO：基本技術の実証、可能なら重力波検出
  - Advanced LIGO：重力波の初検出
- 現状：Initial LIGOからAdvanced LIGOへの改造開始
- 総予算：約1,000億円（Advanced LIGOを含む）
- LIGO Scientific Collaboration
  - 研究機関：63
  - 研究者：565名
- NSFの強力なサポート

LIGOの感度


H1 DARM Noise. SensMon 21.5 Mpc. GPS 957935880.
7,000万光年遠方の中性子星連星の合体からの重力波を検出可能（100年に1度の頻度）
S5 best (5 W) pwr into RM
S6 (15 W) – preliminary
Shot Noise (15 W)
SRD (5 W)
eLIGO goal
Displacemnet (m/√Hz)
Frequency (Hz)
10^{-16}
10^{-17}
10^{-18}
10^{-19}
10^{-20}
10^{2}
10^{3}

GRB 070201

- GRB 070201
  - Short GRB
  - M31の腕を含む方向から到来
- 重力波検出されず
  - LIGO H1のデータ解析（180 s）
- M31におけるNS-NS、NS-BHの合体ではない
  - m1:1Ms-3Ms, m2:1Ms-40Ms
  - 99% CL
- 重力波エネルギー：7.9×10^{50} erg以下（if M31)
  - SGR（in M31）の可能性は排除しない



Abbott et al., Astrophys. J. **681** (2008) p.1419-1430

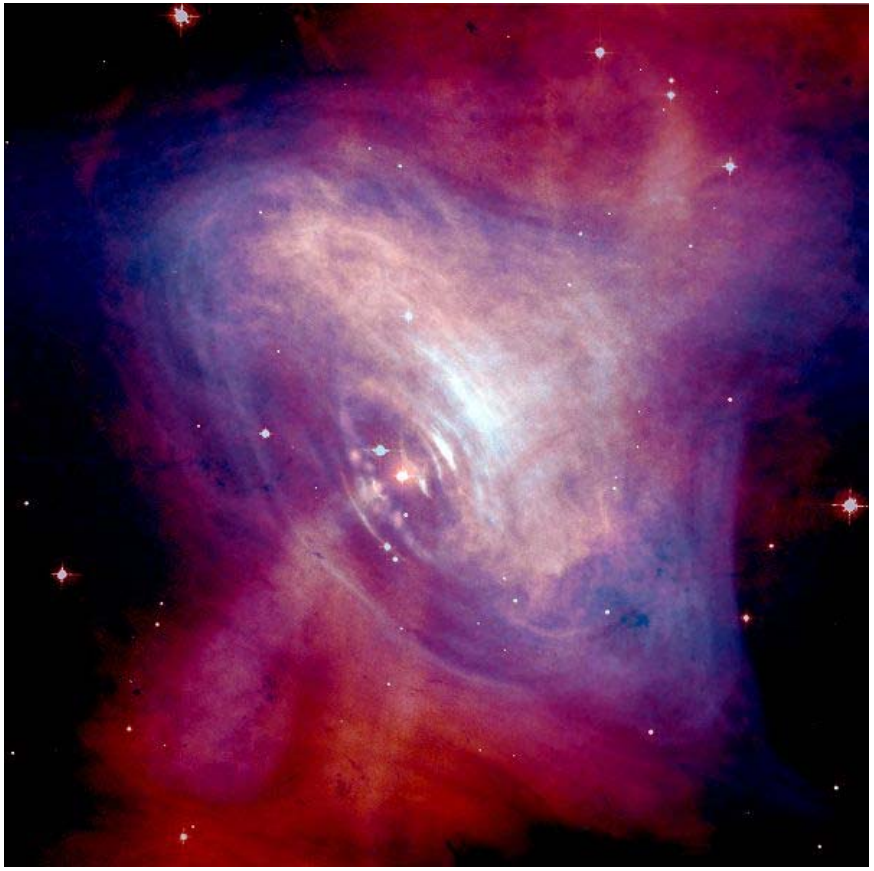
Crabパルサー

スピンダウンレートから放出される重力波の上限値が決まる

LIGOにより重力波は検出されなかった

⇩

重力波によるエネルギーの上限値はスピンダウンレートから決まる値の4%以下



Abbott B, et al., ApJ Lett., **683** (2008) 45

背景重力波

初期宇宙からの重力波に対する新しい上限をつけた

$\Omega_{GW} < 6.9 \times 10^{-6}$

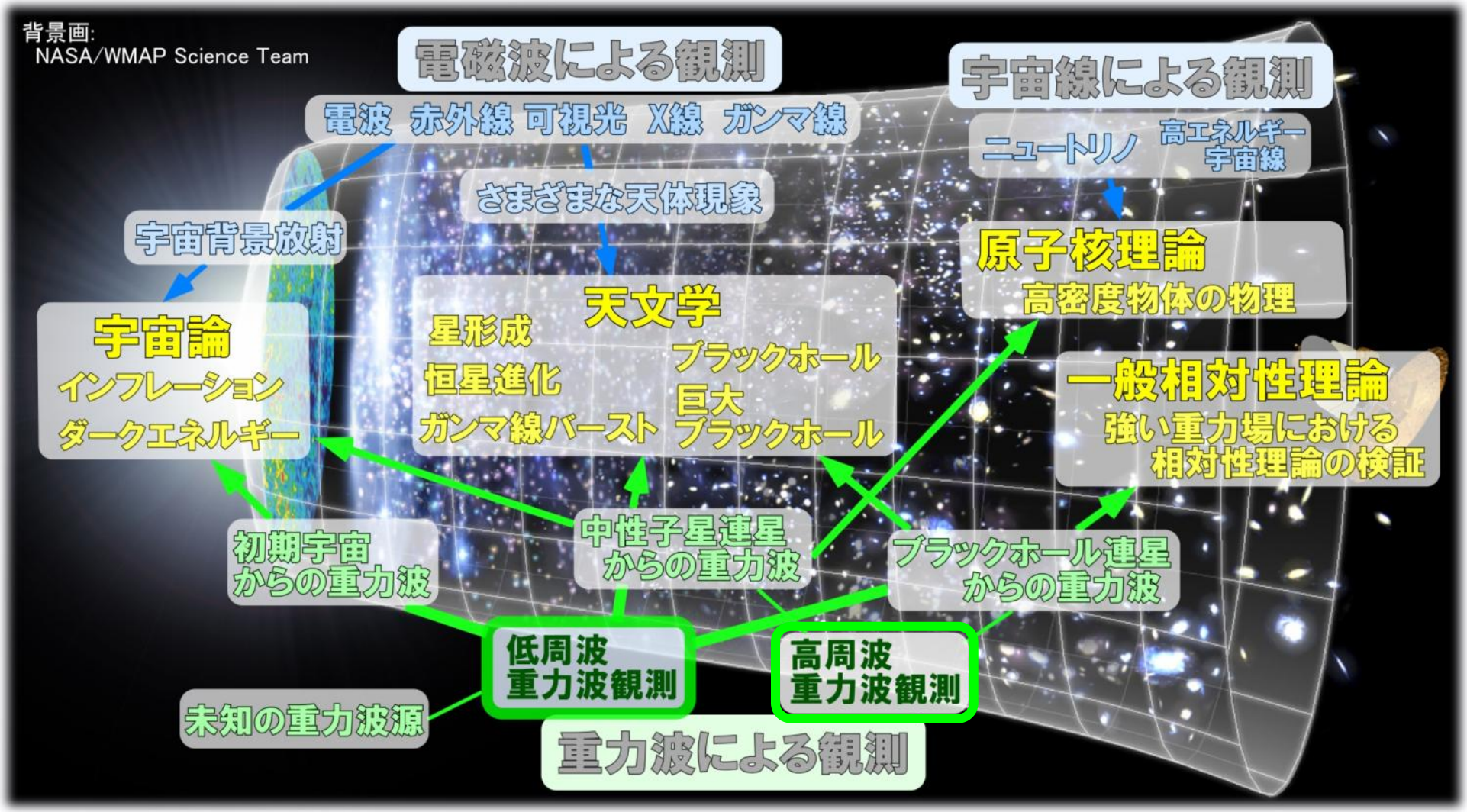
ビッグバン元素合成や宇宙マイクロ波背景輻射から得られる間接的な限界を100 Hzにおいて上回る

（超）弦理論モデルや初期宇宙進化モデルに新たな制限を付けた

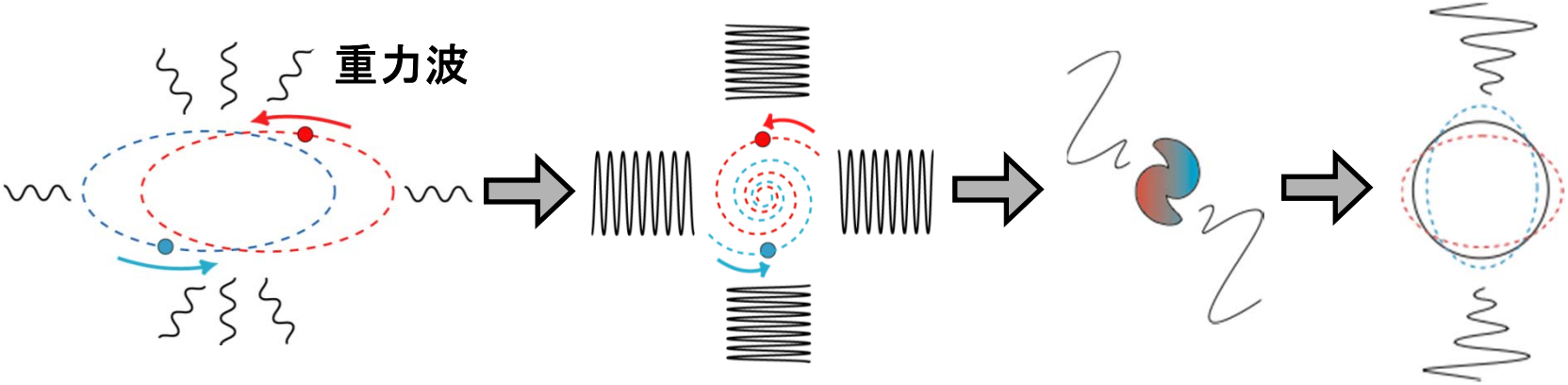
Abbott B P, et al., Nature, **460** (2009) 990

LCGT
重力波を検出し
重力波天文学を創成する

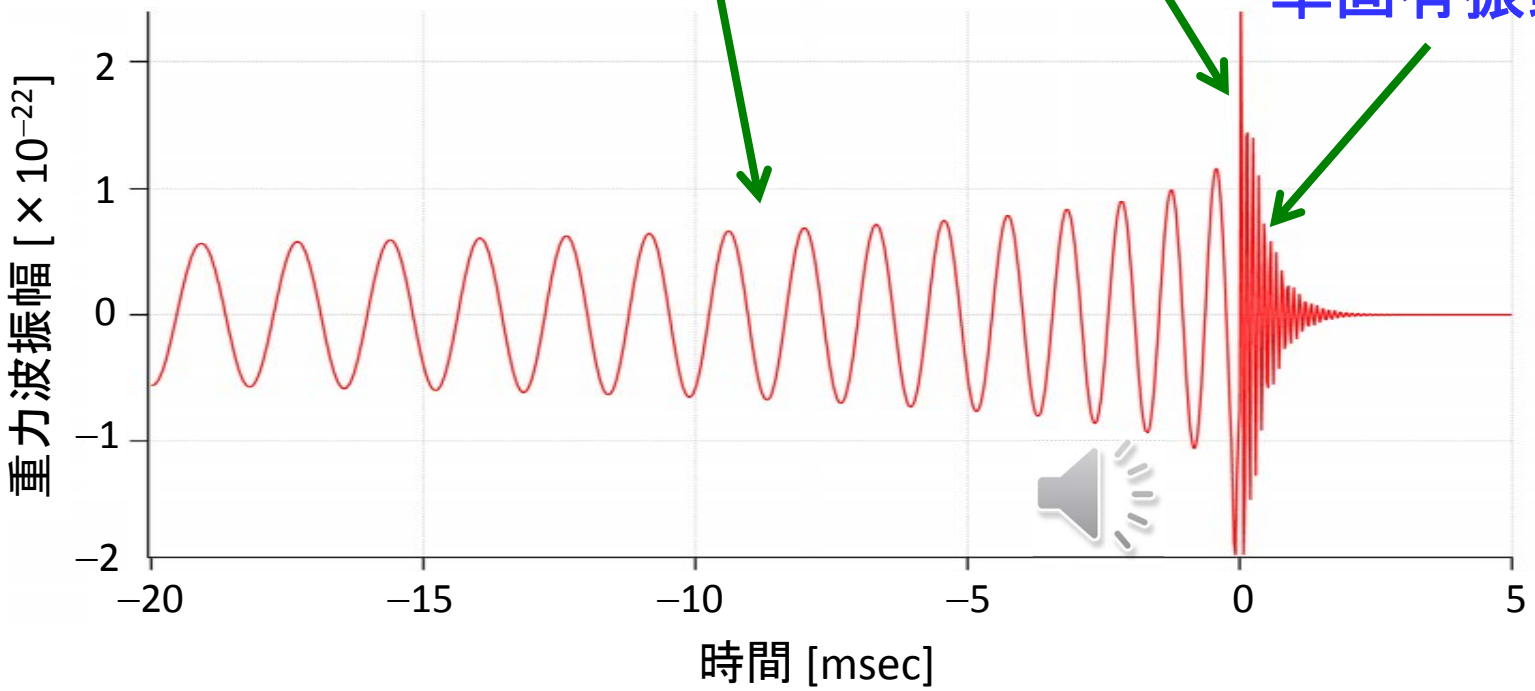
重力波天文学
（電磁波・宇宙線による観測との相補・融合）



中性子星連星の合体



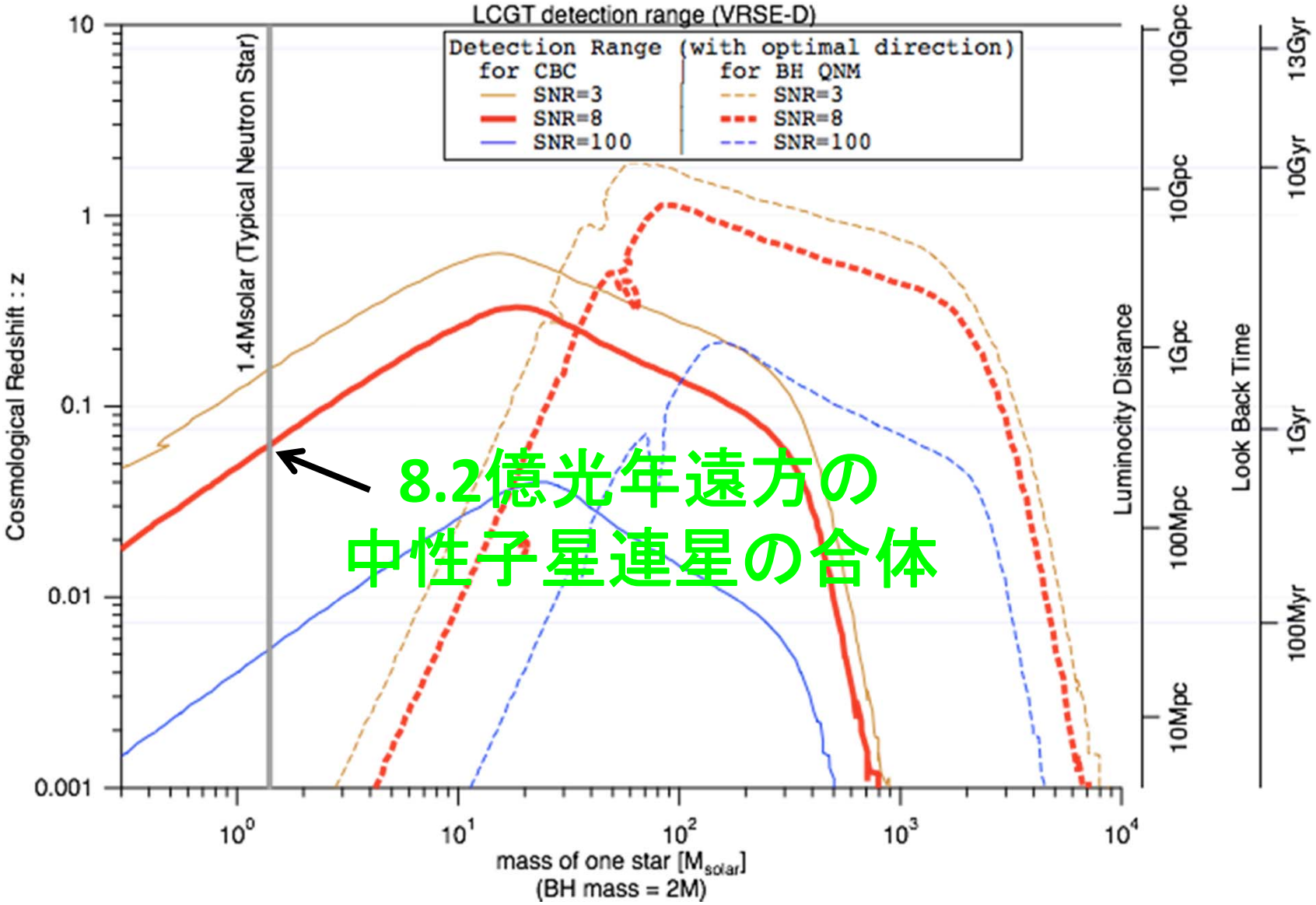
公転運動　インスパイラル　合体　ブラックホールの準固有振動



中性子星連星からの重力波検出の可能性

- どのくらい遠くまで見れるか？
- 合体はどのくらいの頻度で起こるか？

連星合体に対する感度


LCGT detection range (VRSE-D)
Detection Range (with optimal direction)
for CBC
SNR=3
SNR=8
SNR=100
for BH QNM
SNR=3
SNR=8
SNR=100
1.4Msolar (Typical Neutron Star)
Cosmological Redshift : z
10
1
0.1
0.01
0.001
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
mass of one star [M_{solar}]
(BH mass = 2M)
Luminocity Distance
100Gpc
10Gpc
1Gpc
100Mpc
10Mpc
Look Back Time
13Gyr
10Gyr
1Gyr
100Myr
8.2億光年遠方の
中性子星連星の合体

中性子星連星の合体の頻度

- これまでに見つかった中性子星連星とその予測寿命より推測

銀河系合体率: $118^{+174}_{-79}\,\mathrm{Myr}^{-1}$ (Kim ('08), Lorimer ('08))

名前	パルス周期(ms)	公転周期(hr)	離心率	寿命(Gyr)	
B1913+16[a]	59.03	7.75	0.617	0.37	
B1534+12[a]	37.90	10.10	0.274	2.93	
J0737-3039A[a]	22.70	2.45	0.088	0.23	両方パルサーとして観測
J1756-2251[a]	28.46	7.67	0.181	2.03	
J1906+0746[b]	144.14	3.98	0.085	0.082	2006年に見つかったもの
J2127+11C[bcd]	32.76	8.047	0.681	0.32	

(Lorimer, LRR, 11, (2008), 8)

中性子星連星からの重力波検出の可能性

LCGTのイベントレート：

$$9.8^{+14}_{-6.6}\,\mathrm{yr}^{-1}$$

系統誤差は大きいが、１年に1イベント以上はあると期待できる

ショートGRBの正体？

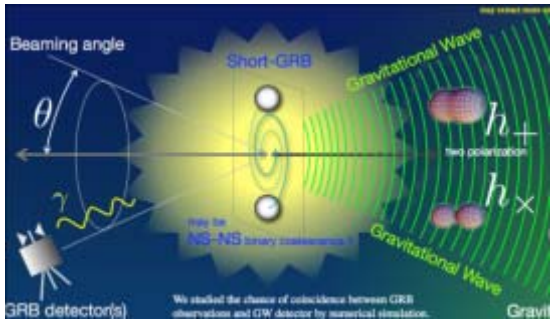
ショートGRBと重力波の同方向・同時観測

↓

ショートGRB＝中性子星連星の合体

相互観測

If　ショートGRB＝中性子星連星の合体



GRBの検出

アフターグローの観測

予報？

時刻の提供

予報

重力波のリアルタイム検出

詳細なデータ解析

ブラックホール連星の合体

- 例えば太陽質量の20倍程度のブラックホール連星に対して、65億光年遠方までの検出を目指す
- ブラックホール連星の合体の頻度についてはまだよく分かっていないが、1～30個/年という予測もある

ブラックホールの準固有振動

- 連星合体でブラックホールが生成されたり、ブラックホールに小さな天体が落ち込んだりする際には、特徴的な減衰を含むブラックホールの準固有振動が起こる
- 100億光年遠方で起こる太陽質量の100～300倍程度のブラックホールの準固有振動を検出することを目指す

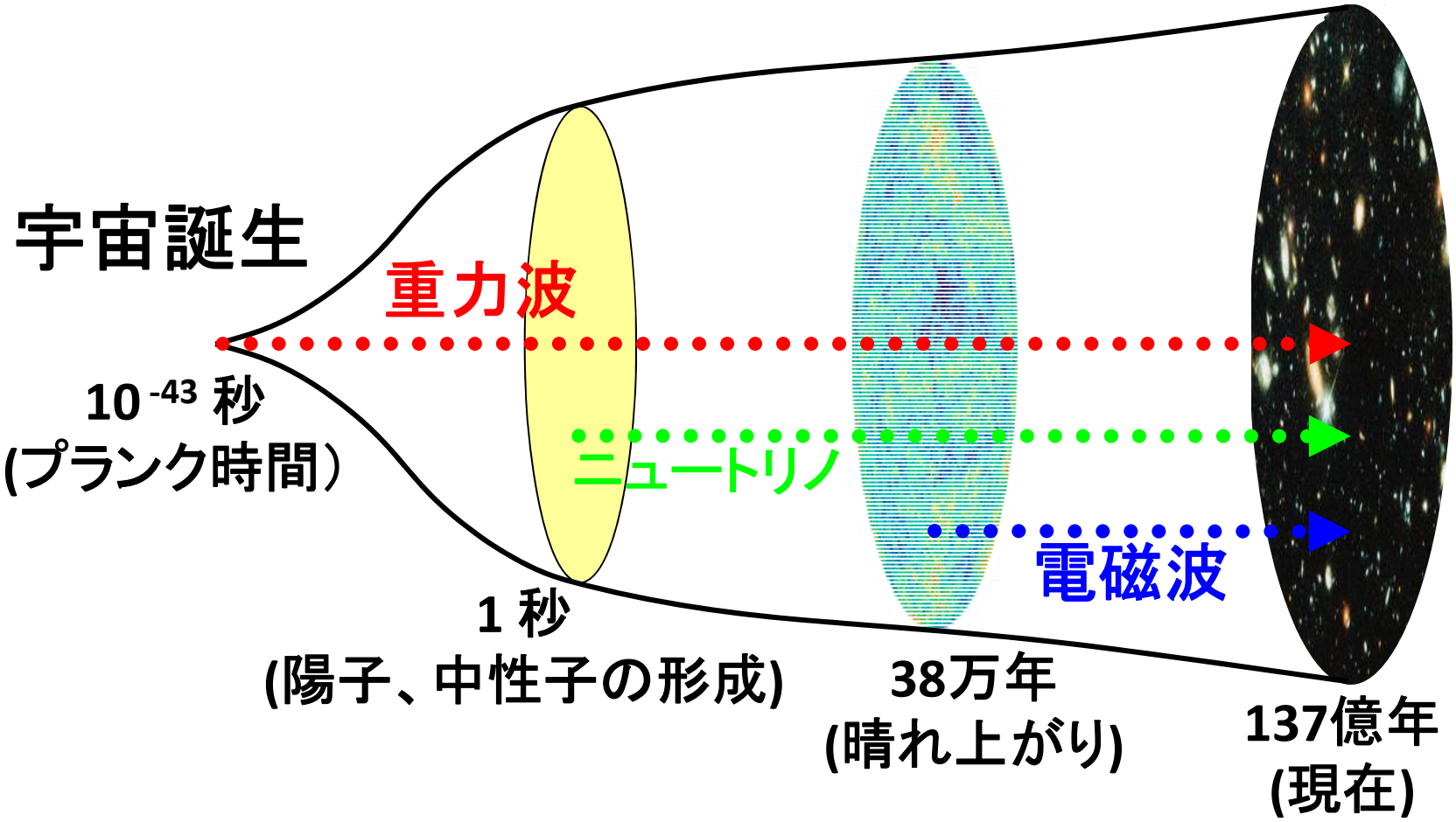
超新星爆発

- 周波数は100 Hz～1 kHz
- 約330万光年遠方で起こる超新星爆発からの重力波の検出を目指す
- 局所銀河群のかなりの部分をカバー
- 数年に1度程度の検出を期待
- スーパーカミオカンデとの同時観測が非常に重要

パルサー

- かにパルサーやベラパルサーなどはスピンダウンレートから求まる重力波振幅の上限値が大きいため、検出の可能性あり
- ビームが地球の方向を向いていないため、電波などでは見つかっていないパルサーからの重力波が検出されるかもしれない

初期宇宙


宇宙誕生
重力波
10 -43 秒
(プランク時間)
ニュートリノ
電磁波
1 秒
(陽子、中性子の形成)
38万年
(晴れ上がり)
137億年
(現在)

初期宇宙

- 標準モデルで予測されるインフレーションから発生する重力波の検出は期待できない
- しかし、初期宇宙に起こった相転移や、その化石である位相的欠陥の運動に伴って生成した重力波など、思わぬ起源の重力波が検出される可能性はある

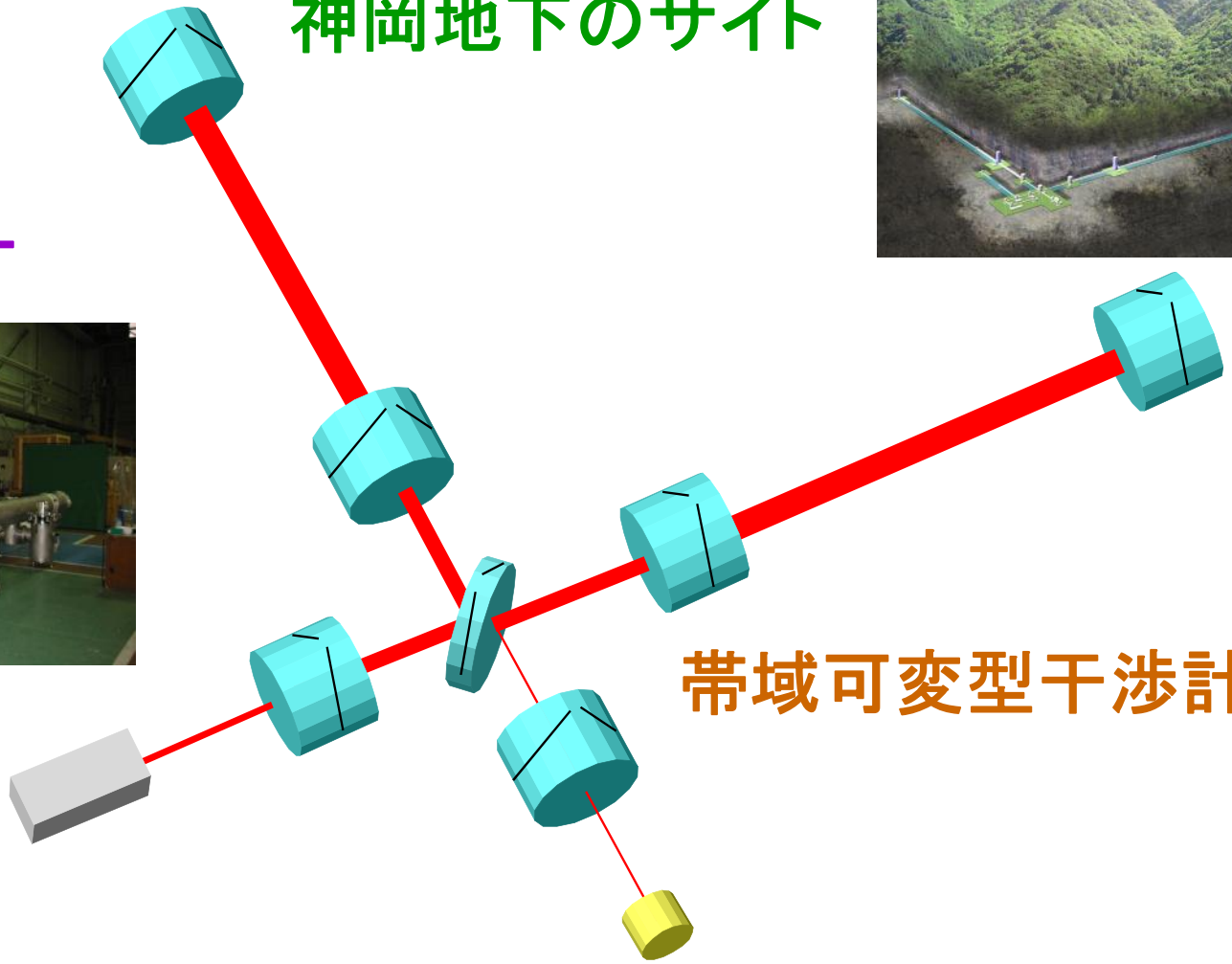
未知なる天体

- これまでの天文学の歴史においては、新しい窓が開かれると新しい天体現象が見つかることがしばしば起こってきた
- したがって、重力波においても、現在の知識では想像すらできないような全く新しい天体現象がLCGTによって見つかる可能性も十分にある

LCGTの基本構成

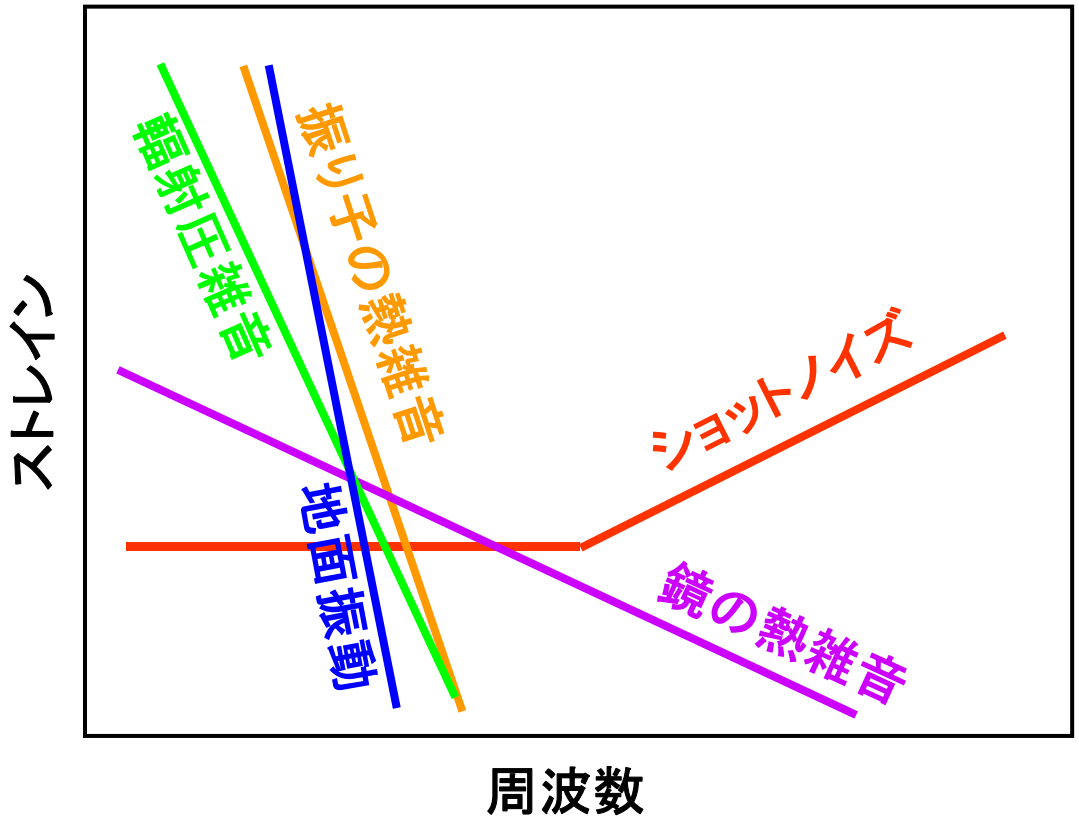
神岡地下のサイト

低温ミラー

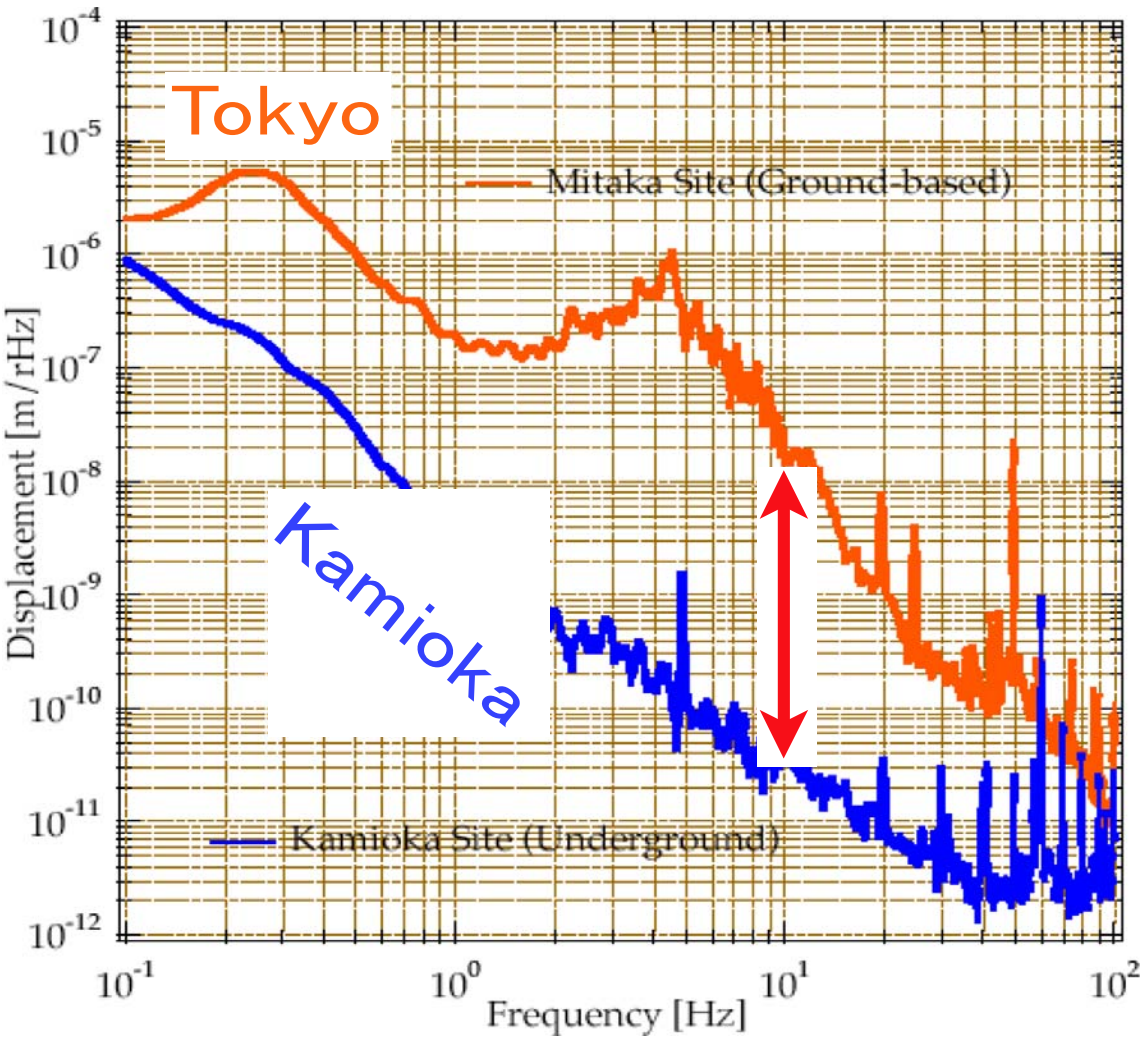


帯域可変型干渉計

干渉計の感度を決める雑音源



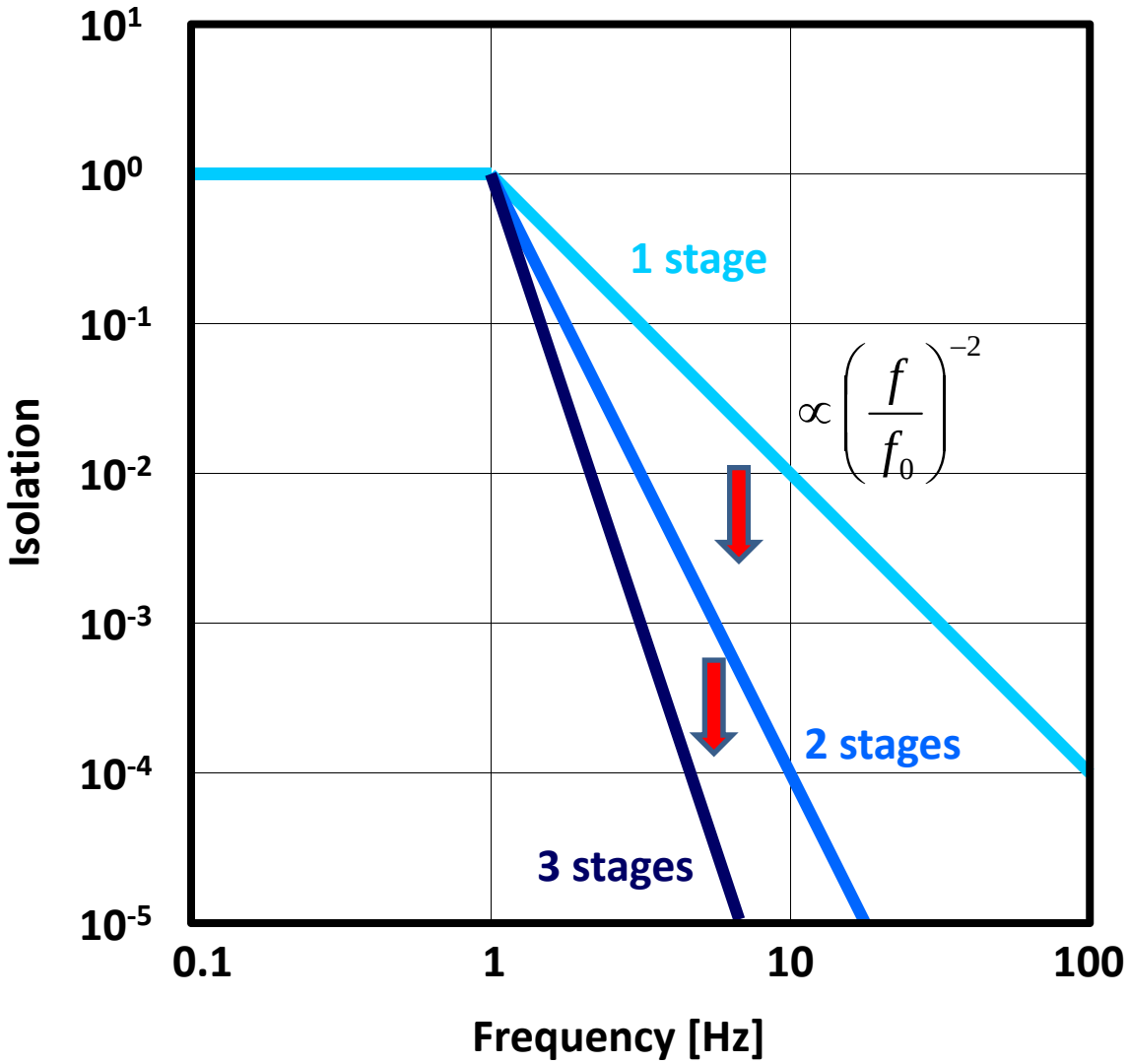
神岡地下と三鷹の地面振動

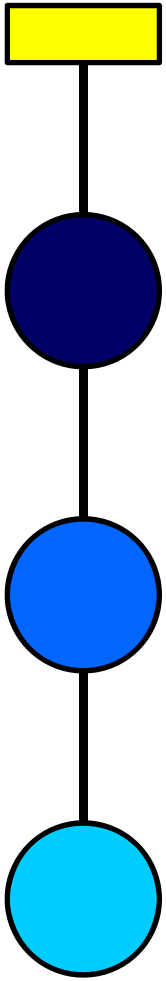


Amplitude of seismic motion

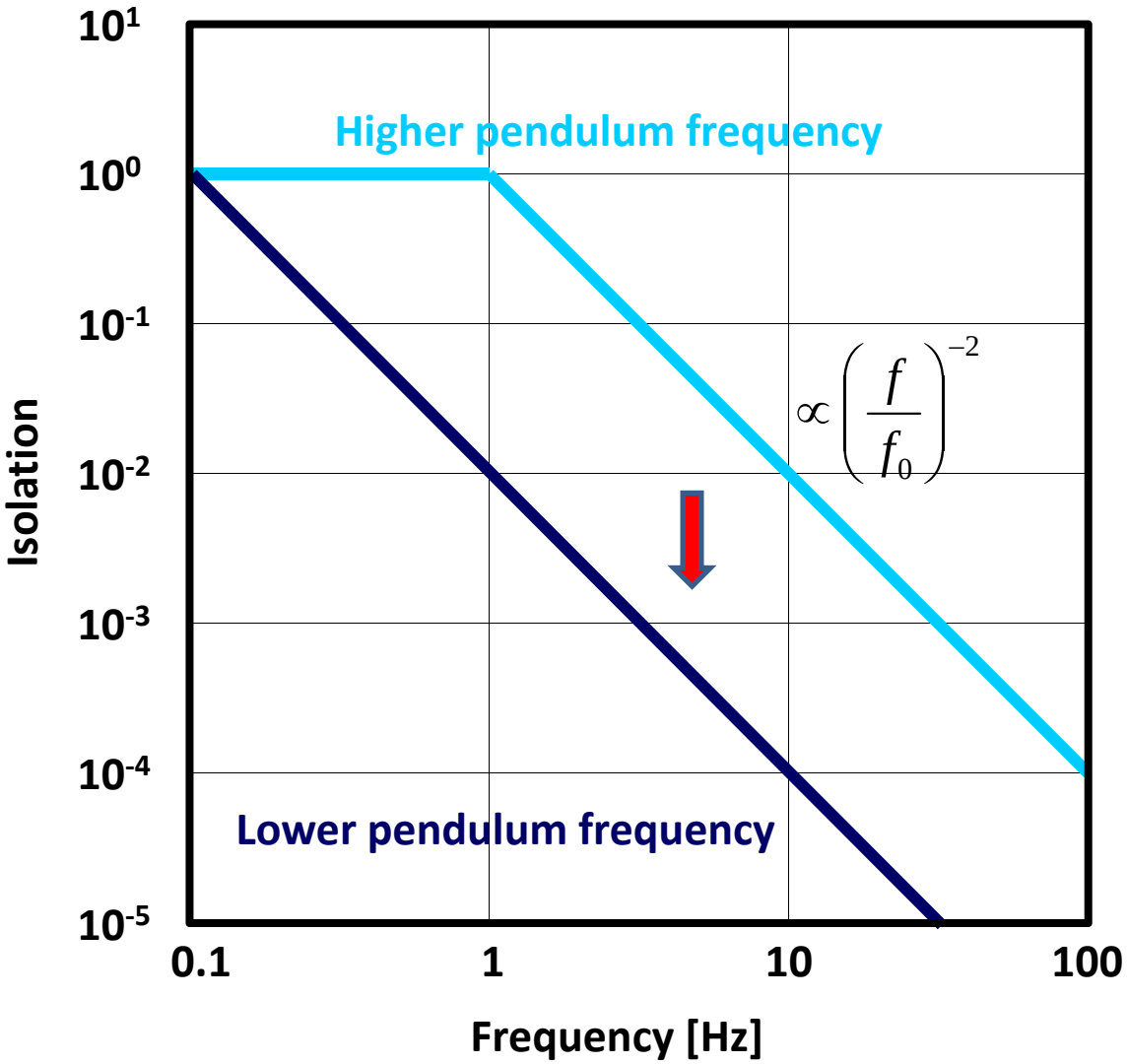
防振（1）

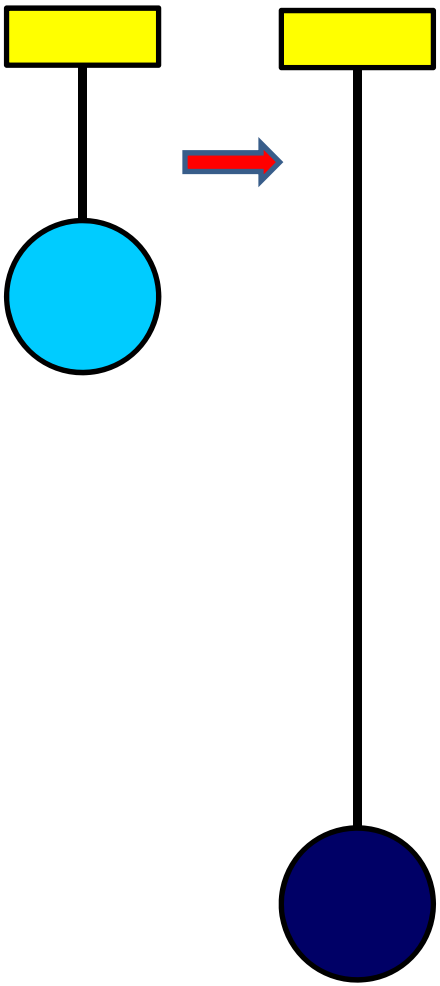
地面振動 ×


10^{1}
10^{0}
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
Isolation
0.1
1
10
100
Frequency [Hz]
1 stage
2 stages
3 stages
$\propto \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-2}$



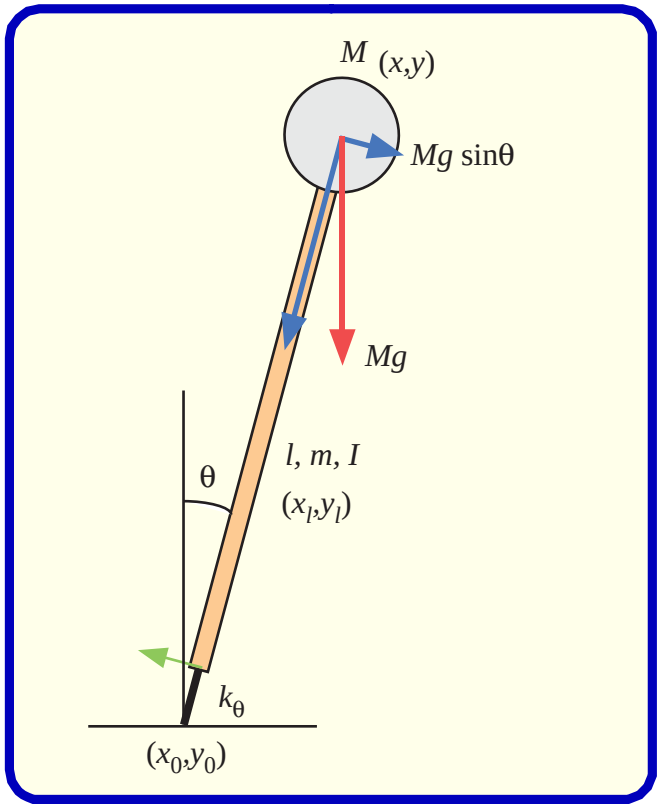
防振（2）

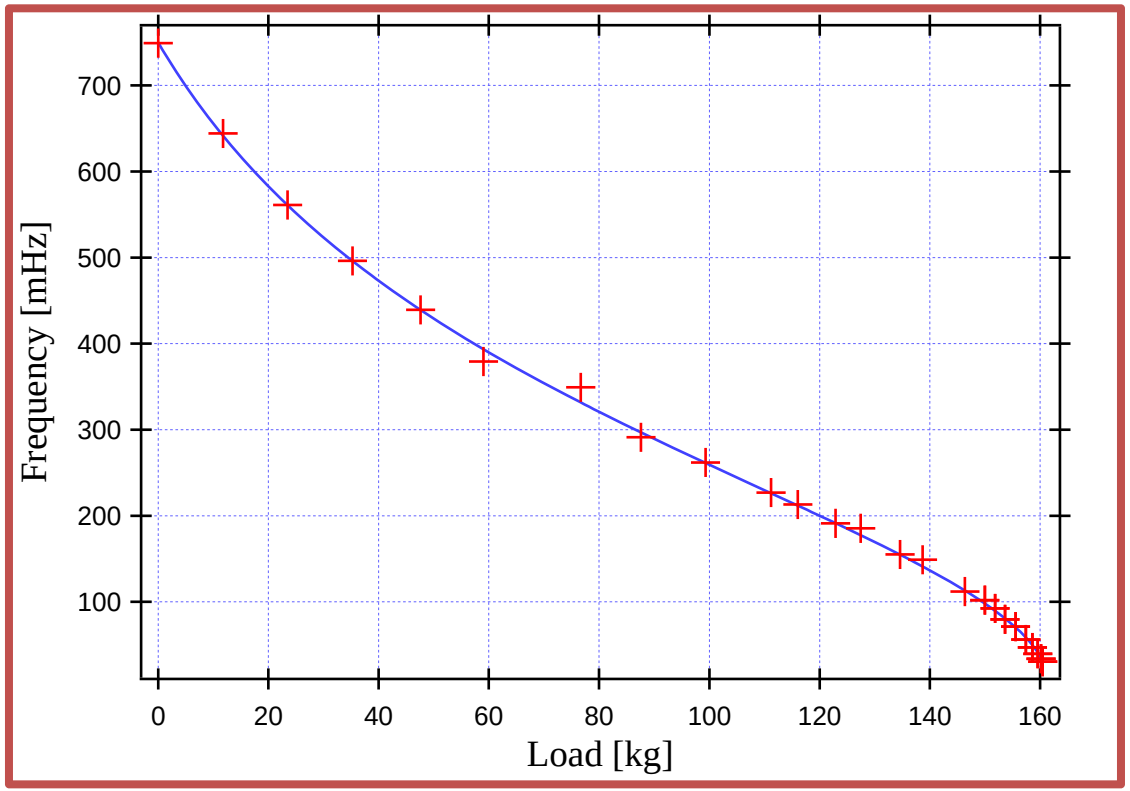

Higher pendulum frequency
Lower pendulum frequency
$\propto \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-2}$
Isolation
10^{1}
10^{0}
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
0.1
1
10
100
Frequency [Hz]



倒立振り子

復元力= 金属のバネ力+ 重力の反バネ力
⇒ 共振周波数の低減





垂直方向の防振

垂直方向の揺れがビーム方向の揺れにカップル

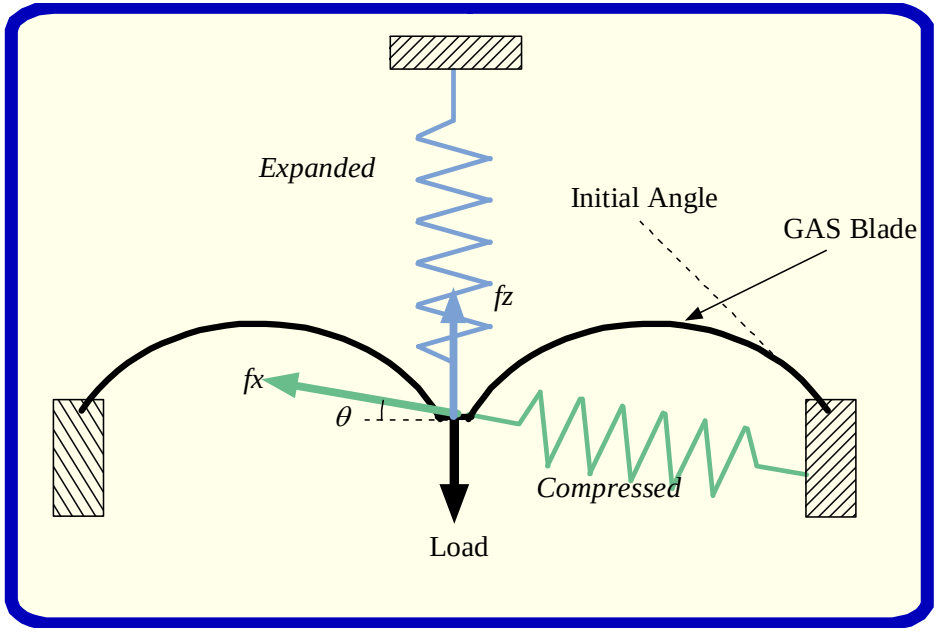
- 地球の曲率
- 機械系の非対称性
- トンネルの傾き（排水のため）

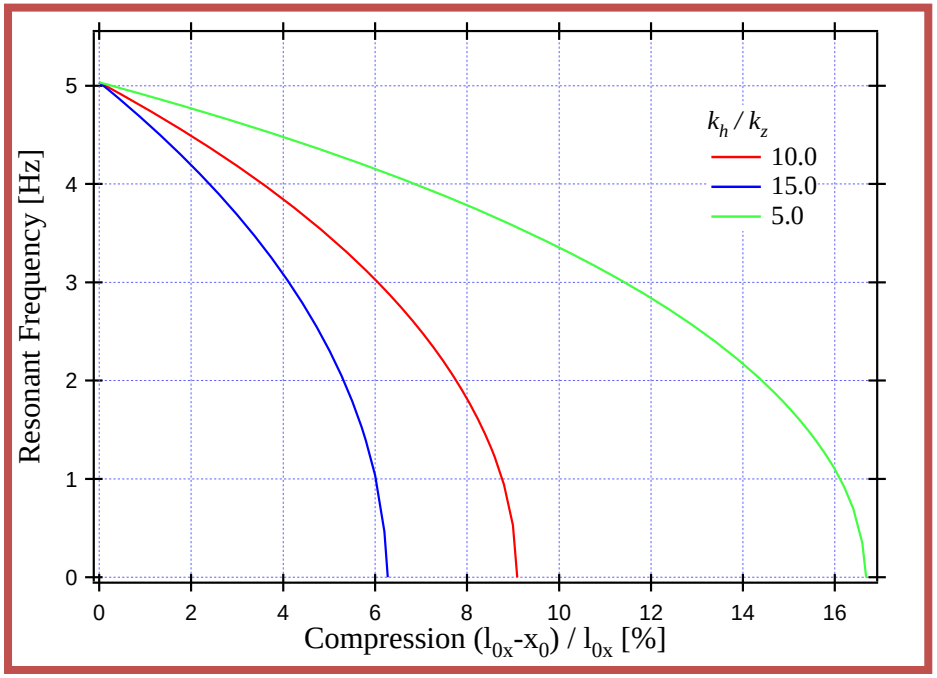
→ 垂直方向の防振も必要

Geometric Anti-Spring (GAS) Filter

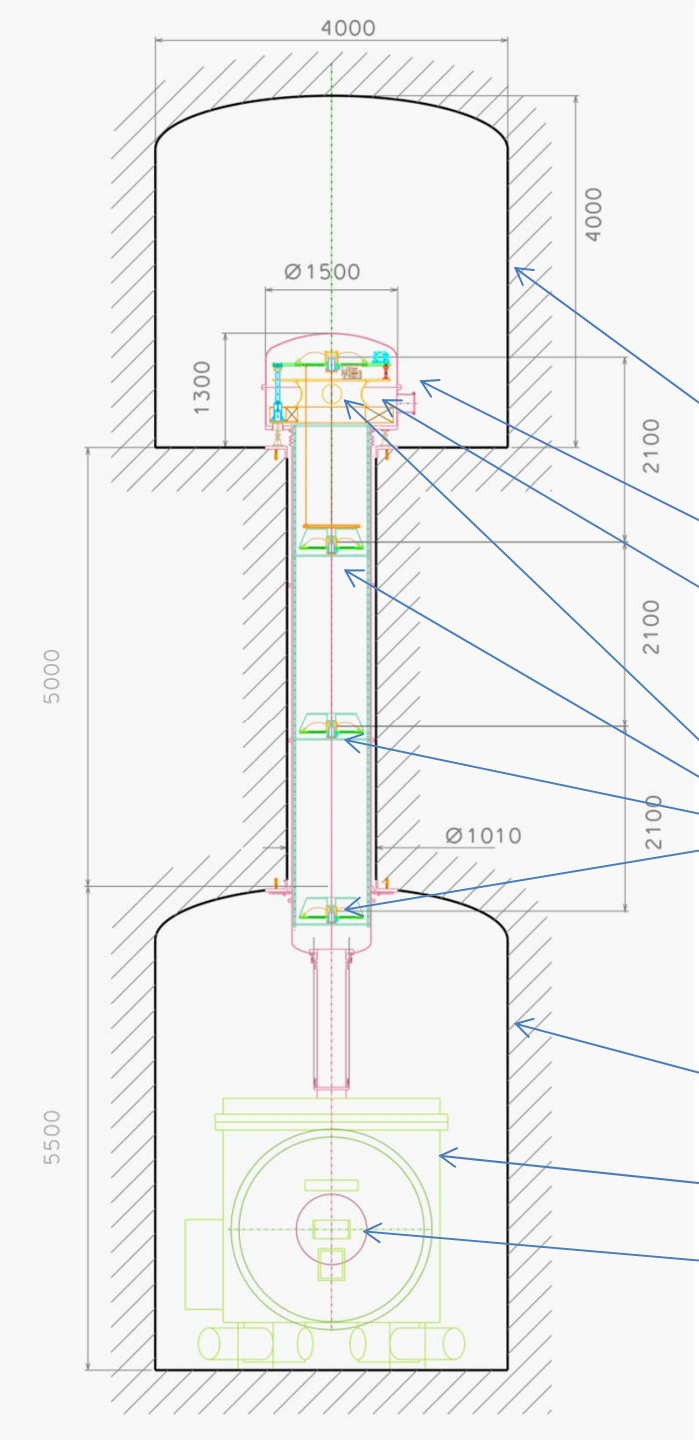
復元力= ブレードのバネ力+ 押し付けることにより生じる反バネ力

→ **共振周波数の低減**





防振システム

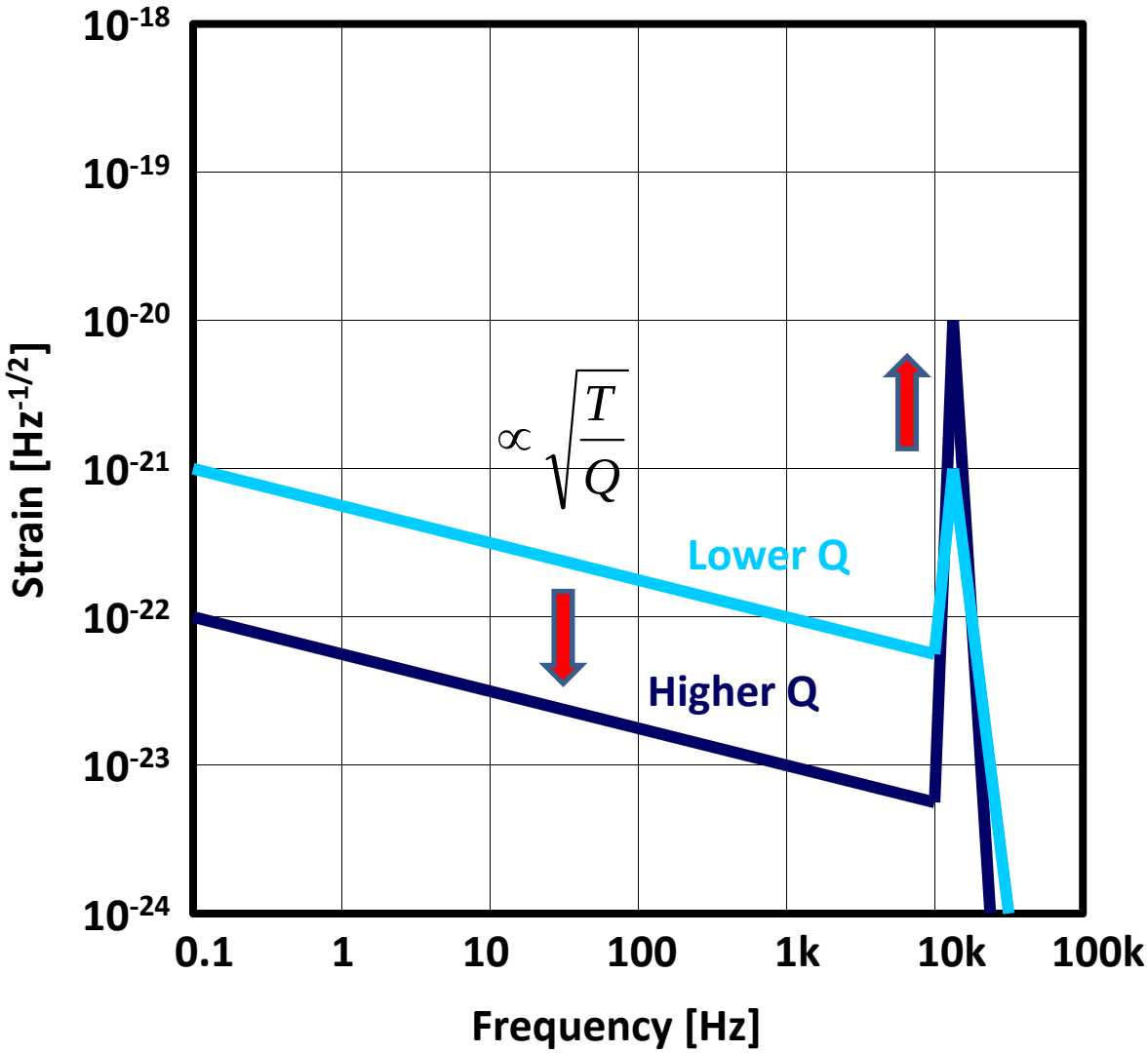


トンネル (2階)
チェンバー
倒立振り子

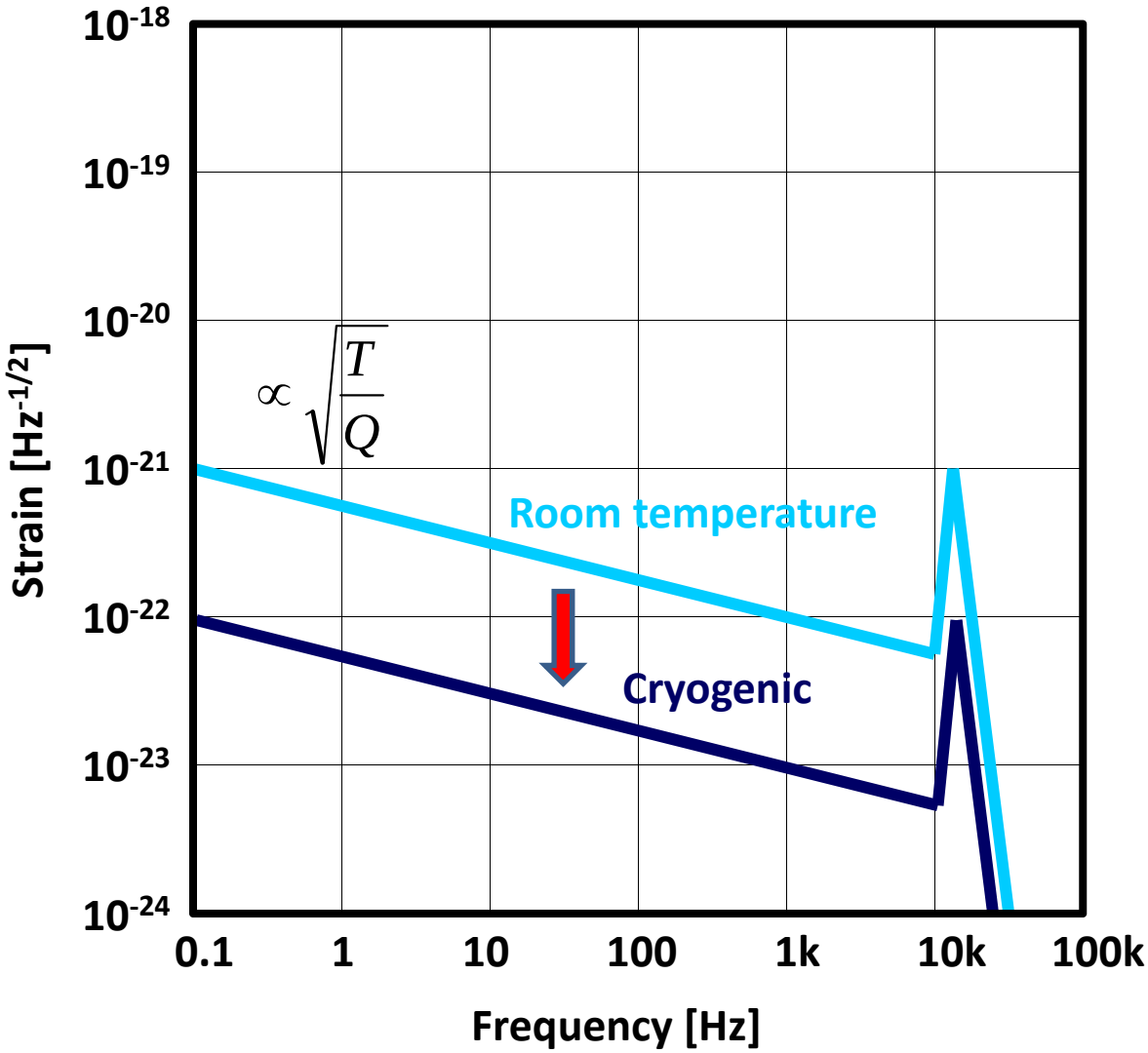
GAS フィルター

トンネル (1階)
チェンバー
鏡

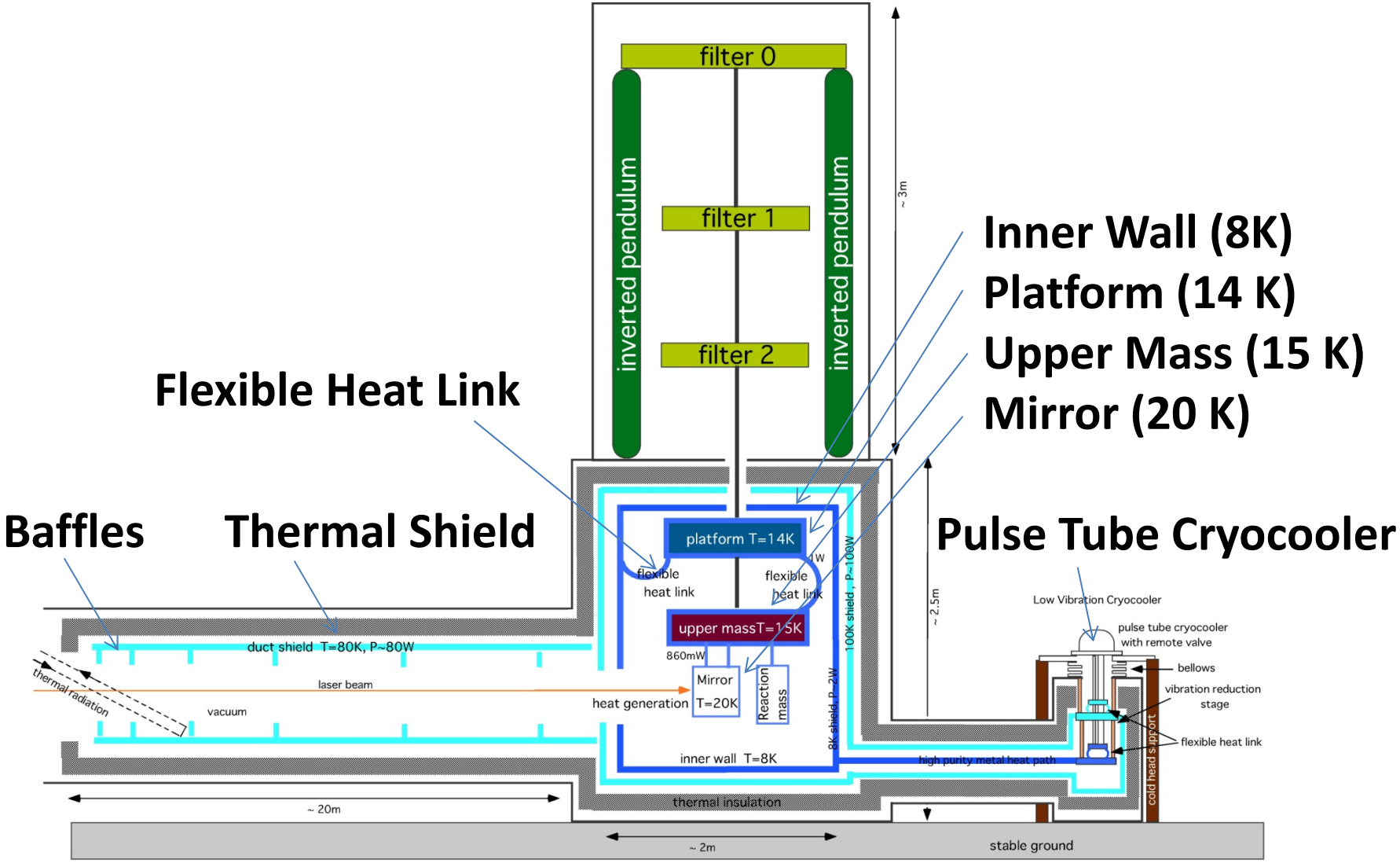
熱雑音（1）


10^{-18}
10^{-19}
10^{-20}
10^{-21}
10^{-22}
10^{-23}
10^{-24}
Strain [$Hz^{-1/2}$]
$\propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$
Lower Q
Higher Q
0.1
1
10
100
1k
10k
100k
Frequency [Hz]

熱雑音（2）

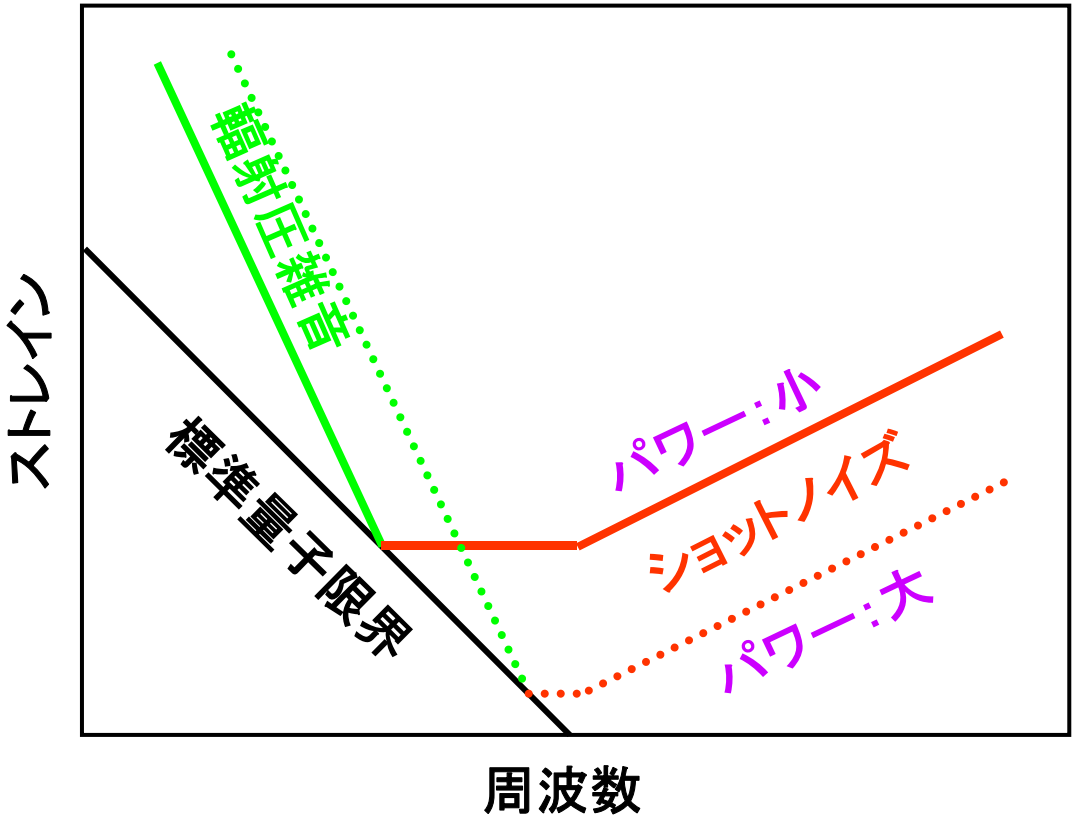

10^{-18}
10^{-19}
10^{-20}
10^{-21}
10^{-22}
10^{-23}
10^{-24}
Strain [Hz$^{-1/2}$]
$\propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$
Room temperature
Cryogenic
0.1
1
10
100
1k
10k
100k
Frequency [Hz]

冷却システム

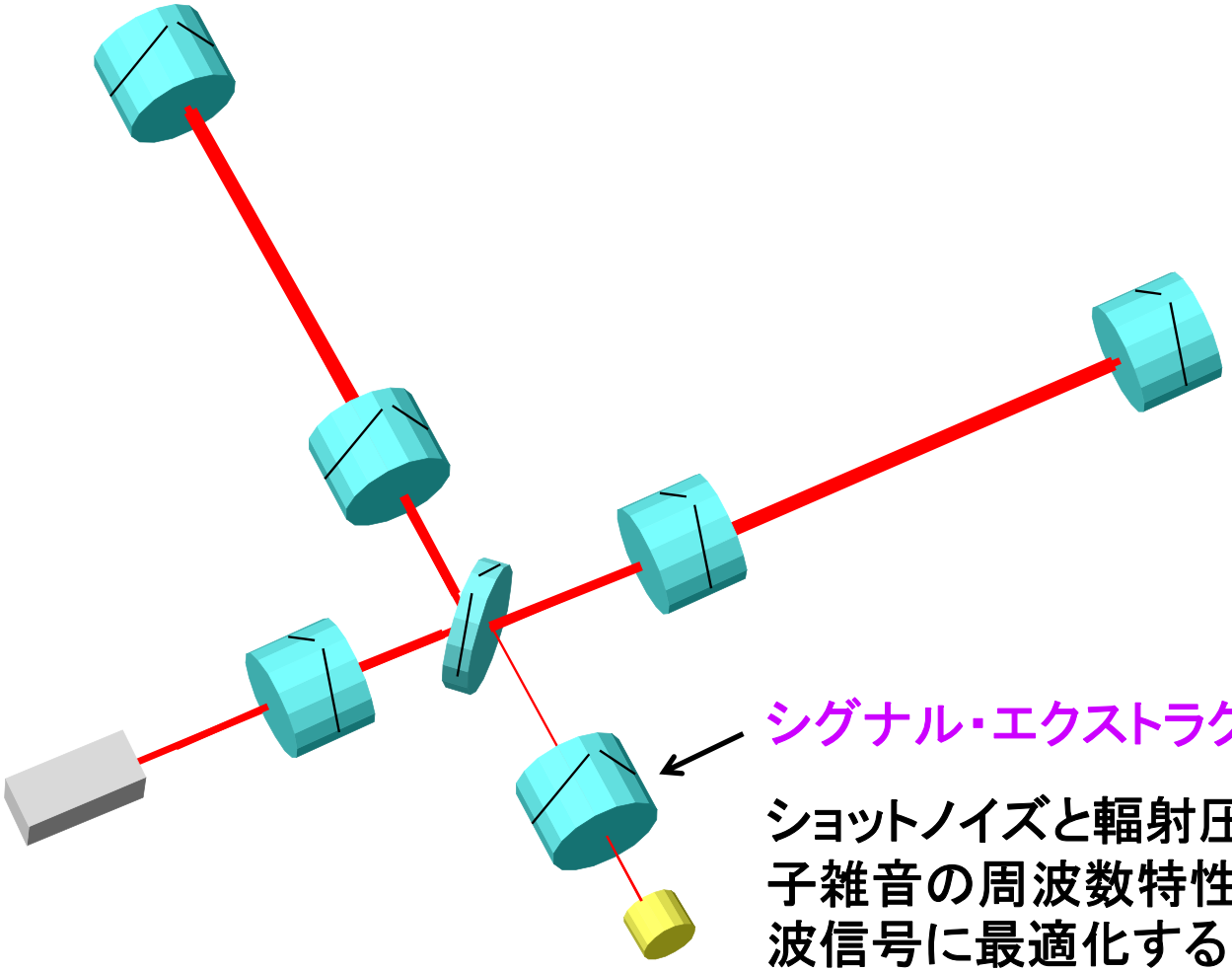

filter 0
filter 1
filter 2
inverted pendulum
inverted pendulum
~ 3m
Inner Wall (8K)
Platform (14 K)
Upper Mass (15 K)
Mirror (20 K)
Flexible Heat Link
Baffles
Thermal Shield
Pulse Tube Cryocooler
platform T=14K
flexible heat link
flexible heat link
1W
upper massT=15K
860mW
Mirror T=20K
Reaction mass
heat generation
100K shield, P~100W
8K shield, P~2W
~ 2.5m
Low Vibration Cryocooler
pulse tube cryocooler with remote valve
bellows
vibration reduction stage
flexible heat link
cold head support
high purity metal heat path
duct shield T=80K, P~80W
laser beam
thermal radiation
vacuum
inner wall T=8K
thermal insulation
~ 20m
~ 2m
stable ground

量子雑音を下げるには？

レーザー光のパワーを上げるとショットノイズが下がり輻射圧雑音が増える



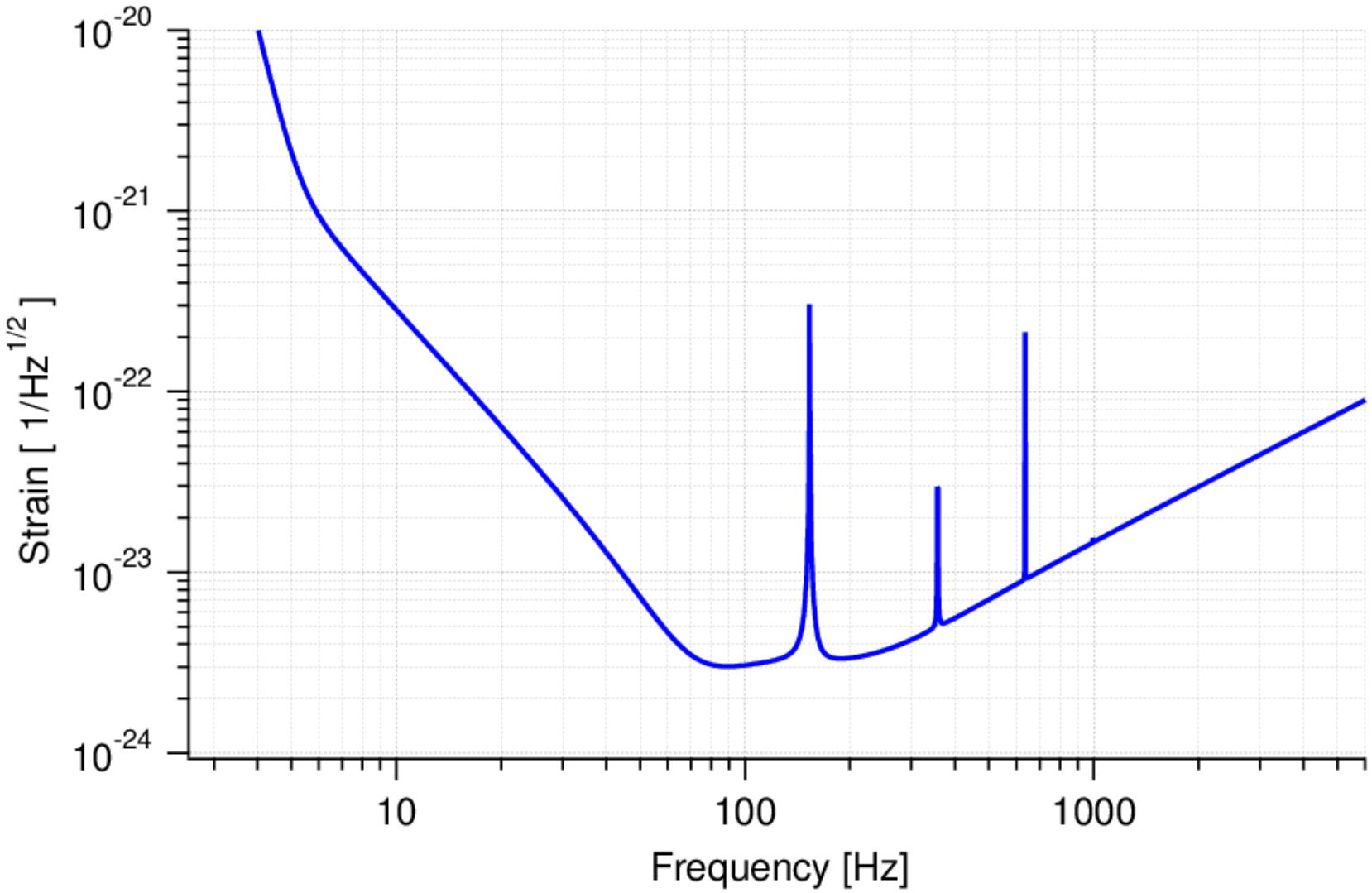
量子雑音を最適化する



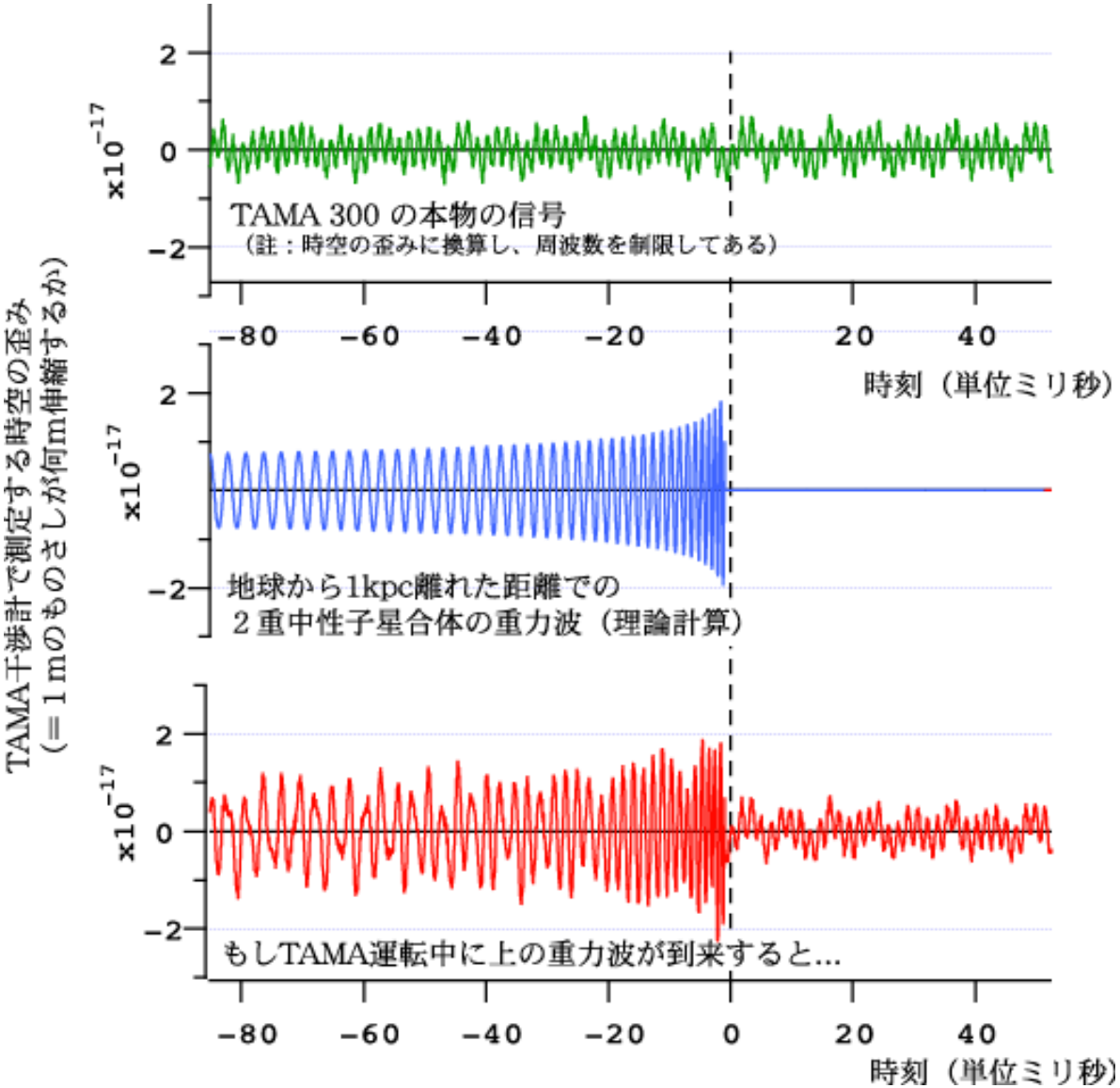
シグナル・エクストラクション・ミラー:

ショットノイズと輻射圧雑音からなる量子雑音の周波数特性を、狙うべき重力波信号に最適化する

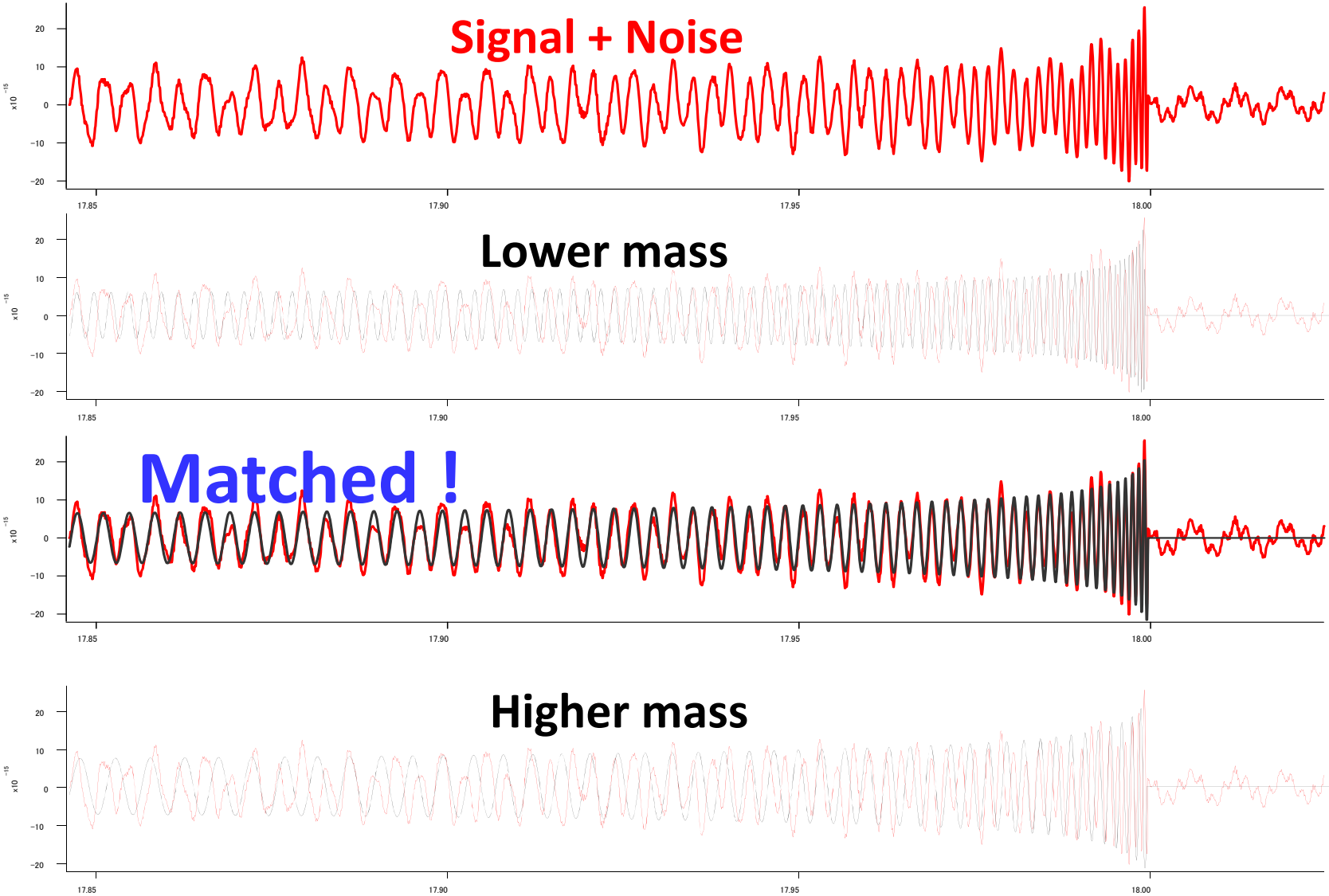
LCGTの感度曲線


10^{-20}
10^{-21}
10^{-22}
10^{-23}
10^{-24}
Strain [$1/Hz^{1/2}$]
10
100
1000
Frequency [Hz]

干渉計の雑音+重力波信号

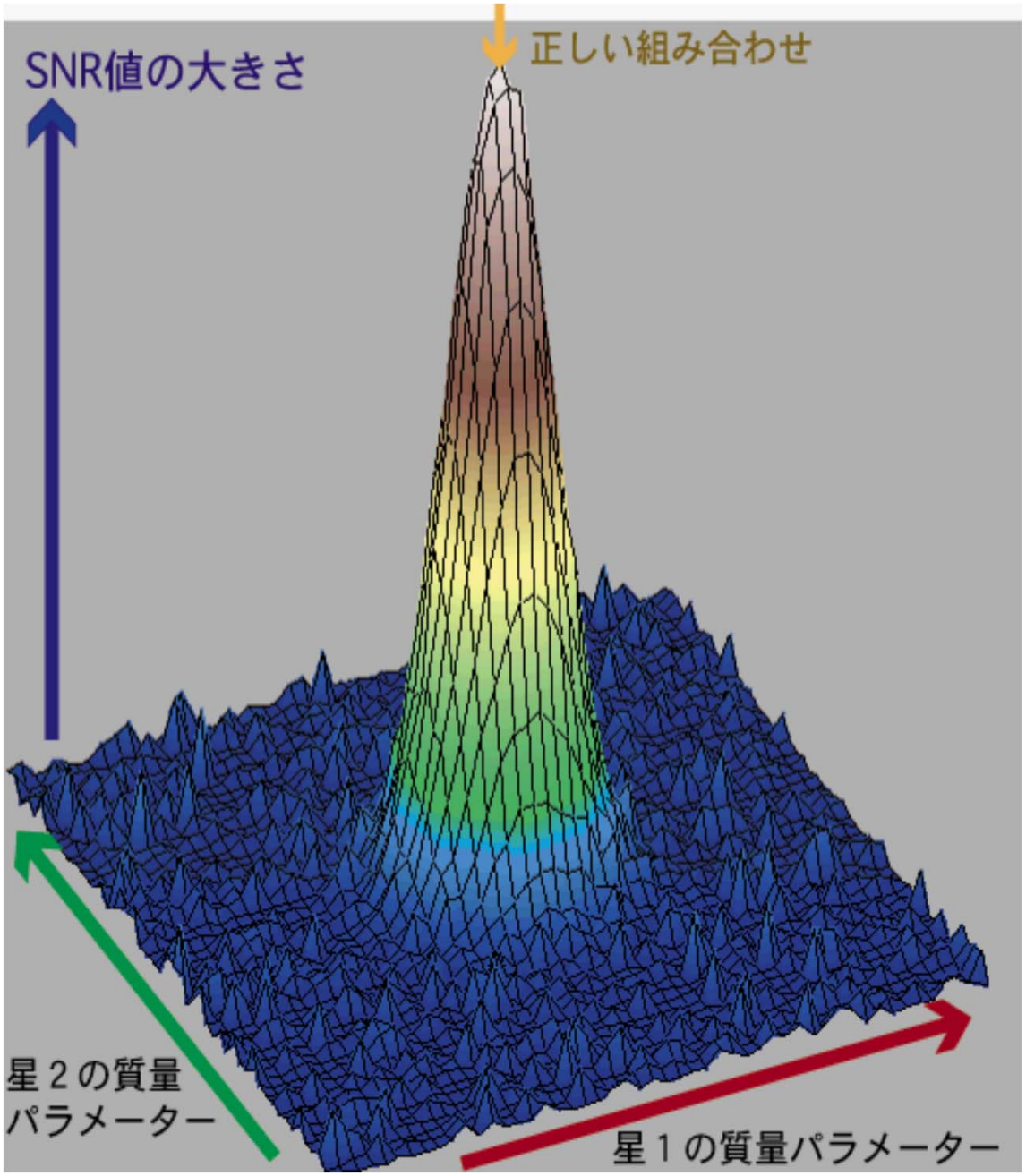


Matched filter



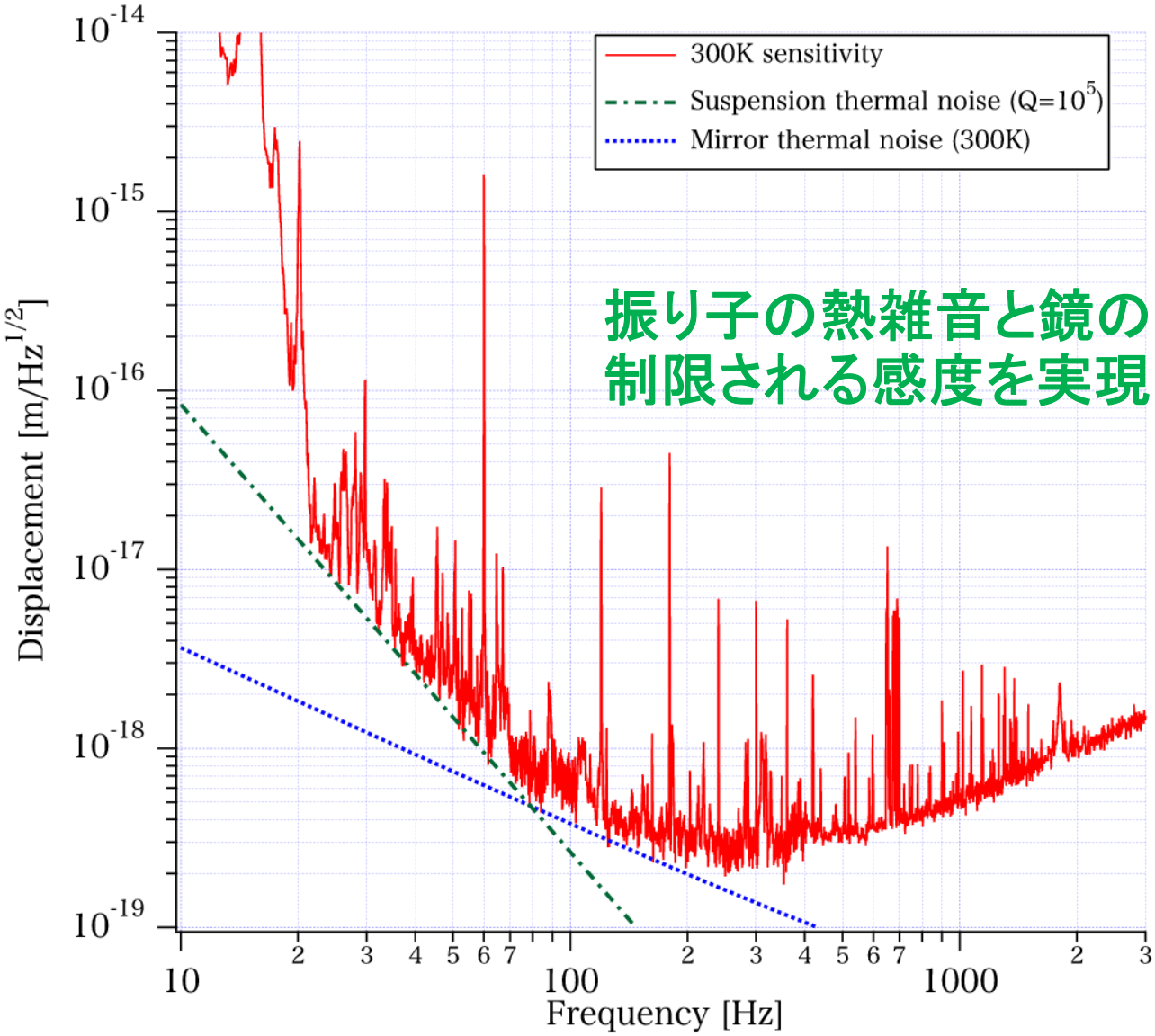
マッチドフィルターを使った信号雑音比

–重力波には大きな値
–雑音だけでは小さい値



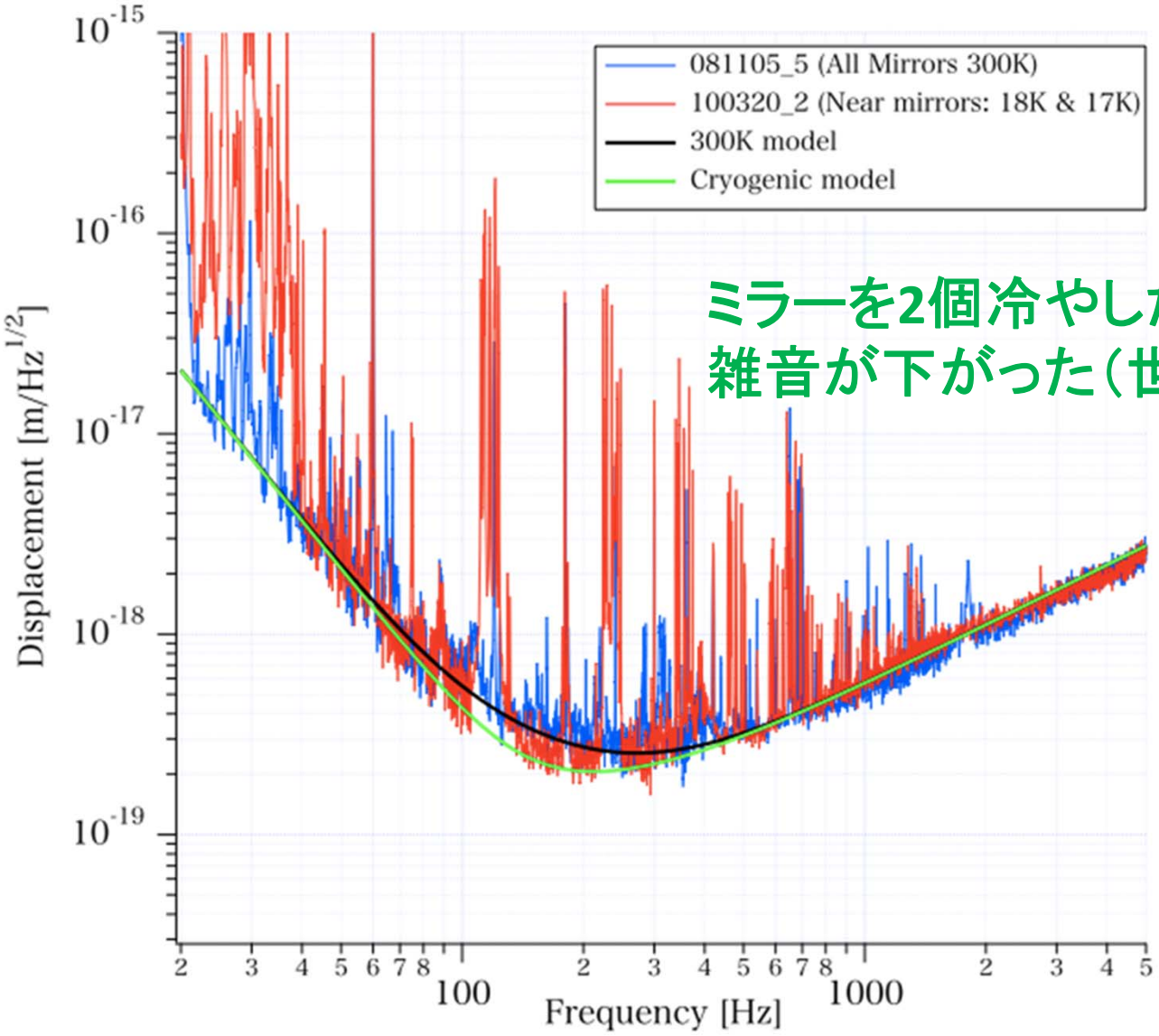
アーム長：100 m
低温プロトタイプ
＠神岡地下
CLIO

CLIOの感度（1）



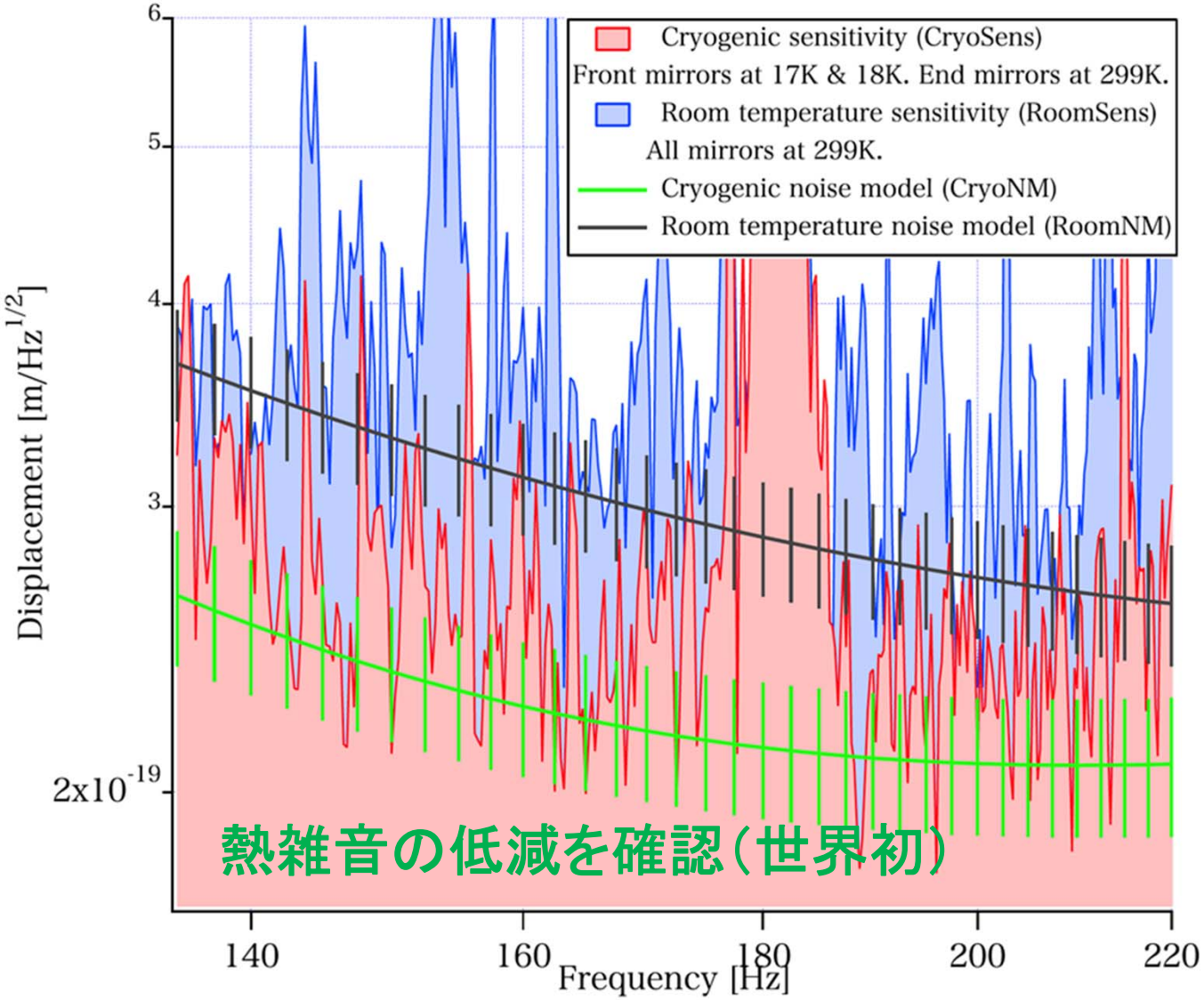
振り子の熱雑音と鏡の熱雑音で
制限される感度を実現（世界初）

CLIOの感度（2）



ミラーを2個冷やしたら
雑音が下がった（世界初）

CLIOの感度（3）


Cryogenic sensitivity (CryoSens)
Front mirrors at 17K & 18K. End mirrors at 299K.
Room temperature sensitivity (RoomSens)
All mirrors at 299K.
Cryogenic noise model (CryoNM)
Room temperature noise model (RoomNM)
Displacement [m/Hz^1/2]
6
5
4
3
2x10^-19
140
160
180
200
220
Frequency [Hz]
熱雑音の低減を確認（世界初）

国際的ロードマップの中での LCGTの位置づけ

- LIGO、VIRGO、GEOは、それぞれ第二世代検出器であるAdvanced LIGO、Advanced VIRGO、GEO-HFへの大々的な改造を始めつつある
- LCGTはこれら第二世代検出器と同様の干渉計技術を用い、同程度の感度を目指すものである
- 「地下」と「低温鏡」に関しては他の検出器にはないLCGTだけの大きな特徴である
- 第三世代検出器ETは「地下」と「低温鏡」の特徴を持つことから、LCGTは第三世代の技術を先取りした検出器であるといえる

他の観測器との協力

- 他の重力波検出器との共同観測により、その信号が重力波によるものであることをより確実にすることができる
- 複数台に現れた重力波信号の時間差などから、重力波源の方向やより詳しい情報を得ることが可能である
- 重力波の観測と電磁波や宇宙線の観測を組み合わせることにより、相補的な、またそれらが融合した、天体現象に関するより深い情報を引き出すことが可能になる

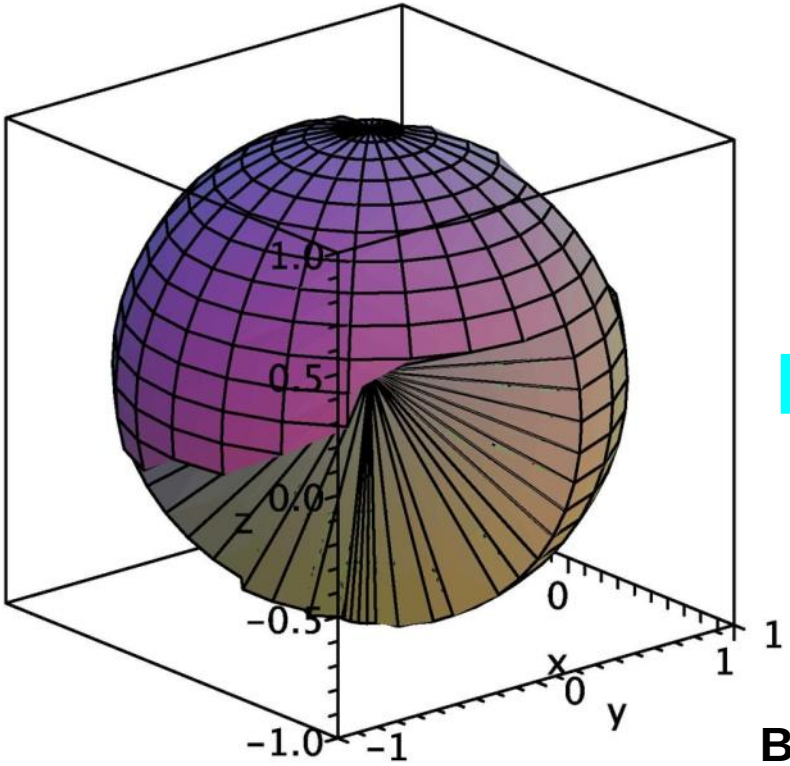
重力波検出器ネットワーク

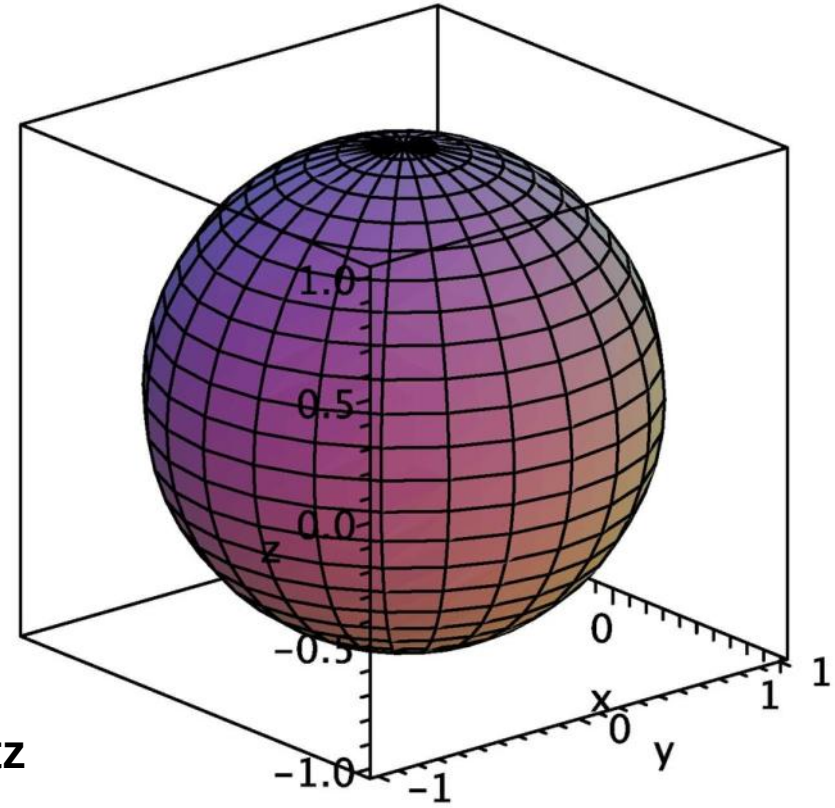
LIGO(H)+LIGO(L)+Virgo

- 1/2最大感度の範囲:72%
- 3台稼働率: 51%

LIGO(H)+LIGO(L)+Virgo+LCGT

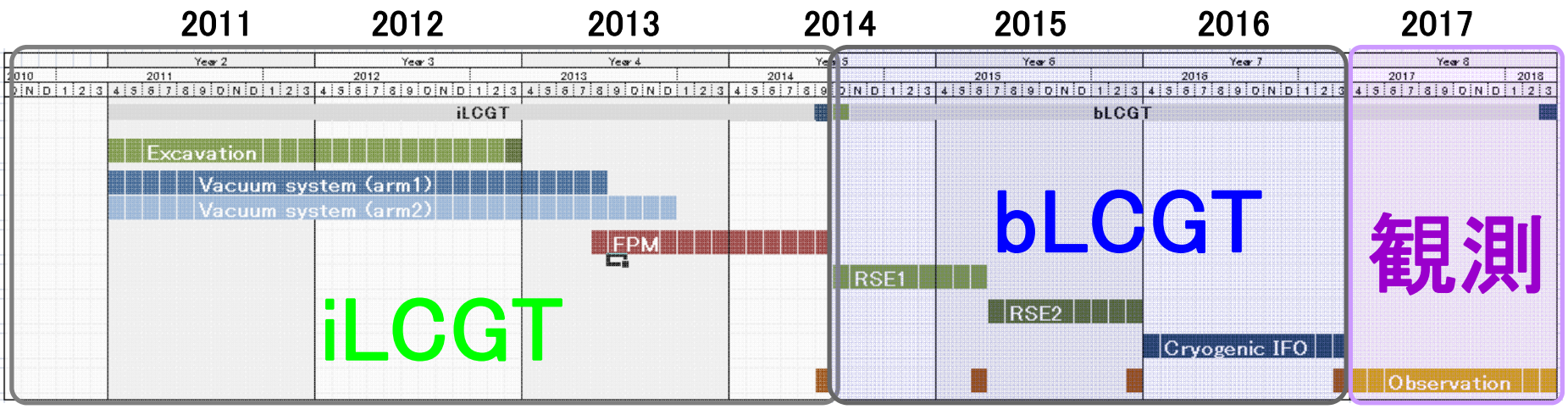
- 最高感度:+13%
- 1/2最大感度の範囲: 100%
- 3台稼働率: 82%





B. F. Schutz

LCGT全体スケジュール

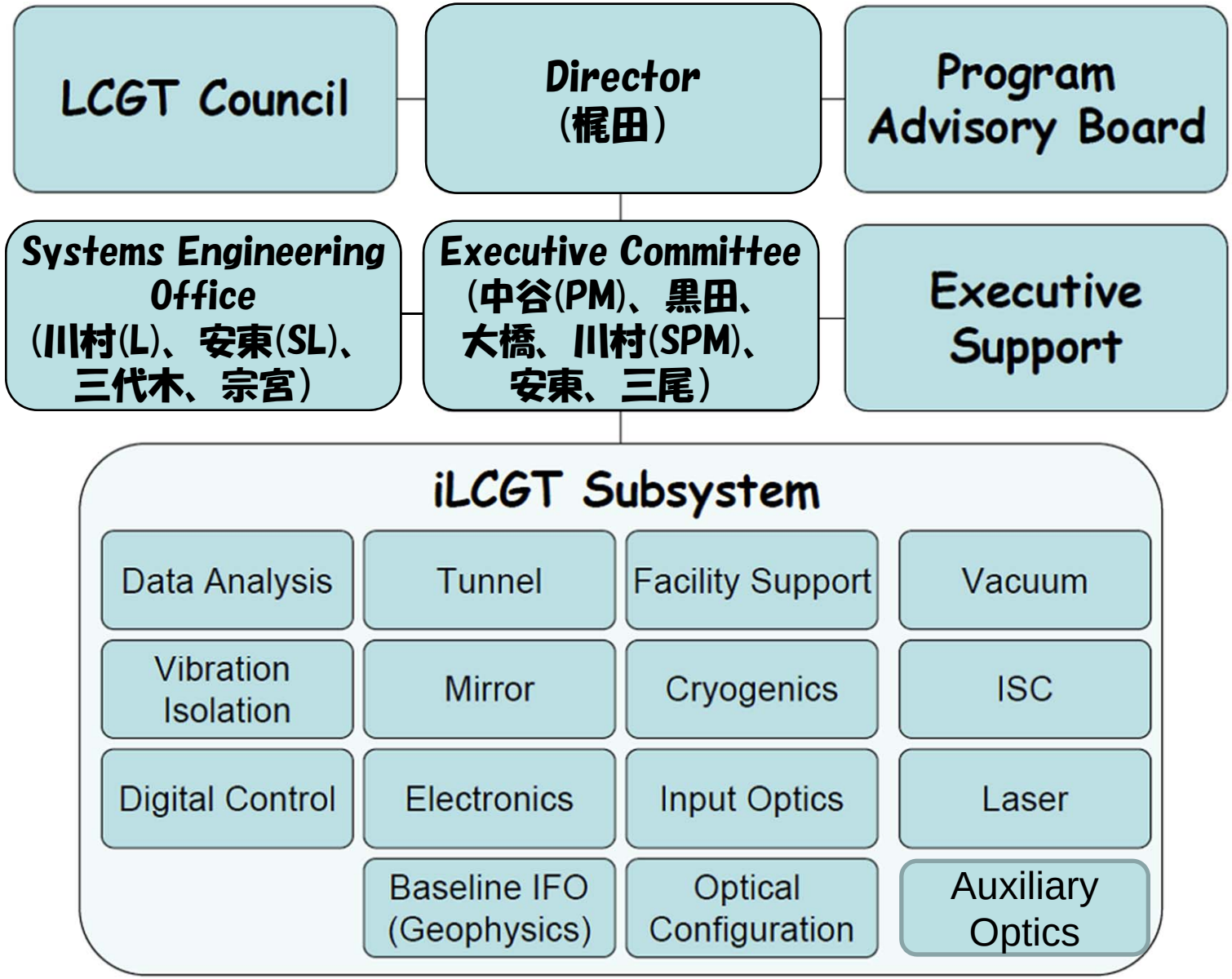


iLCGT：常温・シンプルな光学系＆防振系

bLCGT：低温・先進的光学系＆防振系

＊トンネル掘削の遅れの影響により、現在改訂中

LCGT組織


LCGT Council
Director
(梶田)
Program
Advisory Board
Systems Engineering
Office
(川村(L)、安東(SL)、
三代木、宗宮)
Executive Committee
(中谷(PM)、黒田、
大橋、川村(SPM)、
安東、三尾)
Executive
Support
iLCGT Subsystem
Data Analysis
Tunnel
Facility Support
Vacuum
Vibration
Isolation
Mirror
Cryogenics
ISC
Digital Control
Electronics
Input Optics
Laser
Baseline IFO
(Geophysics)
Optical
Configuration
Auxiliary
Optics

まとめ

- LCGTにより中性子連星の合体などからの重力波が検出され、重力波天文学が創成されることが期待されている
- 重力波は電磁波や宇宙線の観測と融合して新しい天文学を生み出す
- LCGTは低温、地下、帯域可変型干渉計の3つの特徴を持つ
- 2017年度に本格的観測開始予定

重力波天文学の
夜明けは近いぜよ！

イラスト：
Sora