

欧州重力波検出器Virgoでの 研究と重力波観測 ～海外での研究・生活について～

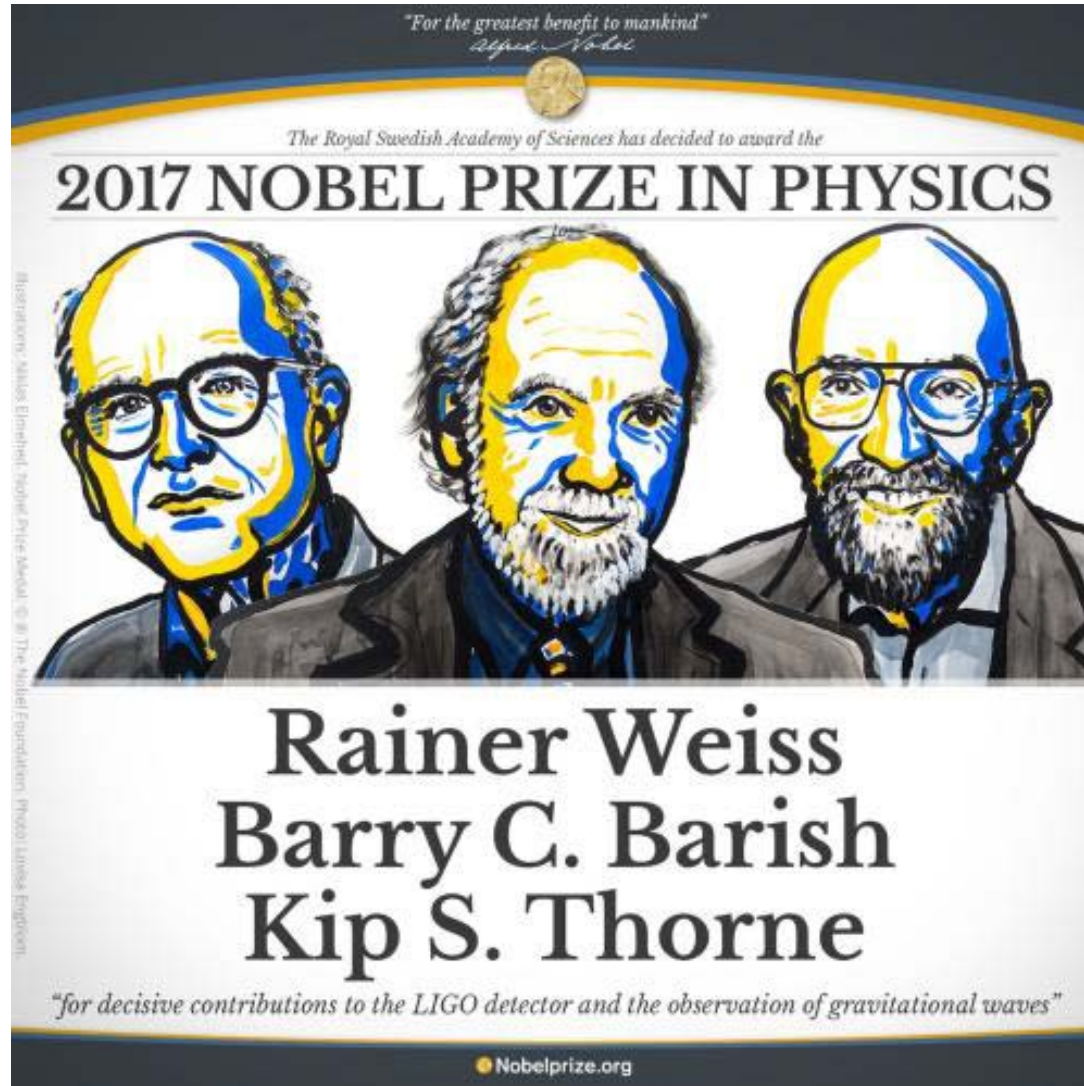
*School of Physics and Astronomy
The University of Birmingham*

我妻 一博

Image Credit: SXS

2017年 ノーベル物理学賞

LIGOの創始者達



初観測以前の重力波業界(主に国内)



重力波の初観測、そして相次ぎ2例目

2016年 2月11日(12日)の発表
[観測は2015年9月14日]



元村有希子
@chibigenome

フォロー

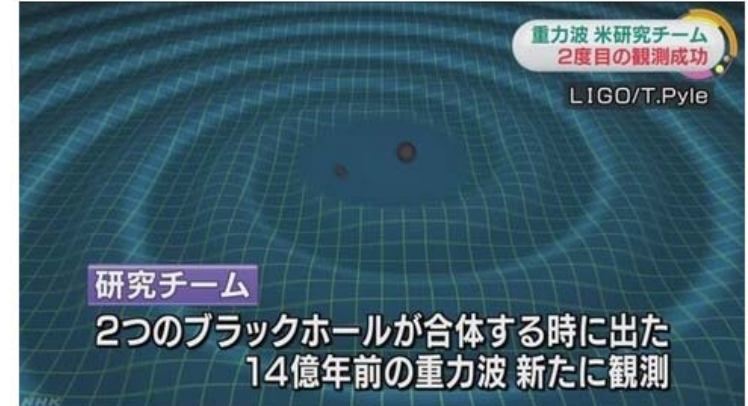
今日の各紙、東京本社版。いいニュースで横トッパンは編集者も元気が出ます。#重力波



2016年 6月15日(16日)の発表
[観測は2015年12月26日]

2016年06月16日 (木)

重力波 2回目の観測に成功



NHK



BBC news

2016年 2月11日(12日)



38

@MoonWave38Hz

 フォローする

香川県民にとって、
重力波よりも円高よりも大切なこと

2016年2月11日 23:03



23,301



12,799

初観測から発表に至るまで

- 重力波の初観測: 2015年9月14日
- 共著者に一斉通知(大きなシグナルが検出)
- Blind injection(二重盲検法)の否定
- 緘口令の一斉通知(食堂でも話すな)
- データの解析・確認作業と論文執筆
- Twitterでのリーク事件
- Natureによる記事(二重盲検法かも)
- 報道陣への対応方法の周知
- 発表記者会見(論文出版): 2016年2月11日

重力波の初検出って何がすごいのか？

技術の凄さ

二つのブラックホールが合体して太陽3個分の質量が一瞬で消えて時空を揺らす波(重力波)になり、それが13億年かかって地球に届いたかすかな時空の歪み(隣の恒星までの距離が髪の毛の太さ一本分変化する量)をLIGOが捕えた。

- 重力波の存在を証明

アインシュタインからの最後の宿題 ~100年越しの証明~
⇒一般相対性理論の検証

- 宇宙を観測する新しい手段

光では見えない天体が観測可能になった

教科書が書きかえられた瞬間！

重力

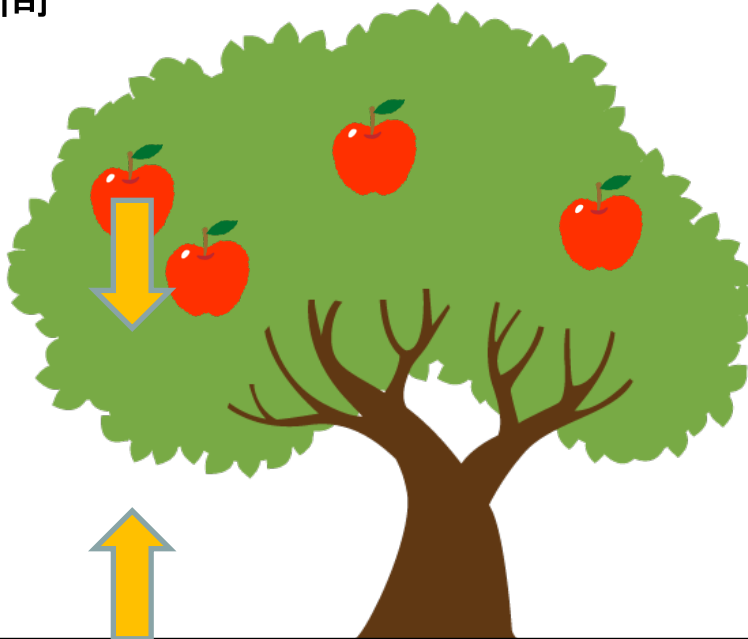
万有引力の法則:

質量のある物体がお互いに引きあっている

地球とリンゴも引きあっている

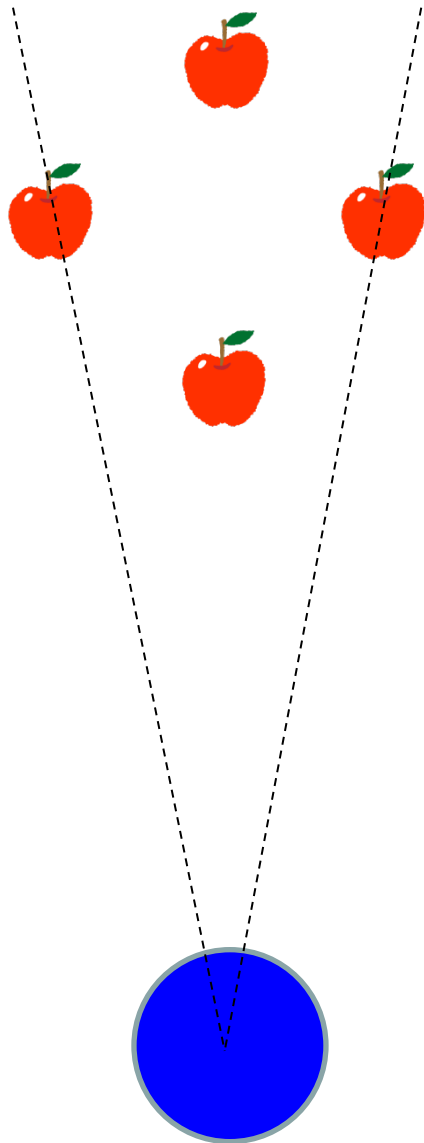
⇒天体同士(地球や太陽)も引きあっている

- ・遠隔作用力
- ・絶対時間

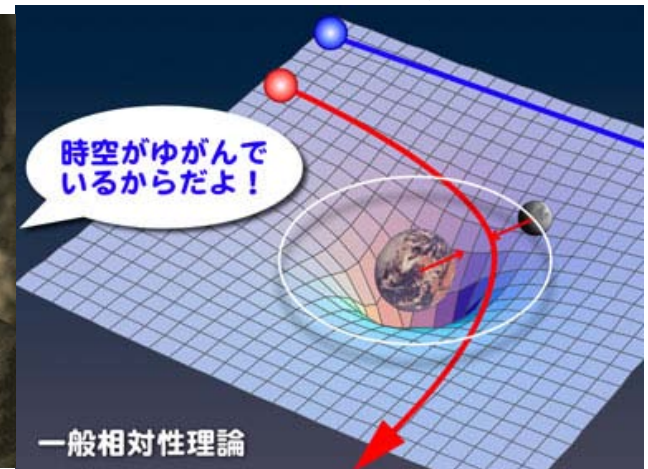
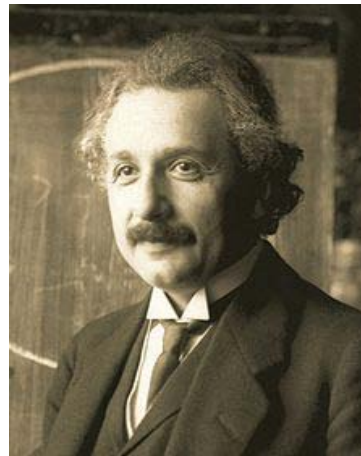
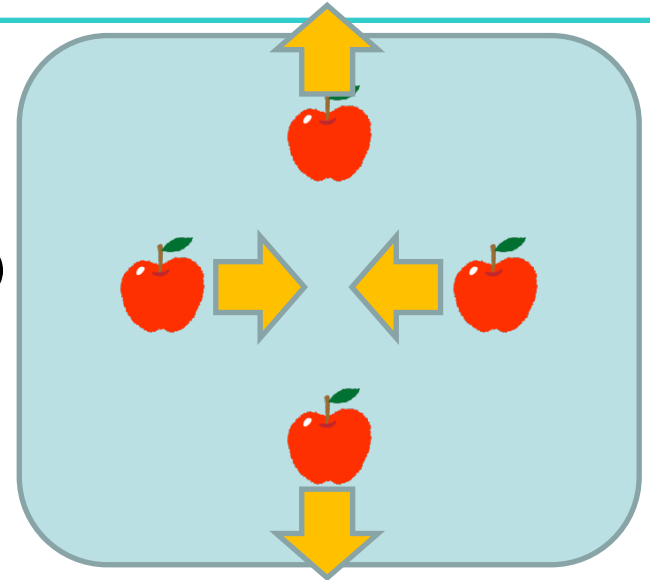


アイザック・ニュートン

重力



リンゴ集団の中心
からみると...
(箱の中のリンゴと
一緒に落下すると)
⇒ 潮汐力
(重力の本質)



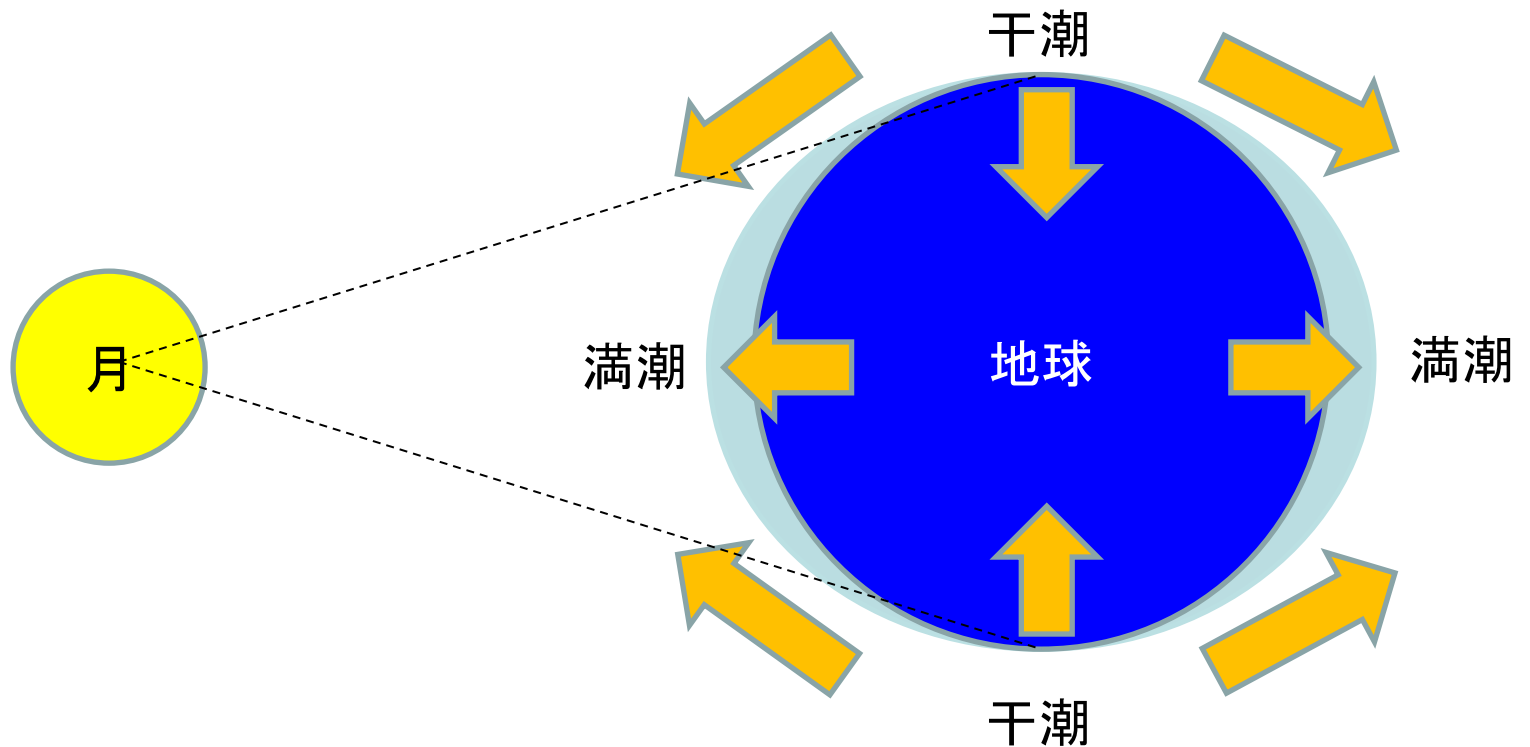
(<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/openworks/whatisgw.html>)

重力を「時空の歪み」として体系化

⇒ 一般相対性理論 (アルバート・アインシュタイン)

重力と潮汐力

月の重力によって生じる潮汐



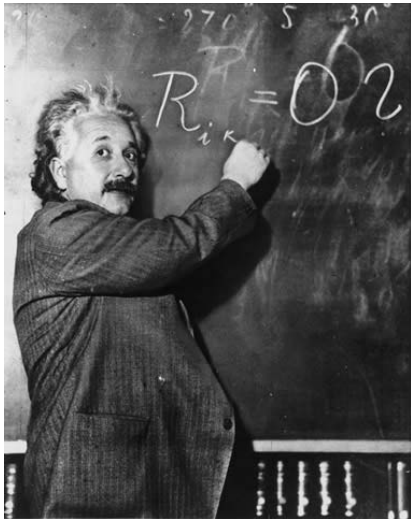
地球の自転によって一日に二度、満ち潮と引き潮が起こる

重力波

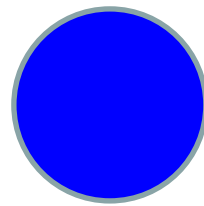
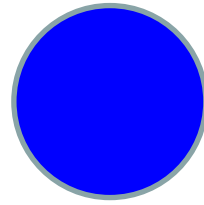
- 質量の四重極モーメントの時間変化
によって生じる**時空のさざ波**

$$\frac{dE}{dt} = \frac{G}{45c^5} \ddot{Q}_{ij}^2$$

- 1916年に**アルバート・アインシュタイン**によって
提唱された



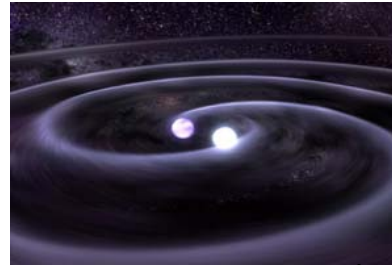
- 重い星の連星系から
たくさん放出される



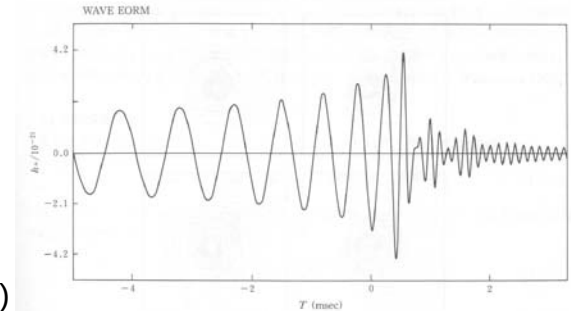
重力波源

地上の重力波検出器の観測帯域はおよそ10 Hz – 1000 Hz

●連星中性子星や ブラックホールの合体

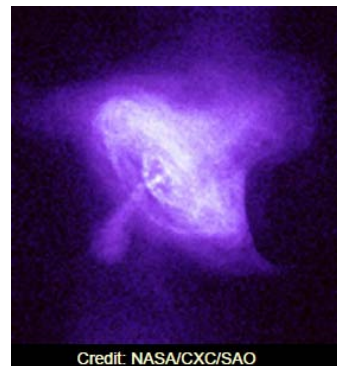


(NASA)

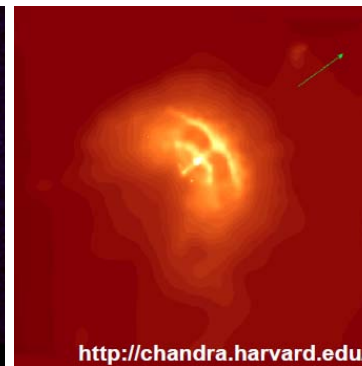


●パルサー(連続波)

- Crab pulsar (60Hz)
- Vela pulsar (22Hz)

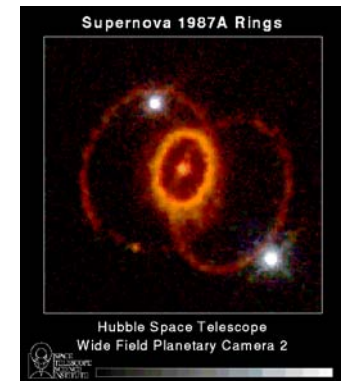


Credit: NASA/CXC/SAO



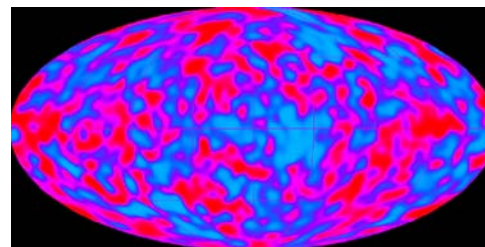
<http://chandra.harvard.edu/>

●超新星爆発



●背景重力波

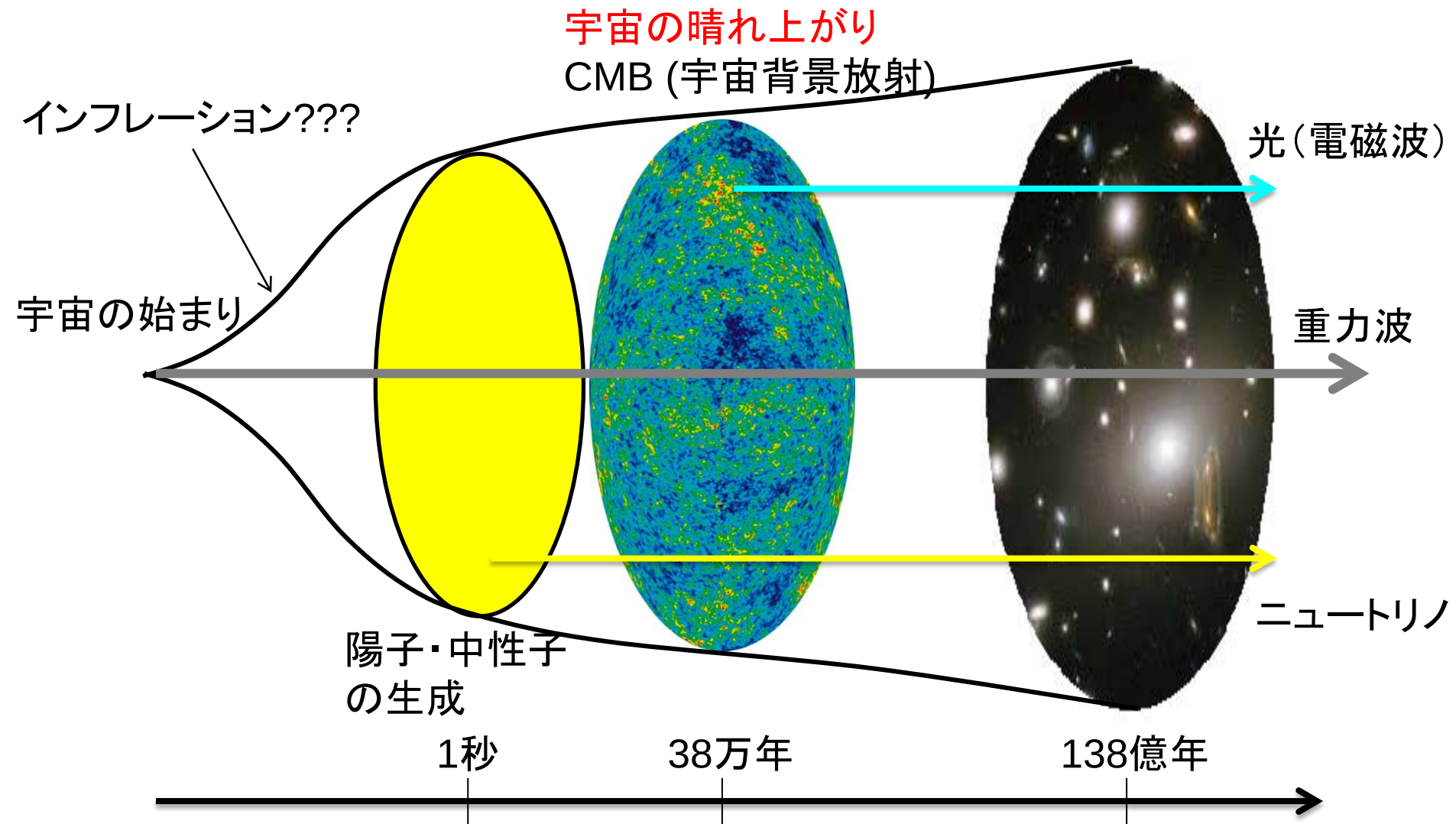
- インフレーション



(COBE)

重力波の直接検出は宇宙論や天文学を発展させる ⇒ **重力波天文学**

宇宙のうぶ声を聞く



重力波の間接的存在証拠

・ HulseとTaylorによる連星パルサー (PSR1913+16) の
周期変化の観測(電波望遠鏡)

⇒ 重力波によるエネルギー放射の計算と一致

・ 1993年にノーベル賞

⇒ 重力波は間違いなく存在する！

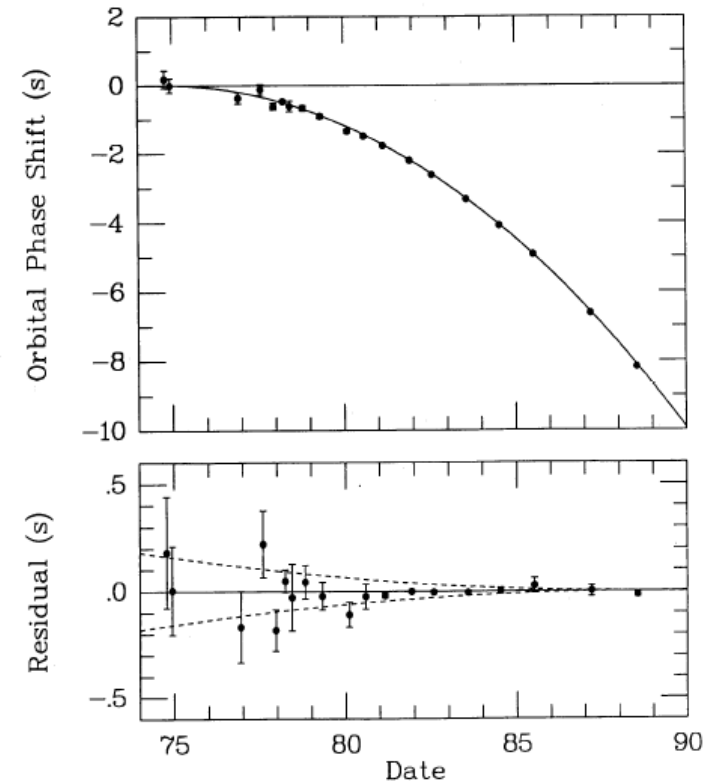


FIG. 5.—Top: Cumulative shift of the times of periastron passage relative to a nondissipative model in which the orbital period remains fixed at its 1974.78 value. Bottom: Differences between the locally measured periastron times and those expected according to the DD(1) parameter set. Dashed curves 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

重力波のまとめ

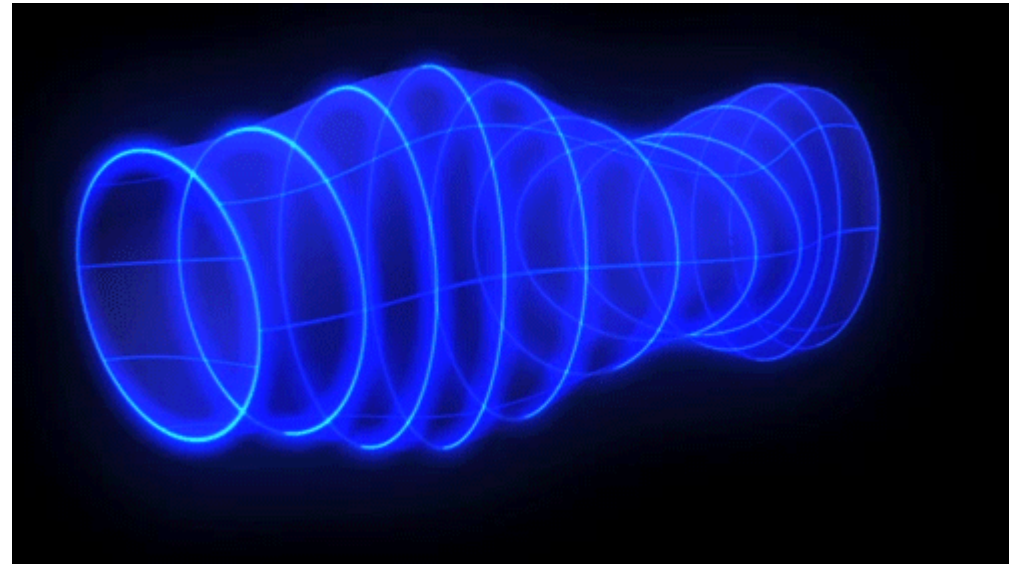
重力波:

●質量を持った物体の運動によって生じる**時空の変化**が、波となって空間を伝わる現象

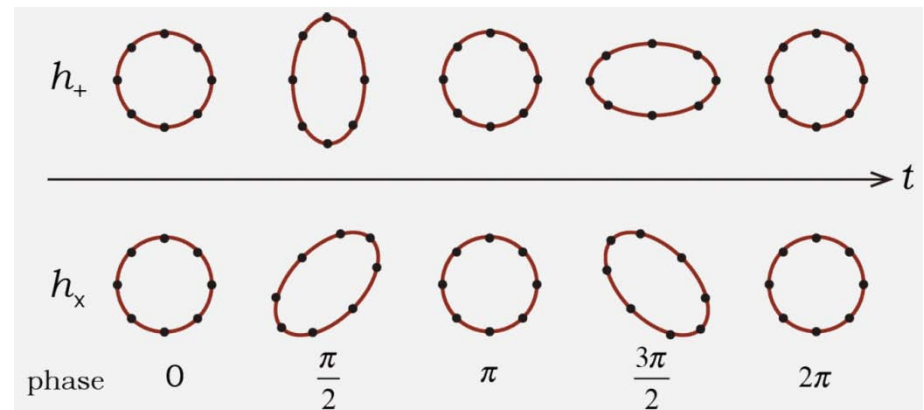
●1916年、**アインシュタイン**によって提唱された

●二つの偏光を持った**横波**
ある座標系で見ると、回転する**潮汐力**のように働く

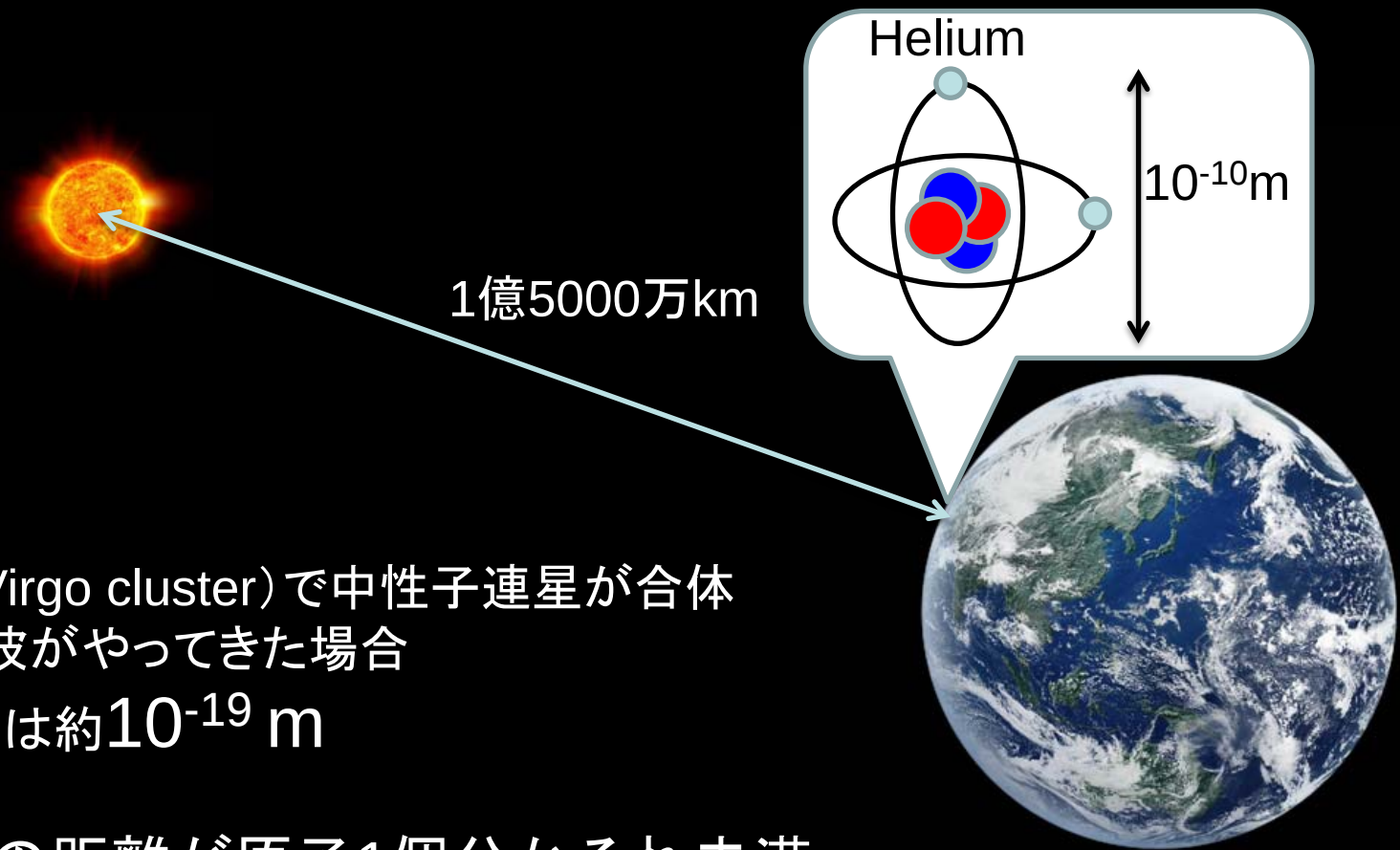
●**極めて小さい**時空の変化
HulseとTaylorらによる
“間接的な”存在証明のみで、
“**直接**”観測は**2015年9月まで**
無かった



[<https://www.ligo.caltech.edu>]



重力波の振幅



近い銀河団 (Virgo cluster) で中性子連星が合体
そこから重力波がやってきた場合

時空の変化量は約 10^{-19} m

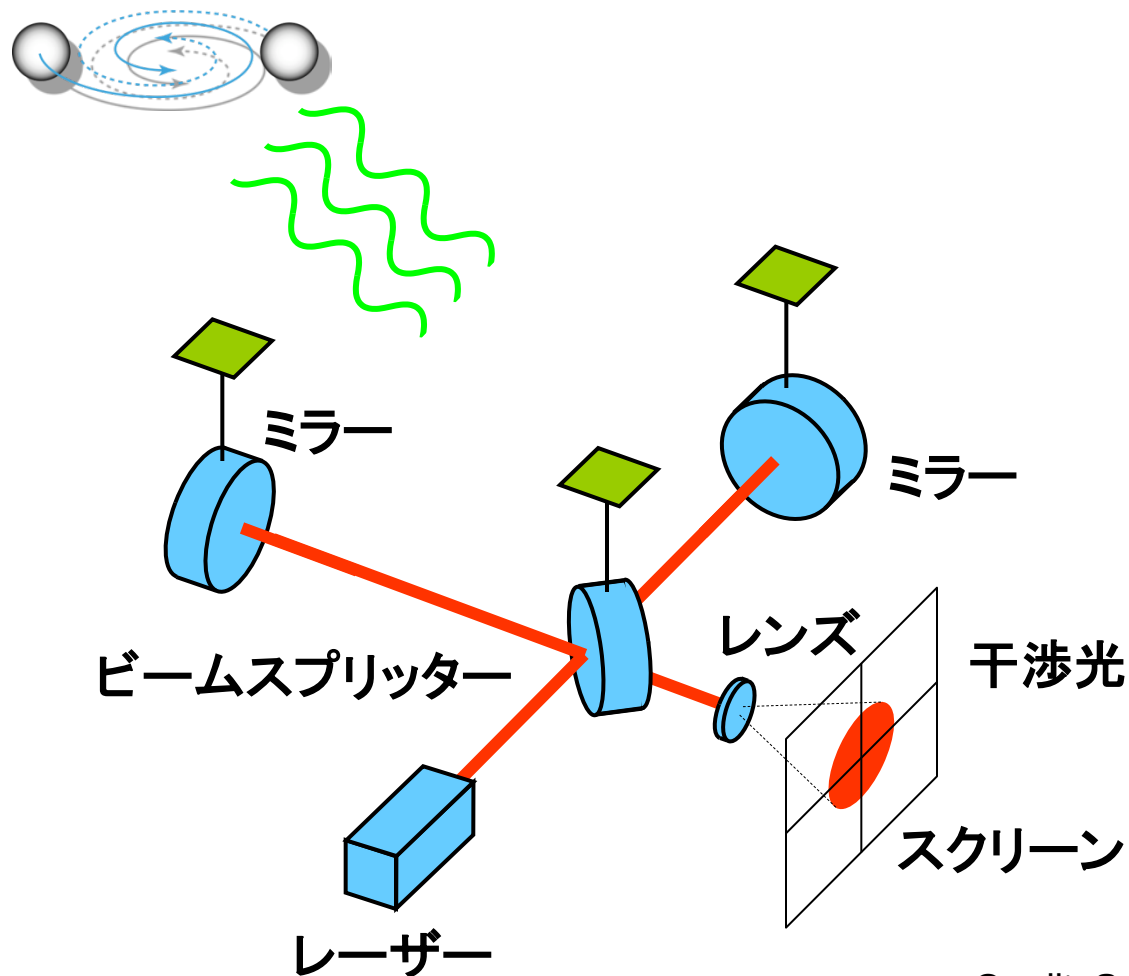
=>

地球と太陽の距離が原子1個分かそれ未満
変化するのを測定しなければならない

重力波は極めて小さな相互作用しか持たない(全てを透過してしまう)

干渉計による重力波の検出

マイケルソン干渉計



Credit: Seiji Kawamura

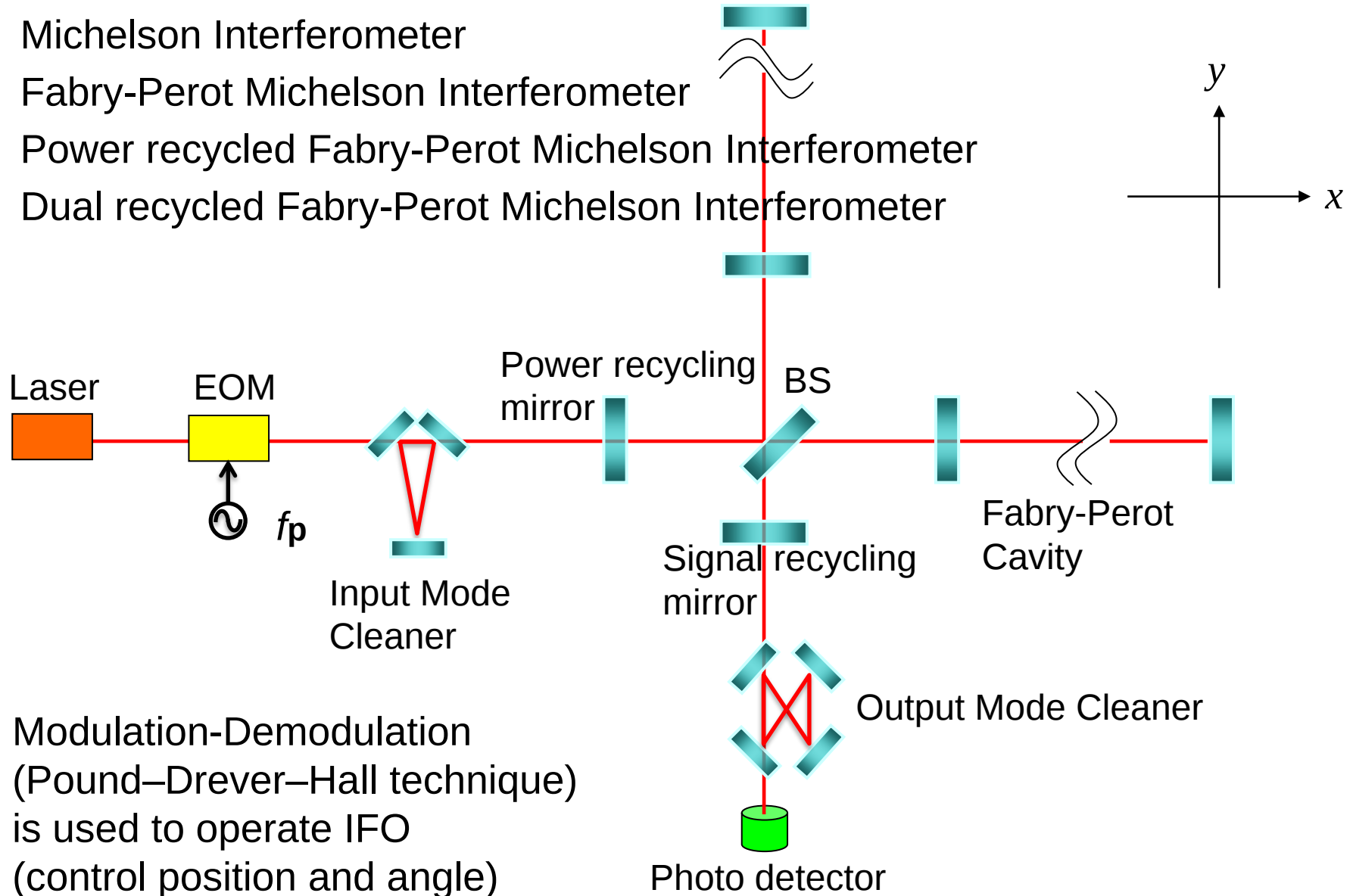
光学系の改良

Michelson Interferometer

Fabry-Perot Michelson Interferometer

Power recycled Fabry-Perot Michelson Interferometer

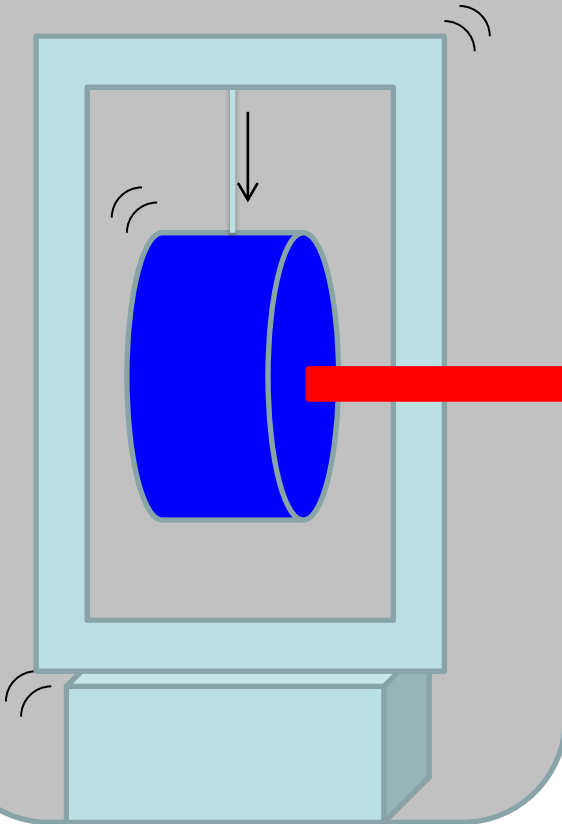
Dual recycled Fabry-Perot Michelson Interferometer



現在の干渉計の主な雑音源

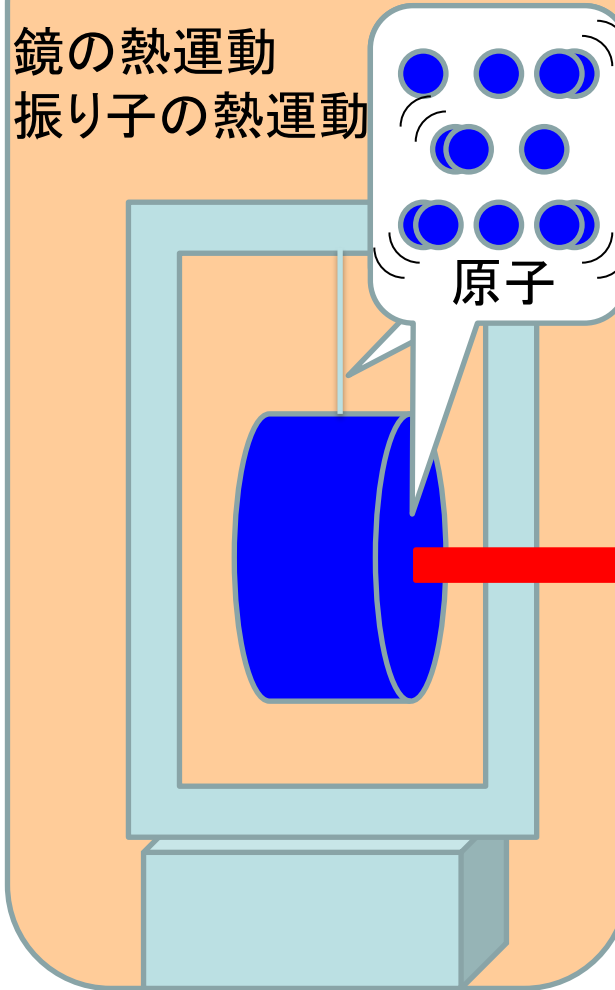
地面振動雑音

地震でなくても地面は揺れている



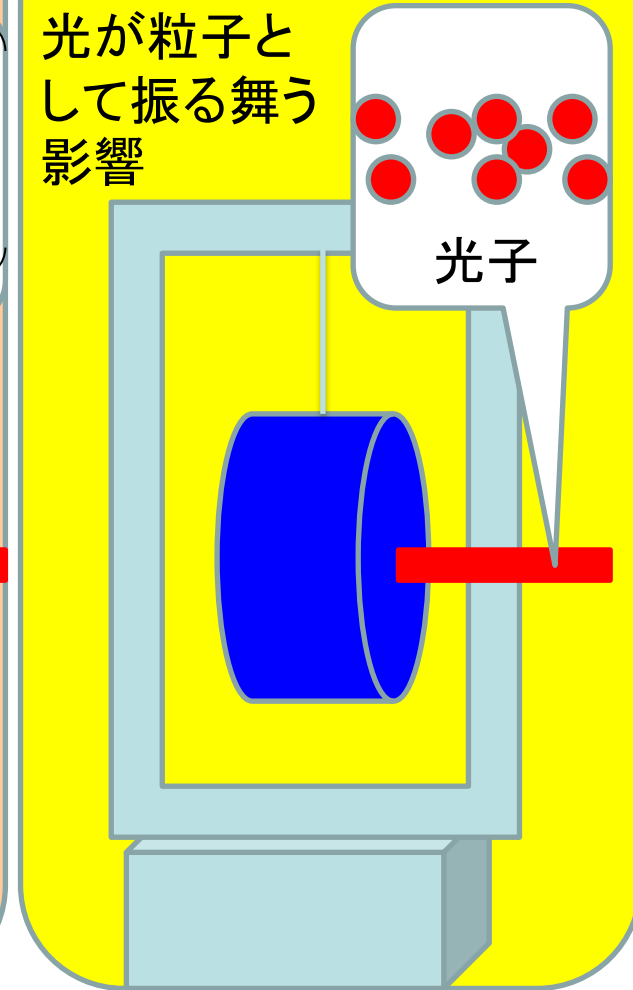
熱雑音

鏡の熱運動
振り子の熱運動



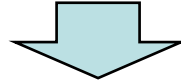
量子雑音

光が粒子として振る舞う影響



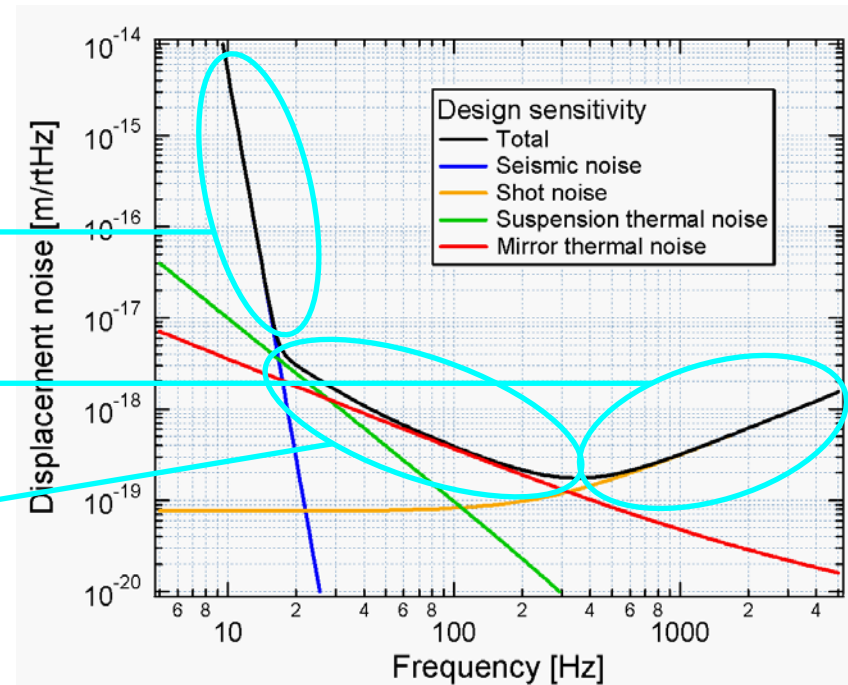
現在の干渉計の主な雑音源

重力波信号は極めて微弱 => 様々な要素が雑音になる



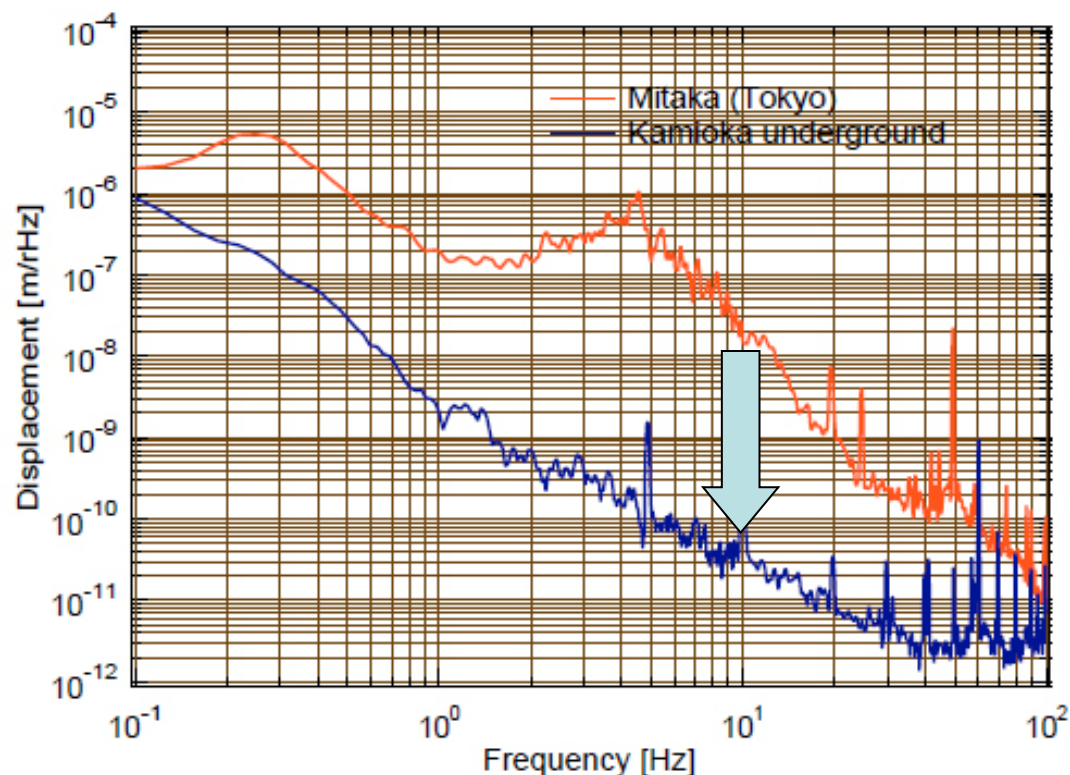
正確な雑音量の見積もりと除去が最重要

- 低周波帯域
地面振動が支配的
- 高周波帯域
散射雑音が支配的
- 観測帯域
熱雑音が支配的
⇒ 鏡、振子

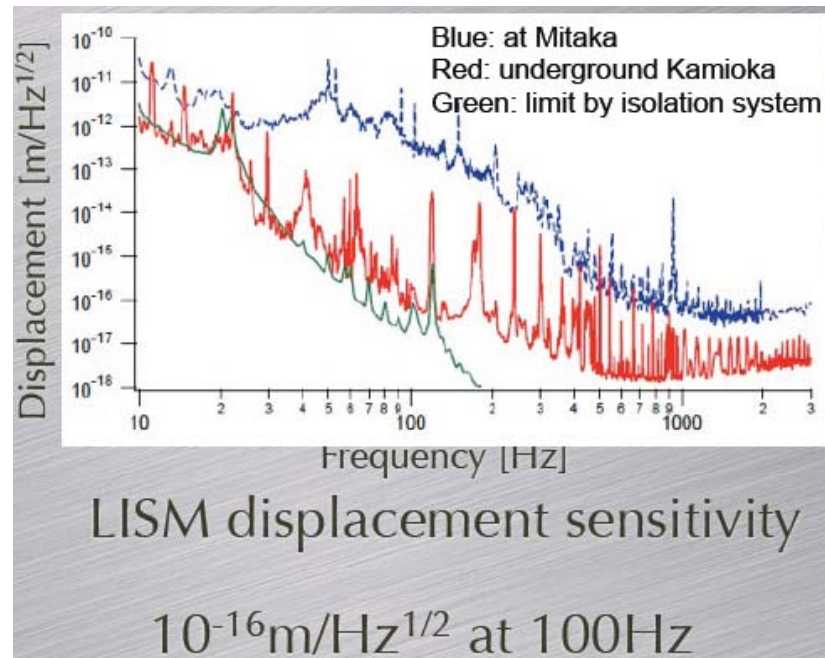


地面振動

地面振動の比較



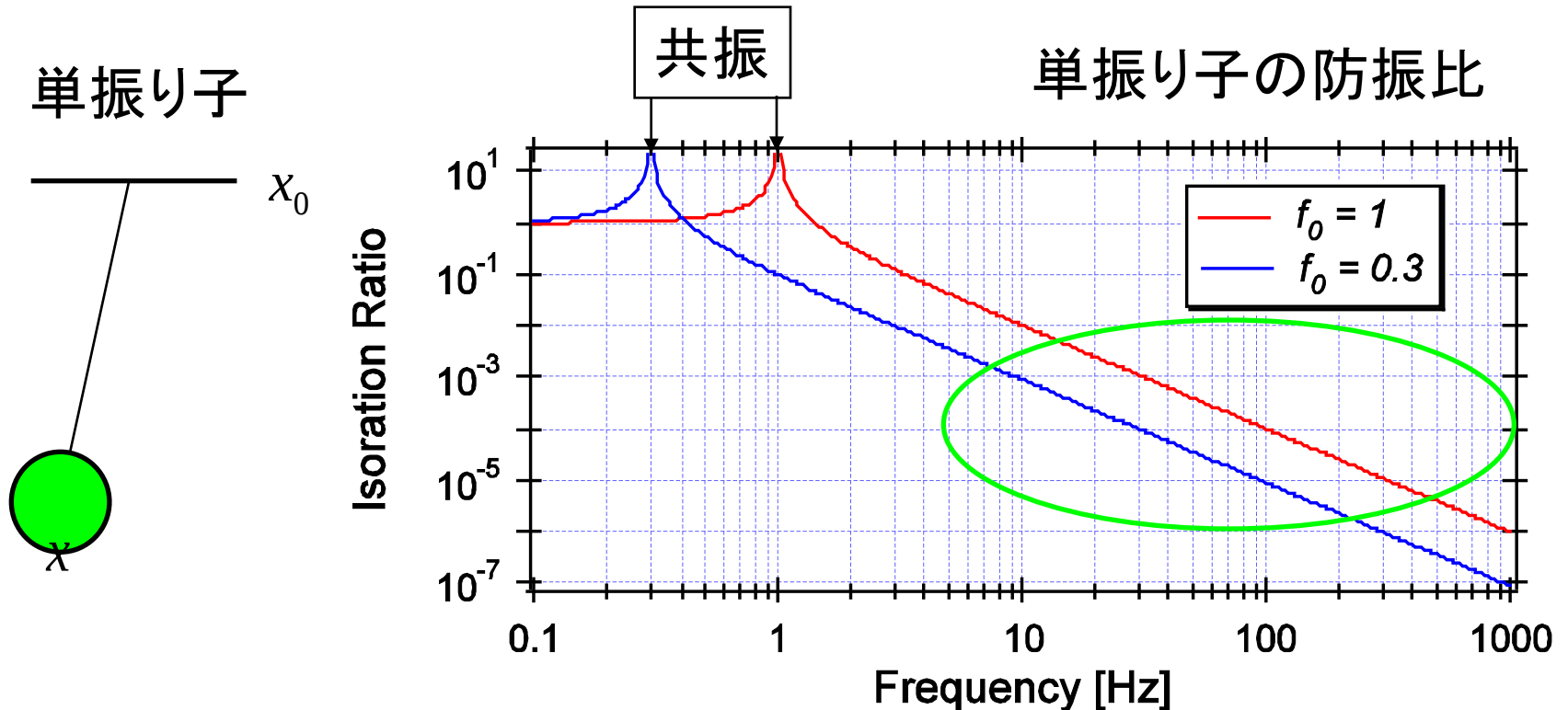
- 神岡鉱山の中は三鷹よりも2桁も地面振動が静か
- 20m干渉計による先行実験でも地下の優位性が示された



国立天文台 20m 干渉計を移設

懸架装置による防振

鏡を吊ることによって防振することができる。



- 共振周波数の低い懸架装置の方が、高周波での防振性能が良い
- 共振では防振できない

鏡の熱雑音

検証方法(雑音同定) ⇒ **直接測定**
(理論値と測定スペクトルの一致を見る)

コーティング

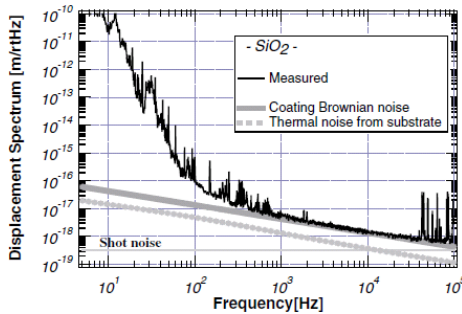
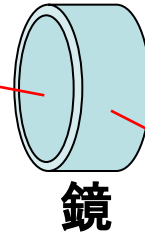


FIG. 4 (color online). Measured displacement spectrum and theoretical thermal noise levels in fused silica cavities. Measured spectrum became smaller than the previous two measurements and coincided with the level of the coating Brownian noise.

(K. Numata et al.)

PRL VOLUME 91, NUMBER 26 (2003)

Structure damping



鏡

基材

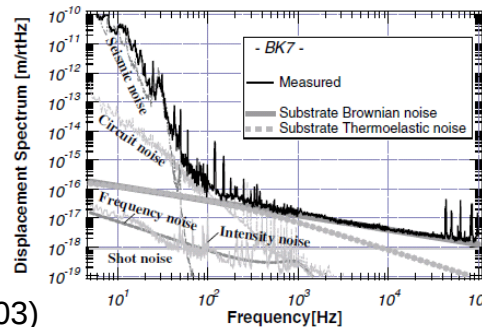


FIG. 2 (color online). Measured displacement spectrum and theoretical thermal noise levels in BK7 cavities. Other estimated noises are also shown. Measured spectrum agreed with the level of the substrate Brownian noise over wide frequency range.

Structure damping

サファイア鏡

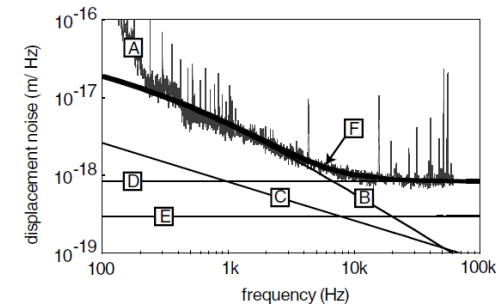


FIG. 2. Displacement noise [$S^{1/2}(\omega)$] in the interferometer with sapphire mirrors as a function of frequency $f = \omega/2\pi$. Curve "A" is the total measured noise; "B" is the calculated thermoelastic-damping noise; "C" is the expected coating thermal noise; "D" is the measured shot noise; and "E" is the electronic noise in the measurement, principally due to the photodetectors. Curve "F" is the sum, in quadrature, of the thermoelastic-damping noise and the shot noise. There are no undetermined parameters in these curves. No fits to the data were performed.

(E.D. Black, et al)

PRL 93, 241101 (2004)

Thermoelastic damping

溶融石英(Fused Silica)や、低温で高Q値を持つサファイア基材によって
熱雑音を低減

振りの熱雑音

サスペンションワイヤー
(Structure damping,
Thermoelastic damping)

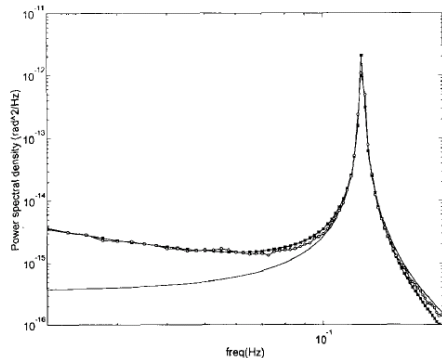
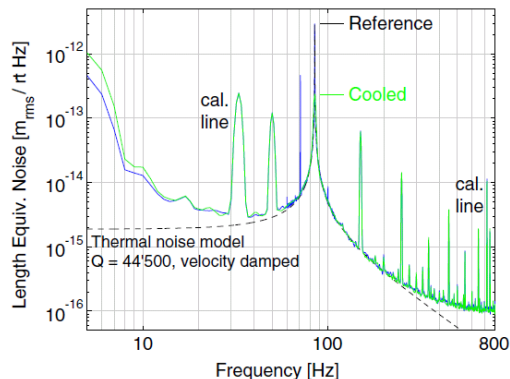


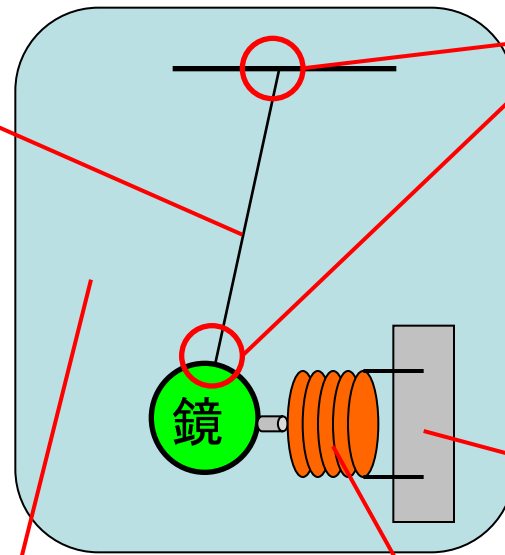
Fig. 5. Comparison between the predicted Brownian motion power spectrum using Eq. (2.4) and loss function (4.1) (*), and the measured power spectrum ($\circ$). There are no adjustable parameters in the comparison. The dotted line would be the prediction of the fluctuation-dissipation theorem using a viscous friction model with the same Q at resonance.

(G.I. Gonzalez, and P.R. Saulson)
Physics Letters A 201 (1995) 12-18



(C. M. Mow-Lowry, et al.)

PRL 100, 010801 (2008)



ワイヤークランプ
(懸架点)
Viscous damping?
Structure damping?

残留大気
(Viscous damping)

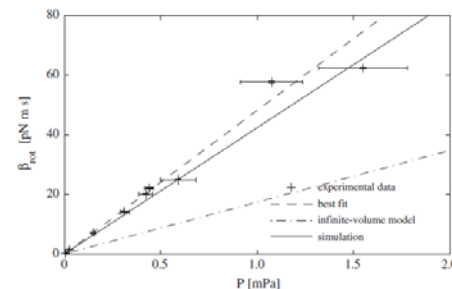
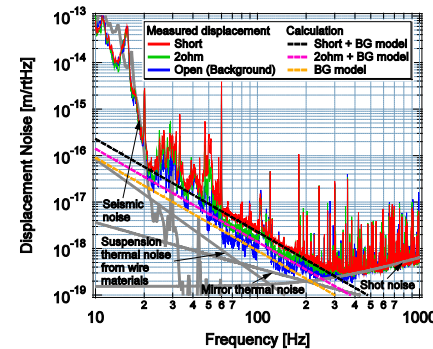


FIG. 2. Measured ITM gas-damping coefficients β_{rot} as function of residual-gas pressure P . Infinite-volume model and simulation predictions are also shown.

(A. Cavalleri, et al)
PRL 103, 140601 (2009)

コイル回路
(Viscous damping)



(K. Agatsuma et al.)
PRL 104 040602 (2010)

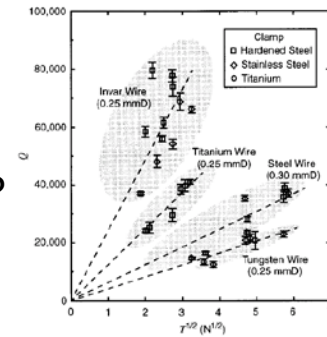
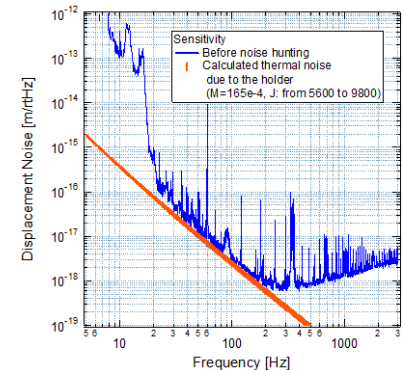


FIG. 2. Violin mode Q of invar, titanium, steel, and tungsten for the clamps made of hardened steel, stainless steel, and titanium, measured as a function of $\sqrt{f}$. The dotted lines indicate best fit to data with the assumption of zero-crossing linear dependence to $\sqrt{f}$.

(Dawid, and Kawamura)
Rev. Sci. Instrum. 68 (12), December 1997

コイル固定具
(Viscous damping)

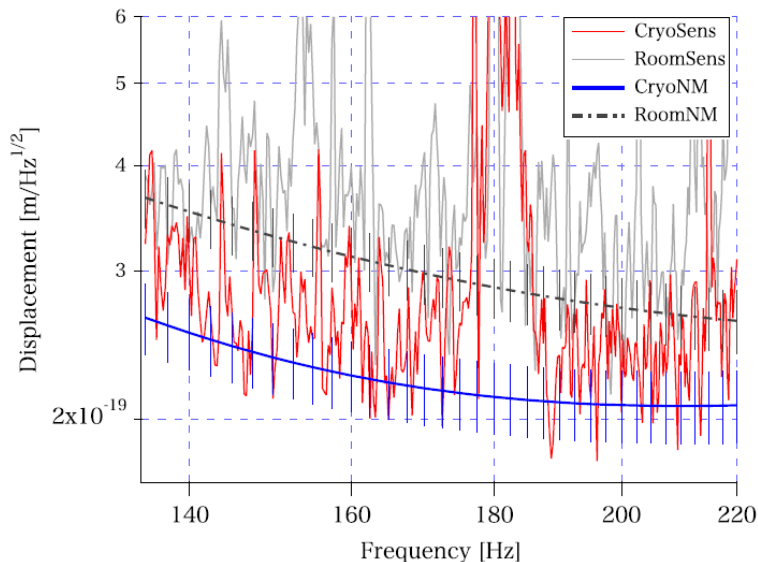
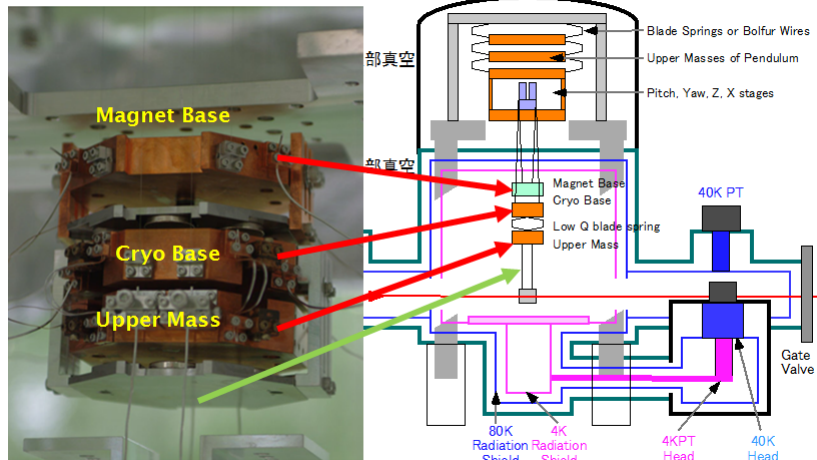


(K. Agatsuma et al.)
Class. Quantum Grav. 27
(2010) 084022

鏡と同一基材のワイヤー、高真空、高インピーダンスコイルで低減

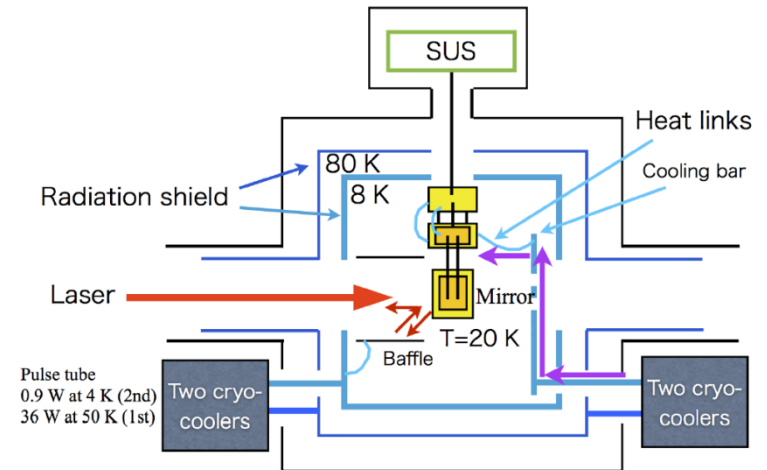
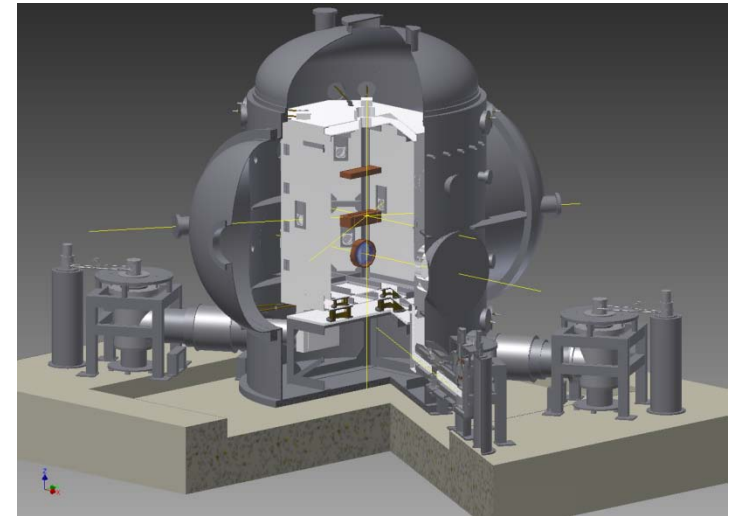
冷却による熱雑音の低減

CLIO: 鏡の熱雑音の低減



PRL 108, 141101 (2012) T. Uchiyama et.al.

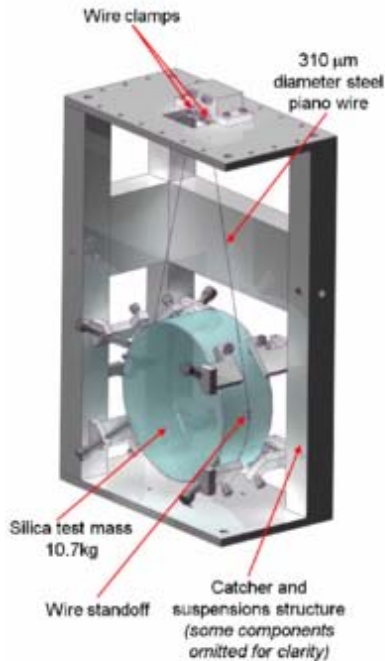
KAGRA



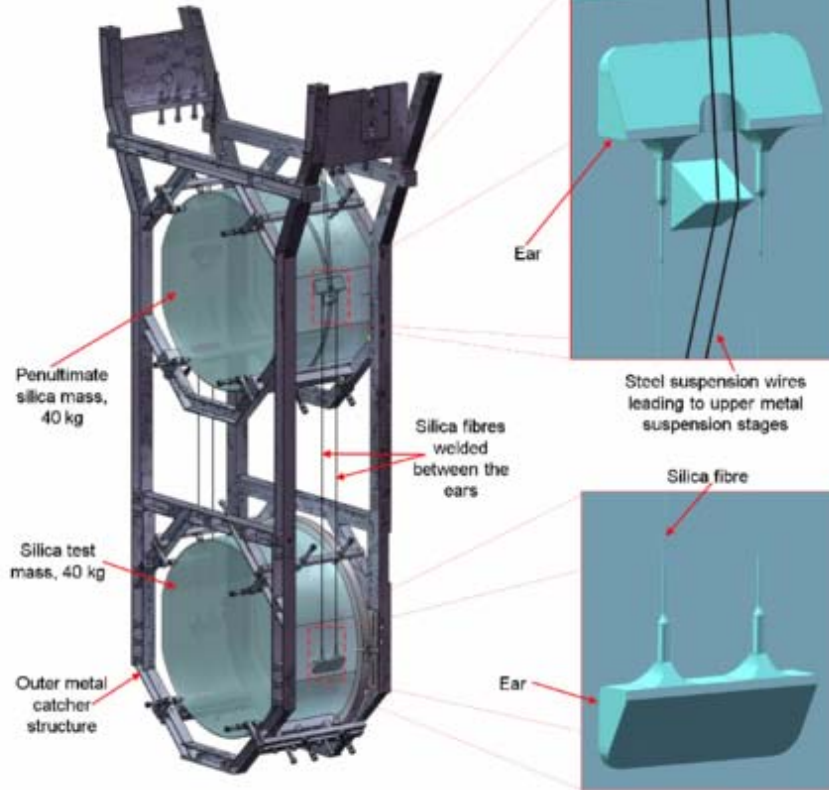
Phd thesis by Chen Dan

防振系の改良

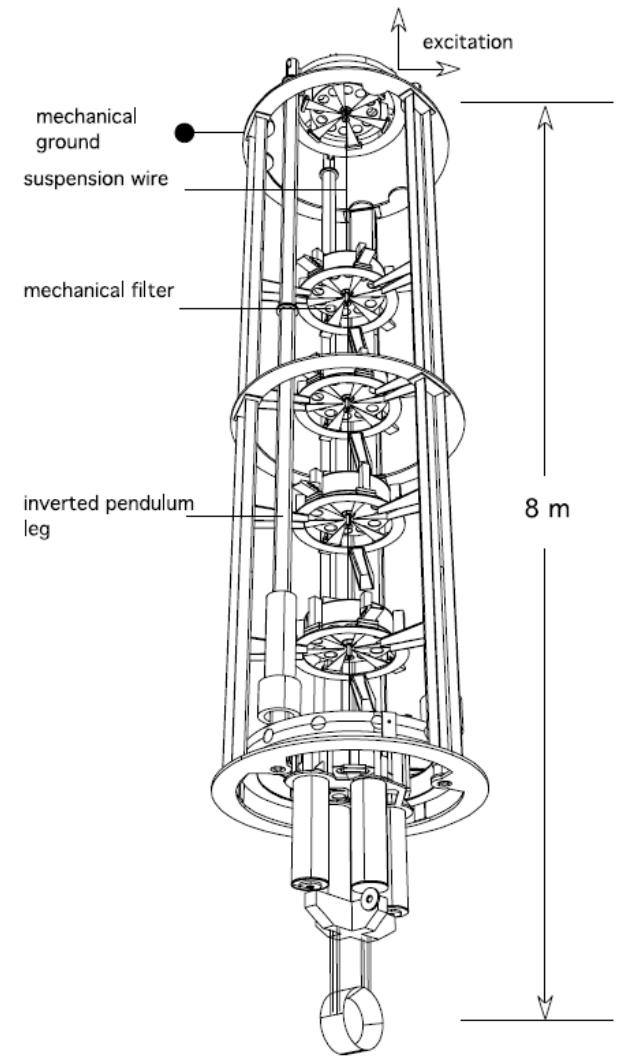
LIGO



Advanced LIGO



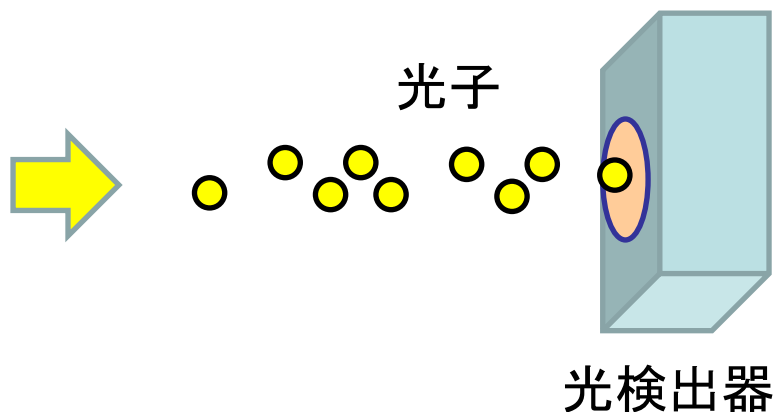
Virgo



高性能防振装置の特徴

- ◆ 多段振り子
- ◆ 低い共振周波数
- ◆ 高いQ値 (低ロス)

量子雑音（散射雑音）



- ・光子のカウンティングノイズ
- ・ホワイト雑音（周波数依存無し）
（雨が屋根に当たる音と同じ）

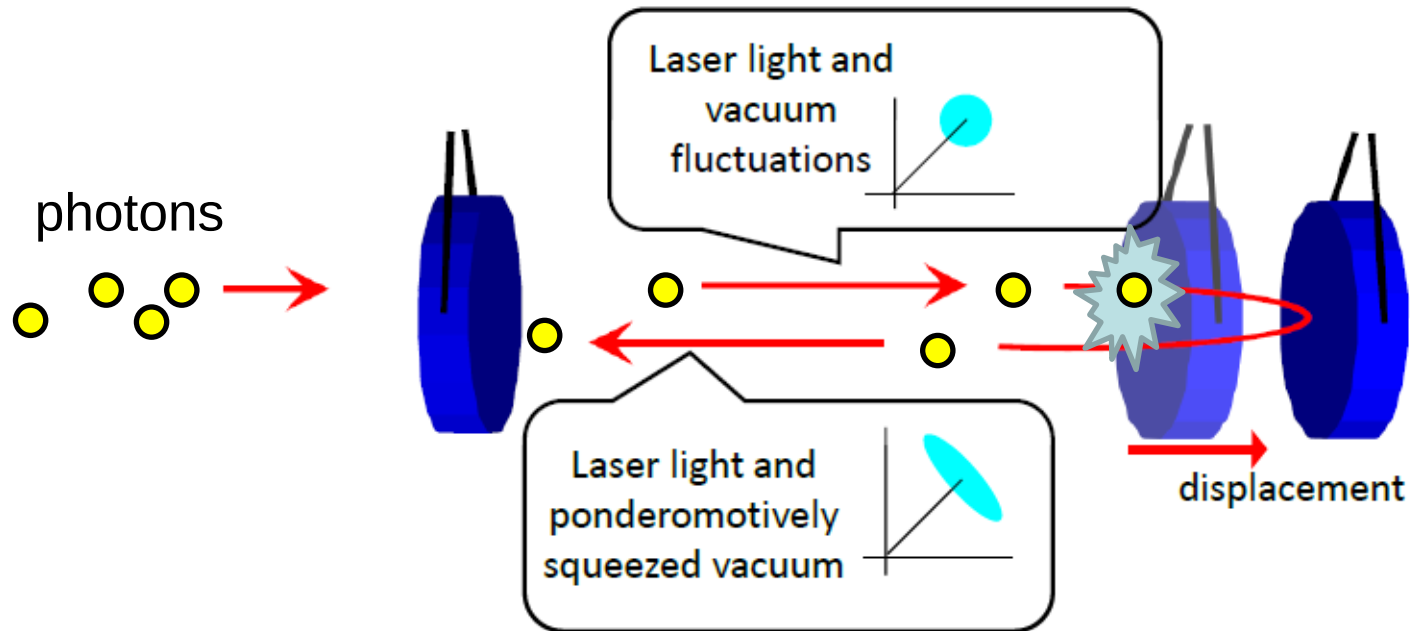
光電流 I [A] に生じる散射雑音 $\tilde{I} = \sqrt{2eI}$ [A/ $\sqrt{\text{Hz}}$]

重力波信号 $\propto I$

等価位相雑音（信号雑音比） $\Delta\tilde{\phi}_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{2e}{I_0}} = \sqrt{\frac{2\hbar\Omega}{\eta P_0}} \propto P_0^{-1/2}$ Ω : 光角周波数

Shot noise（散射雑音の信号雑音比）は入射光量を上げることで抑えられる

量子雑音(輻射圧雑音)



干渉計の応答を含めた量子雑音の計算(散乱雑音と輻射圧雑音): パワースペクトル

$$S_h(f) = \frac{h_{\text{SQL}}^2}{2} \left(\frac{1}{\mathcal{K}_{\text{FPMI}}(\Omega)} + \mathcal{K}_{\text{FPMI}}(\Omega) \right)$$

$$\text{輻射圧雑音} \propto P_0^{1/2}$$

$$\mathcal{K}_{\text{FPMI}}(\Omega) = \frac{4I_0\omega_0}{m_{\text{r}}r_{\text{F}}r_{\text{E}}} \left(\frac{T_{\text{F}}\mathcal{F}}{\pi c\Omega} \right)^2 \frac{1}{1 + r_{\text{F}}^2 - 2r_{\text{F}} \cos\left(\frac{2\Omega L}{c}\right)}$$

$$h_{\text{SQL}} \equiv \sqrt{\frac{4\hbar}{m_{\text{r}}\Omega^2}}$$

Ω : 重力波の周波数

輻射圧雑音は入射光量を下げることによって抑えられる

標準量子限界(SQL)

- Standard Quantum Limit (SQL)

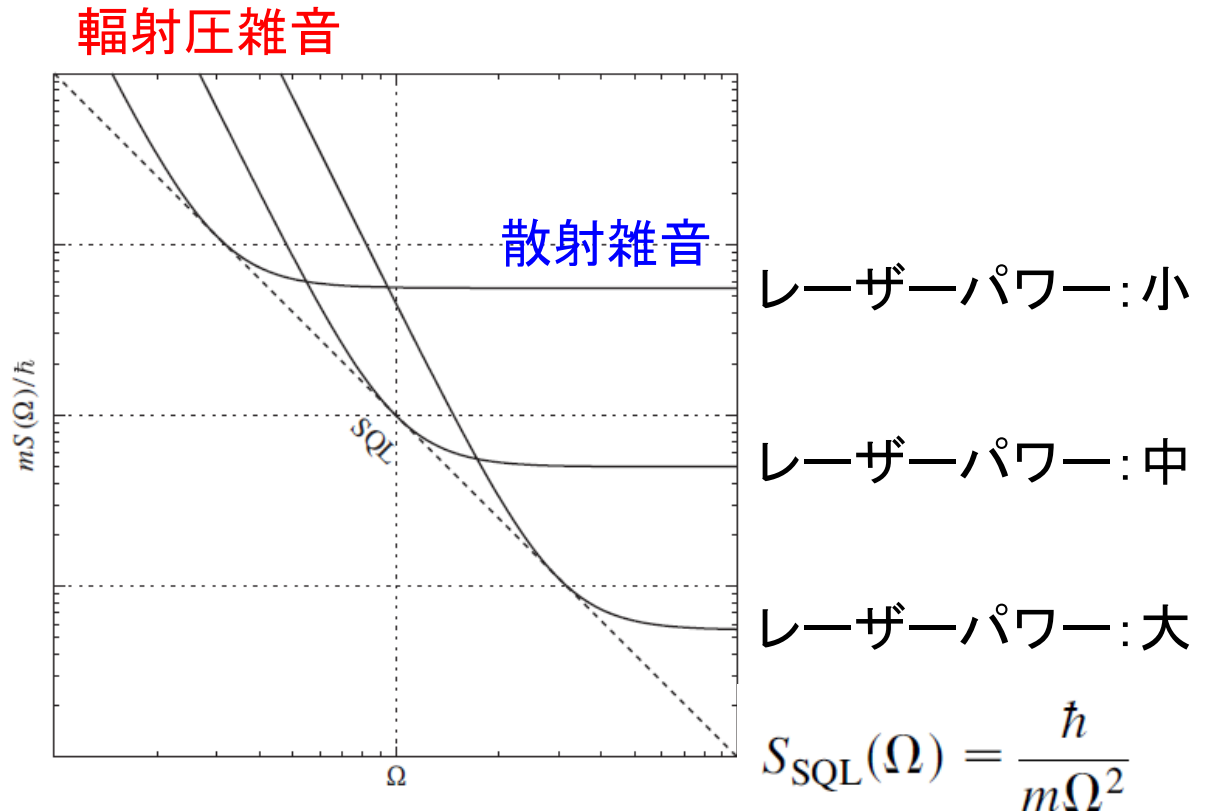


FIG. 2. The noise curves family of SQL-limited position meters; the common envelope of these curves form the SQL.

- ・将来の重力波検出器は量子雑音だけで制限されられる
- ・SQLを超えるための研究も行われている

世界の重力波検出器

ハンフォード



ワシントン州 (4km)

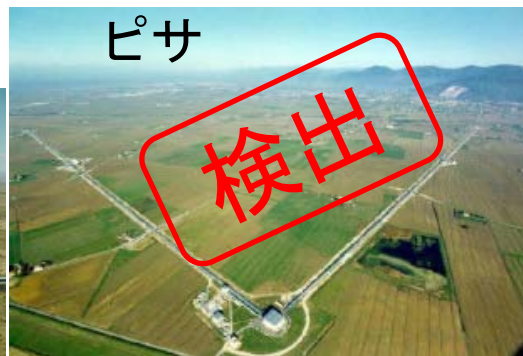
LIGO(2015)

リビングストン



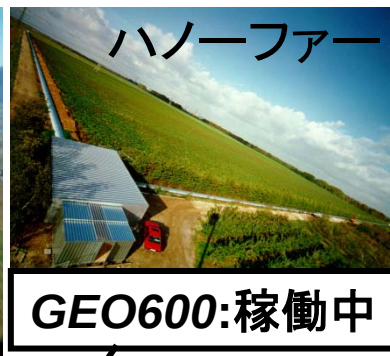
ルイジアナ州 (4km)

ピサ



Virgo(2017) (3km)

ハノーファー



GEO600:稼働中 (600m)

KAGRA (2020?)

岐阜県神岡町



(3km)



三鷹市:国立天文台

TAMA300

(300m)

LIGO India (2023?)



国際ネットワークの構築

初観測の論文

PRL 116, 061102 (2016)

 Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

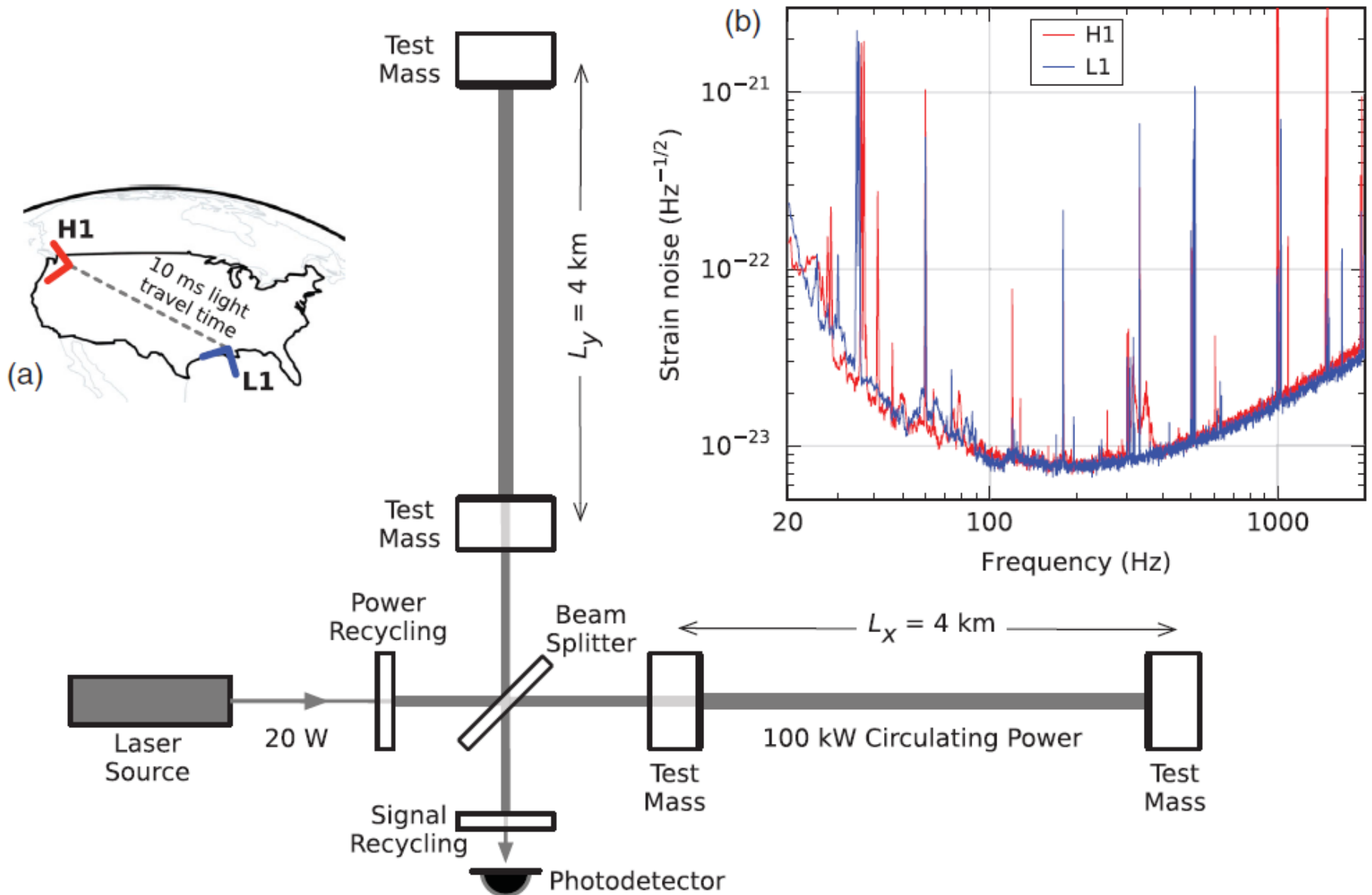
B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

- ◆ 2015年9月14日に**アメリカのLIGO**(検出器2台)が重力波信号を同時に初検出
- ◆ LIGO-Virgoの共同研究論文として発表(欧州のVirgoは検出器稼働には間に合わなかったがデータ解析で貢献)
- ◆ **ブラックホール連星**の合体を初観測
- ◆ 測定された信号は35Hz-250Hz、時空変動量はピークで 1×10^{-21}
- ◆ SNRは24で、**雑音の偶然一致確率は約20万年に1回**(significance 5.1σ)
- ◆ **36太陽質量と29太陽質量のBHが合体して62太陽質量のBHが生成、差分の3太陽質量分が重力波として放出**
- ◆ 合体イベントの距離は410Mpc($z=0.09$): **13億光年**
- ◆ 今回解析されたのは16日間の観測データ
- ◆ 今回の初観測の解析結果には一般相対論との矛盾はみとめられない
- ◆ **アインシュタインが一般相対論によって重力波を予言してから約100年**

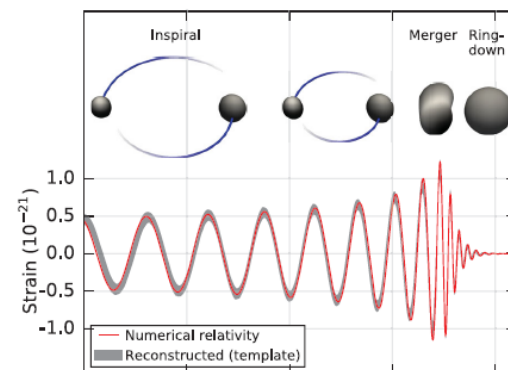
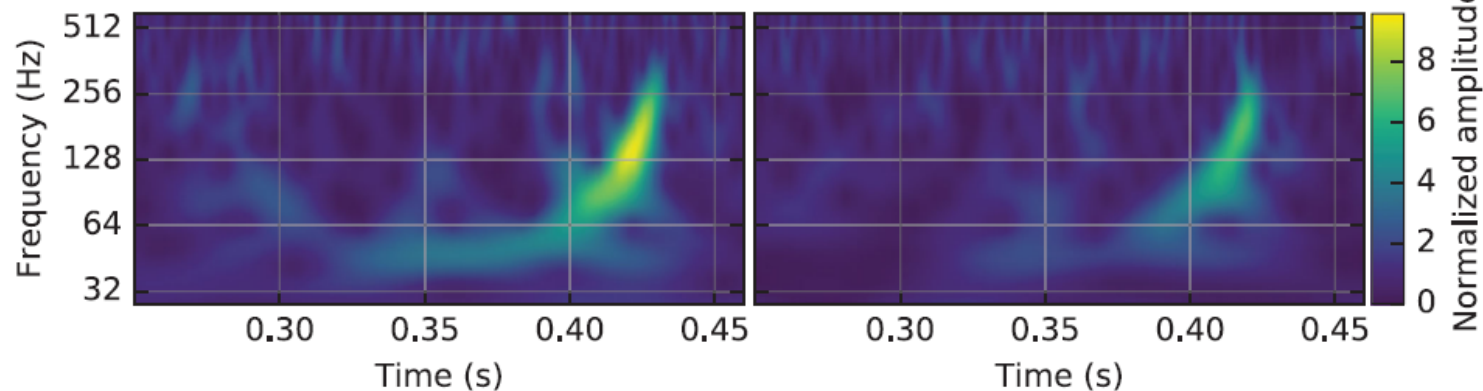
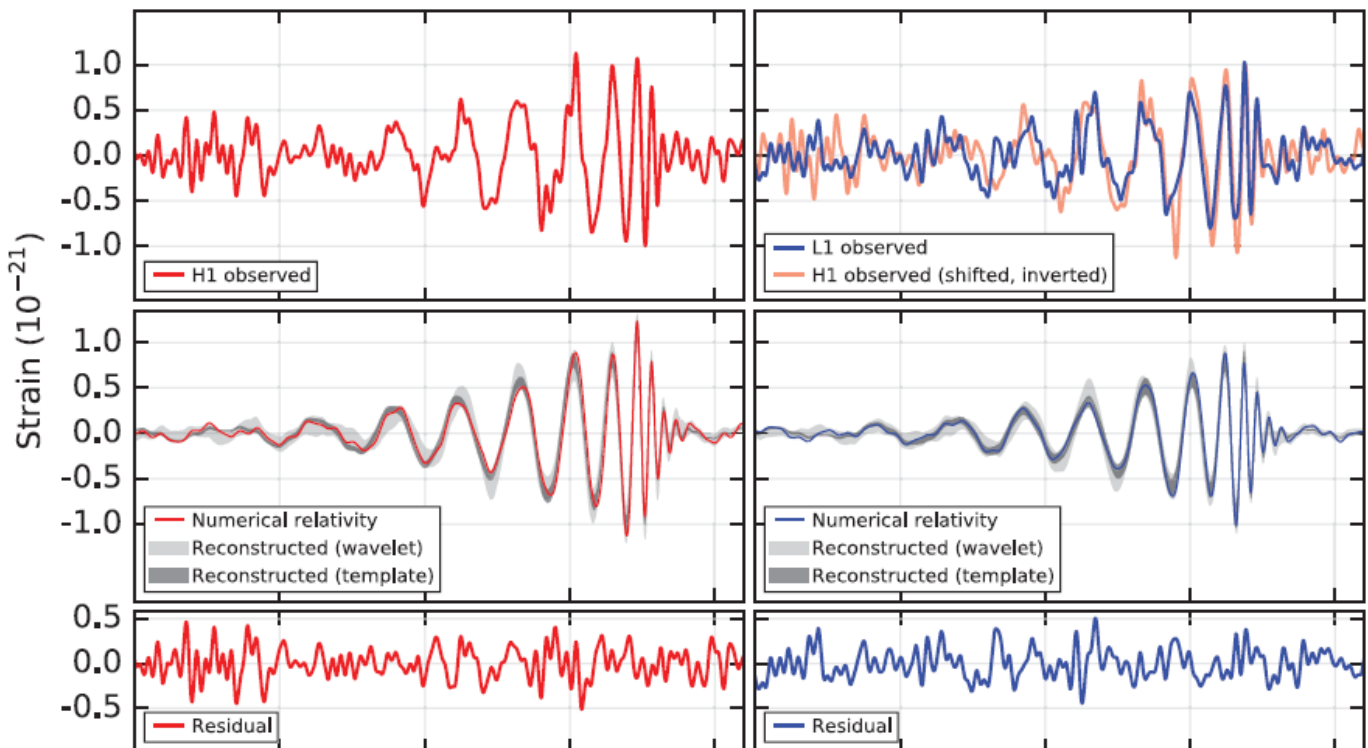
LIGO



初観測データ

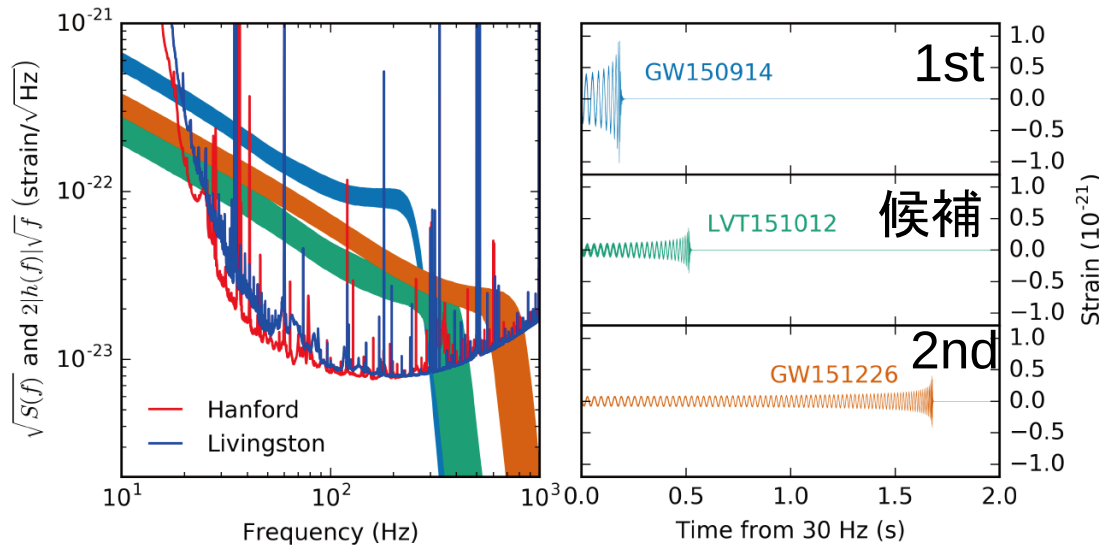
Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



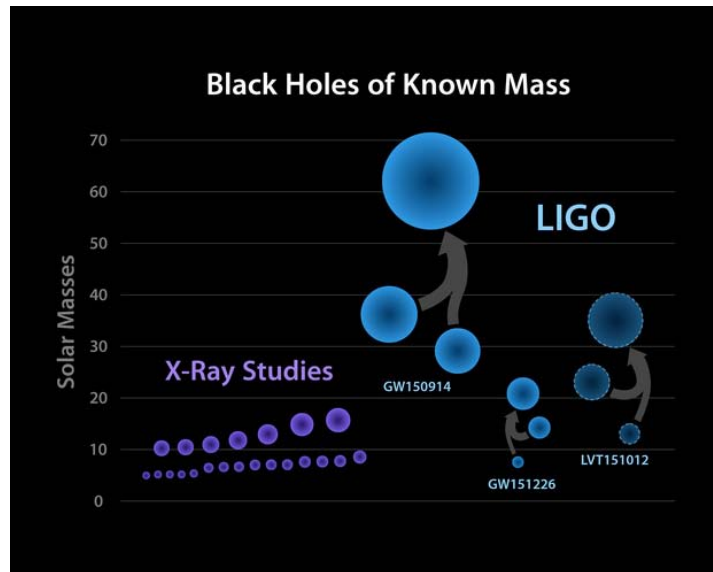
光学望遠鏡を
「目」とするなら
重力波望遠鏡
は「耳」に相当

いきなり天文学



[arXiv:1606.04856v2 [gr-qc] 22 Jun 2016]

Event	GW150914	GW151226	LVT151012
Signal-to-noise ratio ρ	23.7	13.0	9.7
False alarm rate FAR/yr ⁻¹	$< 6.0 \times 10^{-7}$	$< 6.0 \times 10^{-7}$	0.37
p-value	7.5×10^{-8}	7.5×10^{-8}	0.045
Significance	$> 5.3\sigma$	$> 5.3\sigma$	1.7σ
Primary mass m_1 / $M_\odot$	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	23^{+18}_{-6}
Secondary mass m_2 / $M_\odot$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	13^{+4}_{-5}
Chirp mass $\mathcal{M}_{\text{source}} / M_\odot$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$
Total mass $M_{\text{source}} / M_\odot$	$65.3^{+4.1}_{-3.4}$	$21.8^{+5.9}_{-1.7}$	37^{+13}_{-4}
Effective inspiral spin χ_{eff}	$-0.06^{+0.14}_{-0.14}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$
Final mass M_f / $M_\odot$	$62.3^{+3.7}_{-3.1}$	$20.8^{+6.1}_{-1.7}$	35^{+14}_{-4}
Final spin a_f	$0.68^{+0.05}_{-0.06}$	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$0.66^{+0.09}_{-0.10}$
Radiated energy $E_{\text{rad}} / (M_\odot c^2)$	$3.0^{+0.5}_{-0.4}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$1.5^{+0.3}_{-0.4}$
Peak luminosity $\ell_{\text{peak}} / (\text{erg s}^{-1})$	$3.6^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{56}$	$3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$	$3.1^{+0.8}_{-1.8} \times 10^{56}$
Luminosity distance D_L / Mpc	420^{+150}_{-180}	440^{+180}_{-190}	1000^{+500}_{-500}
Source redshift z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.20^{+0.09}_{-0.09}$
Sky localization $\Delta\Omega / \text{deg}^2$	230	850	1600



中間質量ブラックホールを初観測

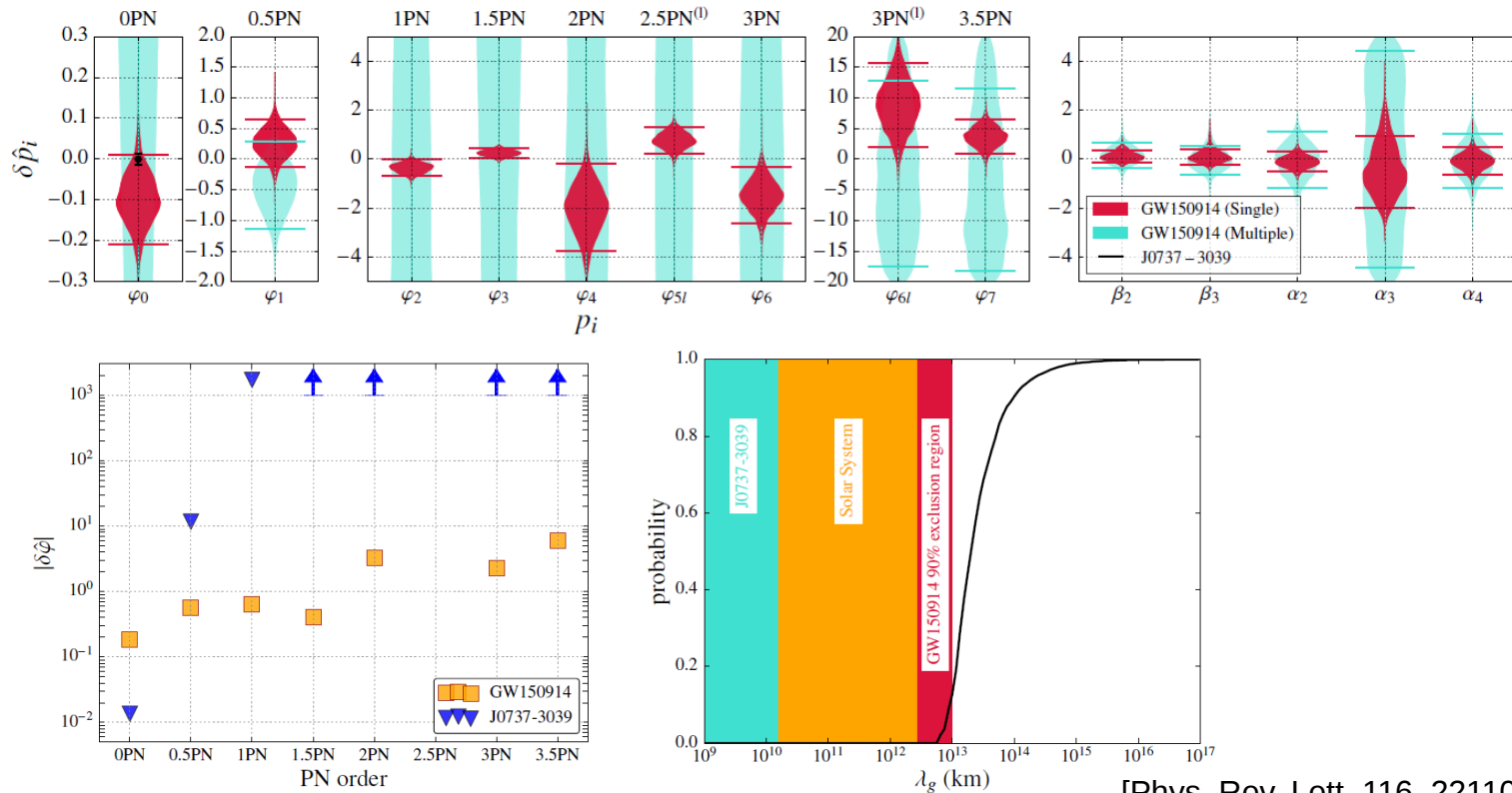
⇒ これまでは小さなBHと超巨大BH(いずれも候補天体)しか見つかっていなかった

[<https://www.ligo.caltech.edu>]

Nikhef グループの貢献

データ解析部門: 一般相対性理論の検証 (Testing GR)

• Post-Newtonian係数の評価



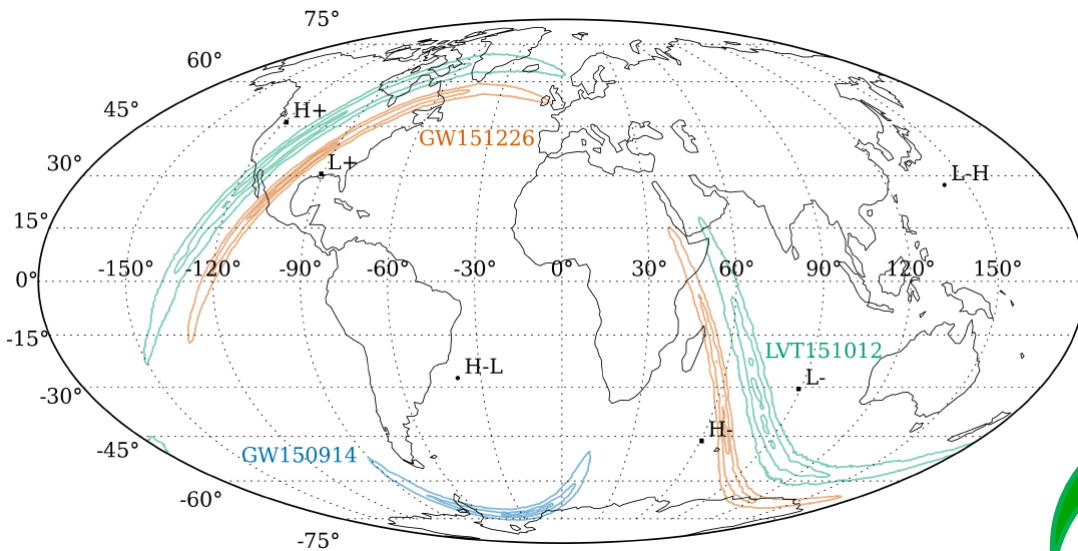
[Phys. Rev. Lett. 116, 221101]
[arXiv:1602.03841v2 [gr-qc] 9 Jun 2016]

◆ 重力場変化の高次成分全てで世界最高精度

◆ 重力子質量の上限値に(仮定無しで)最高精度で制限 $m_g \leq 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$

一般相対論の正しさをこれまでに無い精度で検証した

重力波の飛来方向



[arXiv:1606.04856v2 [gr-qc] 22 Jun 2016]

Virgo稼働での予想

複数台の検出器が同時に測定することで、
飛来方向がより正確に分かる！

⇒ Advanced Virgoの完成が切望

[<https://www.ligo.caltech.edu>]

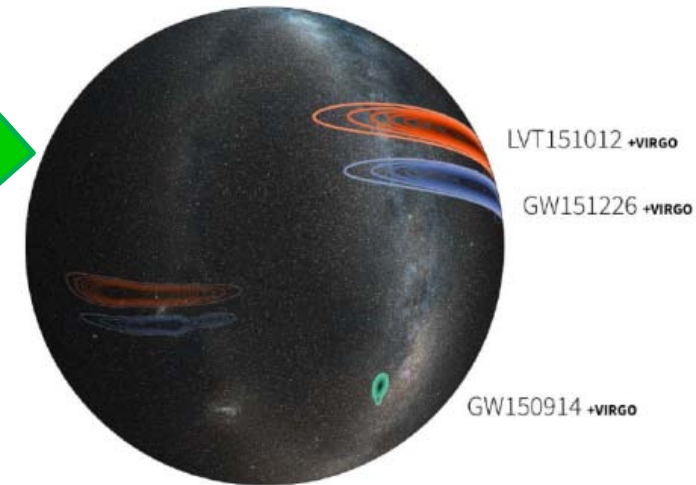
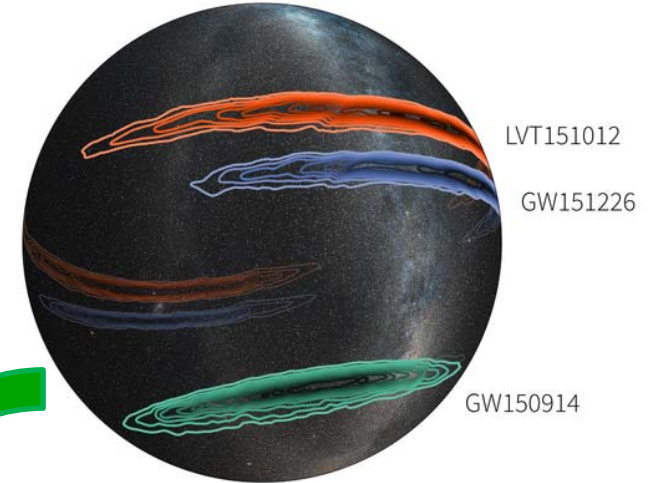
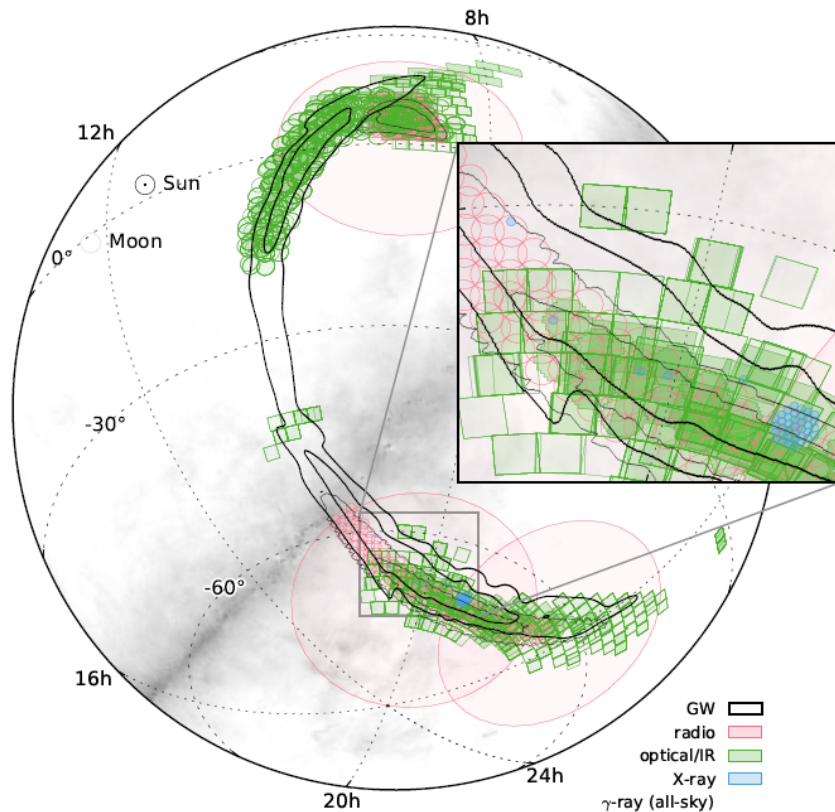


Image credit: LIGO/Leo Singer
(Milky Way image: Axel Mellinger)

電磁波による追尾観測 (EM follow up)



- ・光では何も見えず。
- ・飛来方向の可能性範囲が広すぎてフォローに時間がかかり過ぎる。

[arXiv:1602.08492v1 [astro-ph.HE] 26 Feb 2016]

	Area ^a		
	10%	50%	90%
cWB	10	100	310
LIB	30	210	750
BSTR	10	90	400
LALInf	20	150	620

EM follow up: 電磁波(可視光、ガンマ線、エックス線、赤外線)で追尾観測

重力波の信号 → 他の光学望遠鏡へ連絡 → 望遠鏡が一斉に
重力波飛来方向をスキャン

=> 物音に気付いて対象を発見し、目と耳で注意深く観測

Virgo => Advanced Virgo

ヨーロッパ最大の重力波検出器 (3 km)
(共同研究参加国: **Italy, France,**
Netherlands, Poland, Hungary, Spain)

6 European countries
20 labs, ~250 authors



(Italy, near Pisa)

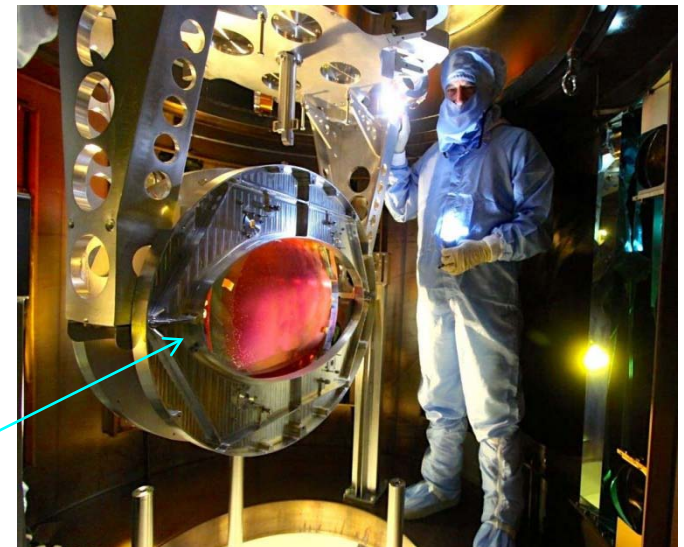
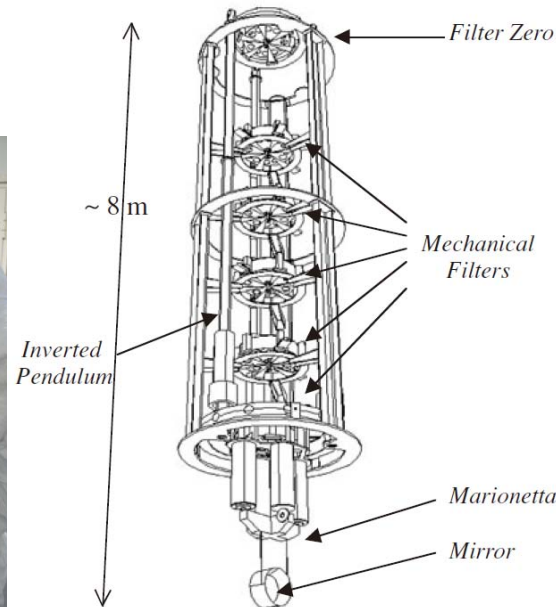
[<http://www.ego-gw.it/public/about/welcome.aspx>]

Virgo

=> Virgo+

=> **Advanced Virgo (AdV)**

**2017年 8月に約一カ月だけ稼働し、
見事に重力波を観測**



アクシデント

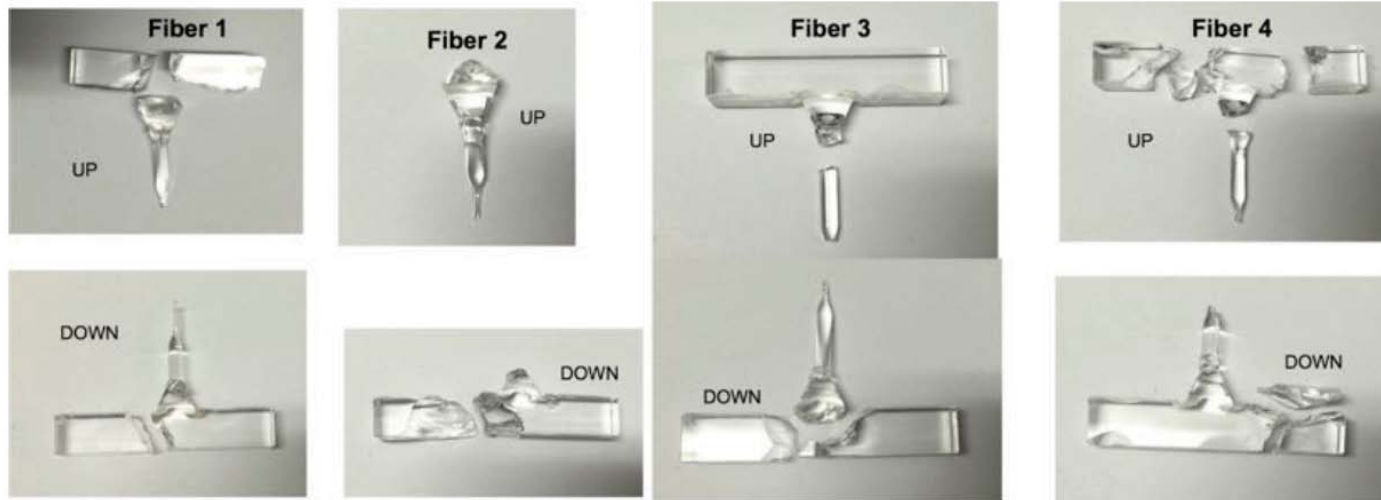
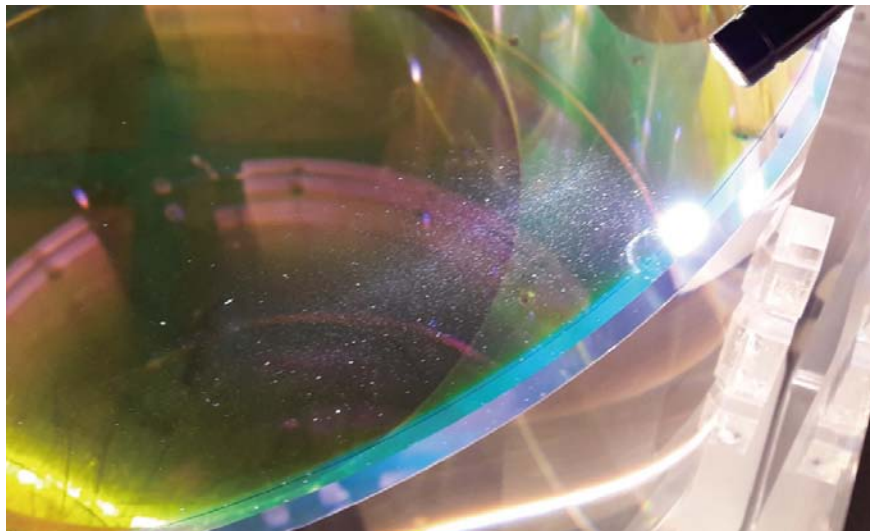


Figure 4 Fibers of WI reconstructed after the crash. According to local control data, the first fiber to break was n.3.

[VIR-0227B-16]



[VIR-0505A-16]

Table of Payload Failures, *updated to Oct. 11 2016*

Failed Mirror	Failure date	Time in air	Time in vacuum	Failed Fiber	Anchor type	Likely cause
WI (1st assembly)	Nov 18 th , 2015	5 months	9 days	3	old	Anchor collapse
NI (1st assembly)	Dec 18 th , 2015	4.5 months	5 days	2	old	Fiber/welding failure
NI (2nd assembly)	Mar 1 st , 2016	1 week	5 days	2	new	Fiber/rod failure
NE	No failure	6 months	4 months (currently)		new	No failure
WI dummy (1st assembly)	Apr 25 th , 2016	1 week	11 days	1	mixed old	Anchor collapse
WI dummy	No failure	2 days	2 weeks		mixed old	No failure
WI (2nd assembly)	June 25 th , 2016	1 month	30 days	3	new	Fiber/welding failure
WE (1st assembly)	Jun 28 th , 2016	7 months	18 days	3	new	Fiber/welding failure

**New
identification
of failed fiber**

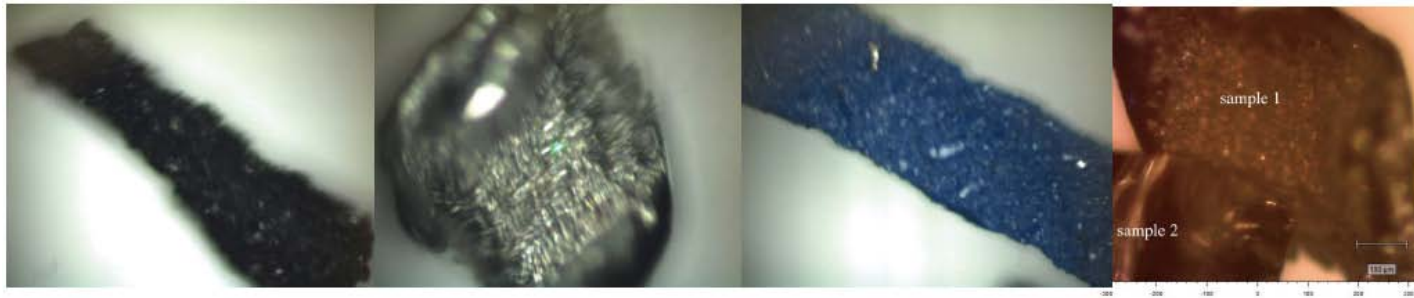
[VIR-0454A-16]

原因

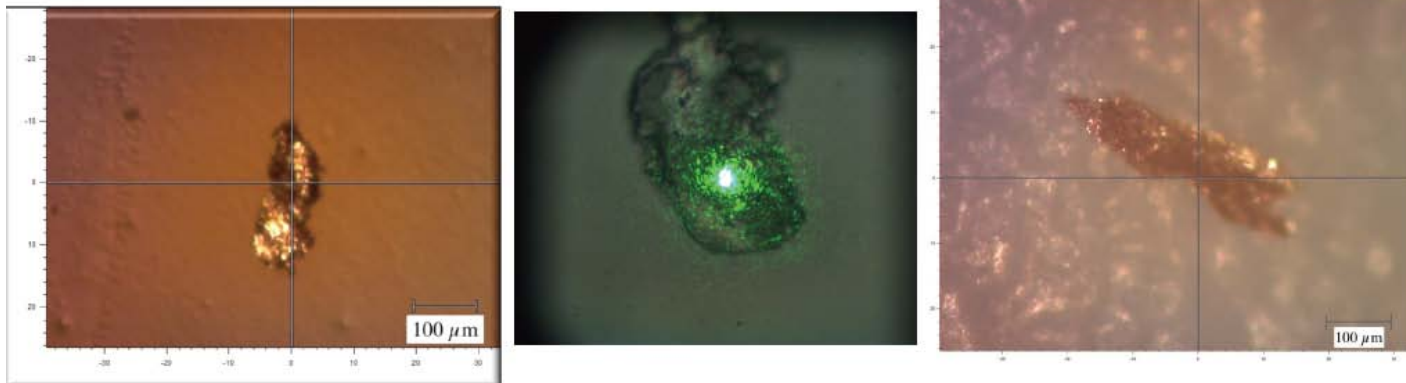


Various pieces from dust in towers

NE

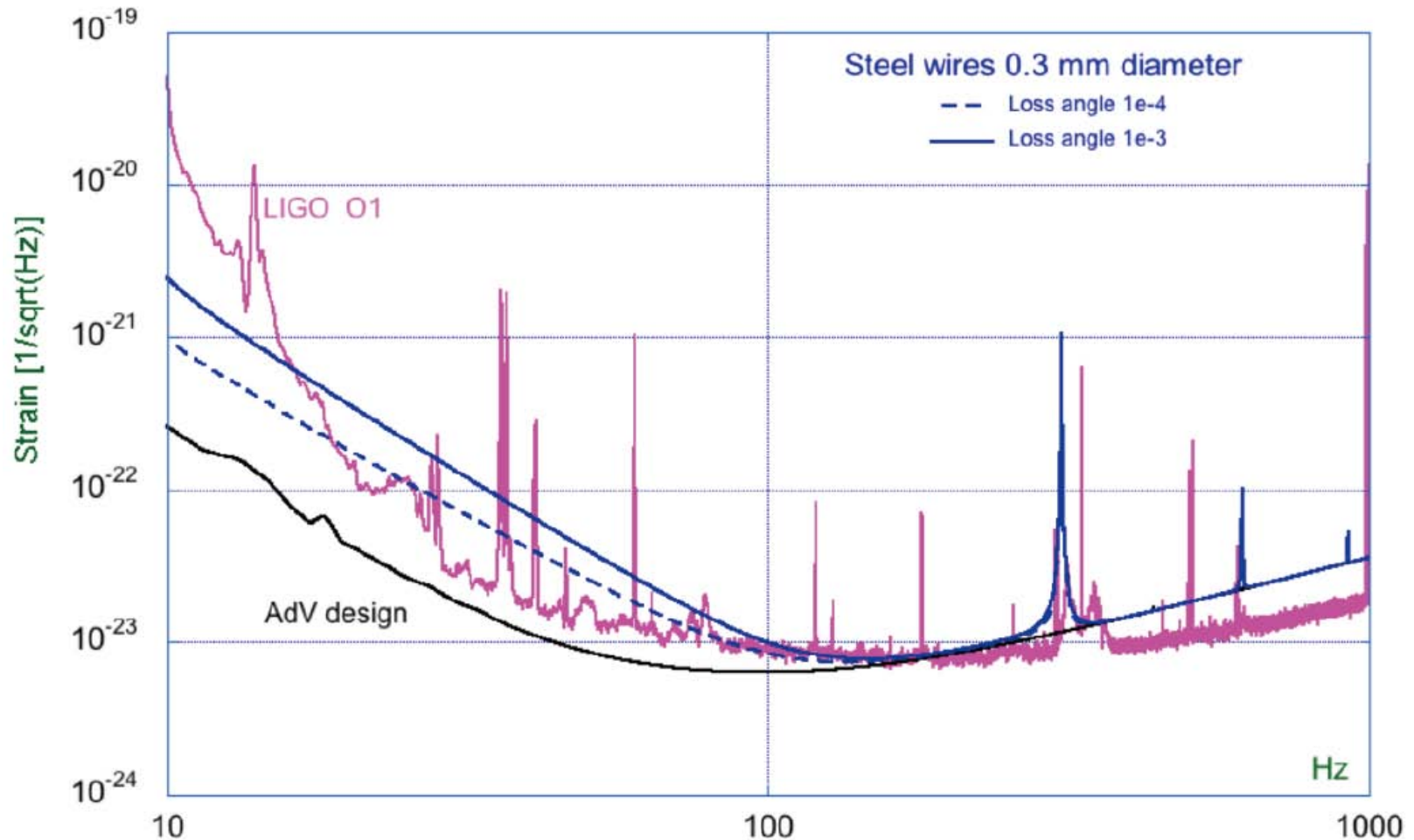


NI



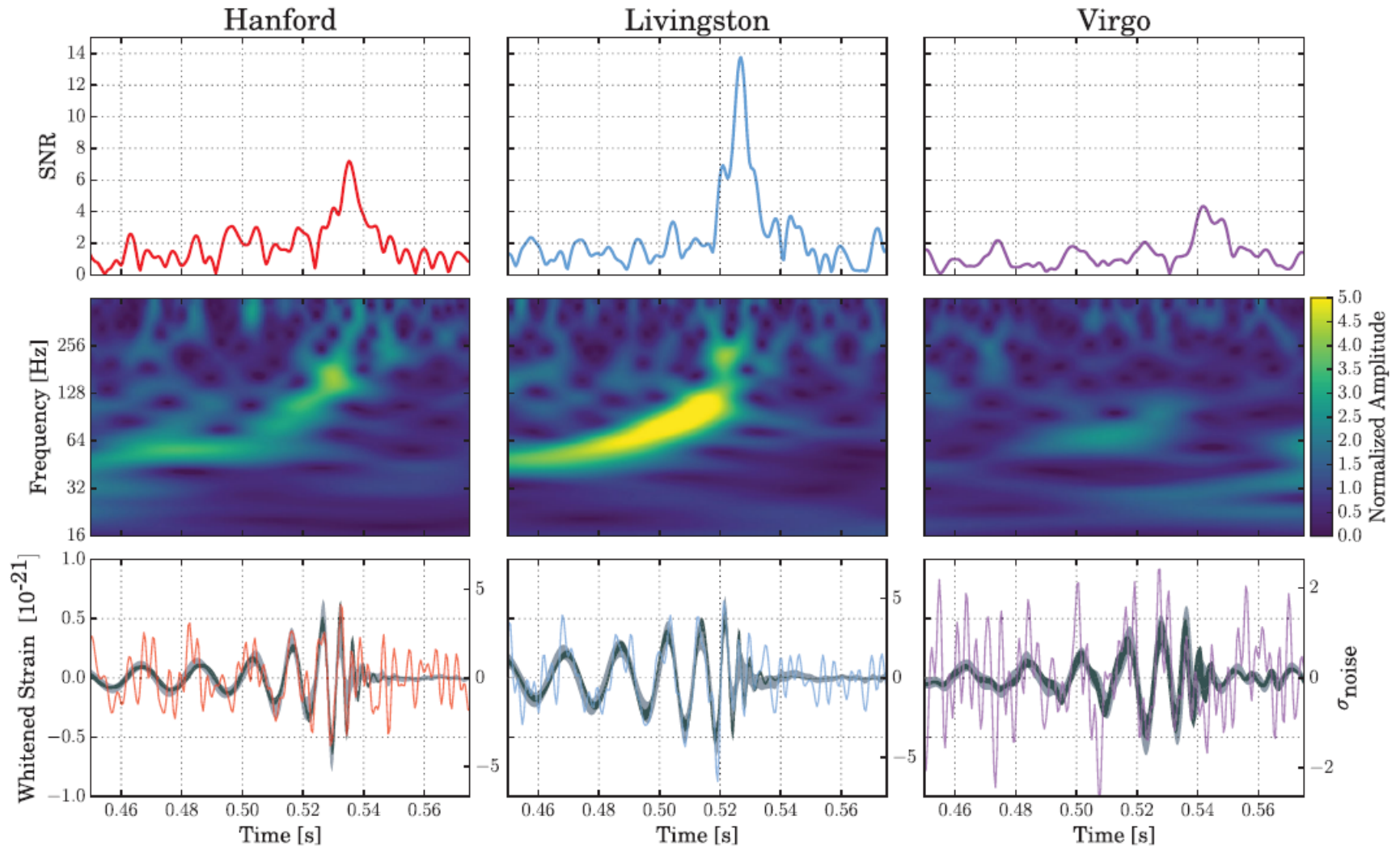
VIR-0505A-16

スチールワイヤでの代替案



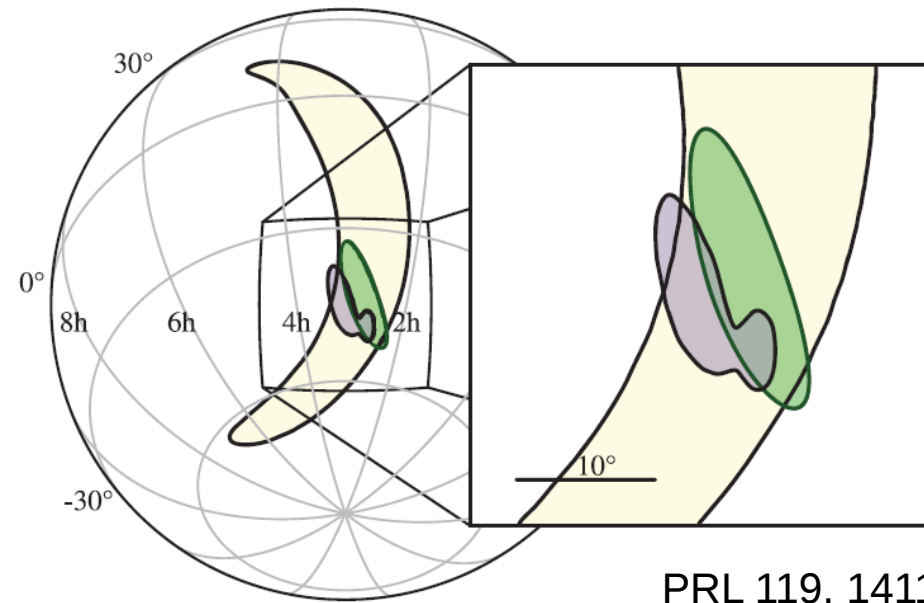
4つのコアミラーが全てスチールワイヤで吊られ、コミッショニングへ移行

GW170814: Virgoを加えた3台同時観測

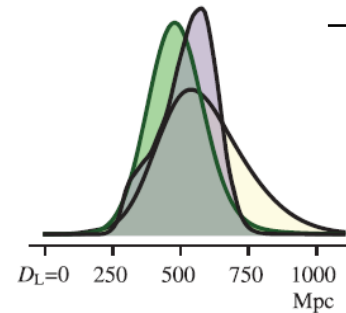


PRL 119, 141101 (2017)

GW170814: Virgoの貢献

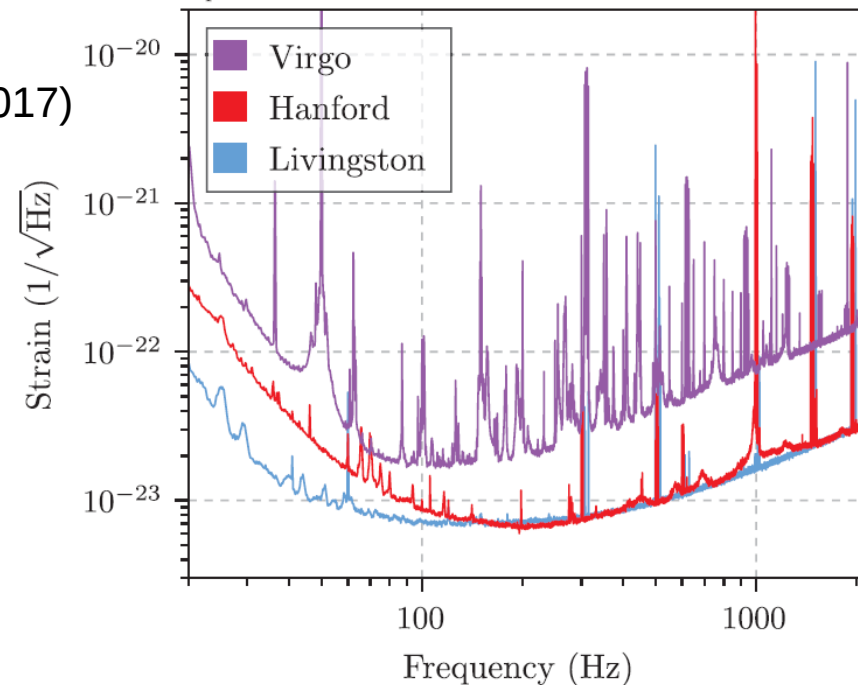


PRL 119, 141101 (2017)



LIGOの2台だけ: 700 deg^2
Virgoが加わる: 80 deg^2
→ 期待通りの大幅改善

感度はLIGOに劣るも
十分な貢献



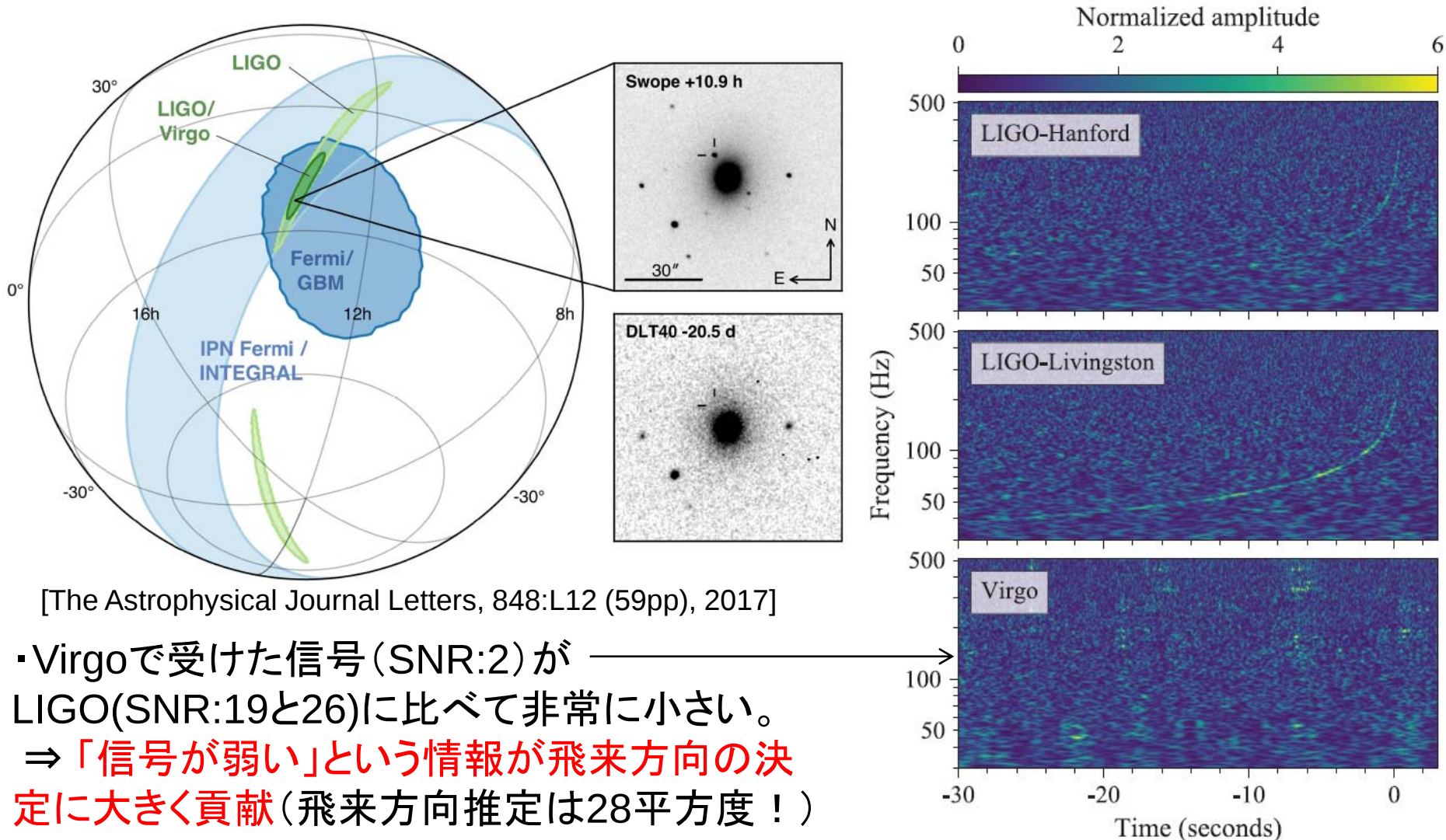
複数台の検出器が同時に測定することで、
飛来方向がより正確に分かる！

⇒ KAGRA, LIGO Indiaが完成すれば、
数度以内の角度精度が可能

重力波の偏極モードも確認
→ 予想通りテンソル型

GW170817: マルチメッセンジャー天文学

マルチメッセンジャー天文学: 複数の観測手段で同時に天体イベントを観測



PRL 119, 161101 (2017)

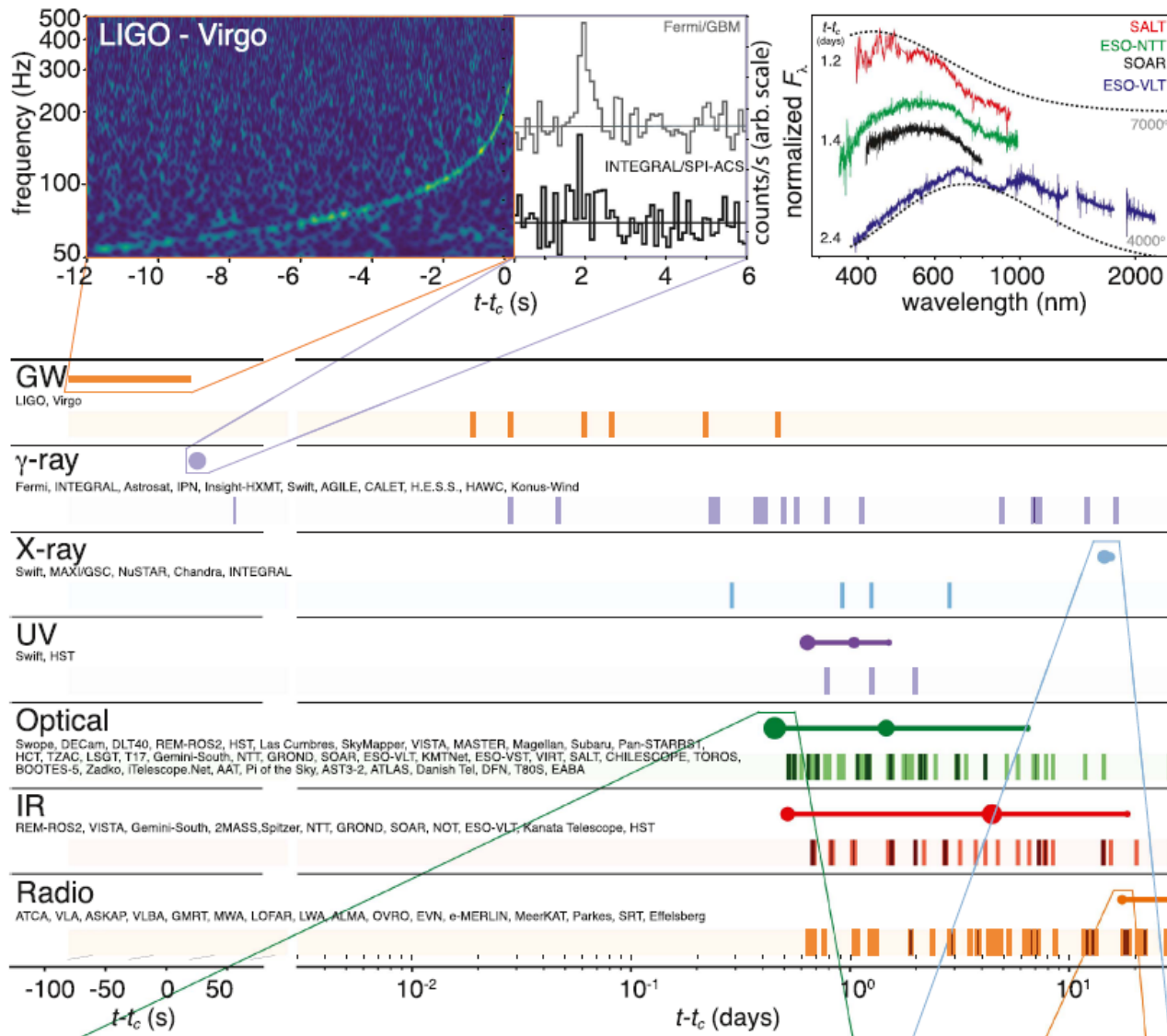
M1の皆さんに問題

- なぜVirgoの信号が弱い(見えない)にもかかわらず、飛来方向の決定精度が向上したのか？

[ヒント]

Virgoの苦手な方向から飛来した
(その苦手な方向はどちらか？)

GW170817:マルチメッセンジャー天文学



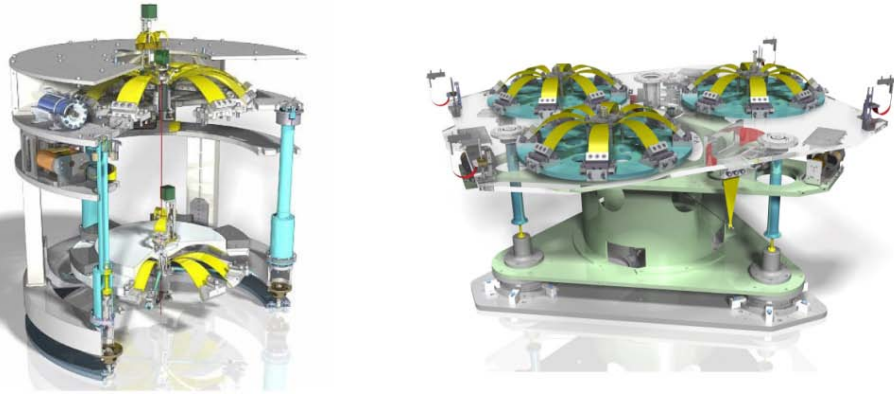
- ・ショートガンマ線バーストの発生源の解明
- ・初めてキロノヴァを観測
- ・金などの重金属の生成が連星中性子星の合体によって作られた

[The Astrophysical Journal Letters, 848:L12 (59pp), 2017]

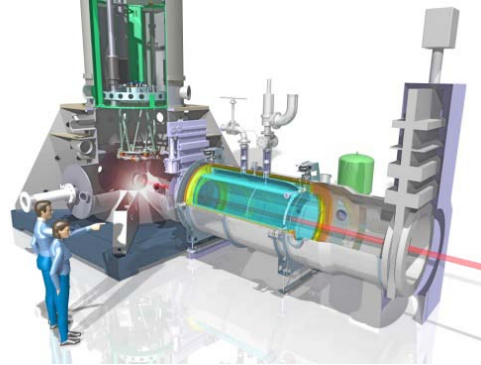
Nikhef グループの貢献

実験装置部門: **Advanced Virgoの構成要素を開発**

・高性能防振装置の開発・製作



・冷却リンクの導入



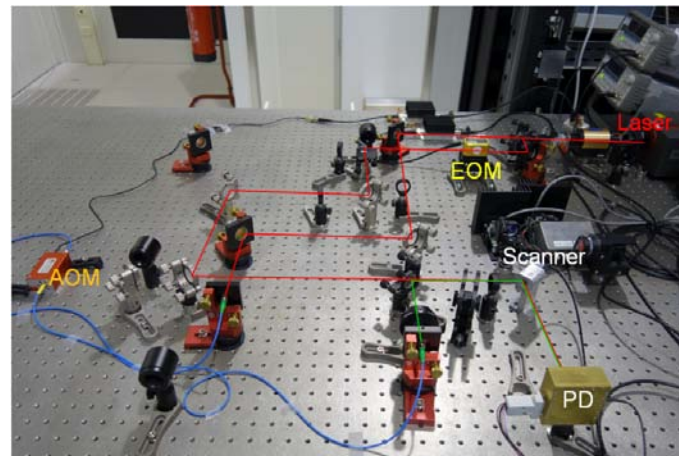
・加速度計の開発



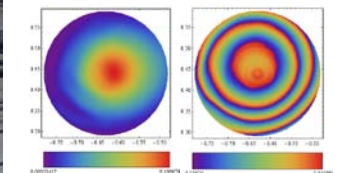
・モードクリーナー鏡の製作
サスペンション振り子のデザイン



・位相カメラ(レーザー波面センサー)の開発



← 私が担当

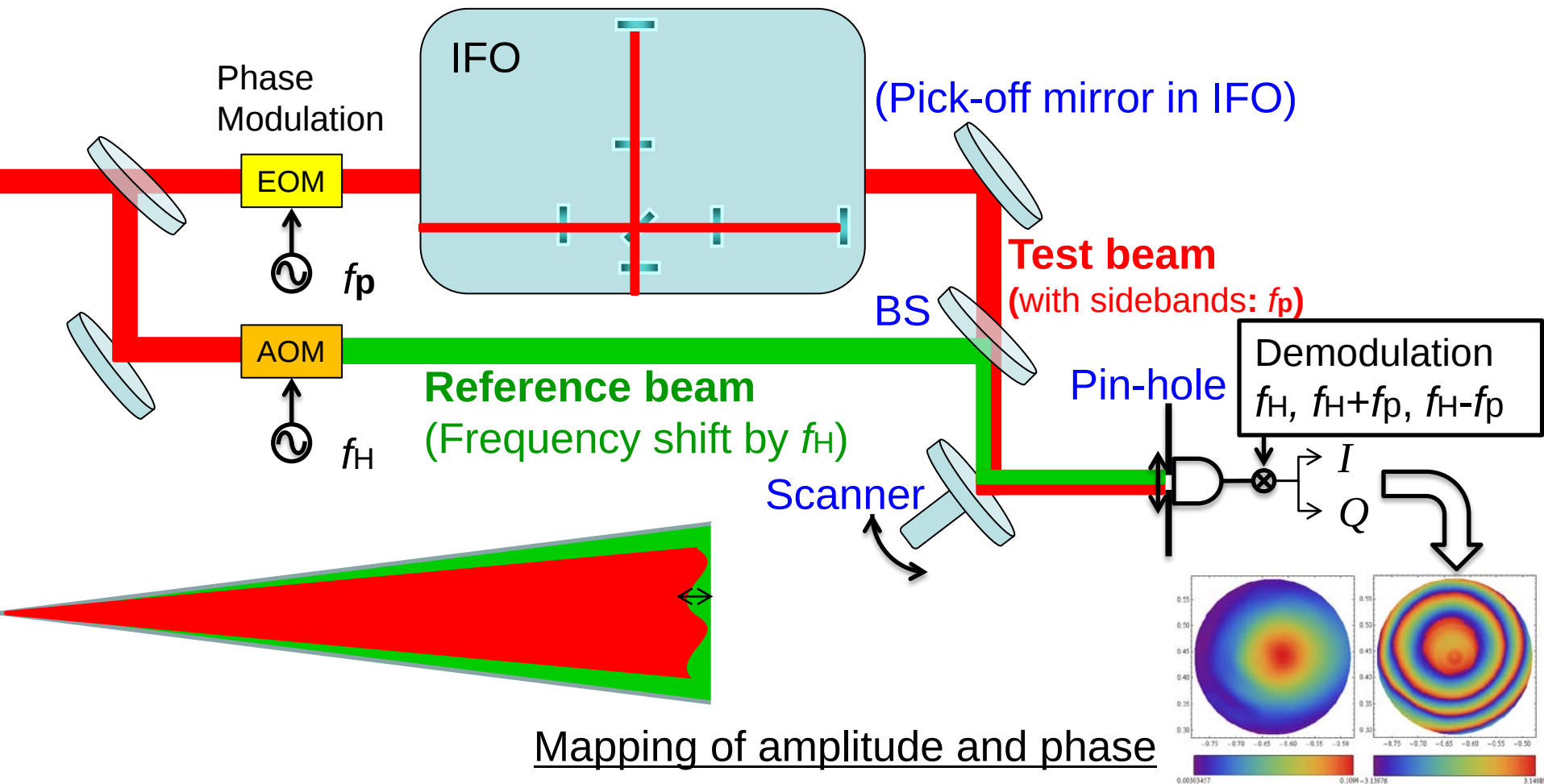


Phase Camera

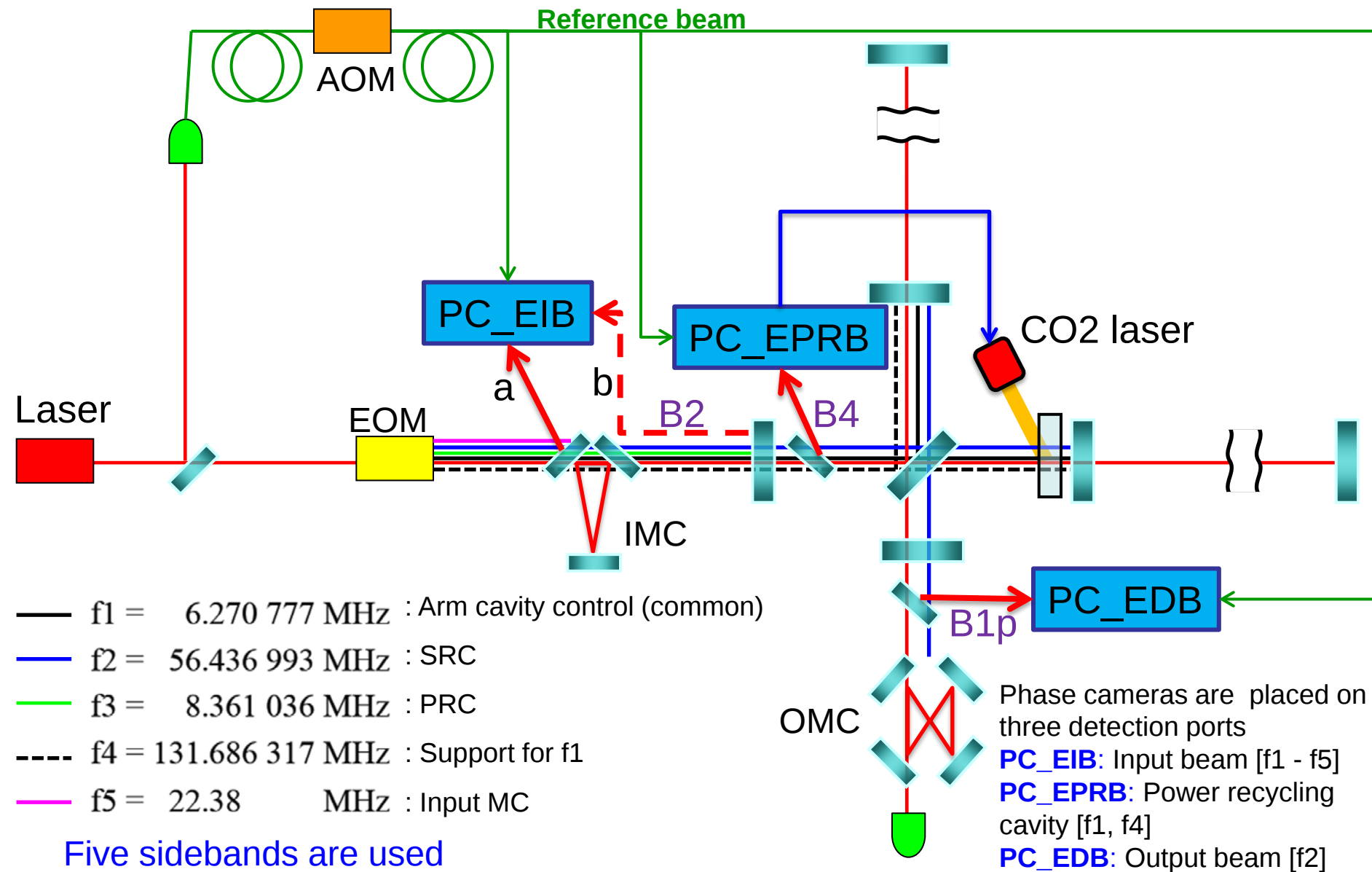
Frequency selective wave front sensor

- ◆ Heterodyne detection
- ◆ Beam scanning with pin-hole detection

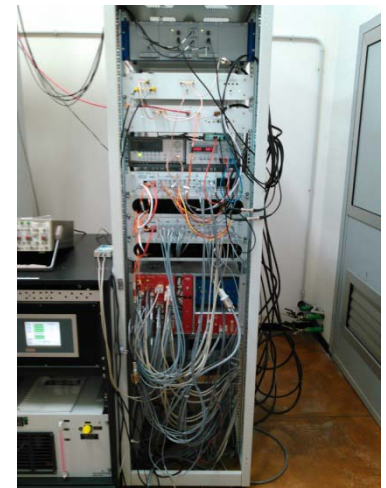
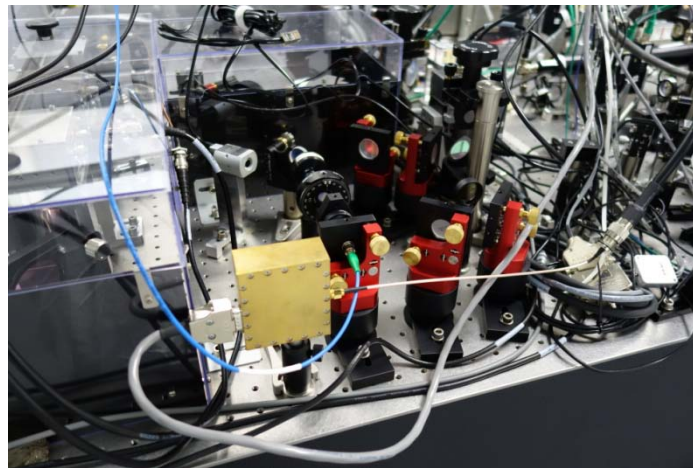
鏡の制御に使われる特定の
変調周波数のレーザーを狙
い撃ちして波面観測できる



Setup in AdV

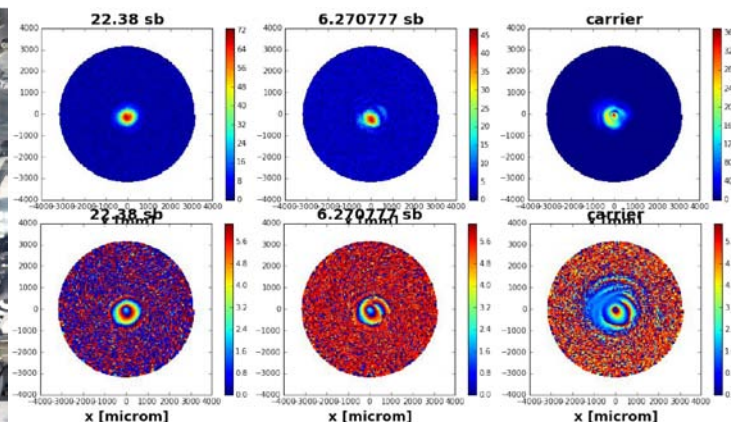
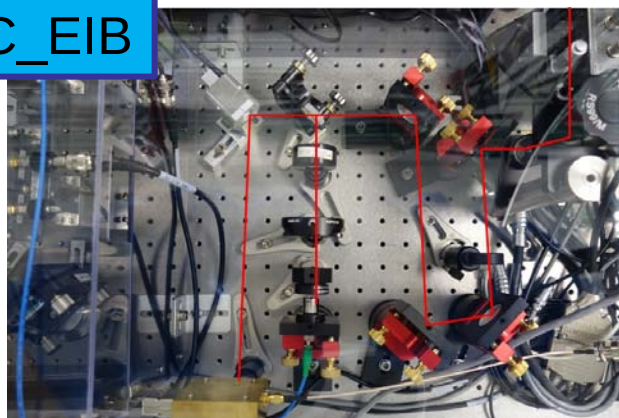


セッアップの様子

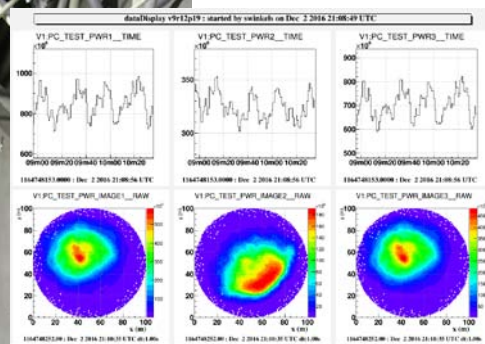
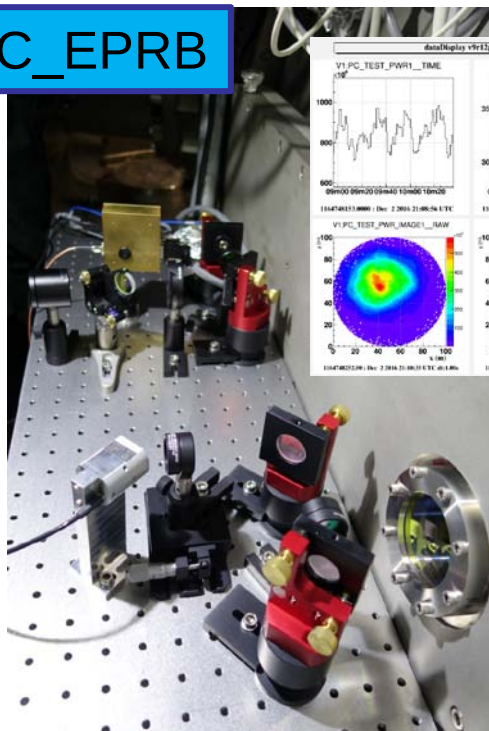


導入した3台の位相カメラ

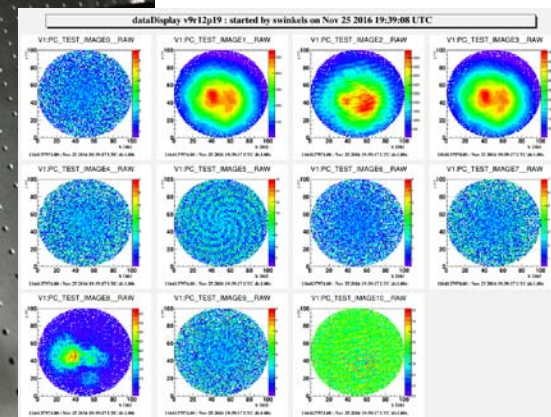
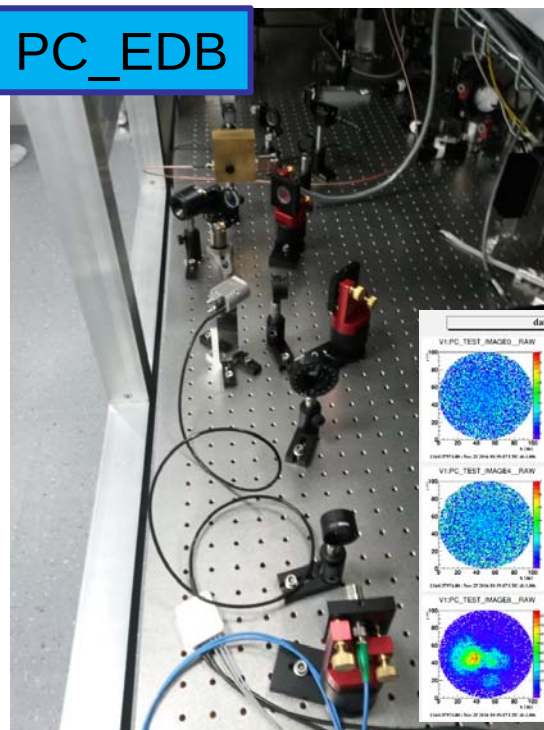
PC_EIB



PC_EPRB

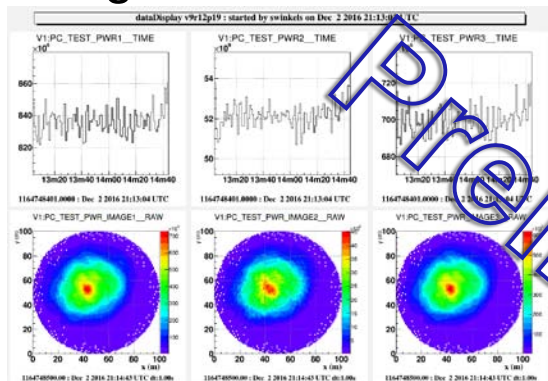


PC_EDB



位相カメラの貢献

- PR gain measurement trial (Virgo Logbook: 35707)



State

CITF @ PRC Locked:

MICH @ PRC Unlocked :

USB

850e6

835e6

CAR

325e9

52e9

LSB

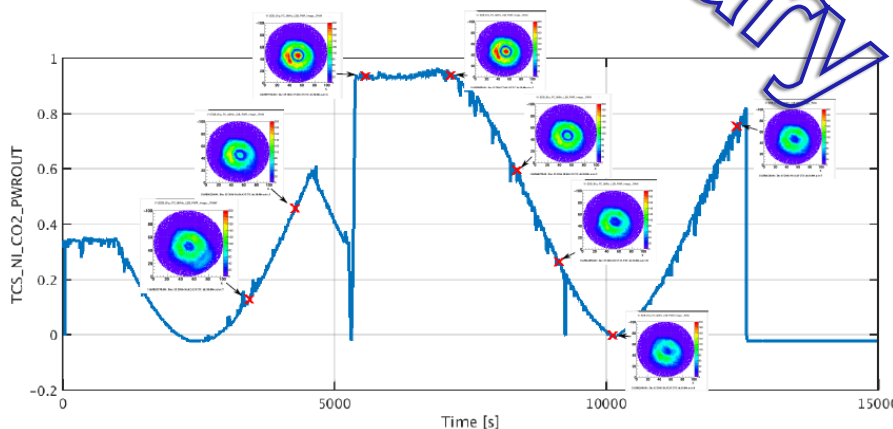
700e6

700e6



PR gain is about 6

- 熱補償システムの動作確認 (Virgo Logbook: 35889)



- Comparison with PDs => PC found a saturated PD

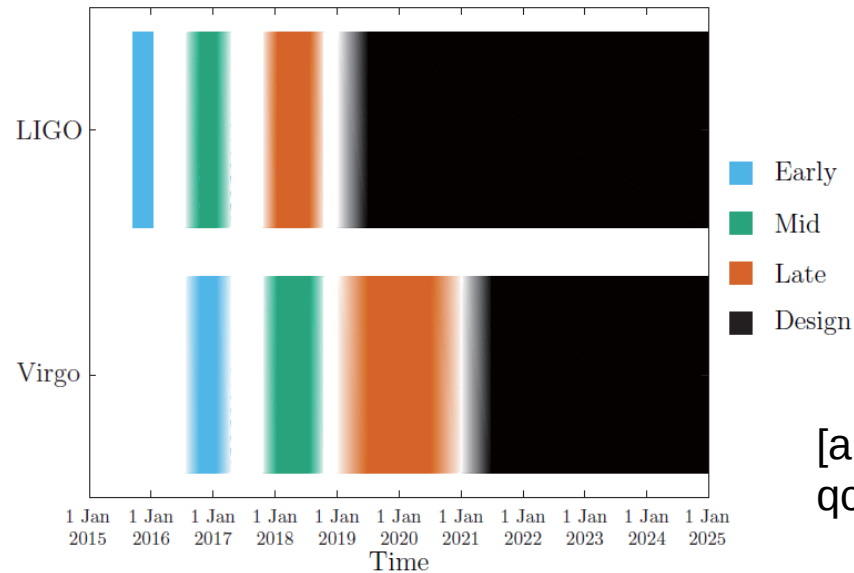
コミッショニング(干渉計駆動のための試行錯誤)の短縮に貢献 → 8月の観測へ

この様な小さな実験の積み重ねが重力波観測につながった

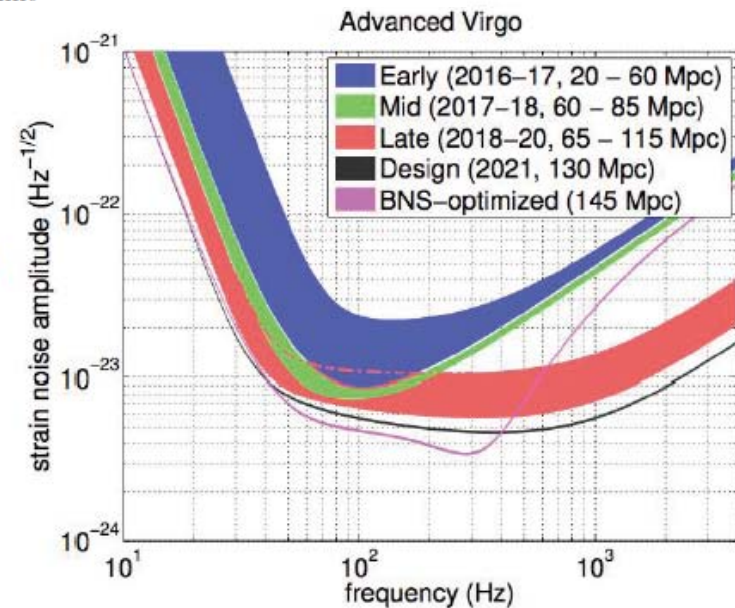
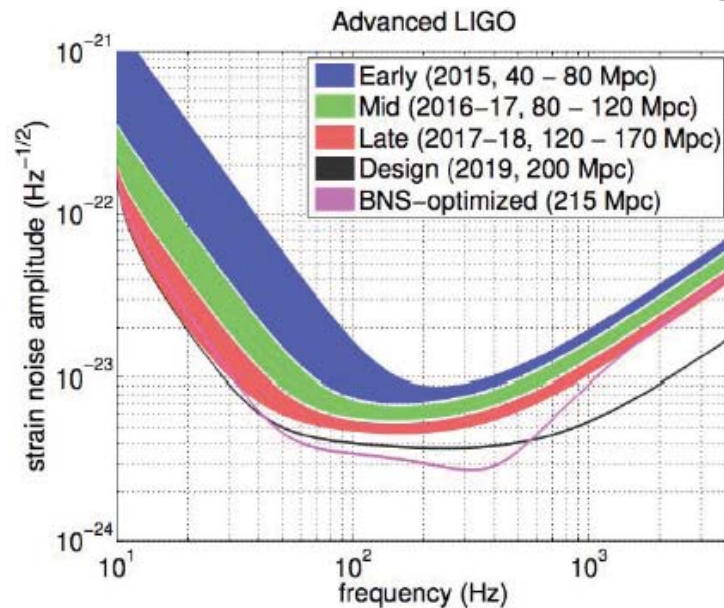
今後のスケジュール

LIGO
「私はまだ30%の力しか出していない」

観測可能距離が3倍
=> 観測空間は27倍

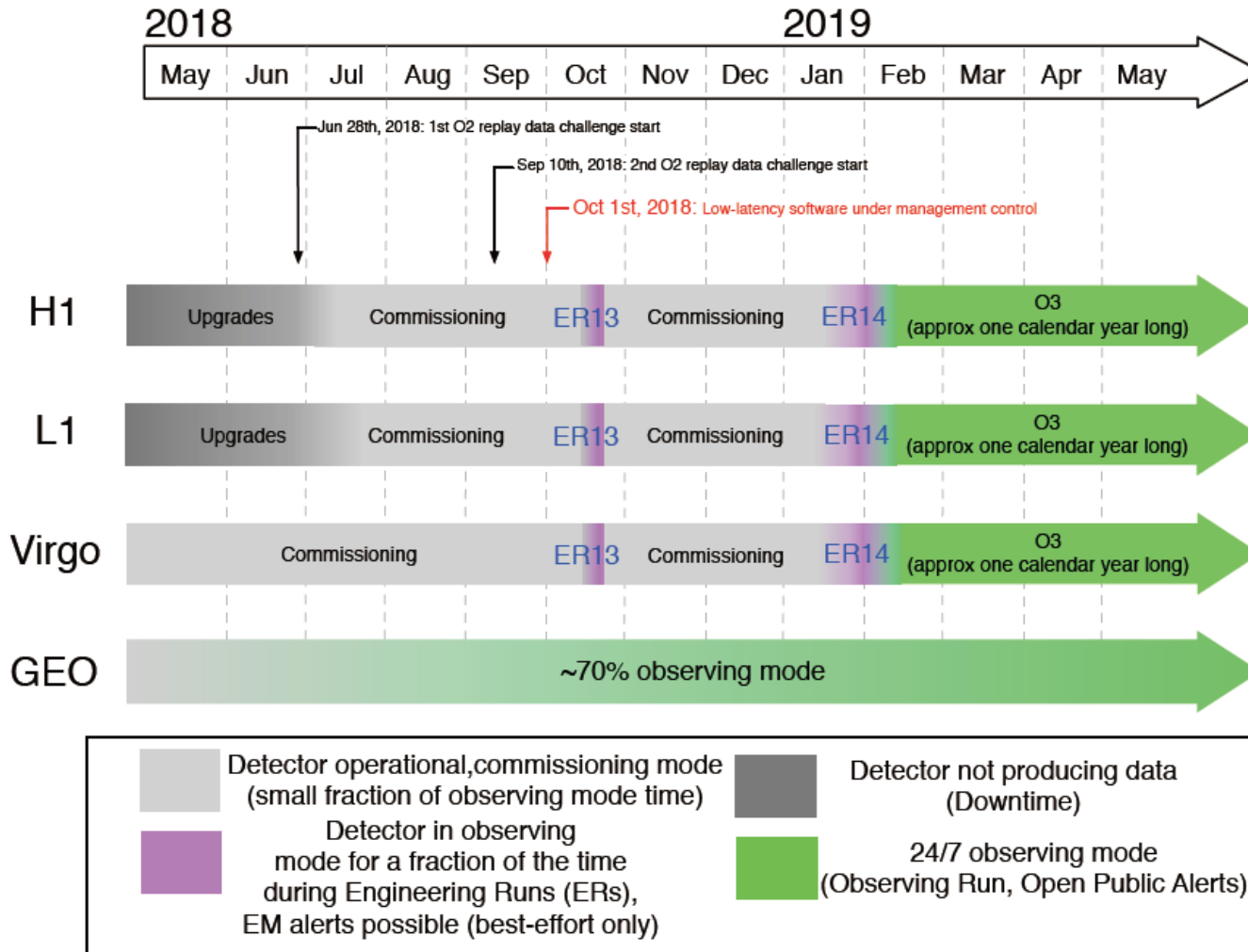


[arXiv:1304.0670v3 [gr-qc] 9 Feb 2016]

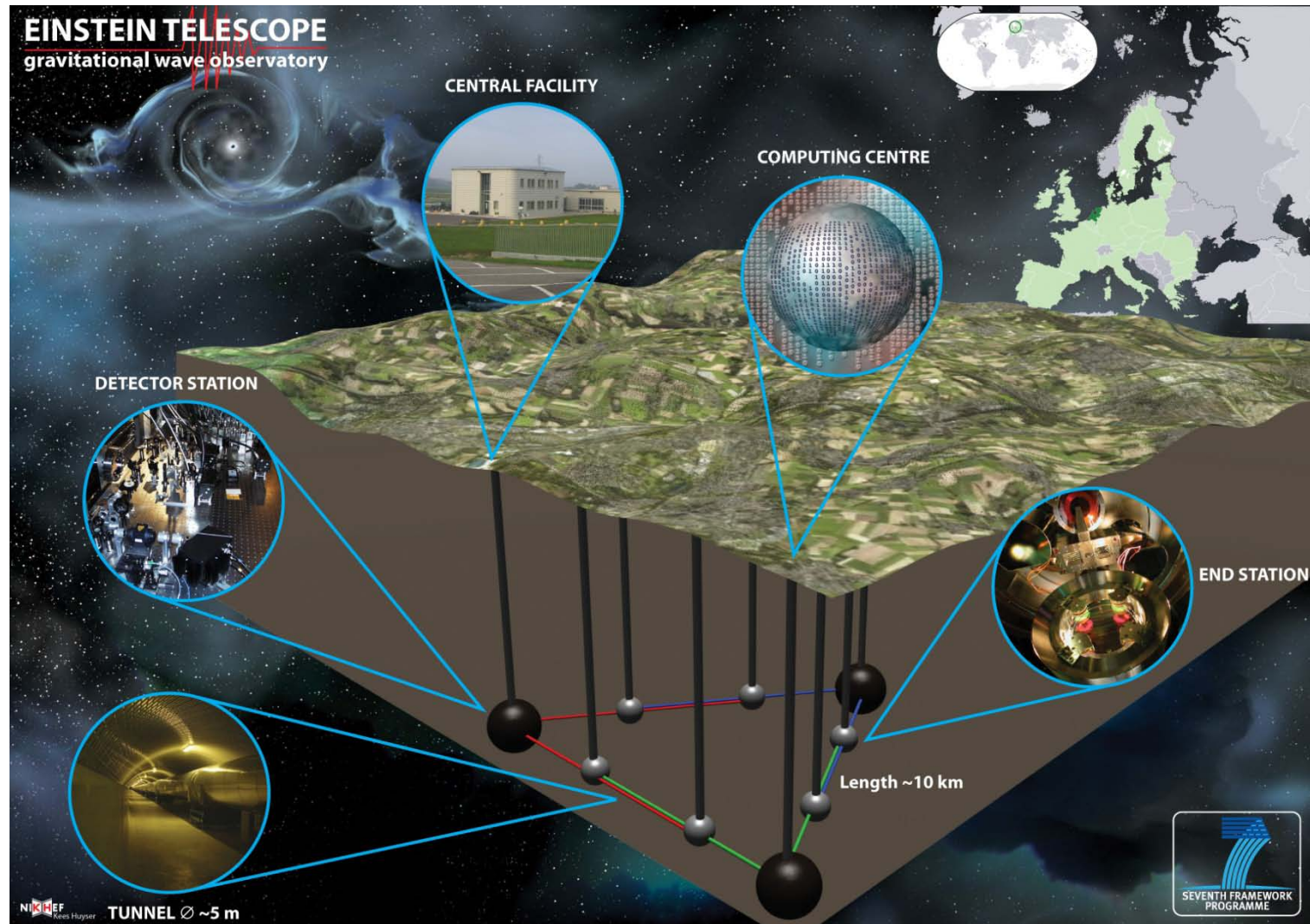


今後のスケジュール

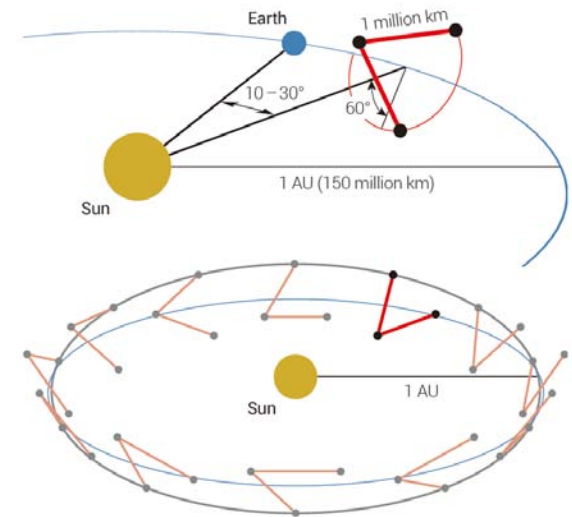
LIGO-VIRGO Joint Run Planning Committee
Working schedule for O3
(G1800889-v4)



Einstein Telescope (ET)

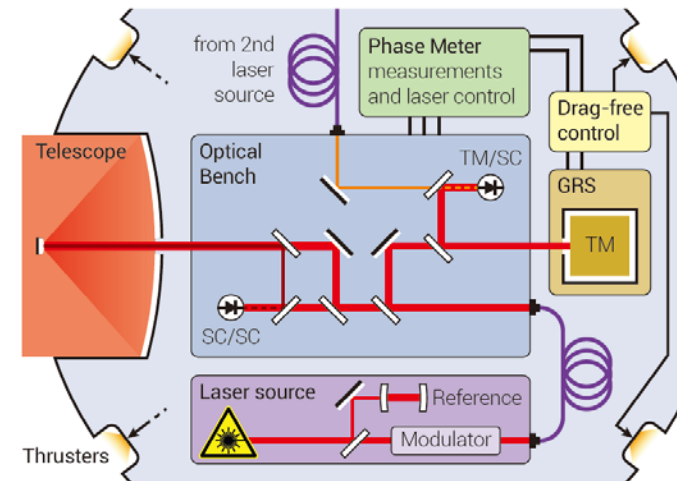
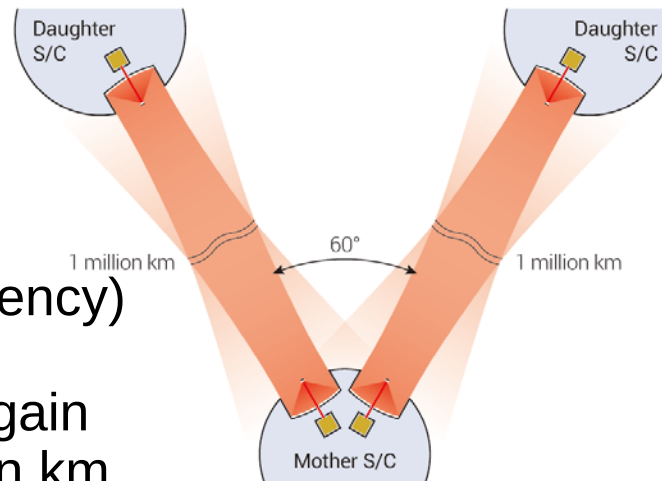


LISA mission



◆ ESA project 
(European Space Agency)

- ◆ NASA has joined again
- ◆ Arm length: 1 million km
- ◆ Optical transponder



技術試験衛星 (LISA pathfinder)

La missione LISA PATHFINDER

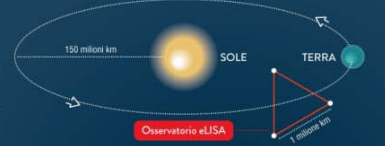
Gli scienziati europei lanciano nello spazio la sonda LISA PATHFINDER con l'obiettivo di dimostrare la fattibilità dell'Osservatorio eLISA.

L'OSSERVATORIO SPAZIALE eLISA

Progettato dall'Agenzia Spaziale Europea con un decisivo contributo di ASI, INFN e Università di Trento, rivelando in onde gravitazionali, ci renderà finalmente capaci di "ascoltare il suono" dell'universo remoto.

Le onde gravitazionali

Sono prodotte da catastrofici eventi cosmici, come scontri di buchi neri o stelle rotanti, ma fino ad oggi non sono mai state osservate.



COME SARÀ FATTO

Tre satelliti orbiteranno intorno al sole a circa 1 milione di km luno dall'altro seguendo la Terra nel suo moto di rivoluzione.

Ogni satellite invierà all'altro un raggio laser per misurare costantemente la distanza di un satellite dall'altro. Solo l'arrivo di un'onda gravitazionale potrà produrre variazioni, pari alla metà del diametro di un atomo, dei lati del triangolo.

La misura di queste variazioni determinerà l'intensità dell'onda, rivelandone l'esistenza.

LA MISSIONE "LISA PATHFINDER"

Testerà la tecnologia innovativa prodotta per mantenere le masse di prova perfettamente immobili l'una rispetto all'altra e scosta da ogni disturbo esterno.



IL CUORE TECNOLOGICO DELLA SONDA

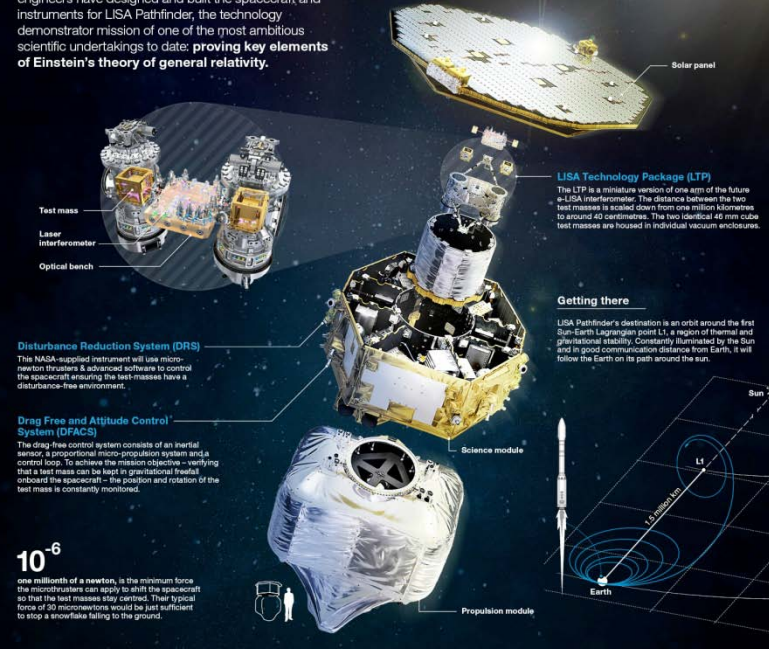
All'interno della sonda le due masse di prova, ognuna di 2 kg, sono distanti 38 cm e in caduta libera. Un complesso sistema elettrodinamico e ottico tiene e controlla le due masse, perfettamente immobili l'una rispetto all'altra, a meno di piccolissime deviazioni che sarà possibile monitorare e misurare.

Foto ESA

CAINTECH

Paving the way

Pushing physics to the limit: Airbus Defence and Space engineers have designed and built the spacecraft and instruments for LISA Pathfinder, the technology demonstrator mission of one of the most ambitious scientific undertakings to date: **proving key elements of Einstein's theory of general relativity.**



LISA Technology Package (LTP)

The LTP is a miniature version of one arm of the future eLISA interferometer. The distance between the two test masses is scaled down from one million kilometres to around 40 centimetres. The two identical 40 mm cube test masses are housed in individual vacuum enclosures.

Getting there

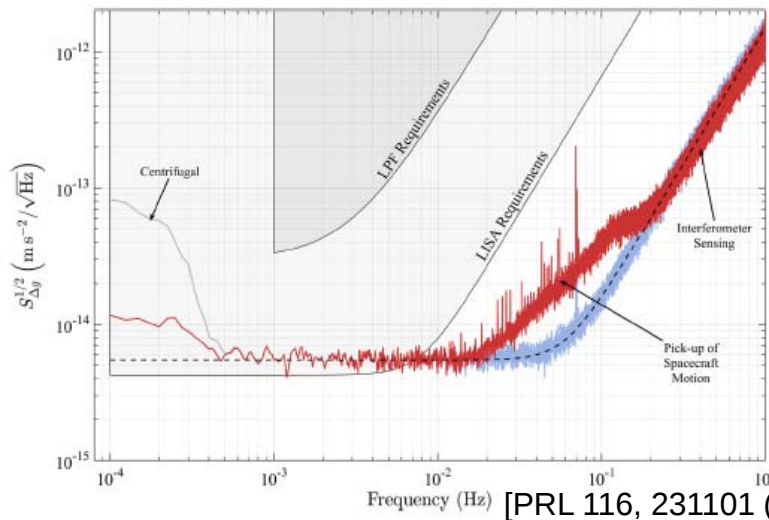
LISA Pathfinder's destination is an orbit around the first Sun-Earth Lagrangian point L1, a region of thermal and gravitational stability. Constantly illuminated by the Sun and in good communication distance from Earth, it will follow the Earth on its path around the sun.

Inside the LISA Technology Package: Creating a silent place in space

- The relative separation of the two cubic test masses is measured by bouncing two laser beams off the highly reflective surfaces.
- If the position of the master test mass to the other test mass alters, commands are sent to the micro-newton nitrogen thrusters...
- ...which will fire immediately to ensure that the spacecraft maintains its relative position to the cubic test masses...
- ...shielding them from all gravitational effects or disturbances, so that these remain in their perfect gravitational freefall.

Source: Airbus Defence and Space, copyright C3 Creative Code and Content

AIRBUS DEFENCE & SPACE



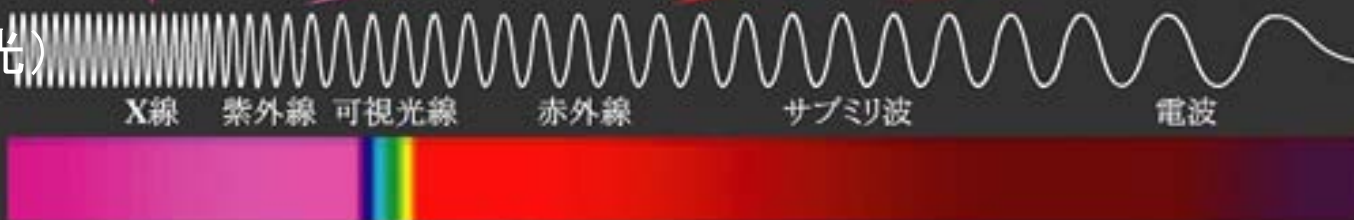
=> LISAに求められる加速度ノイズの要求値を達成してしまった！

光学望遠鏡

すばる/XMM・ニュートン サーベイ領域の多波長観測



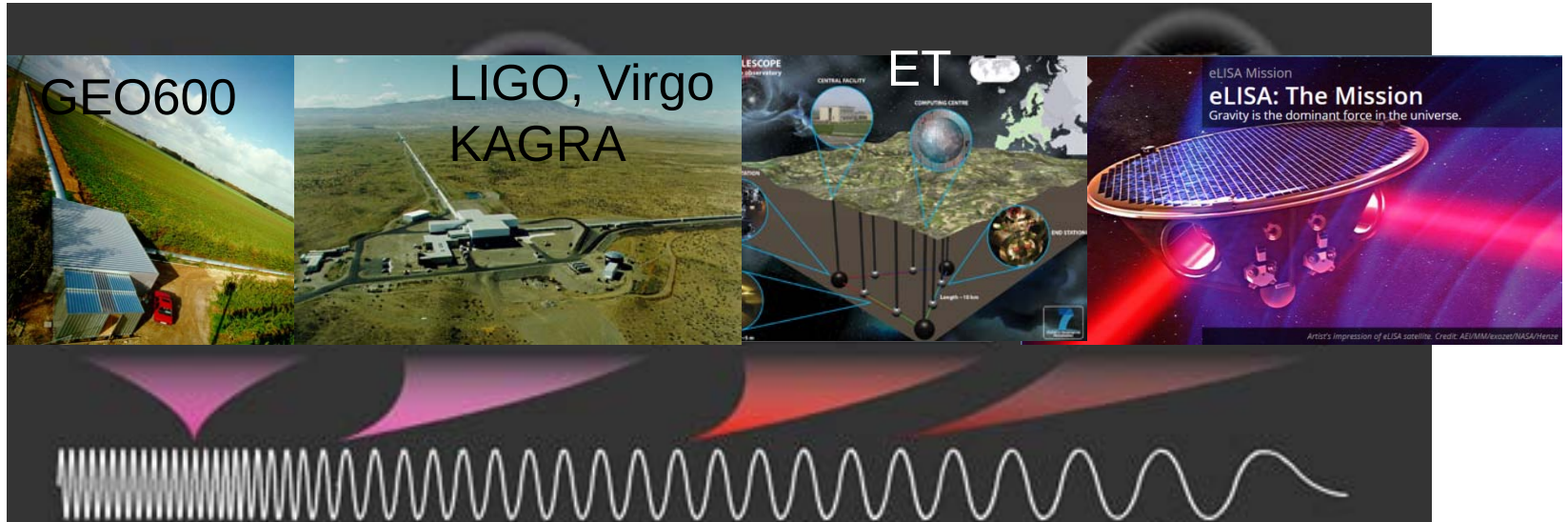
電磁波(光)



http://subarutelescope.org/Pressrelease/2004/06/01/j_MWO.htm

重力波望遠鏡の展開

新たな天文学の幕開け！



重力波

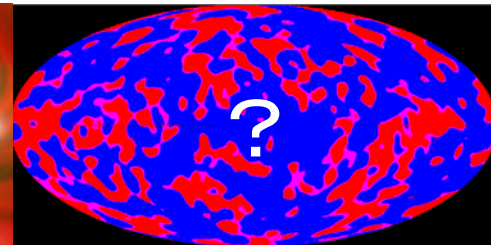
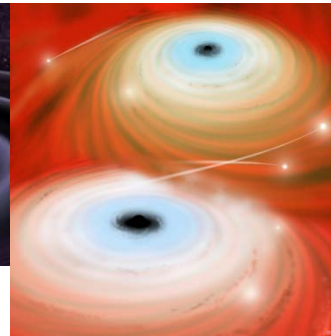
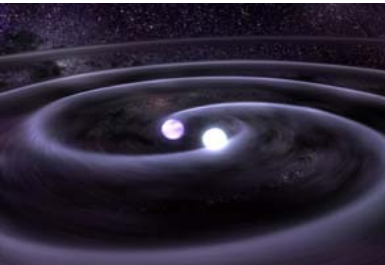
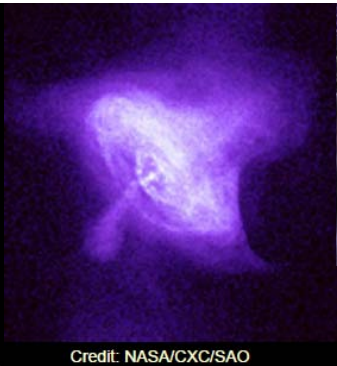
超新星爆発

パルサー

連星中性子星

ブラックホール

宇宙の始まり



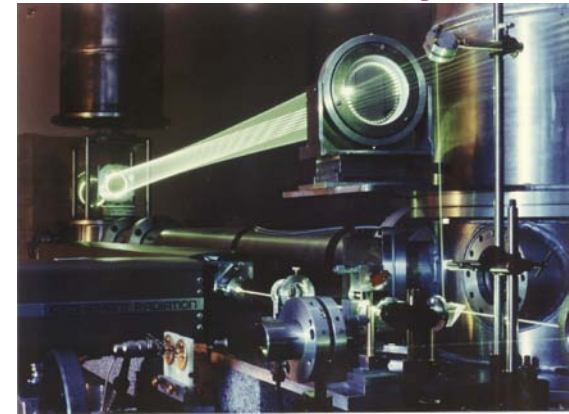
(インフレーション、
宇宙紐)

検出器開発の歴史

- **1916** 重力波の予言 (A. Einstein)
 - **1959** 共振型アンテナの発明 (Joseph Weber)
 - **1968 重力波初検出!?**のニュース => 間違い
 - **1962** マイクエルソン干渉計の利用アイデア
 - M.E. Gertsenshtein and V.I. Pustovoit
 - **1971-2** レーザー干渉計による検出方法の具体的な論文
 - Robert L. Forward (Weberの弟子) @Hughes Research Lab.
 - Rainer Weiss @MIT
 - **1980'-2000** プロトタイプ検出器による技術発展
 - **1992** LIGO(アメリカ)が大型予算獲得
 - **1993** Hulse & Taylor がノーベル賞(重力波の間接証拠)
 - **1999** TAMA300が世界最高感度
 - **2000以降** 大型(kmクラス)レーザー干渉計の時代
 - **2008** LIGOとVirgoが同レベル世界最高感度
(LIGO-Virgo collaboration締結)
 - **2015** LIGOがBHからの重力波を初観測
 - **2017** Virgoも観測、連星中性子星の合体イベントを光学望遠鏡と同時測定
- 理論から100年、検出器開発開始から56年もの歳月の末の初観測**



AIP Emilio Segrè Visual Archives



NSF

「1992年、検出装置の建設に財団始まって以来の多額の投資を決めた。大きなリスクがあったが、リスクをとって基礎科学を支援するからこそ、先端知識の獲得において米国が世界のリーダーでいられる。」

米ワシントンで開かれた重力波発見の記者会見で代表が胸を張った。歴史的に小規模なプロジェクトを支援してきたのがNSF。それを思うと重力波への総額約11億ドル(約**1230億円**)の投資は確かに冒険だったはず。

[毎日新聞]

ちなみに、、、

Virgo: 300 Million Euro (約**400億円**)

KAGRA: 約**160億円**

米チームは米国立科学財団(NSF)から資金援助を受け、技術に磨きをかけてきた。財団のコルドバ長官は「資金援助は大きなリスクだったが、NSFはリスクをとる機関だ」と話す。

[産経新聞]

海外での研究・生活 (あくまで個人的感想)

オランダ生活



2018/6/7

物理学会北陸支部特別講演会

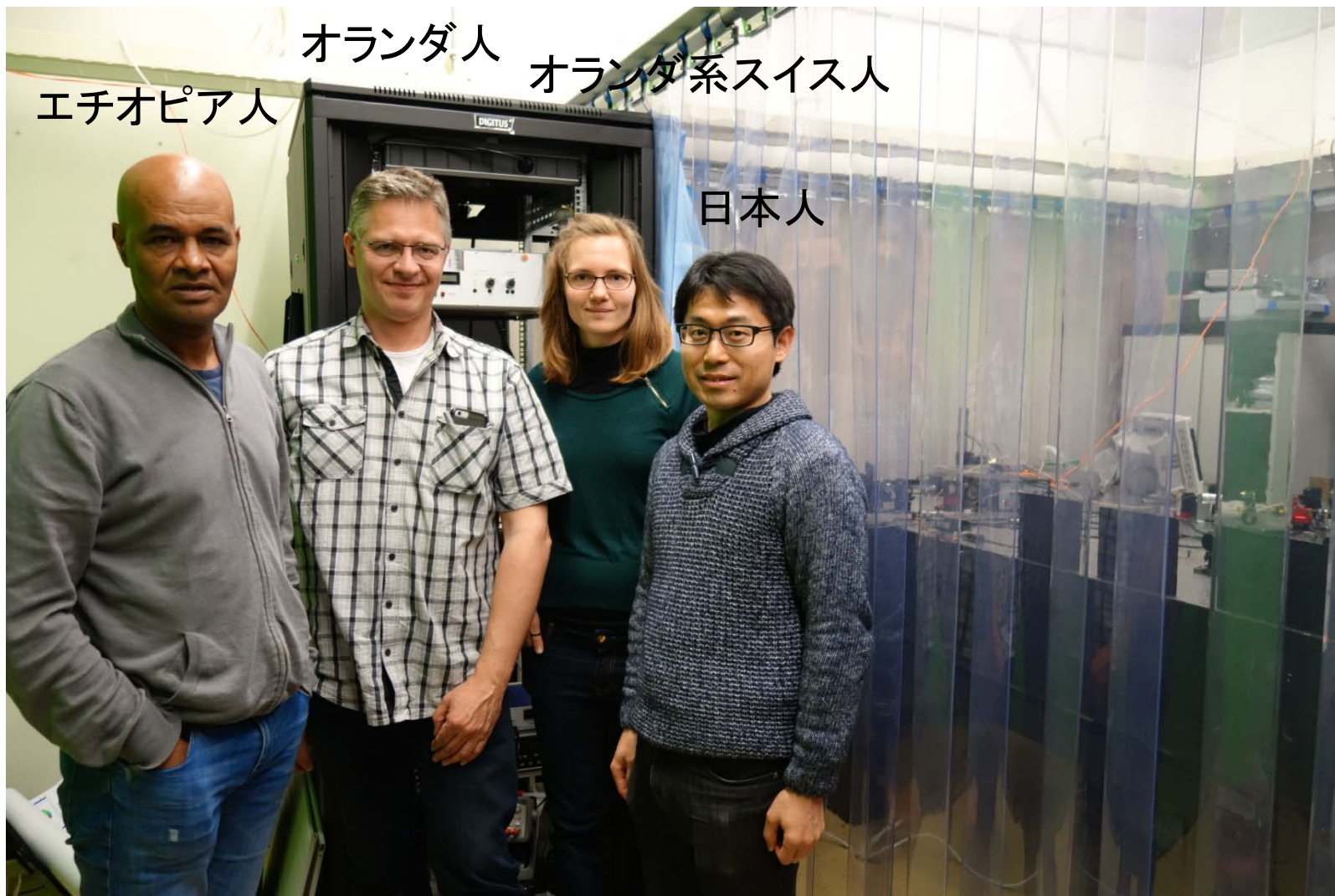
64

イタリアの夜ごはん



日本との違い

チームメンバー(共同研究者)が多国籍



日本との違い

- 休暇をしっかりと取る(ボスでも夏休み2週間)
- 夜7時には家に帰る
- 仕事の優先順位を常に意識
(やる順番とやらなくて済むものの選別、仕事をなるべく減らす努力)
- 攻撃的な言葉を使わない・聞かない



ストレスフリーな職場！

日本との違い

- 商品の不良品率の高さ
- 家の備品が(よく)故障する
→ すぐに直しに来ない
- 電車が来ない(スキップされる)ときがある
- 店は早く(19時～20時には)閉まる
- 医者は基本的に極力治療しない方針



ストレスフルな生活面！

働き方

つまり、生活環境と仕事環境は反対方向のベクトル

- ・生活環境の改善 → 労働者が頑張る必要あり
- ・労働環境の改善 → 受けるサービスの質低下

海外で働き、日本で物を買うのが合理的、、、

サービスの不備に寛容になることが労働環境の改善につながる

(相手に無駄に高い要求をしない)

海外生活のコツ

- ◆ Google があれば非英語圏でも大丈夫
- ◆ 日本人会を見つけて属するべし
(日本では絶対に出会えない人々)
- ◆ 背水の陣で挑む(not 留学、not 駐在)

Hope Step Japan
(東北大震災関連ボランティア)



オランダ淡青会(東大OB・OG会)



ジョブハンティング

海外の職

- メール、ウェブ公募が標準、書式も任意
- 面接費用支給が多い
- 引っ越し費用も出る場合あり(交渉次第)

コツ

- 人脈(国際会議等で積極的に話す)
- プレゼン(練習と場数)
- 求職を公言(職は公開されているとは限らない)

まとめ

良い点

- 働きやすい環境、良い研究環境
- 人種や背景が違う中でのチームワークの経験
- 新しい人脈形成（日本人コミュニティ含む）

悪い点

- 生活環境は良くはない
（インターネット＋Googleのおかげで不便なし）
- 日本の公募に応募しにくい
（近い将来改善されることを期待）

個人的には海外で働く経験ができて
非常に良かった

若人よ、海外へ！