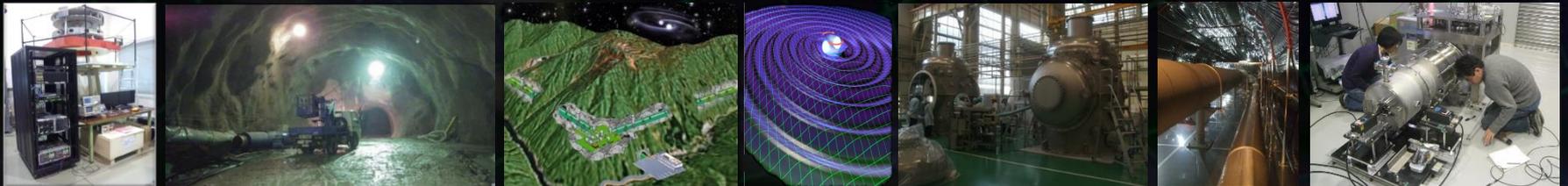


朝日カルチャースクール：宇宙の「未発見」に挑む

重力波検出に挑むKAGRA

安東 正樹 (東京大学 物理学専攻/国立天文台)



あんどう まさき

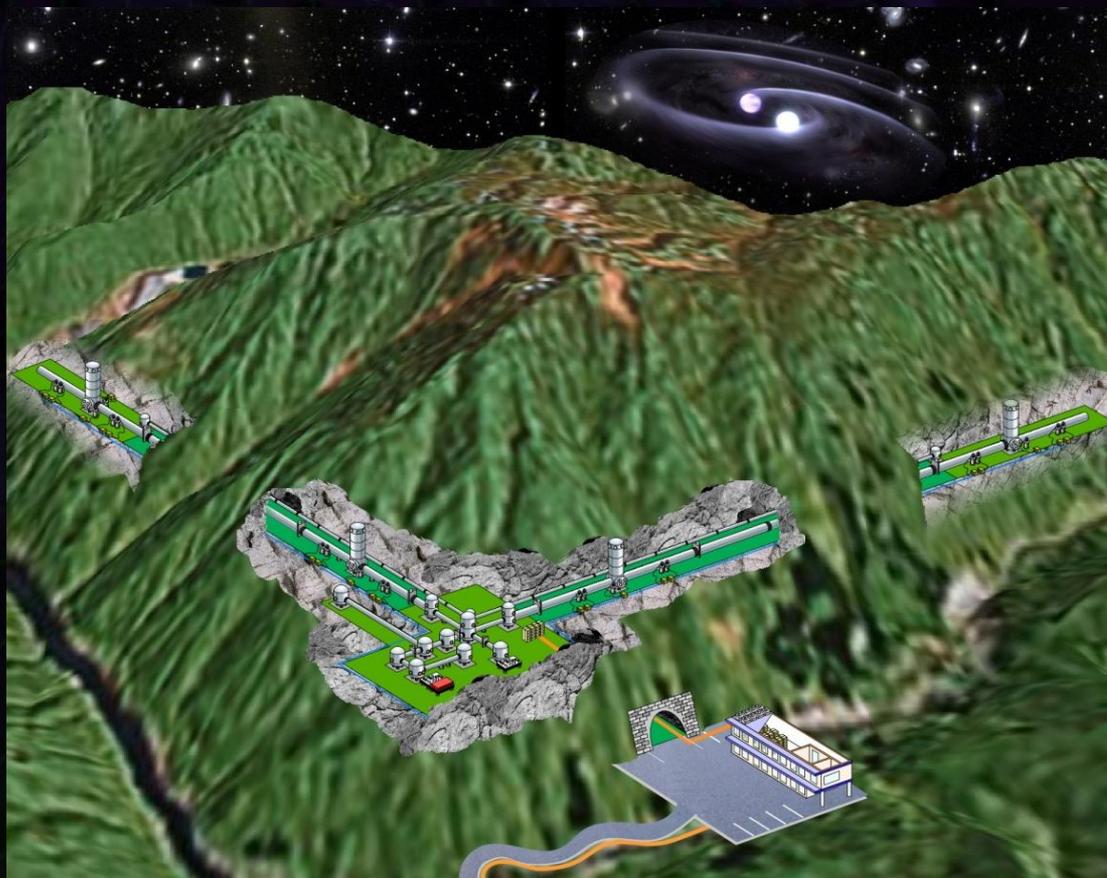
安東 正樹 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻 /
国立天文台 重力波プロジェクト推進室 准教授)

‘重力波天文学’ を研究.

- 滋賀県 草津市 出身.
- 高校・大学は京都.
- 大学院・PD・助教は東京で.
(国立天文台で3年ほど)
- 2009.1 京都大.
- 2012.6 国立天文台.
- 2013.4 東京大.



大型低温重力波望遠鏡



大型低温重力波望遠鏡

かぐら (KAGRA)

岐阜県・神岡で建設中の
次世代重力波検出器
(本格観測 2017年-)

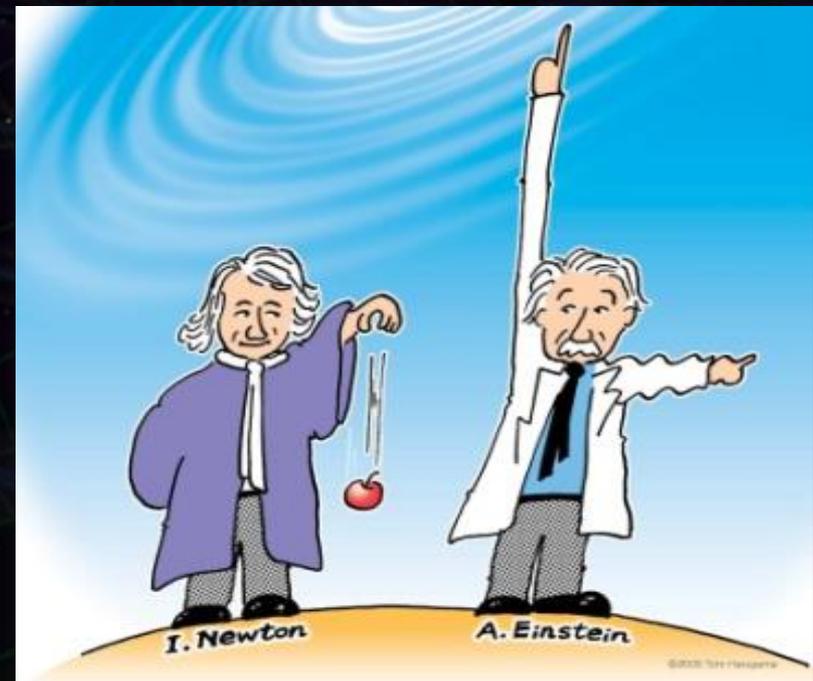


重力波天文学の創成

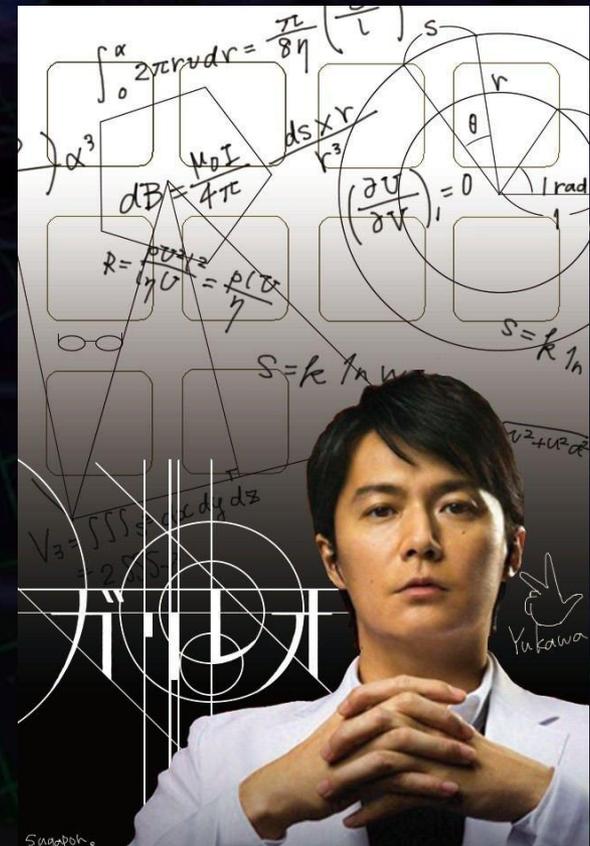
- **アインシュタインが残した宿題.**
- **宇宙誕生直後の姿を直接見る.**
- **重力波望遠鏡 KAGRA.**

アインシュタイン が残した宿題

- 一般相対性理論と
重力波の直接検出 -



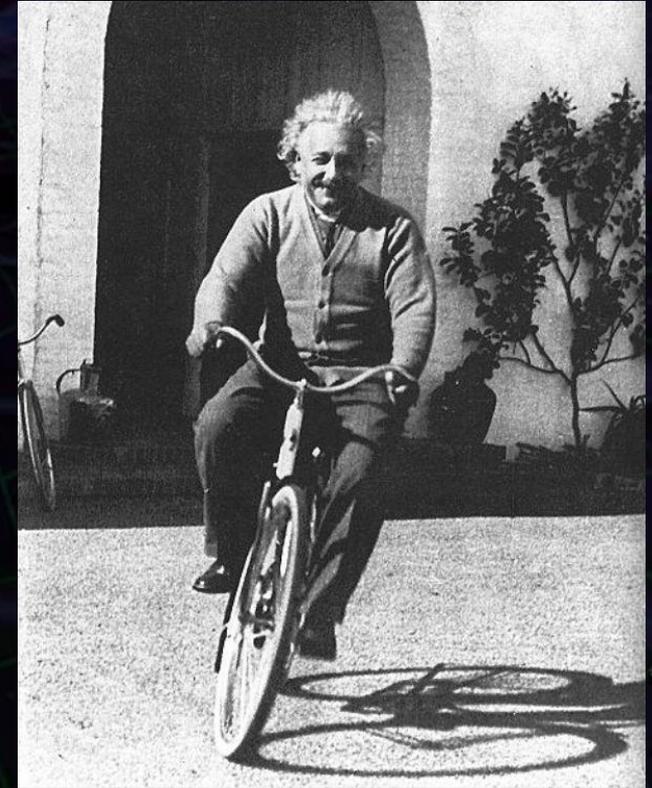
有名な物理学者???



アルベルト・アインシュタイン

(理論物理学者, 1879 - 1955年)

- 1905年 光電効果の理論的解明.
→ 1921年 ノーベル物理学賞.
- 相対性理論を構築.
 - 1905年 特殊相対性理論
 - 1916年 一般相対性理論
→ 重力の効果も取り入れ一般化.



一般相対性理論 (アインシュタイン, 1916)



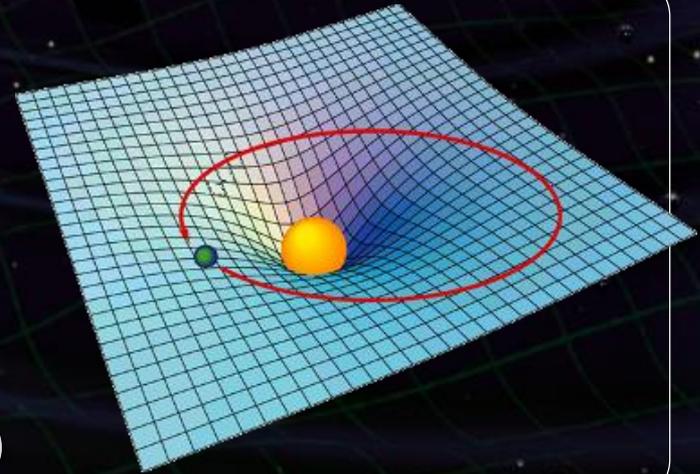
→ 重力を時空の性質と解釈

アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

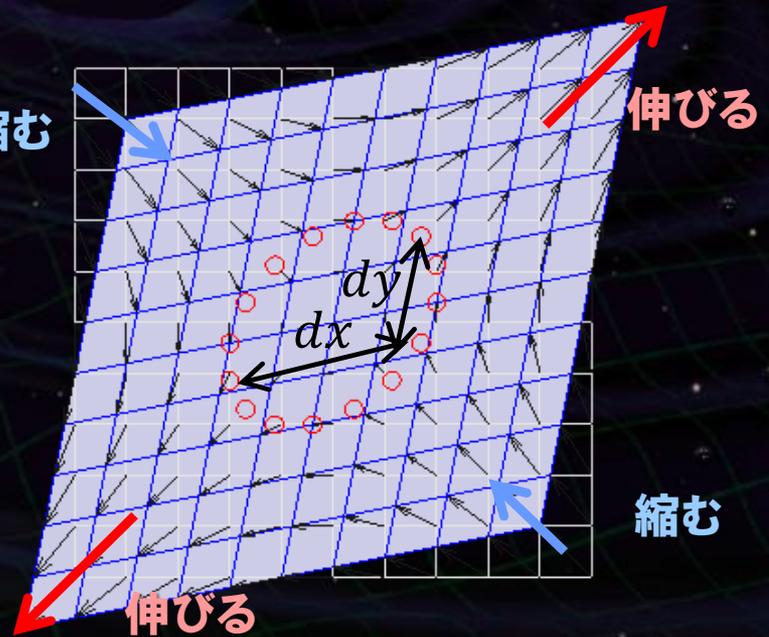
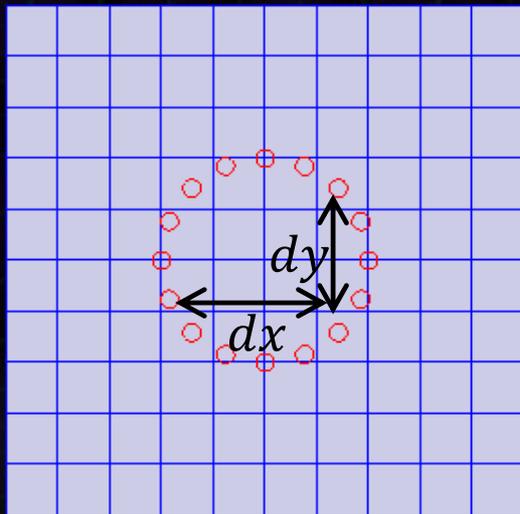
↑
時空の曲がり
を表す量

↑
物質のエネルギー
(質量, 運動量など)



物質が時空の曲がりを生み出し、
時空の曲がり重力として物質の運動に影響する。

空間の歪み → 2点間の距離が変化.



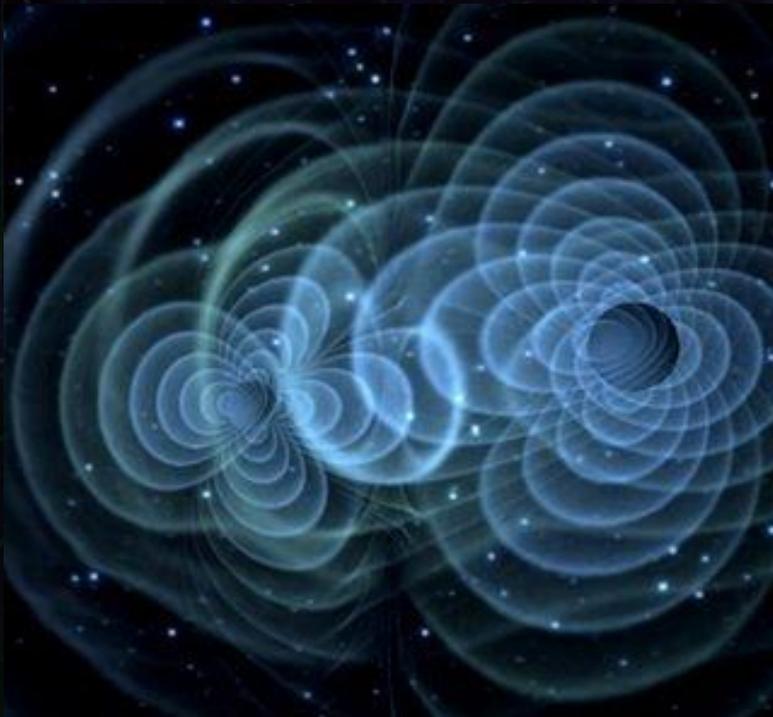
$$ds^2 = dx^2 + dy^2$$

2点間の
微小距離

$$ds^2 = A dx^2 + B dy^2 + C dx dy$$

重力を時空の曲がり(潮汐力)として表現.

→ その曲がりか波として伝搬する解がある.



物質の変動, 形状の変化

→ 時空の歪みが

'さざなみ'として伝播.

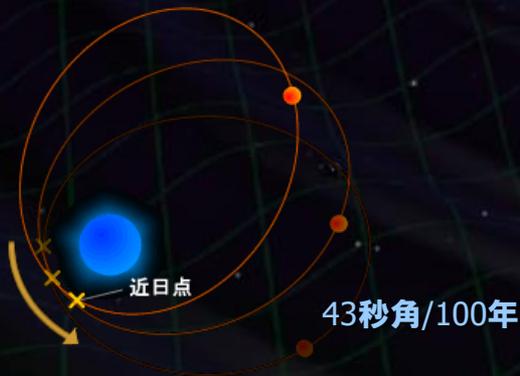


重力波

アインシュタインの一般相対性理論は正しい???

→ '古典的'な3つの検証実験.

水星の近日点移動



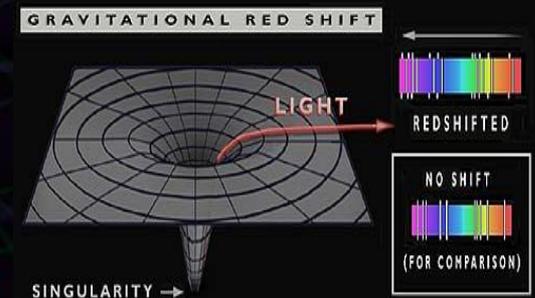
(アインシュタイン, 1915)

光の曲がり (重力レンズ)



•皆既日食時に、恒星の
見かけの位置を観測。
(エディントン, 1919)

重力赤方偏移



•地上(高低差 22m)での
 γ 線共鳴吸収測定。
(パウンド, レプカ, 1960)

その他, シャピロ遅延, GPS補正, 慣性引きずり効果など多数.

連星パルサーの発見と観測

連星パルサーPSR B1913+16

(1974年 ラッセル・ハルス, ジョゼフ・テイラー)

公転周期: 7.75時間

質量: パルサー 1.44 Msolar

伴星 1.39 Msolar

公転周期の変化率:

$$(-2.4056 \pm 0.0051) \times 10^{-12} \text{s/s}$$

アレシボ天文台 (フェルトリコ)



発見から20年以上の継続的な観測

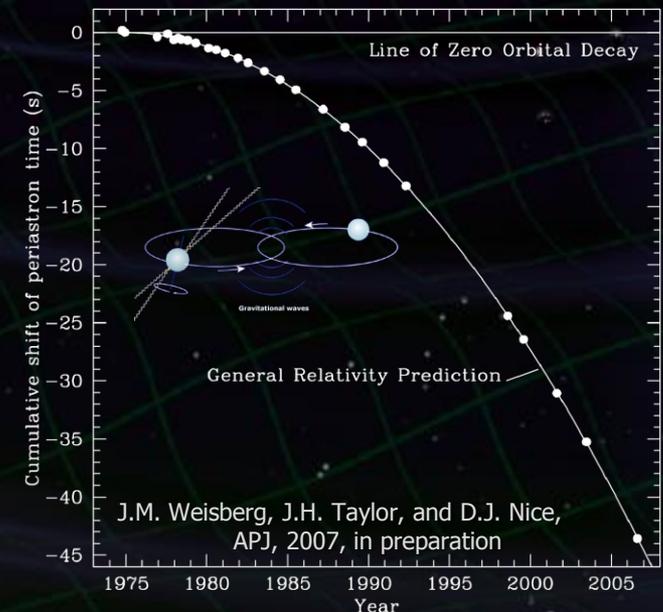
重力波の放出

→ 公転エネルギーを失い, 互いに落ち込む.

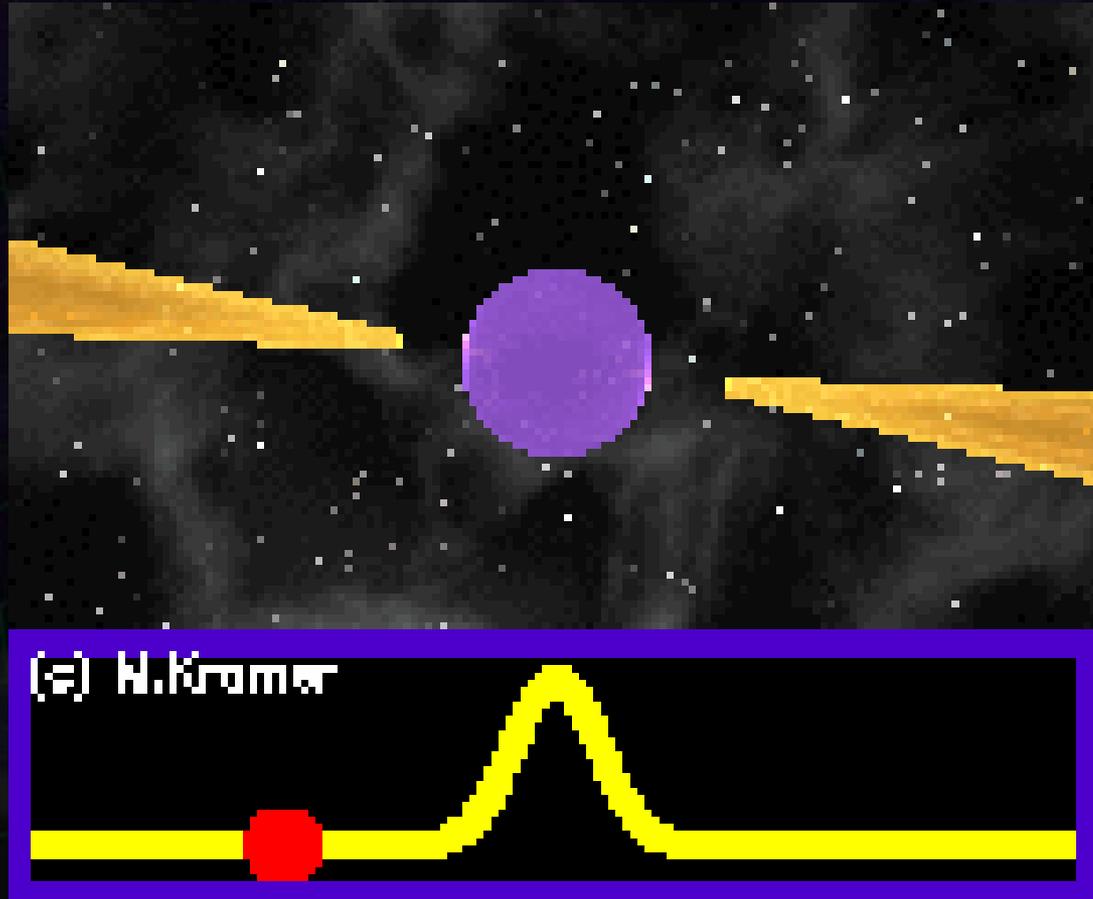
一般相対性理論による理論値
と観測された値の差は0.2%程度



重力波の存在の証明



Lighthouse model



(c) M. Kramer

Duncan R. Lorimer , Living Rev. Relativity 11 (2008) 8

Animation designed by Michael Kramer. <http://www.livingreviews.org/lrr-2008-8>

連星パルサーPSR B1913+16

相対性理論の正しさ, 重力波の存在
を高い精度で証明



1993年ノーベル物理学賞 テイラー, ハルス
「重力研究の新しい可能性を開いた
新型連星パルサーの発見」



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



Russell A. Hulse



Joseph H. Taylor Jr.

The Nobel Prize in Physics 1993 was awarded jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. "for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

- 一般相対性理論は、提唱されてから約100年間、さまざまな観測・実験によってその検証が行われてきた。
→ 現在までに全て、理論的予測と一致する結果。
- 一般相対性理論で予言された重力波についても、その存在を裏付ける観測結果が得られている。

… **しかし、重力波はまだ直接は捕まっていない。**

⇨ **「アインシュタインが残した最後の宿題」**

宇宙誕生直後 の姿を直接見る。

- 重力波望遠鏡
による新しい天文学 -



電磁波

- 光速で伝播する
電磁場の変動



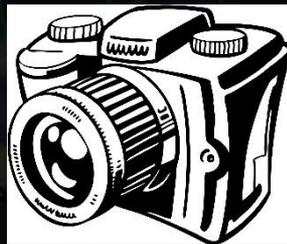
J.C. Maxwell

- 電荷の加速度運動により生成
- 物質による 吸収, 散乱



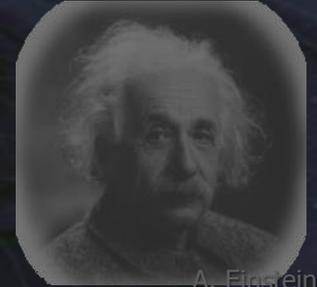
波源の各所から放射

→ 画像として観測.



重力波

- 光速で伝播する
時空の歪み



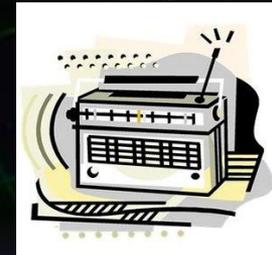
A. Einstein

- 質量の加速度運動により生成
- 物質に対して **強い透過力**



波源全体の運動から放射

→ 時系列変動
として観測.



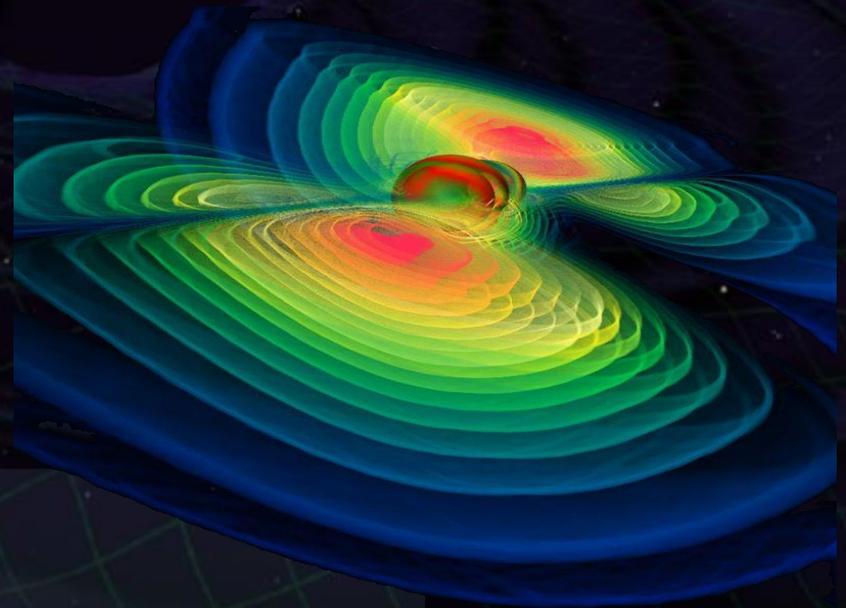
重力波の特徴

- ・質量の加速度運動から放射
- ・物質に対して 強い透過力



宇宙を観測する新しい手段

- ・電磁波と相補的・独立な観測
- ・電磁波などでは見ることの出来ない現象
(初期宇宙, 高エネルギー天体現象の内部)



主な重力波源



CG/KAGAYA

宇宙の誕生と進化



重力波の直接検出

⇒ 物理学・天文学の新たなフロンティア

- 天文学：宇宙を調べる新しい手段。
- 宇宙論：初期宇宙の直接観測。→ 宇宙の誕生と進化。
- 物理学：相対論検証, 極限状態の物理。
→ 究極の物理法則。

耳をすます!!!

- 重力波望遠鏡 -



重力波

重力波の効果

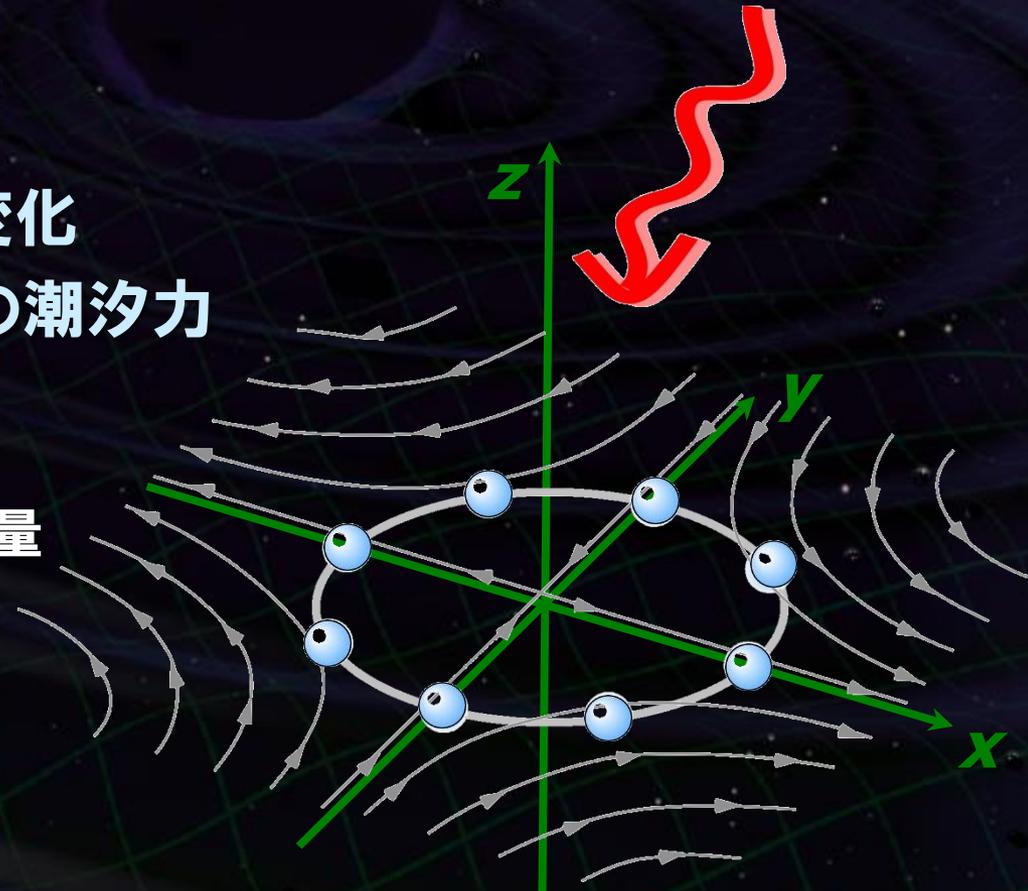
- 自由質点間の距離の変化
- 大きさを持った物体への潮汐力

重力波の振幅 h : 無次元の歪み量

$$h \sim \delta L / L$$

δL : 距離変動

L : 2点間の距離



$h = 10^{-21} \rightarrow 1\text{m}$ の距離が 10^{-21}m 伸縮.

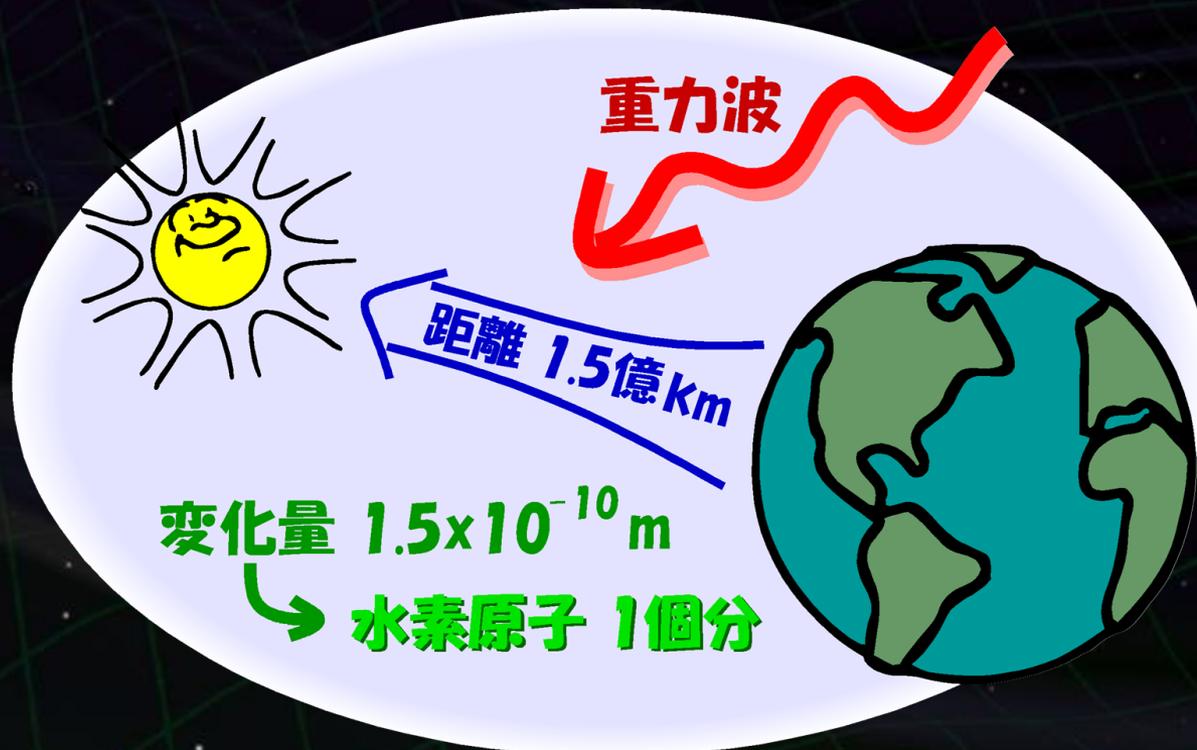
(例) 地球-太陽間の距離変動

距離 1.5×10^{11} m



1.5×10^{-10} m の距離変動

重力波振幅 10^{-21}



レーザー干渉計型重力波検出器

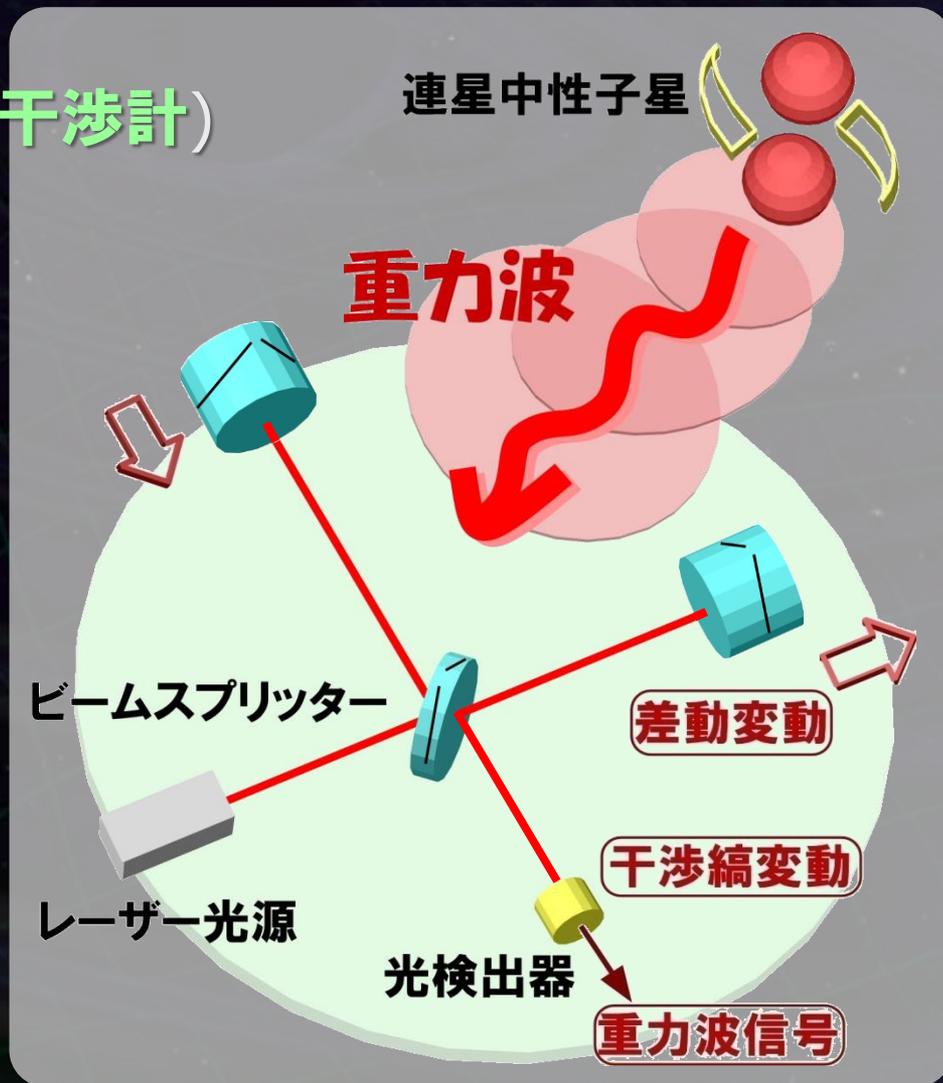
レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- レーザー光源からの光を直交する2方向に分岐.
- 懸架された鏡で打ち返し干涉.
- 光検出器で観測.

重力波が入射



腕の長さの差動変動を
干涉光量の変動として検出



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：5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

ただ... 第1世代干渉計で検出できるような
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 第2世代の重力波望遠鏡

高感度化 → より多くの銀河をカバーする

(重力波の振幅) $\propto 1/(\text{波源までの距離})$

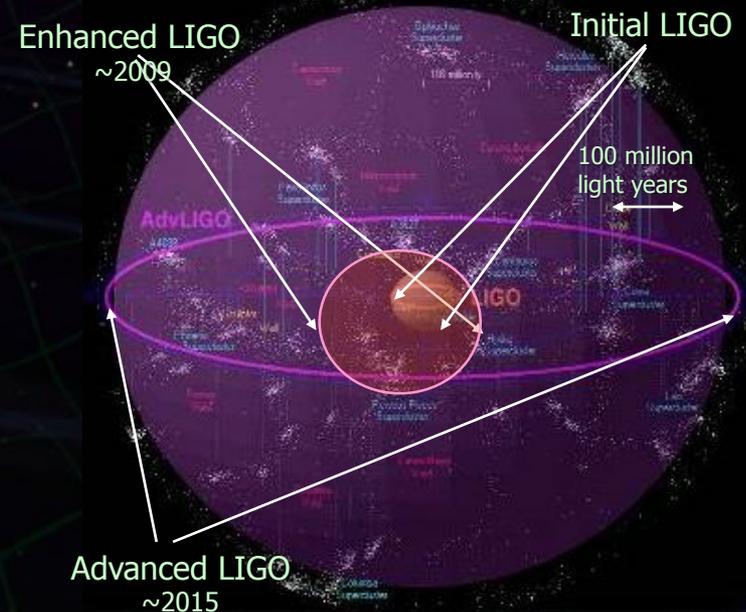


感度が10倍向上 → イベントレートは 10^3 倍

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

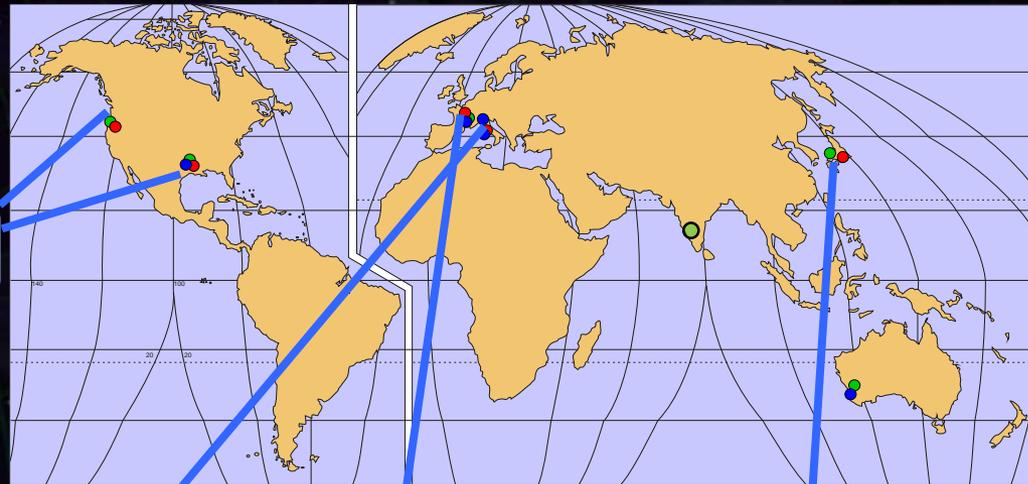
第2世代 重力波望遠鏡

国際観測ネットワークが形成される (現在から 約5年後)

→ 重力波天文学 (重力波の検出, 位置, 物理情報, ...)



aLIGO (USA)
4km x 2 (or3)



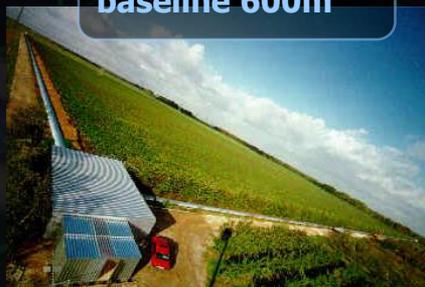
Australia
in proposal



LIGO-India
in proposal



Adv. VIRGO (ITA-FRA)
baseline 3km



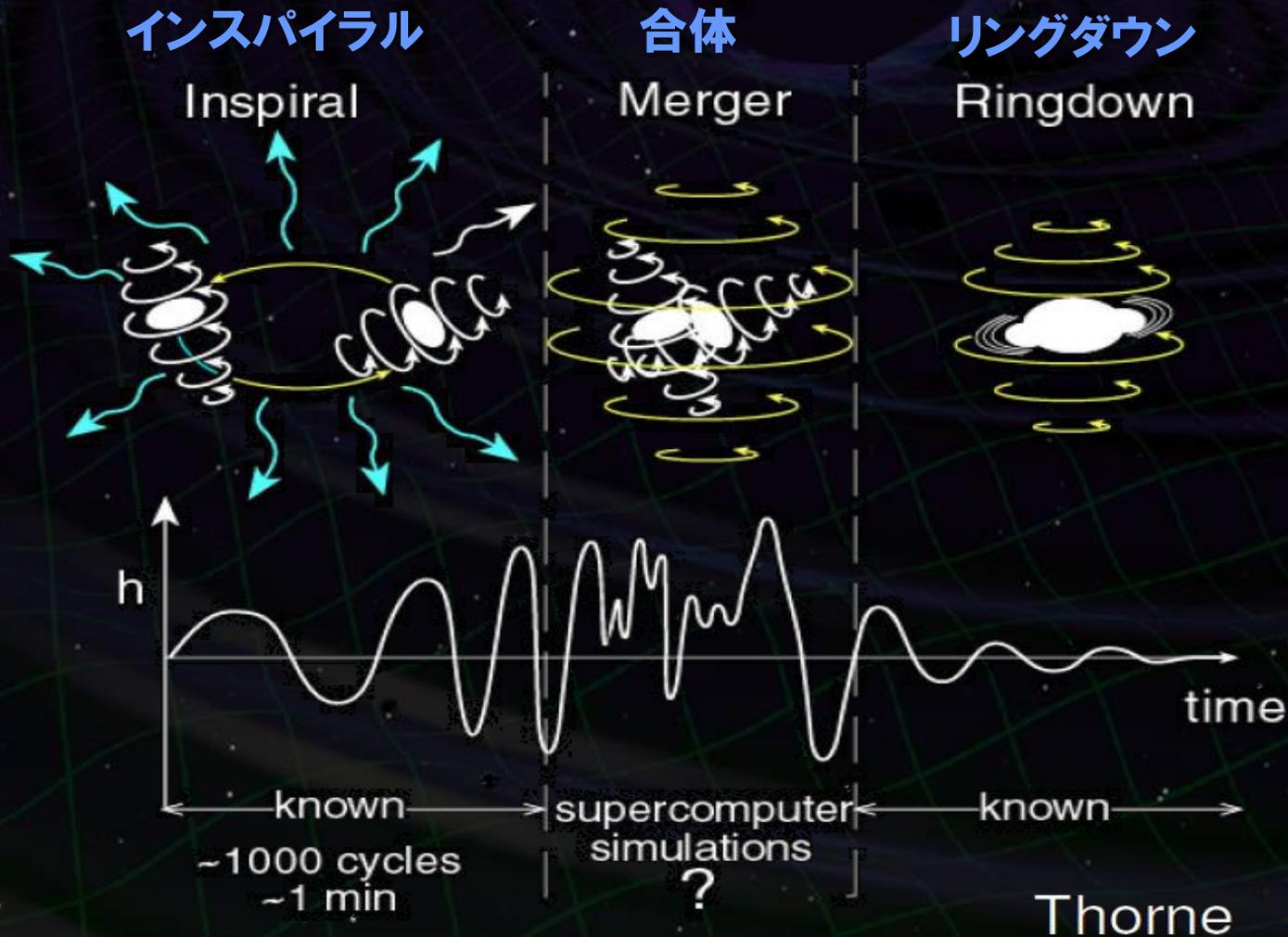
GEO-HF (GER-UK)
baseline 600m



KAGRA (JPN)
baseline 3km



連星合体現象からの重力波

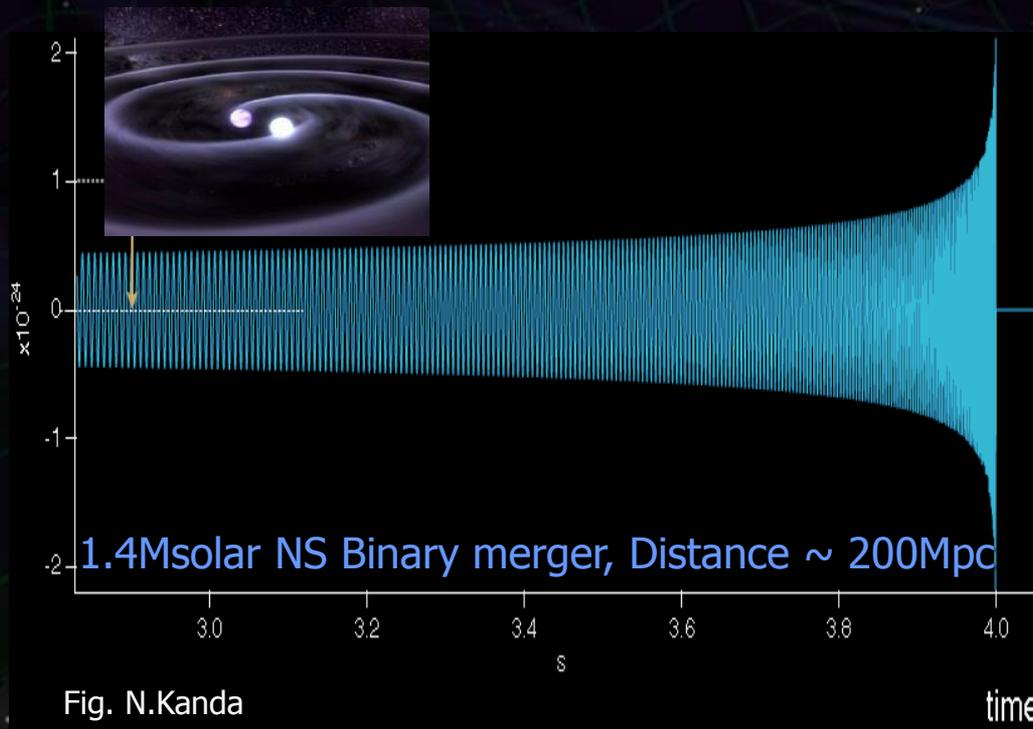


連星合体からの重力波

チャープ波

時間と共に振幅・周波数が増大.

→最終的に合体, BHになる.



KAGRA (かぐら)

- 大型低温重力波望遠鏡 -



大型低温重力波望遠鏡 KAGRA



基線長3kmの大型干渉計

2017年頃本格的な観測開始 → 重力波天文学の創成.
低温技術・地下干渉計 → 次世代干渉計技術.



- ・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 理・工・地震研,
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.

・約1年半前、大型低温重力波望遠鏡 LCGT

(Large Cryogenic Gravitational-wave Telescope)

に愛称がつけました。

かぐら KAGRA

- かぐら (神楽) : 神に奉げる歌や踊り.
- Acronymではないが、
KA (Kamioka)
+ GRA (Gravitational Wave Antenna)
の意味合いもある.



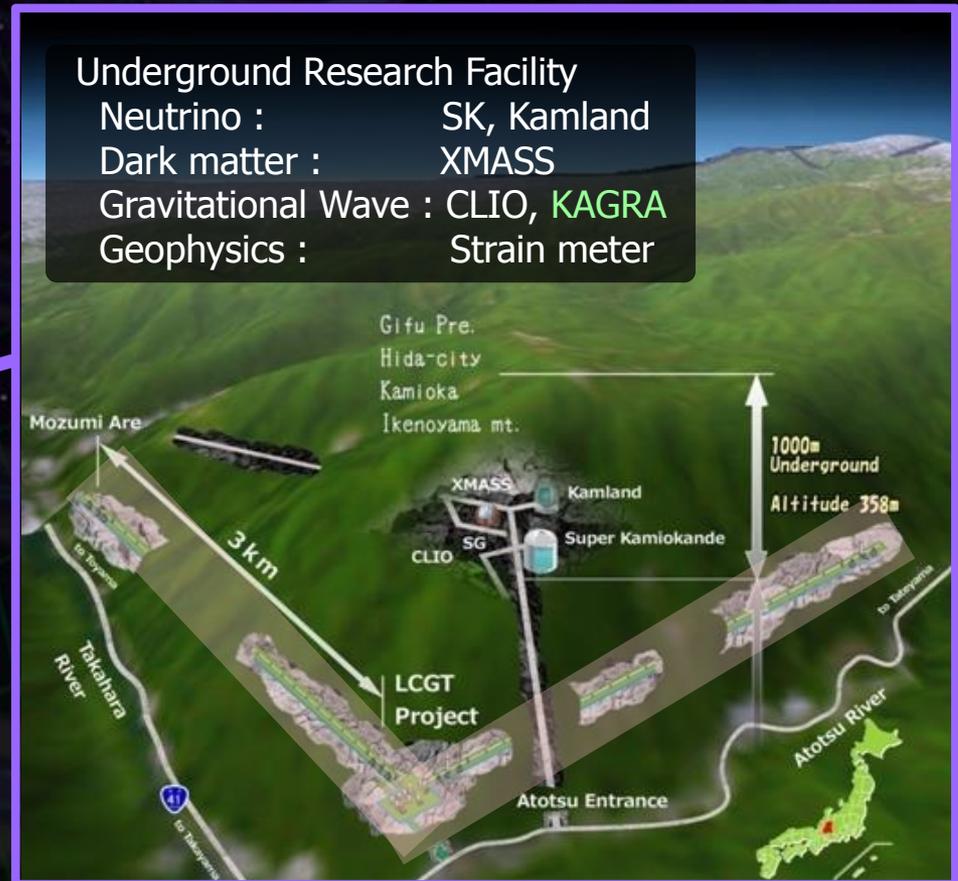
岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

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



富山から
車で約1時間

Map by Google

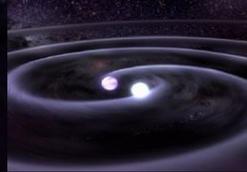


Underground Research Facility
Neutrino : SK, Kamland
Dark matter : XMASS
Gravitational Wave : CLIO, **KAGRA**
Geophysics : Strain meter

重力波望遠鏡の高感度化

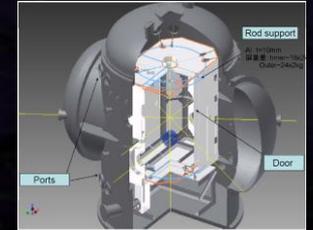
・重力波源の理解

理論・解析的計算
数値相対論
データ解析手法



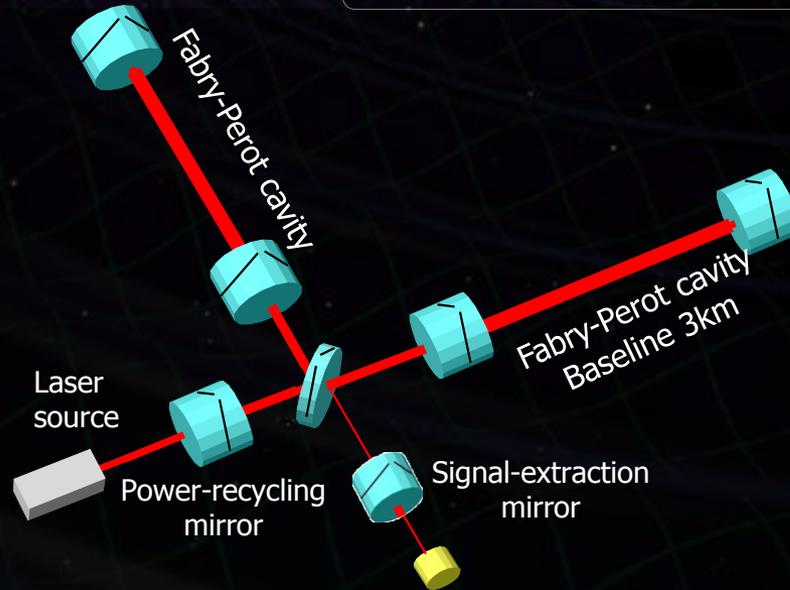
・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化
材質の機械損失



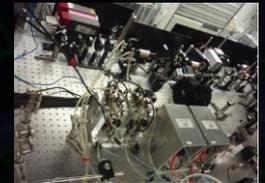
・地面振動の影響

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

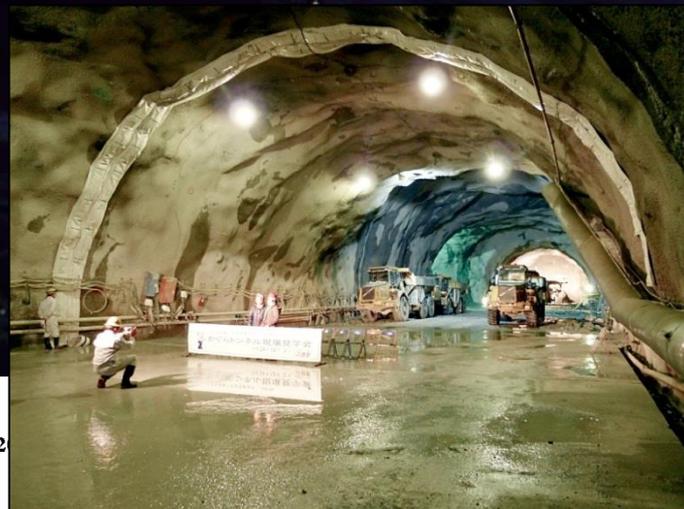


掘削工事の現状

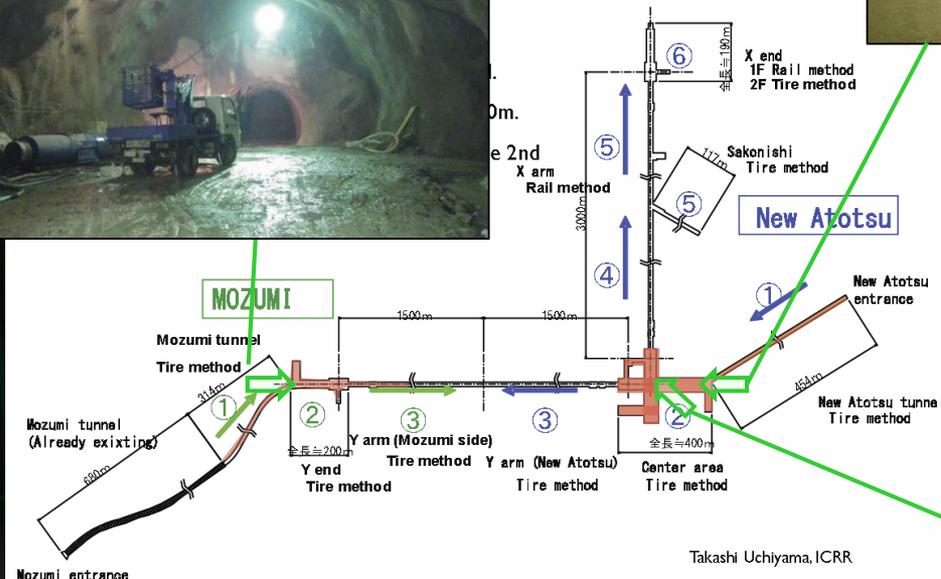
茂住口：
Y腕トンネル



新跡津口：センタールーム



Report for the KAGRA
2012/12/17. JGW-G12



真空ダクト

3km x 2本の真空ダクト：

12m, Φ 800mm を478本接続. → 納品済.



Press to form a duct



Bellows for each duct



Baking at MIRAPRO Co.
Noda/MESCO, Kamioka



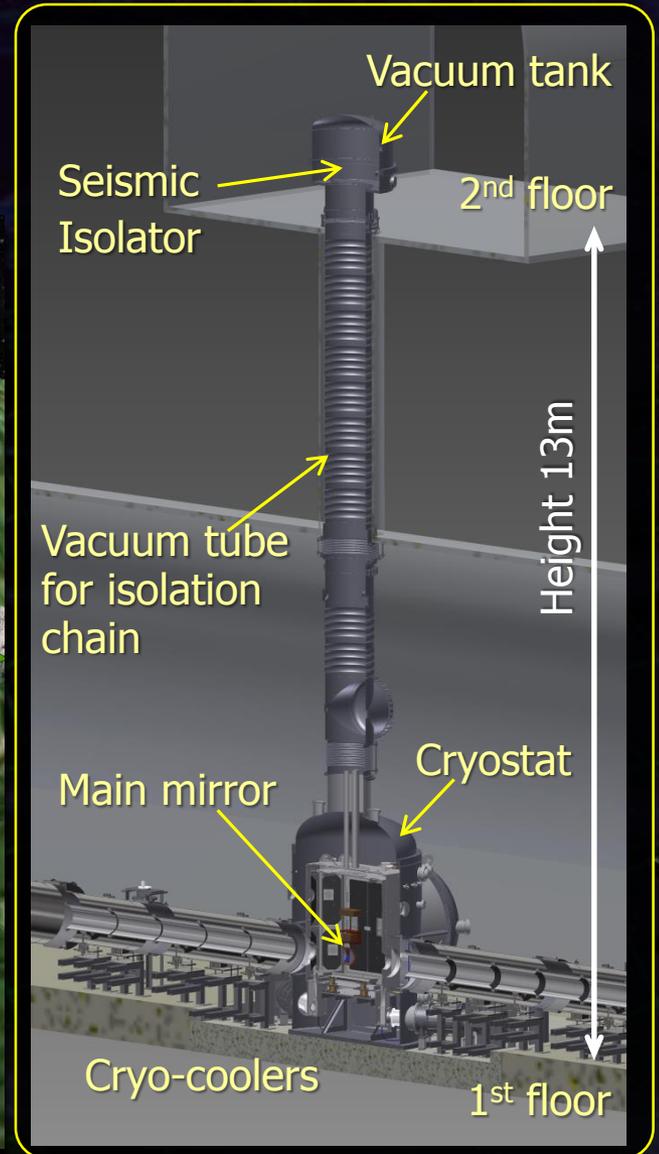
Test at MIRAPRO Co. Noda



Transportation to Kamioka

Presentation
By Y.Saito (KEK)

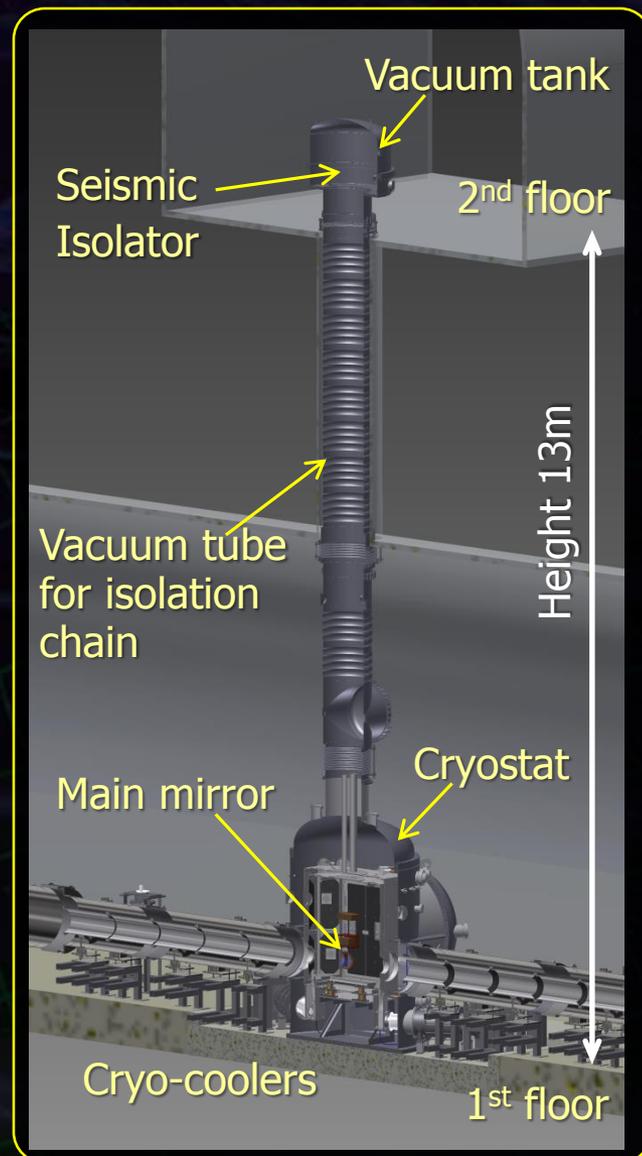
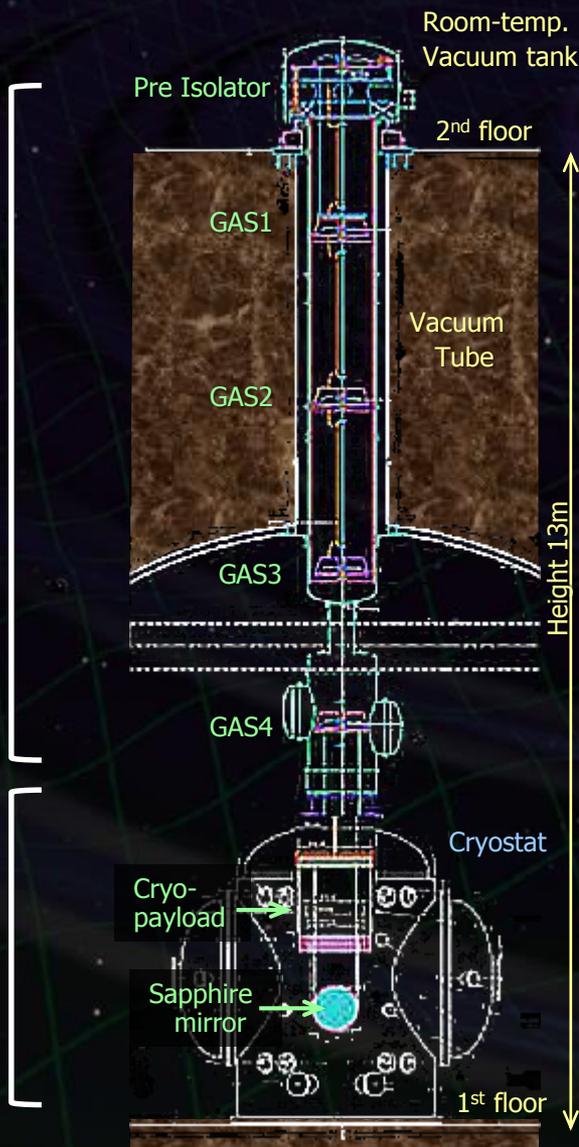
鏡の防振・冷却



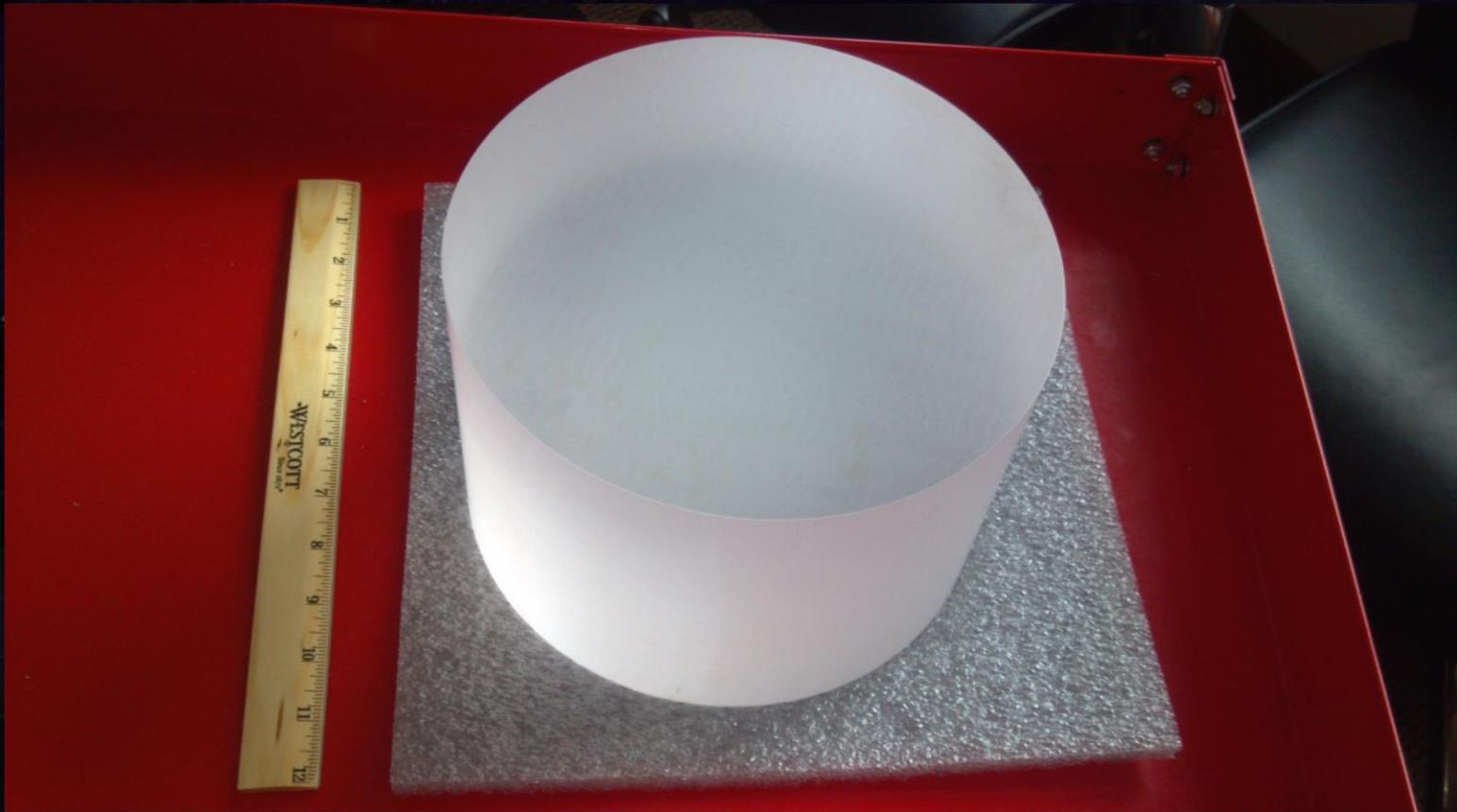
低温鏡 懸架・防振装置

Room-temp.
Filter chain

Cryogenic
Payload

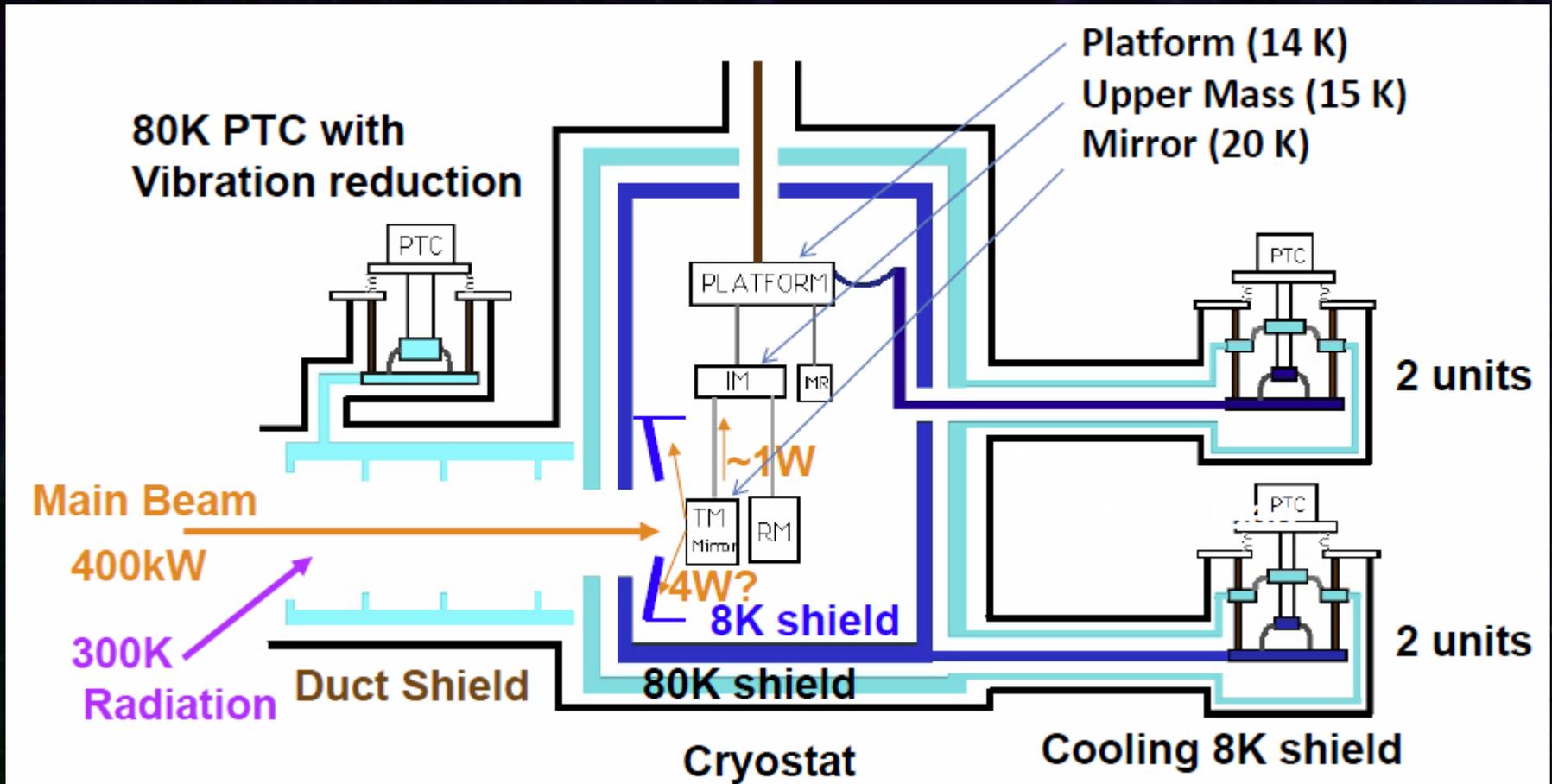


サファイヤ鏡



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

鏡冷却システム



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



Cryostat #1 in preparation for installation of radiation shield.

Cryostat #2 under leak test.

Toshiba Keihin Factory (Oct 31, 2012)



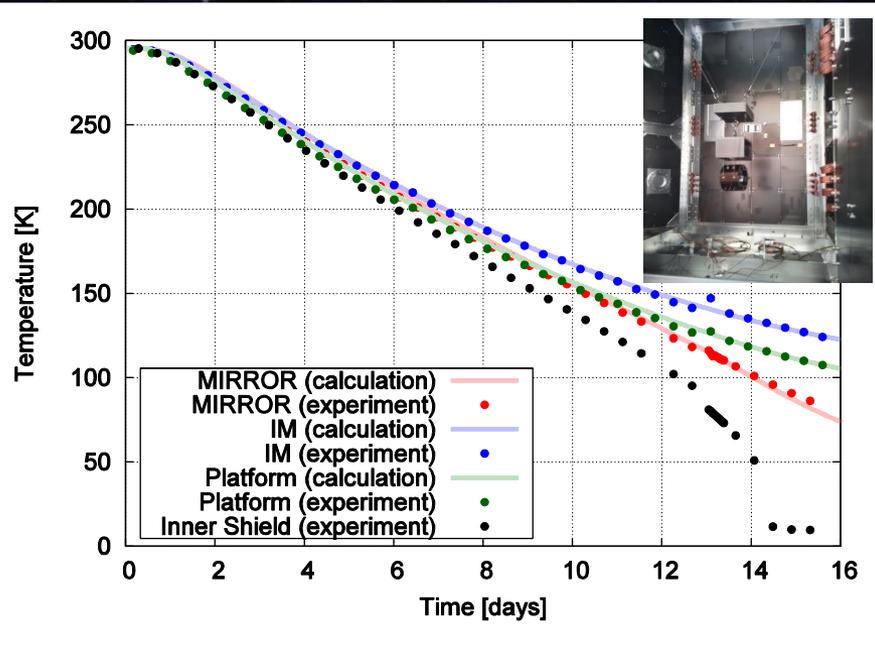
Cryo-cooler unit

クライオスタート冷却試験

約2週間で冷却できることを確認。
ダミーペイロード冷却試験も実施。



倉庫に搬入 (2013.7)



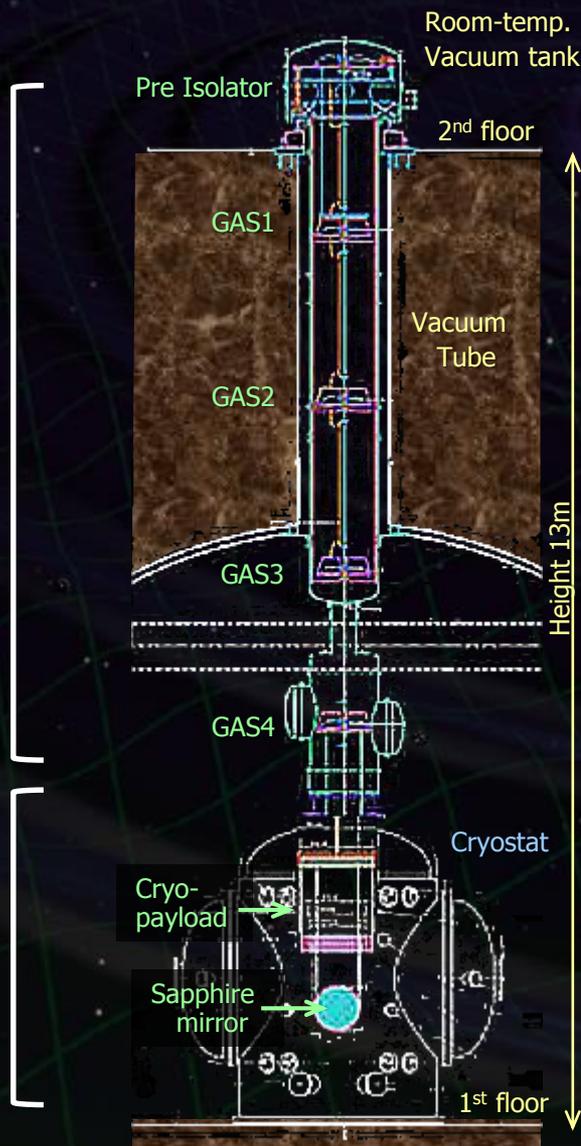
Presentation by N.Kimura at Amaldi10 (2013.7)

Photo by C.Tokoku

低温鏡 懸架・防振装置

Room-temp.
Filter chain

Cryogenic
Payload



Room-temp.
Vacuum tank

2nd floor

'Type-A'
System

Vacuum
Tube

Cryostat

Cryo-coolers

1st floor

Height 13m

防振装置



Pre-Isolator Prototype test (Kashiwa)

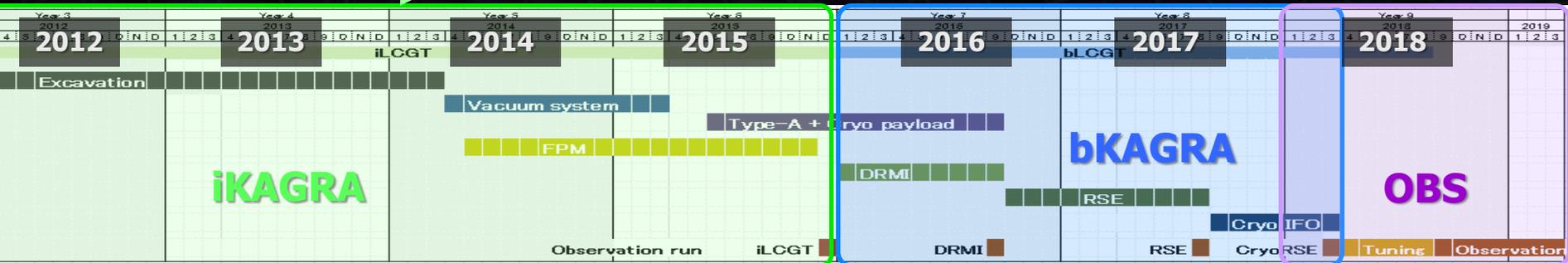
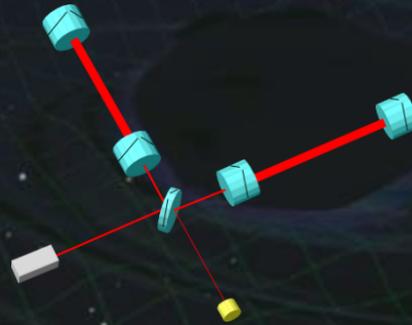


KAGRAスケジュール

• **iKAGRA** (2010.10 – 2015.12)

3-km FPM interferometer

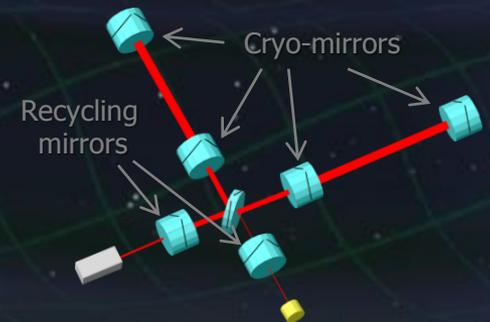
- Baseline 3km room temp.
- Operation of total system with simplified IFO and VIS.



• **bKAGRA** (2016.1 – 2018.3)

Operation with full config.

- Final IFO+VIS configuration
- Cryogenic operation.



宇宙重力波望遠鏡計画

LISA (Laser Interferometer Space Antenna)

Obs. band around 1mHz

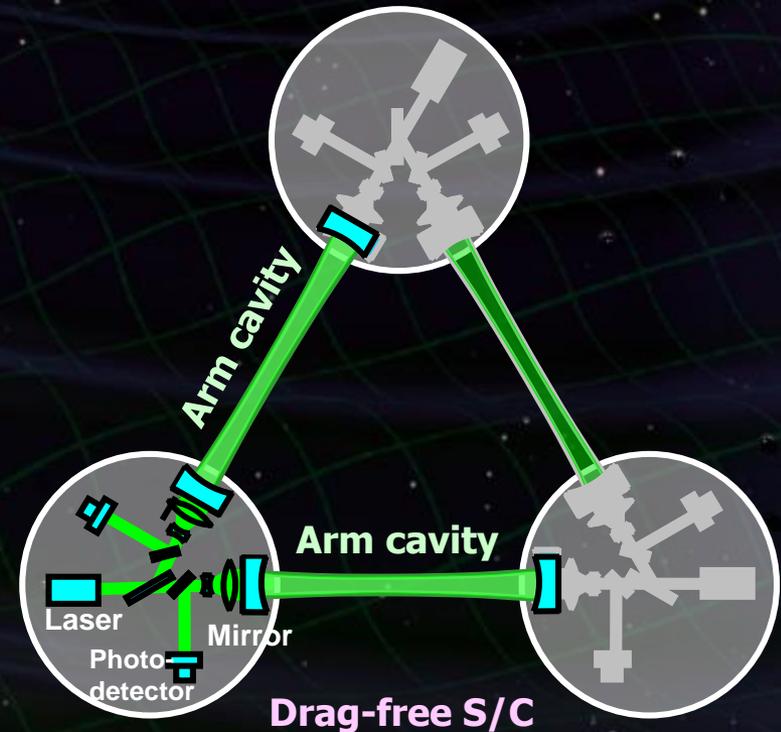
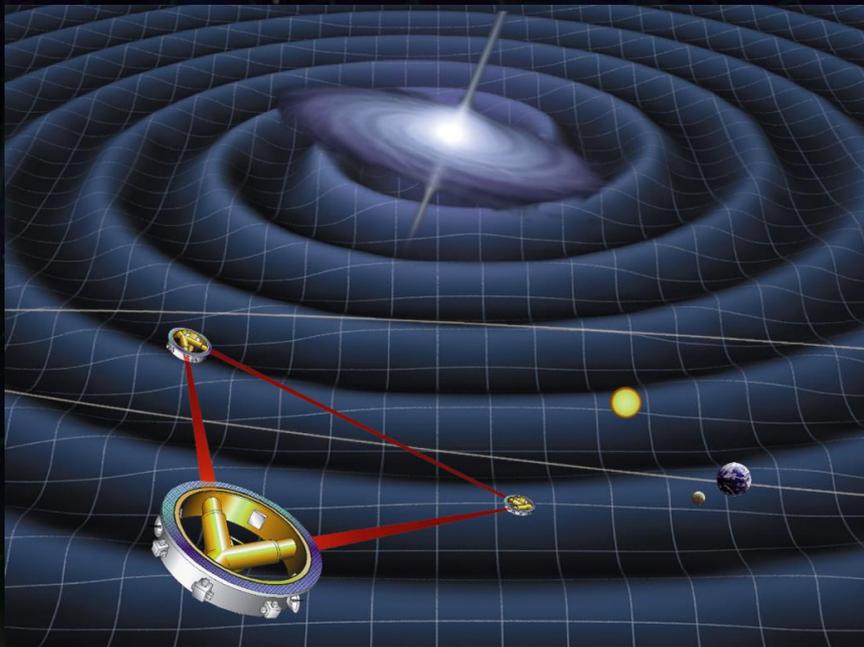
~Million km baseline length

DECIGO

(Deci-hertz Interferometer
Gravitational Wave Observatory)

Obs. Band around 0.1Hz

1000km baseline length



まとめ

- 重力波の存在が一般相対性理論で予言されてから約100年経つが、まだその直接検出はされていない。
「**アインシュタインの最後の宿題**」
- 約50年間の努力の積み重ねの結果、**重力波望遠鏡 KAGRA**による重力波の直接検出が目前に迫っている。
- 「**重力波天文学**」により、宇宙誕生直後の姿など、これまで見ることができなかった宇宙の姿を観測することが可能になるだろう。

終わり