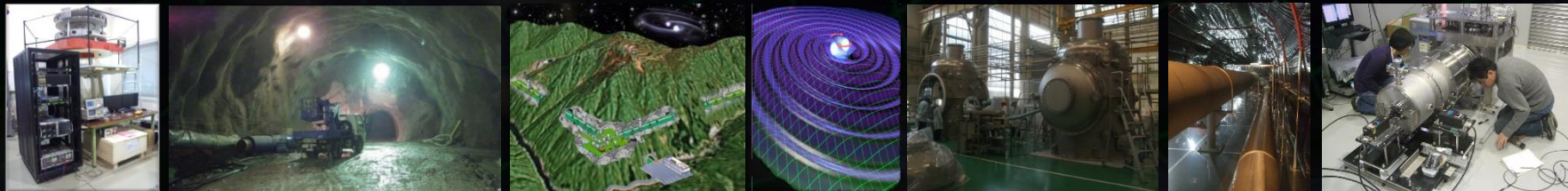


東京大学 第66回 駒場祭 公開講座
[一般相対性理論誕生100年記念市民講演会]

重力波で見る宇宙

- 重力波の観測 -

安東 正樹 (東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻)



重力波にまつわる3つの話

- **アインシュタインが残した宿題.**
- **重力波による天文学.**
- **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 -



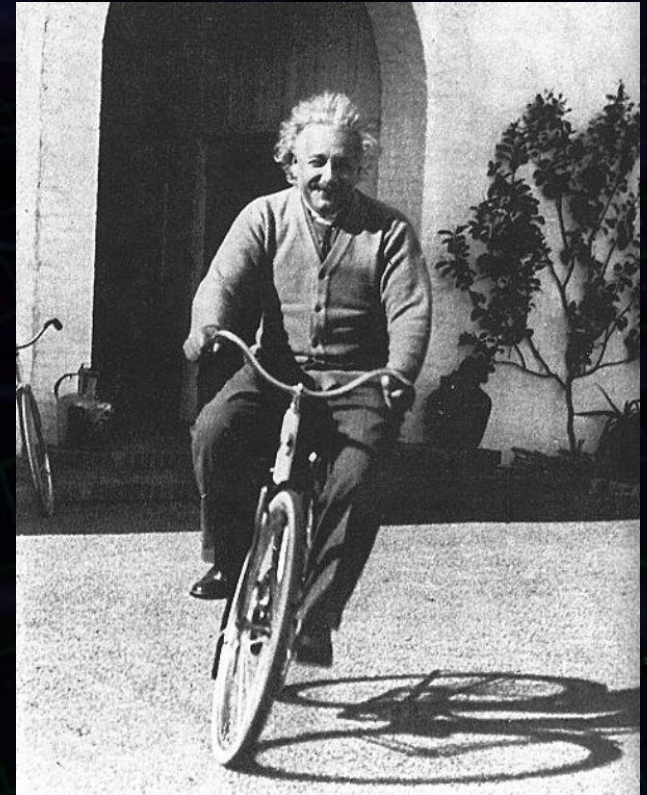
イラスト : Tom Haruyama

アインシュタインの相対性理論

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年度 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
 - 1915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

一般相対性理論 (1915年)

⇒ 重力を時空の性質として解釈。

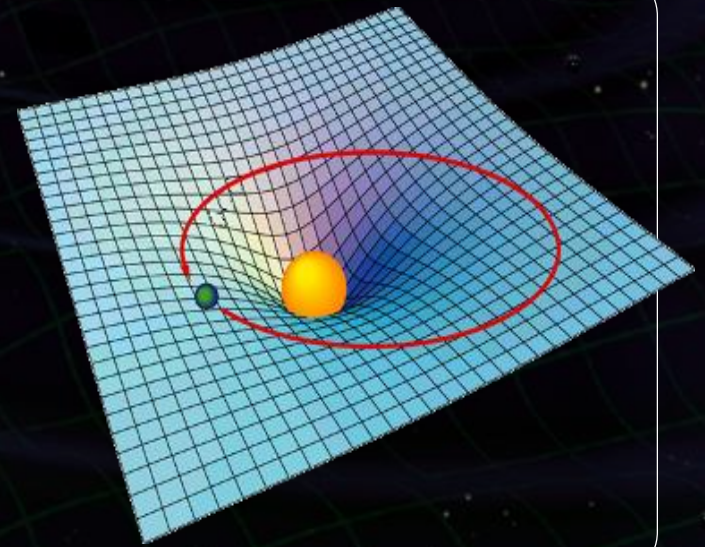


アインシュタイン方程式

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

↑
時空の曲がり
を表す量

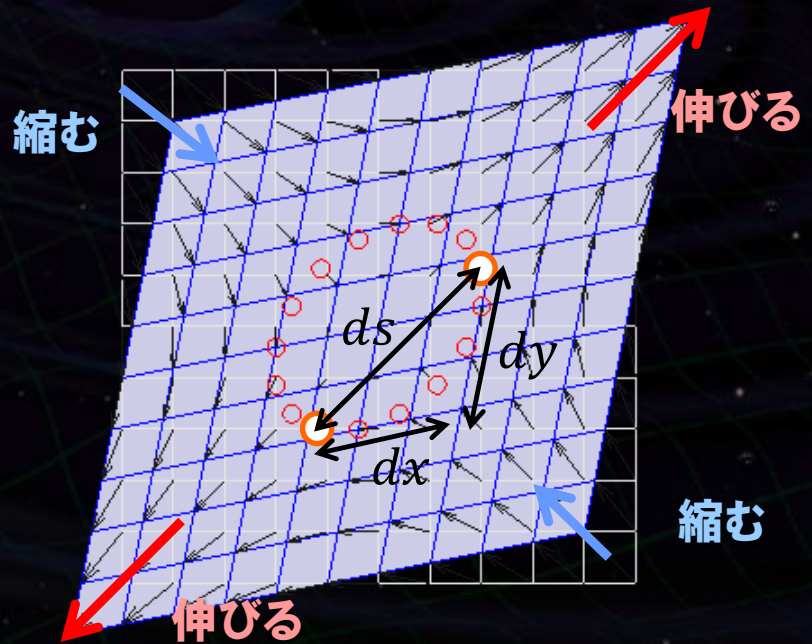
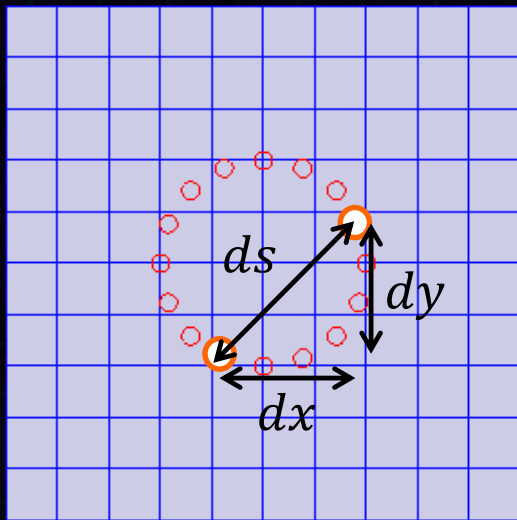
↑
物質のエネルギー
(質量, 運動量など)



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

曲がった時空

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

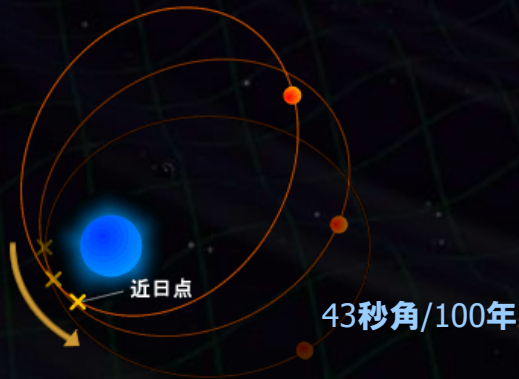
$$ds^2 = A dx^2 + B dy^2 + C dx dy$$

相対論の実験的検証

アインシュタインの一般相対性理論は正しい???

→ '古典的'な検証実験.

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)

その他, 重力赤方偏移, シャピロ遅延, GPS補正, 慣性引きずり効果など多数.

重力波

重力を**時空の歪み**として表現.

→ その**歪みが波として伝搬する**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

重力波の間接的な証拠

連星パルサーPSR B1913+16 の発見 (1974年 ラッセル・ハルス, ジョゼフ・テイラー)

中性子星(パルサー)が伴星を持ち
互いの周りを公転している天体系。

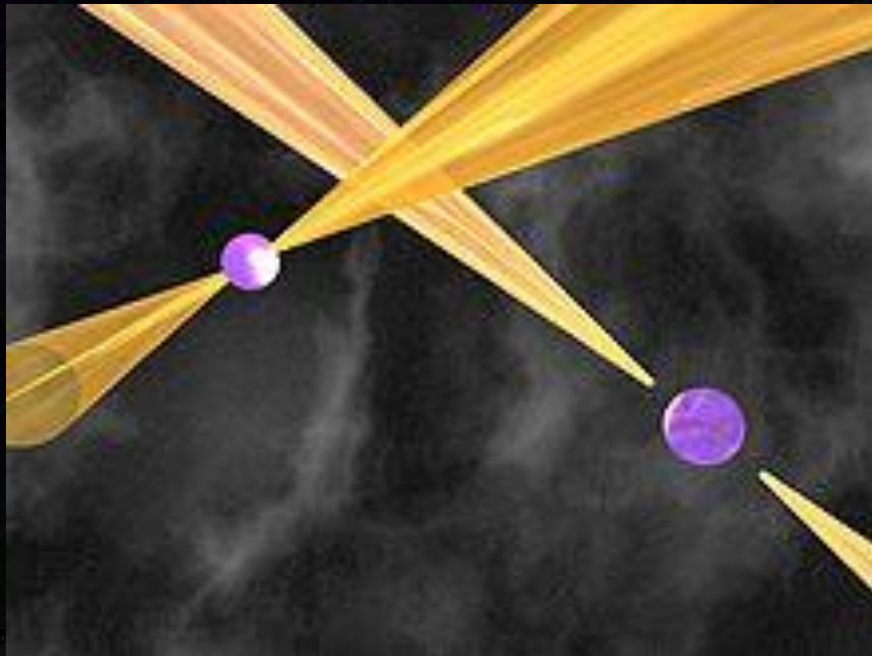


図: Wikipediaより



アレシボ天文台 (プエルトリコ)

公転周期: 7.75時間

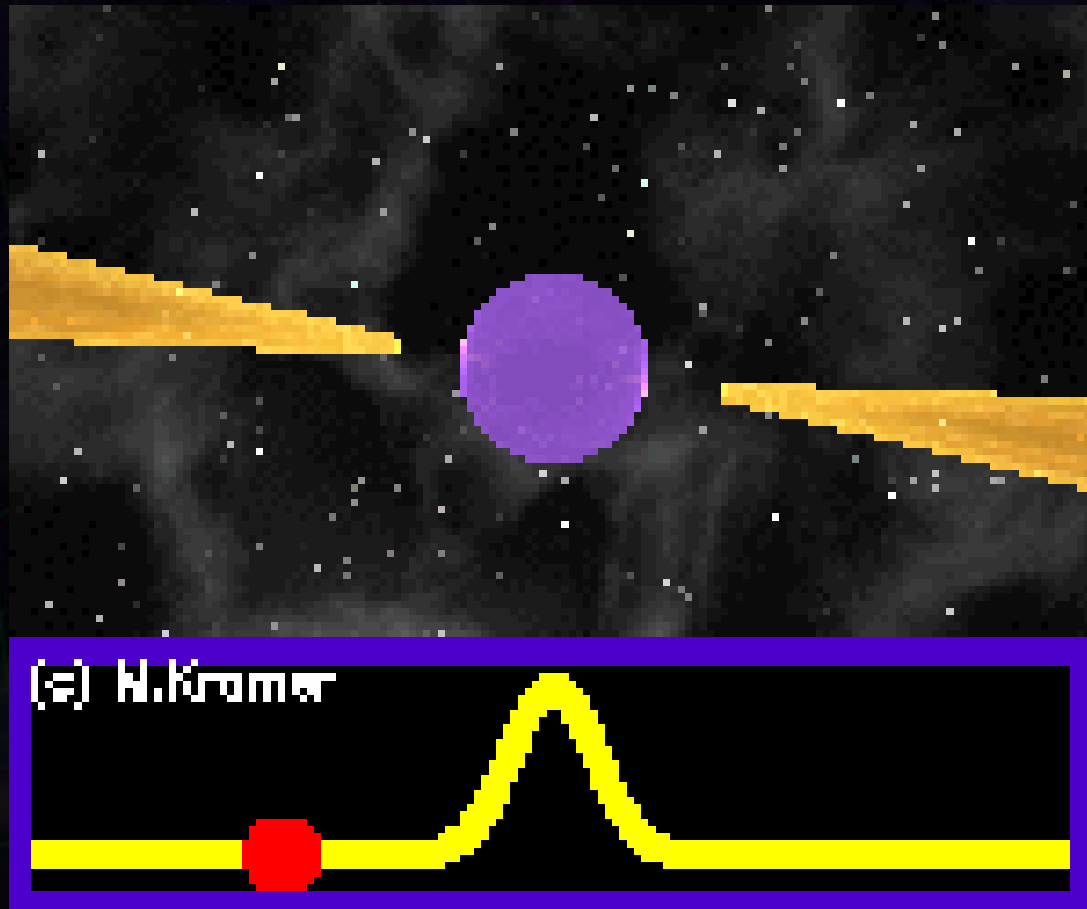
質量: パルサー 1.44 Msolar

伴星 1.39 Msolar

公転周期の変化率:

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

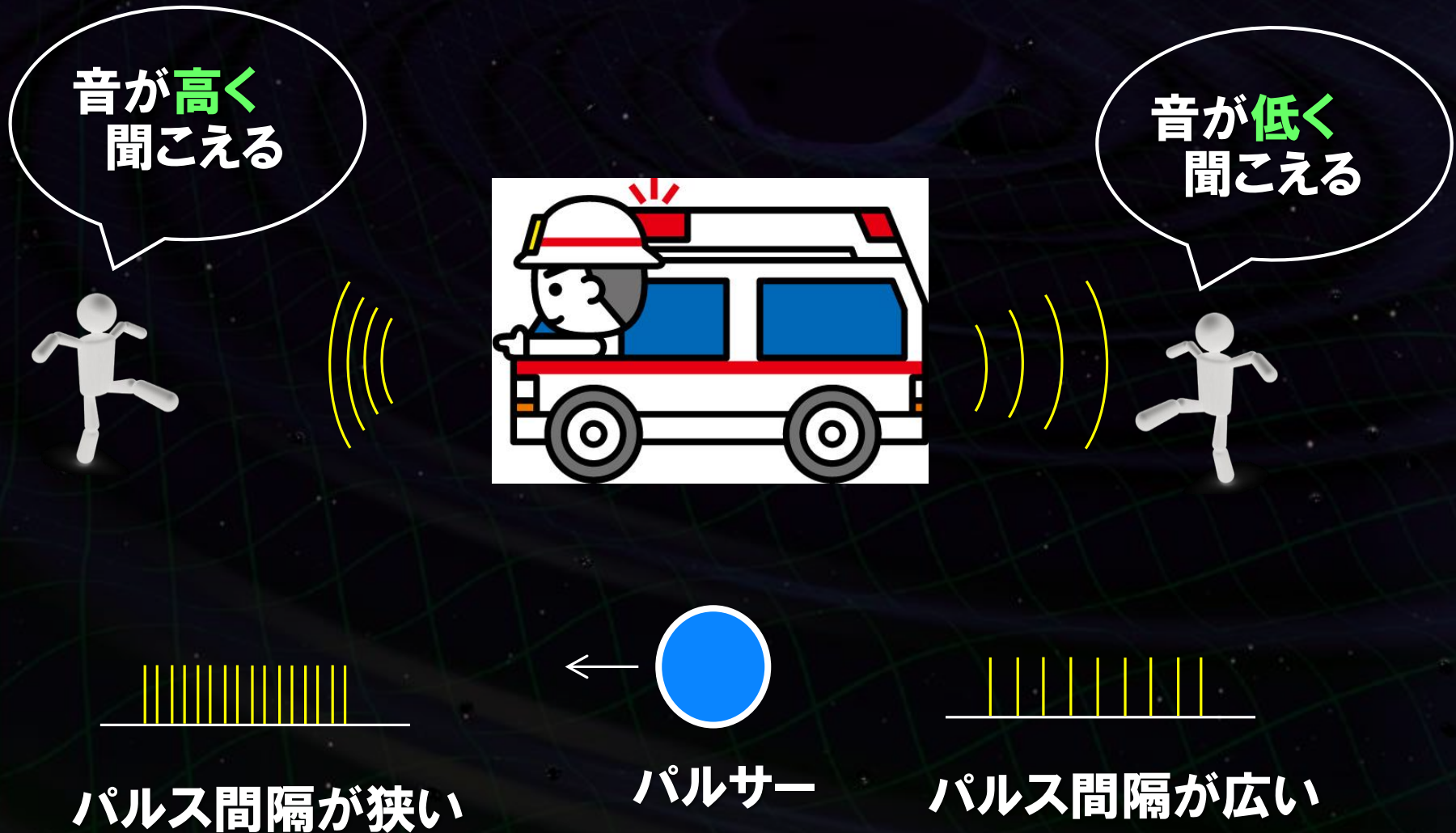
パルサー(中性子星)の灯台モデル



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

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

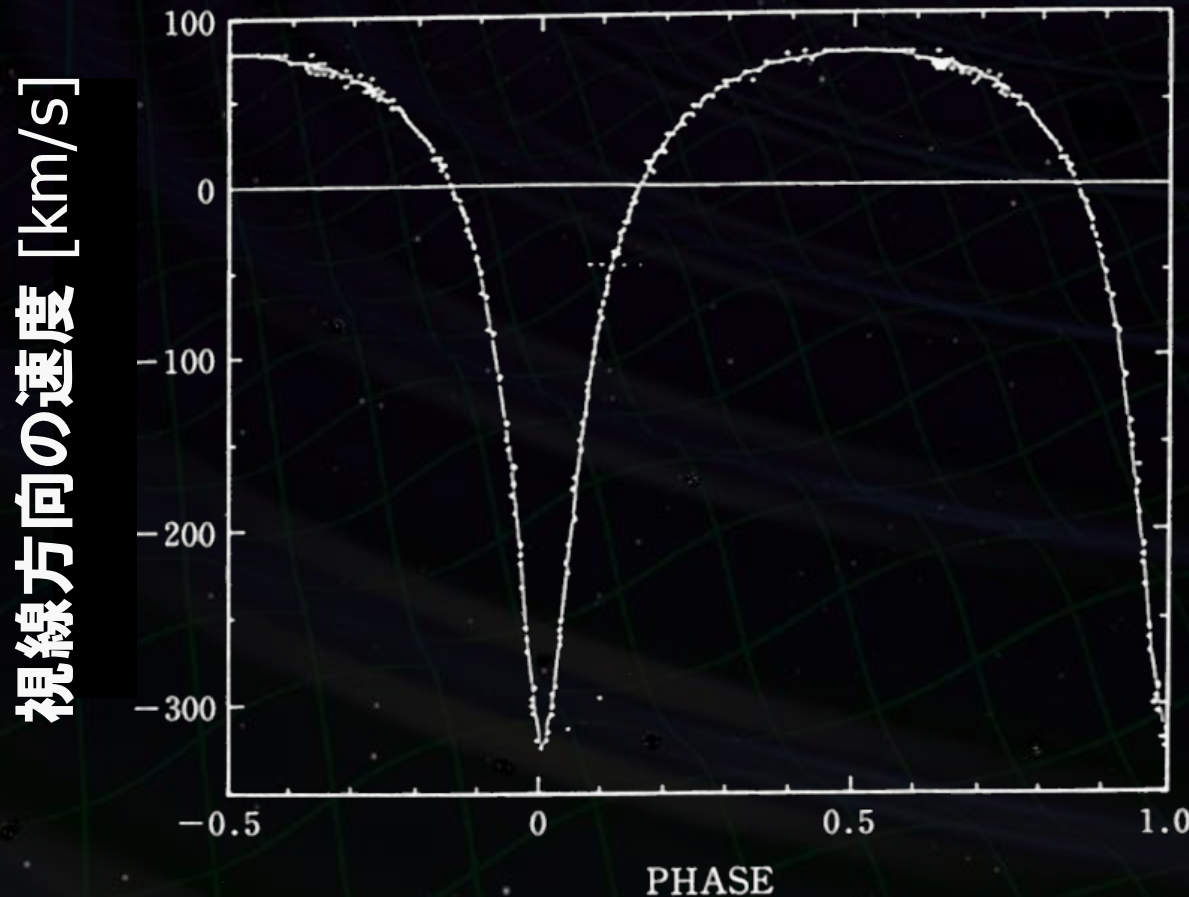
ドップラー効果



連星パルサーの軌道観測

伴星によるドップラーシフトの効果

→ パルス周期の規則的な変化.



公転周期: 7.75時間

質量: パルサー 1.44 Msolar

伴星 1.39 Msolar

重力波存在の間接的な証明

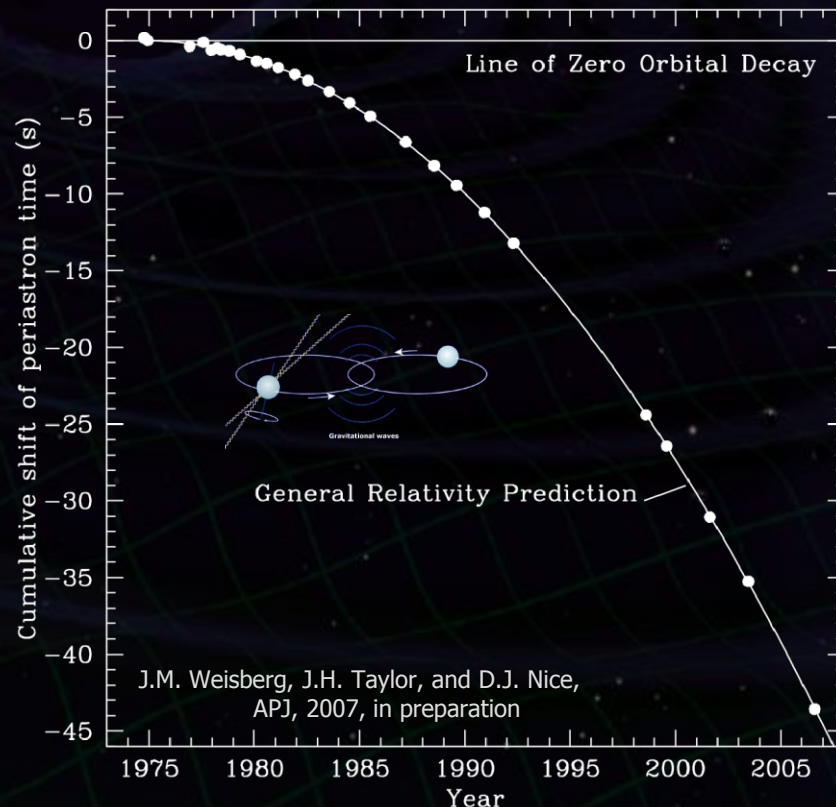
連星パルサーの軌道変化を
20年以上継続的に観測.

重力波の放出により公転エネルギー
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



重力波の存在証明



質量 : パルサー 1.44 Msolar, 伴星 1.39 Msolar
公転周期の変化率: $(-2.4056 \pm 0.0051) \times 10^{-12} \text{s/s}$

重力波の存在証明

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

宇宙の「未発見」

- **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」**

重力波天文学

- 重力波望遠鏡による
新しい天文学 -



電磁波と重力波

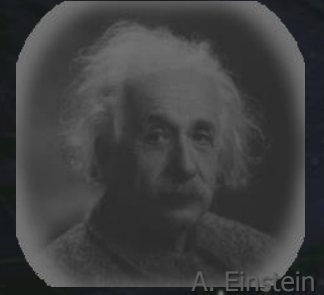
電磁波

- 光速で伝播する
電磁場の変動
- 電荷の加速度運動により生成



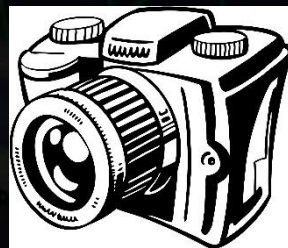
重力波

- 光速で伝播する
時空の歪み
- **質量**の加速度運動により生成



波源の各所から放射

→ 画像として観測.



波源全体の運動から放射

→ 時間変動
として観測.



重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

重力波による天文学

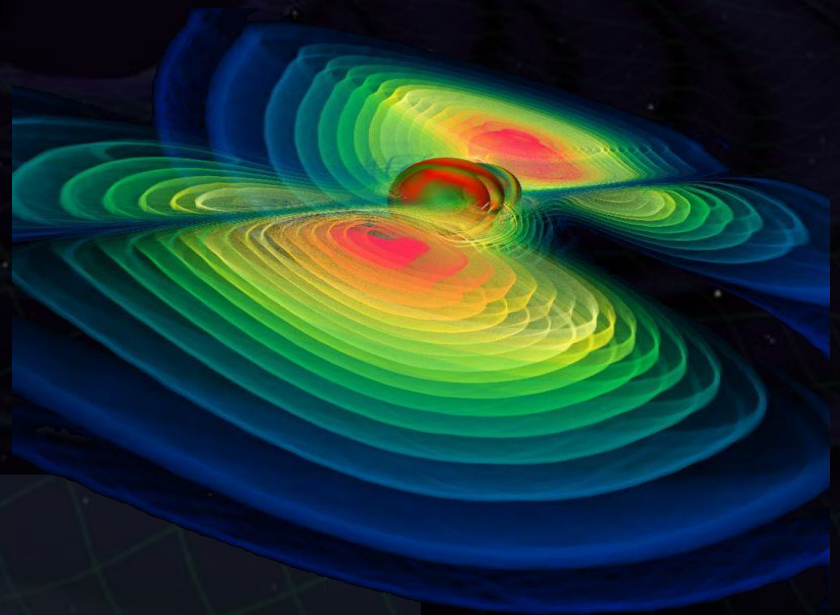
重力波の特徴

- ・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

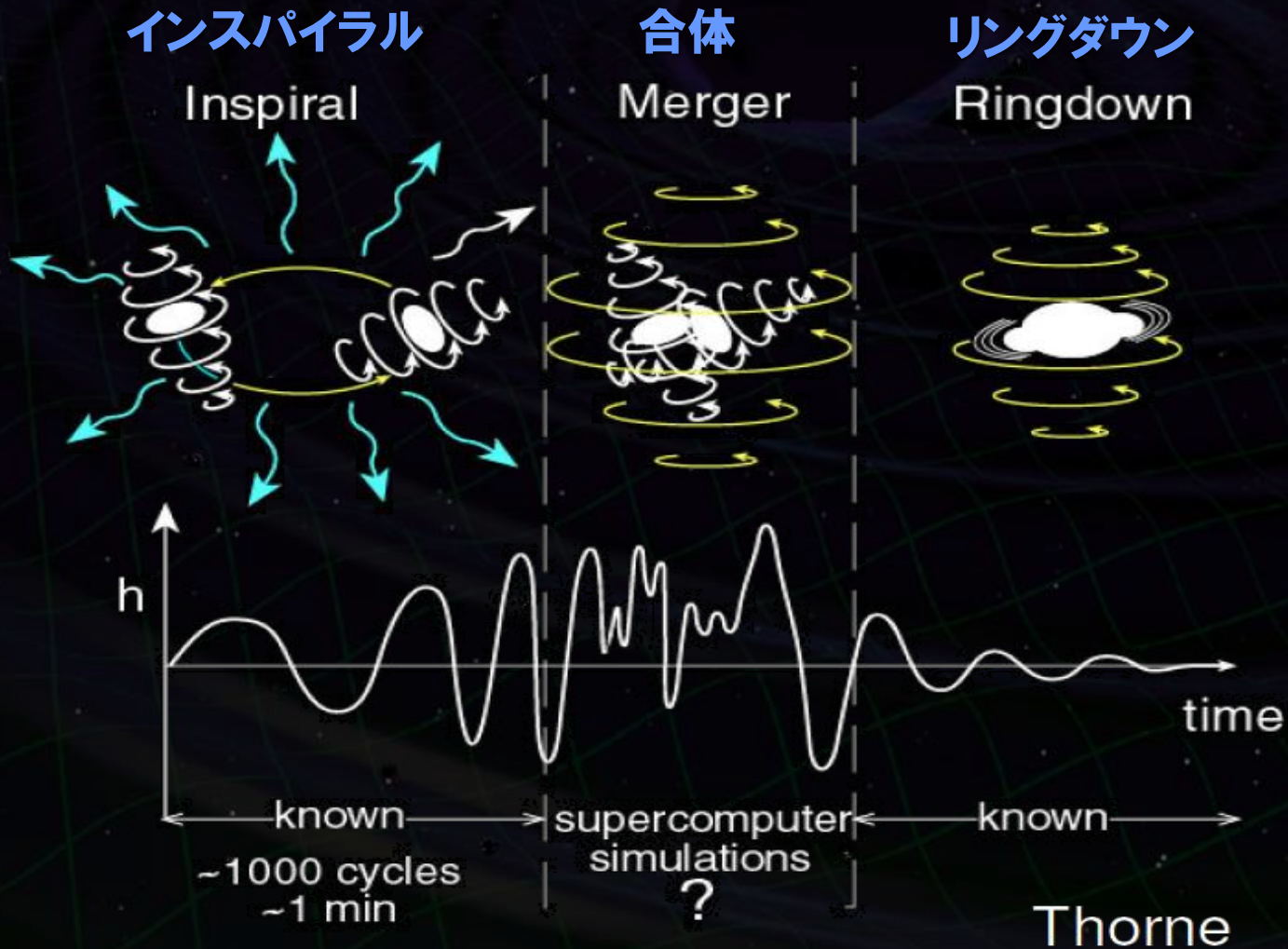
- ・電磁波と相補的・独立な観測
- ・電磁波などでは見ることの出来ない現象
(初期宇宙, 高エネルギー天体現象の内部)



主な重力波源

CG/KAGAYA

連星合体現象からの重力波

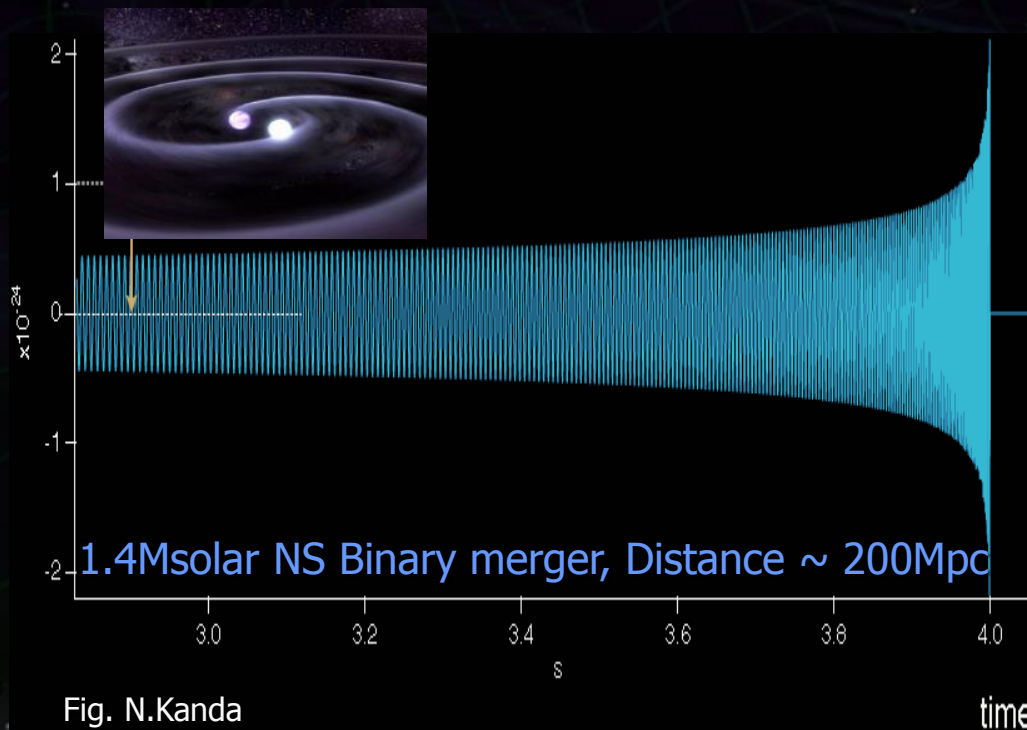


連星合体からの重力波

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.



初期宇宙の観測



Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

宇宙の「未発見」

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

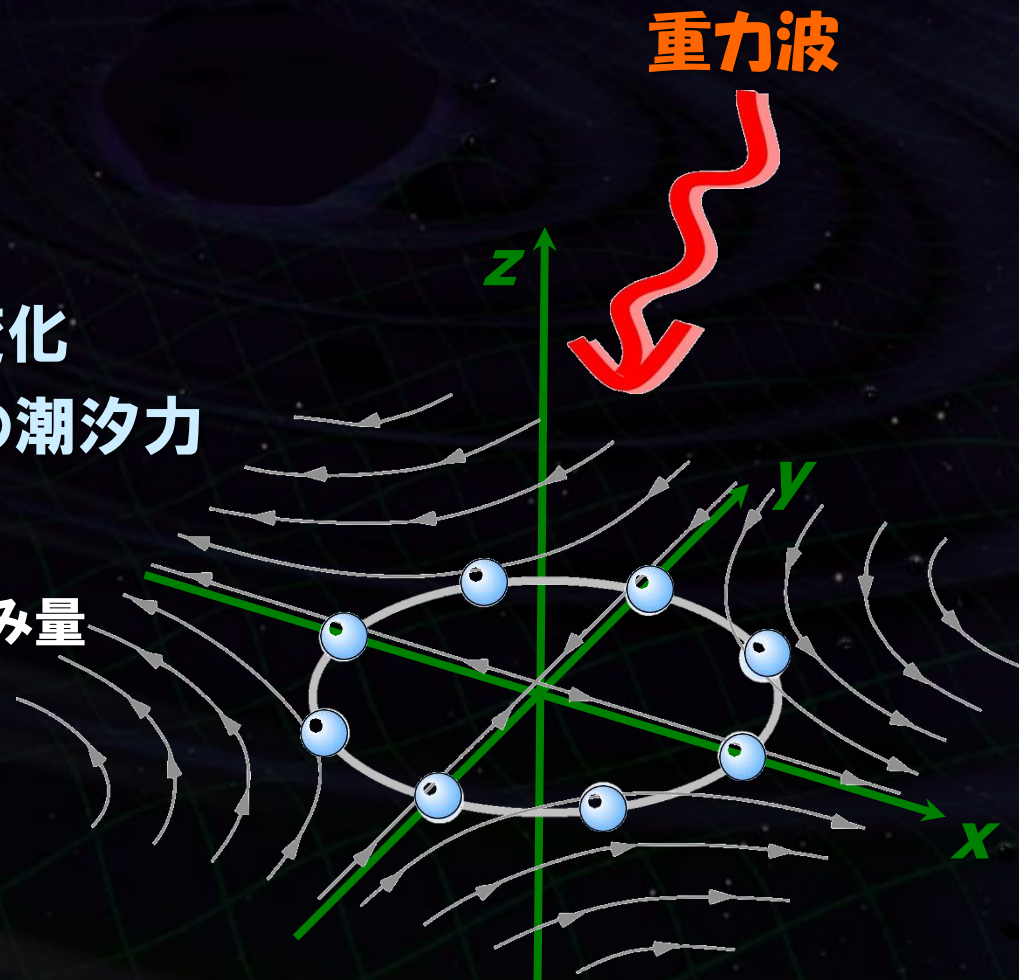
- 自由質点間の距離の変化
- 大きさを持った物体への潮汐力

重力波の振幅 h : 無次元の歪み量

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

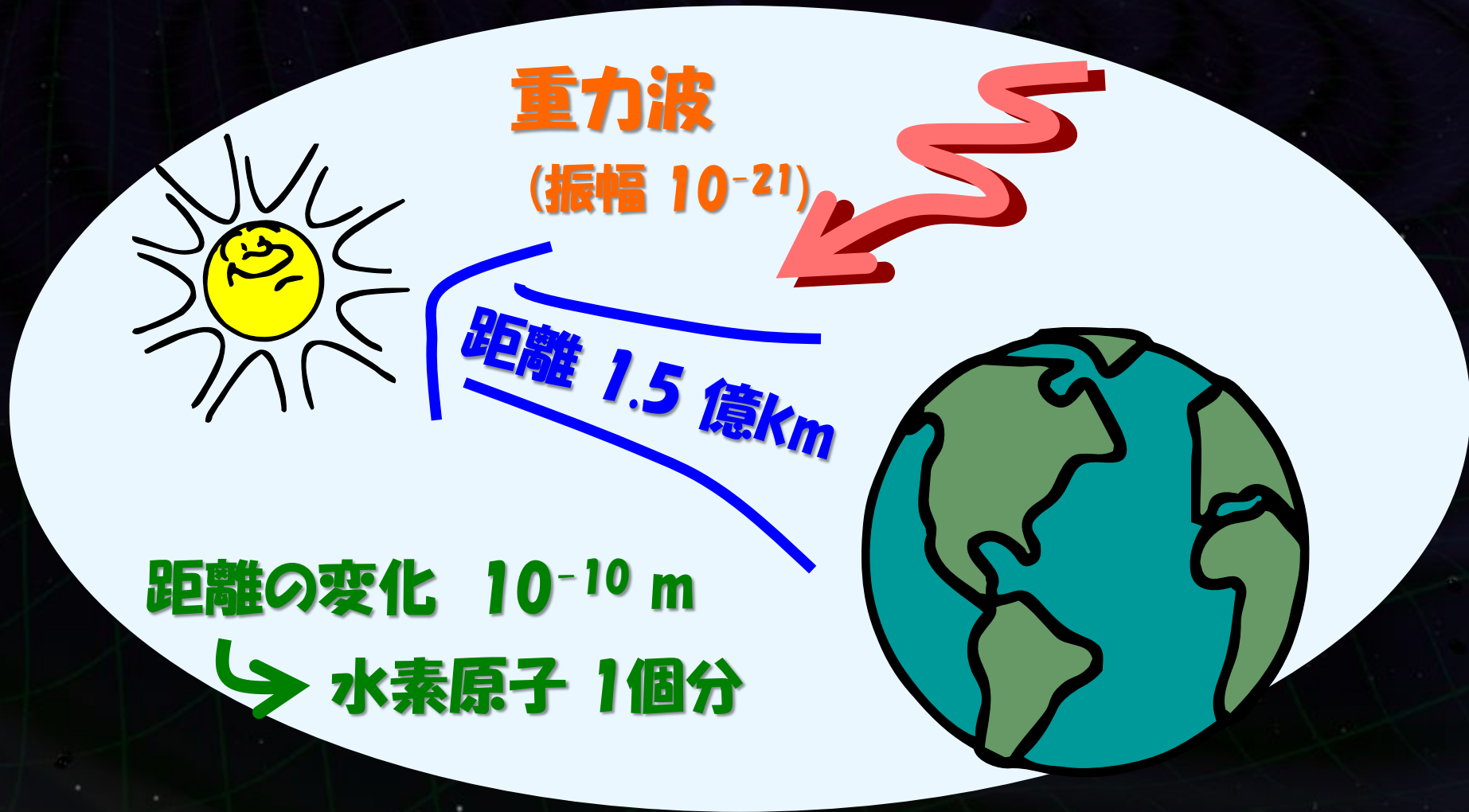
δL : 距離変動

L : 2点間の距離



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

重力波の効果：2点間の固有距離の変化

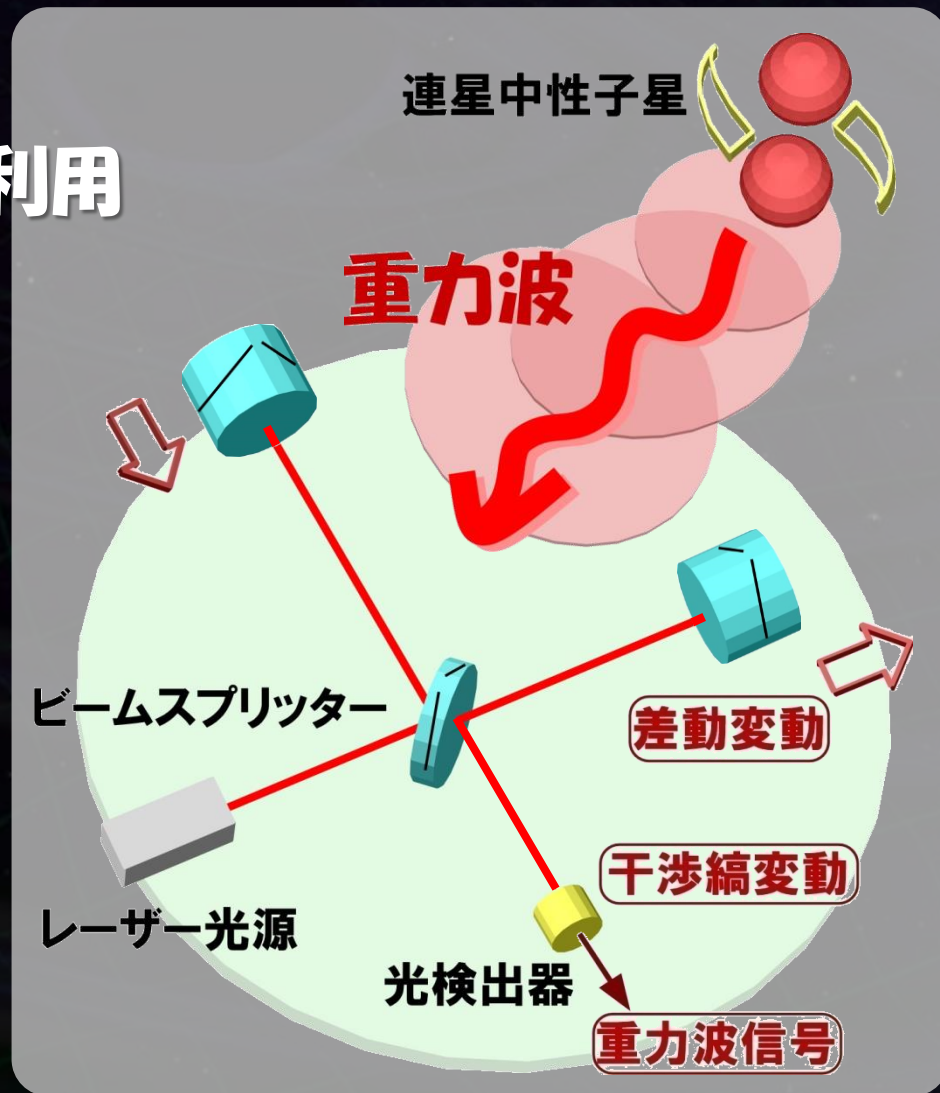


レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)を利用

重力波の潮汐効果
→ 直交する2方向
の差動変動



干渉光量の
変化として観測



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



国際的観測ネットワーク：1年を超える観測データ

⇨ 我々の銀河, 近傍銀河で
連星中性子星合体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

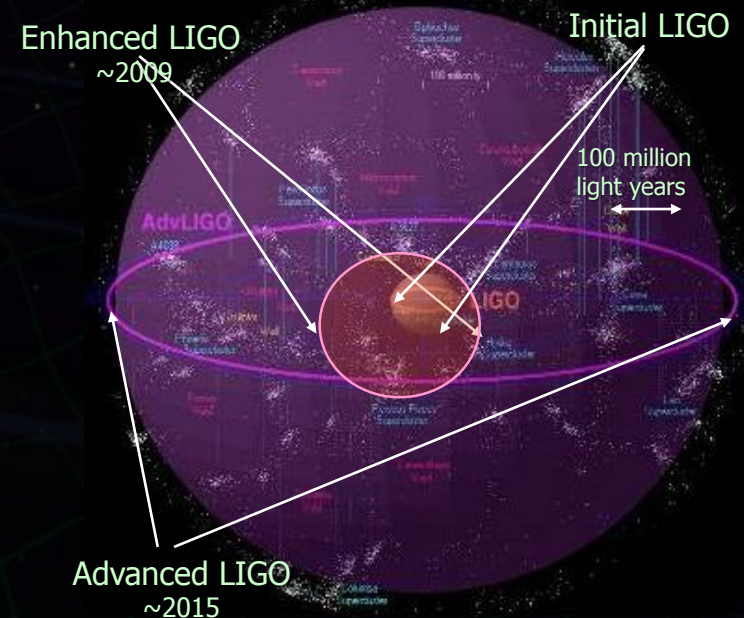
高感度化⇒より多くの銀河をカバー

(重力波の振幅) $\propto 1/(\text{波源までの距離})$



感度が10倍向上

→ 検出頻度は 10^3 倍



第2世代望遠鏡では、検出頻度 ~ 10 event/year

KAGRA (かぐら)

- 大型低温重力波望遠鏡 -



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

• 大型低温重力波望遠鏡 LCGTに愛称.

(Large Cryogenic Gravitational-wave Telescope)

かぐら KAGRA

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



KAGRAの特徴



- 大型のレーザー干渉計：基線長 3km
- 地下に設置：安定な地面振動環境。
- 低温に冷却：熱変動による雑音を低減。

日本独自の
先進技術



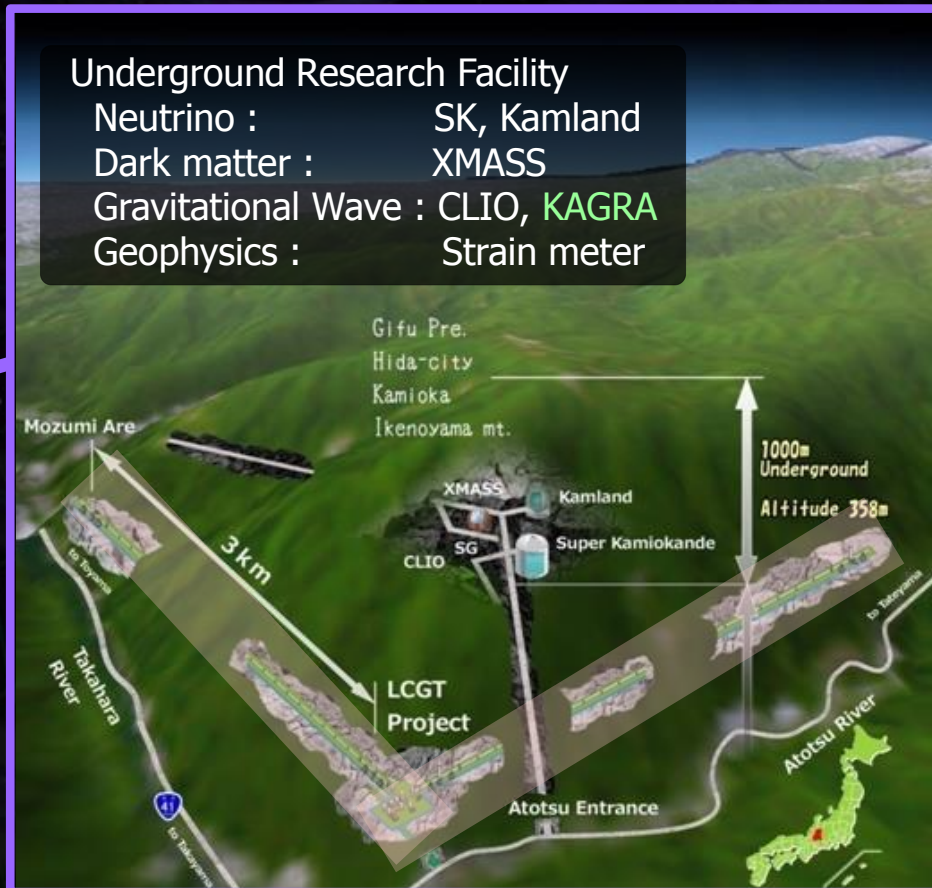
岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

(東京大学宇宙線研究所の施設)



富山から
車で約1時間

Map by Google



Underground Research Facility

Neutrino : SK, Kamland

Dark matter : XMASS

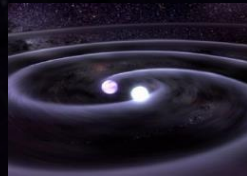
Gravitational Wave : CLIO, **KAGRA**

Geophysics : Strain meter

重力波望遠鏡の高感度化

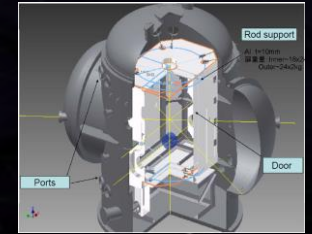
・重力波源の理解

理論・解析的計算
数値相対論
データ解析手法



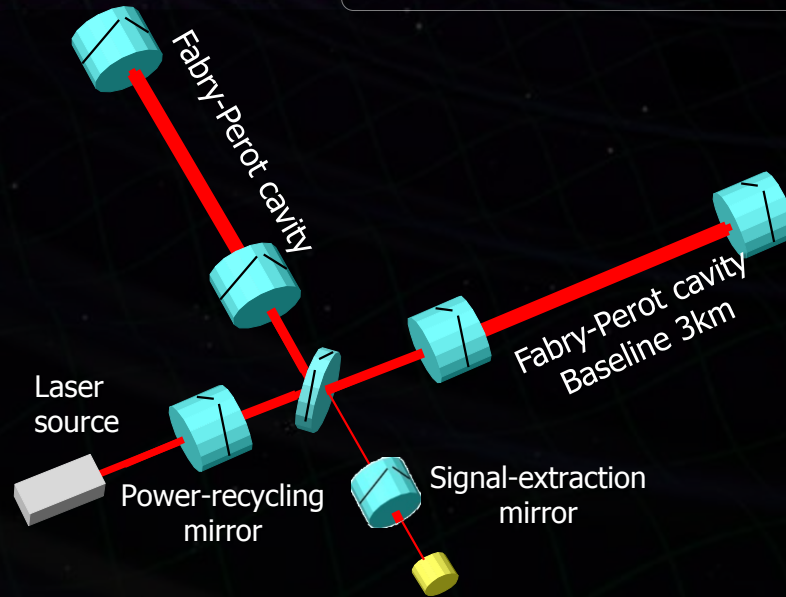
・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化
材質の機械損失



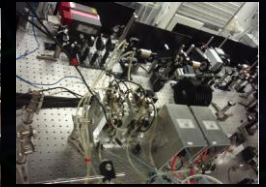
・地面振動の影響

静寂な地下サイト
高性能防振装置



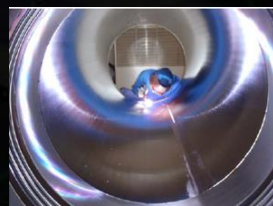
・光の量子雑音

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



トンネル内の様子 (2015年3月10日)



From presentation file by S.Kawamura (March 2015)

トンネル内の写真 (2015年夏)



By S. Miyoki

KAGRA 第一期 実験施設完成 (2015.11.6) KAGRA

朝日新聞 DIGITAL

検索

↑ **トップニュース** スポーツ カルチャー 特集・連載 オピニオン 写真
新着 社会 政治 経済・マネー 国際 テック&サイエンス 教育 環境・エネルギー
朝デシスペシャル

トピックス 大阪ダブル選 MRJ VW不正 フィギュアスケート 東京モーターショー 下町

朝日新聞デジタル > 記事 > 写真・図版

社会 その他・話題 サイエンス 宇宙・天文 ノーベル賞

「時空のひずみ」捉えるか 観測装置「KAGRA」公開

2015年11月6日 21時09分

シェア ツイート ブックマーク メール 印刷

記事に戻る < 前へ [7 / 12] 次へ > 文字を隠す



毎日新聞

2015年11月21日 (土)

LONGINES ロンジン賞 ジャパンカップ プレゼントキャンペーン!
期間 11月1日(日)~29日(日) 賞品 ロンジン マ

ニュース プレミア 動画 写真 オピニオン スポーツ エンタメ 文化 暮らし 教育 特集

総合 社会 政治 経済 国際 サイエンス

[PR] 500円ですぐ入れる葬儀の保険/支払いは1回だけ

G+ 4 ツイート おすすめ 100 BI 3 記事を印刷 文字サイズ 小 中 大

「KAGRA ニュース」の記事をお探しですか? 最新関連記事が 10+ 件 あります。

重力波望遠鏡: 「KAGRA」完成…宇宙の謎、解明へ

毎日新聞 2015年11月06日 19時56分 (最終更新 11月06日 20時39分)



宇宙から届く重力波の検出を目指して東京大などが岐阜県飛騨市に建設を進めてきた大型低温重力波望遠鏡「KAGRA (かぐら)」の実験施設が完成し、6日に報道陣に公開された。宇宙の謎の解明につながる研究で、検出できれば「ノーベル賞級の成果」といわれる。今年度中に試験観測を始め、2017年度中の本格観測開始を目指す。

施設はニュートリノ観測装置「スーパーカミオカンデ」と同じ神岡鉱山跡に建設された。重力波は物体が動いた時に時空がゆがんで波のように伝わる現象で、アインシュタインが1世紀前に存在を予言したが、極めて微弱なため検出に成功した例はない。日米欧で観測に向けた競争が激化しており、日本のプロジェクトの中心で今年のノーベル物理学賞に決まった梶田隆章・東大宇宙線研究所長は「世界一番乗り」を目標に掲げる。【藤野基文】

報道陣に公開された完成した大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」の第1期実験施設。筒状のビームダクトが3キロにわたって続く「X-arm トンネル」=岐阜県飛騨市で2015年11月6日、小関勉撮影

写真特集へ

関連記事

- ・KAGRA完成、次は「重力波天文学」梶田隆章さん意気込み
- ・なるほドリ: ノーベル賞受賞者 出身大学


NHKでのライブ放送 (2015.11.19)



NHK WORLD


Home News **TV** Radio On Demand Life & Culture Learn Japanese 80th

Home > NEWSROOM TOKYO > Putting Einstein to the Test Mar. 10, 2015 - Updated 04:16 UTC



Mon.-Fri. 20:00 - 20:45 (JST)

- Previously Aired
- Sho's Analysis
- About NRT
- Our Team



Putting Einstein to the Test

Nov. 19, 2015 [Tweet](#) [Share](#) [?](#) *You will leave NHK website.

Scientists are at work deep in the mountains of central Japan. They hope to prove a theory of Albert Einstein's. Two hundred meters underground, inside an abandoned zinc mine, the researchers have laid two pipes in tunnels at right angles, each three kilometers long. The tunnels are so long it's impossible to see light at the ends. The tunnels are also so long that on this job, the scientists move around by bicycle.

The project, called KAGRA, began three years ago. It is an initiative of the University of Tokyo. It is led by a team of researchers from Japan and other countries. They're preparing to start testing in March.

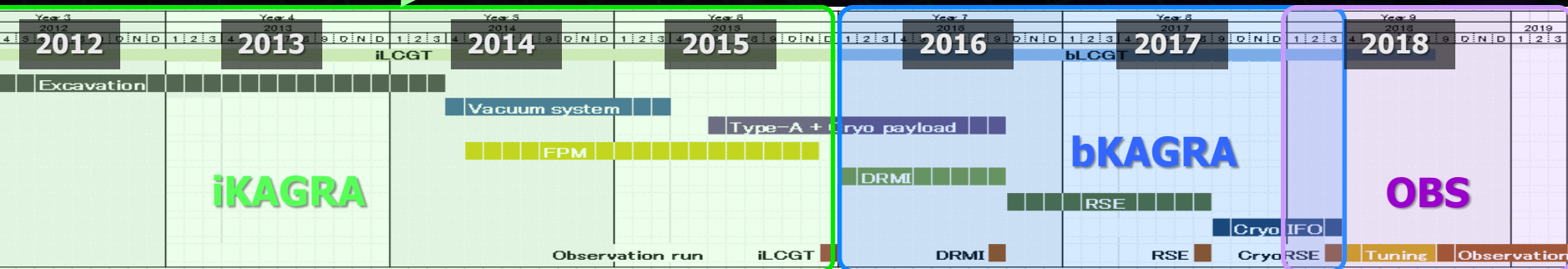
<http://www3.nhk.or.jp/nhkworld/newsroomtokyo/aired/20151119.html>

KAGRAのスケジュール

• iKAGRA (2010.10 – 2015.12)

マイケルソン干渉計

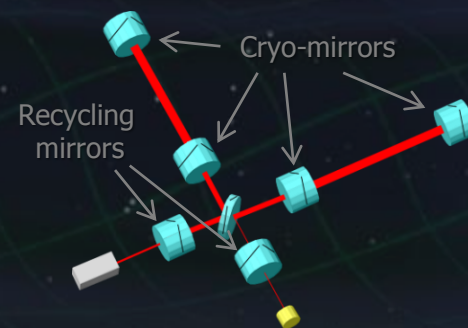
- 基線長 3km, 常温動作.
- 全体システムの動作確認.



• bKAGRA (2016.1 – 2018.3)

最終形での動作.

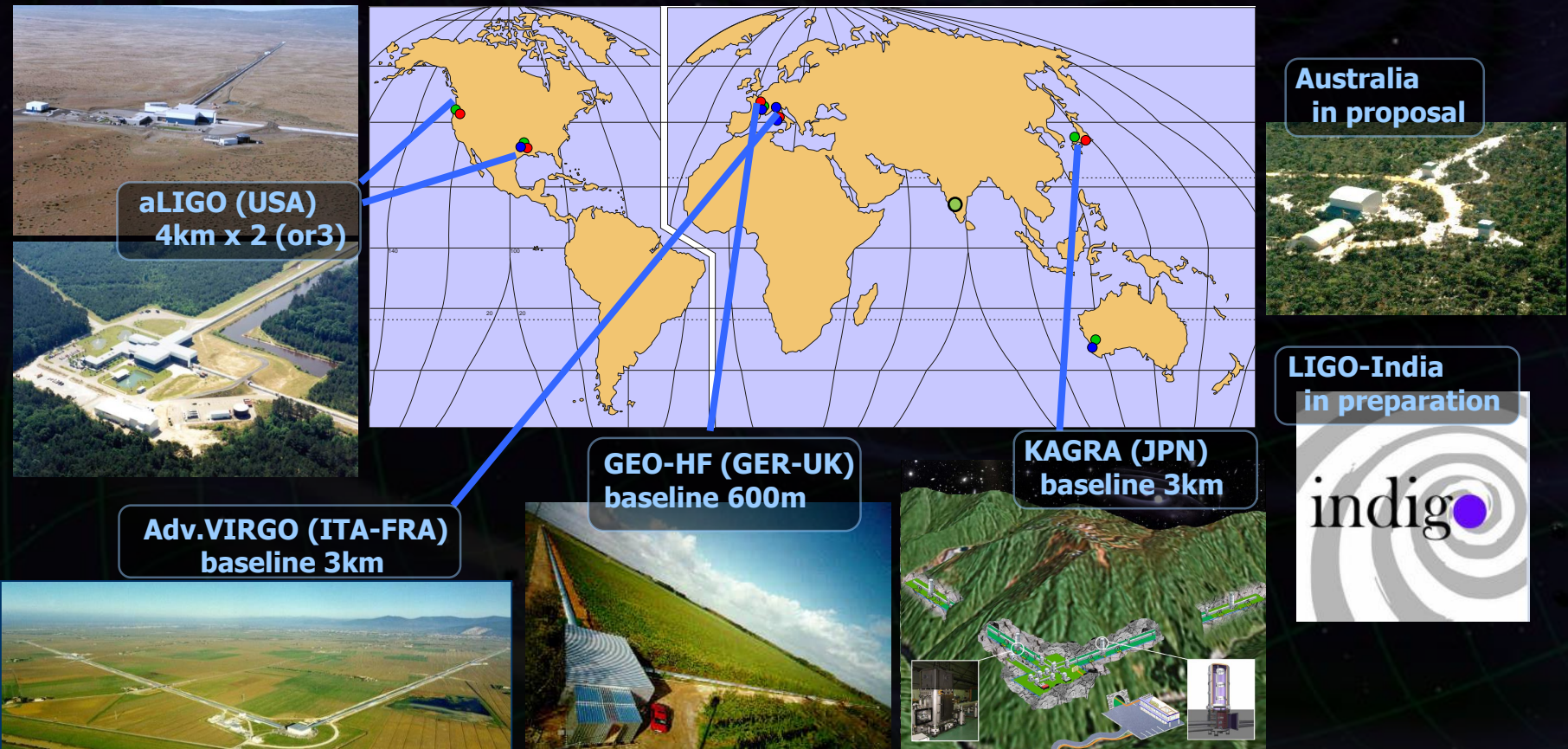
- 干渉計構成等のアップグレード
- 低温での動作.



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3-5年後)

→ 重力波天文学 (重力波の検出, 位置, 物理情報, ...)

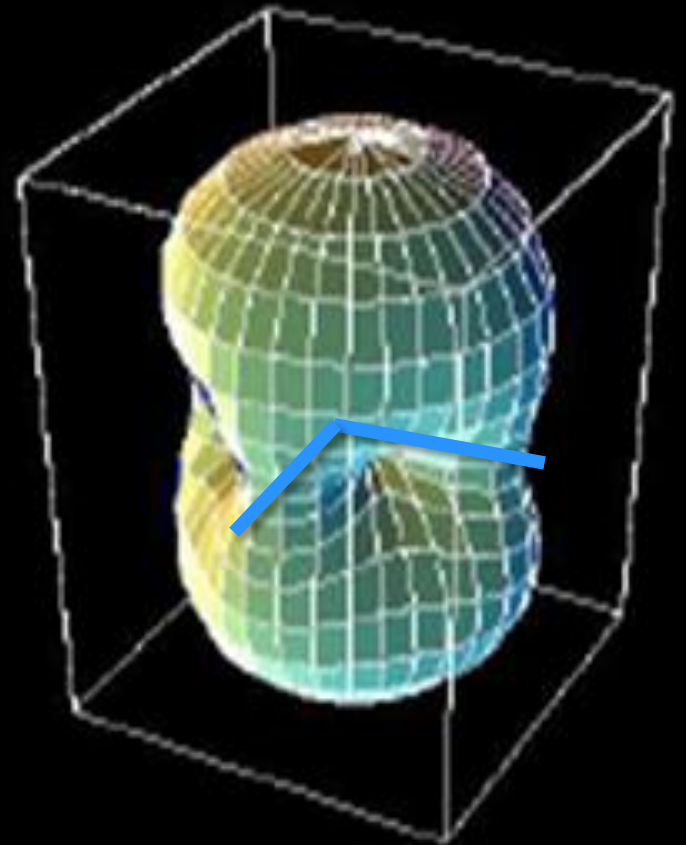


干渉計のアンテナパターン

重力波検出器は指向性が小さい。

- 重力波が真上から来たか真下から来たか区別できない。
- 真横から来ても半分の感度。

⇒ 1台の干渉計で重力波源を特定することはできない。



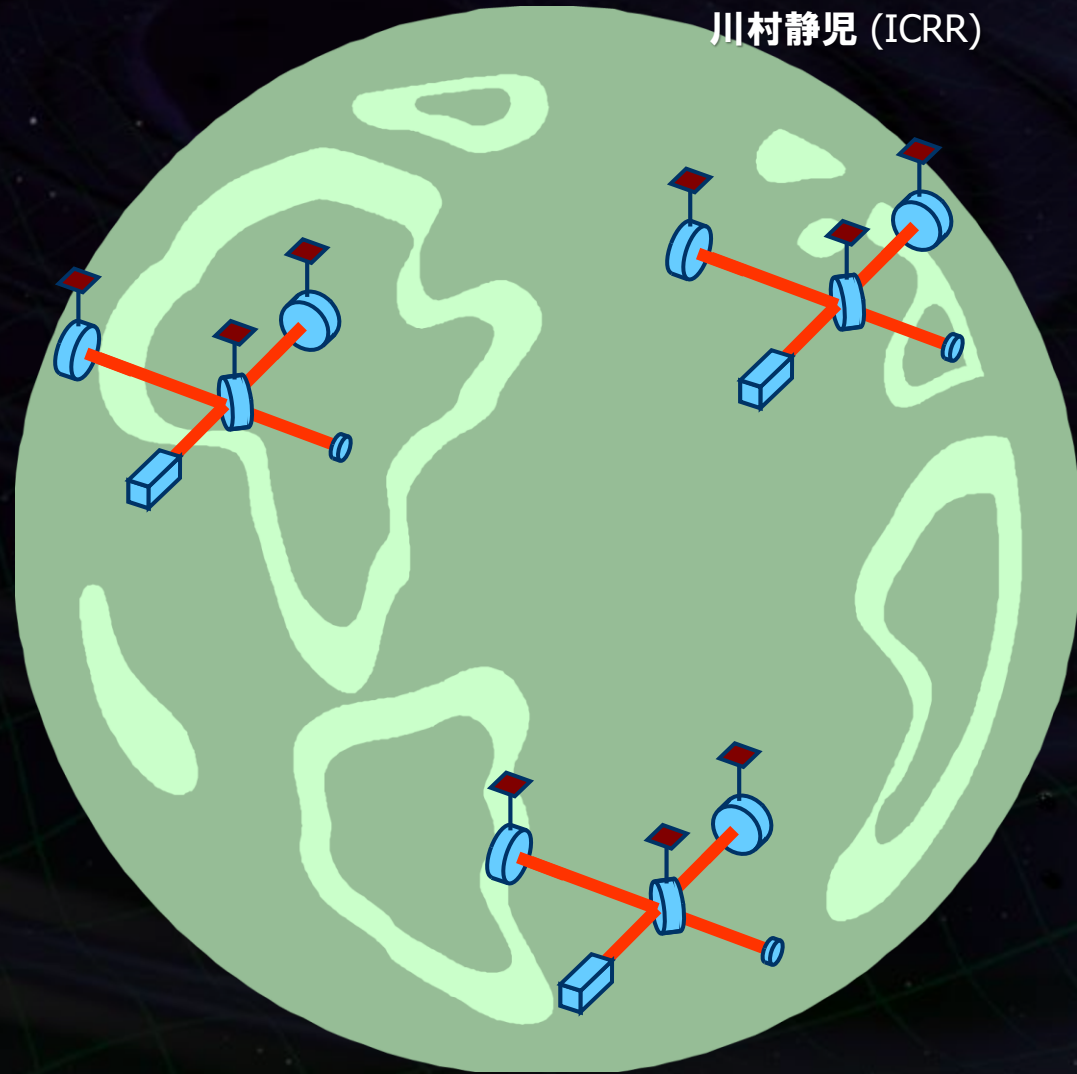
国際観測網での同時観測

アニメーション：
川村静児 (ICRR)

複数台で同時観測

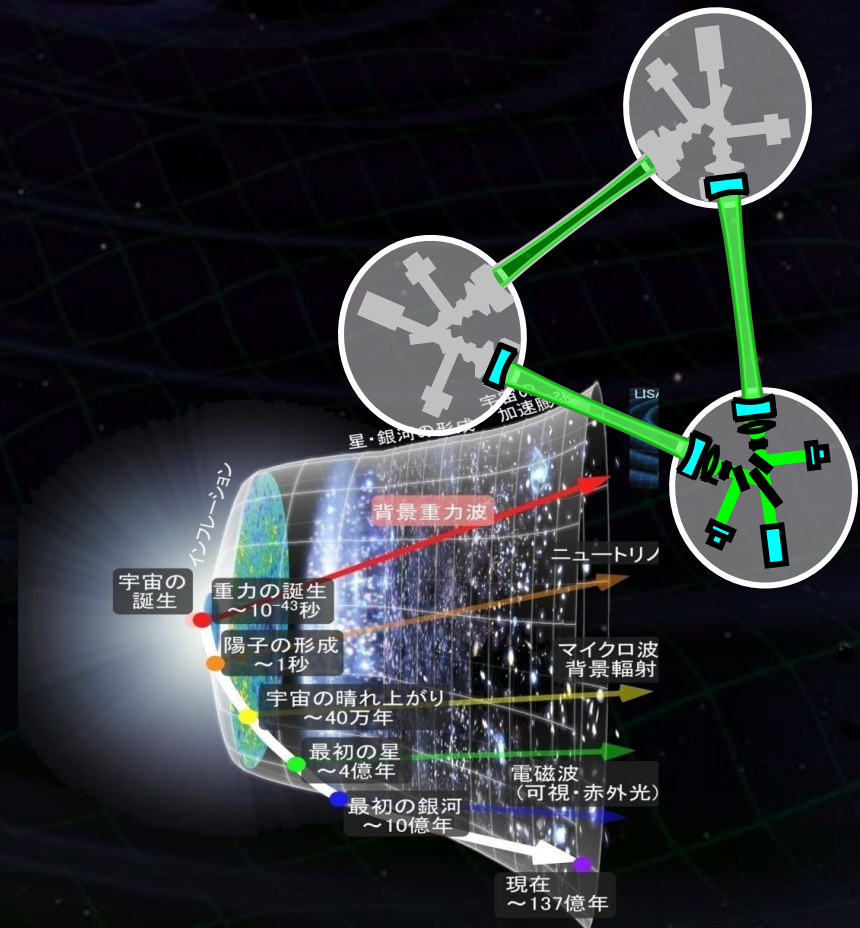


到着時間の差から
波源の方向が分かる！



初期宇宙の観測

- 宇宙重力波望遠鏡 -

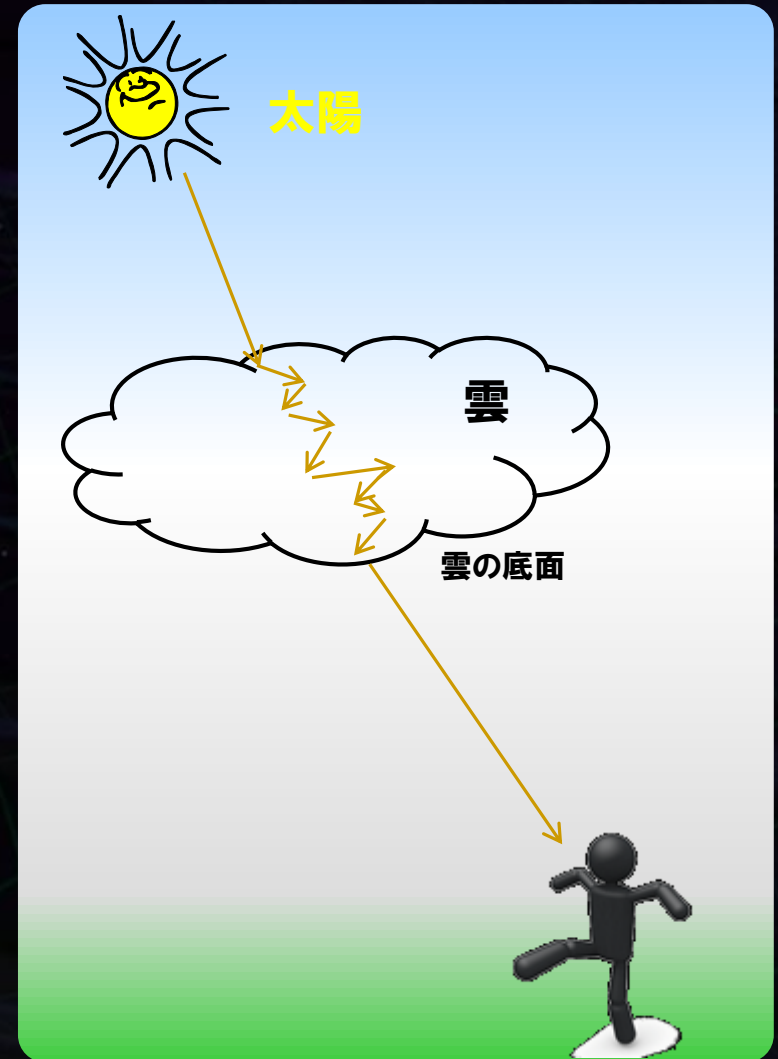


初期宇宙の観測

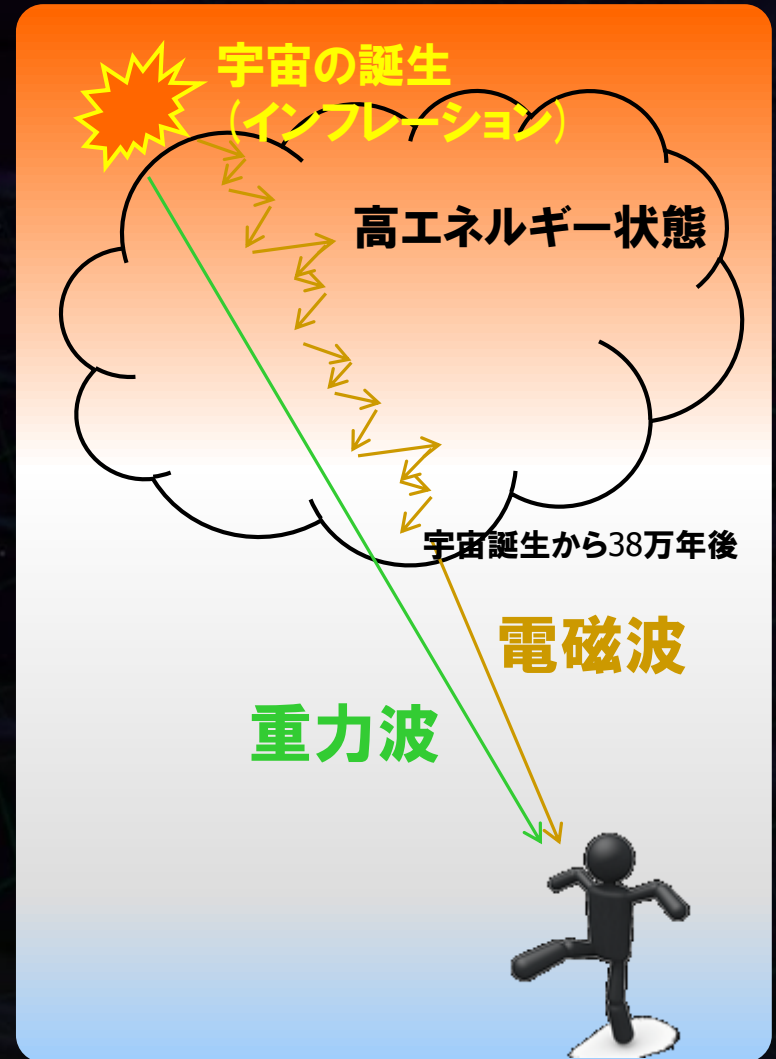
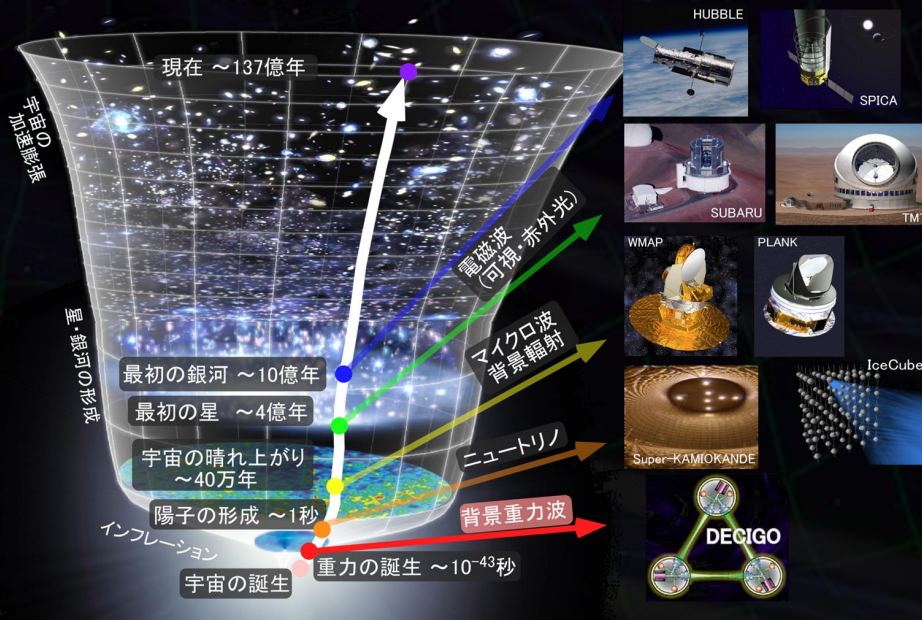


Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

太陽からの光は雲の中で散乱
され、元の情報(太陽の形)を失う。



重力波ならば、宇宙誕生直後の姿を直接観測できる。



- KAGRAでは、初期宇宙からの重力波の直接観測は難しい。
 - KAGRAが感度をもつ100Hz付近では振幅が小さい。
 - 信号振幅が大きくなる低い周波数帯では、地面振動などの影響で感度の向上は難しい。



宇宙重力波望遠鏡

KAGRA と DECIGO

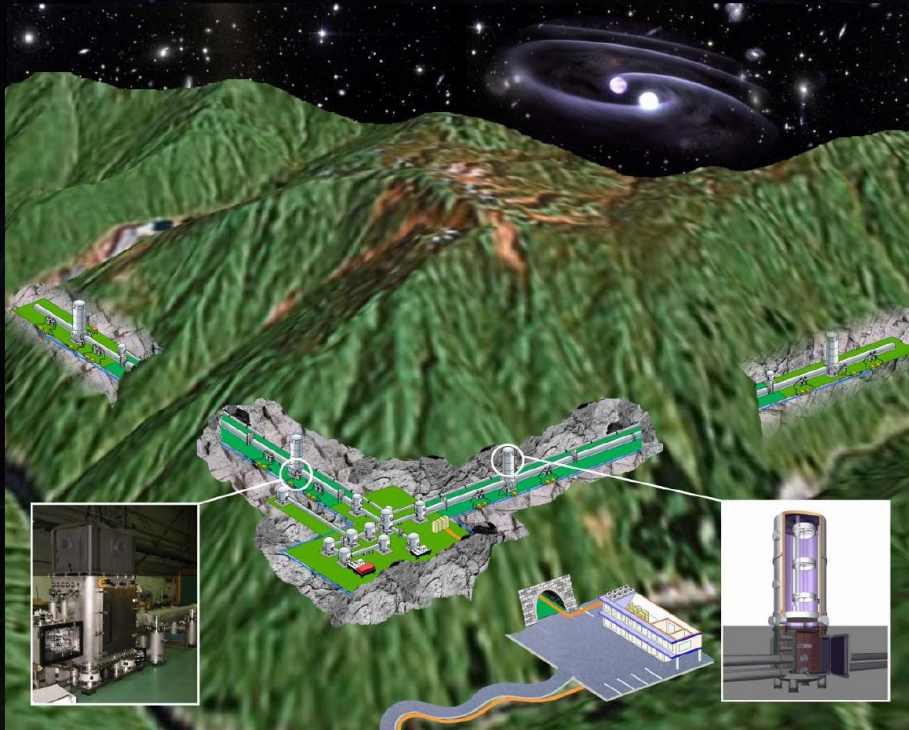


KAGRA (~2017)

Ground-based Detector

→ 高周波数の重力波イベント

目標: 重力波の検出, 天文学

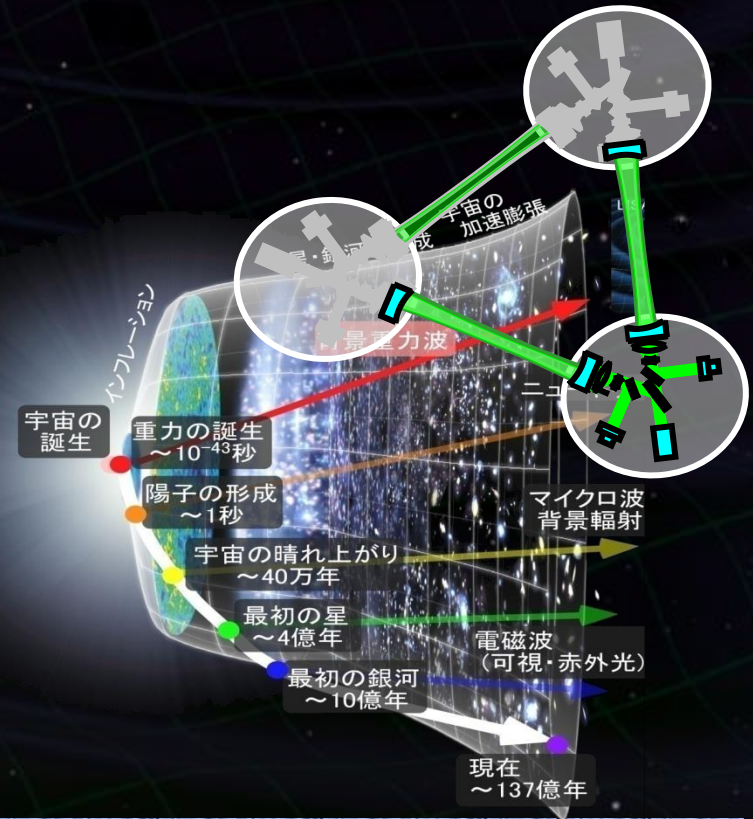


DECIGO (~2030)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 宇宙論的な知見など



宇宙重力波望遠鏡 DECIGO



DECIGO (DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

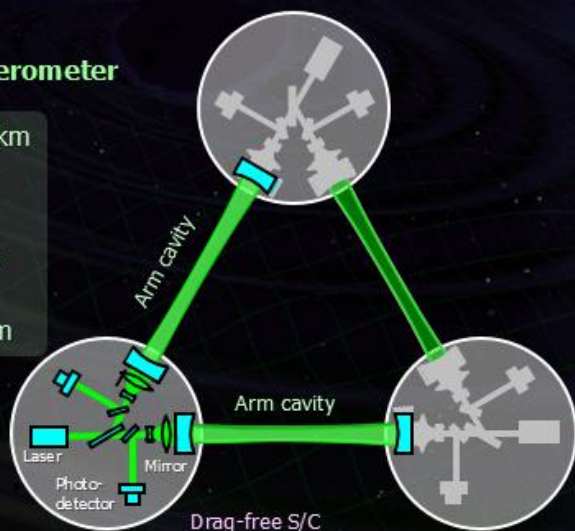
宇宙のはじまりを直接観測する。

ビッグバン宇宙論において、空間・物質の種が、
いかに形成されたかを観測によって解き明かす。

Interferometer Unit:
Differential FP interferometer

Arm length: 1000 km
Finesse: 10
Mirror diameter: 1 m
Mirror mass: 100 kg
Laser power: 10 W
Laser wavelength: 532 nm

S/C: drag free
3 interferometers

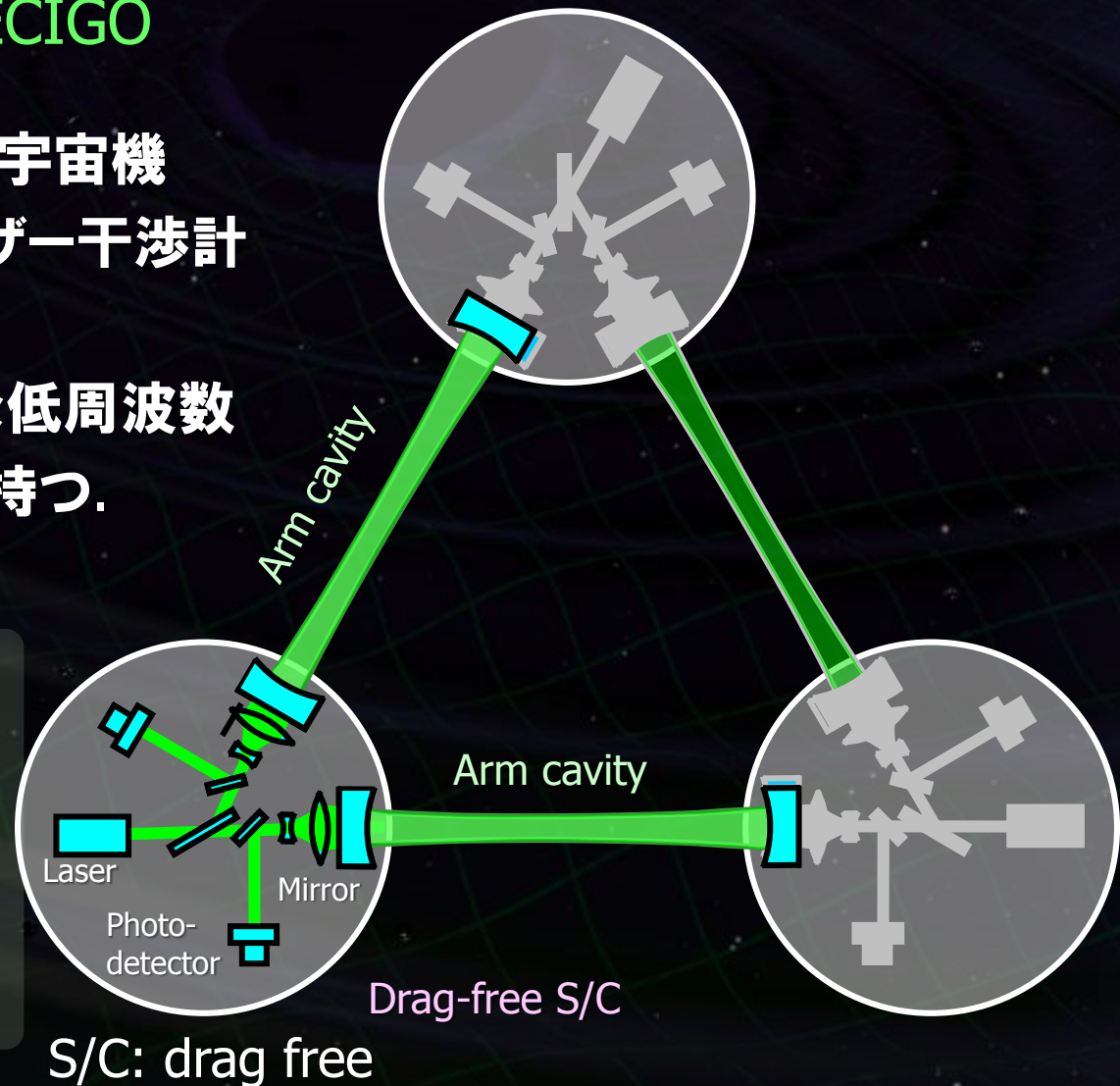


Direct probe to
the history of the Universe

宇宙重力波望遠鏡 DECIGO

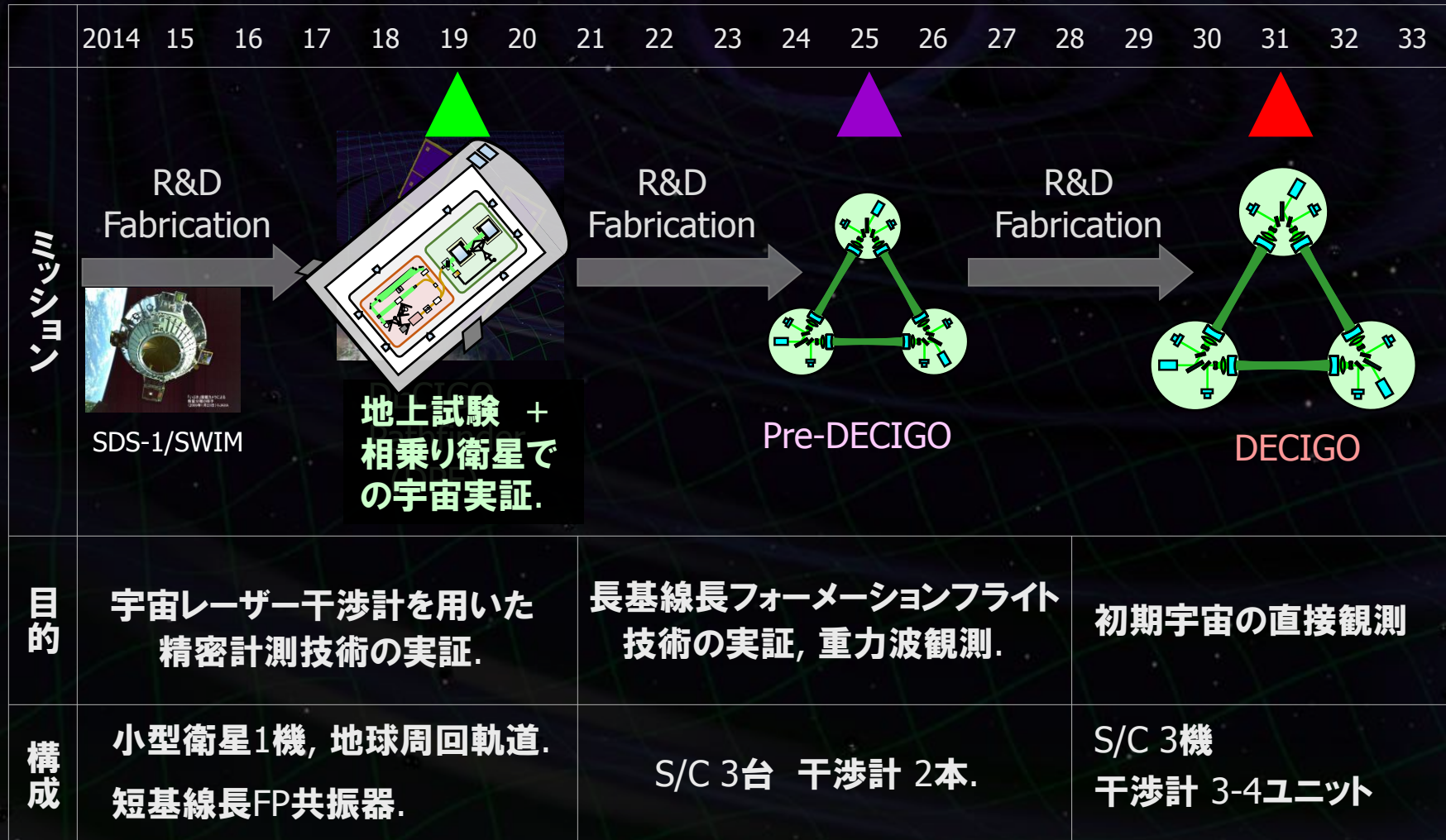
- 1000 km離れた 3機の宇宙機で構成された宇宙レーザー干渉計重力波望遠鏡.
- 地上での観測が困難な低周波数 (0.1Hz)に良い感度を持つ.

Arm length:	1000 km
Finesse:	10
Mirror diameter:	1 m
Mirror mass:	100 kg
Laser power:	10 W
Laser wavelength:	532 nm



DECIGO実現へのロードマップ

Figure: S.Kawamura



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