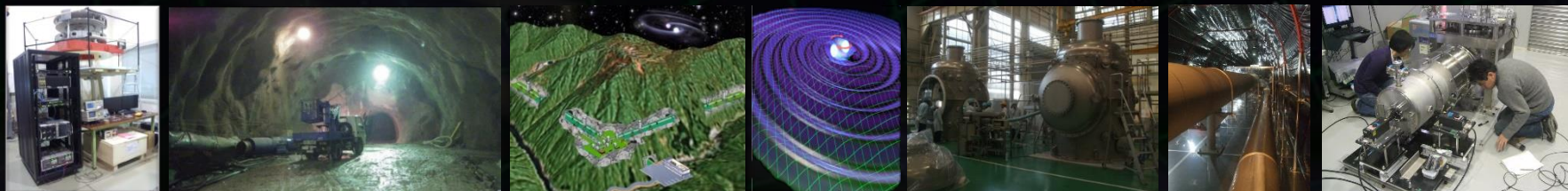


高校生のための夏休み講座 2015

アインシュタインの相対論と 重力波天文学

安東 正樹 (東京大学 物理学専攻/国立天文台)



本日の講演資料は当研究室のWebページからダウンロードして頂けます。

<http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp>

もしくは

安東研究室

検索

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

安東研究室

ホーム 研究室紹介 研究内容 メンバー 連絡先・アクセス

安東研究室のページへようこそ！ 当研究室では、重力・相対論に関する実験、特に重力波による新しい天文学分野を切りひらくことを目標とした研究を進めています。それに加えて、将来の重力波望遠鏡が必要とされる精密計測技術として、スクイー징などの量子光学的手法の研究、熱雑音や防振技術の研究、さらには、宇宙重力波望遠鏡の実現に向けた基礎開発研究も進めています。

日本語 / English / RSS

- ▶ 研究室紹介
- ▶ 研究内容
- ▶ メンバー
- ▶ 連絡先・アクセス
- ▶ 年次報告
- ▶ 学位論文
- ▶ セミナー
- ▶ 講義資料
- ▶ 新着情報

サイト内検索

検索

新着情報

- 2015年7月31日 雑誌「バリエイ」に翻訳記事が掲載されました。
- 2015年7月30日 毎日新聞の記事に取り上げて頂きました。
- 2015年8月18日 「東大理学部 高校生のための夏休み講座 2015」で講義を行います。
- 2015年8月5,6日 「高校生のための東京大学オープンキャンパス」が開催されます。
- 2015年7月14日 道村唯太さんが国際会議MG14で発表を行いました。

振り子の運動とレーザー光の相互作用を利用した巨視的量子現象の世界初観測を目指しています

KAERA DECTO RESCEU 東京大学 The University of Tokyo 東京大学 大学院 理学系研究科 物理学専攻 Physics

top / home / lab wiki / lab elog / tsubono lab / login

連絡先: 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院理学系研究科 電理学教室. labadmin@granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp
Powered by Quick Homepage Maker 4.73 - Based on PukiWiki 1.4.7 - GPL licensed

- **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 -

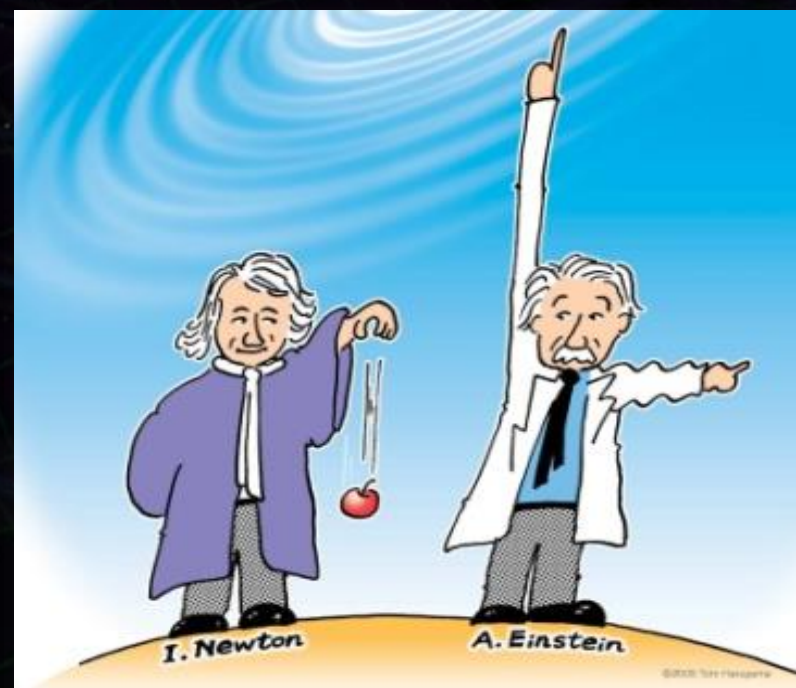
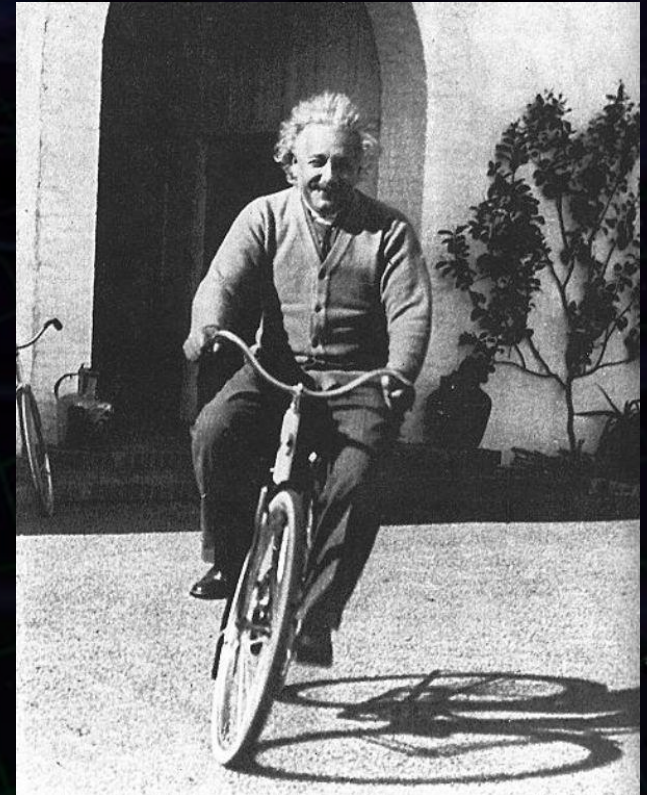


イラスト : Tom Haruyama

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.



相対性理論の関係



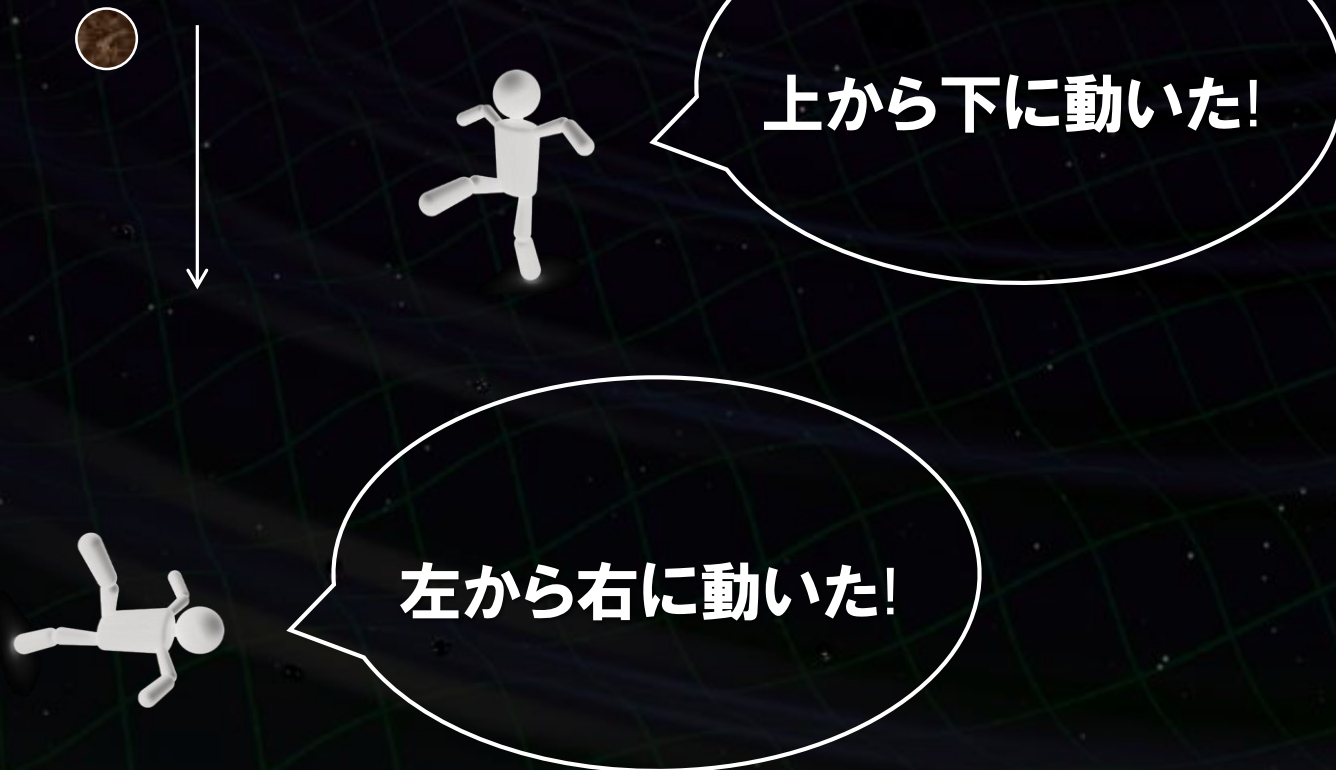
相対性理論は不思議???

- 特殊相対性理論の帰結：
 - 動いているものは縮んで見える, 時間の進みが遅くなる.
 - 見る人によって '同時かそうでないか' が違う.
 - 光の速度を超えることはできない.
- 一般相対性理論の帰結：
 - 重いものの周りでは空間が歪む, 時間は遅く流れる.
 - 空間の歪みによって光が曲がって進む.

→ 不思議では無い. 実は当たり前.

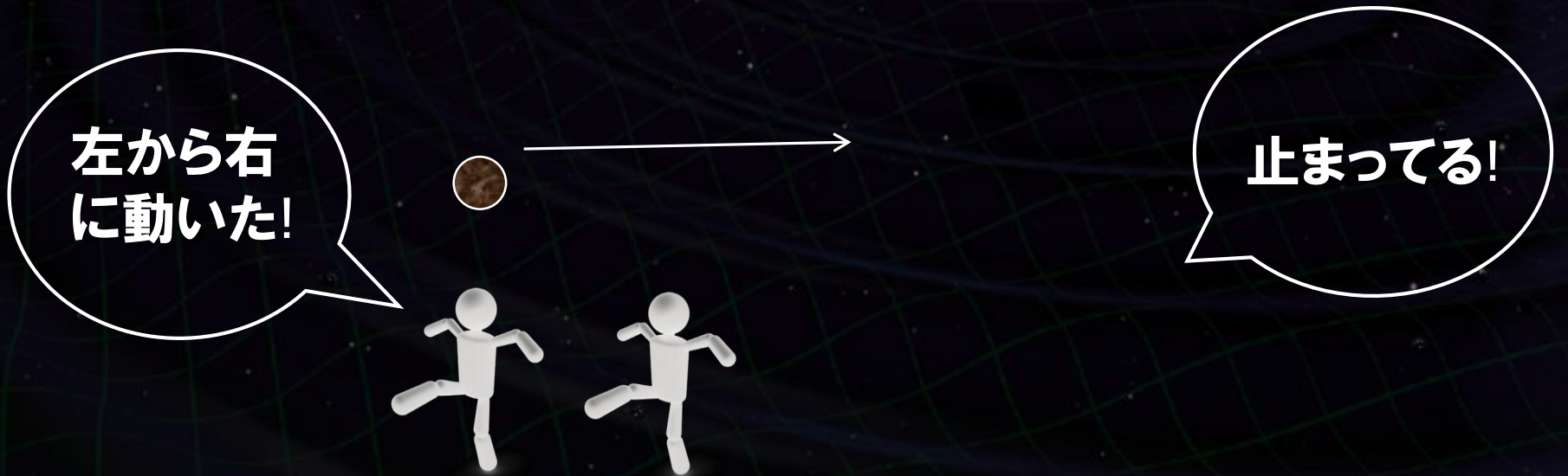
相対性原理：物理現象は観測者(座標系)には依存しない。

(例) ボールの動きの観測



ガリレイの相対性原理：

ニュートンの力学法則は観測者(座標系)には依存しない。

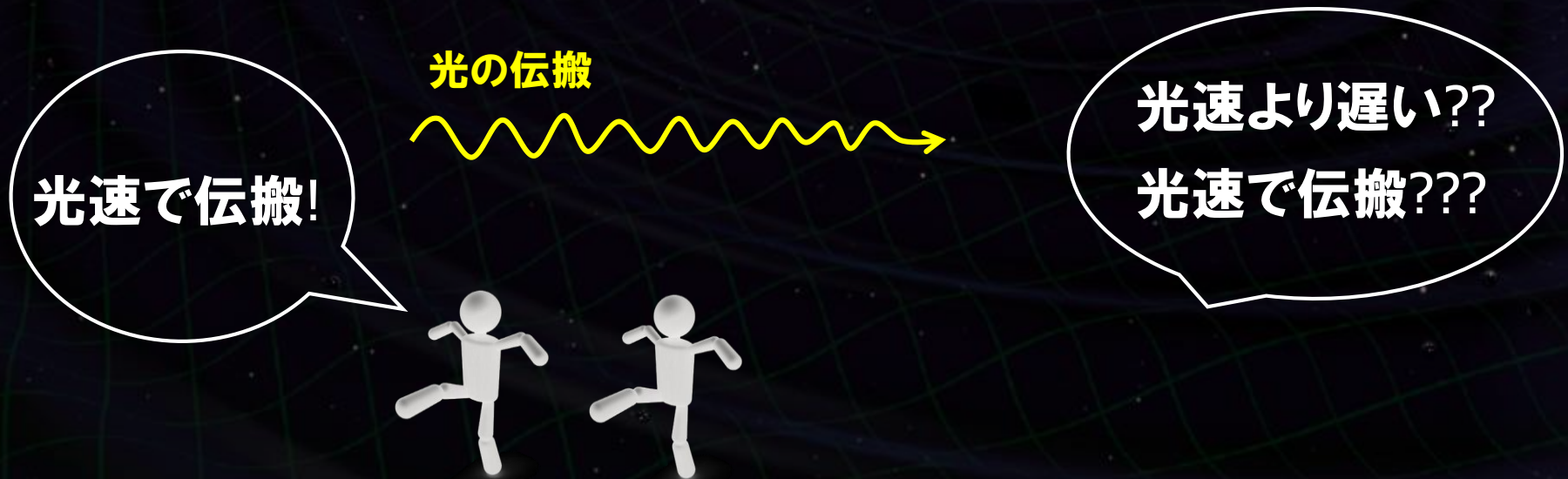


ガリレイ変換 によって説明できる。

$$(t' = t, \quad x' = x - vt, \quad y' = y, \quad z' = z)$$

電磁気学との矛盾???

電磁気学 → 光(電磁波)は, 光速で伝搬する.



もし観測者によって光速からずれるなら,
電磁気学法則では, 相対性原理が成り立たないことになる.

2つの考え方

ガリレイの相対性原理と電磁法則は、両立しないように見える。

(A) **電磁法則には絶対静止系がある**, という考え方.

それに対して等速運動している系では, 速度に応じた電磁法則を考える必要性がある.

(B) **電磁法則でも相対性原理が成り立つ**, という考え方.

ガリレイ変換が不十分であり, 適切な座標変換によって相対性原理を持たす.

→ (B)の考え方に従って構築されたものが
アインシュタインの特殊相対性理論. それによって
観測・実験事実を矛盾なく説明することができる.

特殊相対性理論 (1905年)

一定速度で運動している観測者(慣性系)で、

- 相対性原理

- 光速不変の原理

の2つの原理を出発点.



力学法則・電磁気の法則が観測者に依存しないような座標変換や運動法則の体系.

空間成分だけを考えたガリレイ変換ではなく、

4次元時空をまとめて考える **ローレンツ変換** を用いる.

アインシュタインのエレベータ

落下しているエレベータに乗っている人は、
重力によって落下しているのか、無重力状
態にいるのか区別できない。 → **等価原理**



一様な重力は加速度運動(座標変換)
によって表すことができる。

潮汐力は座標変換をしても残る. → 重力の本質



一般相対性理論 (1915年)

加速度運動も含み

- 相対性原理
- 等価原理



の2つの原理を出発点. \Rightarrow 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

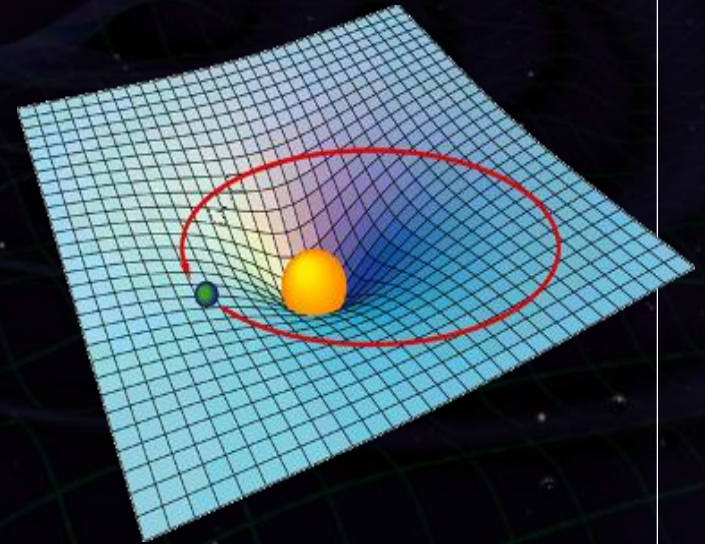
↑
物質のエネルギー
(質量, 運動量など)

アインシュタイン方程式

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

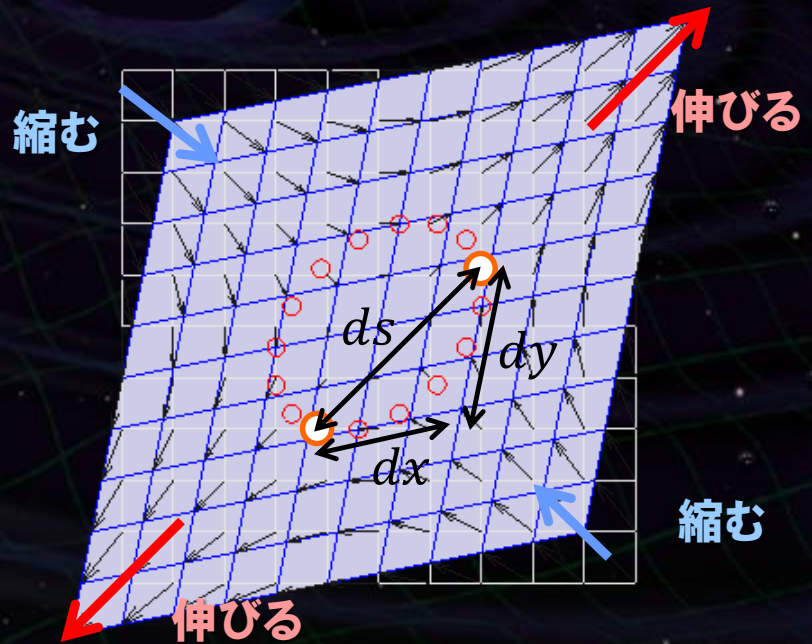
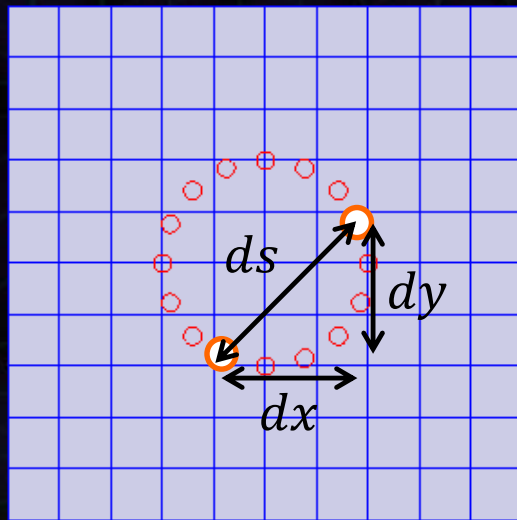
↑
時空の曲がり
を表す量

↑
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。

空間の歪み → 2点間の距離が変化.



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

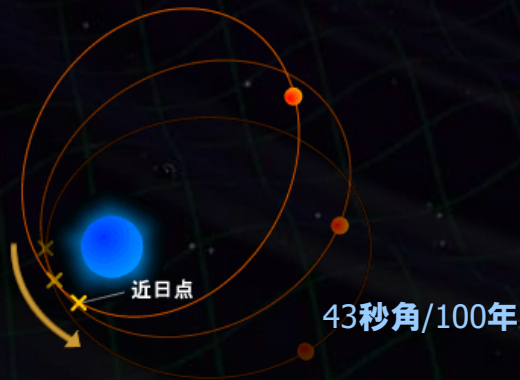
2点間の
微小距離

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

アインシュタインの一般相対性理論は正しい???

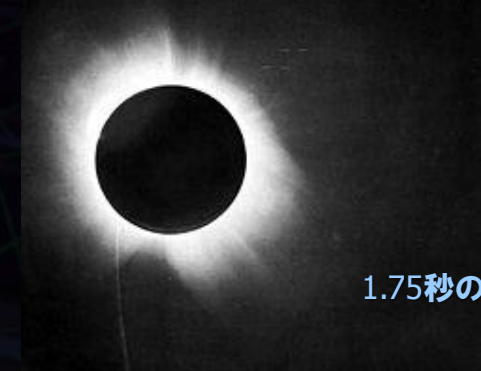
→ '古典的'な検証実験.

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.

重力波の間接的証拠

- 連星パルサーの観測 -

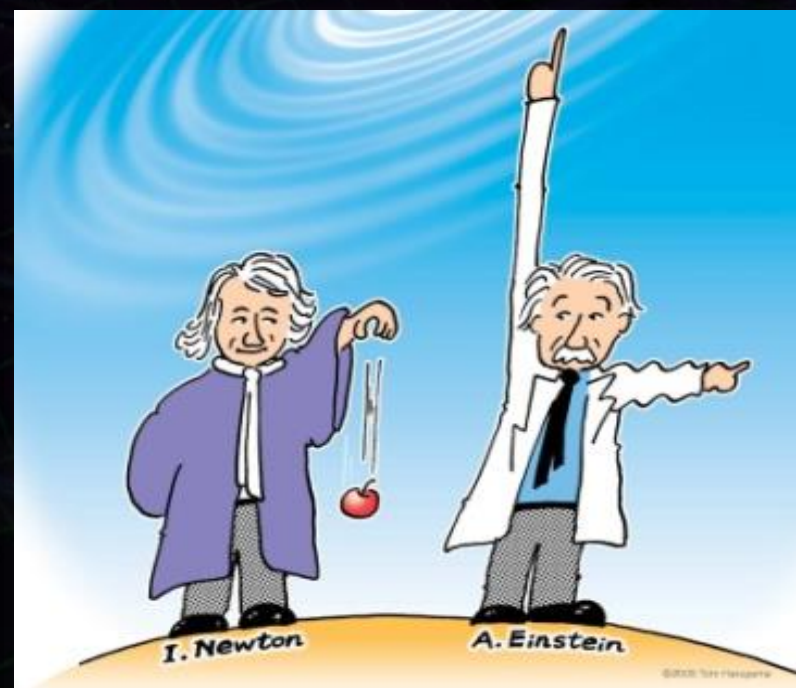


イラスト : Tom Haruyama

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

連星パルサーの発見と観測

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。

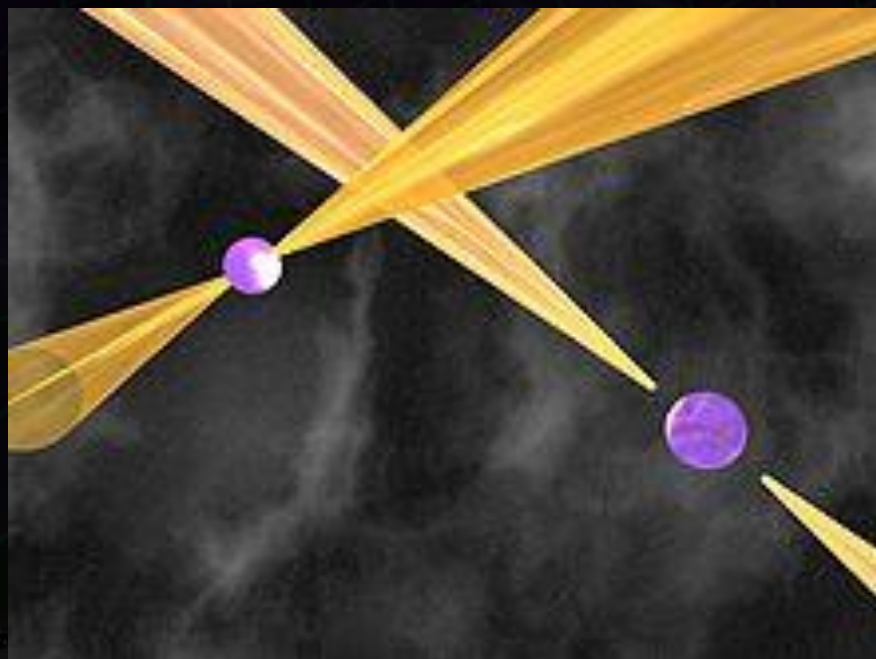


図: Wikipediaより



アレシボ天文台 (プエルトリコ)

公転周期: 7.75時間

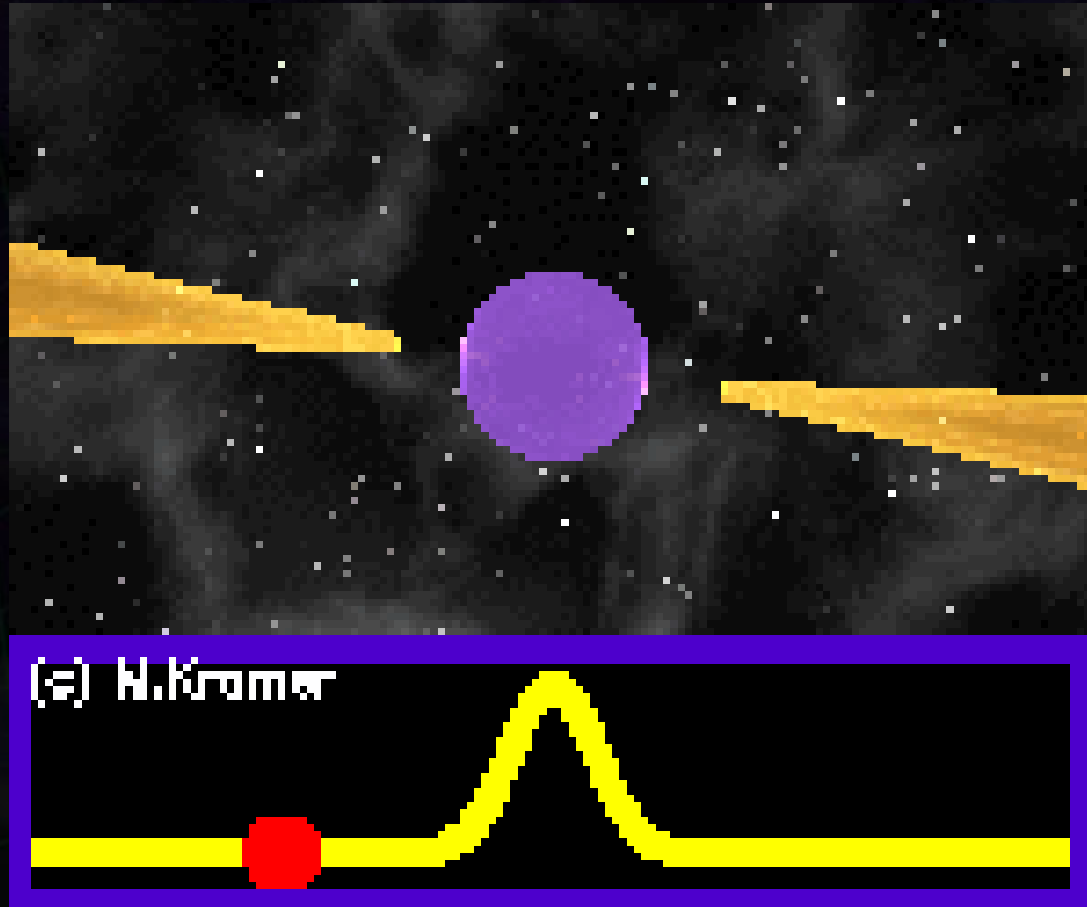
質量: パルサー 1.44 Msolar

伴星 1.39 Msolar

公転周期の変化率:

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

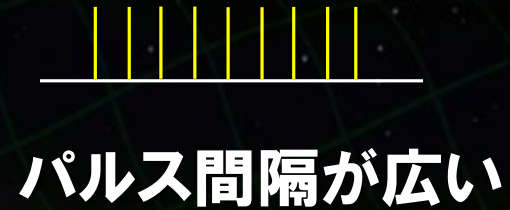
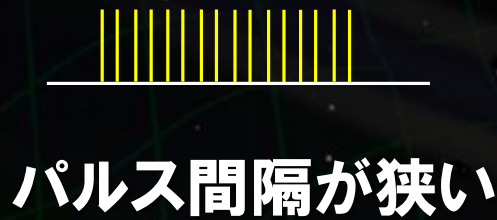
パルサー(中性子星)の灯台モデル



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

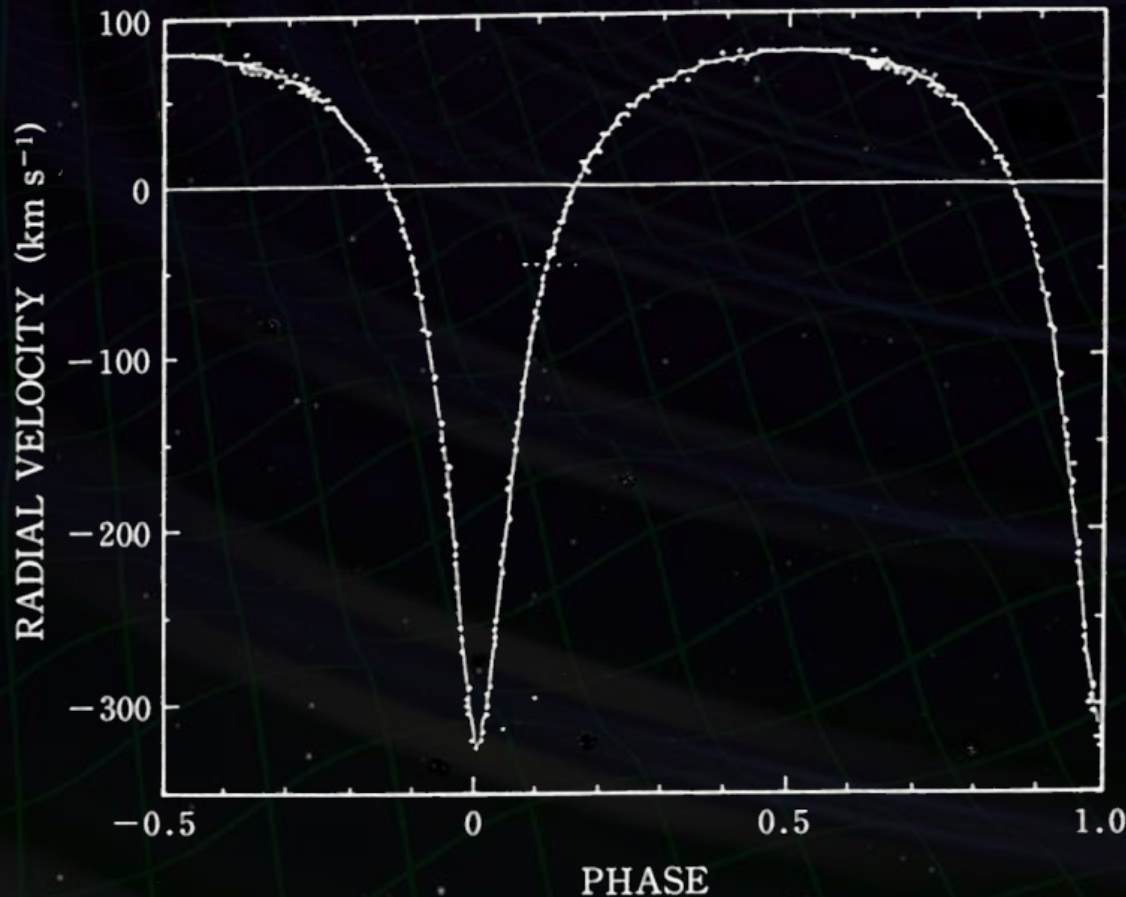
Animation designed by Michael Kramer. <http://www.livingreviews.org/lrr-2008-8>

ドップラー効果



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

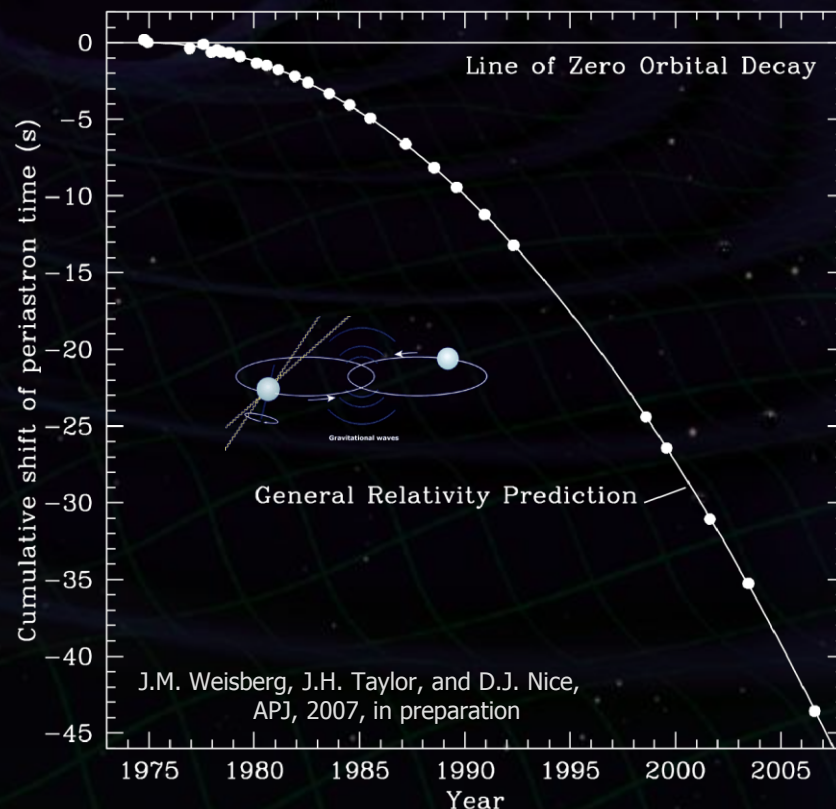
連星パルサーの軌道変化を
20年以上継続的に観測.

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

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」**

重力波天文学.

- 重力波望遠鏡による
新しい天文学 -



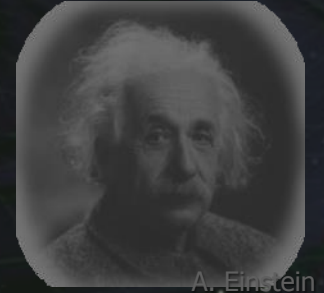
電磁波

- 光速で伝播する
電磁場の変動
- 電荷の加速度運動により生成



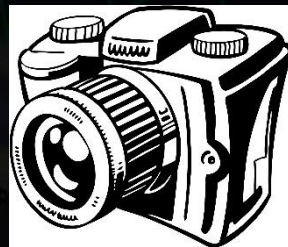
重力波

- 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

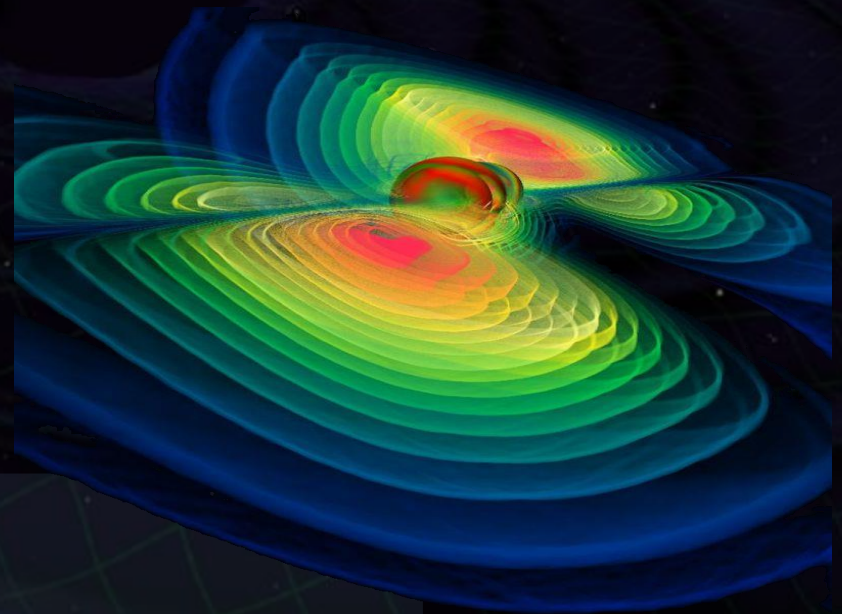
重力波の特徴

- ・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)

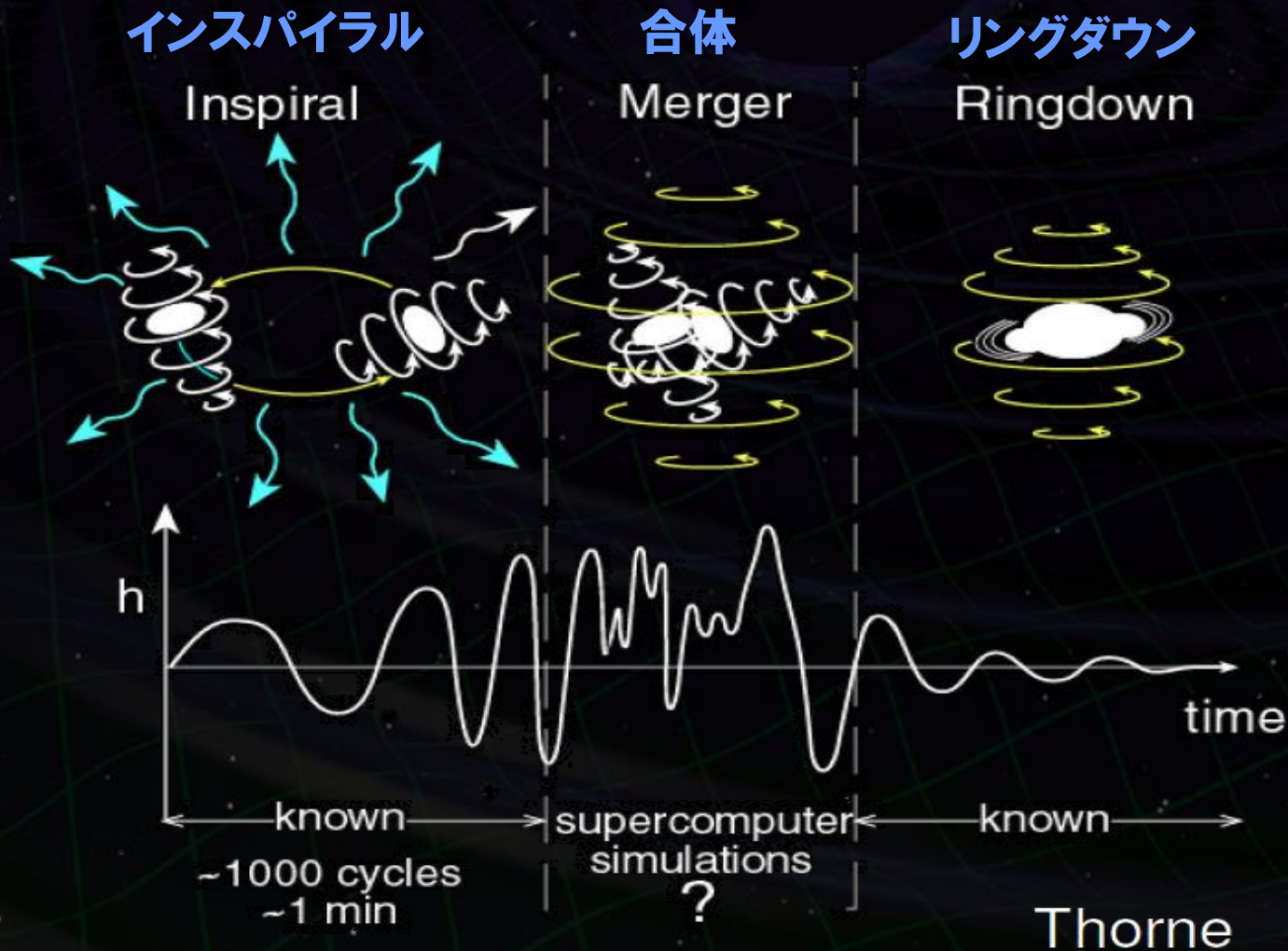


主な重力波源



CG/KAGAYA

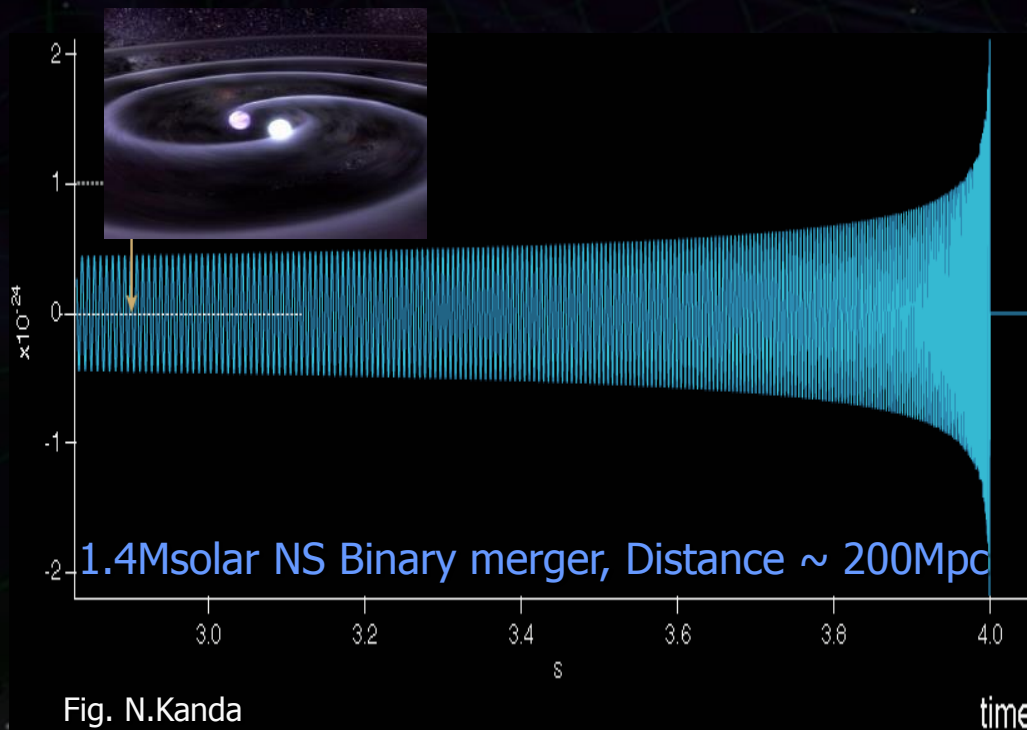
連星合体現象からの重力波



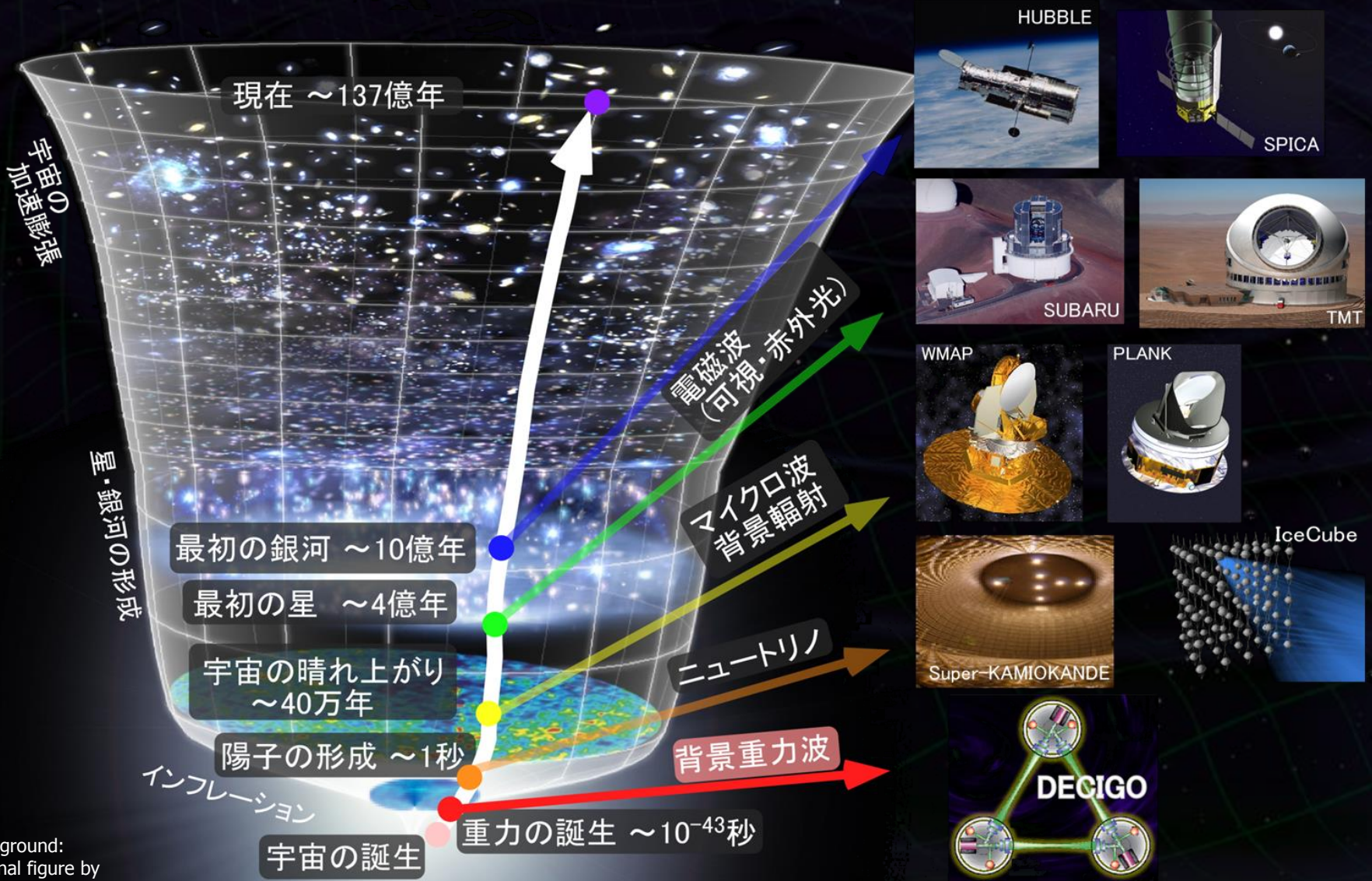
チャープ波

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

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

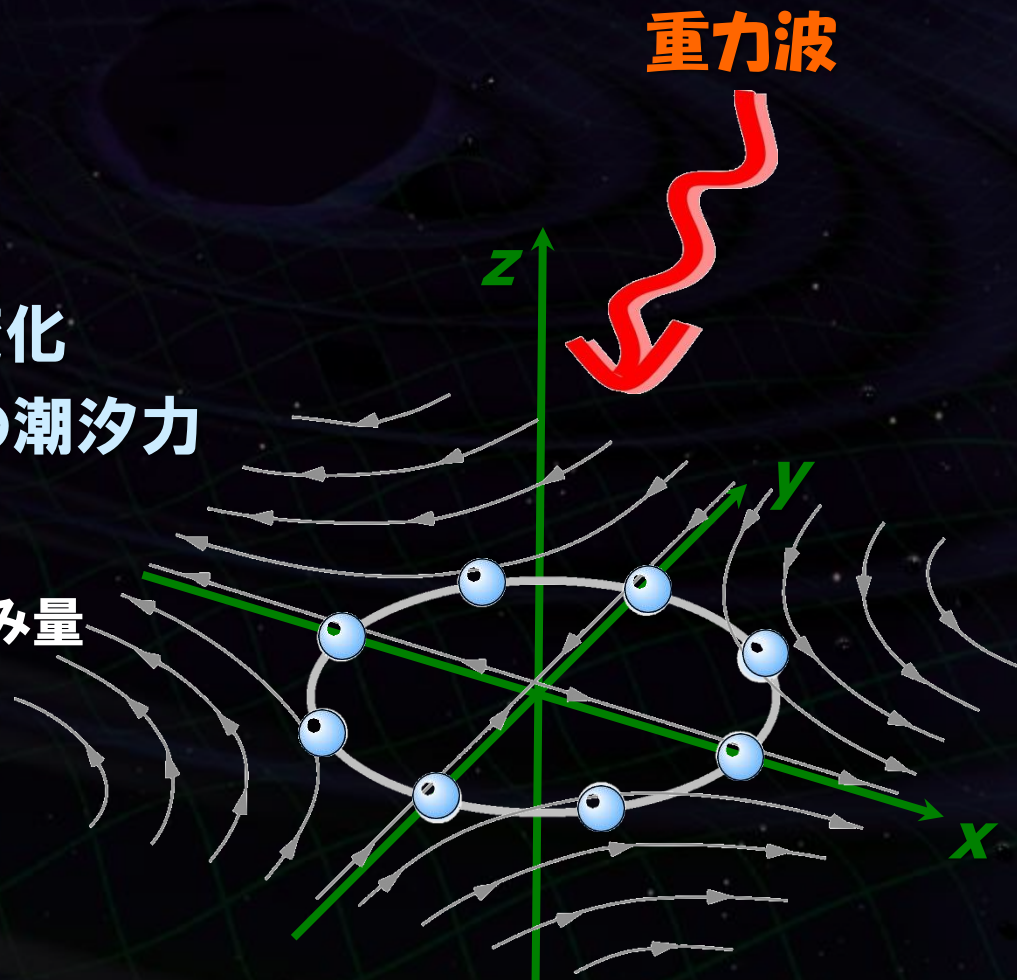
- 自由質点間の距離の変化
- 大きさを持った物体への潮汐力

重力波の振幅 h : 無次元の歪み量

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

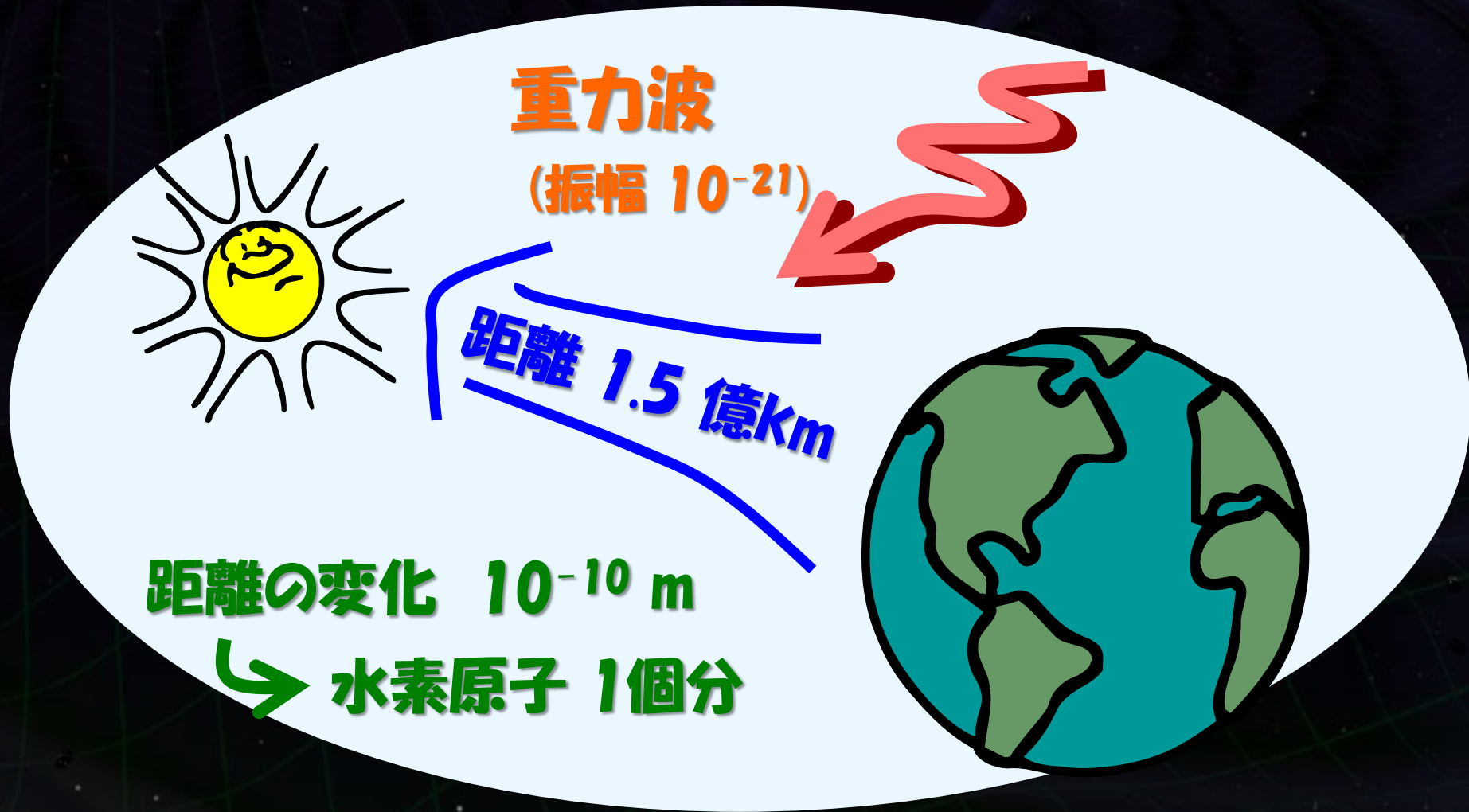
δL : 距離変動

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

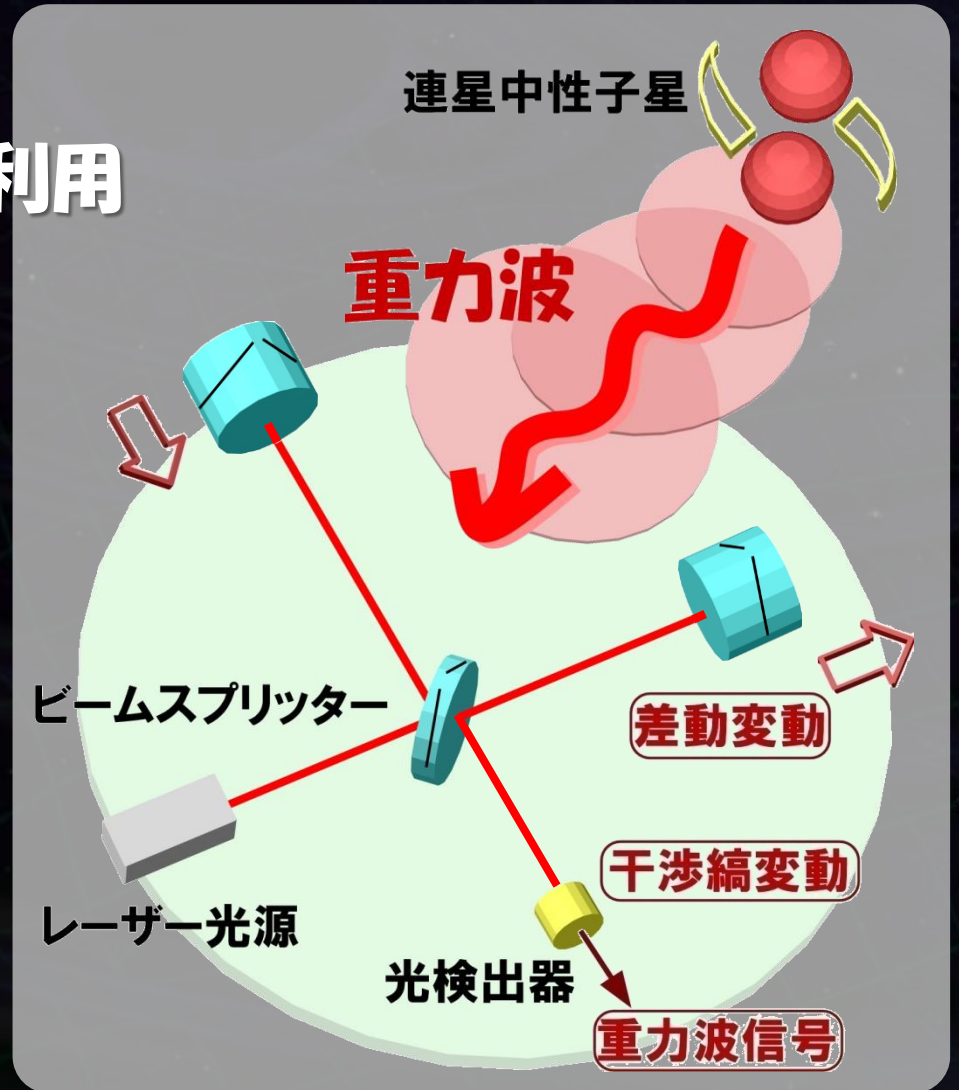


レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)を利用

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

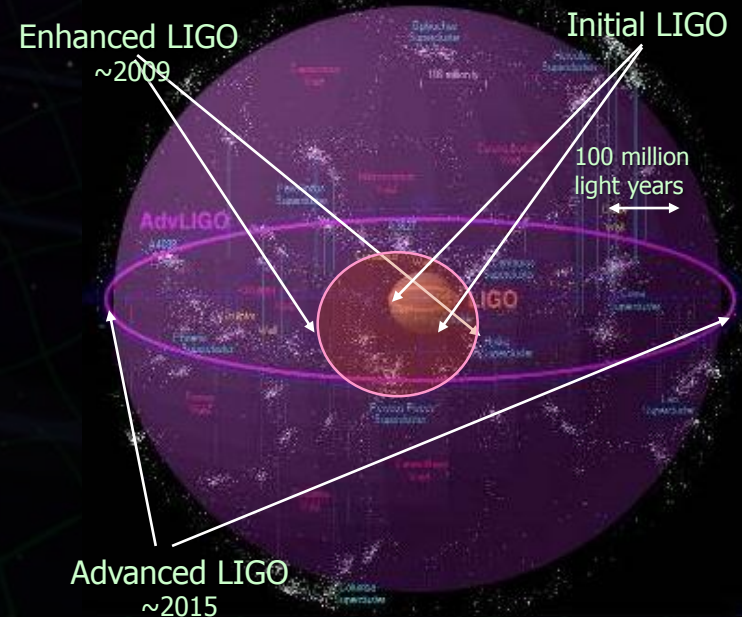
高感度化⇒より多くの銀河をカバー

(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



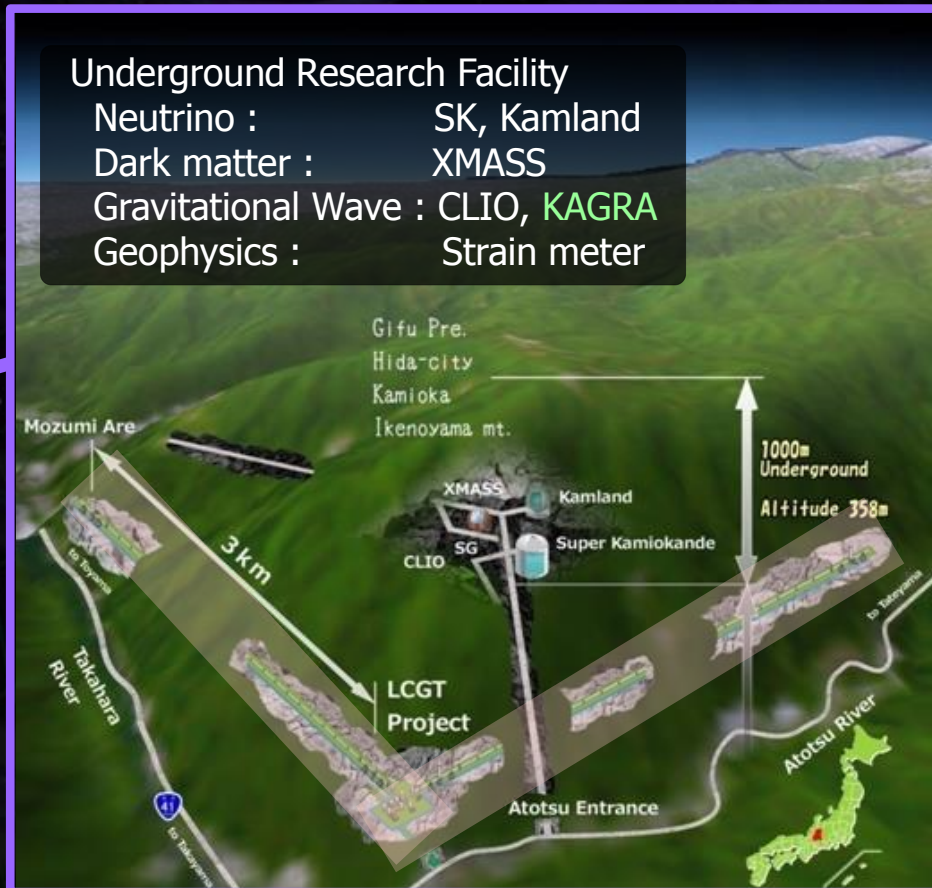
岐阜県・神岡町 の地下サイトに建設

(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

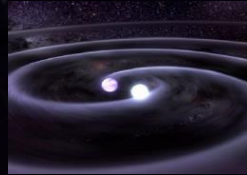
Gravitational Wave : CLIO, **KAGRA**

Geophysics : Strain meter

重力波望遠鏡の高感度化

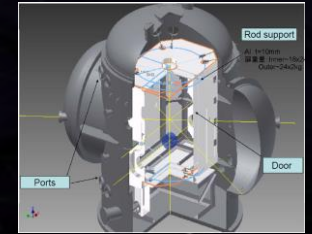
・重力波源の理解

理論・解析的計算
数値相対論
データ解析手法



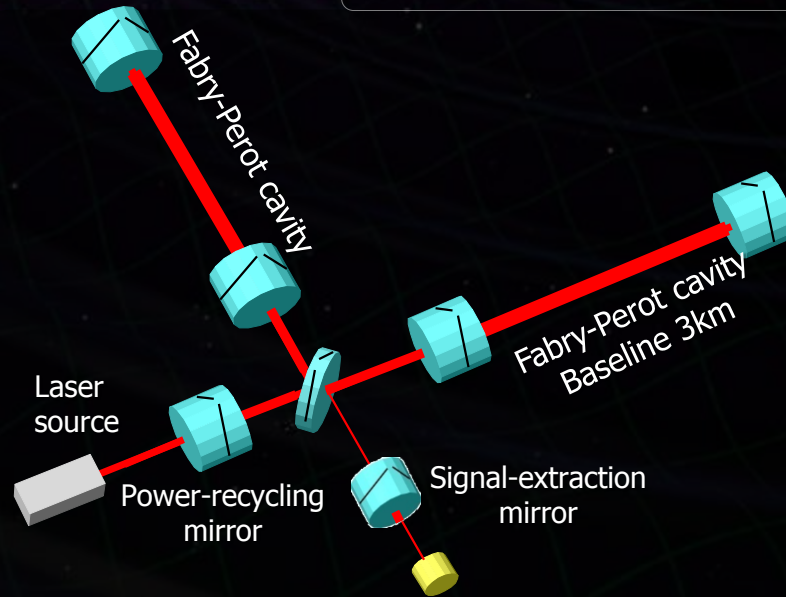
・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化
材質の機械損失



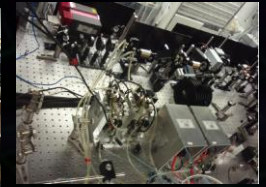
・地面振動の影響

静寂な地下サイト
高性能防振装置



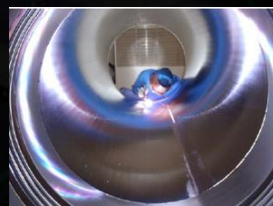
・光の量子雑音

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

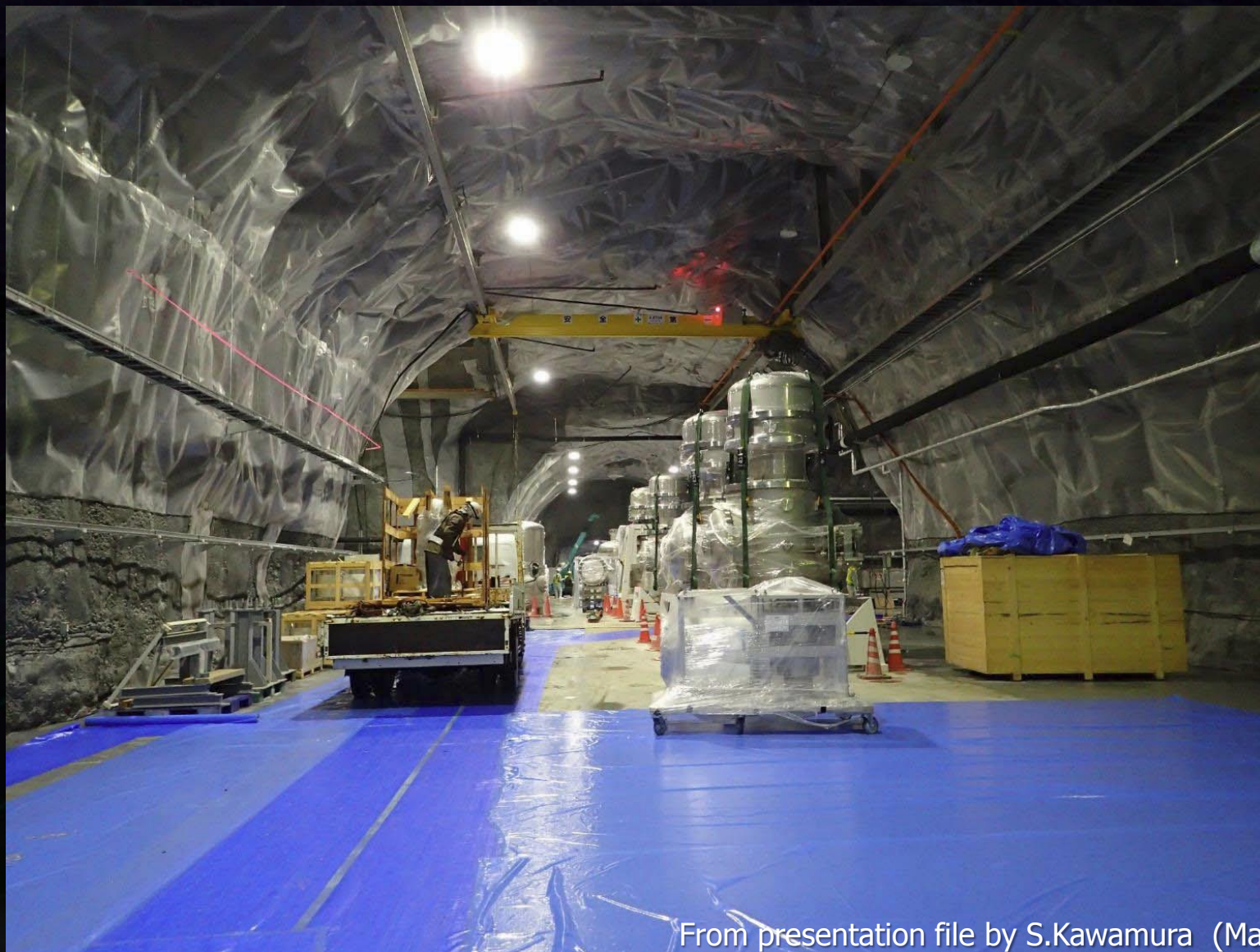


・長期・連続観測

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)

トンネル内現状 (2015年夏)



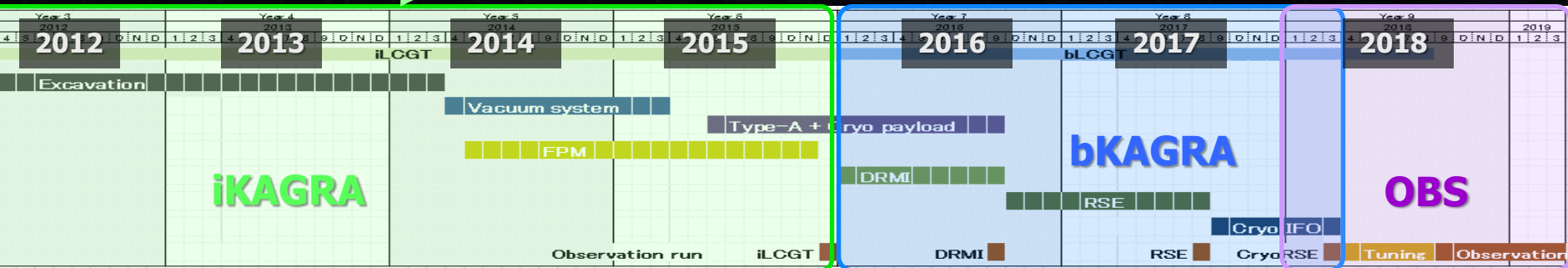
By S. Miyoki

KAGRAのスケジュール

• iKAGRA (2010.10 – 2015.12)

マイケルソン干渉計

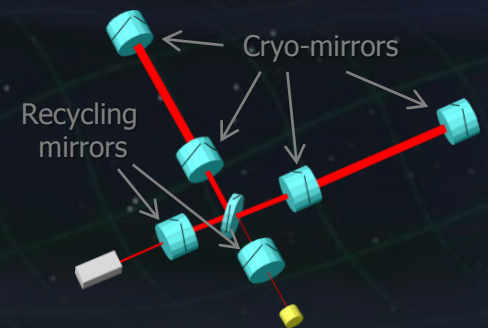
- 基線長 3km, 常温動作.
- 全体システムの動作確認.



• bKAGRA (2016.1 – 2018.3)

最終形での動作.

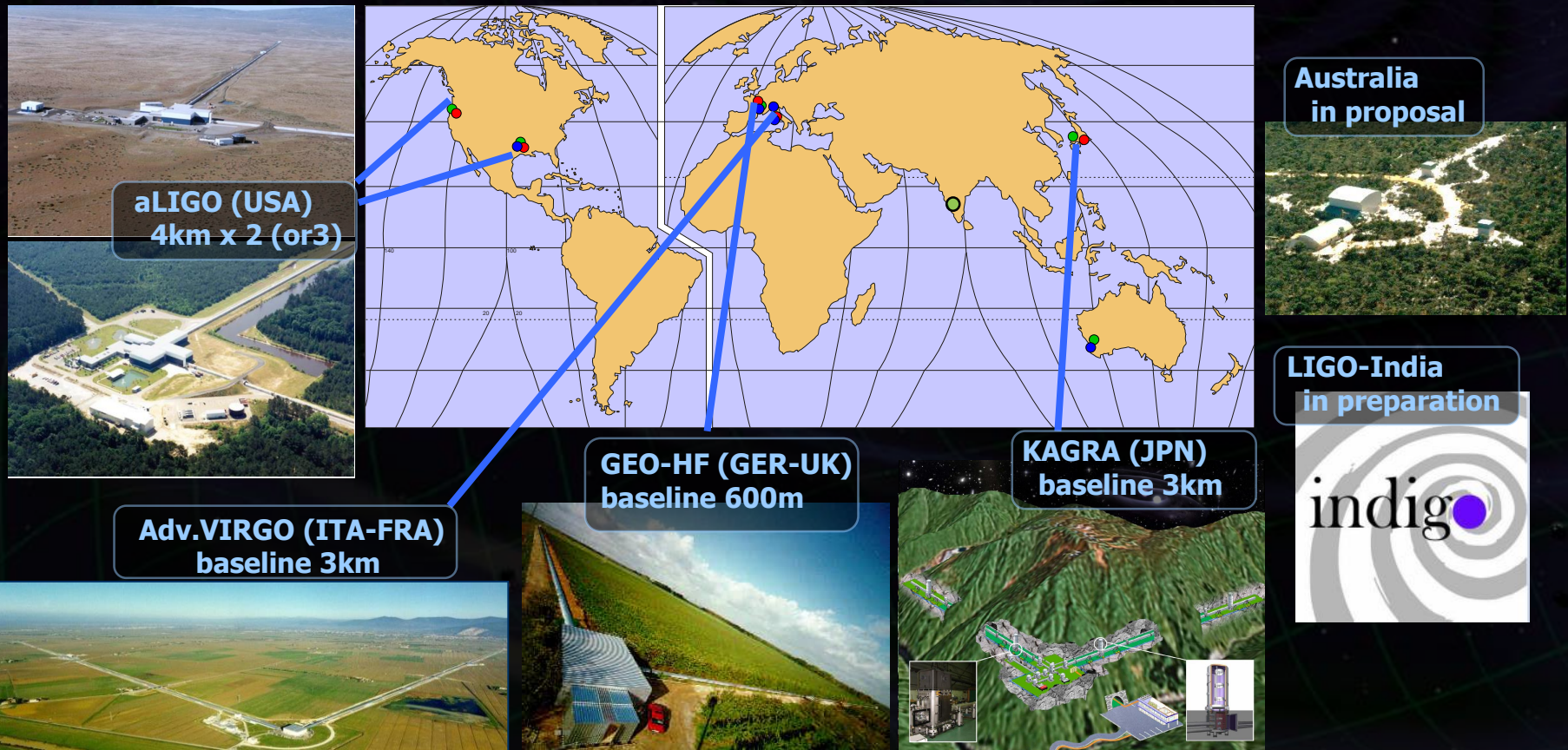
- 干渉計構成等のアップグレード
- 低温での動作.



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, ...)

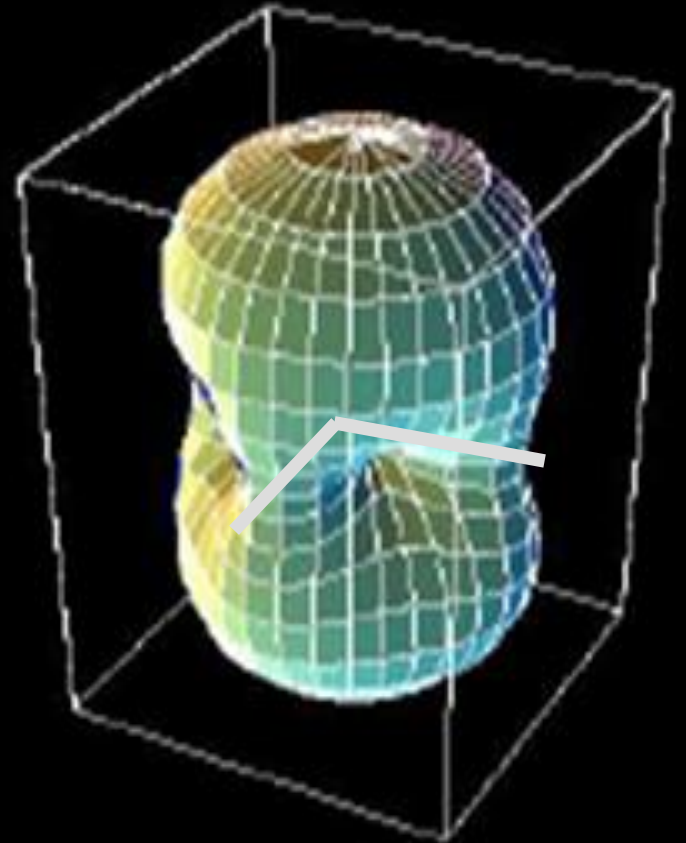


重力波検出器は指向性が小さい。

- 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。

干渉計のアンテナパターン



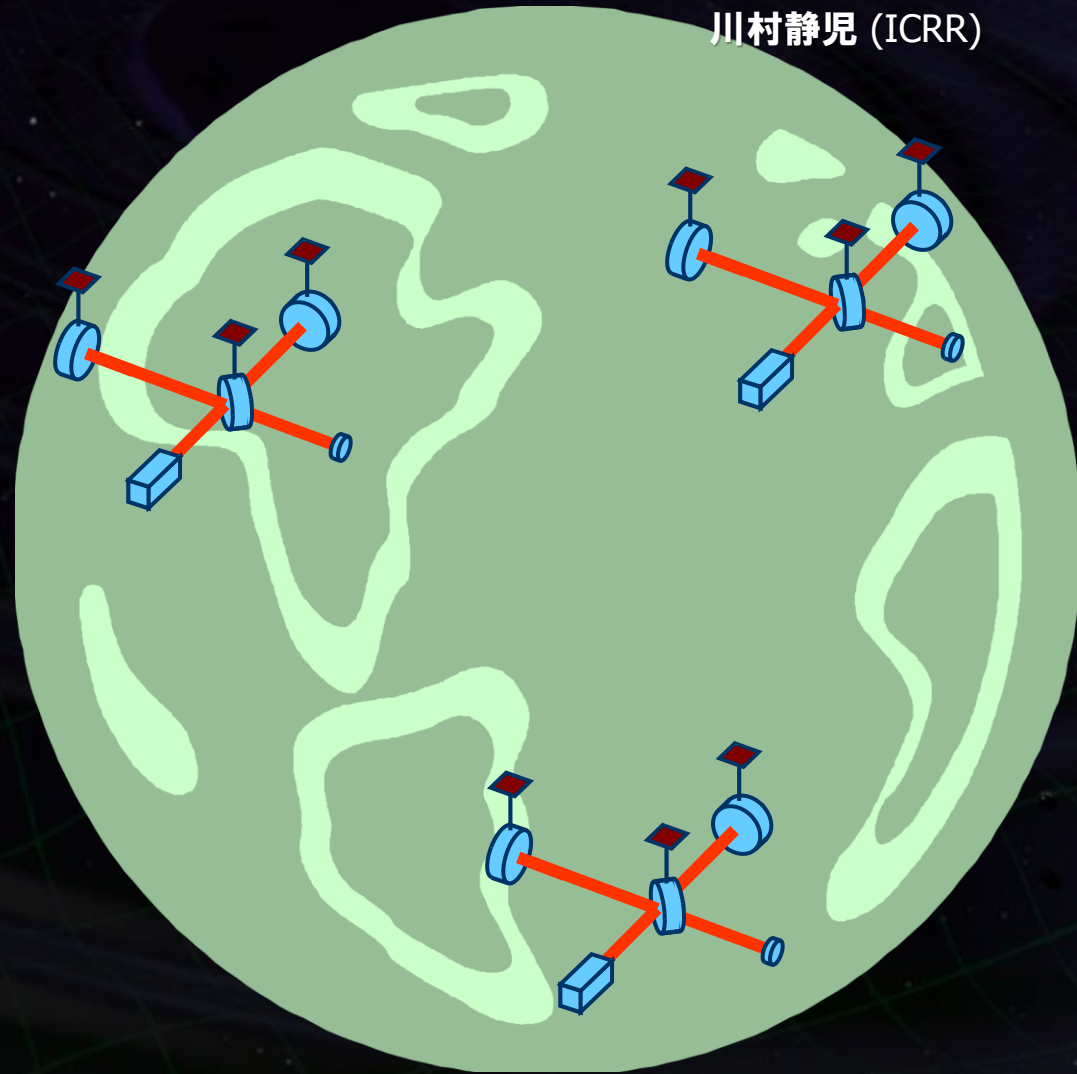
国際観測網での同時観測

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！

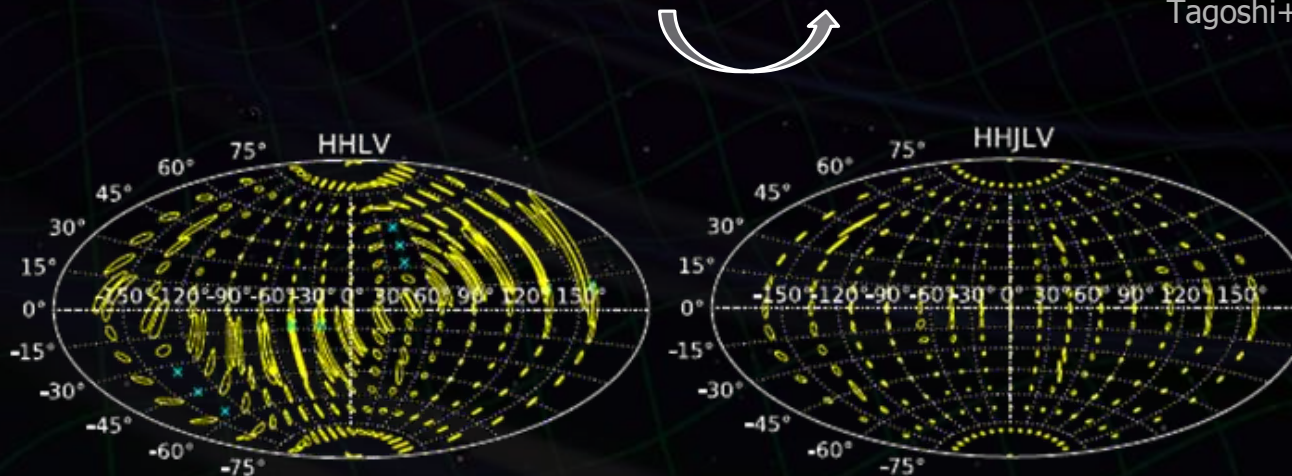


天球上の角度分解能

NS-NS coalescence @180Mpc (95%CI)		
(1.4,1.4)Msun	LHV	LHV K
median of $\delta\Omega$ [Deg ²]	30.25	9.5

H: LIGO--Hanford
 L: LIGO--Livingston
 V: Virgo,
 K: KAGRA
 I: LIGO-Indea

From presentation by H. Tagoshi
 J.Veitch+, PRD85, 104045 (2012)
 Tagoshi+ (2014)

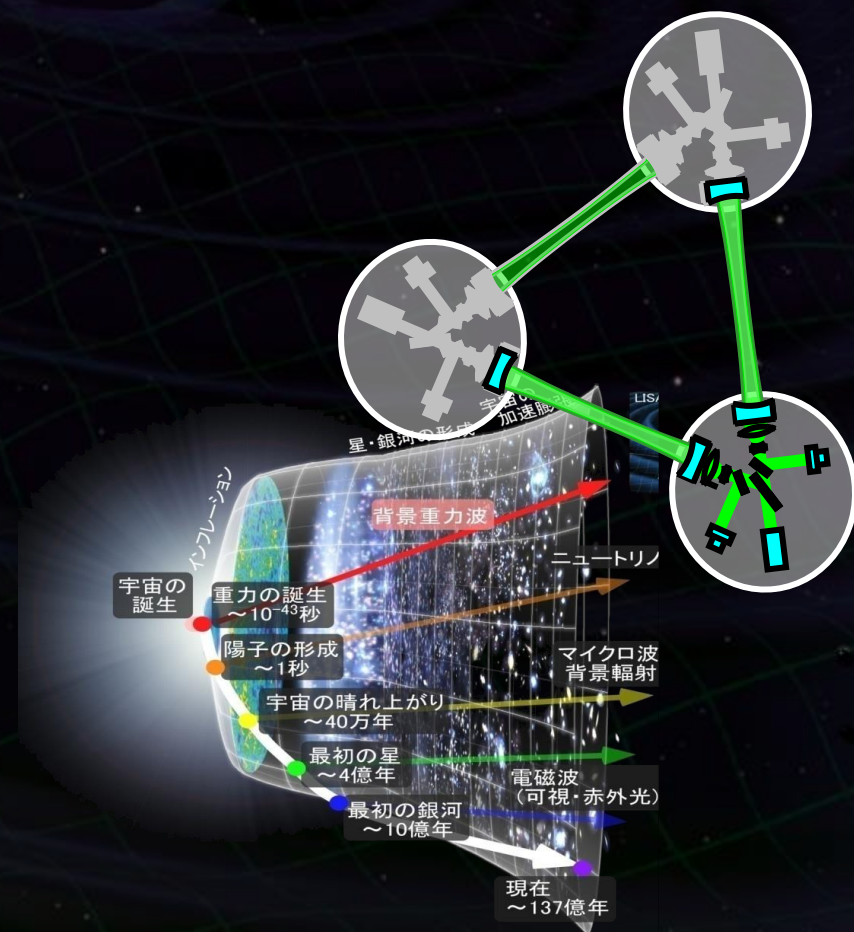


S.Fairhurst
 CQG 28(2011) 105021

国際観測網(aLIGO + adv. VIRGO)に **KAGRA** が加わる
 → 角度分解能が ~3-4 倍に向上.

初期宇宙の観測

- 宇宙重力波望遠鏡 -

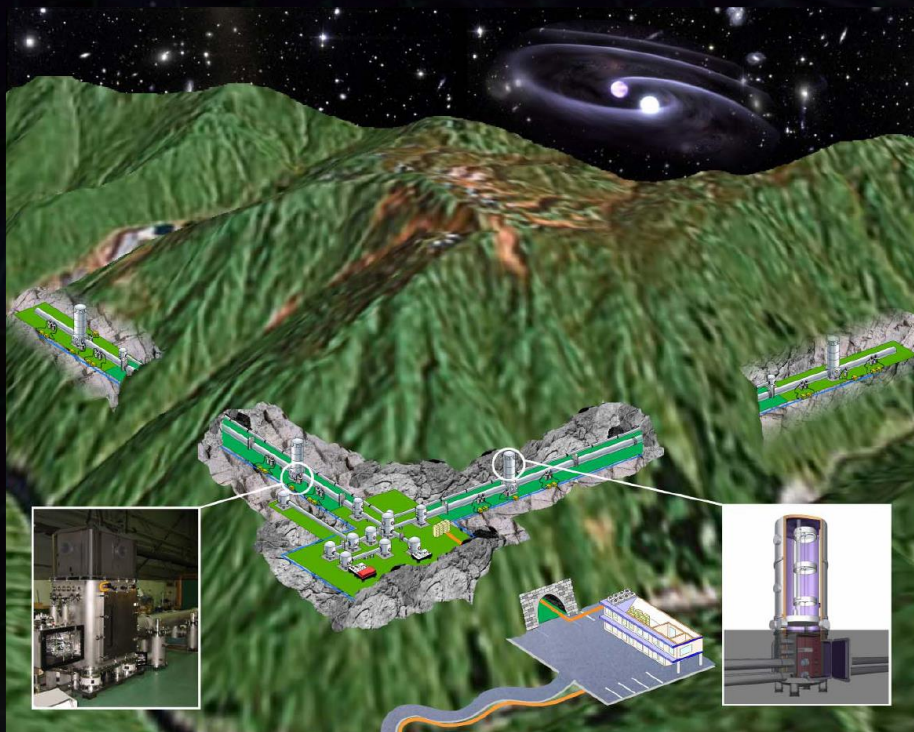


KAGRA (~2017)

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

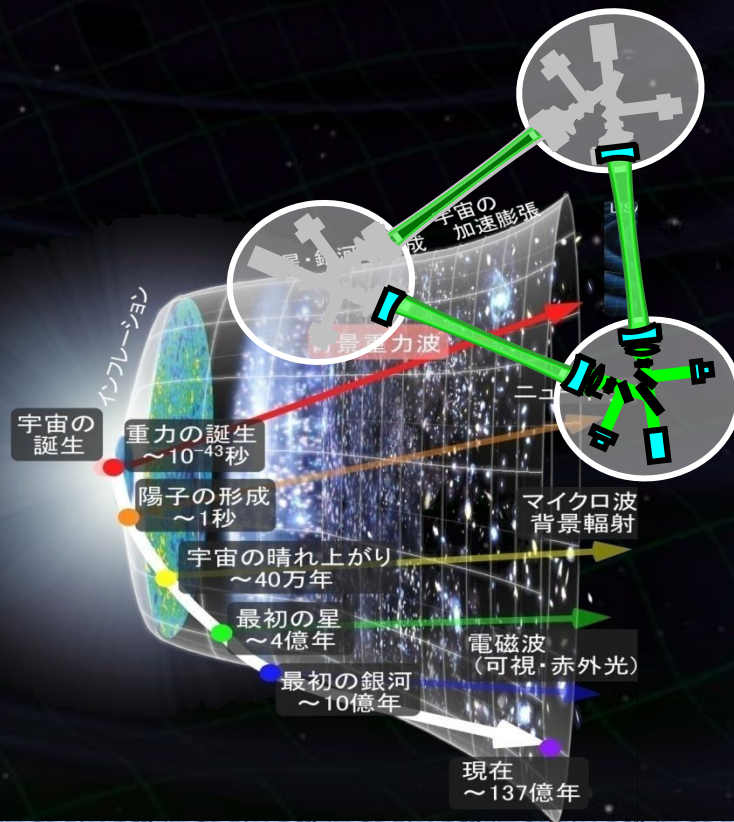


DECIGO (~2030)

Space observatory

→ 低周波数の重力波

目標: 宇宙論的な知見など



2014年3月18日

ナショナルジオグラフィックWeb版

BICEP-2マイクロ波望遠鏡

ナショナルジオグラフィック ニュース

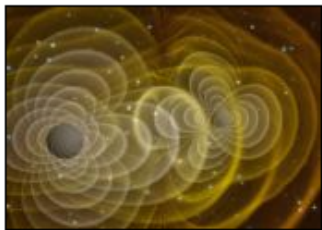
ニューストップ | 動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学&宇宙 | 風変わりニュース | ニュース

宇宙膨張の決定的証拠を発見

ツイート 151 | B! | m チェック | いいね! 600 | 8+1 | 1

Dan Vergano,
National Geographic News
March 18, 2014

宇宙が誕生した瞬間、驚くほど強力な重力波が広がっていった事実が最新の研究によって明らかとなった。「誕生直後に急膨張した」とする「宇宙インフレーション理論」を裏付ける決定的な証拠が、初めて観測されたことになる。



写真を拡大

インフレーション理論は、初期宇宙の誕生直後から想像を絶するほどの大きさまで膨張した成り立ちを説明する進化モデルで、「火の玉の爆発で始まった」とするビッグバン理論を補完する位置付けにある。

研究チームの一員でアメリカにあるミネソタ大学ツインシティー校の物理学者クレメント・プライク (Clement Pryke) 氏は、「重力波の信号検出に初めて成功した。今回の観測結果は十分な検証を重ねており、絶対の自信を持っている」と語る。



その後 (2015年2月)
別観測との共同解析
により、否定された。

原始重力波の観測

BICEP2, (POLARBEAR,...)

マイクロ波望遠鏡を用いた
宇宙背景放射 B-mode偏光
成分の観測.

DECIGO, (KAGRA, aLIGO,...)

レーザー干渉計重力波望
遠鏡を用いた宇宙背景
重力波の観測.

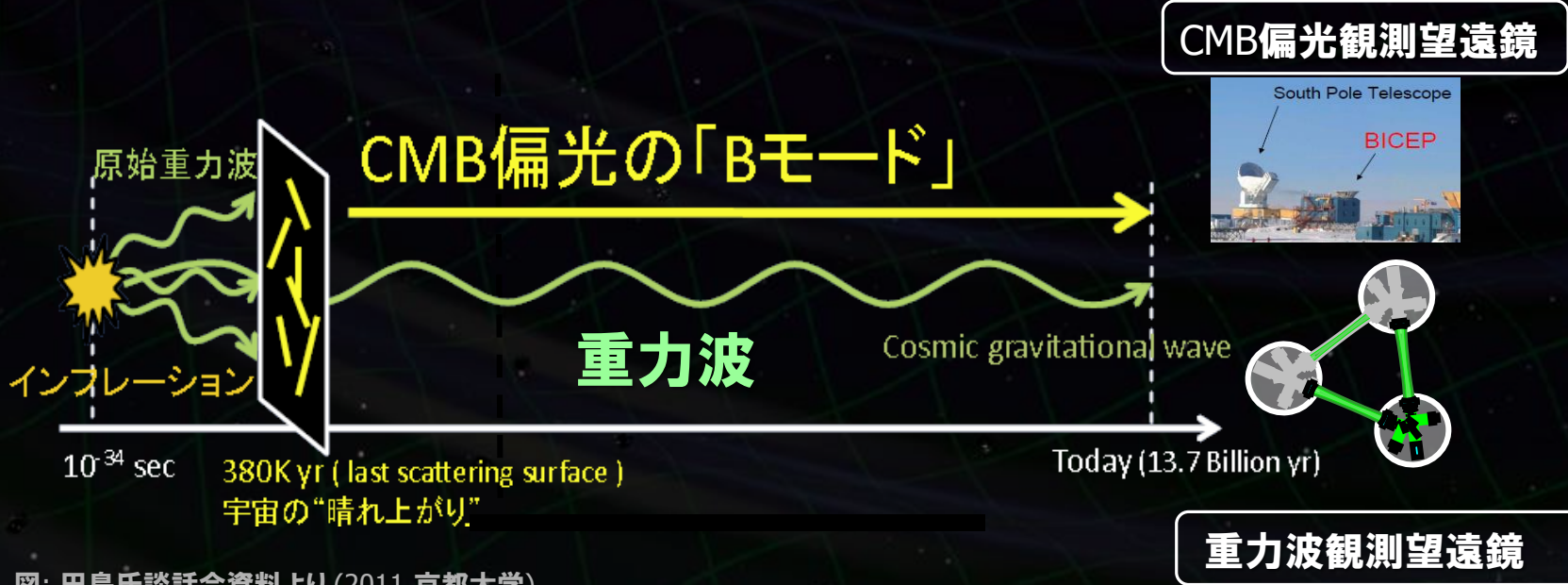
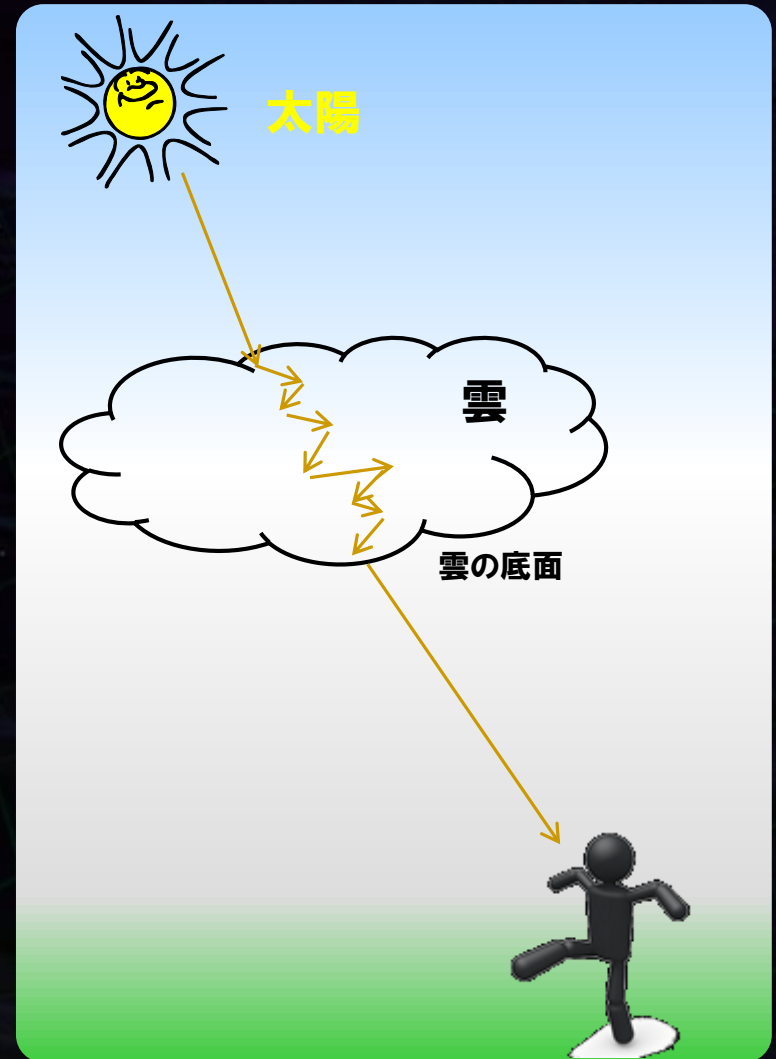


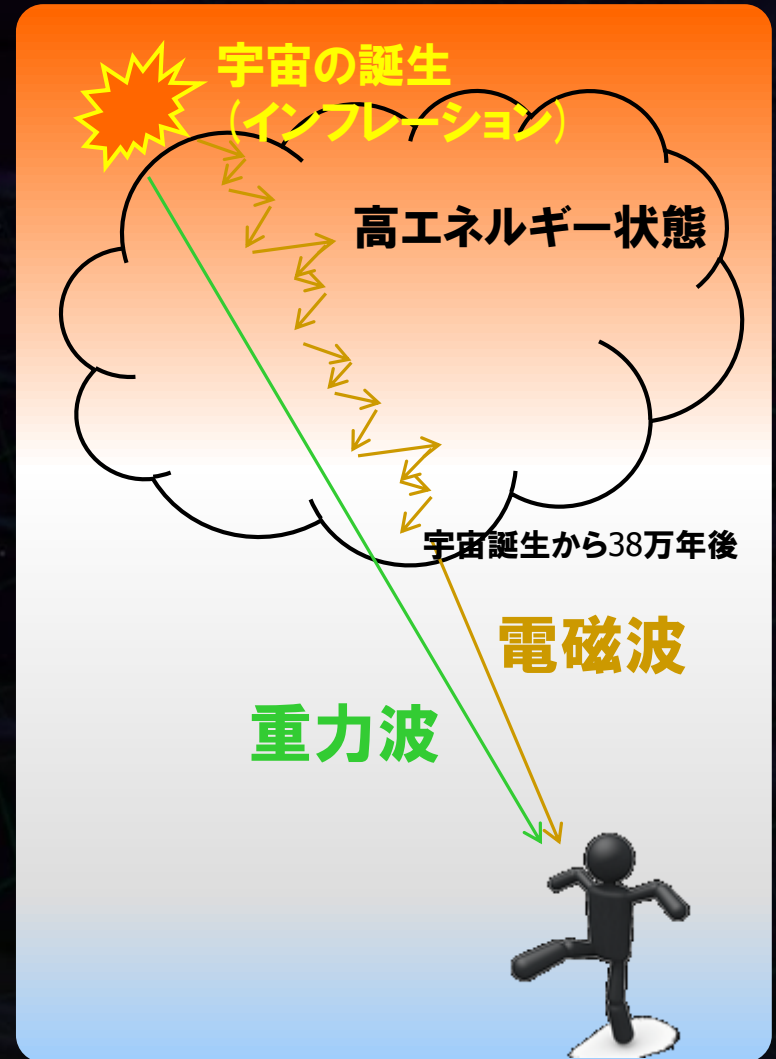
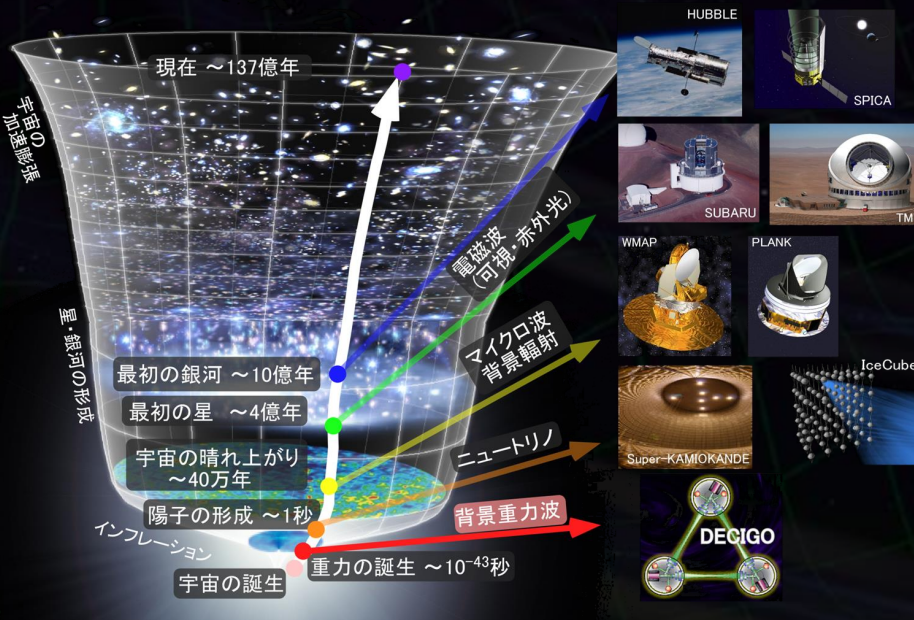
図: 田島氏談話会資料より (2011 京都大学)

光(電磁波)の散乱

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。



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。

- 2015年は、**アインシュタインの一般相対性理論**が誕生してから100周年。
- それを記念した**市民講演会**を実施。
- **全国 10都市 15会場で**
2015年9月-12月頃に開催予定。
→ 詳しくは**Webページ**にて

ポスター：小林努さん（立教大）

2015年11月25日、重力の法則と時空の構造を記述するアインシュタインの一般相対性理論は誕生100年を迎えます。それを記念して、一般相対性理論が持つ意味と関連する研究の最先端にふれて頂く市民講演会を全国15箇所で開催します。この分野の第一線で活躍する研究者たちが、一般相対性理論と関連する最先端の研究について平易な言葉で語りかけます。

一般相対性理論誕生100年記念市民講演会

100

弘前|仙台|新潟|つくば|東京|岐阜|名古屋|京都|大阪|広島

2015年 10月-12月

<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/Gmunu100/>

主催：一般相対性理論誕生100年記念市民講演会実行委員会（実行委員長：小林努、実行委員：10都府県、立教大学、京都大学、大阪大学）

開催会場	2015/10/03 大阪大学 工学部 物理情報学専攻 物理学研究室 物理学棟 301号室	2015/10/04 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/07 新潟大学 理学部 物理学研究室	2015/10/08 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/11 筑波大学 理学部 物理学研究室	2015/10/12 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/15 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/10/16 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/17 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/10/18 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/19 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/10/20 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/21 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/10/22 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/23 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/10/24 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/25 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/10/26 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/27 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/10/28 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/29 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/10/30 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/10/31 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/01 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/02 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/03 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/04 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/05 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/06 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/07 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/08 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/09 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/10 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/11 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/12 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/13 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/14 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/15 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/16 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/17 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/18 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/19 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/20 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/21 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/22 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/23 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/24 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/25 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/26 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/27 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/28 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/11/29 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/11/30 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/01 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/02 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/03 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/04 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/05 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/06 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/07 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/08 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/09 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/10 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/11 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/12 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/13 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/14 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/15 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/16 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/17 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/18 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/19 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/20 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/21 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/22 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/23 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/24 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/25 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/26 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/27 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/28 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/29 立教大学 理学部 物理学研究室
開催会場	2015/12/30 立教大学 理学部 物理学研究室	2015/12/31 立教大学 理学部 物理学研究室

入場料：対価：高校生程度以上

主催：立教大学理学部物理学研究室、東京大学理学部物理学研究室、筑波大学理学部物理学研究室、立教大学理学部物理学研究室、京都大学理学部物理学研究室、大阪大学理学部物理学研究室

KAERA Gmu100

<http://www.gw.hep.osaka-cu.ac.jp/Gmunu100/>

終わり

補足資料

相対論について補足資料

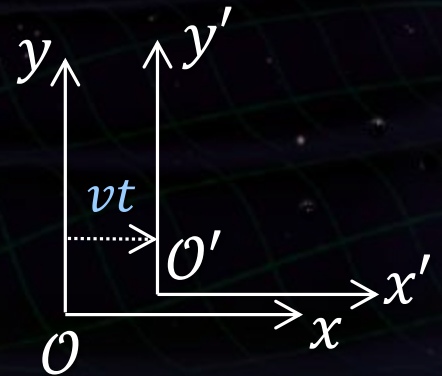
ガリレイ変換

• 等速運動する系への座標変換

座標系 $O(r, t)$ に対して, 一定の速度 $v = (v, 0, 0)$ で運動している座標系を $O'(r', t')$ とすると,

ガリレイ変換 (Galilean transformation)

$$\begin{aligned} t' &= t, & x' &= x - vt, \\ y' &= y, & z' &= z \end{aligned}$$



という関係で書くことができる。

運動方程式の不変性

- ニュートン力学における運動方程式 $f = m \frac{d^2x}{dt^2}$ は、
ガリレイ変換に対して不変。

$$\therefore \frac{d^2x'}{dt'^2} = \frac{d}{dt'} \left(\frac{dx'}{dt'} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} - v \right) = \frac{d^2x}{dt^2}$$

従って $f = m \frac{d^2x}{dt^2}$ が成り立ち、 $f' = f$ とすると、

$$f' = m \frac{d^2x'}{dt'^2} \Rightarrow O' \text{系においても}$$

運動方程式が同じ形に保たれる。

ガリレイの相対性原理 (Galilean principle of relativity):
任意の慣性系において物理法則は不変。

波動方程式のガリレイ変換

- 波動方程式のガリレイ変換を考える.

ダランベール演算子 (簡単のため空間1次元)

$$\square \equiv \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad \text{の変換を考える.}$$

座標変換において,

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t'} = \frac{\partial t}{\partial t'} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial t'} \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial x'} = \frac{\partial t}{\partial x'} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial x'} \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \end{cases}$$

が成り立つことを用いると,

$$\therefore \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t'^2} - \frac{\partial^2}{\partial x'^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{2v}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t \partial x} - \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad \text{となる.}$$

⇒ 波動方程式は, ガリレイ変換に対して不変ではない.

特殊相対性理論

・アインシュタイン (A. Einstein)

2つの基本原理を元に、新しい時間・空間の概念を構成。

- 相対性原理 (Principle of relativity)

たがいに等速運動をしている全ての慣性系において、全ての自然法則は同じ形で表現され、それらの慣性系から特別なものを選び出すことはできない。

- 光速不変の原理 (Principle of invariance of light velocity)

いかなる慣性系においても、その系に対して静止している観測者にとっては光の速度は一定値 c をもつ。

⇒ 特殊相対性理論 (Special relativity, 1905年)

ローレンツ変換

・特殊相対性理論における座標変換

ローレンツ変換 (Lorentz transformation) :

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \gamma \begin{pmatrix} 1 & -\beta \\ -\beta & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}, \quad y' = y, \quad z' = z .$$

(ここで, $\beta = v/c$, $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$)

※ ローレンツ変換は, $v \ll c$ のときガリレイ変換と一致.

このとき,

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t'} = \frac{\partial t}{\partial t'} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial t'} \frac{\partial}{\partial x} = \gamma \frac{\partial}{\partial t} + \gamma\beta c \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial x'} = \frac{\partial t}{\partial x'} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial x}{\partial x'} \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\gamma\beta}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \gamma \frac{\partial}{\partial x} \end{cases}$$

ローレンツ変換

従って,

$$\begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial t'^2} = \left(\gamma \frac{\partial}{\partial t} + \gamma \beta c \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 = \gamma^2 \left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} + 2\beta c \frac{\partial^2}{\partial t \partial x} + \beta^2 c^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] \\ \frac{\partial^2}{\partial x'^2} = \left(\frac{\gamma \beta}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \gamma \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 = \gamma^2 \left[\frac{\beta^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{2\beta}{c} \frac{\partial^2}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right] \end{cases}$$

これらを用いると, O' 系でのダランベール演算子は,

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t'^2} - \frac{\partial^2}{\partial x'^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad \text{となる.}$$



波動方程式はローレンツ変換に対して不変.

ポストケプラーパラメータの見積もり

近日点の移動

$$\dot{\omega} = 2.10 \left(\frac{m_1 + m_2}{M_{\odot}} \right)^{2/3} \text{ [deg/yr]}$$

重力赤方偏移

$$\gamma = 2.96 \left(\frac{m_1 + 2m_2}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{m_2}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{m_1 + m_2}{M_{\odot}} \right)^{-4/3} \text{ [msec]}$$

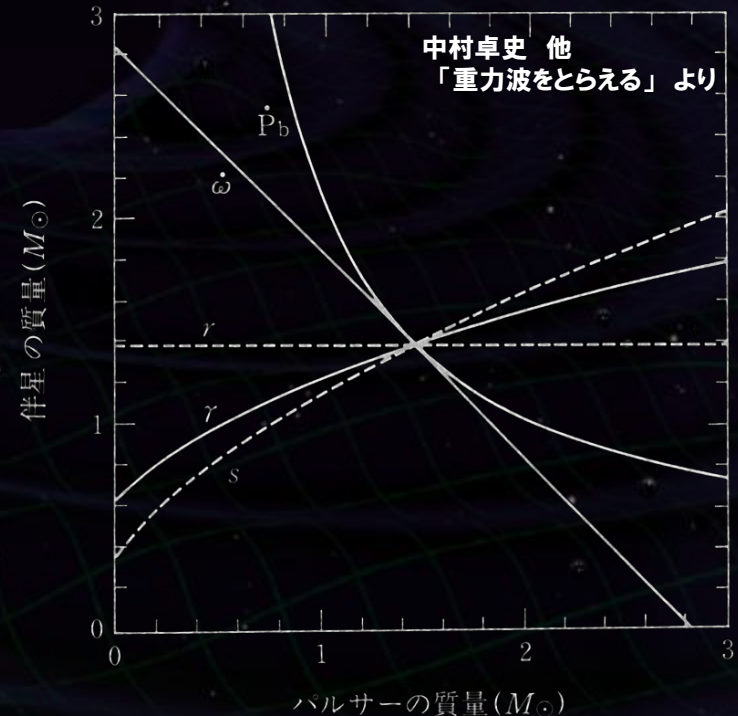
シャピロ時間遅れ

$$r = 5 \left(\frac{m_2}{M_{\odot}} \right) \text{ [\mu sec]}$$

$$s = 0.51 \left(\frac{m_2}{M_{\odot}} \right)^{-1} \left(\frac{m_1 + 2m_2}{M_{\odot}} \right)^{2/3}$$

重力波放出による公転周期減少

$$\dot{P}_b = -54.6 \left(\frac{m_1}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{m_2}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{m_1 + m_2}{M_{\odot}} \right)^{-1/3} \text{ [\mu sec/yr]}$$



中村卓史 他
「重力波をとらえる」より

質量：パルサー 1.4411(7) Msolar
伴星 1.3874(7) Msolar



軌道パラメータとまとめて最小二乗法で決定

初期宇宙からの重力波観測??

2014年3月18日

ナショナルジオグラフィックWeb版

BICEP-2マイクロ波望遠鏡



ナショナルジオグラフィック ニュース

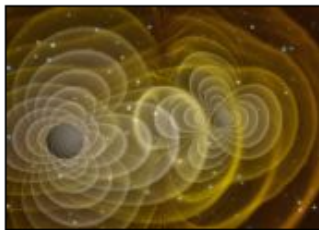
ニューストップ | 動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学&宇宙 | 風変わり

宇宙膨張の決定的証拠を発見

ツイート 151 | チェック | いいね!

Dan Vergano,
National Geographic News
March 18, 2014

宇宙が誕生した瞬間、驚くほど強力な重力波が広がっていった事実が最新の研究によって明らかとなった。「誕生直後に急膨張した」とする「宇宙インフレーション理論」を裏付ける決定的な証拠が、初めて観測されたことになる。



写真を拡大

インフレーション理論は、初期宇宙の誕生直後から想像を絶するほどの大きさまで膨張した成り立ちを説明する進化モデルで、「火の玉の爆発で始まった」とするビッグバン理論を補完する位置付けにある。

研究チームの一員でアメリカにあるミネソタ大学ツインシティー校の物理学者クレメント・プライク (Clement Pryke) 氏は、「重力波の信号検出に初めて成功した。今回の観測結果は十分な検証を重ねており、絶対の自信を持っている」と語る。

2014年5月15日

ナショナルジオグラフィックWeb版

ナショナルジオグラフィック ニュース

ニューストップ | 動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学&宇宙 | 風変わりニュース | ニュース特集 | おすすめ

“宇宙膨張の決定的証拠”は誤り？

ツイート 153 | B! | m チェック | いいね! 251 | +1 43

Dan Vergano,
National Geographic News
May 15, 2014

初期宇宙の成り立ちを説明する“決定的な証拠”が発見され、高い評価を受けていた。ところが、この発見は間違いだったのではないかという風評が広がっている。



写真を拡大

3月、ハーバード大学のジョン・コバック (John Kovac) 氏率いるBICEP (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) 2チームが、アルベルト・アインシュタインが予言した宇宙の“重力波”の観測に成功したと発表し、世界中で話題をさらった。宇宙は誕生直後から指数関数的に膨張したという通説が裏付けられたかに思えた。

研究チームは南極の望遠鏡で観測を行い、ビッグバンの名残で

2014年9月25日

ナショナルジオグラフィックWeb版

ナショナルジオグラフィック ニュース

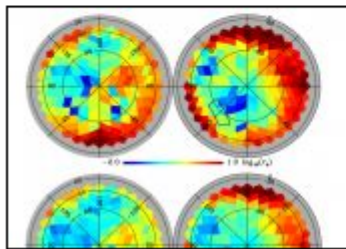
ニューストップ | 動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学&宇宙 | 風変わりニュース | ニュース特集 | おすすめ

“宇宙膨張の証拠”、窮地に

ツイート 75 | BI | チェック | いいね! 100 | +1 33

Dan Vergano,
National Geographic News
September 25, 2014

観測衛星が捉えた宇宙のちりの地図が新たに発表され、先ごろ話題をさらった“原始宇宙の重力波を観測した”という報告の雲行きが怪しくなってきた。



写真を拡大

今年3月、南極にあるBICEP2望遠鏡で観測を行った物理学者のチームが、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の地図上に、驚くほど強力な重力波の痕跡を見つけたと報告した。全天に広がるCMBは、ビッグバンの余波で残った余熱と考えられている。

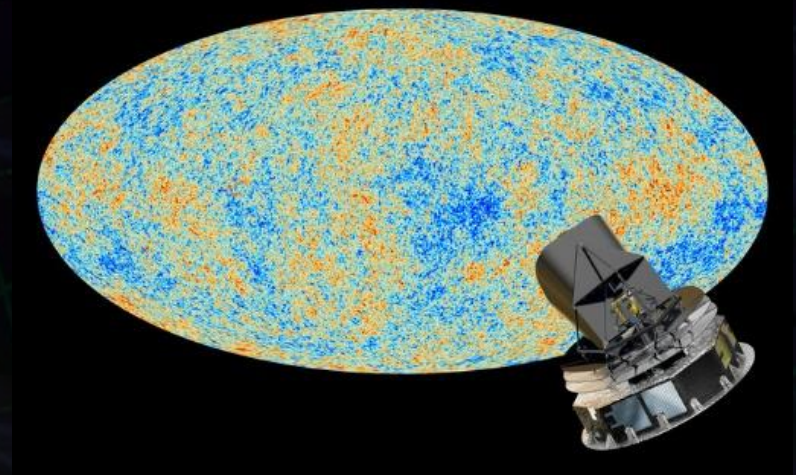
BICEP2チームは、宇宙のごく狭い領域におけるCMBの温度のゆらぎの中に、時空の織物の“さざ波”という形で、重力波の強力な信号が見られると報告していた。こうしたさざ波の検出は、約138億年前に起こったビッグバン直後に宇宙が急激な膨張したと

Planck衛星の観測結果

• 2015年2月

欧州宇宙機関(ESA)のPlanck衛星データを用いた共同解析.

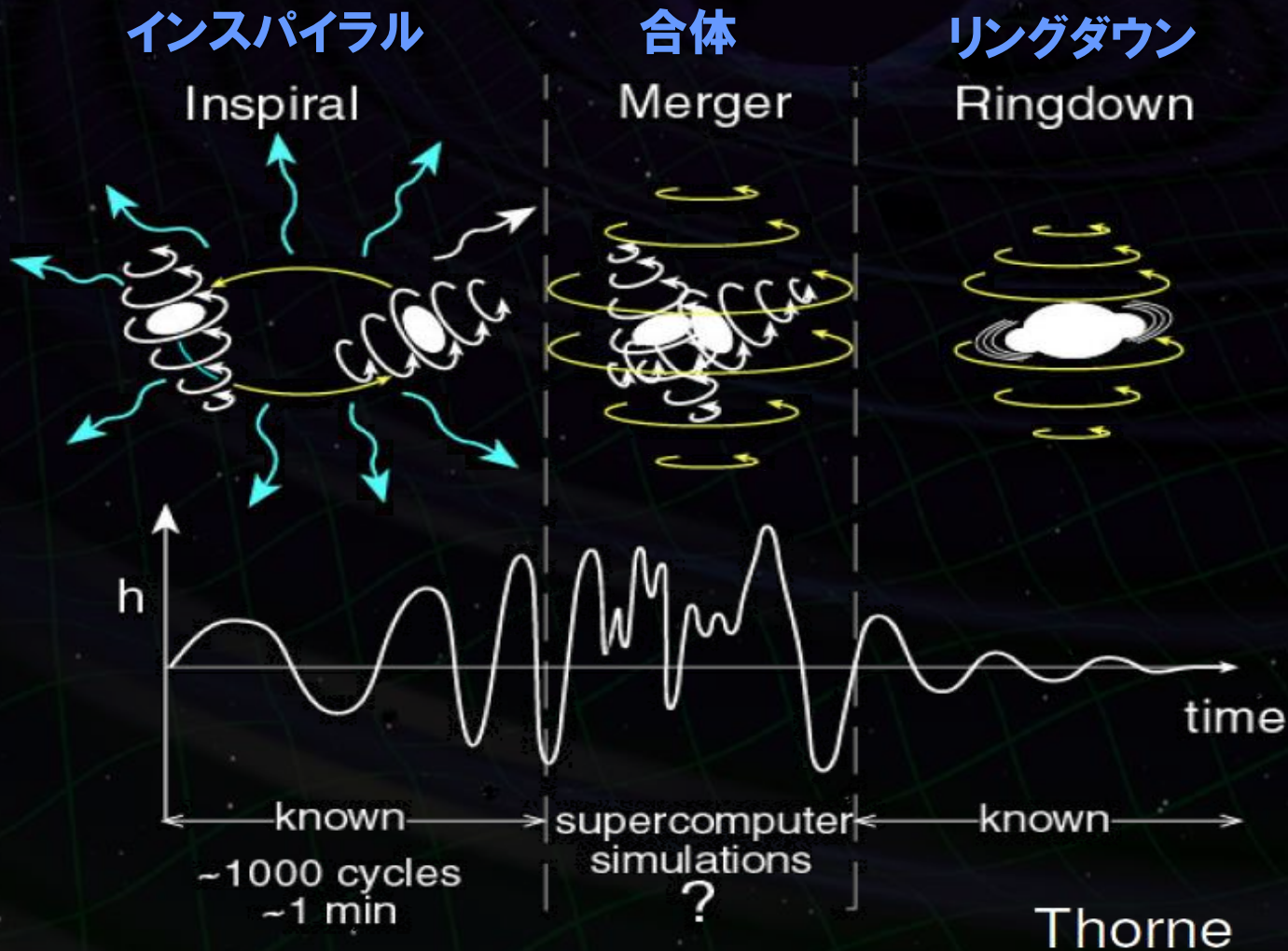
→ BICEP-2の観測結果は、宇宙空間にあるダストの影響を受けていた可能性が高い、という結論.



重力波観測で得られる知見

連星合体現象からの重力波

KAGRAの第一のターゲット：連星合体からの重力波



• 重力波の初検出 → 新しい天文学の創生.

- 連星中性子星 : 確実に存在, 波形予測可能.
- 相対性理論/重力法則の検証.

ブラックホール近傍の直接観測.

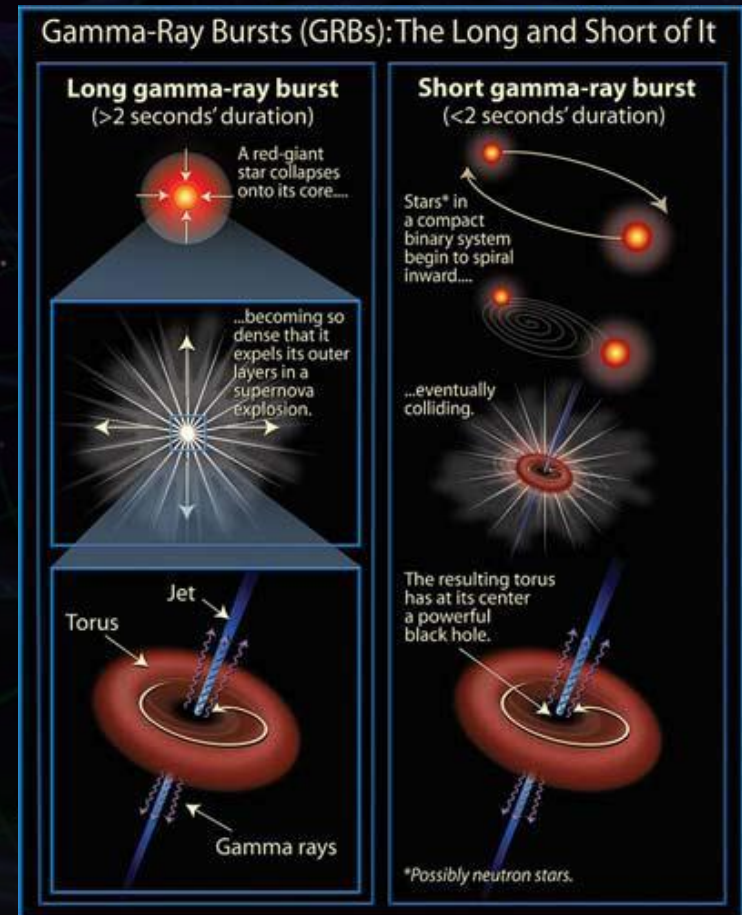
- ガンマ線バーストの起源, 未知の発見.

• 高密度核物質の直接探査.

- 中性子星の状態方程式の情報.
- r-過程 → 元素組成・宇宙の化学進化.

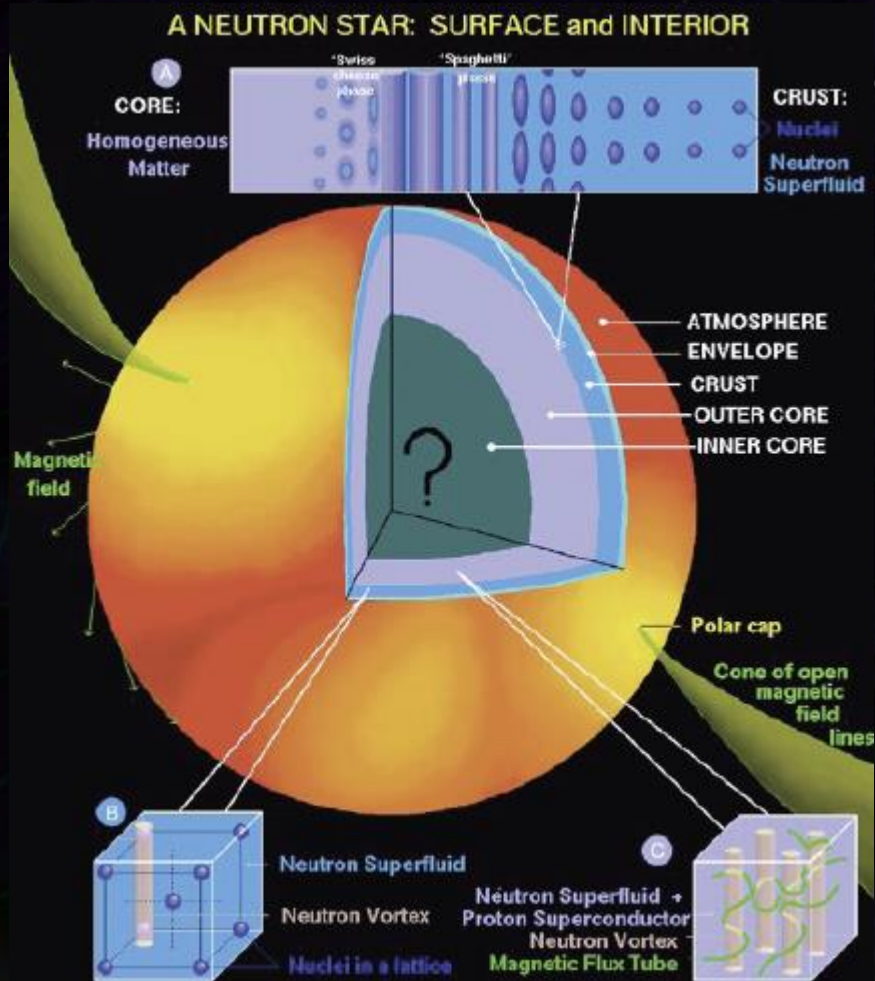
• 宇宙論・銀河形成史に対する知見.

- 宇宙論パラメータへの制限.
- 超巨大ブラックホールの形成過程



From encyclopedia of science

中性子星の構造



中性子星

- ~太陽質量, 半径~10km
の高密度天体.
- 中心部密度: $2 \sim 15\rho_0$

ρ_0 は標準原子核密度

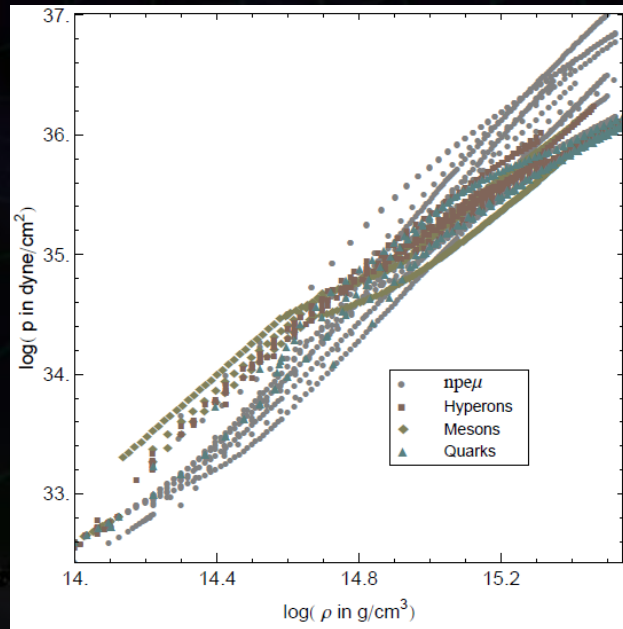
$$\rho_0 = 2.8 \times 10^{17} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

核密度以上の性質は
ほとんど理解されていない。

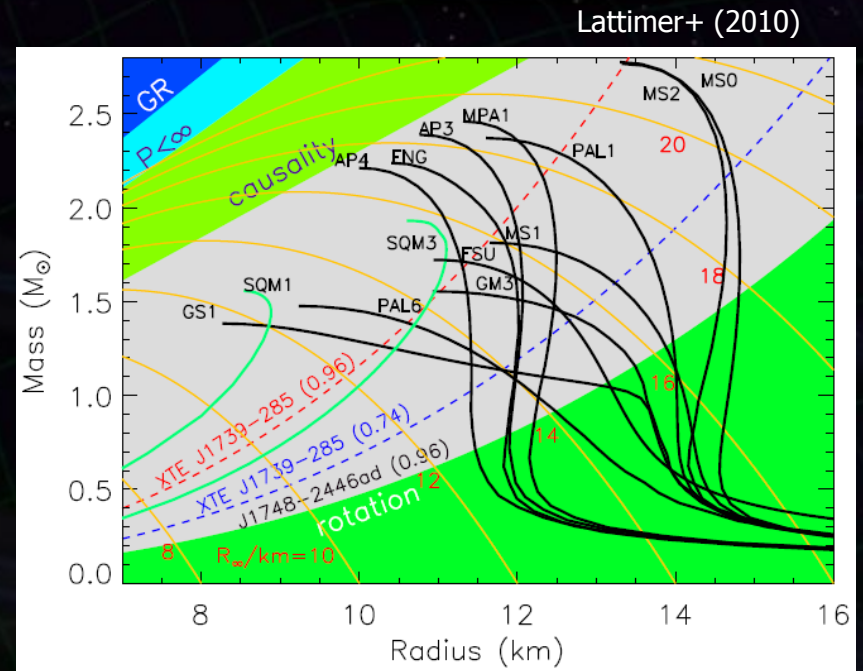
中性子星の状態方程式

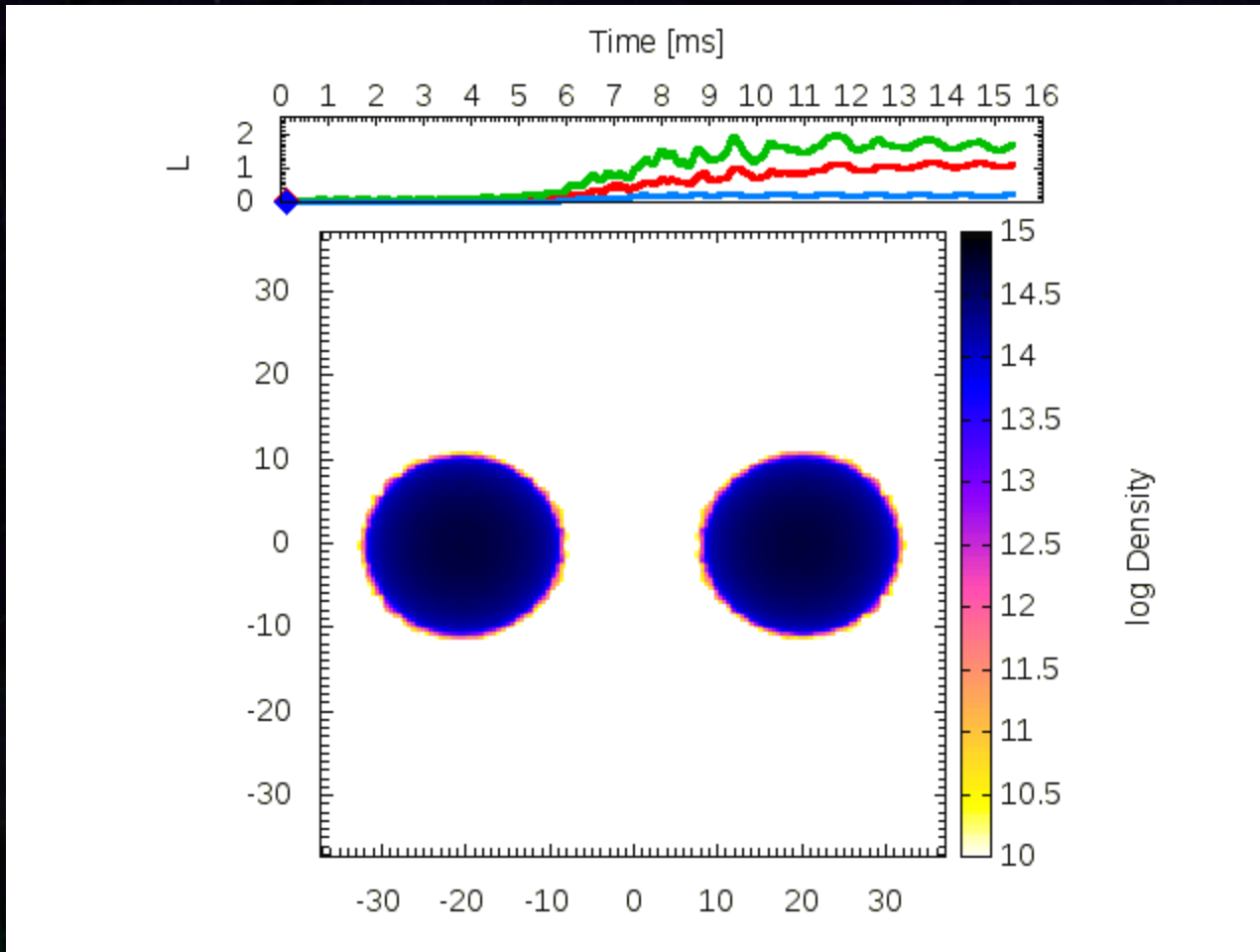
高密度核物質の状態方程式 (EoS, Equation of State)

- 高エネルギー天体現象 (連星中性子星合体, 超新星爆発)
- 原子核物理 (ハイペロン, クォーク, 中間子凝縮)
- 高密度EoSと質量-半径が対応.
- 各EOSに応じた最大質量 M_{\max} が存在



↔
一般相対論的
静水圧平衡

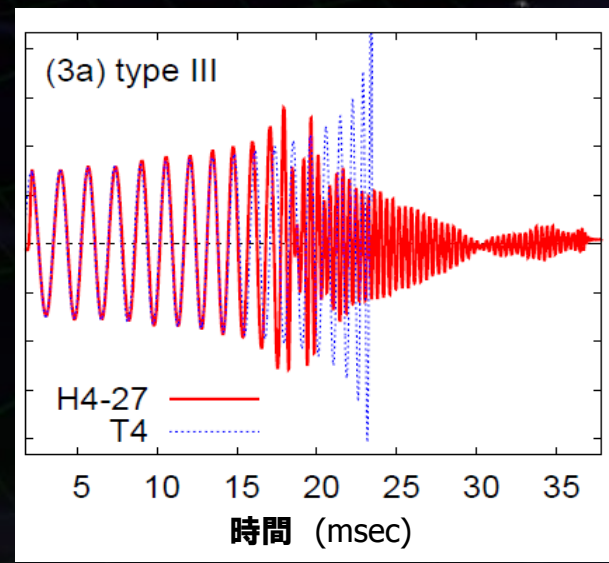
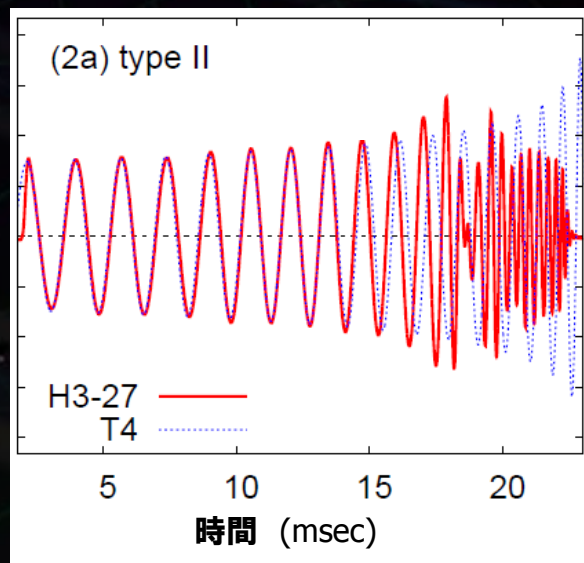
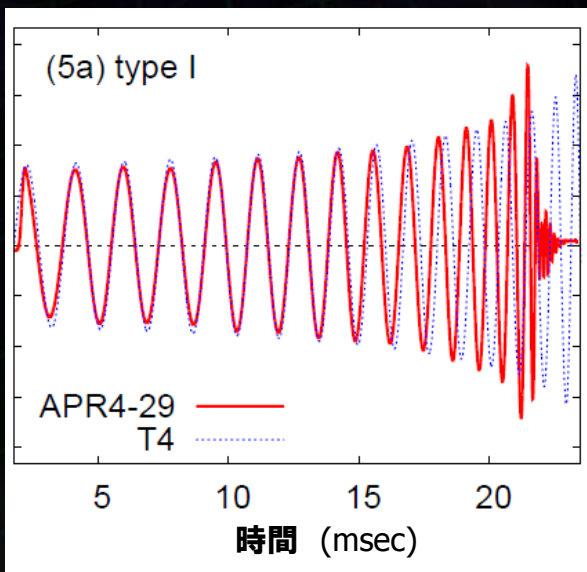
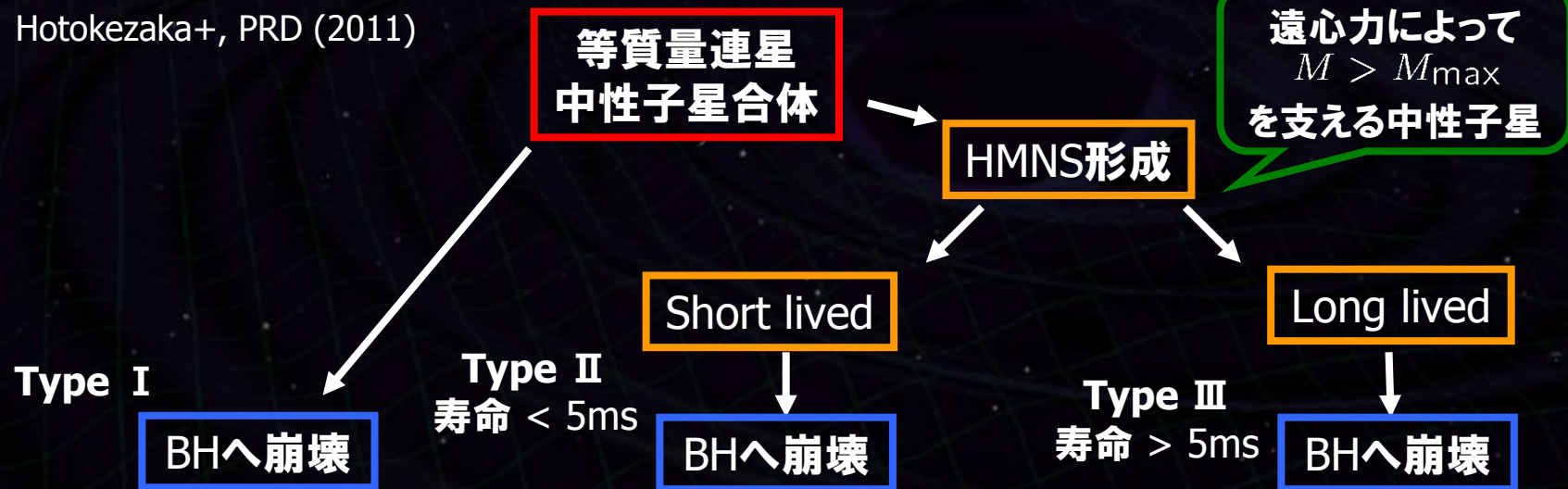




連星中性子星の合体数値シミュレーション by 関口氏

中性子星連星合体の数値シミュレーション

Hotokezaka+, PRD (2011)



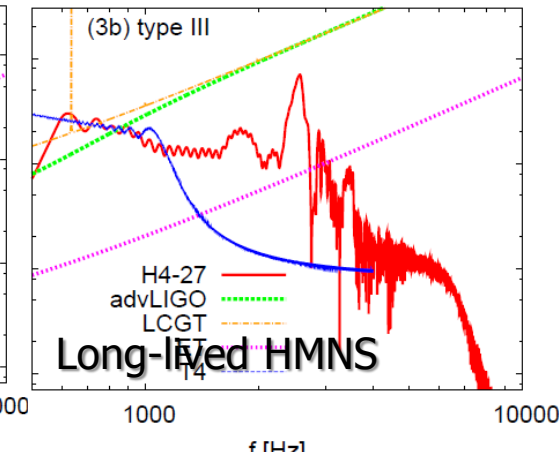
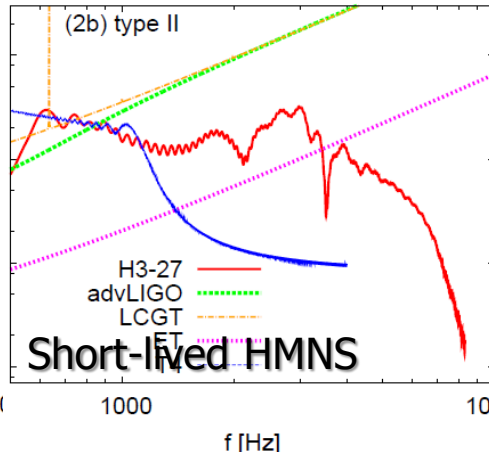
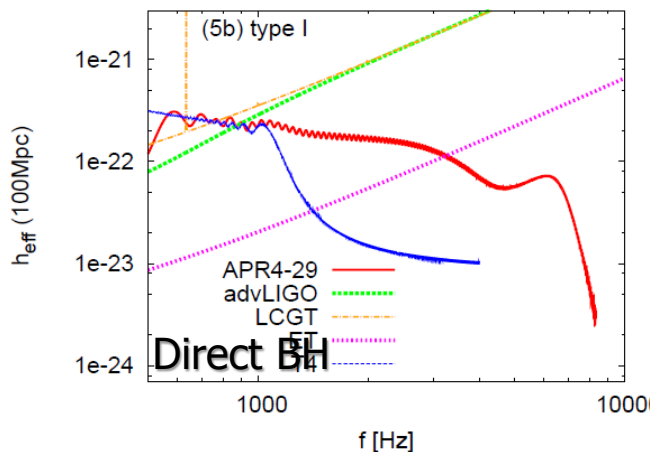
連星合体のスペクトル

距離100Mpc

APR4, Type I
1.45-1.45Msun

H3, Type II
1.35-1.35Msun

H4, Type III
1.35-1.35Msun



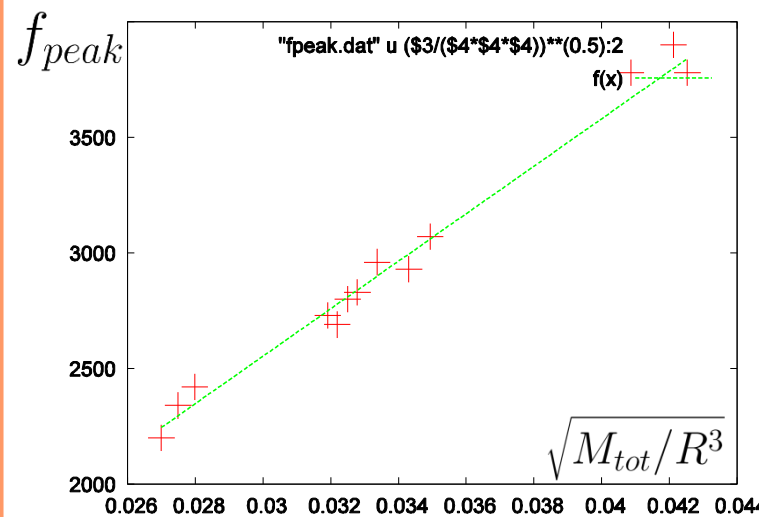
HMNSの回転周波数にピーク
→ 中性子星の半径と相関



EOSに強い制限

Hotokezaka+, PRD (2011)

Kyutoku+, PRD (2010), Bauswein+ (2011)



状態方程式と天文学

中性子星の状態方程式

(密度 $2 \sim 15\rho_0$)

原子核理論

→ 地上実験が困難な
高密度物質の物理
(ハイペロンなど)

密度-圧力

中性子星の半径-質量

Lattimer+ (2010)

理研Web pageより

高エネルギー天体现象

→ 天文学, 極限状態の物理法則

電波パルサー

長ガンマ線バースト

短ガンマ線バースト

超新星爆発

連星合体

LMXB

軟ガンマ線リピーター
マグネター

ブラックホール形成

相対論・宇宙論

連星合体 → 標準音源 (Standard Siren)

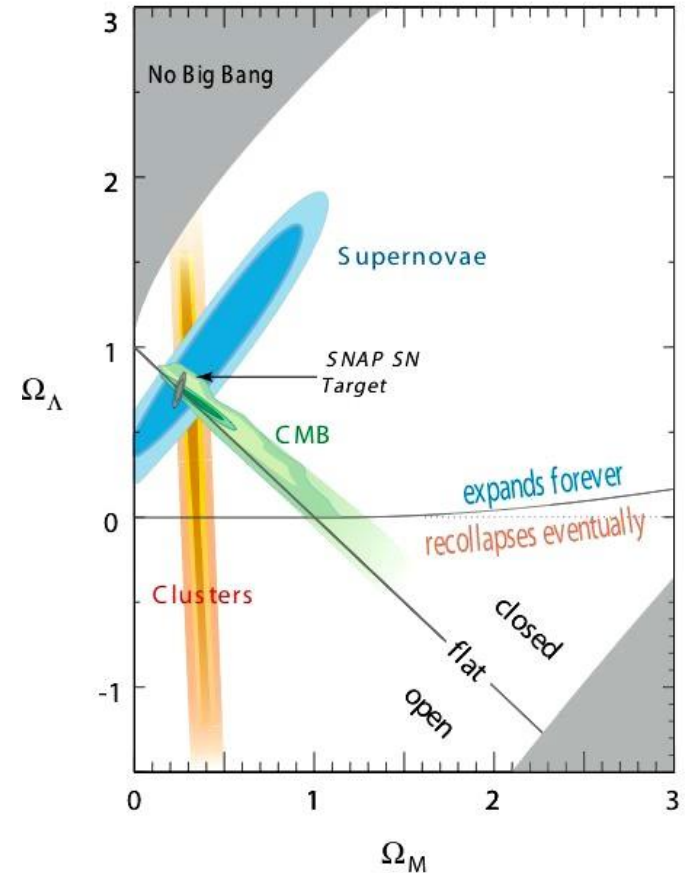
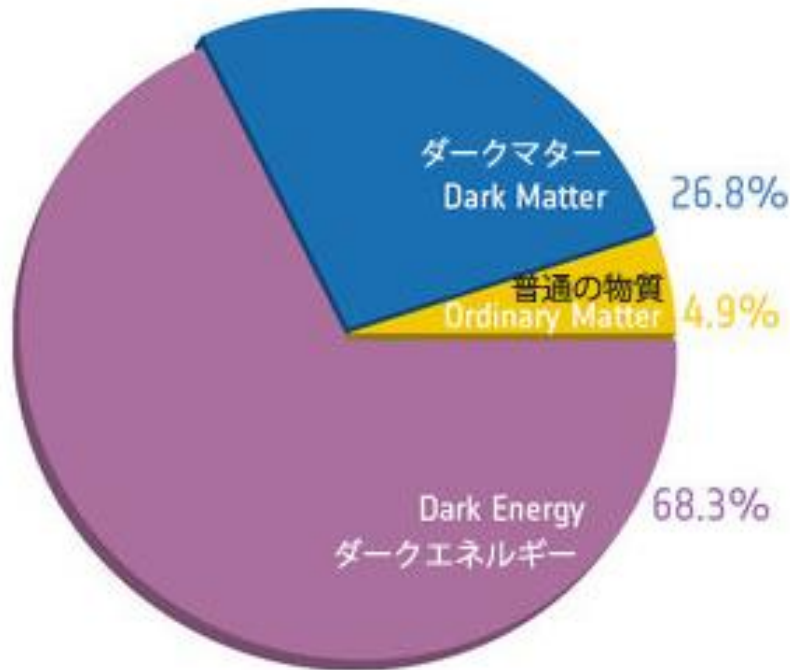
強い重力場での重力法則
宇宙の加速膨張観測

Messenger and Read, arXiv:1107.5725

宇宙の成り立ちを表すパラメータ.

→ 宇宙の年齢・組成・進化を決める.

プランク衛星の
観測結果 (2013)



遠方の超新星爆発の観測

→ 宇宙の加速膨張を直接証明.



2011年ノーベル物理学賞
パールムッター, シュミット, リース
「遠方超新星爆発の観測による
宇宙の加速膨張の発見」



The Nobel Prize in Physics 2011

Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess



Photo: U. Montan

Saul Perlmutter



Photo: U. Montan

Brian P. Schmidt



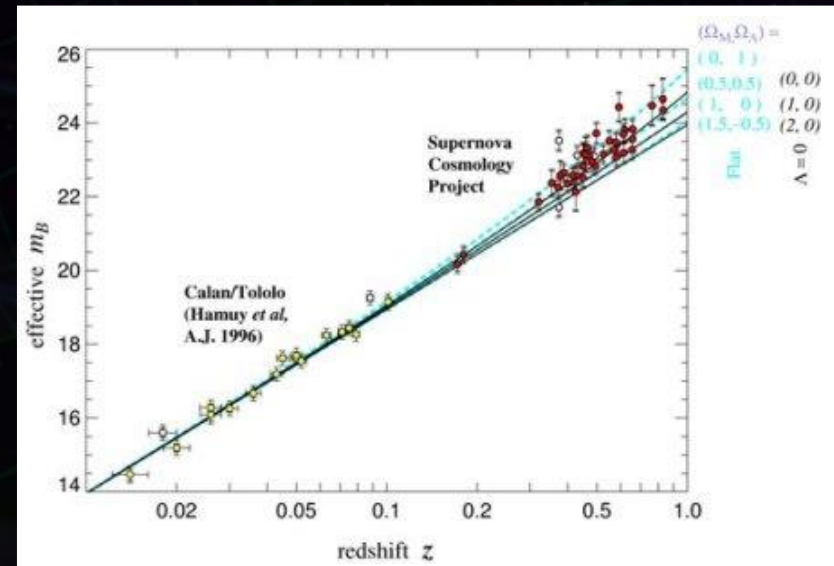
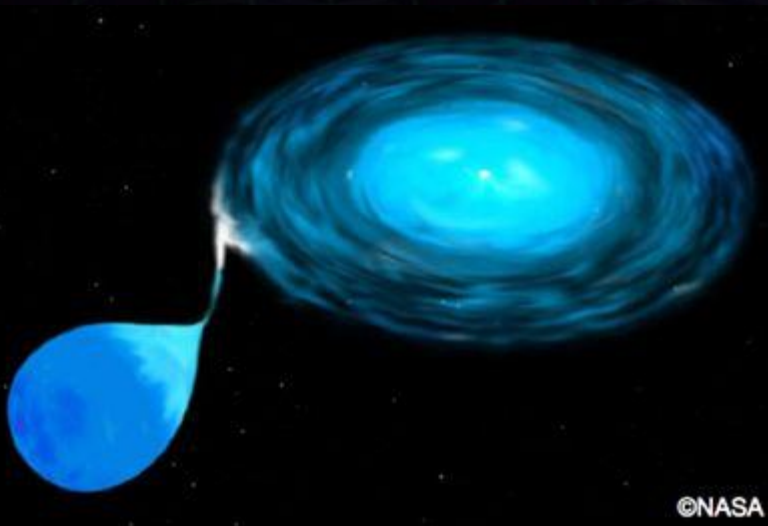
Photo: U. Montan

Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

Type Ia 超新星爆発：標準光源

- 伴星からの降着物質が臨界質量を超えたときに発生。
- ほぼ同じ爆発エネルギーを持つ。→ 距離が分かる。
- 分光観測 → 赤方偏移量が分かる。



連星中性子星：標準音源

- 宇宙論的距離にある連星中性子星 $\sim 10^5$ 個.
- 波形から、連星を構成する中性子星の質量が分かる.
- 振幅は質量のみで決まる. \rightarrow 距離が分かる.
- 母銀河を特定 \rightarrow 赤方偏移量.

連星系からの重力波

$$M_c = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

観測データより $h_{+,\times}, f, \dot{f}$ が分かる

$$\dot{f}(t) \propto [(1+z)M_c]^{5/3} f^{11/3}, \quad M_z \equiv (1+z)M_c \text{ が分かる}$$

$$h_{+,\times}(t) \propto \frac{[(1+z)M_c]^{5/3} f^{2/3}}{D_L}, \quad D_L: \text{光度距離が決まる}$$

赤方偏移は不定 (遠くの軽い連星? or 近くの重い連星?)

- \rightarrow 電磁波の観測からホスト銀河 (赤方偏移) が分かれば、 M_c も決まる
- \rightarrow 重力波によるハッブル図 (z, d_L) が書け、宇宙膨張測定が可能 (距離梯子は必要無い。標準光源としての SNe の検証。)

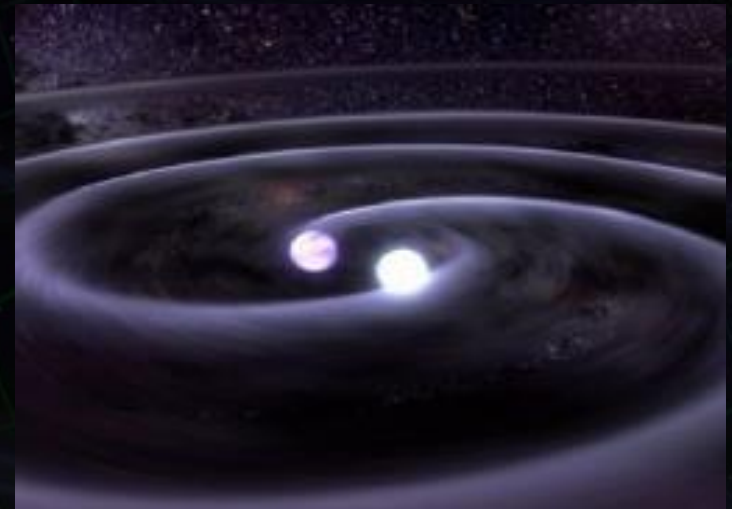


Fig by Nishizawa (2011)

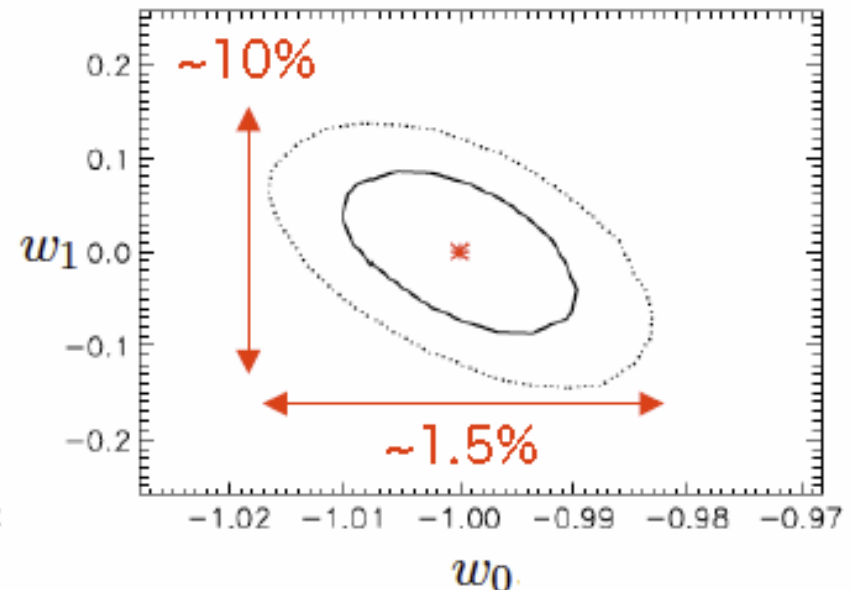
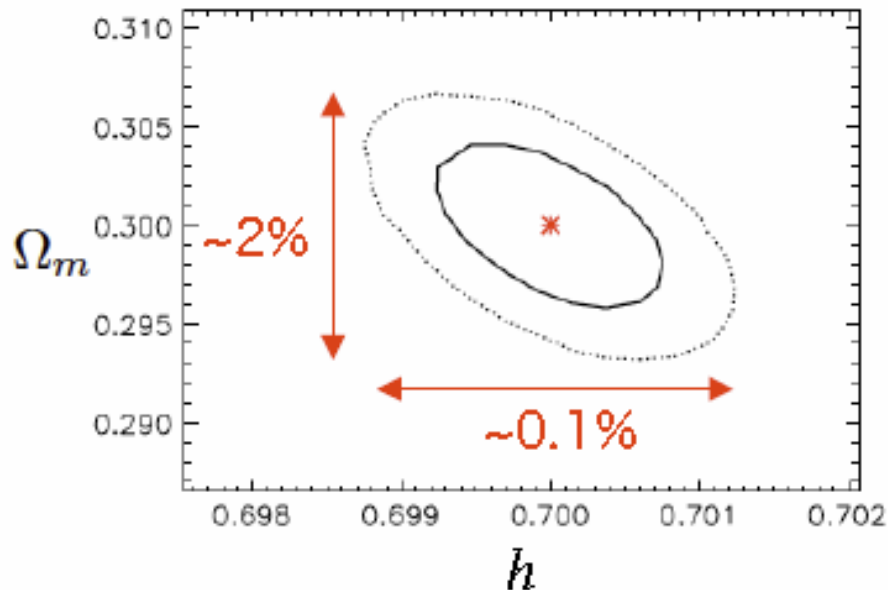
Fig by Nishizawa (2011)

BBOで観測される $\sim 10^5$ 個の連星を用いて、宇宙論パラメータを決定する

平坦宇宙、観測時間 3yr を仮定

[Cutler & Holz 2009]

$$w(z) = w_0 + w_1 \frac{z}{1+z}$$



la 型超新星に比べて、非常に良い決定精度 !!

重力波望遠鏡KAGRAの補足

• 重力波の検出と重力波天文学の創生

- 1年間の観測で複数回の重力波信号の検出が期待できる.
→ 重力波天文学の幕開け, 相対性理論の検証.
- 国際観測網における重要な拠点
波形, 偏波などの情報 → 天体现象の情報.
波源の位置の特定 → 電磁波観測も含めた波源の理解.

• 先進的な干渉計技術の実証

- KAGRAの特徴: 低温干渉計, 地下サイトに設置.
→ 第3世代望遠鏡 (Einstein Telescope) に必須の技術.
- ⇒ KAGRAには、**第2.5世代の望遠鏡**としての役割もある.

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.

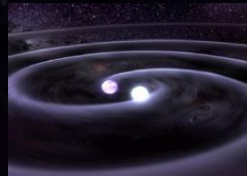


- ・ホスト機関：
東京大学 宇宙線研究所
- ・副ホスト機関：
国立天文台
高エネルギー加速器研究機構
- ・国内外の研究機関
東京大 理・工・地震研，
大阪市大，東工大，大阪大，
京都大，産業技術総合研究所，
情報通信研究機構，電気通信
大，山梨英和大 など。

重力波望遠鏡の高感度化

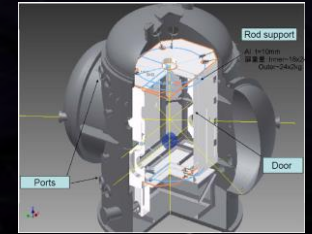
・重力波源の理解

理論・解析的計算
数値相対論
データ解析手法



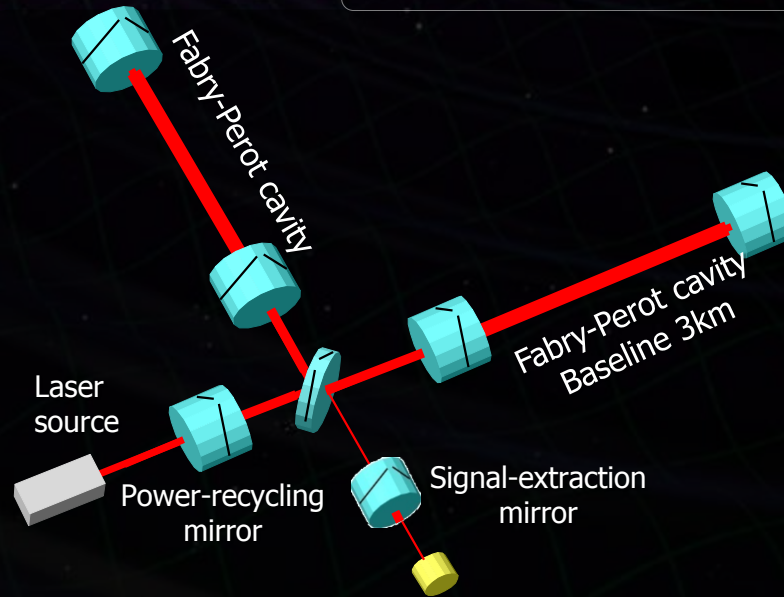
・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化
材質の機械損失



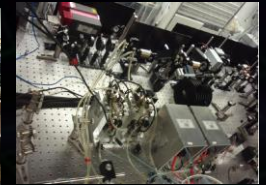
・地面振動の影響

静寂な地下サイト
高性能防振装置



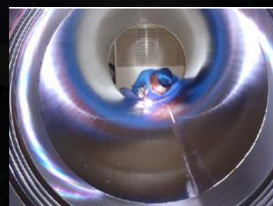
・光の量子雑音

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

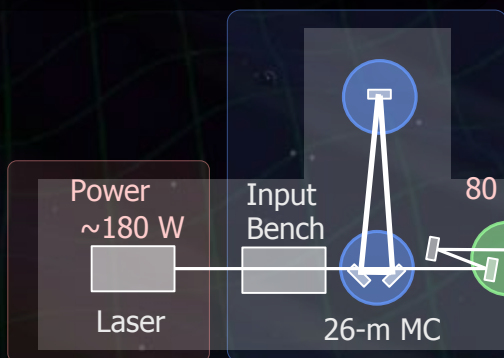
デジタル制御・データ取得系
環境モニタ, データ保管・分配



KAGRA 干渉計構成

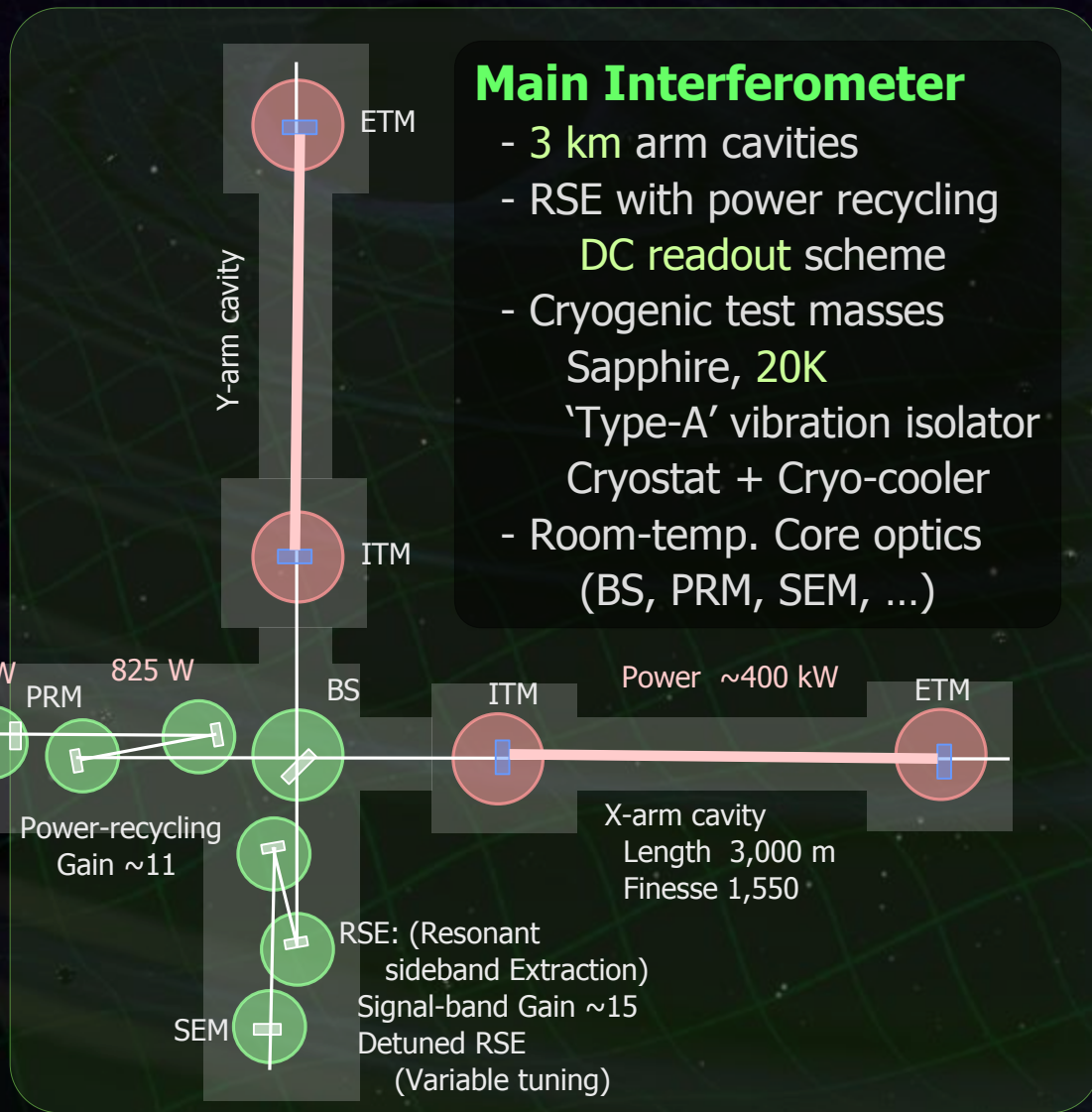
Input/Output Optics

- Beam Cleaning and stab.
- Modulator, Isolator
- Fixed pre-mode cleaner
- Suspended mode cleaner
Length 26 m, Finesse 500
- Output MC
- Photo detector



Laser Source

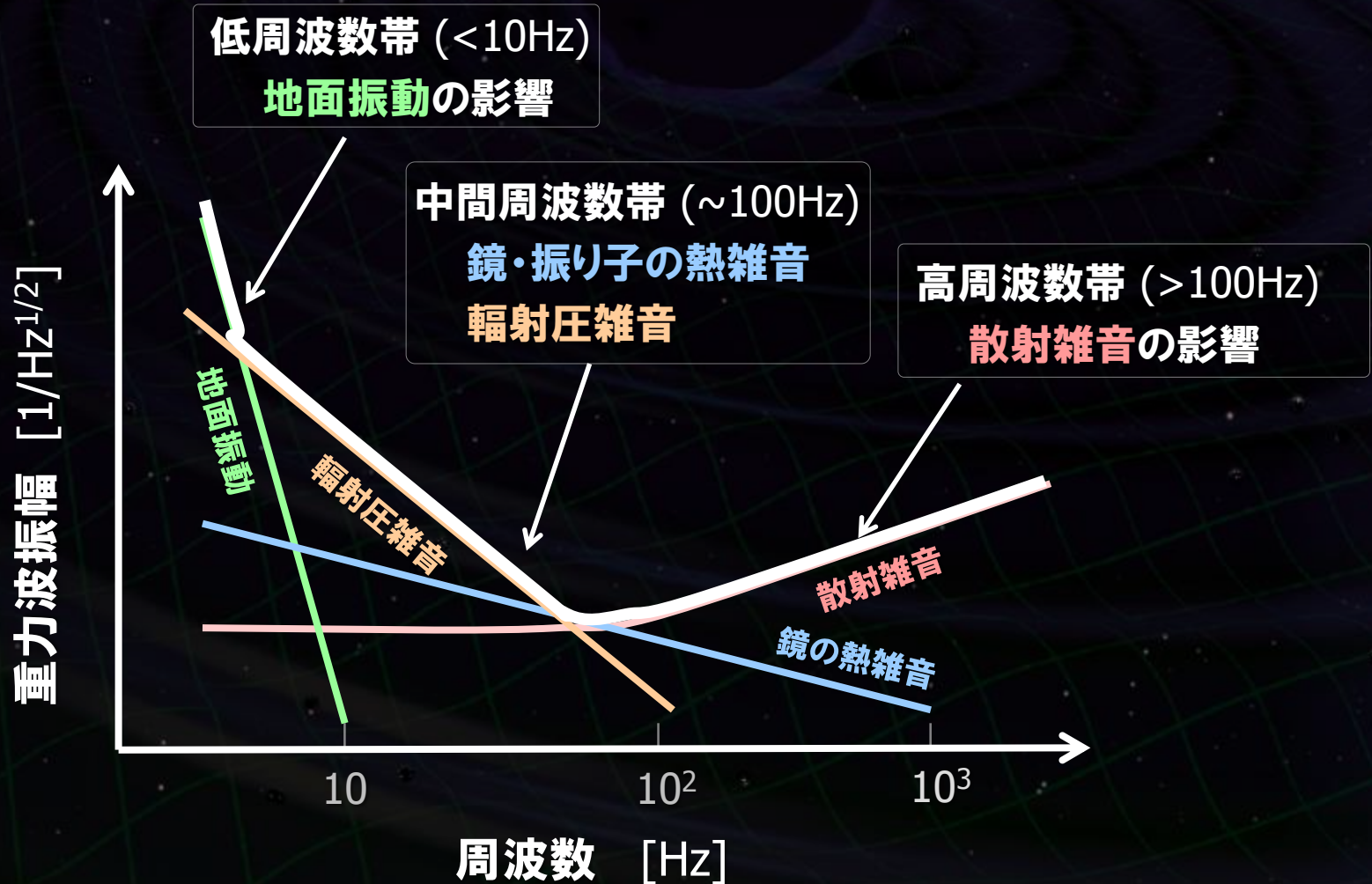
- Wavelength 1064 nm
- Output power 180 W
- High-power MOPA



Main Interferometer

- 3 km arm cavities
- RSE with power recycling
DC readout scheme
- Cryogenic test masses
Sapphire, 20K
- 'Type-A' vibration isolator
Cryostat + Cryo-cooler
- Room-temp. Core optics
(BS, PRM, SEM, ...)

重力波検出器の感度



光の量子雑音 --- 干渉計における原理的な雑音 光が光子の集合であることに起因した統計揺らぎ。

- **散射雑音** (Shot Noise)

光検出時の光子数計数誤差

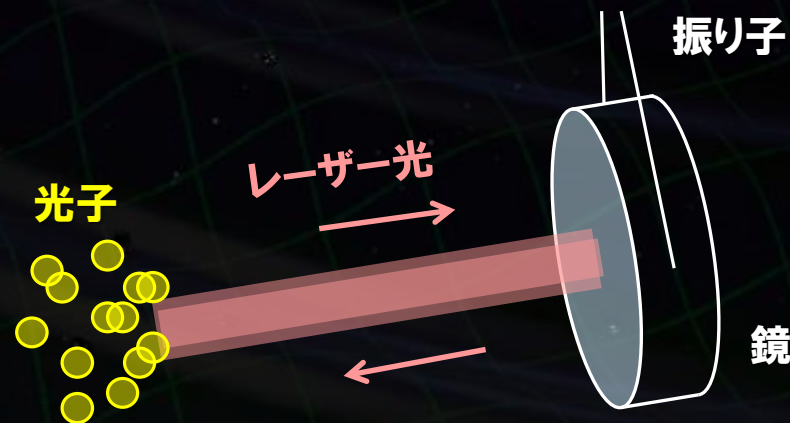
$$h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

- **輻射圧雑音** (Radiation Pressure Noise)

鏡での反射時の光子反跳雑音

$$h_{\text{RPN}} \propto \sqrt{P}$$

[P : 干渉計入射光パワー]



光 (輻射場) の不確定性関係

散射雑音：光の位相雑音

$$\delta h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

輻射圧雑音：光の振幅雑音

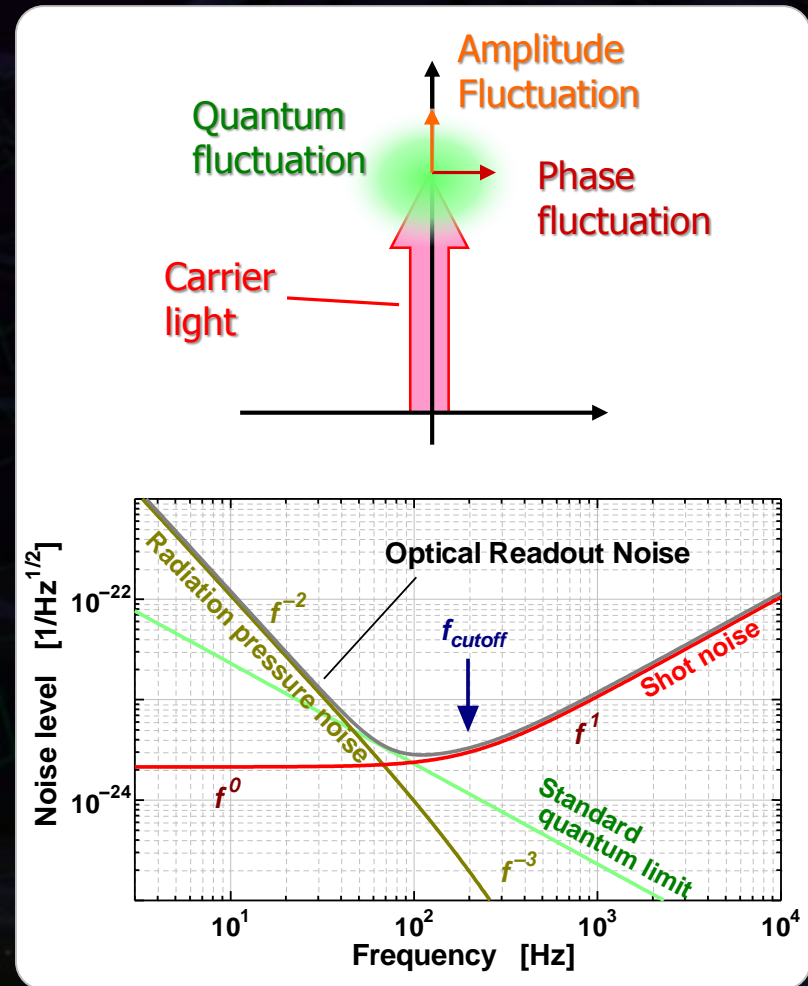
$$\delta h_{\text{rad}} \propto \sqrt{P}$$

⇓ 二乗和を最小にする光パワー

• 標準量子限界

- (SQL : Standard Quantum Limit)

$$h_{\text{SQL}} = \frac{1}{2\pi L f} \sqrt{\frac{8\hbar}{m}}$$



・光の量子雑音 --- 干渉計における原理的な雑音

- **散射雑音** (Shot Noise)

光検出時の光子数計数誤差

$$h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

- **輻射圧雑音** (Radiation Pressure Noise)

鏡での反射時の光子反跳雑音

$$h_{\text{RPN}} \propto \sqrt{P}$$

[P : 干渉計入射光パワー]

標準量子限界 (Standard Quantum Limit)

$$h_{\text{SQL}} \propto \frac{1}{\sqrt{M L^2}} \left[\begin{array}{l} M : \text{鏡の質量} \\ L : \text{基線長} \end{array} \right]$$



長い干渉計基線長
大質量鏡

KAGRA : 大型・大光量干渉計

基線長 3km, 鏡質量 22kg, 干渉計内光パワー ~400kW

熱雑音 --- 干渉計の原理的雑音

干渉計の構成コンポーネントの機械損失

→ 揺動力 (揺動散逸定理)

熱雑音

$$\text{Thermal noise} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

T : 温度 [K]
 Q : 機械損失の逆数

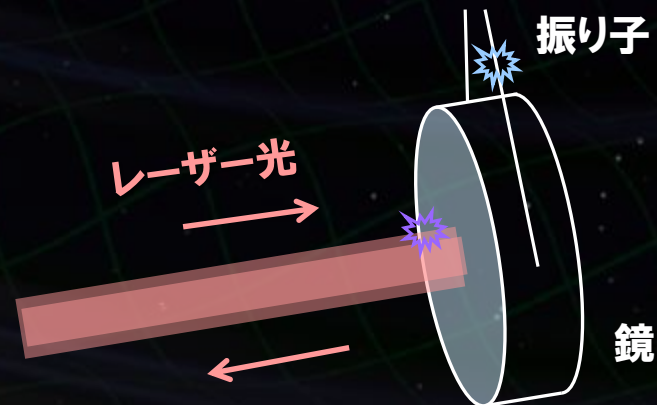
温度を下げる
良い材質を選ぶ
低減する干渉計構成

鏡の熱雑音

鏡基材, コーティング面の損失.

振り子の熱雑音

鏡の懸架ワイヤ等での損失.



・熱雑音 --- 干渉計の原理的雑音

干渉計の構成コンポーネントに 機械損失 → 揺動力 (揺動散逸定理)

- 鏡の熱雑音 : 鏡基材, コーティング面などでの損失.
- 振り子の熱雑音 : 鏡の懸架ワイヤ等での損失.

熱雑音

$$\text{Thermal noise} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

T : 温度 [K]
 Q : 機械損失の逆数

温度を下げる
良い材質を選ぶ
低減する干渉計構成

KAGRA : 低温干渉計 → 熱雑音を低減するクリアな方法.

- 鏡 ~20K, 振り子 ~16K
- 付加的な効果 : 機械損失の低減, 熱レンズ効果の低減, パラメトリック不安定性の低減.

・地面振動 --- 地上干渉計の低周波観測帯域と安定度を制限

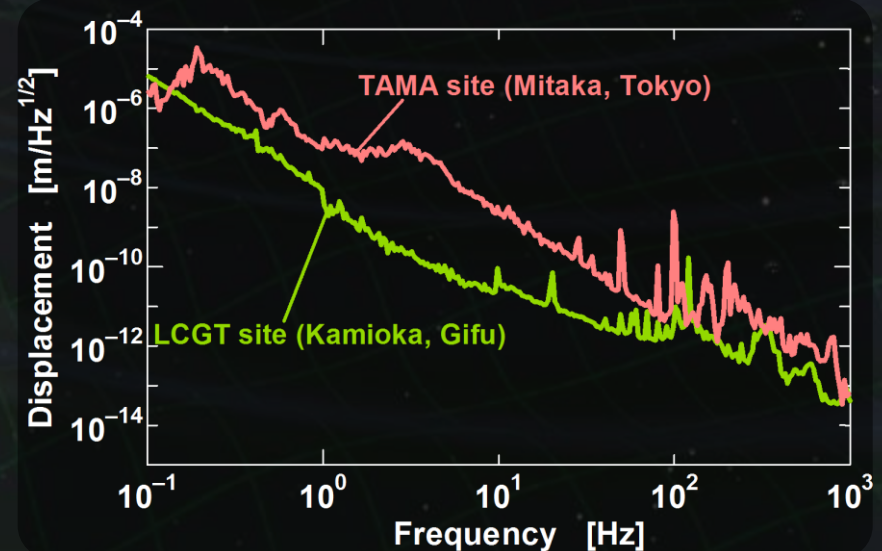
- **常微動** : 準定常的な変動. 干渉計の観測帯域を制限.
- **非定常変動** : 地震, 気象変動, 人工的な励起など.
干渉計の安定度, 観測のデューティサイクルに影響.

地面振動レベル

- 地下サイトでは2-3桁小さい
- 高周波数で低減.

$$\delta x_{\text{seis}} \sim \frac{10^{-9}}{f^2} \quad [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

(神岡サイトでの値, f : 周波数,)



KAGRA : **地下サイトに建設** → 2-3桁小さい常微動, 長期安定な環境.

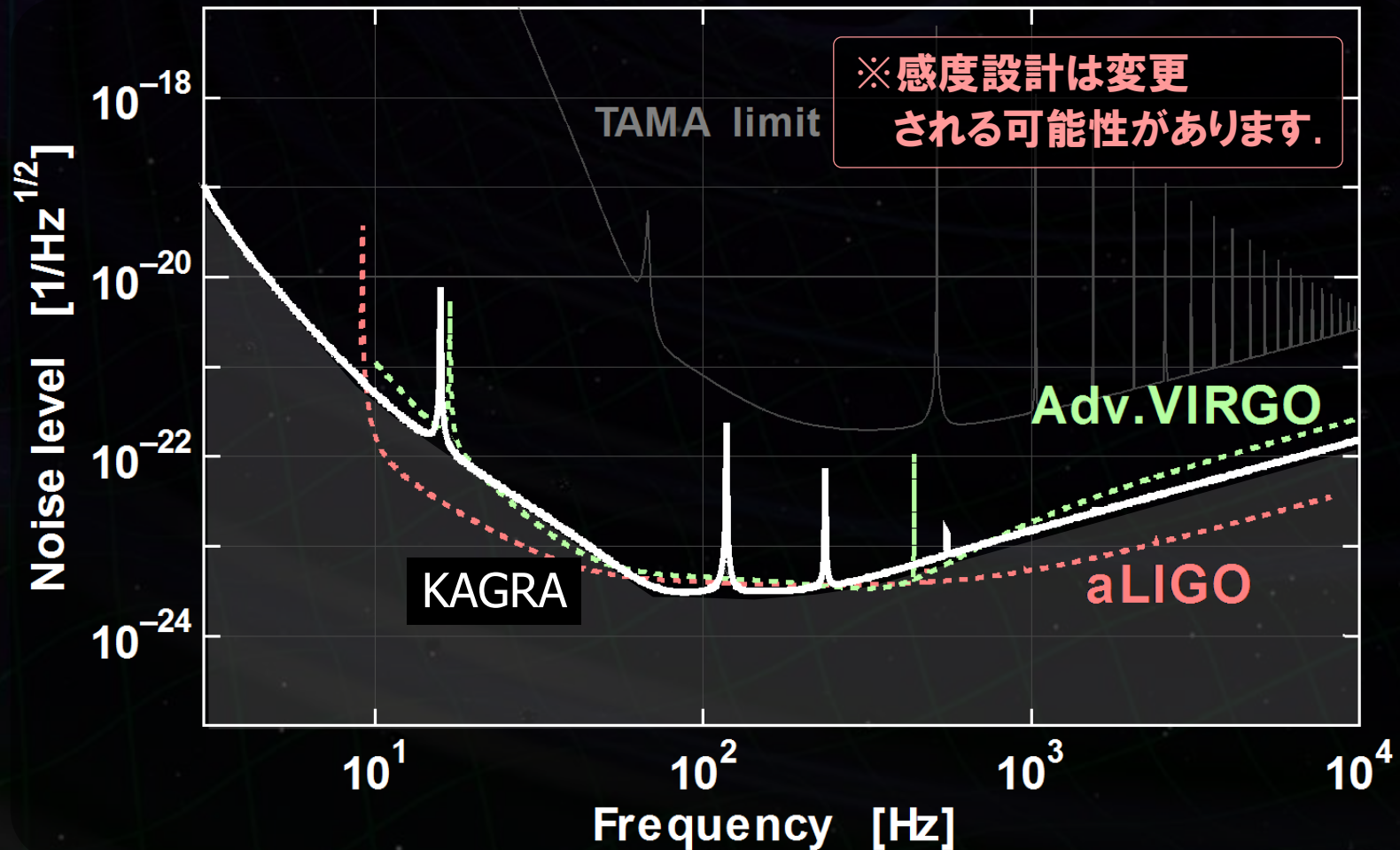
高性能防振装置 SAS : 多段・低周波の防振装置.

KAGRAの感度限界

主要な雑音源で決まる限界感度
aLIGO や Ad.VIRGOと同等



国際観測網を形成
年間1回以上の重力波信号検出



海外望遠鏡との比較

	2 nd -generation detectors		3 rd generation	
	aLIGO	Ad. VIRGO	KAGRA	ET
観測開始	~ 2016	~ 2016	~ 2017	~ 2026
サイト	地上 Hanford 2台 Livingstone 1台	地上 Pisa 1台	地下 Kamioka 1台	地下 3台
基線長	4 km	3 km	3 km	10 km
観測レンジ (*1)	306 Mpc	243 Mpc	273 Mpc (*2)	3 Gpc
干渉計方式	RSE広帯域	RSE狭帯域	RSE可変帯域	RSE Xylophone
熱雑音の低減	大ビーム径, 低機械損失鏡 熱レンズ効果の補正		低温化	低温化
防振系	能動防振系	受動防振系	受動防振系	受動防振系

(*1) 連星中性子性合体现象に対する観測可能距離, 最適方向, 最適偏波, SNR>8.

(*2) 現在、設計の更新作業が進められており, 変更の可能性がある.

地上重力波望遠鏡のロードマップ



TAMA300 と CLIO

TAMA300 (1995~)

基線長300mの 重力波検出器

銀河系内を見渡せる感度

(世界最高感度 2000-2002年)

他の干渉計に先駆けた観測運転

(3000時間を超える観測データ)

Ando+, PRL 86, 3950 (2001)



CLIO (2002~)

基線長100mの

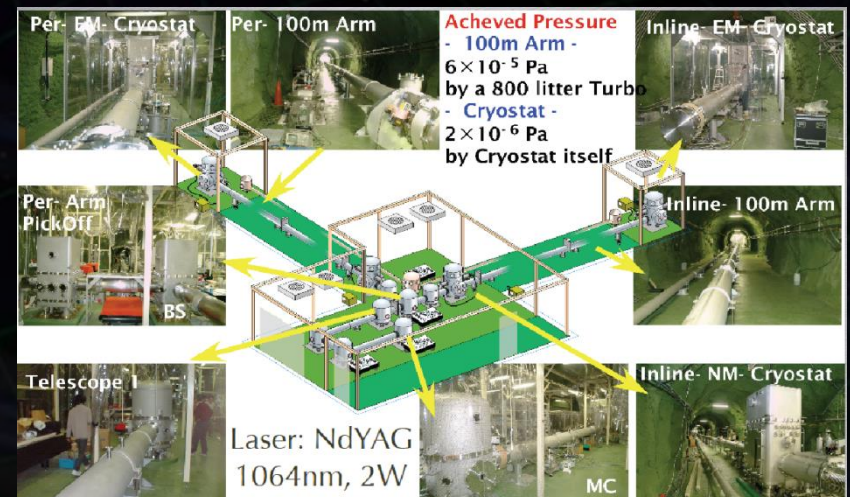
低温・地下レーザー干渉計

地下環境を生かした安定な動作

20K以下の低温での動作

→ 冷却による感度向上を確認

Uchiyama+, PRL 108, 141101 (2012)

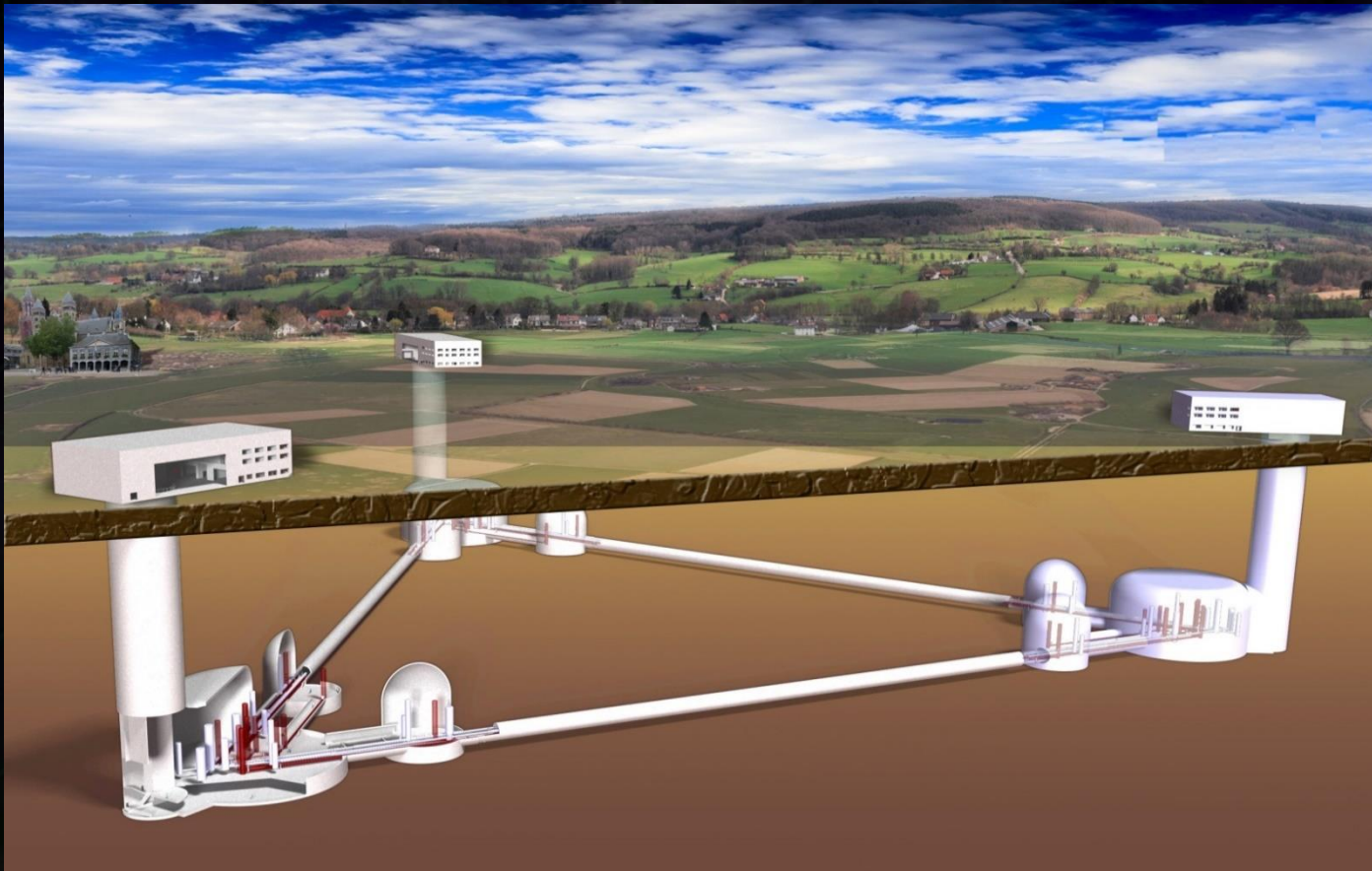


第3世代 重力波望遠鏡

第3世代望遠鏡：ET (Einstein Telescope)

さらに一桁の感度向上, 2026年頃観測開始.

長基線長 ~10km, 地下サイトに建設, 低温干渉計

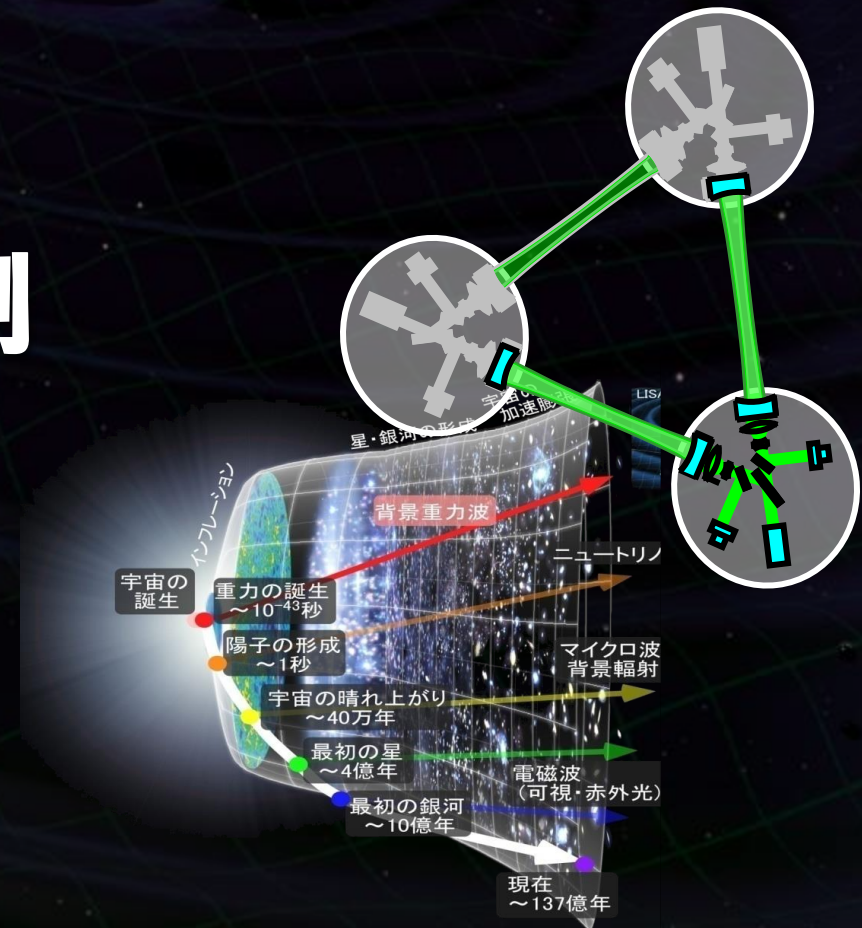


マルチメッセンジャー天文学



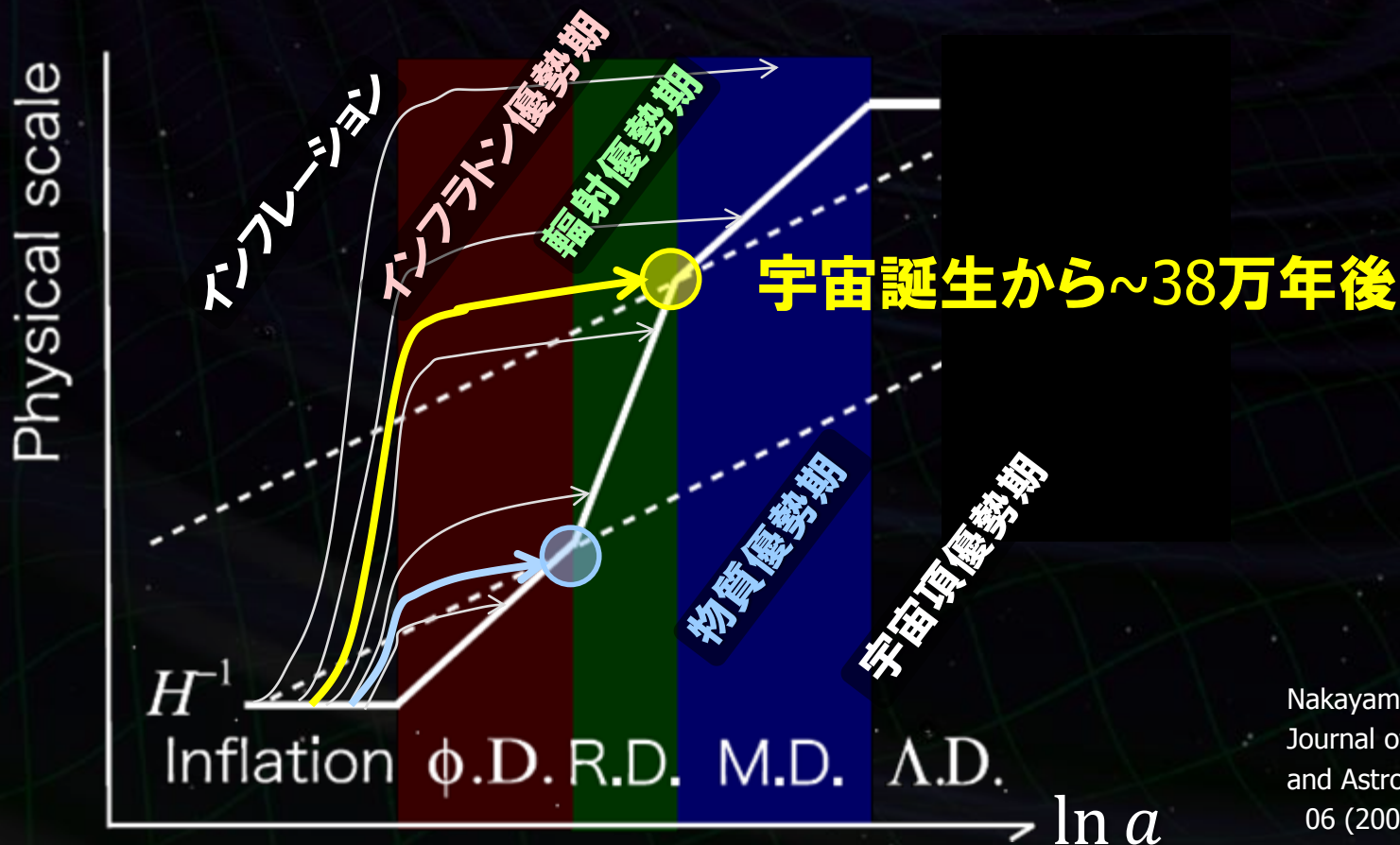
須藤 2011年度 東京大学物理学専攻修士課程入学ガイダンス資料

原始重力波の観測



インフレーションからの重力波

計量の量子揺らぎとして生成 → 初期に生成された重力波ほど、長くインフレーションで引き延ばされ、最近に宇宙の地平線内へ。



Nakayama+,
Journal of Cosmology
and Astroparticle Physics
06 (2008) 020.

インフレーションからの重力波スペクトル

初期に地平線内入ってきた重力波ほど高周波.



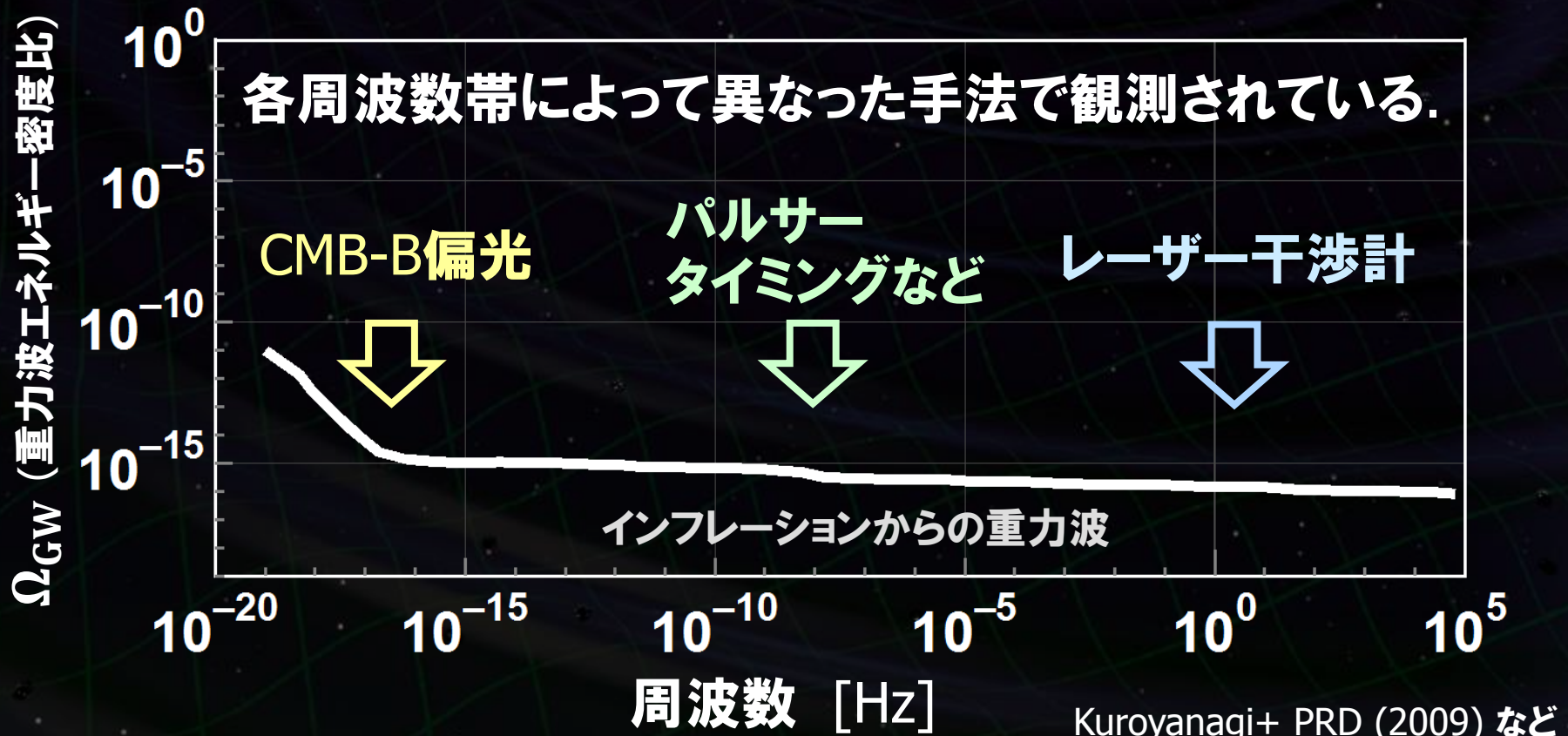
重力波のエネルギー密度比

重力波のエネルギー密度

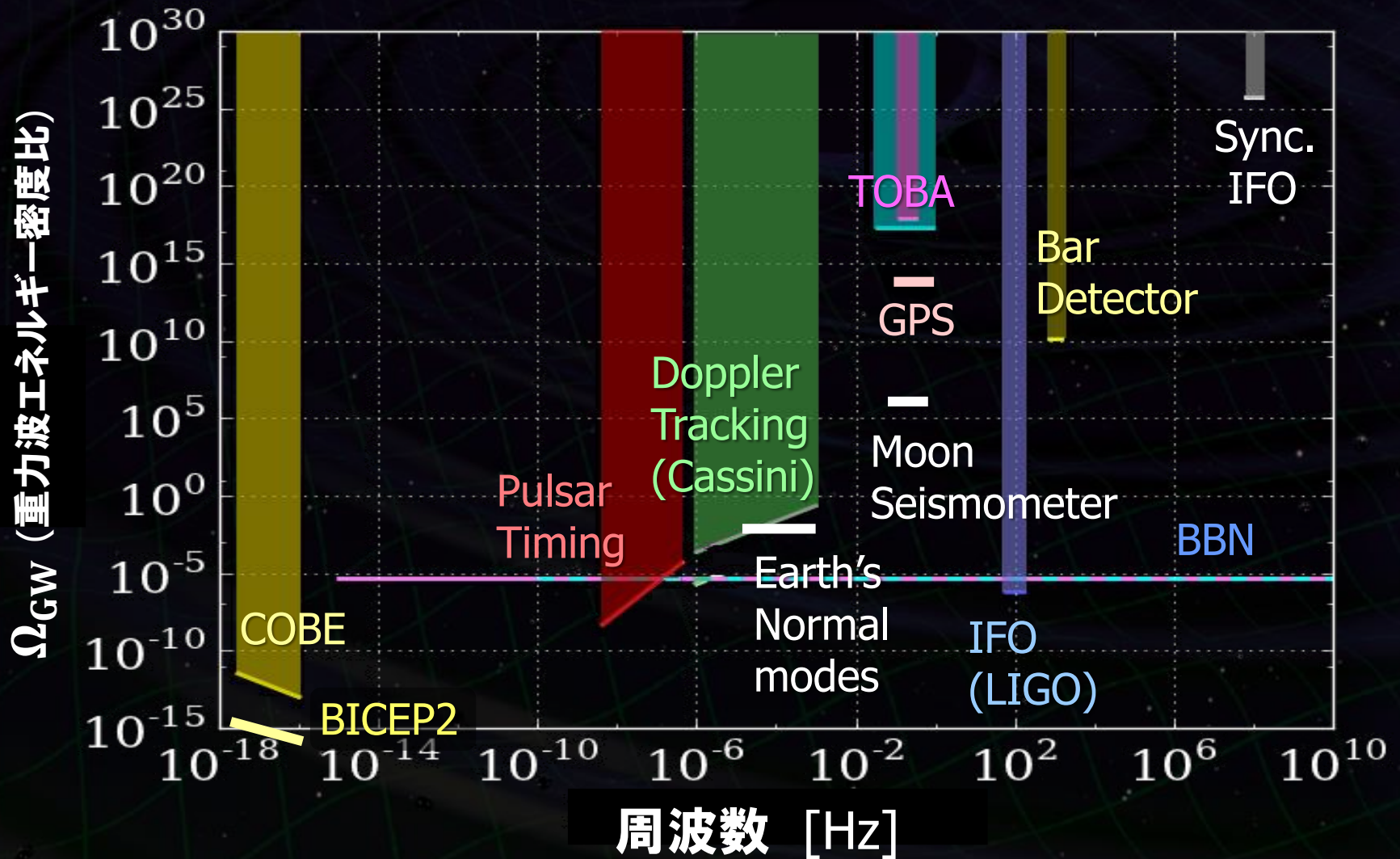
$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}(f)}{d \ln f}$$

宇宙の臨界密度

地平線内に入った重力波は、宇宙膨張とともに発展。
→ スペクトルの形は、**宇宙進化の情報**を持っている。



背景重力波探査の現状



原図 : Shoda+, PRD (2013)

重力波の効果

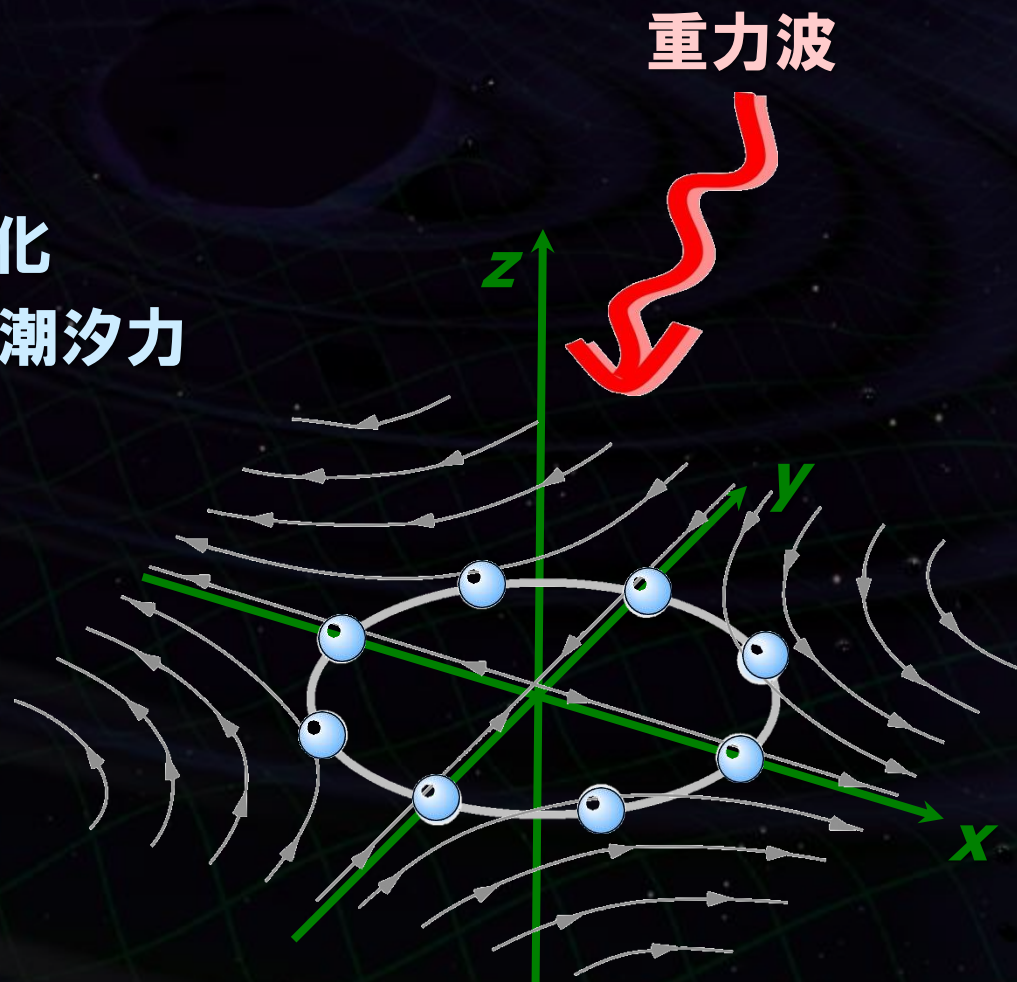
- 自由質点間の距離の変化
- 大きさを持った物体への潮汐力

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



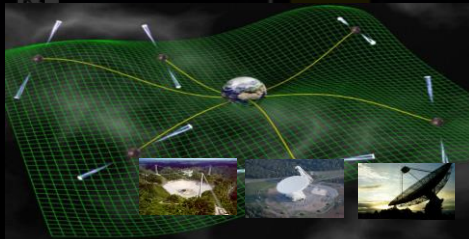
$h = 10^{-24} \rightarrow 1\text{m}$ の距離が 10^{-24}m 伸縮.

重力波観測方式の比較

パルサータイミング

($\sim 10^{-9} - 10^{-8}$ Hz)

電波パルサーを精度の良い時計として利用.



ドップラートラッキング

($\sim 10^{-4} - 1$ Hz)

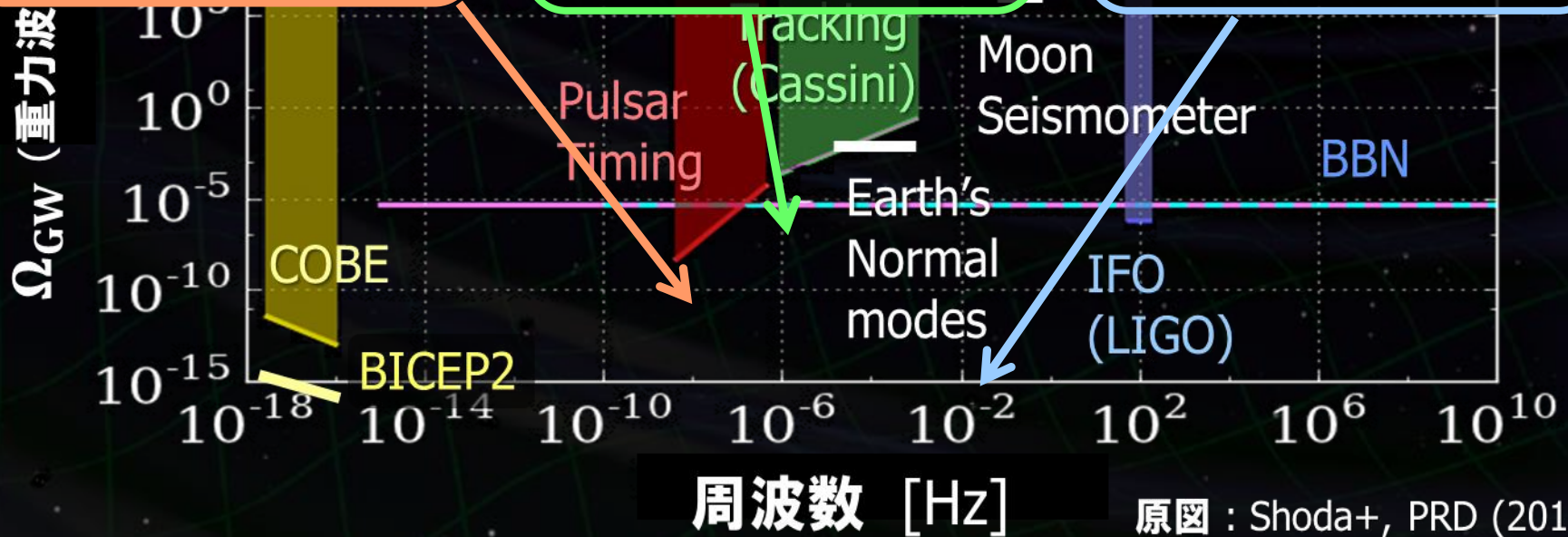
宇宙機・人工衛星との電波通信を利用.



レーザー干渉計

($\sim 10^{-4}$ Hz - 1 kHz)

試験質量(鏡)間距離のレーザー干渉計測距.



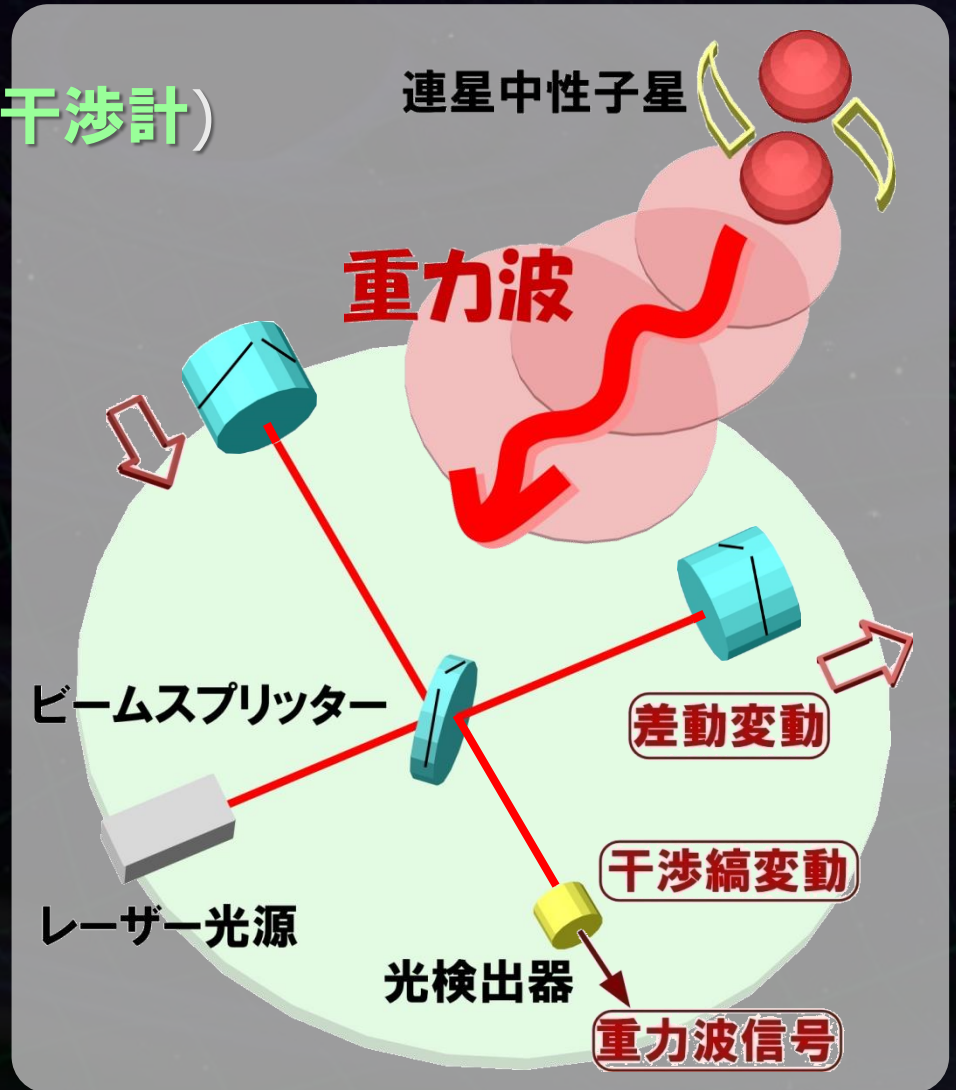
レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- 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渉.
- 光検出器で観測.

重力波が入射



腕の長さの差動変動を
干渉光量の変動として検出



重力波のエネルギー密度比


重力波のエネルギー密度

$$\Omega_{\text{GW}}(f) = \frac{1}{\rho_c} \frac{d\rho_{\text{GW}}(f)}{d \ln f}$$

宇宙の臨界密度

等価な重力波振幅

ハッブル定数


$$\tilde{h}_{\text{GW}}^2(f) = \frac{3H_0^2}{10\pi^2 f^3} \Omega_{\text{GW}}(f)$$

$$\tilde{h}_{\text{GW}}^2(f) = \frac{3H_0^2}{10\pi^2 f^3} \Omega_{\text{GW}}(f)$$



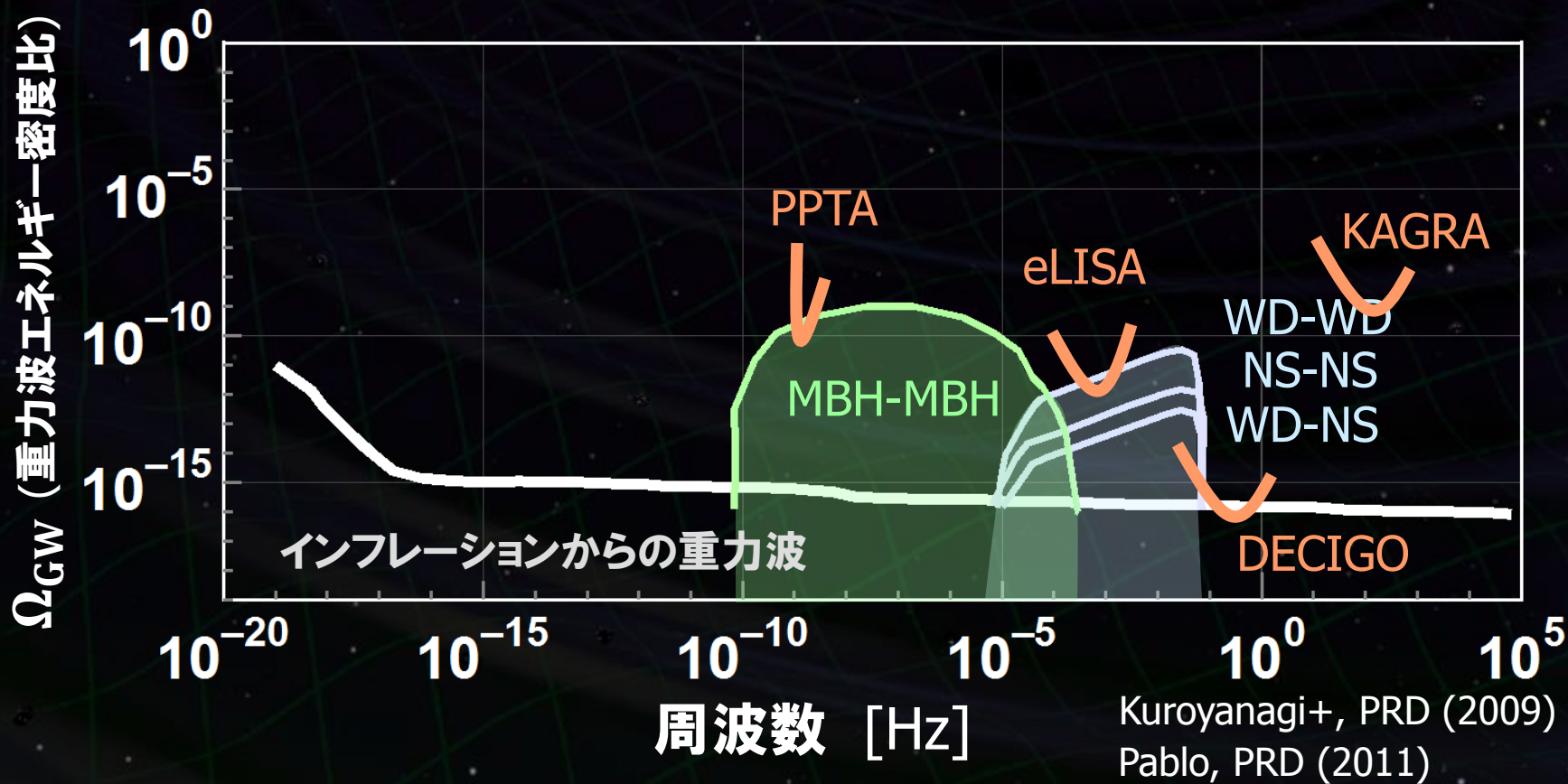
高周波数では振幅は小さくなる

フォアグラウンド重力波

多くの連星系からの重力波 → 分離できない.

⇒ $10^{-10} - 0.1$ Hzの周波数帯で,

原始重力波観測に対する **Foreground雑音** となる.



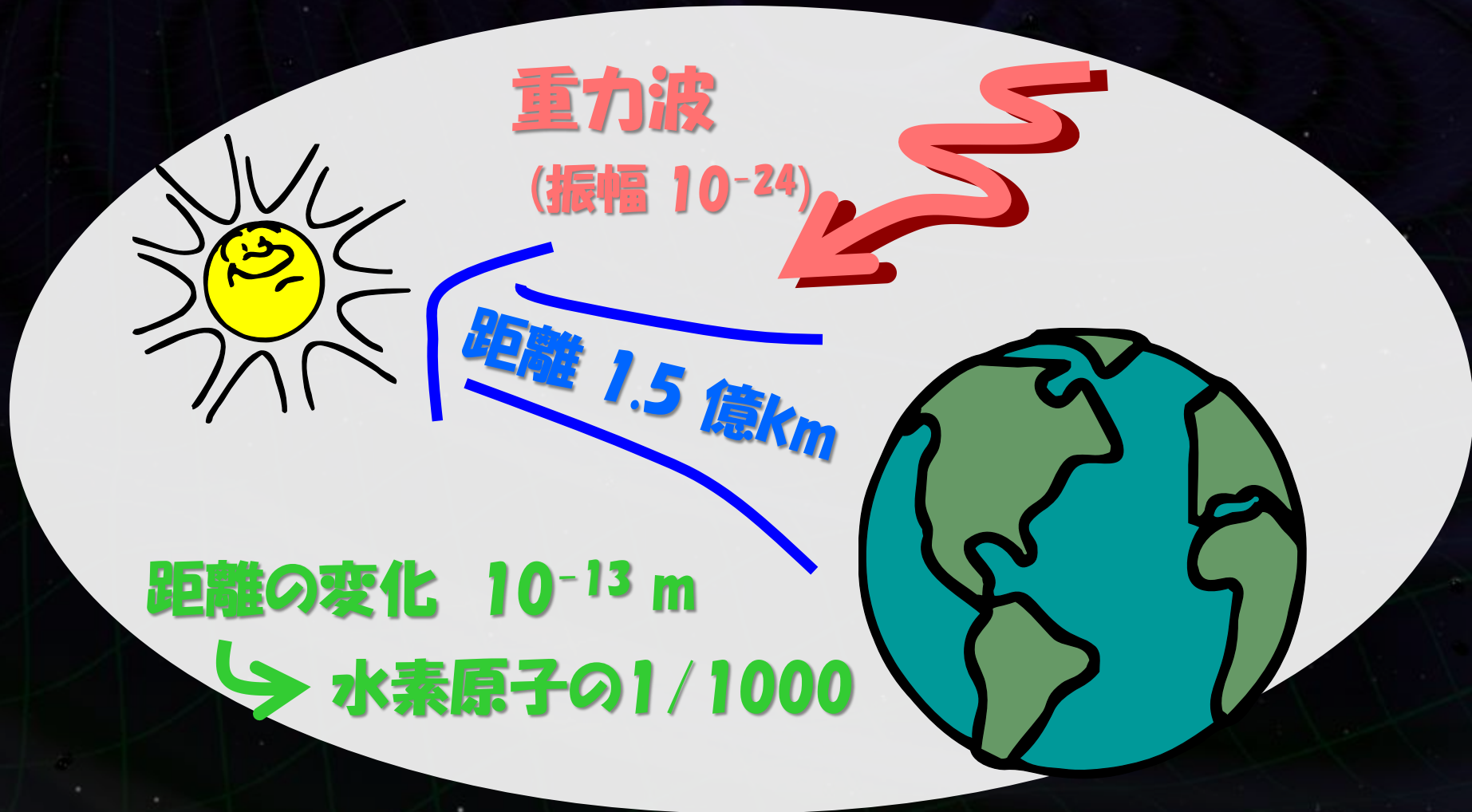
- さまざまな周波数帯で原始重力波観測を観測することで宇宙の進化の情報を得ることが可能.
- インフレーションからの重力波観測には低周波数が有利.
- 0.1Hz以下の周波数帯では, フォアグラウンド重力波が存在.



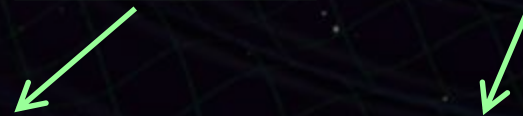
インフレーションからの重力波観測には,
0.1 -1 Hzの周波数帯が良い.

$$\Omega_{GW} \sim 10^{-16} - 10^{-15}$$
$$\rightarrow \tilde{h}_{GW} \sim 10^{-24} \text{ Hz}^{-1/2} (@ 0.1\text{Hz})$$

重力波の効果：2点間の固有距離の変化



- 重力波 – 強い透過力を持ち, 初期宇宙の情報を伝える.
- スペクトルの形 : 初期揺らぎ + 宇宙進化の歴史.



CMB Bモード偏光から
もある程度推定可能.

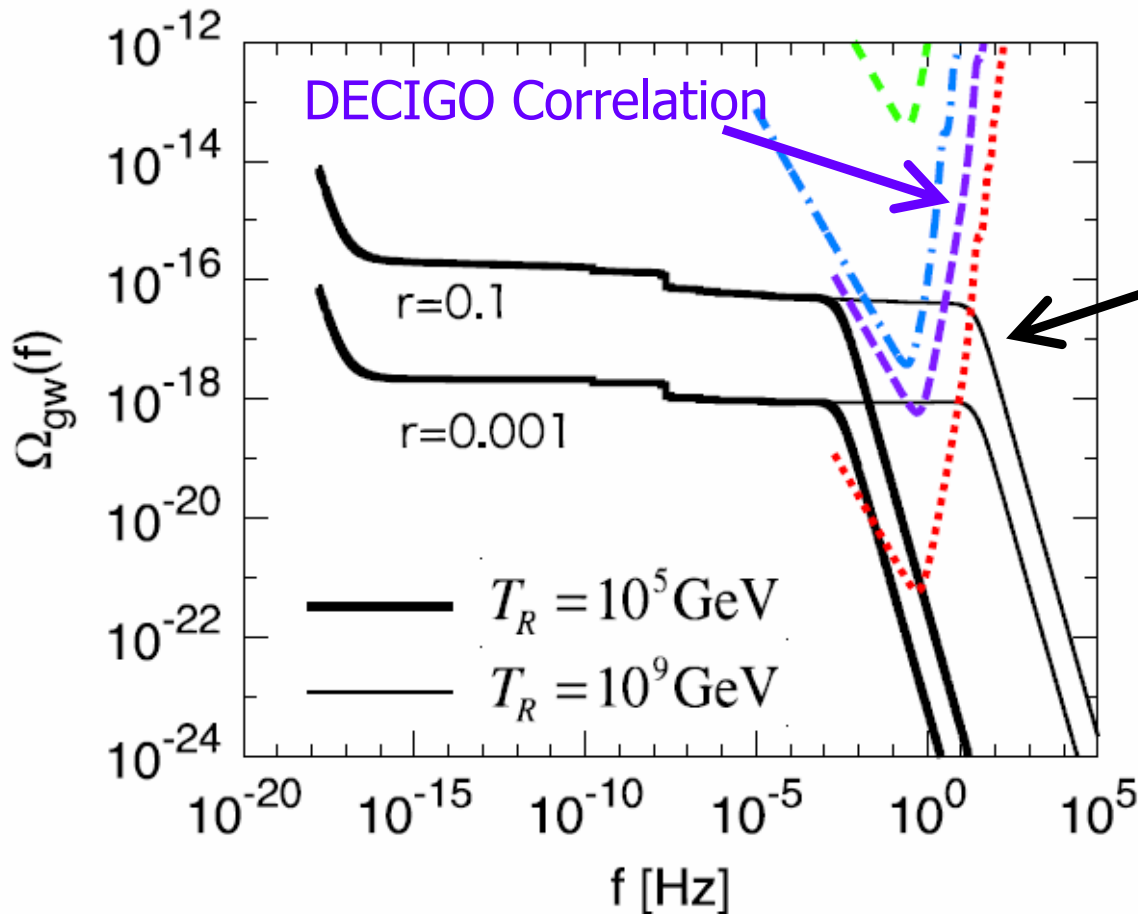
観測周波数と宇宙の時代が対応.
高周波数 → より初期宇宙の情報.
- Reheating温度(物質の種の形成)
- 宇宙の熱進化史

⇒ インフレーション期とBBN期の間の情報
→ CMB-B偏光観測と相補的な観測.

GW from Inflation

Energy density \propto Tensor-Scalar Ratio (r).

Power spectrum : Evolution history of the Universe.

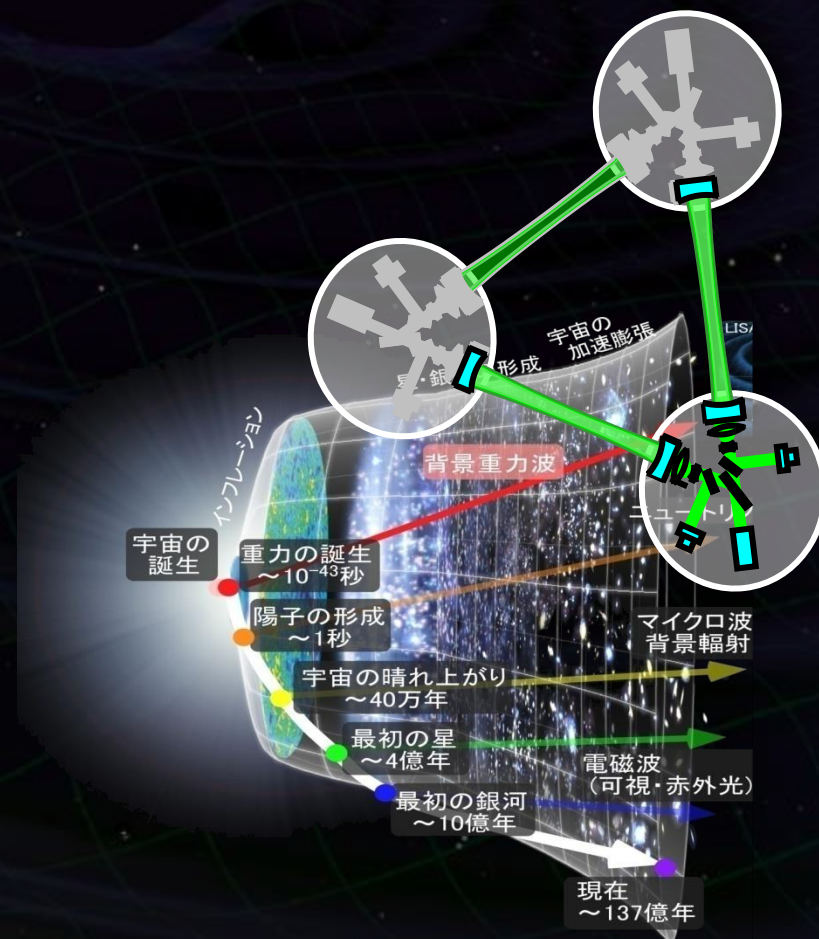


- Spectrum Power.
→ Energy scale of inflation
- Cut-off freq.
→ Energy scale of Reheating

Nakayama+,
Journal of Cosmology
and Astroparticle Physics
06 (2008) 020.

DECIGO (でさいご)

- 宇宙重力波望遠鏡 -



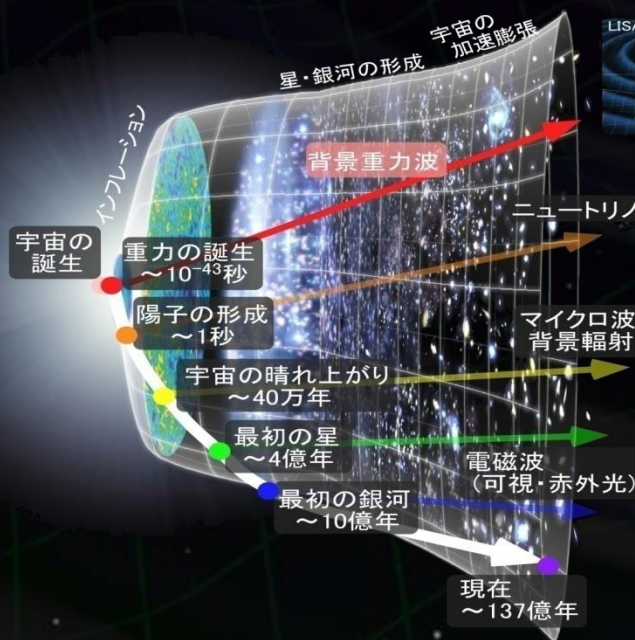
宇宙重力波望遠鏡 DECIGO



DECIGO (DECI-hertz interferometer
Gravitational wave Observatory)

宇宙のはじまりを直接観測する。

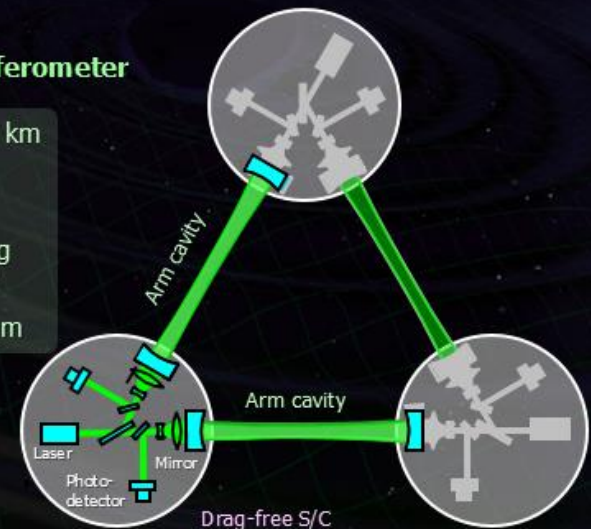
ビッグバン宇宙論において、空間・物質の種が、
いかに形成されたかを観測によって解き明かす。



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

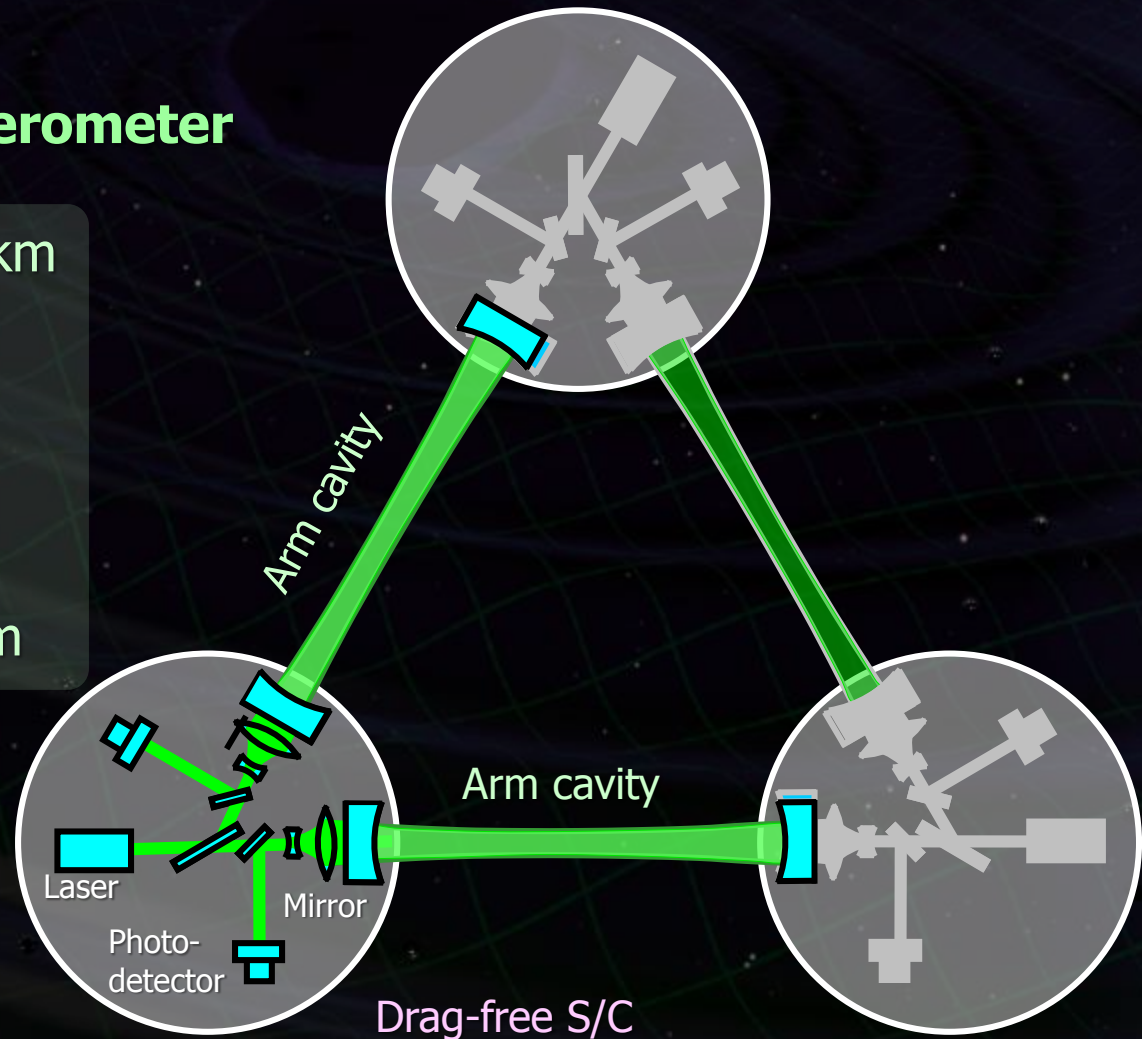
S/C: drag free
3 interferometers



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

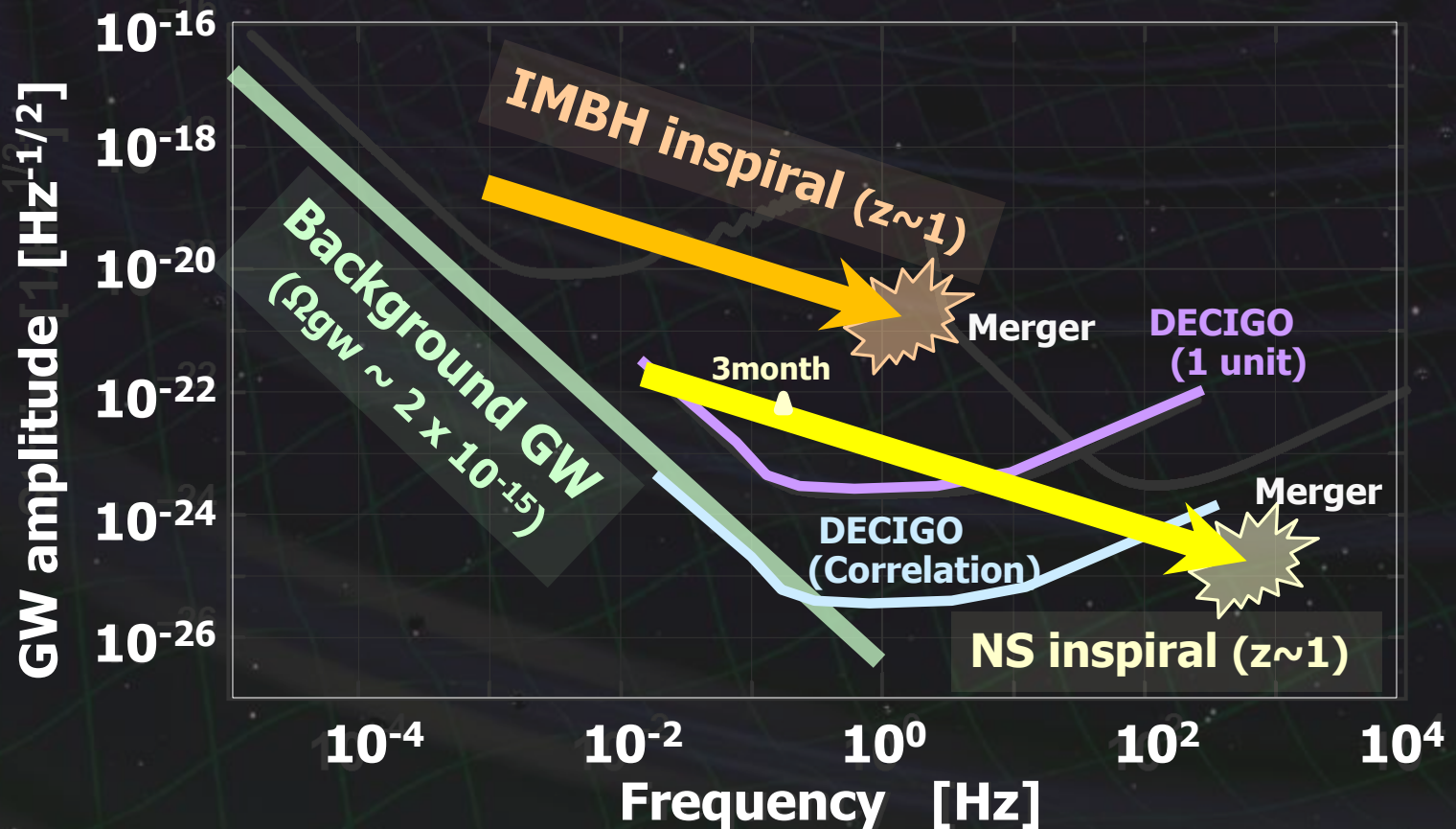


DECIGOの主な観測ターゲット

中間質量BH の連星合体
中性子星連星
背景重力波



大質量BHと銀河の形成
宇宙論パラメータ (Inflation, Dark energy)
基礎物理法則

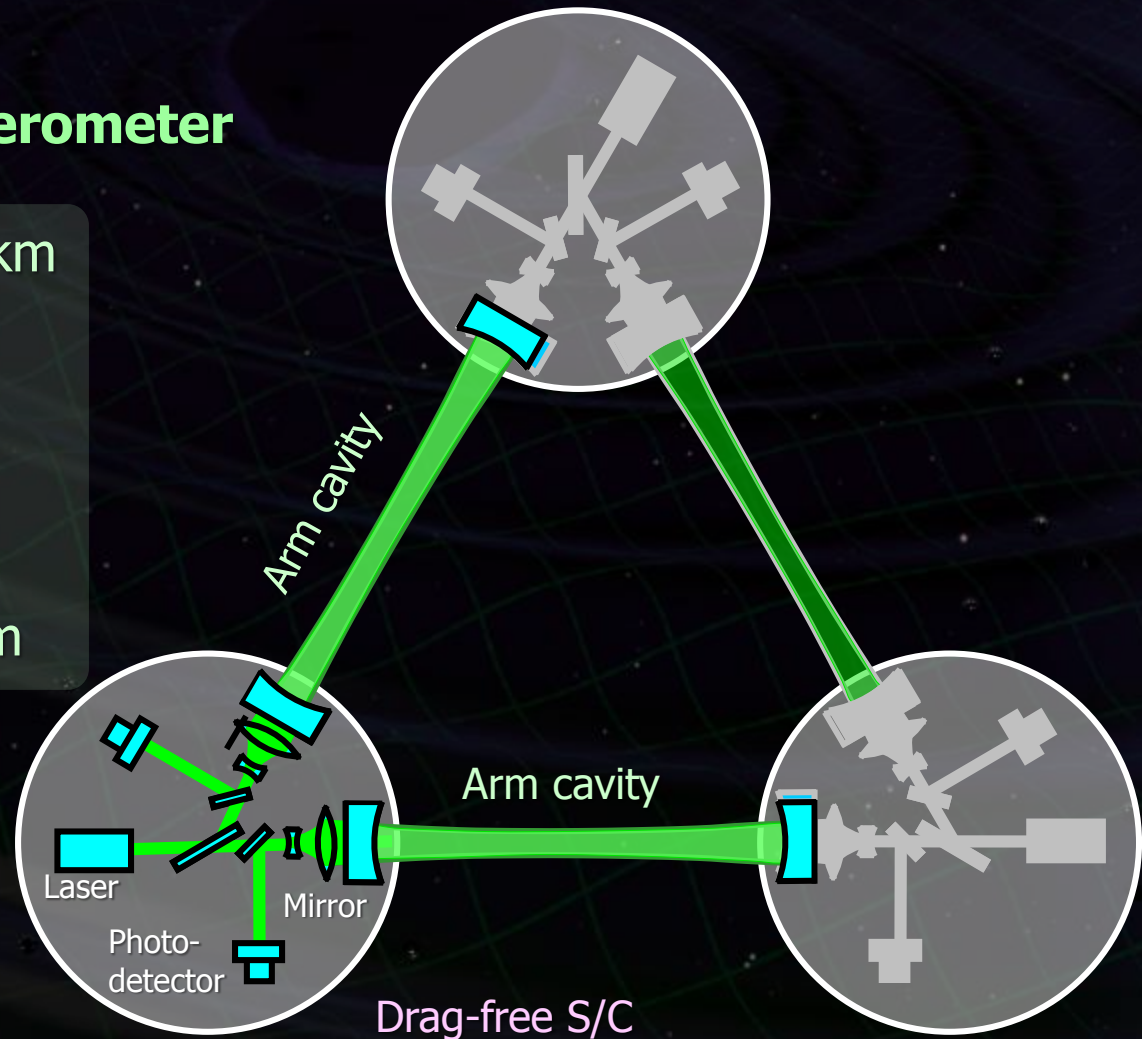


Interferometer Unit:

Differential FP interferometer

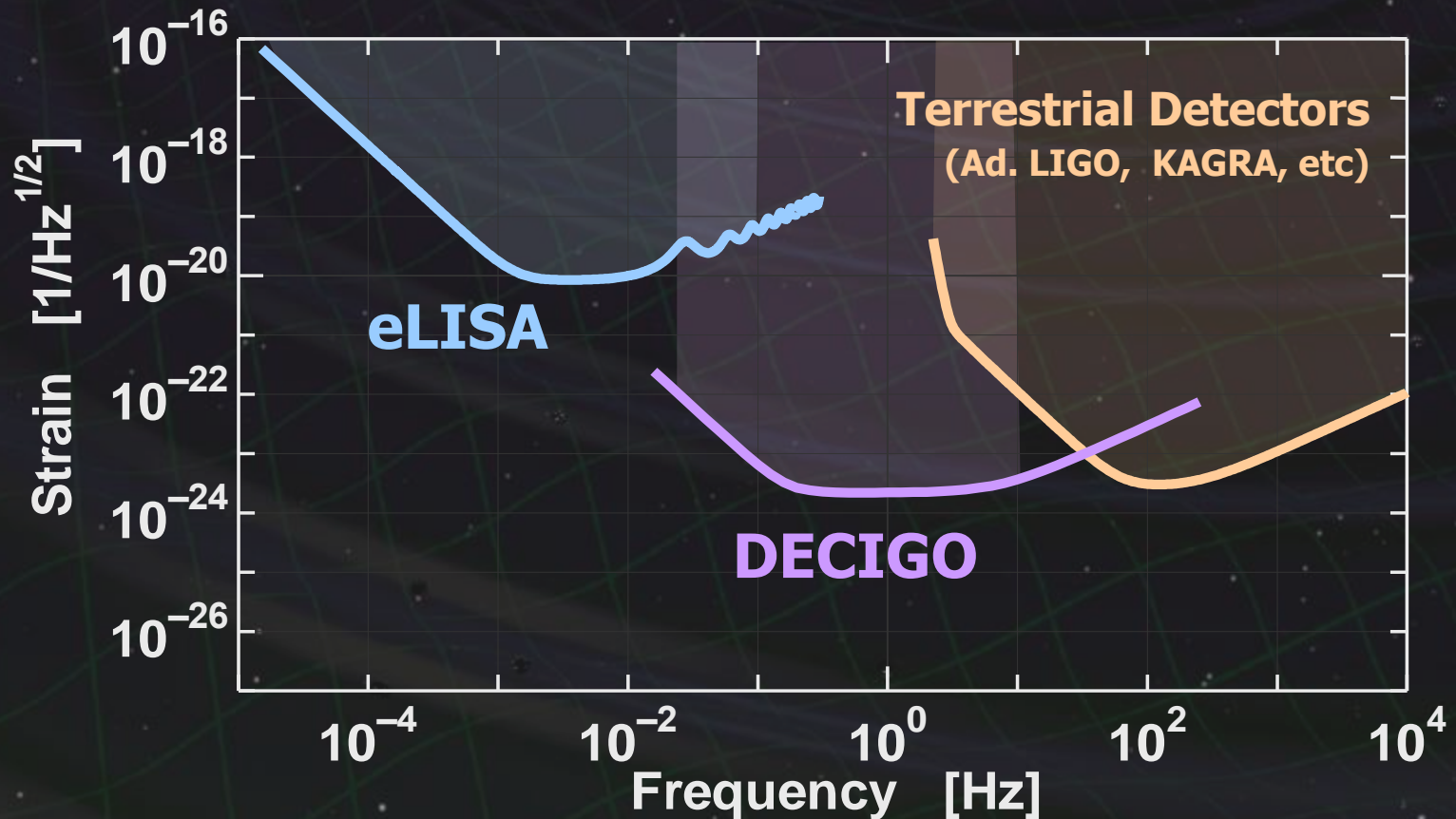
Arm length:	1000 km
Finesse:	10
Mirror diameter:	1 m
Mirror mass:	100 kg
Laser power:	10 W
Laser wavelength:	532 nm

S/C: drag free
3 interferometers



DECIGO (Deci-hertz interferometer Gravitational wave Observatory)

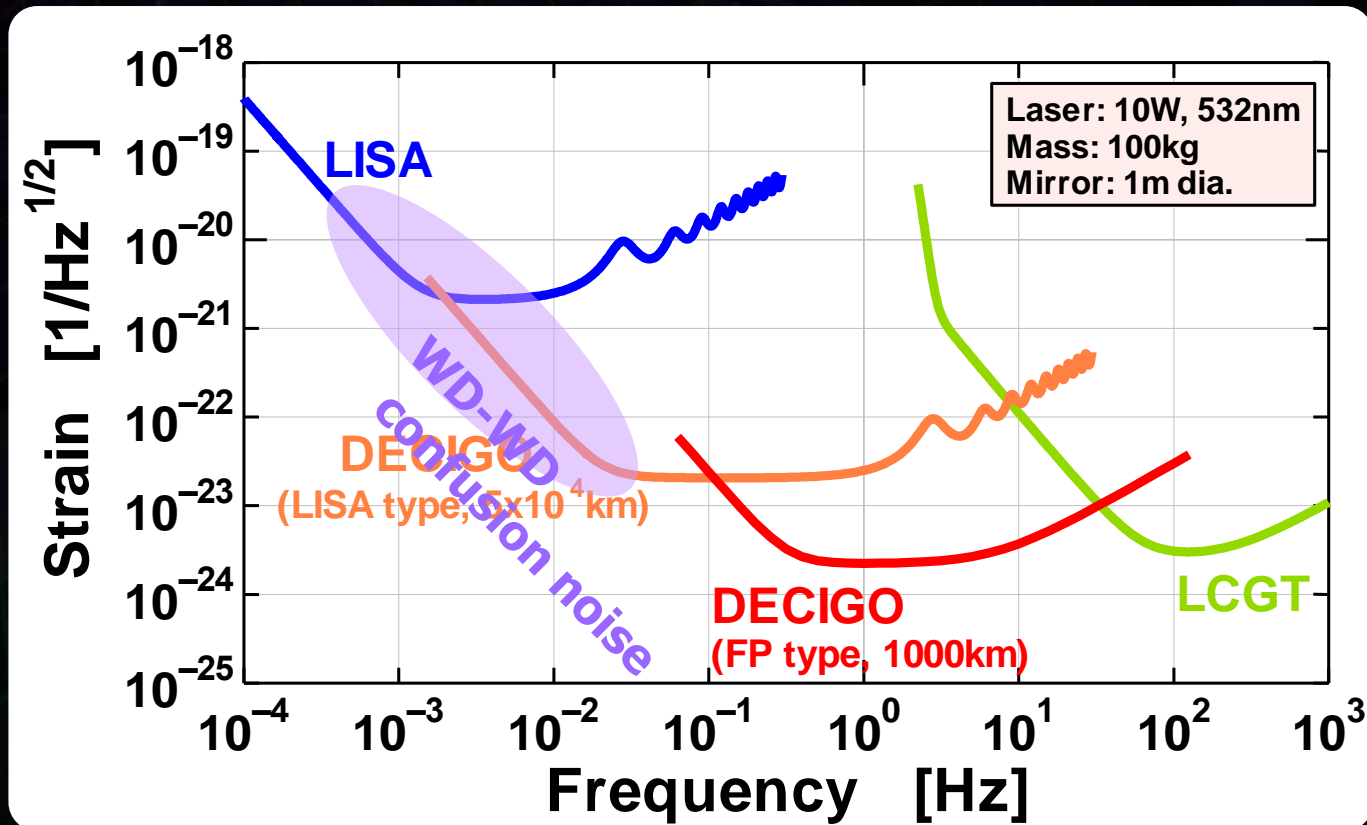
観測周波数 ~ 0.1 Hz \Rightarrow eLISA と 地上望遠鏡
の間の周波数帯



光トランスポンダー方式 VS 直接干渉方式

感度曲線と期待できるサイエンスの検討

➡ 決定要因: 連星による confusion noise



レーザー干渉計基線長

干渉計基線長：回折損失で制限されている

Effective reflectivity ($TEM_{00} \rightarrow TEM_{00}$)

Laser wavelength : 532nm

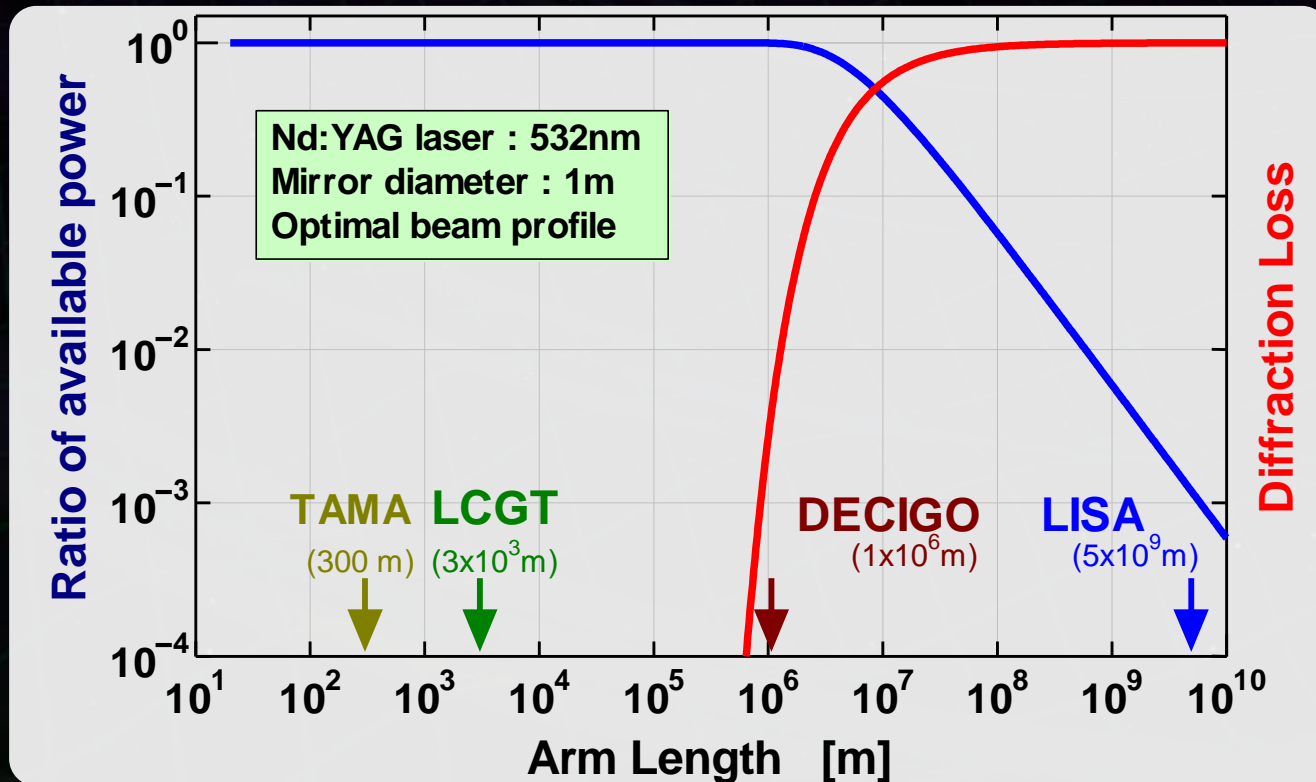
Mirror diameter: 1m

Optimal beam size



1000 km

がほぼ最大値



鏡間の距離 (光共振器長) の制御

干渉計出力信号 → 鏡の位置制御 (+レーザー周波数)

鏡と S/C の相対位置・角度変動

ローカルセンサ → S/C スラスタ (ドラッグフリー制御)

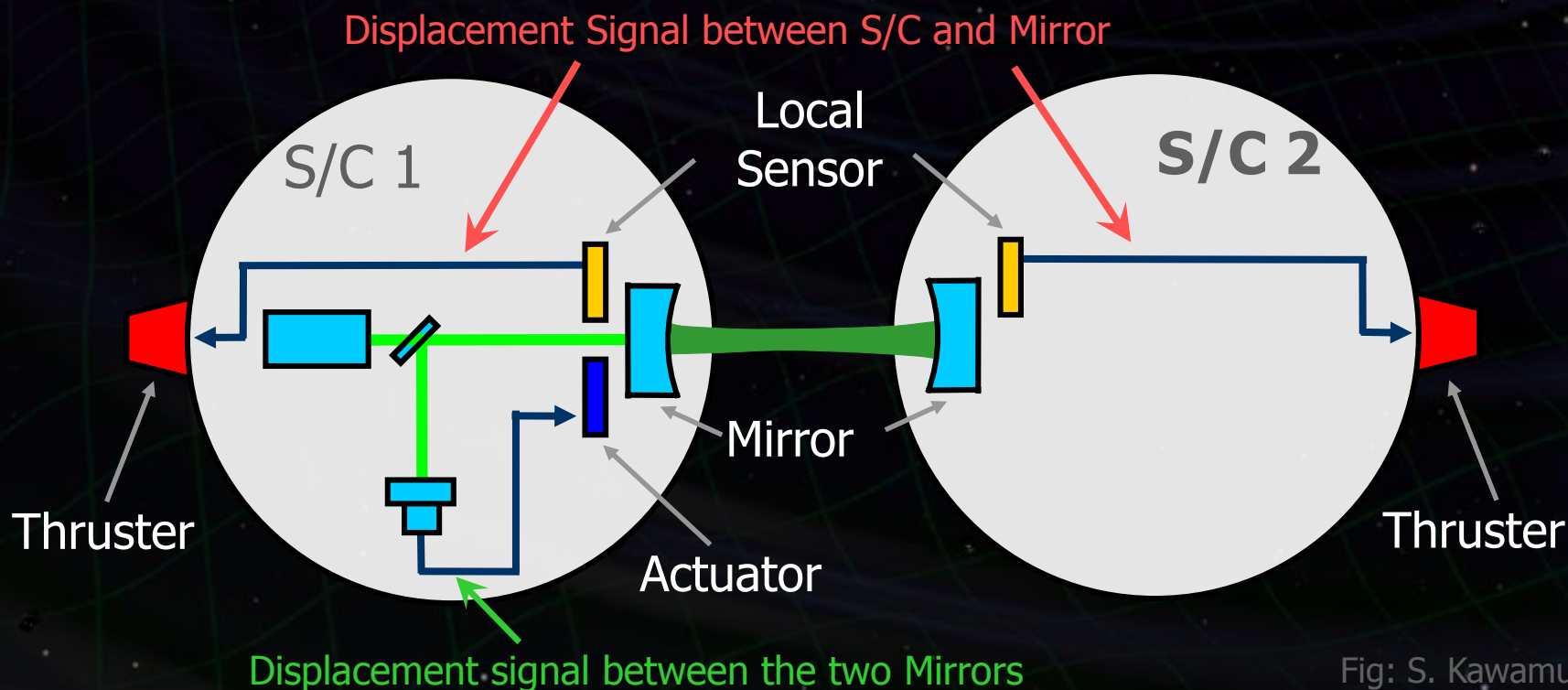


Fig: S. Kawamura

測距雑音

散射雑音 $3 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$ (0.1 Hz)

⇨ KAGRA より 10倍緩い要求.

他の雑音源は散射雑音以下に抑えられなければならない

Laser freq. noise: $1 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ (1Hz)

Stab. Gain 10^5 , CMRR 10^5

加速度雑音

試験マスへの外力雑音 $4 \times 10^{-17} \text{ N/Hz}^{1/2}$

(0.1 Hz) ⇨ x 1/50 of LISA

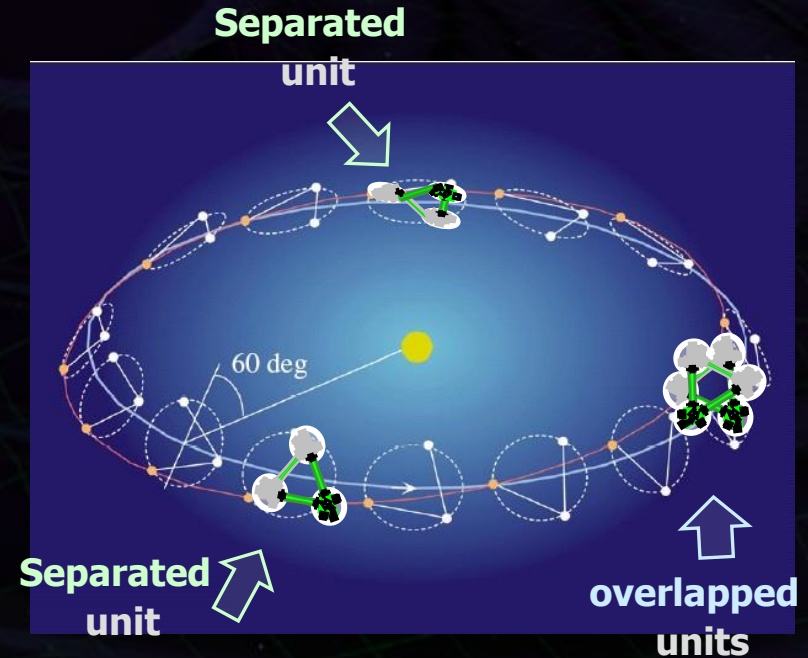
外乱雑音源

磁場変動雑音, 電場雑音, 重力場変動雑音,
温度変動, 熱輻射, 残留気体の衝突,

軌道の候補

候補：太陽周りのレコード盤軌道

Relative acc. $4 \times 10^{-12} \text{ m/s}^2$
(Mirror force $\sim 10^{-9} \text{ N}$)



編隊構成

4つの干渉計ユニット

2 overlapped units → Cross correlation

2 separated units → Angular resolution

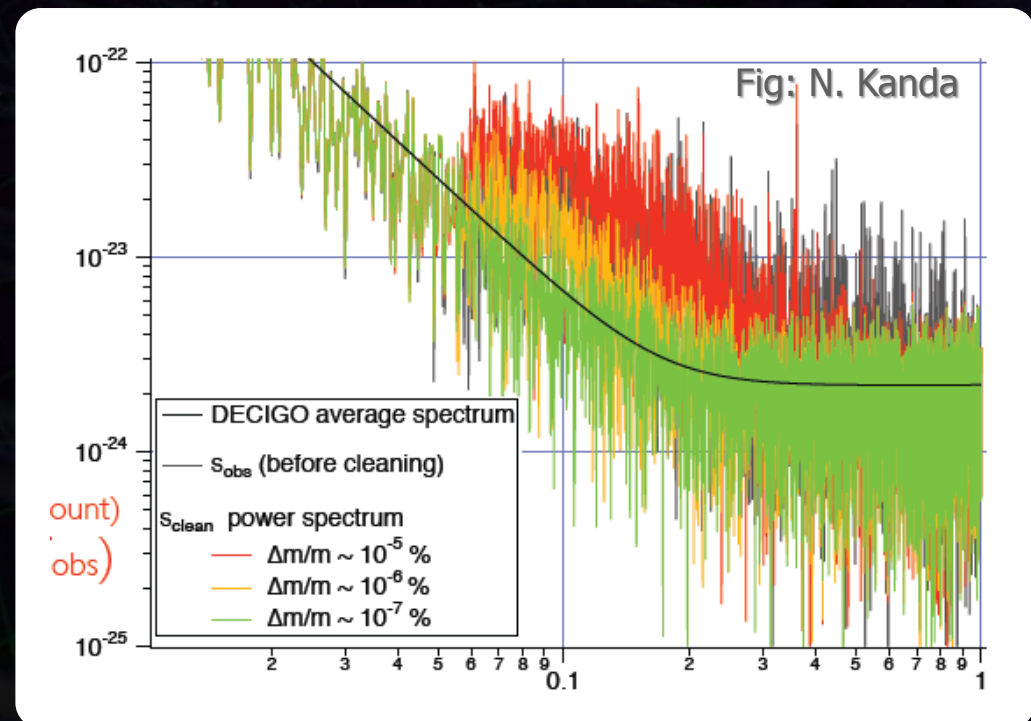
DECIGOの観測周波数帯: WD binary foreground はない。
→ 宇宙論的観測にひらけた「窓」

DECIGOは $\sim 10^5$ 個の
連星中性子星を観測。

⇒ **GWBへのフォアグラウンドになり得る。**

原理的にはそれらを特定し、差し引くことが可能。

ただし、高い精度要求
 $\Delta m/m < \sim 10^{-7} \%$



Considering “Conceptual design”

By T.Akutsu

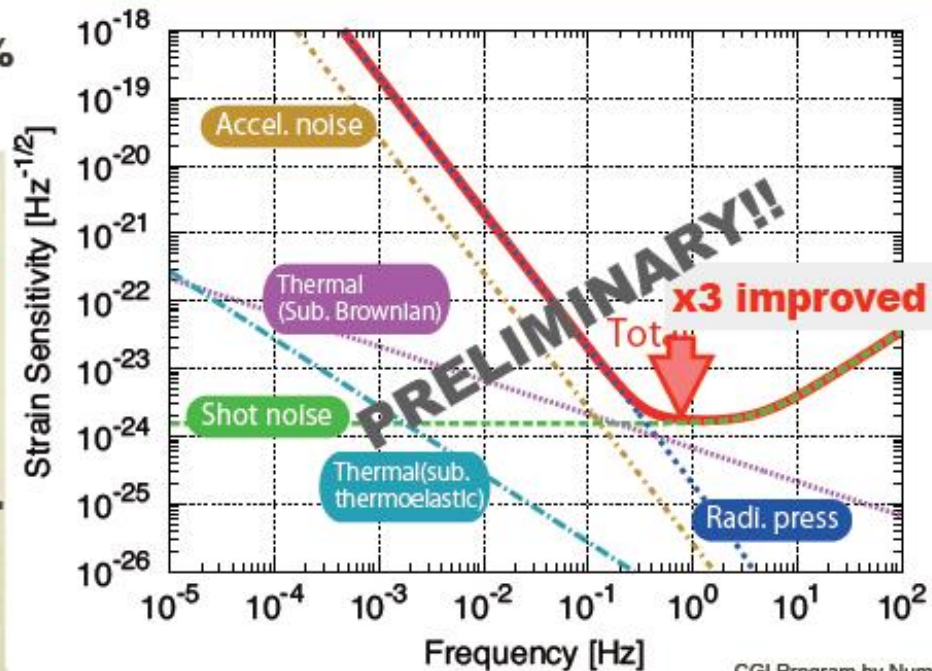
- Arm length: **1,500 km**
- Laser power: **30 W**
- Laser wavelength: **532 nm**
- Mirror diameter: **1.5 m**
- Mirror mass: **100 kg**
- Mirror reflectivity: **77.3%**
- Cavity g-param: **0.1**

Preliminary
 Parameters tuned

This is the first step to considering the **conceptual design**.

Next:

- ➔ Confirm the calculations.
- ➔ Find the realistic way to realize this!



以上