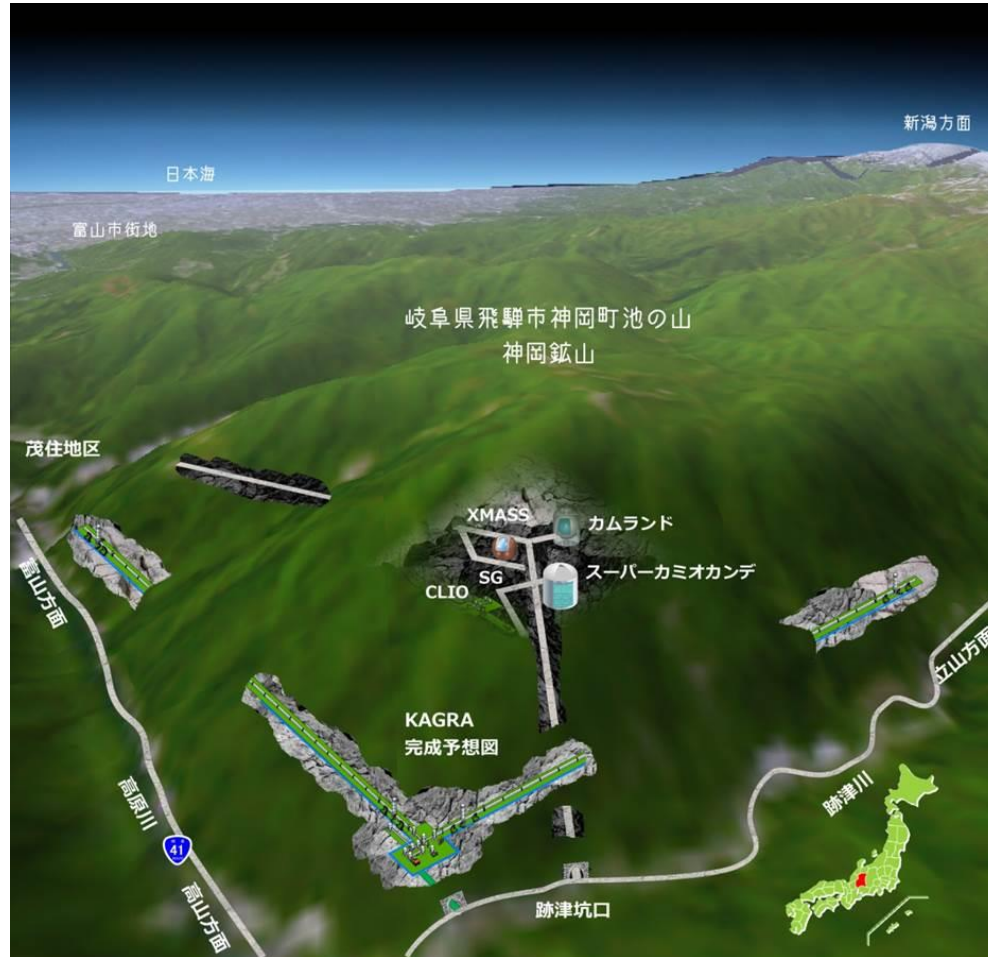


# 重力波天文学 – KAGRAがめざすところ –



# 重力波とは？

- **一般相対性理論が予言した重力の波**
- 時空の歪が光速で伝わる
- 電磁波によく似ている
- とても微弱な波である
- 激しい天体現象で発生

## アインシュタイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時間空間の幾何学  
(曲がり)を表す量

物質を  
表す量

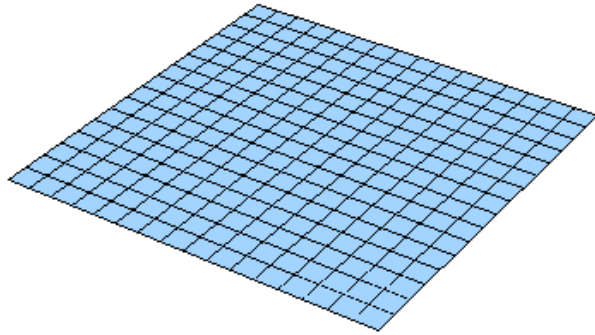
# 重力の概念の変更

ニュートン重力

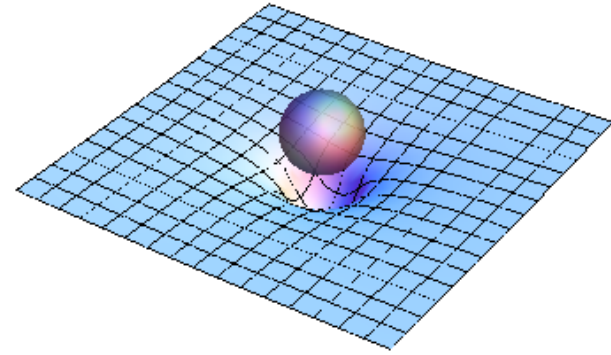


アインシュタイン重力

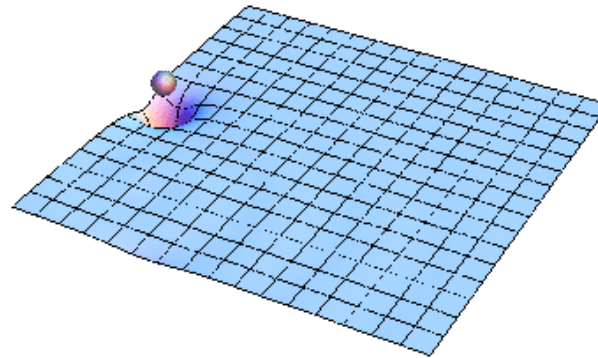
# 曲がった時空から重力波へ



平坦な時空 (特殊相対性理論)



曲がった時空 (一般相対性理論)

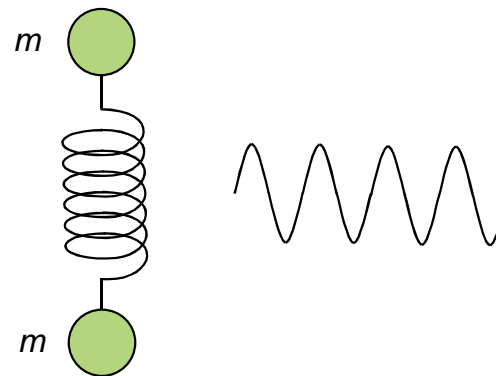
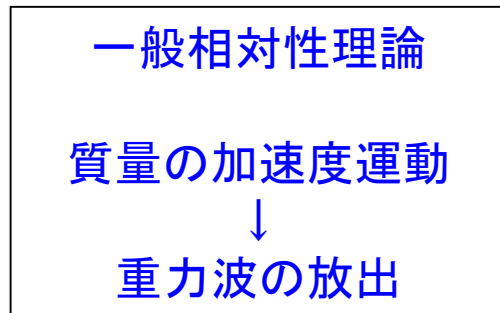
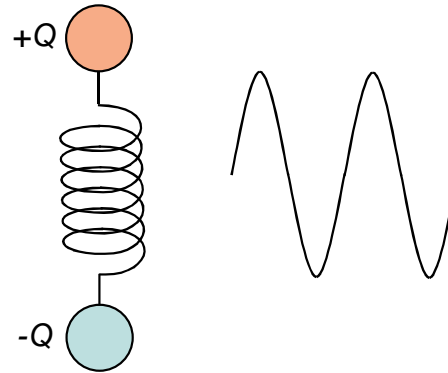
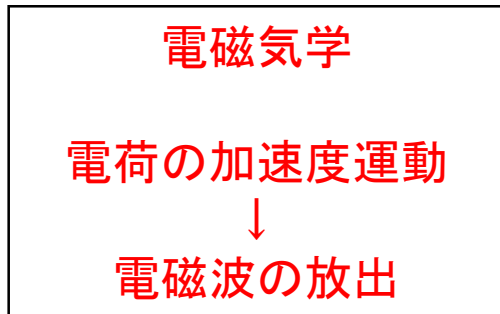


重力波

# 重力波とは？

- 一般相対性理論が予言する重力の波
- **時空の歪が光速で伝わる**
- **電磁波によく似ている**
- とても微弱な波である
- 激しい天体現象で発生

# 電磁波と重力波

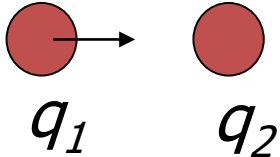


# 重力波とは？

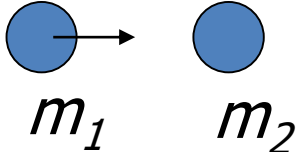
- 一般相対性理論が予言する重力の波
- 時空の歪が光速で伝わる
- 電磁波によく似ている
- **とても微弱な波である**
- 激しい天体現象で発生



# 電磁力と重力

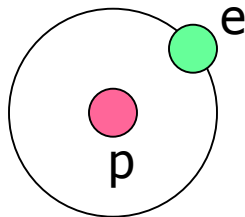
電磁力  
(クーロン力) 

$$f_{\text{Coulomb}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

重力  
(万有引力) 

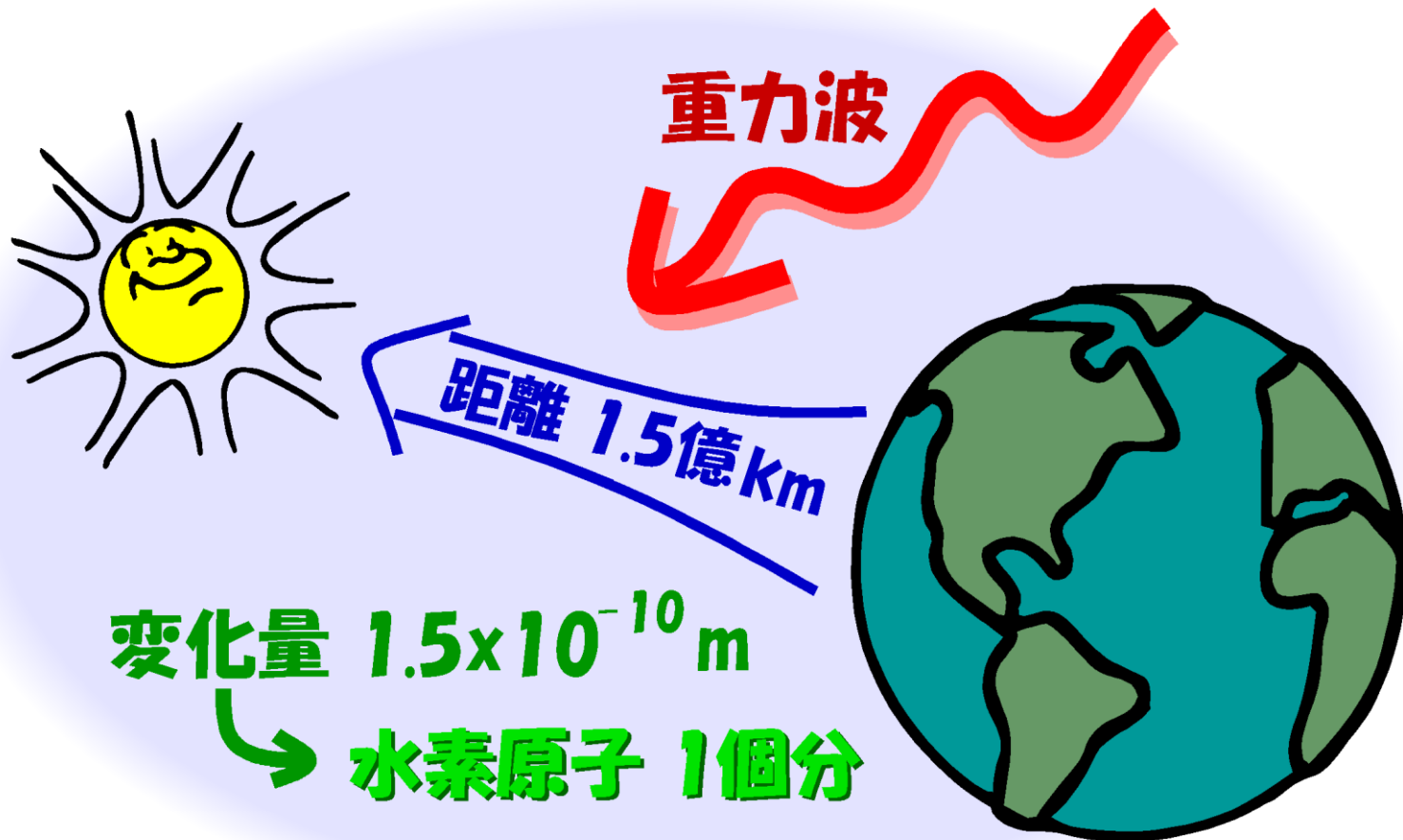
$$f_{\text{Newton}} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

水素原子



$$\frac{f_{\text{Coulomb}}}{f_{\text{Newton}}} = 2.2 \times 10^{39}$$

# 重力波の大きさ

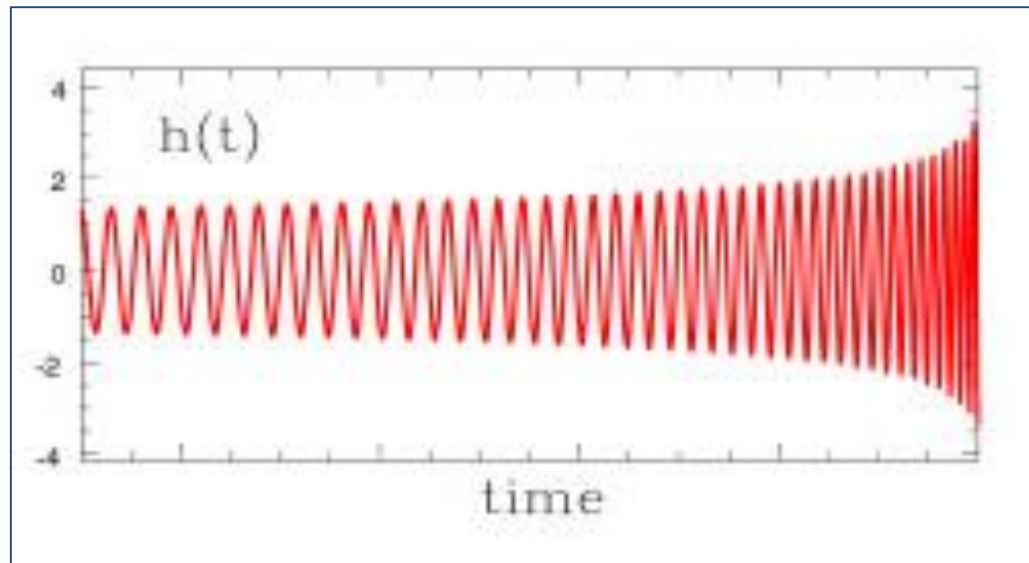


$$h = \Delta L / L = 10^{-21}$$

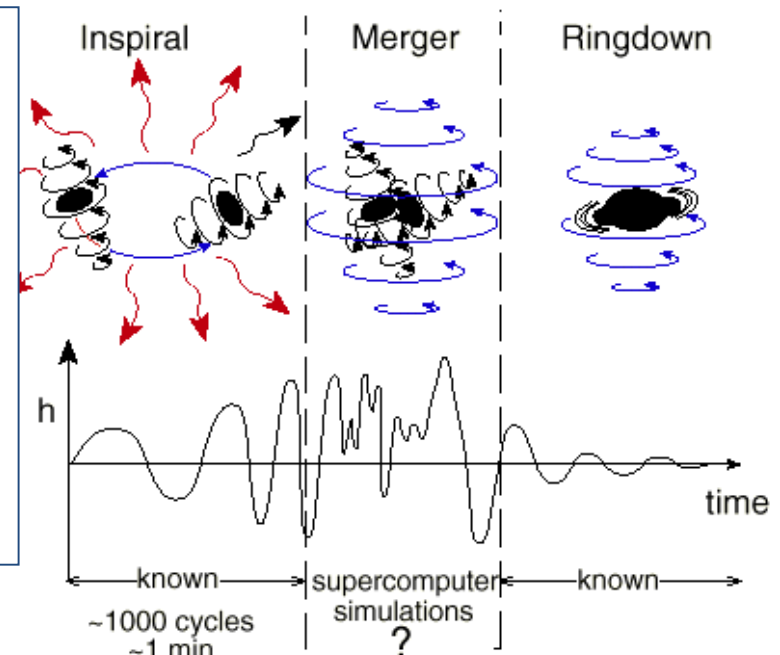
# 重力波とは？

- 一般相対性理論が予言する重力の波
- 時空の歪が光速で伝わる
- 電磁波によく似ている
- とても微弱な波である
- **激しい天体現象で発生**

# 連星中性子星の合体(ブラックホール誕生)



チャープ波形



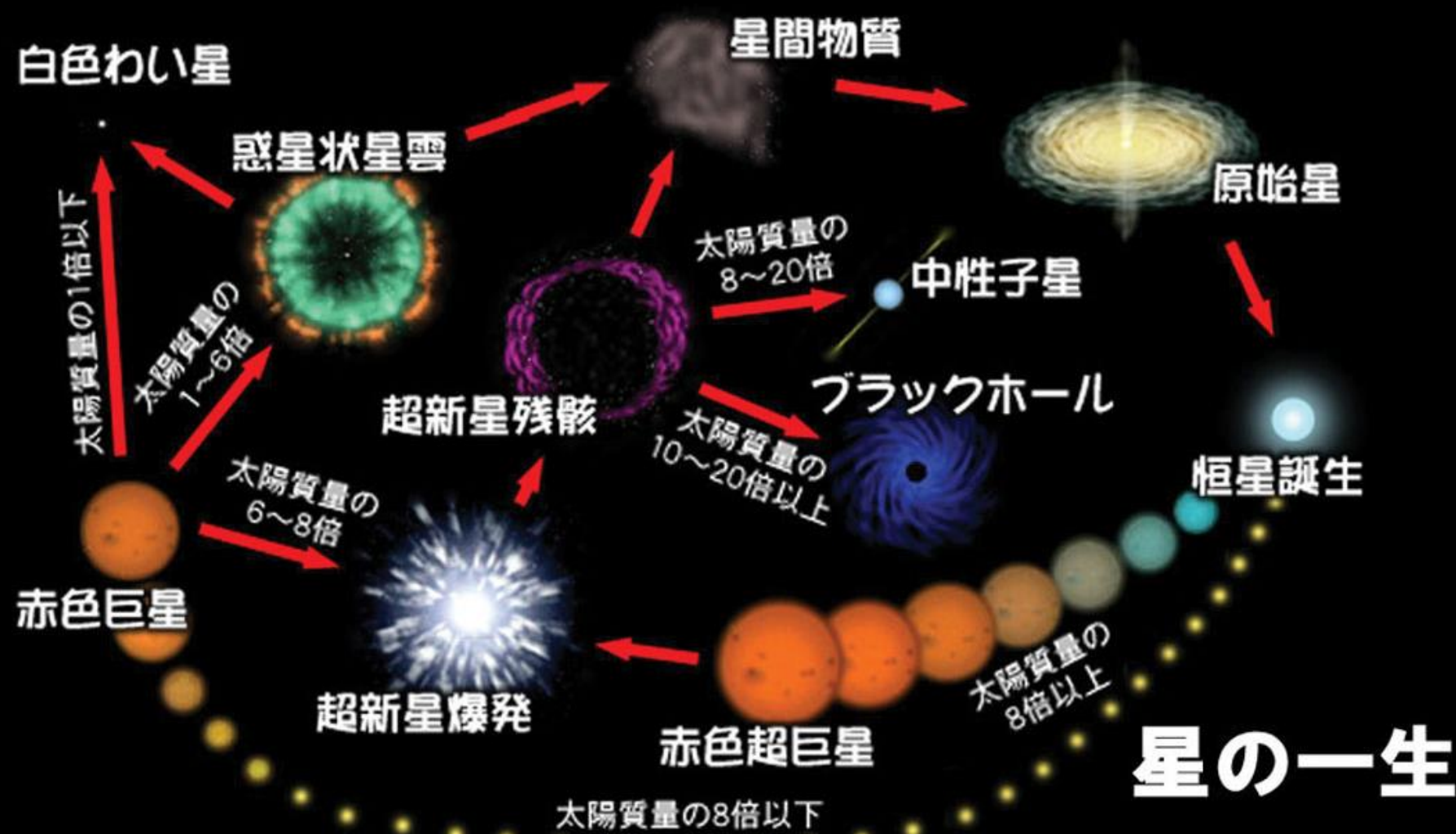
周波数帯: 100Hz ~ 2kHz (ちょうど耳で聞こえる領域)

## PPN(Parameterized Post Newtonian) パラメタ

$$(d\tau)^2 = -\left[1 - \frac{2GM}{c^2 r} + 2\beta\left(\frac{2GM}{c^2 r}\right)^2 + \dots\right]c^2 dt^2 \\ + \left[1 + \gamma\frac{2GM}{c^2 r} + \dots\right](dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$$\beta = \gamma = 1 \quad (\text{Schwarzschild})$$

# 重力波源はどのようなものか？



[https://staff.aist.go.jp/r-morijiri/MyHome2016/bakusou/center/tenmon02.html#back\\_hr](https://staff.aist.go.jp/r-morijiri/MyHome2016/bakusou/center/tenmon02.html#back_hr)



# 超新星爆発



© 2004 Thomson/Brooks Cole

- 超新星は稀な出来事である。(数十年に一回)
- 1987年に大マゼラン星雲で発生した超新星は、ニュートリノで観測された唯一の例。

# 中性子星

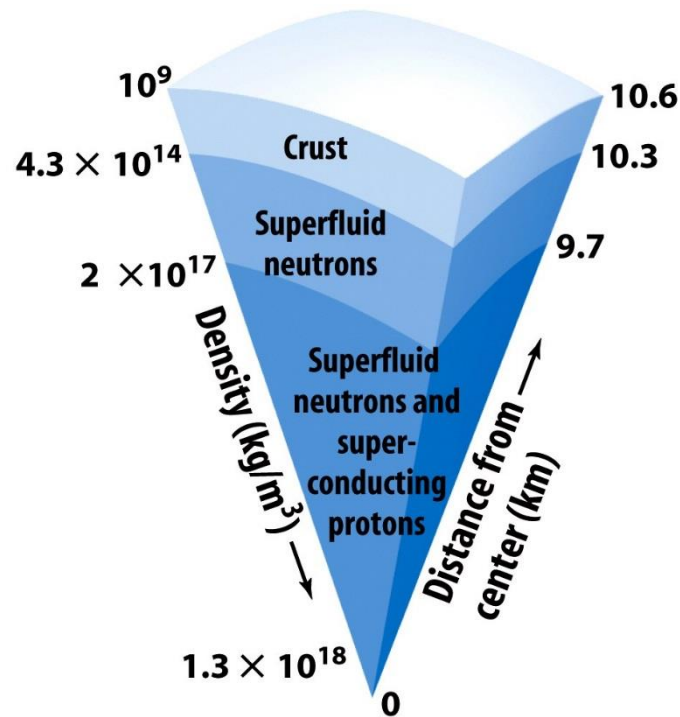


Figure 13-22  
Discovering the Universe, Eighth Edition  
© 2008 W.H. Freeman and Company

- 中性子星はとても小さく、半径10kmほどの星である。百万度以上の高温で密度は1ccで数億トンにもなる。

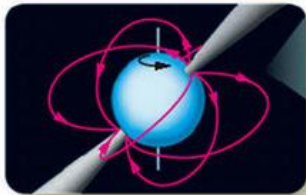


# 中性子星

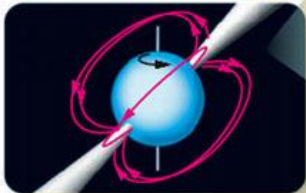
## Neutron Star Rotation with Beams



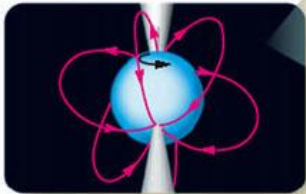
The pulsing of a lighthouse is actually caused by the rotation of beams of light.



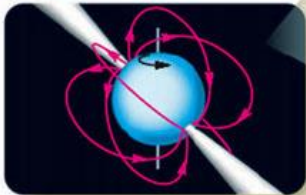
As in the case of Earth, the magnetic axis of a neutron star could be inclined to its rotational axis.



The rotation of the neutron star will sweep its beams around like beams from a lighthouse.



While a beam points roughly toward Earth, observers detect a pulse.



While neither beam is pointed toward Earth, observers detect no energy.

© 2007 Thomson Higher Education

- 中性子星は、**パルサー**として見つかった。高速回転する中性子星が灯台のように電波を発しているのがパルサーである。

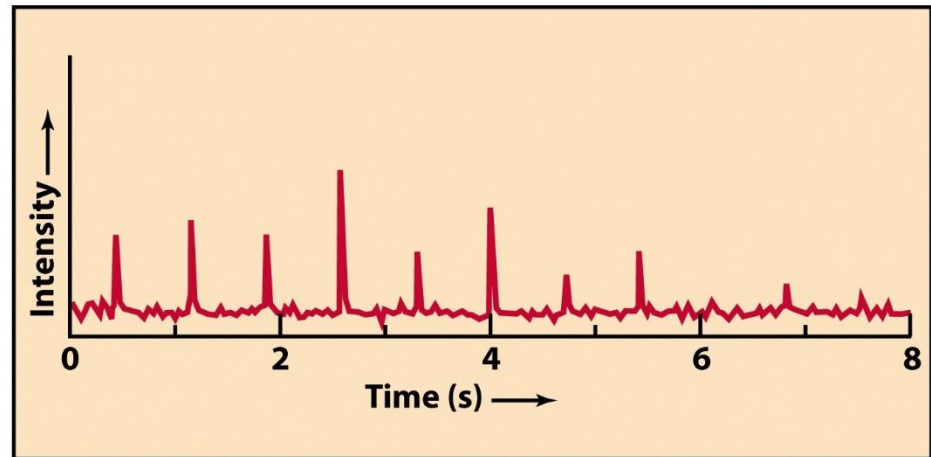


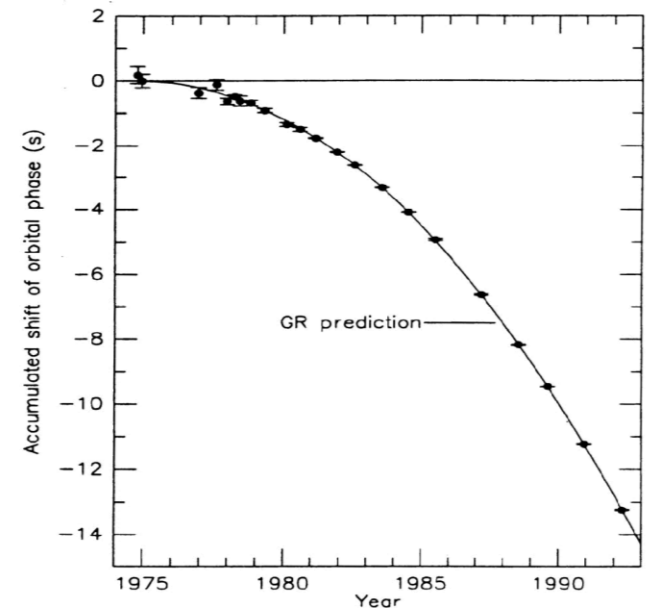
Figure 13-18  
Discovering the Universe, Eighth Edition  
© 2008 W. H. Freeman and Company

# 重力波の間接的証明

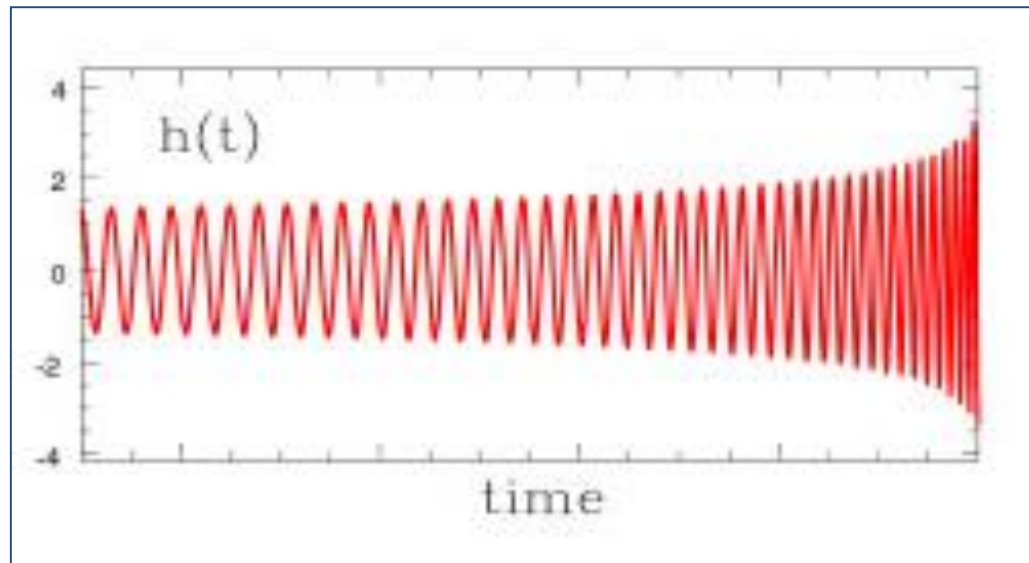
- テイラーとハルス(大学院生)、連星パルサーPSR1913+16の公転周期を丹念に測定
- 公転の周期が短くなっていくのを発見
- 重力波によるエネルギーの放出で説明できる
- 1993年ノーベル賞受賞



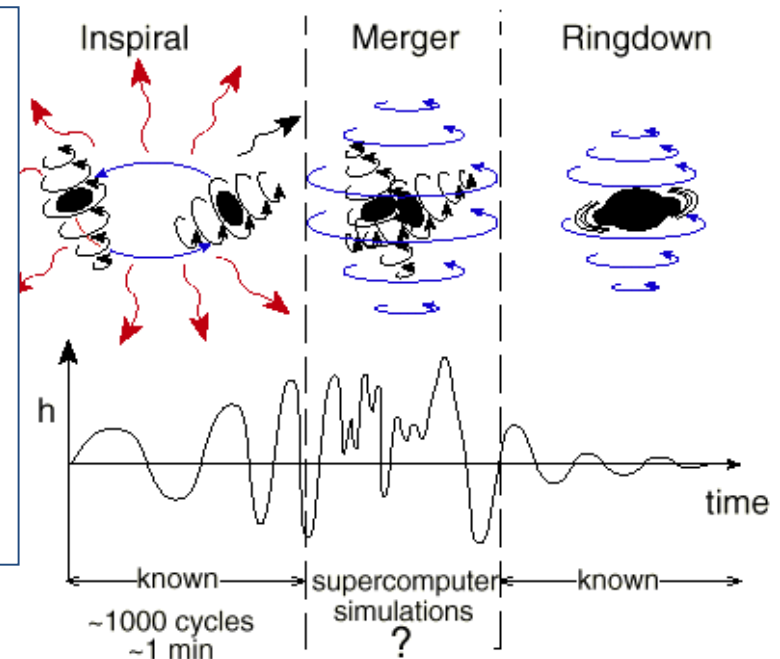
アレシボ電波望遠鏡 直径305m



# 連星中性子星の合体(ブラックホール誕生)

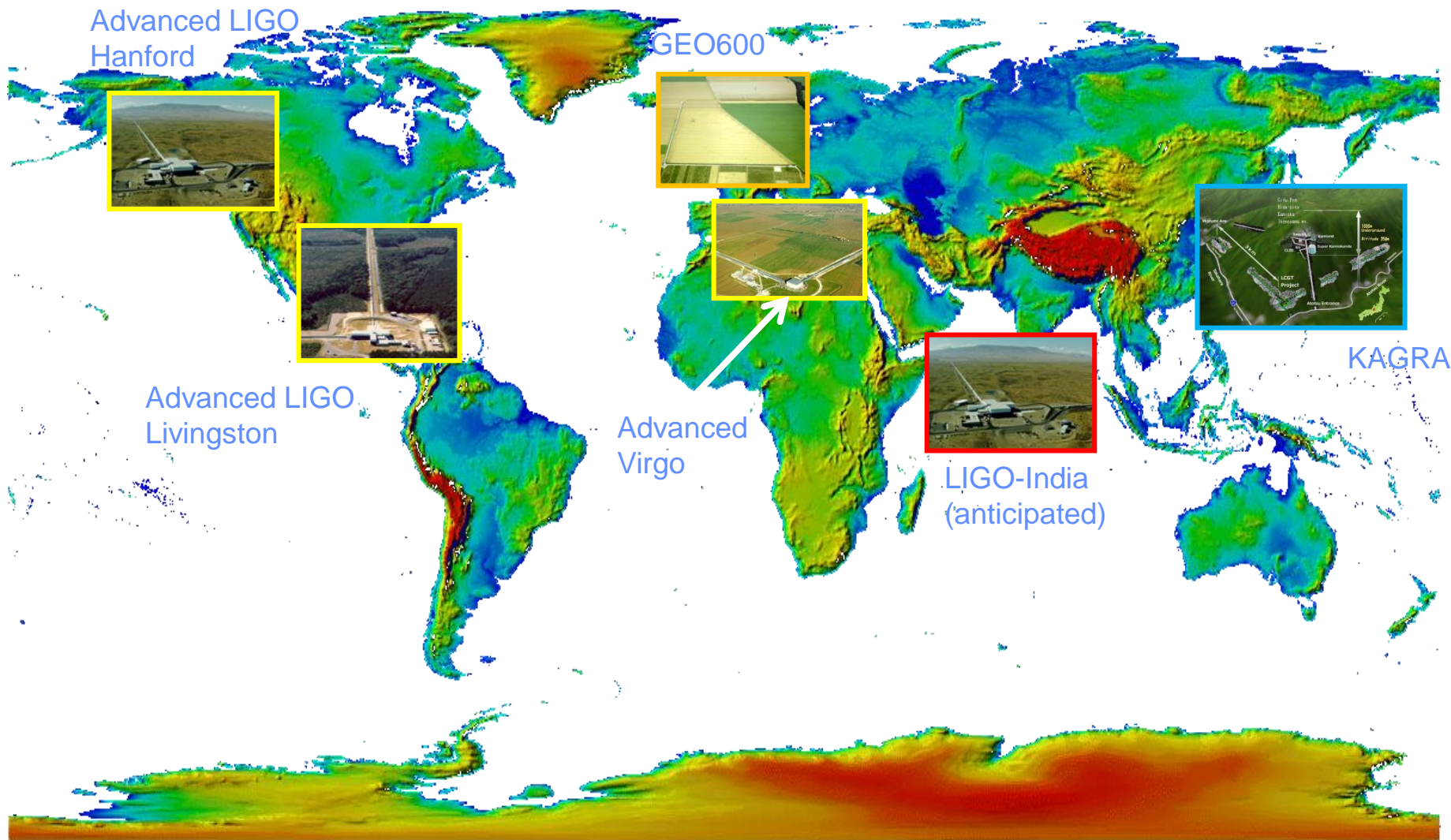


チャープ波形



PSR1913+16は3億年後に合体し、ブラックホールになる

# 世界の重力波望遠鏡





# LIGO (基線長4km、東西海岸に各一台)



# ついに重力波が直接検出されました

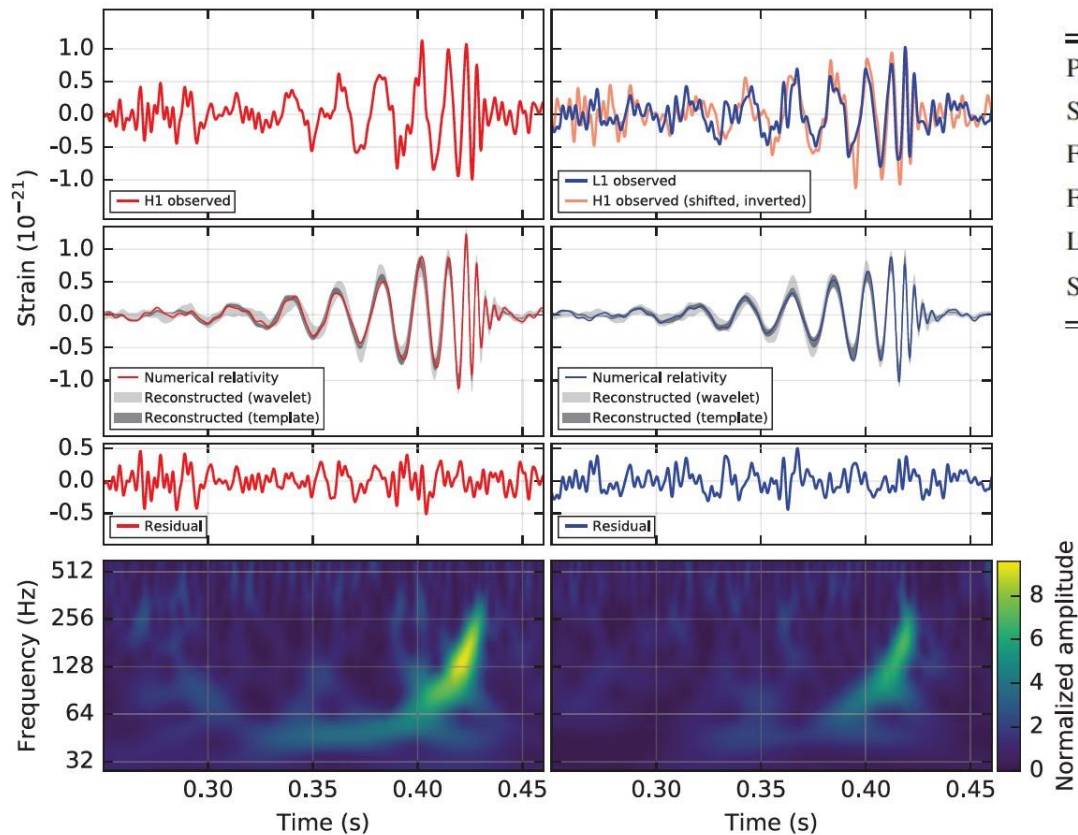


ワシントンでの記者会見の様子(2016. 2. 11)



# 連星ブラックホールからの重力波

## GW150914



Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180}$ Mpc
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

LIGOのスライドより

### ブラックホール連星合体の重力波形

<https://www.ligo.caltech.edu/video/ligo20160211v2>

# 初代星起源連星ブラックホール

- 36太陽質量+29太陽質量の連星ブラックホール(BBH)
- 一方、従来X線連星で観測されてきたBH候補天体は～10太陽質量  
→今まで観測されたBHより2-3倍重い

このBBHの起源を説明するために様々な説が提唱されている

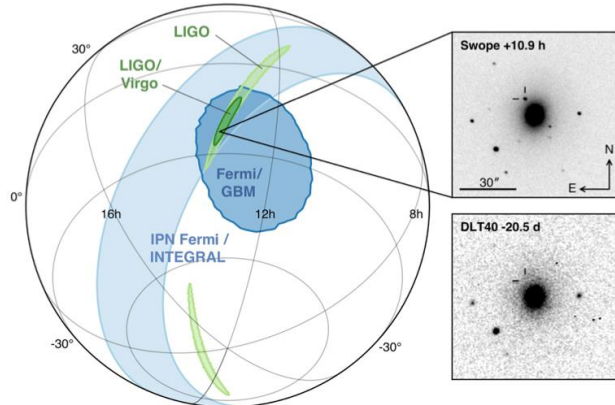
- 低金属量星(種族Ⅱ星)起源
- 初代星(種族Ⅲ星)起源
- 星団起源
- 原始BH起源
- .....

連星として生まれてきた  
低金属な星起源



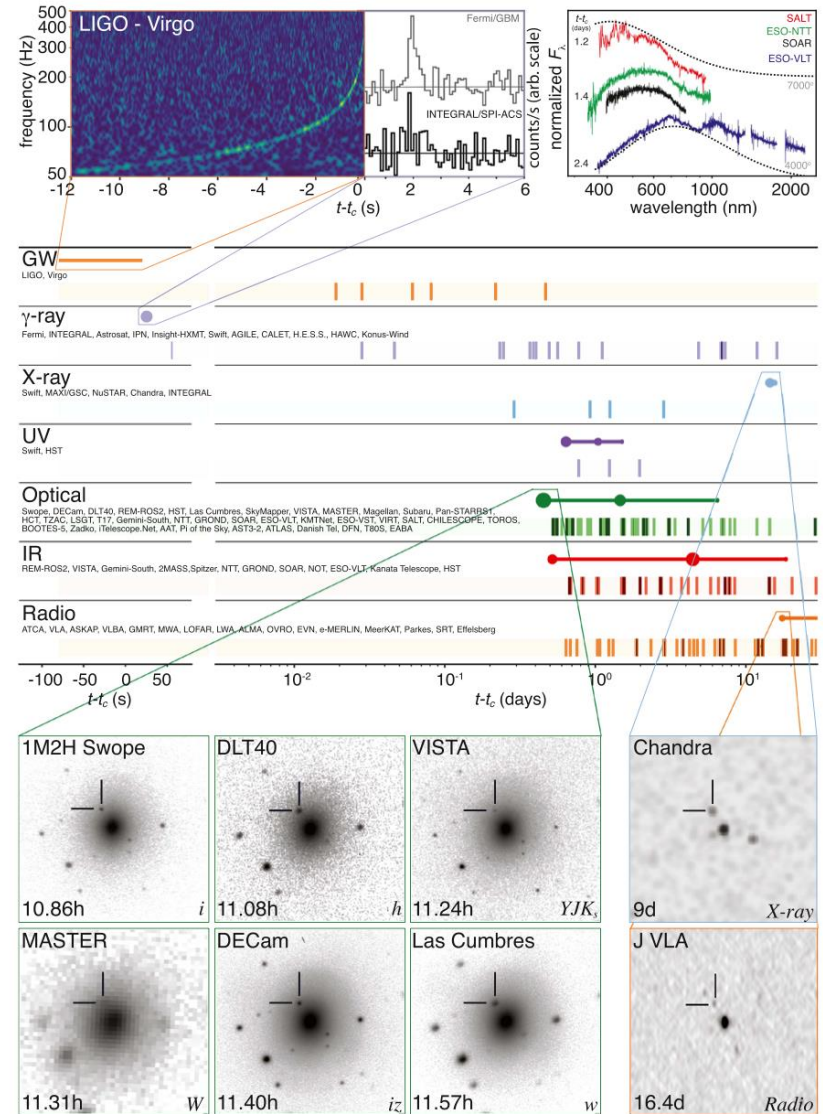
# 連星中性子星合体もとられました

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20



**Figure 1.** Localization of the gravitational-wave, gamma-ray, and optical signals. The left panel shows an orthographic projection of the 90% credible regions from LIGO (190 deg<sup>2</sup>; light green), the initial LIGO-Virgo localization (31 deg<sup>2</sup>; dark green), IPN triangulation from the time delay between *Fermi* and *INTEGRAL* (light blue), and *Fermi*-GBM (dark blue). The inset shows the location of the apparent host galaxy NGC 4993 in the Swope optical discovery image at 10.9 hr after the merger (top right) and the DLT40 pre-discovery image from 20.5 days prior to merger (bottom right). The reticle marks the position of the transient in both images.

Abbott et al.

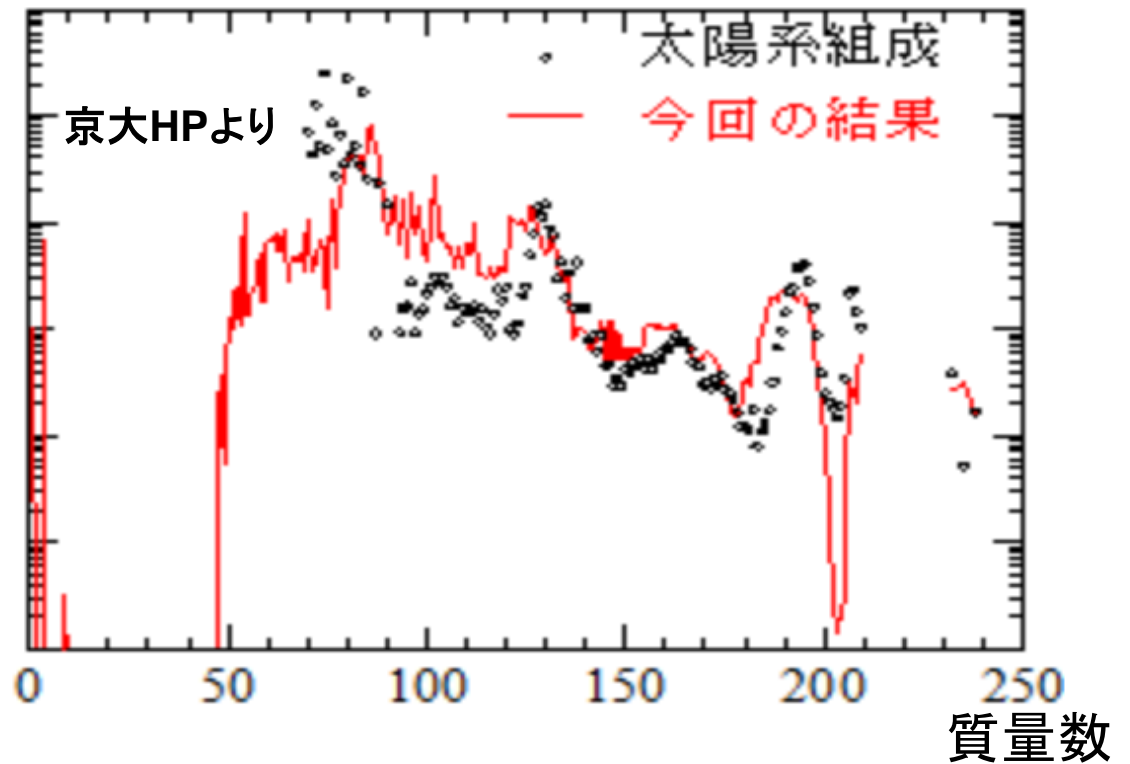
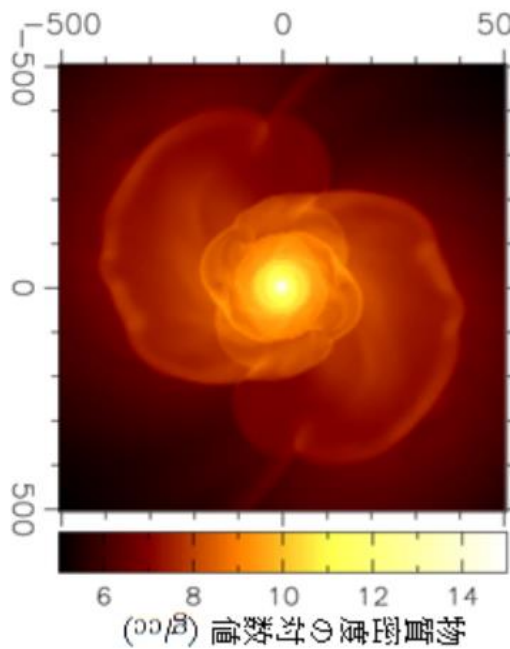
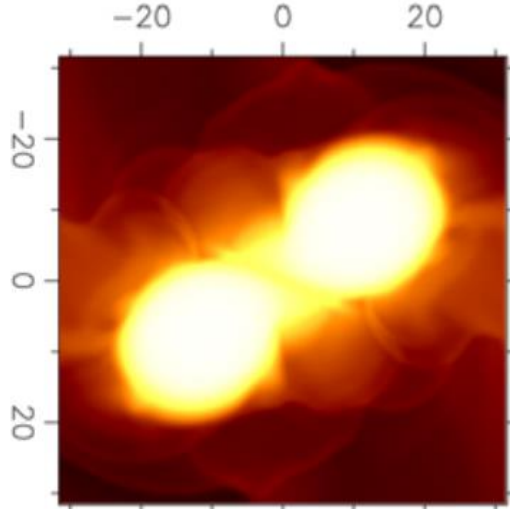


GW170817  
 GRB170817A  
 SSS17a / AT2017gfo  
 マルチメッセンジャー観測

一般相対論と原子核データを用いた  
中性子星連星の合体シミュレーション

# 重元素の起源は 中性子星合体か？

超新星爆発では、重元素を作るための中性子の量が足りない  
中性子星合体だと説明できる 和南城(京大)ほか 2014



今回の中性子星合体から重元素の信号が観測

スプリングスタウンの仮説が証明された！

# 核図表と元素合成

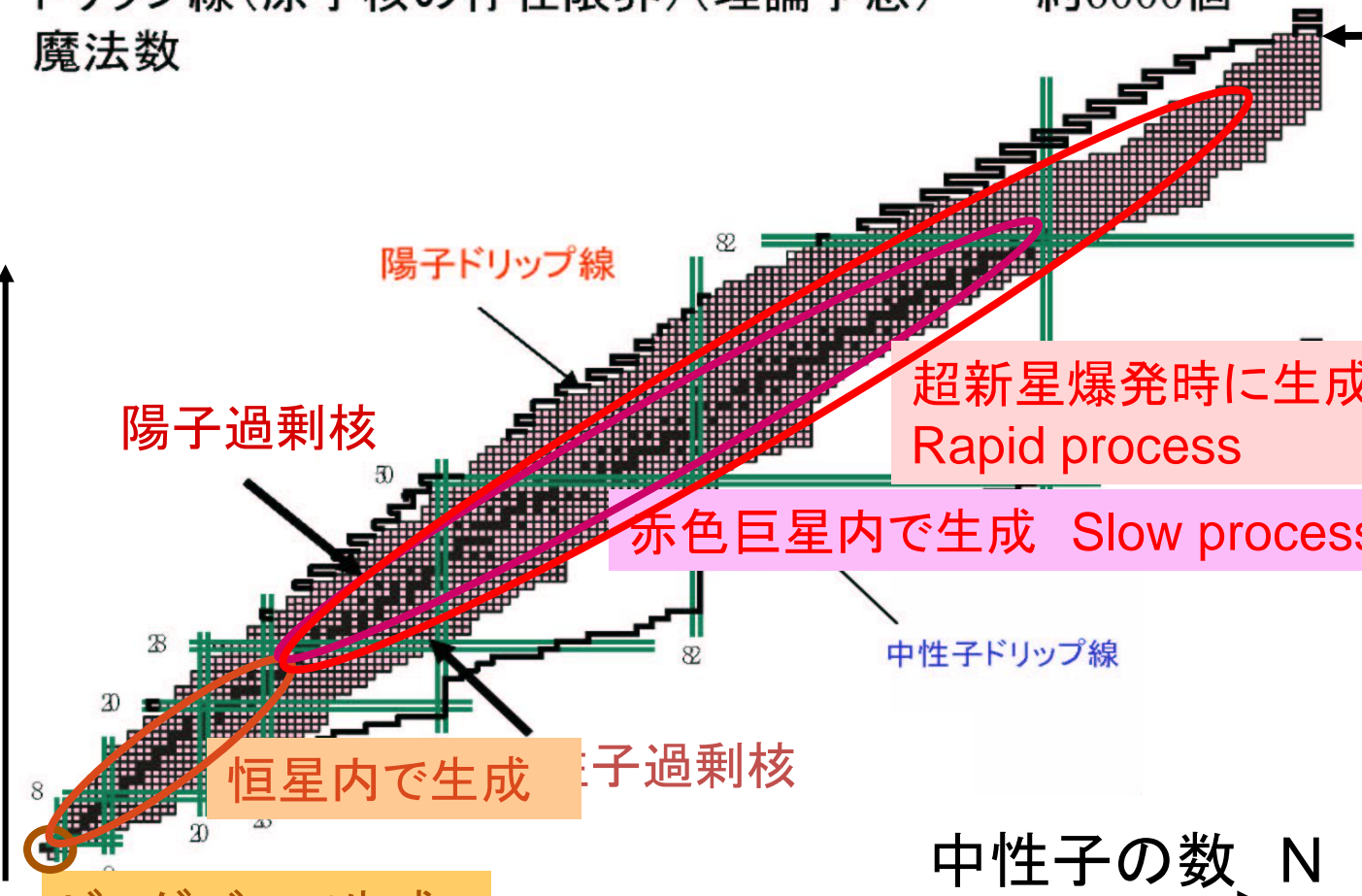
陽子間の  
クーロン斥力のため  
質量数には上限あり

- 安定核
- これまで発見された不安定核
- ドリップ線(原子核の存在限界)(理論予想)
- 魔法数

約300個  
約2700個  
約6000個

Z~113が  
(現在の)限界

陽子の数 Z



ビッグバンで生成

恒星内で生成

中性子過剰核

陽子過剰核

陽子ドリップ線

中性子ドリップ線

超新星爆発時に生成?  
Rapid process

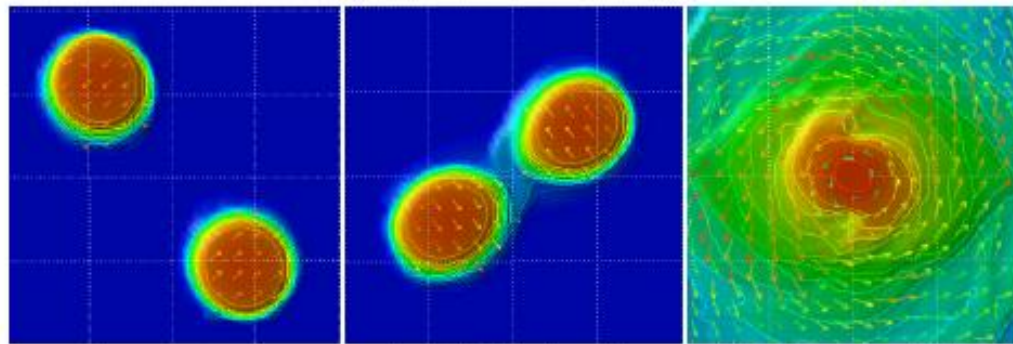
赤色巨星内で生成  
Slow process

中性子の数 N

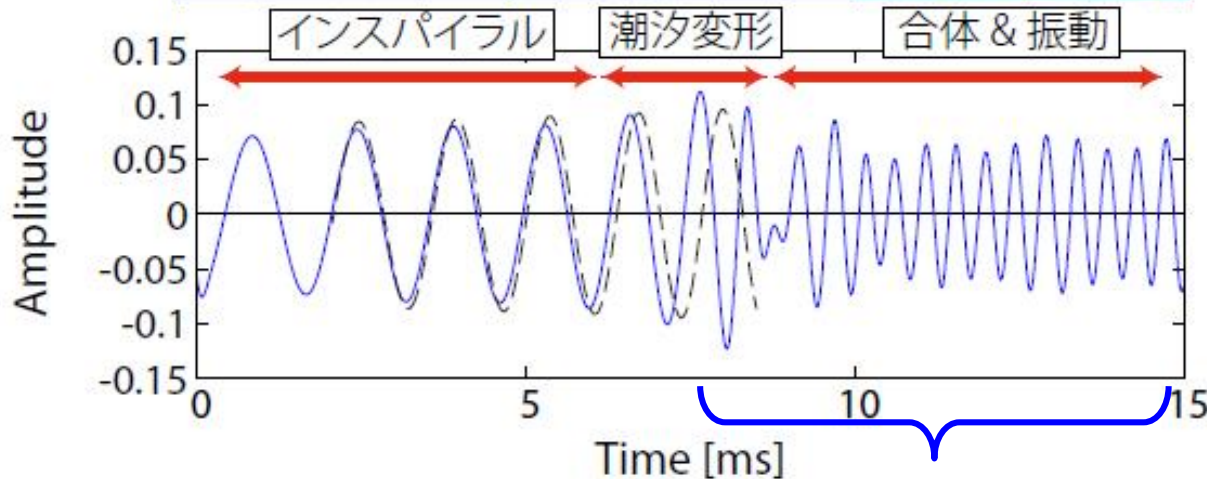
# 重力波で中性子星の中身がわかる?

## 中性子星-中性子星連星の合体の重力波

一般相対論シミュレーション



木内、関口(京大基研)  
物理学会誌 2012 より

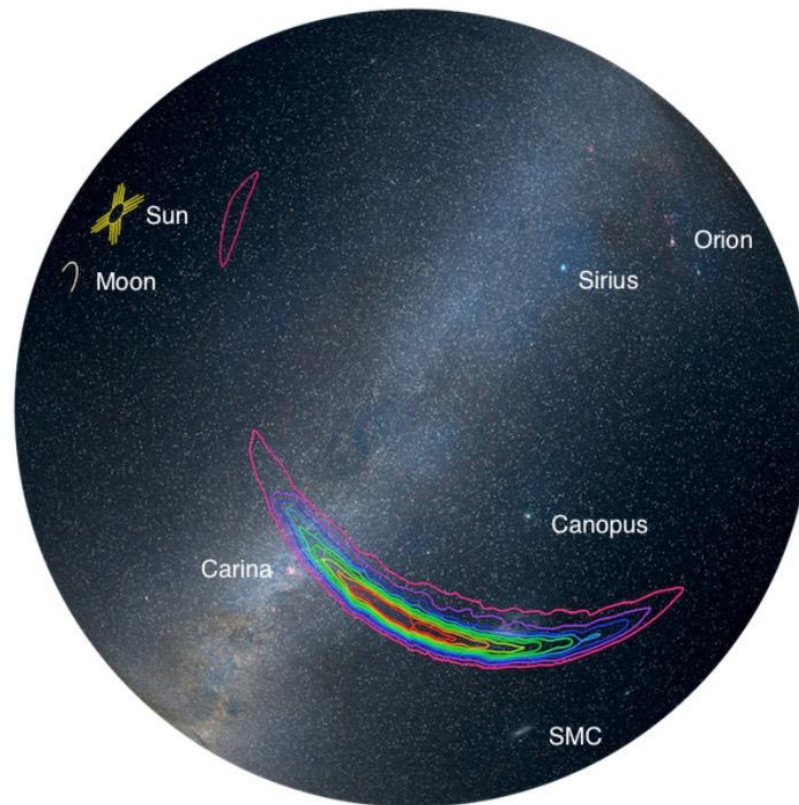


この波形は  
中性子星の硬さによって大きく変わる



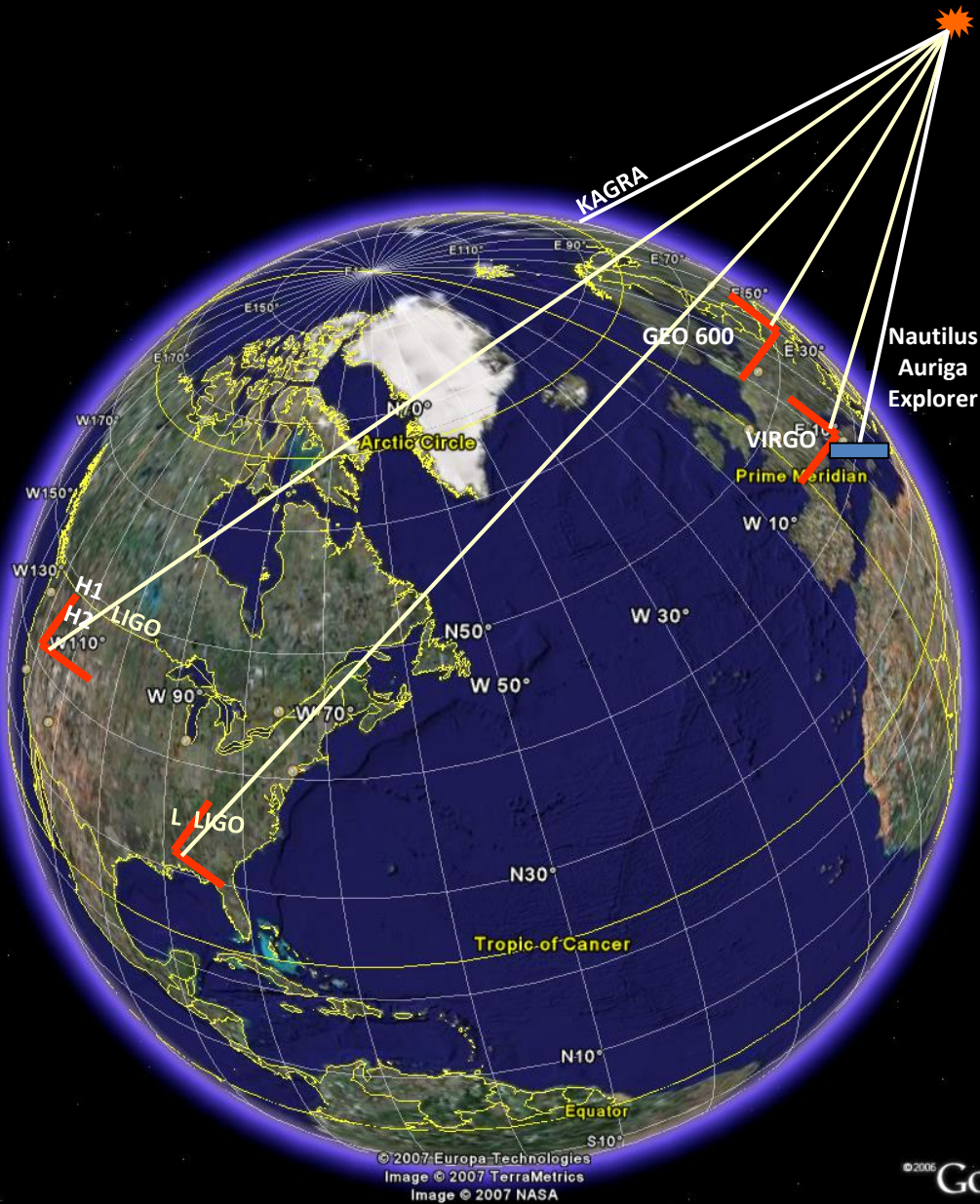
# 角度分解能を上げる必要があります

600平方度を10平方度に！



LIGOのスライドより

# Global network of Detectors

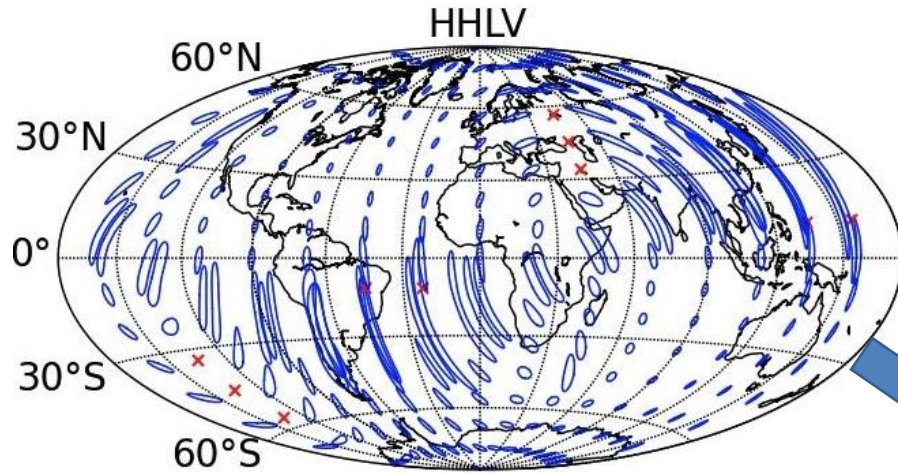


©2006 Google™

Alt 5586.99 mi

# 国際観測ネットワークとKAGRA

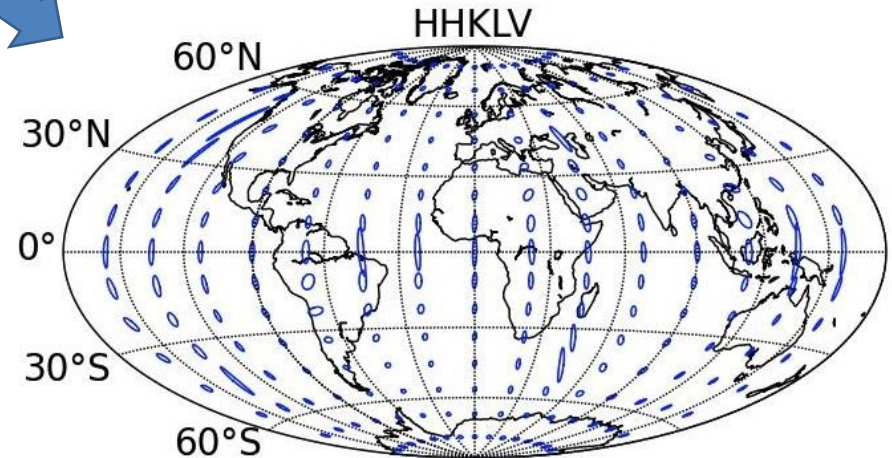
LHO + LLO + Virgo



x は盲点を示す

S. Fairhurst, “Improved source localization with LIGO India”, [J. Phys.: Conf. Ser. 484 012007](#)

LHO + LLO + Virgo + KAGRA



角度分解能が上がる



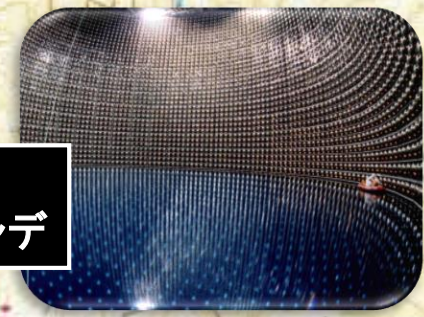
# KAGRAの設置場所と研究拠点

宇宙線研究所  
重力波観測研究施設

- 神岡は既にニュートリノ研究で世界最先端研究拠点。
- サイエンスに基づいた地域活性化の期待もあり、地域の人々から本設備への大きな期待がある。

宇宙線研究所  
神岡宇宙素粒子  
研究施設

スーパー  
カミオカンデ



カムランド  
スーパーカミオカンデ

本計画の検出器

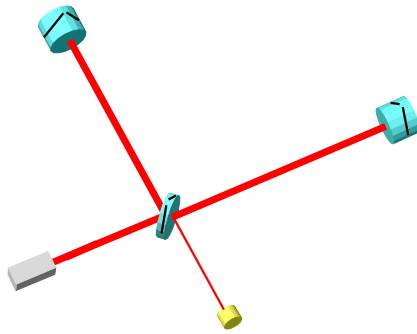
(岐阜県飛騨市神岡町)





# *iKAGRA*から*bKAGRA*へ

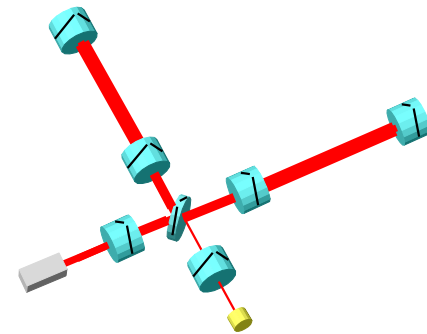
## *iKAGRA*



- ローパワーレーザー
- マイケルソン干渉計
- 常温溶融石英鏡
- 簡易防振システム

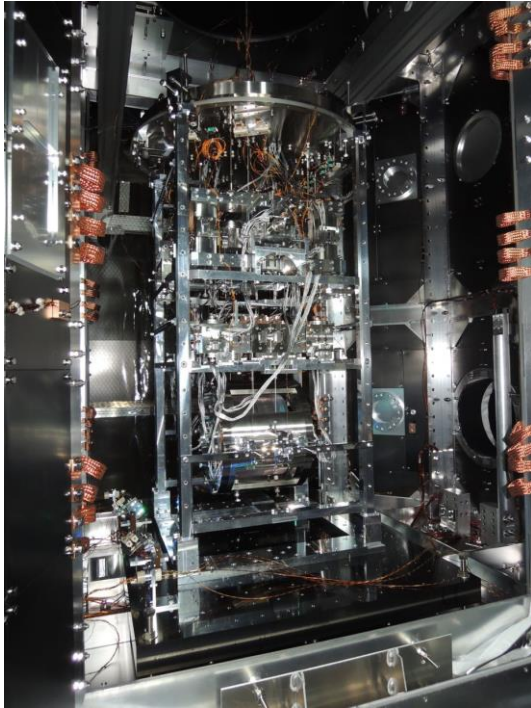


## *bKAGRA*

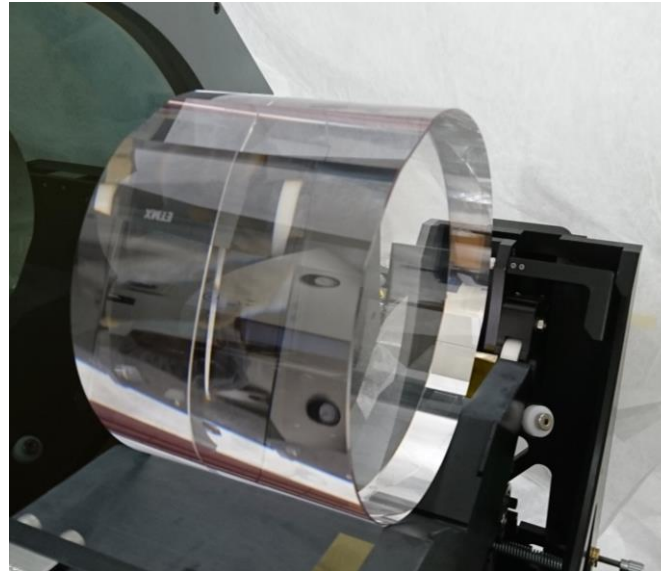


- ハイパワーレーザー
- 帯域可変型干渉系
- 低温サファイア鏡
- 超高防振システム

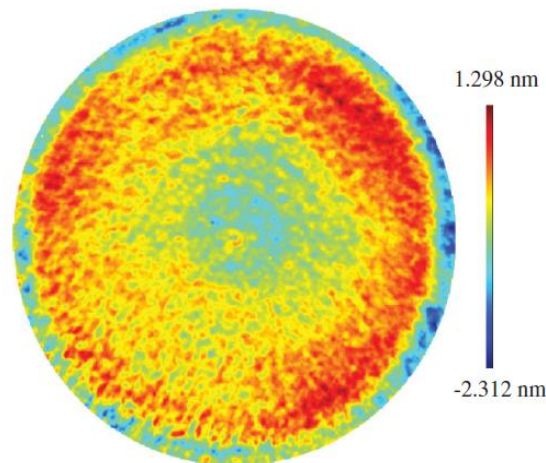
# 本格観測に向けて



低温懸架装置



サファイア鏡基材  
(直径22cm,  
厚さ15cm,  
重さ23kg)



研磨試験結果  
0.24nm (14cmの範囲)  
0.48nm (18cmの範囲)

重力波天文学は始まったばかり

続々と面白い発見があるはず！

一日も早く国際共同観測に参加