

# 重力波初検出の 学術的意義

東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター 横山順一

Jun'ichi Yokoyama (The University of Tokyo)



Research Center for the  
Early Universe (RESCEU)



Department of Physics  
SCHOOL OF SCIENCE  
THE UNIVERSITY OF TOKYO



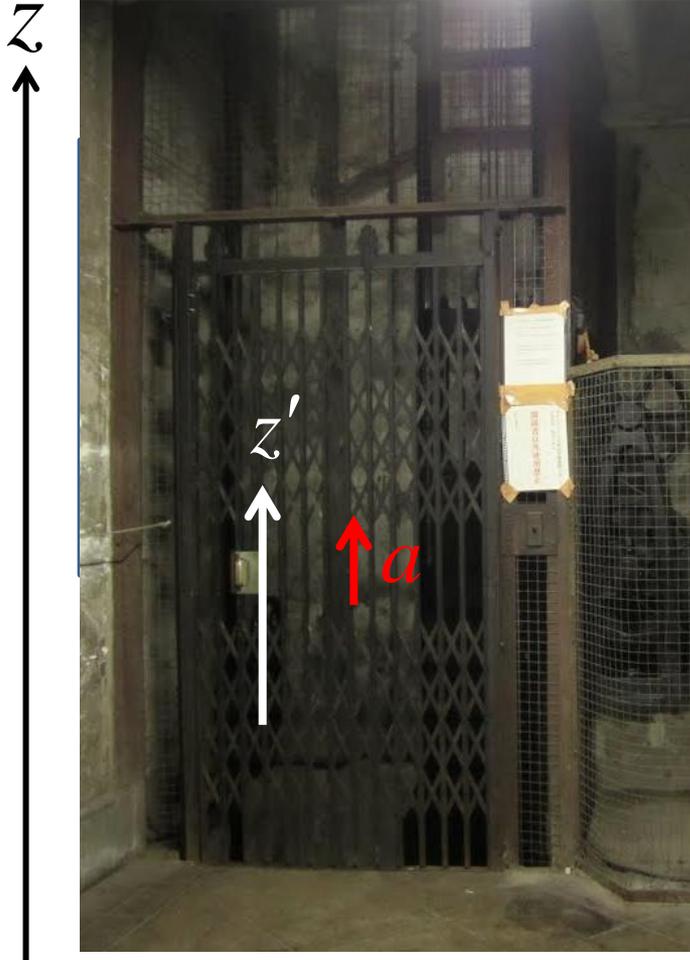
一般相対性理論と重力波(お勉強)

重力波検出とその意義(本論)

宇宙論的重力波(わたしの夢)

# アインシュタインの一般相対性理論

そもそもの始まり：アインシュタインのエレベーター



エレベーターが上がり始めたとき重くなったように感じ、  
下がり始めたとき軽くなったように感じる = 慣性力

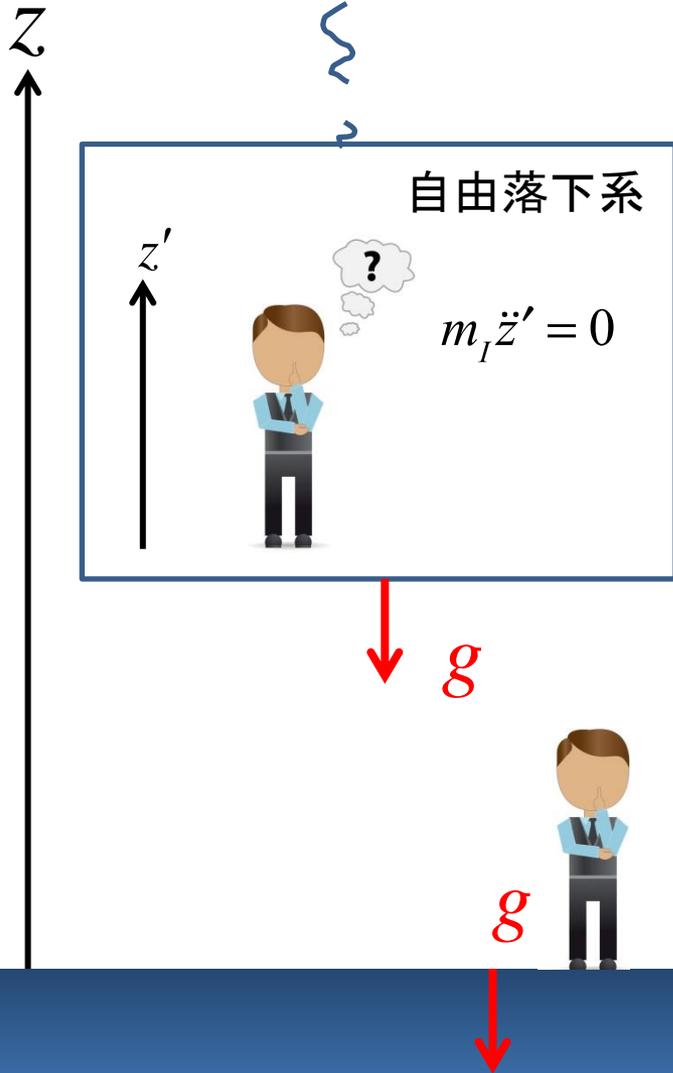
$$m_I \ddot{z}' = -m_G g - m_I a$$



$$m_I \ddot{z} = -m_G g$$

# アインシュタインの一般相対性理論

そもそものはじまり：アインシュタインのエレベーター



ワイヤーロープが切れてエレベーターが自由落下を始めたとするとき、乗員は自分の重さがゼロになったように感じる。

$$m_I \ddot{z}' = -m_G g + m_I g = 0$$

自由落下系(≒加速系)に移ると局所的に重力を消すことができる

**等価原理**

慣性質量  $m_I = m_G$  重力質量  
が成り立てば、のはなし

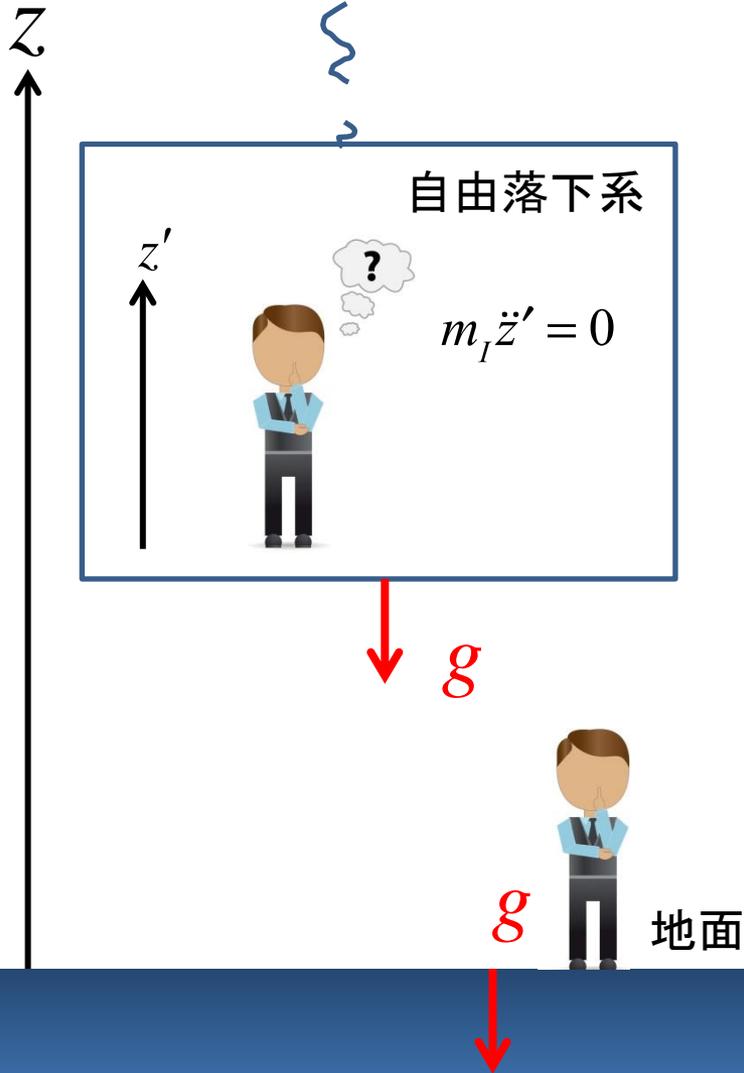
これを積極的に  
指導原理とする

地面

† 実際にはロープが切れてもエレベーターは落ちません

# アインシュタインの一般相対性理論

そもそものはじまり：アインシュタインのエレベーター



重力が考察の対象になると、慣性系と加速系の区別は意味がなくなる。

特殊相対性原理(狭義相対論)

すべての慣性系で物理法則は共変である



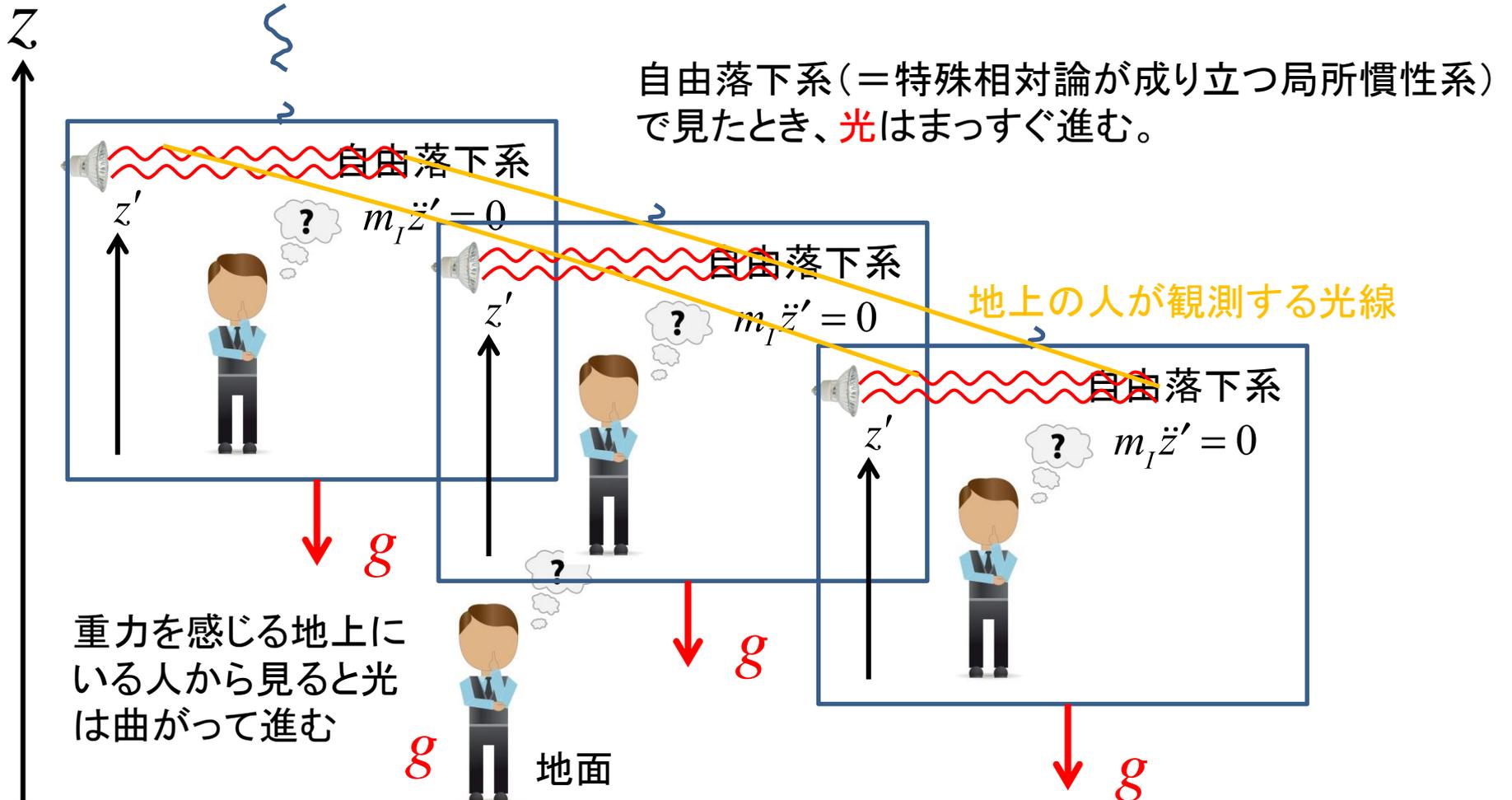
一般相対性原理(広義相対論)

すべての座標系で物理法則は共変である

テンソル方程式で  
書けるということ

# アインシュタインの一般相対性理論

そもそものはじまり：アインシュタインのエレベーター



自由落下系 (= 特殊相対論が成り立つ局所慣性系) で見たとき、**光**はまっすぐ進む。

地上の人が観測する光線

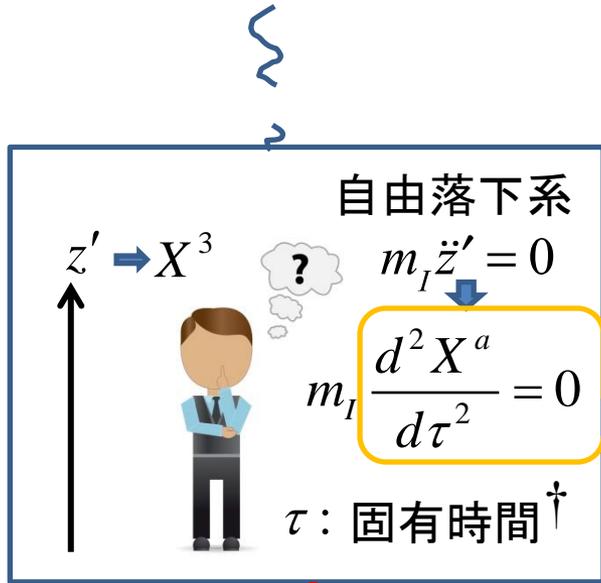
重力を感じる地上にいる人から見ると光は曲がって進む

重力場があると時空間が曲がる！

時間

# アインシュタインの一般相対性理論

そもそものはじまり：アインシュタインのエレベーター



一般相対性原理(広義相対論)

すべての座標系で物理法則は共変である

自由落下系(=局所慣性系)から座標変換してみる

$$\frac{d}{d\tau} = \frac{\partial x^\mu}{\partial \tau} \frac{\partial}{\partial x^\mu} \quad \text{より}$$

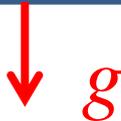
$$\frac{d^2 X^a}{d\tau^2} = \frac{d}{d\tau} \left( \frac{\partial x^\nu}{\partial \tau} \frac{\partial X^a}{\partial x^\nu} \right) = \frac{d^2 x^\nu}{d\tau^2} e_\nu^a + \frac{dx^\nu}{d\tau} \frac{dx^\sigma}{d\tau} \frac{\partial e_\nu^a}{\partial x^\sigma} = 0$$

逆行列  $e_a^\mu$  を掛けると、

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\nu\sigma}^\mu \frac{dx^\nu}{d\tau} \frac{dx^\sigma}{d\tau} = 0 \quad \text{という測地線方程式が出る}$$

$$\Gamma_{\nu\sigma}^\mu = e_a^\mu \partial_\nu e_\sigma^a = \frac{1}{2} g^{\mu\alpha} (\partial_\nu g_{\alpha\sigma} + \partial_\sigma g_{\mu\alpha} - \partial_\alpha g_{\nu\sigma})$$

これが  ~~$m_I \ddot{z} = -m_G g$~~  に対応する式



地面

† 固有時間: 観測者の静止系の刻む時間  
 $c^2 d\tau^2 = -ds^2 = -g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu$

ニュートン極限： 光速と比べて遅い、重力が弱い(時空の曲がり小)

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\nu\sigma}^\mu \frac{dx^\nu}{d\tau} \frac{dx^\sigma}{d\tau} = 0 \quad \Gamma_{\nu\sigma}^\mu = e_a^\mu \partial_\nu e_\sigma^a = \frac{1}{2} g^{\mu\alpha} (\partial_\nu g_{\alpha\sigma} + \partial_\sigma g_{\mu\alpha} - \partial_\alpha g_{\nu\sigma})$$

$$x^0 = ct \text{ は大きい} \quad \partial_0 = \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \text{ は小さい} \quad h_{\mu\nu} \equiv g_{\mu\nu} - \eta_{\mu\nu} \text{ は小さい}$$

$\tau \cong ct$ としてよく、 $\nu = \sigma = 0$ のみ効く。空間座標  $i = 1, 2, 3$ に対しては、

$$\frac{d^2 x^i}{dt^2} + c^2 \Gamma_{00}^i = 0 \quad \Gamma_{00}^i \cong \frac{1}{2} \eta^{ij} (2\partial_0 h_{0j} - \partial_j h_{00}) \cong -\frac{1}{2} \partial_i h_{00}$$

となり、 $m\ddot{x}^i = \frac{mc^2}{2} \partial_i h_{00} = -m\partial_i \phi$  と比べると、ニュートンの重力ポテンシャル  $\phi$ により

$$h_{00} = -\frac{2\phi}{c^2} \text{ とすれば良いことがわかる。}$$



$$g_{00} = -1 - \frac{2\phi}{c^2} \text{ だけが重要}$$

# 重力場の方程式をニュートンから解読する

ニュートン重力では、重力ポテンシャル  $\phi$  はポアソン方程式



にしたがう

質量密度  $\rightarrow$  エネルギー密度  $/c^2$

$$\phi = -\frac{GM}{r}$$

cf 静電ポテンシャルのポアソン方程式  $\nabla^2 \phi_e(x) = -\frac{1}{\epsilon_0} \rho_e(x)$  同様  
クーロンの法則(逆二乗則)を出す。

相対性理論では、エネルギー密度は  
エネルギー運動量テンソルという  
4次元行列の00成分に埋め込まれている。

$$T_{\nu}^{\mu} = \begin{pmatrix} \rho & p^1 & p^2 & p^3 \\ p^1 & & & \\ p^2 & & S_j^i & \\ p^3 & & & \end{pmatrix}$$



$g_{00} = -1 - \frac{2\phi}{c^2}$  のようにニュートンポテンシャルも計量テンソルの00成分に出てくるので

ポアソン方程式を計量テンソルの二階微分からなるテンソル量とエネルギー運動量  
テンソルを両辺に持つテンソル(行列)量に拡張したのがアインシュタイン方程式である

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

# アインシュタイン方程式

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

時空の曲がり・幾何学的性質

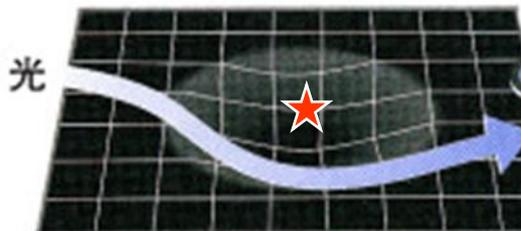
物質・エネルギー組成

$G_{\mu\nu}$  アインシュタインテンソル

$R_{\mu\nu}$  リッチテンソル

$R$  スカラー曲率

いずれも計量の二階微分から成る



物質やエネルギーがあるとまわりの空間がゆがむ。  
空間の状態を中身の物質(エネルギー)が決める。

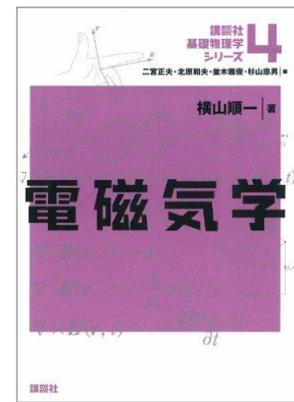
重力が弱く  $h_{\mu\nu} \equiv g_{\mu\nu} - \eta_{\mu\nu}$  が小さい(しかし遅いとは限らない)とき、

$$-\square h_{\mu\nu} + \partial_\nu \partial^\alpha h_{\mu\alpha} + \partial_\mu \partial^\alpha h_{\nu\alpha} - \partial_\mu \partial_\nu h - \eta_{\mu\nu} (\partial^\alpha \partial^\beta h_{\alpha\beta} - \square h) = \frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad h = \eta^{\mu\nu} h_{\mu\nu}$$

電磁気学でマックスウェル方程式  $\partial_\nu F^{\mu\nu} = \partial_\nu \partial^\mu A^\nu - \square A^\mu = J^\mu$  (右辺は電流ベクトル) にゲージ変換してゲージ条件  $\partial_\nu A^\nu = 0$  を課すことにより、波動方程式

$$\square A^\mu = \left( -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2 \right) A^\mu = -J^\mu$$

が得られ、光速で伝わる横波である電磁波の解が得られたのであった。



重力波の場合も、やや複雑だが、事情は同じ。

$$-\square h_{\mu\nu} + \partial_\nu \partial^\alpha h_{\mu\alpha} + \partial_\mu \partial^\alpha h_{\nu\alpha} - \partial_\mu \partial_\nu h - \eta_{\mu\nu} (\partial^\alpha \partial^\beta h_{\alpha\beta} - \square h) = \frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

ゲージ条件  $\partial^\alpha h_{\mu\alpha} = 0$ ,  $h = \eta^{\mu\nu} h_{\mu\nu} = 0$  の下で波動方程式

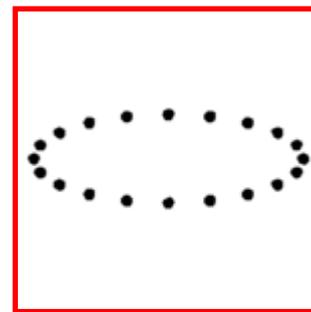
$$\square h_{\mu\nu} = \left( -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2 \right) h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

がでてくる。電磁波と同じように重力波も光速で伝播する横波である。

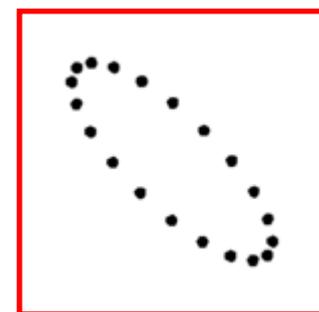
真空中を  $z$  方向に伝播する重力波  $h_{\mu\nu} = a_{\mu\nu} e^{ikz}$  を考えると、物理的な自由度は

$$a_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_+ & a_\times & 0 \\ 0 & a_\times & -a_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ という二つの偏極だけで表される。}$$

$$ds^2 = -(cdt)^2 + (1+h_+)dx^2 + (1-h_+)dy^2 + 2h_\times dx dy + dz^2$$



+ polarization



x polarization

# 重力波の生成

$$\square h_{\mu\nu} = \left( -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \nabla^2 \right) h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

電磁波の場合と同様遅延グリーン関数を使って書ける。

$$h_{\mu\nu}(ct, \mathbf{r}) = \frac{4G}{c^4} \int \frac{T_{\mu\nu}(ct - |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|, \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3 r'$$

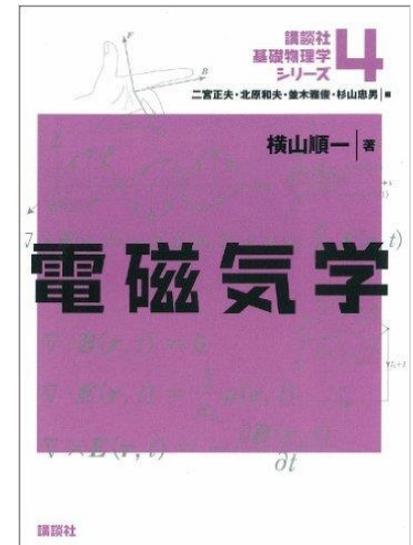
エネルギー運動量テンソルの保存則  $\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0$  のため、四重極モーメントでかける。

$$h_{ij}(ct, \mathbf{r}) = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}_{ij}(ct - r) \quad \ddot{I}_{ij}(ct - r) = \int \rho(ct, \mathbf{r}') \left( r'_i r'_j - \frac{1}{3} r'_k r'^k \right) d^3 r'$$

cf 運動する電荷からの電磁波放射は、電荷(四元電流)保存則により、  
双極子放射公式で与えられると同様。

重力波源の質量を  $M$ 、大きさを  $R$ 、タイムスケールを  $T$  とすると

$$h(r) \square \frac{G}{c^4 r} \frac{MR^2}{T^2} \text{ f } \frac{G}{c^4 r} Mc^2 \square \frac{GM}{c^2 r} \square \frac{r_g}{r} \quad r_g \equiv \frac{2GM}{c^2} \quad \begin{array}{l} \text{シュバルツシルト半径} \\ \text{(ブラックホールの地平線)} \end{array}$$



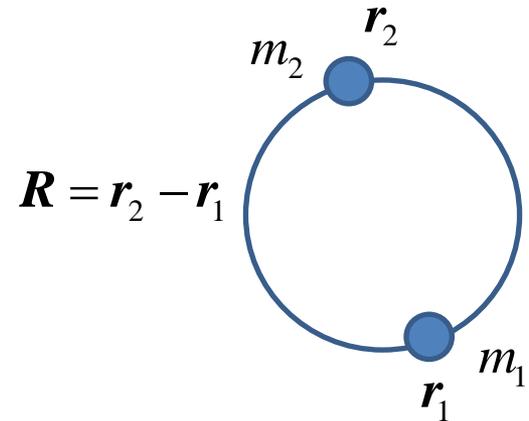
$$h(r) < \frac{r_g}{r} \quad r_g \equiv \frac{2GM}{c^2} \quad \begin{array}{l} \text{シュバルツシルト半径} \\ \text{(ブラックホールの地平線)} \end{array}$$

太陽のシュバルツシルト半径と100メガパーセクの比を取ると  $h \in \frac{r_g}{r} \approx \frac{3\text{km}}{3 \times 10^{24}\text{m}} \approx 10^{-21}$

## コンパクト連星からの重力波

本質的にはケプラー問題

$$\mu \ddot{\mathbf{R}} = -\frac{Gm_1 m_2}{R^3} \mathbf{R} \quad \mu \equiv \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \equiv \frac{m_1 m_2}{m}$$



$$\ddot{\mathbf{R}} = -\frac{Gm}{R^3} \mathbf{R} \equiv -\omega_s^2 \mathbf{R} \quad f_{GW} = \frac{\omega_s}{\pi}$$

$$h_{ij}(ct, \mathbf{r}) = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}_{ij}(ct - r) \quad \mu R^2 \omega_s^2 = G^{\frac{2}{3}} \mu \omega_s^{\frac{2}{3}} m^{\frac{2}{3}}$$

$$h \approx \frac{G \mu R^2 \omega_s^2}{c^4 r} \approx \frac{G^{\frac{5}{3}} \mu \omega_s^{\frac{2}{3}} m^{\frac{2}{3}}}{c^4 r} \approx \frac{1}{r} \left( \frac{GM}{c^2} \right)^{\frac{5}{3}} \left( \frac{\pi f_{GW}}{c} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\mathcal{M} \equiv \mu^{\frac{3}{5}} m^{\frac{2}{5}} = \frac{(m_1 m_2)^{\frac{3}{5}}}{(m_1 + m_2)^{\frac{1}{5}}} \quad \text{チャープ質量}$$

これでお勉強は終わりです



至唯剛上  
神直  
期接  
勝萬  
利人

金三

# 重力波研究の歴史

---

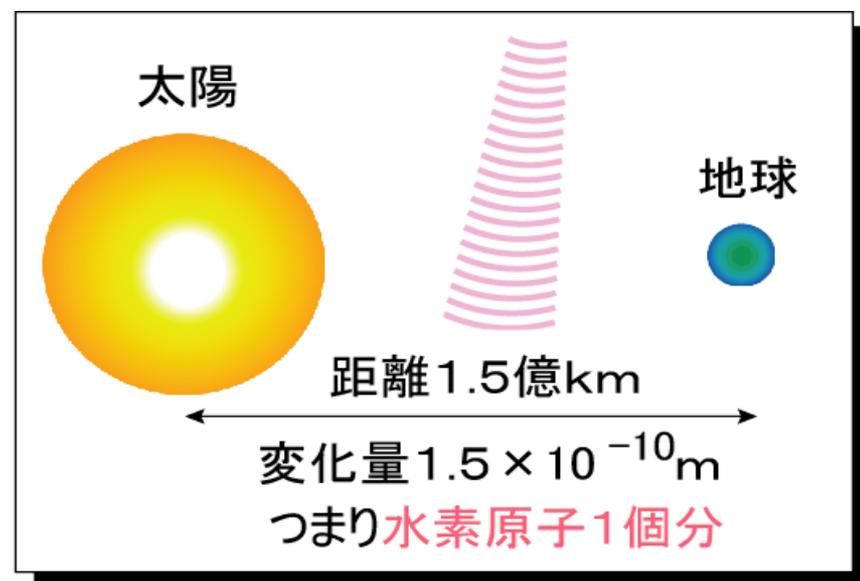
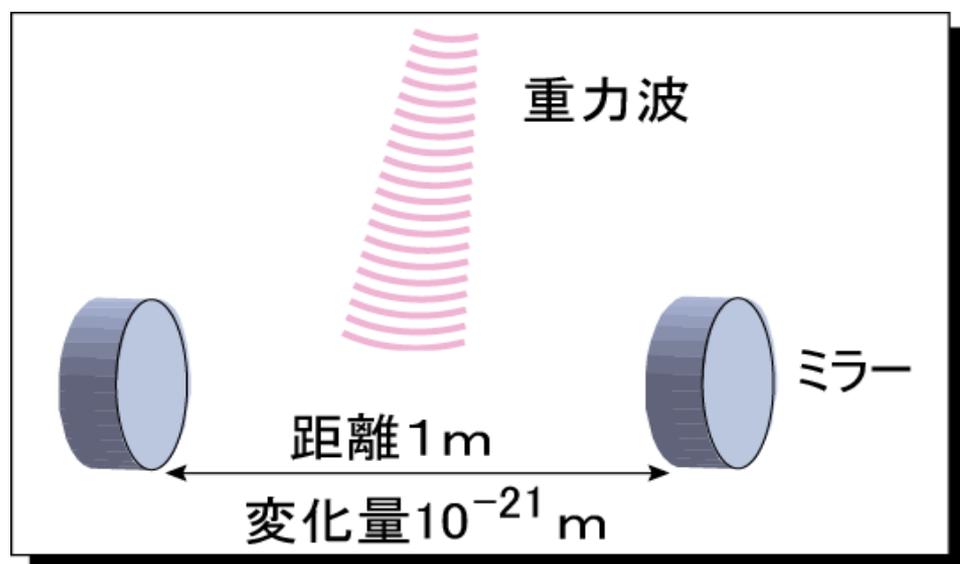
- 1916年 **アインシュタイン**  
**一般相対性理論**から重力波を導く
- 1968年 ウェーバー バーアンテナにより銀河中心からの重力波を検出したと主張
- 1974年～ ハルス&テイラー  
**連星パルサー**の観測により**間接的**に重力波の存在を証明  
(1993年ノーベル物理学賞)
- 2000年～ **レーザー干渉計**を用いた本格的重力波観測が始まる
- 2015年9月に米国のadvanced LIGO検出器が連星ブラックホール合体からの重力波を初検出したと2016年2月に発表

# 重力波の源

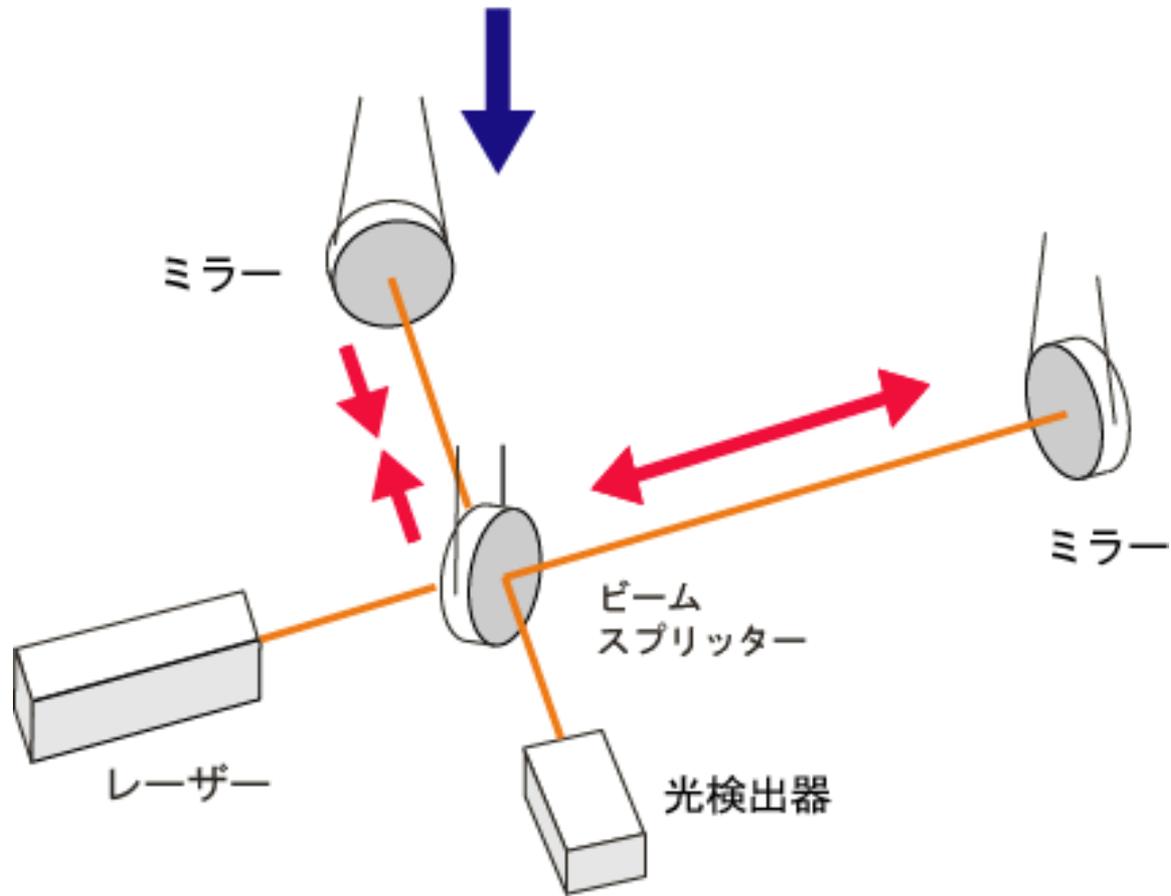
- **バースト重力波**
  - 連星中性子星の合体
  - ブラックホール連星の合体
  - 超新星爆発
- **連続重力波**
  - パルサーの回転、振動
  - 連星中性子星の公転運動
- **背景重力波**
  - 初期宇宙のインフレーション起源
  - 初期宇宙の相転移や位相的欠陥の運動
  - 白色矮星連星、中性子星連星、ブラックホール連星

# 重力波検出⇒**極限計測**

重力波の効果: 2点間の距離の変化



# 重力波



# レーザー干渉計重力波検出器

# TAMAプロジェクト



1995年-

基線長300mレーザー干渉計

TAMA300重力波検出器(三鷹)



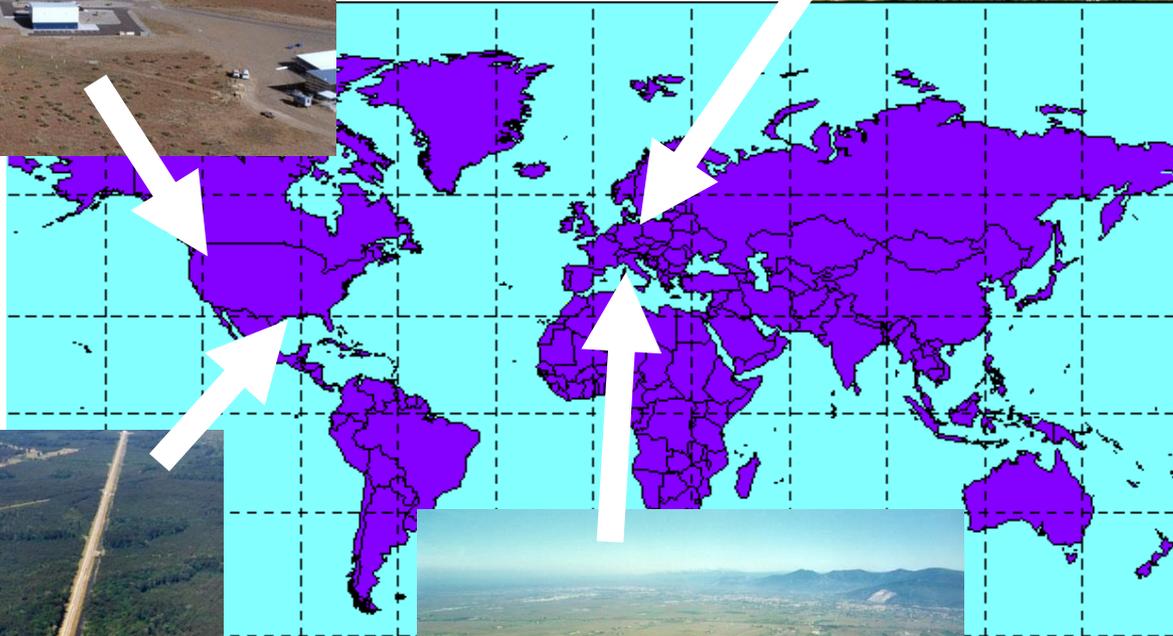
TAMAセンタールーム

# km-class GW detectors in the world: 2015

LIGO Hanford 4 km, desert



GEO 600 600 m, university farm



LIGO Livingston 4 km, forest



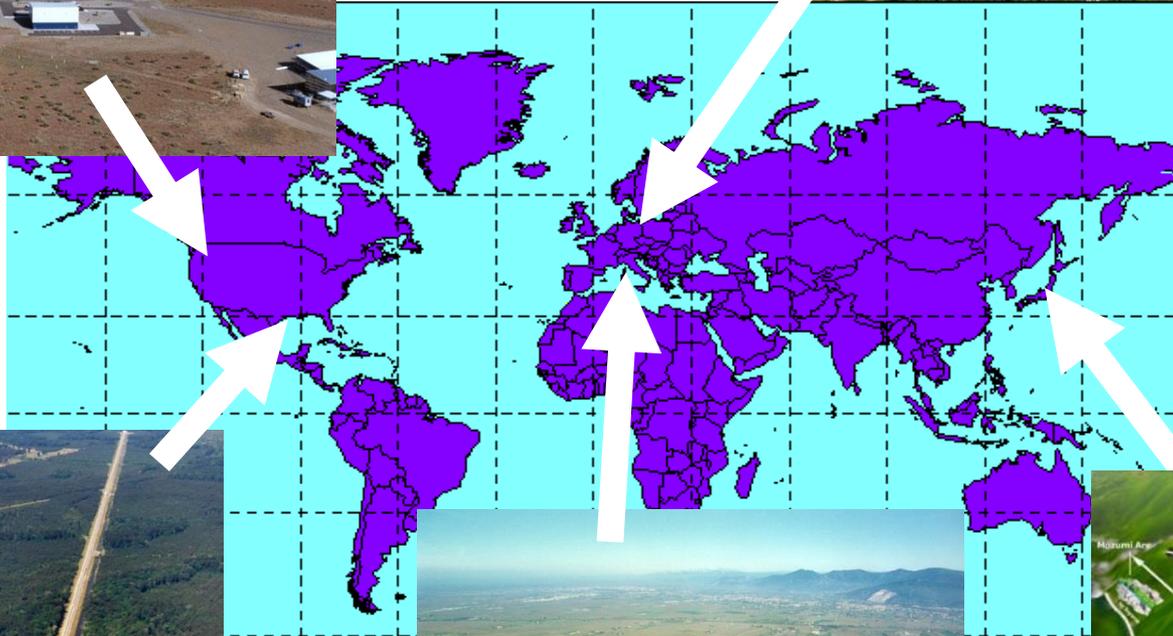
Virgo Cascina 3 km

# km-class GW detectors in the world: FY2015

LIGO Hanford 4 km, desert



GEO 600 600 m, university farm



LIGO Livingston 4 km, forest



Virgo Cascina 3 km



iKAGRA Kamioka, 3 km, Michelson underground



# km-class GW detectors in the world: near future

LIGO Hanford 4 km, desert



GEO 600 600 m, farm



LIGO India !  
Approved by the  
Indian gov. on  
Feb. 16 2016 !!



LIGO Livingston 4 km,  
forest

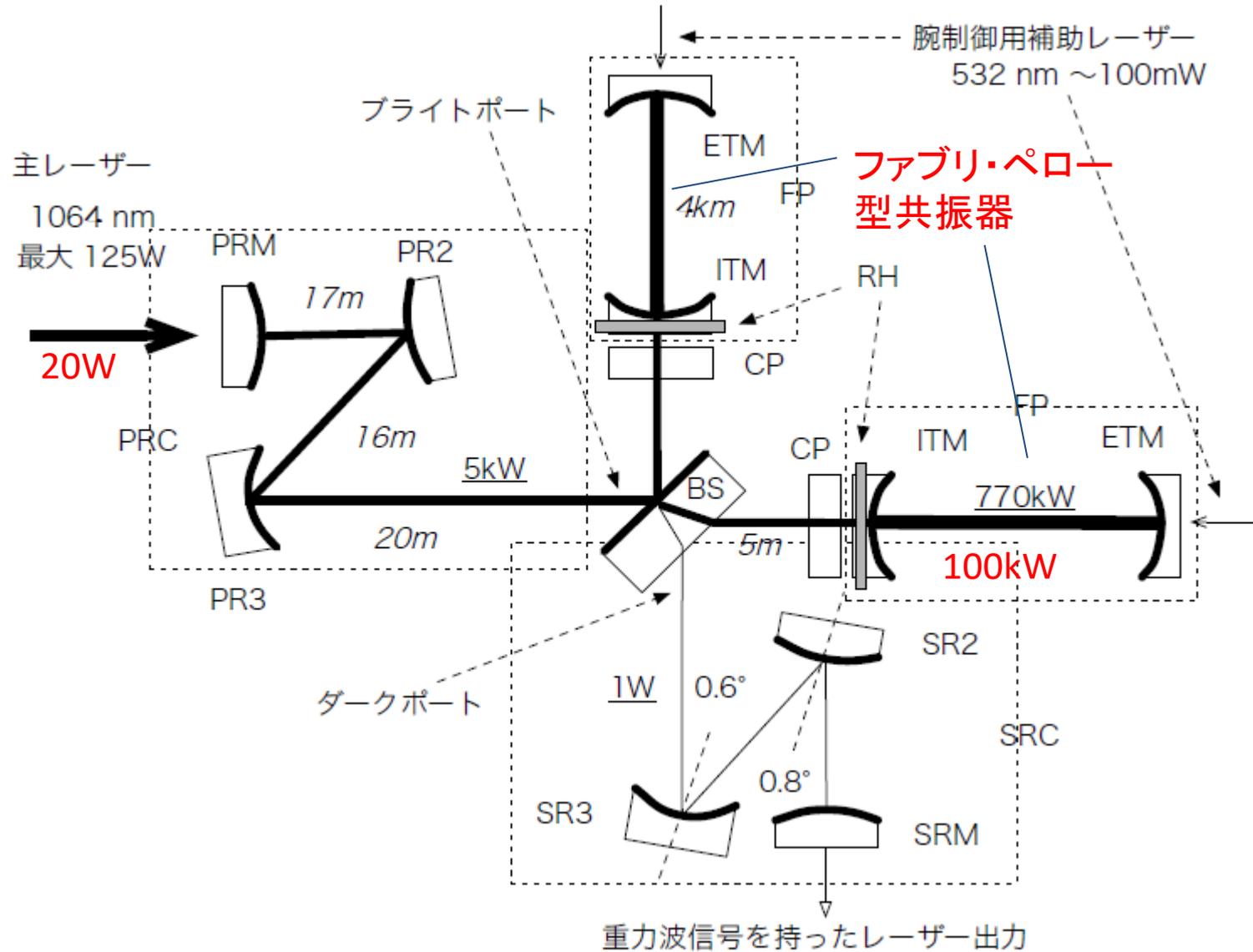


Virgo Cascina 3 km



bKAGRA Kamioka,  
3 km, FPM  
cryogenic,  
underground

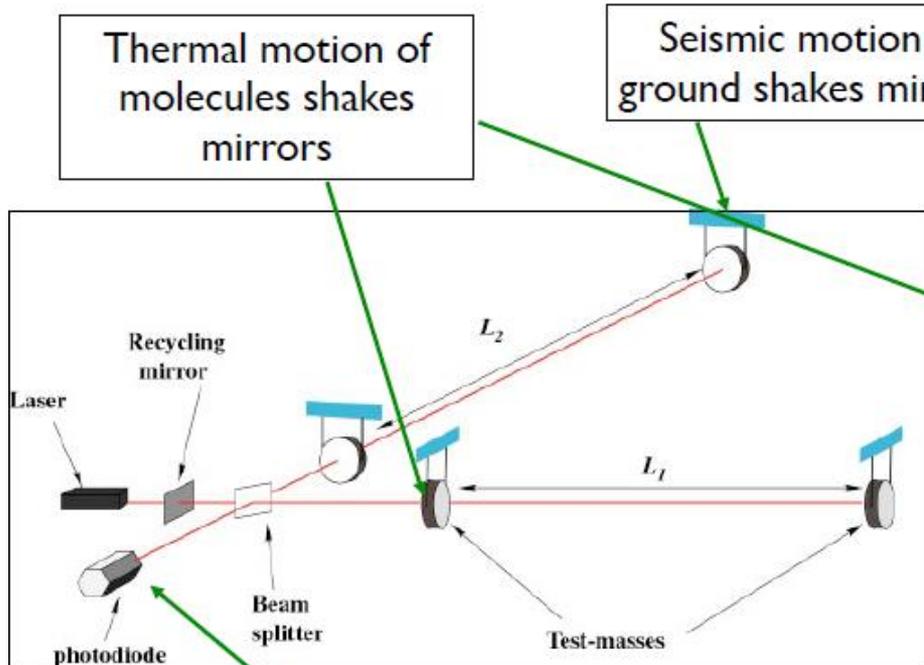
# Advanced LIGOの光学系



# 重力波検出器の感度曲線

レーザー干渉計で鏡間の距離を測る

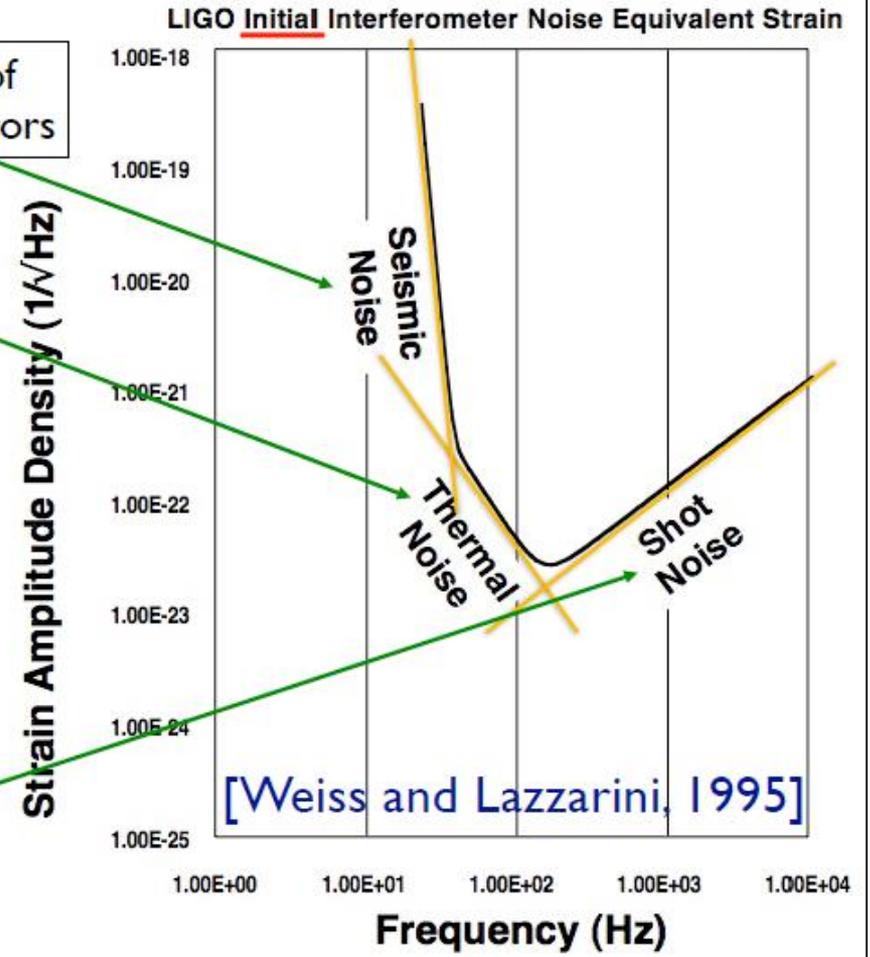
$$\delta l = h(t)L$$



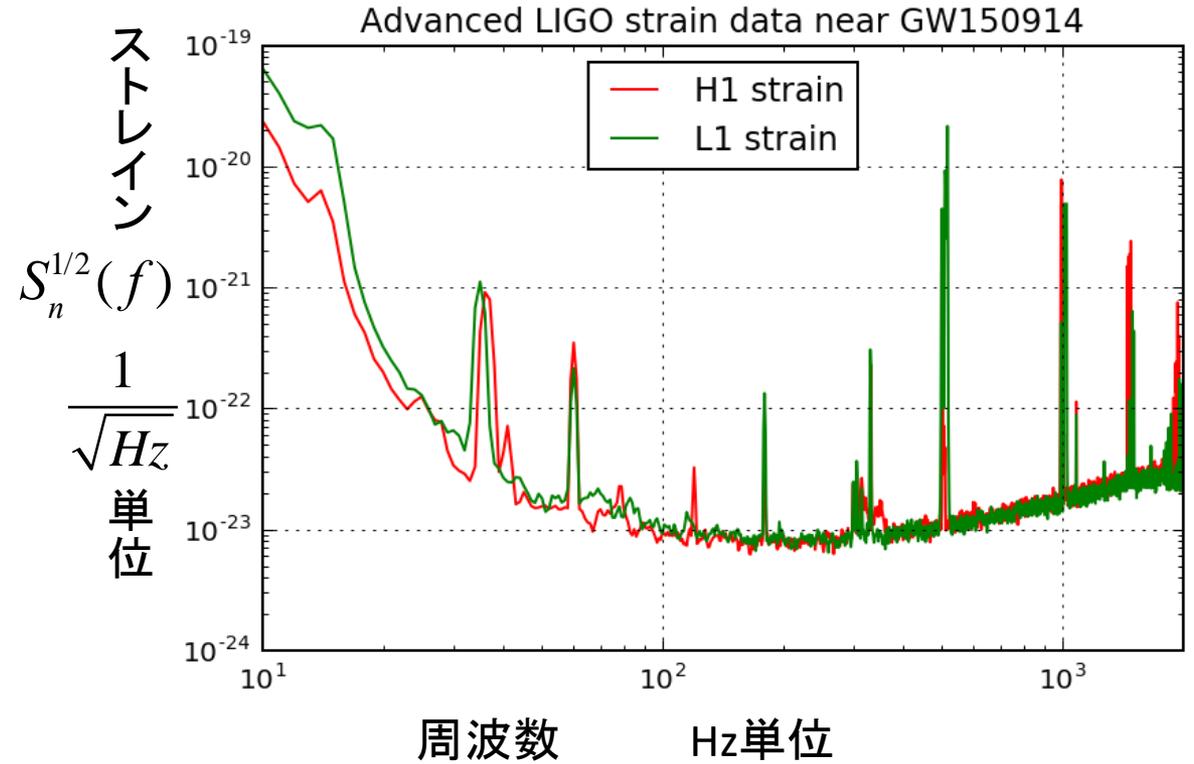
Thermal motion of molecules shakes mirrors

Seismic motion of ground shakes mirrors

Photons arrive in a statistical pitter patter



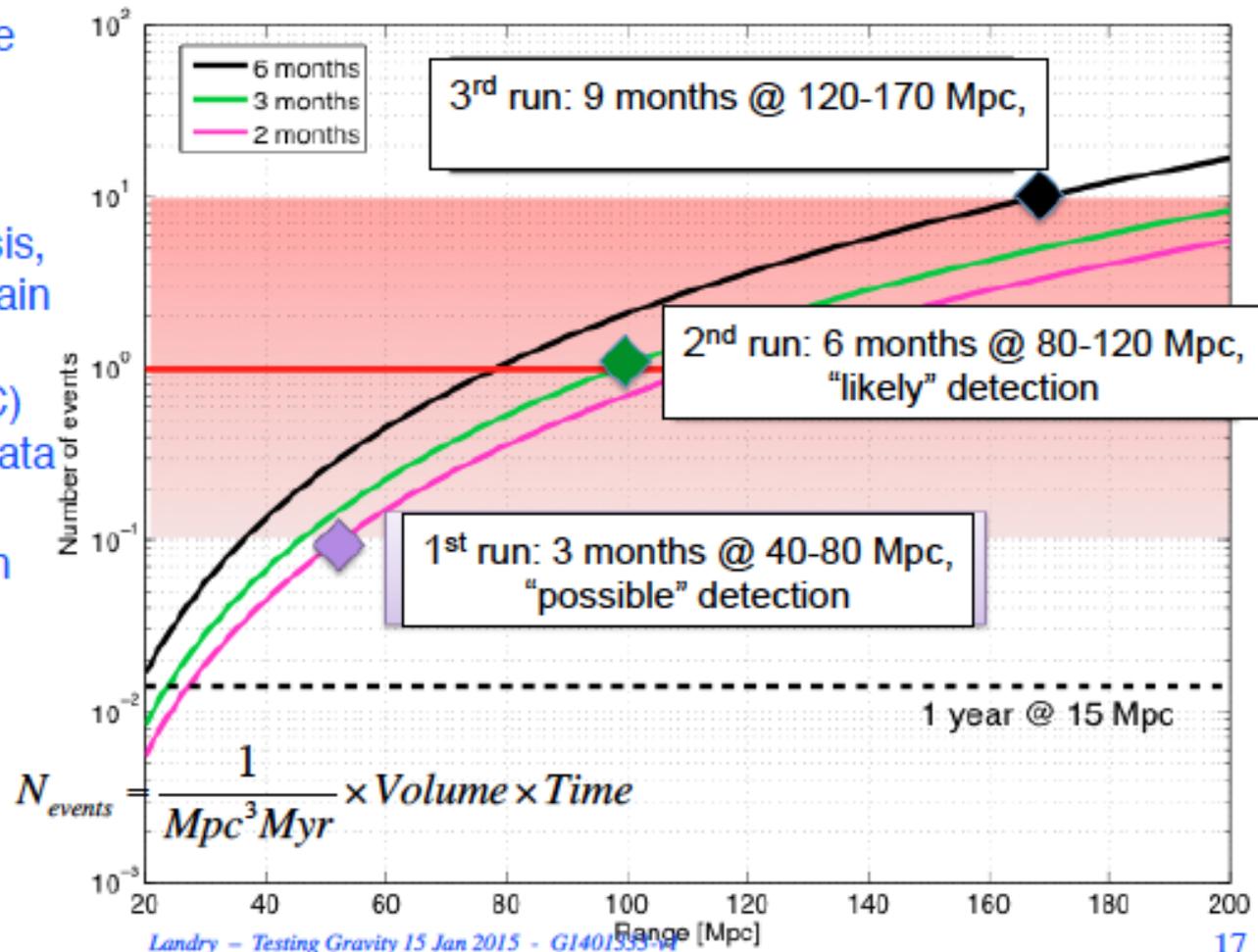
# advanced LIGOの実際の感度曲線(初検出当時)



ノイズの自乗期待値  $\langle n^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} df S_n(f)$  ノイズのパワースペクトル

# advanced LIGOの観測予想

- Vertical scale is the number of binary inspirals detected
- Rates based on population synthesis, realistic but uncertain
- LIGO Scientific Collaboration (LSC) preparing for the data analysis challenge
- Close collaboration with Virgo
- Early detection looks feasible
- [arXiv:1304.0670](https://arxiv.org/abs/1304.0670),  
[arXiv:1003.2480](https://arxiv.org/abs/1003.2480)



TITLE: GCN CIRCULAR

NUMBER: 18330

SUBJECT: LIGO/Virgo G184098: Burst candidate in LIGO engineering run data

Dear colleagues,



2016/02/11 press conference

<https://www.ligo.caltech.edu/detection>

Identified by GWD & GED, confirmed by gstar & pycbc

- 200 deg<sup>2</sup> (50 % CL) or 750 deg<sup>2</sup> (90 % CL)
- Distance not announced.

TITLE: GCN CIRCULAR

NUMBER: 18330

SUBJECT: LIGO/Virgo G184098: Burst candidate in LIGO engineering run data

Dear colleagues,

We would like to bring to your attention a trigger identified by the online Burst analysis during the ongoing Engineering Run 8 (ER8).

G184098 (2015-09-16 06:39 UT)

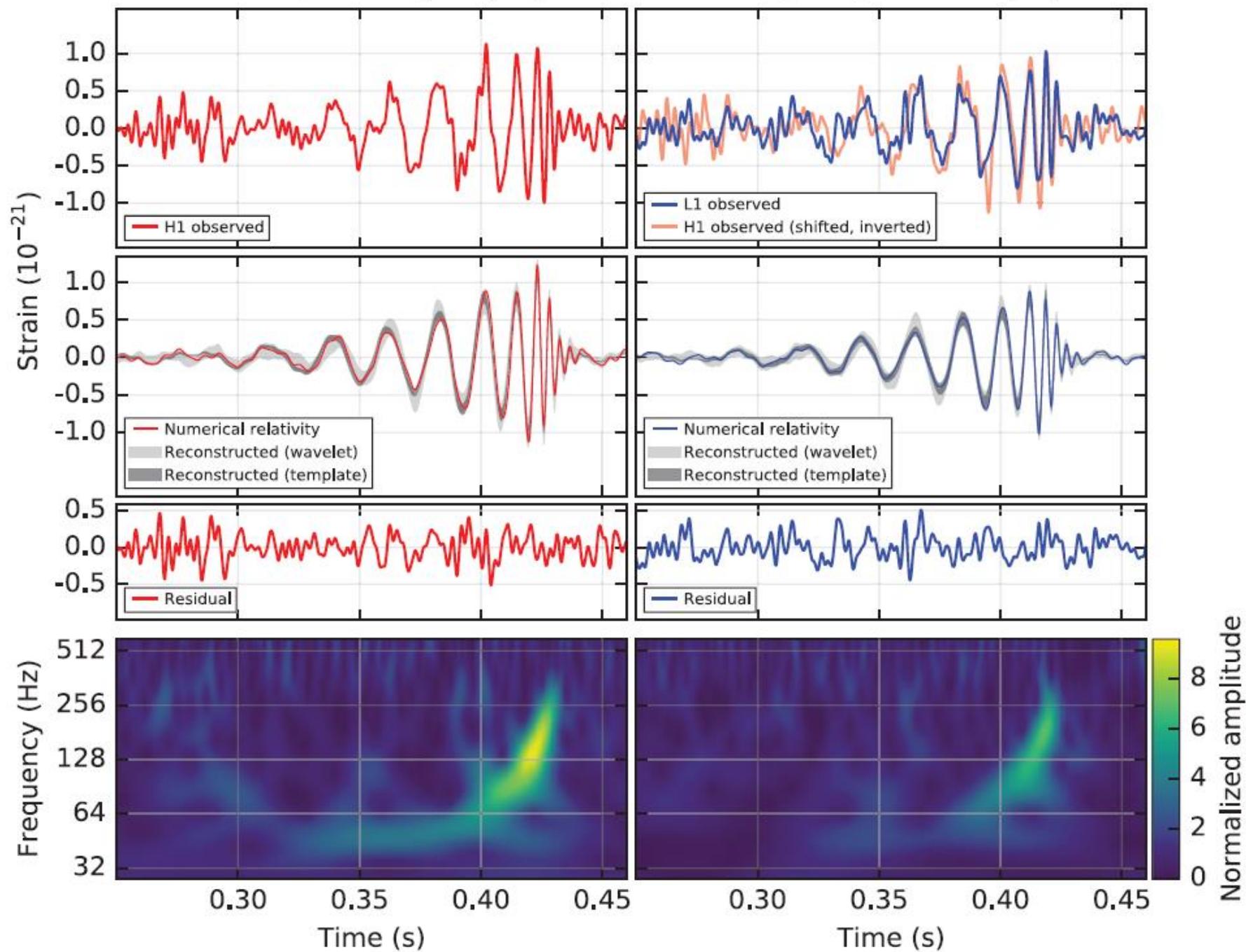
- 2015-09-14 09:50:45 UTC (18:50:45 JST)
- FAR below  $\sim 1/\text{month}$ 
  - $< 1/(2.7\text{yr}) \rightarrow < 1/(100\text{yr}) \rightarrow < 1/(22500\text{yr}) \rightarrow < 1/(203000\text{yr})$
- gstlal/pycbc pipeline were turned-off.
- ER8: O1 not yet started (O1:9/19 0:00 JST)
  - Calibration not fixed.
  - Automatic alert to LV within 3 mins of discovery, 2days latency for EM/nu follow-ups.
  - Importance of low-latency alert.
- Identified by cWB & oLIB, confirmed by gstlal & pycbc
- $200 \text{ deg}^2$  (50 % CL) or  $750 \text{ deg}^2$  (90 % CL)
- Distance not announced (needs gstlal: 50 sec. latency, 20 = whitening, another big factor is calibration).

## GW150914検出までの道程

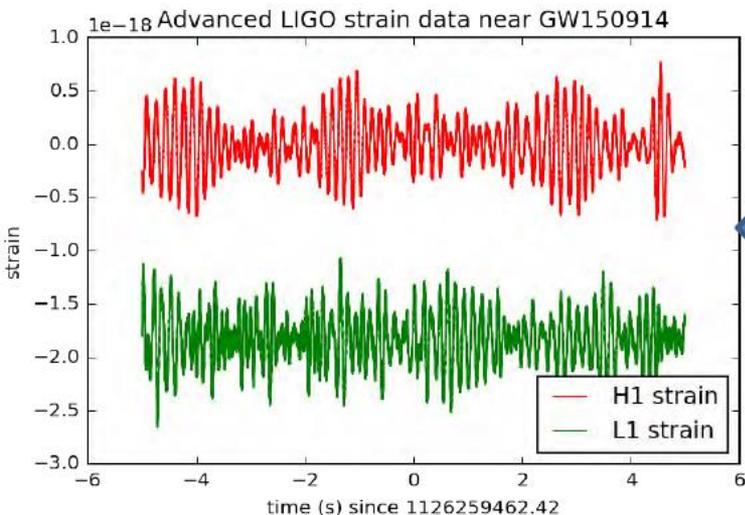
- 2015年9月初旬、最後の試験運用。検出器と解析ソフトの最終調整
- 2015年9月14日(月)9:50:45(協定世界時) 早期バースト検出システムcWBがブラックホール連星の合体とおぼしき現象候補を検出。リビングストンの現地時間は午前2:50、ハンフォードは午前4:50だった。
- この候補は3分ほどの遅延で候補リストにアップロードされた
- コンパクト天体合体検出の二つのパイプラインは、いずれもその瞬間には検知できなかった。連星の少なくとも一方は中性子星だろうと仮定していたから。
- 9月16日(水)17時頃(協定世界時)電磁波対応天体探索のためのアラートが手動で出された。自動アラートシステムは技術試験運用中はオフになっていた。
- この現象候補の偽警報率を正確に計算し、候補を正式な検出と確認するためには16日間の同時観測が必要であった。
- この16日間の10月12日(月)に二つ目の連星ブラックホール合体候補を検出。偽警報率はパーセントレベル。これは後にLVT151012と呼ばれる。
- いずれも月曜日だったのでfirst Monday, second Mondayと呼ばれた。

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



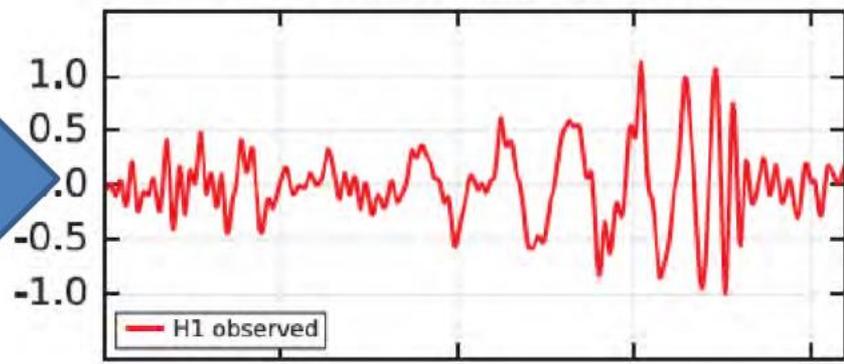
# データ解析



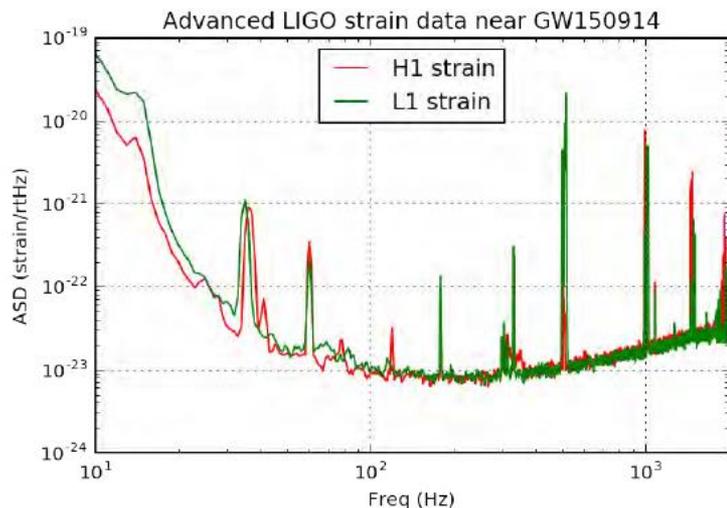
検出器出力時系列



Hanford, Washington (H1)



再構成されたBH-BH連星  
合体の重力波波形



検出器スペクトル:

低周波で大きい振幅

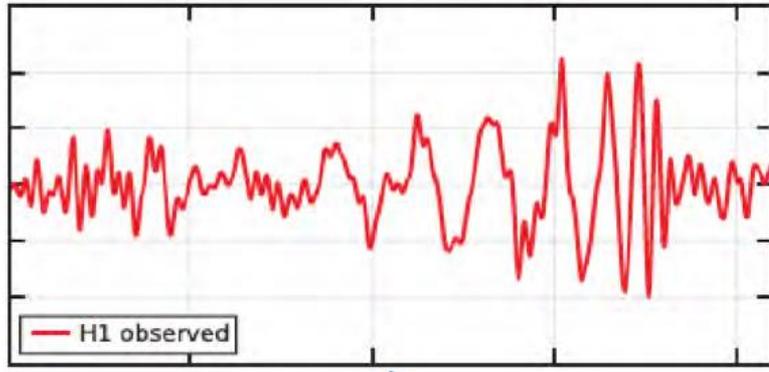
✓ ハイパスフィルター

✓ ホホワイトニング

✓ ラインノイズノッチフィルター

# データ解析

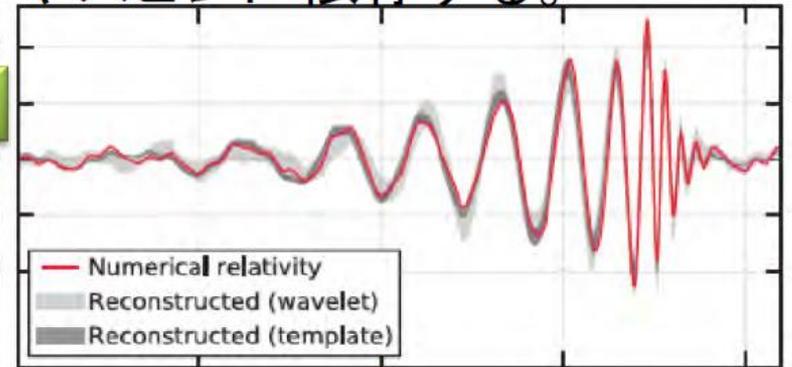
再構成されたBH-BH連星  
合体の重力波波形



比較

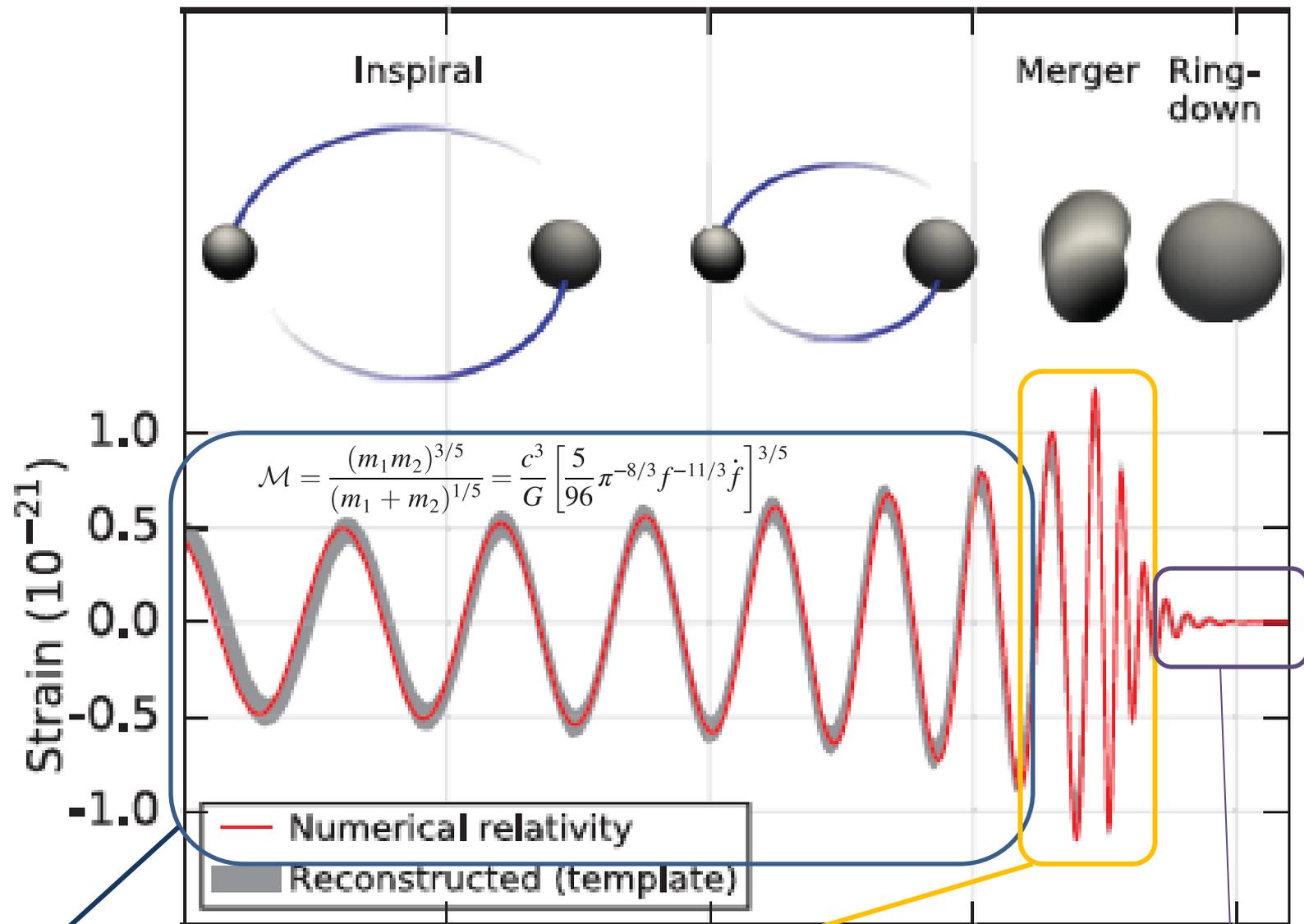


理論計算された波形:質量  
やスピンの依存する。



Matched Filter  $G \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{s}(f)\tilde{h}^*(f)}{S_n(|f|)} df$  つまり観測と理論の相関を

最大化するような波形パラメタを見つけることによってフィットする。  
もしノイズがランダムガウシアンなら、この量はSN比の自乗を与える



BH連星の距離、方向、質量、自転角運動量

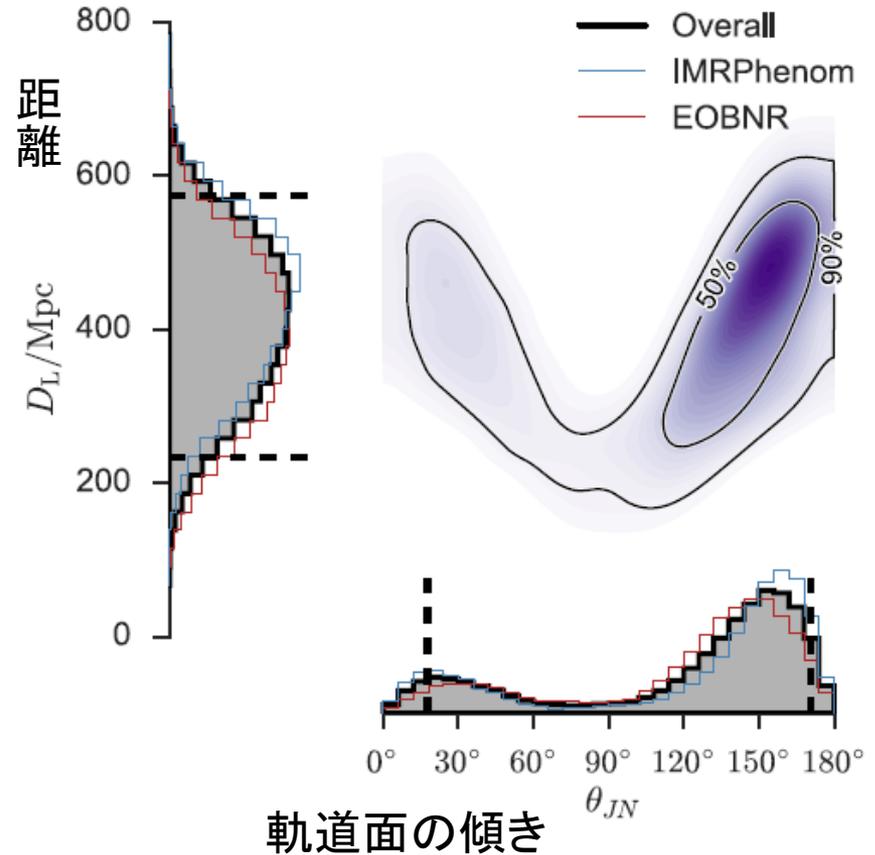
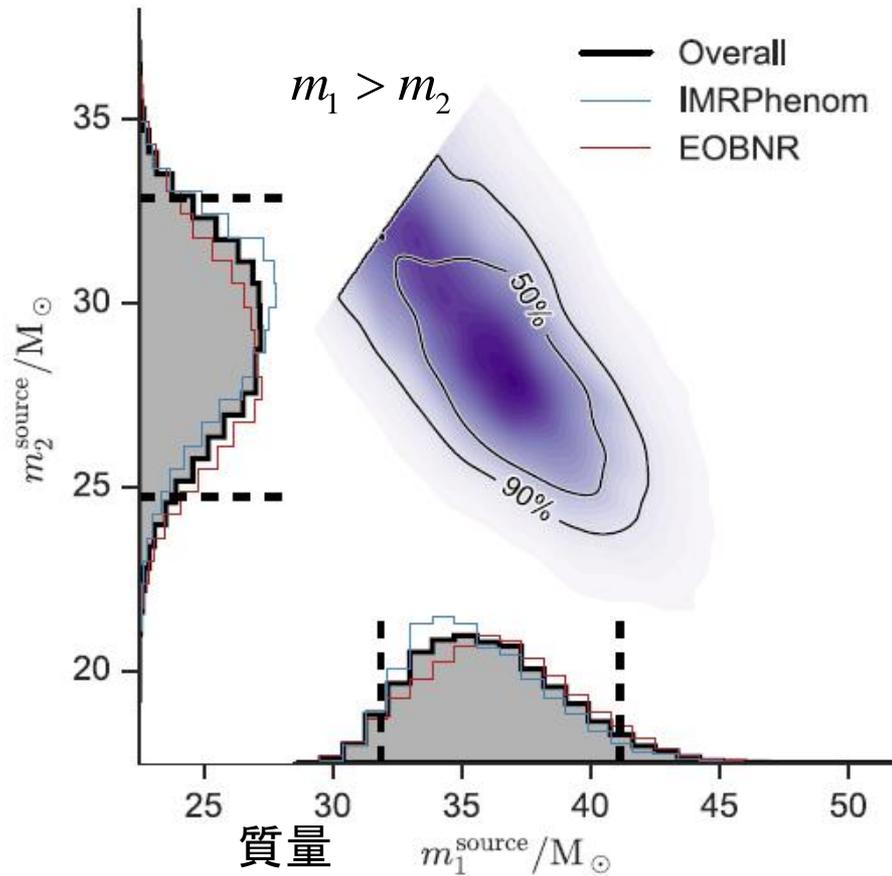
数値相対論  
ホライズンの挙動

生成したBHの質量と自転角運動量

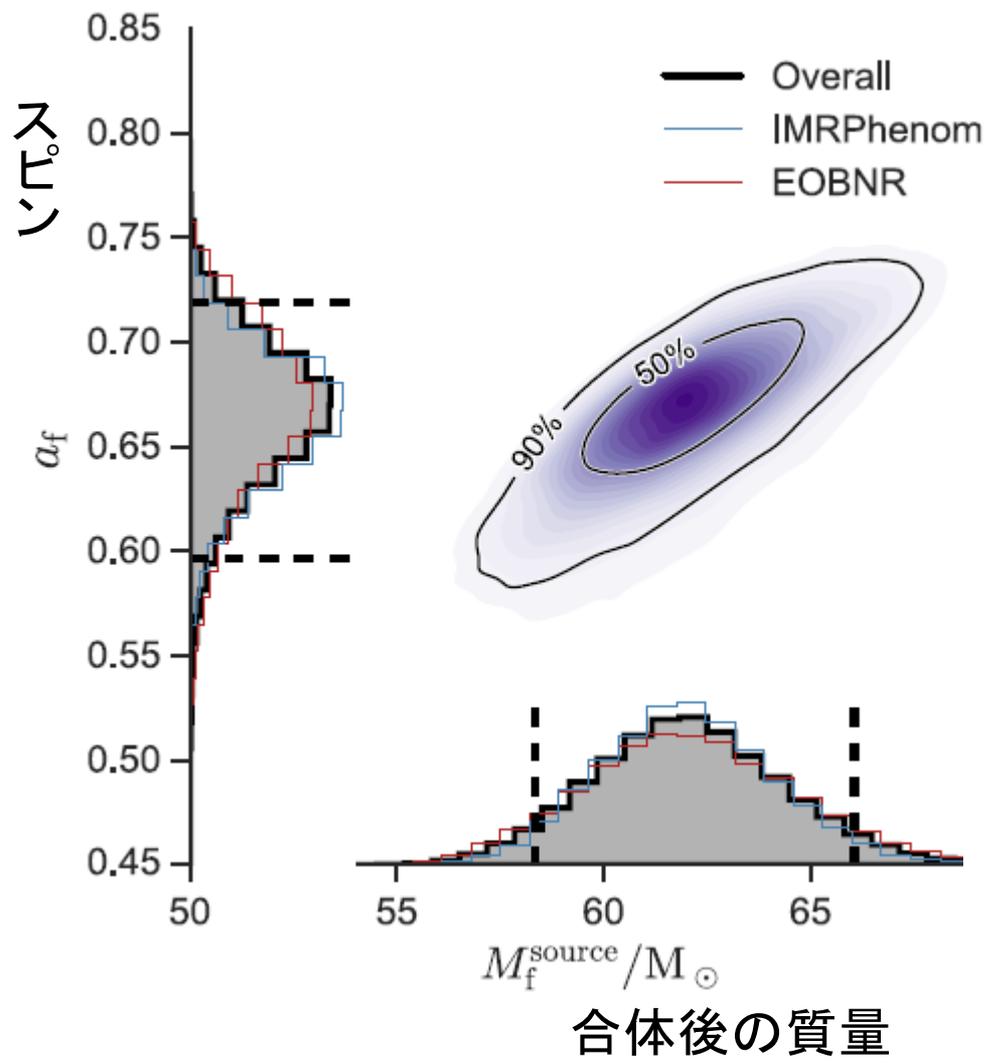
# 理論波形 2通りの計算法を使用して波形パラメタをフィット

IMRPhenom: Inspiral-Merger-Ringdown Phenomenology

EOBNR: Effective one body formalism numerical relativity



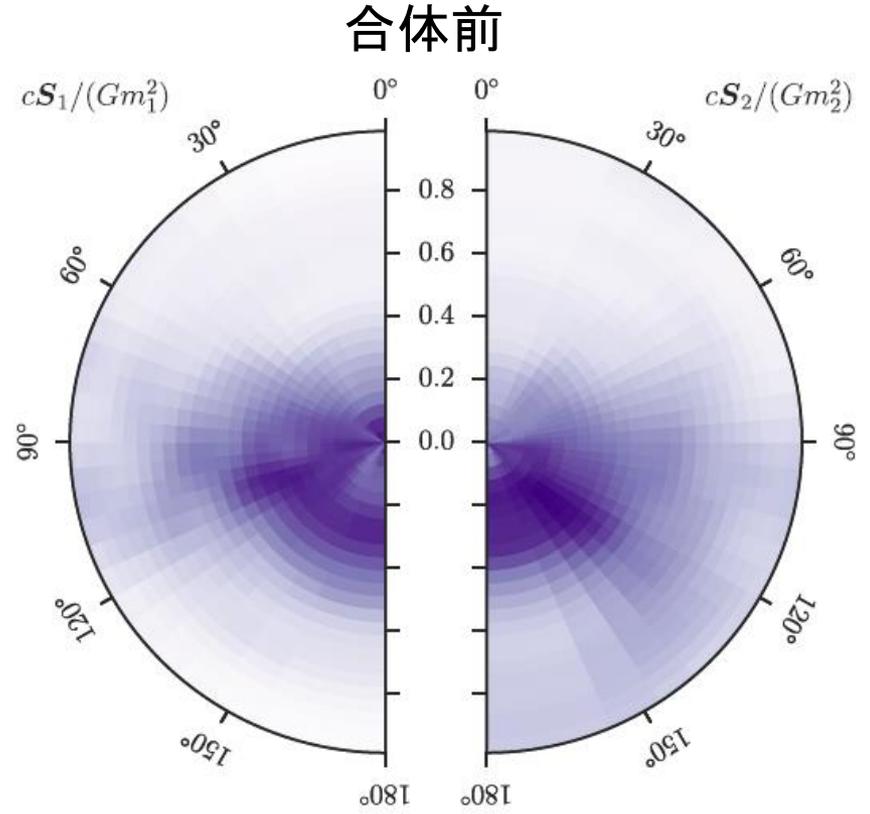
□ = 太陽のこと



## スピンの単位

$$\frac{GM^2}{c} = \frac{1}{2} M \frac{2GM}{c^2} c = \frac{1}{2} M r_g c$$

ホライズン半径で光速で  
 回っているような極端な  
 状況で規格化している

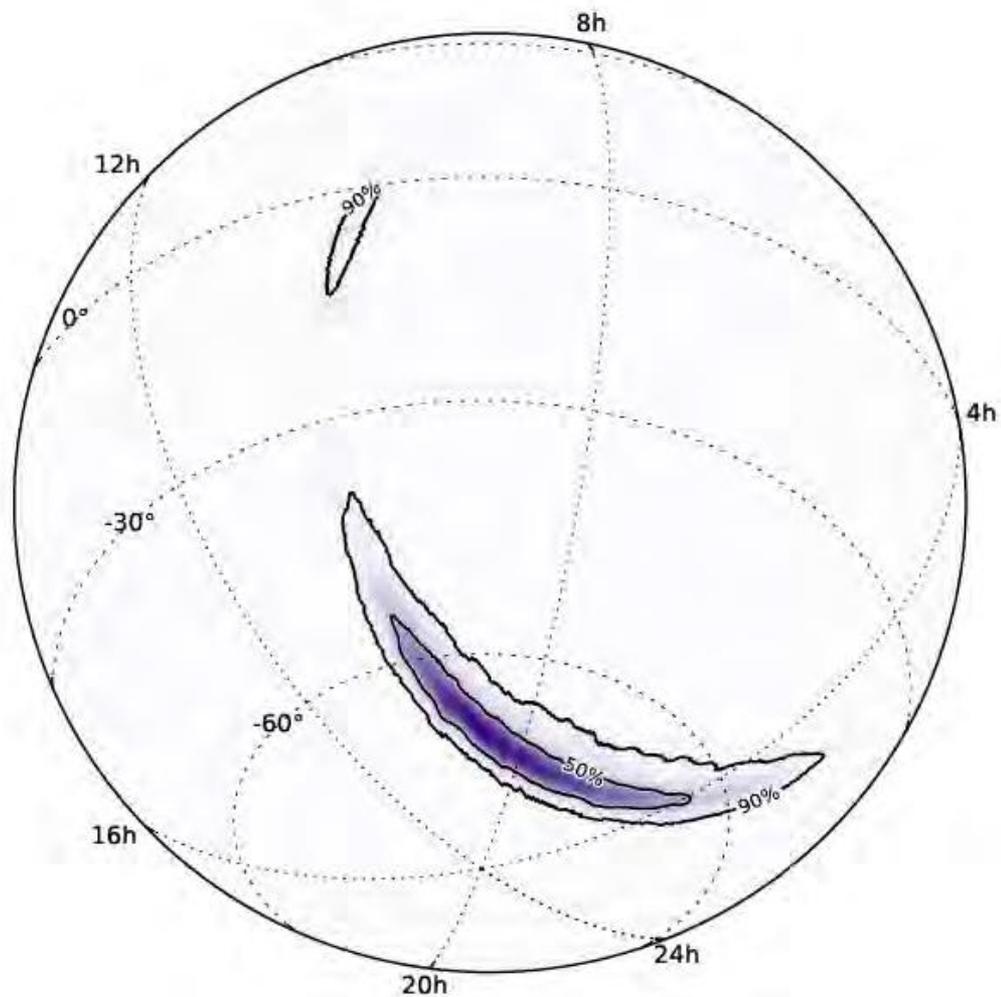


# GW150914: FACTSHEET

<https://losc.ligo.org/events/GW150914/>

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY SPECTROGRAMS (TOP) AND GRAVITATIONAL WAVE STRAIN (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTOR OBSERVATORIES (MIDDLE-TOP), BEST FIT TO THE DATA (MIDDLE-BOTTOM), AND THE MERGER OF TWO BLACK HOLES (BOTTOM)

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz	~10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	$1 \times 10^{-21}$
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	$\pm 0.002$ fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 Mpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.054 to 0.136	peak speed of BHs	~ 0.6 c
signal-to-noise ratio	24	peak GW luminosity	$3.6 \times 10^{56}$ erg s <sup>-1</sup>
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M <sub>⊙</sub>
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses	M <sub>⊙</sub>	remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, $3.5 \times 10^5$ km <sup>2</sup>
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< $1.2 \times 10^{-22}$ eV
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc <sup>-3</sup> yr <sup>-1</sup>
mass ratio	0.6 to 1	online trigger latency	~ 3 min
primary BH spin	< 0.7	# offline analysis pipelines	5
secondary BH spin	< 0.9	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
remnant BH spin	0.57 to 0.72	papers on Feb 11, 2016	13
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
likely sky position	Southern Hemisphere		
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		



- 方向決定:
  - ✓ 到達時間差:  
7 msec (L→H)
  - ✓ 振幅比

- 一般に悪い:  
600平方度@2台

○ KAGRAも加わると  
このくらいで決められる  
はずである

意外にも、初検出は連星中性子星合体ではなく、連星ブラックホール合体だった。

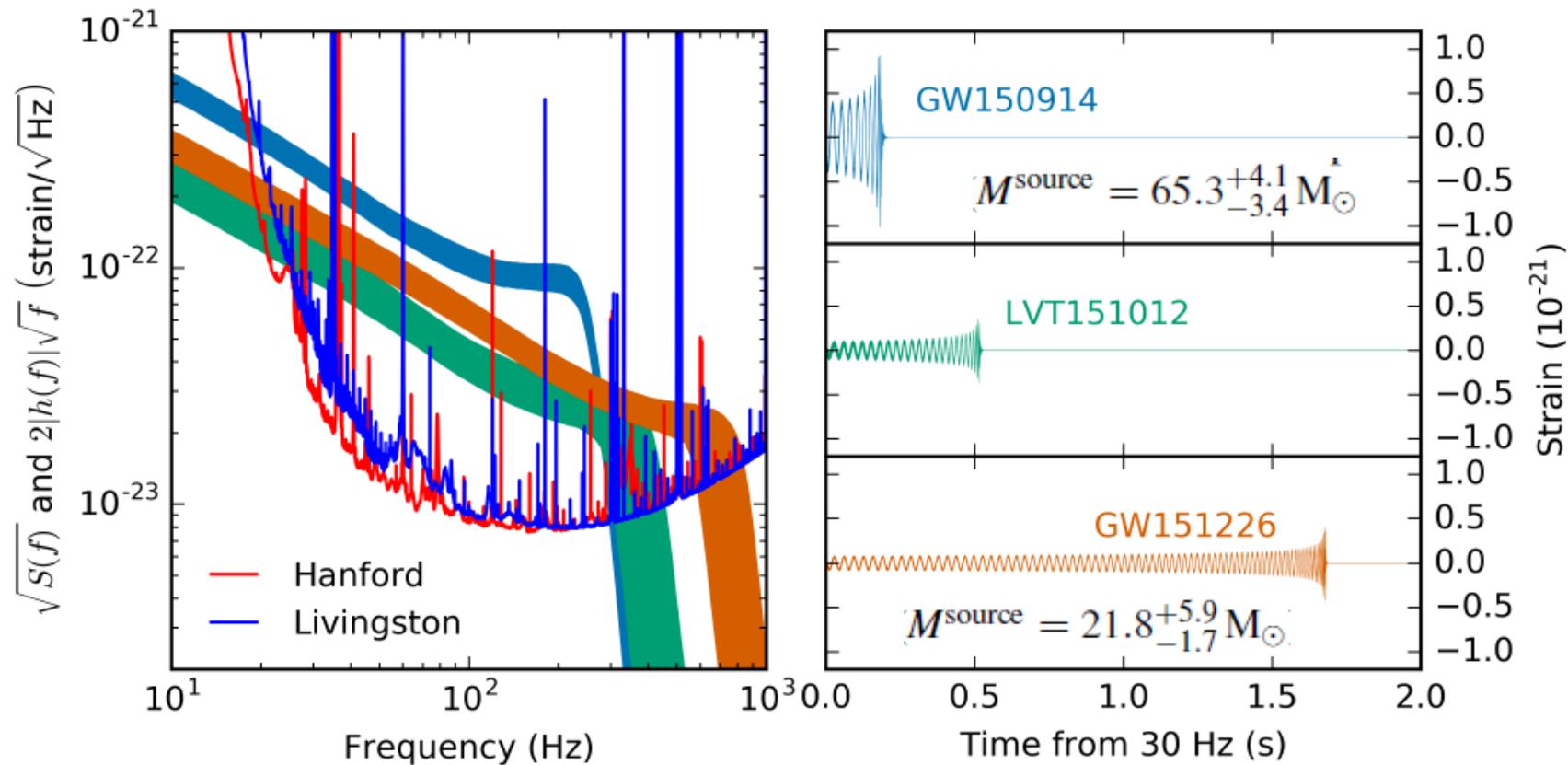
しかし、天文学の歴史は、人類が新しい観測手段を得るごとにそれまで予想もしなかった発見の繰り返しだったので、今回も驚くには当たらない。

今後さらに多くのイベントが期待される。  
連星中性子星の合体も発見されるであろう。

KAGRAが本格稼働するまでは、重力波源の方向を精度良く特定することはできない。また、重力波の偏光を検出することもできない。一般相対論の真の検証はKAGRAまでお預け！  
LIGO/Virgoチームとしても今回の結果は一般相対論と無矛盾であると主張しているに過ぎない。

ビッグバン宇宙国際研究センターにKAGRA重力波データ解析国際協力部門を設立し、カナダLIGOチーム代表だったKipp Cannon氏が准教授に就任。

その後2015年12月26日にももう一つのイベントが見つかった



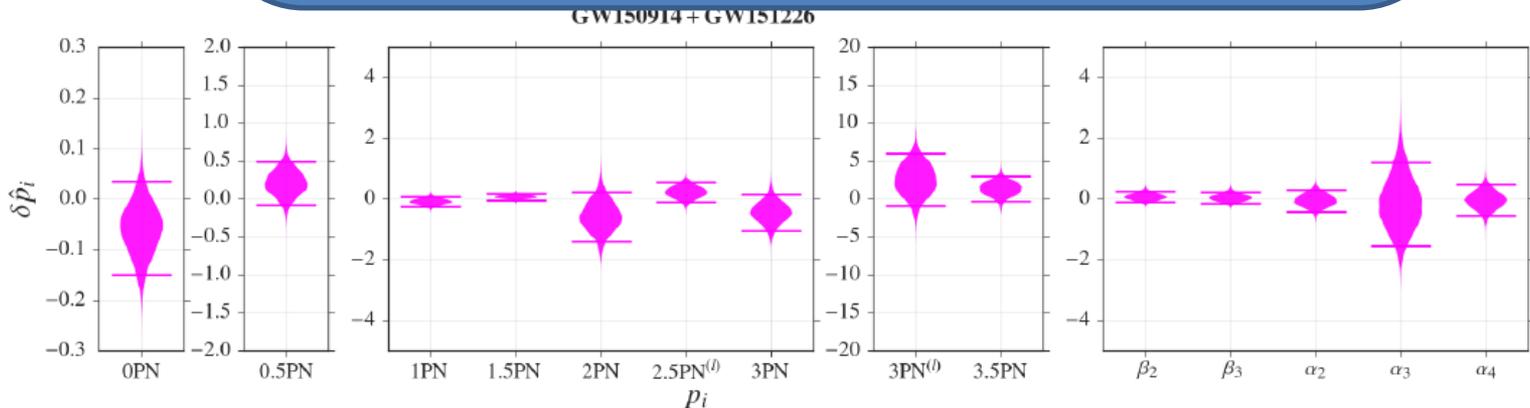
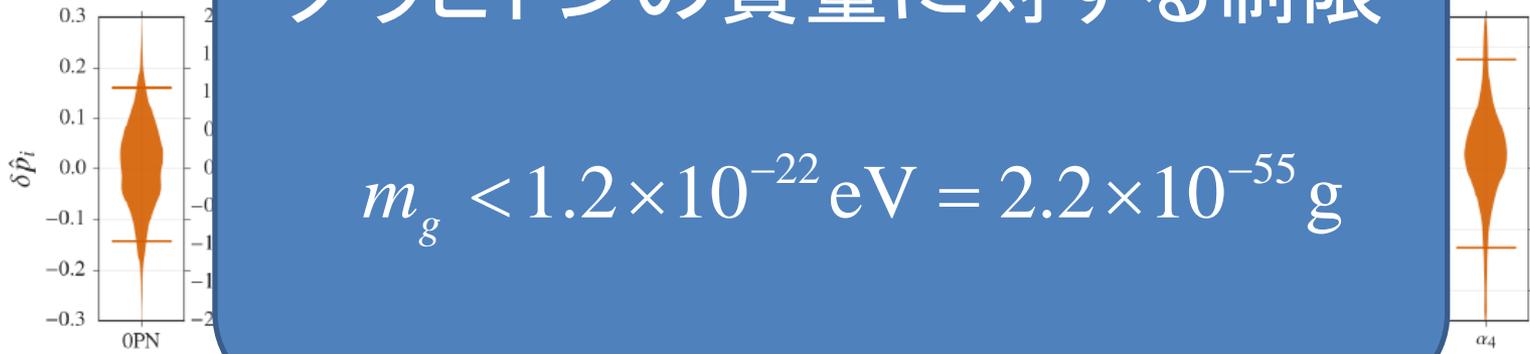
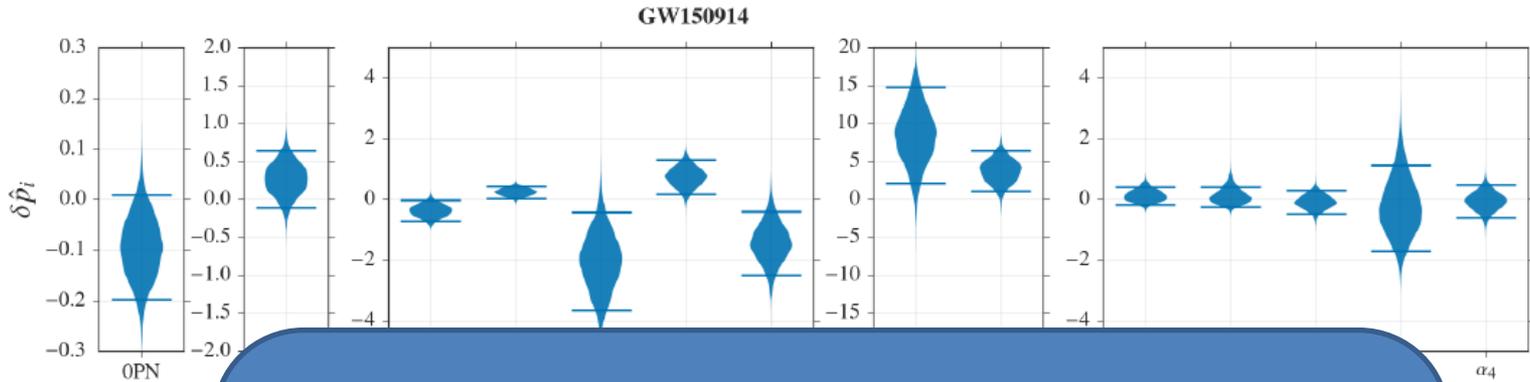
$$\rho^2 = \int_0^{\infty} \frac{(2|\tilde{h}(f)|\sqrt{f})^2}{S_n(f)} d\ln(f)$$

# 重力理論のテスト

一般相対論の値からのズレを表すさまざまなパラメータをフィットした結果、いずれもゼロと無矛盾であった

## グラビトンの質量に対する制限

$$m_g < 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV} = 2.2 \times 10^{-55} \text{ g}$$



$v/c$  展開

# ブラックホールの起源は何か？

まだよくわからない

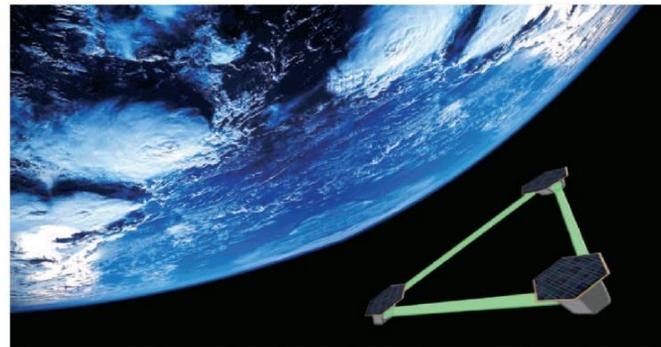
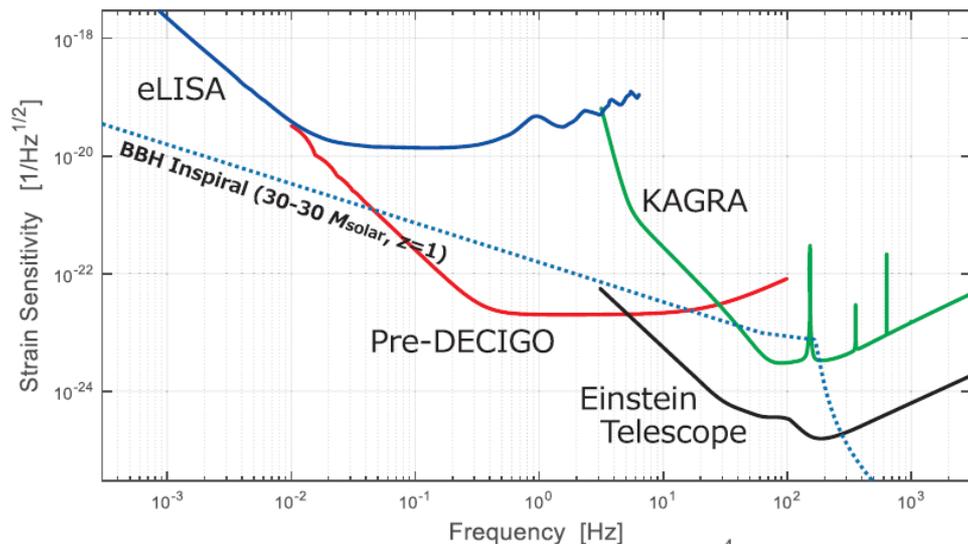
今後イベント数が増えて、質量分布やスピンのわかるようになれば、絞り込まれていくだろう

これまでX線で観測されてきたブラックホール候補天体は  $10 M_{\odot}$  程度だったので、3倍以上も重い新種のブラックホールが見つかったことになる。

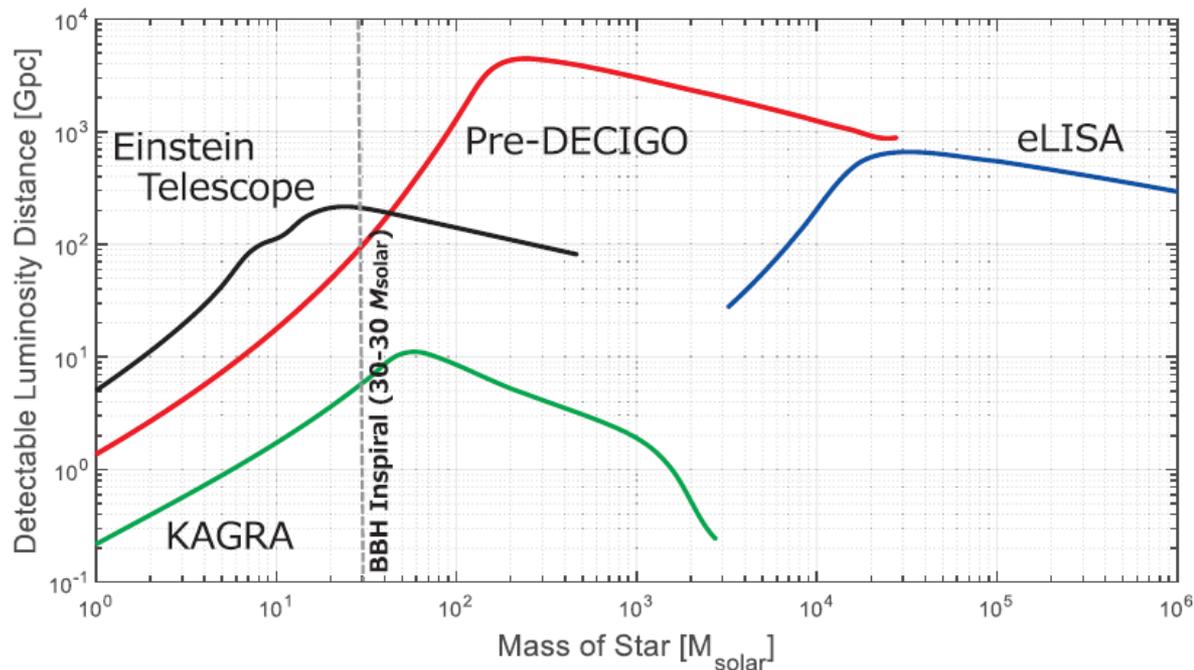
太陽と同じような金属組成を持つ種族Iの星は、恒星風によって質量を失うので、このような思いブラックホールにはなれない。種族IIの低金属星か、金属を含まない第一世代の天体(種族III)である可能性が高い。とくに、種族IIIの星を考えると  $30 M_{\odot}$  のブラックホール連星が自然に説明できる。(Kinugawa et al 2014)

初期宇宙の高密度揺らぎから放射優勢期にできた原始ブラックホールかもしれない。(Sasaki et al 2016)

# スペースレーザー干渉計B-DECIGOができれば区別できる！



30太陽質量のブラックホール連星を赤方偏移 $z \sim 30$ まで検出できる。初代天体説なら $z \sim 10$ 以遠はないが、原始ブラックホールなら $z \sim 20$ より遠くのものも存在するので両者を区別できる



ここから先は宇宙論的重力波の話

上州 剛毅 唯口 至  
神期 勝利 直接 萬人 誠易 被救 無大

鑑三



## RESCEU

Research Center for the Early Universe  
School of Science, The University of Tokyo  
Tokyo, 113-0033, Japan

# INVITATION TO Gravitational Wave Cosmology



## RESCEU

Research Center for the Early Universe  
School of Science, The University of Tokyo  
Tokyo, 113-0033, Japan

# 宇宙論

私たちは、どこから来て、どこに行きつとどこへ行くのか？  
それを物理学によって知りたい

現在 138億年

↑  
ダークエネルギー時代

銀河形成

初代天体形成

晴れ上がり 38万年

元素合成 3分

↑  
熱いビッグバン宇宙の始まり

↑  
インフレーション

多重発生する宇宙

↑  
時間

# 私たちの宇宙

大きい

$$100\text{億光年} \approx 10^{28} \text{ cm} \quad \square \quad l_{pl} = c^{-\frac{3}{2}} \hbar^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} = 1.6 \times 10^{-33} \text{ cm}$$

基礎物理定数から作ったプランク長

年を取っている

$$100\text{億年} \approx 10^{17} \text{ sec} \quad \square \quad t_{pl} = c^{-\frac{5}{2}} \hbar^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} = 5.4 \times 10^{-44} \text{ sec}$$

基礎物理定数から作ったプランク時間

以下  $c = \hbar = 1$  とします

豊かな階層構造を持っている  
宇宙背景放射に満たされている

現在 137億年

宇宙はいつ生まれたか？

ダークエネルギー時代

インフレーションはいつ起こったか？

ビッグバンはいつ起こったか？

形成

38万年

分

熱いビッグバン宇宙の始まり

インフレーション

↑  
インフレーション

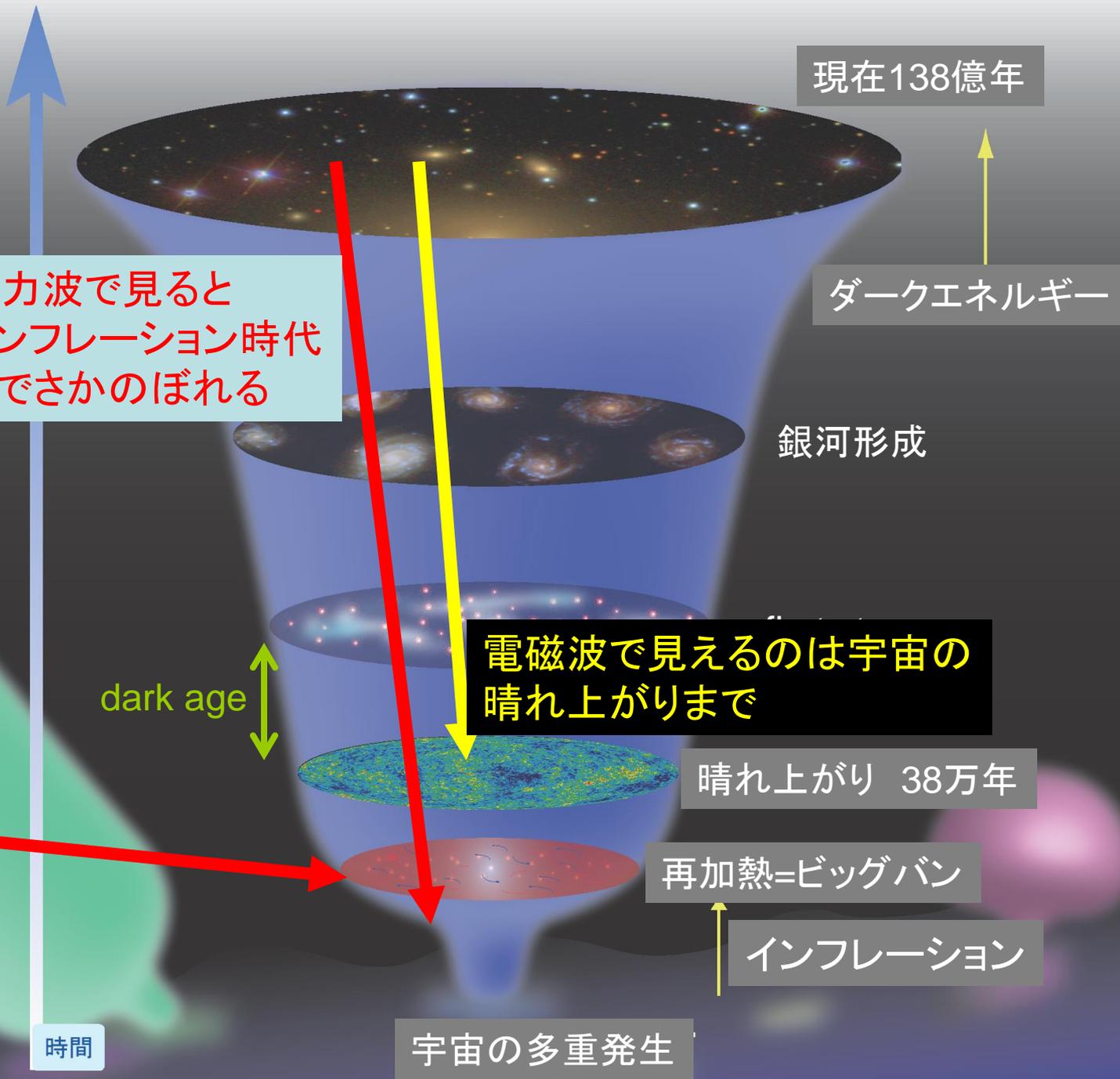
多重発生する宇宙

以上全てに対して初期宇宙の本質的な役割を果たしている  
インフレーションが

# なぜ重力波 宇宙論か？

重力波で見ると  
インフレーション時代  
までさかのぼれる

ビッグバン元素  
合成とインフレーションの間の  
暗黒時代のこと  
が重力波によって  
わかる



現在138億年

ダークエネルギー

銀河形成

電磁波で見えるのは宇宙の  
晴れ上がりまで

晴れ上がり 38万年

再加熱=ビッグバン

インフレーション

時間

宇宙の多重発生

# 指数関数的膨張宇宙での量子的重力波生成を示した 1979年。インフレーション宇宙論が出るより前!! A.スタロビンスキー(ビッグバン宇宙国際研究センター永年客員教授)

Письма в ЖЭТФ, том 30, вып. 11, стр. 719 – 723

5 декабря 1979 г.

## СПЕКТР РЕЛИКТОВОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И НАЧАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ВСЕЛЕННОЙ

А.А.Старобинский

Рассмотрена феноменологическая модель Вселенной, в которой до начала классического фридмановского расширения Вселенная находилась в максимально симметричном квантовом состоянии. Вычислен спектр длинноволнового фонового гравитационного излучения, возникающего в такой модели. Возможности детектирования этого излучения в диапазоне  $10^{-3} - 10^{-5}$  Гц являются обнадеживающими.

В настоящее время теория квантовых эффектов в сильных гравитационных полях является уже достаточно развитой, чтобы можно было

719

## Spectrum of relict gravitational radiation and the early state of the universe

A. A. Starobinskii

L.D. Landau Institute of Theoretical Physics, USSR Academy of Sciences

(Submitted 25 October 1979)

Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 30, No. 11, 719–723 (5 December 1979)

A phenomenological model of the universe, in which, the universe was in a maximum symmetrical quantum state before the beginning of the classical Friedman expansion, is examined. The spectrum of long-wave, background, gravitational radiation is calculated in this model. The possibility of detecting this radiation in the range  $10^{-3} - 10^{-5}$  Hz is promising.

PACS numbers: 98.80.Bp, 95.30.Sf

At present, the theory of quantum effects in strong gravitational fields has reached the stage of development at which it is possible to ask what was the state of the universe before the beginning of its classical expansion according to the Friedman

682 0021-3640/80/230682-04\$00.60

© 1980 American Institute of Physics 682



現在の宇宙 137 億年

ダークエネルギー時代

インフレーション中に生成した原始重力波は宇宙マイクロ波背景放射の偏光を観測することによって検出できる。その振幅からインフレーションがいつ起こったかがわかる。

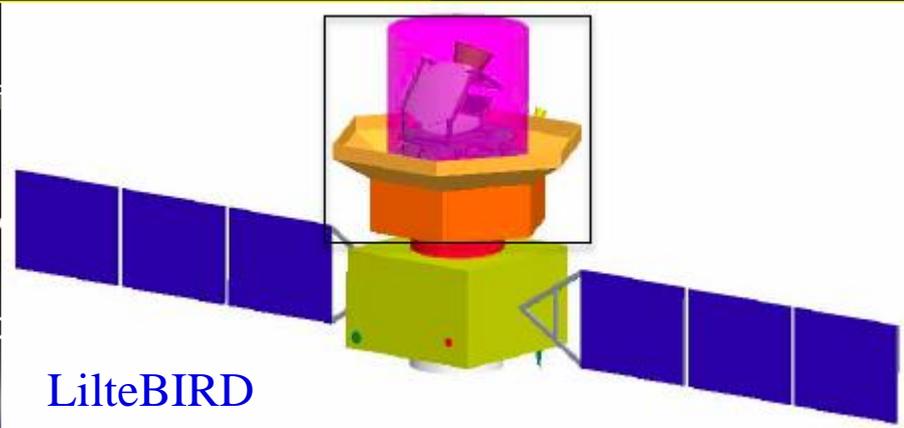
宇宙の晴

熱いビッグ

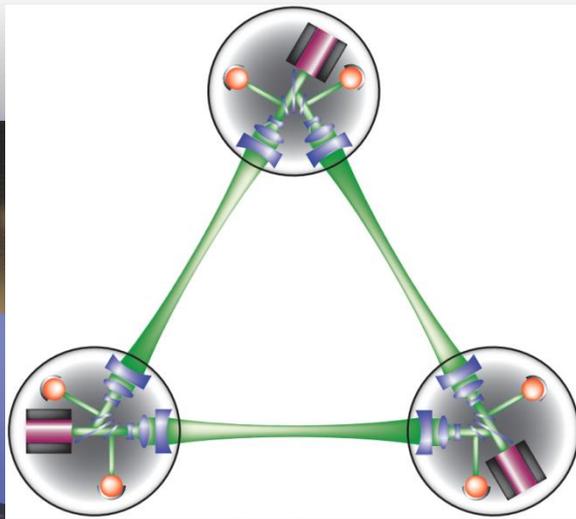
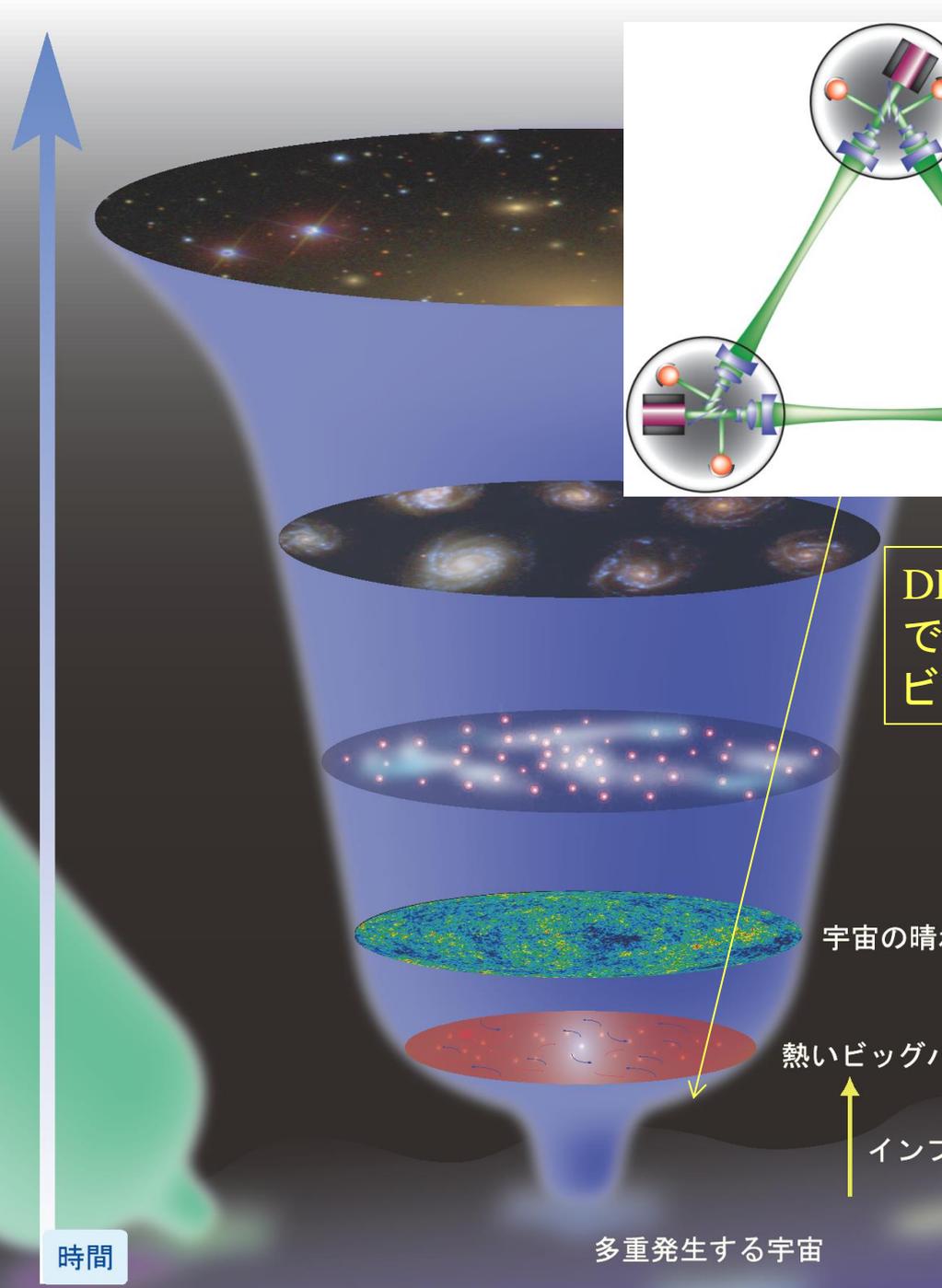
イン

多重発生する宇宙

時間



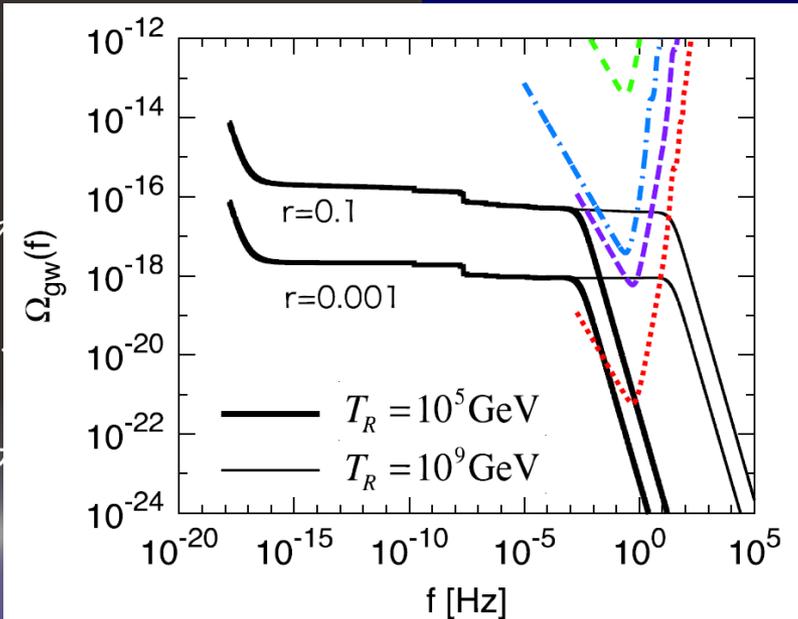
LiteBIRD



億年

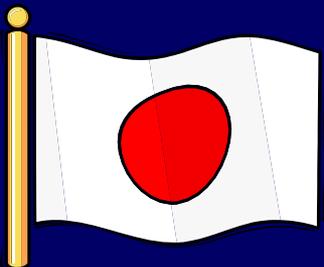
エネルギー時代

DECIGOで原始重力波を直接観測できると、宇宙の熱史がわかり、ビッグバンがいつ起こったかわかる。



# インフレーションと重力波

- ★宇宙の大域的に一様・等方・平坦性はインフレーションによって説明
- ★観測されている曲率ゆらぎはインフレーションの予言と整合的だが、モデルを決定するには至っていない。
- ★そう遠くない将来量子的重力波が見えことが、モデルの自然さからも期待される。すると、インフレーションがいつ起こったかわかる。
- ★CMBによって量子的重力波が観測されたら、スペース重力波干渉計DECIGOによって宇宙の再加熱温度が測れると期待される。ビッグバンがいつ起こったかわかる。



LiteBIRDとDECIGO

日本の実験宇宙論

# まとめ

advanced LIGOが連星ブラックホール合体からの重力波を発見した

ブラックホールが存在する直接の証拠をつかんだ

強重力場中で一般相対論が成り立っている証拠を得た。

重力波が2つの偏光を持っていることは、KAGRAが稼働するまでわからない。

イベントの方向を特定することもまだできていない。

ブラックホールの起源は興味深い問題である。

今後中性子星合体からの重力波が見つかりと期待され、中性子星の内部構造や状態方程式がわかるようになる。

いずれ宇宙論的重力波の研究が進む時代になるだろう

上州無名亦無大  
剛毅木訥易被欺  
唯以三直接萬人  
至誠信神期勝利

盤三