

# 重力波とシミュレーション

柴田 大

京都大学 基礎物理学研究所



# Outline

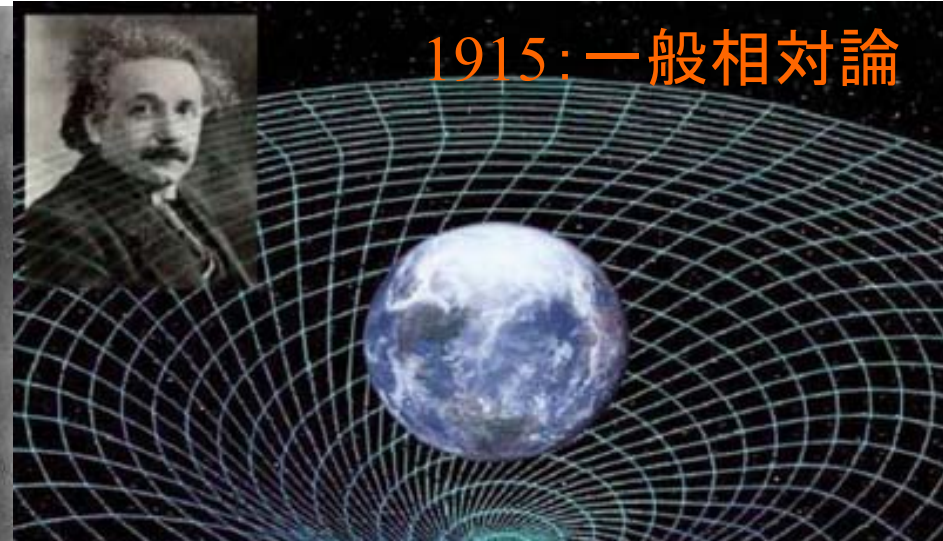
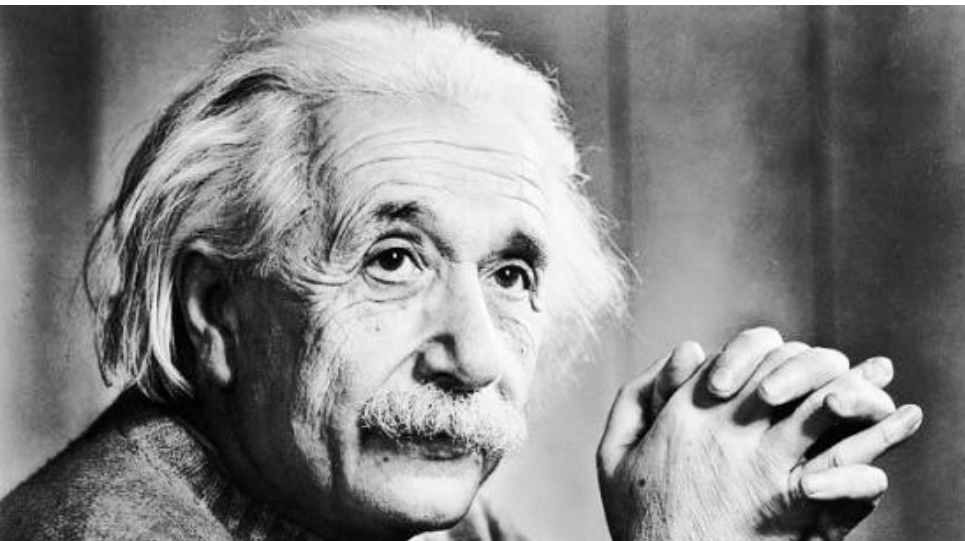
1. **GW150914: First direct detection**
2. **連星中性子星の合体**
3. **連星中性子星合体の観測展望**

# **1 GW150914**

**“The first direct detection of  
gravitational waves”**

**“The first discovery of  
binary black holes”**

# 一般相対性理論と重力波



1915: 一般相対論



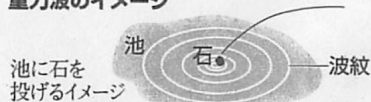
Rai Weiss & Kip Thorne

1916: 重力波の存在予言

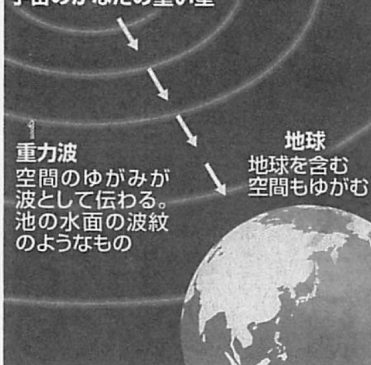
1960代: Weber の努力  
1970代～: レーザー干渉計による  
重力波の直接観測計画  
1990代～: LIGO, VIRGO,  
GEO, TAMA



## 重力波のイメージ



## 宇宙のかなたの重い星



# 重力波を初観測

発表チーム米

## 相対性理論裏付

## 宇宙探る新たな

100年前にアインシュタインが存在を予言し、世界の研究者が観測を目指していた「重力波」について、米国の研究チームが11日、初めて観測したと発表した。最終的に確認されれば理論が実証されたことになり、物理学の歴史的な成果となる。光や電波ではわからない宇宙の姿を探る新たな天文観測にも道が開ける。

▼3面＝アインシュタインの宿題について

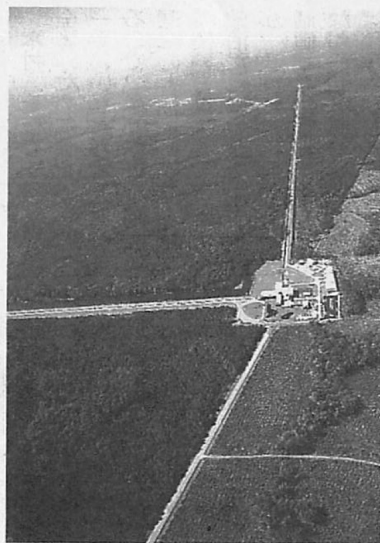
重力波は、時間や空間がわずかに伸び縮みする「時空のひずみ」がさざ波のように伝わる現象。物体が加速して動くときに起こる。アインシュタインが191

6年、一般相対性理論から予言していた。その観測は「最後の宿題」とされ、物理学の長年の悲願だった。重力波はあらゆる運動で生じるとされるが、極めて

微弱で通常は観測できない。このため、星の合体などで生じた大きな重力波をとらえることになる。研究チームは米国2カ所にある装置「LIGO」の性能を大幅に高め、昨年9月から今年1月上旬まで観測、分析作業を進めていた。

発表によると、昨年9月14日、地球から13億光年離

れた二つのが合体したとされる重力波で検出できた。物理学者「ビュー・レ」が掲載された「我々は「カメフラシ」の仲間だ」という一大会場から大興奮を受けた。今後、別の可能性も検証を受け、研究チームは、長さ4



米ルイジアナ州リビングストンにあるLIGOの重力波観測所。カリフォルニア工科大・マサチューセッツ工科大・LIGO研究所提供

## 重力波の観測

内部を真空にした2本のパイプ、それぞれにレーザー光を往復。重力波によって空間がひずんだとかな距離の差をとらえる。LIGOは、トンネルとルイジアナ州の2カ所、長さ4km、約3km離れた2カ所、ここで検出精度を高めている。カリフォルニア工科大・マサチューセッツ工科大など、世界各国の科学者1千人超が

## 最難題 100年越し解明

解説

「宇宙は膨張する」

「重力が曲がる」

「アインシュタインが100年前に発表した一般相対性理論で示した宇宙像は、人々の常識を根底から覆すものだった。『時空のひずみが波として伝わる』という重力波もその一つだ。

直後の宇宙、大きな目標と。138億

予言は観測によって一つずつ実証されてきたが、重力波は最難関とされた。それも、この100年の技術革新によって、ついに実現さ

れる日が来た。また一つの研究チームの速報で検出作業は残るが、人類は「重力波天文学」という宇宙を知るための新たな手段を手に入れることになる。

重力波を使えば、光や電波をとらえる従来の望遠鏡ではわからない天体の「別の姿」を見ることができ、強い重力で光を吸い込むブラックホールはそ

直折て下つ、ついでに重力波



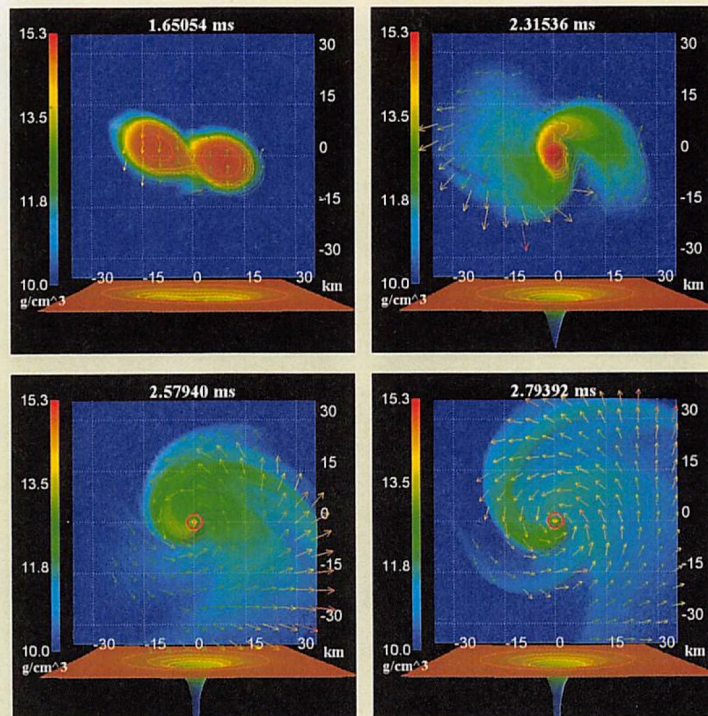
# 一般相対論の 世界を探る

重力波と数値相対論

柴田 大—[著]

2007年 1 月出版

残念ながら  
あまり  
売れなかった



次に 2-4 章で、(2) と (3) の部分を説明する。特に強調するのは、今後の課題の 1 つは、強い重力場が激しく時間変動する現象を観測し理解することであり、またその手段として重力波を用いた観測が有効である、という点である。重力波の直接検出はこれまでにないが、控えめに予想しても、一般相対論の誕生 100 周年にあたる 2015 年までには達成されるであろう。その後は、重力波を観測手段とする天文学が始まるはずである。一般相対論的天体の観測手段が、飛躍的に向上することは間違いない。

本書の後半では、数値相対論の概要と最新の成果について紹介する。先に述べたように、重力場が激しく時間変動する一般相対論的現象は今後観測されることが予想されるが、数値相対論はその観測事実を解き明かすための唯一の理論的研究手段である。近年その重要性が高く認識されたため活発に研



# アメリカ：LIGO重力波望遠鏡

## Simultaneous Detection *LIGO*



LIGO: Hanford



LIGO: Livingstone

3000km離れている



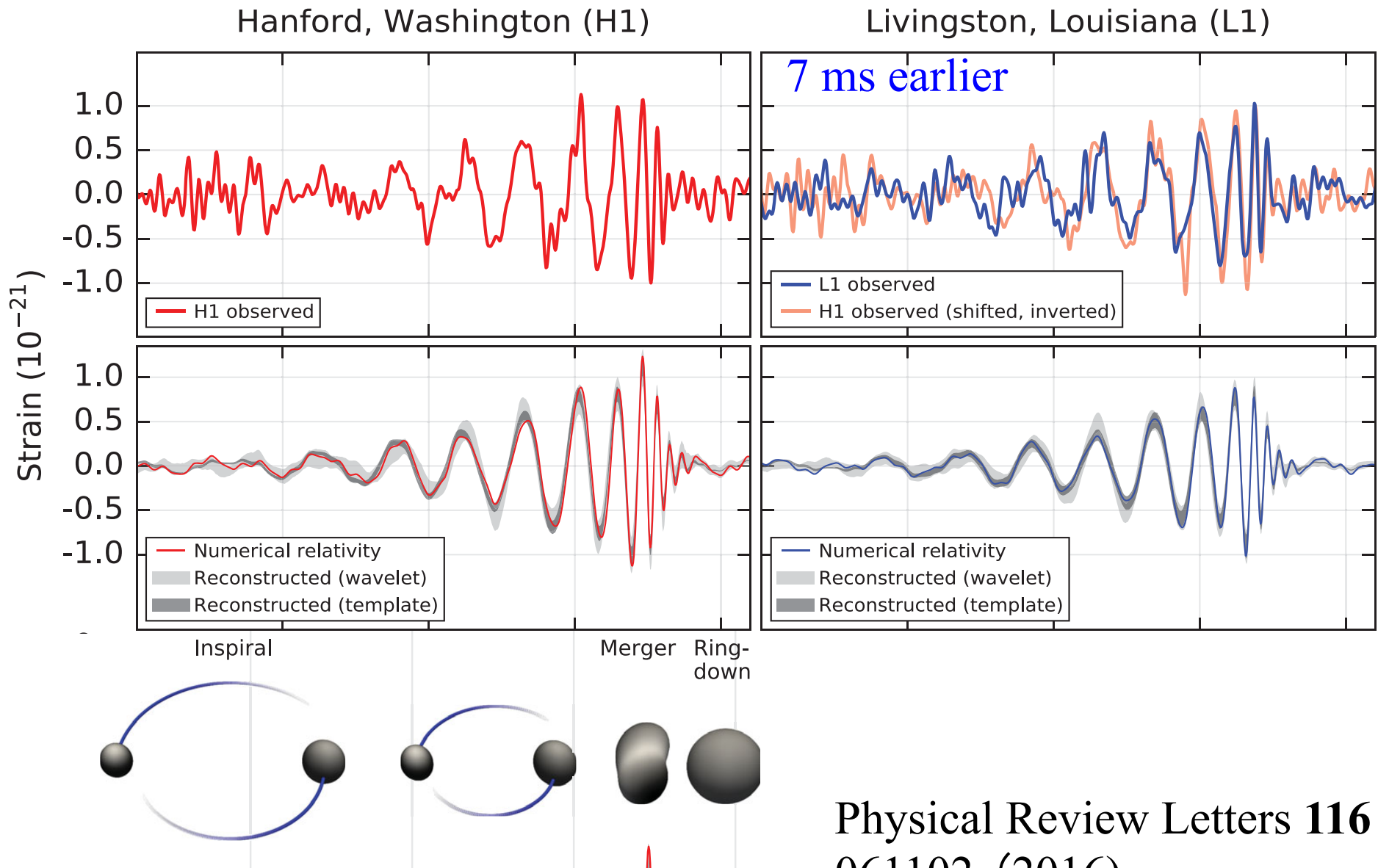
10光ミリ秒

# iKAGRA: 2016/3/25~ 数年先には本格稼働





# GW150914: 重力波波形



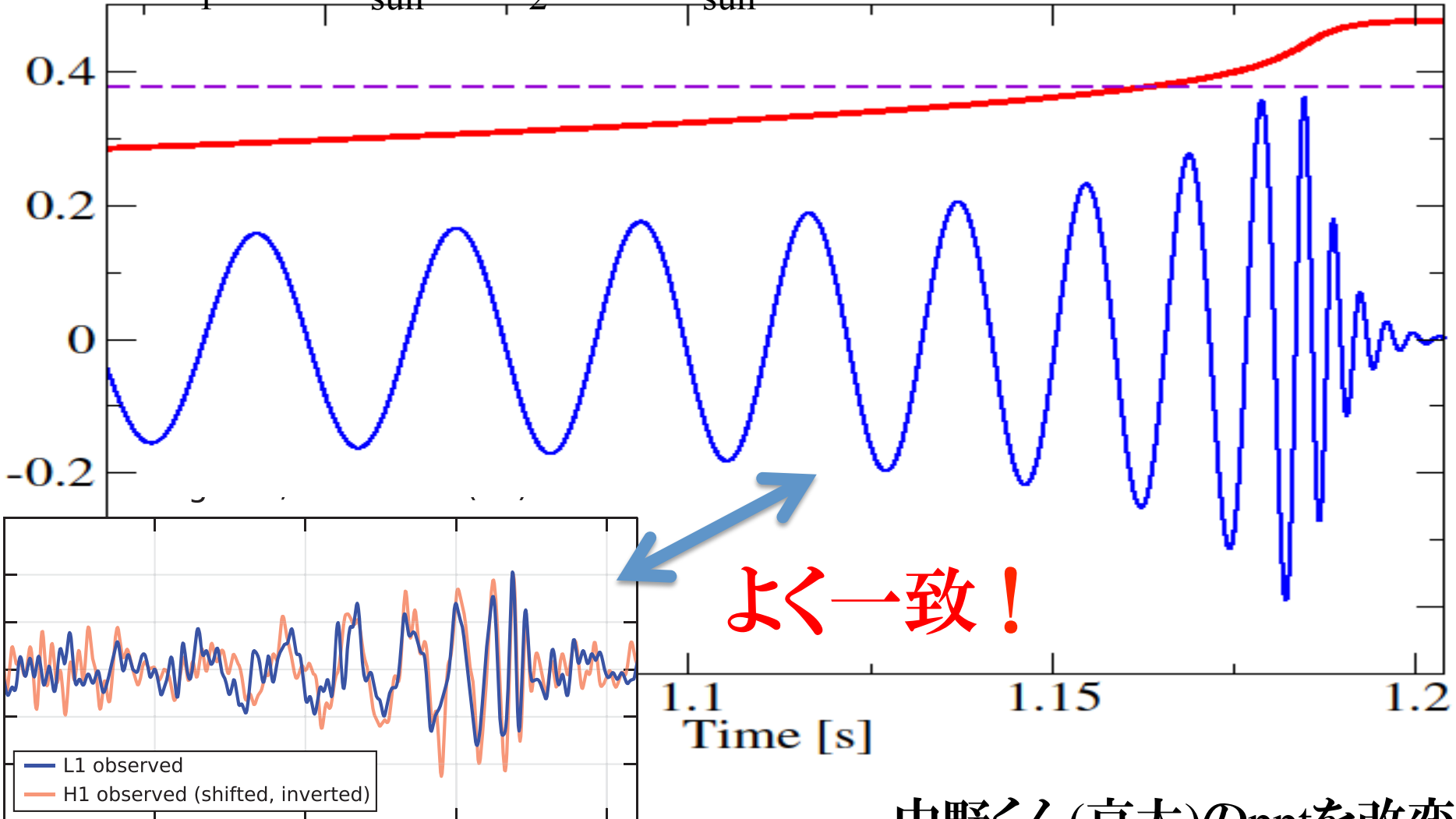
# 連星ブラックホール合体： 数値シミュレーションの結果とよく一致！

**Albert Einstein Institute/SXS提供: Grateful to Roland Haas**



# Gravitational waveform by numerical relativity: by Caltech-Cornell-CITA

$M_1 = 36 M_{\text{sun}}$     $M_2 = 29 M_{\text{sun}}$

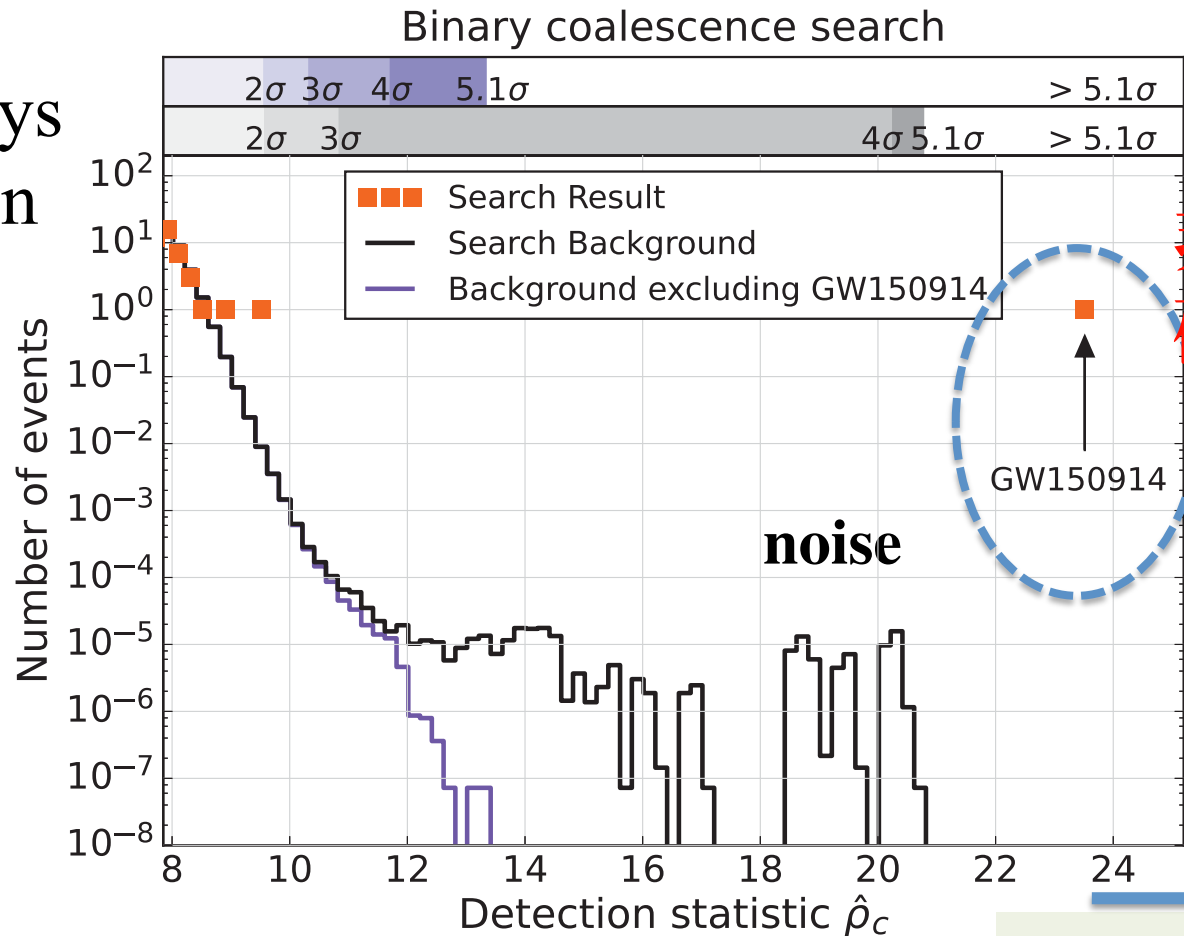


中野くん(京大)のpptを改変

# LIGO noise vs signal

PRL 116, 2016, LIGO collaboration

Per 16-days observation



非常に高い  
確からしさ

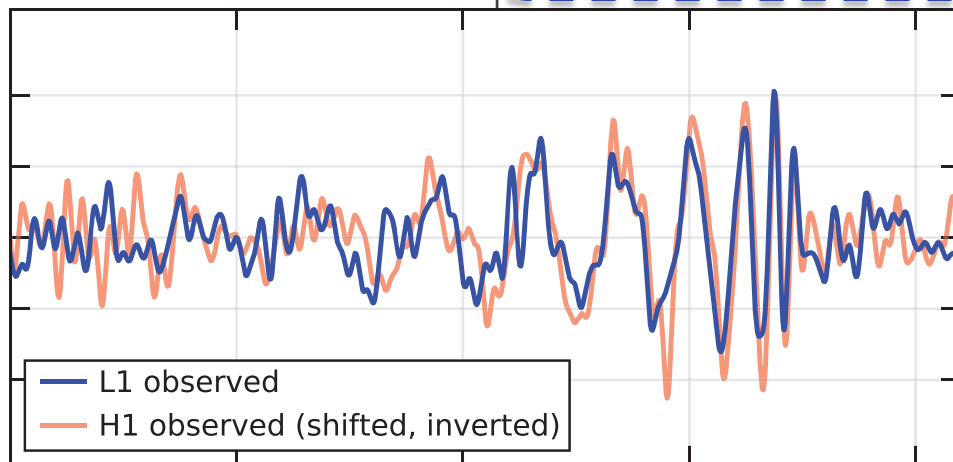
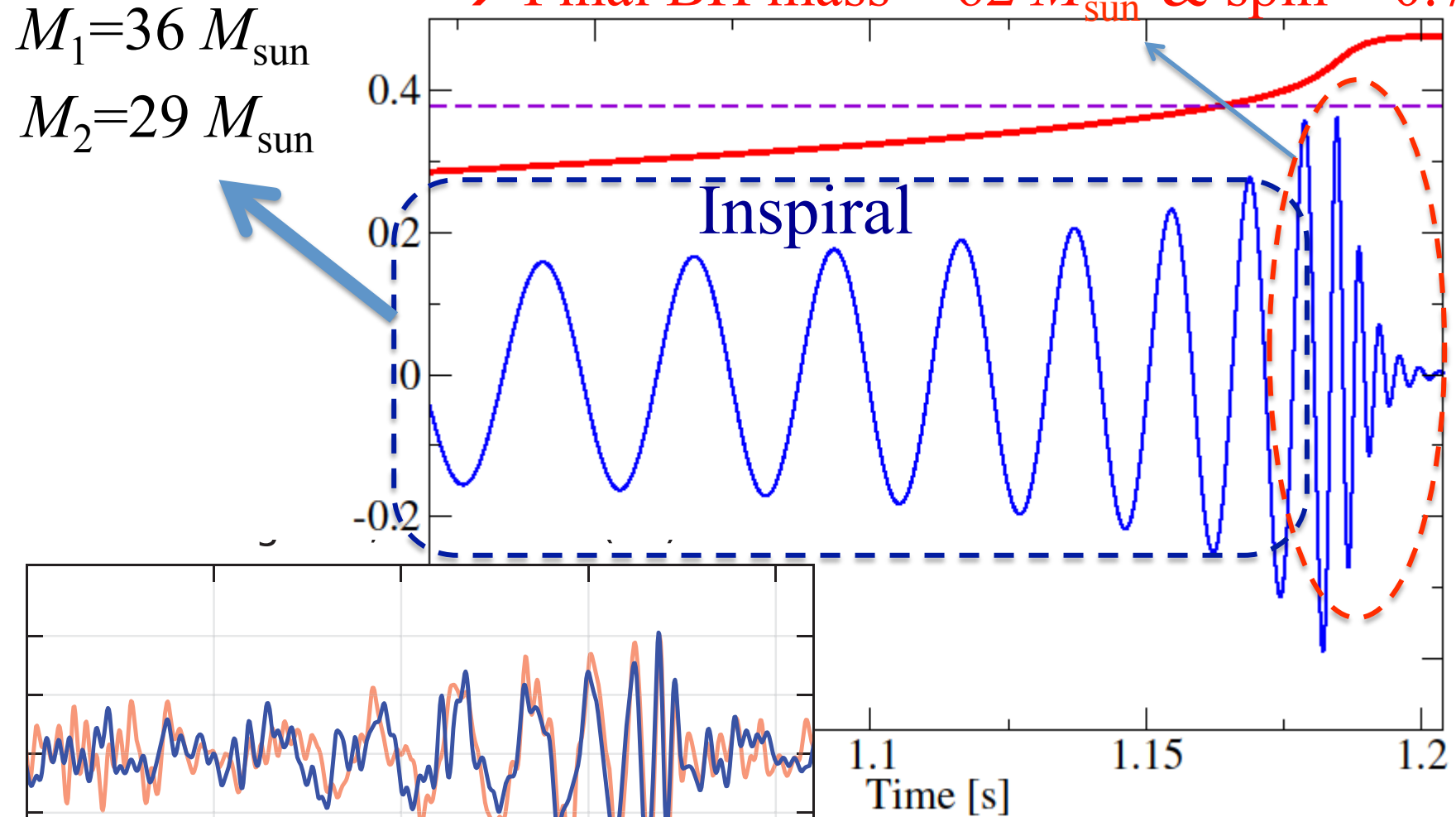
- SNR < 10 events = low confidence level
- SNR > 12: Significant confidence

$$SNR = \left( 4 \int_0^{f_{\max}} \frac{h_f g_f^*}{S_n} df \right)^{1/2}$$

# 何がわかるのか？

## Merger + Ringdown

→ Final BH mass  $\sim 62 M_{\text{sun}}$  & spin  $\sim 0.7$



中野くん(京大)のpptを改変



# ブラックホールの準固有振動

$$h(t \geq t_0) = A e^{-(t-t_0)/\tau} \cos [2\pi f_0 (t - t_0) + \phi_0]$$

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi M_{\text{BH}}} \left[ 1.5251 - 1.1568 (1-a)^{0.1292} \right] \\ \tau &= \frac{1}{\pi f_0} \left[ 0.700 + 1.4187 (1-a)^{-0.4990} \right] \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Fitting formula} \\ \text{(Berti et al. 09)} \end{array}$$

$f_0$  : oscillation frequency,  $\tau$  : damping timescale

$M_{\text{BH}}$  : BH mass,  $a$  : dimensionless BH spin parameter

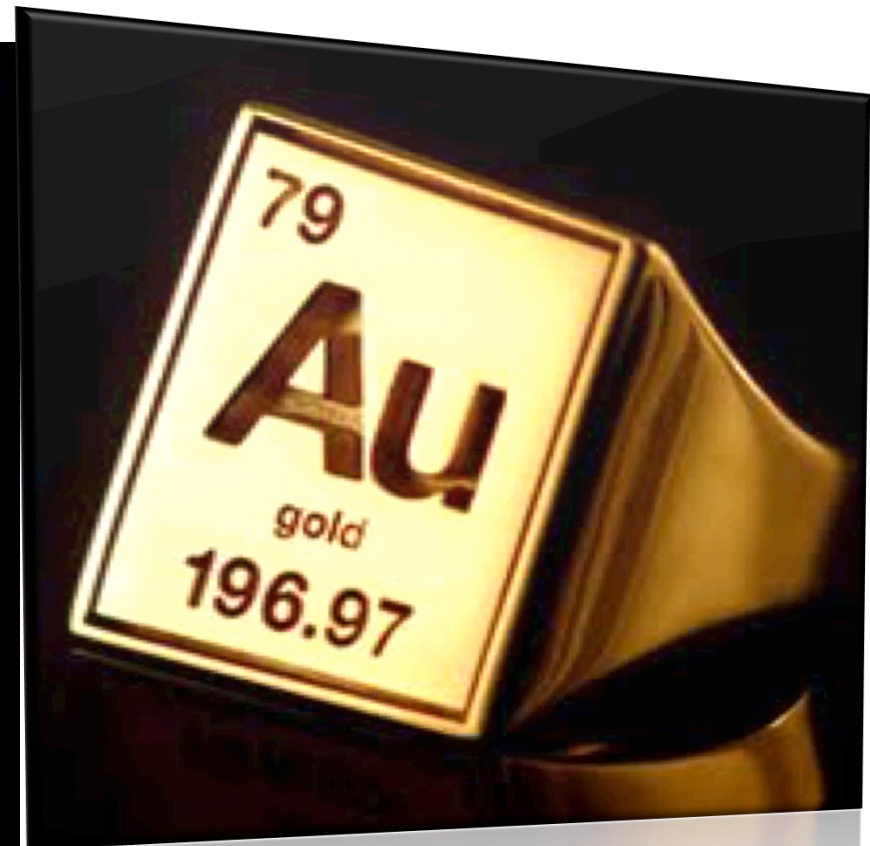
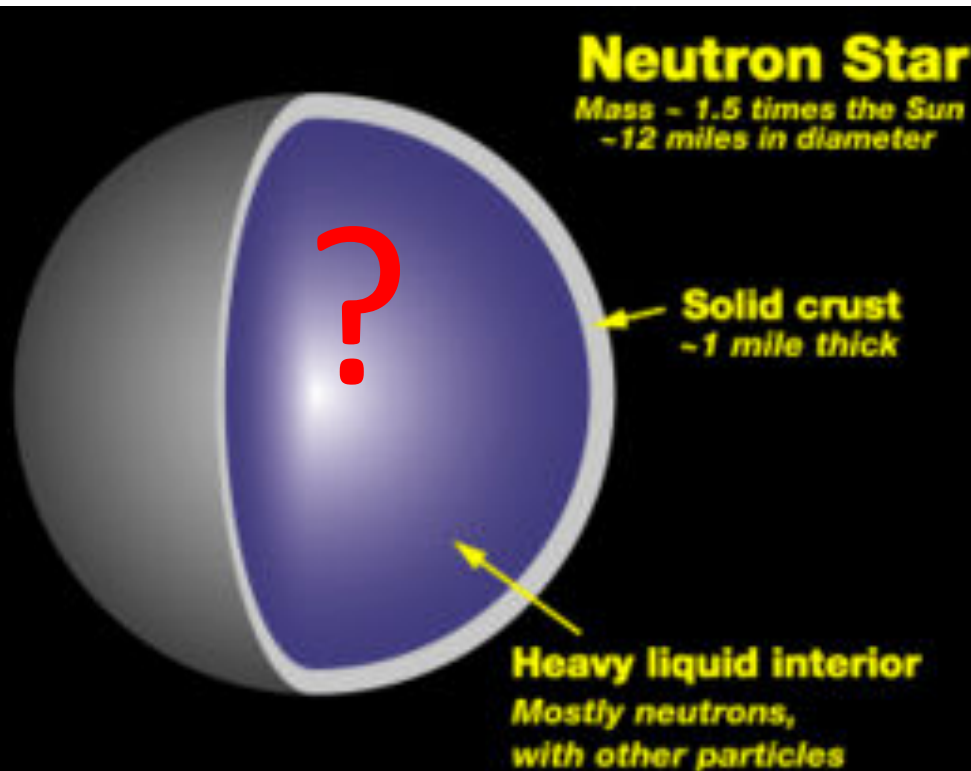
BHスピンの大きいほど、減衰率が低く、周波数が高い  
→ 減衰の速さからスピンの大きさに制限

## 2 連星中性子星の合体

- LIGO/VIRGO/KAGRAに対するもう1つの強力な重力波源

# 連星中性子星合体は、なぜ重要か？ (特に我々のプロジェクトとの関連から)

1. 中性子星や高密度物質探査の貴重な実験場
2. 未解明の重元素合成場の有力候補

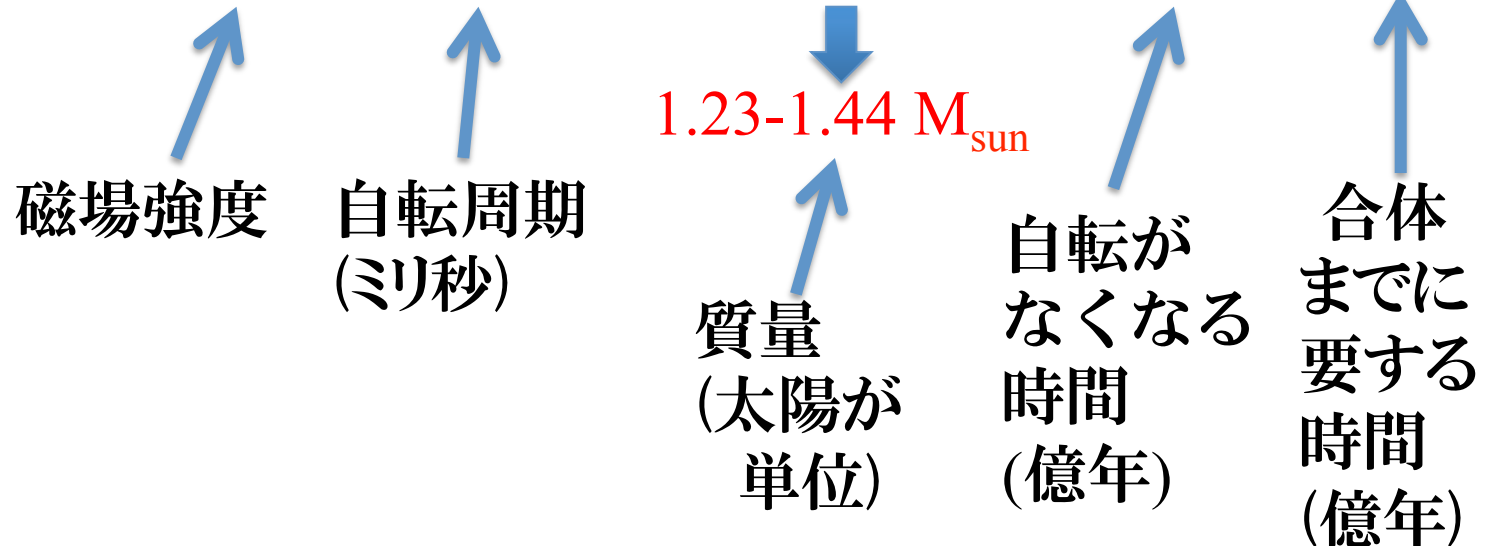


# 連星中性子星合体を解明するには

- 数値相対論が必須。準備OK.
- コンピュータ資源も充実(例：京)
- 現在では、強力な現象予言力がある
  - 標準的シナリオは確率。
  - 今後はあらゆる可能性の探査が必須

# Parameters of *compact* NS-NS binaries

	PSR	$\log B(\text{G})$	$P_{\text{rot}} (\text{ms})$	$M(M_{\text{sun}})$	$T_{\text{Mag}}$	$T_{\text{GW}}$
1.	B1913+16	10.4	59.0	1.441/1.387	1.0	3.0
2.	B1534+12	10.0	37.9	1.333/1.345	2.5	27
3.	B2127+11C	10.7	30.5	1.36/1.35	1.0	2.2
4.	J0737-3039	9.8/12.2	22.7/2770	1.34/1.25	2.0/0.5	0.86
5.	J1756-2251	9.7	28.5	1.34/1.23	4.0	17
6.	J1906+746	(12.2)	(144)	1.29/1.32	(<0.1)	3.1



E.g., <http://stellarcollapse.org/nsmasses>



# Merger of $1.35\text{-}1.35M_{\text{sun}}$ NS with four EOSs

APR4:  $R=11.1\text{km}$

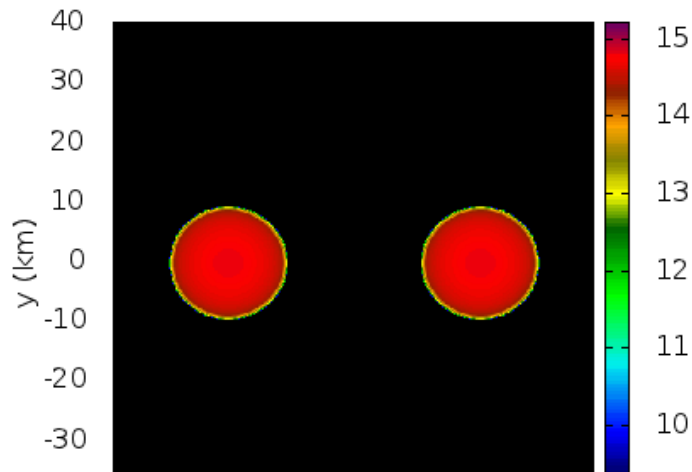
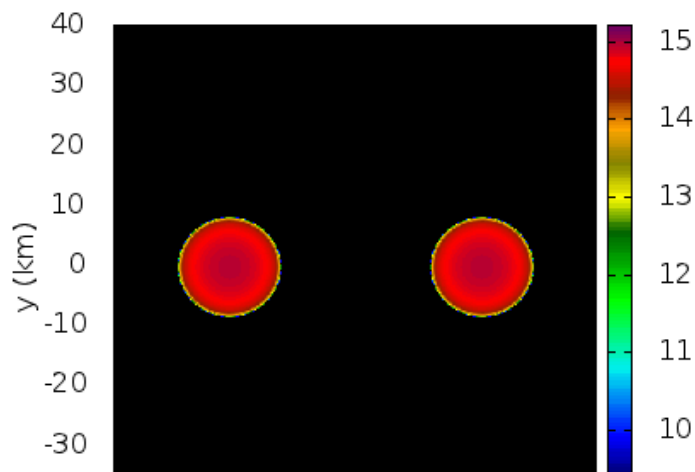
ALF2:  $R=12.4\text{km}$

**For all, maximum mass is larger than 2 solar mass**

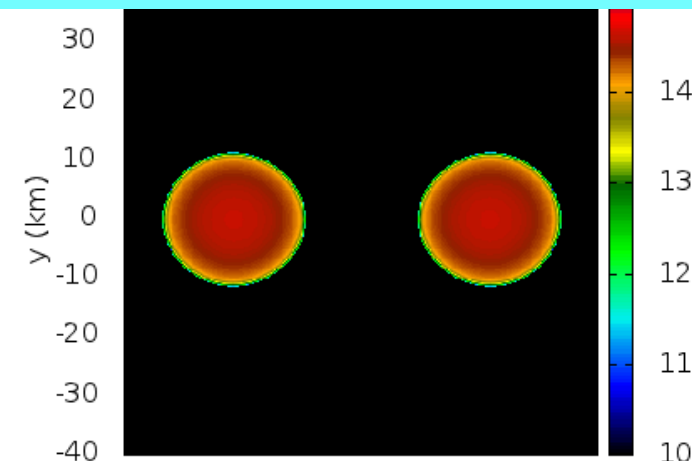
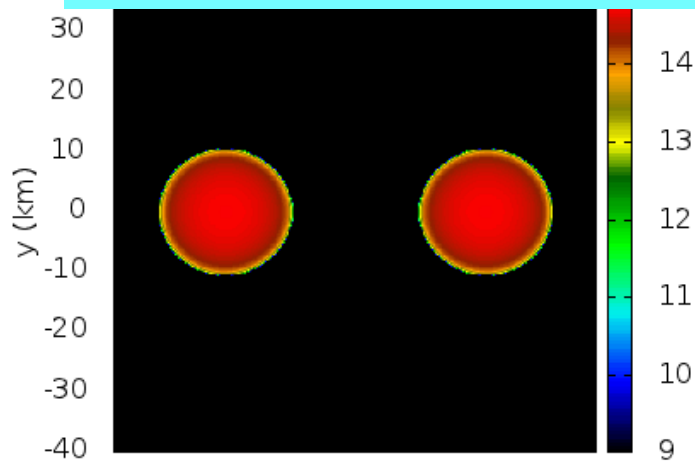
H4:  $R=13.6\text{km}$

MS1:  $R=14.5\text{km}$

# Merger of $1.35\text{-}1.35M_{\text{sun}}$ NS with four EOSs $t=0$ ms



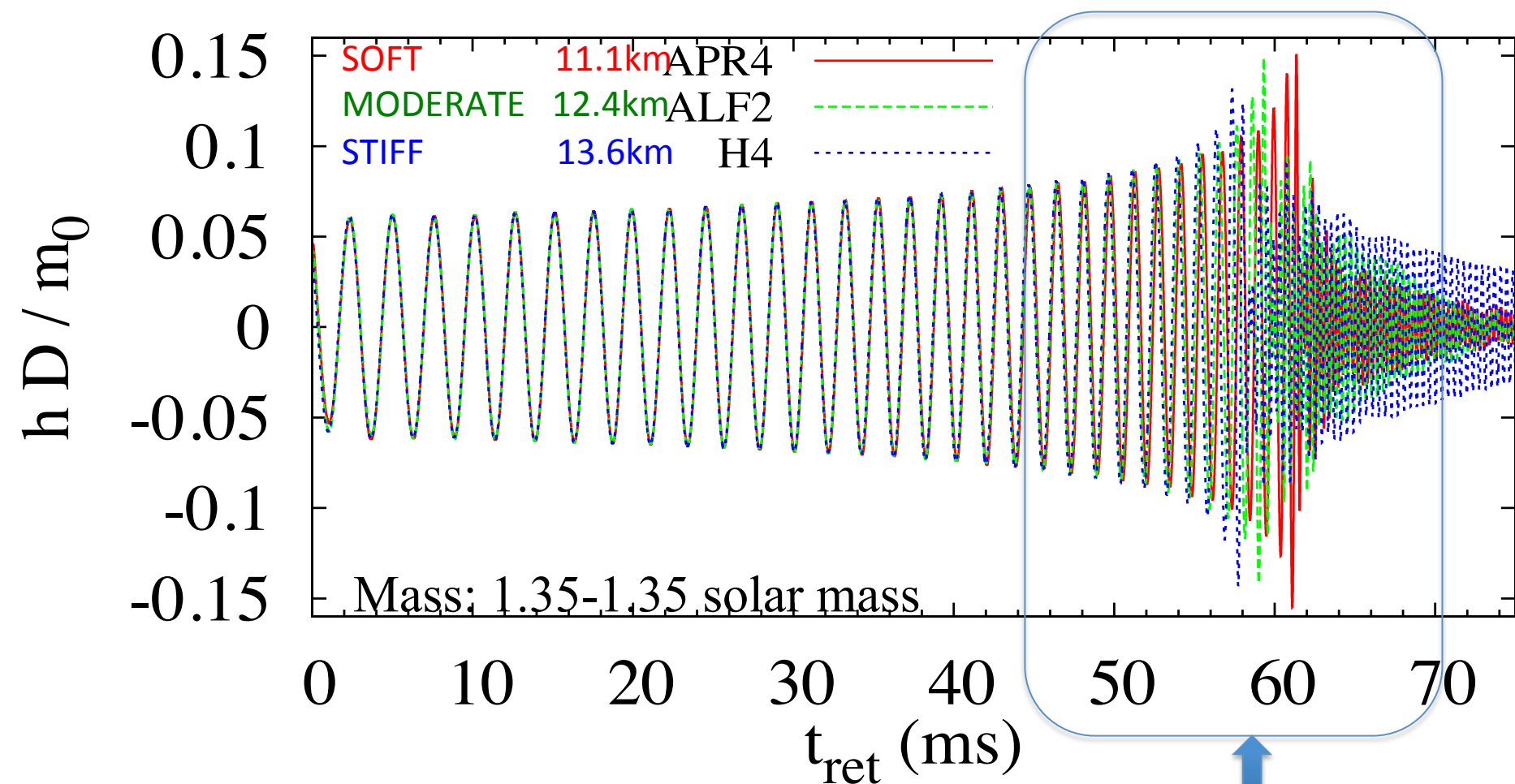
重い中性子星が合体後に誕生し、  
多様な現象が起きる(例えば質量放出)



$x$  (km) H4:  $R=13.6\text{km}$

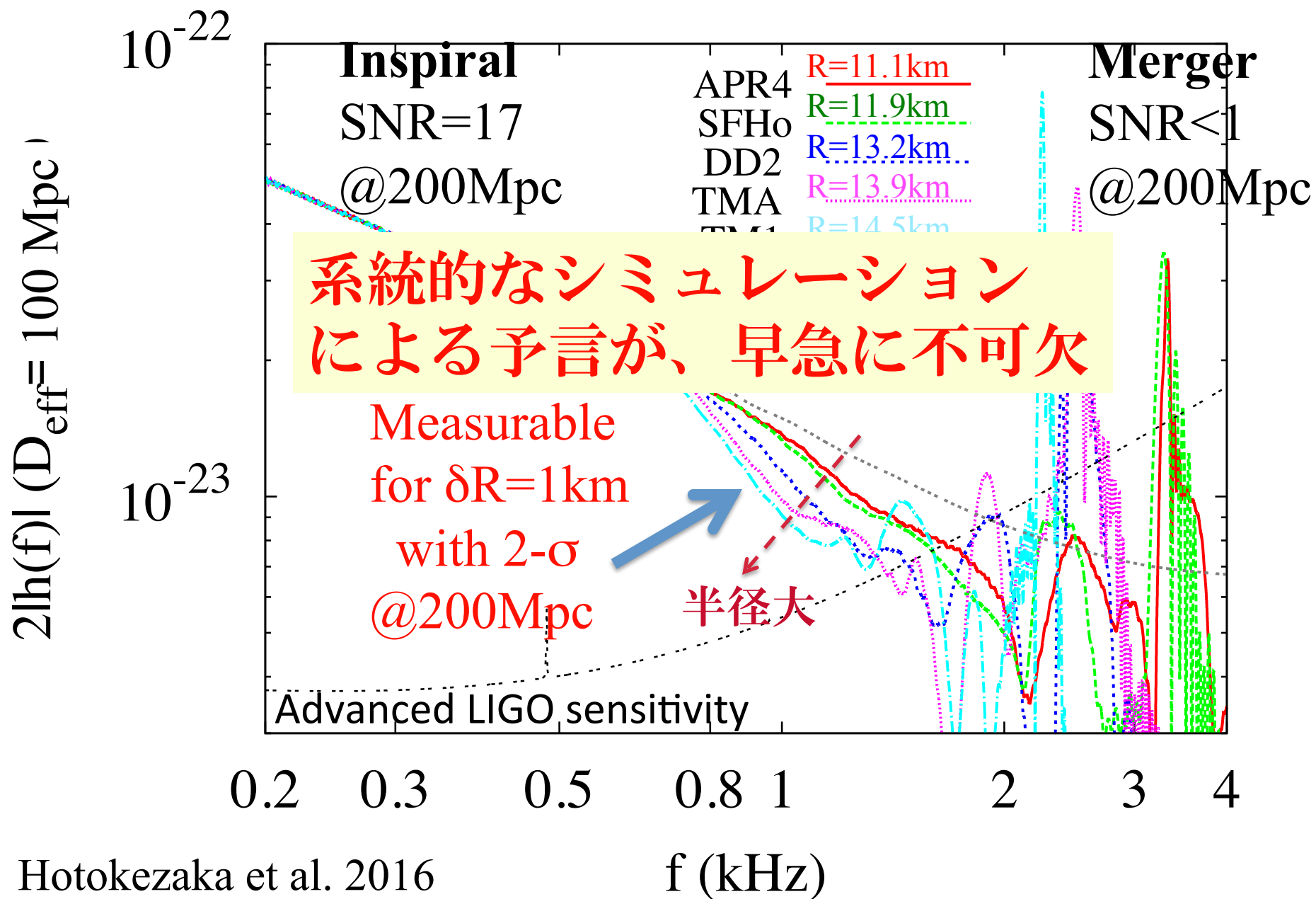
$x$  (km) MS1:  $R=14.5\text{km}$

# 数値的相対論による波形： 合体直前に中性子星の差異が反映される



Appreciable difference  
in phase

# 重力波のスペクトル

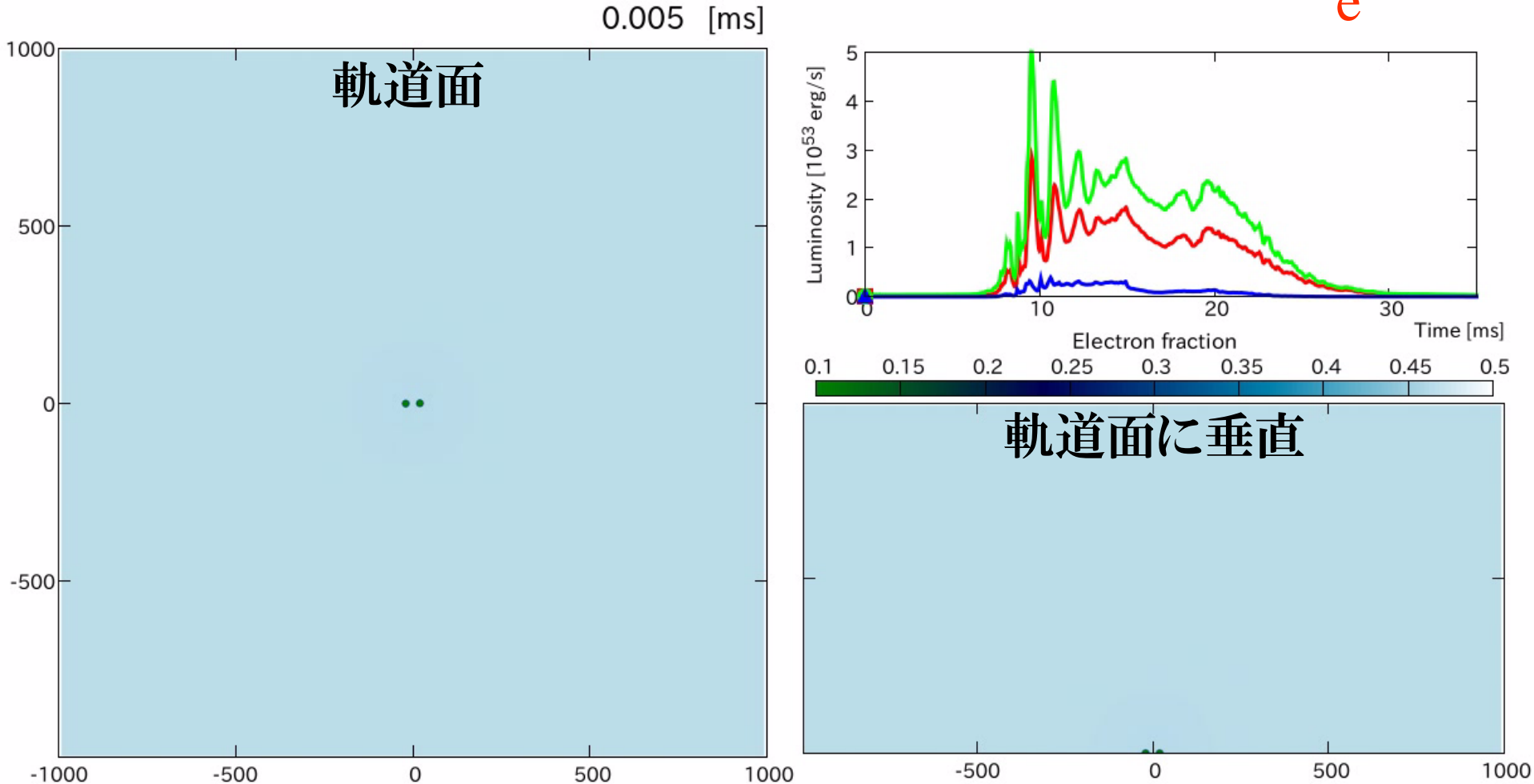




# 質量放出

SFHo (R~11.9 km): 1.35-1.35  $M_{\text{sun}}$

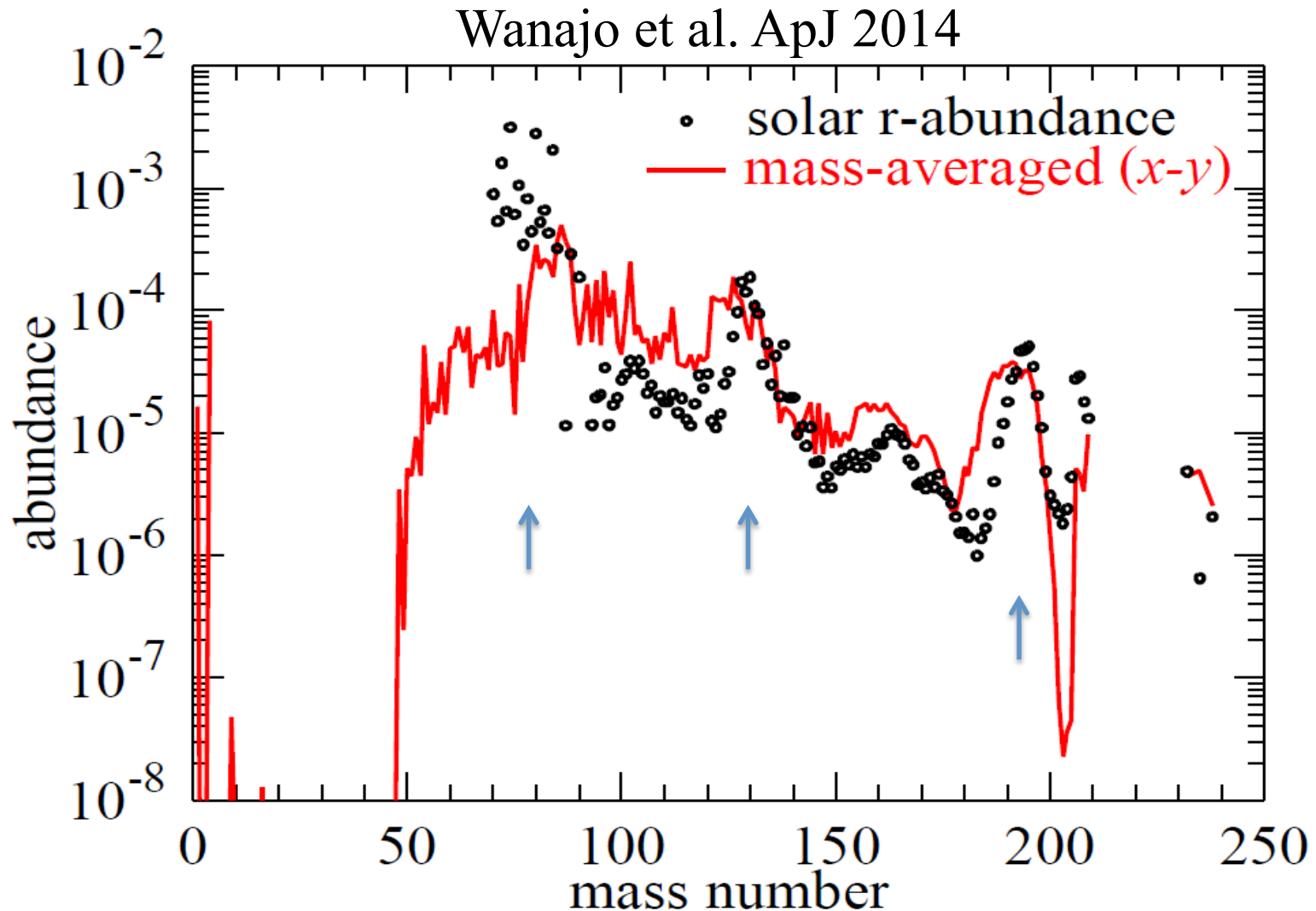
Electron fraction=Neutron un-richness  $Y_e$



Sekiguchi et al. 2015

中性子過剰物質 → 速い中性子捕獲による元素合成  
→ 大量の不安定性元素の崩壊 → **heat up & shine**

(Li & Pacyznski, 1998)



# 連星中性子星の合体の標準シナリオ

**Radioactively  
powered  
EM signals**

**R-process  
&  $\beta$  decay**



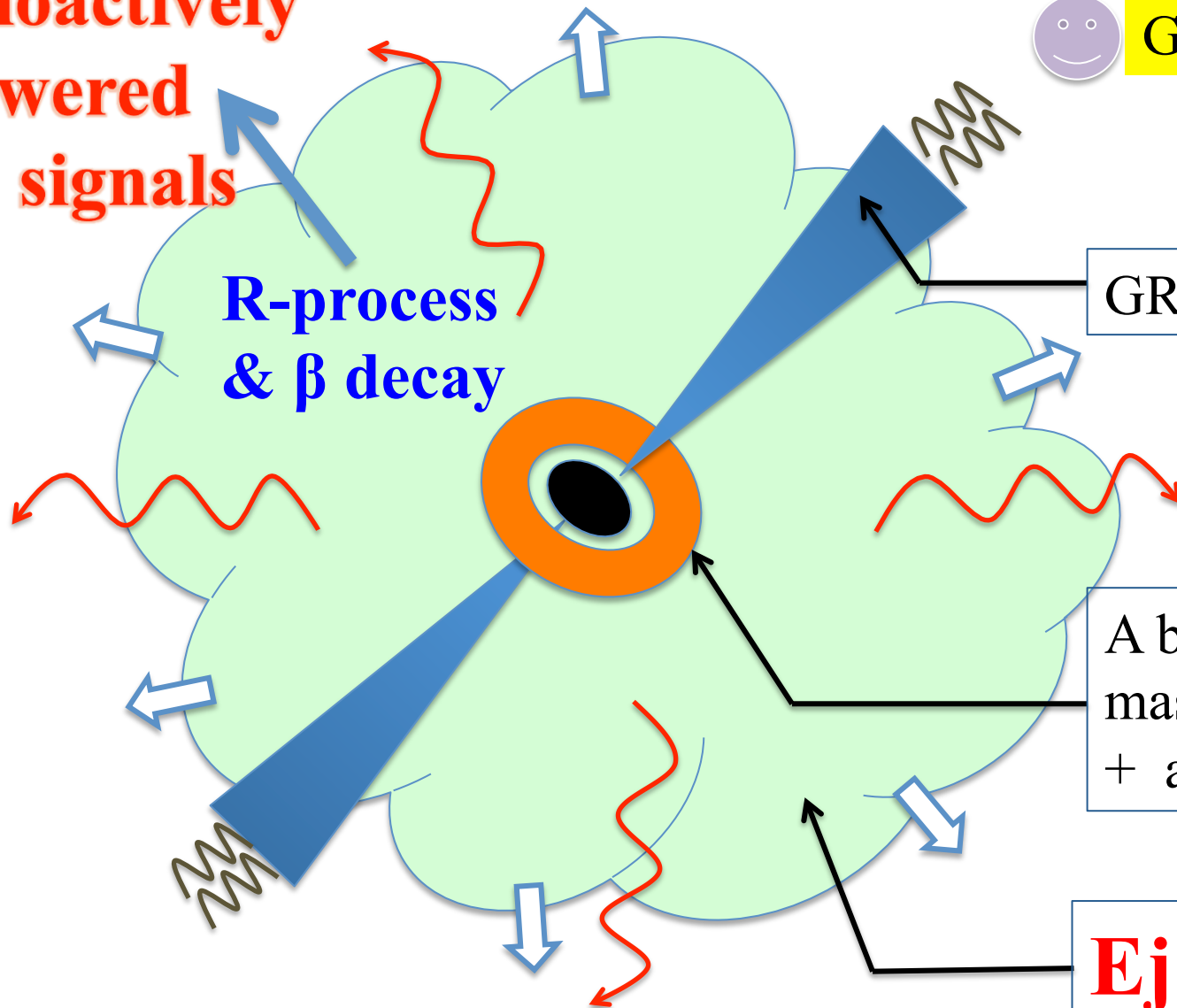
GRB Observer

GRB jet

A black hole or  
massive NS  
+ accretion torus:

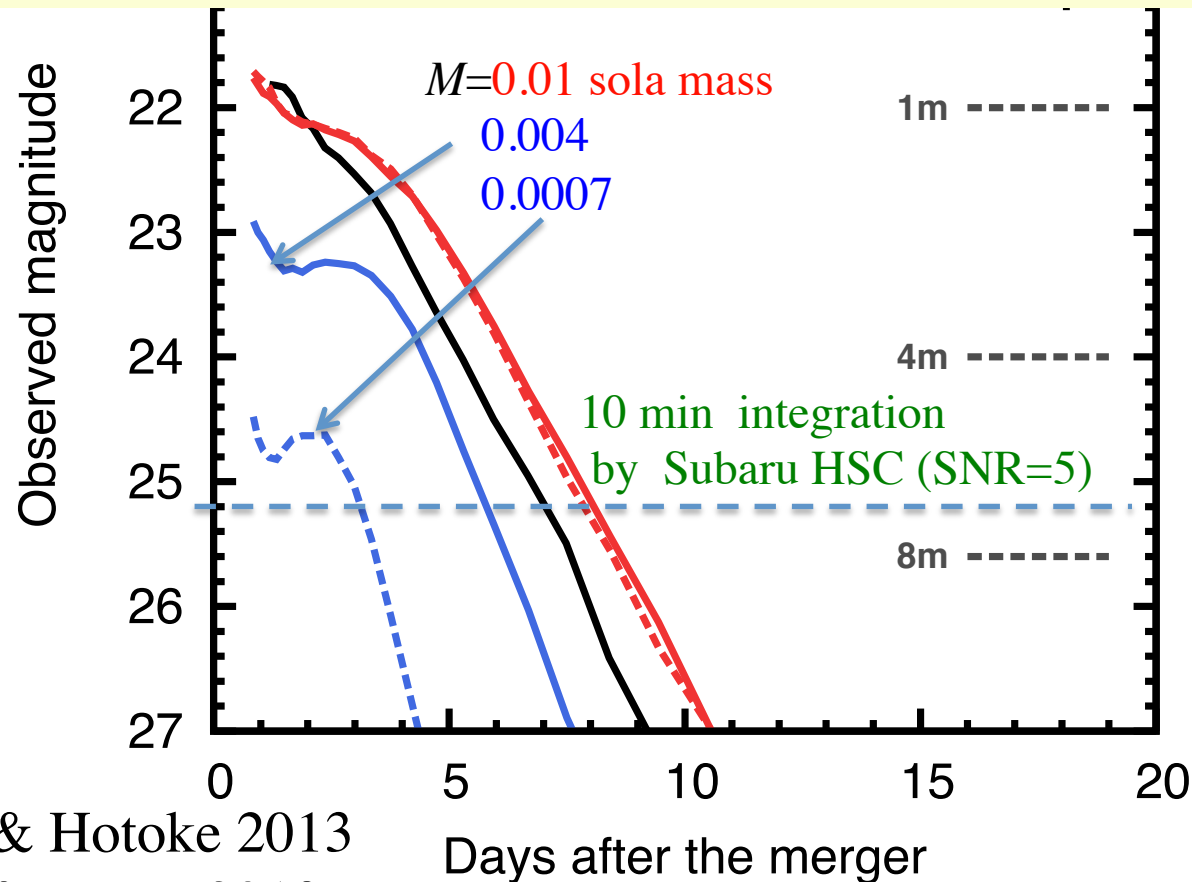
**Ejecta**

Original figure by Hotokezaka



# Expected light curves @ 200Mpc (初期成果)

観測計画策定には、シミュレーションにより、多様な可能性をあらかじめ調べておく必要あり：要至急！



Tanaka & Hotoke 2013

Barnes & Kasen 2013

**Bright in near infrared for 1 week after the merger**

### 3 連星中性子星合体初観測の展望



合体率？



# A latest population synthesis result

(M. Dominik et al., 2014)

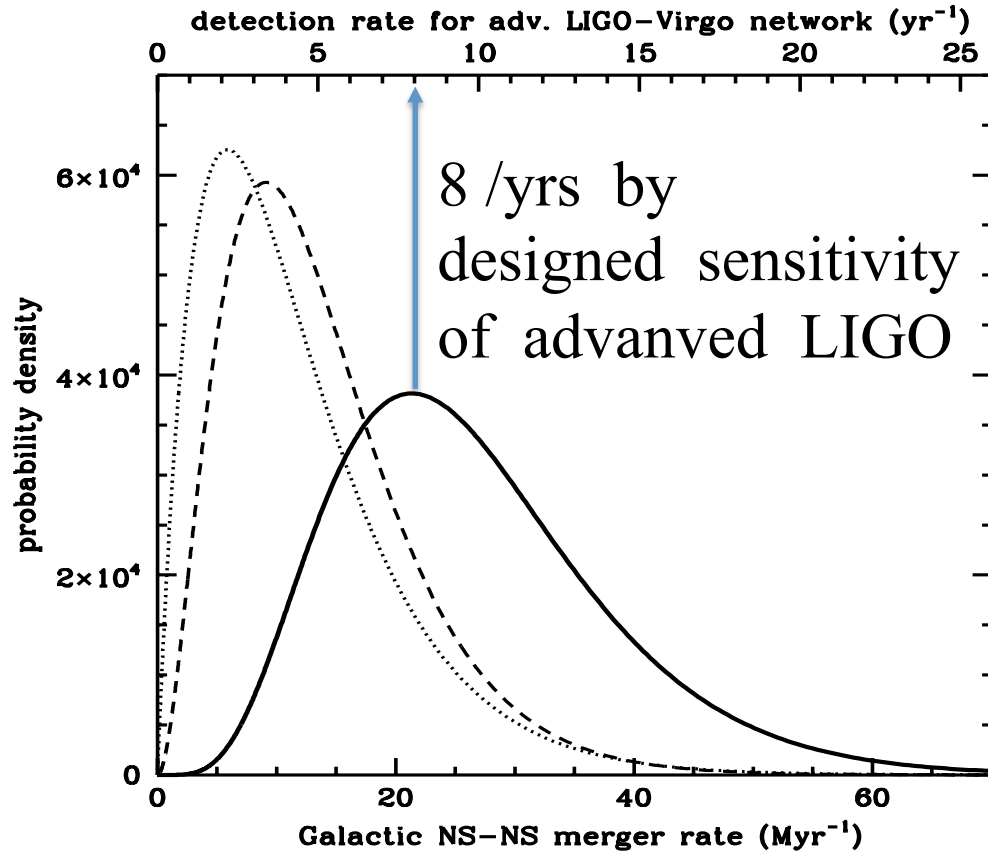
## 大雑把な理論による推定

TABLE 1

LOCAL MERGER RATES AND SIMPLY-SCALED DETECTION RATE PREDICTIONS<sup>a</sup>:

Model	$\langle \mathcal{M}_c^{15/6} \rangle$ $M_{\odot}^{15/6}$	$\mathcal{R}(0)$ $\text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$	$R_D$ (aLIGO $\rho \geq 8$ ) $\text{yr}^{-1}$	$R_D$ (3-det network $\rho \geq 10$ ) $\text{yr}^{-1}$	
NS-NS					
Standard	1.1 (1.1)	61 (52)	1.3 (1.1)	3.2 (2.7)	十分
Optimistic CE	1.2 (1.2)	162 (137)	3.9 (3.3)	9.2 (7.7)	
Delayed SN	1.4 (1.4)	67 (60)	1.9 (1.7)	4.5 (4.0)	
High BH Kicks	1.1 (1.1)	57 (52)	1.2 (1.1)	3.0 (2.7)	
BH-NS					
Standard	18 (19)	2.8 (3.0)	1.0 (1.2)	2.4 (2.7)	多い
Optimistic CE	17 (16)	17 (20)	5.7 (6.5)	13.8 (15.4)	
Delayed SN	24 (20)	1.0 (2.4)	0.5 (0.9)	1.1 (2.3)	
High BH Kicks	19 (13)	0.04 (0.3)	0.01 (0.08)	0.04 (0.2)	
BH-BH					
Standard	402 (595)	28 (36)	227 (427)	540 (1017)	多い
Optimistic CE	311 (359)	109 (221)	676 (1585)	1610 (3773)	
Delayed SN	829 (814)	14 (24)	232 (394)	552 (938)	
High Kick	2159 (3413)	0.5 (0.5)	22 (34)	51 (81)	

<sup>a</sup> Detection rates computed using the basic scaling of Eq. (3) for both the *high-end* and *low-end* (the latter in parentheses) metallicity scenarios (see Section 2.2). These rates should be compared with those from more careful calculations presented in Tables 2 and 3.

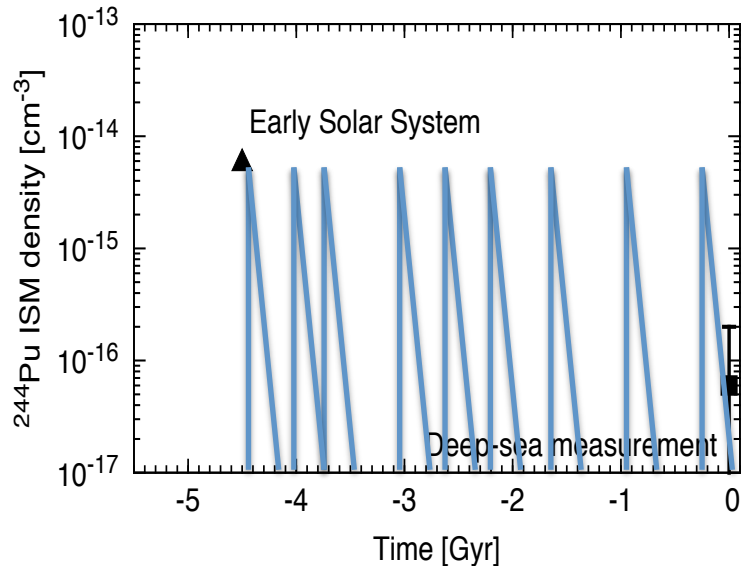
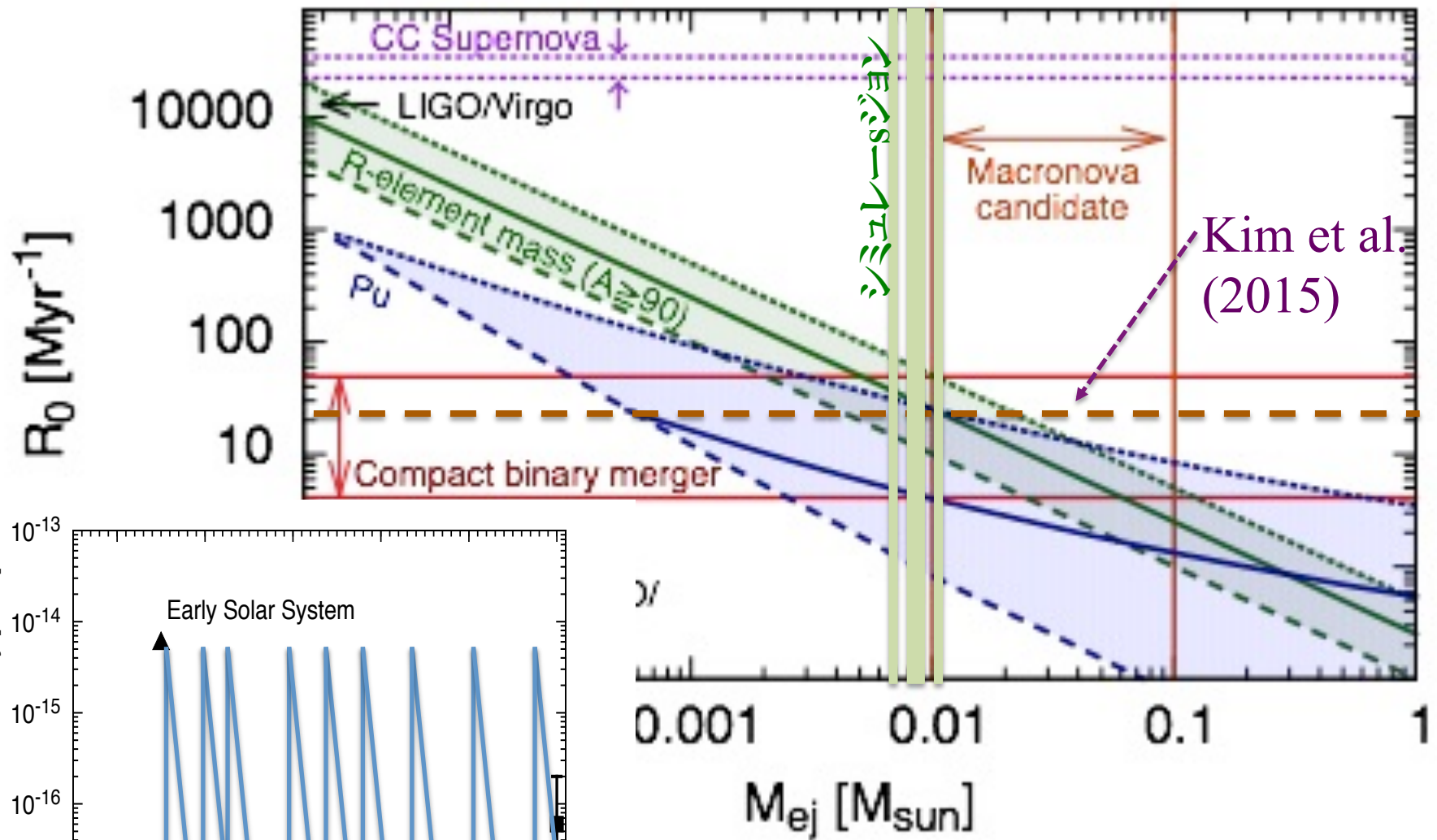


Predicted detection rate  
of NS-NS  
based on binary pulsar  
observation

観測事実に  
基づいた中性子星  
合体数の推定

**Figure 7.**  $\mathcal{P}_g(\mathcal{R}_g)$  (solid) is overlaid with individual  $\mathcal{P}(\mathcal{R})$  obtained from PSR B1916+13 (dotted) and the Double Pulsar (short dashed). Based on our reference model, the Galactic NS-NS merger rate is most likely to be  $21 \text{ Myr}^{-1}$ . The corresponding GW detection rate for the advanced ground-based GW detectors is  $\sim 8 \text{ yr}^{-1}$ .

# Hotokezaka et al., Nature phys. 2015 (r-process 元素量に基づく推定)

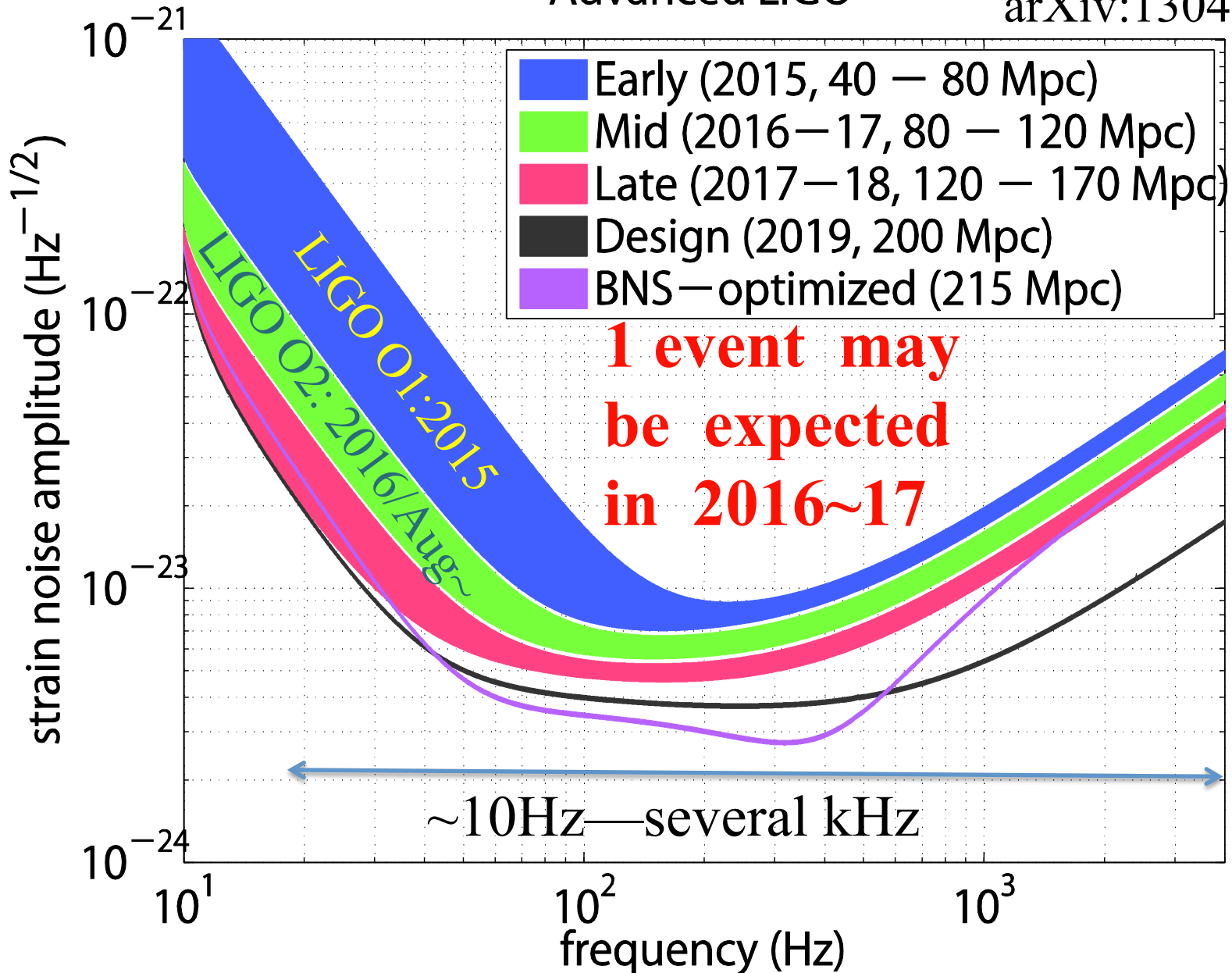


Total r-process elements  
in our galaxy  $\sim 5000 M_{\text{sun}}$

# Planned sensitivity of advanced LIGO

Advanced LIGO

arXiv:1304.0670v



# Summary

- **The first direct detection of gravitational waves** open a new window for astronomy:
- **First discovery of black-hole binary**  
→ BH-BH merger rate would be high:  
More detection will be achieved this year in O2
- Statistical/population-synthesis studies suggest that **NS-NS merger may be detected by aLIGO this year or next year**  
→ Detection could solve several unsolved issues
- **Numerical-relativity simulations are crucial for understanding gravitational-wave events**  
→ Urgent task !!



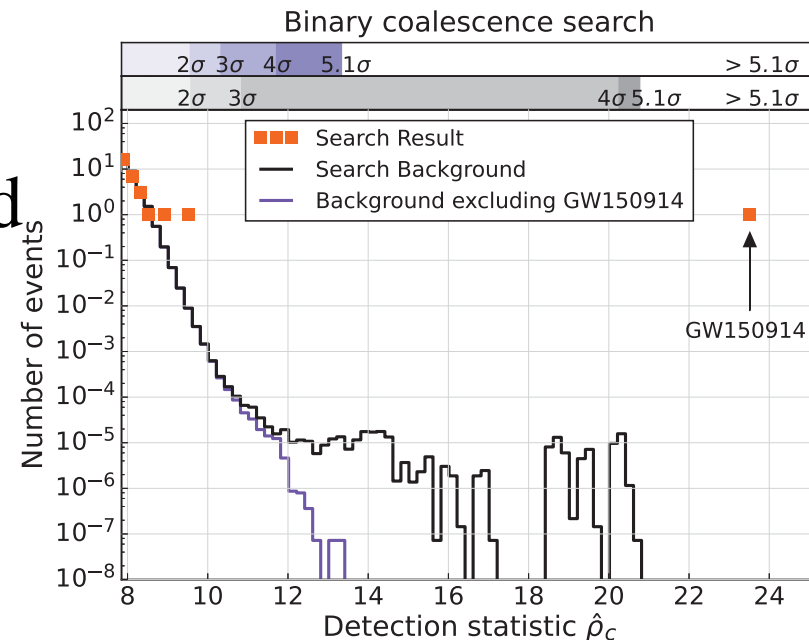
# BH-BH merger rate based on GW150914: very simple version

- 1 event in 16-day observation
  - $D \sim 410$  Mpc (SNR=24)
- $365/16 = 23$  events/yr in 410 Mpc in the current noise level

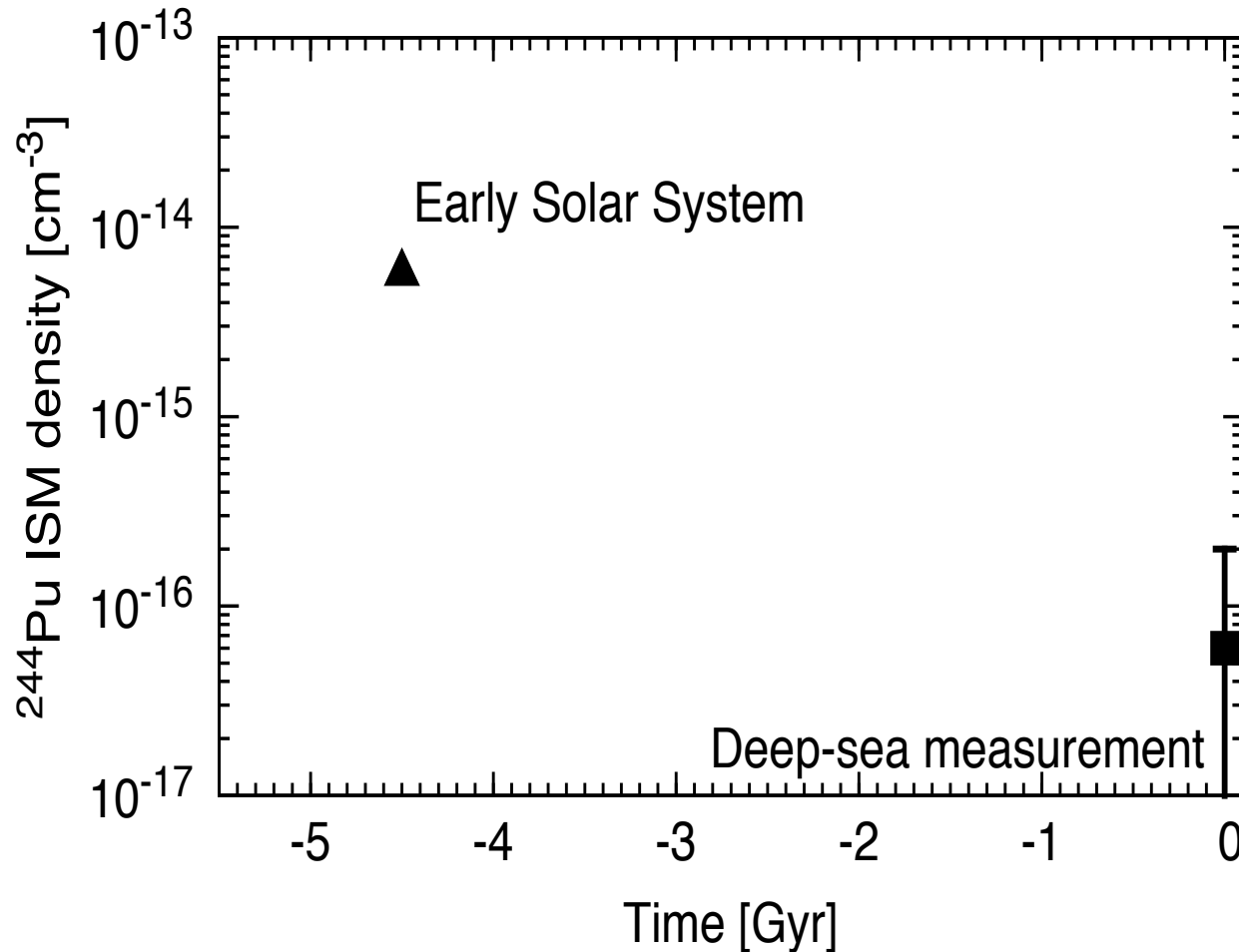
→ For SNR=10, 318/yr

→ Sensitivity will be improved by a factor of  $\sim 3$

→ For SNR=10, 8600/yr



# Estimated $^{244}\text{Pu}$ density



1. Early Solar data  
Turner et al 2007  
(ancient rock)  
Lodders et al 2007  
(meteorite)

2. Deep-sea data  
Wallner et al 2015  
sea crust & sediment  
for the last 25 Myr.

# Time scale

$$1M_{\text{sun}} \rightarrow \frac{GM}{c^3} = 4.9255 \mu\text{s}$$

$$62M_{\text{sun}} \rightarrow \frac{GM}{c^3} \approx 0.3 \text{ ms}$$

Orbital period around the Black hole with spin  $< 0.7$

$$P = 2\pi \left( \frac{r^3}{GM} \right)^{1/2} > 70 \left( \frac{GM}{c^3} \right) \left( \frac{r}{r_{\text{ISCO}}} \right)^{3/2} \rightarrow 20 \text{ ms}$$

$$\text{viscous timescale} \sim \frac{P}{\alpha} \sim 100P > 2 \text{ s}$$

**For achieving short GRB,  
need a highly non-standard picture**

# Binary neutron star

--Typical formation scenario --

