

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

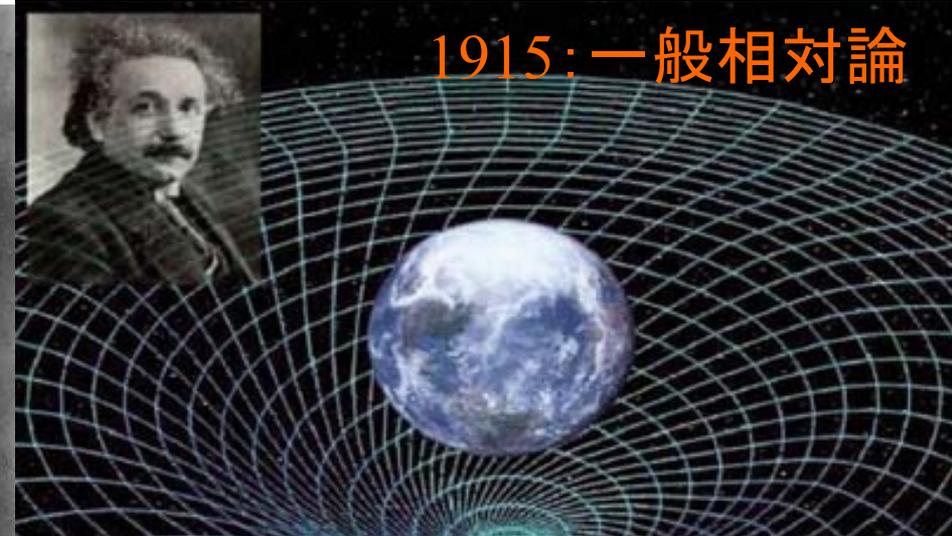
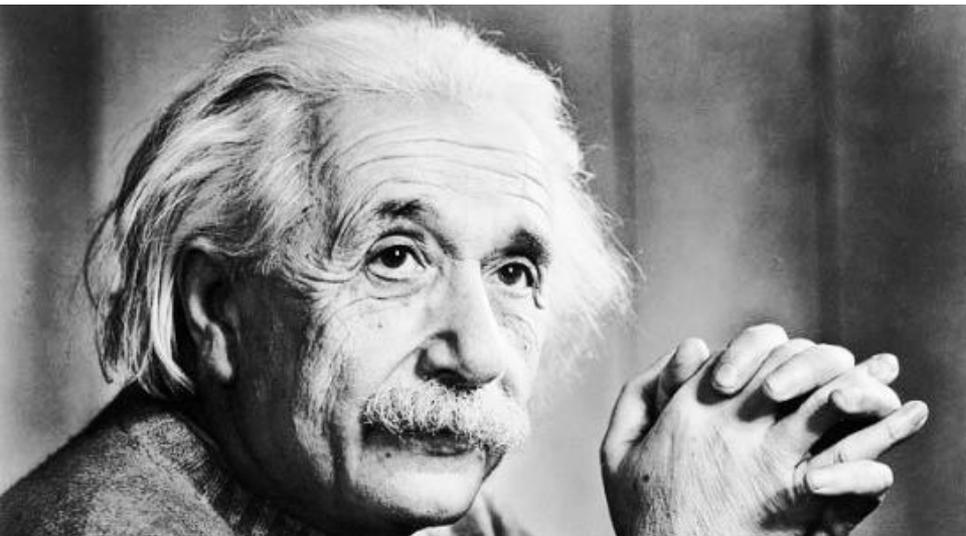
1. **GW150914: First direct detection**
2. **連星中性子星の合体**
3. **連星中性子星合体の観測展望**

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



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

Rai Weiss & Kip Thorne

重力波のイメージ



重力波を初観測

米チーム発表

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。

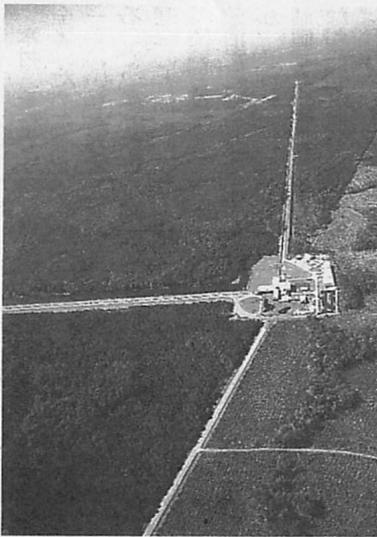
▼3面＝アインシュタインの宿題について

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」がさざ波のようにはつた現象。物体が加速して動くときに起こる。アインシュタインが1915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。研究チームは米国の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

れた二つのが合体したられる重力で検出でき物理学誌「ビュー」が掲載され「我々はました」。かれた記者「ターの会場から大た。今後、別の可能性も検証を受け研究者！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、2つの州とルイジアナ州の2カ所、長さ4km、約3km離れた2施設で検出精度を高めている。カリフォルニア工科大や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」「光が重力で曲がる」

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。

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

直後の宇宙(138億)きな目標とる。わめて大きな瞬間に膨張、このときに「は、力」かたして生究極の手段、星で直接観測の計画が昨今回の成はすみとな観に新たな

予言は観測によって一つづ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年の技術革新でついに、ついに

り一列。K. S. Thorne、E. E. Flanagan

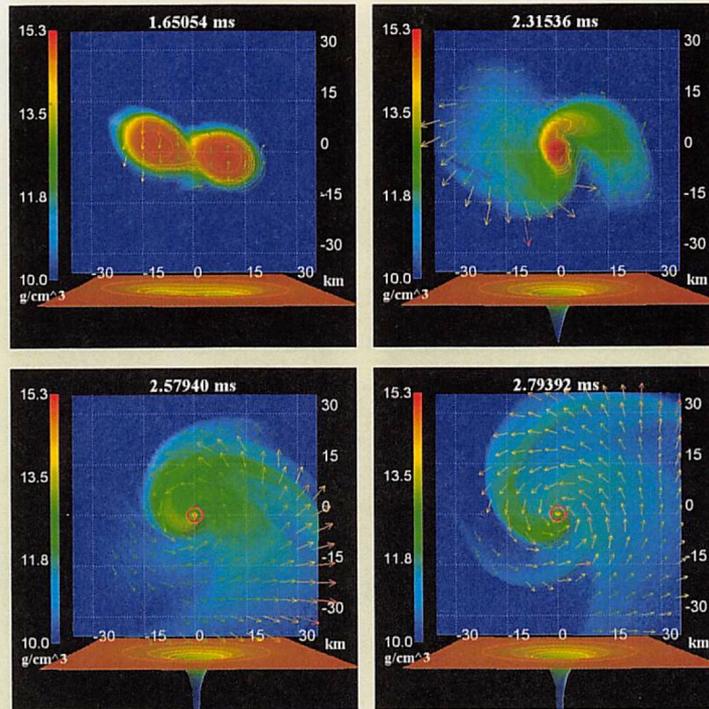
一般相対論の 世界を探る

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*



3000km離れている



10光ミリ秒

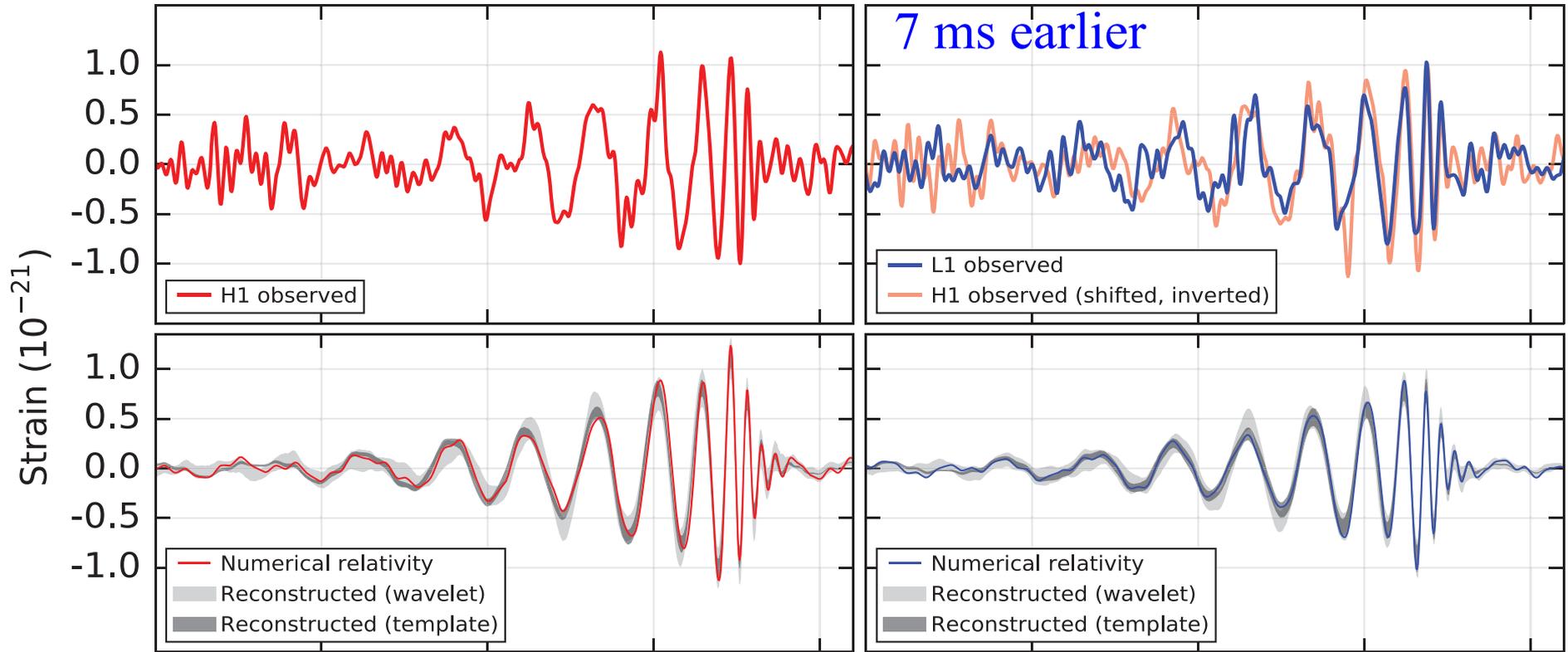
iKAGRA: 2016/3/25~ 数年先には本格稼働



GW150914: 重力波波形

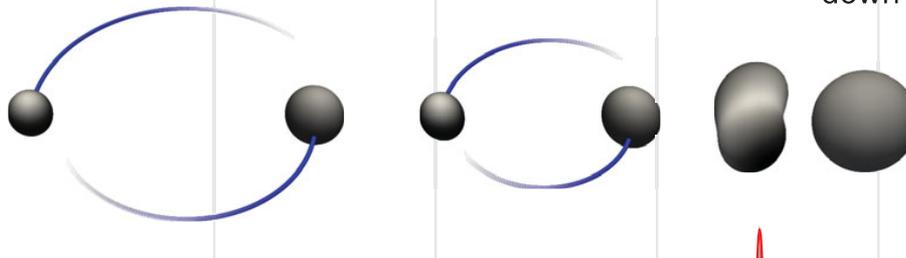
Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



Inspiral

Merger Ring-down



Physical Review Letters **116**
061102 (2016)

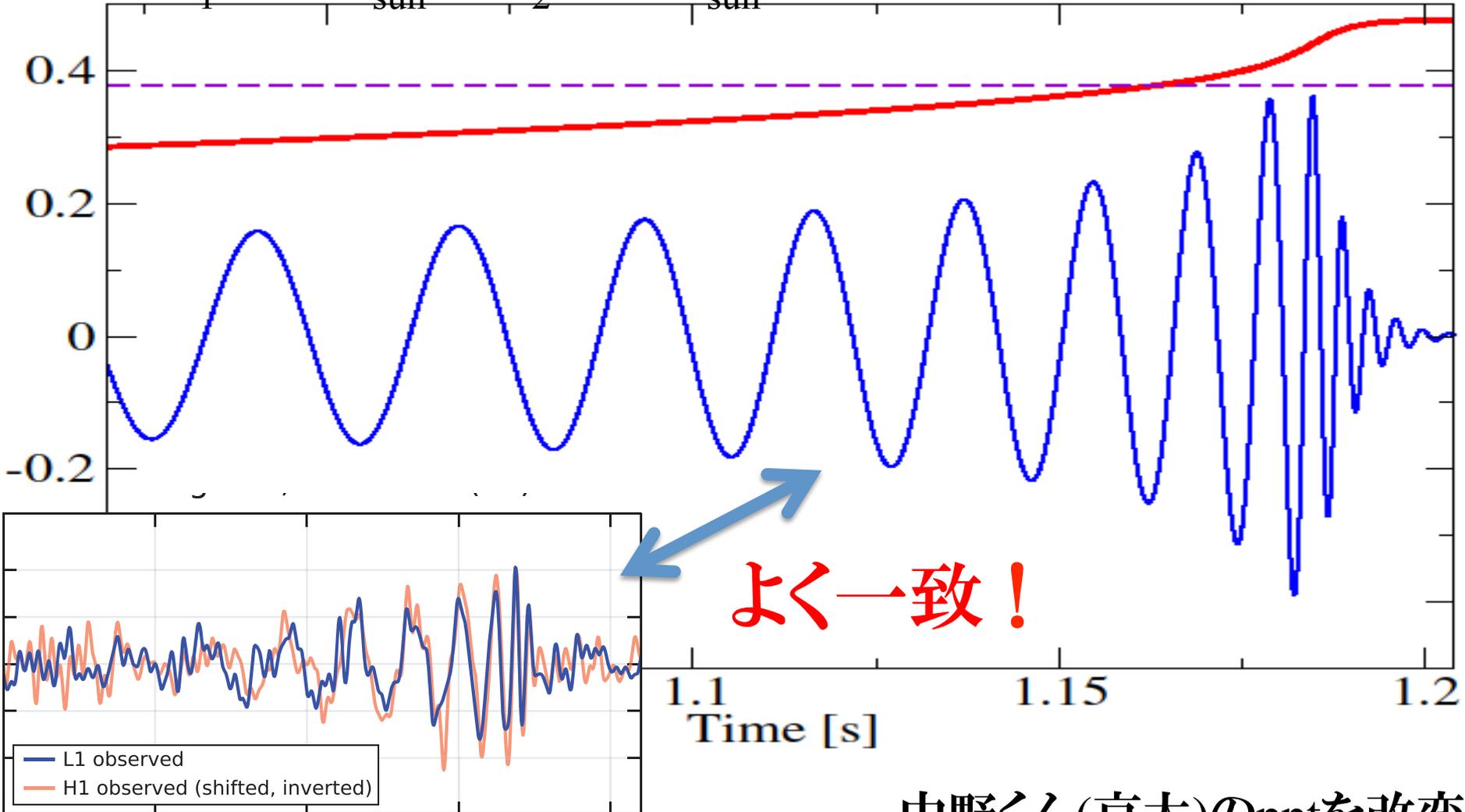
連星ブラックホール合体： 数値シミュレーションの結果とよく一致！

Albert Einstein Institute/SXS提供: Grateful to Roland Haas



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

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

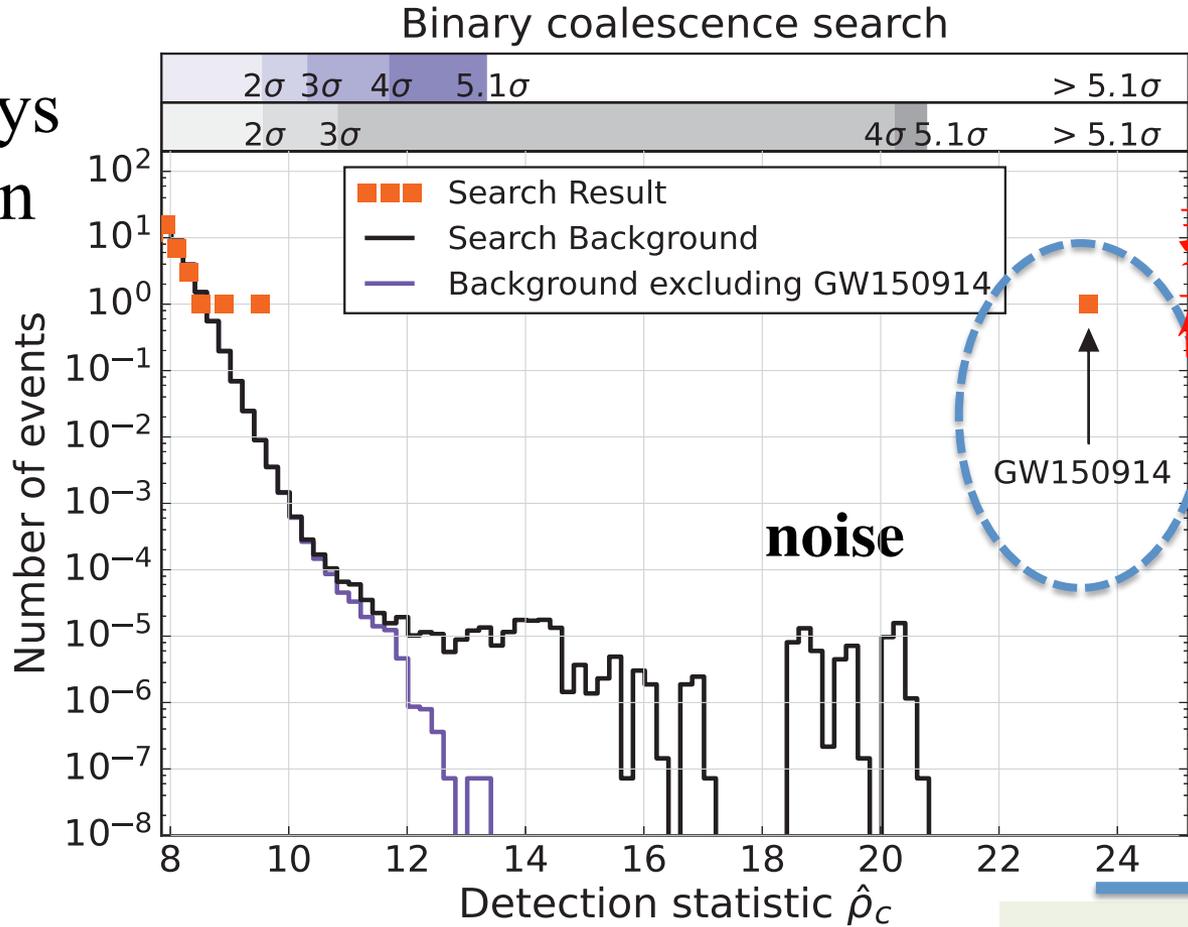


中野くん(京大)のpptを改変

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

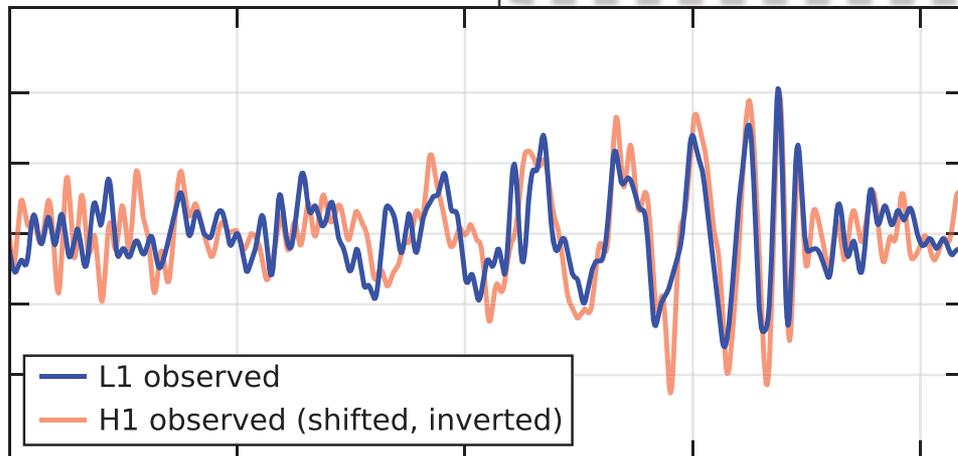
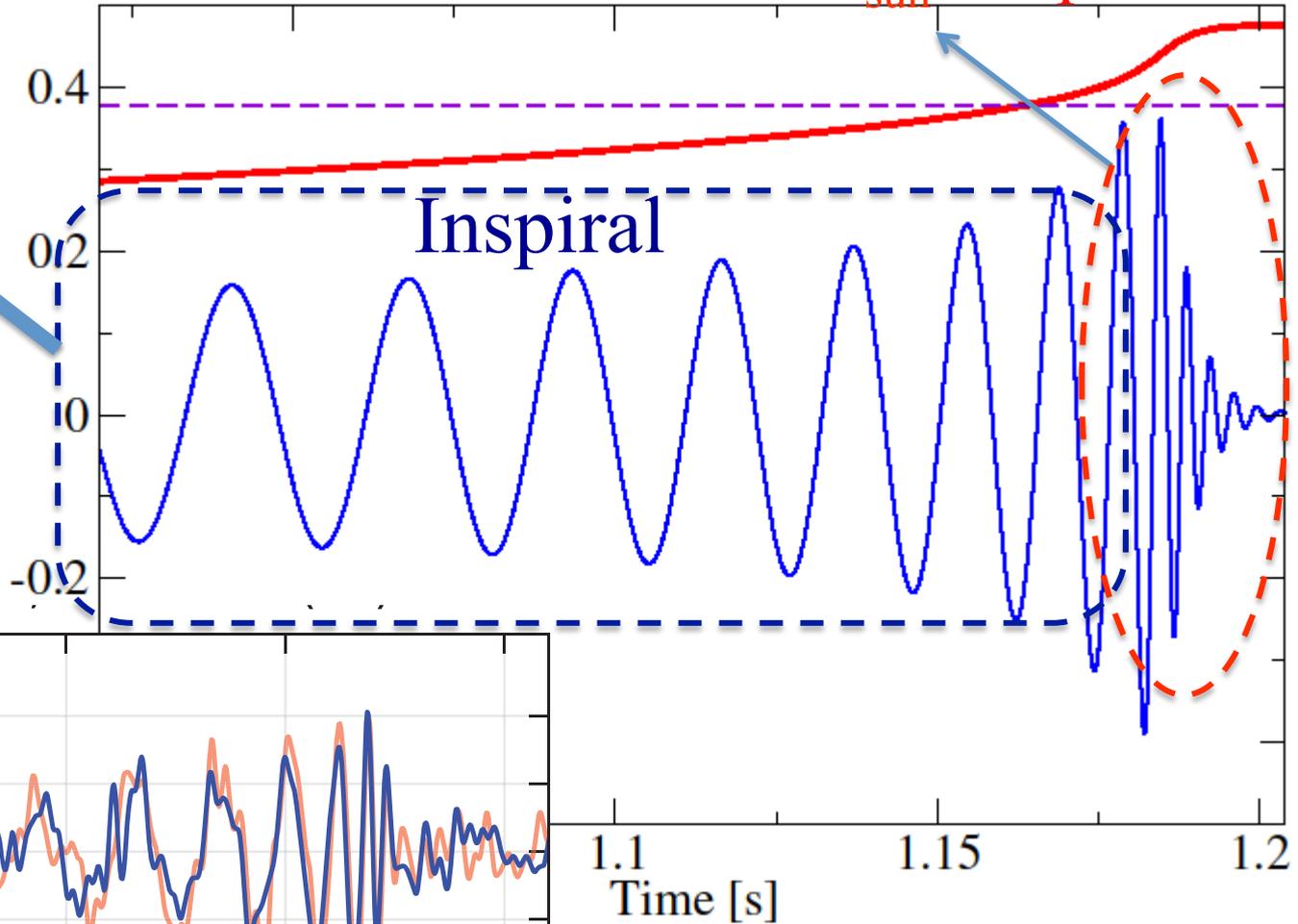
$$SNR = \left(4 \int_0^{f_{\max}} \frac{h_f g_f^*}{S_n} df \right)^{1/2}$$

何がわかるのか？

Merger + Ringdown

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

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



ブラックホールの準固有振動

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

$$f_0 = \frac{1}{2\pi M_{\text{BH}}} \left[1.5251 - 1.1568(1-a)^{0.1292} \right]$$

$$\tau = \frac{1}{\pi f_0} \left[0.700 + 1.4187(1-a)^{-0.4990} \right]$$

Fitting formula
(Berti et al. 09)

f_0 : oscillation frequency, τ : damping timescale

M_{BH} : BH mass, a : dimensionless BH spin parameter

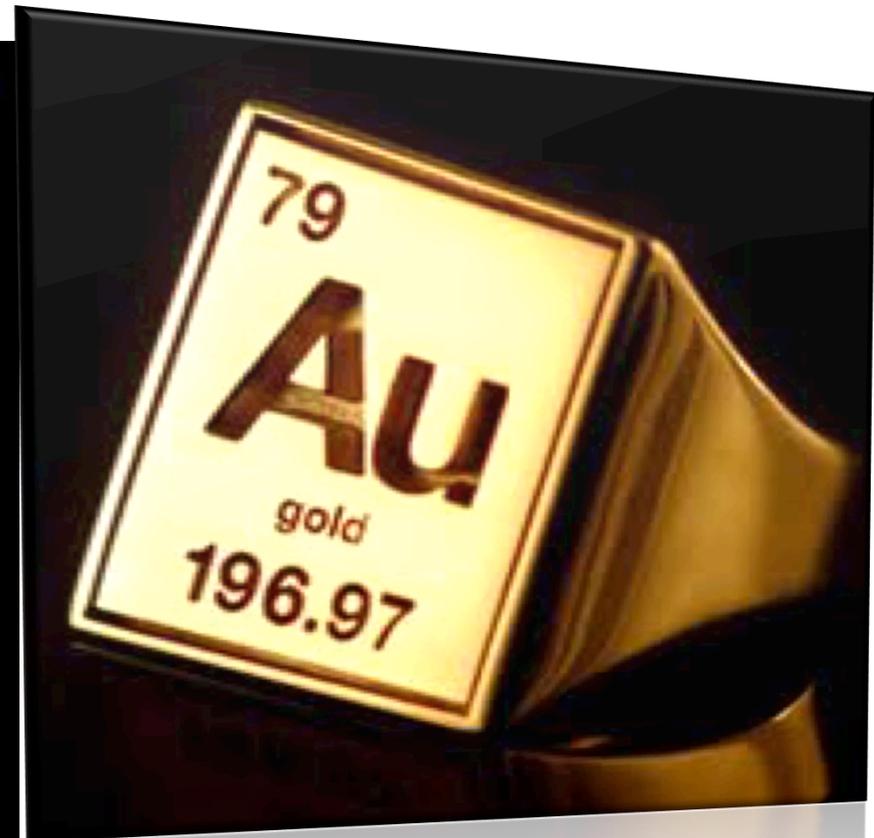
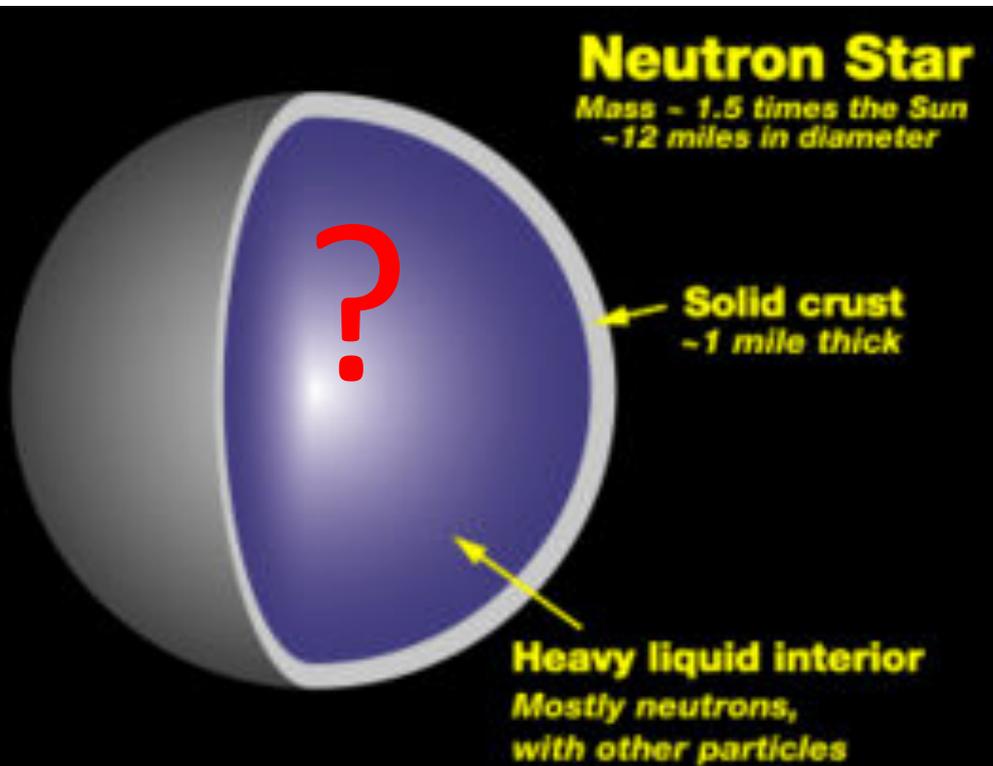
BHスピンの大きいほど、減衰率が低く、周波数が高い
→ 減衰の速さからスピンの大きさに制限

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

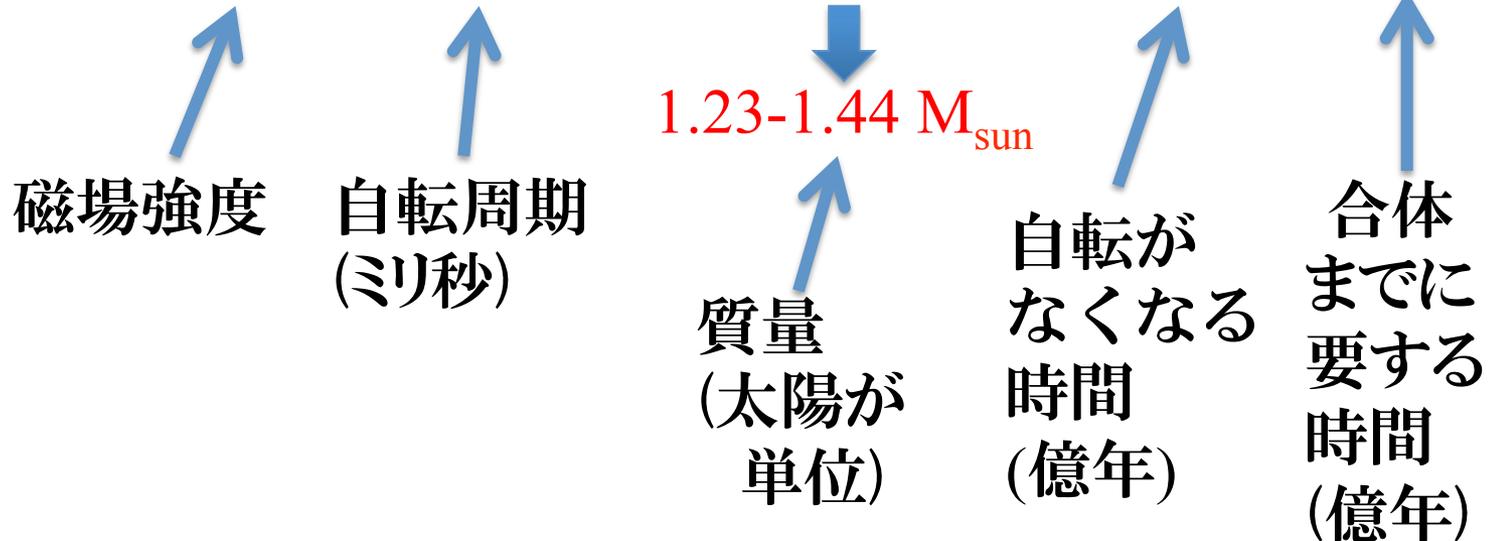


連星中性子星合体を解明するには

- 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_{rot} (ms)	$M(M_{\text{sun}})$	T_{Mag}	T_{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 $1.35-1.35M_{\text{sun}}$ NS with four EOSs

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

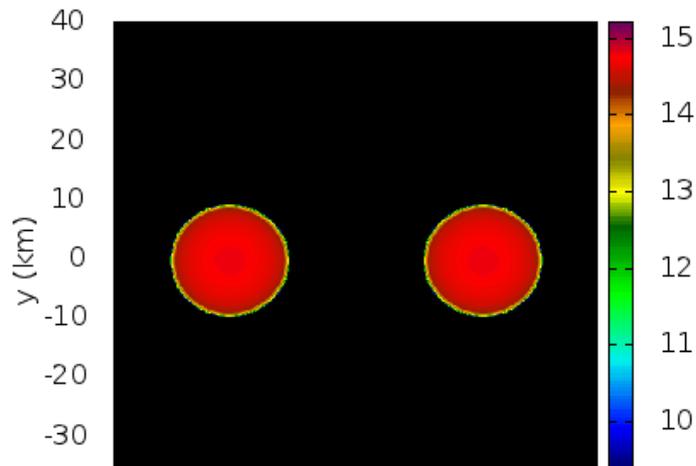
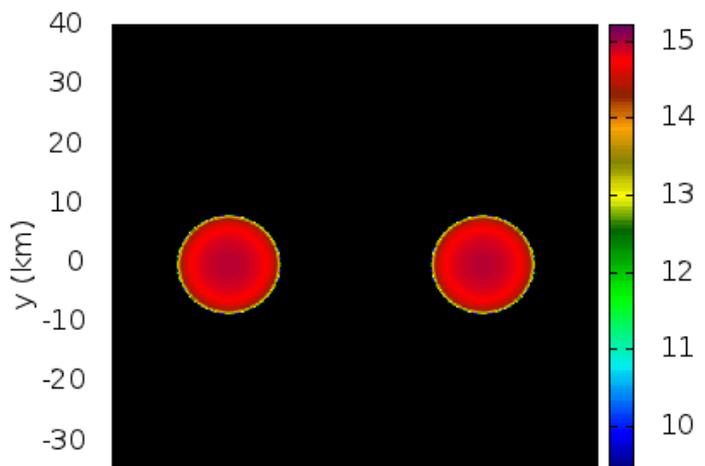
ALF2: $R=12.4\text{km}$

For all, maximum mass is larger than 2 solar mass

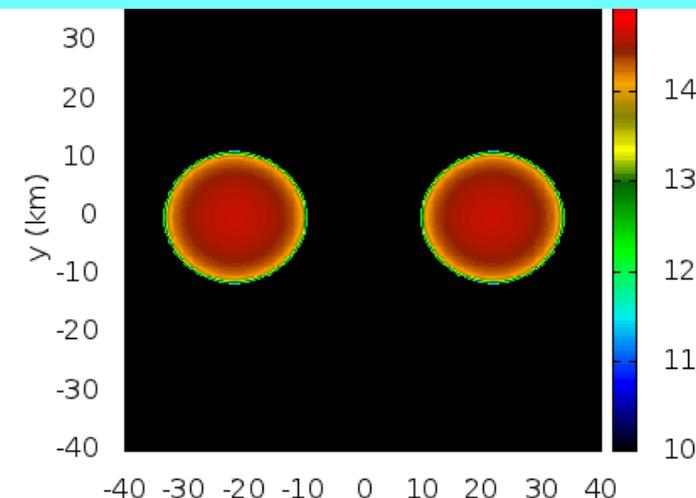
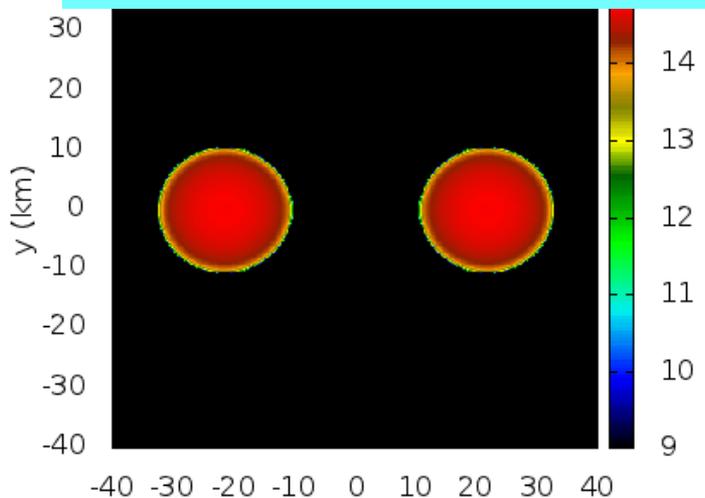
H4: $R=13.6\text{km}$

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

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



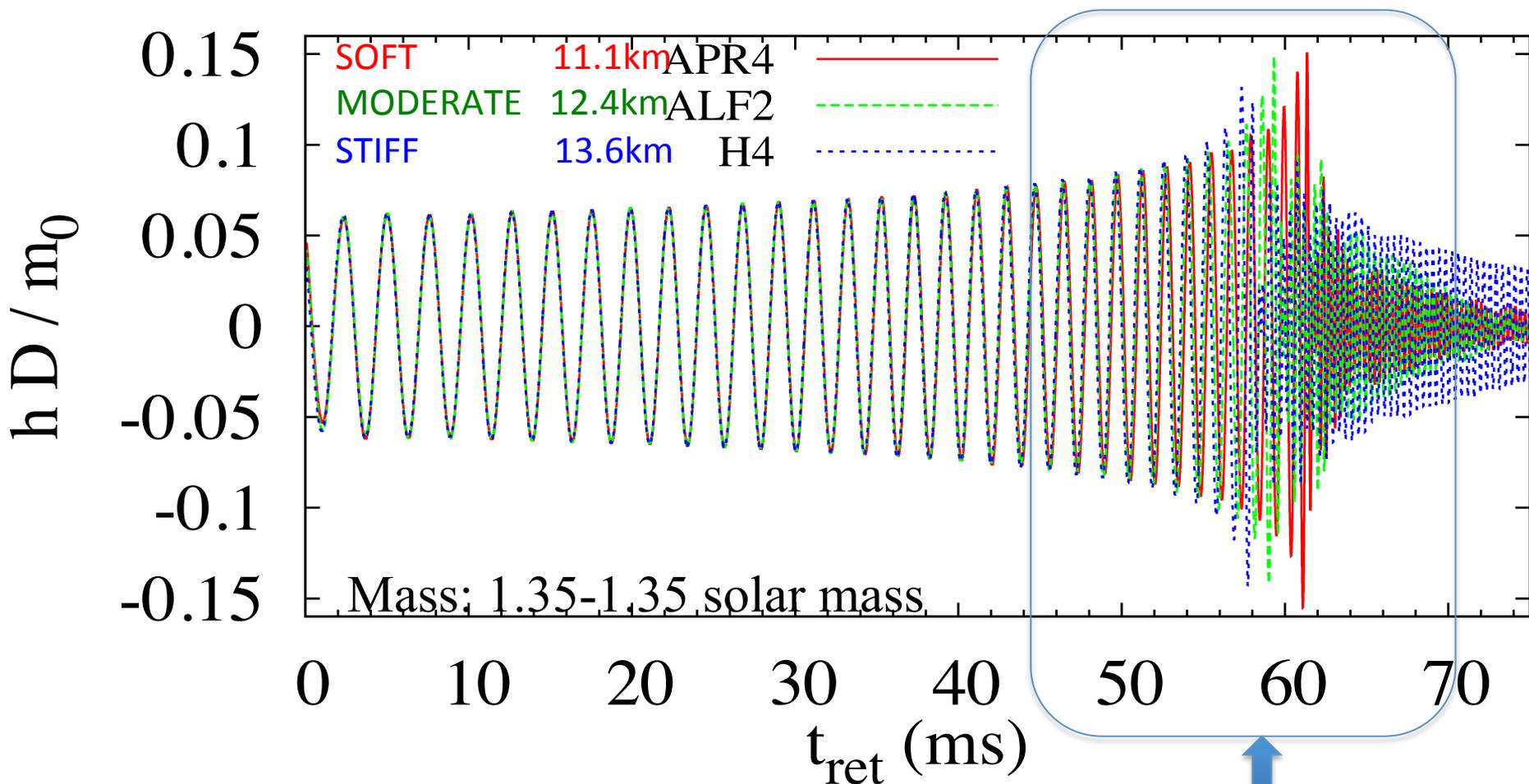
重い中性子星が合体後に誕生し、
多様な現象が起きる(例えば質量放出)



x (km) H4: R=13.6km

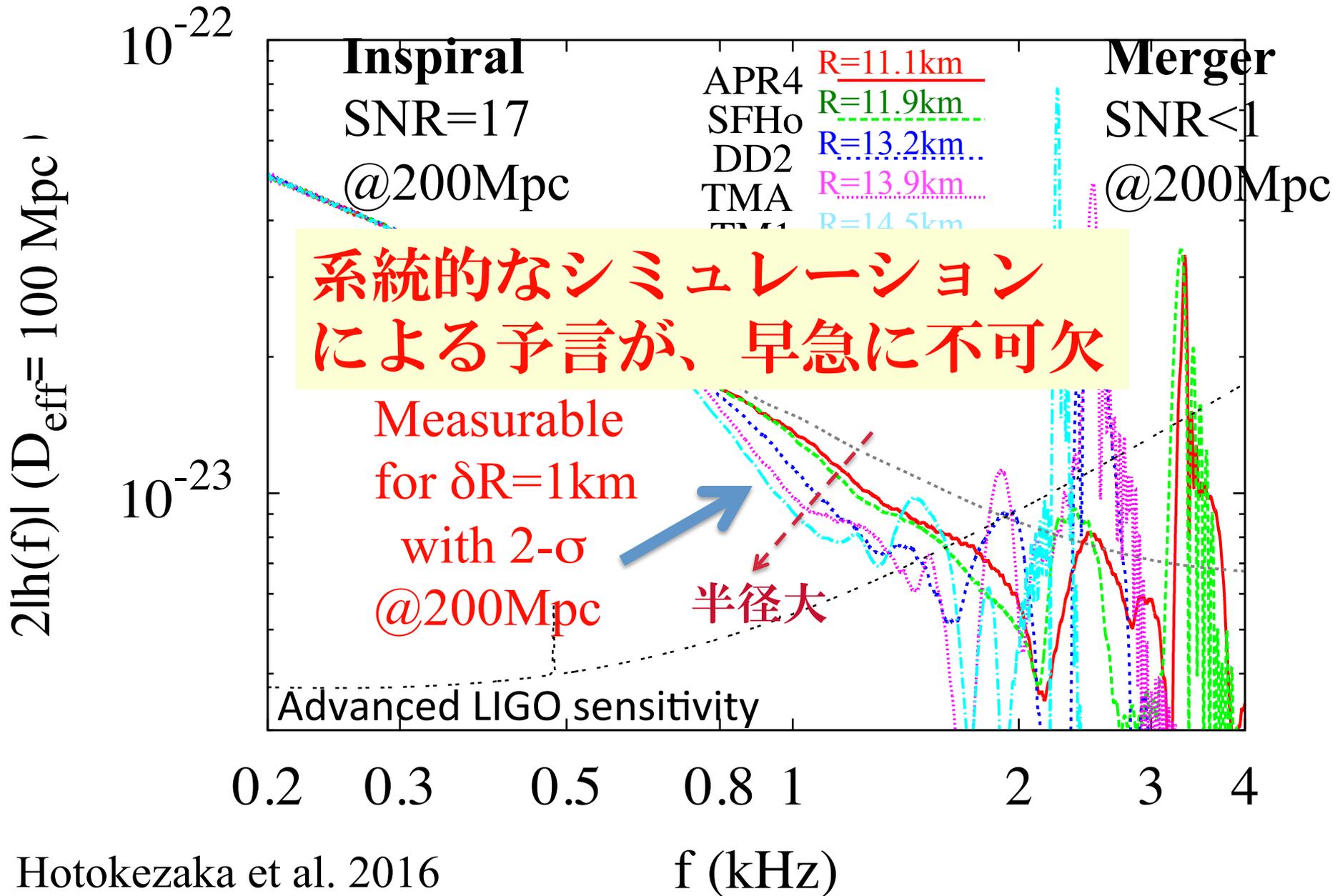
x (km) MS1: R=14.5km

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

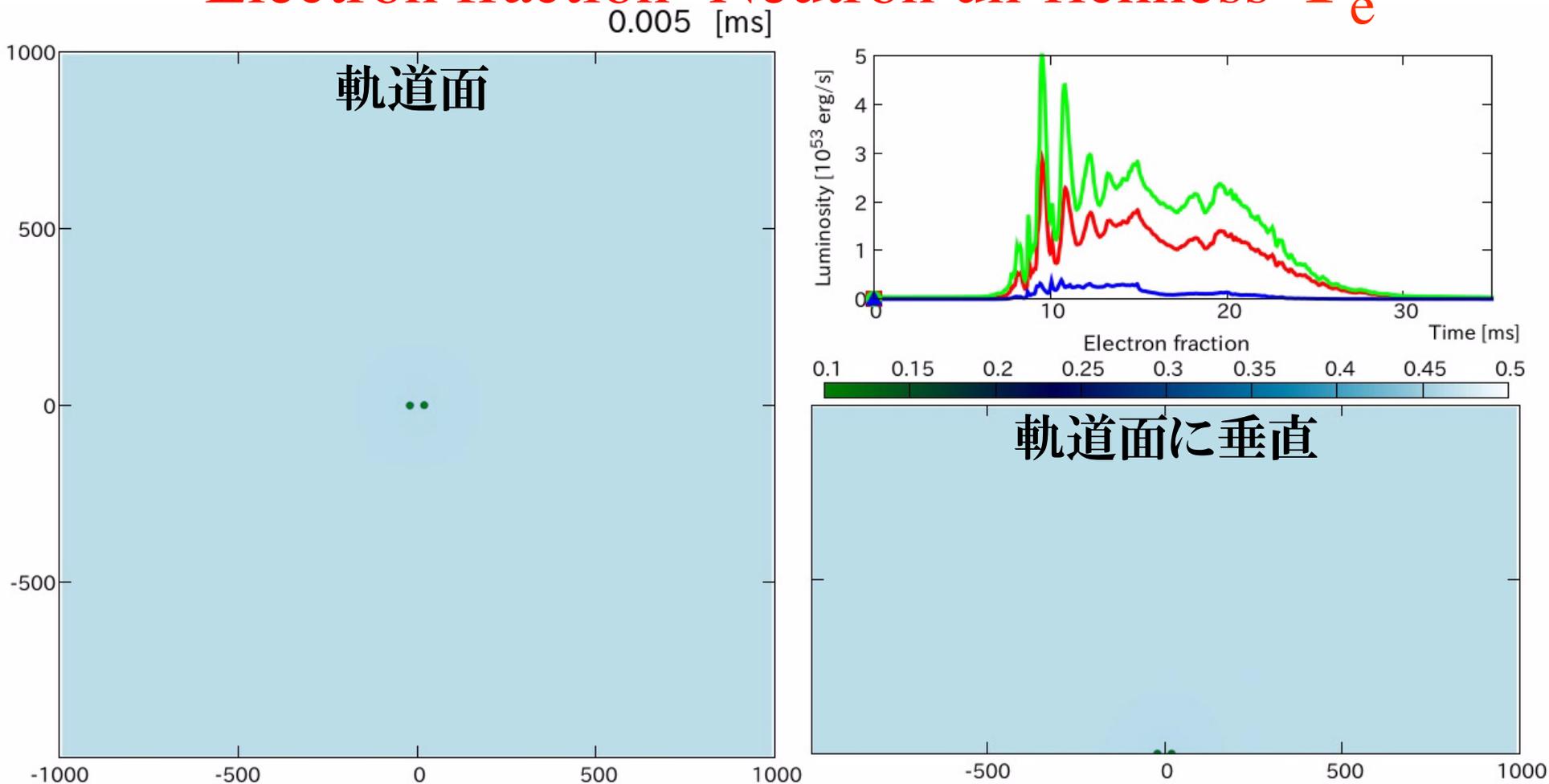
重力波のスペクトル



質量放出

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

Electron fraction=Neutron un-richness Y_e

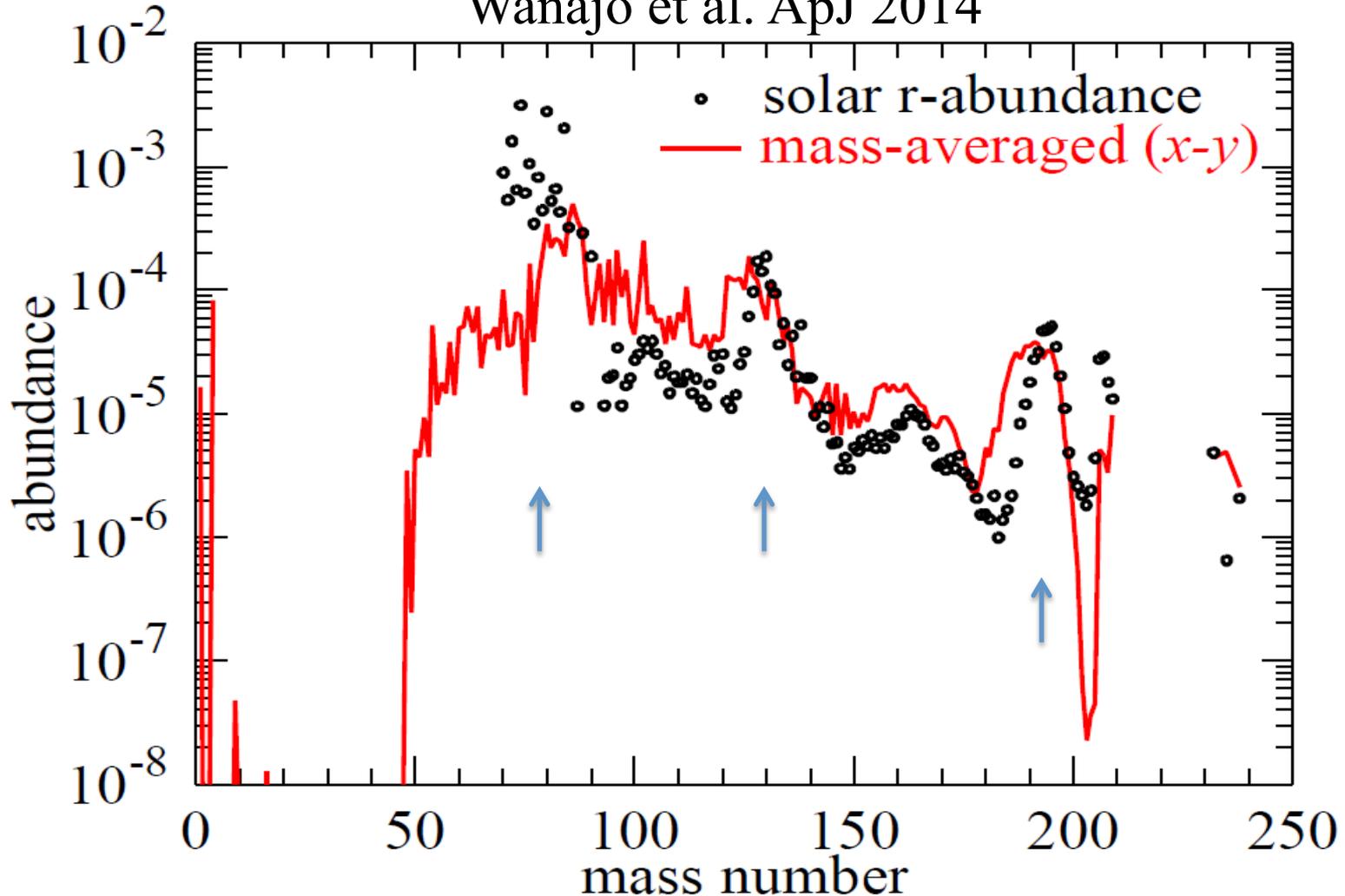


中性子過剰物質 → 速い中性子捕獲による元素合成

→ 大量の不安定性元素の崩壊 → **heat up & shine**

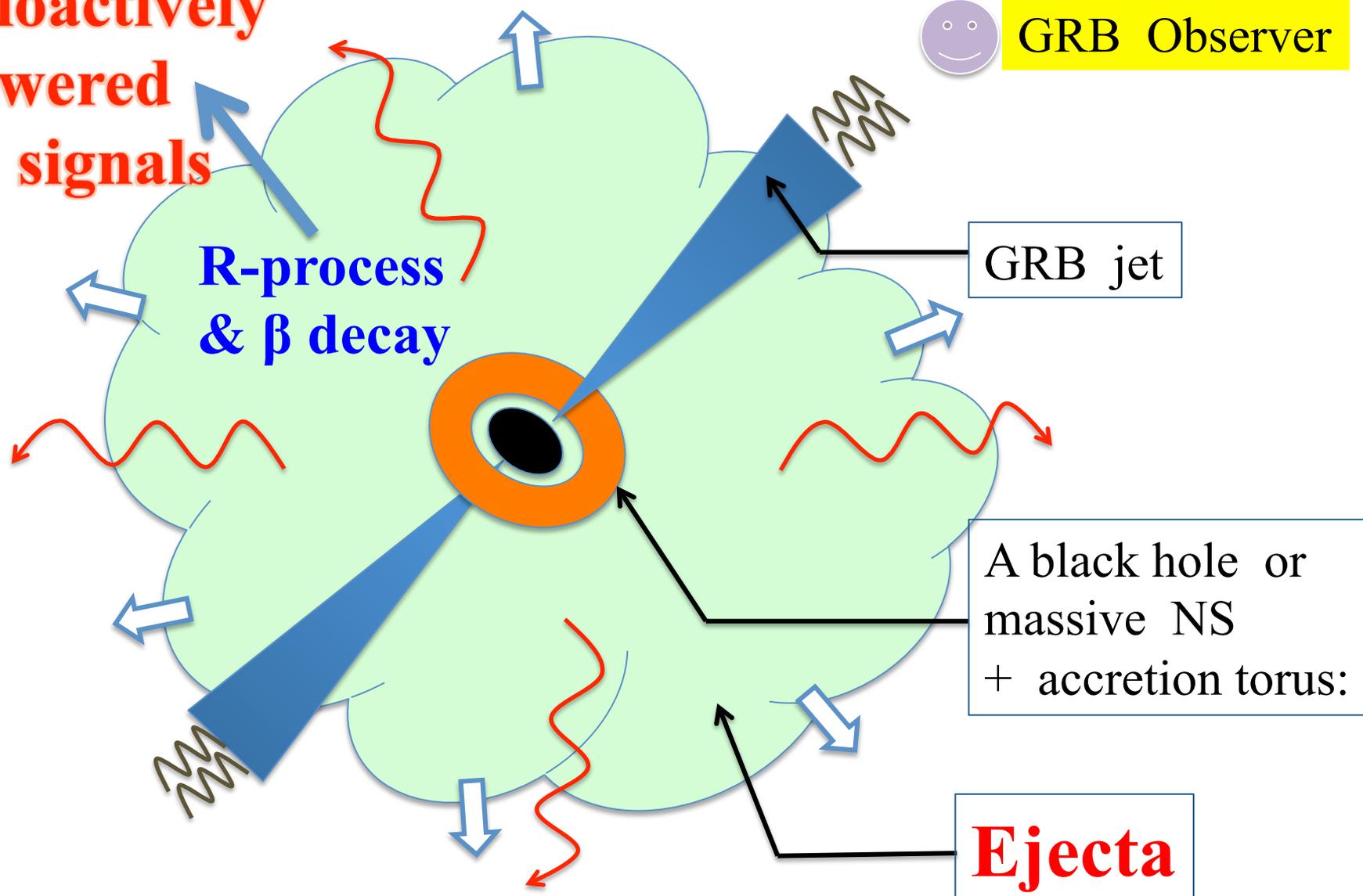
(Li & Paczynski, 1998)

Wanajo et al. ApJ 2014



連星中性子星の合体の標準シナリオ

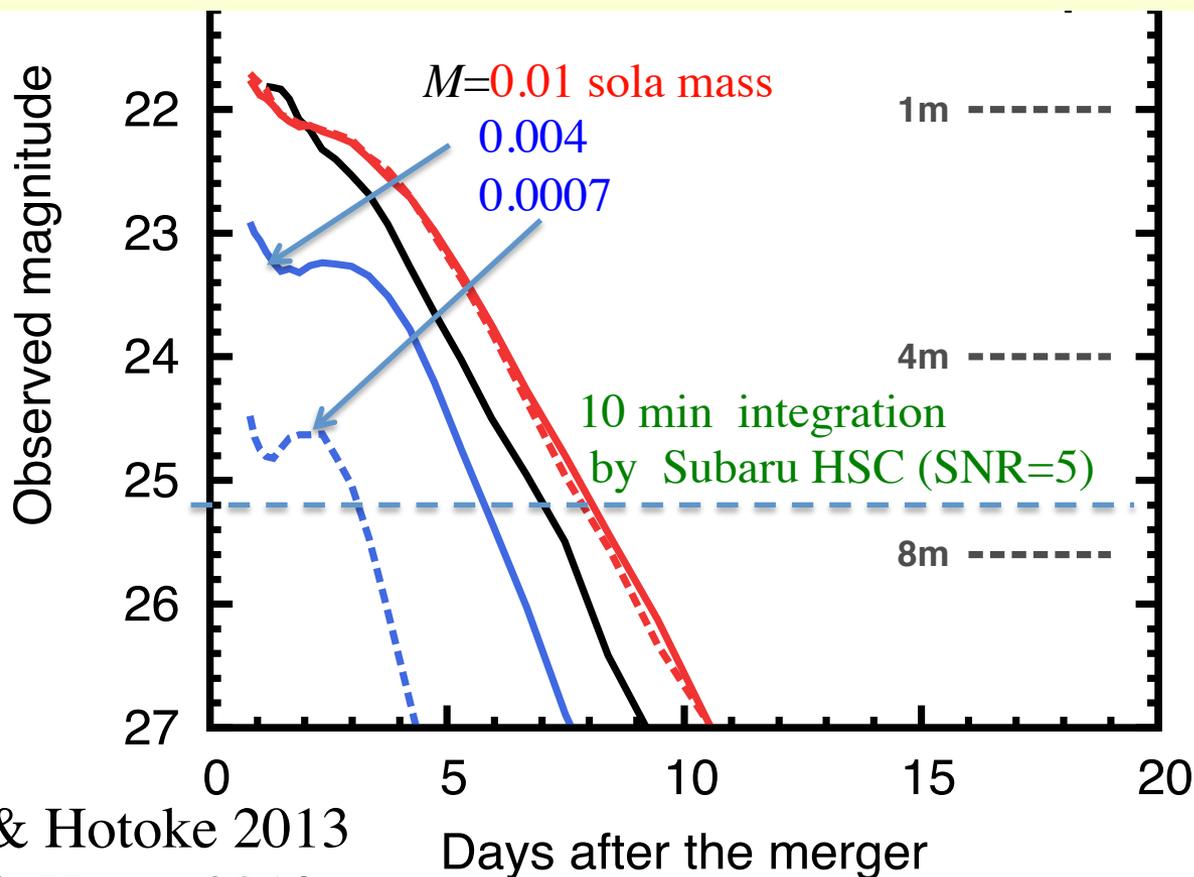
**Radioactively
powered
EM signals**



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！

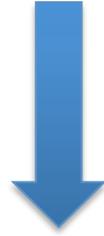


Tanaka & Hotoke 2013

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)

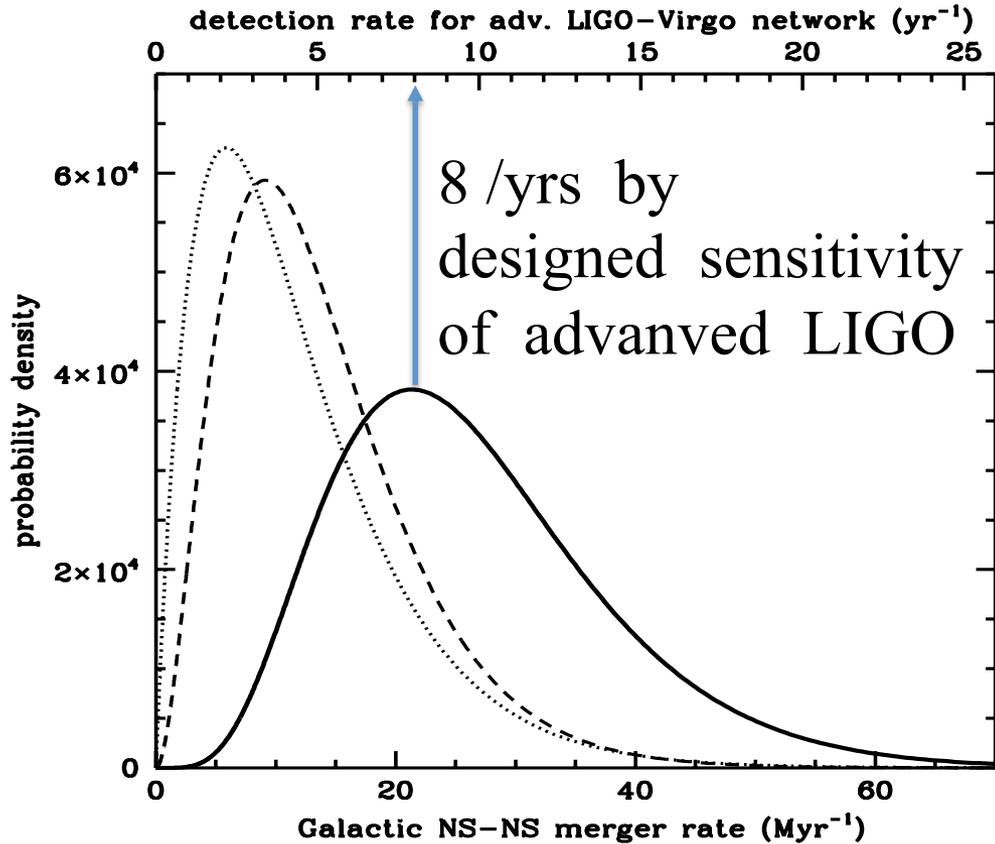
大雑把な理論による推定

TABLE 1

LOCAL MERGER RATES AND SIMPLY-SCALED DETECTION RATE PREDICTIONS^a:

Model	$\langle \mathcal{M}_c^{15/6} \rangle$ $M_{\odot}^{15/6}$	$\mathcal{R}(0)$ $\text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$	R_D (aLIGO $\rho \geq 8$) yr^{-1}	R_D (3-det network $\rho \geq 10$) 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)	

^a 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.

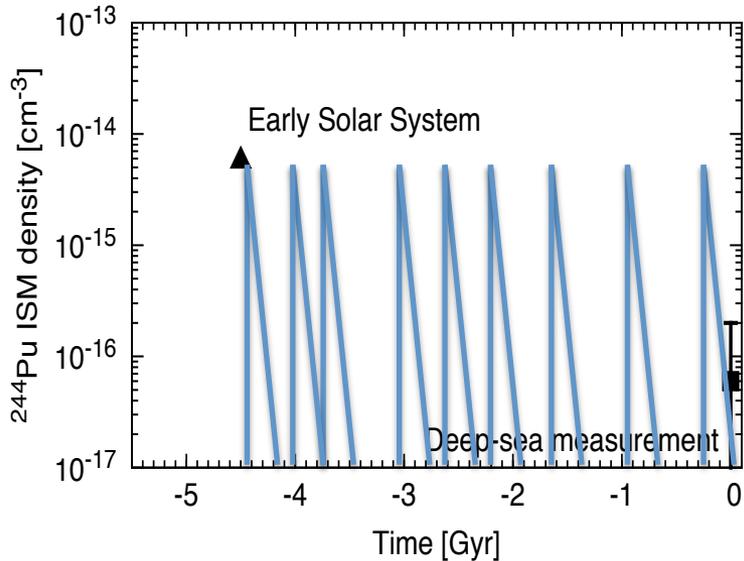
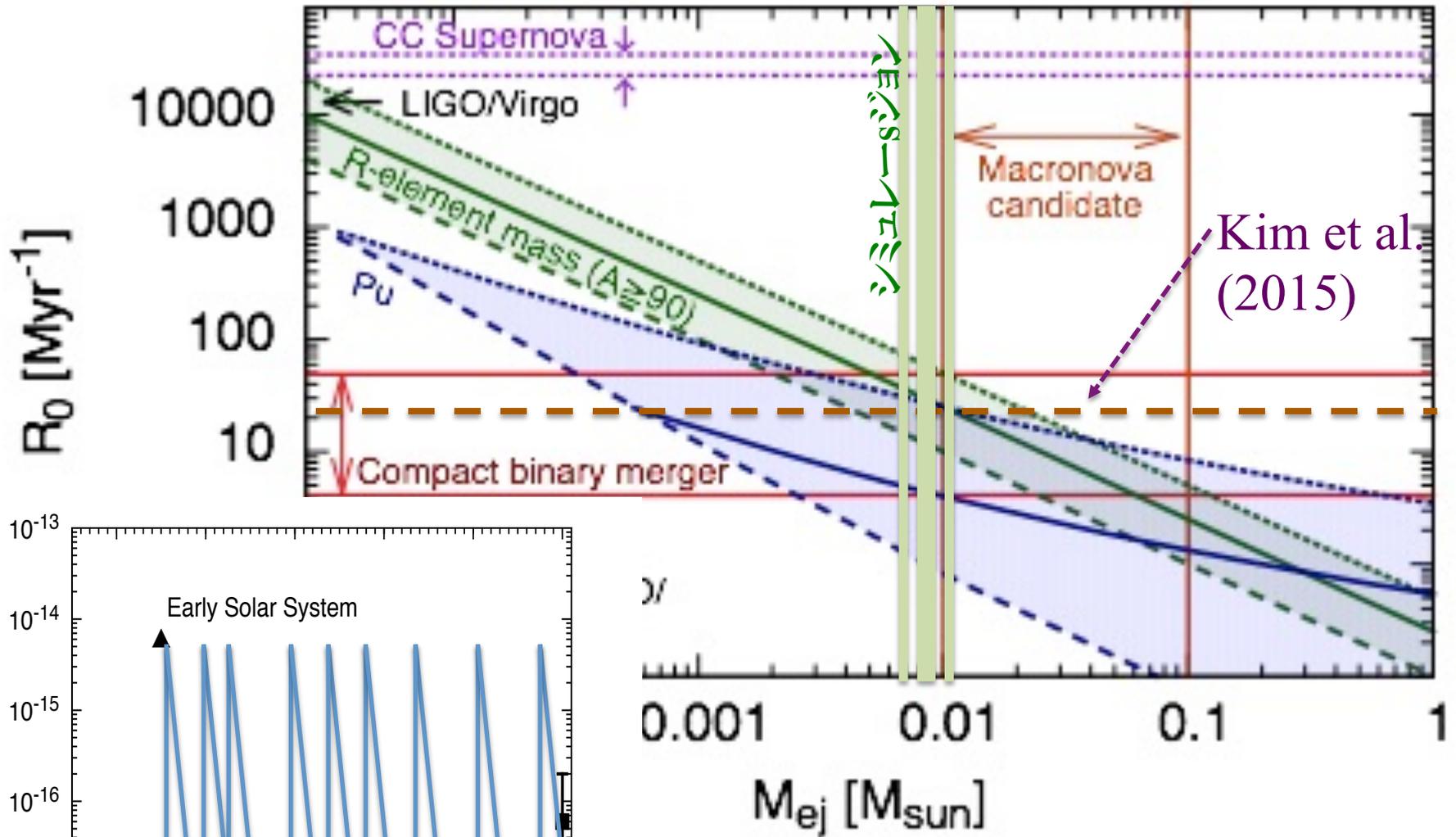


Predicted detection rate
of NS-NS
based on binary pulsar
observation

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 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)

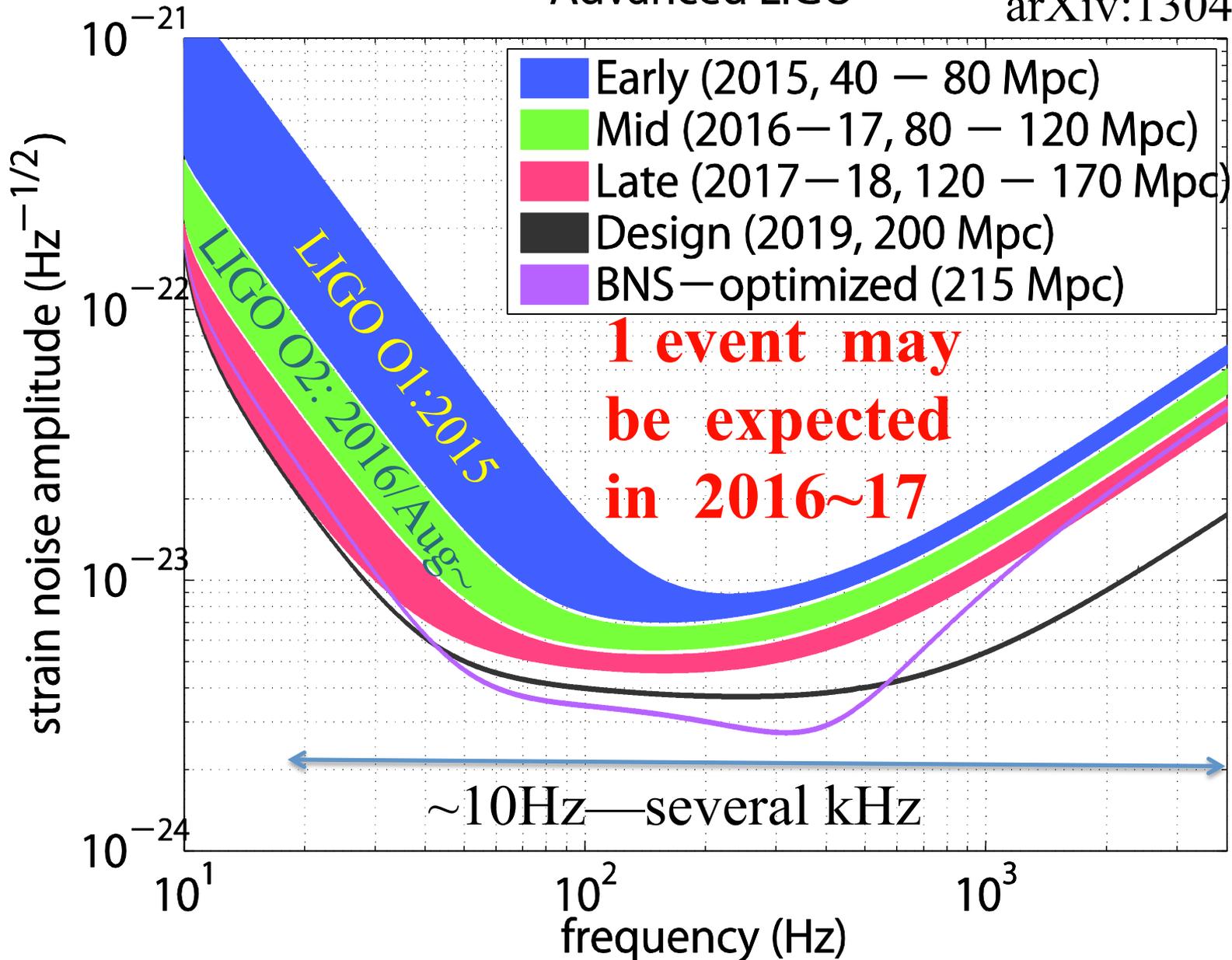


Total r-process elements
in our galaxy $\sim 5000M_{sun}$

Planned sensitivity of advanced LIGO

Advanced LIGO

arXiv:1304.0670v

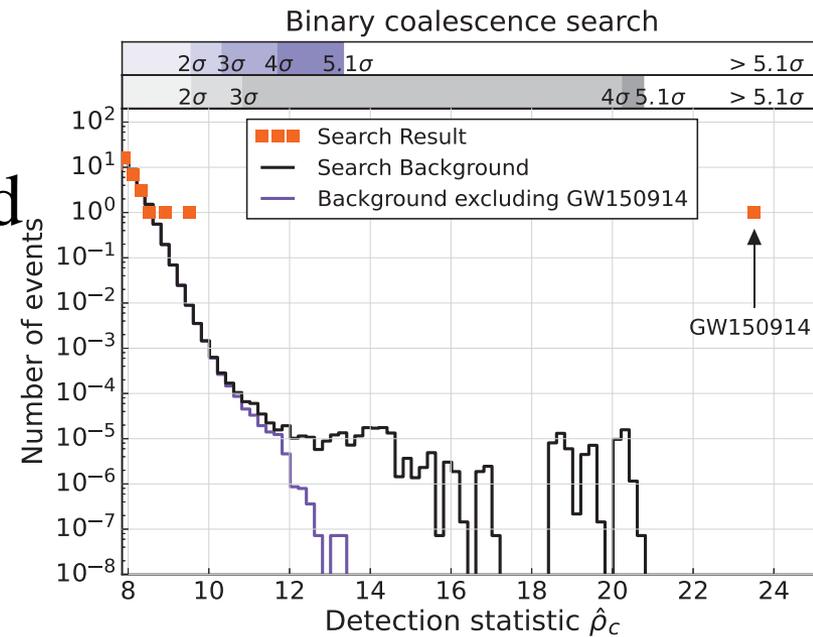


Summary

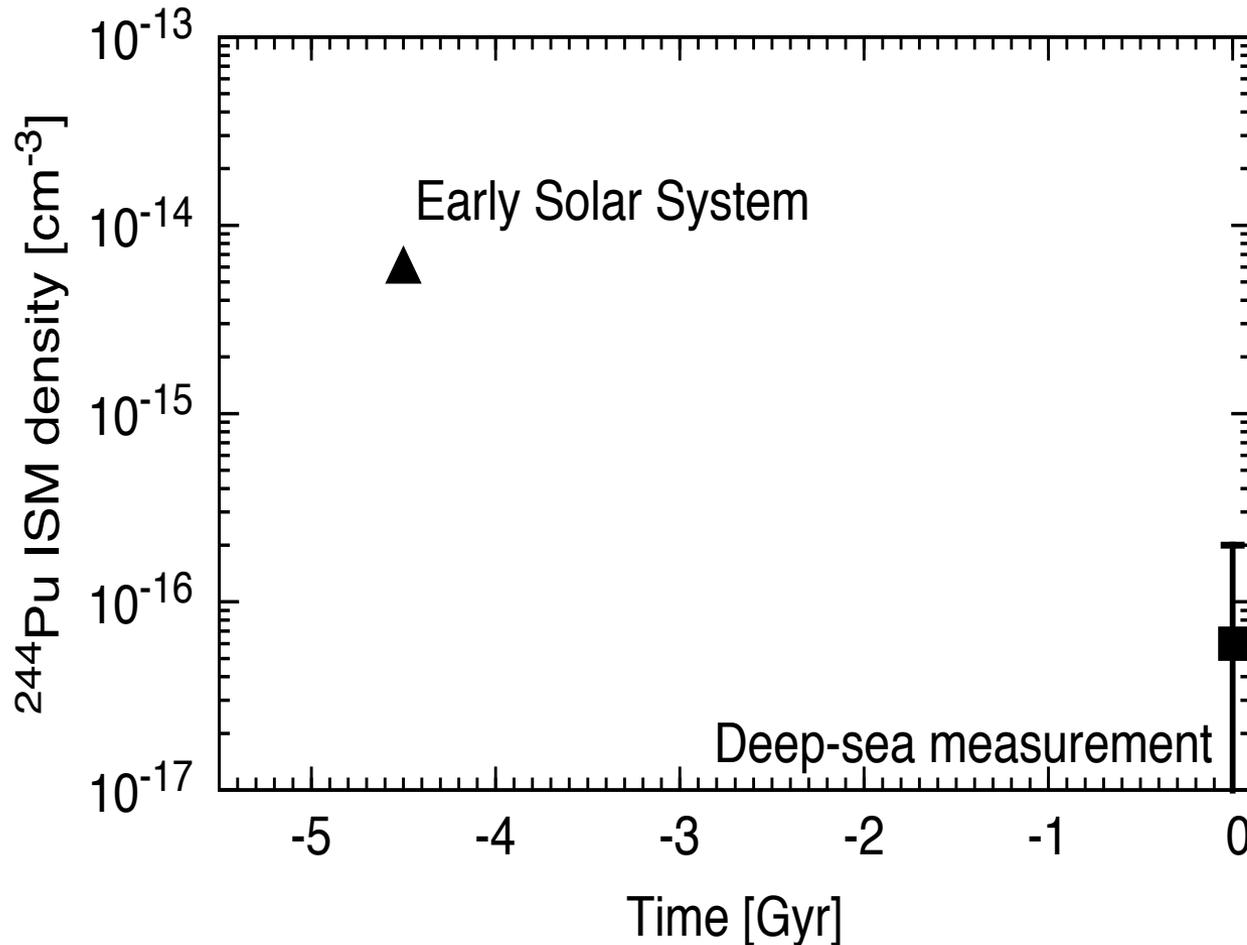
- **The first direct detection of gravitational waves open a new window for astronomy:**
- **First discovery of black-hole binary**
 - BH-BH merger rate would be high:
More detection will be achieved this year in O2
- Statistical/population-synthesis studies suggest that **NS-NS merger may be detected 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 ~ 3
- For SNR=10, 8600/yr



Estimated ^{244}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 --

