

KAGRA計画の現状と重力波検出の展望

神田展行（大阪市立大学理学研究科）

KAGRA collaboration

27th Dec. 2013, 理化学研究所

中性子星核物質研究会

本日のお話

重力波とは？

- 一般相対論と重力波
- 重力波源候補天体

KAGRA計画の現状

重力波検出の展望

- イベント期待値
- 重力波の波形の語ること
- 多数の重力波イベントで見えてくること

重力波とは

一般相対論と重力波

重力波源候補天体

重力波とは？

重力＝時空の歪み

Einstein Eq.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa T_{\mu\nu}$$

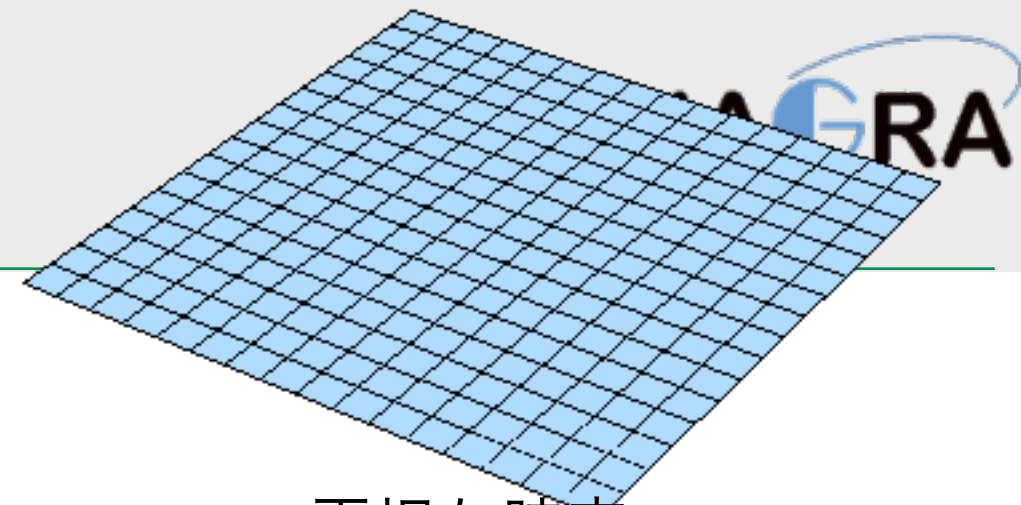
計量テンソル

平坦な時空 (Minkowski)

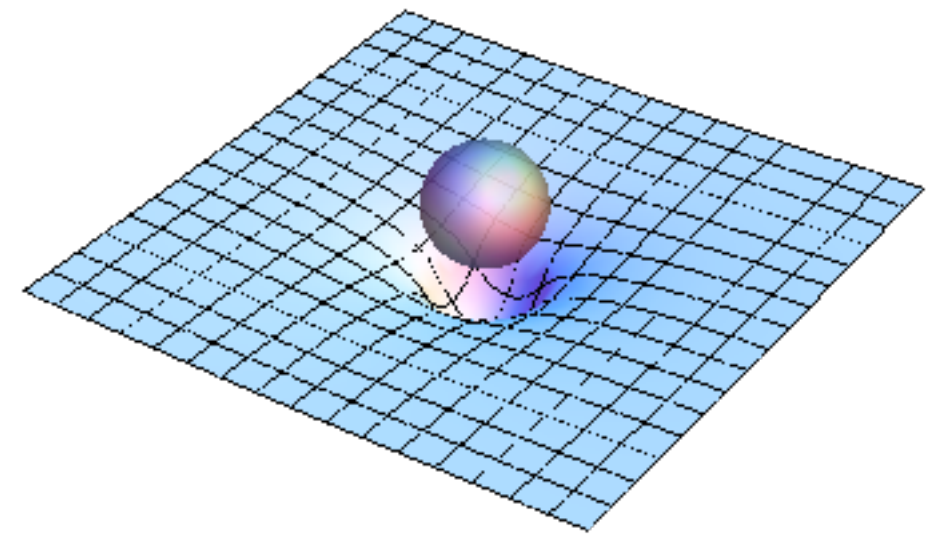
$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} ct & x & y & z \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{matrix}$$

“曲がった (歪んだ)” 時空

$$g_{\mu\nu} \neq \eta_{\mu\nu}$$



平坦な時空



質量による重力＝時空の歪み

重力波とは？

重力＝時空の歪み

Einstein Eq.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa T_{\mu\nu}$$

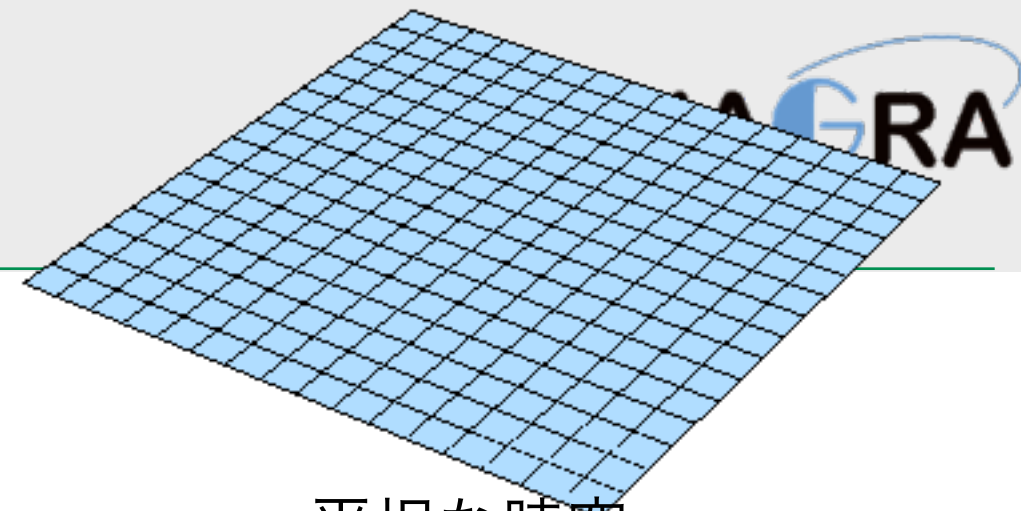
計量テンソル

平坦な時空 (Minkowski)

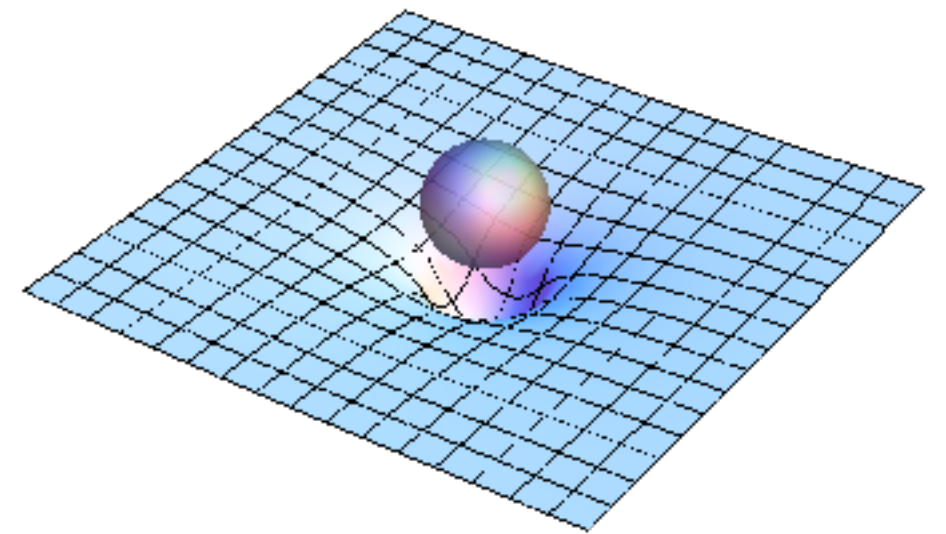
$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} ct & x & y & z \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{matrix}$$

“曲がった (歪んだ)” 時空

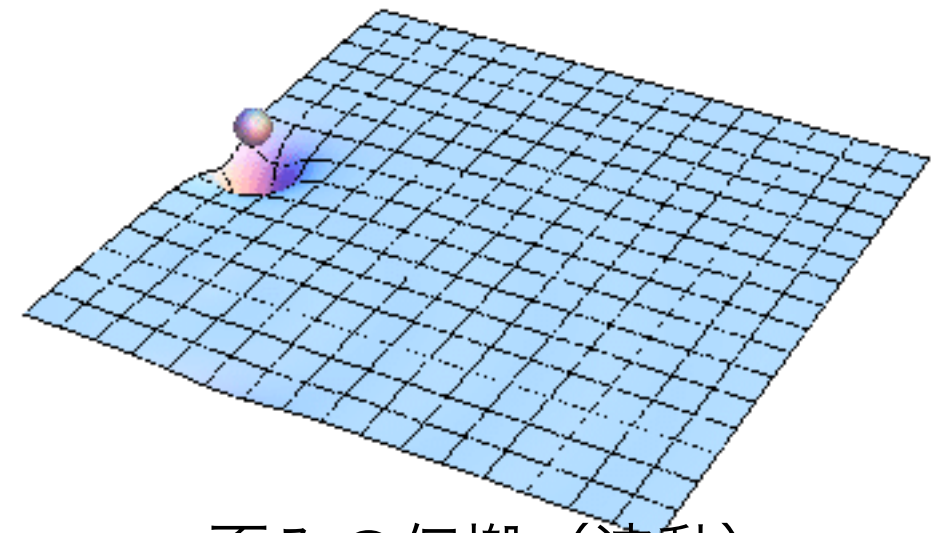
$$g_{\mu\nu} \neq \eta_{\mu\nu}$$



平坦な時空



質量による重力＝時空の歪み



歪みの伝搬 (波動)

重力波とは？

重力＝時空の歪み

Einstein Eq.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa T_{\mu\nu}$$

計量テンソル

平坦な時空 (Minkowski)

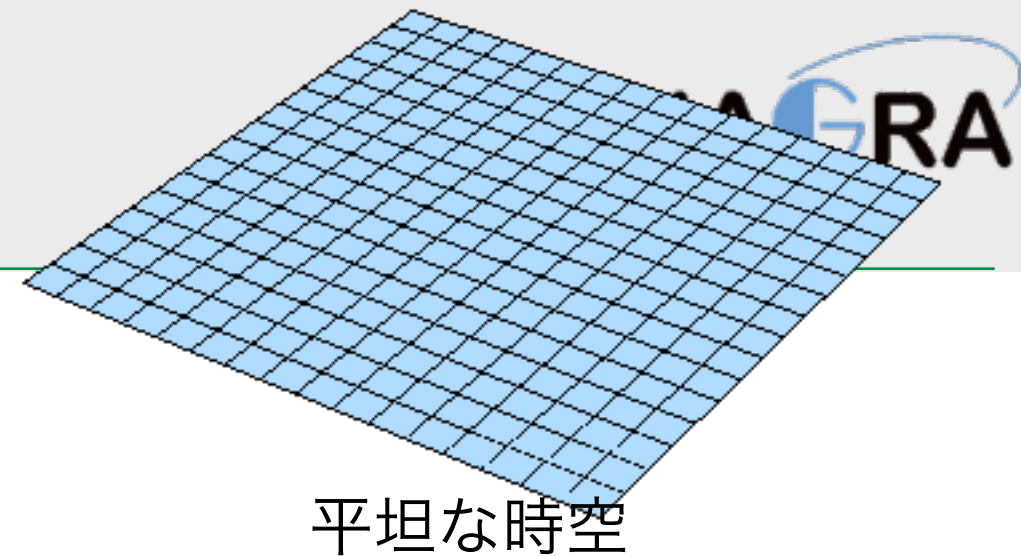
$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} ct & x & y & z \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{matrix}$$

“曲がった (歪んだ)” 時空

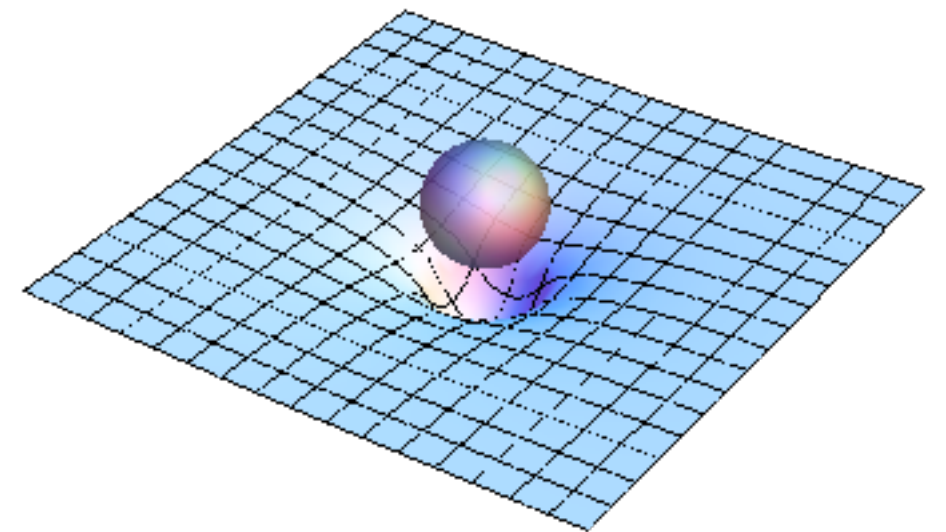
$$g_{\mu\nu} \neq \eta_{\mu\nu}$$

摂動 ‘ h ’ --> 波動解

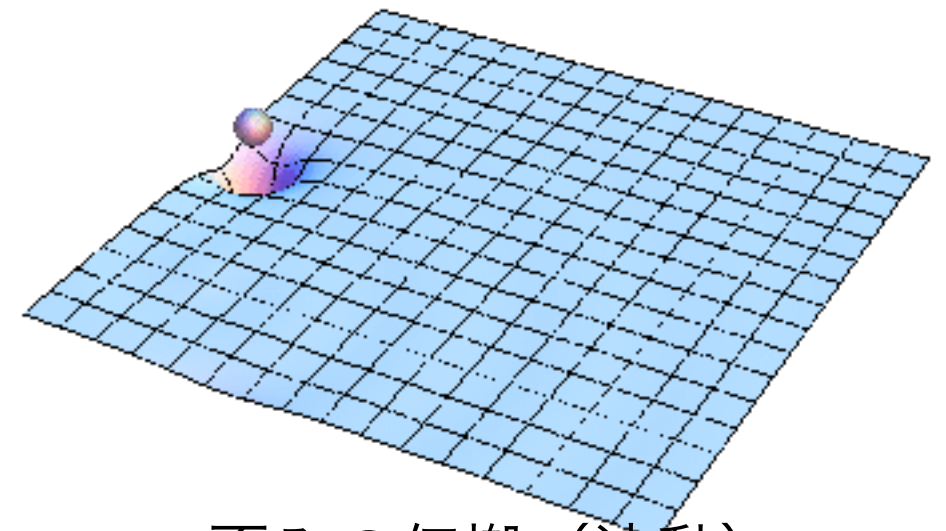
$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$
$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = 0$$



平坦な時空



質量による重力＝時空の歪み



歪みの伝搬 (波動)

重力波とは？

重力＝時空の歪み

Einstein Eq.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -\kappa T_{\mu\nu}$$

計量テンソル

平坦な時空 (Minkowski)

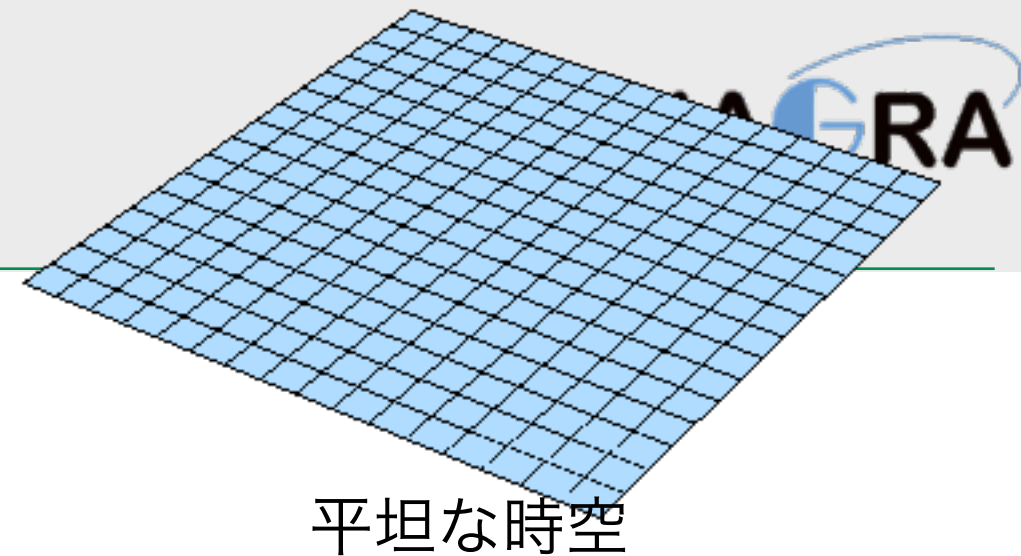
$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} ct & x & y & z \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{matrix}$$

“曲がった (歪んだ)” 時空

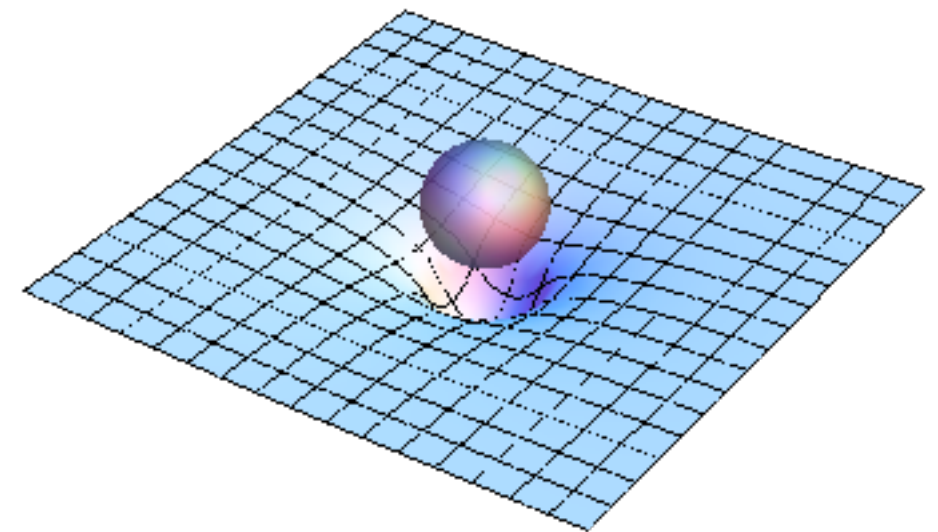
$$g_{\mu\nu} \neq \eta_{\mu\nu}$$

摂動 ‘ h ’ --> 波動解

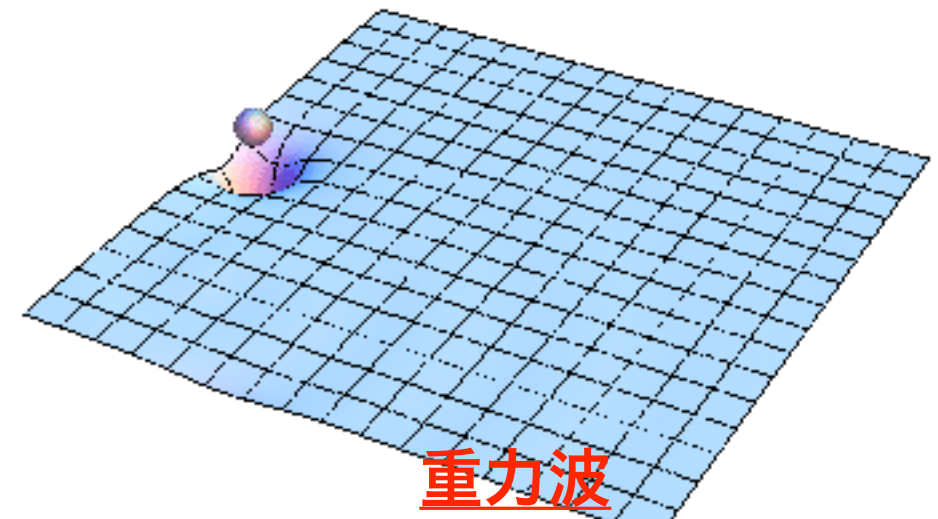
$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$
$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = 0$$



平坦な時空



質量による重力＝時空の歪み



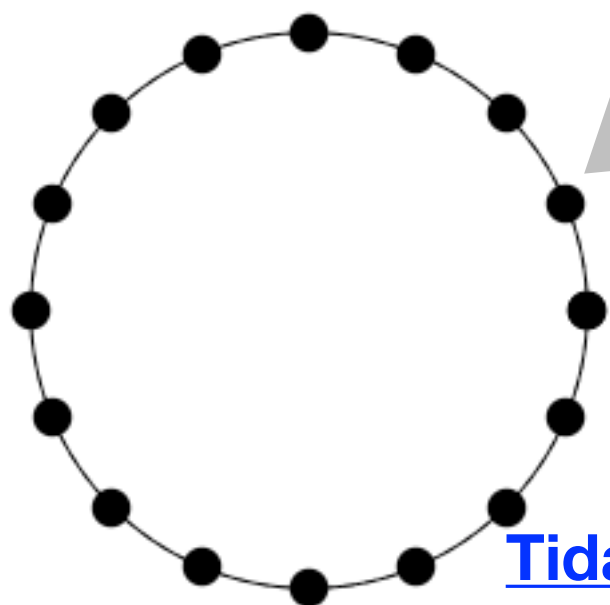
重力波

歪みの伝搬 (波動)

重力波の性質

- 光速度
- 横波
- 四重極
- (潮汐力)

$$h_+ \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - 2\pi f_{GW} t)$$

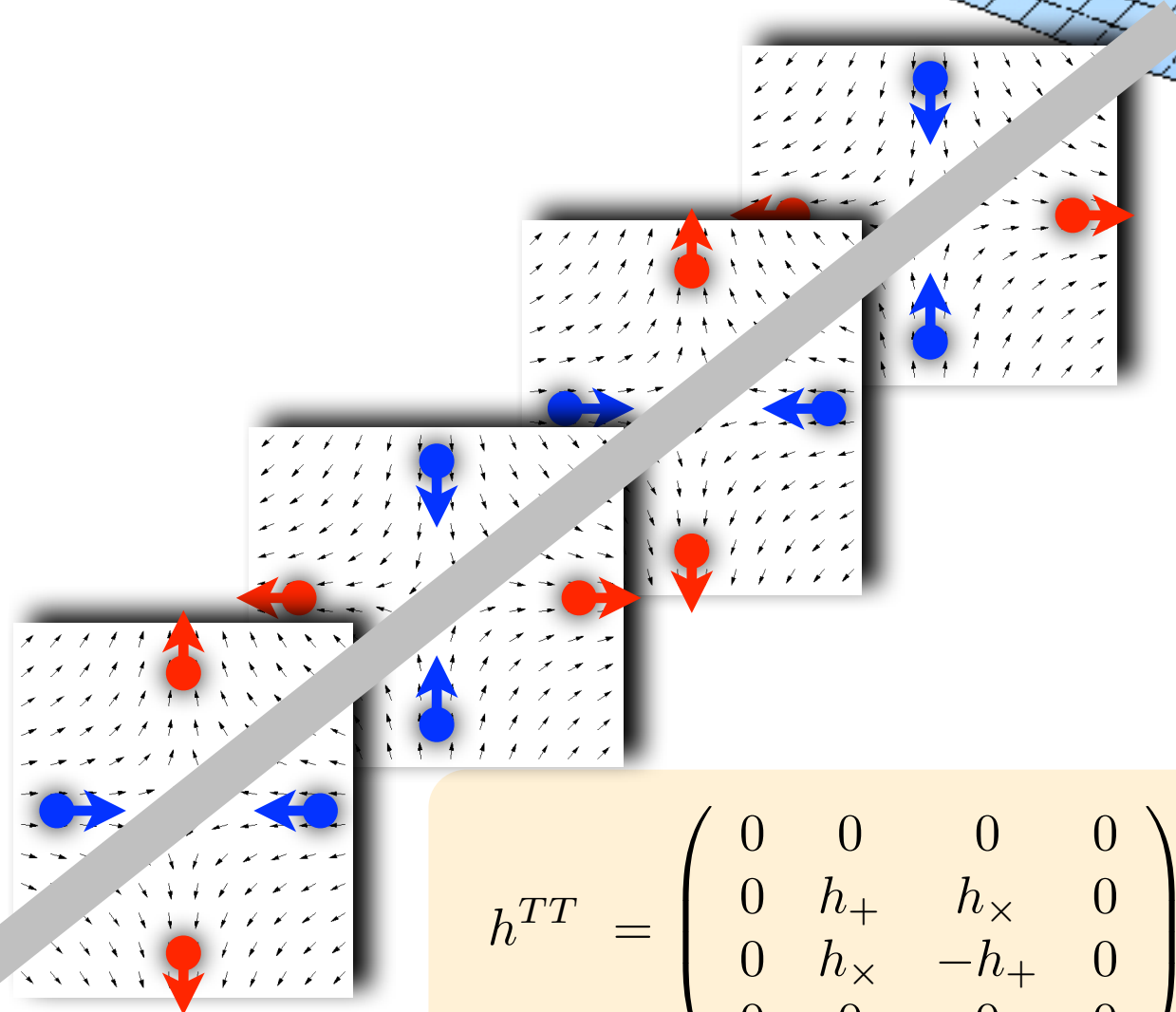
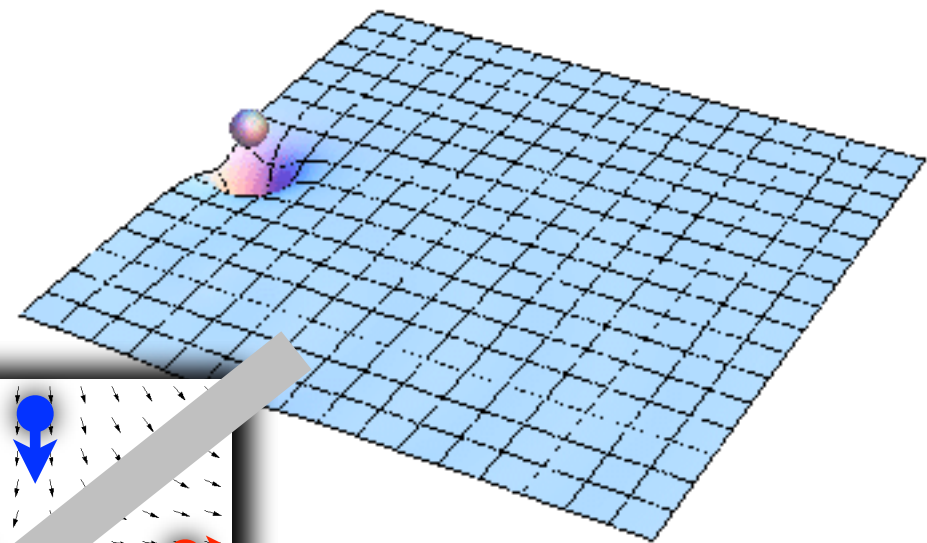


Tidal force (潮汐力)

が重力波によって誘起される

$$h^{TT} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = h_+ e_+ + h_\times e_\times$$

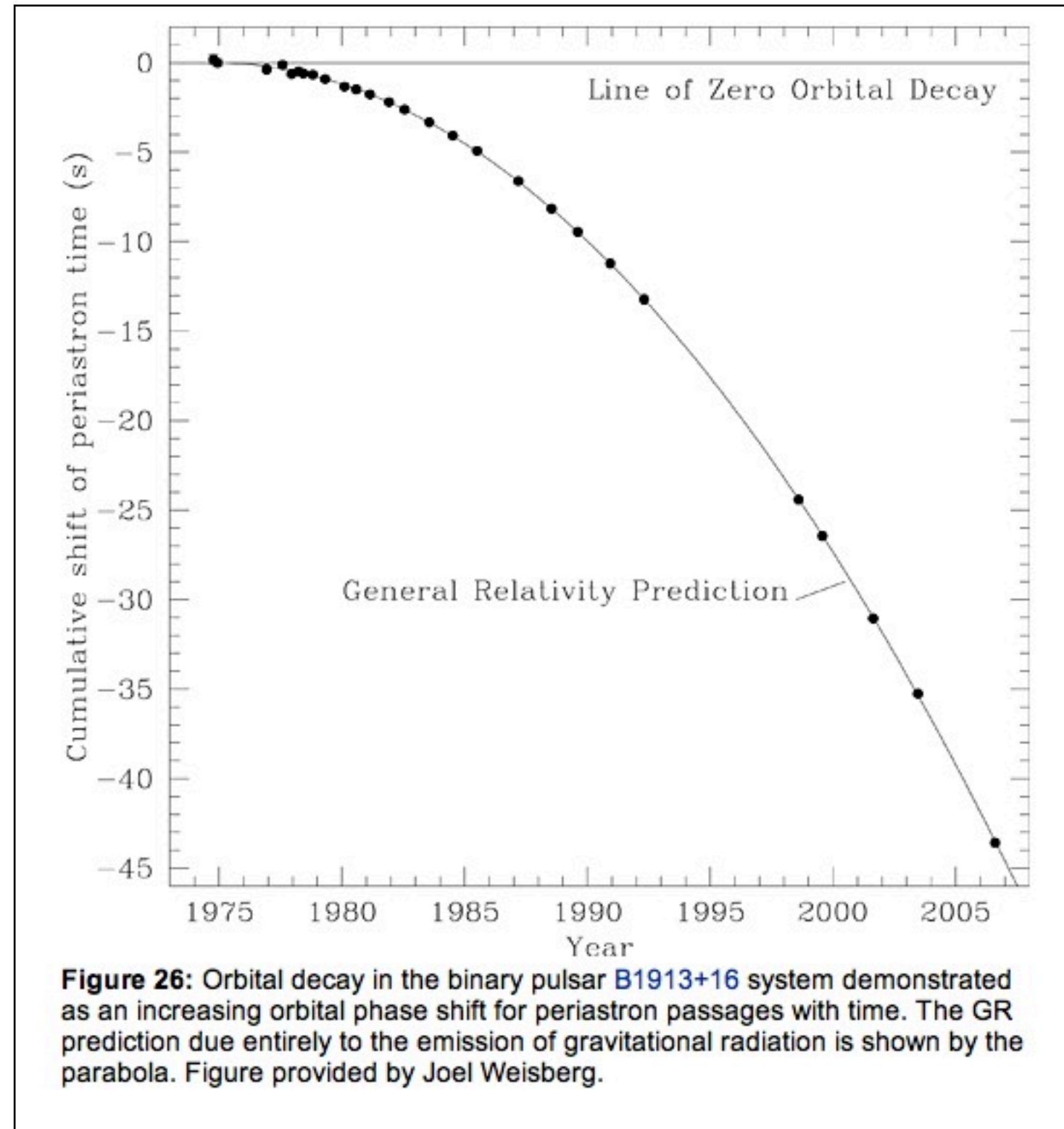
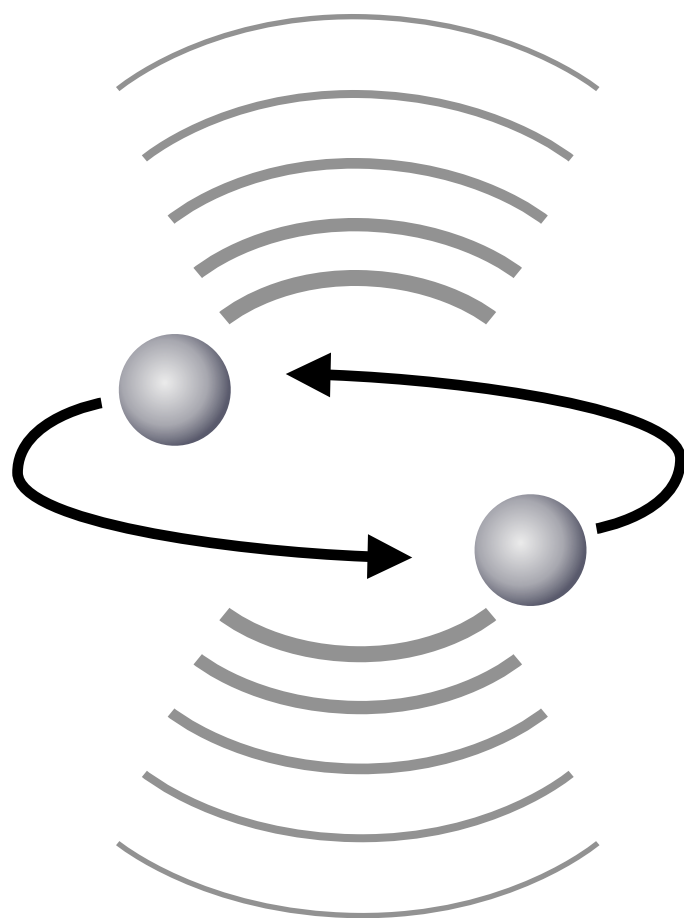
$$e_+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad e_\times = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



重力波の間接証明

連星パルサー PSR1913+16

- by Hulse & Taylor
- 公転周期は、連星系からの重力波放射によって運びさられるエネルギーと角運動量によって変化する。
- 観測結果と一般相対論による予想計算が、非常に高い精度で一致。



直接証明（直接測定）の必要性

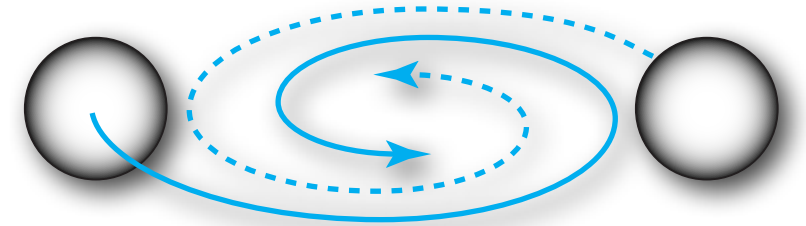
直接測定の意義

- **強い** 重力場での一般相対論の検証
- 過去、一般相対論はことごとく実験／観測テストに合格してきた。しかし、それらは太陽系程度の**弱い**重力場でのテスト。
- また、重力の「波動」の性質は、基本相互作用の探求としても**重要なテーマ**
- 重力波は波源の情報を持っている
- 天体物理や宇宙物理の新しいプローブ、新しい窓
- 重力波イベントの同定＝波源を見ること
- 重力波天文学

地上検出器の目標とする重力波源

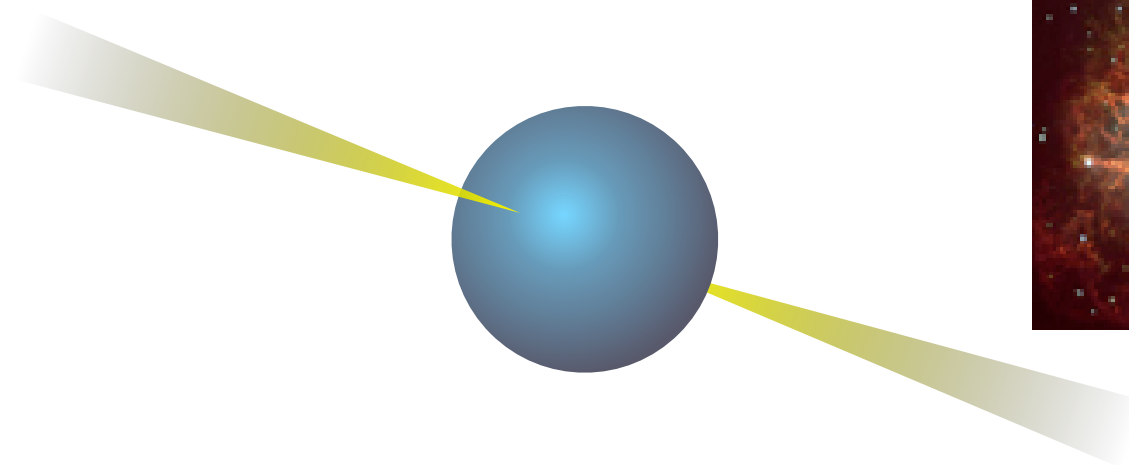
突発性のイベント的なもの:

- コンパクト連星 (NS-NS, NS-BH, BH-BH)
- **中性子星 (NS)**, ブラックホール (BH)
- 超新星爆発
- BH 準固有振動
- パルサーのグリッジ



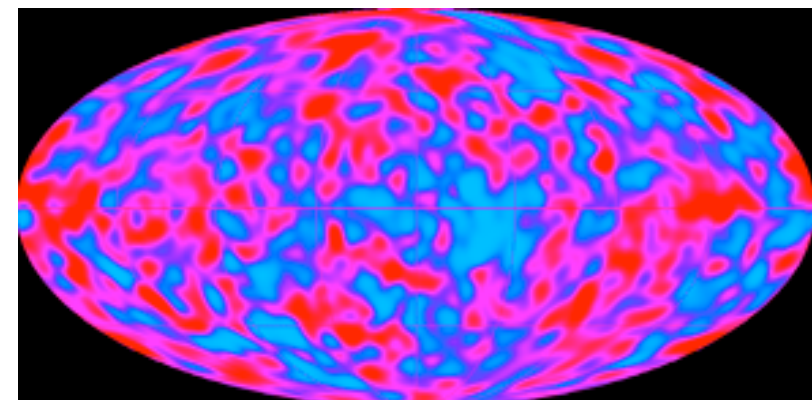
連続波:

- パルサー
- 連星

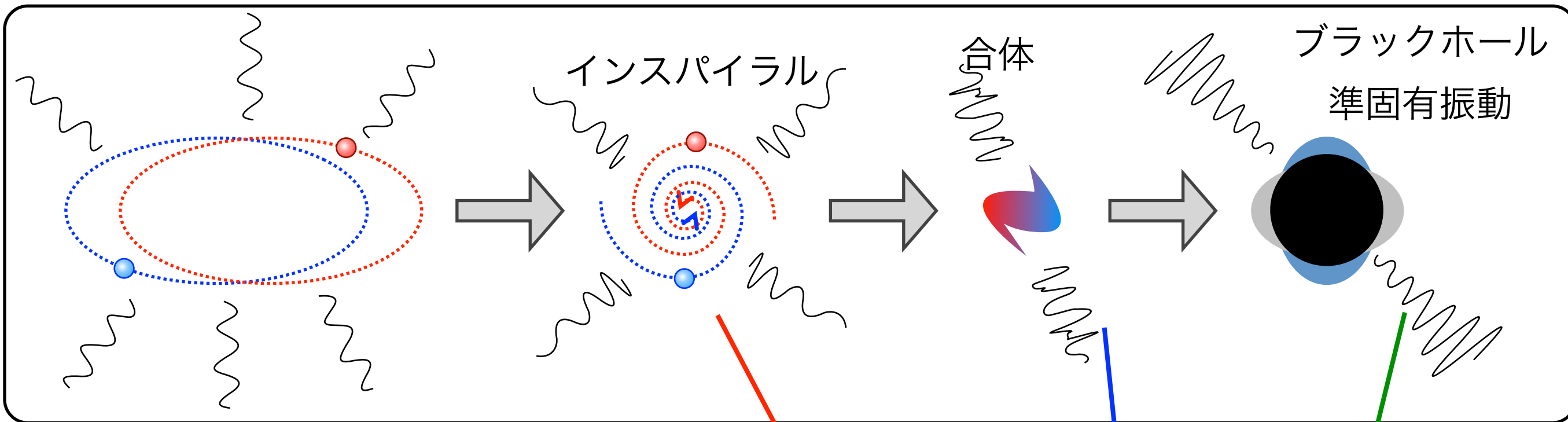


背景輻射重力波

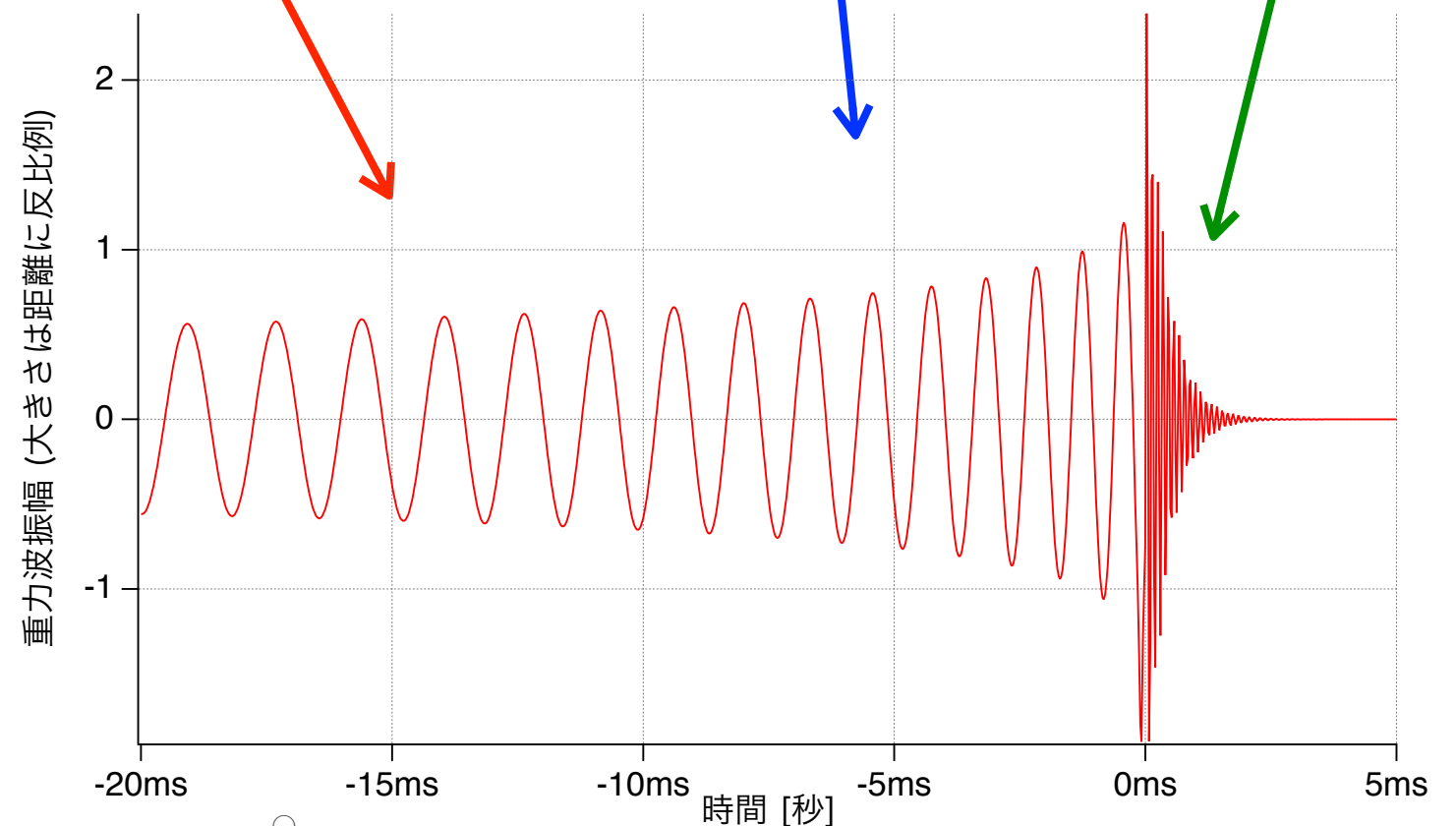
- 初期宇宙 (インフレーション起源など)
- 宇宙紐
- 天体起源の分離できないもの



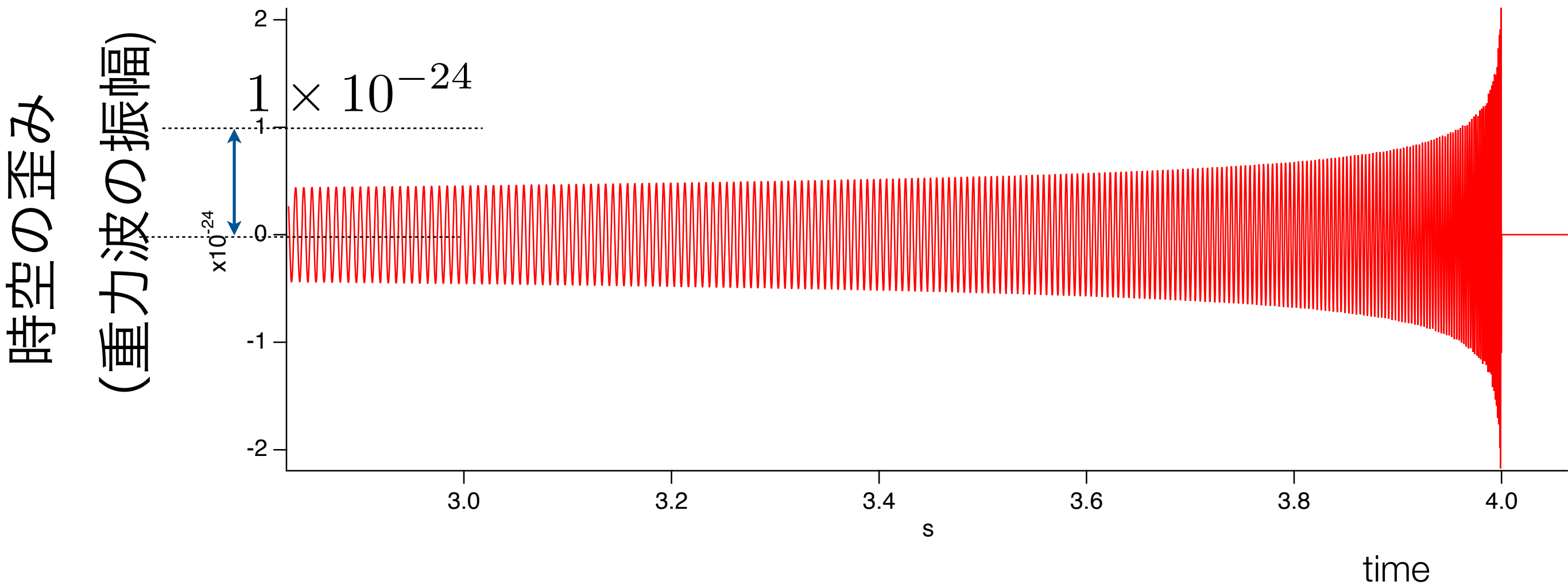
(& 未知の重力波源...)



$h \sim 10^{-24}$ for NS-NS
at 200Mpc away!



“Chirp” (チャープ)

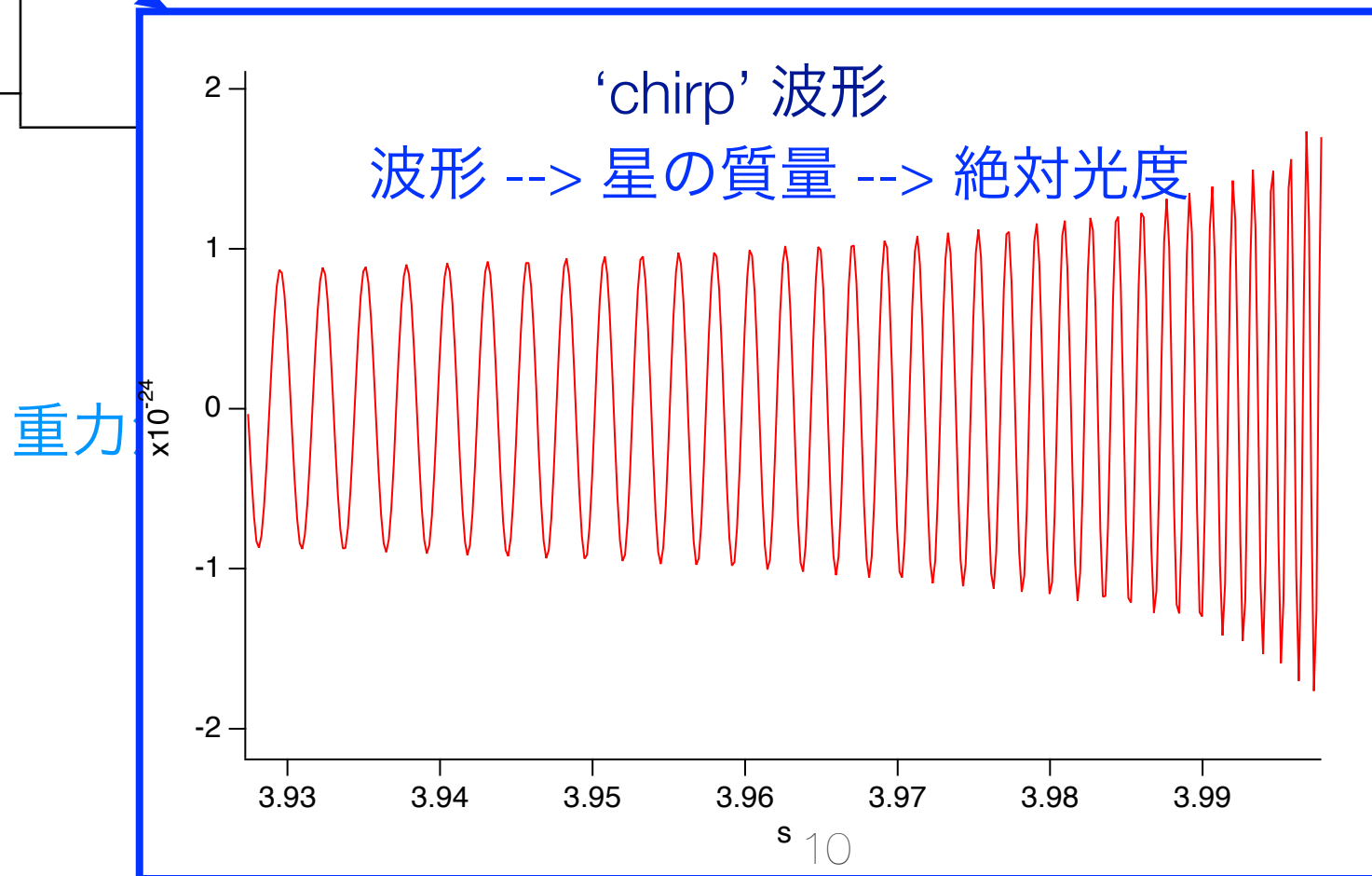
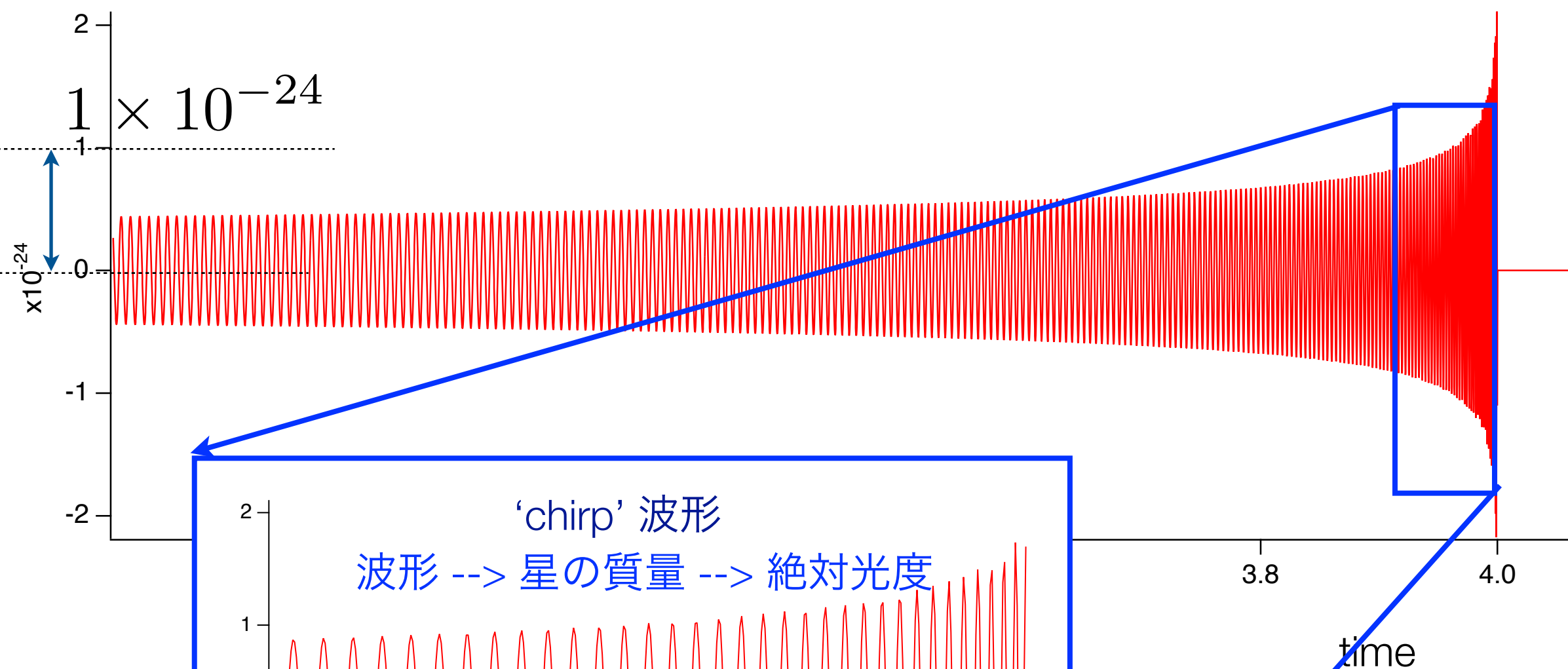


重力波の振幅 $\sim 10^{-24}$ (200Mpc 離れた中性子星連星の合体)
(周波数スペクトルで $\sim 10^{-22} \sim 10^{-23}$ [$1/\sqrt{\text{Hz}}$] @10~100Hz)

“Chirp” (チャープ)

時空の歪み

(重力波の振幅)

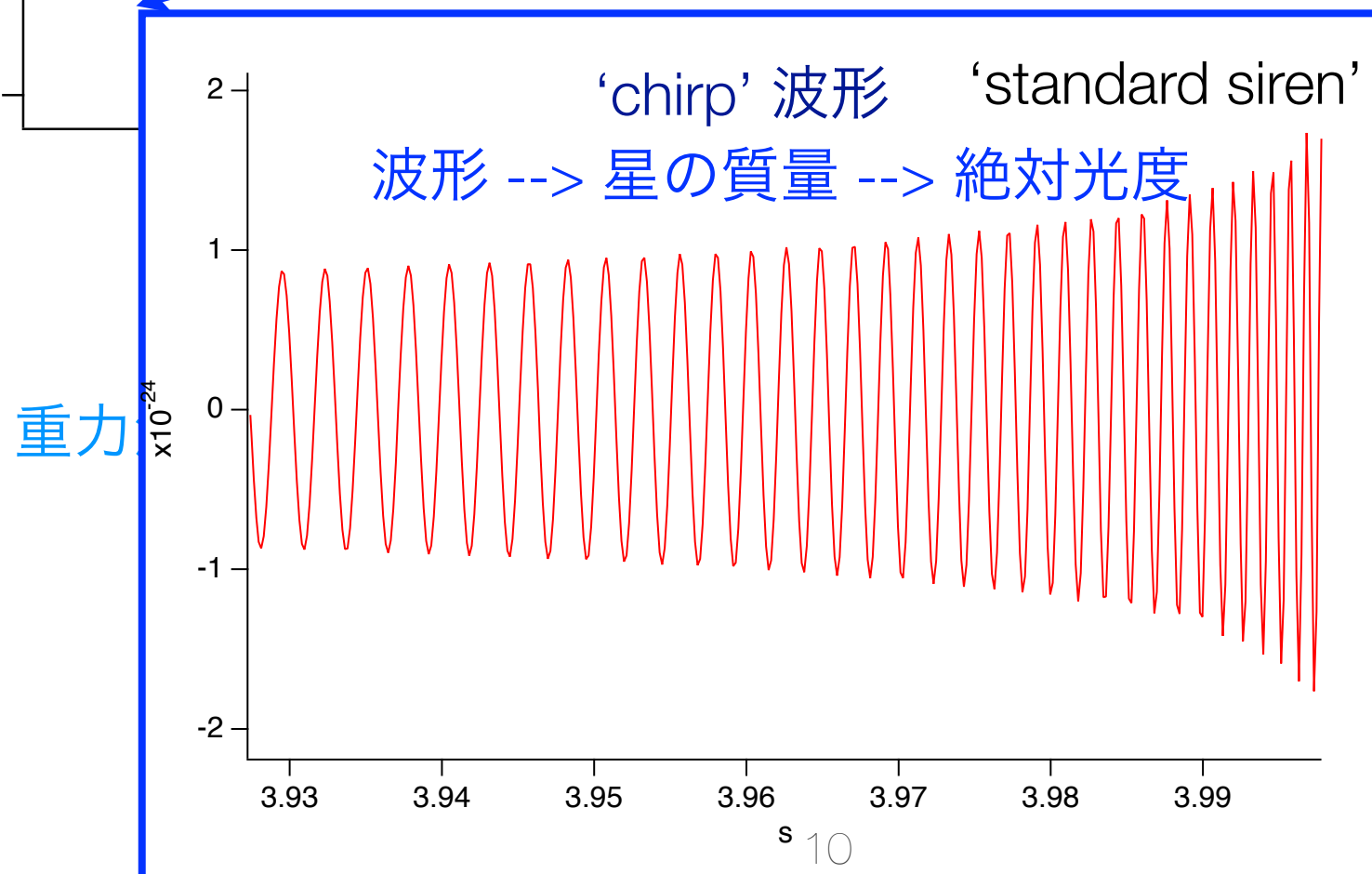
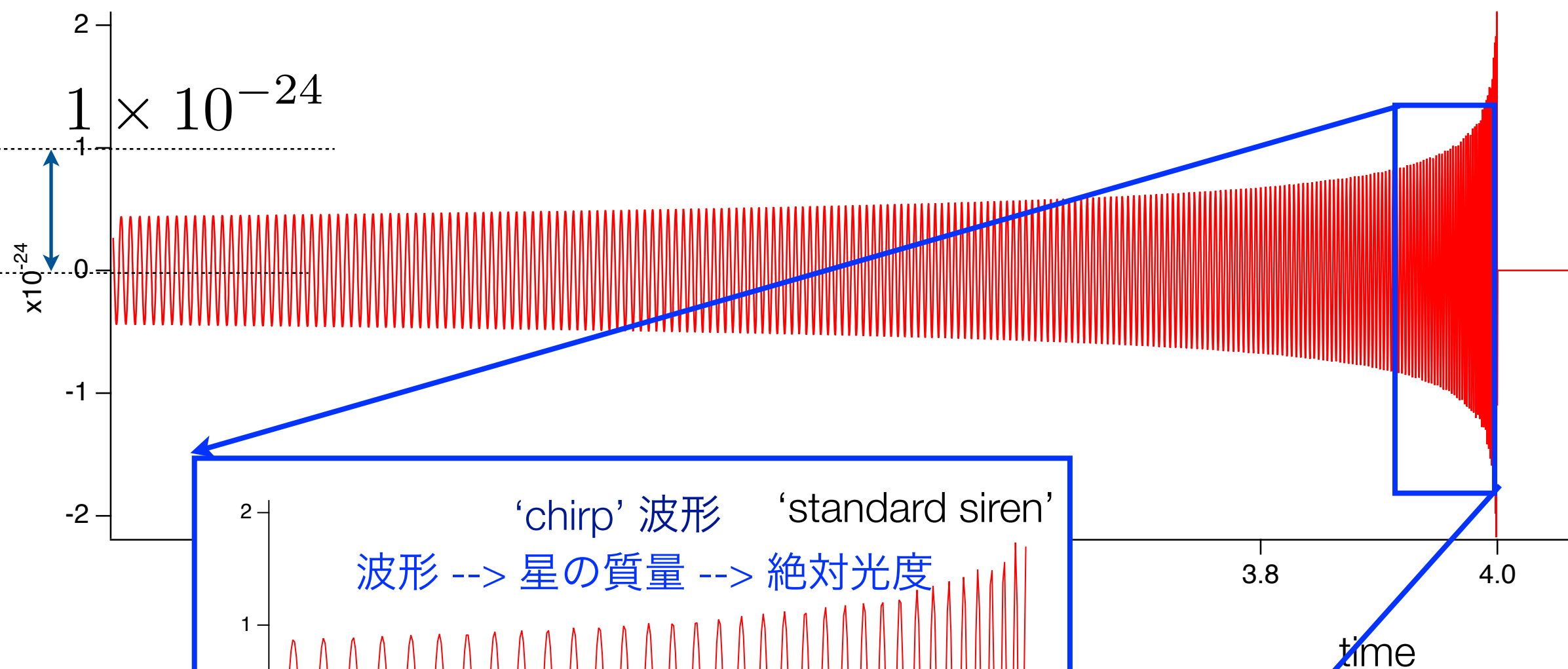


星の合体)
(100Hz)

“Chirp” (チャープ)

時空の歪み

(重力波の振幅)



星の合体)
(100Hz)

重力波検出実験

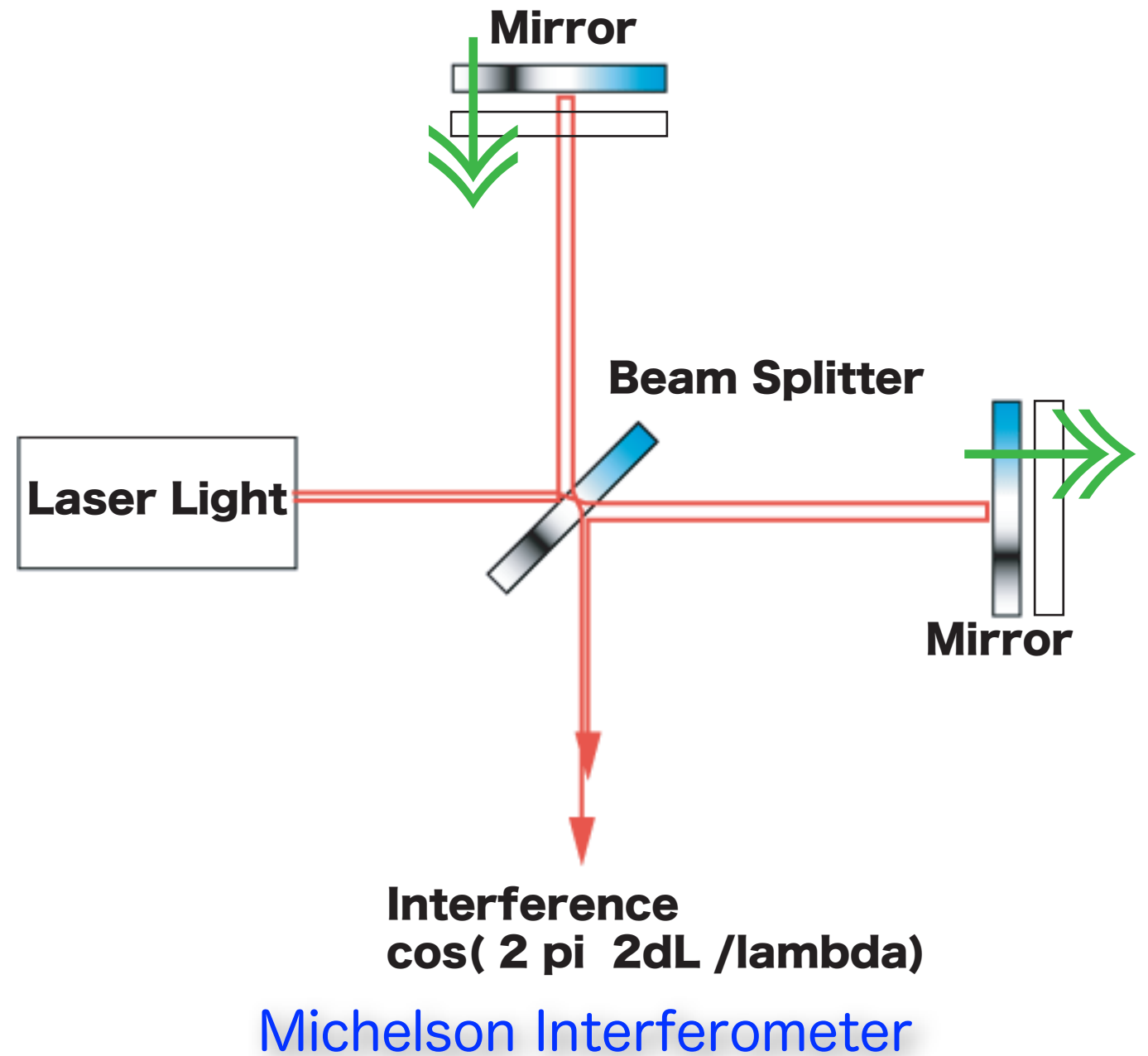
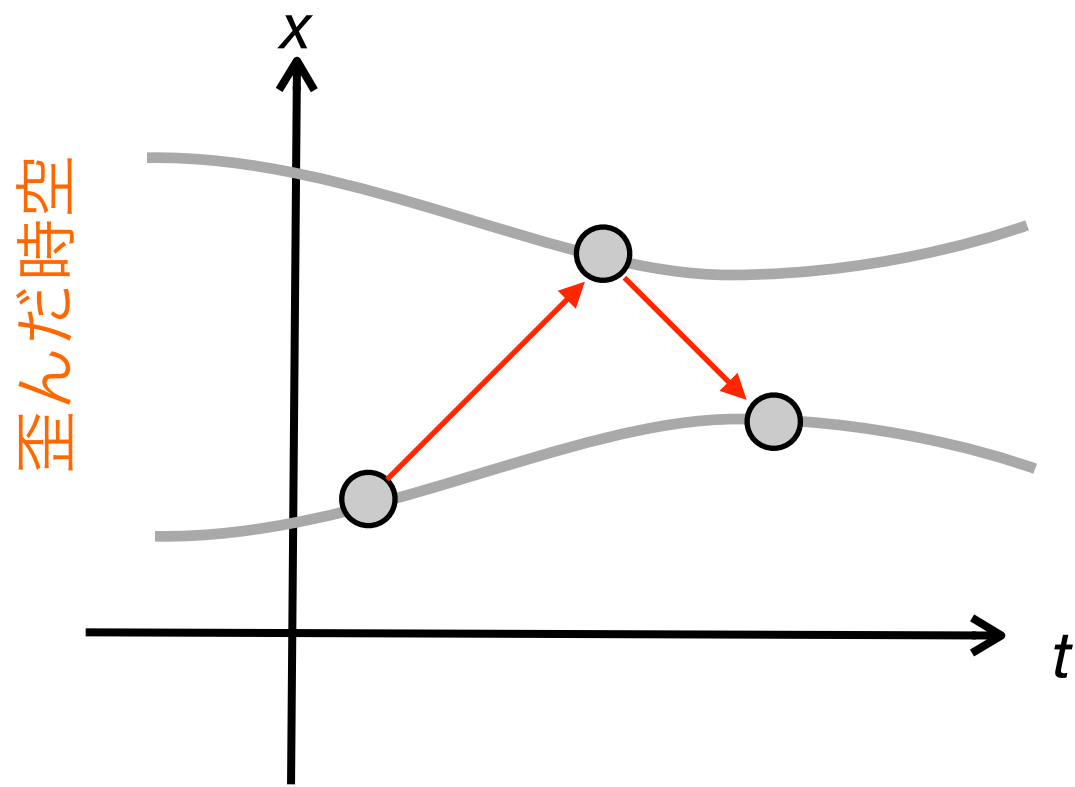
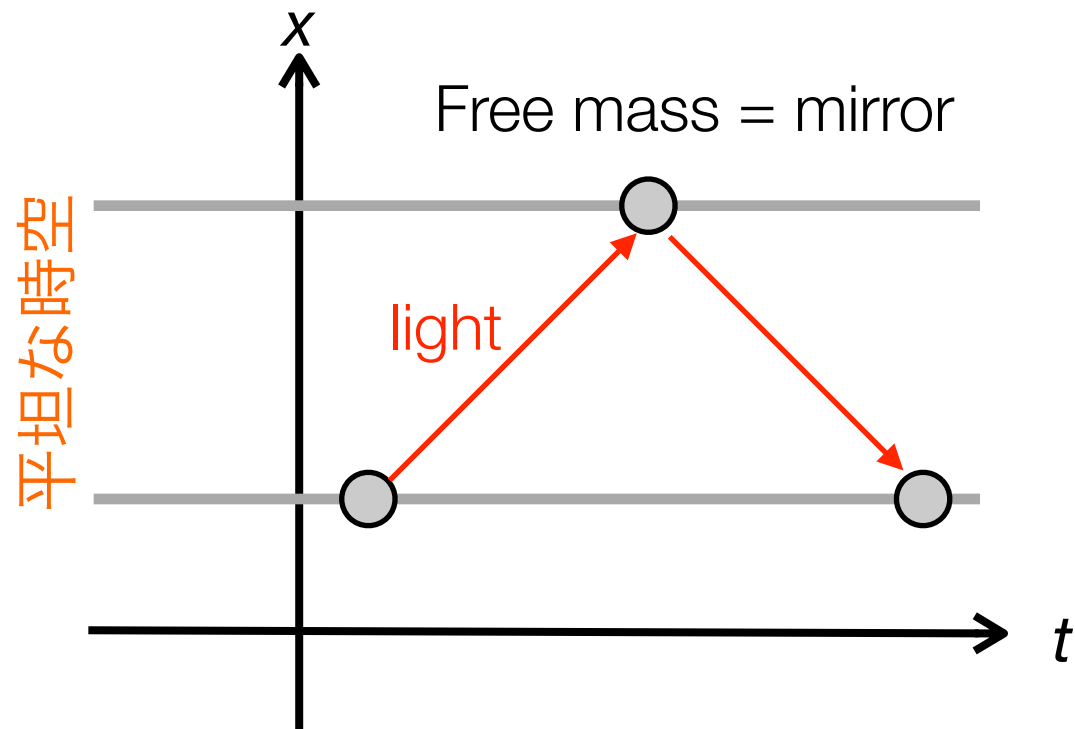
検出原理

国内外の観測実験

KAGRAの現状

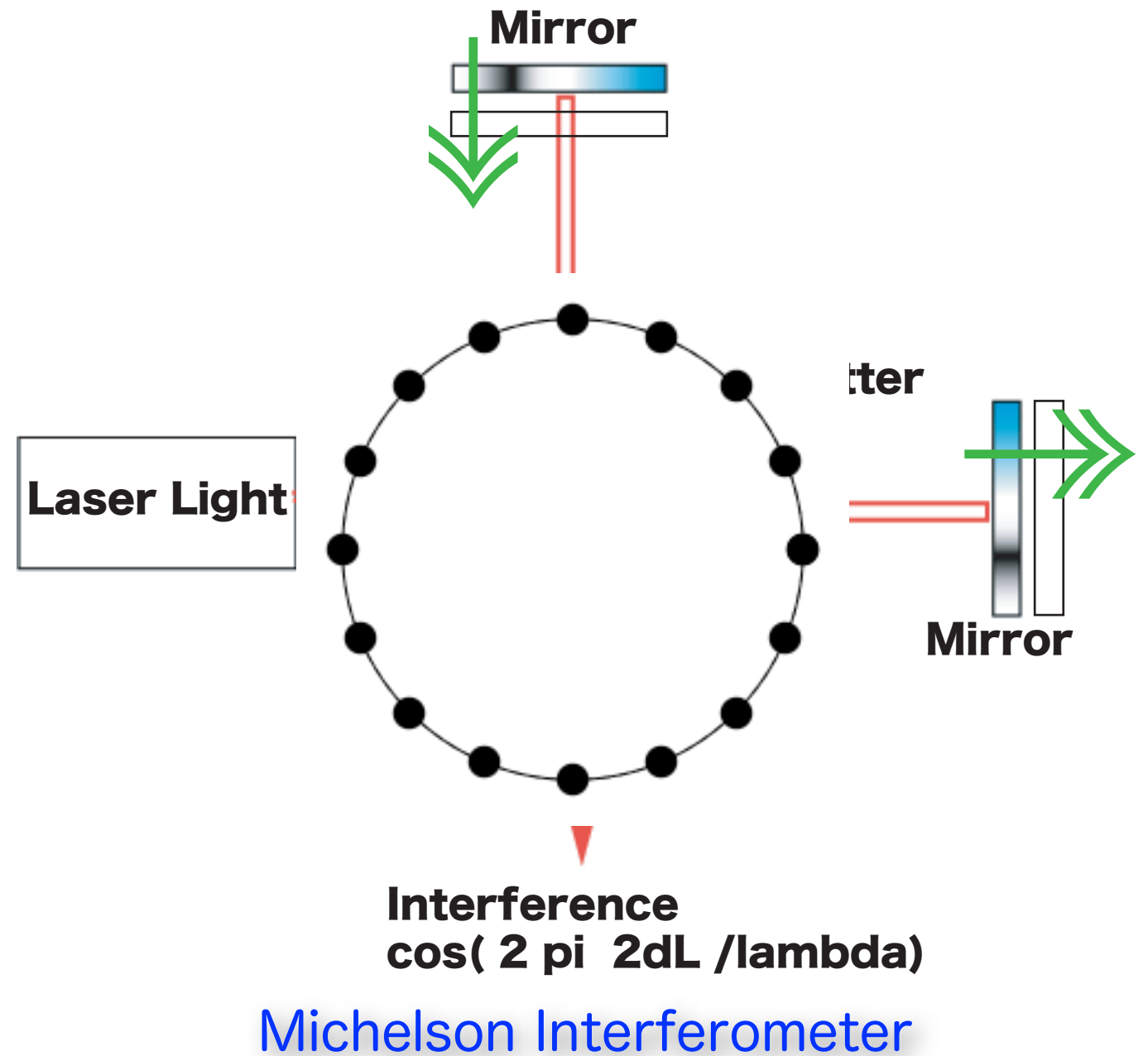
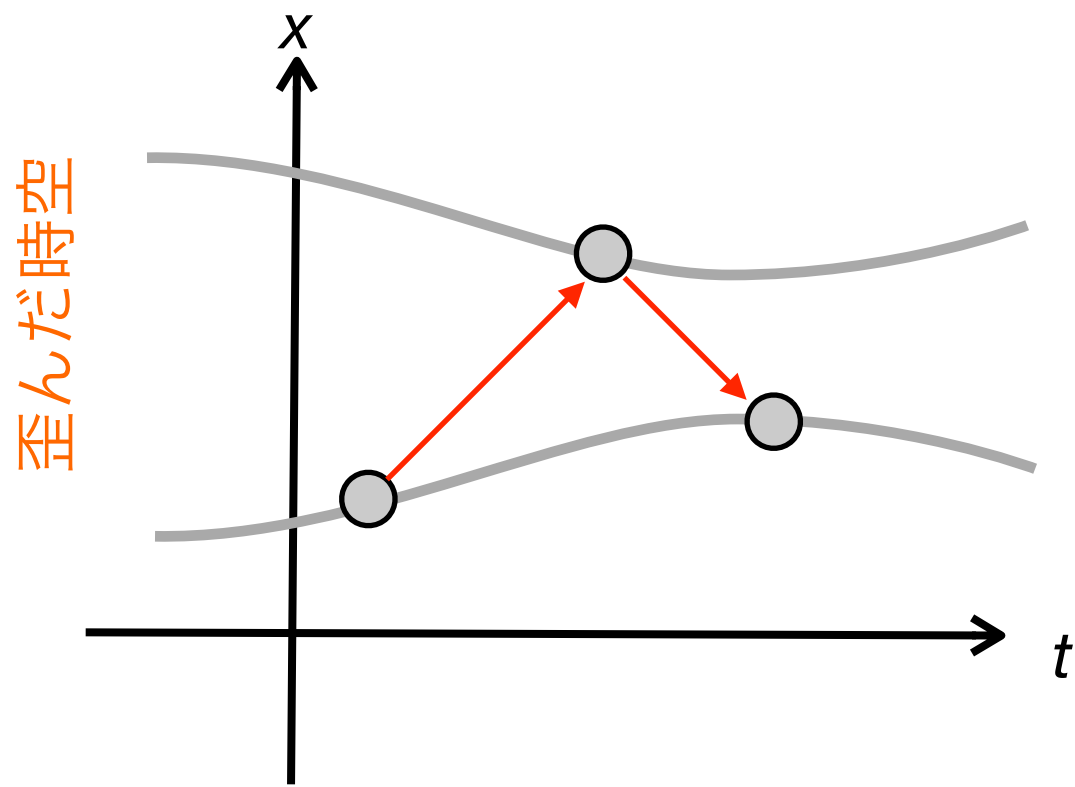
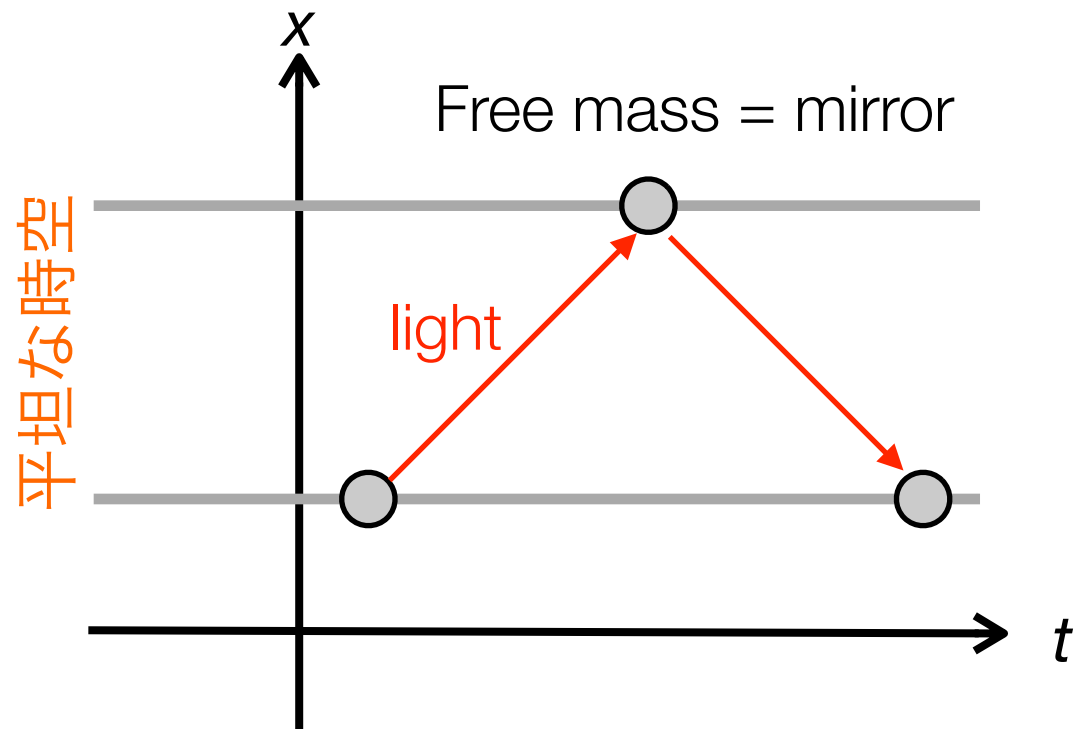
検出原理（自由質点形＝レーザー干渉計）

自由質点として鏡を用い、レーザー干渉計で高精度の測距をおこなう



検出原理（自由質点形＝レーザー干渉計）

自由質点として鏡を用い、レーザー干渉計で高精度の測距をおこなう



概念図

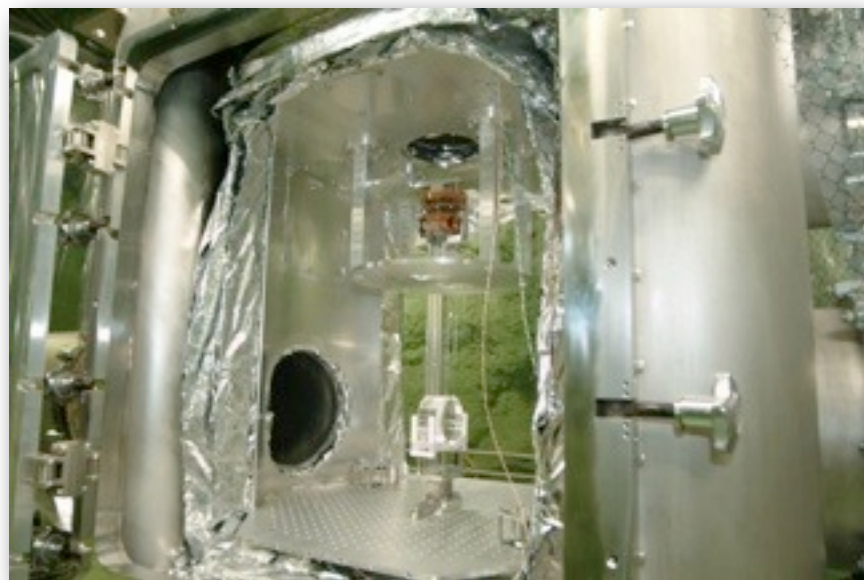
自由質点 --> 懸架された鏡

時空の歪み'h'の積分 --> 長い基線

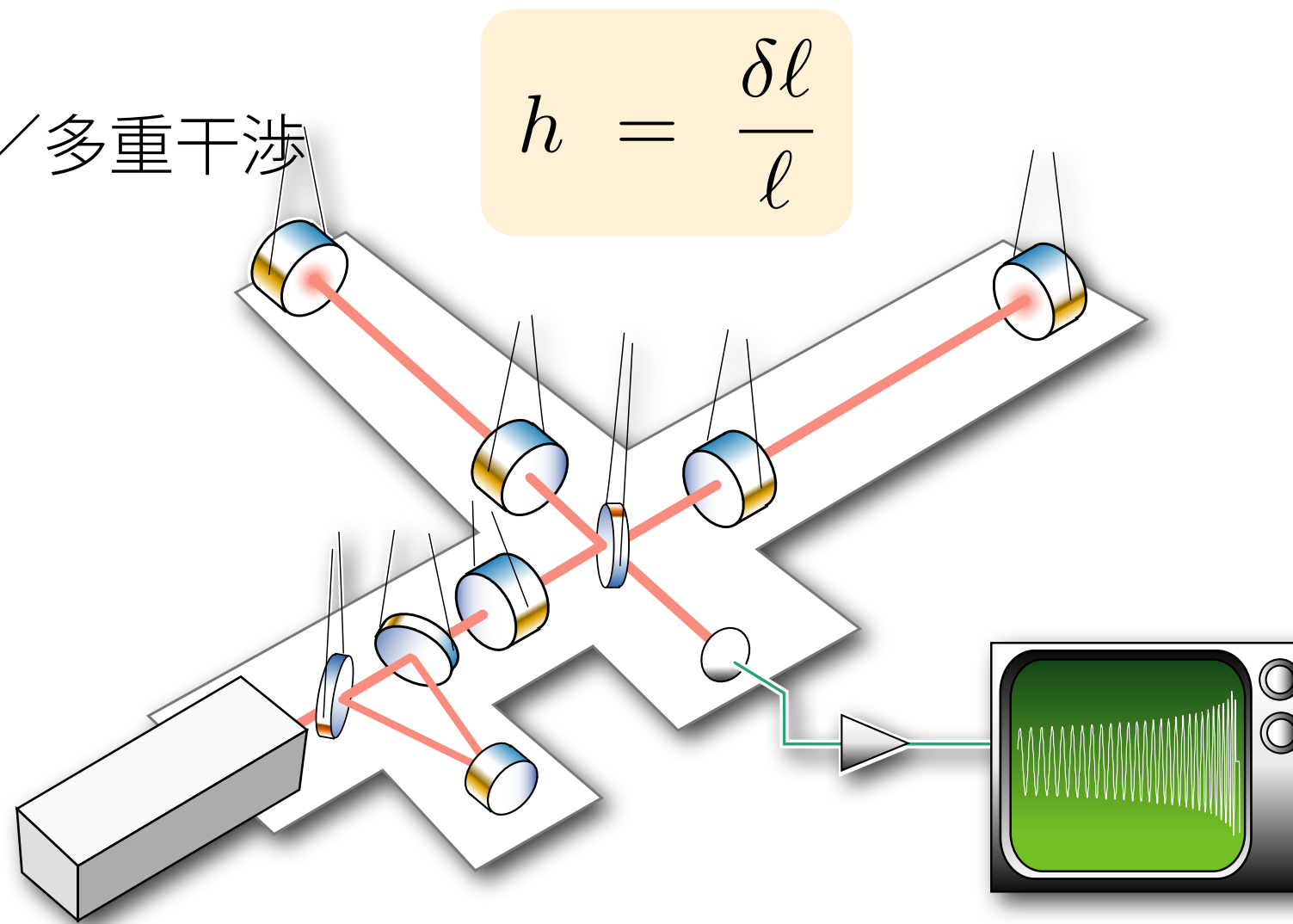
サイズの制限 --> 腕の折りたたみ／多重干渉

雑音対策 -->

- 高出力レーザー
- 鏡を冷やす
- etc..



<-- mirror and suspension
of CLIO interferometer
(prototype of KAGRA)



世界の重力波観測実験

GEO 600m



LIGO (Livingston) 4km



advanced LIGO

LIGO (Hanford) 4km & 2km



Virgo 3km
advanced Virgo



IndIGO
(LIGO-India)

複数台による観測網の必要性：

- 到来方向と偏極の決定
- 全天探索
- 常時観測

TAMA 300m

CLIO 100m

KAGRA 3km

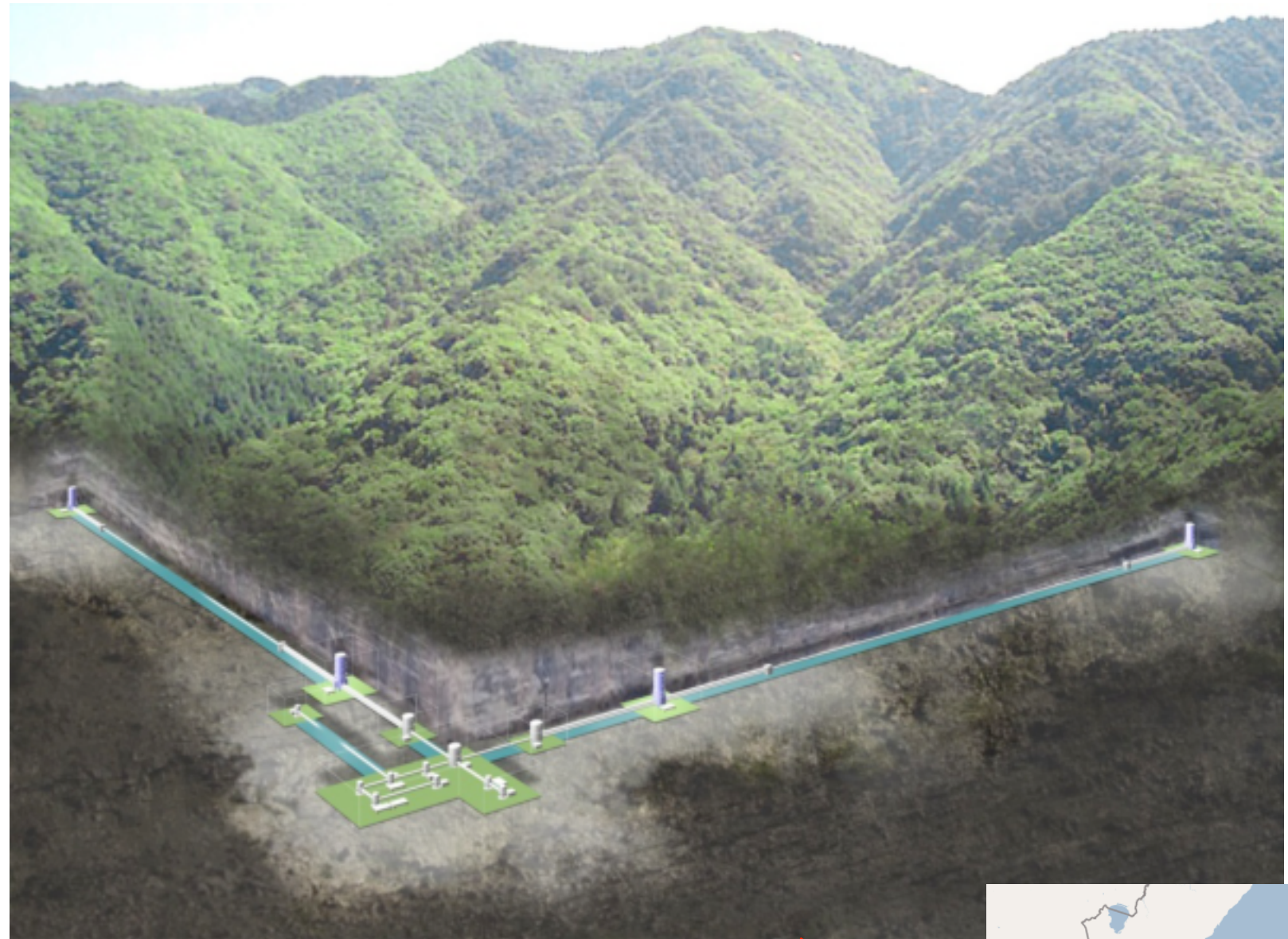
地下

- 岐阜県神岡鉱山内
- 静謐で安定な環境

低温鏡

- 20K
- サファイア基材

3km 基線長



© ICRR, university of Tokyo

計画

- 2010 : 建設開始
- 2015 : 最初の常温観測
- 2018 (or late 2017)- : 低温鏡での高感度の本格観測開始



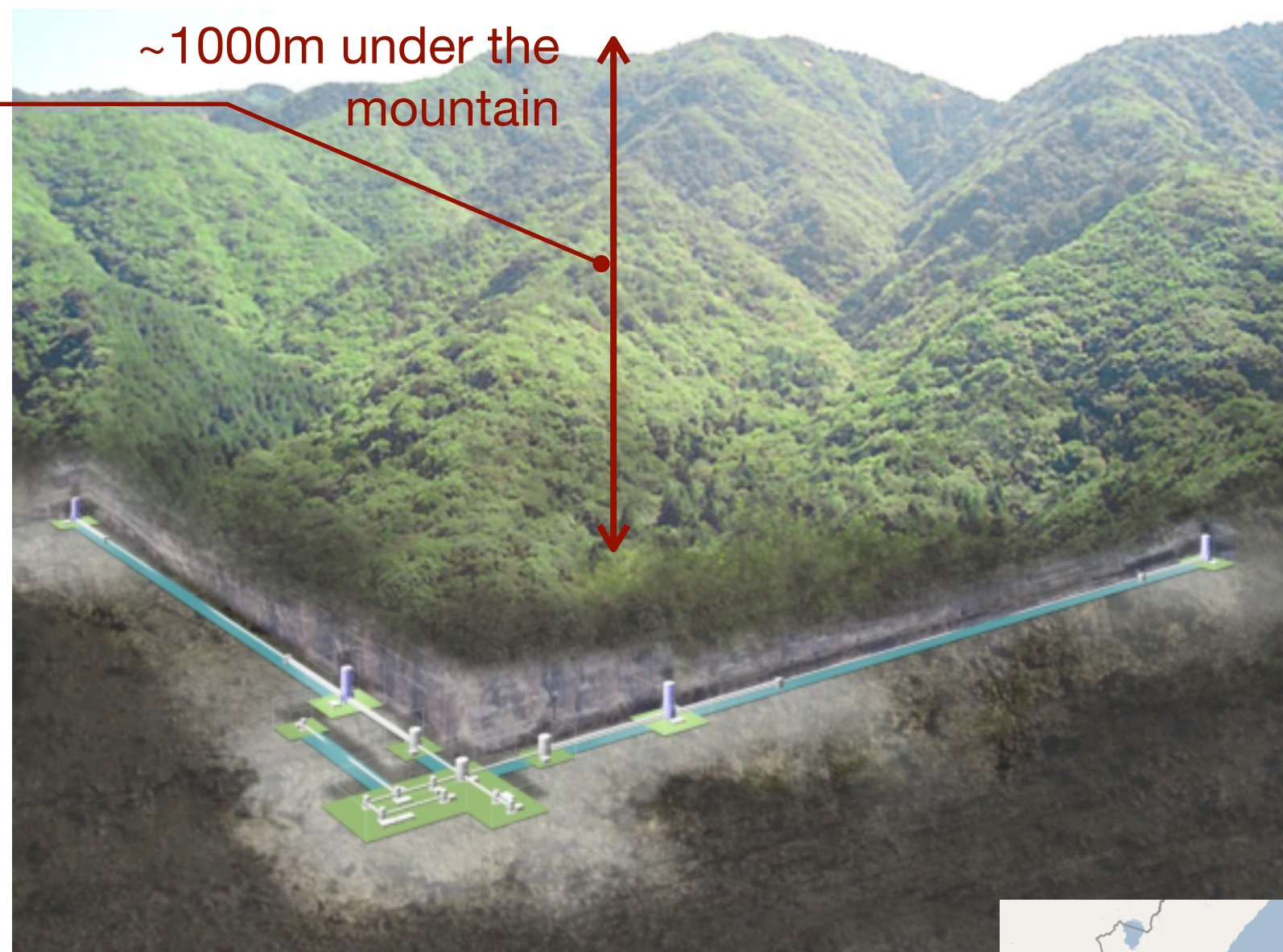
地下

- 岐阜県神岡鉱山内
- 静謐で安定な環境

低温鏡

- 20K
- サファイア基材

3km 基線長



© ICRR, university of Tokyo

計画

- 2010 : 建設開始
- 2015 : 最初の常温観測
- 2018 (or late 2017)- : 低温鏡での高感度の本格観測開始



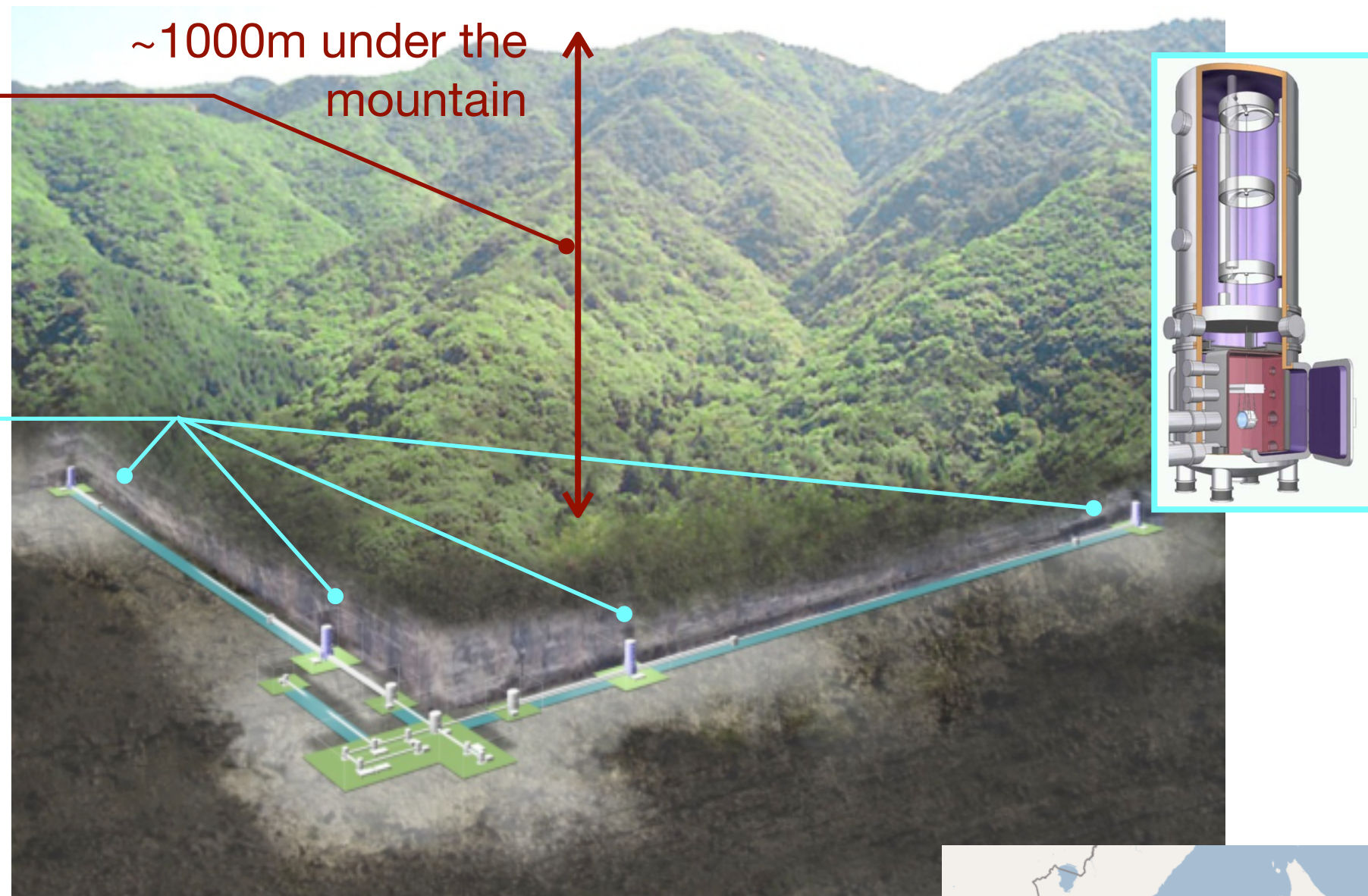
地下

- 岐阜県神岡鉱山内
- 静謐で安定な環境

低温鏡

- 20K
- サファイア基材

3km 基線長



© ICRR, university of Tokyo

計画

- 2010 : 建設開始
- 2015 : 最初の常温観測
- 2018 (or late 2017)- : 低温鏡での高感度の本格観測開始



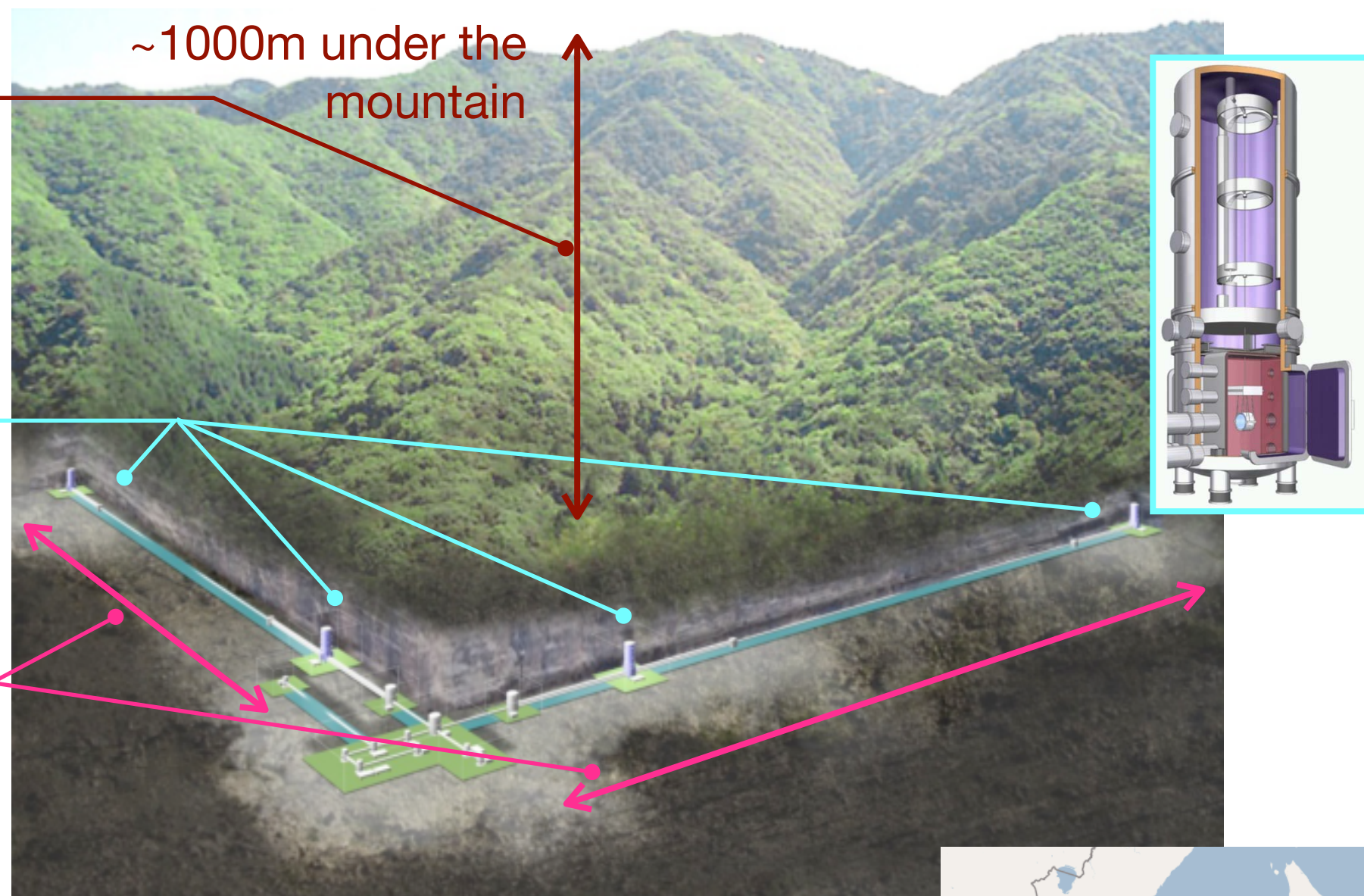
地下

- 岐阜県神岡鉱山内
- 静謐で安定な環境

低温鏡

- 20K
- サファイア基材

3km 基線長



© ICRR, university of Tokyo

計画

- 2010 : 建設開始
- 2015 : 最初の常温観測
- 2018 (or late 2017)- : 低温鏡での高感度の本格観測開始



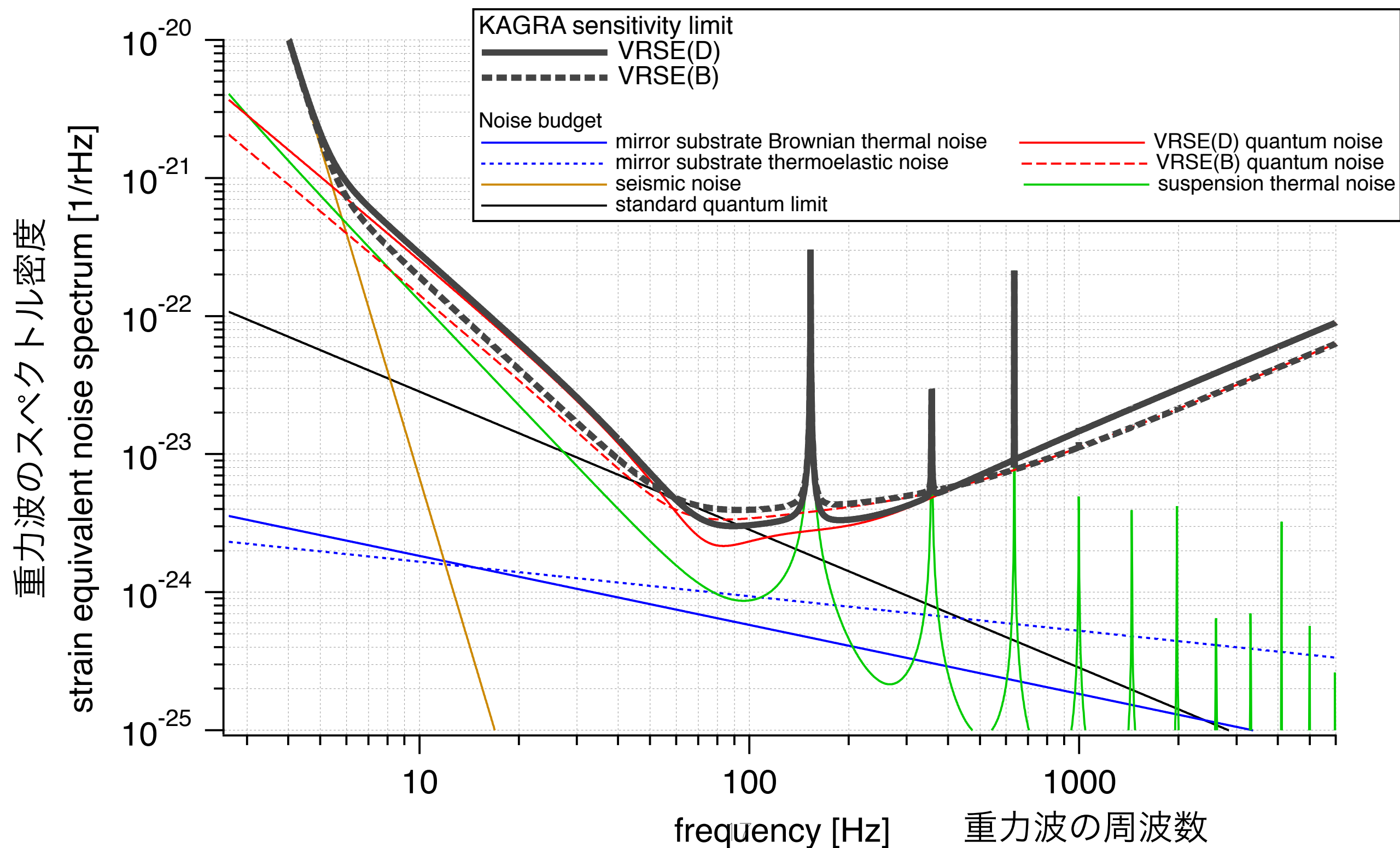
KAGRA Collaboration in the world

- Research organizations of laboratories and universities are 41 in Japan and 38 in overseas
- 158 researchers in Japan and 67 in abroad, 225 members in total



KAGRAの感度

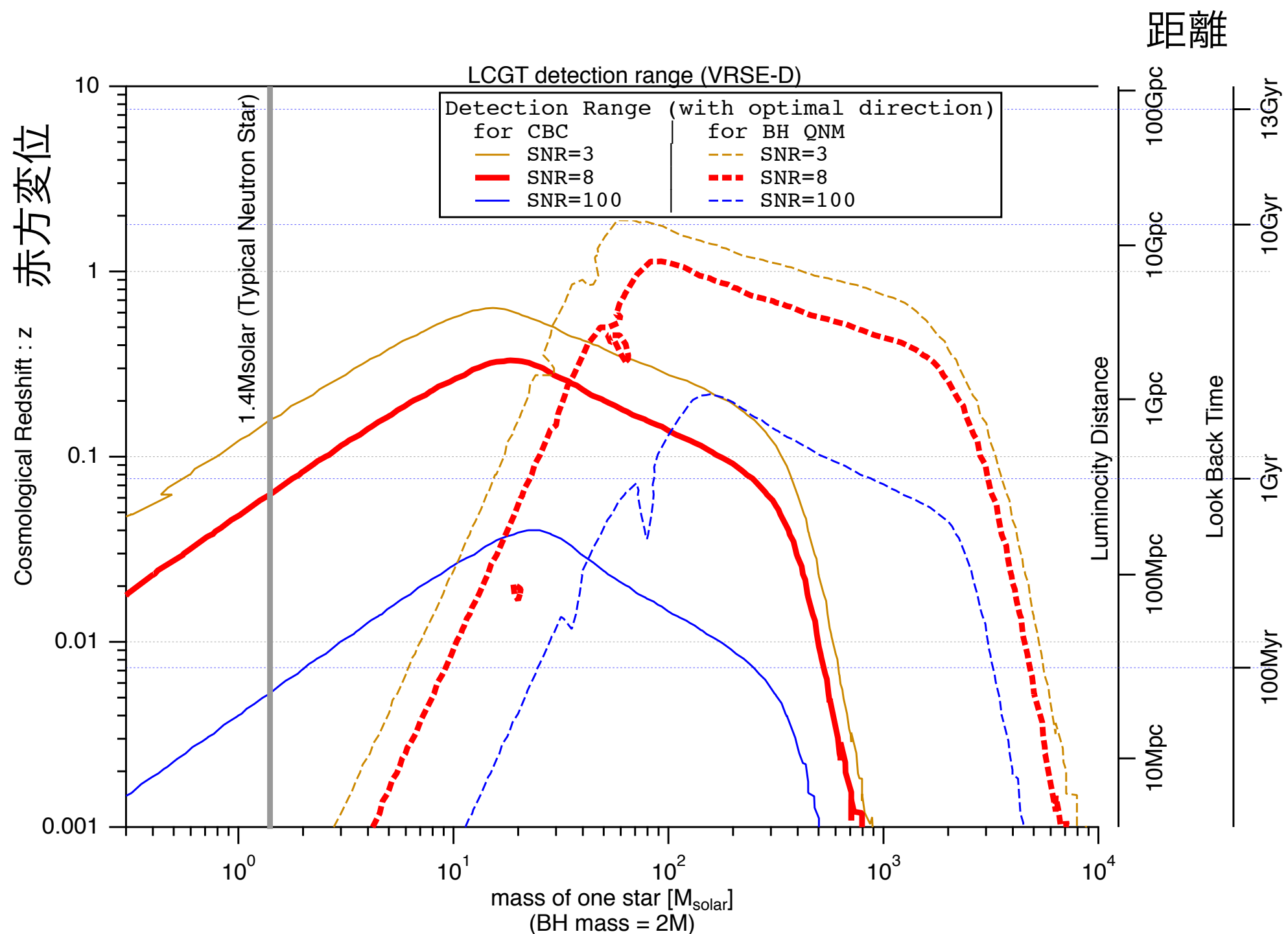
$h \sim \text{factor} \times 10^{-24} \text{ [}/\sqrt{\text{Hz}}\text{]}$ for observation band



探索レンジ

連星中性子星の合体
(NS-NS) : 検出レンジ
 は、最高感度の方向
 で、約**280 Mpc**。
 (全天平均で
 ~173Mpc)
 -> **10 イベント/年**

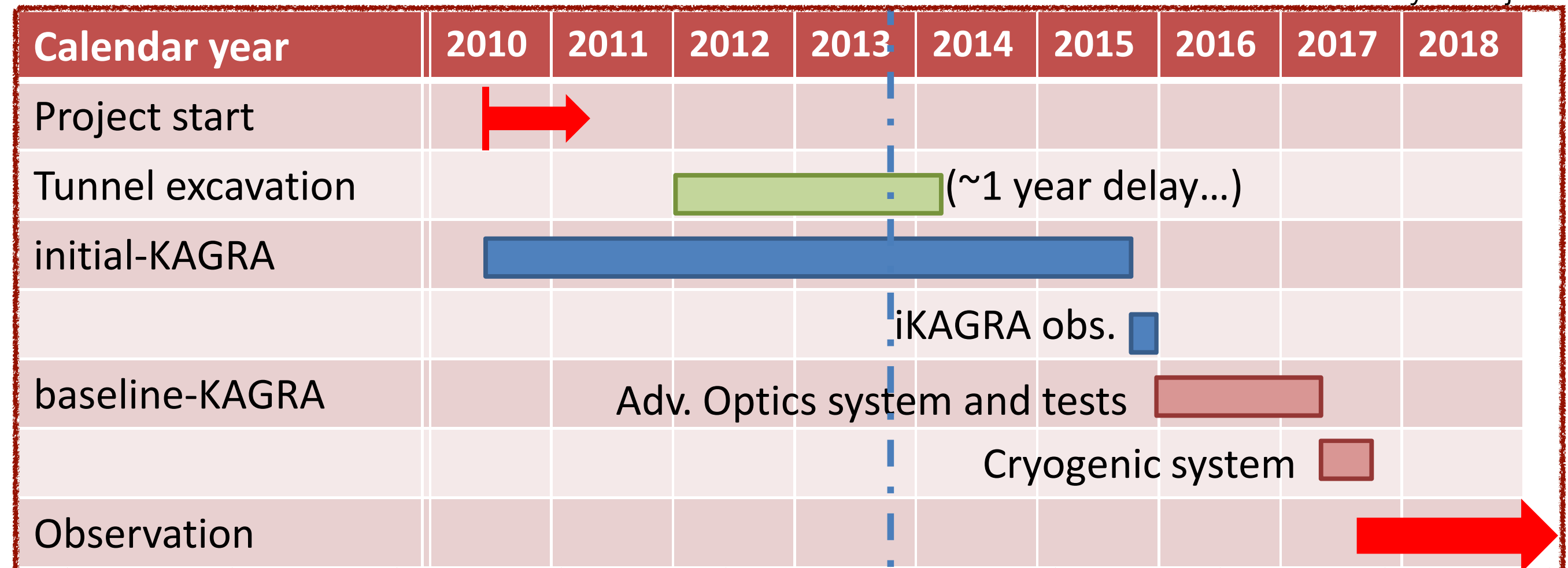
超新星爆発(SNe) :
 検出原理は、
typically 典型的に
100kpc から1Mpc



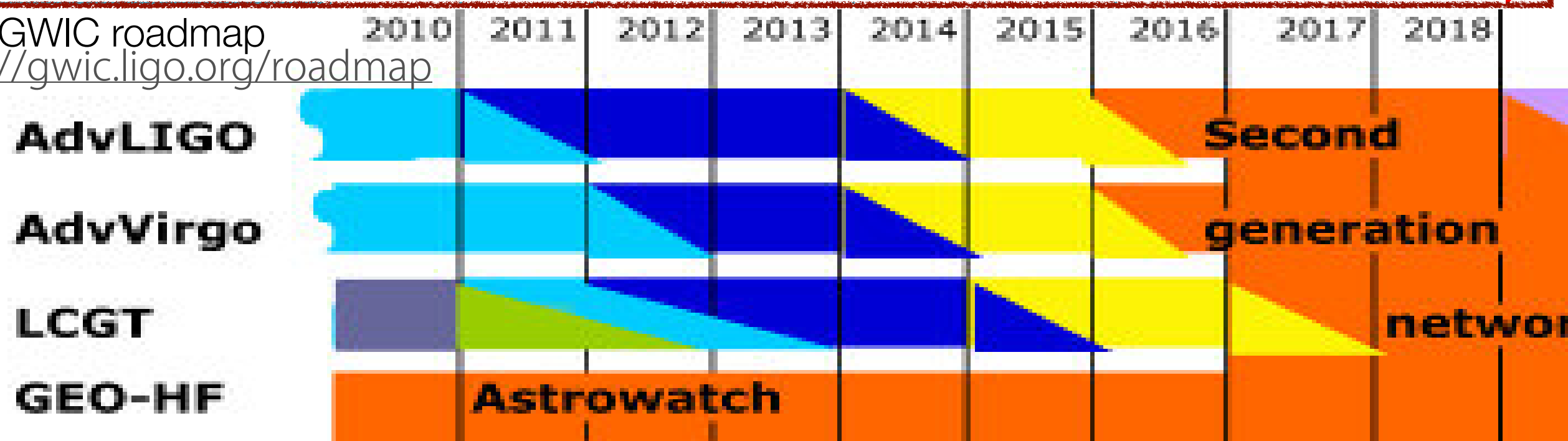
星の質量 [太陽質量]

スケジュール

by T.Kajita

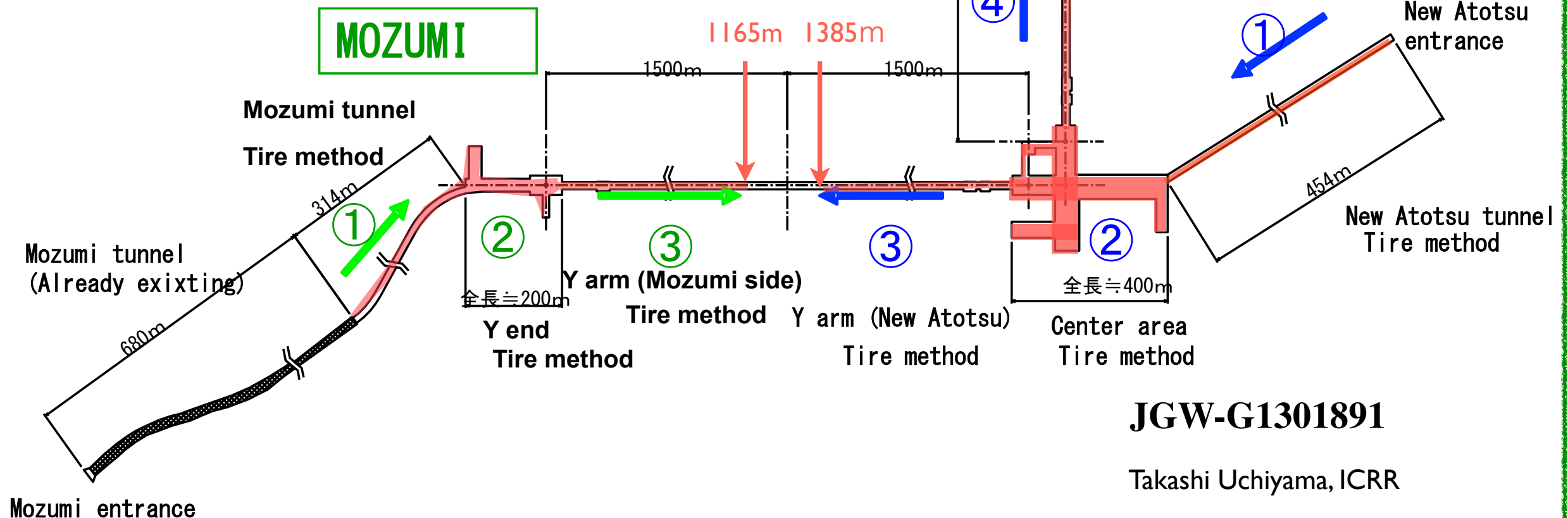
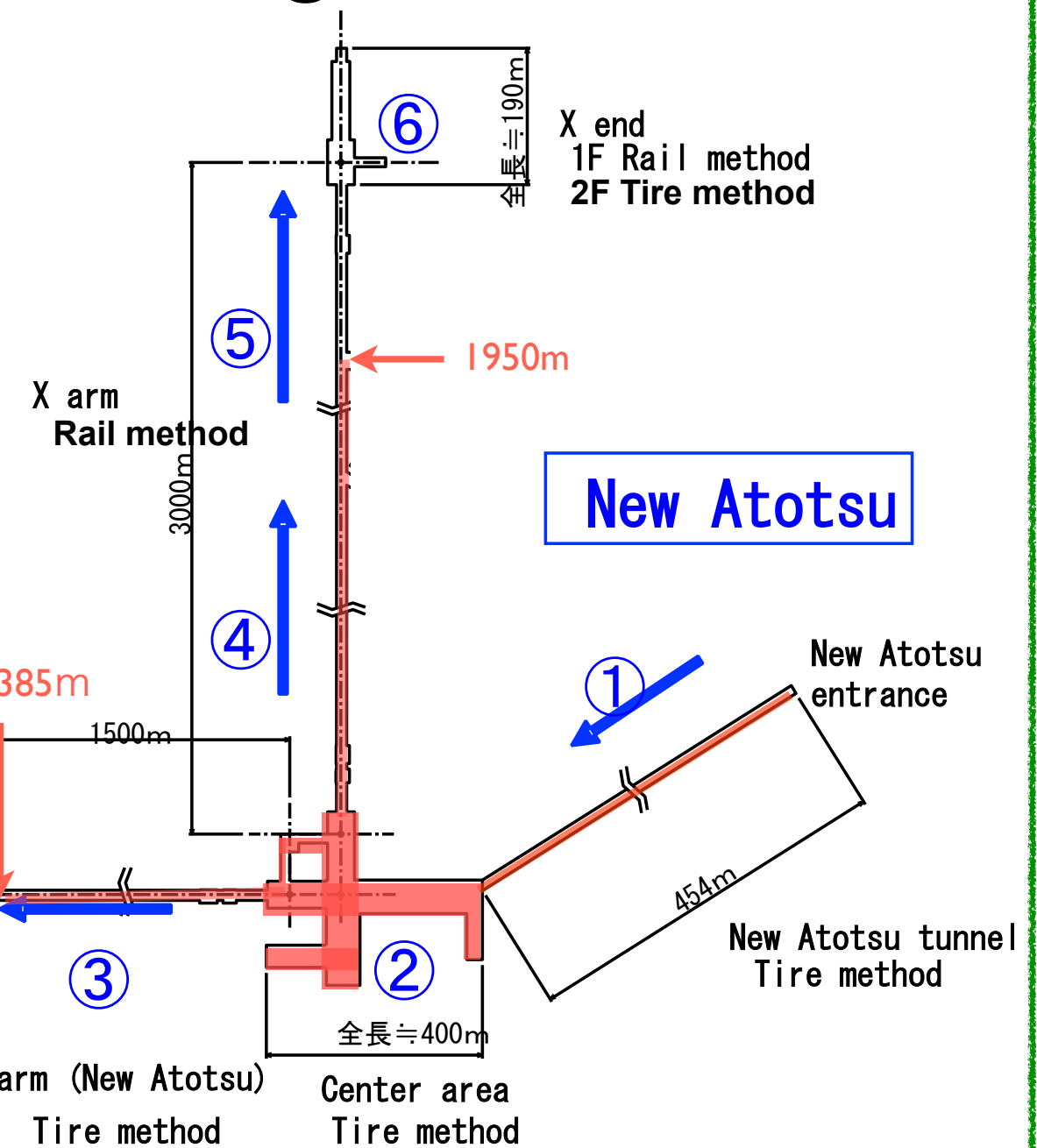


GWIC roadmap
<https://gwic.ligo.org/roadmap>



Tunnel subgroup brief report for the KAGRA international collaboration meeting on 2013/10/09.

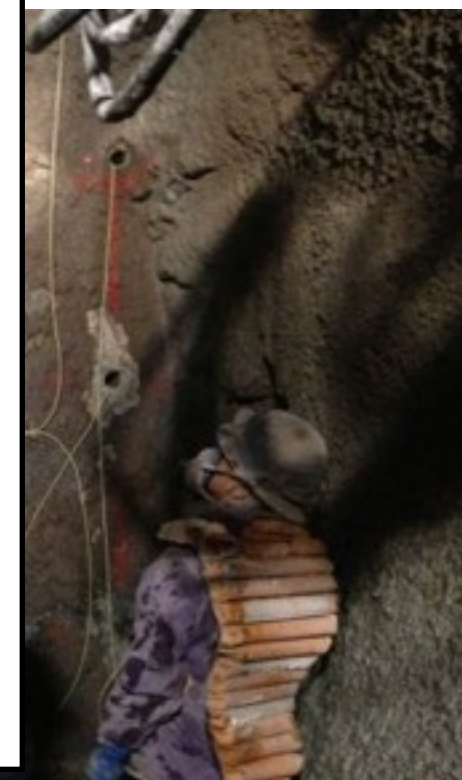
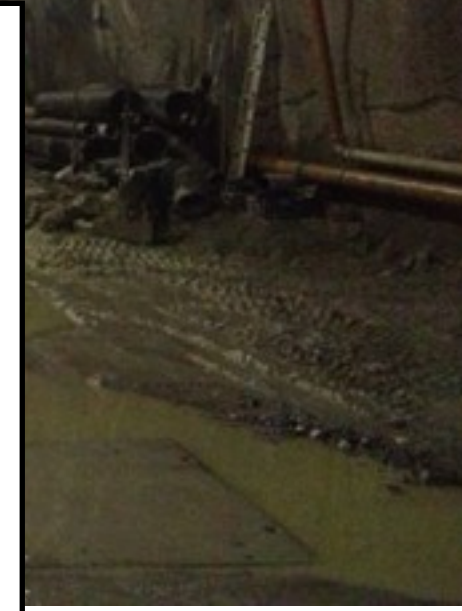
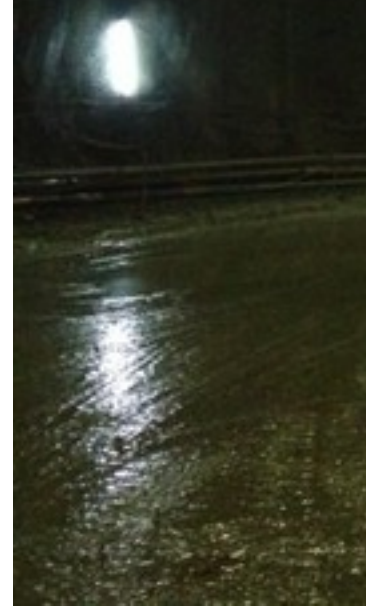
- Excavation from Mozumi entrance finished on 2013/03/06.
- The Yend has been completed except for the vertical hole. Length of the Y arm tunnel is 1165m.
- Center area has been completed except for the vertical hole.
- The current progress of Xarm and Yarm are 1950m and 1385m, respectively.
- Yarm tunnel will be completed on 2013/12.
- The excavation will be completed on 2014/03.



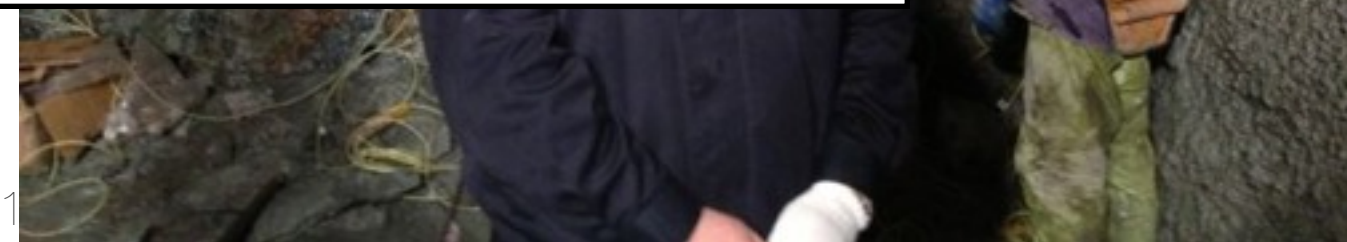
JGW-G1301891

Takashi Uchiyama, ICRR

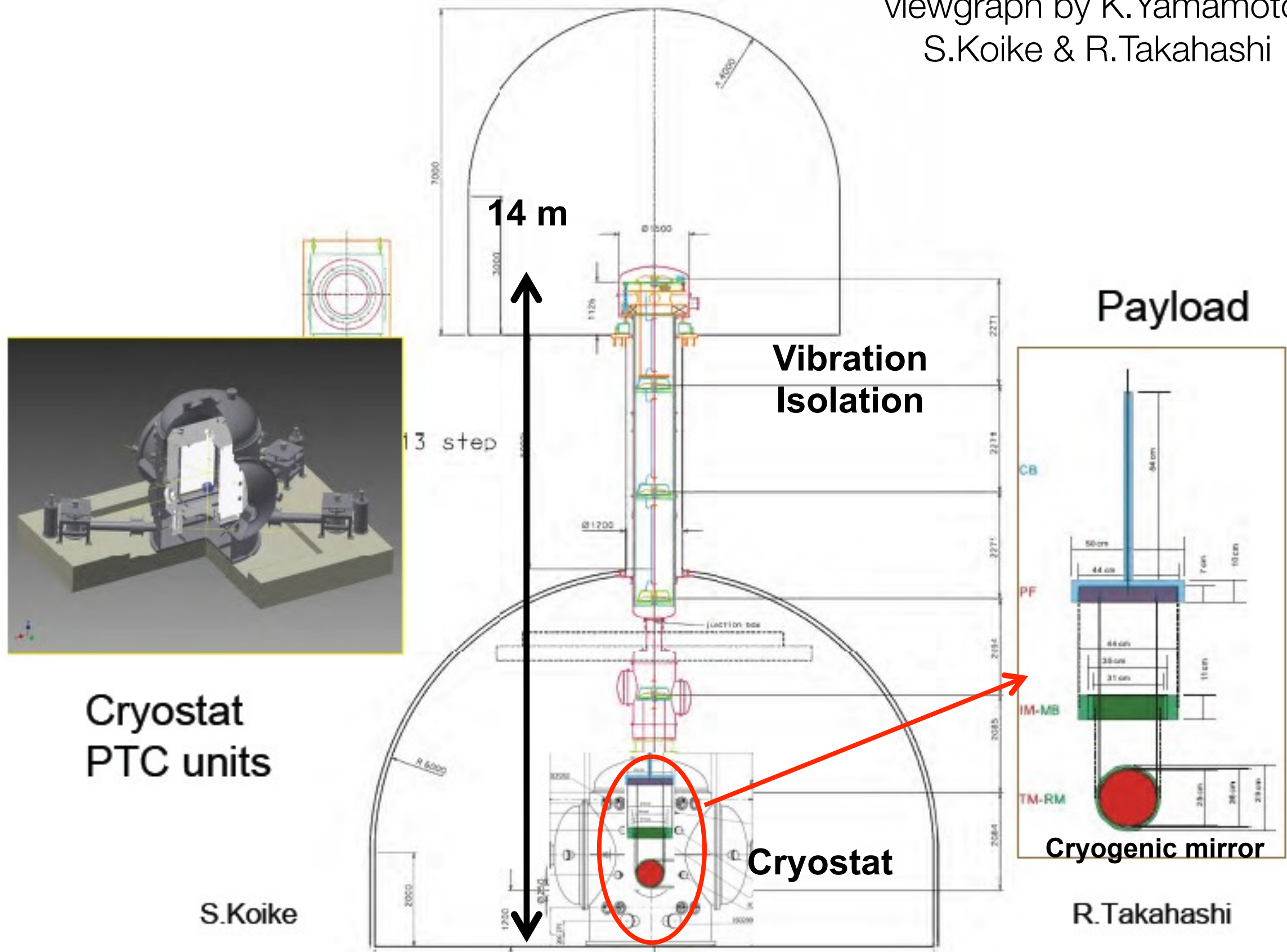




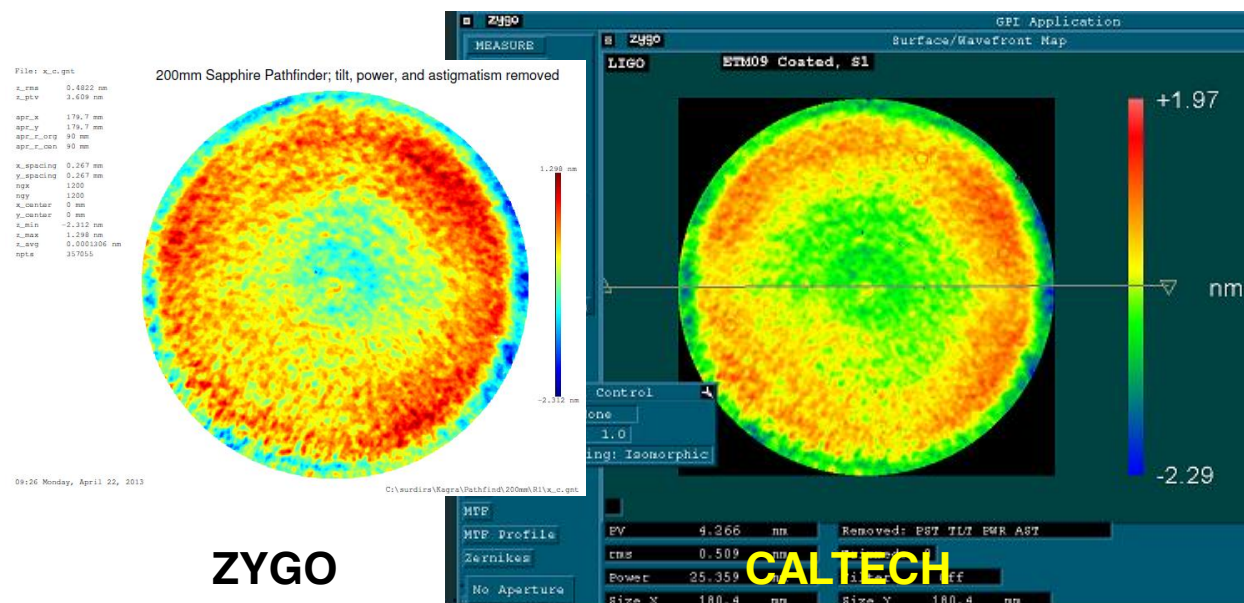
2013.12.6 Yアーム貫通



viewgraph by K.Yamamoto,
S.Koike & R.Takahashi







Sapphire test-polish was successful.

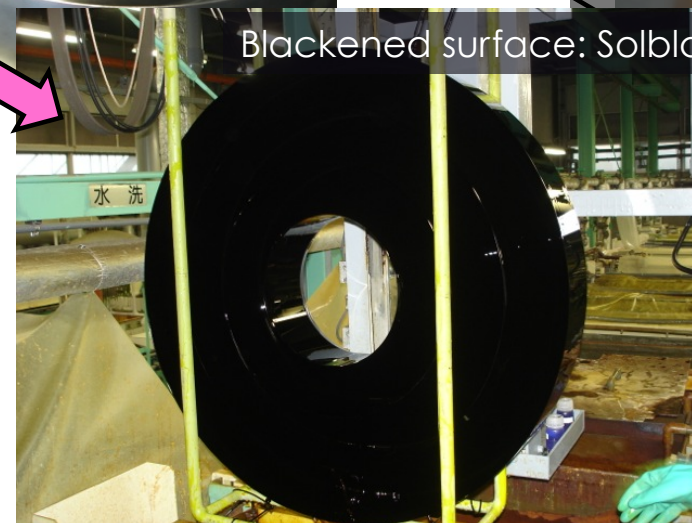
viewgraph by N.Mio

Example of a large baffle

#3 Narrow-angle baffle
Material: A5052



Blackened surface: Solblack

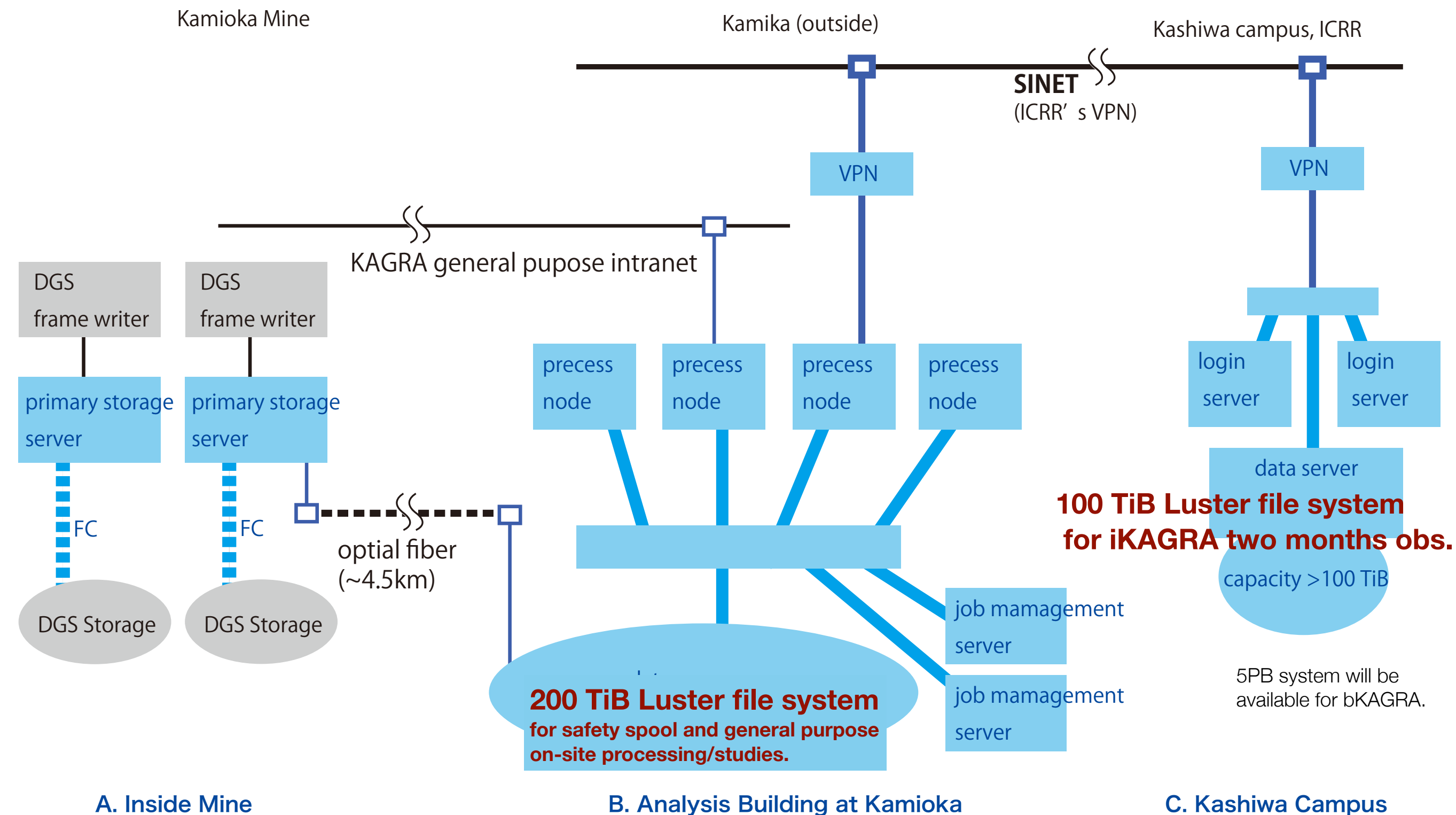


ECB: low scattering
Solblack: Vacuum Compatibility (10^{-7} Pa), Cryogenic compatibility ($<8K$), Low reflectivity ($\sim 2\%$ at $1064nm$), Applicable for a large work

viewgraph by T.Akutsu

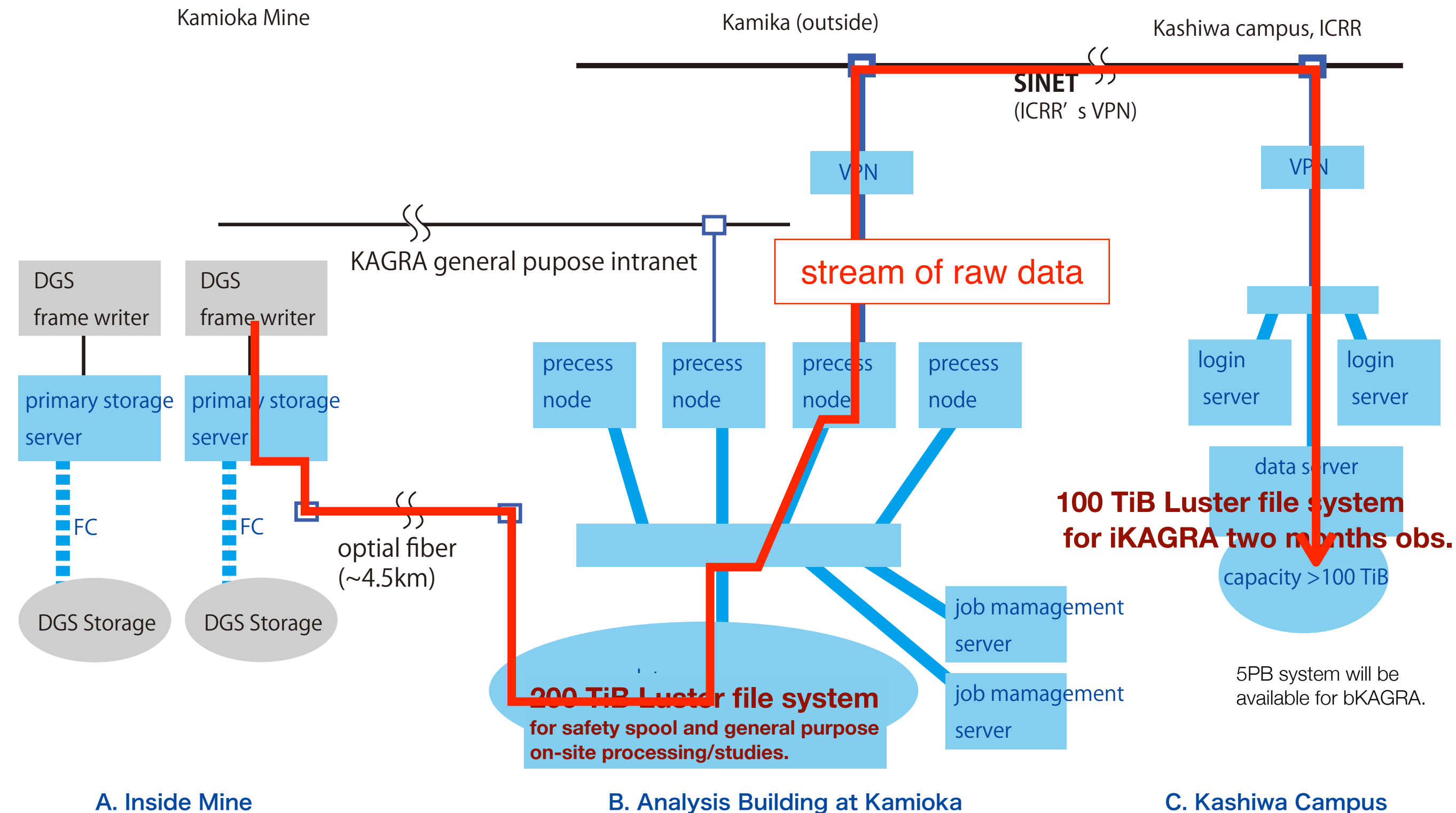
iKAGRA データ転送・保管システム

The equipments will be installed at Kamioka and Kashiwa by the end of February 2014.



iKAGRA データ転送・保管システム

The equipments will be installed at Kamioka and Kashiwa by the end of February 2014.



観測データ量

phase	期間	data rate / duty	total expected amount	転送
iKAGRA	about 2~3 months at <u>end of 2015</u>	20MB/s / 100%	100 TiB	神岡→柏
		1MB/s / 100%	5TiB	神岡→大阪市大／阪大
commissioning	2016-2017	20MB/s / ?(5~10%)	?	神岡→柏
		1MB/s / ?(5~10%)	?	神岡→大阪市大／阪大
bKAGRA	2017 - (end of KAGRA)	20MB/s / 100%	3PB / 5yrs	神岡→柏
		1MB/s / 100%	150 TiB / 5yrs	神岡→大阪市大／阪大

iKAGRA : 常温鏡、テスト観測 2015年末

bKAGRA : 低温鏡での高感度化観測運転 2017年度末～

干渉計

観測データ : $s = h + n$
(h : 重力波、 n : 雑音)

データ解析

h は微弱、稀



微小信号解析！

重力波（波形） h
“イベント”（時刻、方向、...）

干渉計

観測データ : $s = h + n$
(h : 重力波、 n : 雑音)

データ解析

h は微弱、稀
↓
微小信号解析！

重力波（波形） h
“イベント”（時刻、方向、...）

Status of construction: Surface building

Local government (Hida city) kindly agreed for KAGRA to use old kindergarten as a part of the surface building. Refurbished in summer 2012.



New office building to be built in 2013. (340m²).



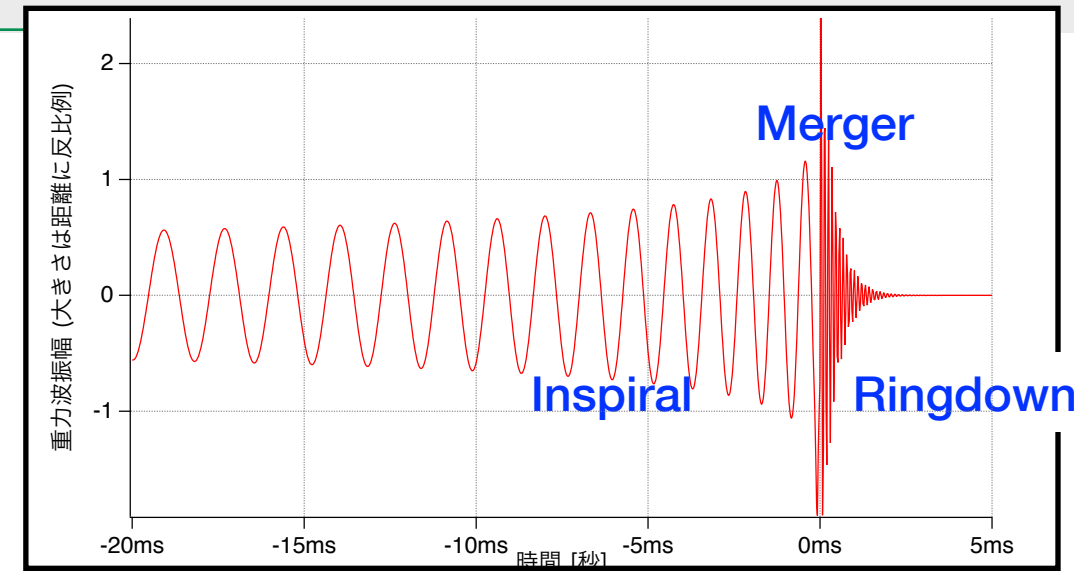
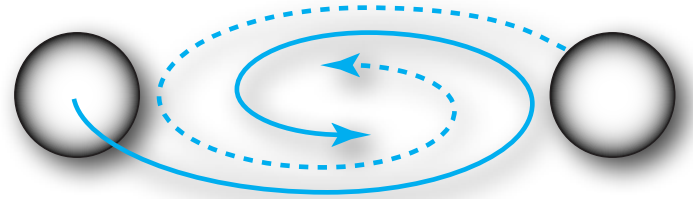
重力波検出の展望

イベント期待値

重力波の波形の語ること

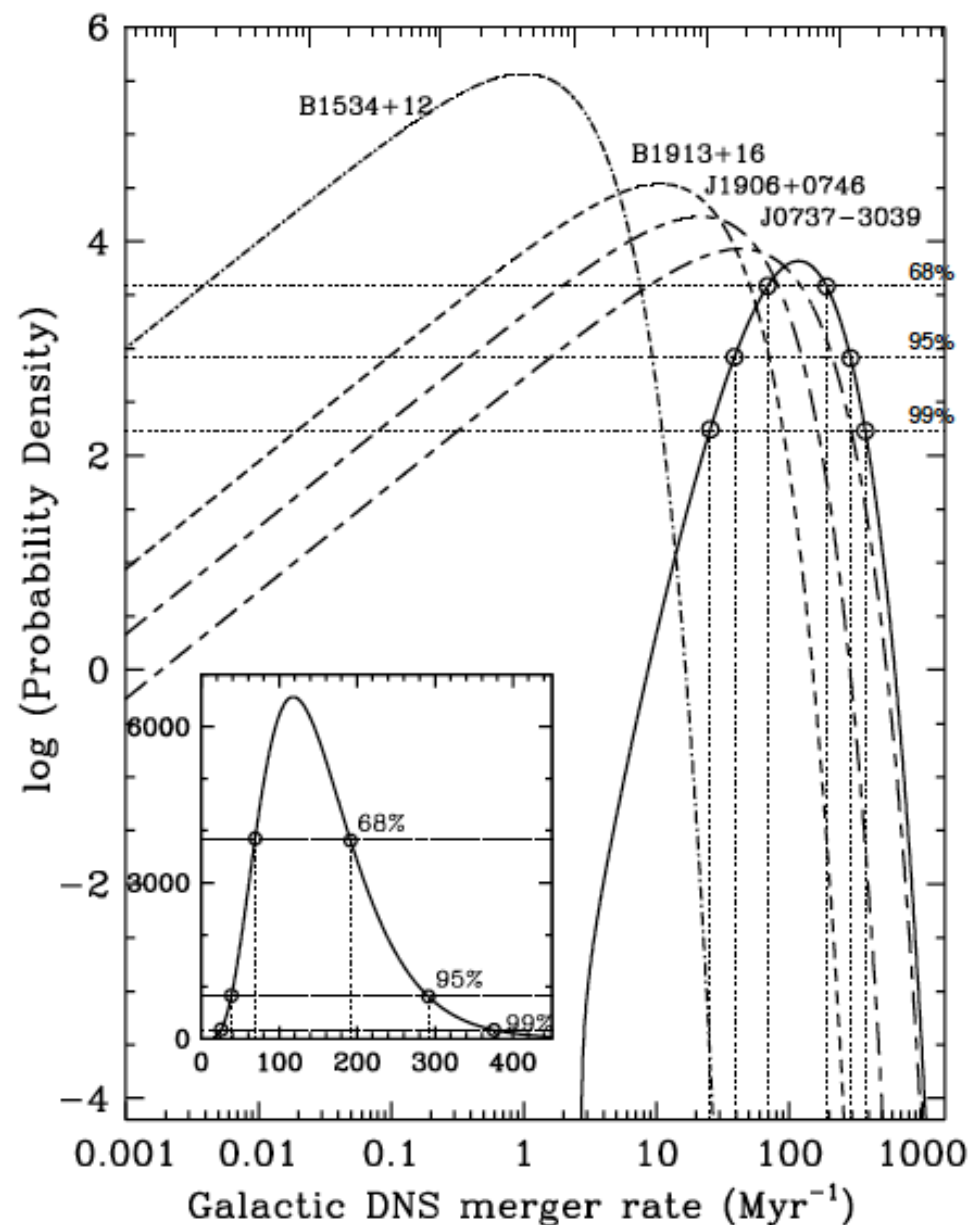
多数の重力波イベントで見えてくること

既知の連星パルサー



PSR name	P_s (ms)	P_b (hr)	e	τ_{life} (Gyr)
B1913+16 ^a	59.03	7.75	0.617	0.37
B1534+12 ^a	37.90	10.10	0.274	2.93
J0737-3039A ^a	22.70	2.45	0.088	0.23
J1756-2251 ^a	28.46	7.67	0.181	2.03
J1906+0746 ^b	144.14	3.98	0.085	0.082
J2127+11C ^{bcd}	32.76	8.047	0.681	0.32

期待される検出頻度



(Kim ('08), Lorimer ('08))

1つの銀河系あたり、年間

Galactic merger rate $118^{+174}_{-79} \text{ Myr}^{-1}$

A current official LCGT design (VRSE-D)
gives horizon distance (@S/N=8)
= 280Mpc (z=0.065)

KAGRAの検出頻度期待値

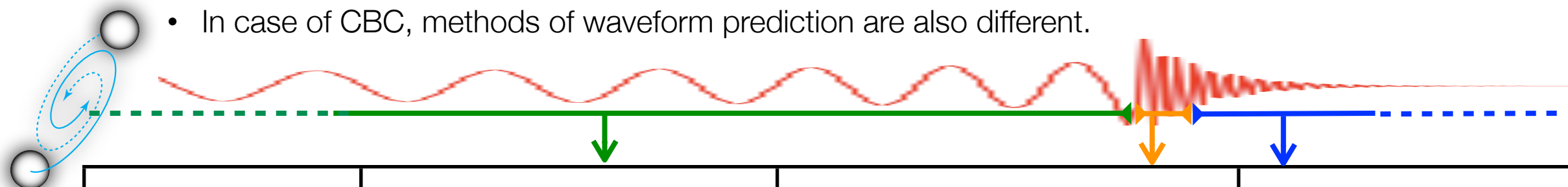
Event rate for KAGRA: $9.8^{+14}_{-6.6} \text{ yr}^{-1}$

However, systematic errors which are not
included in this evaluation may be large.

See also: Abadie et al. CQG27, 173001(2010)

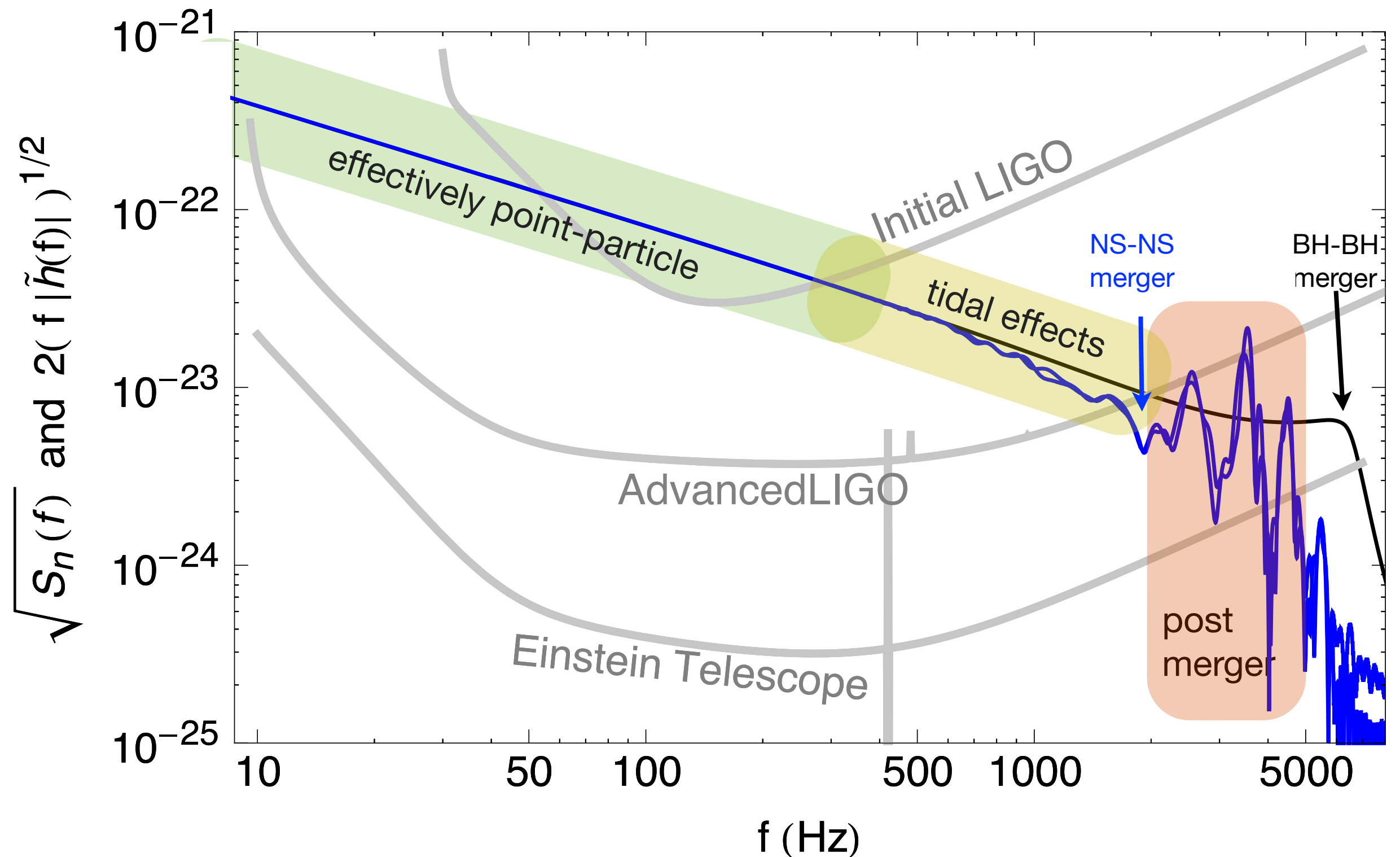
コンパクト連星合体波形とその物理

- GW emissions from different phases
- carry out different informations.
- In case of CBC, methods of waveform prediction are also different.



	“インスパイラル” (100sec~)	合体 (~10msec)	リングダウン (~100msec)
波形予想	Post-Newton 近似 (解析的な計算)	数値相対論	ブラックホール時空の 摂動
周波数帯	(10Hz) ~ 1.5 kHz	2~3 kHz	数 kHz
物理！	星の質量 絶対光度 距離、軌道面の傾き (要複数台検出器)	EOS, 潮汐変形、潮 汐破壊 粘度, etc...	(もしHyper- massive NS が 形成されれば) EOS, hyperon BHの質量と 角運動量

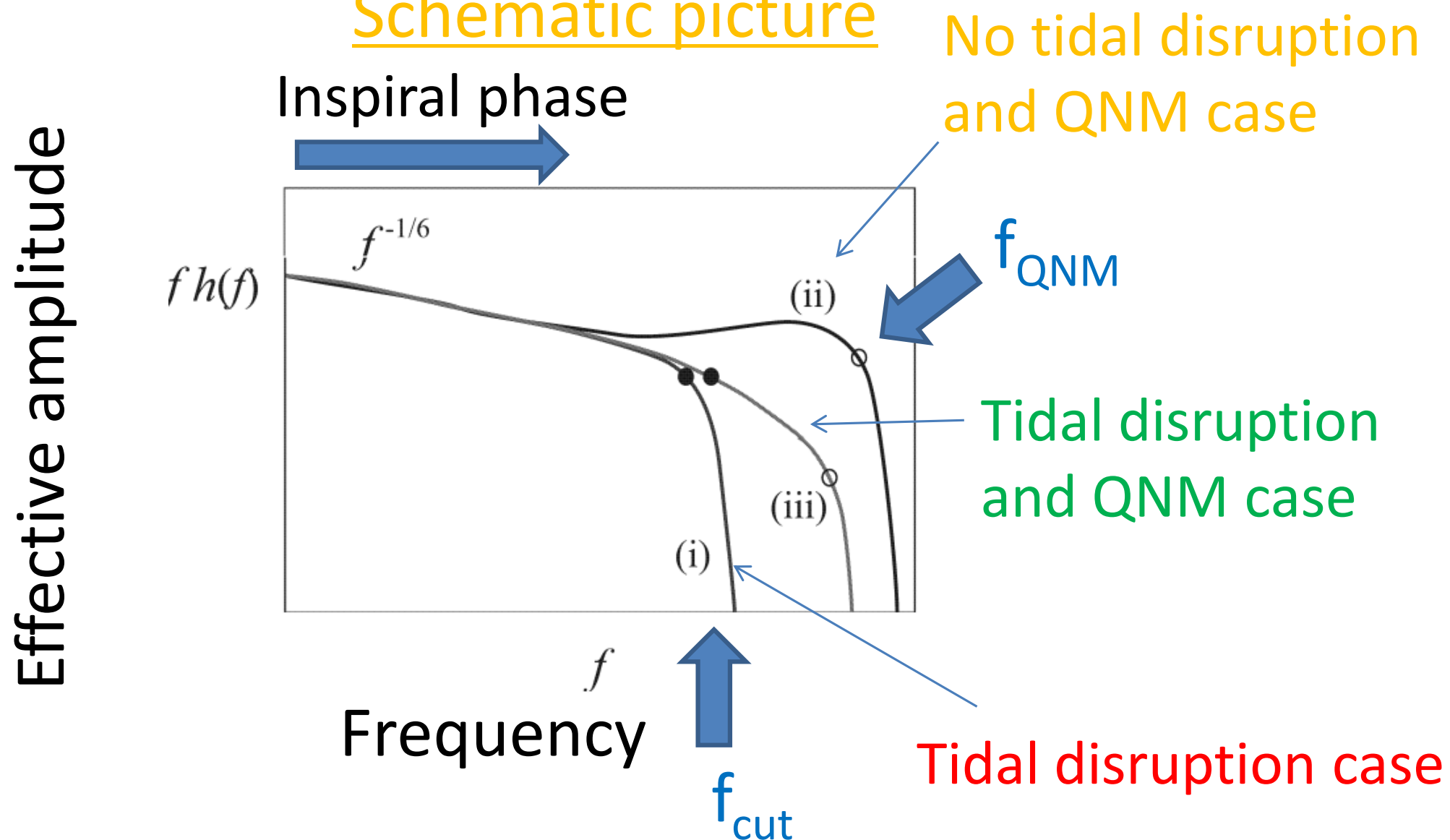
Effects of EOS as neutron stars merge



Tidal disruption on NS-BH merger

Gravitational wave Spectrum

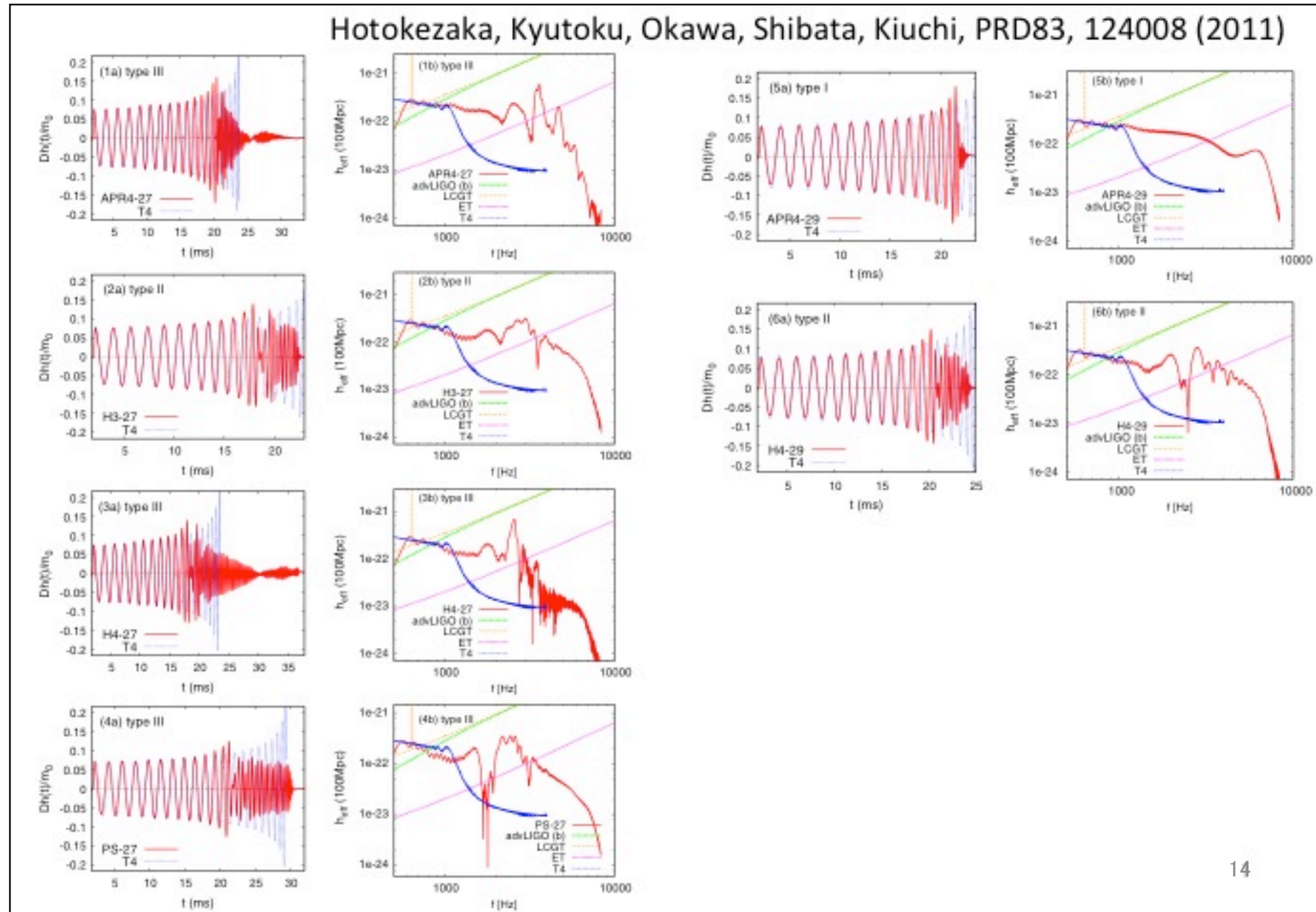
Schematic picture



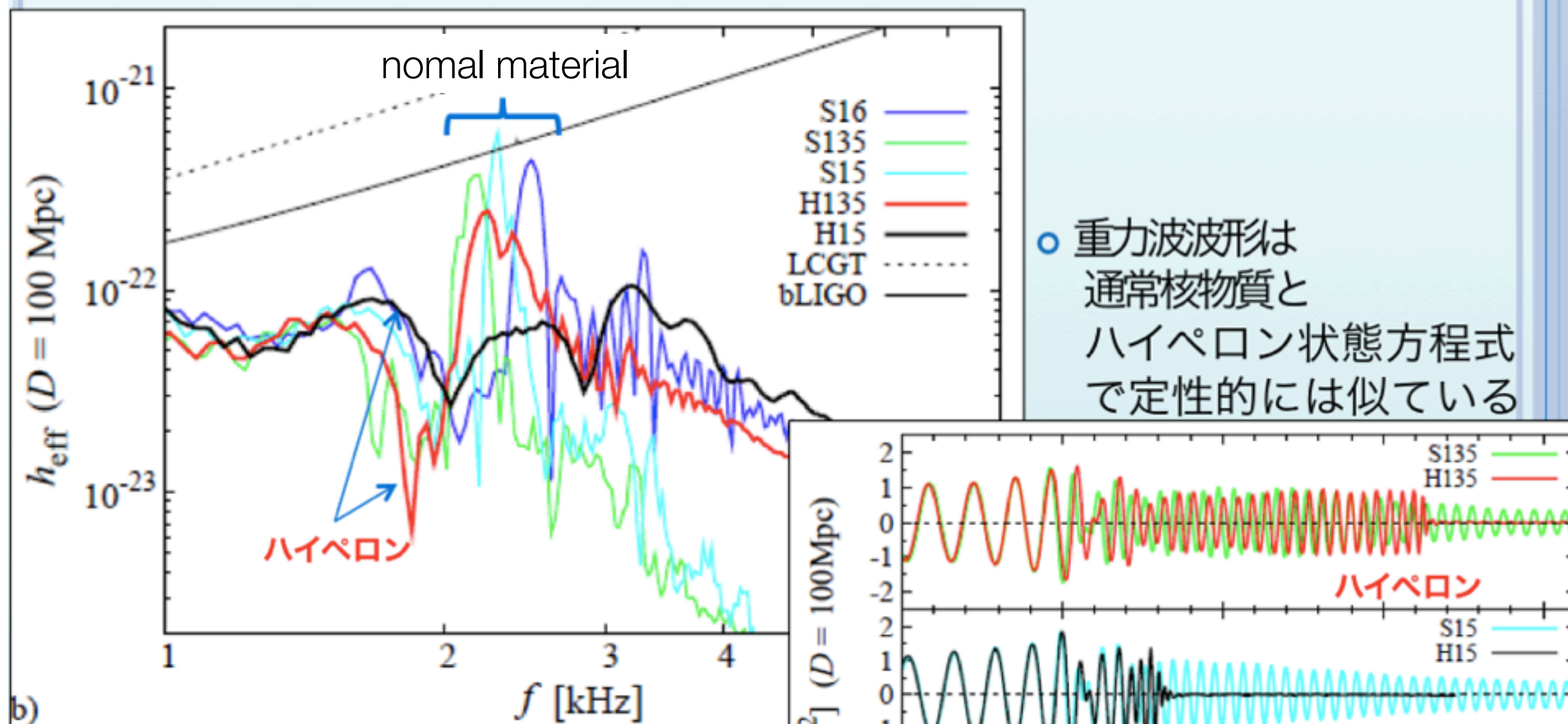
We extract f_{cut} by fitting the spectrum and calculate f_{QNM} from final BH mass and spin

Hyper Massive Neutron Stars

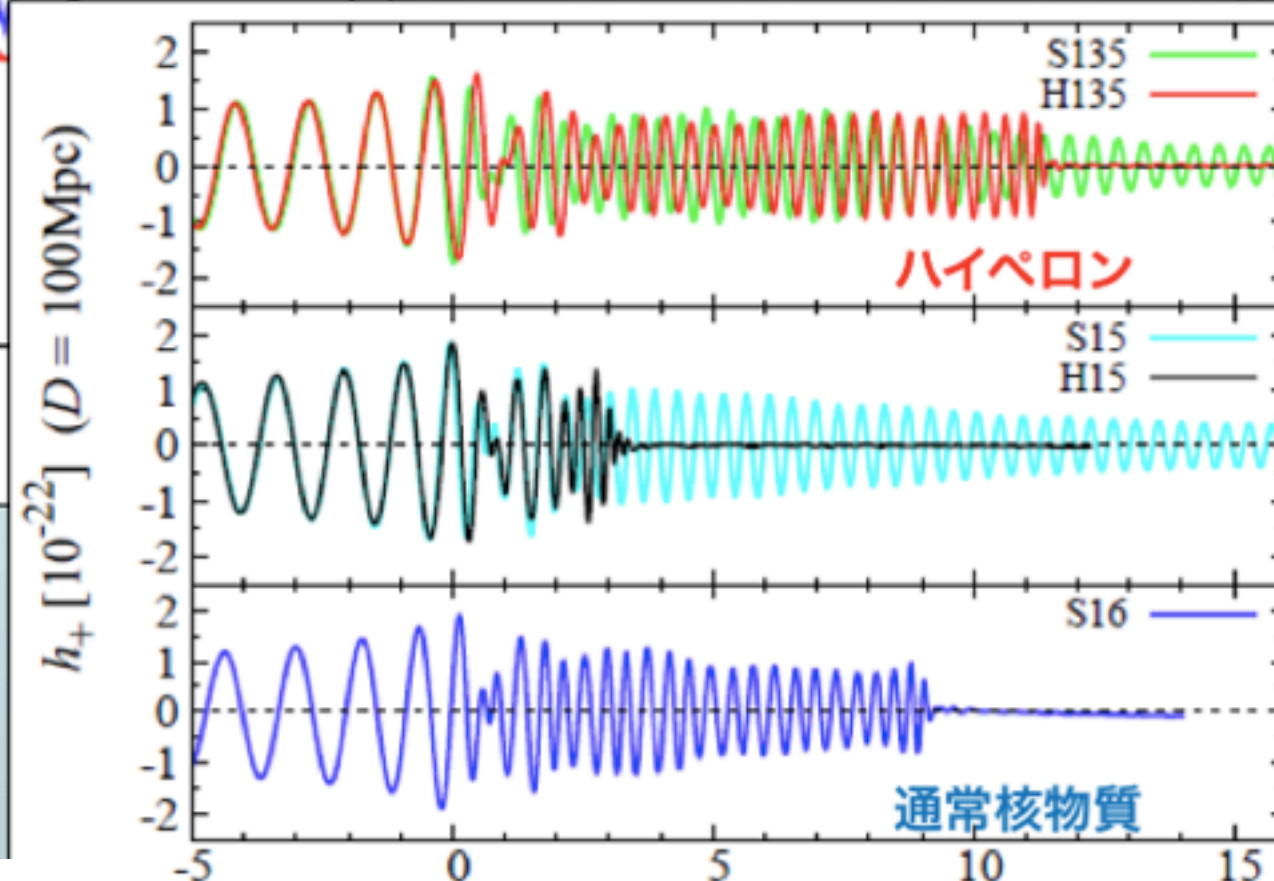
NS+NS $\rightarrow$ **(HMNS)** $\rightarrow$ BH, if highly rotating and/or enough stiff.



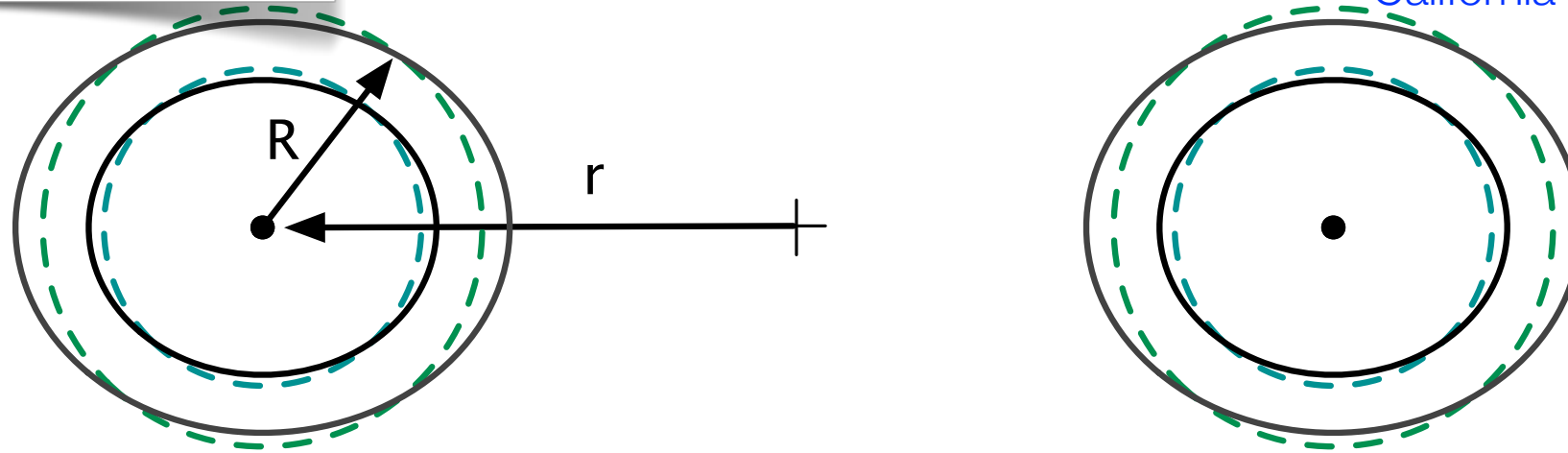
重力波スペクトルは状態方程式の情報を含む



- 通常核物質(S-EOS)では合体後の中性子星振動に付随したピークがみられる
- ハイペロン状態方程式では広がった弱いピーク

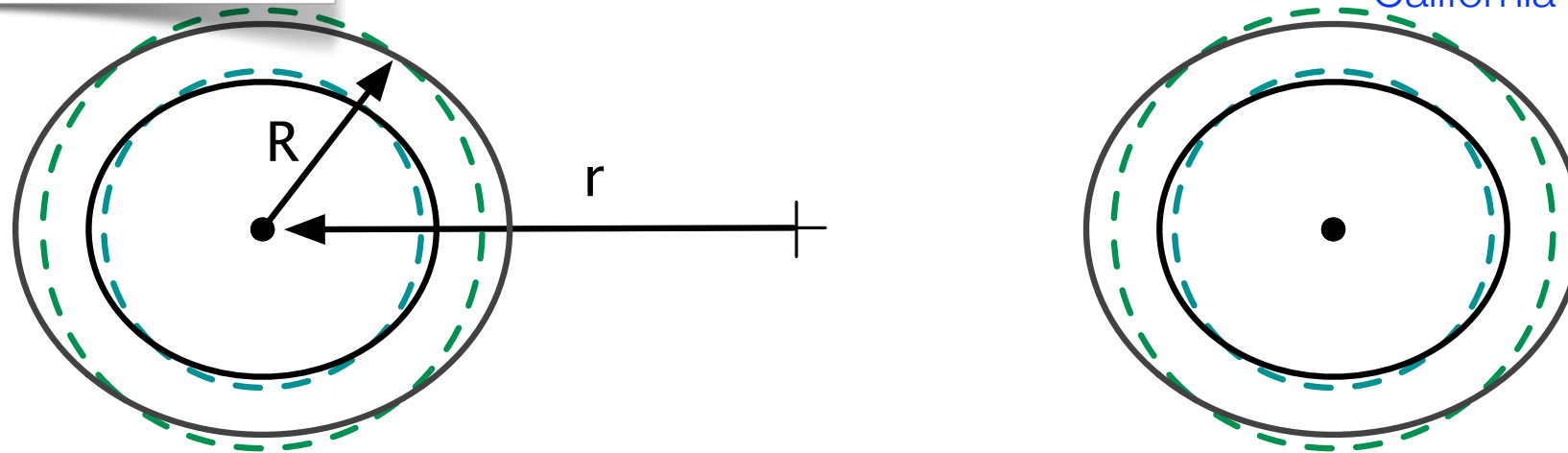


Hyperon EOS is softer than normal.



Neutron stars in binaries experience tides:

$$\lambda = \frac{Q}{\mathcal{E}} = \frac{\text{size of quadrupole deformation}}{\text{strength of external tidal field}}$$



Neutron stars in binaries experience tides:

$$\lambda = \frac{Q}{\mathcal{E}} = \frac{\text{size of quadrupole deformation}}{\text{strength of external tidal field}}$$

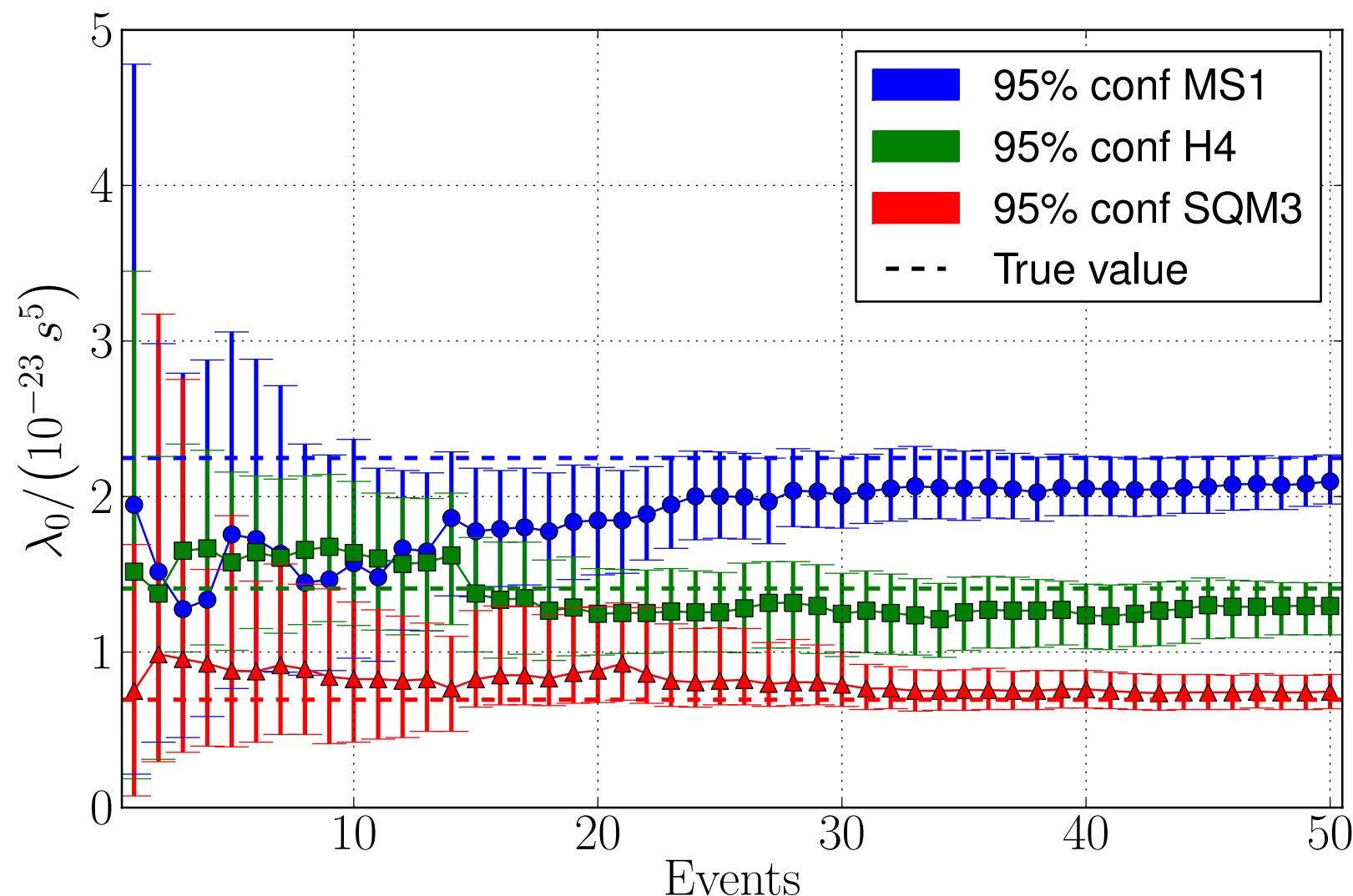
Love number k_2

Radius R

$$\lambda = \frac{2}{3} k_2 R^5 \quad (G = c = 1)$$

Del Pozzo et al:

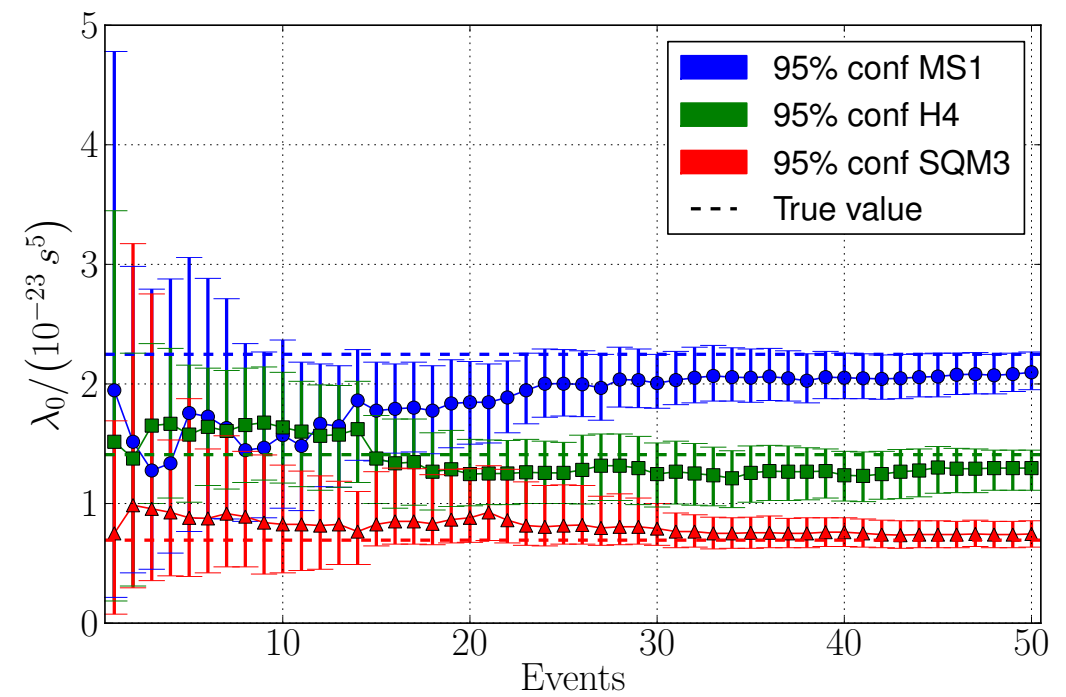
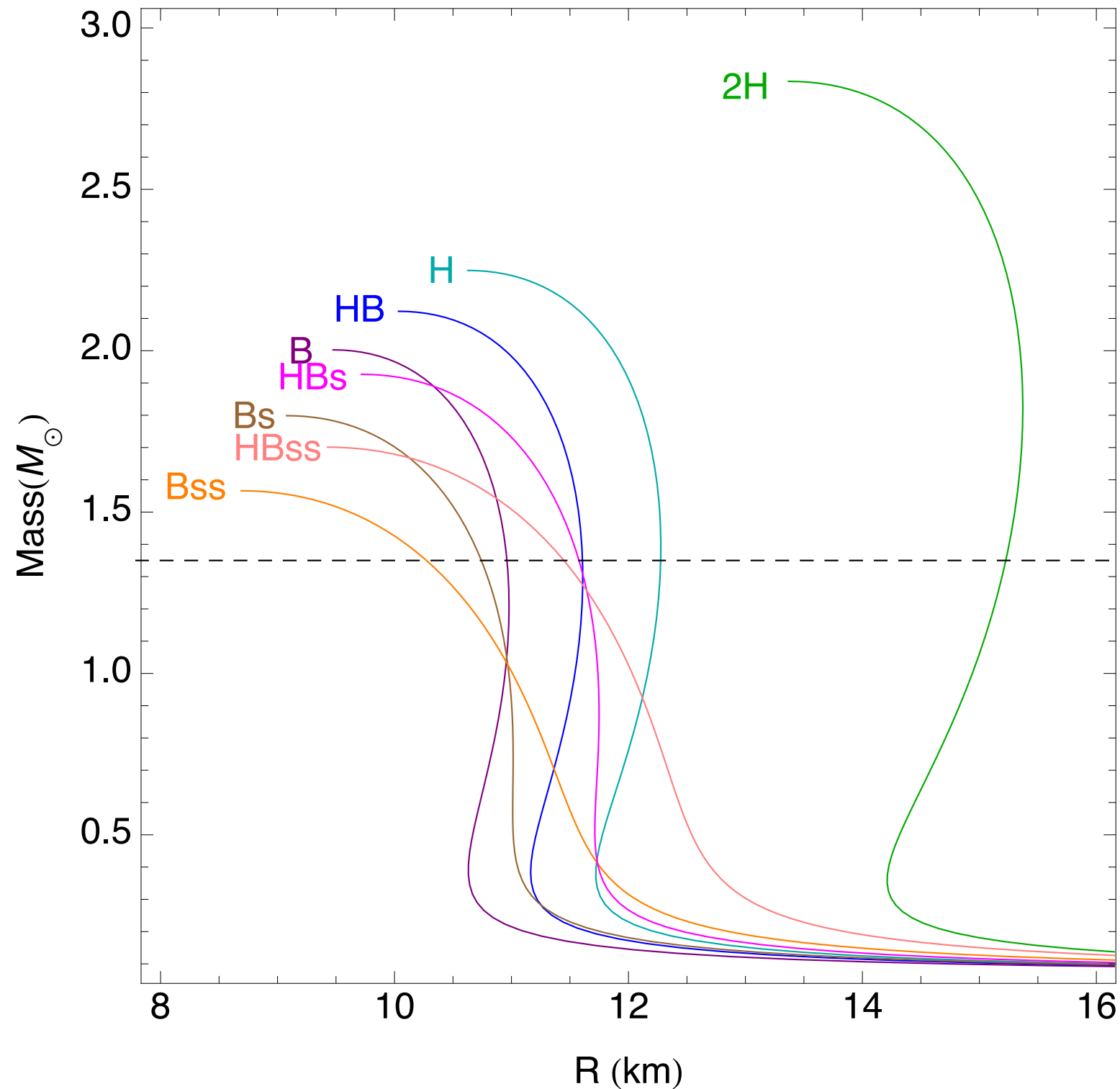
Full Bayesian analysis of injected signal population



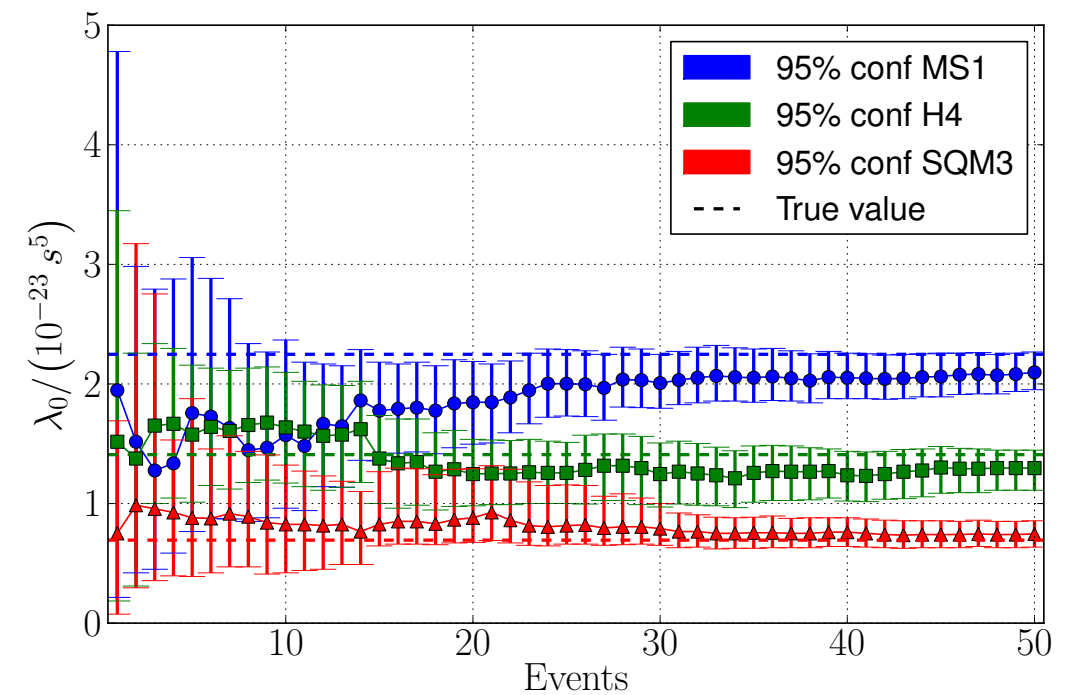
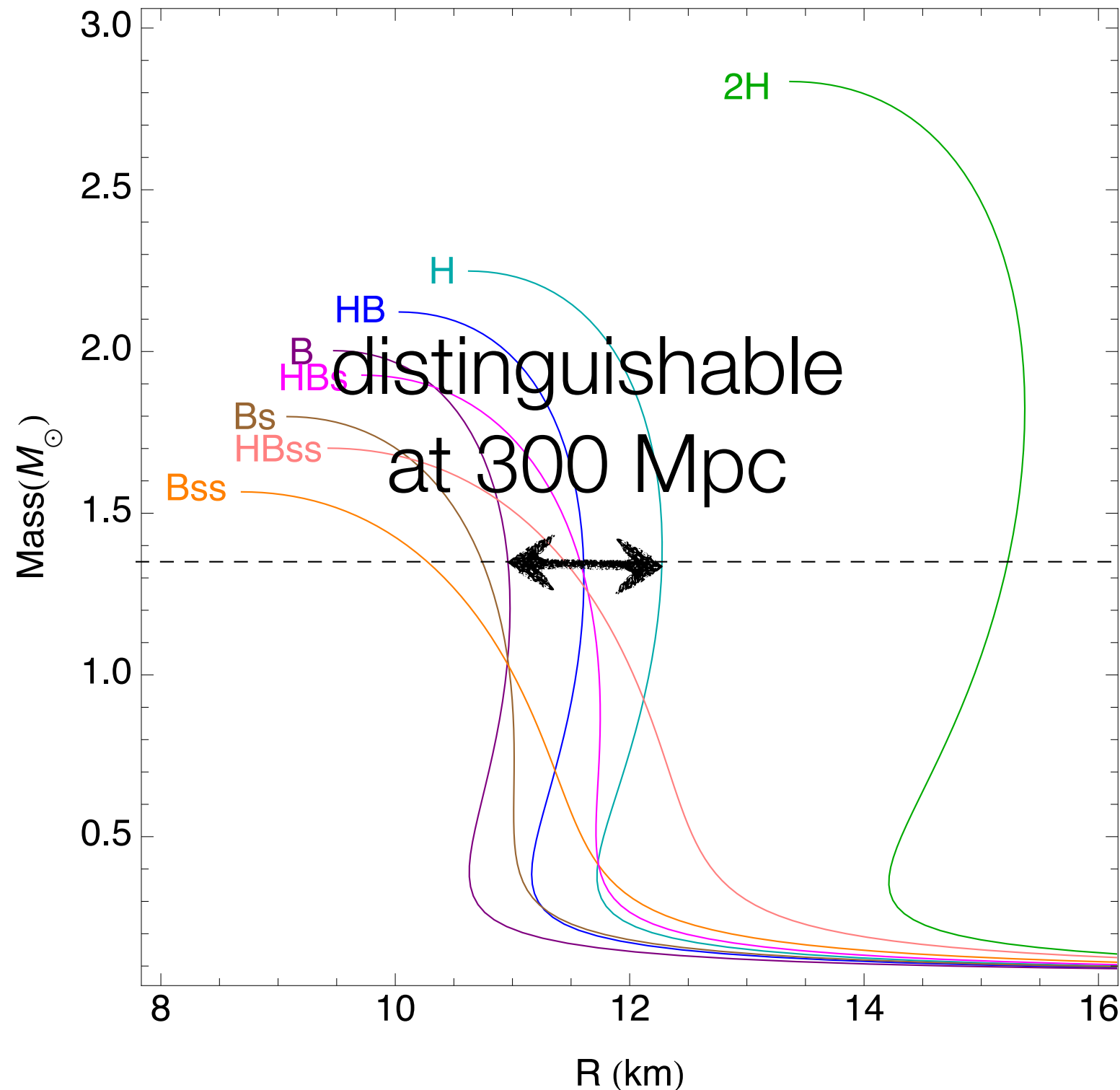
expand $\lambda(M)$
around λ_0 at 1.4
 $M_\odot$, estimate
both mass
parameters and
 λ_0

Uses post-Newtonian inspiral with tidal corrections
up to 1630Hz (ISCO for PP)

Measurement using hybrid waveforms



Measurement using hybrid waveforms



*Magnitude of
hybrid estimate
agrees with
PN estimates*

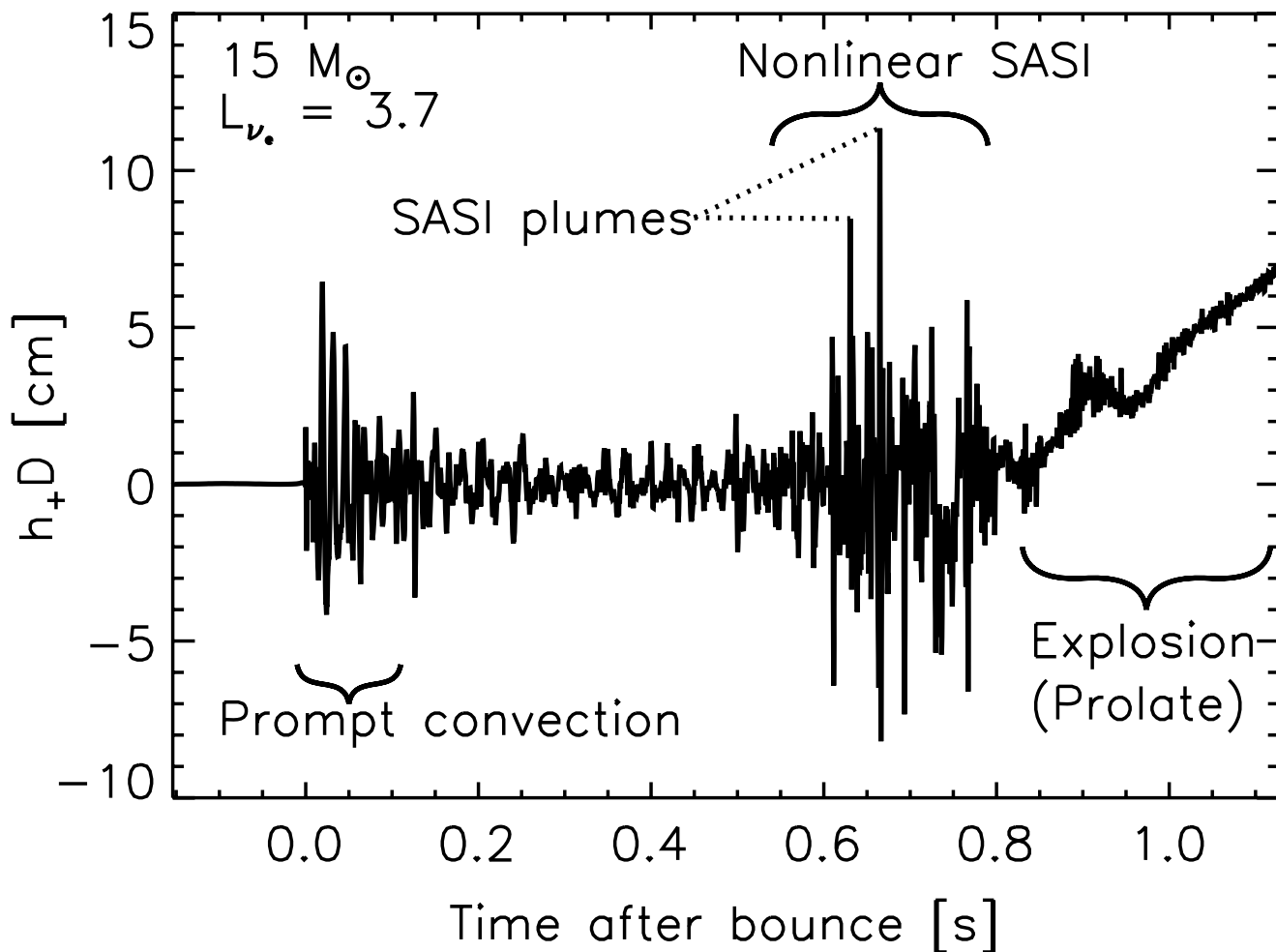
超新星爆発からの重力波

いろんな過程で重力波が出ると期待されている。

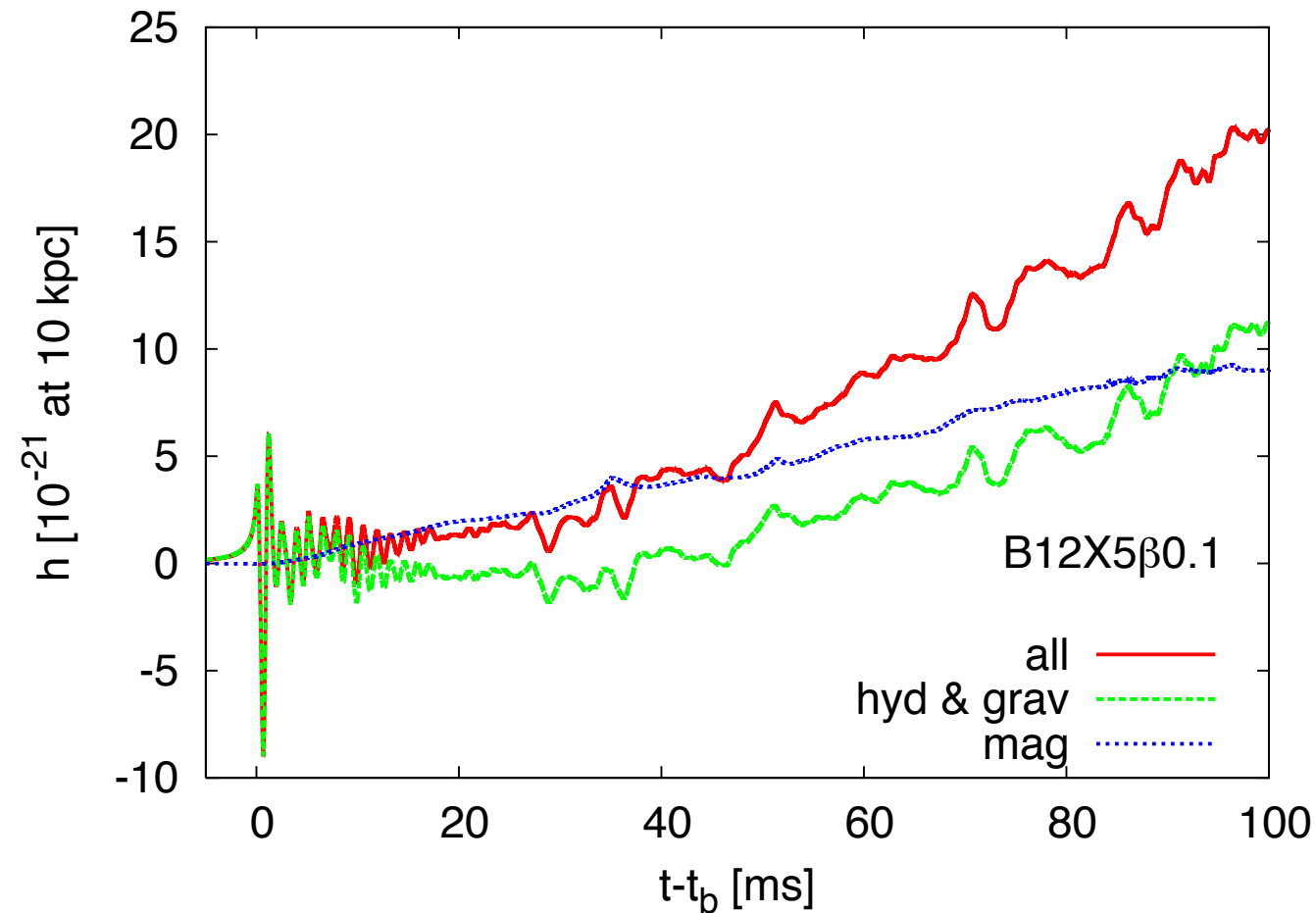
- コアのバウンス
- 対流
- 原始中性子星の形成時
- ニュートリノ放射
- 物質降着と衝撃波面
- ジェット状の大きな質量放出流？



Kinematics エネルギーの収支？



Murphy, Ott, Burrows, 2009



Takiwaki & Kotake, 2011

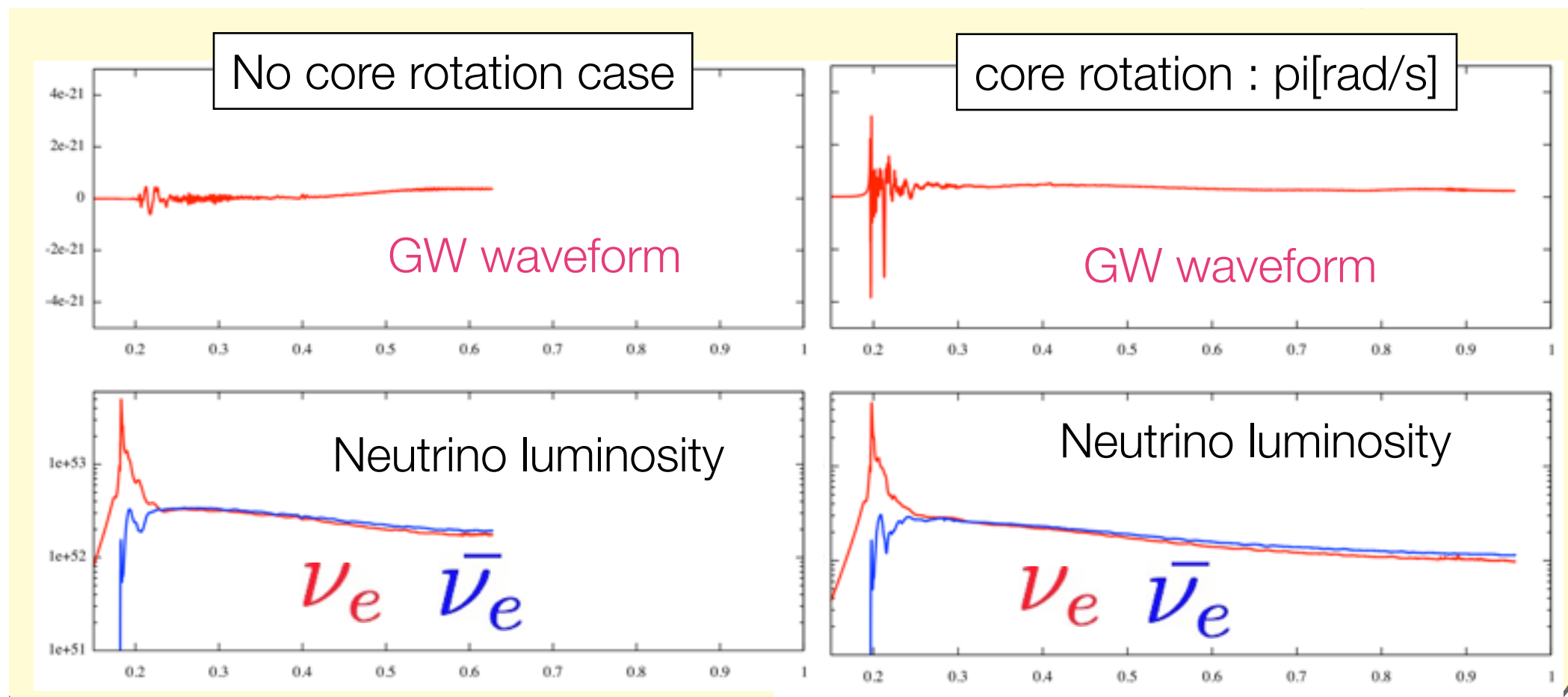
実は超新星の爆発エネルギー $\sim 10^{51}$ erg はシミュレーションで再現できていない。
 現在のシミュレーションは、これより 1～2 桁小さいエネルギーでしか爆発できない。
重力波は、爆発のどの課程が大きなエネルギーを担うかを示唆する。

(註：ニュートリノの運び出すエネルギー 10^{53} erg).

Dynamics 動的な解明

いつ強い重力波が放出されたか？

- ニュートリノの中性子化バースト以前に強い放出があれば、コアは高速で回転している。
- 中性子化バーストの後ならば、コアはあまり回転していない。



Simulation by Y.Suwa (drawn by T.Yokozawa)

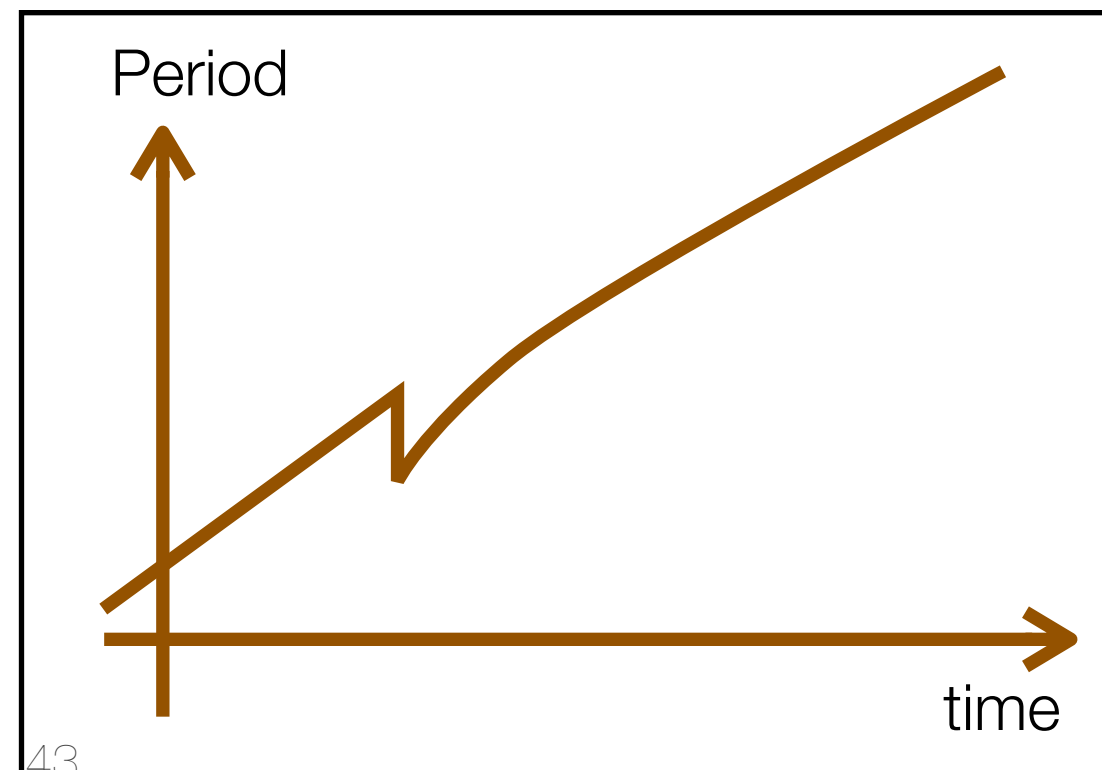
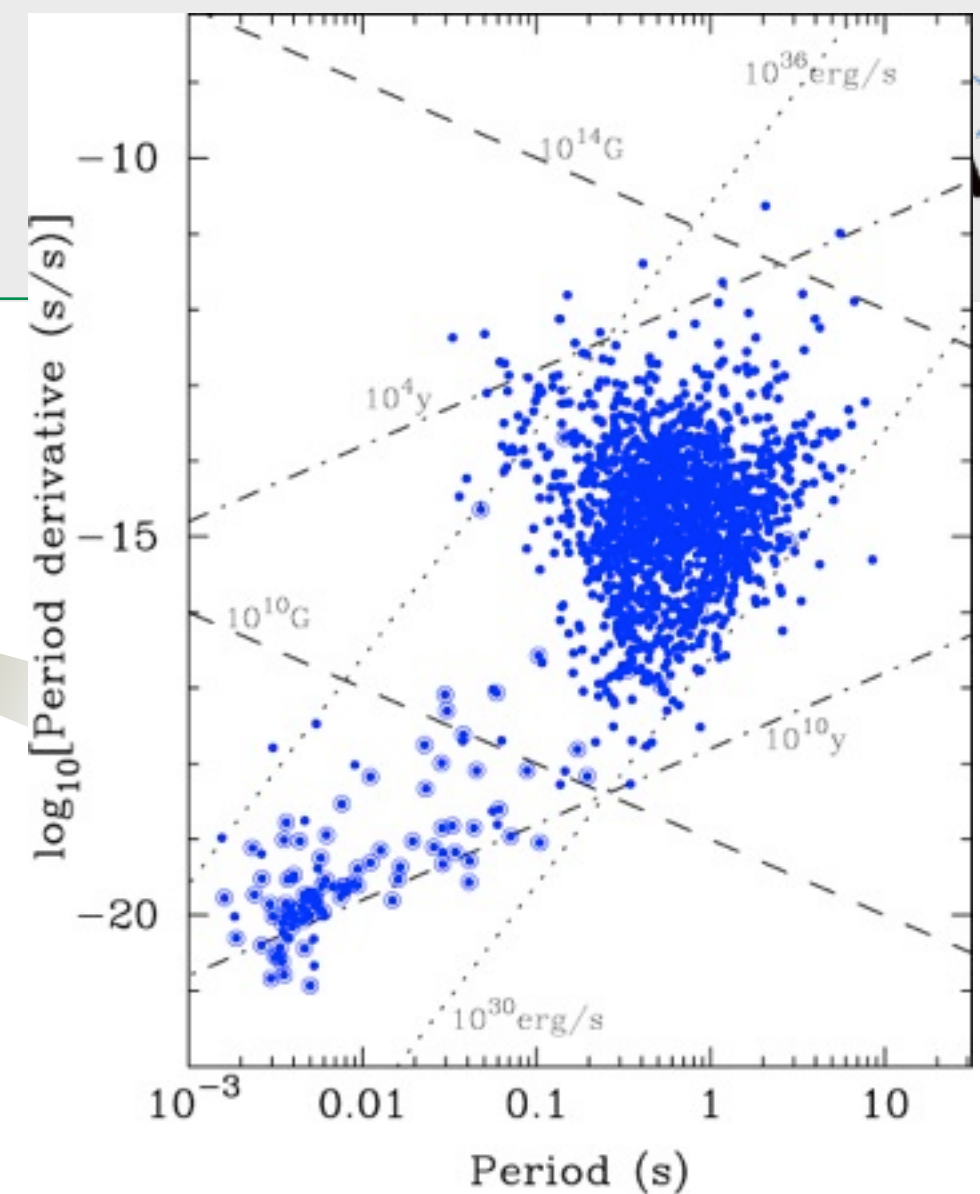
Pulsars パルサー

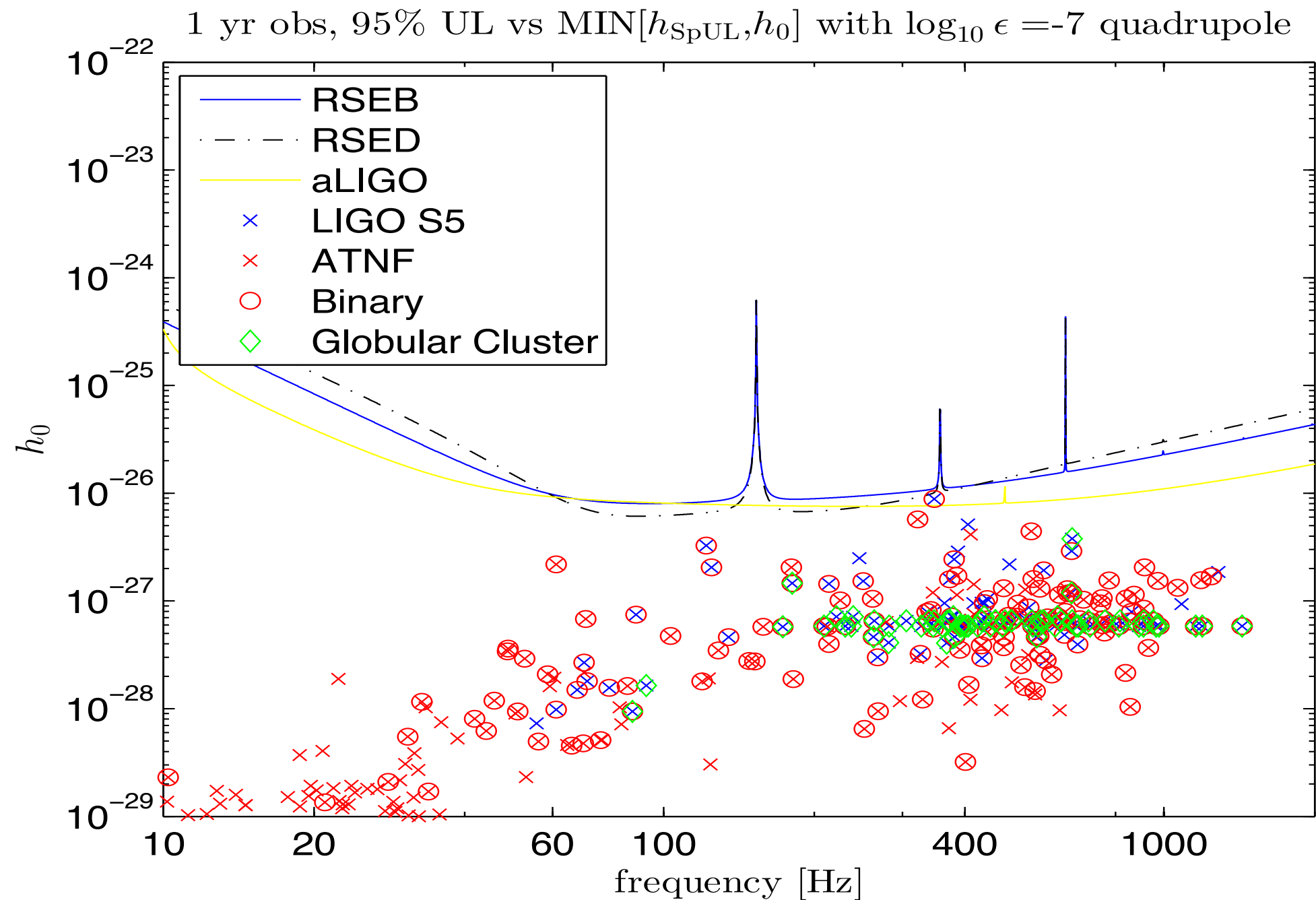
連続重力波

- non-axisymmetric --> GW radiation
- GW radiation may cause spin down.

バースト的なもの

- Glitches





伊藤氏(RESCUE)のコードによる

- ATNF pulsar catalogue から、
- ・観測のスピンダウンレート
 - ・楕円率 10^{-7}

のいずれかで許される最大の重力波の大きさを求めたもの。

フォローアップ観測の必要性

重力波観測の利点...

- 星の質量や距離を推定できる
- 運動や変形の様子が現れる
- ほぼ全方位に感度が有る

(最高感度方向の50%以上の応答を示すのは全立体角の約65%)

しかし、問題点...

- 方向決定精度が悪い

数度角から数十度角。ホスト銀河を決められない。

- 超新星バーストからの重力波のように、波形がよくわからないものもある
- まだ発見したことがない。天体起源であることを確信が欲しい

====> 解決策：フォローアップ観測／同時観測（相補的な）

天体の様子を多面的な切り口で調べることが可能に！

中性子星連星合体はShort-GRBか？

-----> X, ガンマ線観測

重力波の光度距離とホスト銀河の赤方偏移の比較

-----> 光赤外観測

超新星のダイナミクスの解明

<-----> ニュートリノ観測

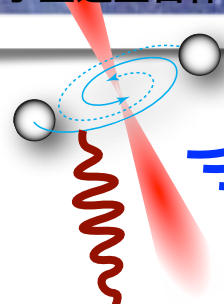
重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開

New development in astrophysics through multimessenger observations of gravitational wave sources

重力波源

- A. 合体波形
- B. バースト波
- C. 連続波
- D. 背景重力波
- E. 未知の波源

中性子星連星合体



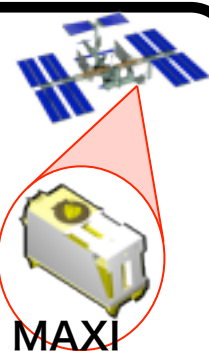
X線、 γ 線、可視光、赤外線、電波、ニュートリノ...

超新星爆発



計画研究A01

大立体角の連続モニター



MAXI

多様な手段で観測

計画研究A02

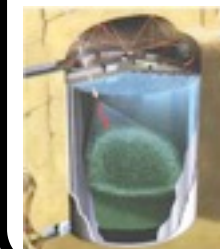
光・赤外広視野望遠鏡

電波観測



計画研究A03

ニュートリノ検出



連携した観測の構築
重力波事象の理解

計画研究A04

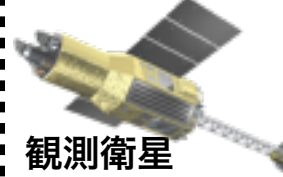
重力波のデータ解析

重力波観測

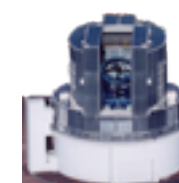
計画研究A05

理論

各種天体観測



観測衛星



地上の光赤外望遠鏡



KAGRA

海外の重力波検出器
aLIGO, aVirgo

まとめ

重力波

- 一般相対論の重要な検証
- 天体物理、宇宙物理の新しい窓になると期待

重力波の観測がもうじき！

- KAGRA の常温テスト観測(iKAGRA) 2015年
- 2017~2018に初観測か？

重力波源の物理

- それぞれの波源に期待される物理がある。

重力波天体をより良く理解するためには、複数の観測手段や深い物理の理解が必要

→隣接分野の協力を！

お知らせ：「重力波天体」シンポ 2014/1/13-15



新学術「重力波天体」wiki

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

★ 2nd_Annual_Symposium

アップデート日時 12月25日、午後9:40 ユーザ gwastro

新学術領域研究「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」
第2回シンポジウム

[日 時] 2014年1月13日(月)～15日(水)

[場 所] 東京工業大学 西9号館 デジタル多目的ホール

Program プログラム (pdf file, ~56KB)