

重力波と数値相対論

柴田 大(基礎物理学研究所)

1. はじめに
2. 重力波とは
3. 重力波検出器
4. 数値相対論

1 はじめに: 宇宙の調べ方

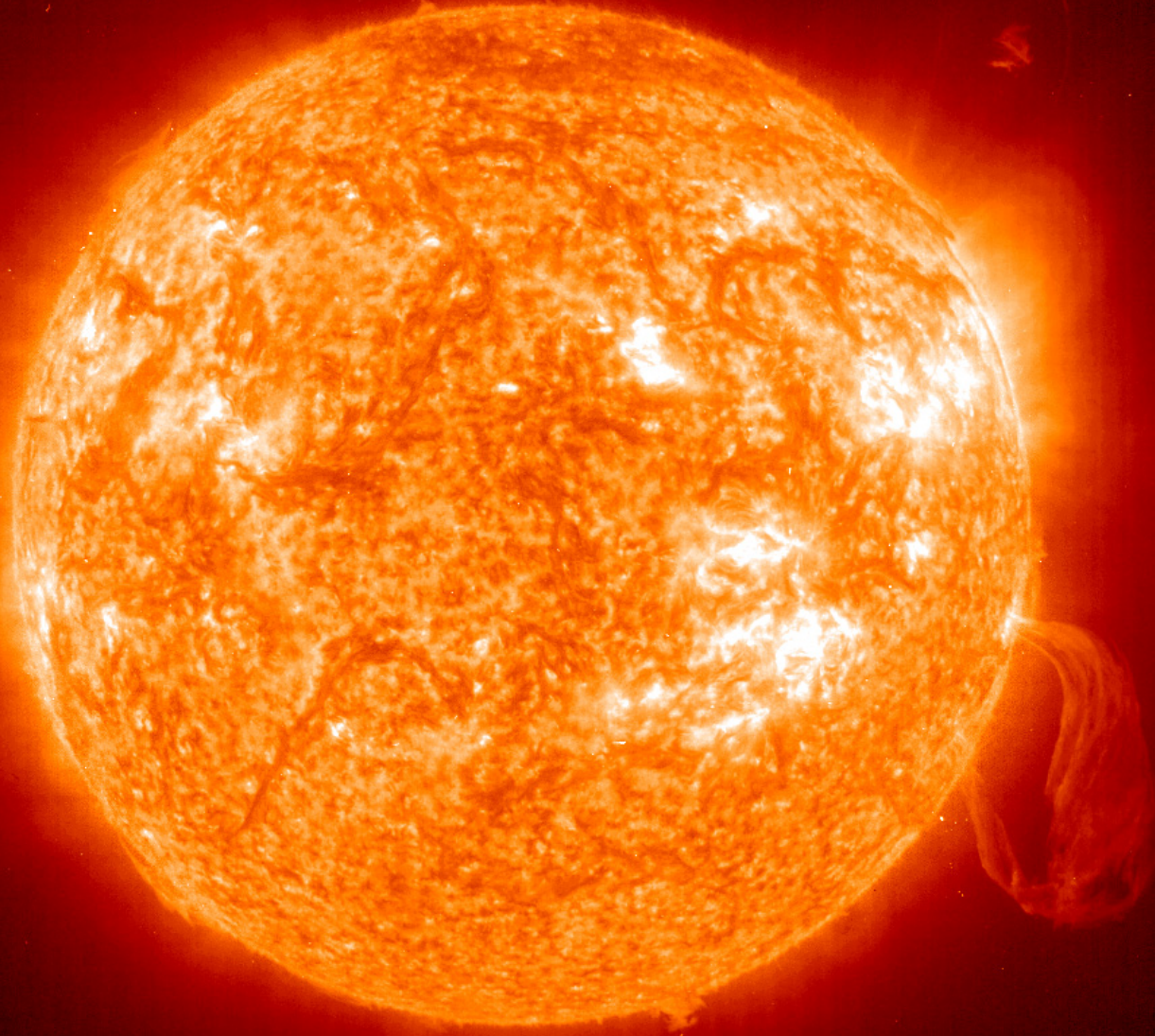
宇宙から地球に降り注ぐものを観測する。
⇒ 受動的である

地上で行う物理学とはかなり異なる。

- 電磁波: 可視光線、ガンマ線、X線、紫外線、赤外線、マイクロ波、電波
- 粒子(水素、ヘリウム、電子、…)
- 隕石
- ニュートリノ
- 重力波

あらゆる可能性を
追求すべきである

太陽(可視光線)



大きさや
表面温度を
観測



$T=5850\text{K}$

$R=70\text{万km}$

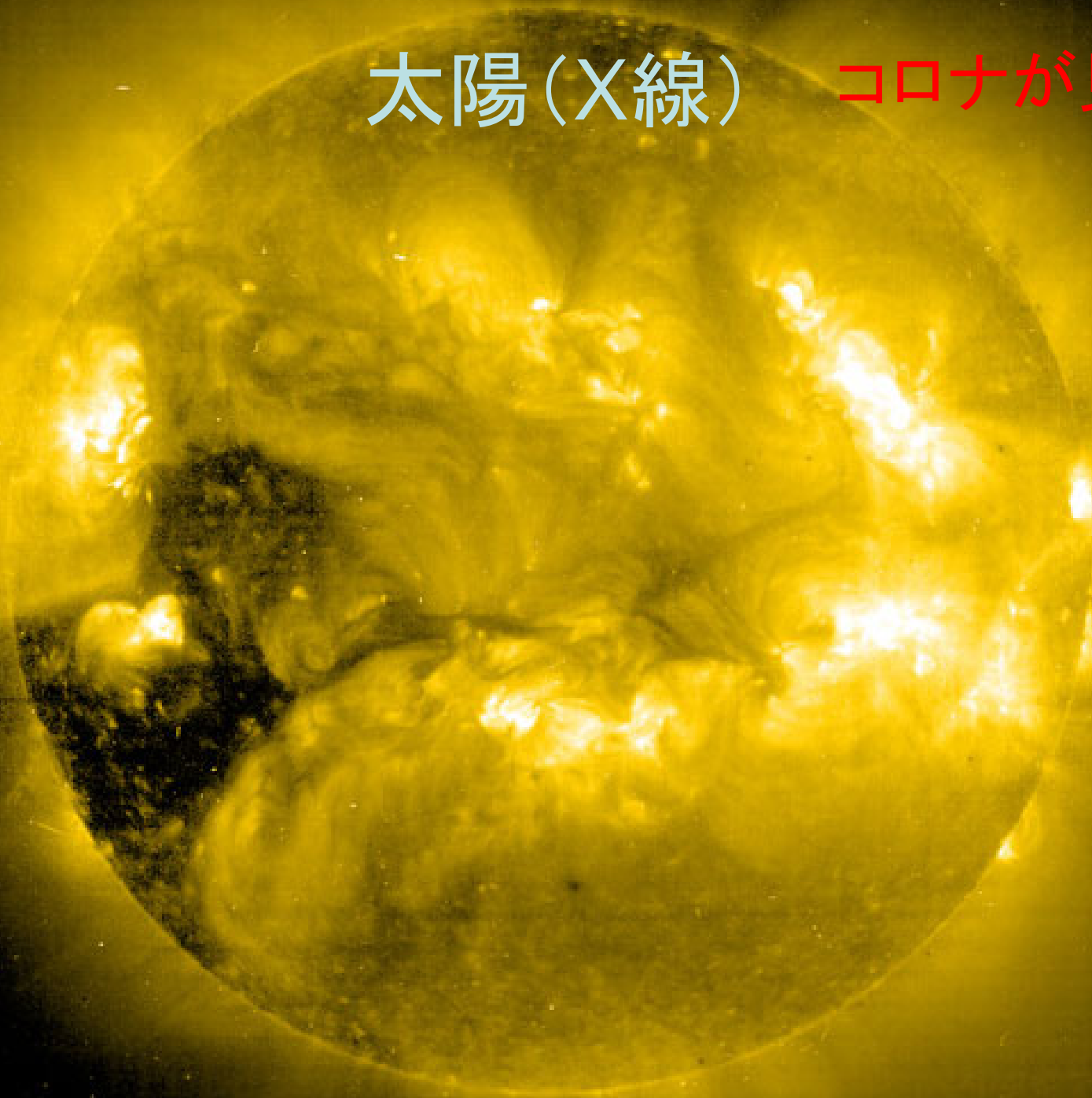


密度、
内部構造

、、、

太陽(X線)

コロナが見える



太陽(ニュートリノ)

By SuperKamiokande

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/archivepix.html>

得られた知見と教訓

- X線観測⇒高温コロナの発見
⇒プラズマ物理の発展に貢献。
- ニュートリノ観測⇒核融合反応の直接検証
⇒どんな場合に核融合が起こるのかについて、
太陽が身を持って示している。
- ニュートリノは検出されたが、測定された
量は、当初予想された量の約半分だった
⇒素粒子理論に新たな知見

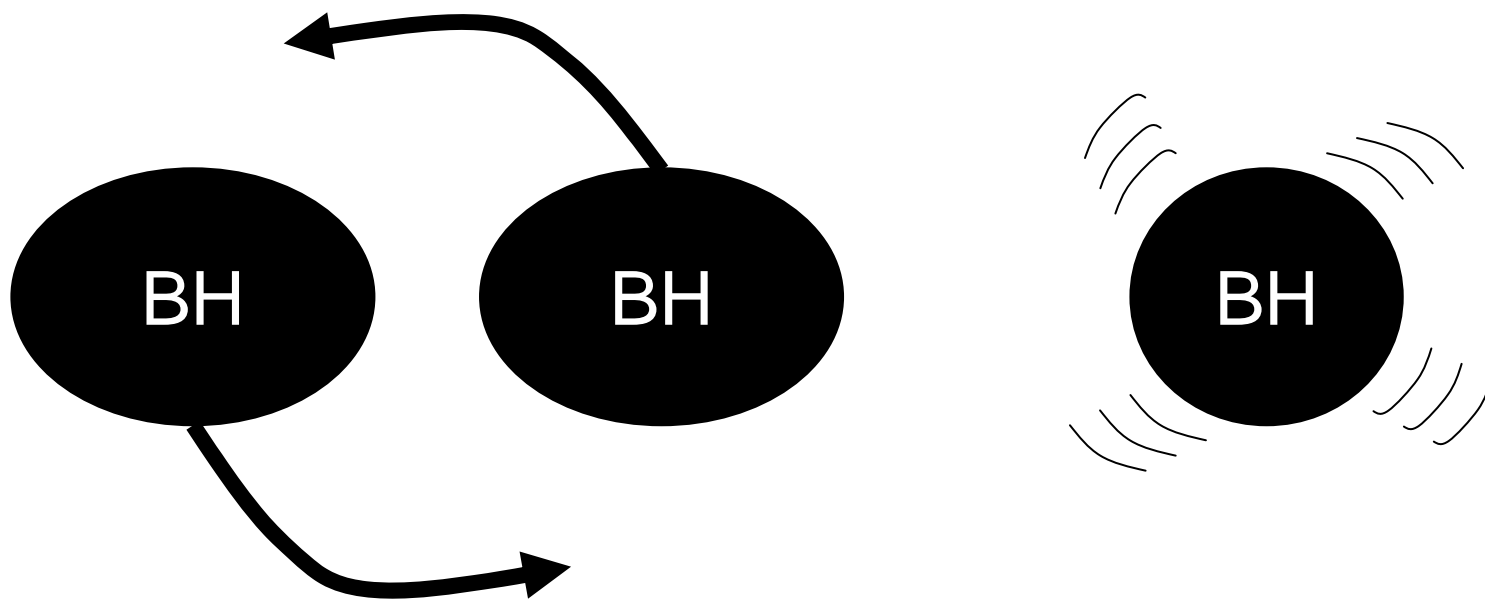
教訓：人間はそれほど賢くない。

新しい手段で観測すれば、新たな側面が見える。

重力波観測の役割

光など、他では見えないもの、
見えない部分を見る

- 例えば、ブラックホールの合体や振動



ブラックホールは存在する！

1992

10 light days

約2600億km

我々の銀河中心：
ブラックホール質量
= 約300万太陽質量

超巨大ブラックホールの周りを
恒星が高速度で運動

銀河の合体⇒ブラックホールの合体？

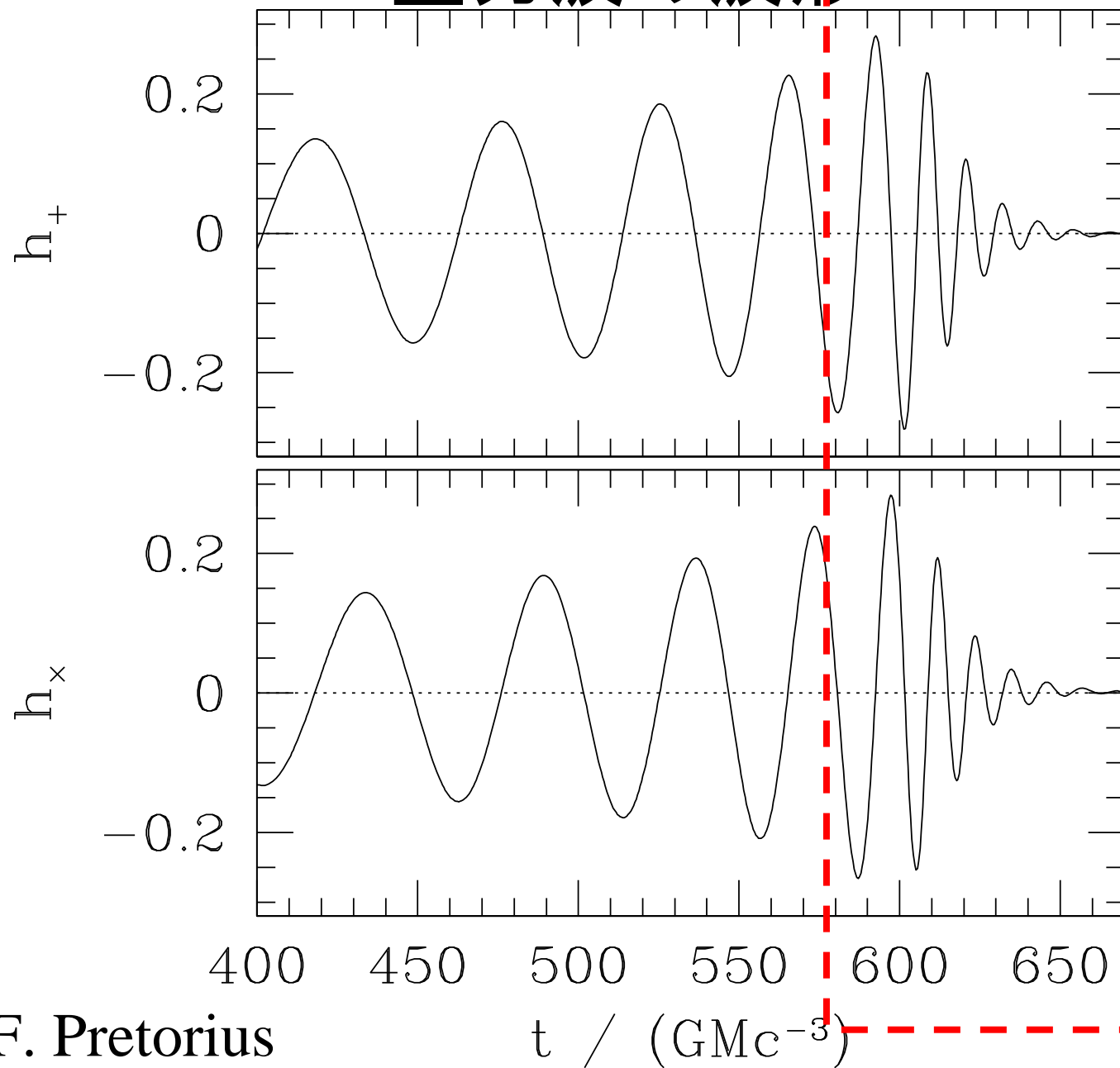
Galaxies NGC 2207 and IC 2163



中心のブラックホール同士がやがて合体するかも ble
age

<http://antwarp.gsfc.nasa.gov/apod/archivepix.html>

重力波の波形



ブラック
ホールの
固有振動
↓
質量と
スピンの
決まる

ブラックホール、中性子星、さらには
宇宙の誕生直後は電磁波観測だけでは
完全に理解できない

⇒ 重力波で「見る」

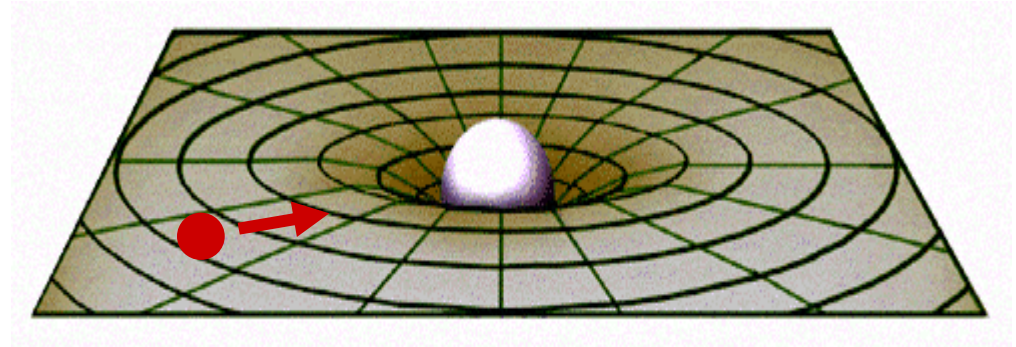
2 重力波とは①

- 一般相対論
= 時空の重力理論
⇒ アインシュタイン方程式により記述される
重力波はその解の1つ

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

曲がり具合を表す 物質の存在
 具合を表す

引き付けられる
= 曲がり具合に
従って動く



2 重力波とは②

- では、物質が動いたら？

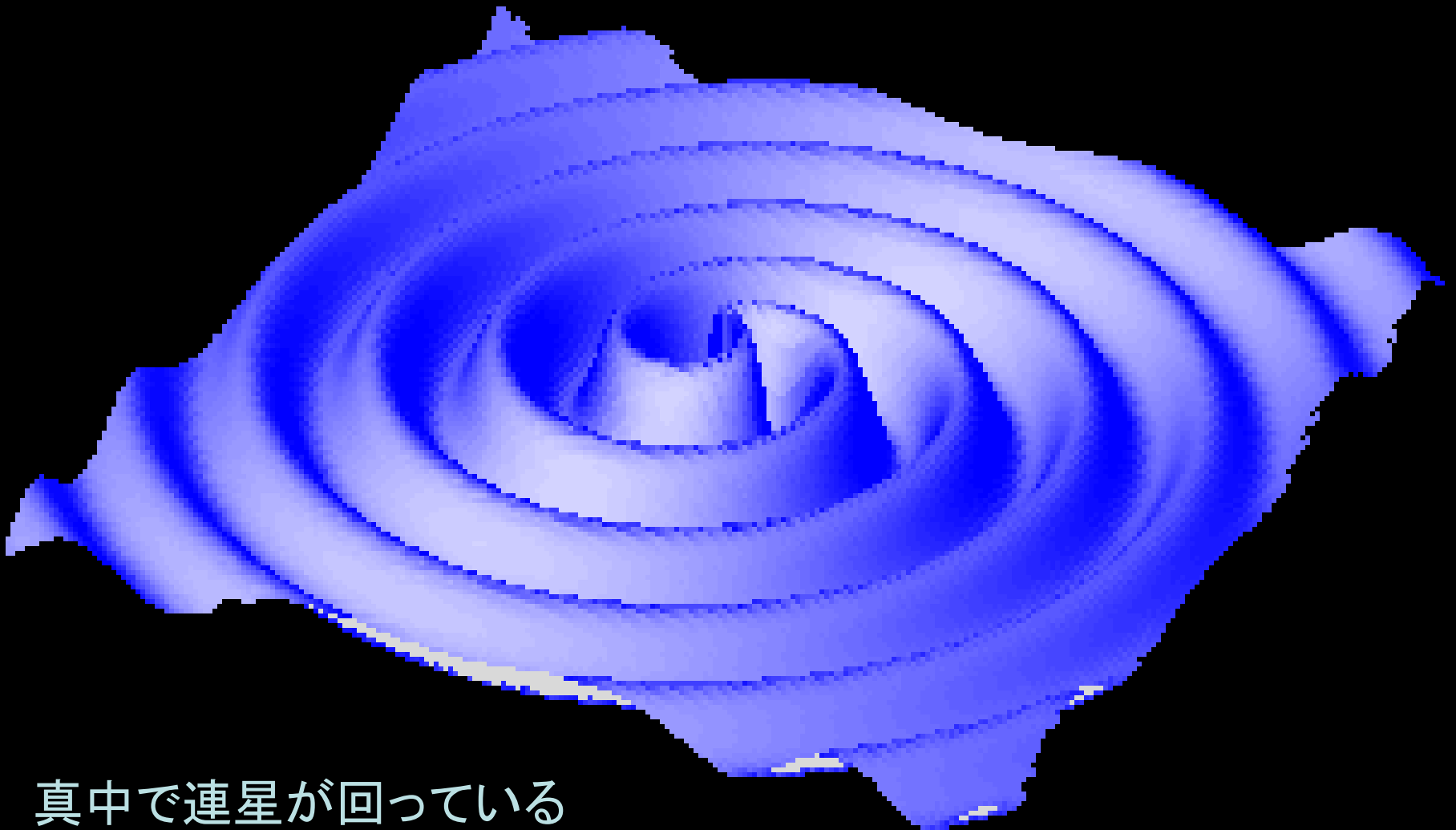
⇒ 時空の曲がり具合も変わる。

⇒ さらに、変化の履歴がさざなみとして周りに伝わる

(あたかも、池に石が落ちたときに、波が伝わるように)

この時空のさざなみが**重力波**

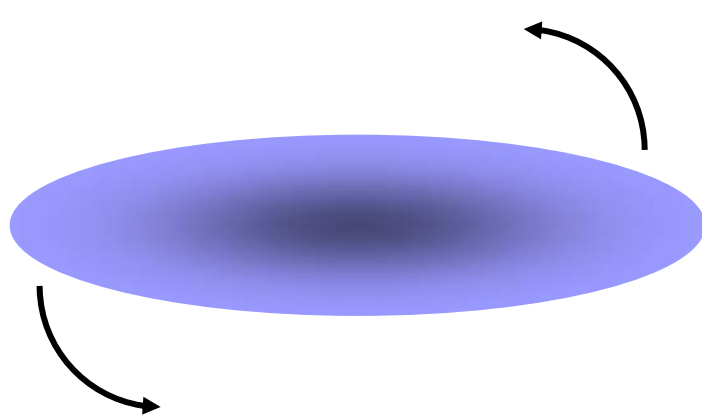
例えば、連星が軌道運動する場合に放射される重力波の模式図



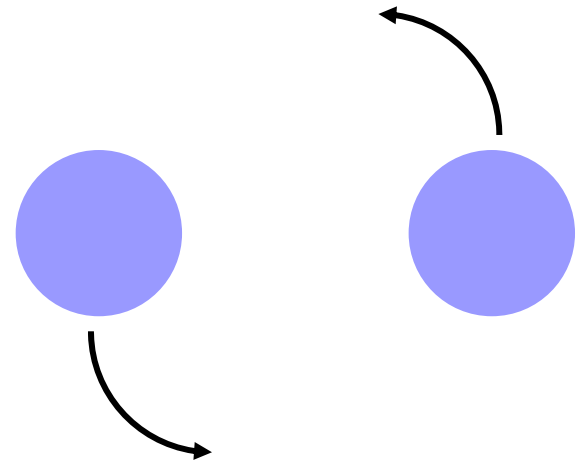
真中で連星が回っている

どのような場合に放射？

基本的には、非球対称、高密度、大質量の物質が高速で動く場合に大量放射



回転楕円体



連星

参考：電磁波は、電流が流れると放射される

⇔ 重力波は、物質が動くと放射される

重力波はどのような場合に**大量放射**？

振幅 $h = \frac{G(\ddot{I}_1 - \ddot{I}_2)}{c^4 r} : I_i$ は慣性モーメント

おおざっぱには、 $|\ddot{I}| \sim MR^2T^{-2} \sim Mv^2$

$$h \sim \frac{GM \Delta v^2}{c^4 r} \sim \left(\frac{GM}{c^2 r} \right) \left(\frac{\Delta v}{c} \right)^2$$

M : 重力波源の質量

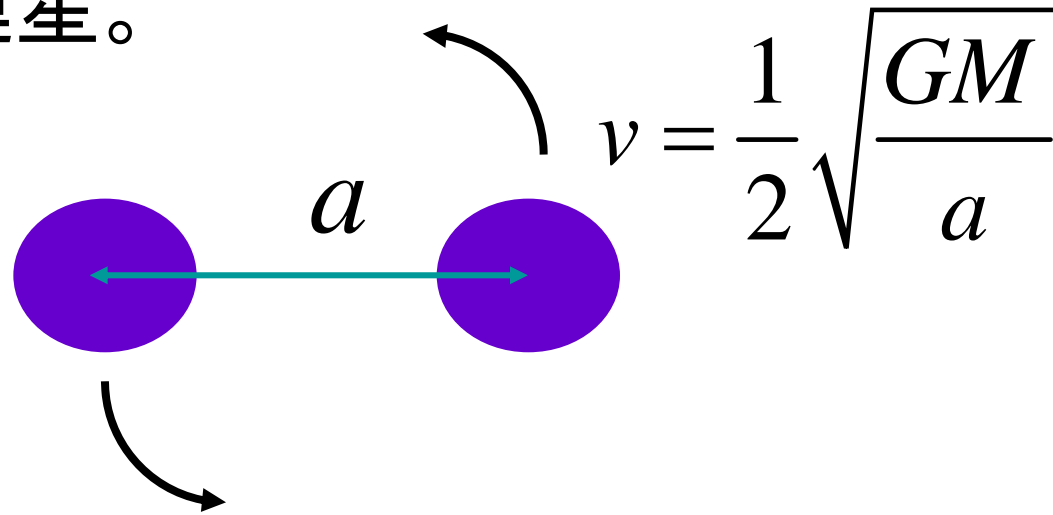
T : 時間変化する特徴的時間

R : 重力波源の特徴的半径

r : 重力波源までの距離

ゆえに、強力な重力波源は重くて、非対称に速く動く(あるいは振動する)もの。
また、できるだけ近くにあるもの。

⇒ 速く動くものは、一般に強重力下にある：
例、連星。

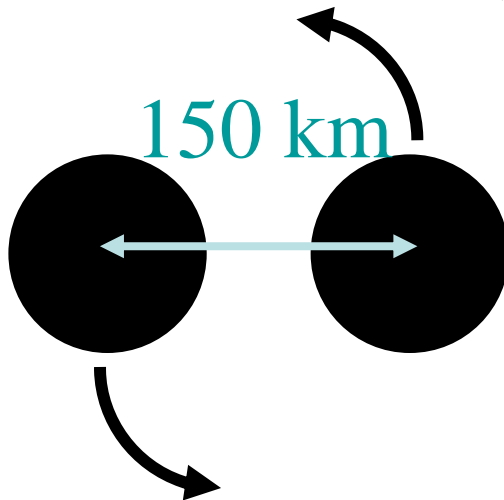


コンパクトな天体(強重力天体)が
強い重力波源

それでも、重力波の振幅は極めて小さい

$$|h| \sim \left(\frac{GM}{c^2 r} \right) \left(\frac{\Delta v}{c} \right)^2$$

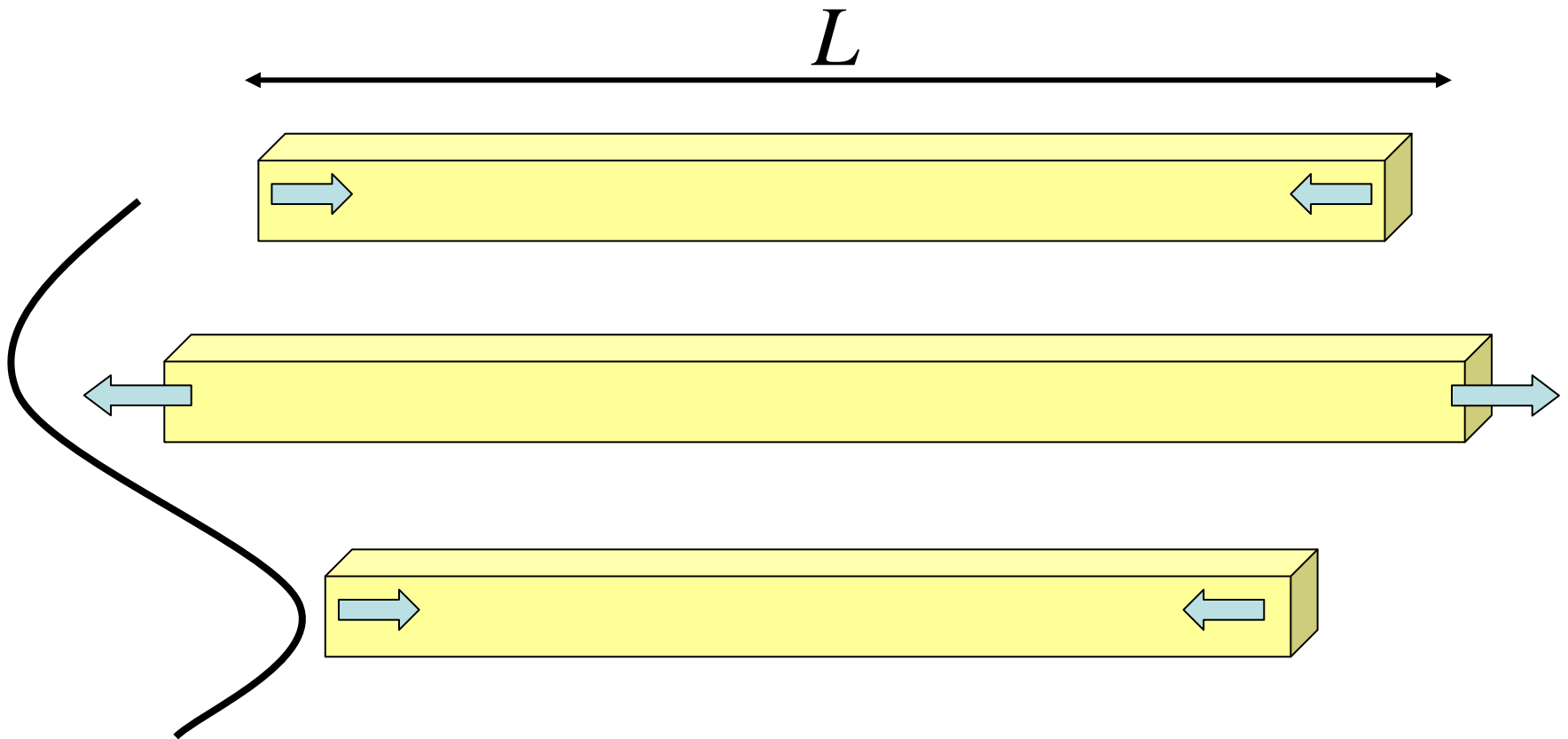
$$= 5 \times 10^{-18} \left(\frac{3 \text{万光年}}{r} \right) \left(\frac{M}{10M_{\odot}} \right) \left(\frac{\Delta v}{0.3c} \right)^2$$



我々の銀河系中心で
太陽の5倍の質量の
ブラックホール同士が
合体した場合の振幅

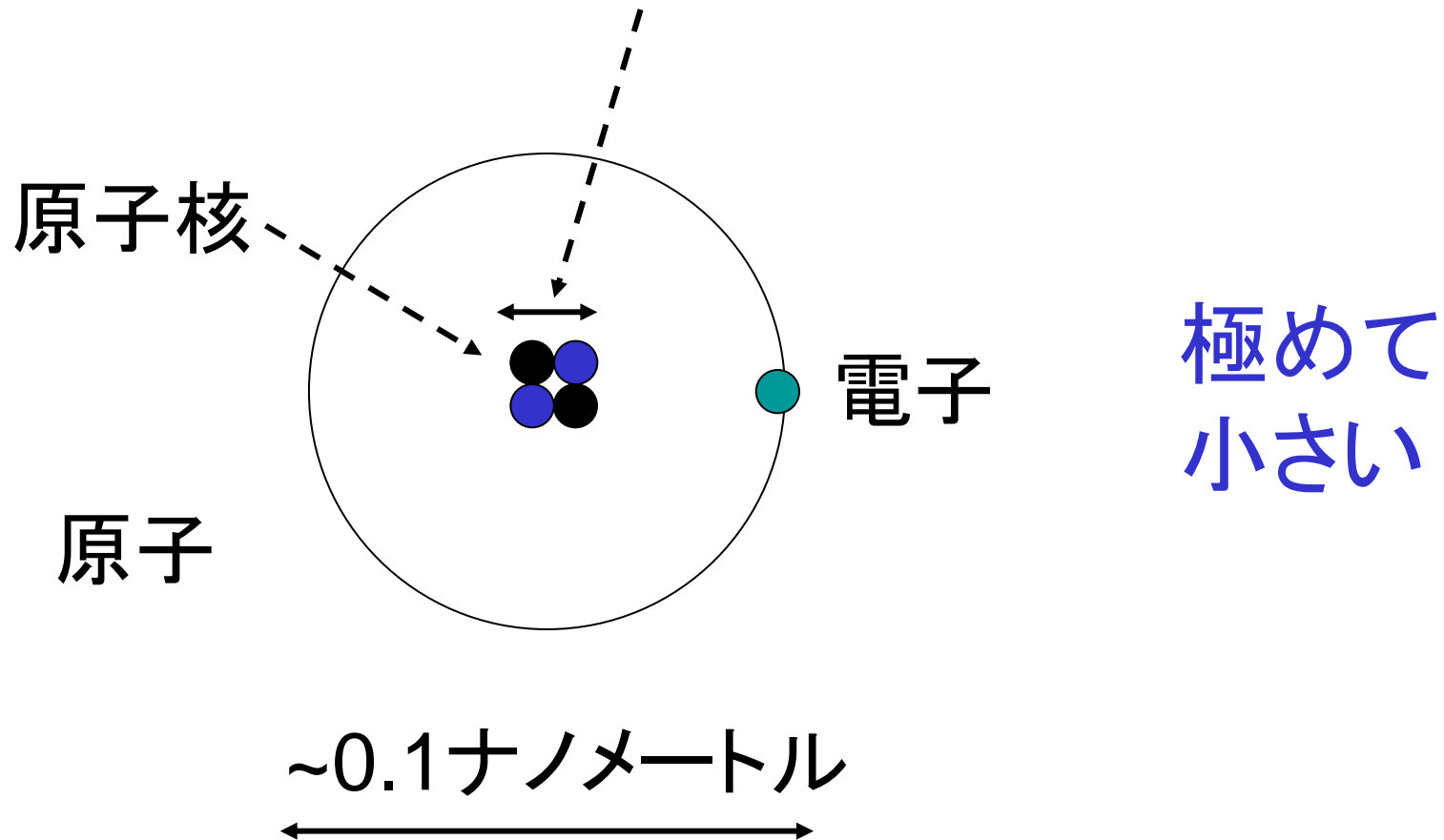
重力波の振幅の意味

- 振幅 h に対して、長さ L の空間は Lh だけ伸び縮みする



振幅 10^{-18} の意味

- 1 kmの棒が 10^{-13} cm伸び縮み
← 原子核半径にほぼ等しい



我々の銀河系で連星ブラックホールや 連星中性子星が次に合体するのは？

- たぶん10-100万年後 ⇒ とても待てない
- 宇宙には我々のような銀河は無数にあるのでそれらを考慮しよう。
- 10万個の銀河を考えれば、おそらく1年以内に合体が起こるであろう。
- 10万個の銀河を含む距離＝約3億光年
⇒ 3億年の彼方からやってくる重力波を
捕えなくてはならない

注：宇宙の大きさ＝137億光年

極めて小さい振幅の重力波がやってくる

$$|h| \sim \left(\frac{GM}{c^2 r} \right) \left(\frac{\Delta v}{c} \right)^2$$

$$= \underline{5 \times 10^{-22}} \left(\frac{3 \text{億光年}}{r} \right) \left(\frac{M}{10M_{\odot}} \right) \left(\frac{\Delta v}{0.3c} \right)^2$$

- 先ほどよりさらに4桁小さい。
→ 検出は容易でない作業である。
- 事実、今まで直接捉えられたことはない。
⇒ 直接検出することが今世紀の課題である。

3 重力波検出器

LIGO、ハンフォード:



TAMA、三鷹

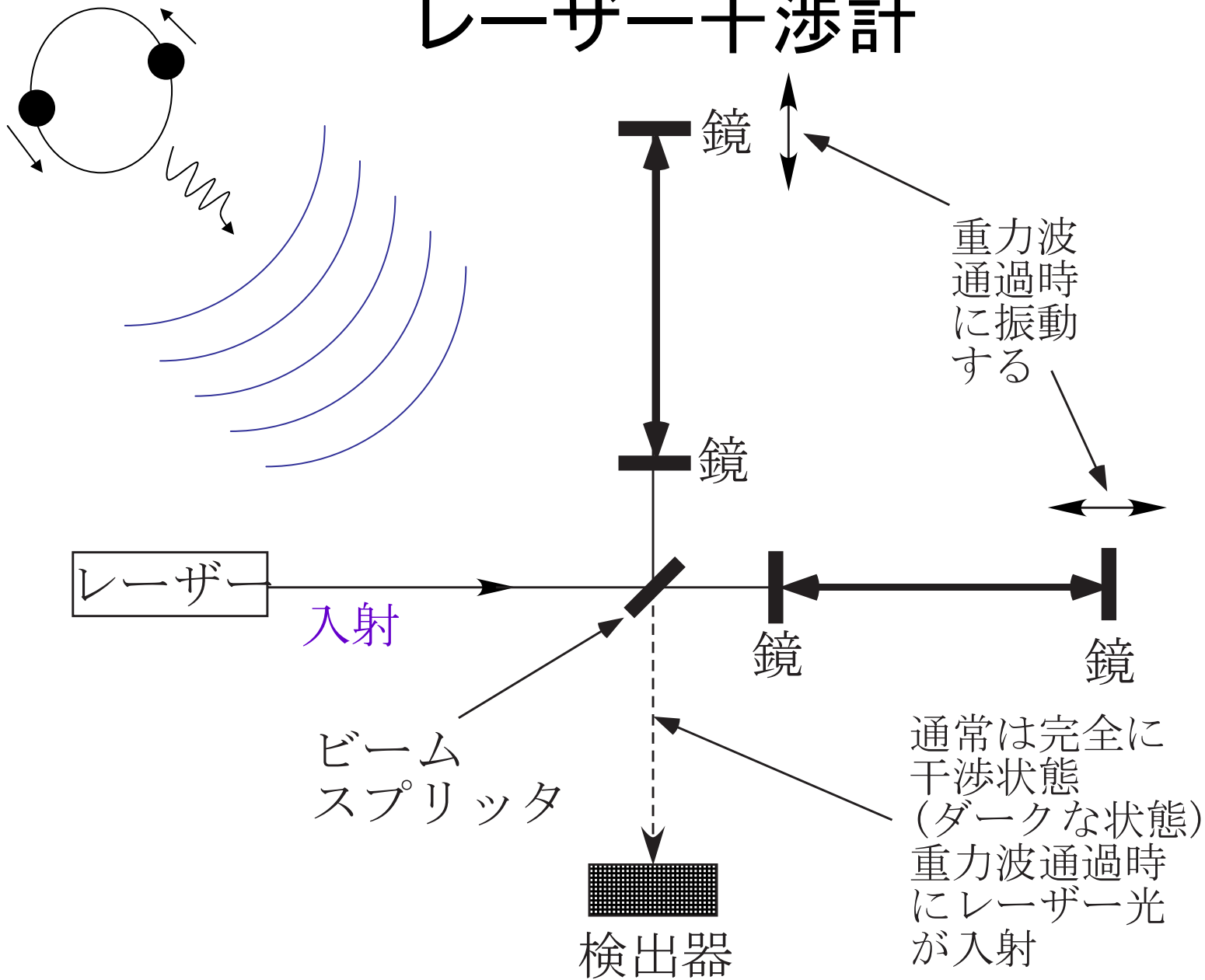


VIRGO、イタリア

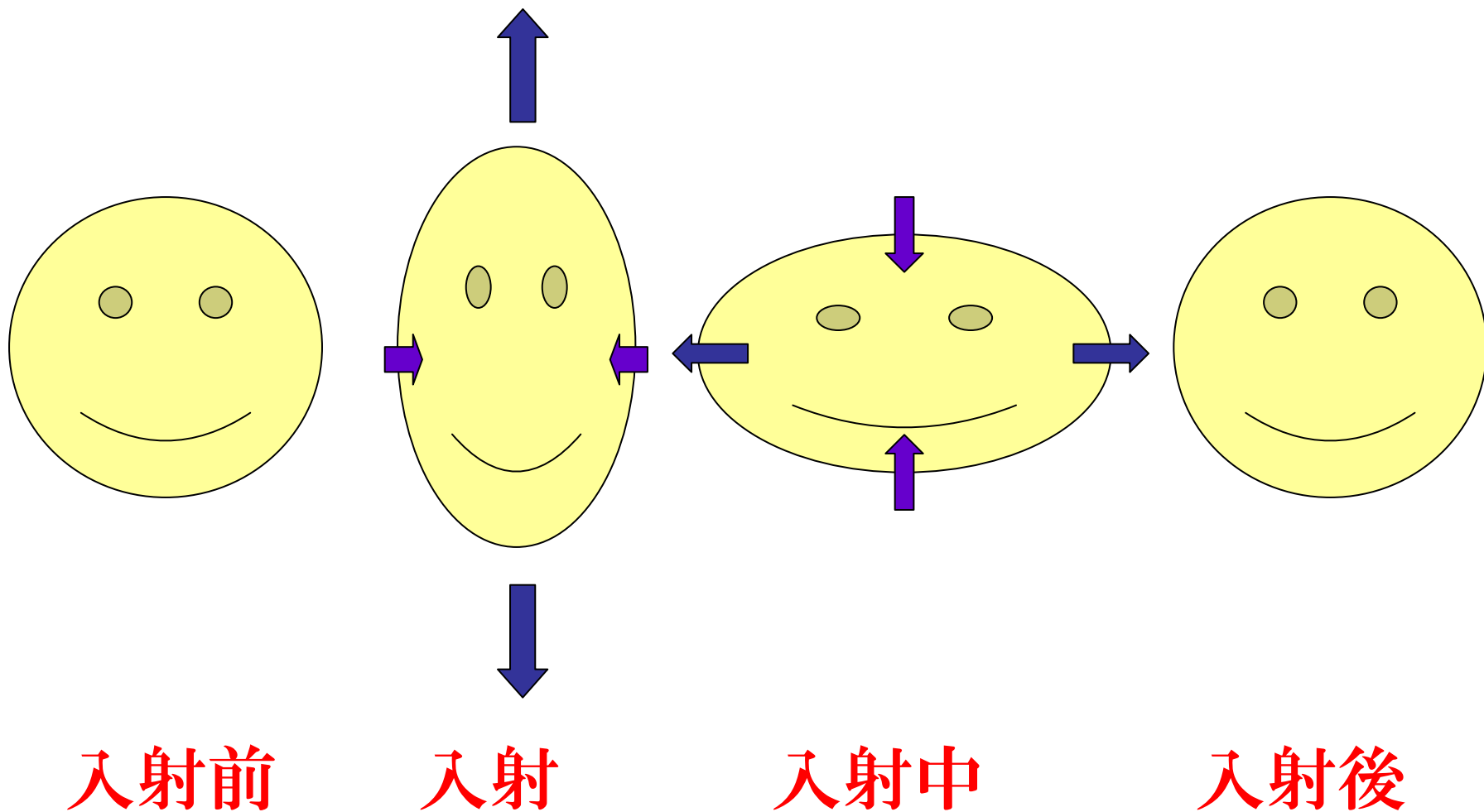


LCGT

レーザー干渉計

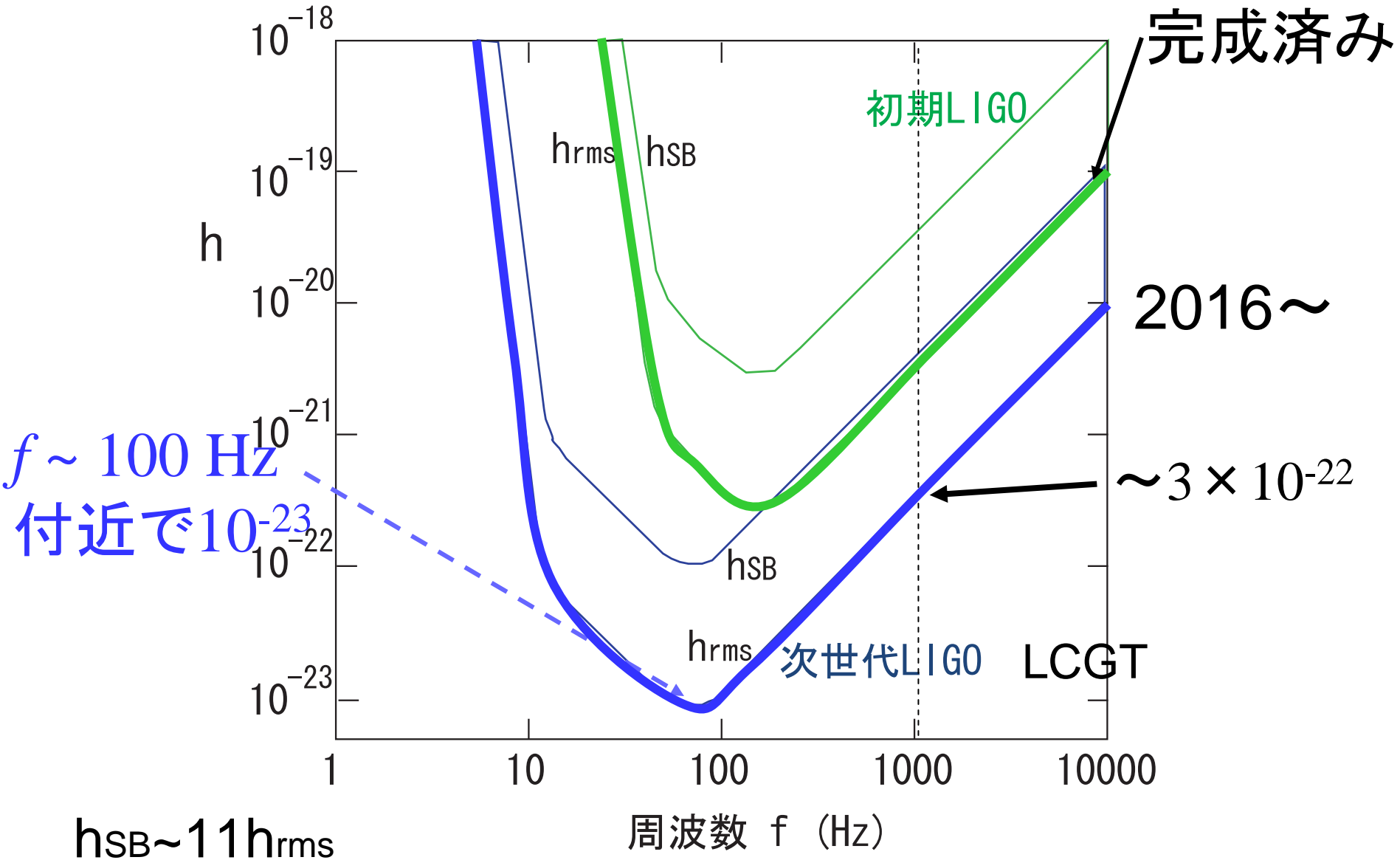


紙面垂直方向から重力波が入射した場合



矢印は、力の加わる方向を表す

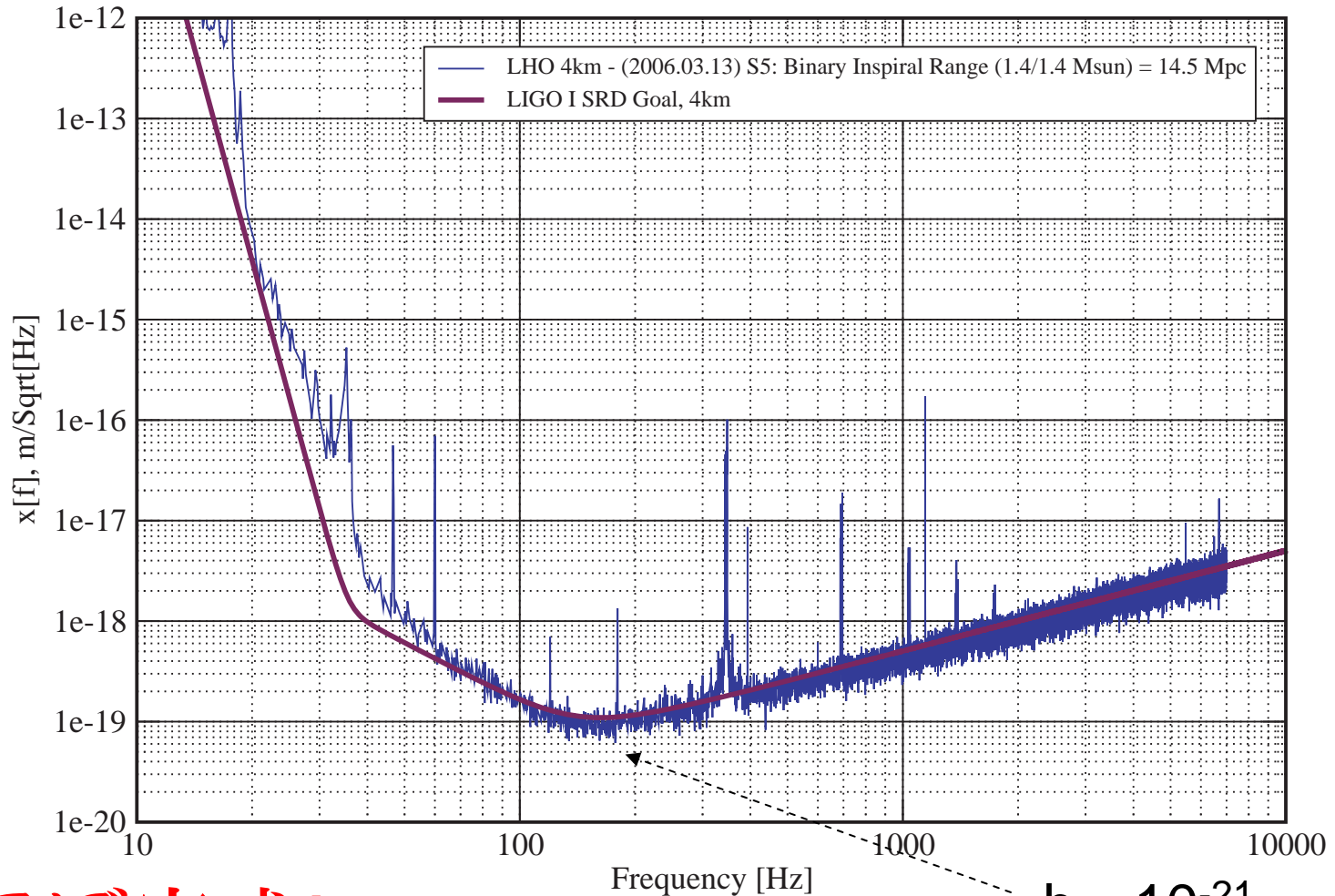
重力波検出器: LIGO, VIRGO, LCGT



初期LIGOの感度の現状

Displacement Sensitivity for the LIGO Hanford 4km Interferometer

Performance for S5 LIGO-G060052-00-E



$h(1/\text{Hz}^{1/2}/\text{m})$

ほぼ完成!

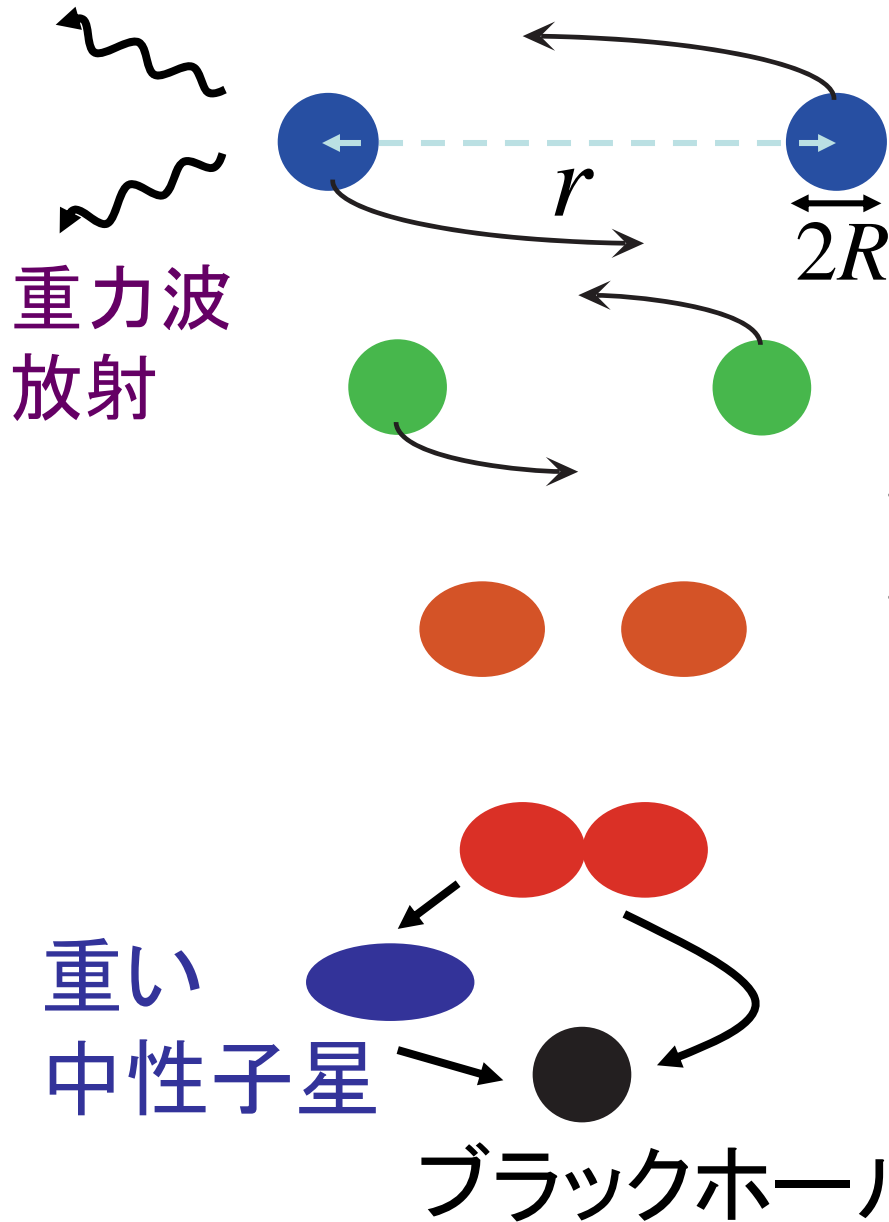
f (Hz)

何が最初のターゲットか？

- 感度：次期LIGOの場合、重力波の振幅 10^{-22} 程度まで検出可能。
- 周波数域：およそ10 Hzから数 kHz。
- 主要ターゲットは、
中性子星やブラックホールからなる
2重星の合体。
- ただし、信号とノイズの比は高々10
⇒ 重力波形の予言が必要

連星中性子星の進化

(質量を $M = 2.8M_{\square}$ と仮定)



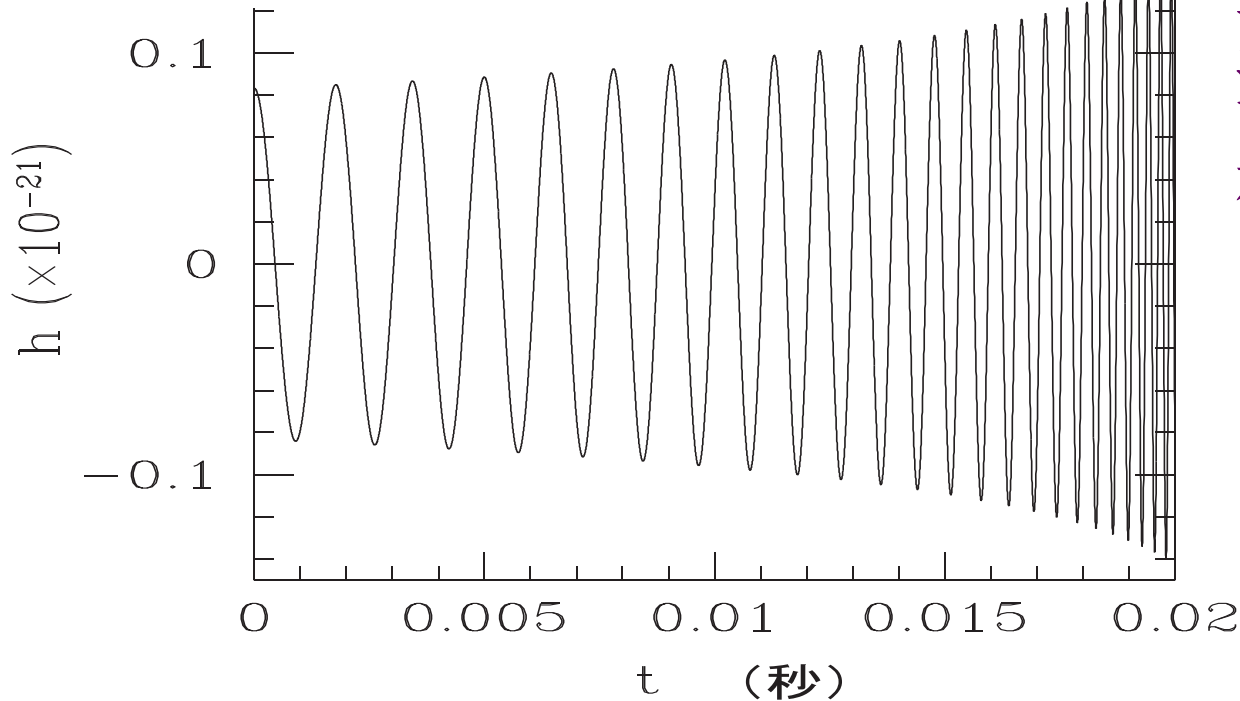
・ゆっくり軌道半径を縮める

$f = 10 \text{ Hz}$ \longleftrightarrow $r = 700 \text{ km}$ から
 $f \sim 1 \text{ kHz}$ \longleftrightarrow 30 km まで
約8,000回転
(~15分)

・約30 kmまで
近づくと合体開始
・重力波周波数 ~ 数 kHz

合体前($10 < f < \sim\text{kHz}$) 合体時($f > \sim\text{kHz}$)

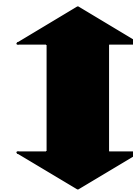
質点近似可能、2体問題



チャープ信号
← 解析的に
計算可能

強重力、非線形、
流体相互作用、
複雑な素過程

?

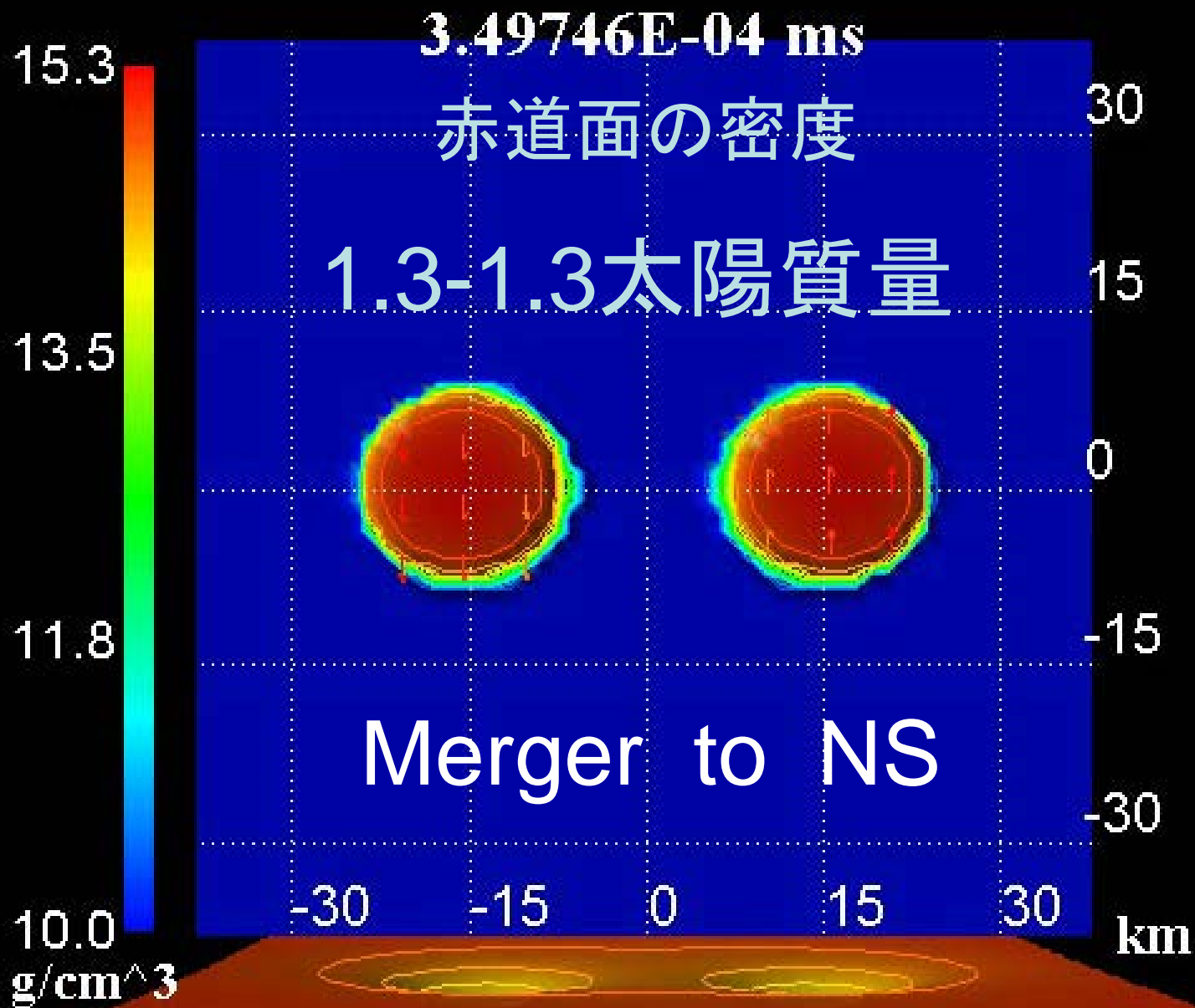


数値計算

合体現象を数値計算で解明するとは

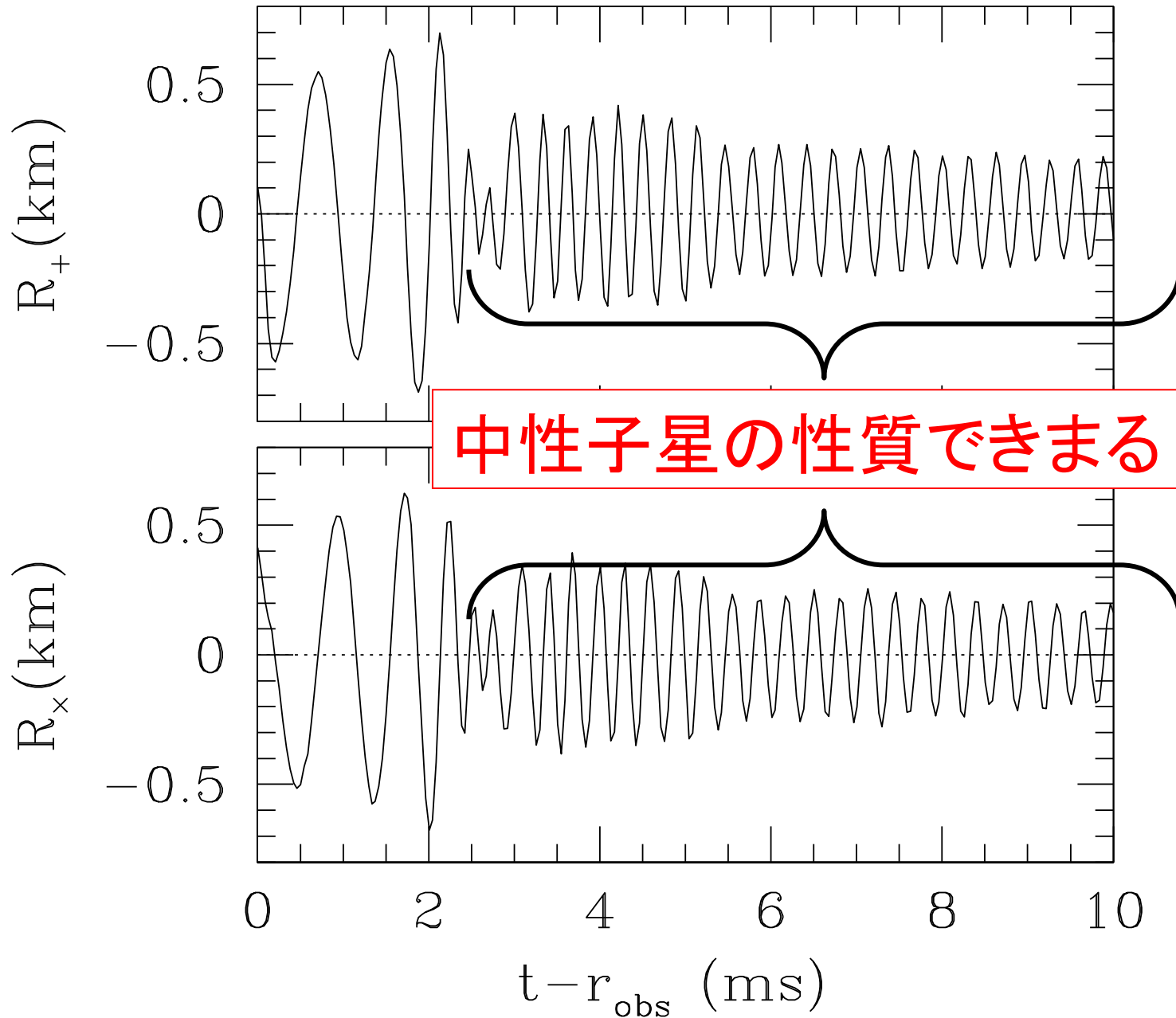
- アインシュタイン方程式を解く
- 物質に対する運動方程式(流体方程式)を解く
- 高密度物質の性質を考慮した状態方程式を採用する
- ニュートリノ放射を考慮する
- 中性子星は磁場がある⇒その効果を考慮する(磁気流体方程式を解く)

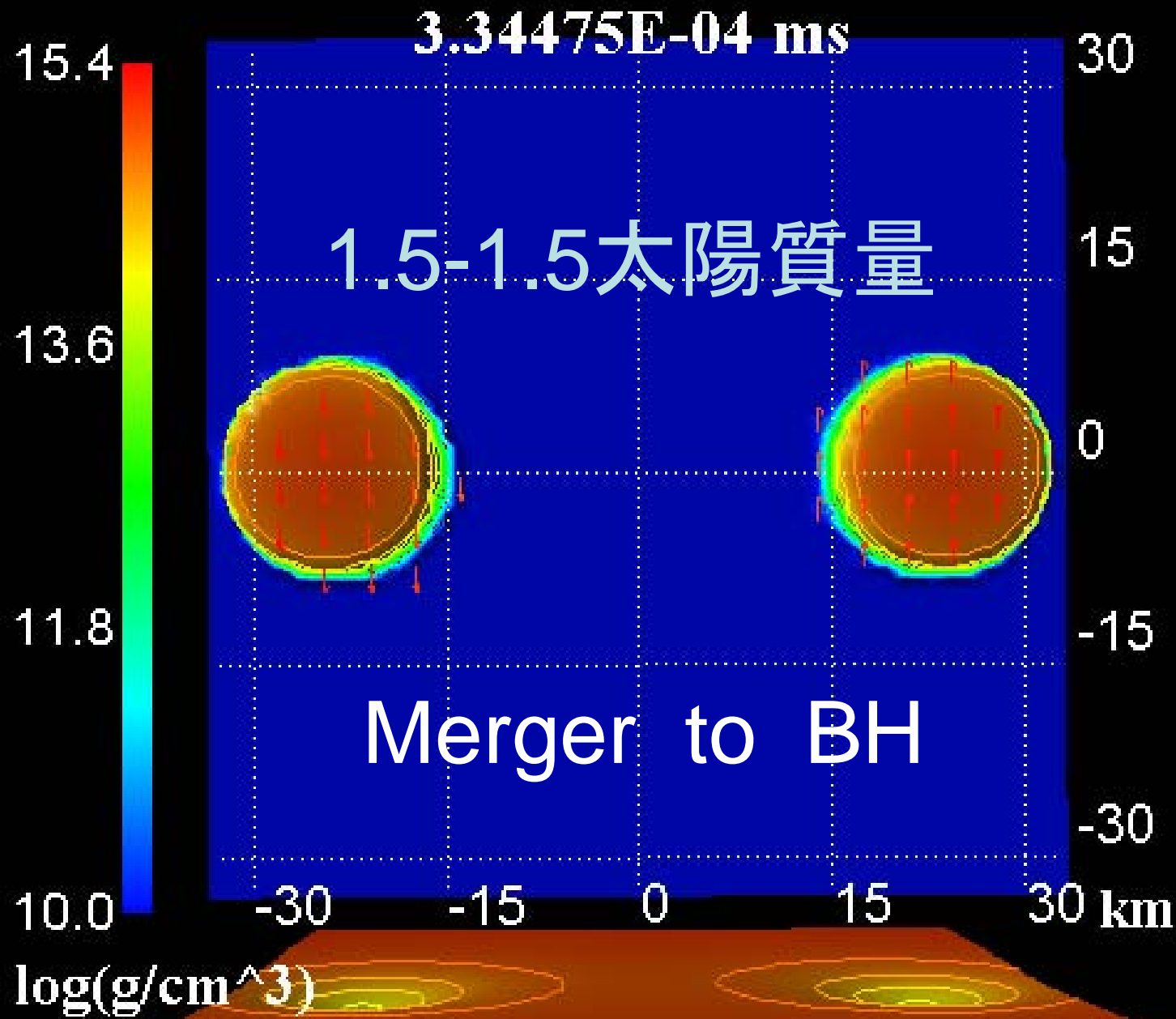
これらを全て考慮して数値シミュレーションを行うのが**数値相対論**



ラプス関数の鳥瞰図～重力ポテンシャル

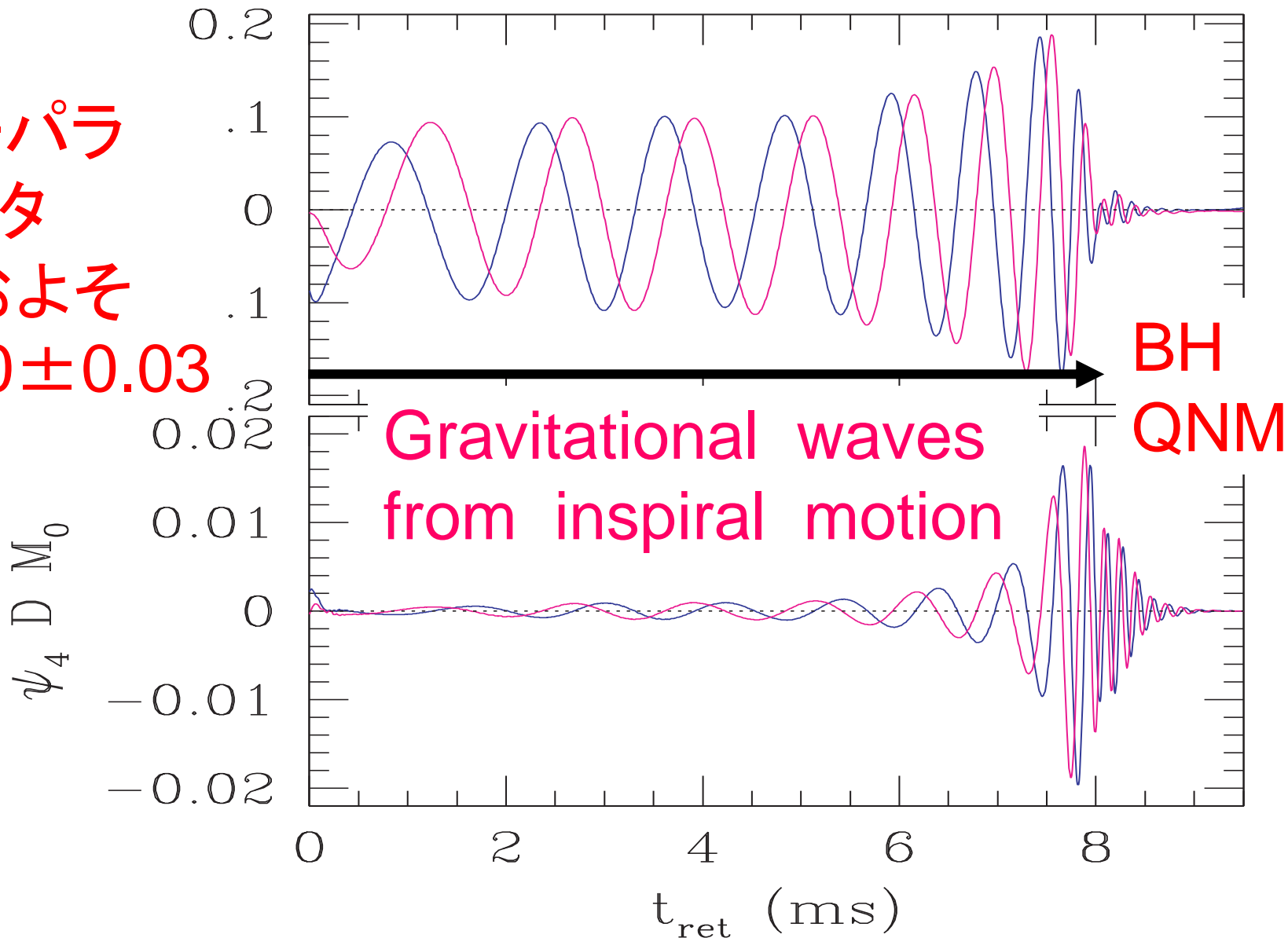
連星中性子星の合体による重力波





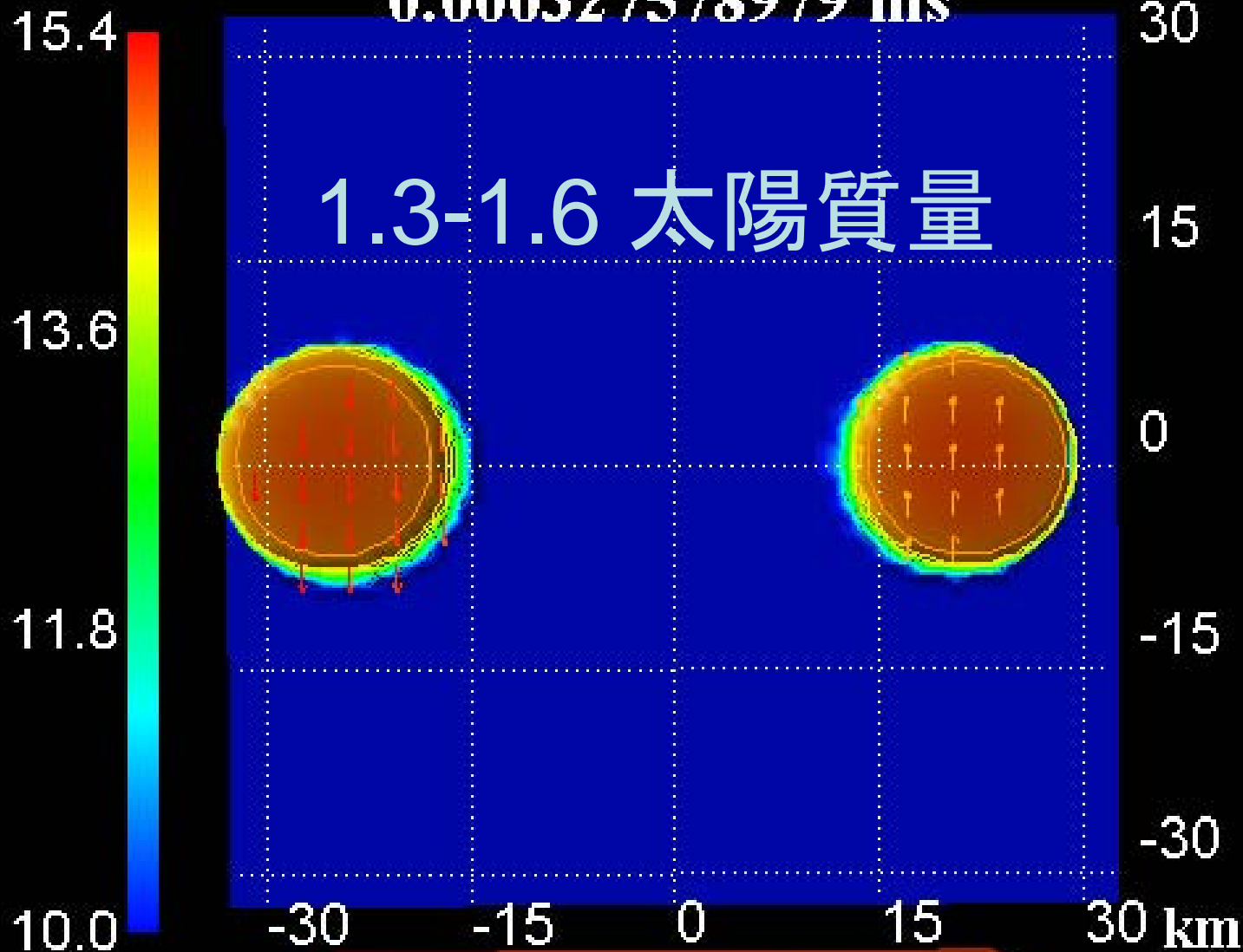
ブラックホール誕生後と重力波

カーパラ
メータ
がおおよそ
 0.80 ± 0.03



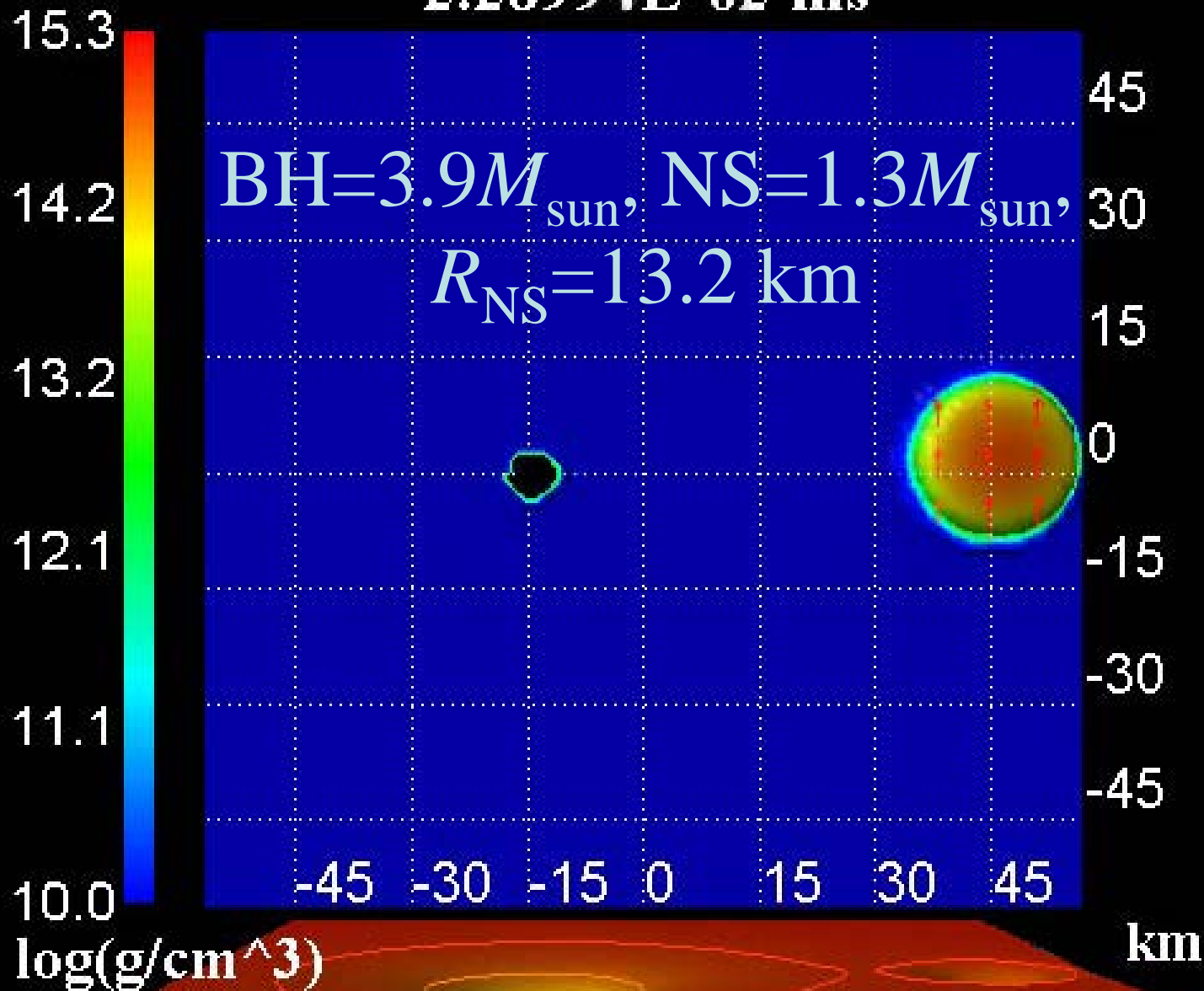
0.000327578979 ms

1.3-1.6 太陽質量

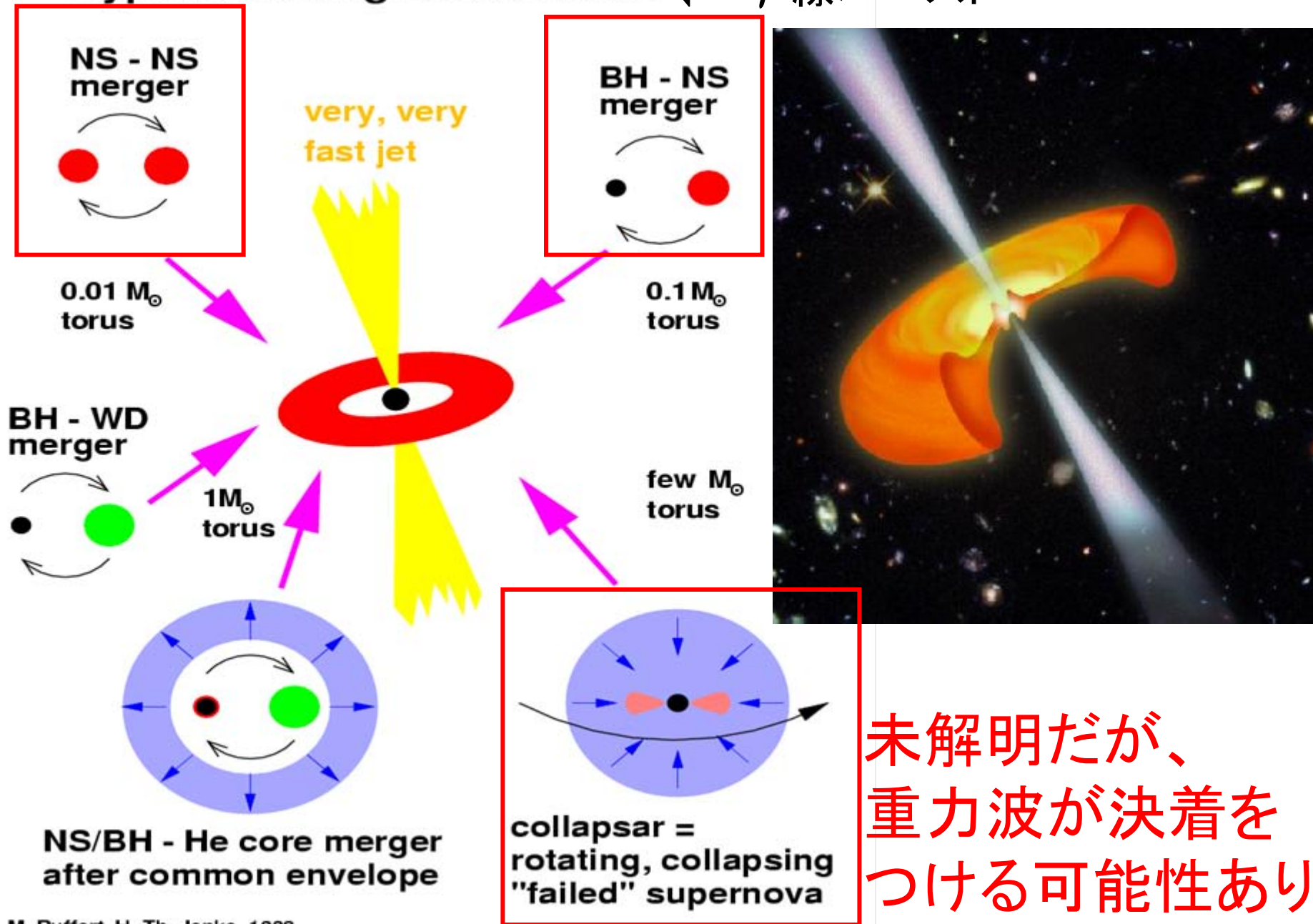


$\log(\text{g/cm}^3)$

2.28994E-02 ms



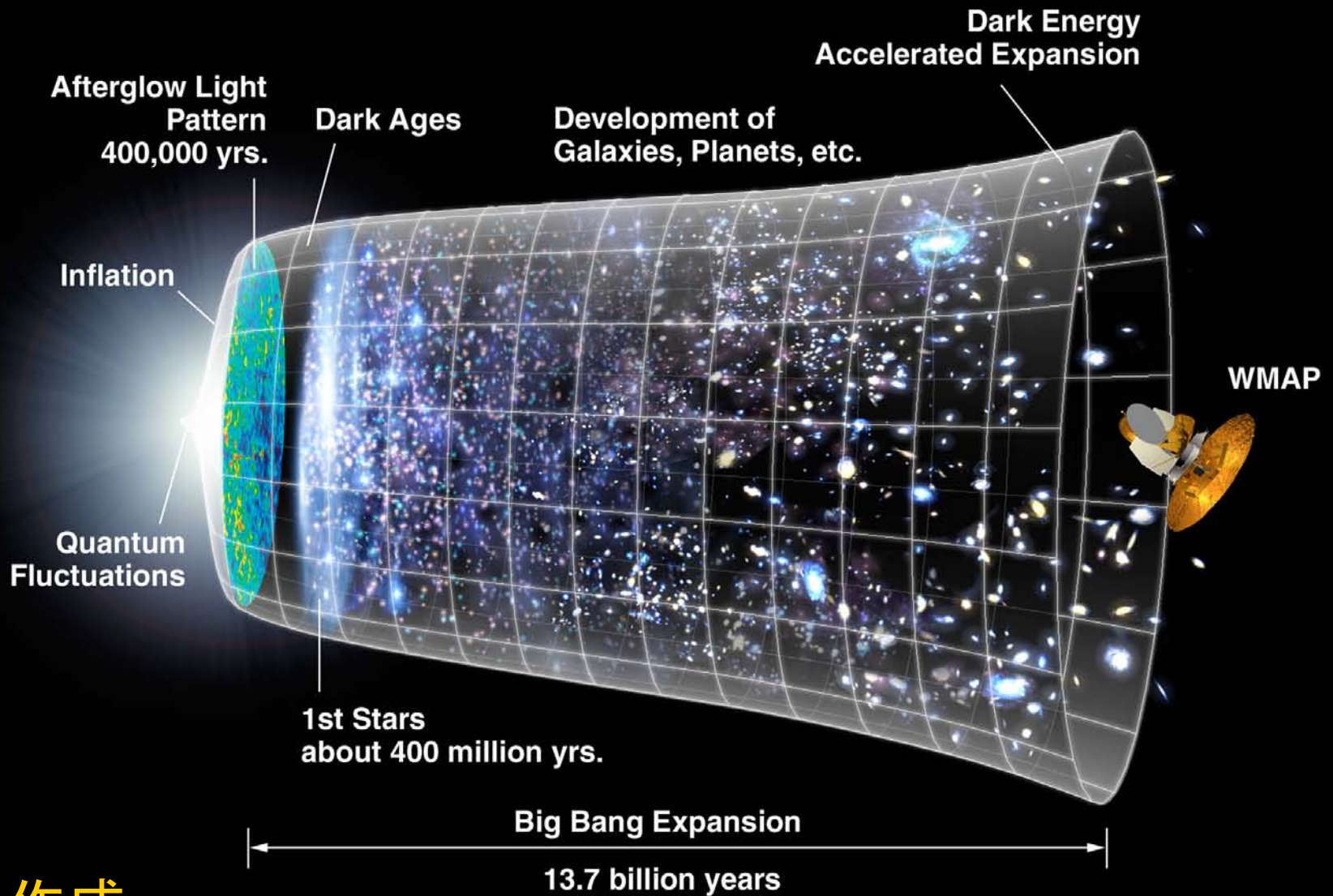
Hyperaccreting Black Holes ← γ 線バースト



未解明だが、
重力波が決着を
つける可能性あり

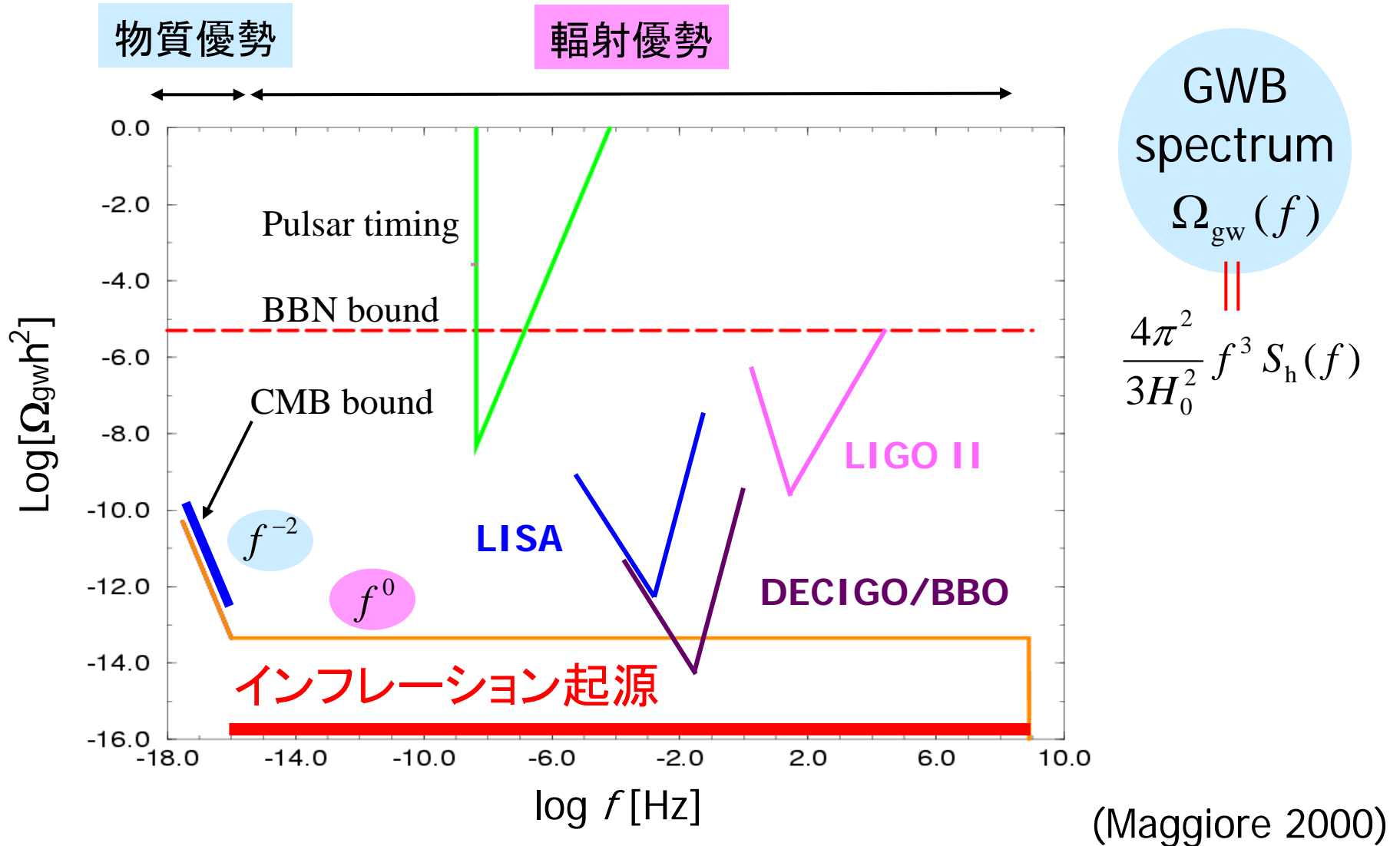
6 まとめ

- ・ 時空のさざ波である重力波は未だに直接検出されたことは無い。しかし、レーザー干渉計を用いて、今後10年以内になされるであろう
- ・ 重力波の直接検出が可能になれば、天文学に応用されるようになる
 - ⇒ 宇宙に関する新たな知見が得られる。
- ・ 重力波形を前もって予言する必要がある
 - ⇒ 数値相対論が現在活躍中。
 - ⇒ 相対論的強重力現象が解明されている。



安東氏作成

背景重力波のエネルギースペクトル



重力波振幅 [Hz^{-1/2}]

