
第23回 ICEPPシンポジウム 特別講義

重力波天文学入門 (1)

安東 正樹

(東京大学 / 国立天文台)

LIGOによる重力波の初観測

- 2016年2月11日 米国の重力波観測所 LIGO (ライゴ) が重力波の初観測を発表：地球から13億光年遠方でのブラックホール連星合体からの重力波信号を観測。



2016年2月11日 新聞各紙の朝刊



Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory

- ⇒ 1. 一般相対性理論と重力波
- * 重力波の性質, 放出
 - * 存在証明
2. 重力波の観測
- * 観測の原理
 - * LIGOによる初観測
 - * KAGRA
3. 相対論の検証と初期宇宙の観測
- * 一般相対性理論の検証
 - * 初期宇宙の観測

重力波って???

- 一般相対性理論と
時空のさざなみ -



From presentation by B Schutz

一般相対性理論

一般相対性理論 (アインシュタイン, 1916)

→ 重力を時空の性質と解釈

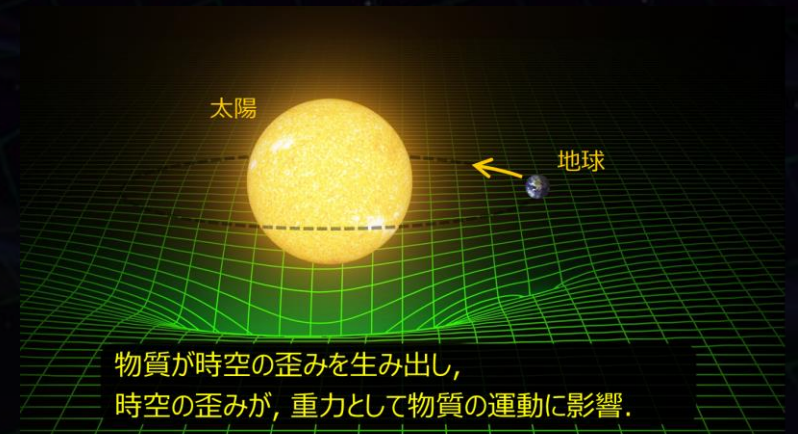


アインシュタイン方程式

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

↑
時空の曲がり
を表す量

↑
物質のエネルギー
(質量, 運動量など)



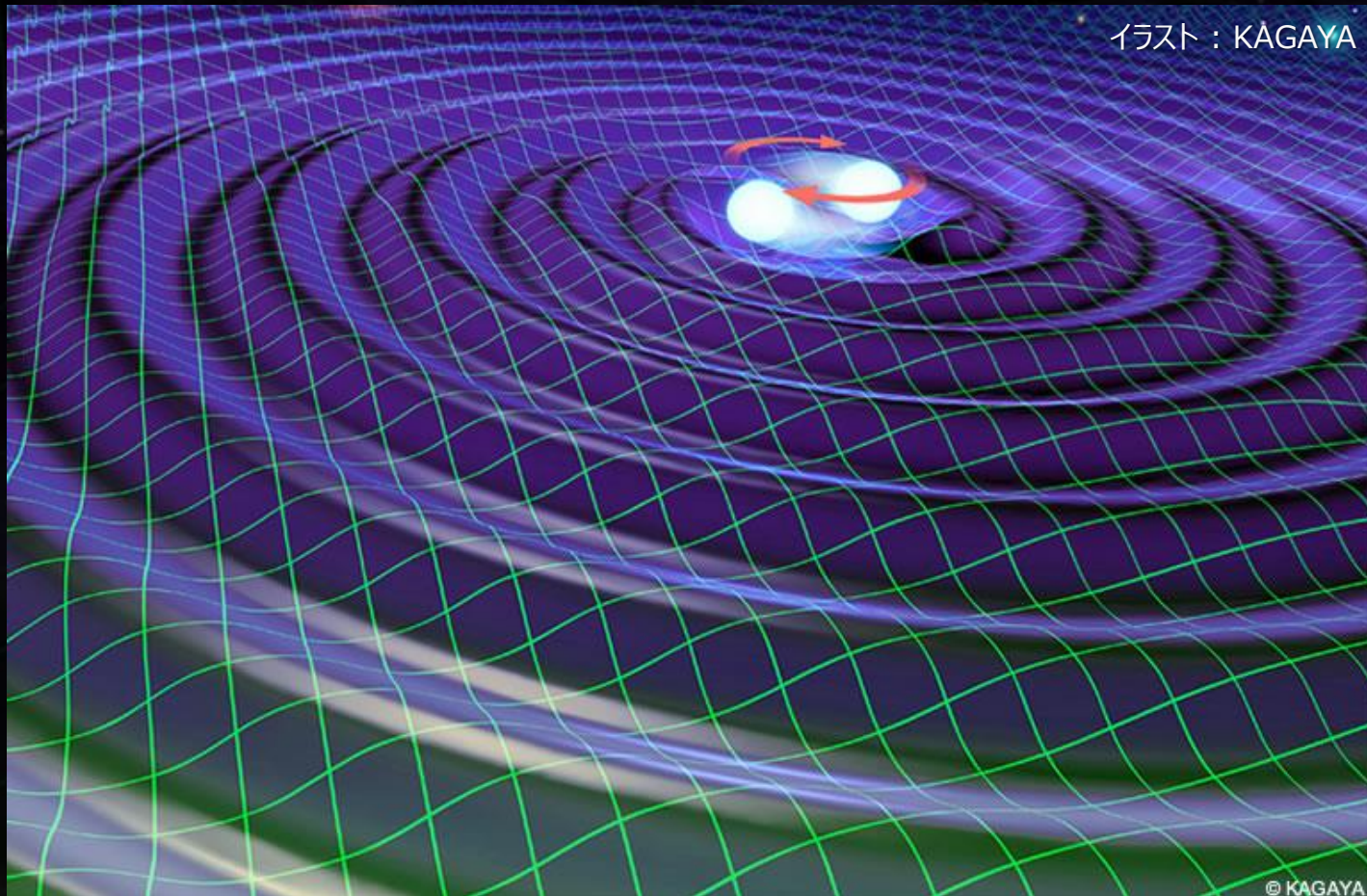
Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory

重力波

物体(天体)の運動, 形状の変化.

→ 時空の歪みが'さざなみ'として伝搬する.

⇒ **重力波**



重力波の振幅

重力波の効果：

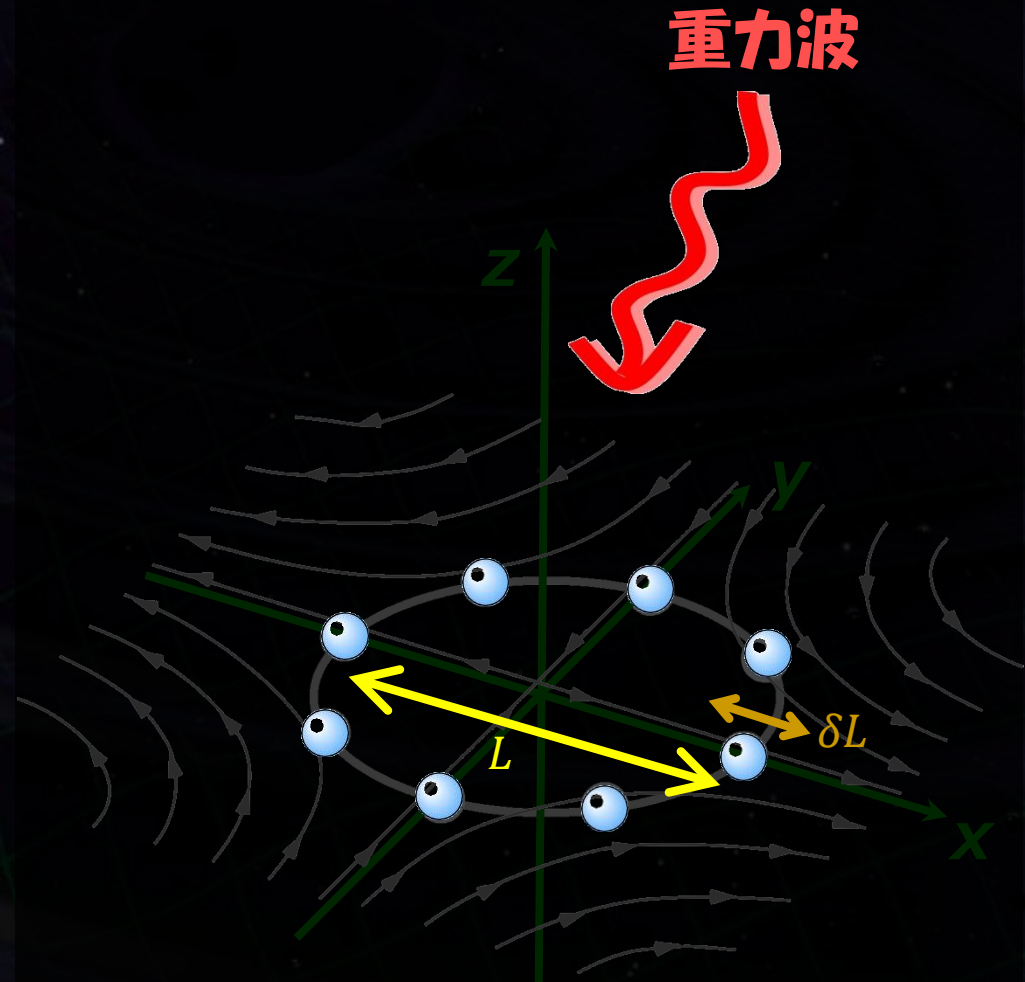
離れた2点間距離の変化

重力波の振幅は、
歪み量 ' h ' で表される。

$$h \sim \delta L / L$$

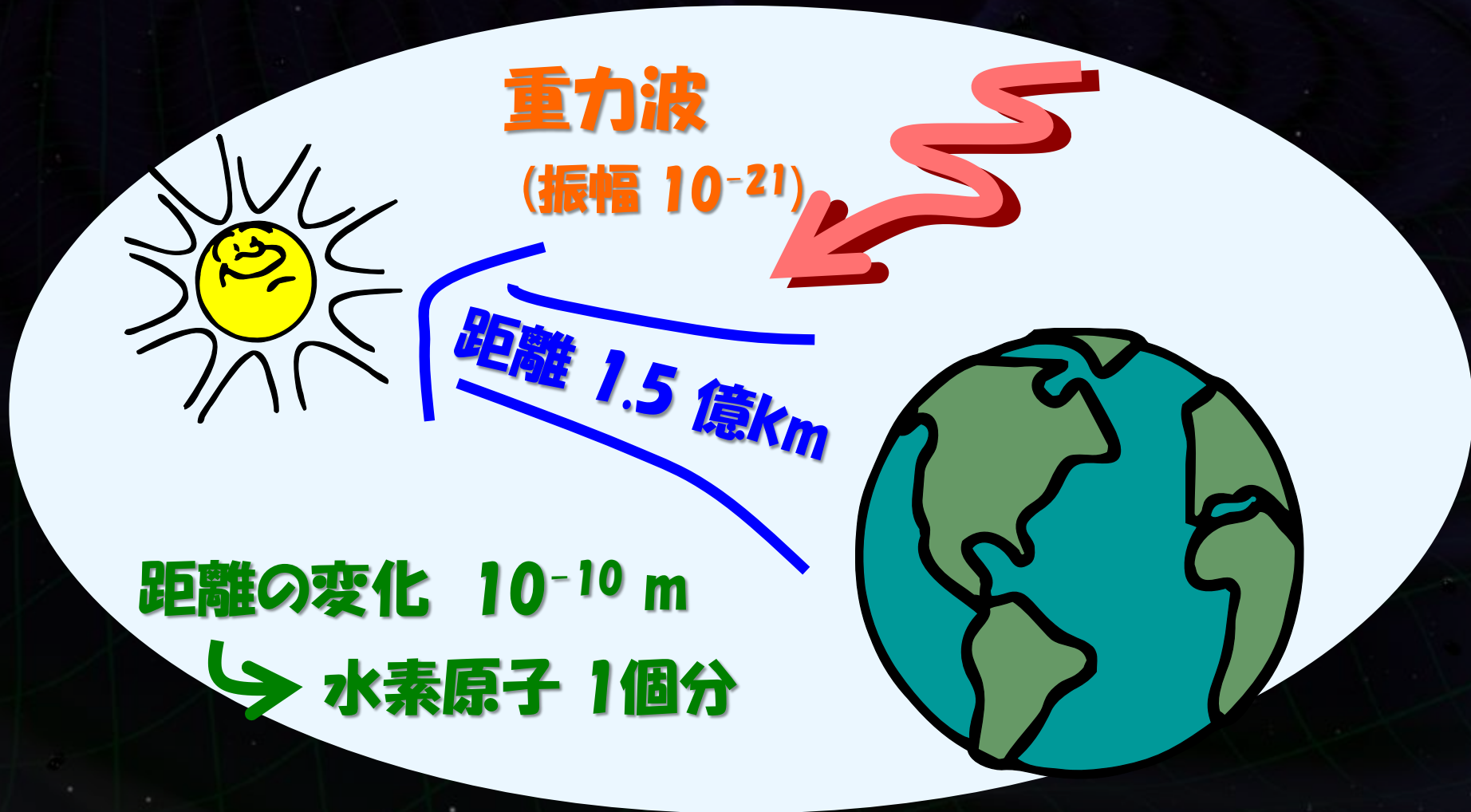
δL : 距離変動

L : 2点間の距離

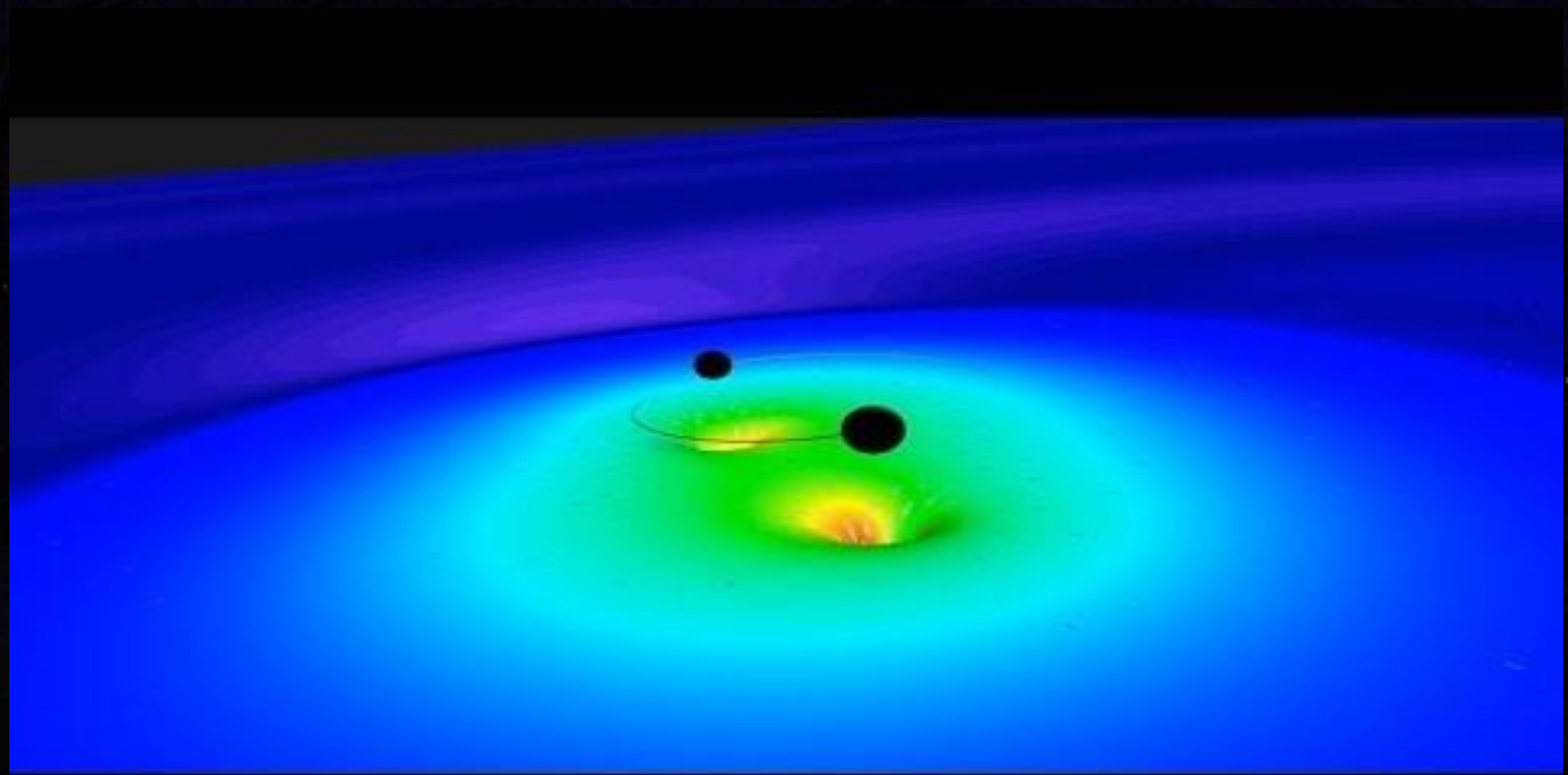


捕まえるのはとても大変

重力波の効果：2点間の固有距離の変化



連星ブラックホールの合体からの重力波



Simulation by the SXS (Simulating eXtreme Spacetimes) Project (<http://www.black-holes.org>).

<https://youtu.be/1agm33iEAuo>

Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory

曲った時空

時空の幾何は、微小距離離れた2点間の線素に集約。

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

↑
4次元線素

↑
計量テンソル
(Metric Tensor)



アインシュタイン テンソル $G_{\mu\nu}$ も
(アインシュタイン方程式の左辺)
計量テンソル $g_{\mu\nu}$ を用いて表わされる。

4次元直交座標

$$dx^0 = cdt, \quad dx^1 = dx$$

$$dx^2 = dy, \quad dx^3 = dz$$

4次元の平坦な時空

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -1 & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

重力波とその伝播

平坦な時空からの摂動

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

↑ ↑
平坦な時空 微小な曲率



真空中の波動方程式

(線形化されたアインシュタイン方程式)

$$\square h_{\mu\nu} = 0$$

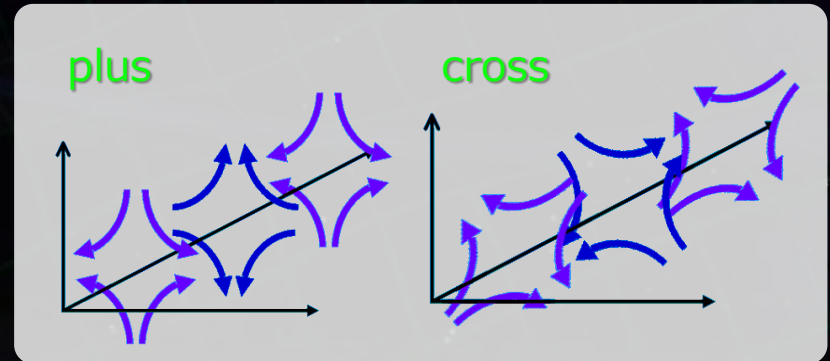
平面波解 (横波) : 重力波

$$h_{ij} = A_{ij} \times \exp [i(\omega t - kz)]$$

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2つの偏波 :

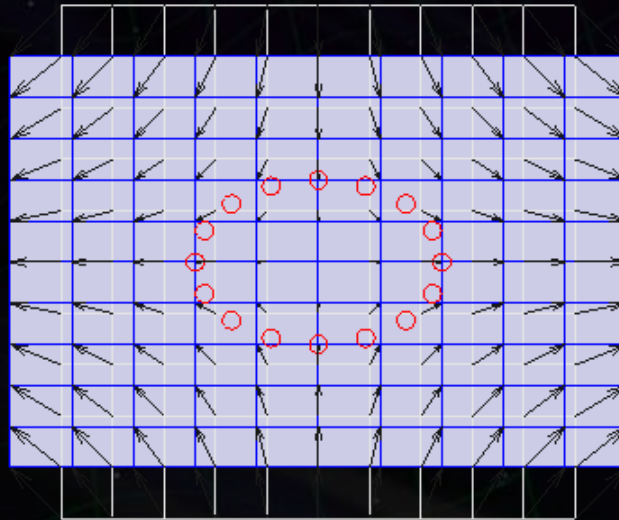
Plus mode, Cross mode



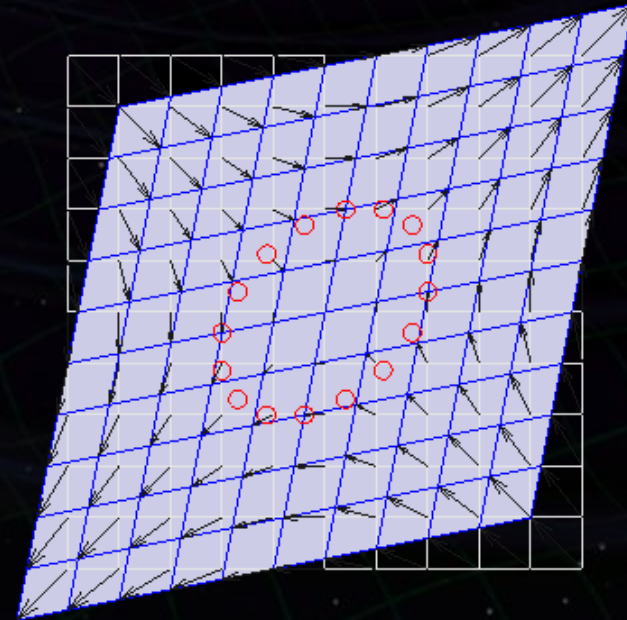
重力波の2つのモード

画面垂直方向から重力波が入射したときの空間の歪み.

プラスモード (h_+)



クロスモード (h_x)



重力波の振幅 h : 2点間の距離が $L \rightarrow L(1+h/2)$ と変化.

重力波の効果

真空中の伝播

$$\square h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \rightarrow \square h_{\mu\nu} = 0$$

➡ 平面波解 (横波)

$$h_{ij} = A_{ij} \times \exp [i(\omega t - kz)]$$

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

2つの偏波: Plus mode, Cross mode

自由質点に対する作用:

2点間の固有距離の変化

$$\xi' = \int_{P_1}^{P_2} |g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu|^{1/2} \simeq \left[1 + \frac{1}{2} h \right] \xi$$



重力波の発生

アインシュタイン方程式の線形化

平坦な時空からの摂動

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

平坦な曲率

微小な曲率

⇒ 波動方程式

$$\square h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



Slow Motion
近似

重力波の発生

$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}_{ij}$$

四重極モーメントの
時間2階微分

$$\begin{aligned} \ddot{I}_{ij} &\sim \frac{(\text{Mass}) \times (\text{System size})^2}{(\text{System transit time})^2} \\ &\sim (\text{Quadrupole kinetic energy}) \end{aligned}$$

重力波の発生

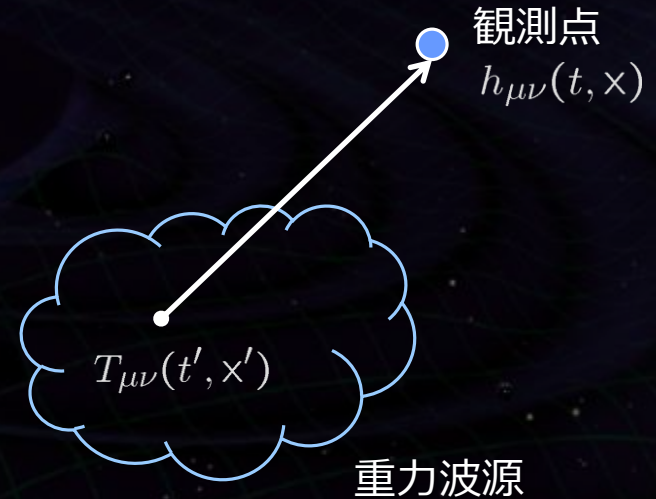
線形化されたアインシュタイン方程式

$$\square h_{\mu\nu} = -2\kappa T_{\mu\nu} \quad \left[\kappa = \frac{8\pi G}{c^2} \right]$$

遅延解

$$h_{\mu\nu} = \frac{\kappa}{2\pi} \int \frac{[T_{\mu\nu}(t', \mathbf{x}')]_{\text{ret}}}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} dV'$$

($t' = t - |\mathbf{x} - \mathbf{x}'|/c$)



低速度, 十分遠方
として近似

$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}_{ij} \quad \left[I_{ij} = \int \rho \left(x_i x_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} r^2 \right) dV' \right]$$

四重極モーメントの
時間2階微分

質量分布の四重極モーメント

波源のエネルギー・運動量保存側 → 双極子放射はない
(波源での双極子モーメントが0になる座標がある)

電磁波と重力波

電磁波

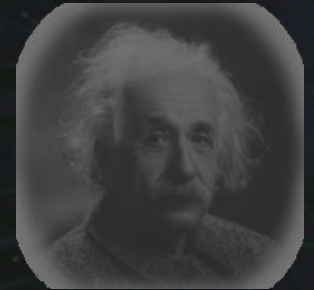
- 光速で伝播する
電磁場の変動
- 電磁気学：
マクスウェル方程式の波動解
- 電荷の加速度運動により生成
- 物質による 吸収, 散乱



J.C. Maxwell

重力波

- 光速で伝播する
時空の歪み
- **一般相対性理論**：
アインシュタイン方程式の波動解
- 質量の加速度運動により生成
- 物質に対して **強い透過力**



A. Einstein

参考：電磁波の放射

- Maxwell方程式を電磁ポテンシャルで表現.

電場と磁束密度を電磁ポテンシャル \mathbf{A} と ϕ で書く.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A} - \nabla \phi$$

このとき, Maxwell方程式は,

$$\text{ベクトルポテンシャル:} \quad \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{j}$$

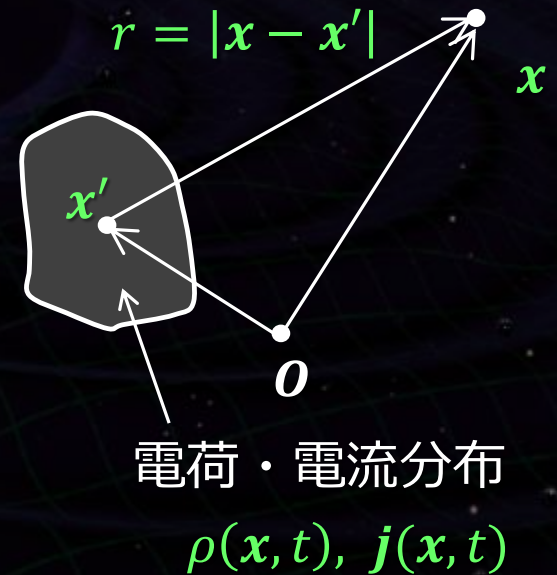
$$\text{スカラーポテンシャル:} \quad \left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \phi = -\frac{1}{\epsilon_0} \rho$$

$$\text{Lorentz条件:} \quad \nabla \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$$

と書きあらわされる.

参考：電磁波の放射（遅延ポテンシャル）

- せまい領域にある電荷・電流分布によって、無限に広がった真空空間に生じる電磁波。



遅延ポテンシャル

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int d^3 \mathbf{x}' \frac{\mathbf{j}(\mathbf{x}', t')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}$$

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3 \mathbf{x}' \frac{\rho(\mathbf{x}', t')}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|}$$

ただし $t' = t - \frac{r}{c}$

参考：電磁波の電気四重極放射

* 多重極展開 → 電気四重極による成分：電気四重極放射

$$\phi_2^{(e)}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{8\pi\epsilon_0 c^2} \left[\frac{\ddot{Q}(t-\frac{r}{c})}{r} \right]_{\text{ret}}, \quad A_2^{(e)}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{8\pi c} \left[\frac{\ddot{Q}(t-\frac{r}{c})}{r} \right]_{\text{ret}}$$

これらから,

$$\mathbf{E}_2^{(e)}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{8\pi c} \frac{\mathbf{x} \times (\mathbf{x} \times \ddot{\mathbf{Q}}(t-\frac{r}{c}))}{r^3}, \quad \mathbf{B}_2^{(e)}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mu_0}{8\pi c^2} \frac{\ddot{\mathbf{Q}}(t-\frac{r}{c}) \times \mathbf{x}}{r^2}$$

ただし, $Q(t)$ は電気四重極モーメント

$$Q(t) = \int \left[(\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{x}')(\mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{x}') - \frac{1}{3} \mathbf{x}'^2 \right] \rho(\mathbf{x}', t) d^3 x'$$

$$\mathbf{Q} = \int \left[\mathbf{x}'(\mathbf{x}' \cdot \mathbf{n}_0) - \frac{1}{3} \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{x}'^2 \right] \rho d^3 x'$$

$$(Q = \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{Q})$$

重力波の振幅と周波数

重力波の振幅

$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}_{ij} \quad \left[I_{ij} = \int \rho \left(x_i x_j - \frac{1}{3} \delta_{ij} r^2 \right) dV' \right]$$

重力波振幅

--- 波源の四重極運動エネルギーに比例

$$\ddot{I}_{ij} \sim \frac{(\text{Mass}) \times (\text{System size})^2}{(\text{System transit time})^2}$$

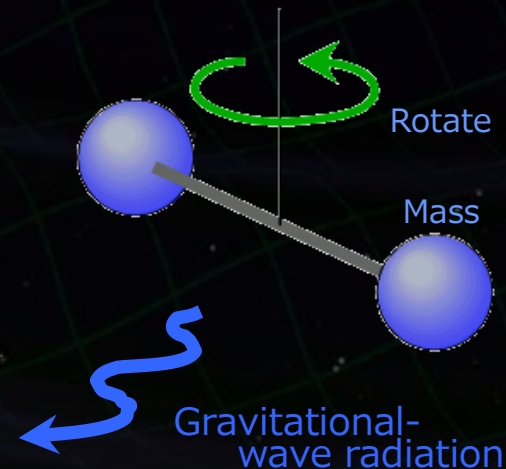
~ (Quadrupole kinetic energy)

重力波の周波数

4重極モーメントの時間変動のスケール

$$f_{\text{GW}} \sim \frac{(\text{System velocity})}{(\text{System size})}$$

回転体の場合 --- 回転周期の2倍



人工的な重力波の生成

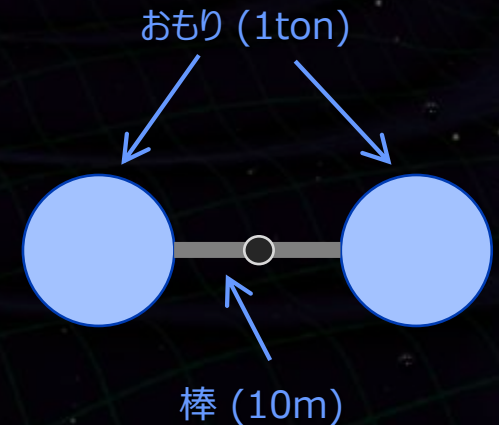
重力波は、重たい物体の激しい運動で生成。

→ 人工的な重力波生成 を考えてみる。

質量 1ton のおもりを長さ 10m
の棒でつないだダンベルを、
1秒間に10回転させる。



周波数 20Hz (回転周波数の倍) で
振幅 $h \sim 10^{-45}$ の重力波が発生。



天体からの重力波

連星の運動で生じる重力波.

太陽の 1.4倍 の質量をもつ2つの
中性子星が, 20km 離れて公転.
1秒間に400回転する.



7000万光年(20 Mpc)遠方にあるとき,
周波数 800Hz で 振幅 $h \sim 10^{-21}$
の重力波が地球に届く.



重力波のエネルギー

4重極公式

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{GW}} = \frac{G}{5c^5} \left\langle \frac{d^3 I_{ik}}{dt^3} \cdot \frac{d^3 I_{jk}}{dt^3} \right\rangle$$

ここで $L_0 \equiv \frac{c^5}{G} = 2 \times 10^5 M_{\odot} c^2/s$ という大きな値

連星からの重力波放射

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{GW}} = \frac{32G^4 \mu^2 M^3}{5c^5 R^5}$$

連星の全質量 $M = m_1 + m_2$

換算質量 $\mu = m_1 m_2 / M$

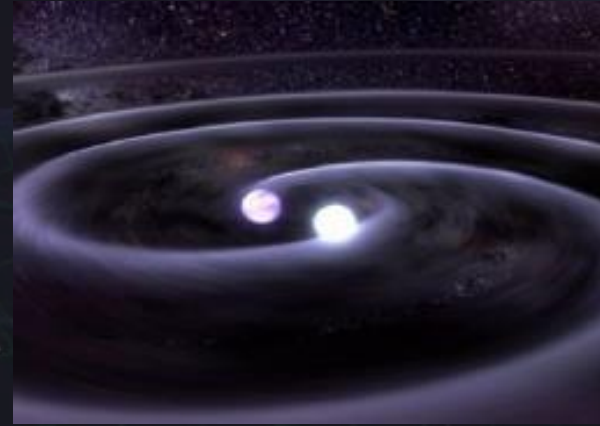
軌道半径 R

(例) 連星合体からの重力波

コンパクト連星からの重力波

重力波振幅 $h \sim \frac{4G^2}{c^4 r} \frac{m_1 m_2}{R}$

Separation Mass



周波数 $f \sim \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{G(m_1 + m_2)}{R^3}}$



準定常的な正弦波形 → チャープ波 → 合体時のバースト波 → リングダウン波

(例) 連星合体からの重力波

チャープ波

時間と共に振幅・周波数が増大していく。
→最終的に合体, BHになる.

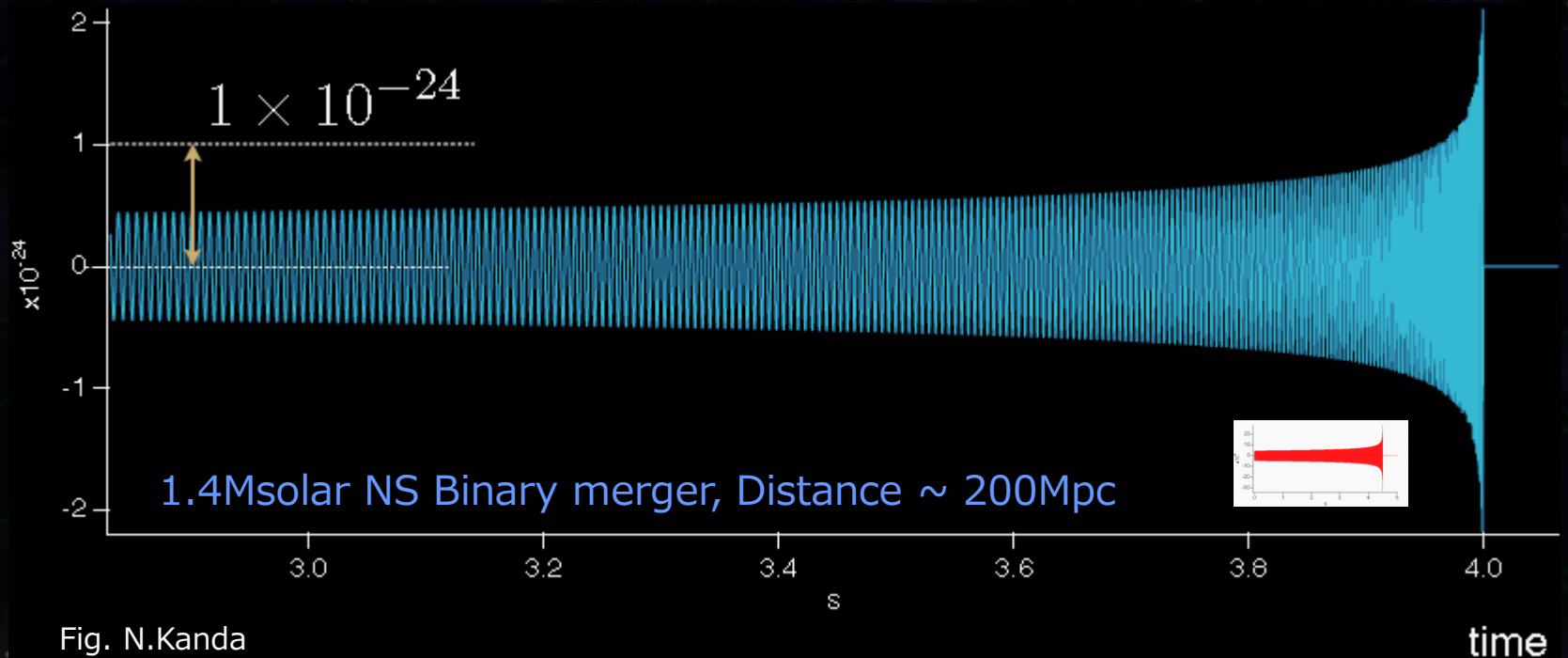
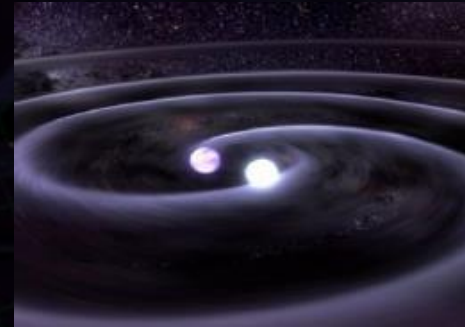


Fig. N.Kanda

主な重力波源

	短時間 (重力波イベント)	長時間 (定常重力波)
波形 予測可能	 <p>連星の合体 → チャープ波</p> <p>ガンマ線 バースト</p>	 <p>パルサー, LMXB → 連続波</p>
波形が 予測できない	 <p>超新星爆発 → バースト波</p>  <p>ソフトガンマ線 リピータ</p>	 <p>背景重力波 → 定常ランダム波</p>

重力波はある???

- 観測による証明 -



連星パルサーの発見と観測

1974年 R・ハルス, J・テイラー
連星パルサー-PSR B1913+16 の発見

公転周期： 7.75時間
質量： パルサー 1.44 Msolar
 伴星 1.39 Msolar
公転周期の変化率：
 $(-2.4056 \pm 0.0051) \times 10^{-12} \text{s/s}$



その後の継続的な観測

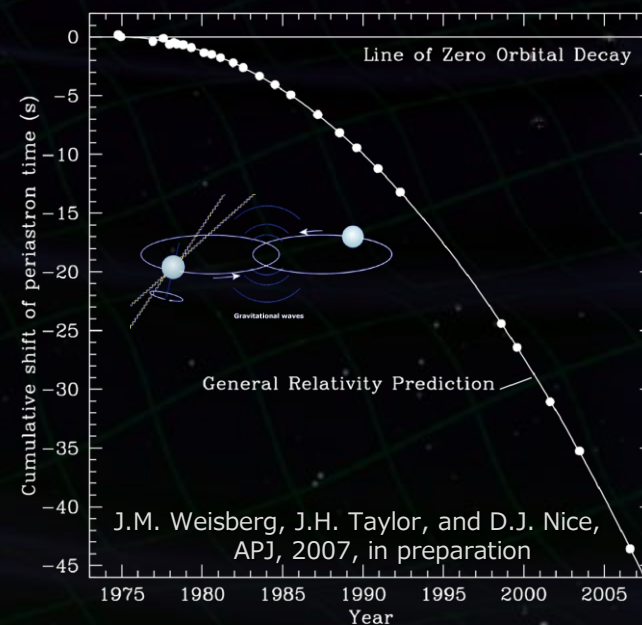
重力波の放出

→ 公転エネルギーを失い, 互いに落ち込む

一般相対性理論による理論値：
 $(-2.40242 \pm 0.00002) \times 10^{-12} \text{s/s}$
理論と観測の差は0.2%程度



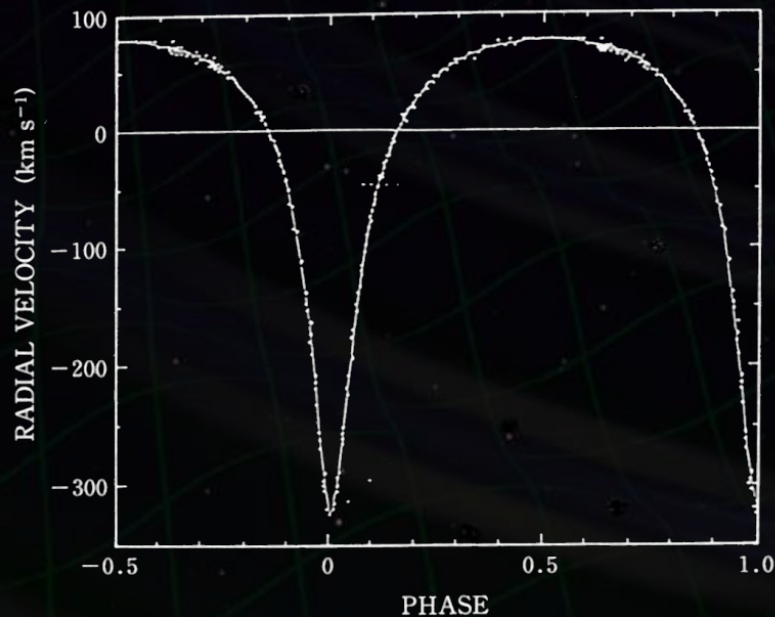
重力波の存在の証明
(1993年ノーベル物理学賞)



連星パルサーの発見と観測

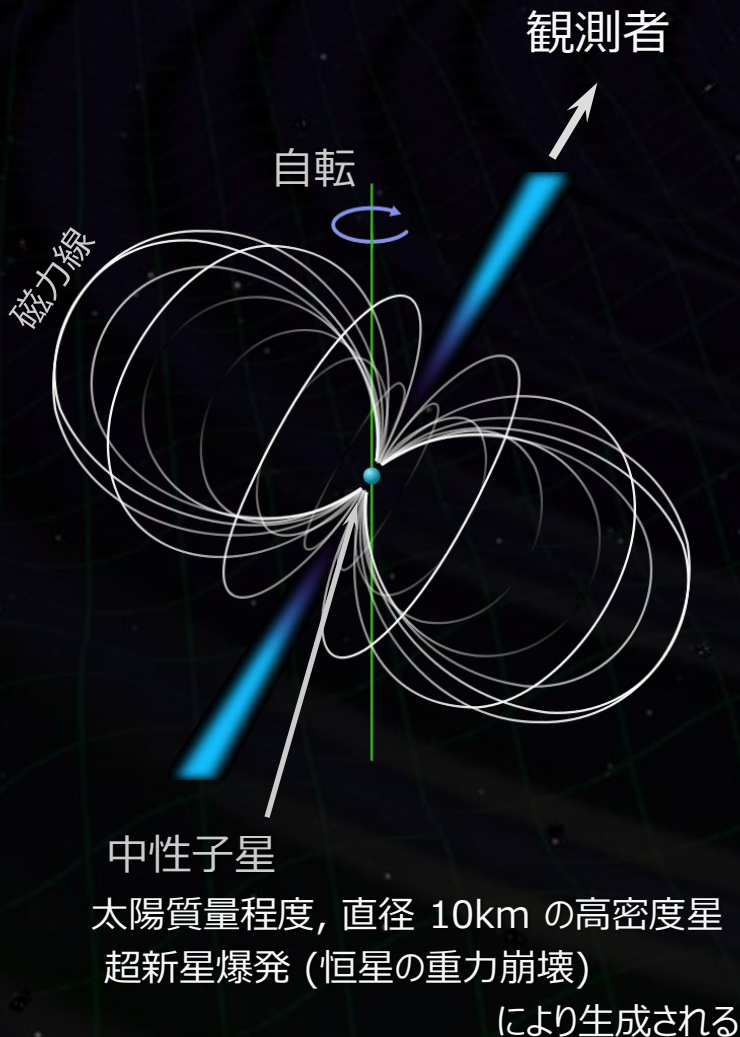
連星パルサーPSR B1913+16 の発見
(1974年 ラッセル・ハルス, ジョゼフ・テイラー)

伴星によるドップラーシフトの効果
→ パルス周期の規則的な変化.



公転周期 : 7.75時間
質量 : パルサー 1.44 Msolar
 伴星 1.39 Msolar
公転周期の変化率 :
 $(-2.4056 \pm 0.0051) \times 10^{-12} \text{s/s}$

パルサー・中性子星



電波パルサー

高速で回転する中性子星

強い磁場のため、磁極方向に
電波ビームを放射している

→ 周期的な電波パルスが観測できる

自転周期 1m秒 – 数秒 程度

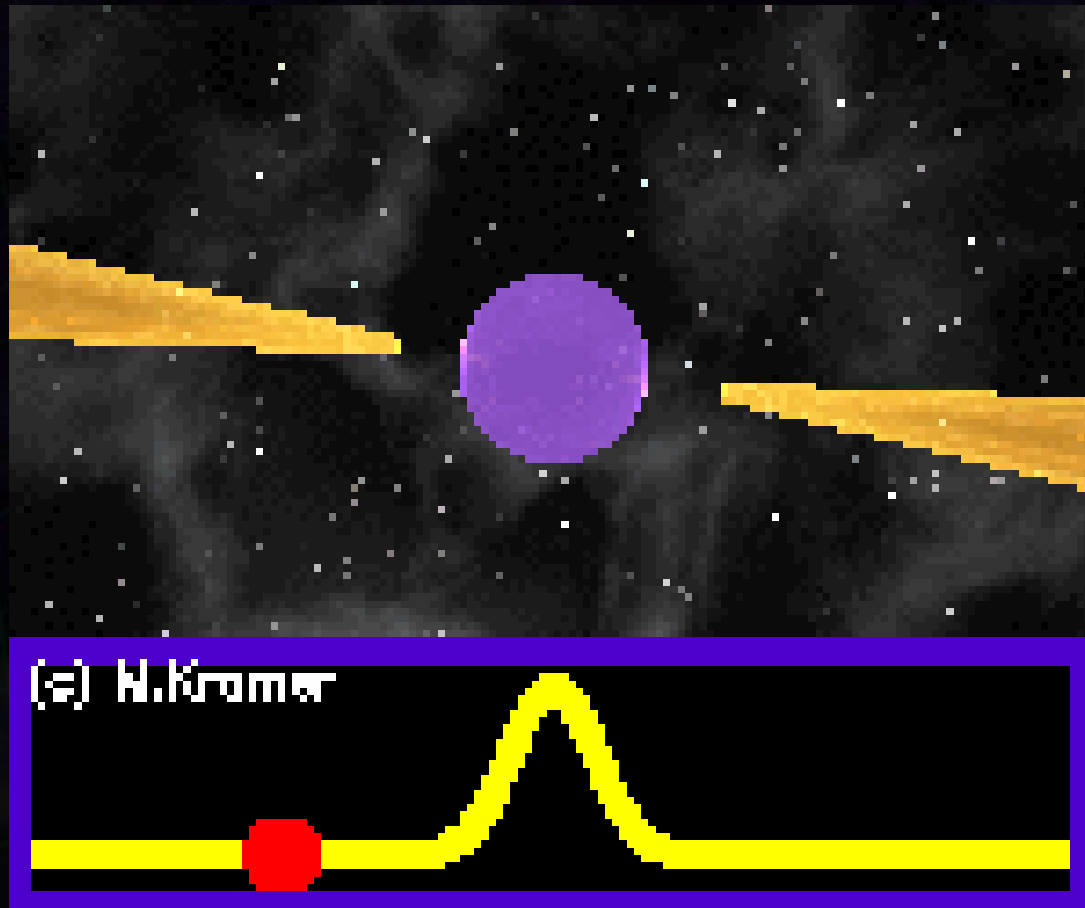
精度の良い 時計 となる

PSR1855+09 5.36… msec

PSR1937+21 1.55… msec

など、15桁の精度

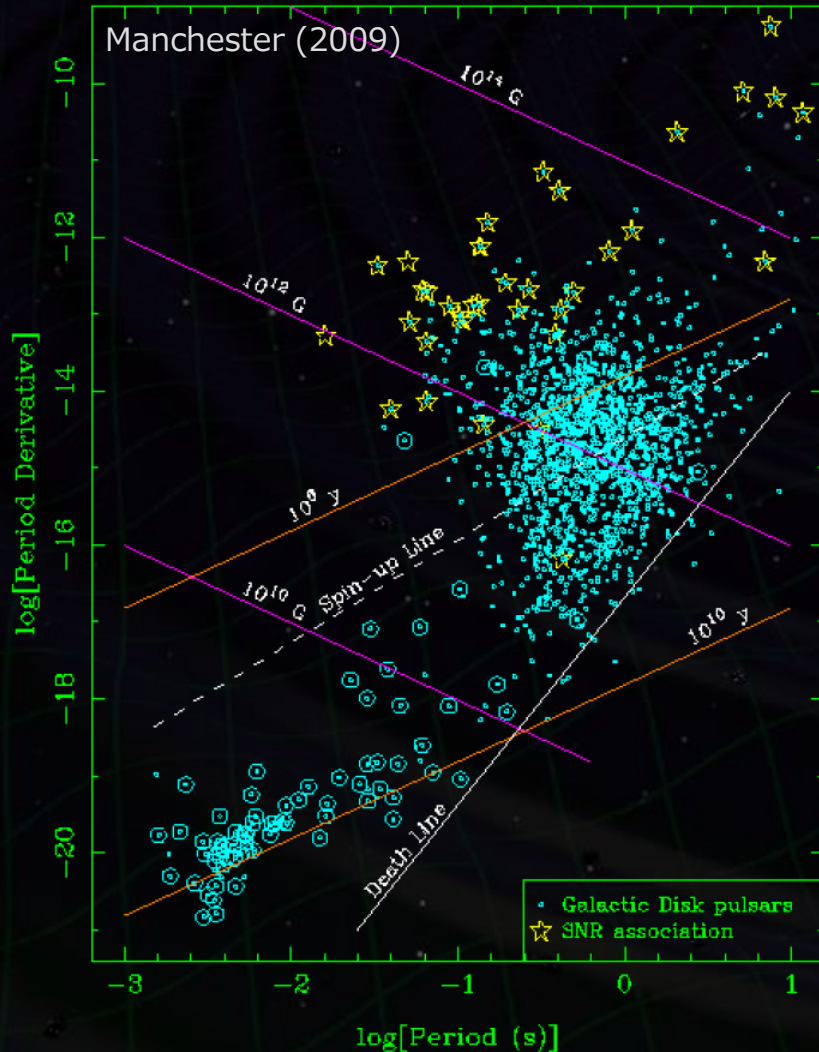
Lighthouse model



Duncan R. Lorimer , Living Rev. Relativity 11 (2008) 8

Animation designed by Michael Kramer. <http://www.livingreviews.org/lrr-2008-8>

パルサー



1967年 ベル, ヒューイッシュ
によって最初に発見
現在までに 約1800個が発見されている

- Most pulsars have $dP \sim 10^{-15}$
- MSPs have dP smaller
by about 5 orders of magnitude
- Most MSPs are binary
- Only a few percent of normal
pulsars are binary
- $P/(2 dP)$ is an indicator of pulsar age
- Most young pulsars are associated
with supernova remnants

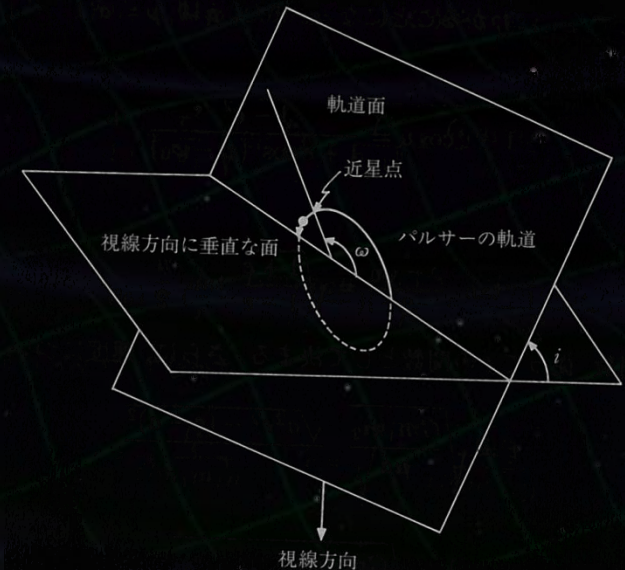
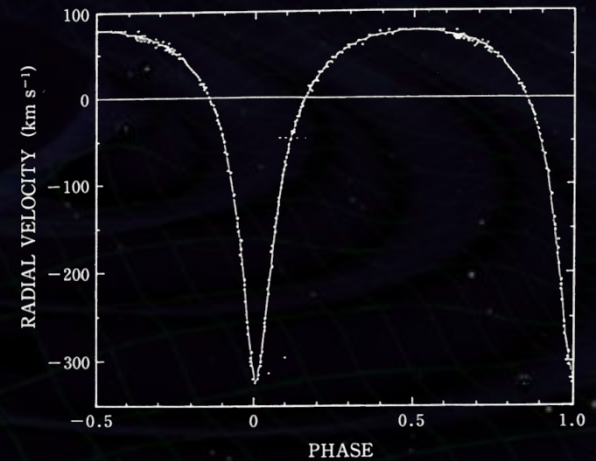
軌道要素の決定

視線方向の速度曲線をもとに
ケプラー運動より軌道要素を決定

公転周期 7.75時間
(27908 ± 7 sec)
離心率 0.615 ± 0.010
視線速度の振幅 199 ± 5 km/sec
視線方向の軌道長半径
 $a_1 \sin i = 1.00 \pm 0.02$ 太陽半径



中性子星とコンパクト天体
(中性子星・BH) の連星系
→ 相対性理論の実験場



相対論的効果

ポストケプラーパラメータの見積もり

近日点の移動

$$\dot{\omega} = 2.10 \left(\frac{m_1 + m_2}{M_{\odot}} \right)^{2/3} \text{ [deg/yr]}$$

重力赤方偏移

$$\gamma = 2.96 \left(\frac{m_1 + 2m_2}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{m_2}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{m_1 + m_2}{M_{\odot}} \right)^{-4/3} \text{ [msec]}$$

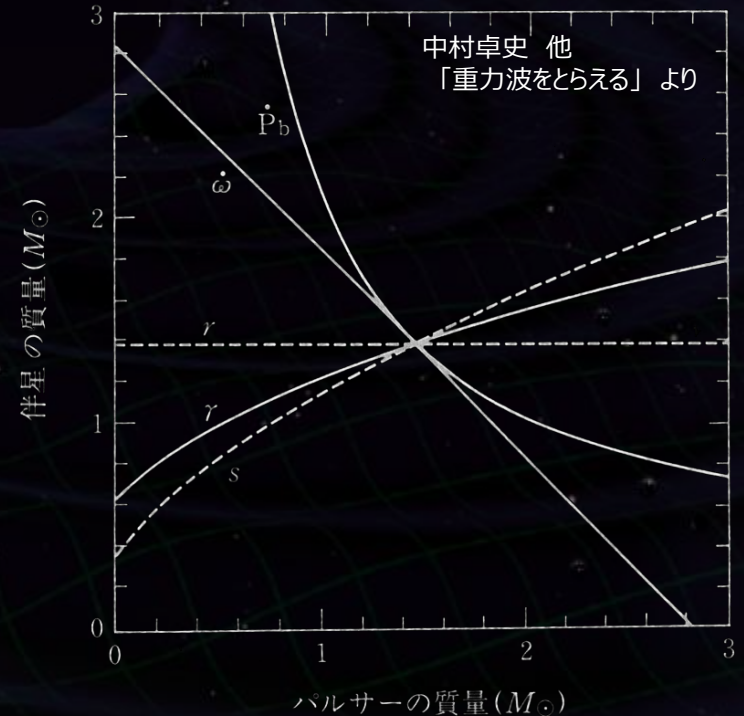
シャピロ時間遅れ

$$r = 5 \left(\frac{m_2}{M_{\odot}} \right) \text{ [\mu sec]}$$

$$s = 0.51 \left(\frac{m_2}{M_{\odot}} \right)^{-1} \left(\frac{m_1 + 2m_2}{M_{\odot}} \right)^{2/3}$$

重力波放出による公転周期減少

$$\dot{P}_b = -54.6 \left(\frac{m_1}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{m_2}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{m_1 + m_2}{M_{\odot}} \right)^{-1/3} \text{ [\mu sec/yr]}$$



質量 : パルサー 1.4411(7) Msolar
伴星 1.3874(7) Msolar

➡ 軌道パラメータとまとめて最小二乗法で決定

重力波のエネルギー

4重極公式

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{GW}} = \frac{G}{5c^5} \left\langle \frac{d^3 I_{ik}}{dt^3} \cdot \frac{d^3 I_{jk}}{dt^3} \right\rangle$$

ここで $L_0 \equiv \frac{c^5}{G} = 2 \times 10^5 M_{\odot} c^2/s$ という大きな値

連星からの重力波放射

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{\text{GW}} = \frac{32G^4 \mu^2 M^3}{5c^5 R^5}$$

連星の全質量 $M = m_1 + m_2$

換算質量 $\mu = m_1 m_2 / M$

軌道半径 R

重力波放射による軌道変化

連星系のエネルギー (運動エネルギー + ポテンシャルエネルギー)

$$E = -GM\mu/2R \quad \rightarrow \quad \frac{dE}{dt} = \frac{GM\mu}{2R} \frac{dR}{dt}$$

重力波の放出 → 公転エネルギーを失い, 互いに落ち込む
(ゆっくりとエネルギーを失い, 3×10^8 年後に 合体)

軌道半径の変化

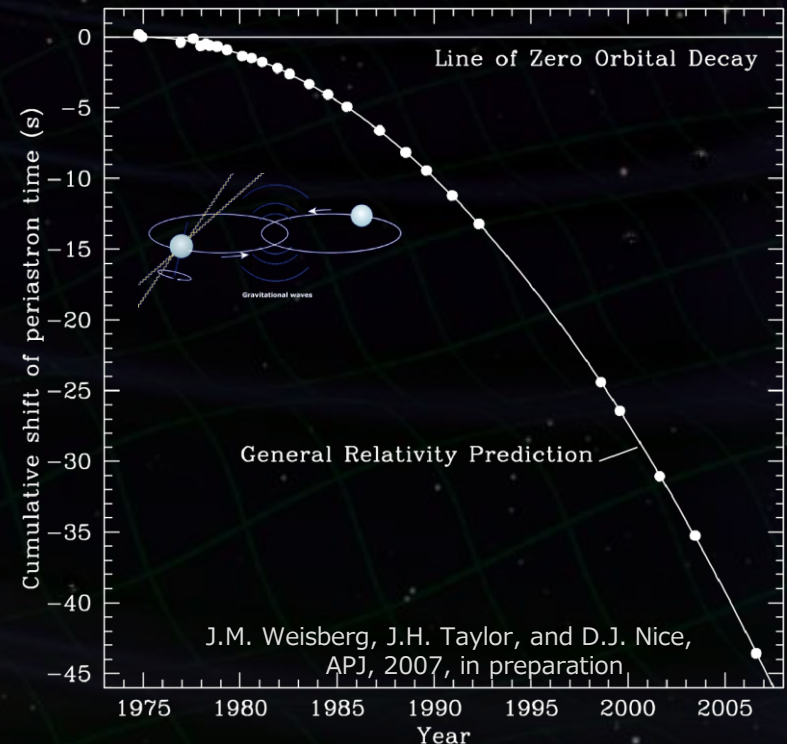
$$\frac{dR}{dt} = -\frac{64G^3\mu M^2}{5c^5 R^3}$$

→ 近日点が移動

一般相対性理論による理論値 :

$$(-2.40242 \pm 0.00002) \times 10^{-12} \text{s/s}$$

理論と観測の差は0.2%程度



重力波の存在証明

連星パルサーPSR B1913+16

相対性理論の正しさ, 重力波の存在
を高い精度で証明



1993年ノーベル物理学賞 テイラー, ハルス
「重力研究の新しい可能性を開いた
新型連星パルサーの発見」



The Nobel Prize in Physics 1993
Russell A. Hulse, Joseph H. Taylor Jr.



Russell A. Hulse



Joseph H. Taylor Jr.

The Nobel Prize in Physics 1993 was awarded jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. "for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

重力波天文学

- 重力波望遠鏡による
新しい天文学 -



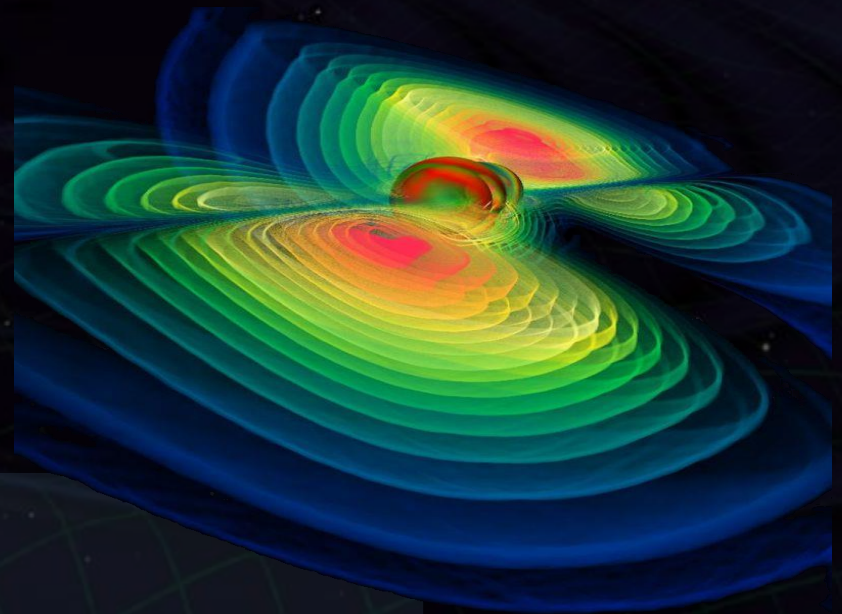
重力波の特徴

- ・質量の加速度運動から放射
- ・物質に対して 強い透過力



宇宙を観測する新しい手段

- ・電磁波と相補的な観測
- ・電磁波などでは見ることの出来ない現象
(初期宇宙, ブラックホール,
高エネルギー天体現象の内部)

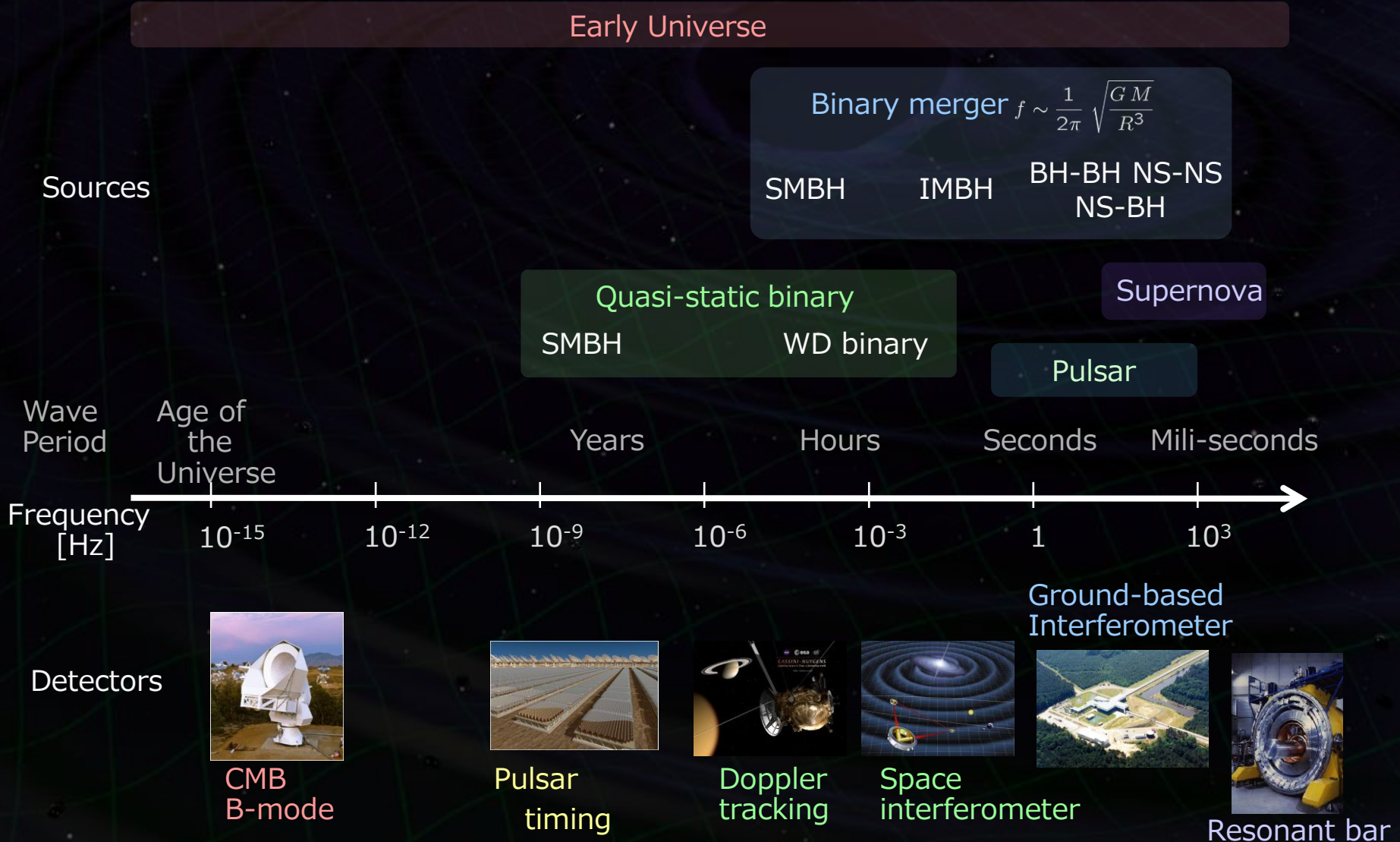


重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

重力波検出器の種類



地上重力波望遠鏡のターゲット

地上重力波望遠鏡 -- 10Hz - 1kHz の観測周波数帯

⇨ コンパクト天体, 高エネルギー天体現象

中性子星

ブラックホール

初期宇宙

パルサー

超新星爆発

連星合体

背景重力波

軟ガンマ線リピーター

EMRI

電磁波
ニュートリノ
高エネルギー宇宙線

星の
振動
モード

長ガンマ線
バースト

短ガンマ線
バースト

準固有
振動

同時観測
数値相対論

高エネルギー天体
現象の総合的理解

高密度天体の状態方程式
原子核物理

相対性理論の検証
強い重力場での物理法則

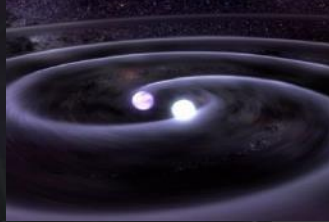
宇宙重力波望遠鏡のターゲット

宇宙重力波望遠鏡 -- 0.1mHz – 1 Hz の観測周波数帯

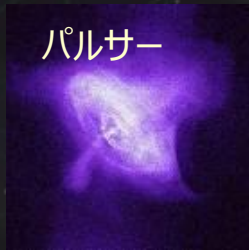
⇒ 中間/巨大ブラックホール, 初期宇宙

中性子星・白色矮星

連星



パルサー



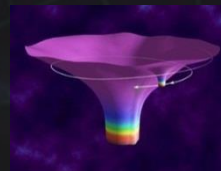
定常的・準静的な自転・公転運動

ブラックホール



巨大ブラックホールの合体

EMRI



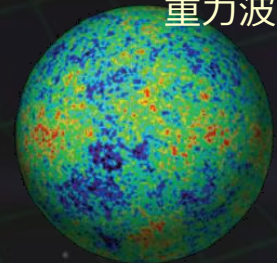
準固有振動

初期宇宙

多数天体の重ね合わせ

背景重力波

原始背景重力波



電磁波
ニュートリノ

同時観測
数値相対論

重力理論の検証

超巨大BHの形成過程
銀河形成史

宇宙論, 宇宙の誕生と発展
ダークエネルギー・ダークマター

観測頻度の見積もり

第一の観測ターゲット：連星中性子星の合体 だった。

- * 存在することが分かっている。
- * 放射される重力波の波形や振幅の予測が可能。

中性子星連星 及びその候補：10組

そのうち、寿命が宇宙年齢より短いもの：6組

⇒ 確実性が高い4組を見積もりに使用。

名前	パルス周期(ms)	公転周期(hr)	離心率	寿命(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

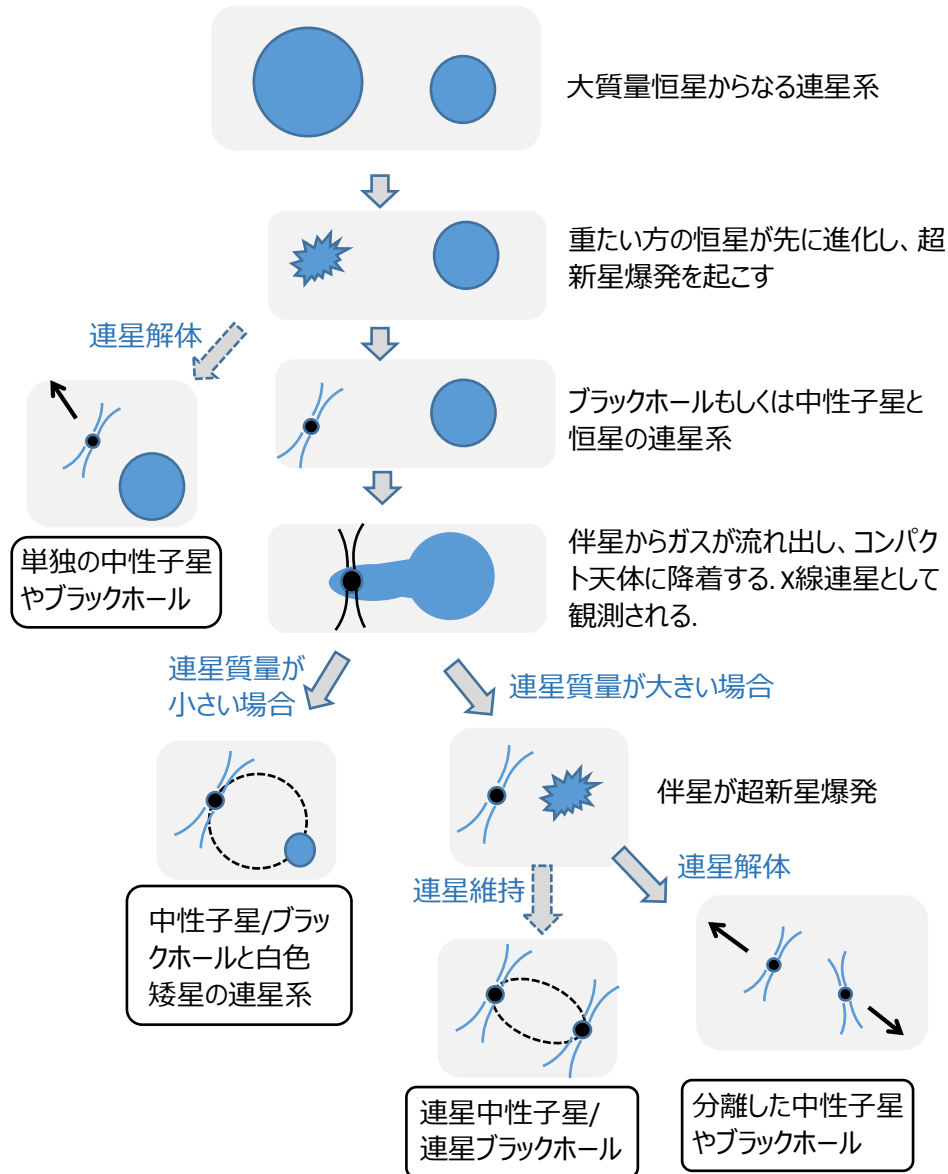
H-T pulsar

Double
pulsar

最も最近に発見 (2006)

球状星団M15外周部

連星中性子星の形成



大質量恒星からなる
連星系が進化

→ 連星中性子星の形成

形成確率には不定性がある

連星合体イベントレート

合体レートの見積もり

Kalogera+, ApJ (2004), Lorimer, LRR (2008), Kim+ (2008)

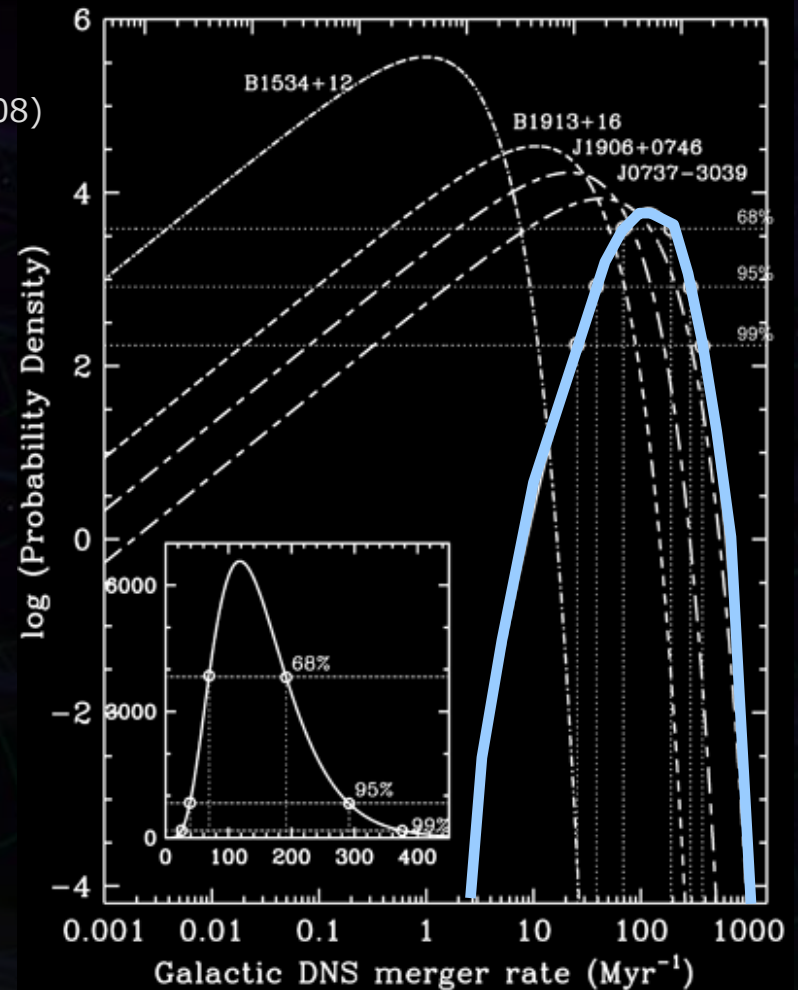
- 宇宙年齢以内に合体するDNS 4つ
- 各'種類' → 銀河系内の数を見積もる.
連星の寿命, 明るさ
パルサー探査で見つけられる確率
銀河系内の分布モデル

+ その種類の連星系が
1つ見つかったという観測事実.



銀河系あたりの合体レート

$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} [\text{events/Myr}]$$



ベイズ統計 (Bayesian Statistics)

同時確率と条件付き確率の関係

$$P(y|x) \cdot P(x) = P(x, y) = P(x|y) \cdot P(y)$$

辺々 x の和をとる

$$\sum_x P(y|x) \cdot P(x) = P(y) = \sum_x P(x|y) \cdot P(y)$$



観測量 y が得られた時の, x の確率分布

$$P(x|y) = \frac{P(y|x) \cdot P(x)}{P(y)} = \frac{P(y|x) \cdot P(x)}{\sum_x P(y|x) \cdot P(x)}$$

事後確率

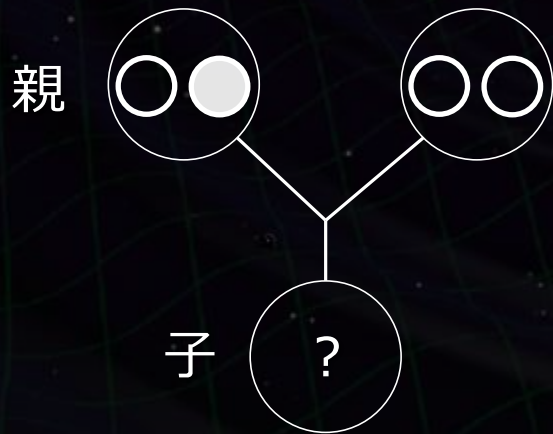
(Posterior Distribution)

事前確率 (Prior Distribution)

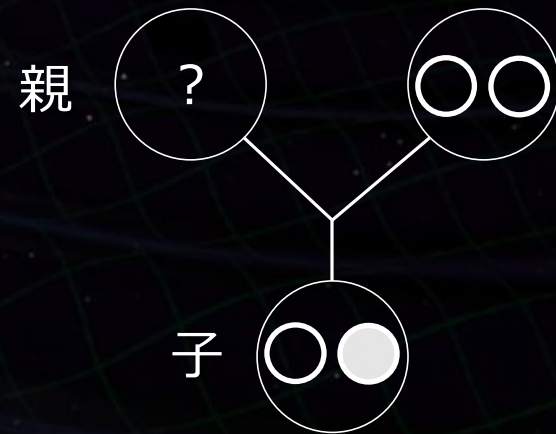
ベイズ統計の例 (1/2)

メンデルの法則

ある遺伝子が ○● のどちらかを取り, それを2つ1組で持っている.
親は1対のどちらかの性質を子に与える.



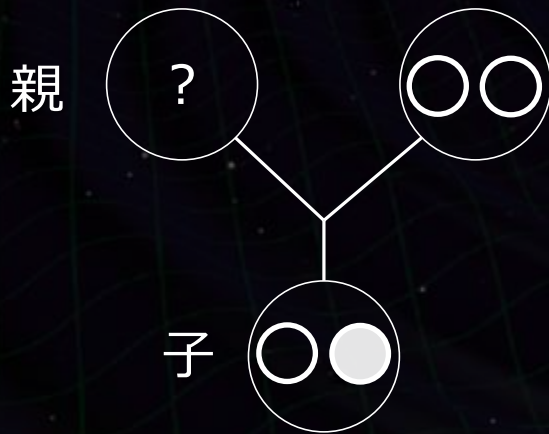
子が持つ 遺伝子の確率	○○	1/2
	○●	1/2
	●●	0



親が持つ遺伝子の確率は???

ベイズ統計の例 (2/2)

親が持つ遺伝子の確率を求める



親が ○○ の時 → 子が ○● である確率 0

親が ○● の時 → 子が ○● である確率 1/2

親が ●● の時 → 子が ○● である確率 1

Prior

条件付き確率: 尤度

親が持つ
遺伝子の確率

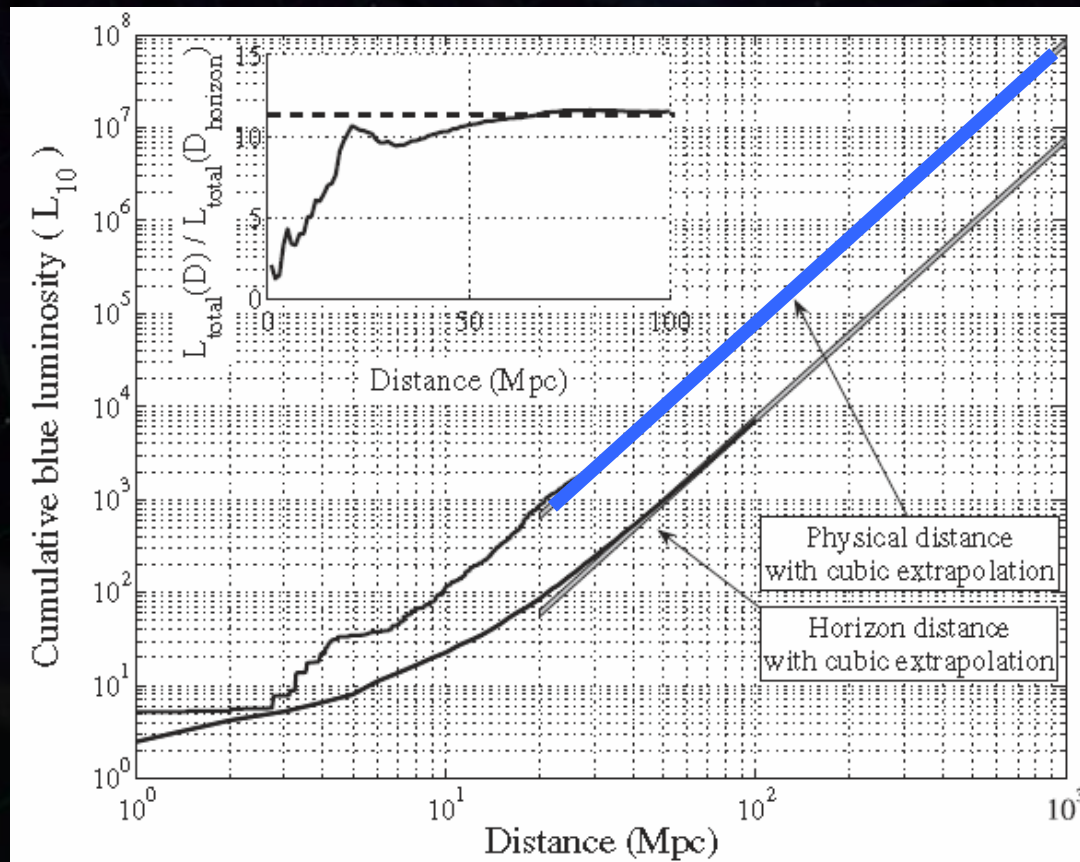
○○	$\frac{0}{1/2 + 1} = 0$
○●	$\frac{1/2}{1/2 + 1} = 1/3$
●●	$\frac{1}{1/2 + 1} = 2/3$

事後確率
(Posterior Probability)

銀河の個数密度

- ・近傍銀河の観測結果を外掃して見積もる

$$\Rightarrow \rho = 1.2 \times 10^{-2} \text{ [Mpc}^{-3}\text{]}$$



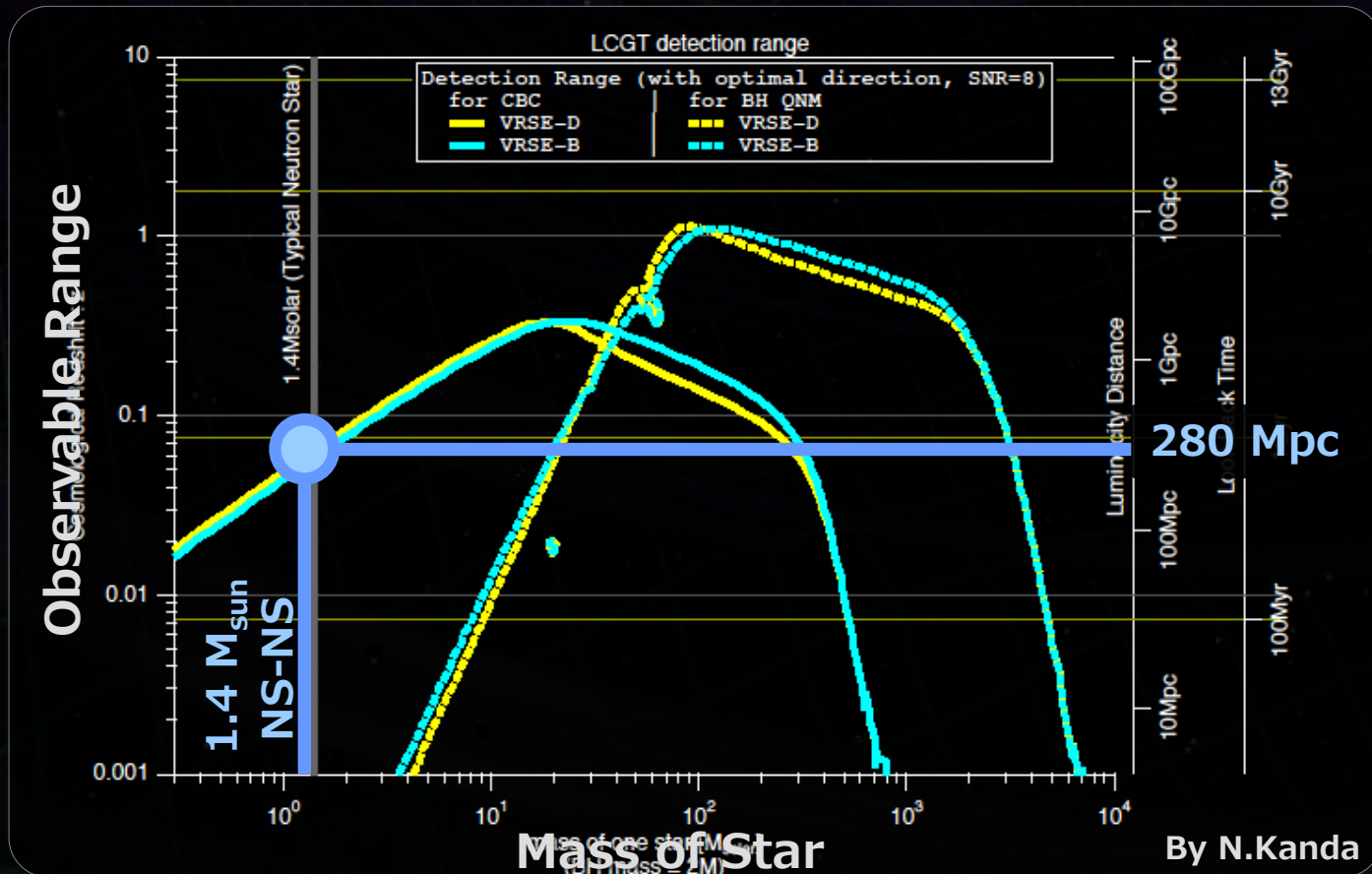
Kopparapu+, ApJ (2008), Abadie+, CQG (2010)

Observable range

Primary purpose of KAGRA : Detection of GW

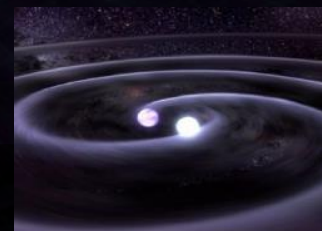
→ First target : Neutron-star binary inspirals

⇒ Obs. Range 280Mpc (SNR=8, Optimal sky pos. an pol.)



KAGRAの観測確率

第一目標: 連星中性子星合体からの重力波の検出



観測レンジ

感度曲線 → 観測可能距離 280 Mpc

(SNR 8, 最適方向・偏波)

銀河の個数密度:

$$\rho = 1.2 \times 10^{-2} \text{ [Mpc}^{-3}\text{]}$$

R. K. Kopparapu et.al.,
ApJ, 675 1459 (2008)

銀河あたりのイベントレート:

$$\mathcal{R} = 118_{-79}^{+174} \text{ [events/Myr]}$$

V. Kalogera et.al.,
ApJ, 601 L179 (2004)



KAGRAの観測レート **9.8 events/yr**

(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

観測頻度の見積もり

実際には、最初に重力波の直接観測がされたのは、
連星ブラックホールの合体だった。

- * 質量が大きいため比較的大きな振幅の重力波が放出される → より遠方まで観測できる。
- * 合体頻度の見積りに不定性が大きかった。
- * そのような質量のBHの存在は未知であった。



今後の観測でより明らかになっていくことが期待できる。

おしまい