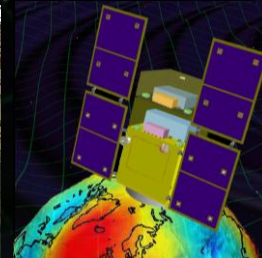
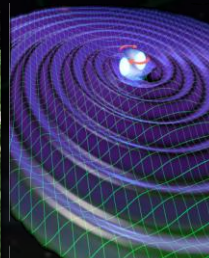
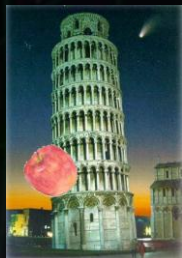


宇宙・高エネルギー物理学特別講義 III

重力波天文学

安東 正樹 (国立天文台)



講義の予定

- 1コマ目 重力波
- 2コマ目 重力波の観測
談話会 KAGRA
- 3コマ目 データ解析
- 4コマ目 最近の観測結果

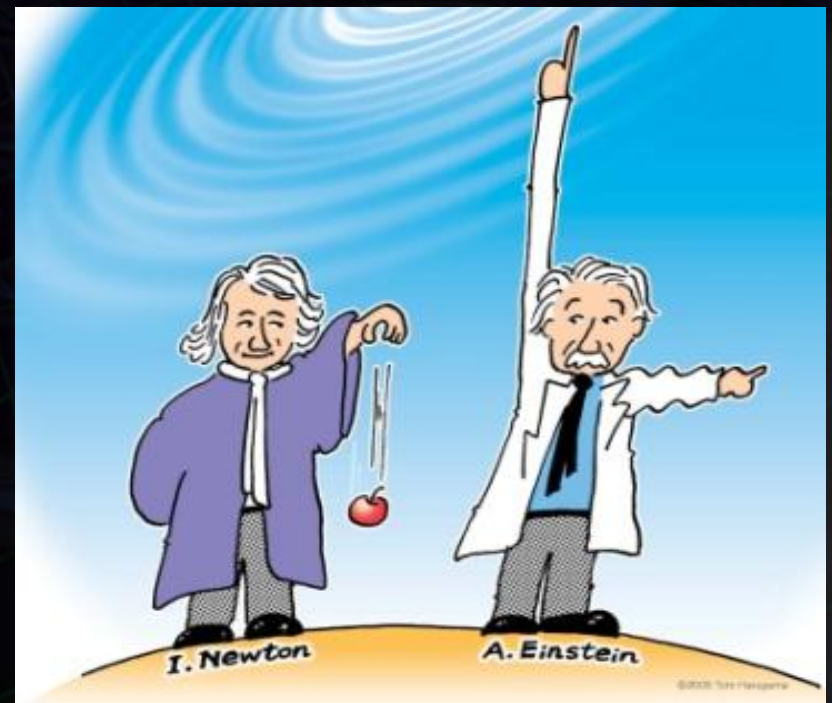
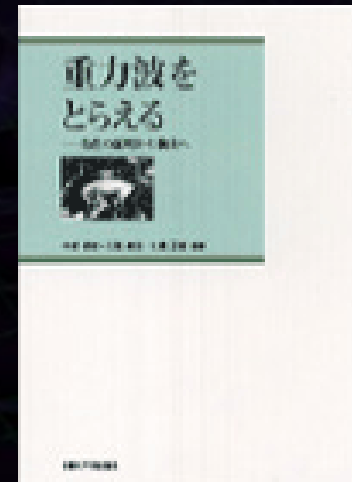


イラスト Tom Haruyama

参考文献

- 重力波をとらえる -存在の証明から検出へ
(中村卓史ほか 京都大学学術出版会)
- ブラックホールと高エネルギー現象
(シリーズ現代の天文学8, 日本評論社)
- 宇宙の観測(3) 高エネルギー天文学
(シリーズ現代の天文学17, 日本評論社)



第1章：重力波

「時空のさざなみ」



From presentation by B Schutz

第1章 重力波

重力波による天文学
相対論と重力波
重力波の存在証明

第1章 重力波

⇒ 重力波による天文学
相対論と重力波
重力波の存在証明

電磁波

J.C. Maxwell



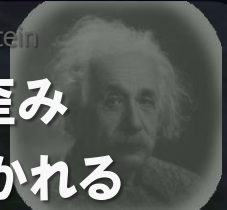
光速で伝播する電磁場の変動
電磁気学から導かれる
(マクスウェル方程式の波動解)

1864年：マクスウェルが予言
1888年：ヘルツの実験で発見

電荷の加速度運動により生成
物質による 吸収, 散乱
原子・分子から放射 → 画像情報
双極子放射, 2つの偏波

重力波

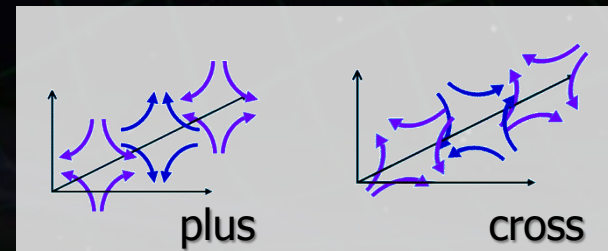
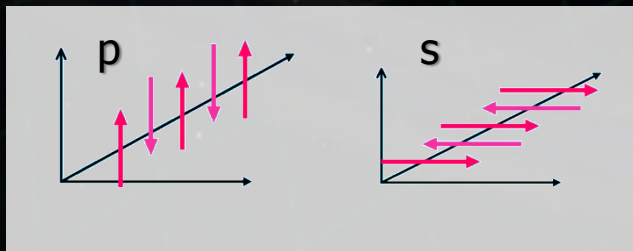
A. Einstein



光速で伝播する時空の歪み
一般相対性理論から導かれる
(アインシュタイン方程式の波動解)

1916年：アインシュタインが予言
1989年：連星パルサーの観測
によって存在を証明

質量の加速度運動により生成
物質に対して 強い透過力
全体運動から放射 → バルクな情報
四重極放射, 2つの偏波



From presentation
by Laura Cadonati

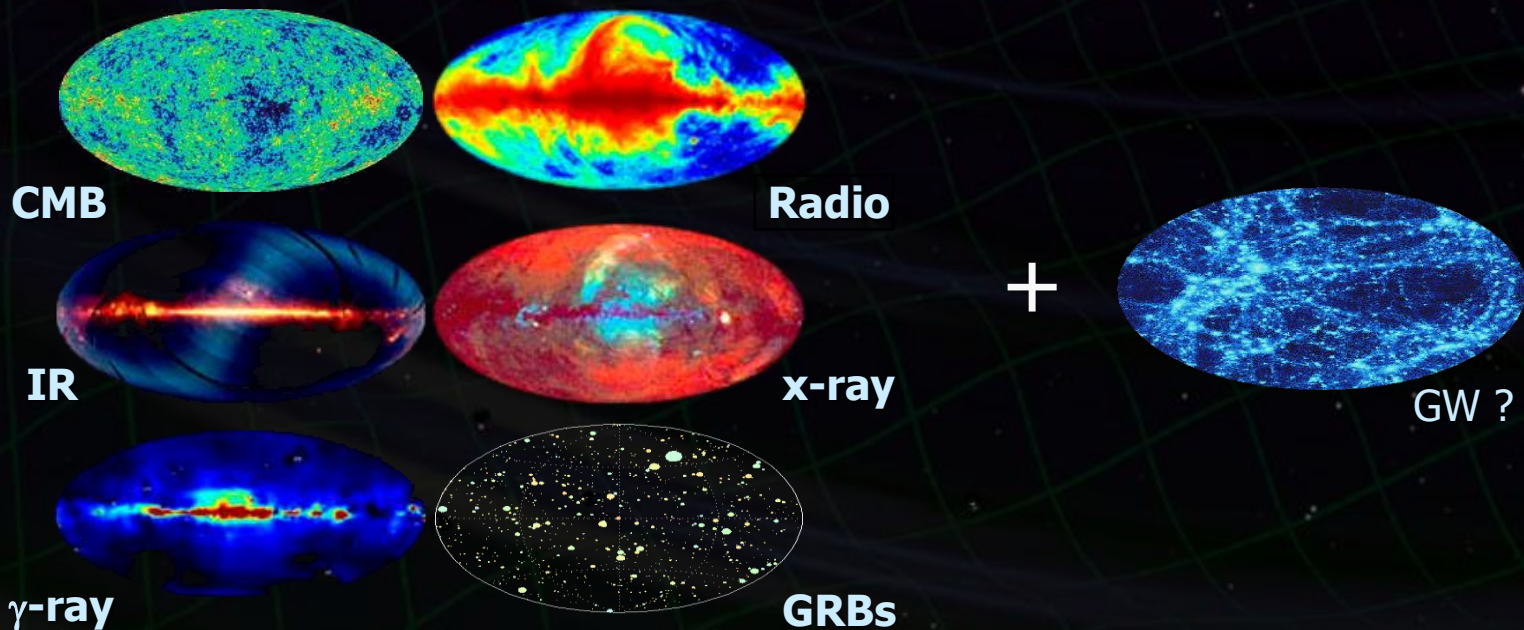
重力波の特徴

質量の加速度運動により生成
物質に対して強い透過力
波源全体の運動から放射



宇宙を観測する新しい手段

電磁波と相補的・独立な観測
他では見ることの出来ない現象
‘晴れ上がり’前の初期宇宙
激しい天体現象の内部



重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

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

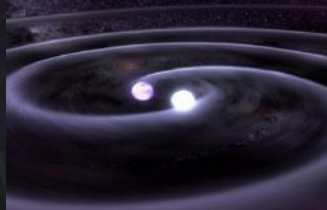
宇宙重力波望遠鏡のターゲット

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



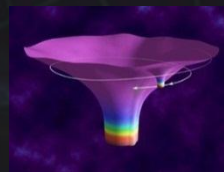
定常的・準静的な自転・公転運動

ブラックホール



巨大ブラックホールの合体

EMRI



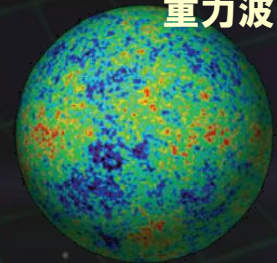
準固有振動

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

初期宇宙の観測



Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

第1章 重力波

重力波による天文学



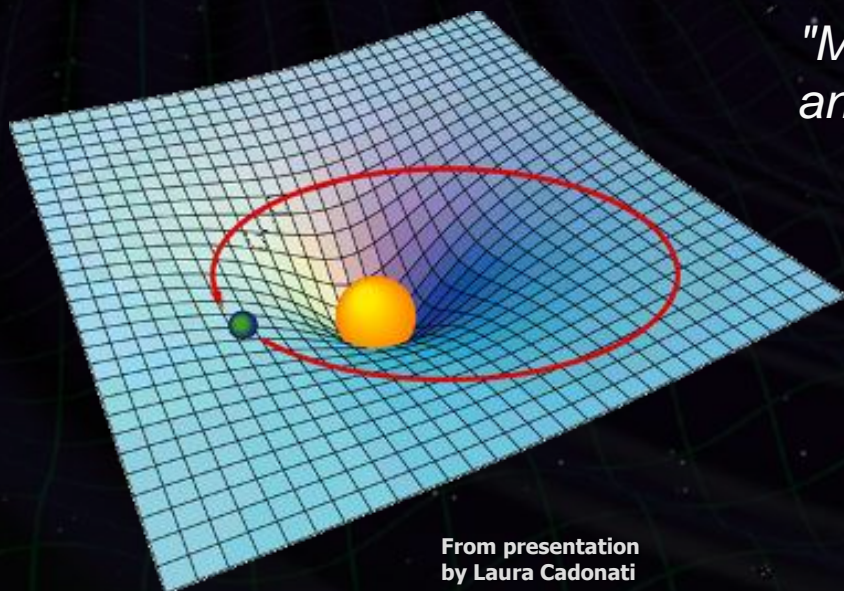
相対論と重力波

重力波の存在証明

一般相対性理論

→ 重力を時空の性質と解釈

*"Mass tells space-time how to curve,
and space-time tells mass how to move."
John Archibald Wheeler*



From presentation
by Laura Cadonati

アインシュタイン方程式

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

↑
時空の曲率

↑
質量
(エネルギー・運動量)

物質の変動, 形状の変化

→ 重力場の変動

→ 時空の歪みのさざなみとして伝播

⇒ 重力波

時空の幾何

→ 微小距離離れた2点間の
時空距離を与える線素 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)

座標変換によって不変



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

(参考)

3次元空間

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

4次元時空 (平坦な時空)

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

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -1 & & 0 \\ & 1 & \\ 0 & & 1 & \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

座標変換, 慣性系の変換
(ローレンツ変換) に対して不変

重力波とその伝播

平坦な時空からの摂動

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

$\eta_{\mu\nu}$ → 平坦な曲率
 $h_{\mu\nu}$ → 微小な曲率



波動方程式

(線形化されたアインシュタイン方程式)

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

真空中の伝播

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

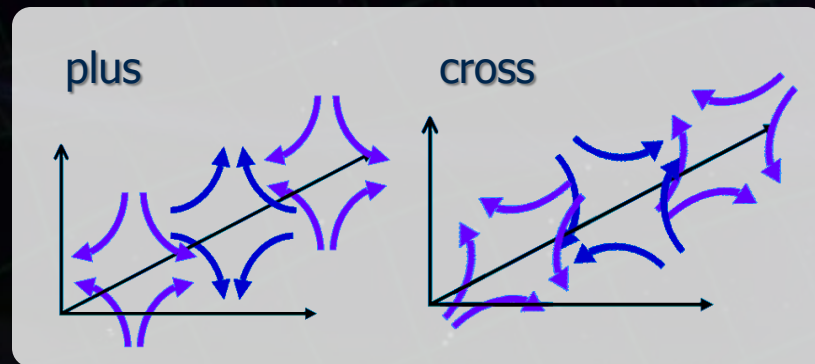
➡ 平面波解 (横波): **重力波**

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

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

2つの偏波:

Plus mode, Cross mode



測地線の方程式 (Geodesic Equation)

重力以外に力を受けていない粒子(自由質点)の運動方程式

$$\frac{d}{d\tau} u^\mu = -\Gamma_{\alpha\beta}^\mu u^\alpha u^\beta$$

クリストッフェル記号
4元速度

クリストッフェル記号の公式

$$g_{\alpha\delta} \Gamma_{\beta\gamma}^\delta = \frac{1}{2} (g_{\alpha\beta,\gamma} + g_{\alpha\gamma,\beta} - g_{\beta\gamma,\alpha})$$

最初静止した質点と、適当な座標系 (TTゲージ) を考える

$$u^\mu|_{\tau=0} = (1, 0, 0, 0)$$

重力波が入射したときの加速度

$$\left. \frac{du^\mu}{d\tau} \right|_{\tau=0} = 0$$



質点は静止したまま
(同じ座標に留まり続ける)

定常的な弱い重力場の近似

4次元線素

$$ds^2 = - \left(1 + \frac{2\phi_G}{c^2} \right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2\phi_G}{c^2} \right) (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

↑
重力ポテンシャル

質量Mの作る
重力ポテンシャル

$$\phi_G = -G \frac{M}{r}$$

計量の1階微分 : 重力
(時空の傾き,
計量00成分の空間微分)

$$g = -\nabla \phi_G \rightarrow G \frac{M}{r^2}$$

計量の2階微分 : 潮汐力
(時空の歪み, 曲率)


$$g_{\text{tidal}} = -\frac{\partial^2 \phi_G}{\partial^2 r} \rightarrow -2G \frac{M}{r^3}$$

等価原理：

一様加速度と一様重力場は区別できない

自由落下している実験室での実験は（十分小さく十分短時間のとき）
無重力下の慣性系での実験とは区別できない


一様重力場中を自由落下する
エレベータ内での物理法則



無重力状態での物理法則



重力加速度 g





局所慣性系： 無重力（平坦時空）と同じ計量をもつ座標系

$$g'_{\mu\nu}(x'_P) = \eta_{\mu\nu} \quad \left. \frac{\partial g'_{\mu\nu}}{\partial x'} \right|_{x=x'_P} = 0$$

↑

平坦な時空

↑

計量の1階微分(重力)

潮汐力：計量の2階微分

座標系の取り方では消すことができない

非一様重力場中を自由落下する
エレベータ内での物理法則

重力加速度 g



重力源

離れた2点間の潮汐力
固有距離の変化

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)

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

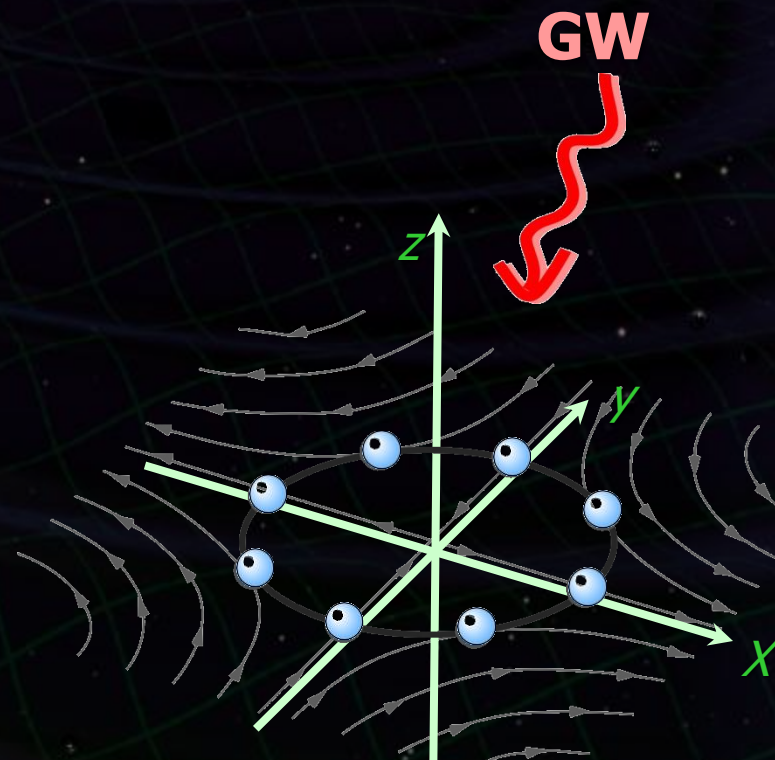
$$A_{ij} = \begin{pmatrix} h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

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

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



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

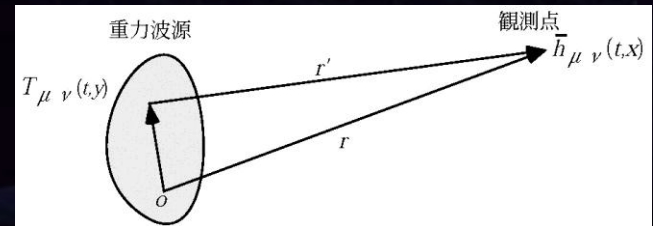
$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4 r} \ddot{I}_{ij}$$

四重極モーメントの
時間2階微分

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

波動方程式

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



⇒ 遅延解

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



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

(波源での双極子モーメントが0になる座標がある)

→ 双極子放射はない

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

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

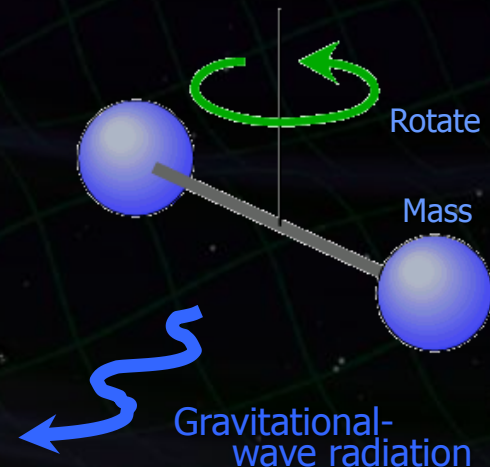
~ (Quadrupole kinetic energy)

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



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

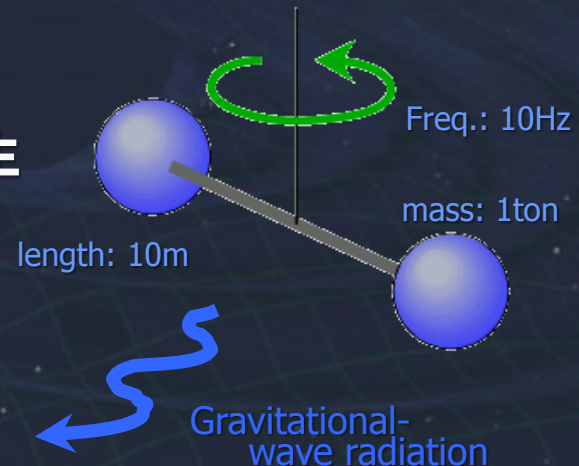
人工重力波

ダンベルの回転による重力波の発生

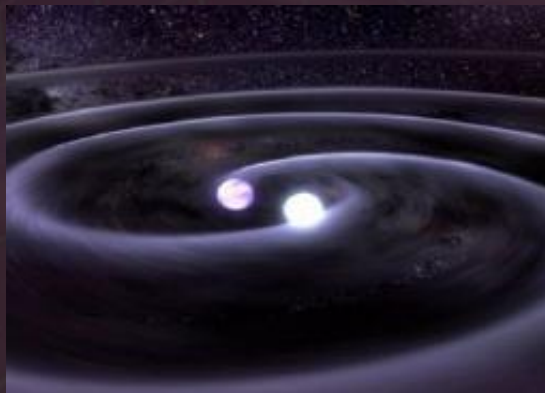
質量 1 ton, 長さ 10 m

回転周波数 10Hz

$$\Rightarrow h \sim 10^{-45}$$



連星からの重力波



Virgo Cluster (20Mpc)
の中性子星連星 (1.4 Msun)

$M \sim 10^{30}$ kg, $R \sim 20$ km
 $f \sim 400$ Hz, $r \sim 10^{23}$ m

$$\Rightarrow h \sim 10^{-21}$$

2つの自由質点間の固有距離の変化

(例) 地球-太陽間の距離変動

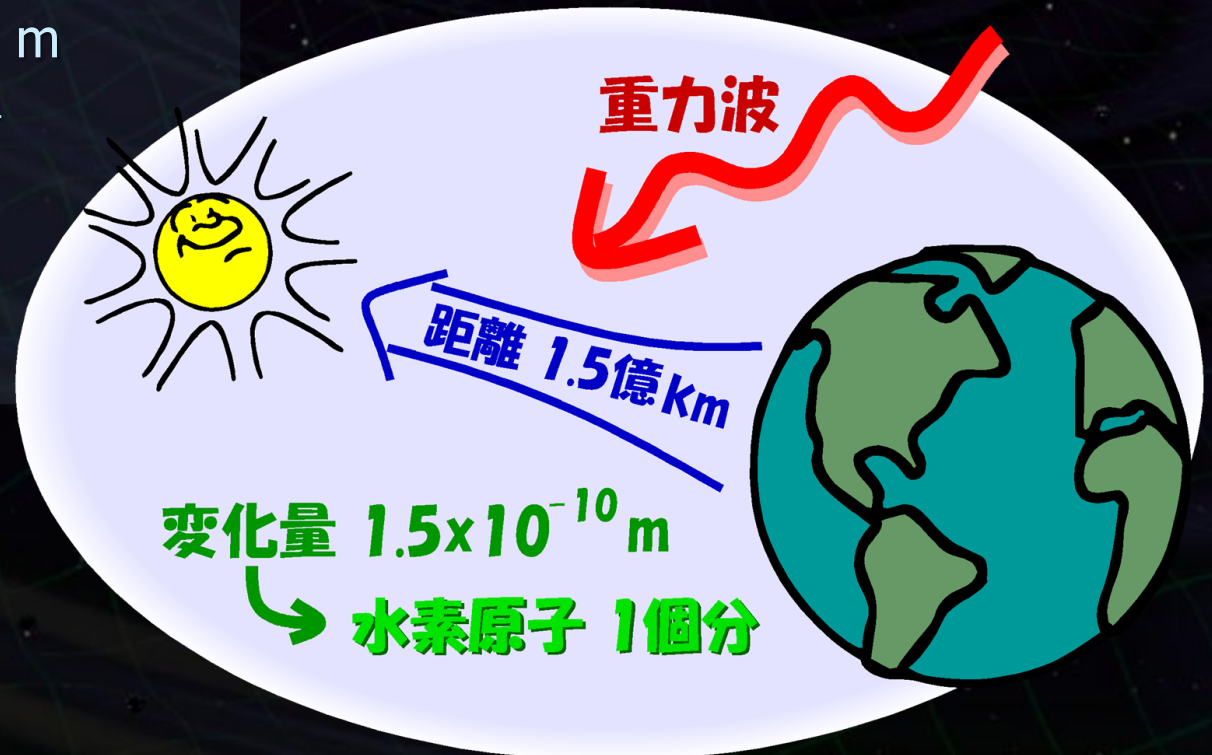
距離 1.5×10^{11} m

重力波振幅 10^{-21}



1.5×10^{-10} m

の距離変動



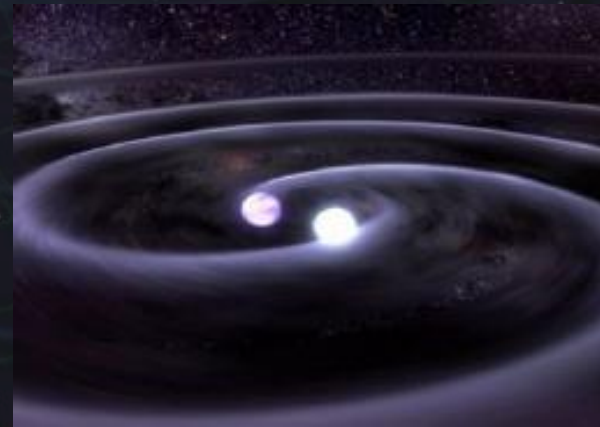
主な重力波源

	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>

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

・軌道半径が大きい時 → 準定常的な正弦波信号

・合体の直前 ($R_{\text{ISCO}} \propto M$) → $h \propto M$, $f \propto 1/M$

1.4 M_{solar} の連星中性子星合体 → $f_{\text{ISCO}} \sim 1.4 \text{ kHz}$

(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。

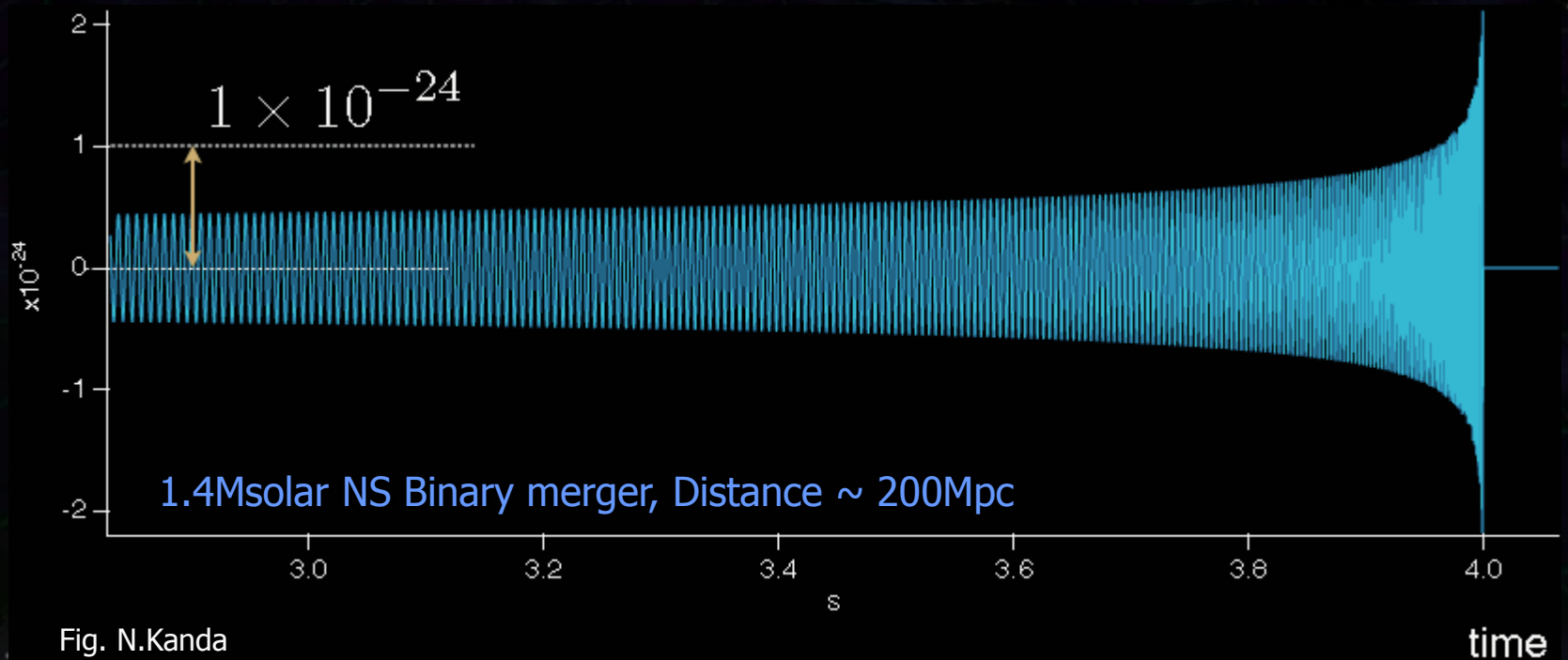
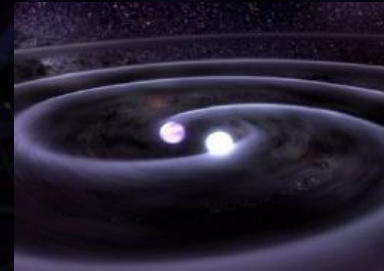


Fig. N.Kanda

第1章 重力波

重力波による天文学

相対論と重力波

⇒ 重力波の存在証明

連星パルサーの発見と観測

連星パルサーPSR B1913+16

(1974年 ラッセル・ハルス, ジョゼフ・テイラー)

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:

$$(-2.4056 \pm 0.0051) \times 10^{-12} \text{s/s}$$

アレシボ天文台 (フェルトリコ)



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
(3×10^8 年後に 合体する)

一般相対性理論による理論値:

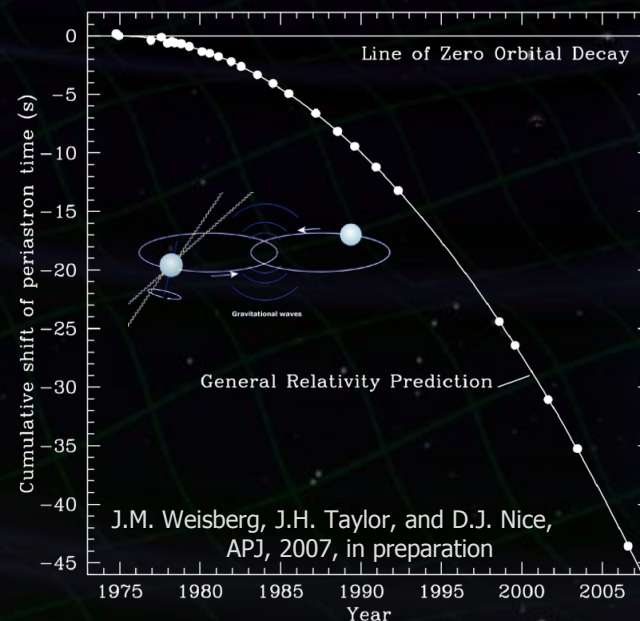
$$(-2.40242 \pm 0.00002) \times 10^{-12} \text{s/s}$$

理論と観測の差は0.2%程度



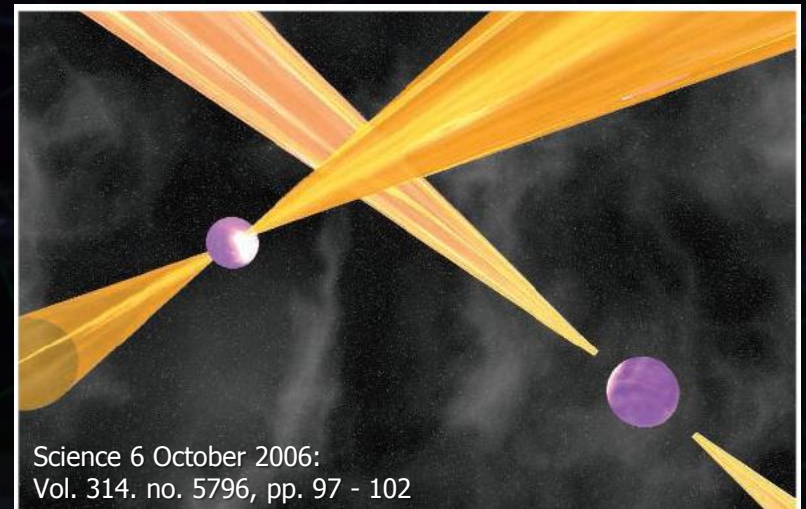
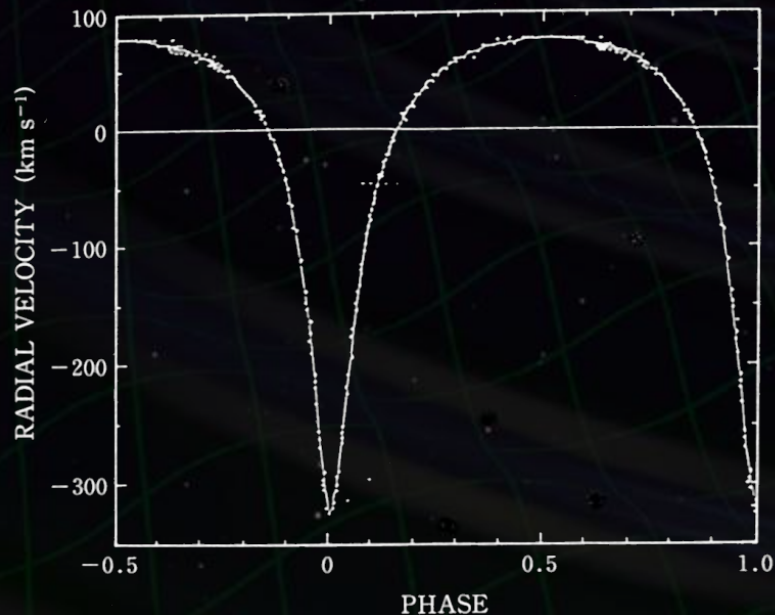
重力波の存在の証明

(1993年ノーベル物理学賞: テイラー, ハルス)

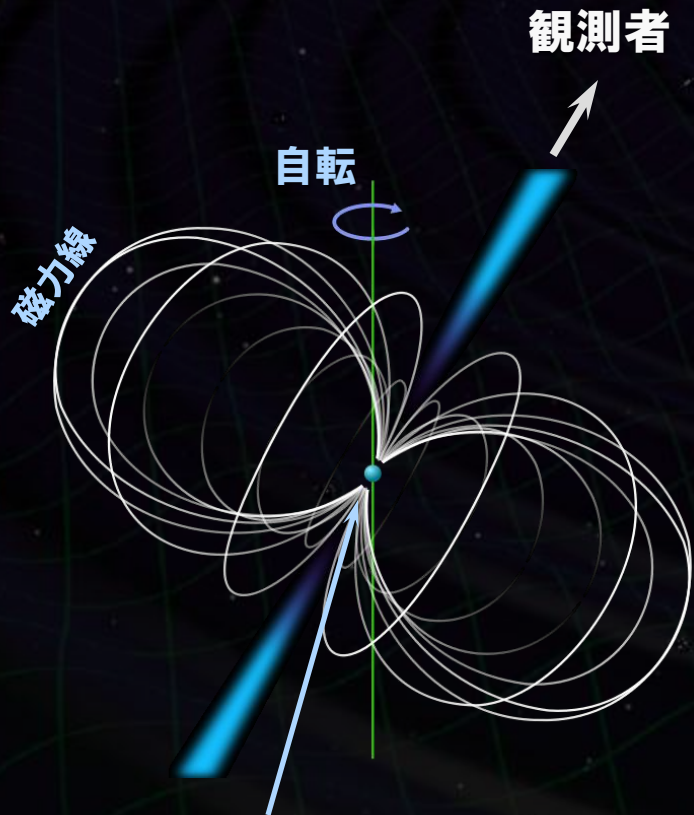


連星パルサーPSR B1913+16
(1974年 ラッセル・ハルス, ジョゼフ・テイラー)

パルス周期の規則的な変化を観測
→ 伴星によるドップラーシフトの効果



Timepieces. Taking the pulses of two pulsars as they whiz around each other, astronomers have determined their orbit and tested general relativity.



中性子星

太陽質量程度, 直径 10km の高密度星

超新星爆発 (恒星の重力崩壊)

により生成される

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

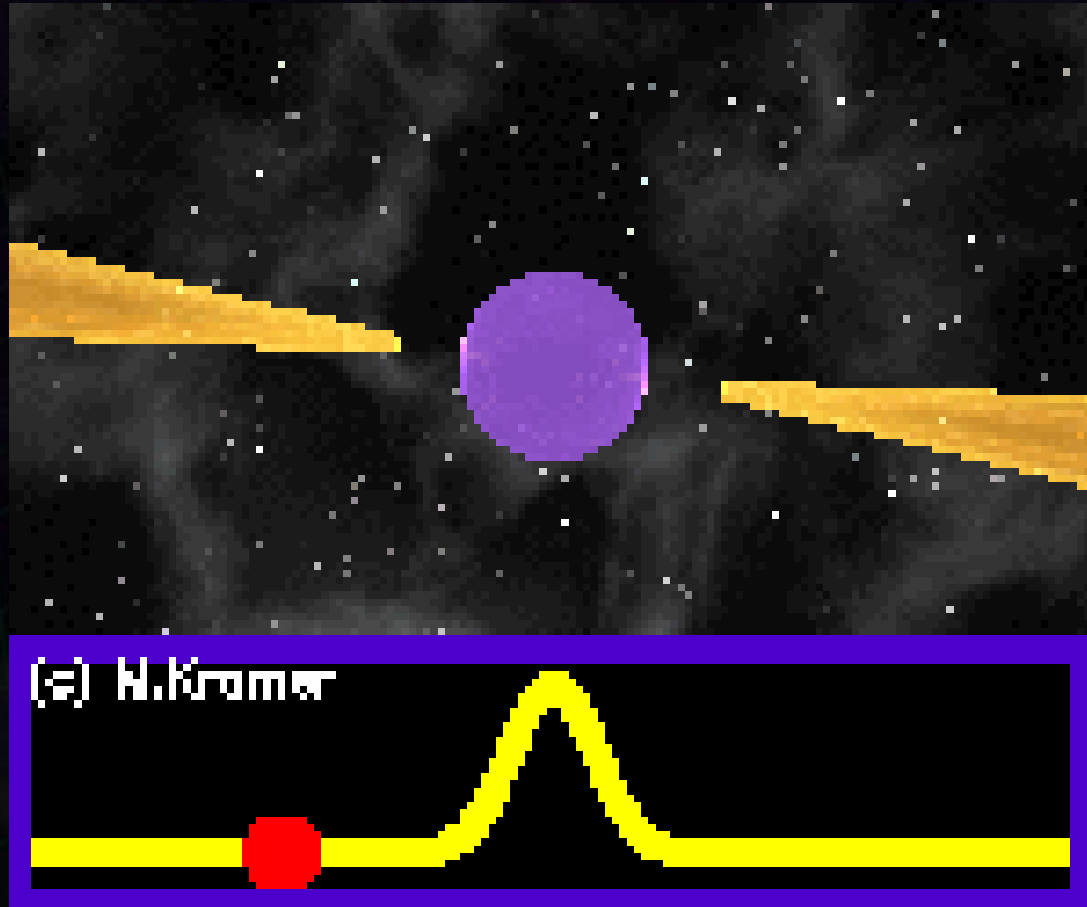
精度の良い 時計 となる

PSR1855+09 5.36... msec

PSR1937+21 1.55... msec

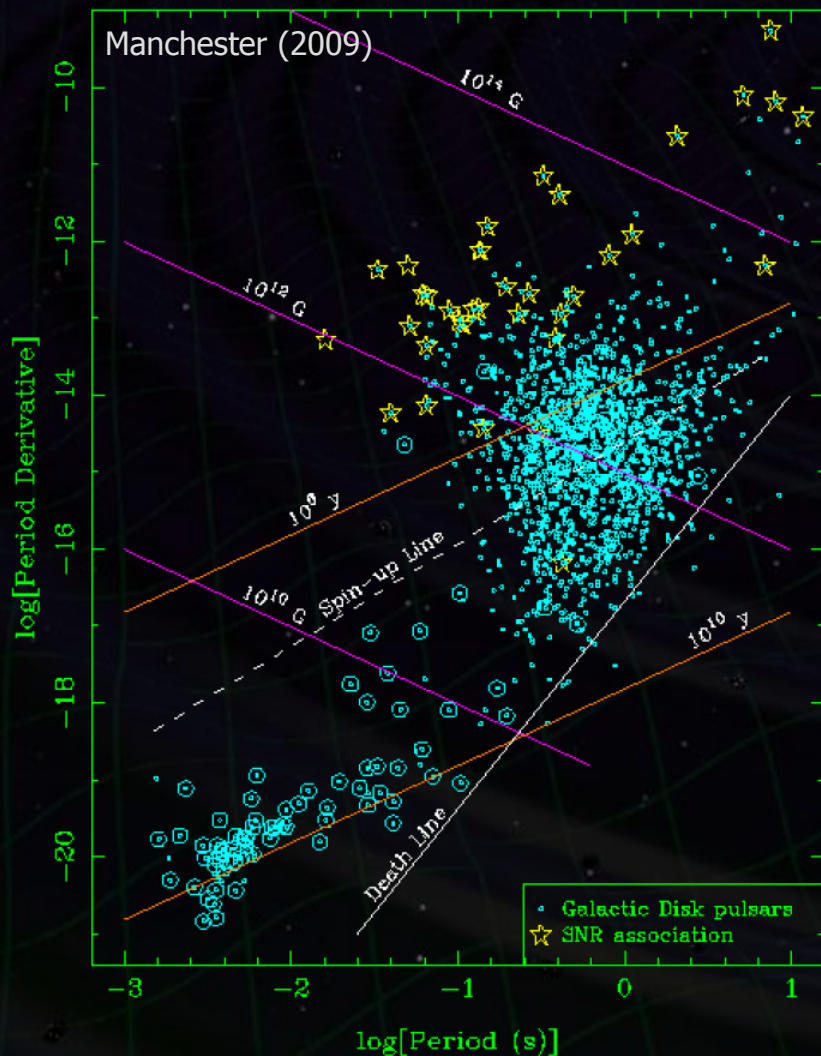
など、15桁の精度

Lighthouse model



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

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



1967年 ベル, ヒューイツシュ
 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

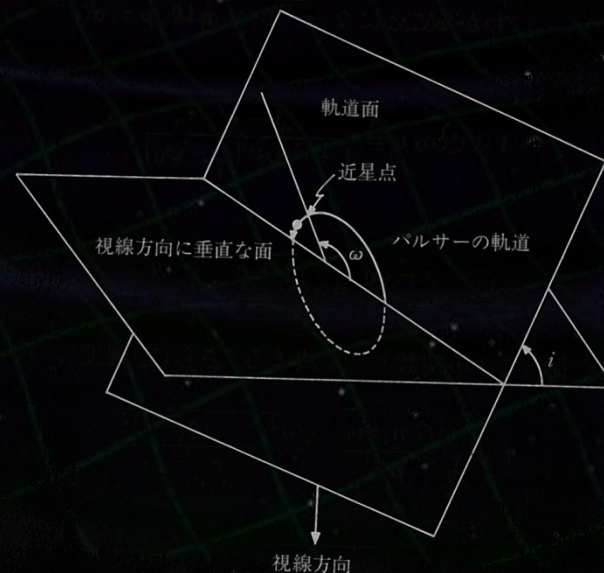
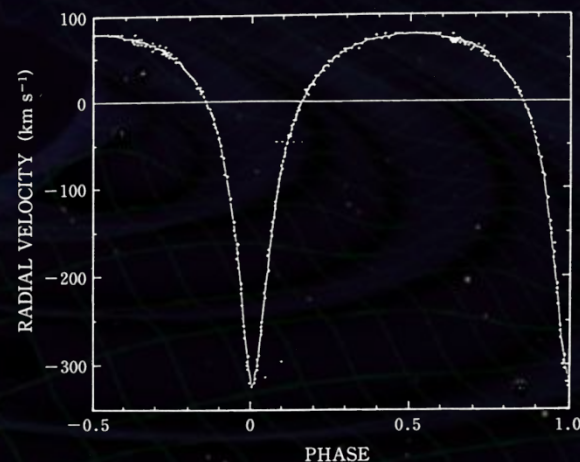
- Most pulsars have $dP \sim 10^{-15}$
- MSPs have dP smaller
 by about 5 orders of magnitude
- Most MSPs are binary
- Only a few percent of normal pulsars are binary
- $P/(2 dP)$ is an indicator of pulsar age
- Most young pulsars are associated with supernova remnants

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



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

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

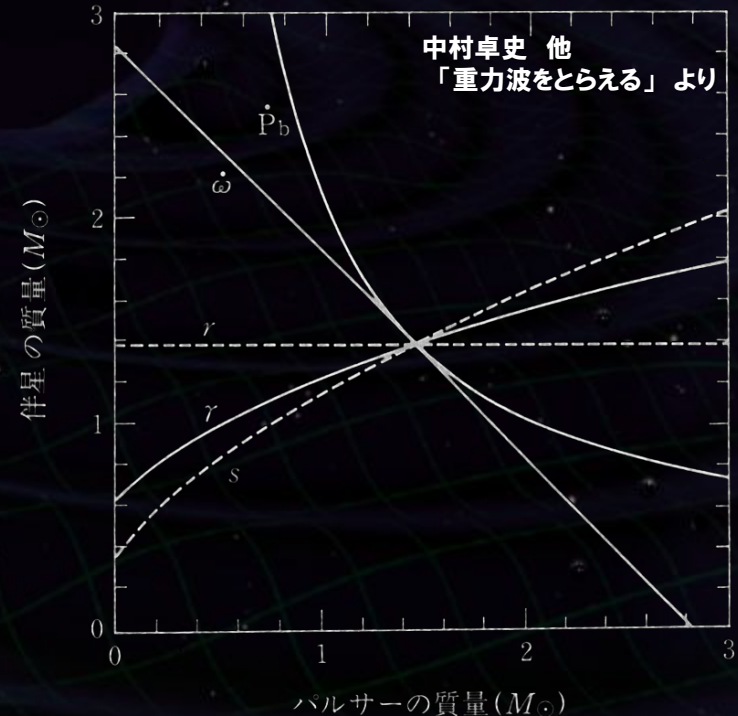
シャピロ時間遅れ

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

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

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

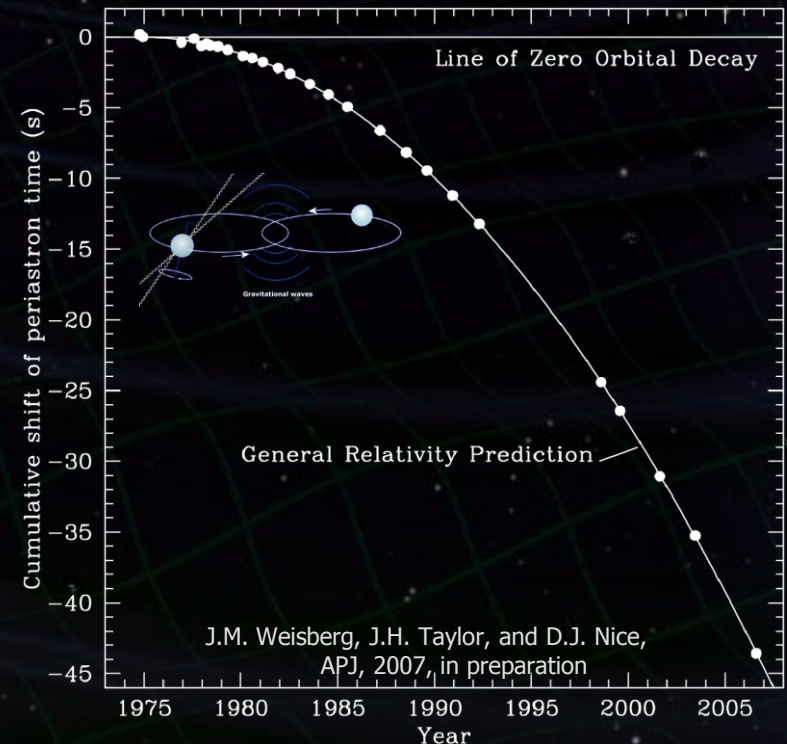
$$\frac{dR}{dt} = -\frac{64G^3\mu M^2}{5c^5 R^3}$$

→ 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



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

中性子星連星の合体

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

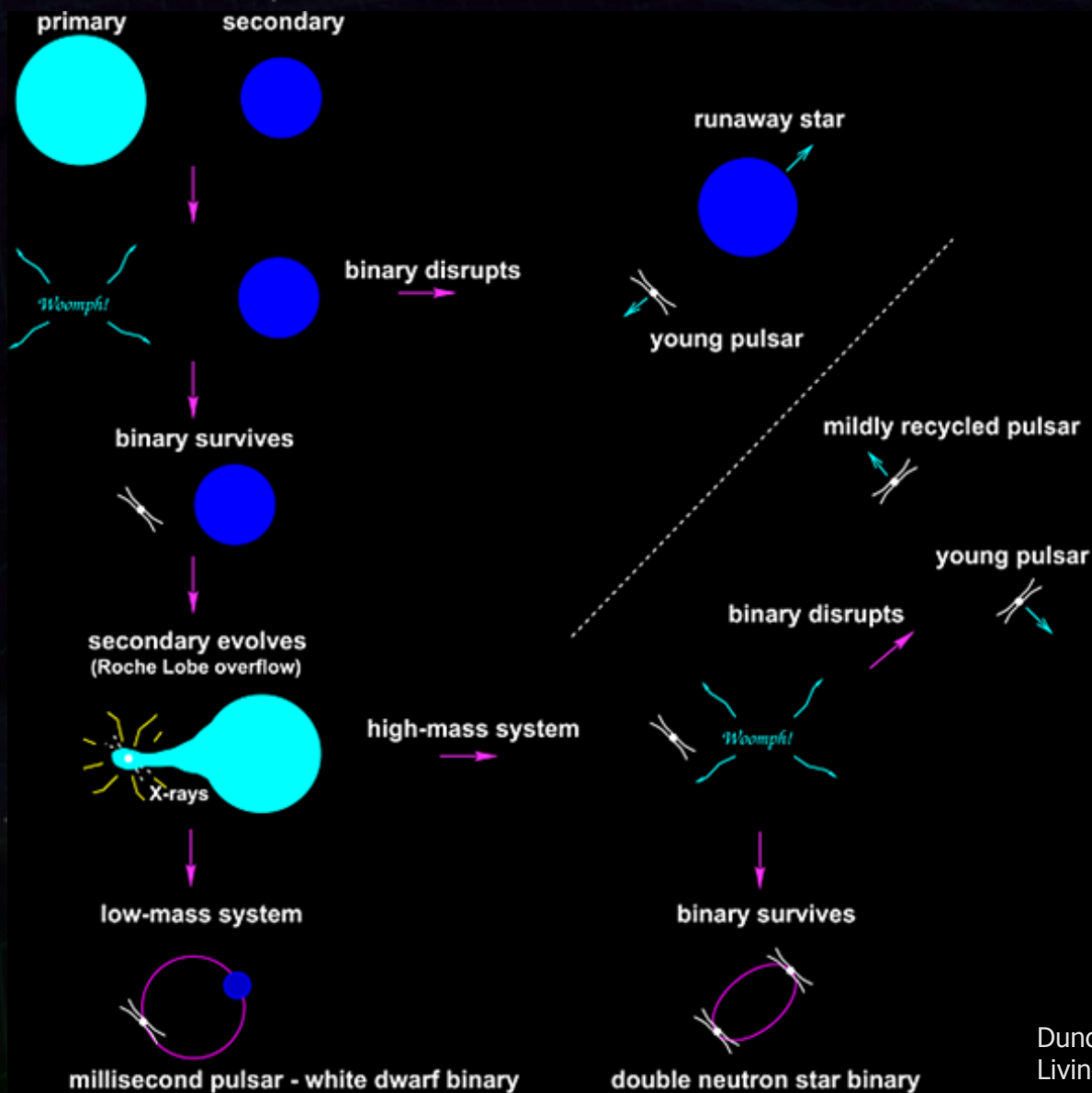
H-T pulsar

Double pulsar

最も最近に発見 (2006)

球状星団M15外周部

中性子星連星の形成



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

•合体レートの見積もり

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

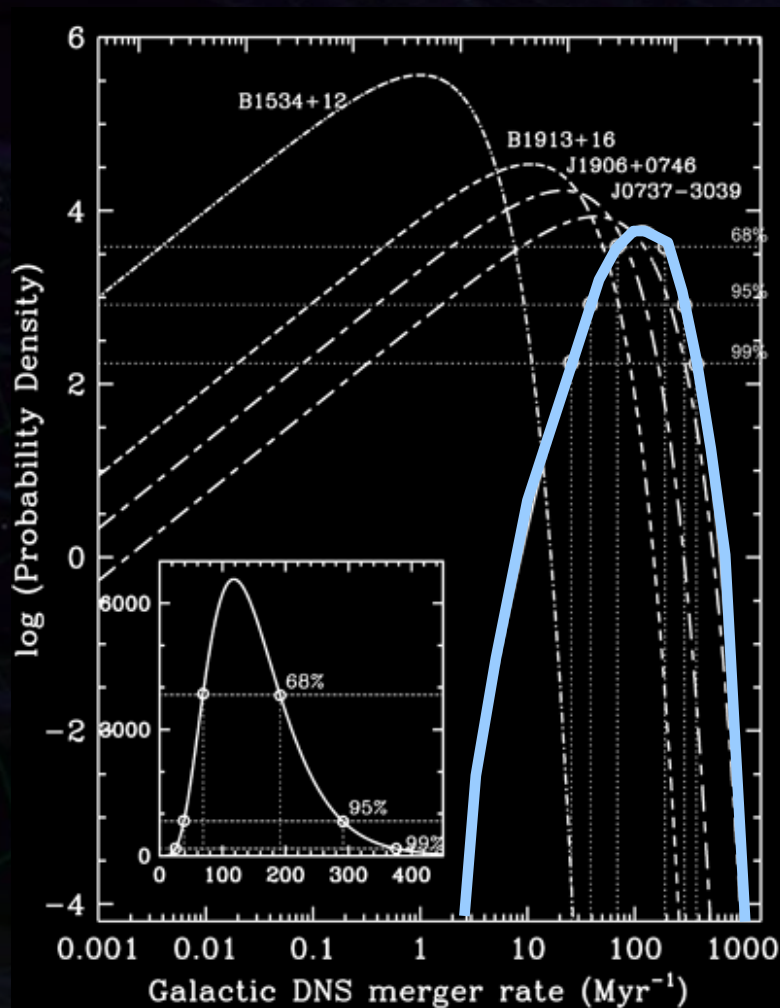
- 宇宙年齢以内に合体するDNS 4つ
- 各'種類' → 銀河系内の数を見積もる。
連星の寿命, 明るさ
パルサー探査で見つけられる確率
銀河系内の分布モデル

+ 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

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



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

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

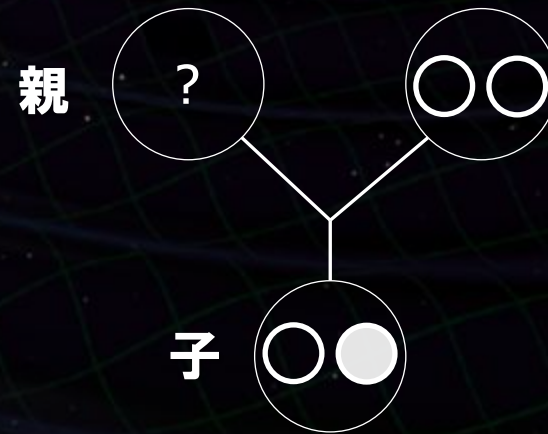
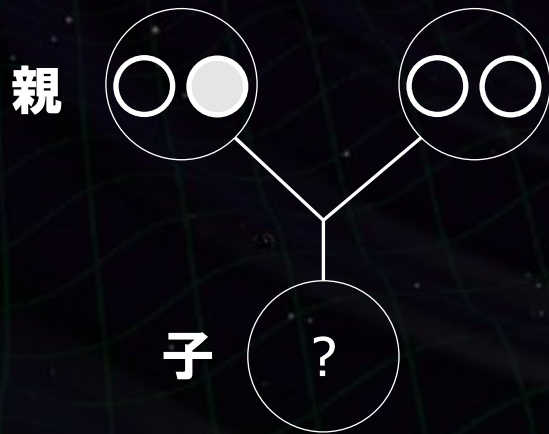
事後確率

(Posterior Distribution)

事前確率 (Prior Distribution)

メンデルの法則

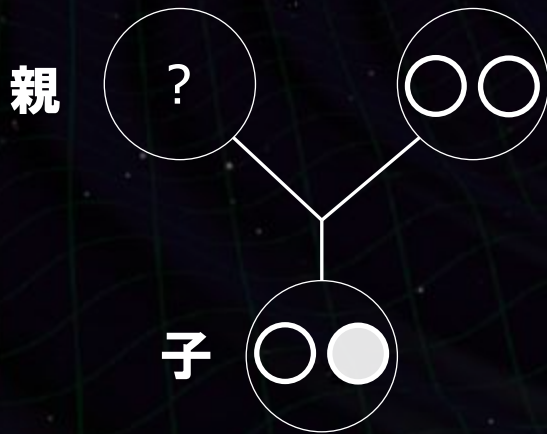
ある遺伝子が ○● のどちらかを取り, それを2つ1組で持っている。
親は1対のどちらかの性質を子に与える。



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???

親が持つ遺伝子の確率を求める



親が OO の時 → 子が O●である確率 0

親が O●の時 → 子が O●である確率 1/2

親が ●●の時 → 子が O●である確率 1

Prior

条件付き確率: 尤度

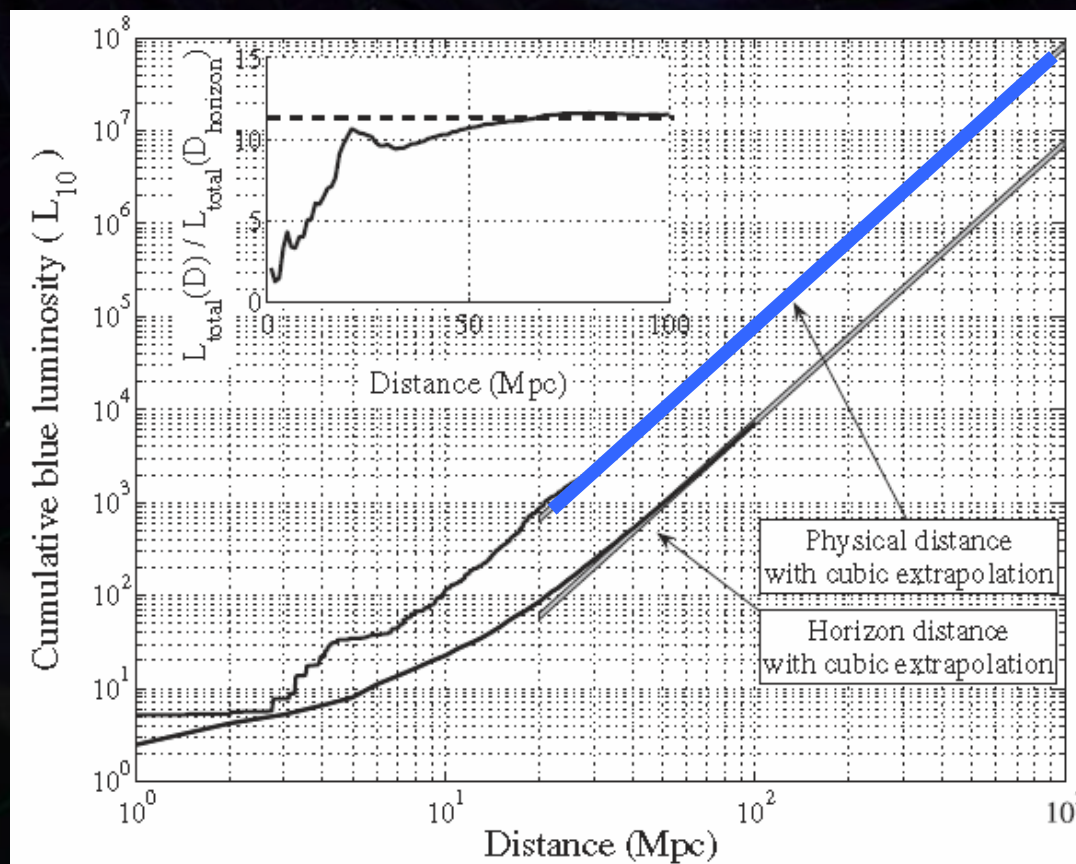
親が持つ
遺伝子の確率

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

事後確率
(Posterior Probability)

- 近傍銀河の観測結果を外掃して見積もる

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



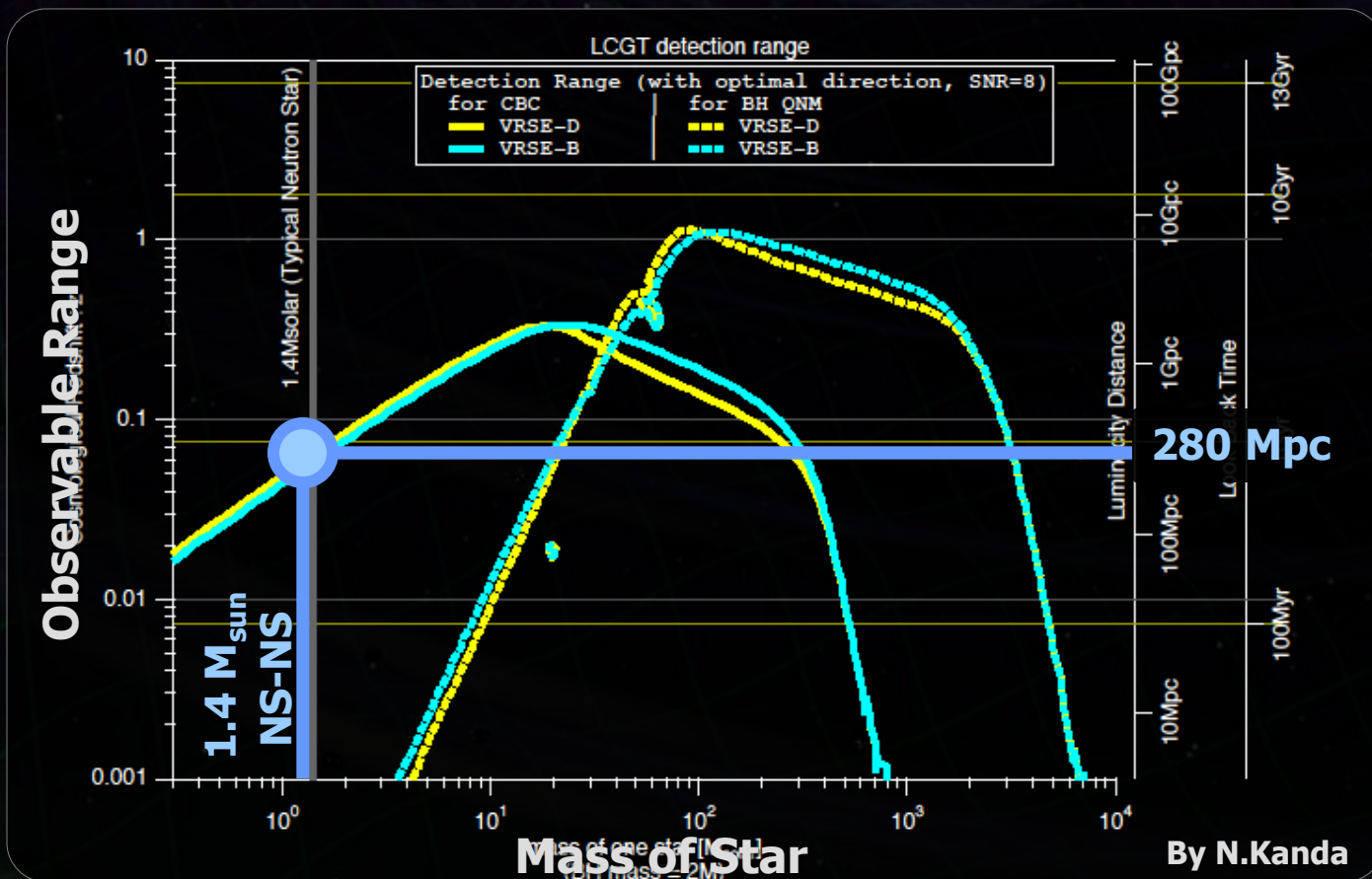
Kopparapu+, ApJ (2008), Abadie+, CQG (2010)

Observable range

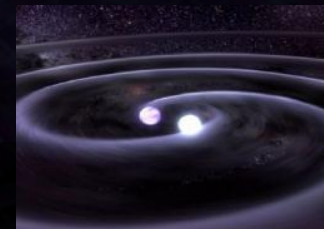
Primary purpose of KAGRA : Detection of GW

→ First target : Neutron-star binary inspirals

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



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)

重力波観測によるサイエンス

～ いくつかの例 ～

・重力波の初検出

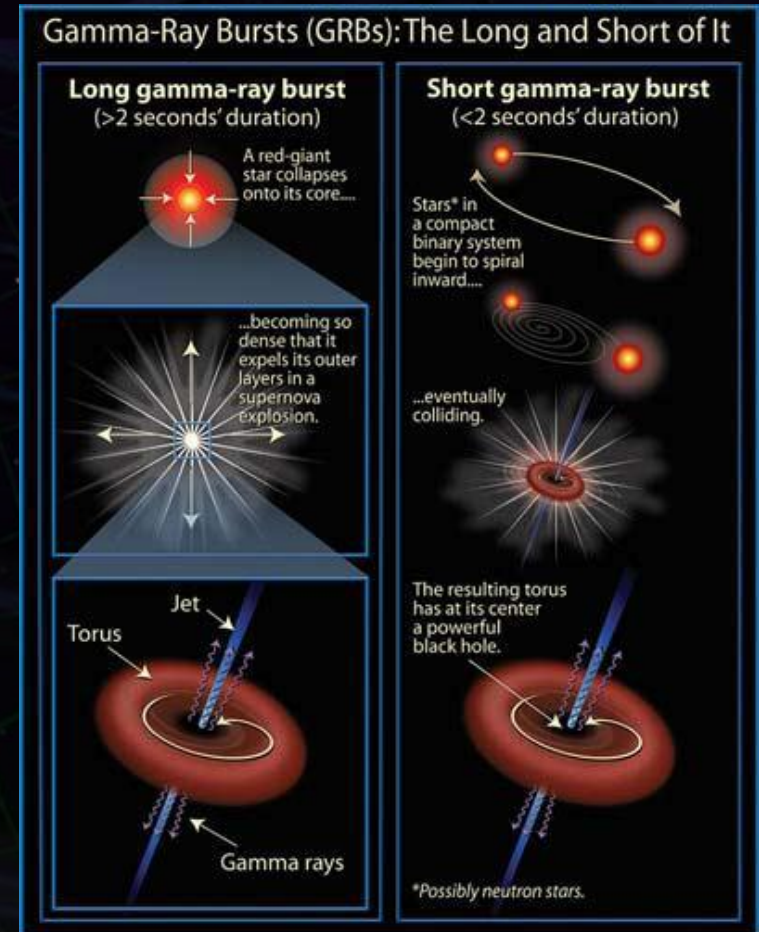
- 連星中性子星：存在が確実，波形が予測できる。
- 相対性理論/重力法則の検証。
- 新しい天文学の創生，
- ガンマ線バーストの起源，未知の発見。

・高密度核物質の直接探査

- 中性子星の状態方程式の情報。
- 潮汐変形/破壊，HMNSの形成など。

・宇宙論・銀河形成史に対する知見

- 宇宙論パラメータへの制限。
- 超巨大ブラックホールの形成過程
- 連星の進化や分布の情報。



From encyclopedia of science

状態方程式と天文学

中性子星の状態方程式 (密度 $2 \sim 15\rho_0$)

密度-圧力

中性子星の半径-質量

Lattimer+ (2010)

A NEUTRON STAR: SURFACE and INTERIOR

原子核理論

→ 地上実験が困難な
高密度物質の物理
(ハイペロンの出現など)

Theoretical Nuclear Physics Laboratory

理研Web pageより

高エネルギー天体现象

→ 天文学, 極限状態の物理法則

電波パルサー

超新星爆発

連星合体

長ガンマ線バースト

短ガンマ線バースト

軟ガンマ線リピーター

LMXB

マグネター

ブラックホール形成

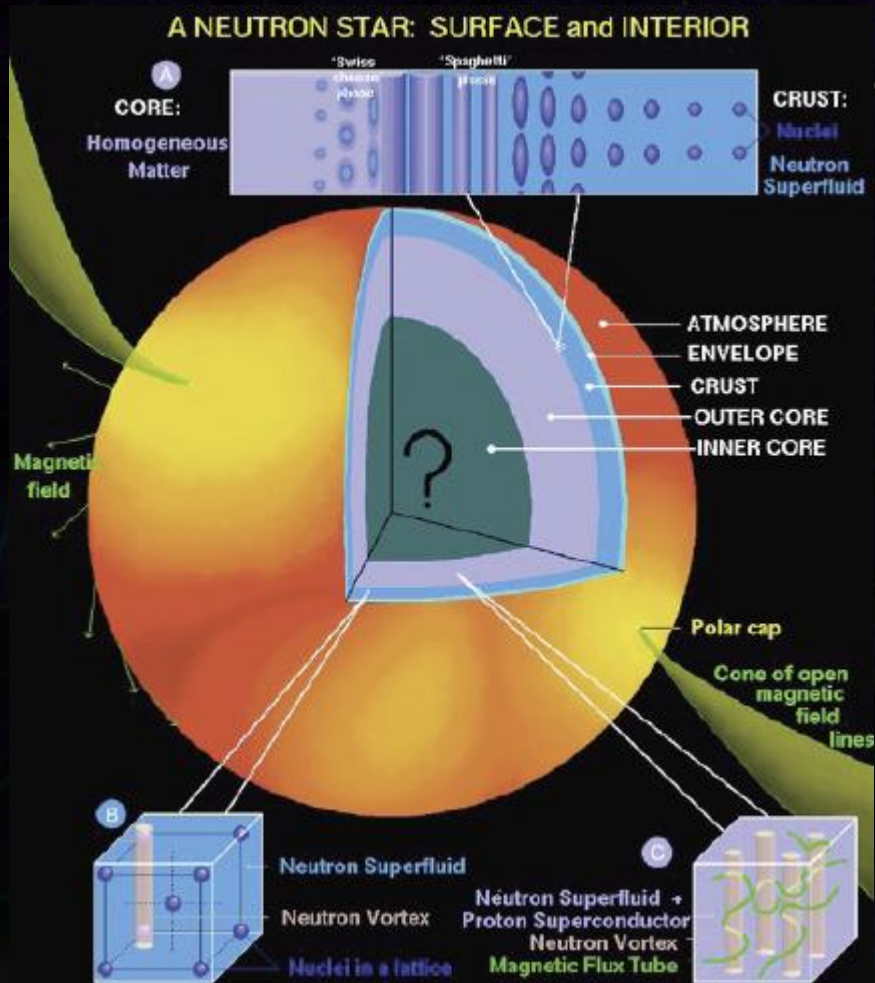
相対論・宇宙論

連星合体 → 標準音源
(Standard Siren)

強い重力場での重力法則
宇宙の加速膨張観測

Messenger and Read, arXiv:1107.5725

中性子星の構造



中性子星

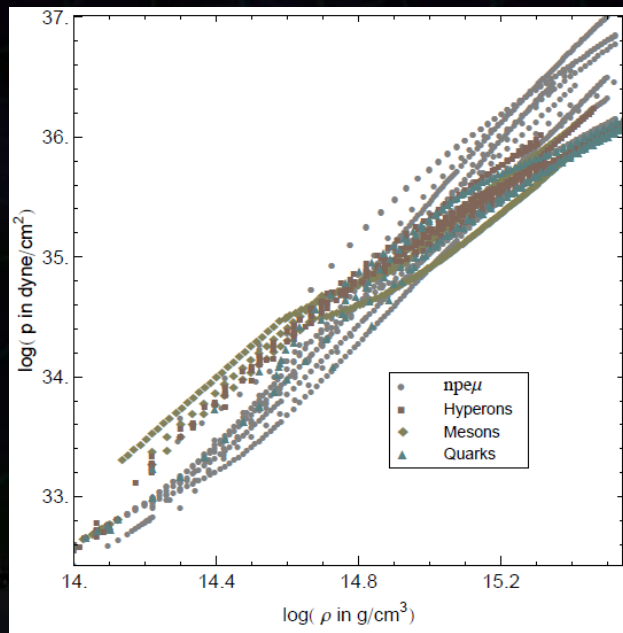
- 太陽質量程度, 半径10km程度の高密度天体.
- 中心部密度 : $2 \sim 15\rho_0$

ここで ρ_0 は標準原子核密度
 $\rho_0 = 2.8 \times 10^{17} \text{ [kg/m}^3\text{]}$

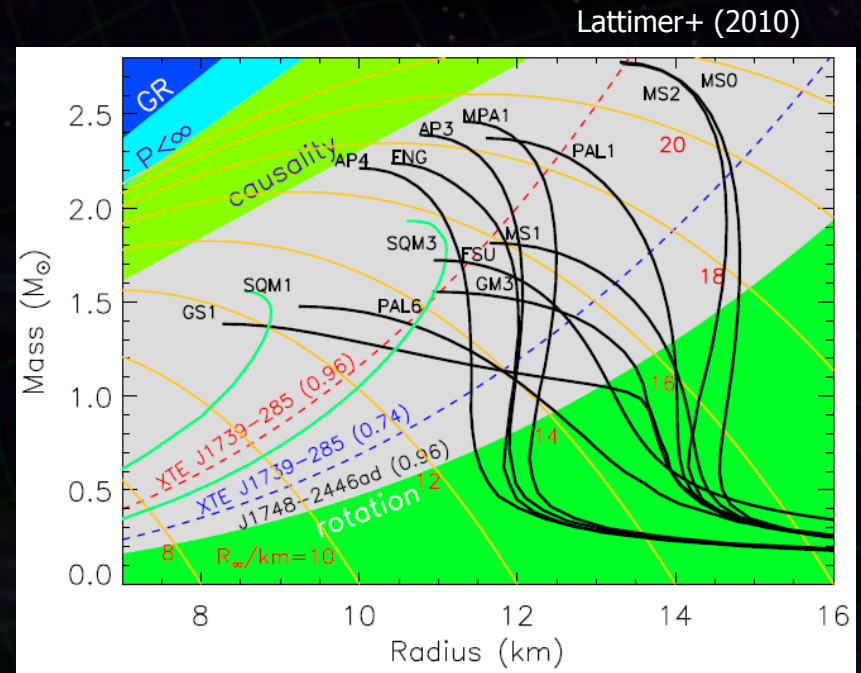
核密度以上の性質は
ほとんど理解されていない。

中性子星の状態方程式

- 高密度核物質の状態方程式 (EoS, Equation of State)
 - 高エネルギー天体現象の理解 (連星中性子星合体, 超新星爆発)
 - 核物理の理解 (ハイペロン, クォーク, 中間子凝縮)
 - 高密度EoSと質量-半径が対応.
 - 各EOSに応じた最大質量 M_{\max} が存在

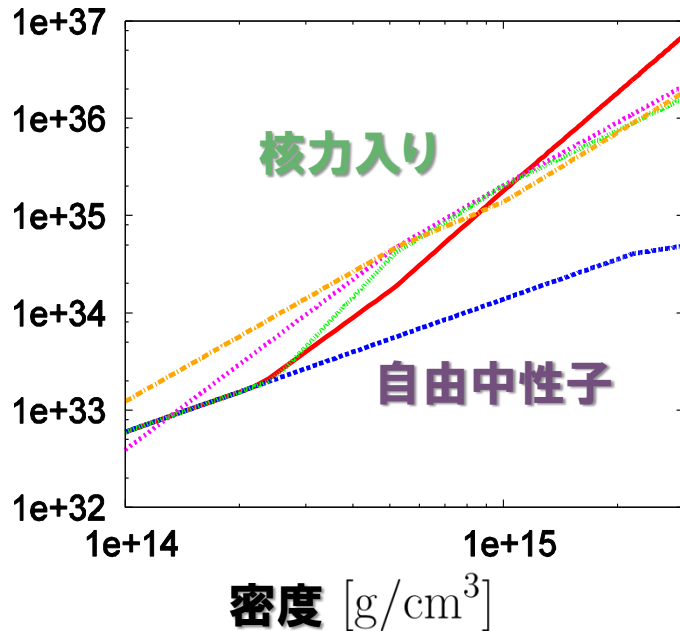


↔
一般相対論的
静水圧平衡



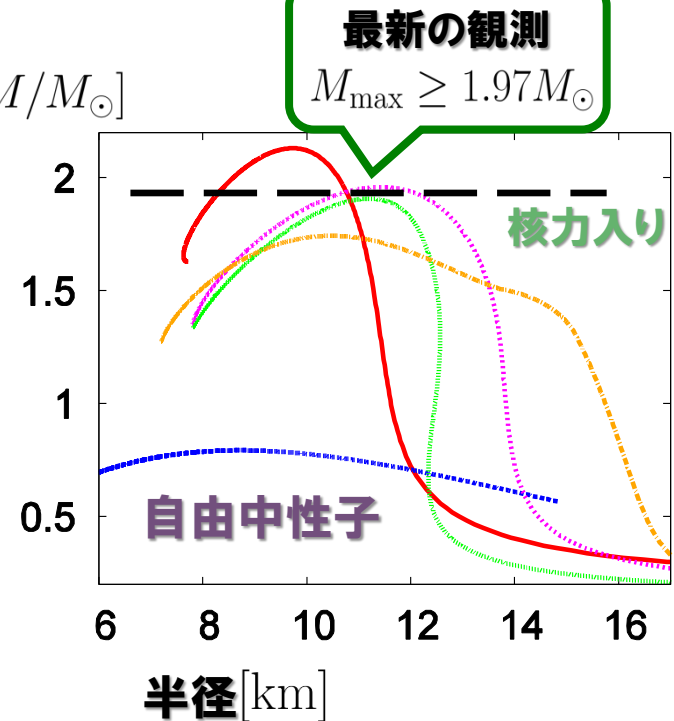
Lattimer+ (2010)

圧力 [dyne/cm²]



質量 [M/M_{\odot}]

一般相対論的
静水圧平衡



- 高密度EoSと質量-半径が対応.
- 各EOSに応じた最大質量 M_{\max} が存在

Lindblom (1992)

Akmal, et al. (1998) ,Douchin and Haensel (2001)

Glendenning and Moszkowski (1991) ,Pandharipande and Smith (1975), Alford et al. (2005)

重力波の観測により、中性子星の状態方程式に制限を与えられる。

• **連星中性子星の合体** Hotokezaka+, PRD (2011), Kiuchi+, PRD (2009)

- 合体直前：中性子星の潮汐変形, 重力波位相の変化.
- 合体直後：HMNSの形成, HMNS自転に同期した信号ピーク.

• **中性子星-ブラックホールの合体** Kyutoku+, PRD (2011)

- 中性子星の潮汐変形/破壊の様子.
- 合体後の信号カットオフ周波数 - 中性子星半径の相関.

• **マグネターからの重力波** Kashiya+, PRD (2011)

- 非常に強い磁場(10^{14-16} G)を持つ中性子星.
- ジャイアントフレア → 軟ガンマ線リピーターとして観測される.
- 中性子星の振動が励起 → 重力波の放射.
- 重力波の周波数, 周波数変化からEoS情報を得る.

- Piecewise-polytropic EoS

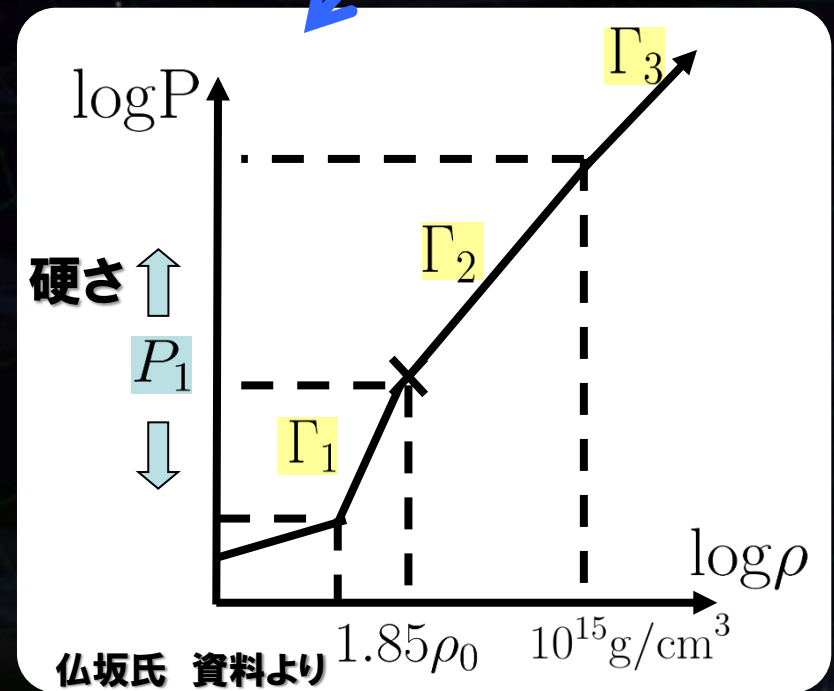
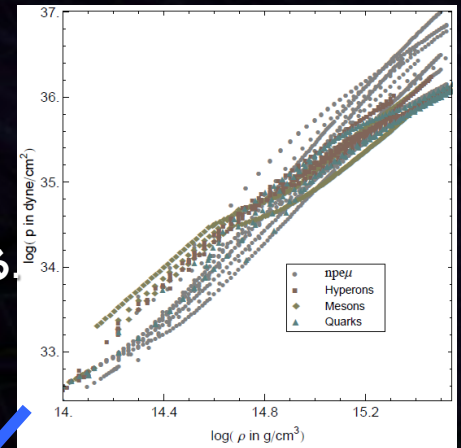
Read+, PRD (2009)

- 高密度EoSを系統的に扱うための現象論モデル.
- 核物理から予言されるEoSを4つのパラメータで表現.

$$P_{\text{cold}} = K_i \cdot \rho^{\Gamma_i}$$

($P_1, \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$)

多数のEoSモデル
テーブル化されている.



中性子星連星合体の数値シミュレーション

Hotokezaka+, PRD (2011)

等質量連星
中性子星合体

HMNS形成

遠心力によって
 $M > M_{\max}$
を支える中性子星

Type I

BHへ崩壊

Type II
寿命 < 5ms

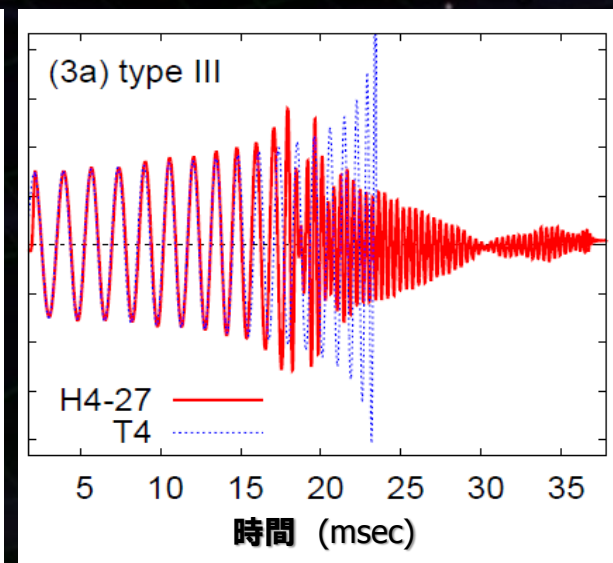
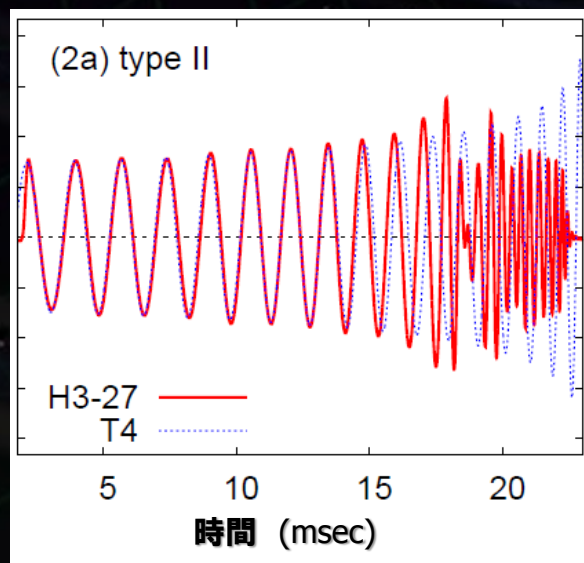
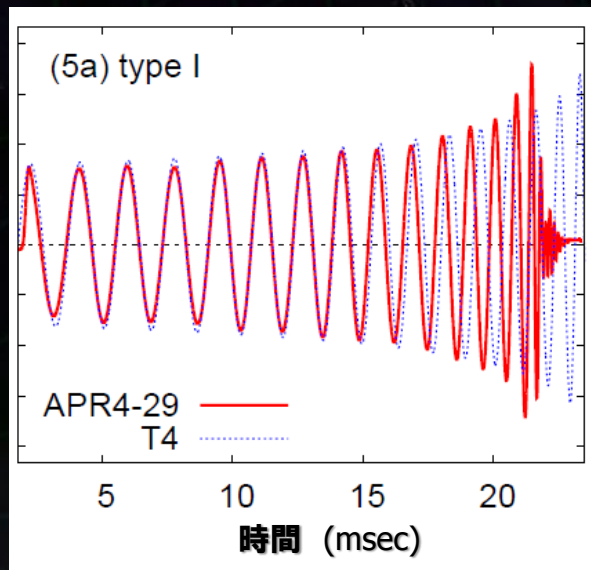
Short lived

BHへ崩壊

Type III
寿命 > 5ms

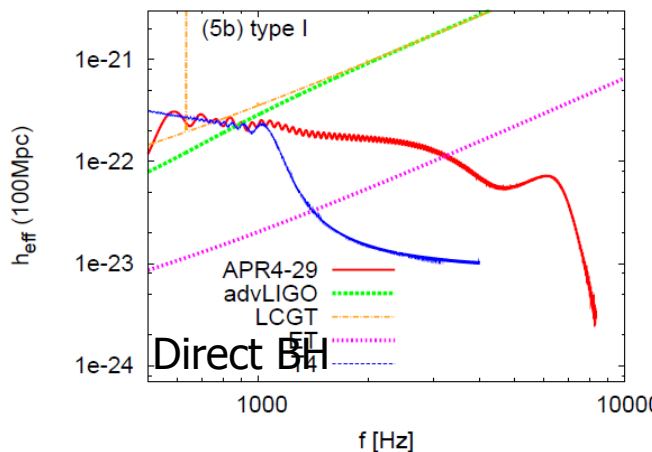
Long lived

BHへ崩壊

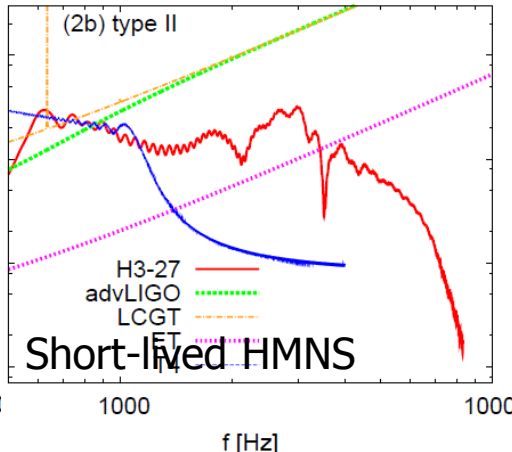


連星合体のスペクトル

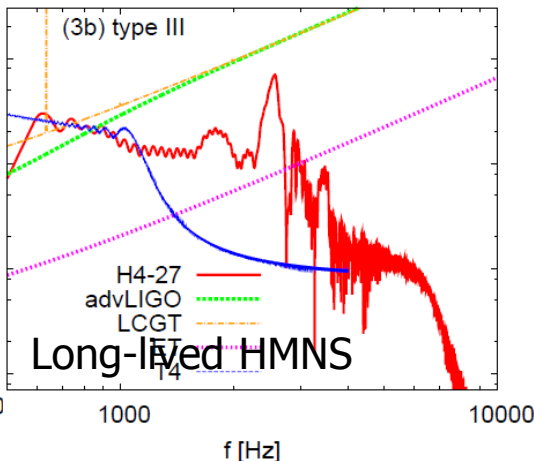
距離100Mpc APR4, **Type I**
1.45-1.45Msun



H3, **Type II**
1.35-1.35Msun



H4, **Type III**
1.35-1.35Msun

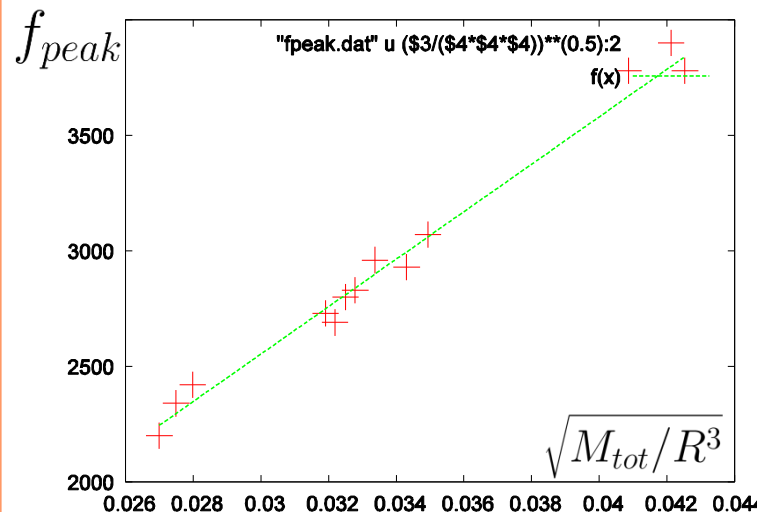


HMNSの回転周波数にピーク
→ 中性子星の半径と相関



EOSに強い制限

Hotokezaka+, PRD (2011)
Bauswein+ (2011)



・連星系からの重力波 – 精度の良い時計.

→ 標準音源 (Standard Siren) Schutz (1986)

連星系からの重力波

Fig by Nishizawa (2011)

$$M_c = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

観測データより h_{+x}, f, \dot{f} が分かる



$$\dot{f}(t) \propto [(1+z)M_c]^{5/3} f^{11/3},$$

$M_z \equiv (1+z)M_c$ が分かる



$$h_{+x}(t) \propto \frac{[(1+z)M_c]^{5/3} f^{2/3}}{D_L},$$

D_L : 光度距離が決まる

赤方偏移は不定 (遠くの軽い連星? or 近くの重い連星?)

- 電磁波の観測からホスト銀河 (赤方偏移) が分かれば、 M_c も決まる
- 重力波によるハッブル図 (z, d_L) が書け、宇宙膨張測定が可能 (距離梯子は必要無い。標準光源としての SNe の検証。)

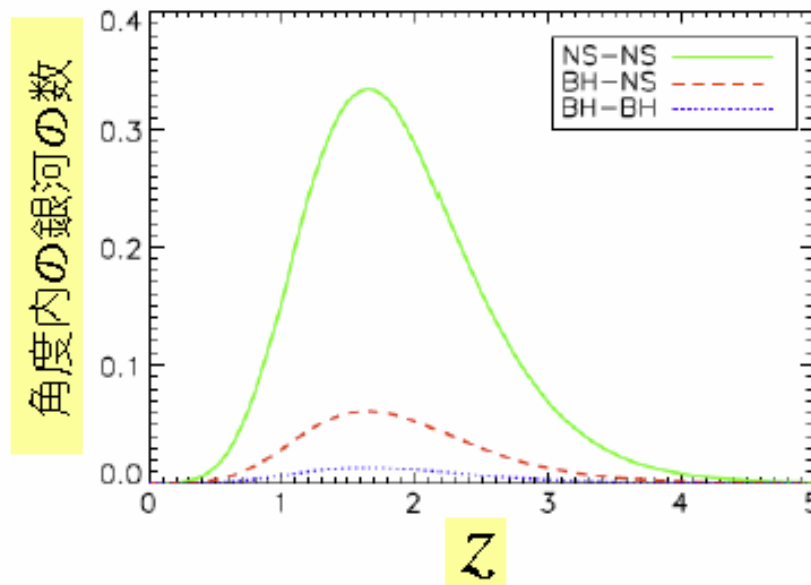
・ホスト銀河の同定

BBO の場合、角度分解能 1 - 100 秒角平方

Fig by Nishizawa (2011)

Hubble Ultra Deep Field

$dN/d\Omega = 1,000$ galaxies/arcmin²



BBO の視野内の銀河は
1つ以下



ホスト銀河を絞り込む
ことはおそらく可能

[Cutler & Holz 2009]

しかし、個々の銀河の赤方偏移を決めるのは時間がかかる。
そもそも銀河が見えない場合もある。
本当に全ての連星の z を決めることは可能か？

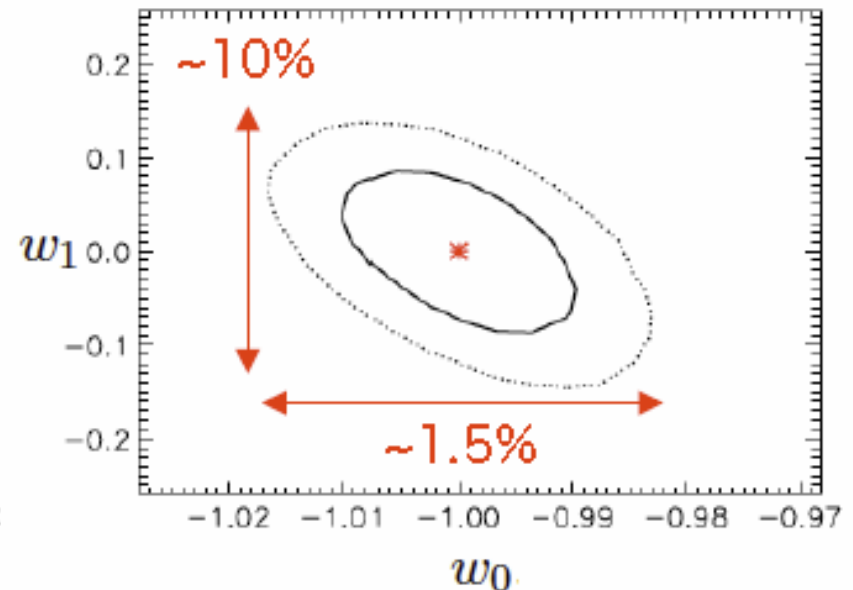
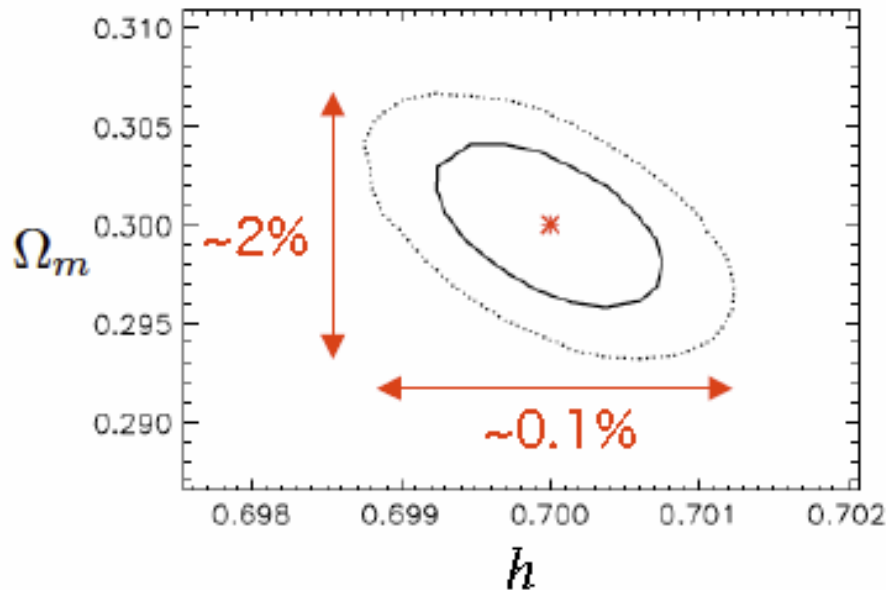
Fig by Nishizawa (2011)

BBOで観測される $\sim 10^5$ 個の連星を用いて、宇宙論パラメータを決定する

平坦宇宙、観測時間 3yr を仮定

[Cutler & Holz 2009]

$$w(z) = w_0 + w_1 \frac{z}{1+z}$$



la 型超新星に比べて、非常に良い決定精度 !!

第1章 重力波

重力波による新しい天文学の可能性

重力波 : 「時空のさざなみ」

アインシュタイン方程式の波動解

激しい天体現象から放射される

連星パルサーの観測

→ 重力波の存在は証明されている

第1章 終わり