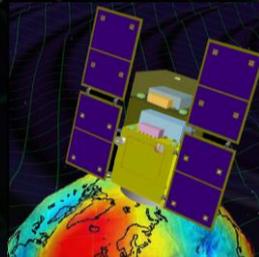
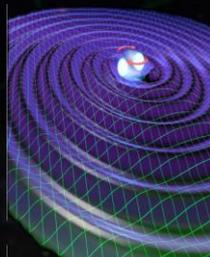
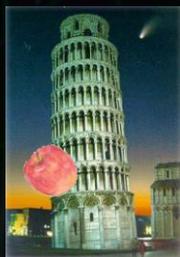


共通基礎天文学

重力波天文学

安東 正樹 (国立天文台)



講義の予定

第1回 重力波による天文学

第2回 観測技術と観測結果

第3回 次世代重力波望遠鏡

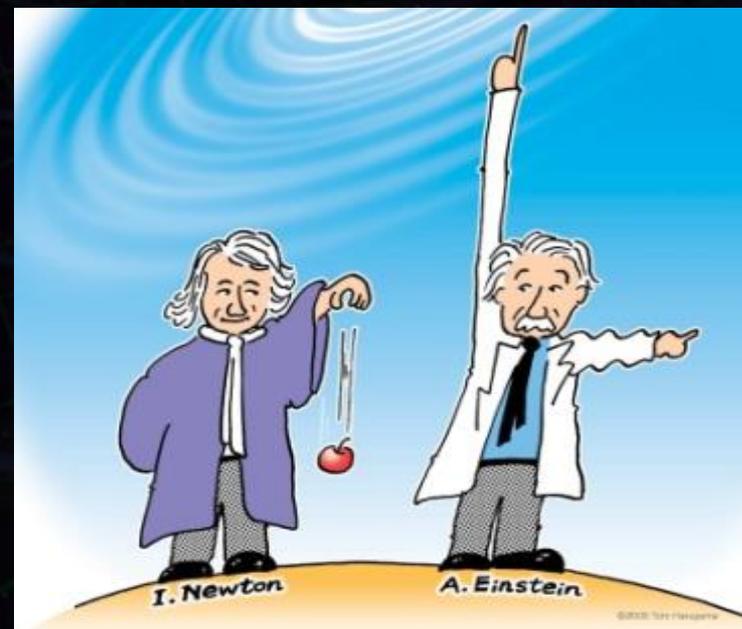
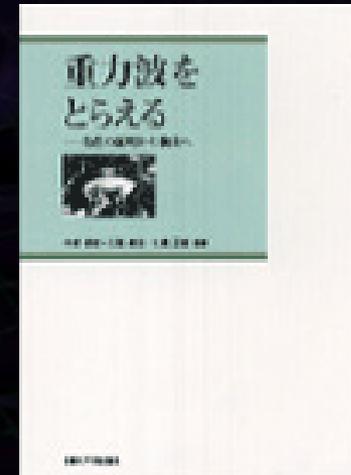


イラスト Tom Haruyama

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)



講義の予定

- 1回目 重力波による天文学
- 2回目 観測技術と観測結果
- 3回目 次世代重力波望遠鏡

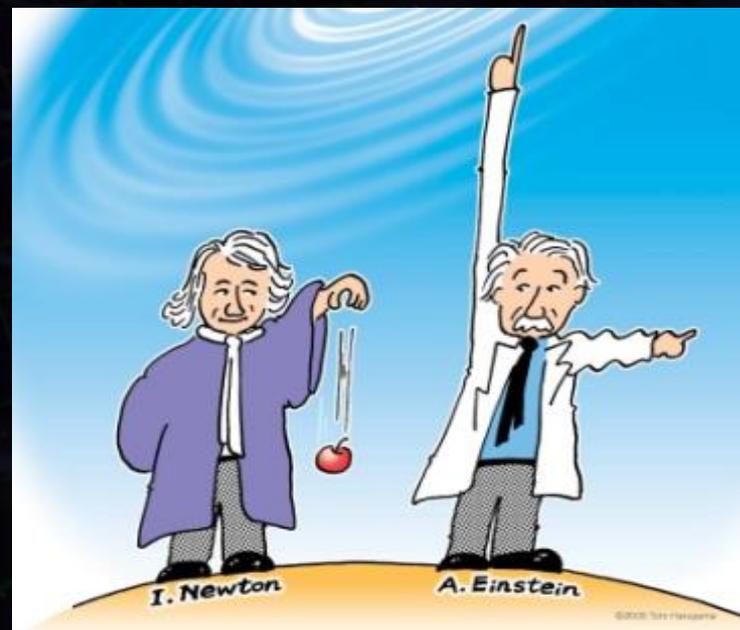


イラスト Tom Haruyama

重力波による天文学???



天文学・宇宙物理学は何を目指している？

- 天体や天文現象、宇宙のことを調べ、理解すること。
- 私たちの頭上にある 月・惑星・恒星から遠くの銀河などを対象にする。

- 宇宙の誕生と成り立ちを知る。
- 極限状態の物理を知る。
- 地球・生命の誕生と歴史を知る。

どうやって宇宙を調べる?

- 宇宙に行って調べる. 地上のものを調べる.
- 宇宙から来るものを調べる

電磁波, 宇宙線, ニュートリノ, 重力波, 隕石



すばる (光赤外望遠鏡)



アルマ (電波望遠鏡)



TAMA300 (重力波望遠鏡)

重力波で宇宙を探る



背景画: NASA/WMAP Science Team

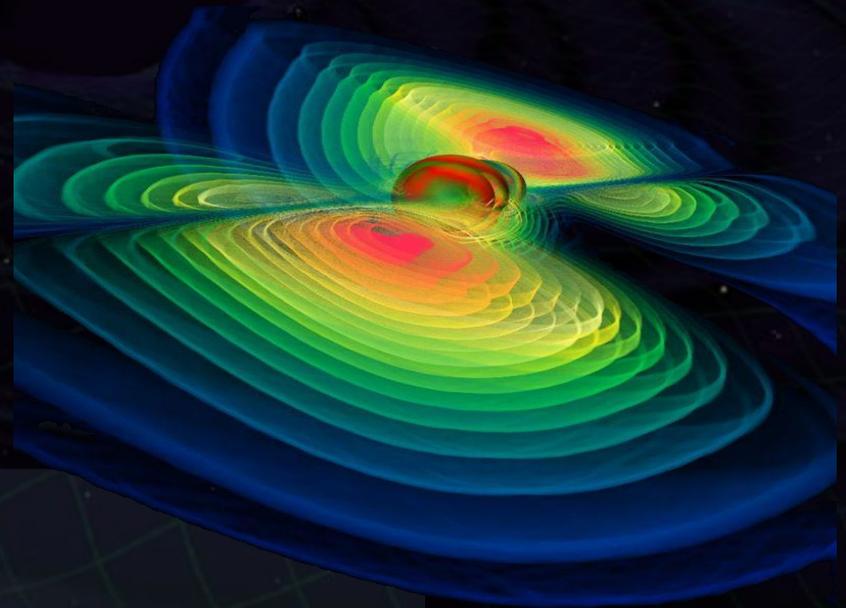
重力波の特徴

- ・質量の加速度運動から放射
- ・物質に対して 強い透過力

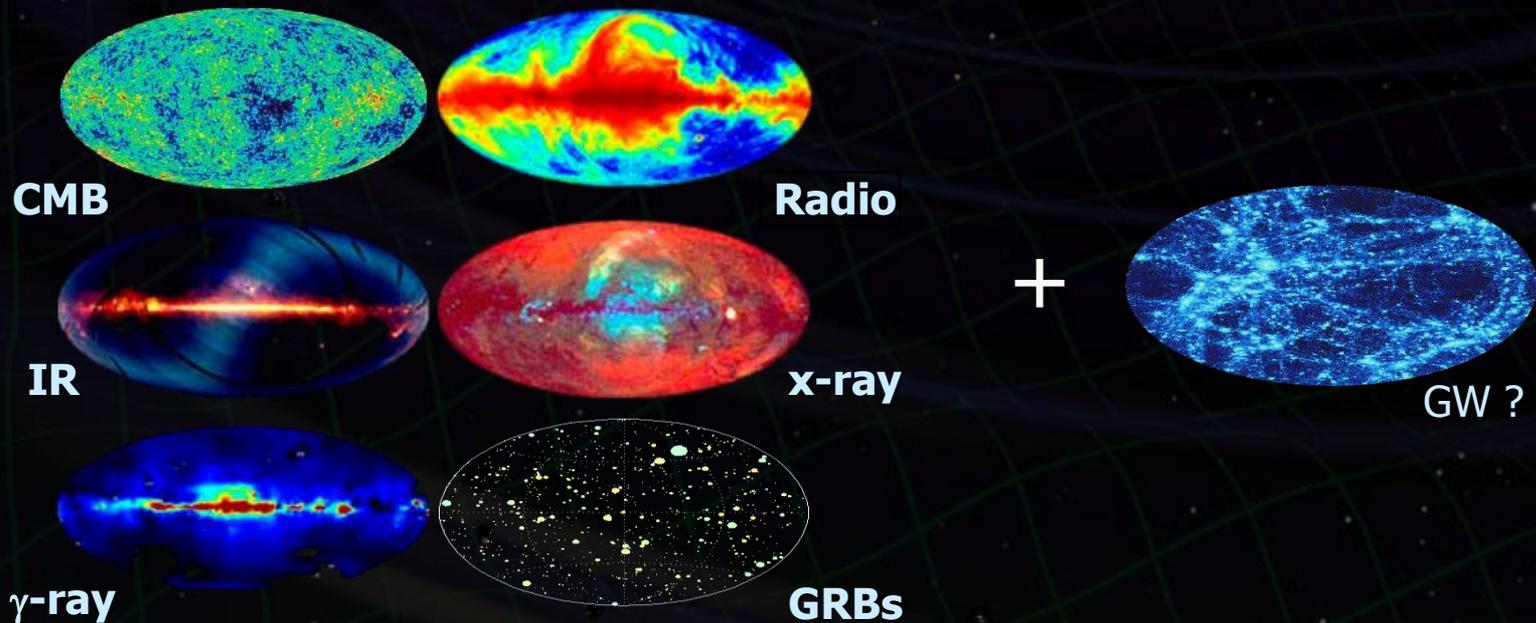


宇宙を観測する新しい手段

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



宇宙を観測する新しい手段 → 新しい発見!!!



主な重力波源



CG/KAGAYA

初期宇宙の観測



Background:
original figure by
NASA/WMAP Science Team

しかし… 重力波はまだ捕まっていない!

⇒ 天文学・宇宙物理学のフロンティア

- 天文学：宇宙を調べる新しい手段.
- 宇宙論：初期宇宙の直接観測 → 宇宙の誕生と進化.
- 物理学：極限状態の物理 → 大統一理論.

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 (アインシュタイン, 1916)



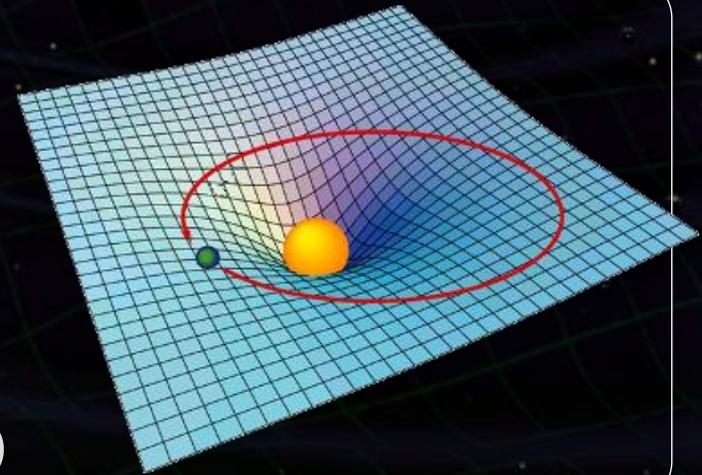
→ 重力を時空の性質と解釈

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)

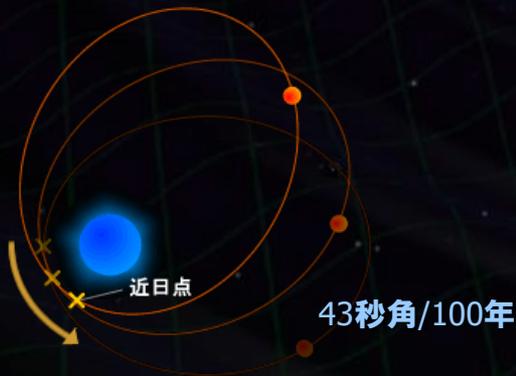


物質が時空の曲がりを生み出し、
時空の曲がり重力として物質の運動に影響する。

一般相対性理論は正しい???

→ '古典的'な3つの検証実験.

水星の近日点移動



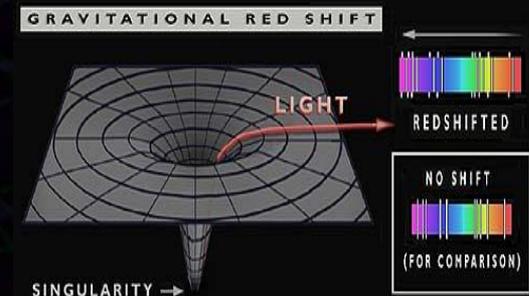
(アインシュタイン, 1915)

光の曲がり (重力レンズ)



皆既日食時に、恒星の見かけの位置を観測。
(エディントン, 1919)

重力赤方偏移



地上(高低差 22m)での
 γ 線共鳴吸収測定。
(パウンド, レプカ, 1960)

その他, シャピロ遅延, GPS補正, 慣性引きずり効果など多数.

重力を時空の曲がり(潮汐力)として表現.

→ その曲がりか波として伝搬する解がある.



物質の変動, 形状の変化

→ 時空の歪みが

'さざなみ'として伝播.



重力波

(アインシュタイン, 1916)

電磁波

- 光速で伝播する
電磁場の変動

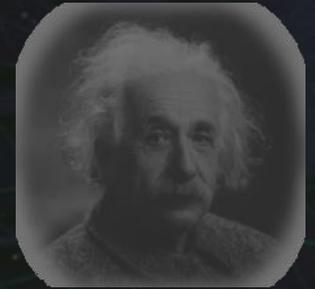


J.C. Maxwell

- **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

重力波

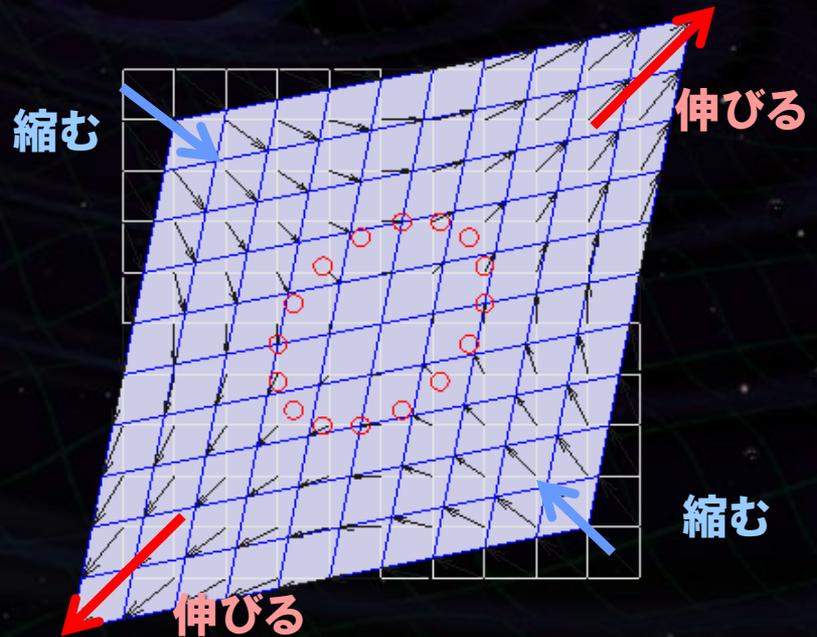
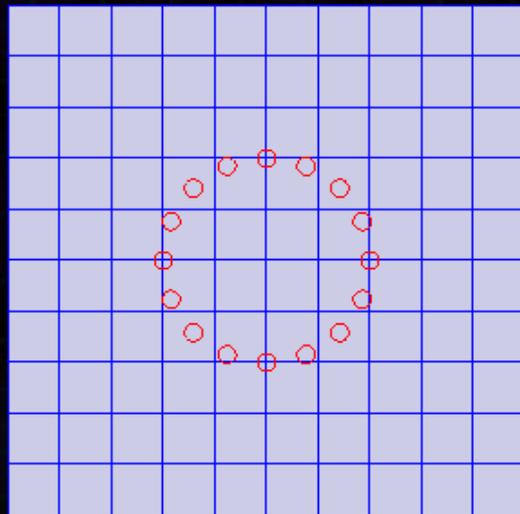
- 光速で伝播する
時空の歪み



A. Einstein

- **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**

空間の歪み → 2点間の距離が変化.



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

2点間の
微小距離

$$ds^2 = A dx^2 + B dy^2 + C dx dy$$

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

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

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

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)

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

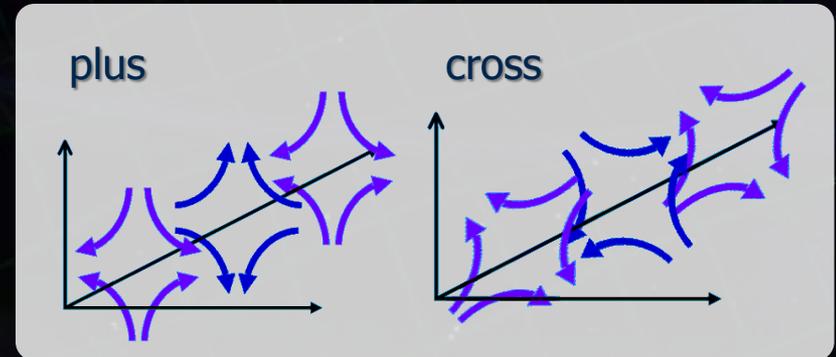
平面波解 (横波) : 重力波

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

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

2つの偏波 :

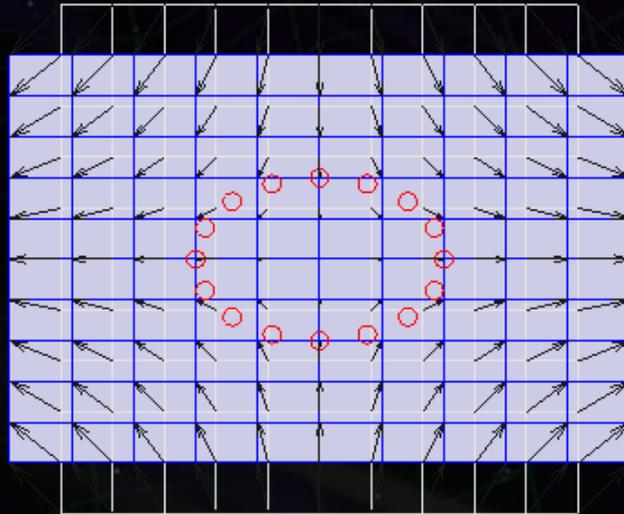
Plus mode, Cross mode



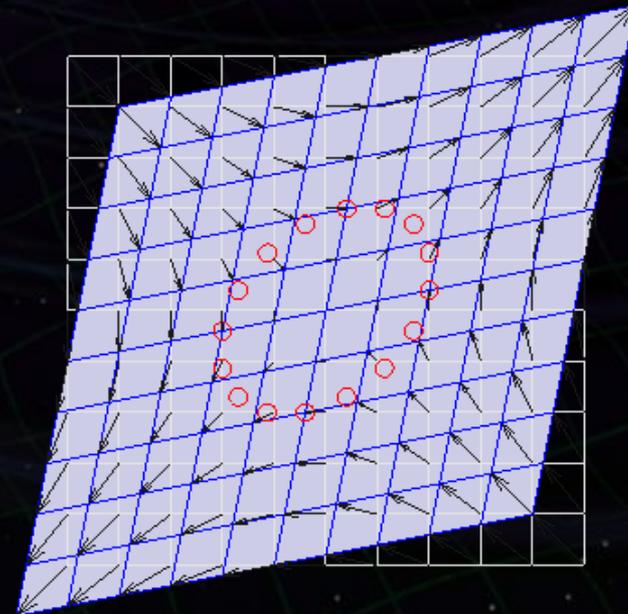
重力波の2つのモード

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 $L \rightarrow L(1+h)$ と変化.

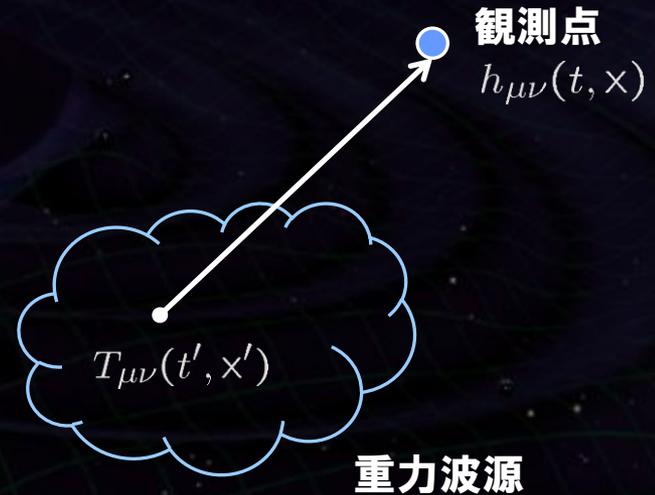
線形化されたアインシュタイン方程式

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

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)

重力波振幅：波源の四重極運動エネルギーに比例

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

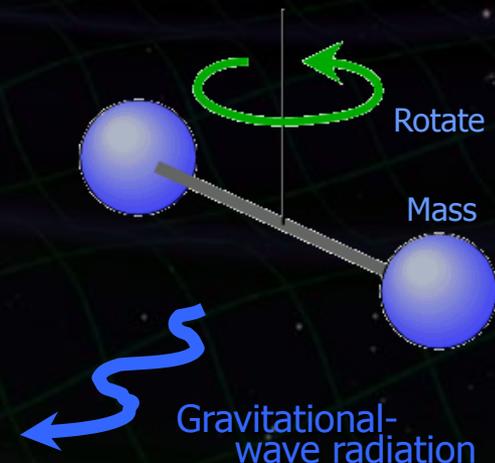
~ (Quadrupole kinetic energy)

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



(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。

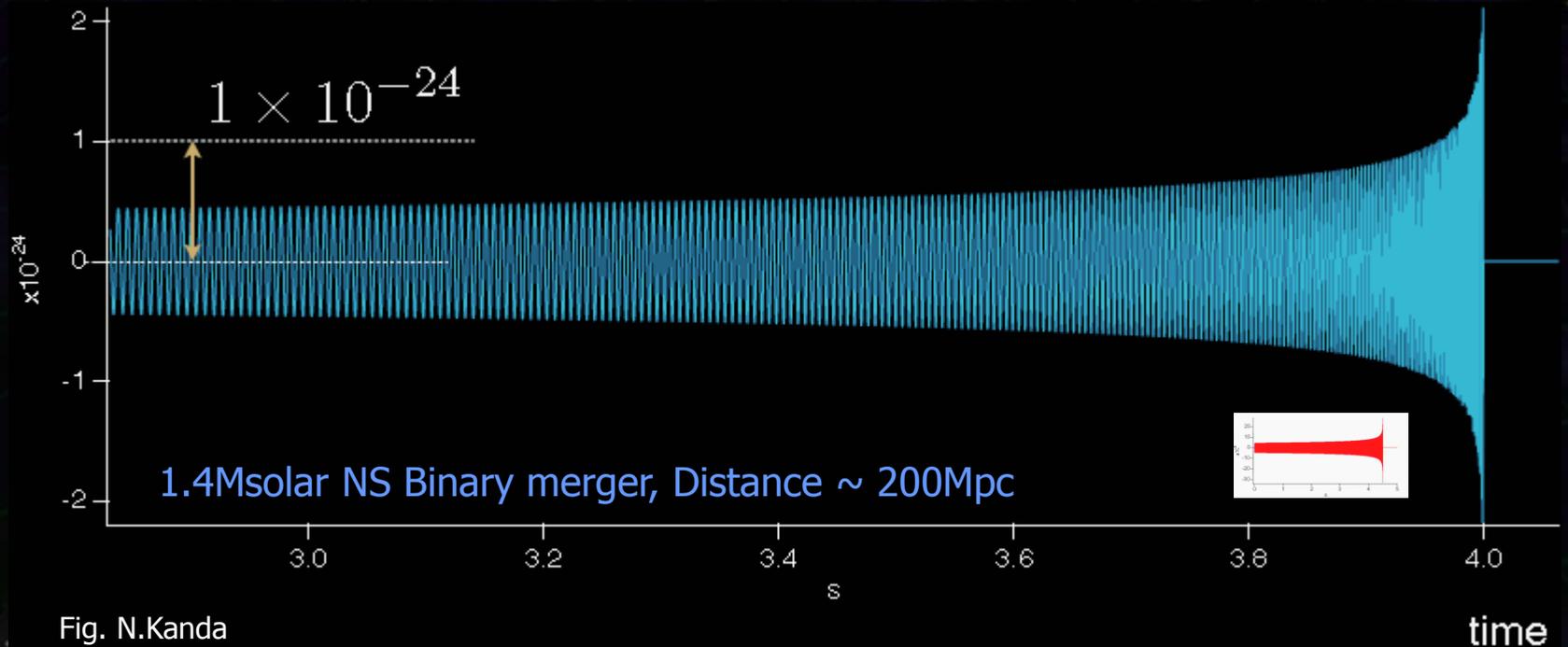
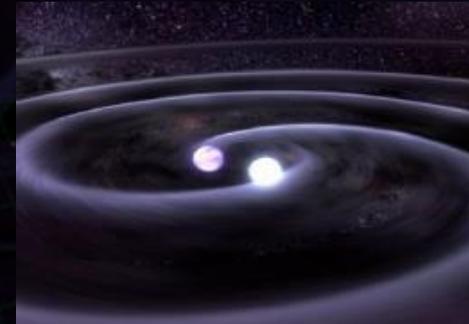


Fig. N.Kanda

人工重力波

ダンベルの回転による重力波の発生

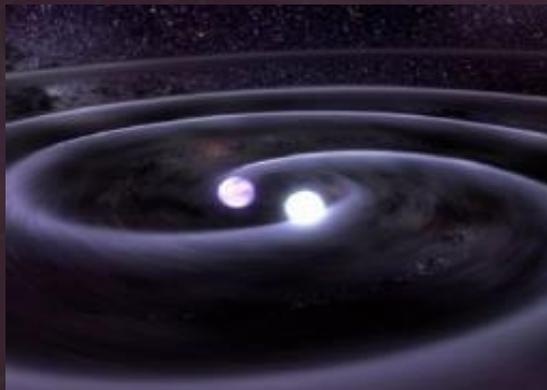
質量 1 ton, 長さ 10 m

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

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

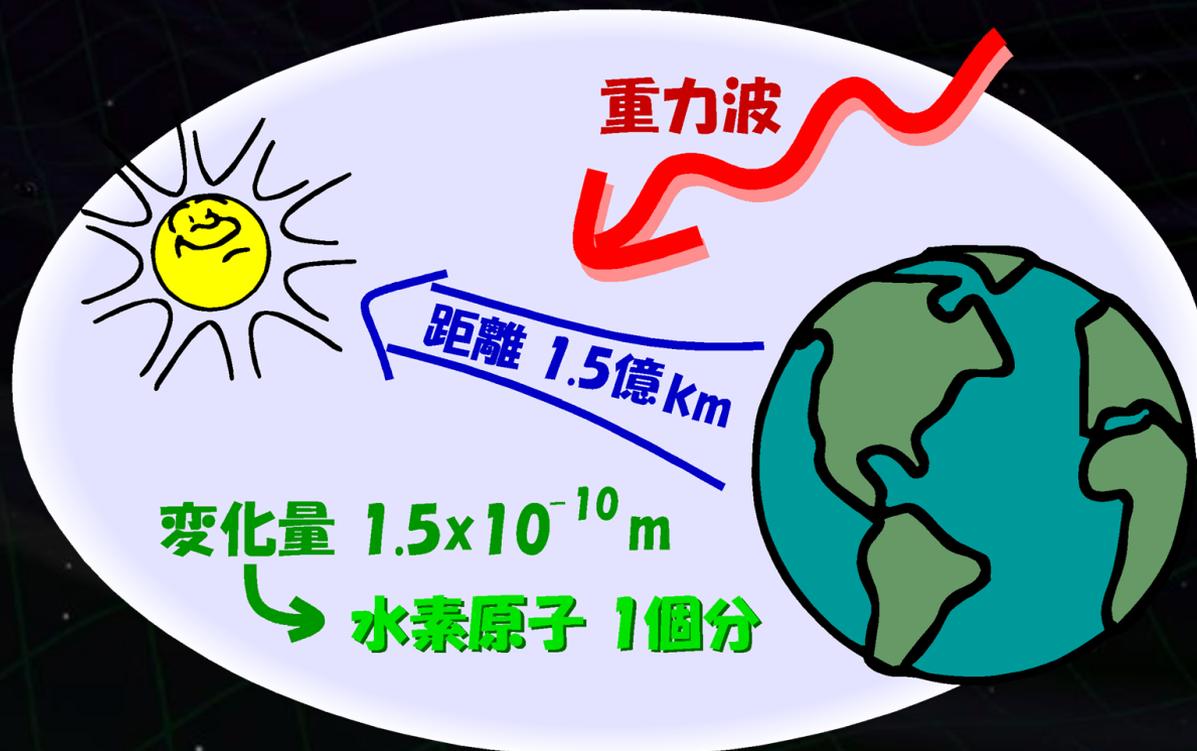
(例) 地球-太陽間の距離変動

距離 1.5×10^{11} m

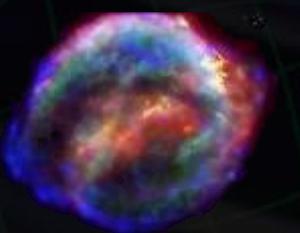
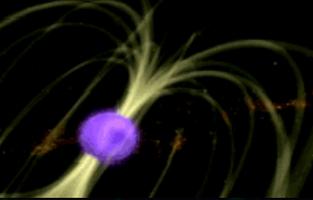
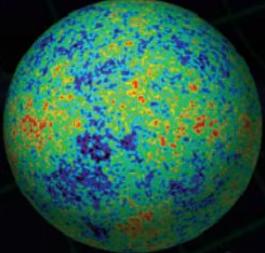


1.5×10^{-10} m の距離変動

重力波振幅 10^{-21}



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>

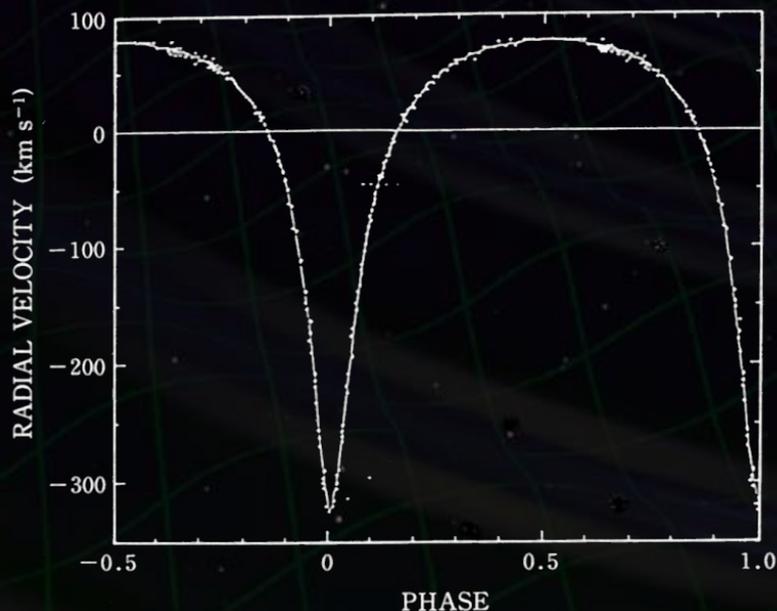
重力波はある???

- 観測による証明 -



連星パルサー 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.



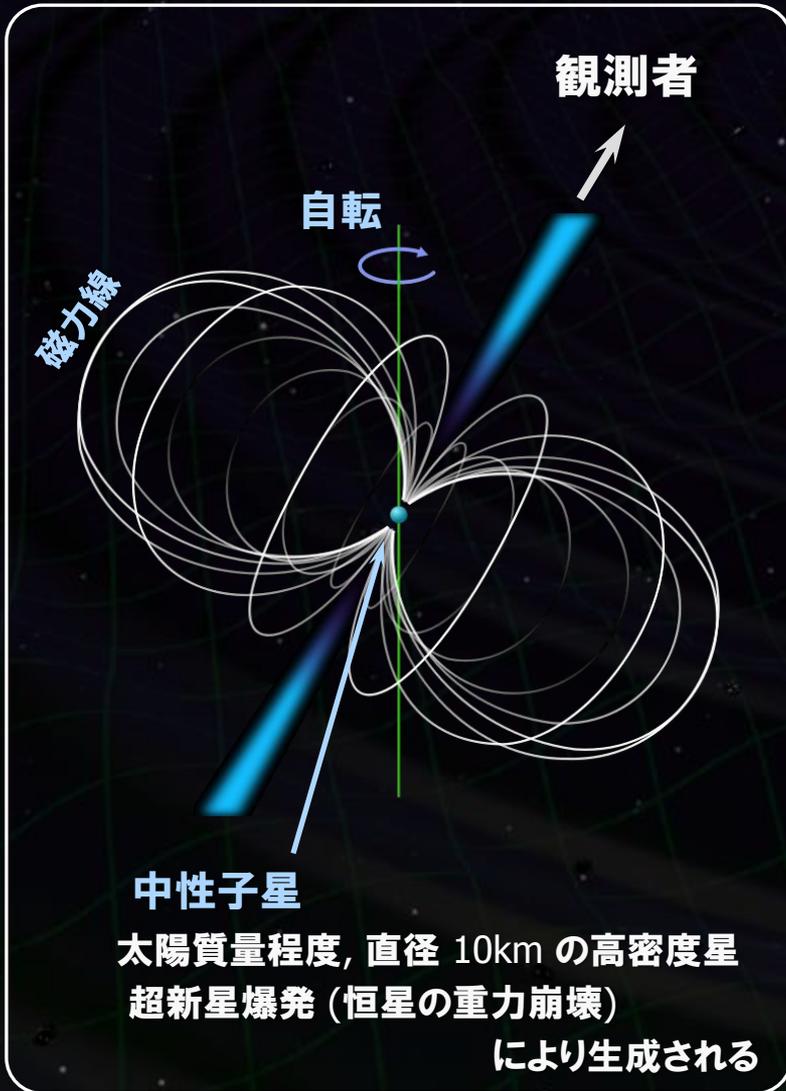
公転周期: 7.75時間

質量: パルサー 1.44 Msolar

伴星 1.39 Msolar

公転周期の変化率:

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



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

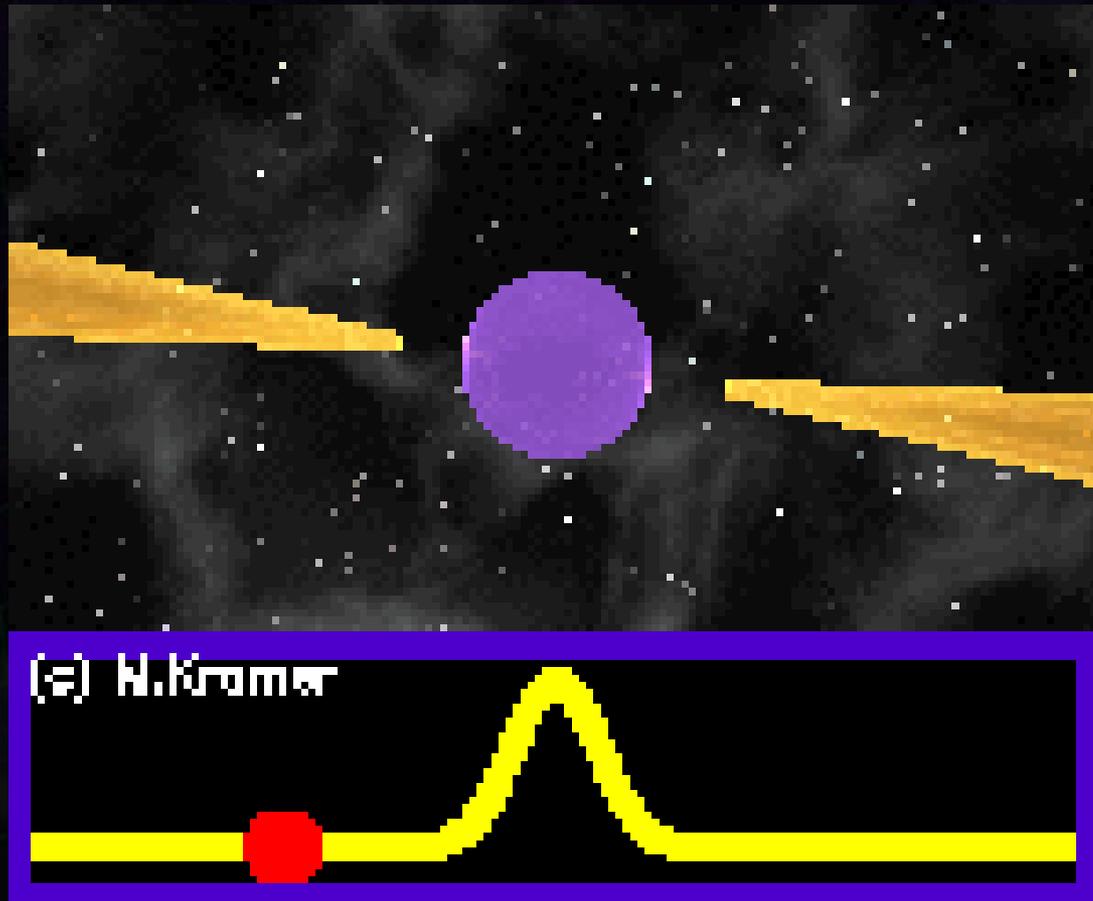
精度の良い 時計 となる

PSR1855+09 5.36... msec

PSR1937+21 1.55... msec

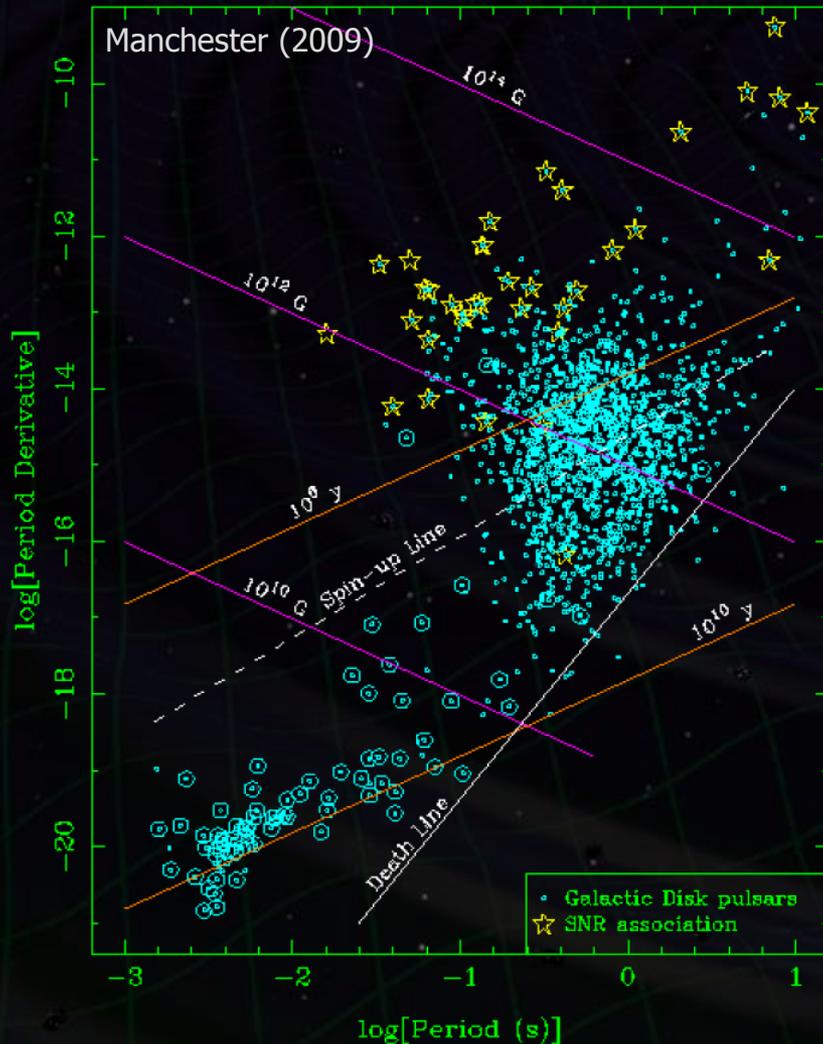
など、15桁の精度

ライトハウスモデル



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2000個が発見されている

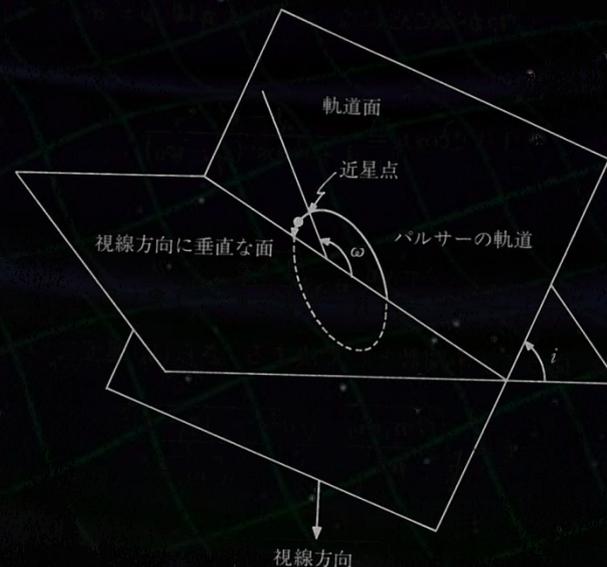
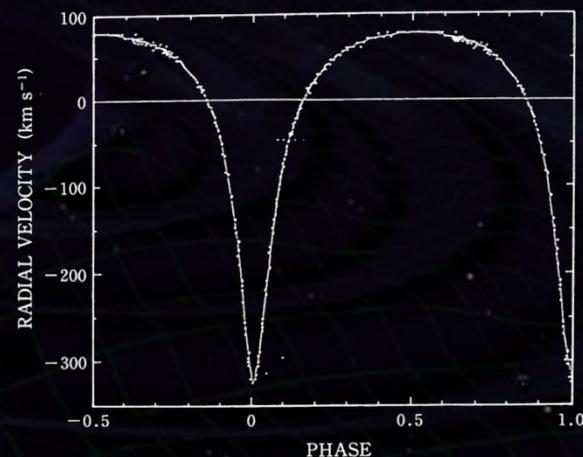
- Most pulsars have $dP \sim 10^{-15}$
- MSPs have dP smaller
by about 5 orders of magnitude
- Most MSPs are binary
- Only a few percent of normal
pulsars are binary
- $P/(2 dP)$ is an indicator of pulsar age
- Most young pulsars are associated
with supernova remnants

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

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

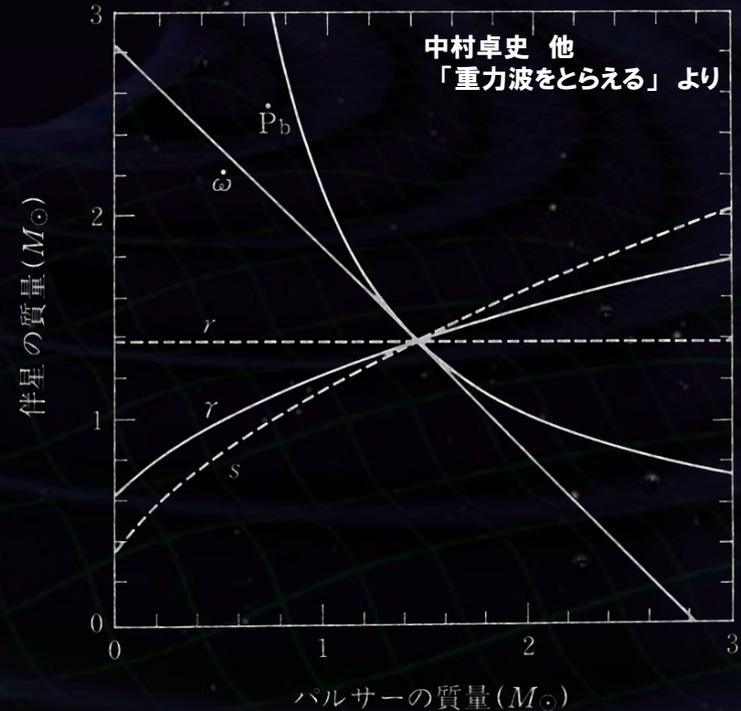
シャピロ時間遅れ

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

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

重力波放出による公転周期減少

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



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

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

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

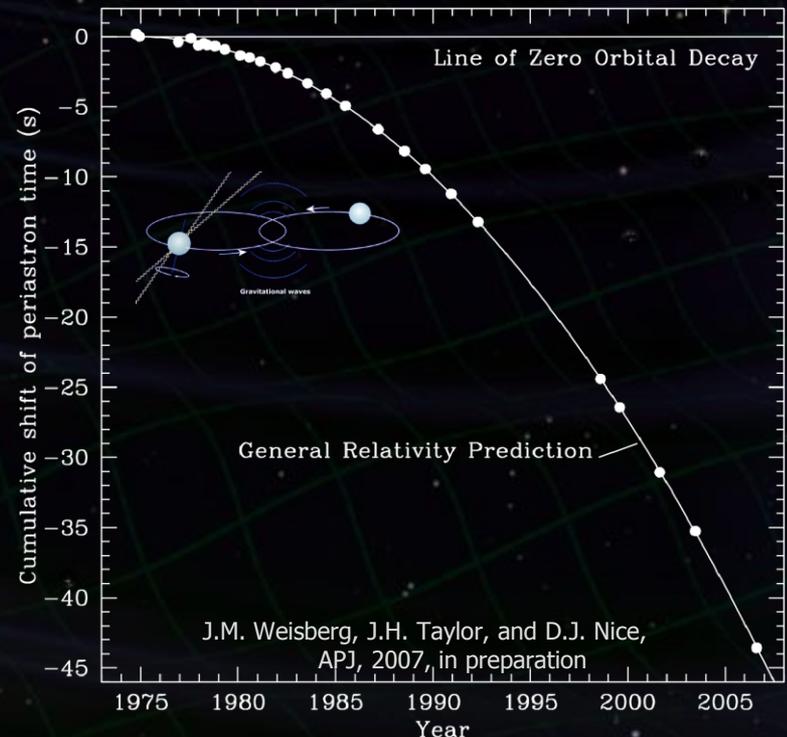
$$\frac{dR}{dt} = -\frac{64G^3\mu M^2}{5c^5 R^3}$$

→ 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

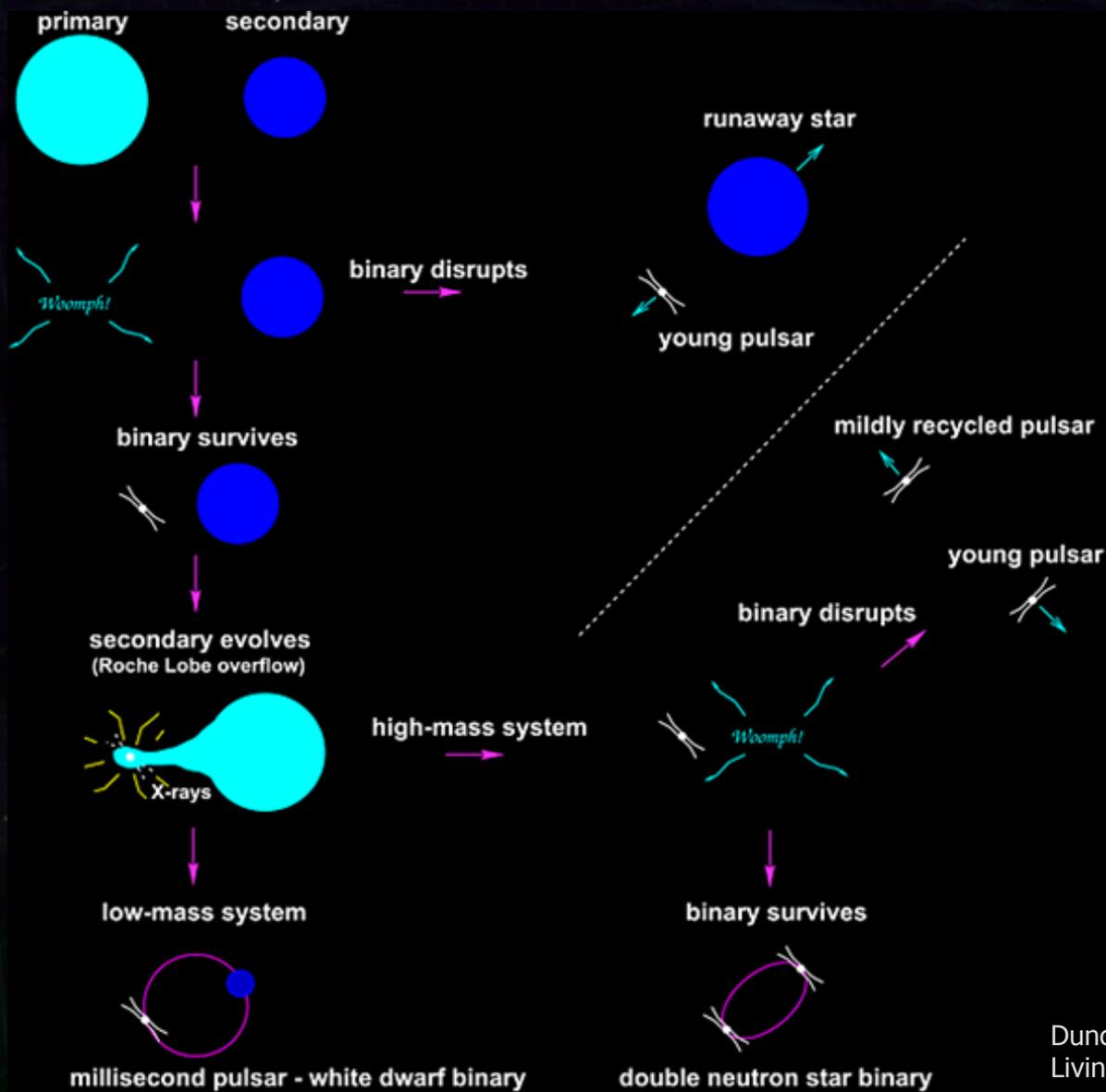
H-T pulsar

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

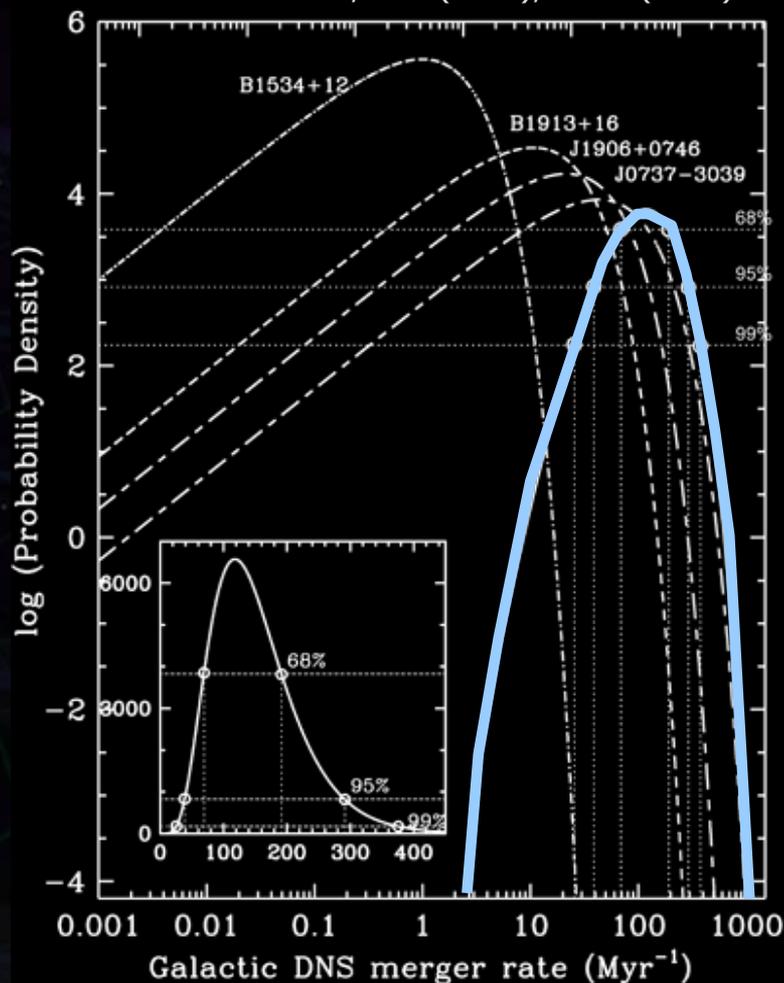
Kalogera+, ApJ (2004),
Lorimer, LRR (2008), Kim+ (2008)

中性子星連星合体の イベントレートの見積もり

宇宙年齢以内に合体するDNS 4つ
→ 銀河系内にある数の
確率分布を見積もりたい。



ベイズ統計を用いる



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

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

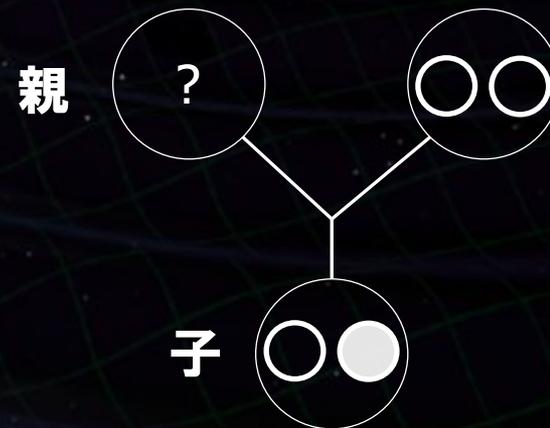
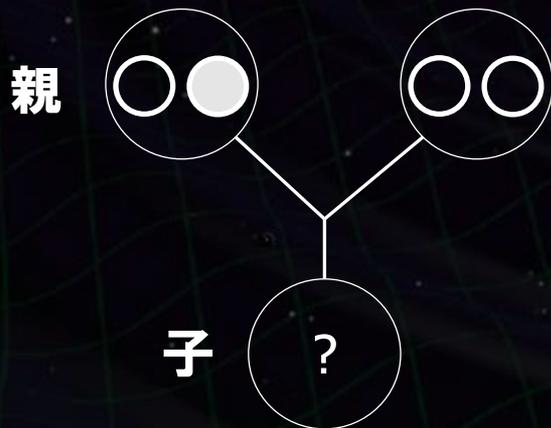
事後確率

(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 ○○ 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)

合体レートの見積もり

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

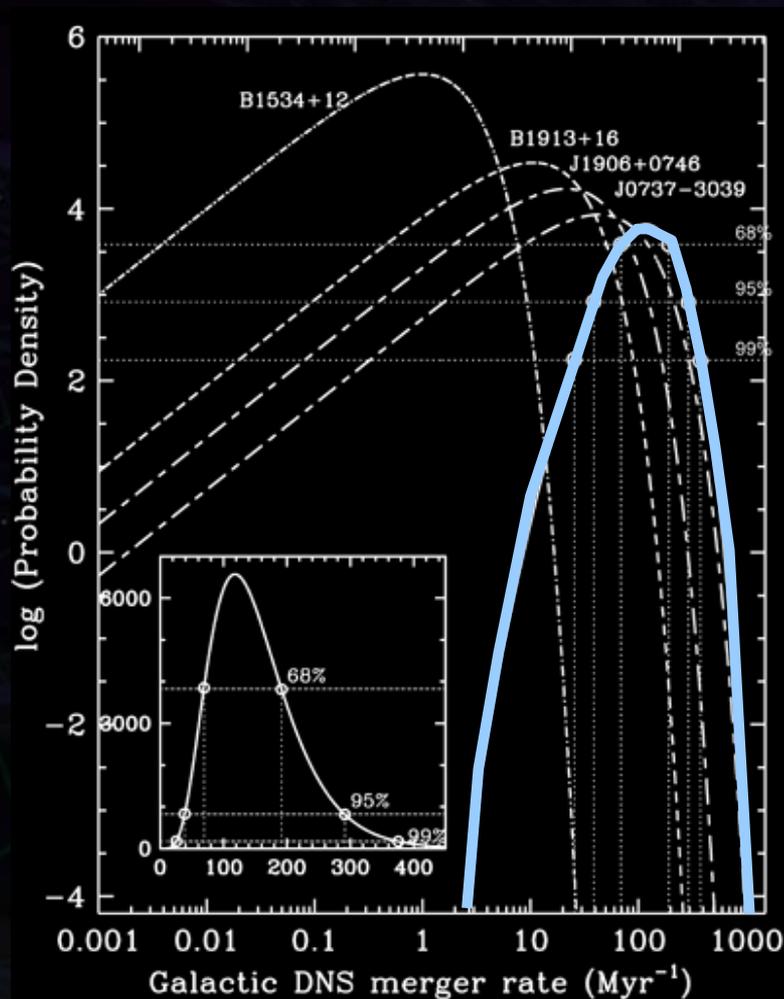
- 宇宙年齢以内に合体するDNS 4つ
- 各'種類' → 銀河系内の数を見積もる。
連星の寿命, 明るさ
パルサー探査で見つけられる確率
銀河系内の分布モデル

+ その種類の連星系が
1つ見つかったという観測事実.



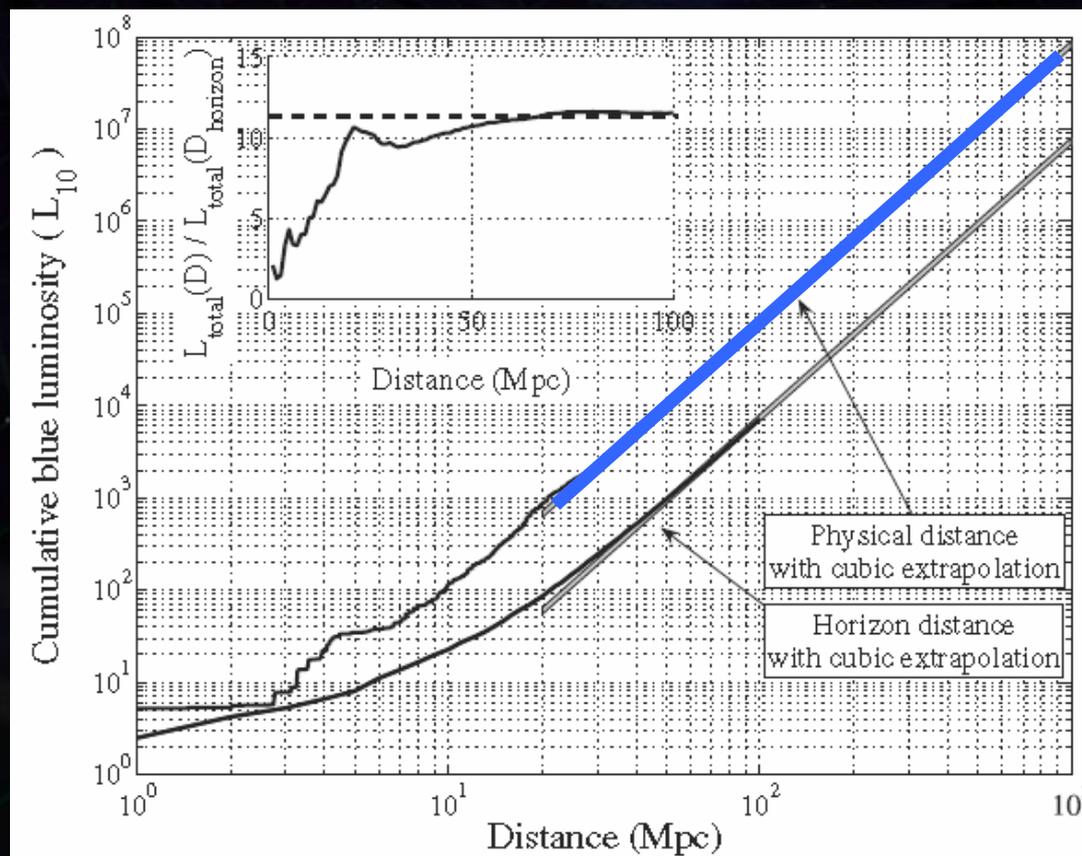
銀河系あたりの合体レート

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



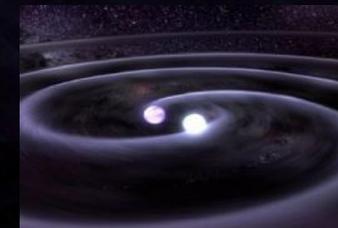
近傍銀河の観測結果を外掃して見積もる

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



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

連星中性子星合体からの重力波の観測



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)

⇒ 観測レートの期待値 **9.8 events/yr**
(1年間の観測での検出確率 99.9%以上)

観測できたら???

- 観測で期待できる知見 -

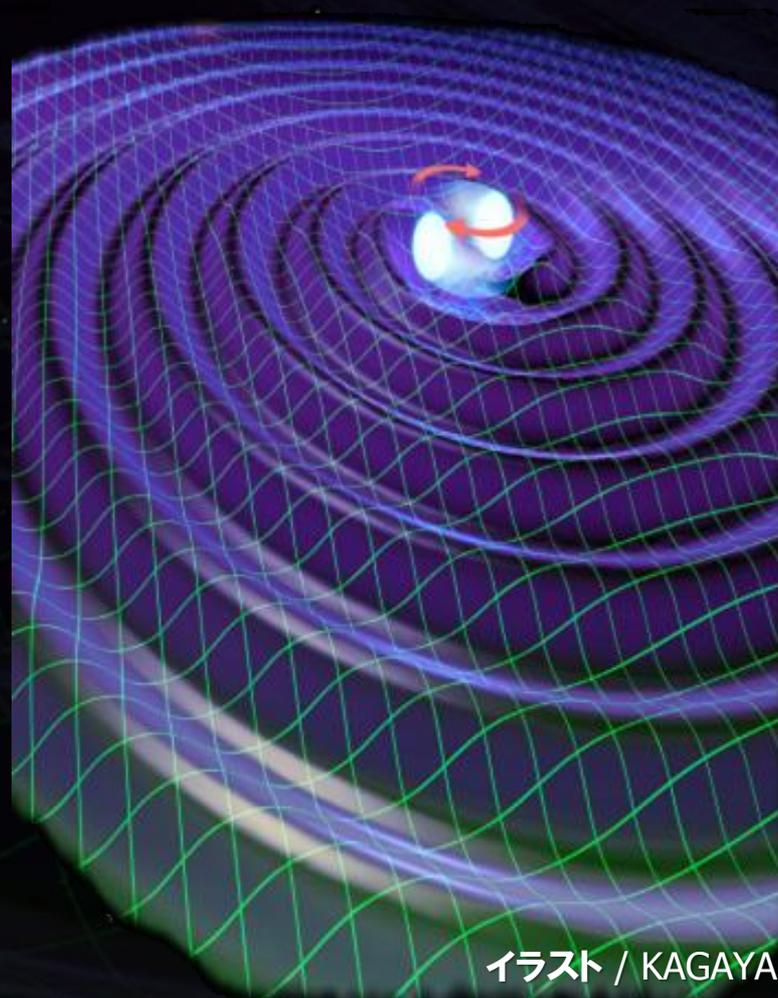


イラスト / KAGAYA

• 重力波の初検出

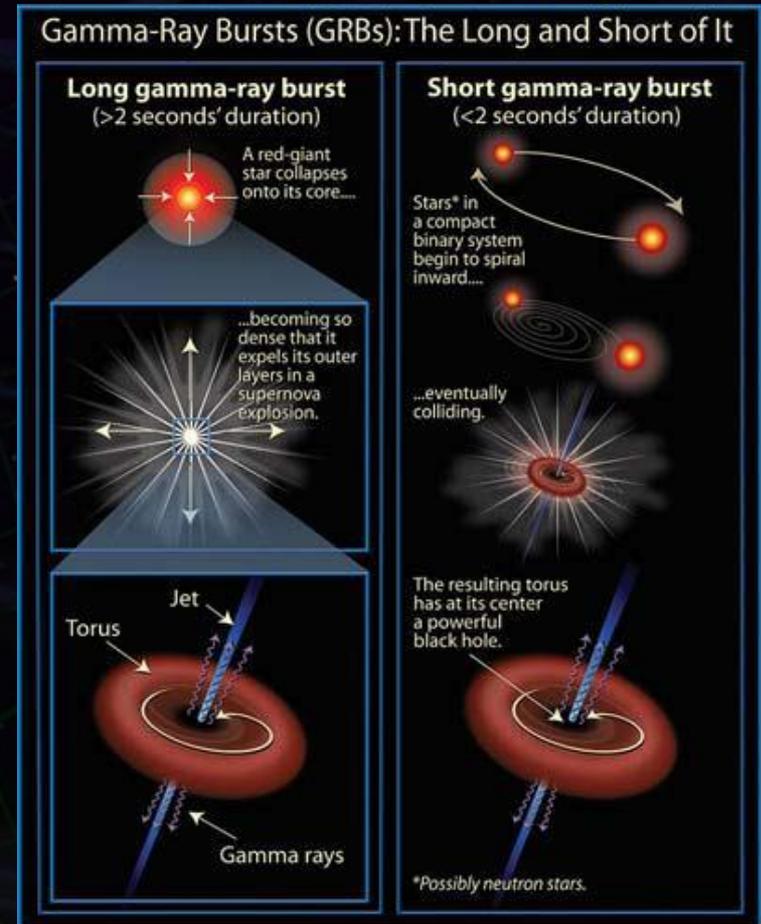
- 連星中性子星：存在が確実，波形が予測できる。
- 相対性理論/重力法則の検証。
- 新しい天文学の創生，
- ガンマ線バーストの起源，未知の発見。

• 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

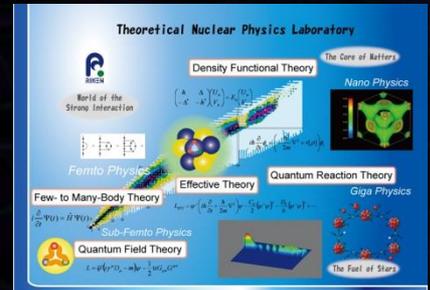
中性子星の半径-質量

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)



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

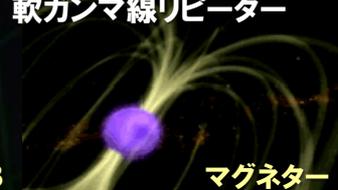
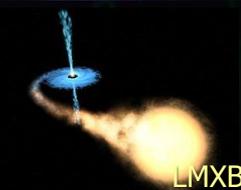
連星合体



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



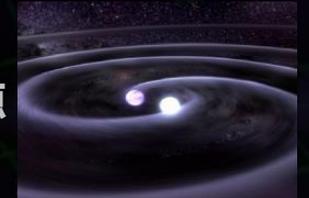
LMXB

マグネター

ブラックホール形成

相対論・宇宙論

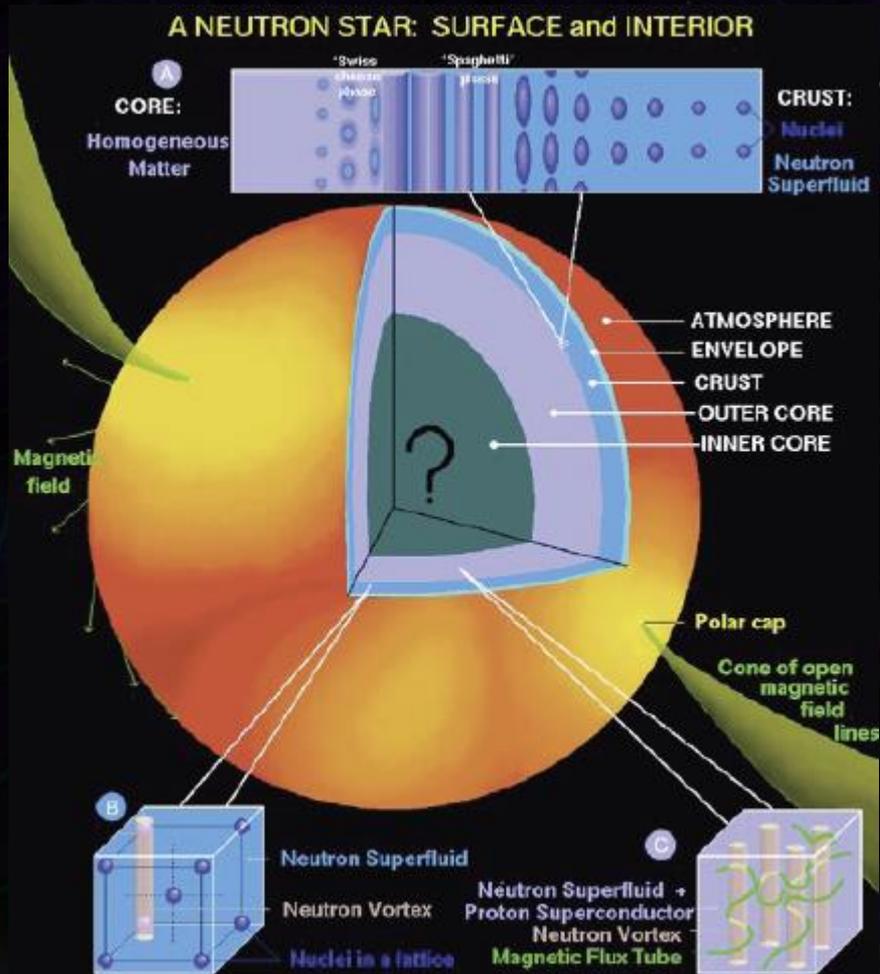
連星合体 → 標準音源
(Standard Siren)



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

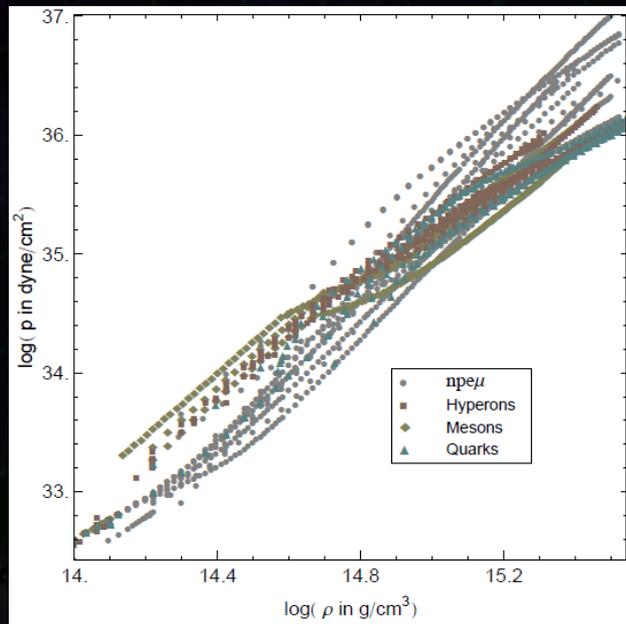
- 太陽質量程度, 半径10km程度の高密度天体.
- 中心部密度 : $2 \sim 15\rho_0$

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

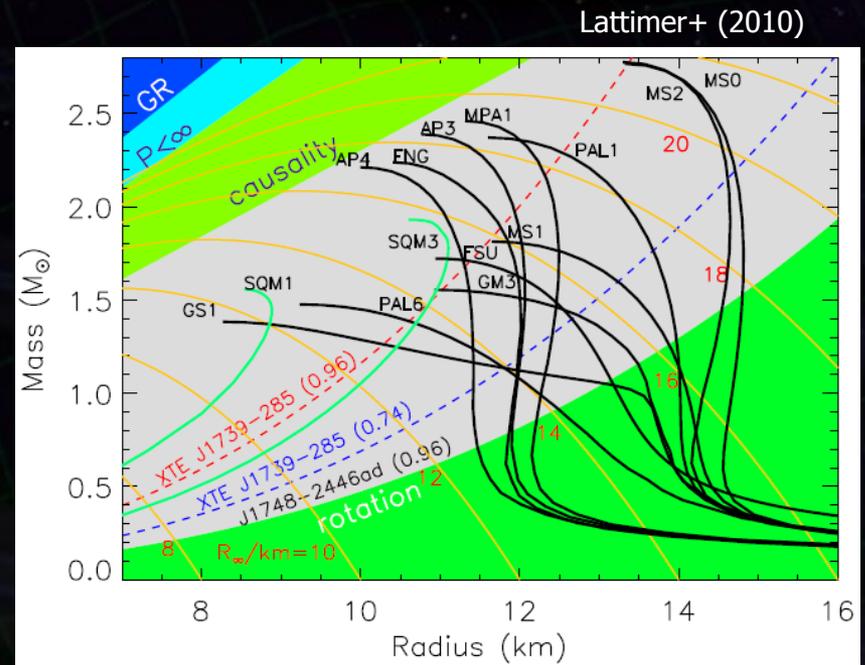
核密度以上の性質は
ほとんど理解されていない。

高密度核物質の状態方程式 (EoS, Equation of State)

- 高エネルギー天体现象の理解 (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



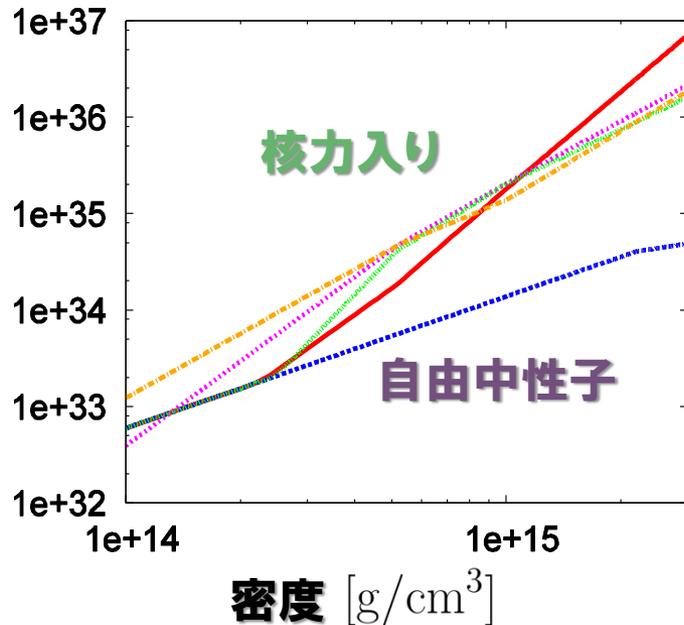
↔
一般相対論的
静水圧平衡



Lattimer+ (2010)

仏坂氏 資料より

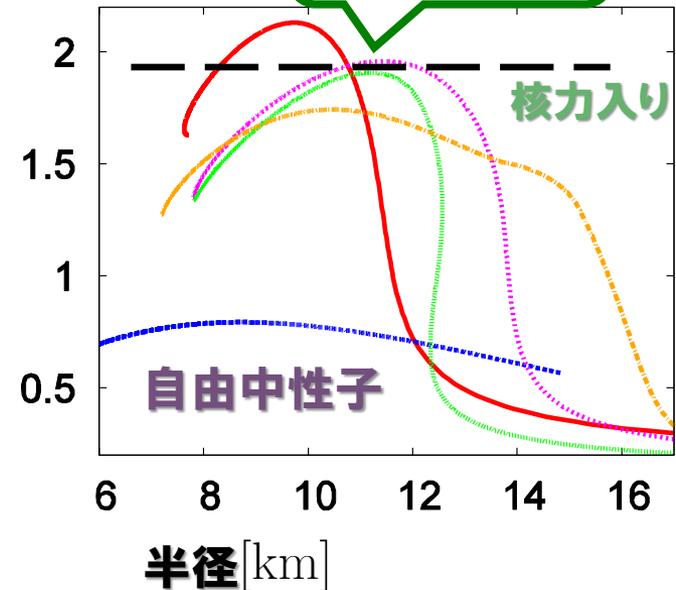
圧力 [dyne/cm²]



質量 [M/M_{\odot}]

一般相対論的
静水圧平衡

最新の観測
 $M_{\max} \geq 1.97M_{\odot}$



- 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-Polytrope

• Piecewise-polytropic EoS

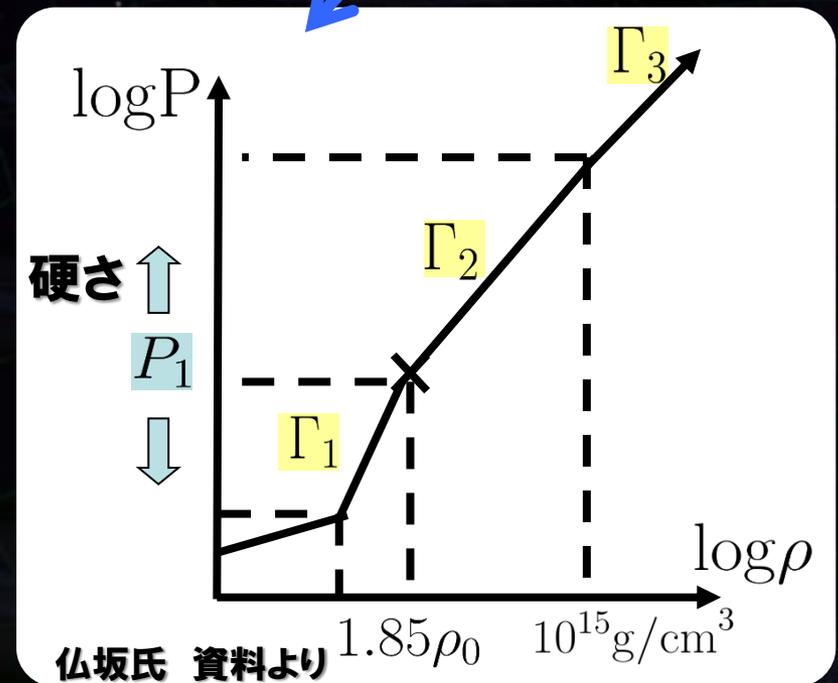
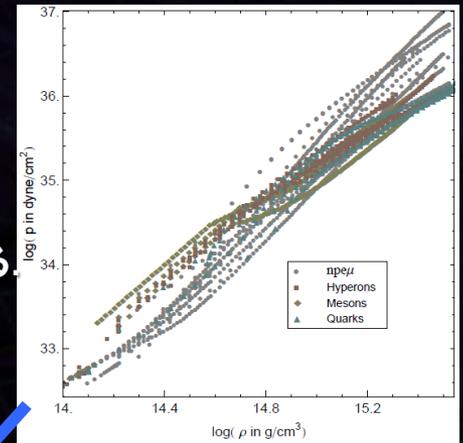
Read+, PRD (2009)

- 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.

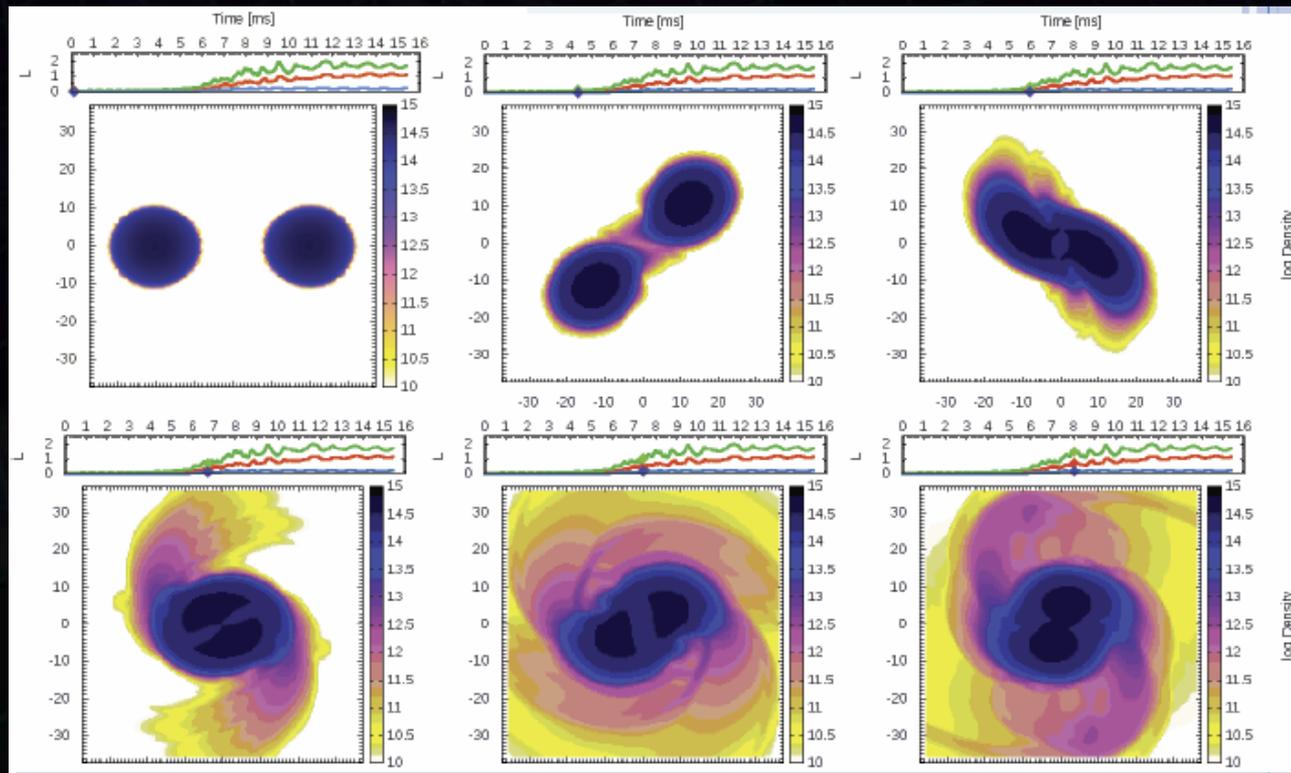
$$P_{\text{cold}} = K_i \cdot \rho^{\Gamma_i}$$

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

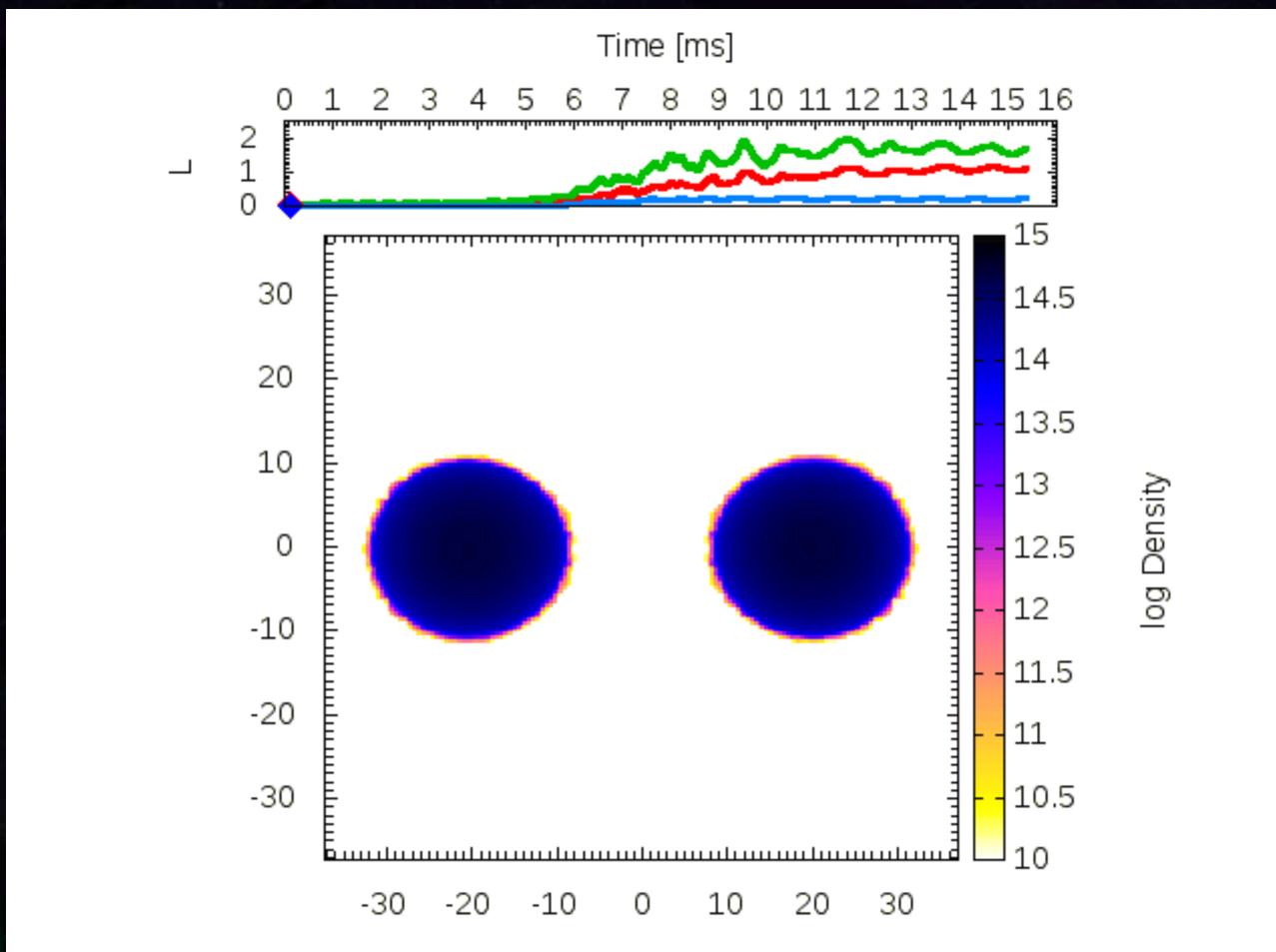
多数のEoSモデル
テーブル化されている.



- ・連星合体時の重力波 --- 解析式で記述できない
 - 数値シミュレーションによる研究 (NS-NS, BH-NS, BH-BH)
- 潮汐破壊, ディスクの形成, HMNS/BHの形成, 減衰振動, 重力波波形, ニュートリノ放射, ... といった物理現象を再現.



NS連星合体の
数値計算
(By Sekiguchi)



連星中性子星の合体数値シミュレーション by 関口氏

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

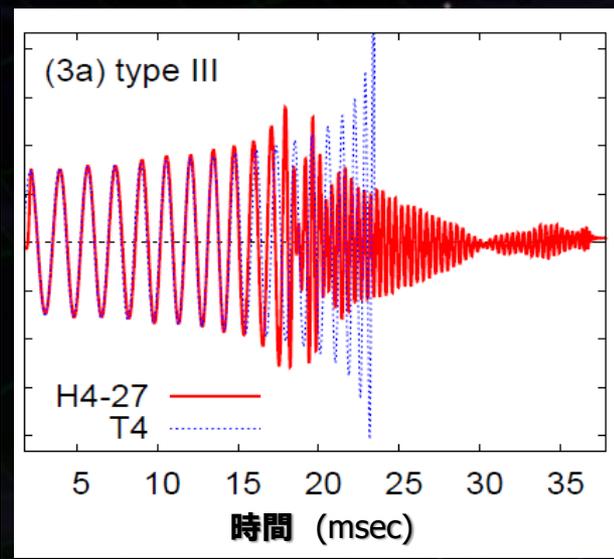
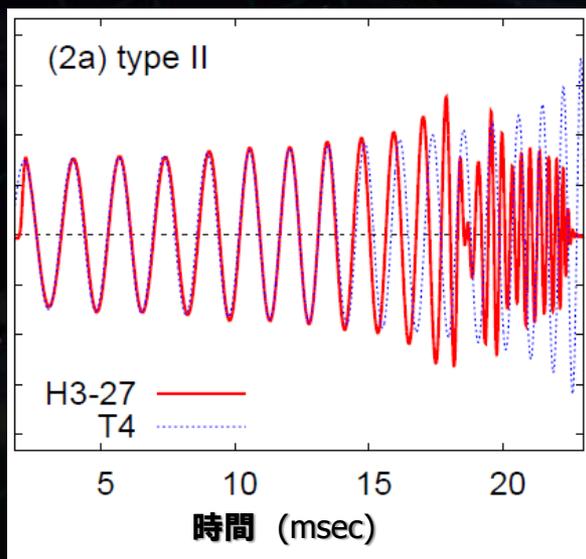
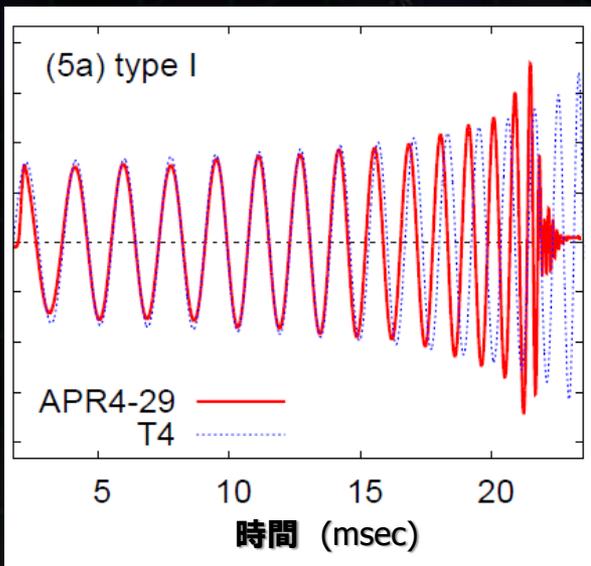
Short lived

BHへ崩壊

Type III
寿命 > 5ms

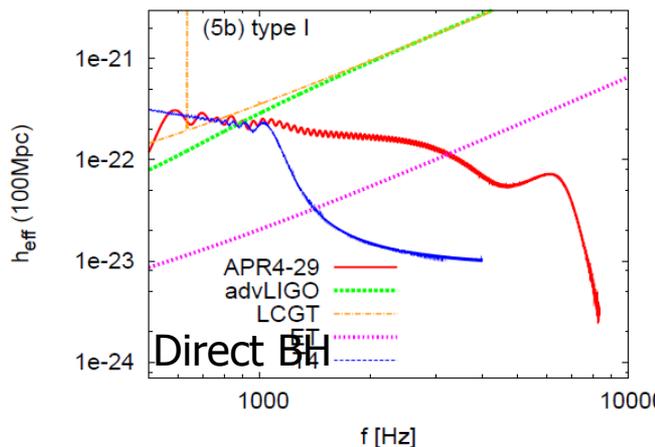
Long lived

BHへ崩壊

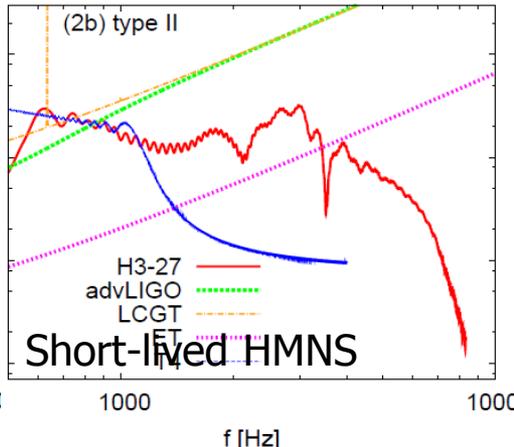


連星合体のスペクトル

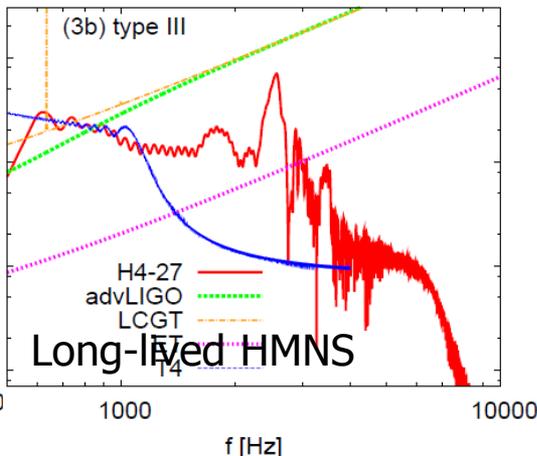
距離100Mpc APR4, Type I
1.45-1.45Msun



H3, Type II
1.35-1.35Msun



H4, Type III
1.35-1.35Msun

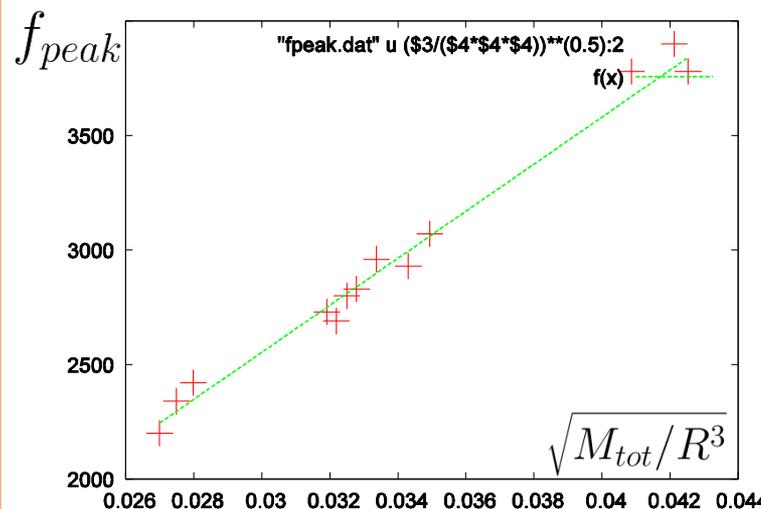


HMNSの回転周波数にピーク
→ 中性子星の半径と相関



EOSに強い制限

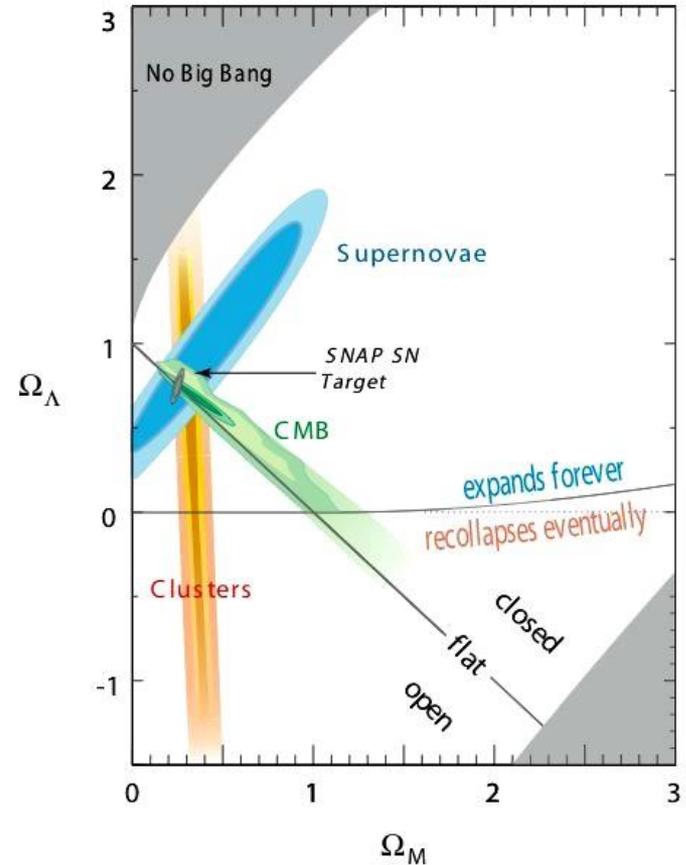
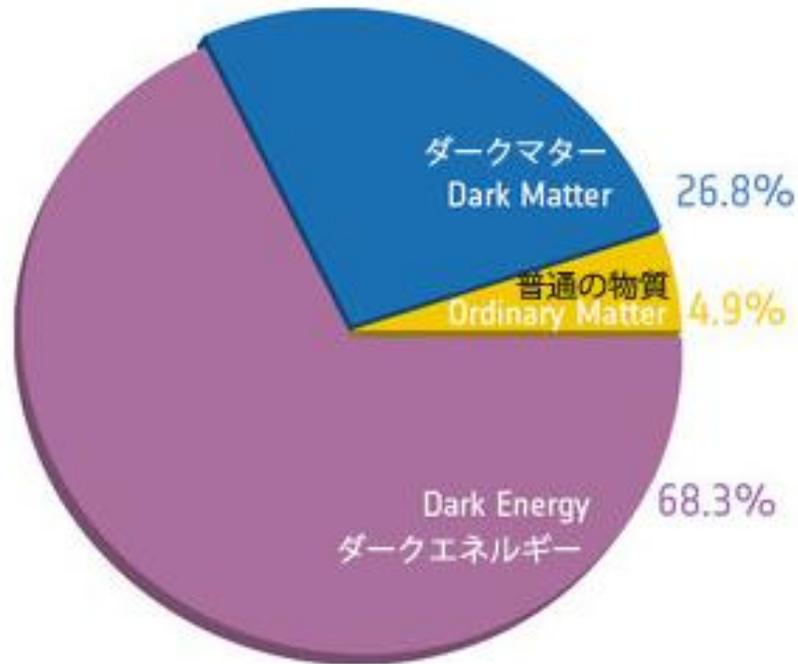
Hotokezaka+, PRD (2011)
Bauswein+ (2011)



宇宙の成り立ちを表すパラメータ.

→ 宇宙の年齢・組成・進化を決める.

プランク衛星の
観測結果 (2013)



遠方の超新星爆発の観測

→ 宇宙の加速膨張を直接証明.



2011年ノーベル物理学賞
パールムッター, シュミット, リース
「遠方超新星爆発の観測による
宇宙の加速膨張の発見」



The Nobel Prize in Physics 2011

Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess



Photo: U. Montan

Saul Perlmutter



Photo: U. Montan

Brian P. Schmidt



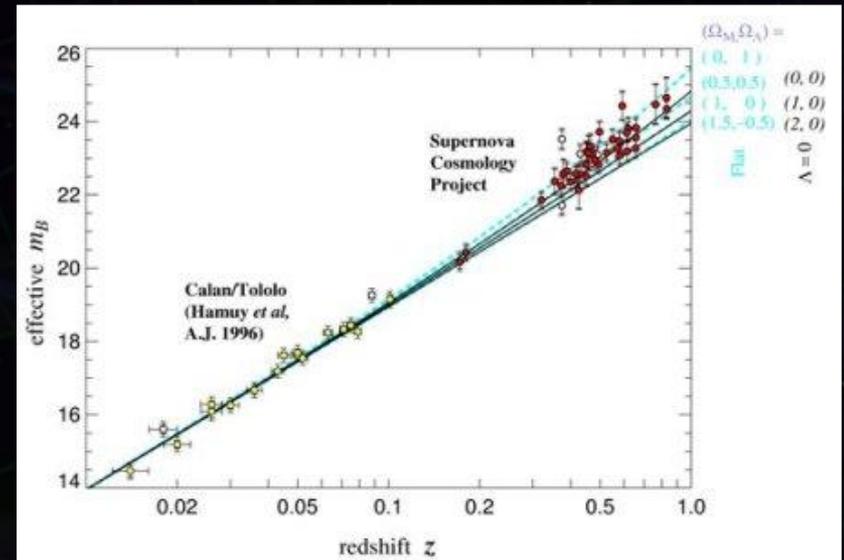
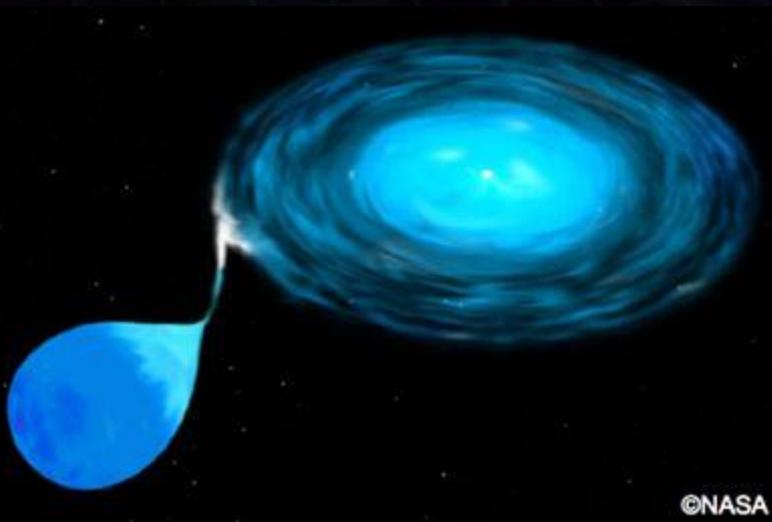
Photo: U. Montan

Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

Type Ia 超新星爆発：標準光源

- 伴星からの降着物質が臨界質量を超えたときに発生.
- ほぼ同じ爆発エネルギーを持つ. → 距離が分かる.
- 分光観測 → 赤方偏移量が分かる.



連星中性子星：標準音源

- 宇宙論的距離にある連星中性子星 $\sim 10^5$ 個.
- 波形から、連星を構成する中性子星の質量が分かる.
- 振幅は質量のみで決まる. \rightarrow 距離が分かる.
- 母銀河を特定 \rightarrow 赤方偏移量.

連星系からの重力波

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

観測データより $h_{+,\times}, f, \dot{f}$ が分かる

$$\dot{f}(t) \propto [(1+z)M_c]^{5/3} f^{11/3}, \quad M_z \equiv (1+z)M_c \text{ が分かる}$$

$$h_{+,\times}(t) \propto \frac{[(1+z)M_c]^{5/3} f^{2/3}}{D_L}, \quad D_L: \text{光度距離が決まる}$$

赤方偏移は不定 (遠くの軽い連星? or 近くの重い連星?)

- \rightarrow 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
- \rightarrow 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。)

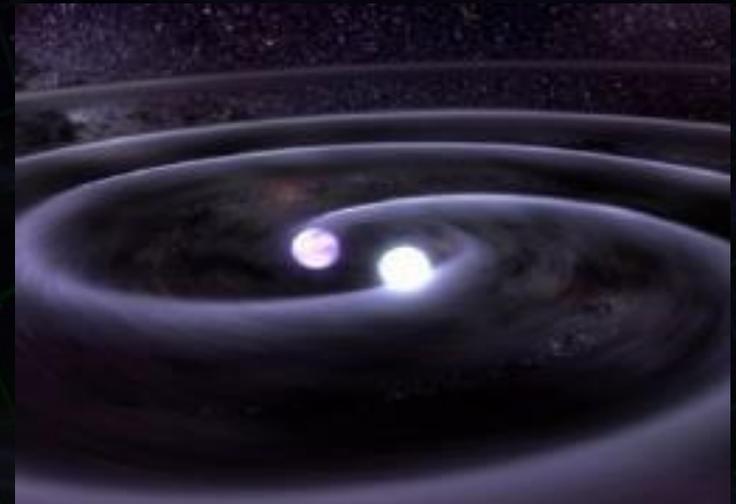


Fig by Nishizawa (2011)

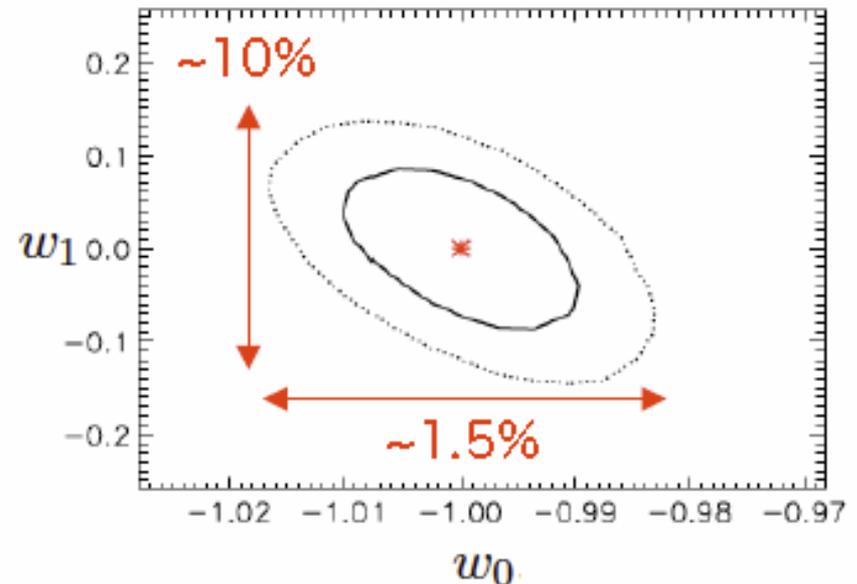
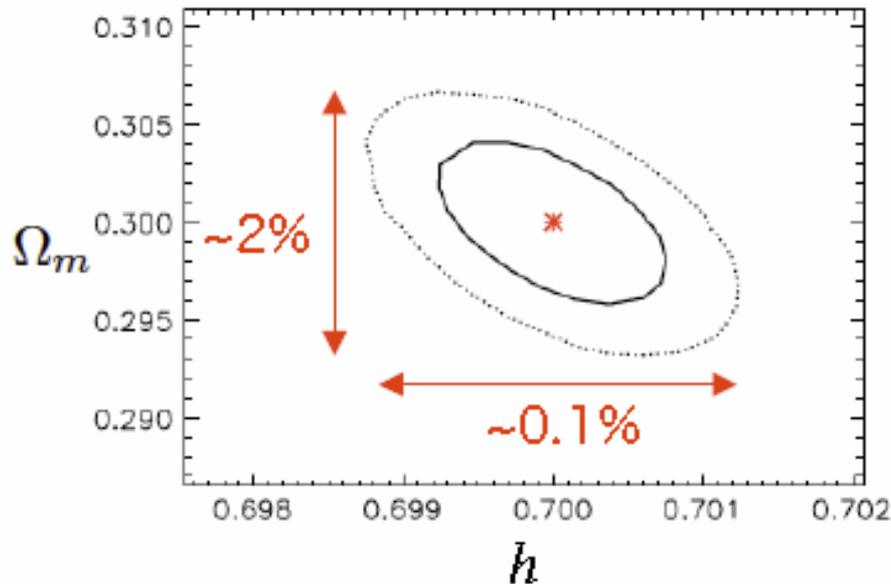
Fig by Nishizawa (2011)

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 !!

- 重力波による新しい天文学の可能性.
- 重力波は「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による重力波の存在証明.
- 重力波観測による天文学・物理学の可能性.
高エネルギー天体現象, 原子核理論, 宇宙論.

講義の予定

第1回 重力波による天文学

第2回 観測技術と観測結果

第3回 次世代重力波望遠鏡

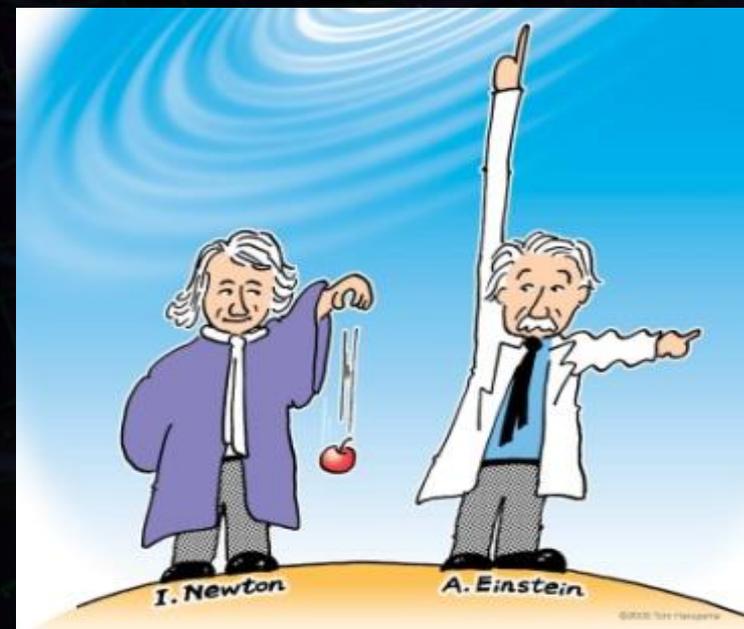


イラスト Tom Haruyama

第1回 終わり