

「中性子星の中身をどこまで探れるか？ 現状と今後の展望」



理化学研究所 長瀧 重博



長瀧天体ビッグバン研究室 主任研究員

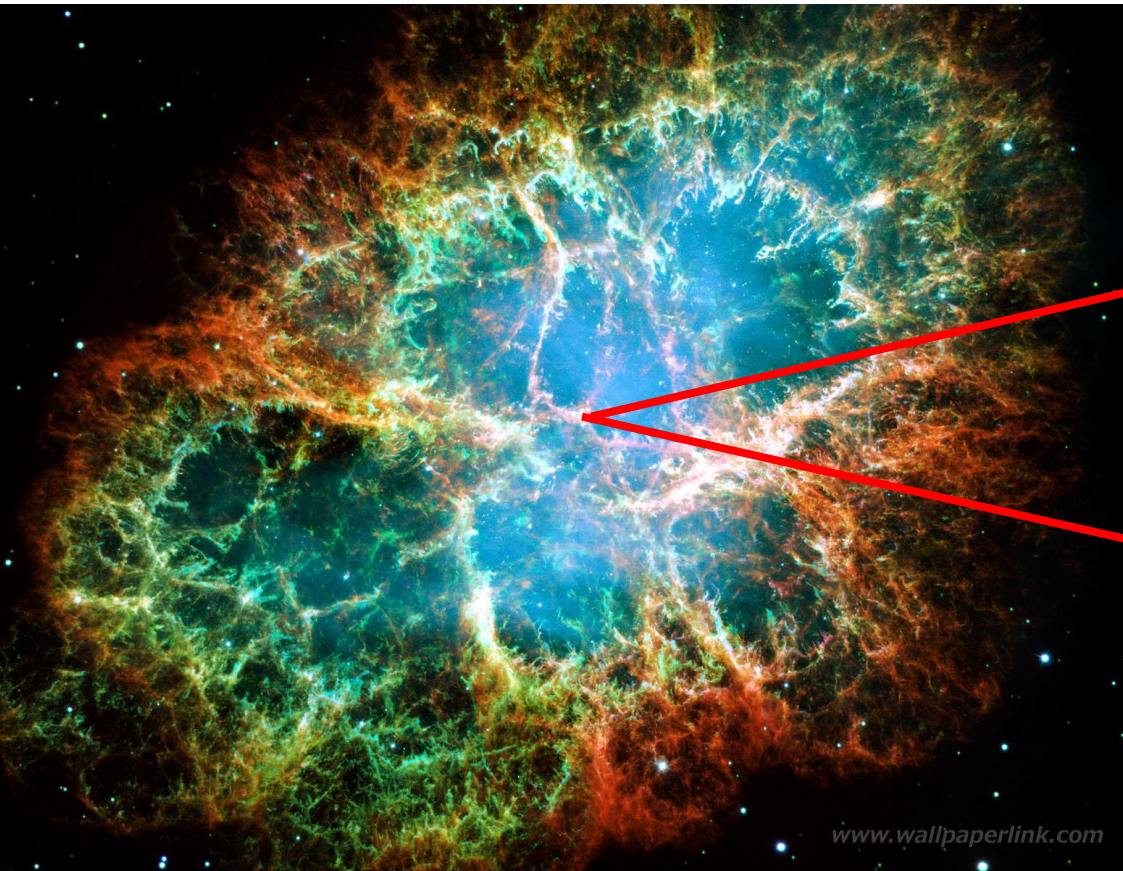
数理創造プログラム 副プログラムディレクター



2018年8月29日 理研和光キャンパス

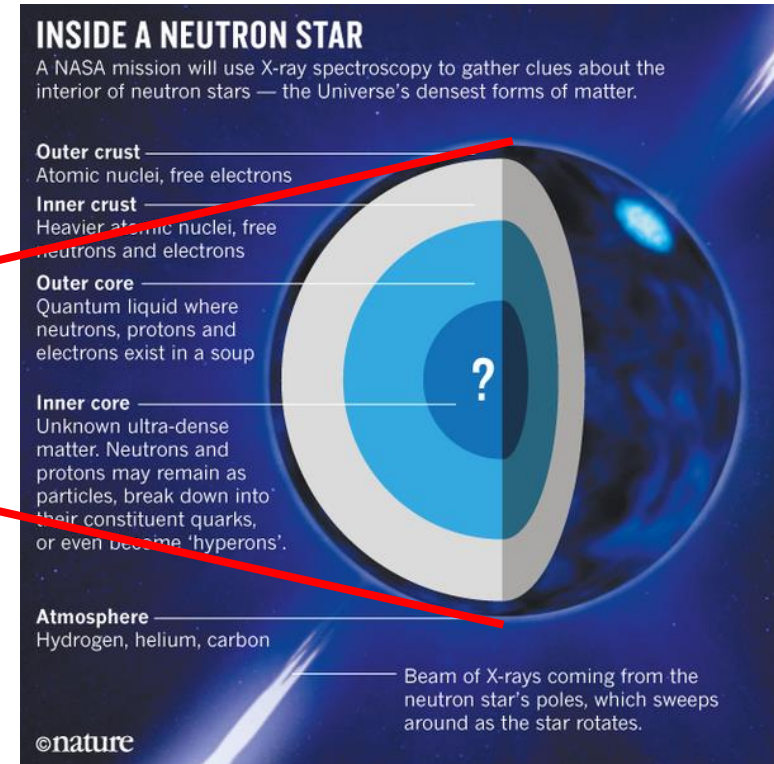
§ 連星系から求める中性子星の 質量と半径

中性子星



天の川銀河で観測される超新星残骸
カニ星雲(1054年)

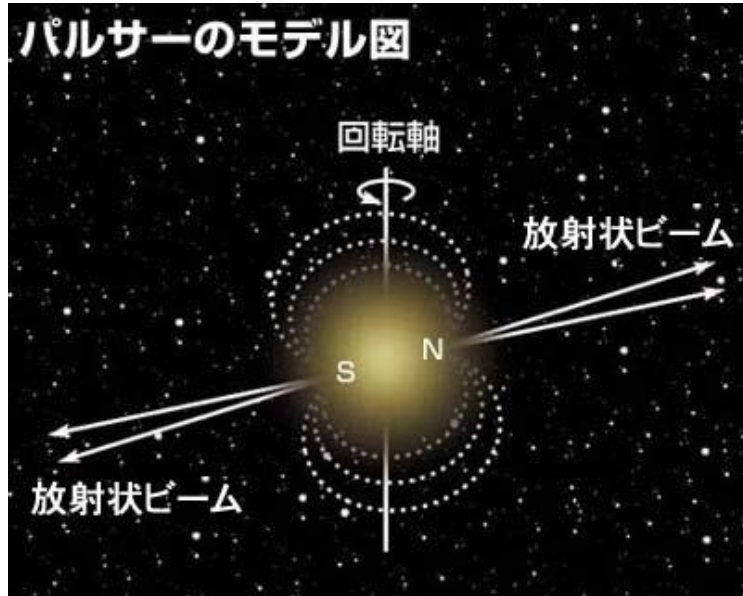
中性子星(カニパルサー)は点源として見つかる
(つまり、大きさは解像出来ない)。



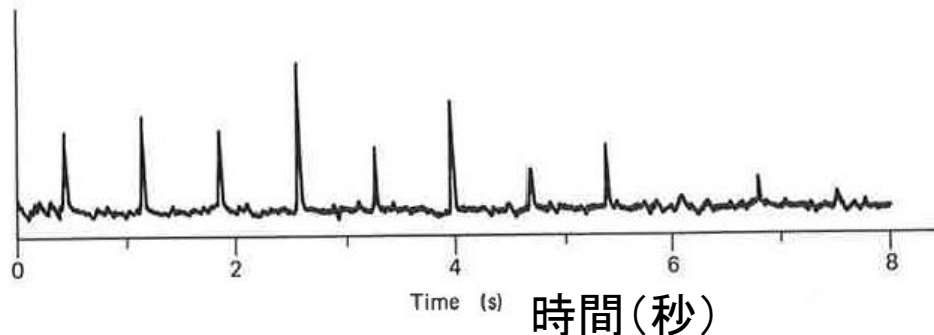
中性子星の想像図 (NASA)
質量 太陽質量の約1.5倍
半径 10km程度
中心密度 10^{15} g/cc
(1リットルで富士山程度)

中性子星は時々パルサーとして見つかる

中性子星は時々連星系として見つかる

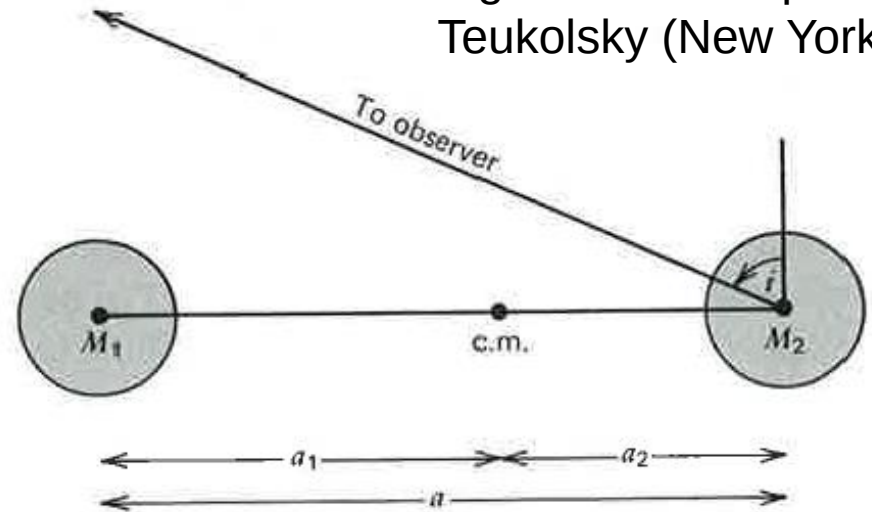


From JAXA HP



電波パルサーPSR0329+54の観測例

Figure from Shapiro & Teukolsky (New York)



$$f(M_1, M_2, i) \equiv \frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{P v_1^3}{2\pi G}$$

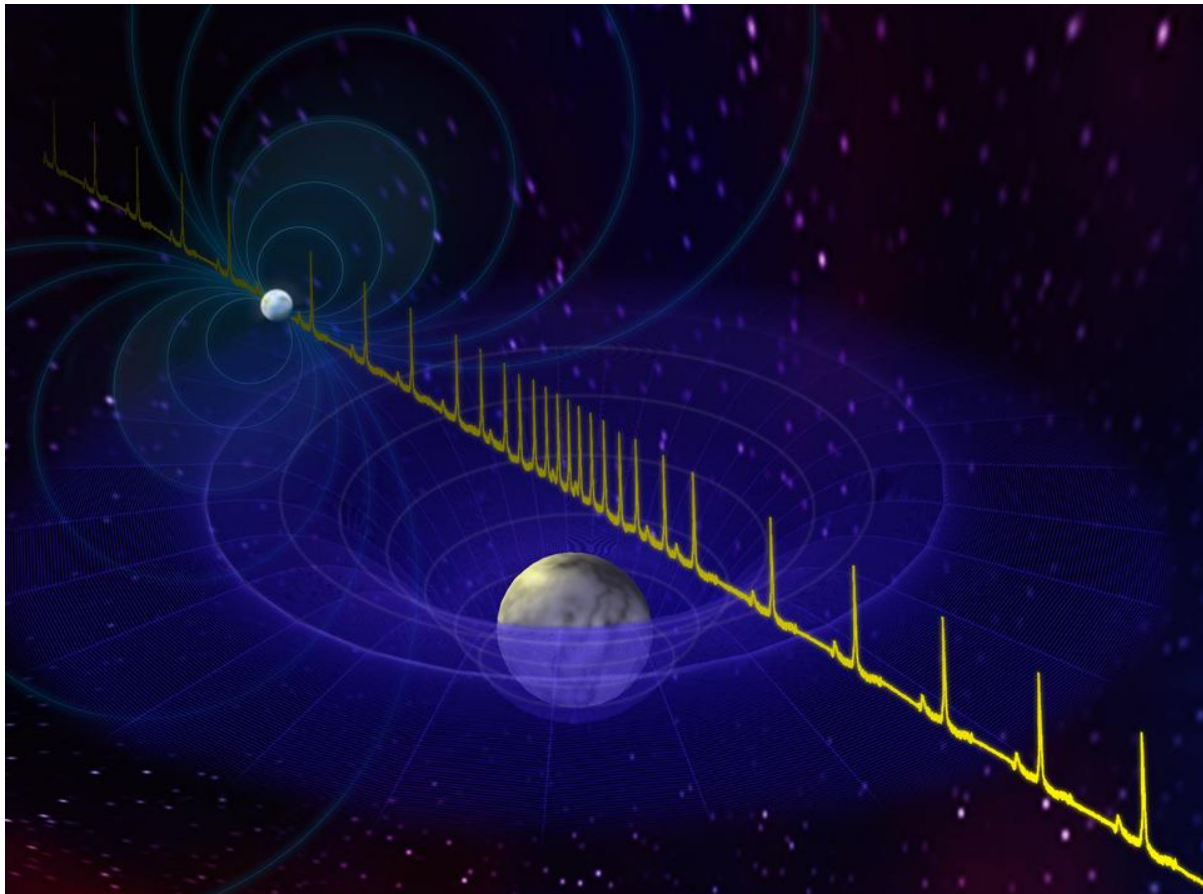
質量関数 通常、ここまでしか求まらない。

P: 軌道周期

v_1 : 視線方向ドップラー速度(絶対値)
の最大値

質量が正確に求まる例2

- 中性子星-白色矮星連星。
- パルスのシャピロディレイが求まる。



一般相対論的重力効果
(時間の遅れ)による、
パルス周期変化

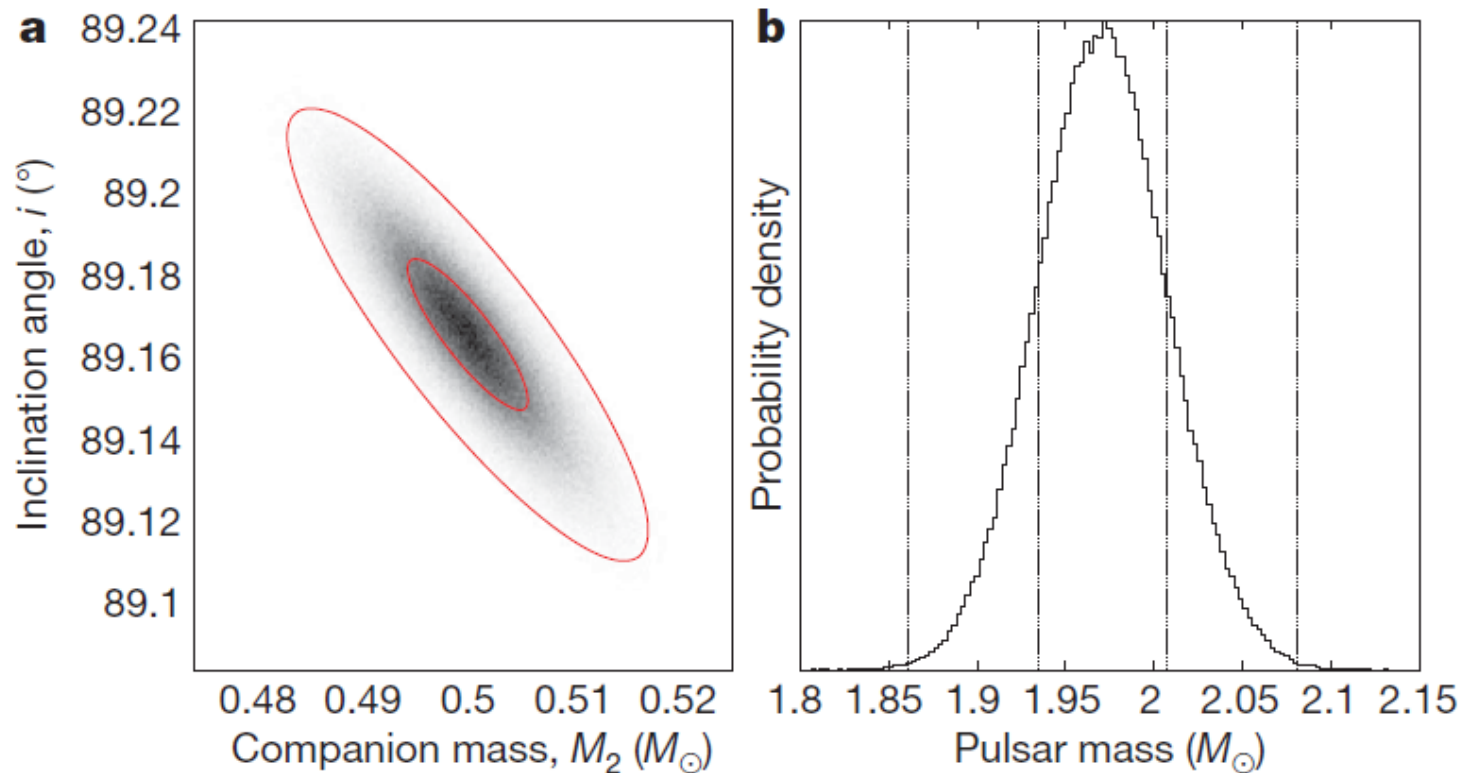
白色矮星による重力場が
推定できる。

注: 地球が公転面にいる場合
ドップラー効果が最大に
見えるタイミングと位相90度
ずれている。

シャピロディレイから求まる 白色矮星の質量と見込み角

J1614-2230

P. B. Demorest et al., NATURE 467 (2010)



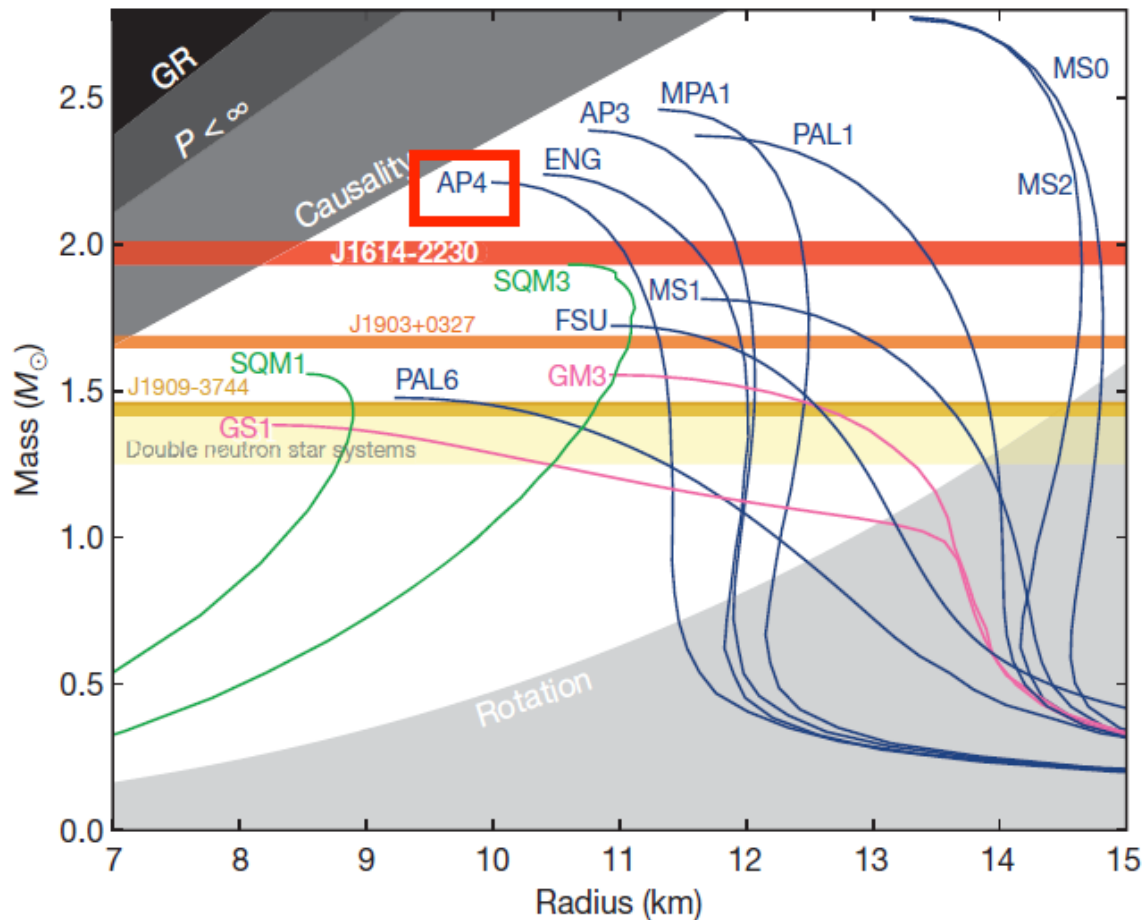
丁度
地球がほぼ公転面にあった
(シャピロディレイ効果最大)。

→
質量関数

パルサー(中性子星)の質量は
 $(1.97 \pm 0.04)M_\odot$

2倍の太陽質量の中性子星が存在した！

P. B. Demorest et al., NATURE 467 (2010)



Demorest+2010

他の中性子星－白色矮星系1

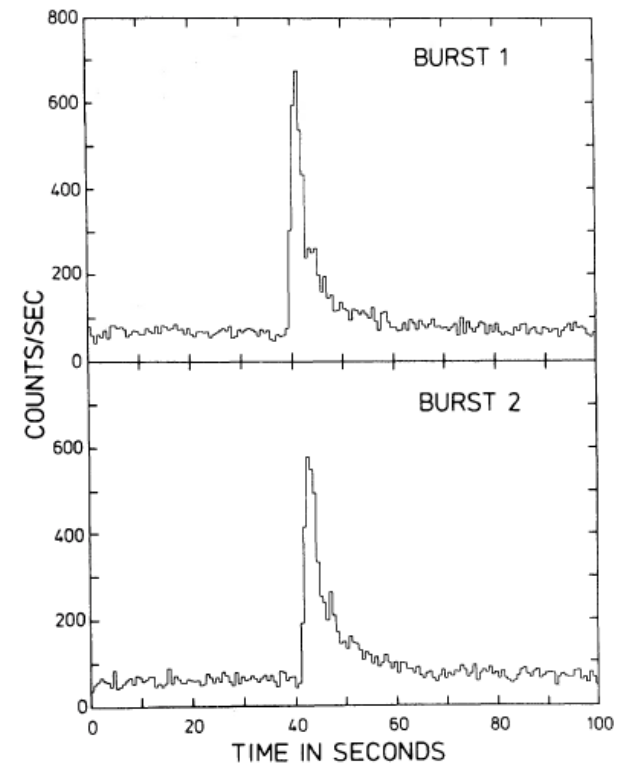
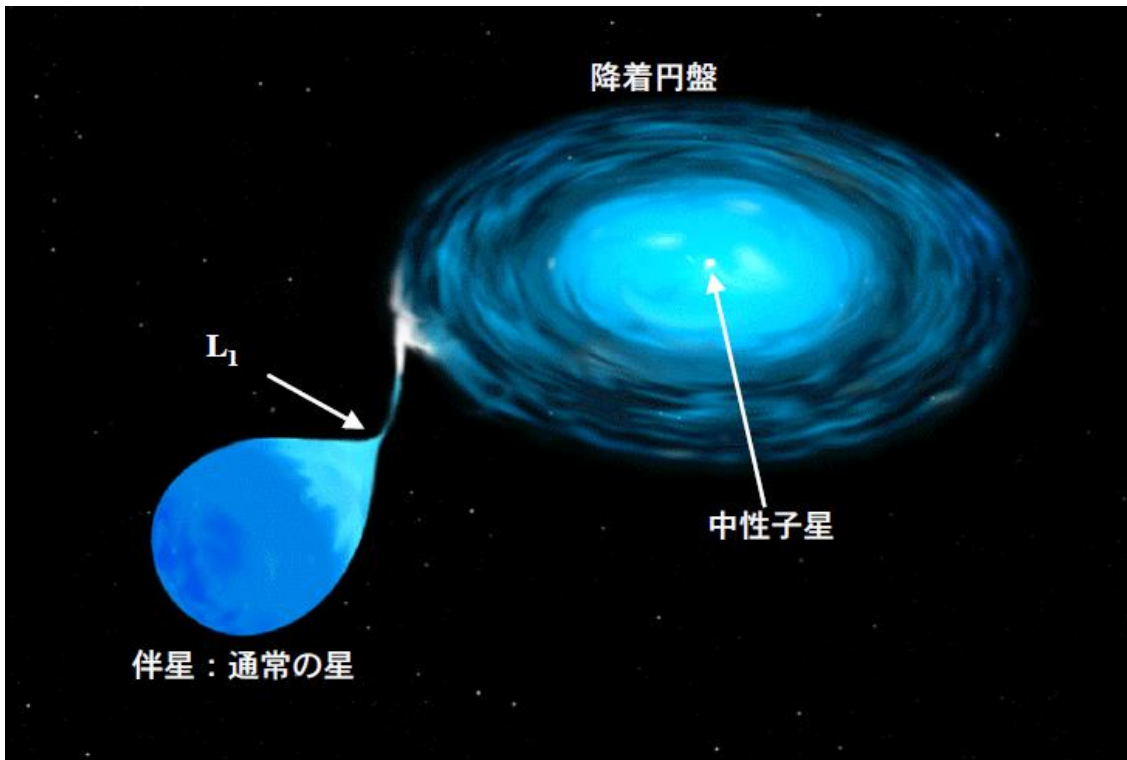
他の中性子星－白色矮星系2
連星中性子星系で求まっている質量帯

背景の曲線は様々な
状態方程式が予測する
中性子星の質量-半径
関係式。

半径は求まらない。

X線バーストを用いて質量・半径を求める

F. Özel Nature (2006), Steiner et al. (2010),...



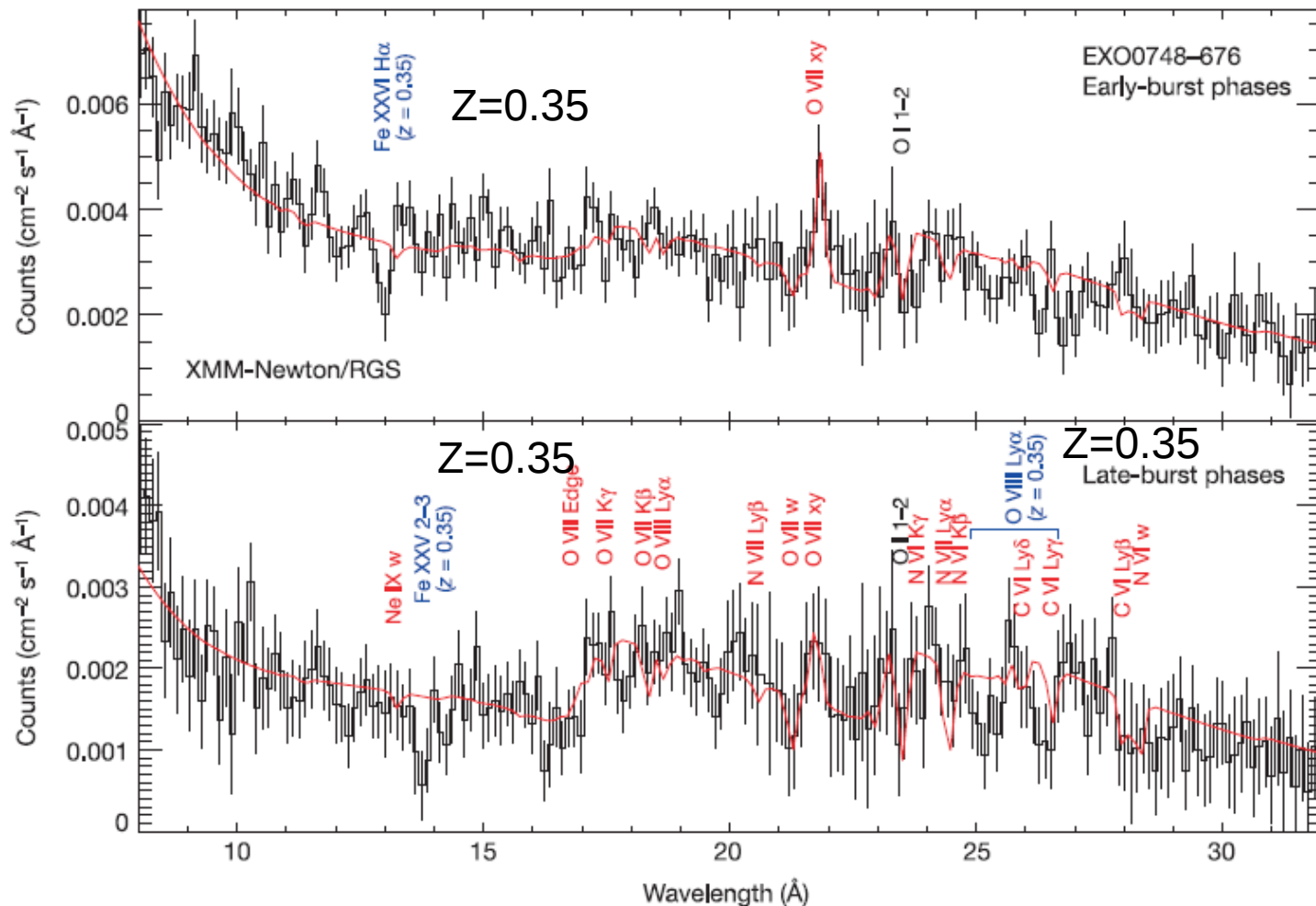
X線バーストの例
Sztajno et al. (1987)

伴星から質量(物質)が流れる。
ある段階で核反応を起こし、爆発的に燃える。
ピーク光度は中性子星の重力と放射圧の平衡で決まると考えられる(エディントン光度)。

X線バースト天体の重力赤方偏移発見

EXO 0748-676

Cottam et al. Nature (2002)



3行の連立方程式で質量・半径求めた！

EXO 0748-676

F. Özel Nature (2006)

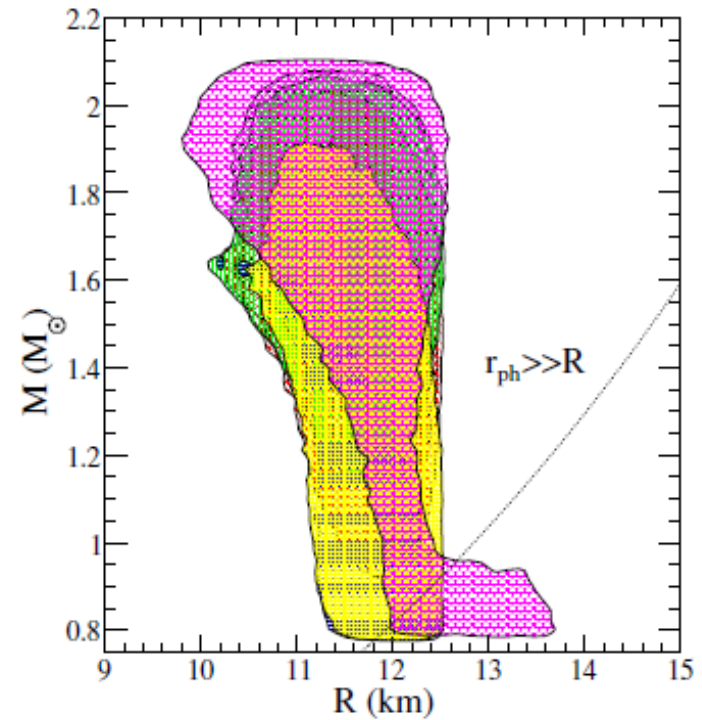
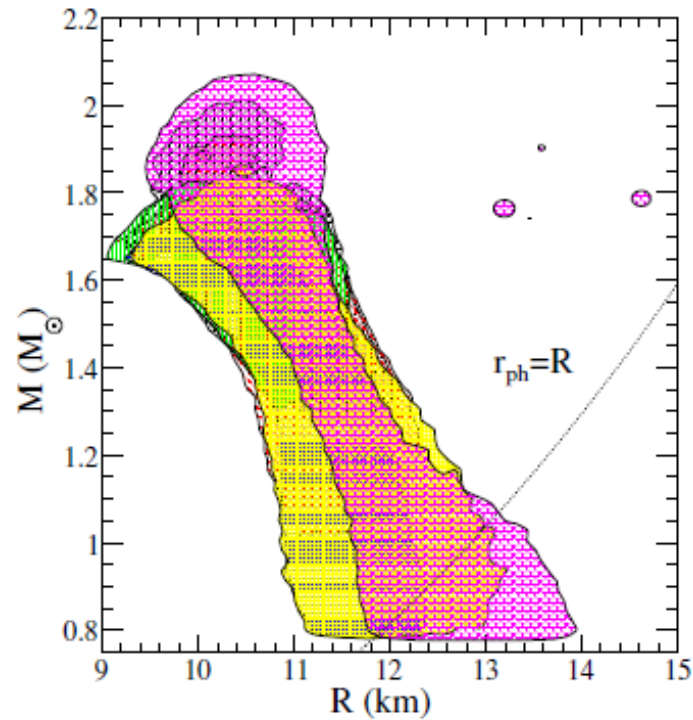
Observable	Measurement	Dependence on neutron-star properties
F_{Edd}	$(2.25 \pm 0.23) \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\frac{1}{4\pi D^2} \frac{4\pi G M c}{\kappa_{\text{es}}} \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{1/2}$
z	0.35	$\left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{-1/2} - 1$
$F_{\text{cool}}/\sigma T_c^4$	$1.14 \pm 0.10 \text{ (km kpc}^{-1}\text{)}^2$	$f_{\infty}^{-4} \frac{R^2}{D^2} \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{-1}$

↓
逆解き！

Neutron-star property	Dependence on observables	Constraint
M	$\frac{f_{\infty}^4 c^5}{4G\kappa_{\text{es}}} \left(\frac{F_{\text{cool}}}{\sigma T_c^4}\right) \frac{[1-(1+z)^{-2}]^2}{(1+z)^3} F_{\text{Edd}}^{-1}$	$2.10 \pm 0.28 M_{\odot}$
R	$\frac{f_{\infty}^4 c^3}{2\kappa_{\text{es}}} \left(\frac{F_{\text{cool}}}{\sigma T_c^4}\right) \frac{1-(1+z)^{-2}}{(1+z)^3} F_{\text{Edd}}^{-1}$	$13.8 \pm 1.8 \text{ km}$
D	$\frac{f_{\infty}^2 c^3}{2\kappa_{\text{es}}} \left(\frac{F_{\text{cool}}}{\sigma T_c^4}\right)^{1/2} \frac{1-(1+z)^{-2}}{(1+z)^3} F_{\text{Edd}}^{-1}$	$9.2 \pm 1.0 \text{ kpc}$

より慎重に不定性(主に光級面=半径)を考慮した結果の、M-R関係式

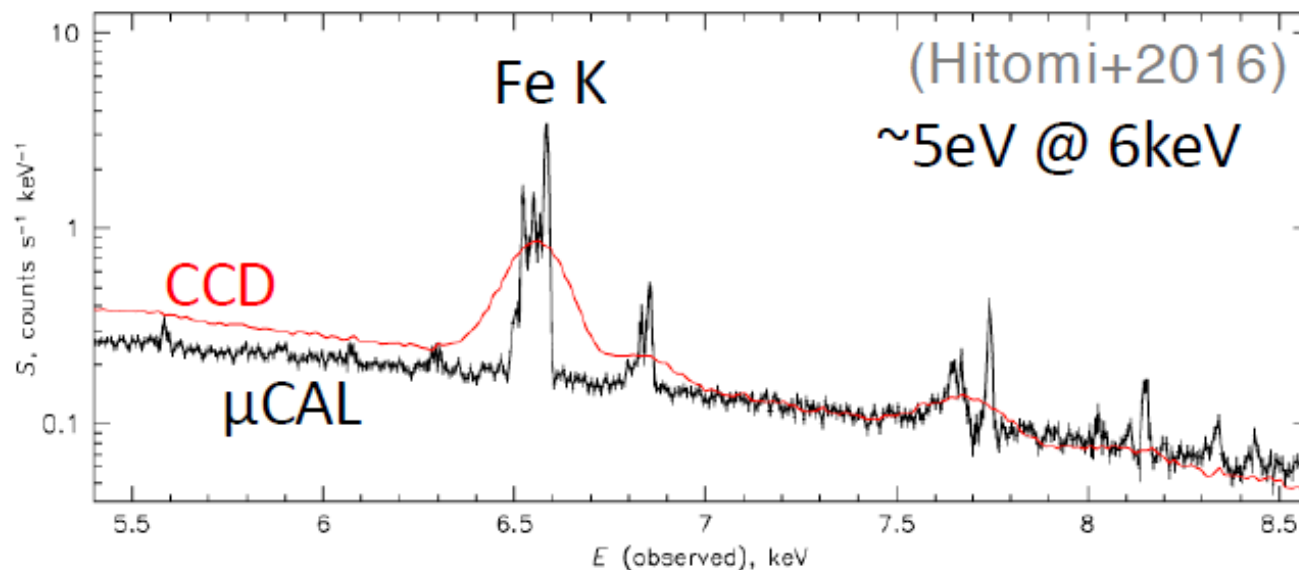
Steiner, Lattimer, Brown (2010).



10%程度の違いが生じる。

今後の展望1:ひとみ衛星代替機

(2021—)

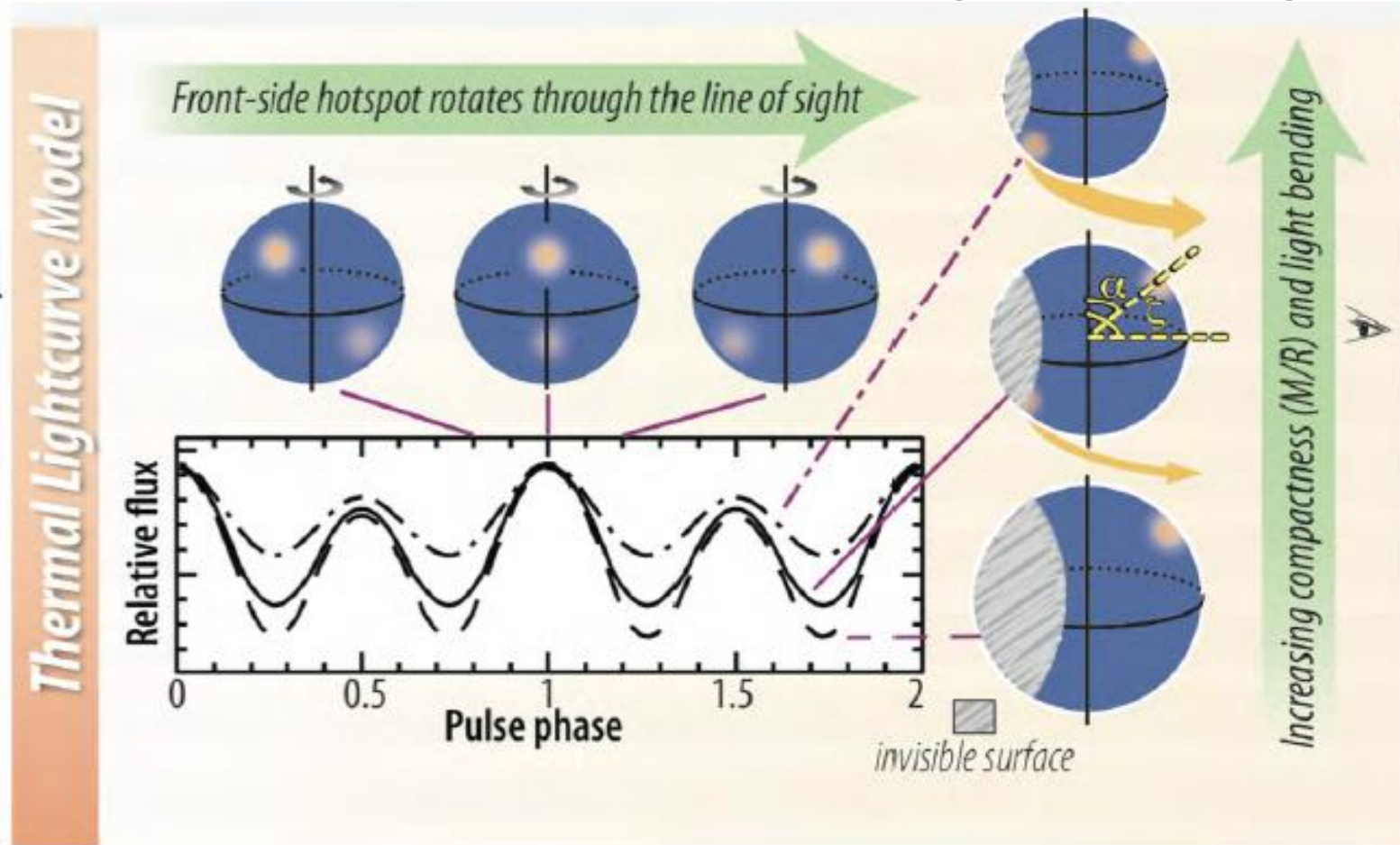


従来の測定方法(CCD)に比べて20倍程度のエネルギー分解能



重力赤方偏移効果をより正確に評価出来る。

NICER (Neutron star Interior Composition Explorer)

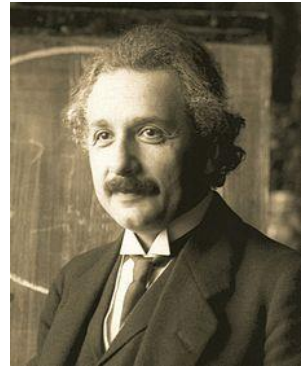


Gendreau, K. C. et al. 2012, SPIE, 8443, 844313

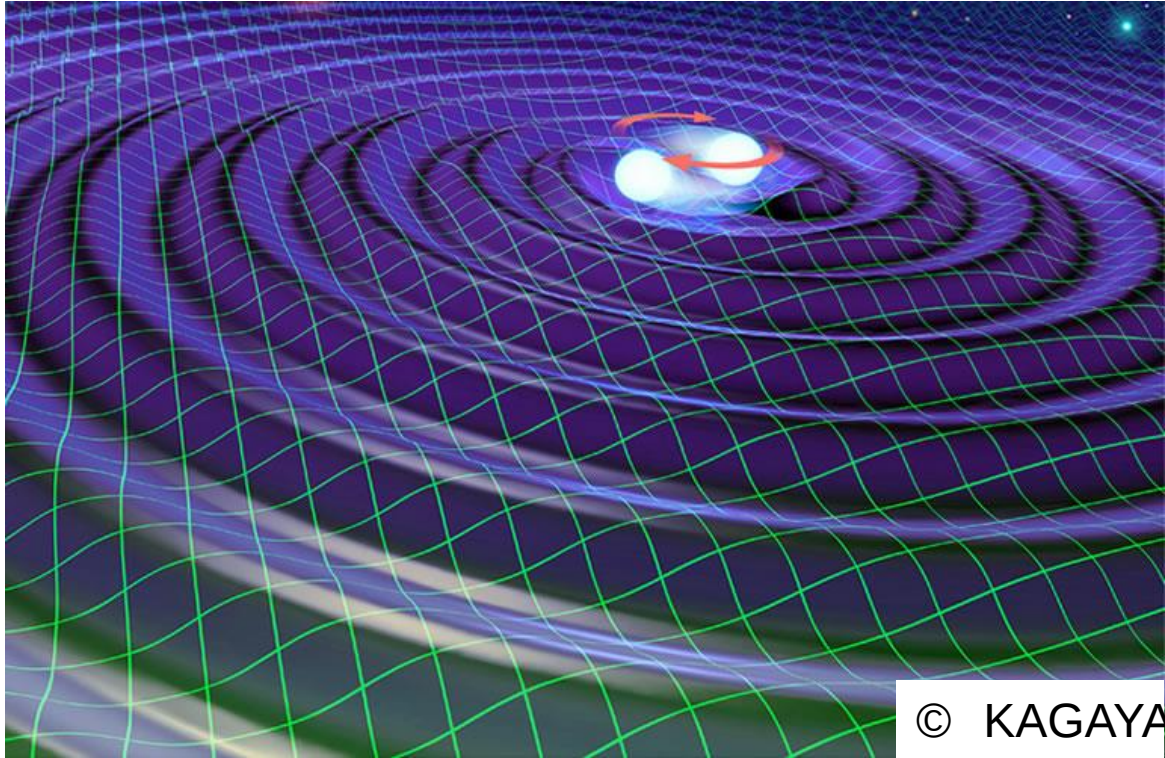
2017年打ち上げ成功。国際宇宙ステーションに取り付けられ、現在データ取得中。

§ 連星中性子星合体からの重力波

一般相対性理論提唱(1915) 重力波の予言(1916)



アルバート・
アインシュタイン
(1879－1955)



地球が運動する。その応答が時空場の波(=重力波)として伝わる。

アインシュタイン方程式

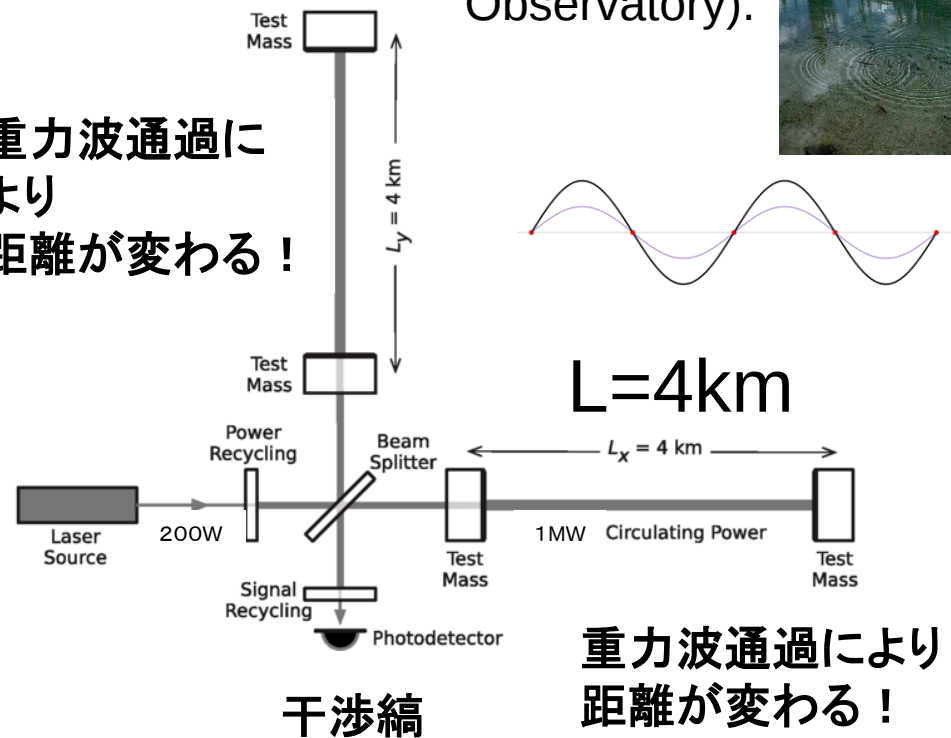
$$\underset{\text{時空場}}{G^{\mu\nu}} = 8\pi \underset{\text{物質場(地球)}}{T^{\mu\nu}}$$

重力波の検出

From LIGO HP.
(Laser Interferometer
Gravitational-Wave
Observatory).



重力波通過により
距離が変わる！



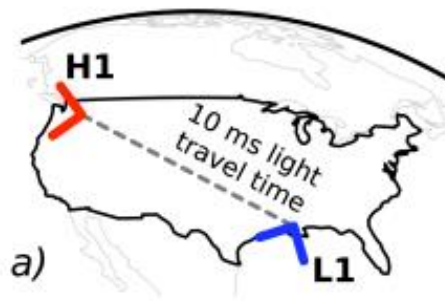
$L=4\text{km}$

重力波通過により
距離が変わる！

干涉縞



LIGO検出器
左: Hanford
右: Livingston



重力波が通過すると距離が変わるので干渉縞が変化する！

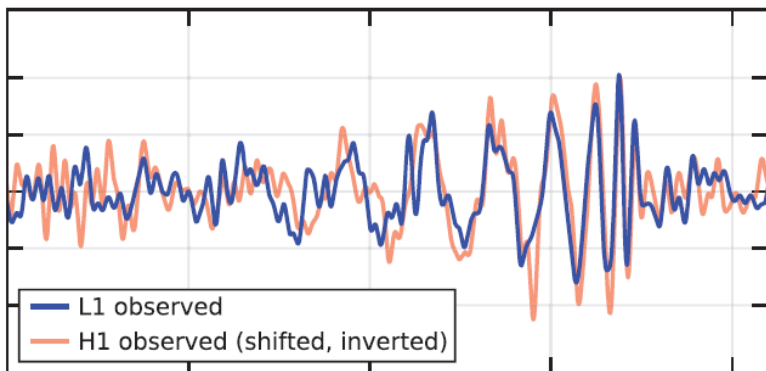
但し、距離の変化は極めて小さい($\Delta L/L \sim 10^{-21}$)。

地球-太陽間(1億5千万km)に対して水素原子一個(10^{-8}cm)程度。

2015年9月14日、重力波天文学時代の幕開け

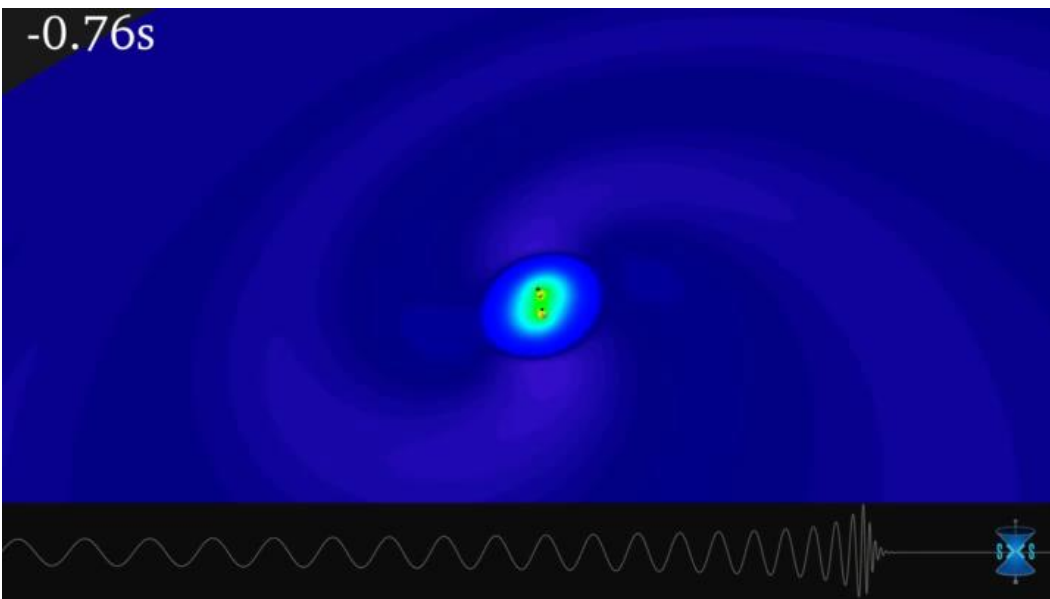


2016年2月11日（日本時間12日）
重力波検出を報告するライツィー教授



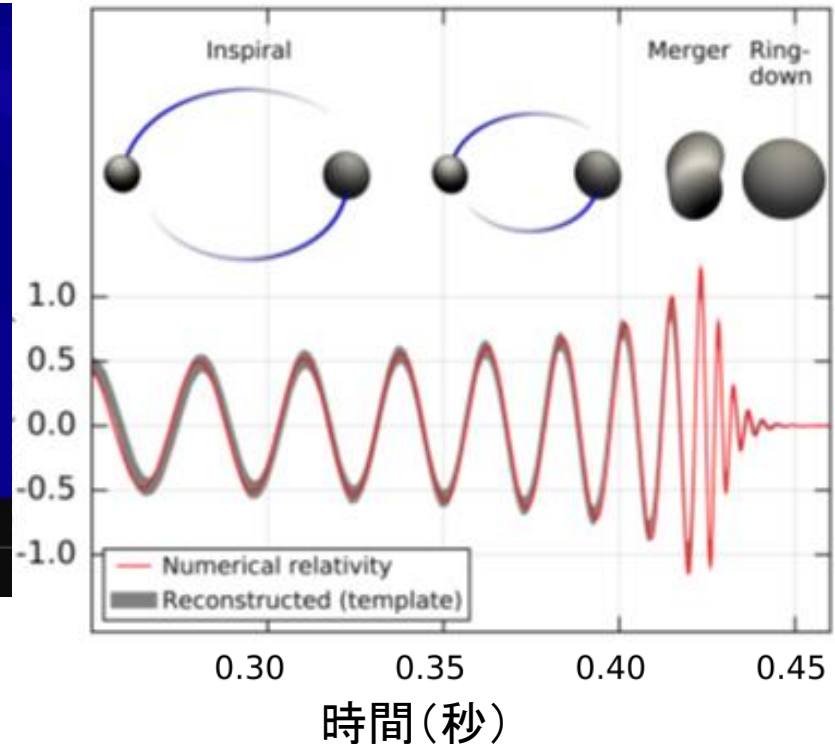
重力波源はブラックホール連星の合体だった。
太陽質量の36倍と29倍。地球からの距離13億光年。
これまでに少なくとも、4例のブラックホール連星合体
の重力波を検出した。

重力波検出によって、初めてブラックホールの存在が直接証明された。



コンピュータシミュレーションによるブラックホール連星合体の例。色は時空のゆがみの程度を表す。

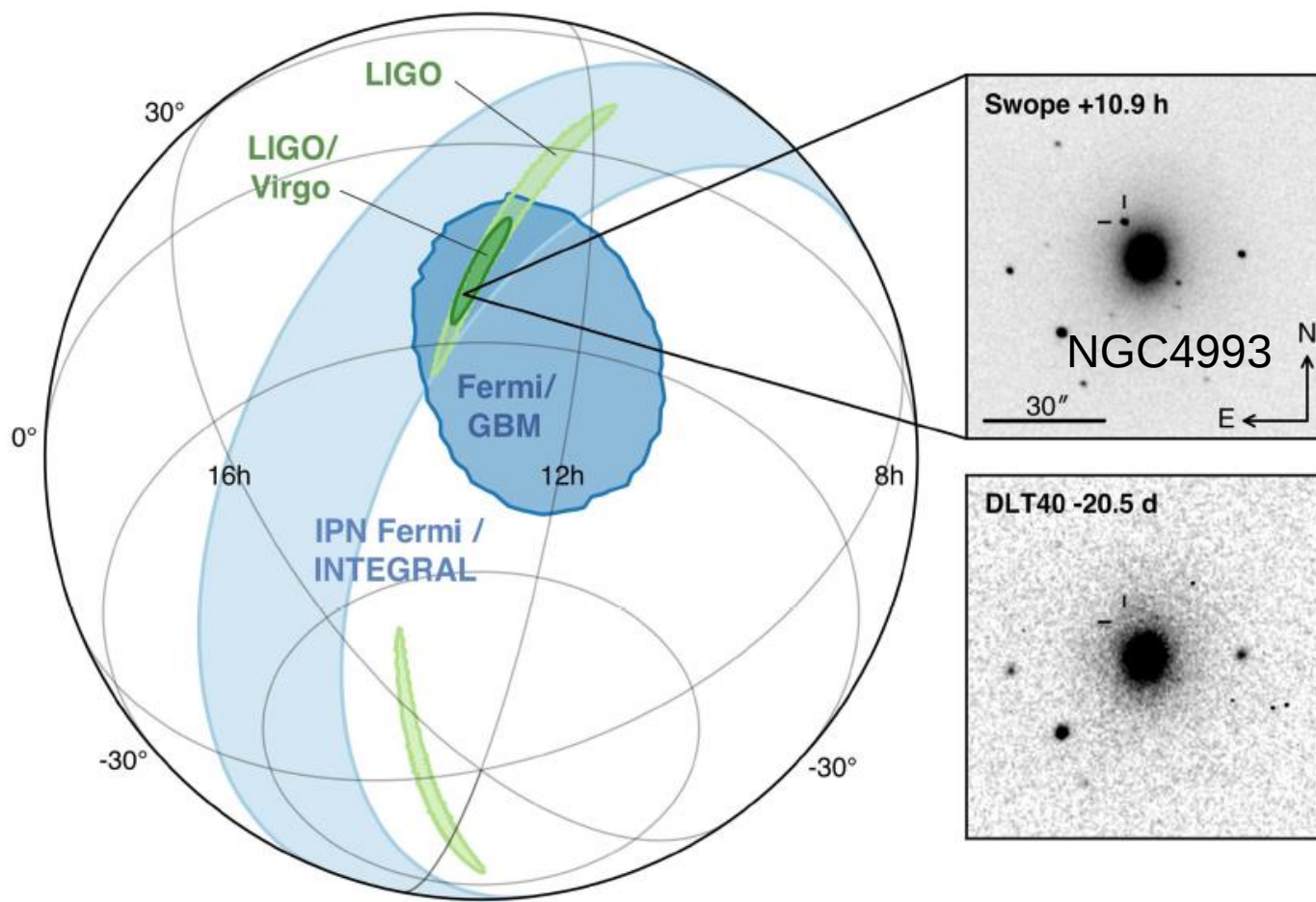
From LIGO HP



重力波波形について、
数値シミュレーション(赤)と
観測データ(グレー)が
極めて高い精度で一致！

2017年8月17日、 連星中性子星合体からの重力波初検出！

Press release was done on 16th Oct. 2017. GW170817/GRB170817A/SSS17a



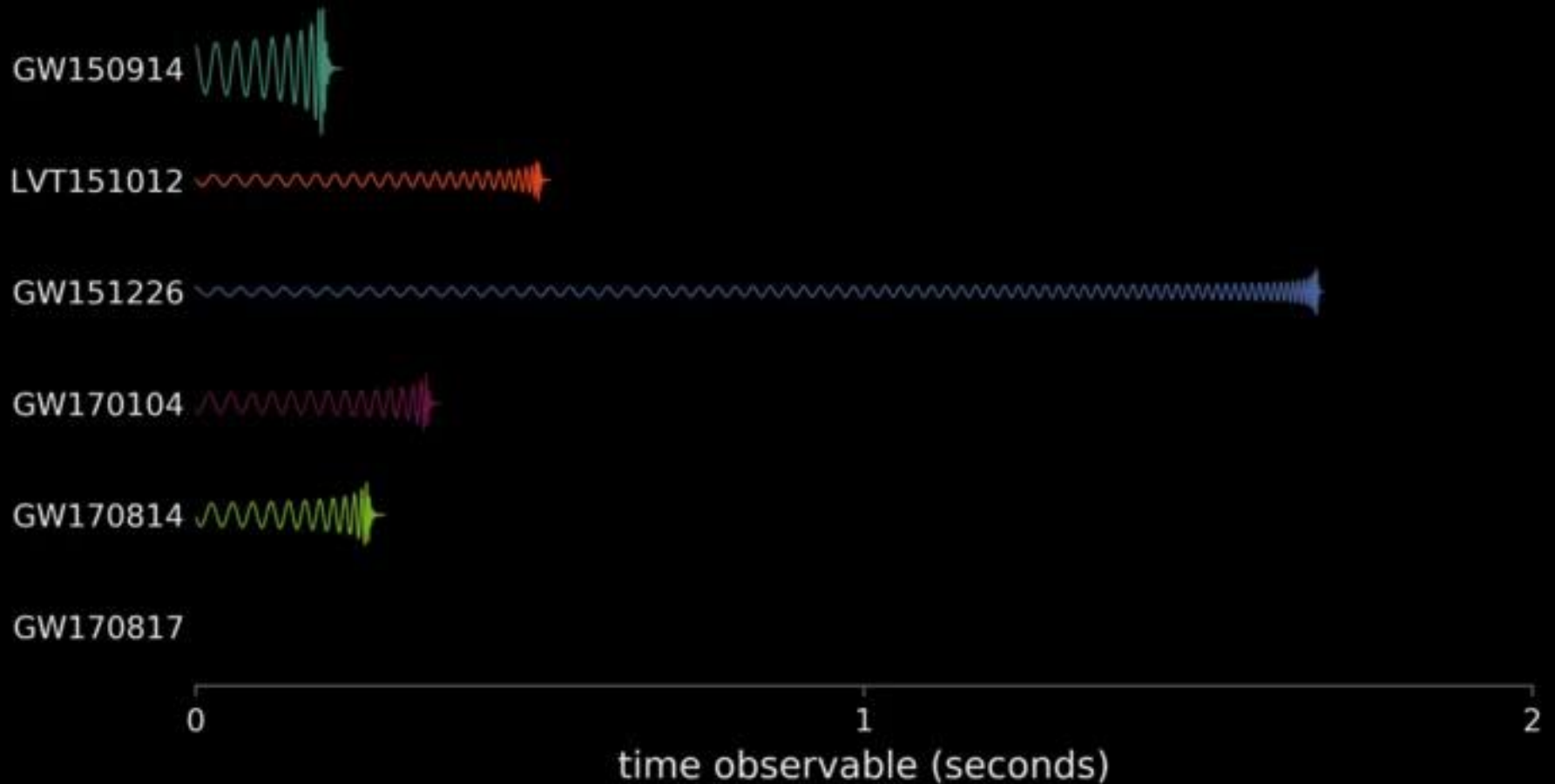
世界の重力波望遠鏡



LIGO2基+VIRGO1基で到来方向を決めた。

国立天文台HPより

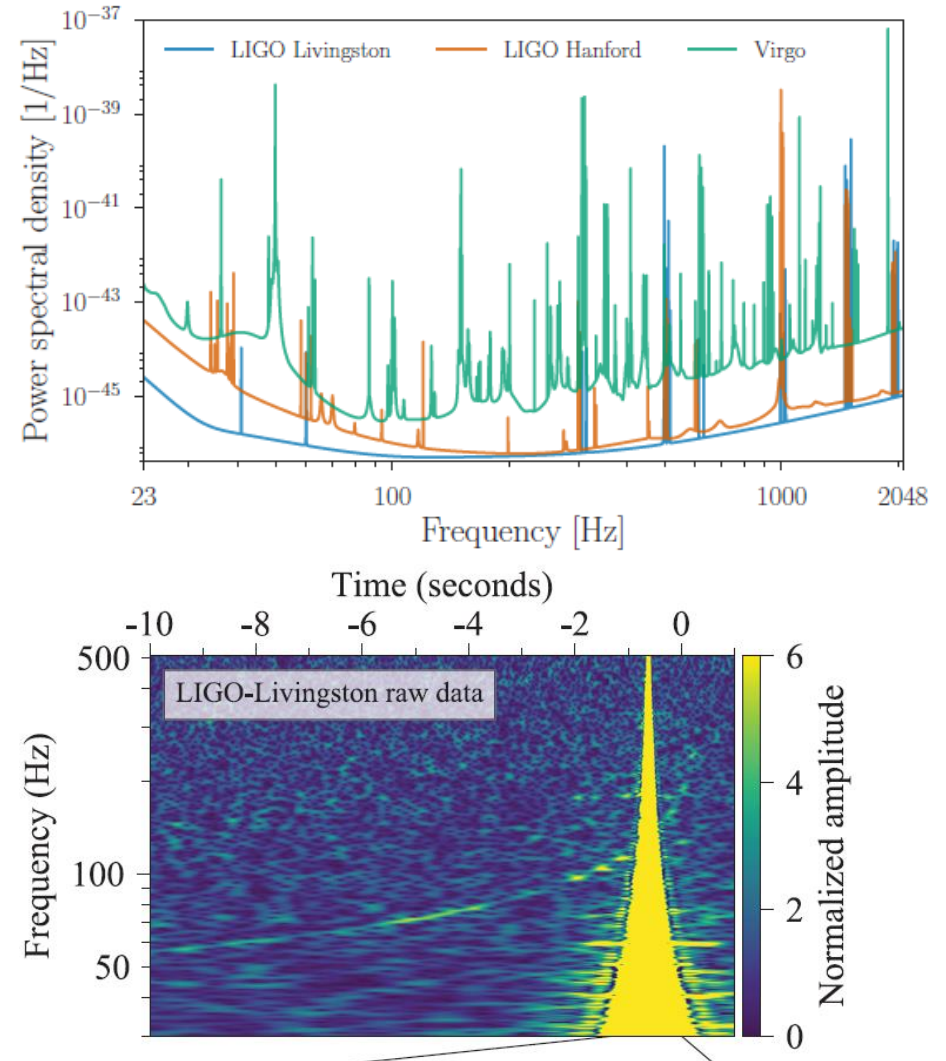
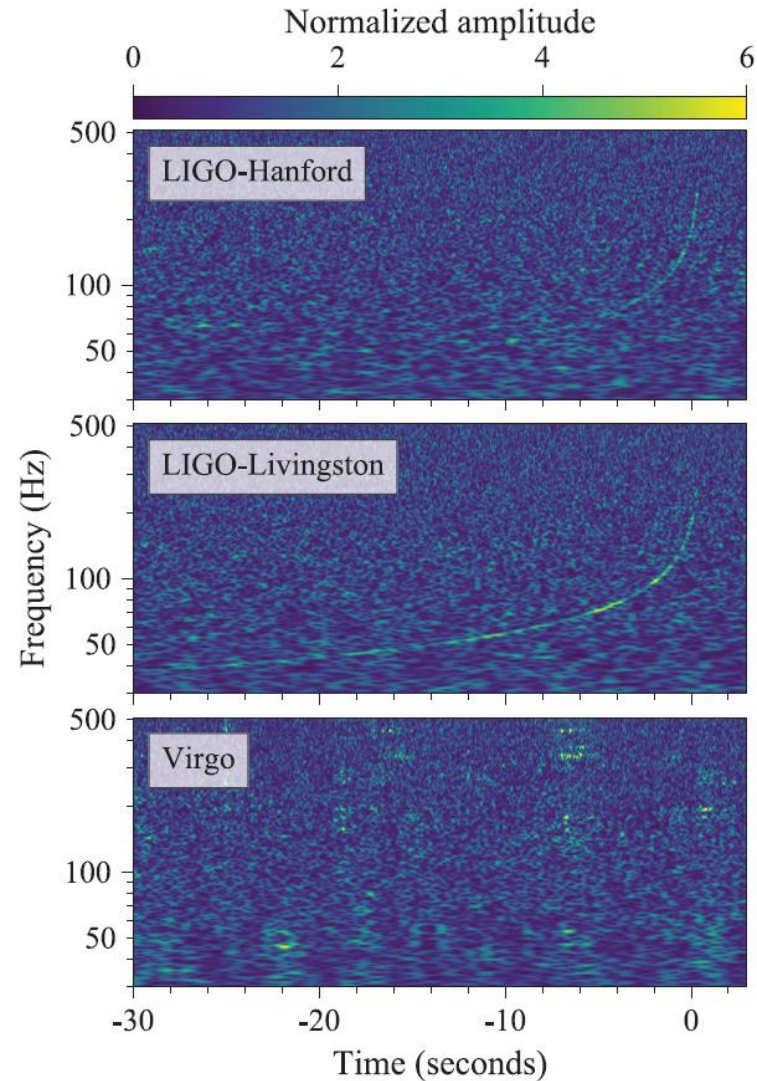
中性子星合体からの重力波



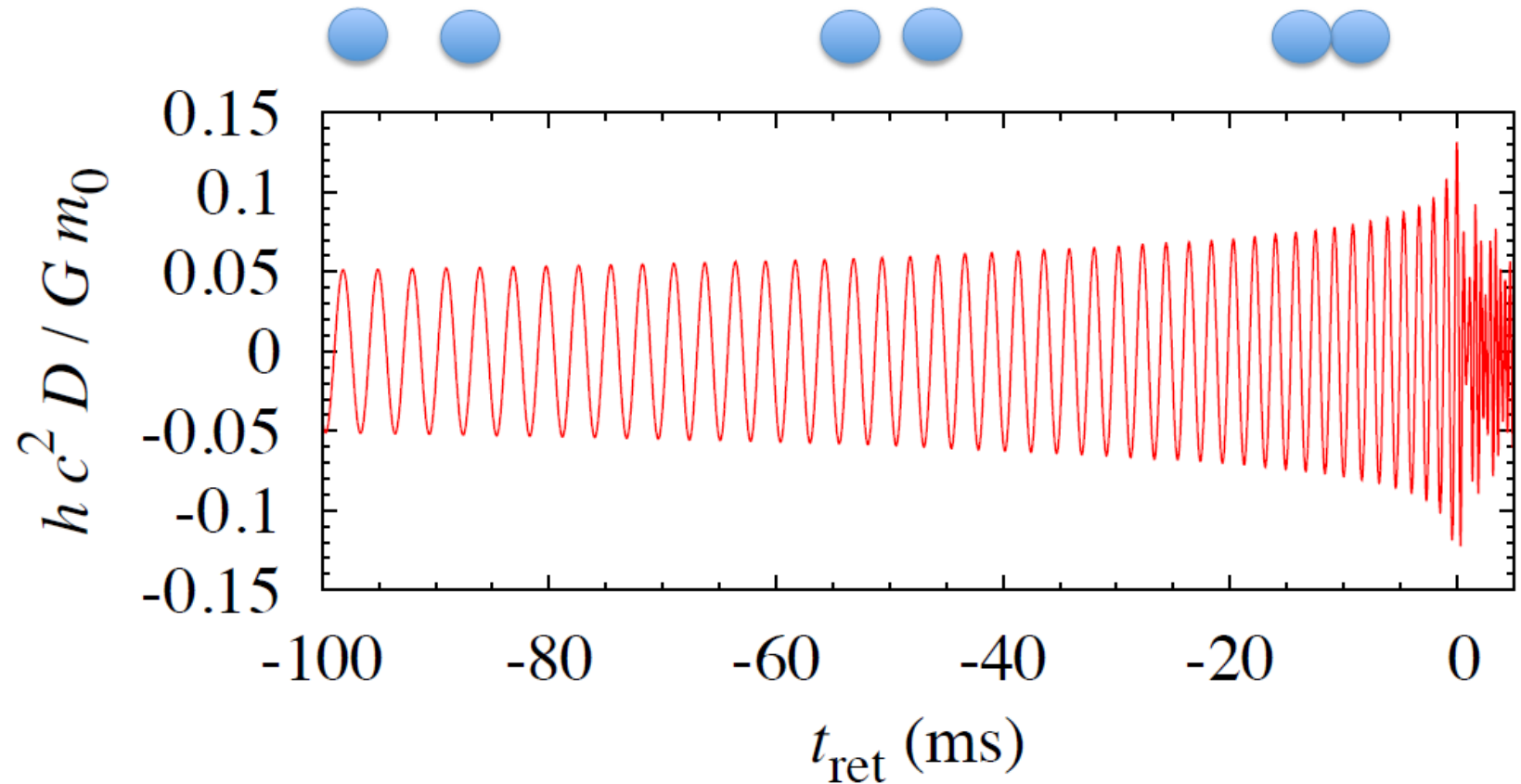
GW170817からの重力波(時間一周波数)

LIGO & Virgo Collaboration PRL (2017)

LIGO & VIRGO Collaboratin: arXiv:1805.11579



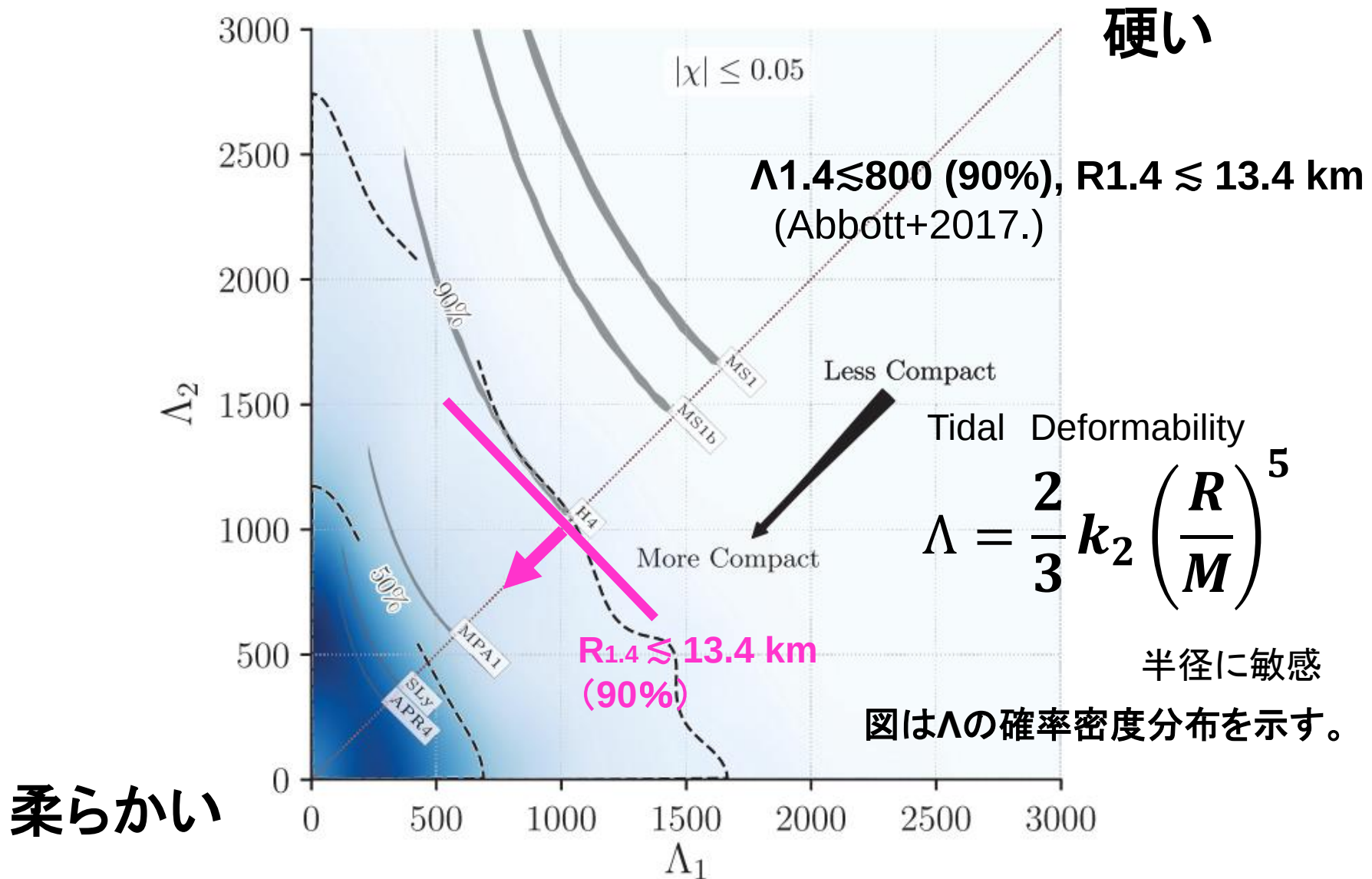
Chirp signal



$$h_{\text{effective}} \approx 2.3 \times 10^{-22} \left(\frac{\mathcal{M}}{1.2 M_{\odot}} \right)^{5/6} \left(\frac{f}{100 \text{ Hz}} \right)^{-1/6} \left(\frac{100 \text{ Mpc}}{D} \right) \left(\frac{Q_{\text{angle}}}{5^{-1/2}} \right) f \propto \mathcal{M}^{-5/8} t^{-3/8}$$

$$\mathcal{M} = M^{2/5} \mu^{3/5} : \text{Chirp mass} \quad \mathcal{M} = m_1^{3/5} m_2^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$$

柔らかい状態方程式がfavored!



What is Tidal Deformability?

e.g. Hinderer (2008), Postnikov, Prakash, Lattimer (2010), Gralla (2018)

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{Tidal Deformability} & & \\
 & & \downarrow & & \\
 \begin{array}{c} \uparrow \\ Q_{ij} \end{array} & = & -k_2 \frac{2R^5}{3G} E_{ij} \equiv & -\lambda E_{ij}, & \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{摂動として与える外場 (l=2)} \end{array} \\
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{四重極モーメント} \end{array} & & \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{Love Number (l=2)} \end{array} & &
 \end{array}$$

ニュートニアンでは $Q_{ij} = \int d^3x \delta\rho (x_i x_j - \frac{1}{3} \delta_{ij})$

$$\Phi_{\text{ext}} = \frac{1}{2} \mathcal{E}_{ij} x^i x^j,$$

1. 与えられたEOSに応じて球対称な星を作る(TOV方程式)。

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{G}{r^2} \left[\rho(r) + \frac{P(r)}{c^2} \right] \left[M(r) + 4\pi r^3 \frac{P(r)}{c^2} \right] \left[1 - \frac{2GM(r)}{c^2 r} \right]^{-1}.$$

2. 上記摂動を与え、その応答からTidal Deformabilityを決定する。

重力波では逆に四重極モーメント→重力波となる。その係数をTidal deformabilityが担う。

連星中性子星合体に於ける重力波と Tidal Deformability

e.g. Hinderer (2008), Flanagan & Hinderer (2008), De+(2018)

Leading Orderとしては次の量が重力波にimprintされている。
重力波の位相が(点源と比較して)変化する。

$$\tilde{\Lambda} = \frac{16}{13} \frac{(12q + 1)\Lambda_1 + (12 + q)q^4\Lambda_2}{(1 + q)^5}, \quad q = m_2/m_1 \leq 1$$

$$\delta\Psi = -\frac{9}{16} \frac{v^5}{\mu M^4} \left[\left(11 \frac{m_2}{m_1} + \frac{M}{m_1} \right) \lambda_1 + 1 \leftrightarrow 2 \right], \quad v = (\pi M f)^{1/3},$$

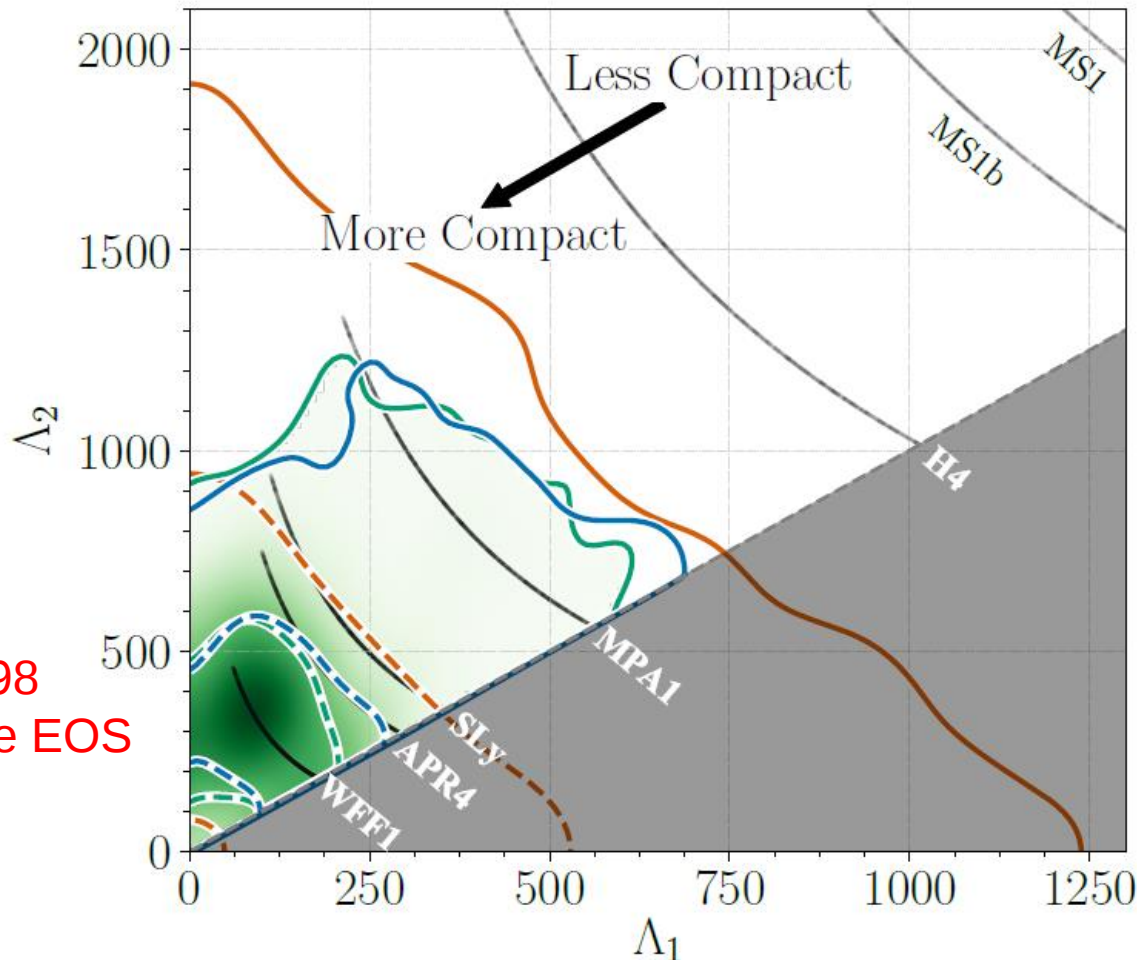
$$\begin{aligned} \Psi(f) = & 2\pi f t_c - \phi_c - \frac{\pi}{4} + \frac{3M}{128\mu} (\pi M f)^{-5/3} \left[1 + \frac{20}{9} \left(\frac{743}{336} + \frac{11}{4} \frac{\mu}{M} \right) v^2 - 4(4\pi - \beta) v^3 + 10 \left(\frac{3058673}{1016064} + \frac{5429}{1008} \frac{\mu}{M} \right. \right. \\ & + \left. \frac{617}{144} \frac{\mu^2}{M^2} - \sigma \right) v^4 + \left(\frac{38645\pi}{252} - \frac{65}{3} \frac{\mu}{M} \right) \ln v + \left(\frac{11583231236531}{4694215680} - \frac{640\pi^2}{3} - \frac{6848\gamma}{21} \right) v^6 \\ & + \frac{\mu}{M} \left(\frac{15335597827}{3048192} + \frac{2255\pi^2}{12} + \frac{47324}{63} - \frac{7948}{9} \right) v^6 + \left(\frac{76055}{1728} \frac{\mu^2}{M^2} - \frac{127825}{1296} \frac{\mu^3}{M^3} - \frac{6848}{21} \ln(4v) \right) v^6 \\ & \left. + \pi \left(\frac{77096675}{254016} + \frac{378515}{1512} \frac{\mu}{M} - \frac{74045}{756} \frac{\mu^2}{M^2} \right) v^7 \right], \end{aligned}$$

Flanagan & Hinderer (2008)

2018年、解析方法を改訂。 →上限値のみでなく、下限値も見えて来た。

LIGO & VIRGO Collaboratin: arXiv:1805.11581

See also De, Lattimer, Brown, Berger, Biwer arXiv:1804.08583 (PRL accepted)



実線: 90%信頼度
点線: 50%

緑:
共通EOS。
上限質量>1.97M。
確率分布の濃淡付

青:
共通EOS
上限質量制限なし

オレンジ:
独立EOS(2017と
同じ)。
上限質量制限なし

APR:
Akmal et al. 98
後にreference EOS
として使う。

包括的(?)ブローケン・パワーローEOS解析

LIGO & VIRGO Collaboratin: arXiv:1805.11581

$$p(\rho) = K_i \rho^{\Gamma_i}, \quad \text{の形を仮定。}$$

$$\rho_1 = 10^{14.7} \text{ g/cm}^3 \quad \rho_2 = 10^{15} \text{ g/cm}^3$$

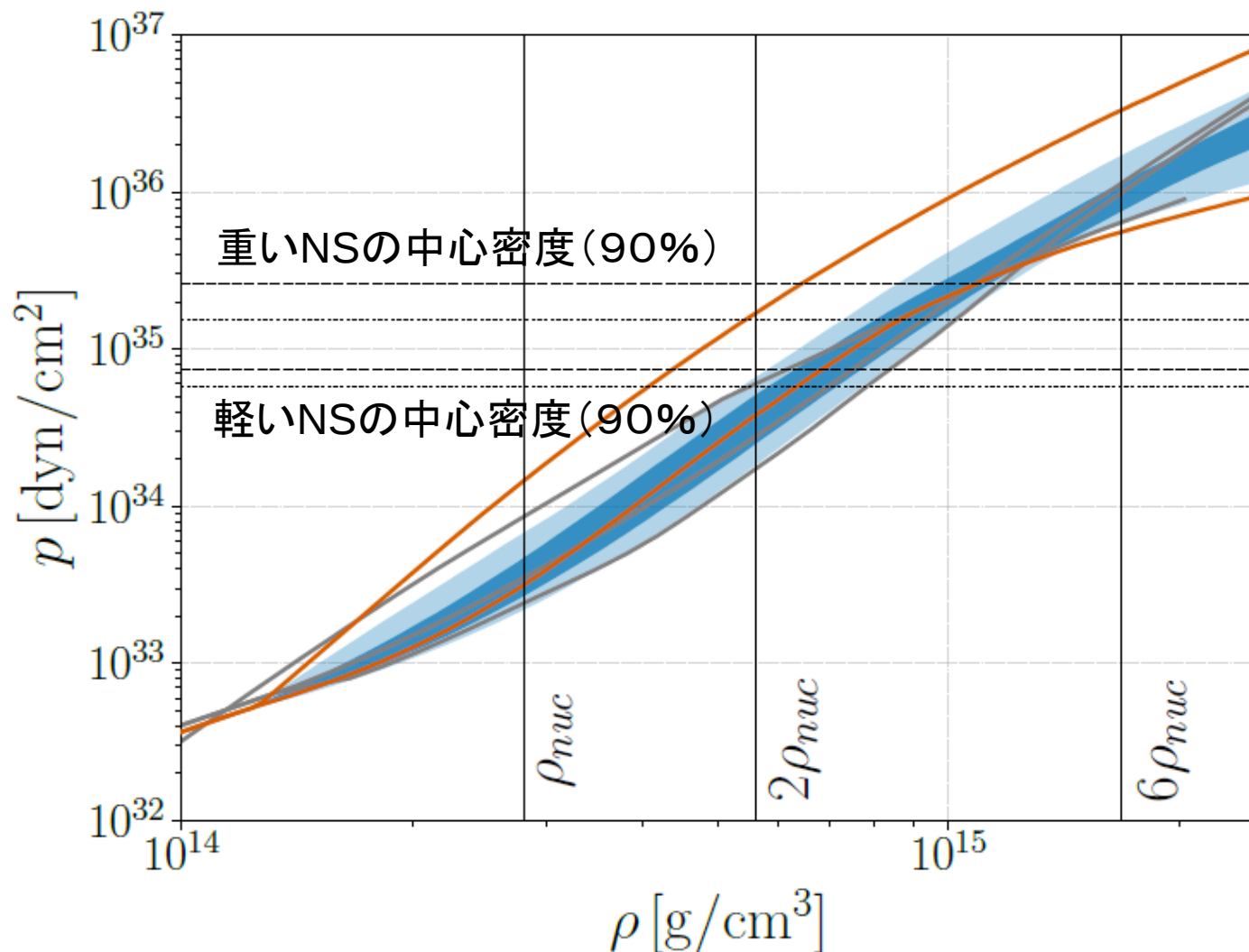
$$\vec{E} = \{\log(p_1), \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3\}.$$

このFitting Formulaで、ほぼ発表されているEOSの形をカバーできる。

Lackey & Wade (2015)が提案 → LIGO & VIRGO Collaborationもこの形を採用して解析。

中性子星内部の状態方程式に制限がついた！

LIGO & VIRGO Collaboratin: arXiv:1805.11581



M,Rは積分値。
それにとどまらず、
P(ρ)のプロファイルを示した！

濃い青: 50%
薄い青: 90%

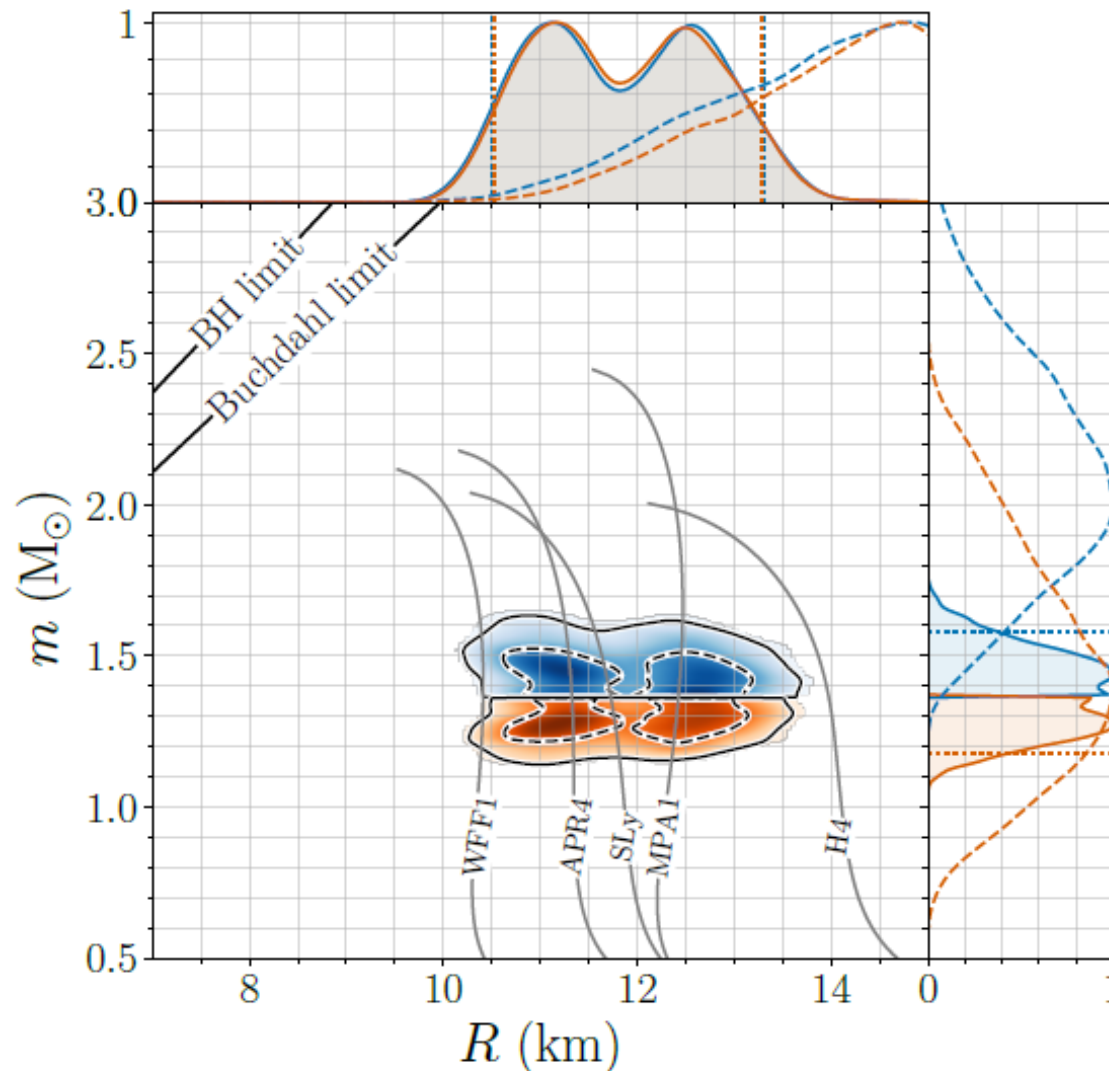
グレー3本は
上から順に
(at $2\rho_{nuc}$)
H4, APR4, WFF1

二つの中性子星の質量・半径推定値

LIGO & VIRGO Collaboratin: arXiv:1805.11581

arXiv:1805.11579

中性子星の最大
質量 $>1.97M_{\text{solar}}$
を前提とした解析。



$$R_1 = 11.9^{+1.4}_{-1.4} \text{ km}$$

$$R_2 = 11.9^{+1.4}_{-1.4} \text{ km}$$

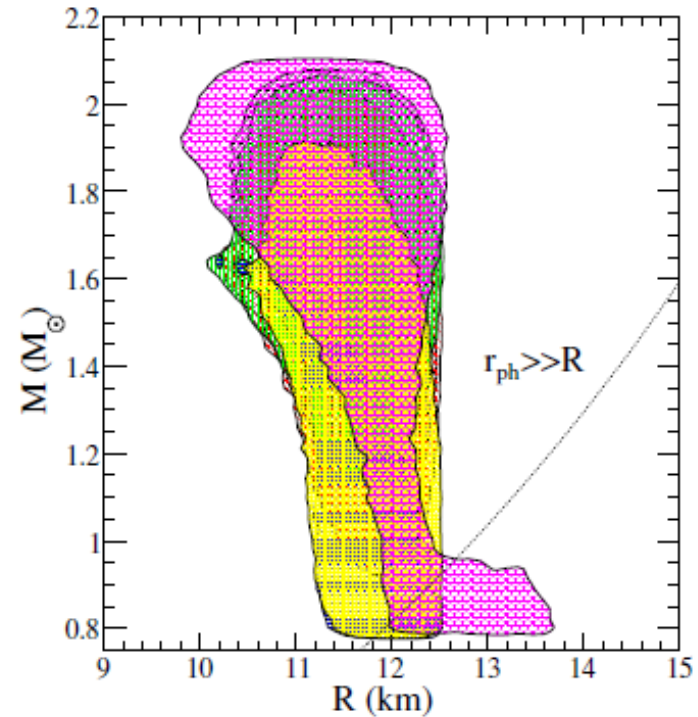
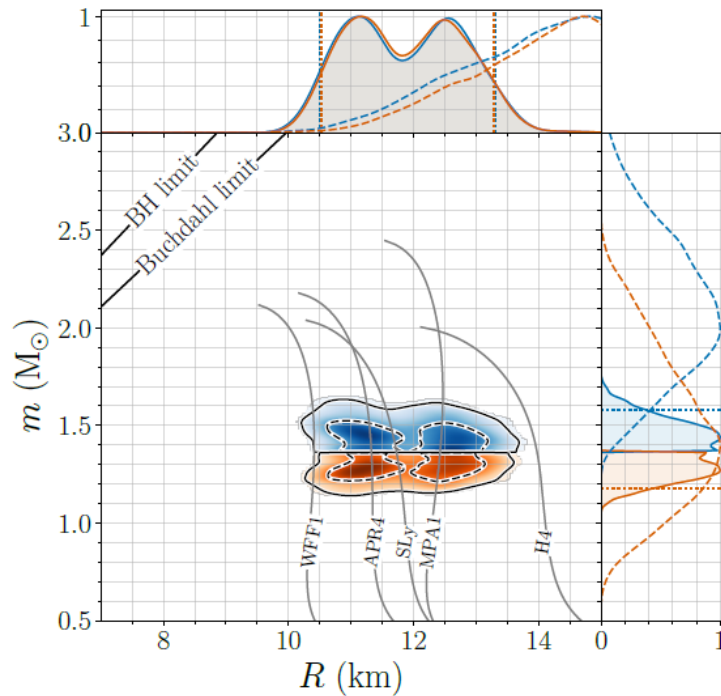
Total Mass

$$2.73^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$$

Mass Range

$$1.16 - 1.60 M_{\odot}$$

従来の連星系X線バーストによる半径推定値と、
今回の重力波観測の半径推定値が良く一致した！



LIGO & VIRGO Collaboratin: arXiv:1805.11581
arXiv:1805.11579

X線バーストからの推定値
Steiner, Lattimer, Brown (2010).

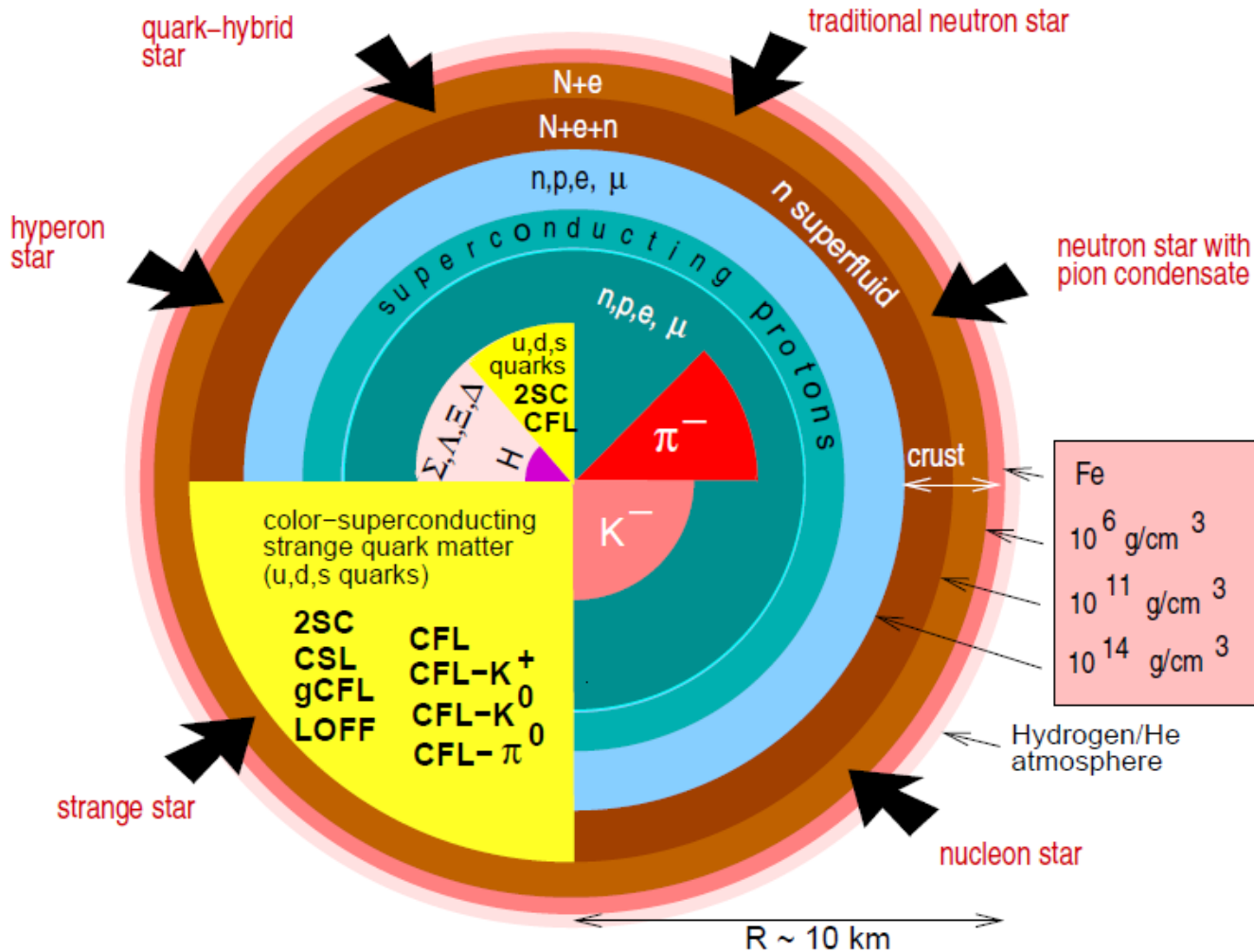
重力波の観測例は今後劇的に増加する可能性がある！

§ Equation of State in Dense Matter

中性子星の歴史

- 中性子の発見 James Chadwick (1932)
- 中性子星の予言 Zwicky & Baade (1934)
- 中性子星の発見
1965: Antony Hewish and Samuel Okoye がカニ星雲からの電波パルス発見（後にカニパルサー起源と分かる）。周期33ミリ秒。
- 以降、LMXBなどの検出など。質量・半径等推定され、おおよそ理論と整合する（太陽質量の1-2倍、半径10km程度）。
- その先の不定性は何に由来するか。その不定性は埋まるのか。

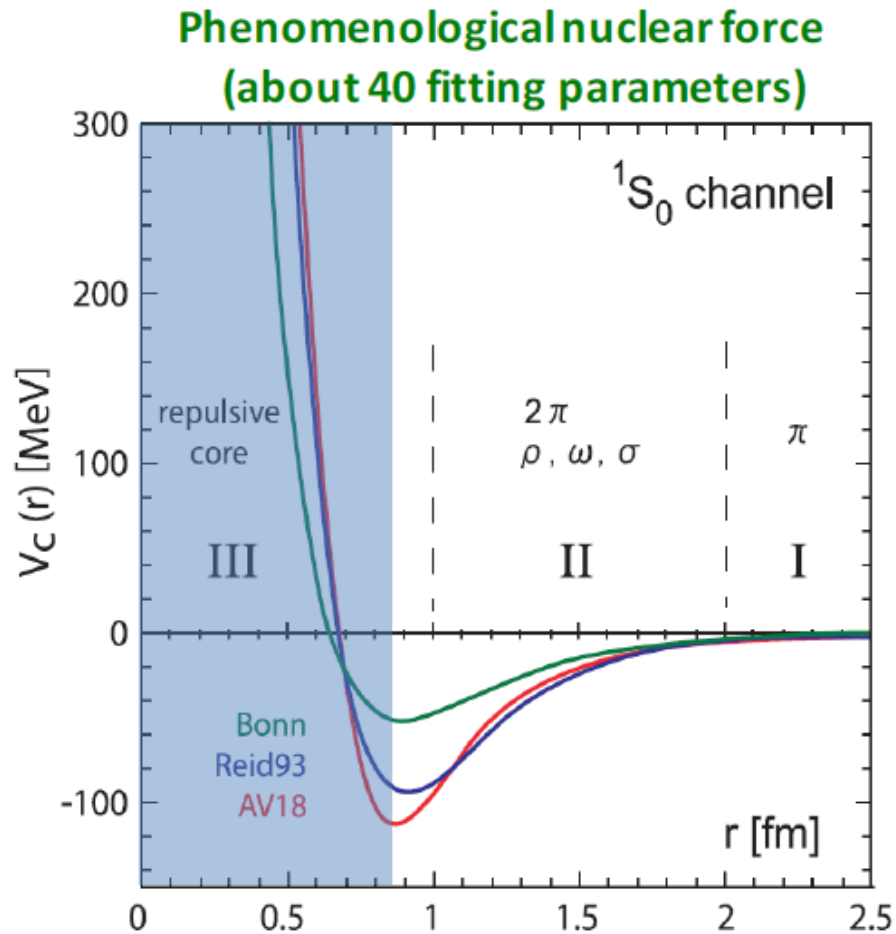
中性子星構造の可能性



From F. Weber 2005

何故、おおよそのサイズ(質量・半径)は分かるのか。
しかし何故、これらの可能性を一つに絞れないのか。

核力(クォーク力)が分かれば 中性子星の構造も分かる



分からないこと

- 斥力芯(高密度)
- 中性子過剰状態
- ハイペロン
- クォーク
- ...

ハイペロン核・メソン凝縮

Muto PTP (1993)

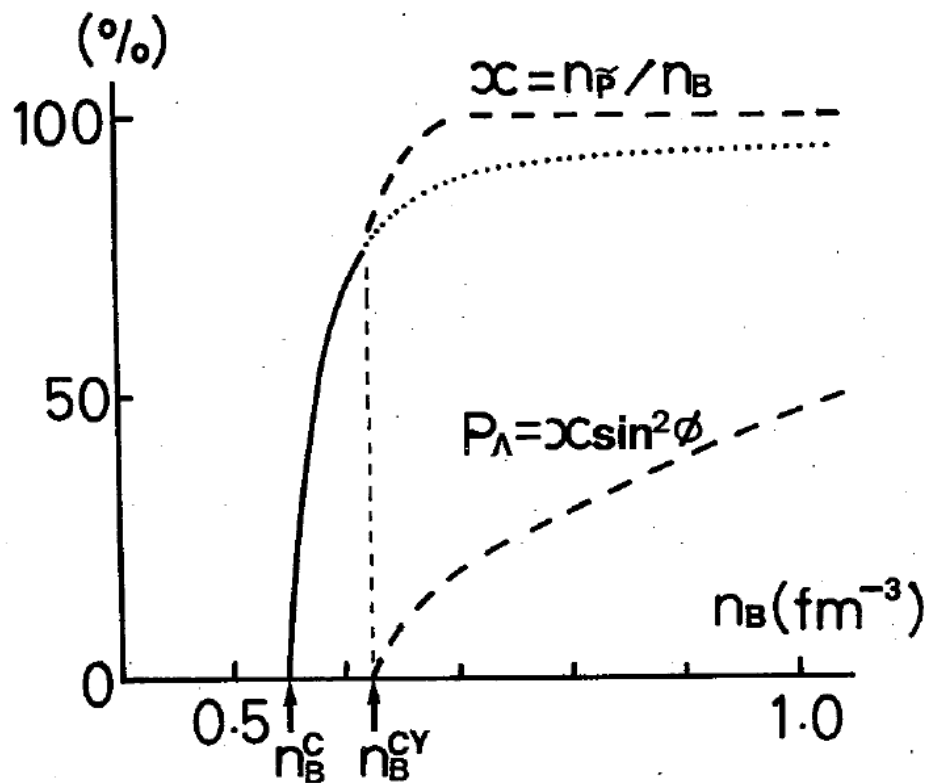
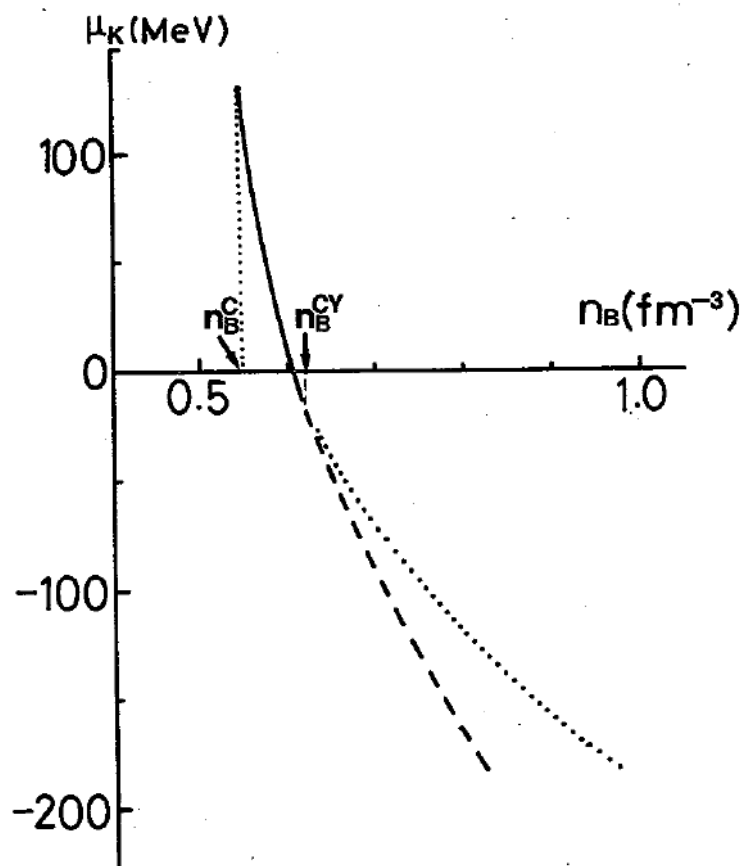
$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & \frac{1}{4}f^2\text{Tr}\partial^\mu\Sigma^\dagger\partial_\mu\Sigma + \frac{1}{2}f^2\Lambda_{\chi SB}(\text{Tr}M(\Sigma-1)+\text{h.c.}) \\ & + \text{Tr}\bar{\Psi}(i\not{\partial}-m_B)\Psi + \text{Tr}\bar{\Psi}i\gamma^\mu[V_\mu,\Psi] + D\text{Tr}\bar{\Psi}\gamma^\mu\gamma^5\{A_\mu,\Psi\} \\ & + F\text{Tr}\bar{\Psi}\gamma^\mu\gamma^5[A_\mu,\Psi] + a_1\text{Tr}\bar{\Psi}(\xi M^\dagger\xi+\text{h.c.})\Psi \\ & + a_2\text{Tr}\bar{\Psi}\Psi(\xi M^\dagger\xi+\text{h.c.}) + a_3(\text{Tr}M\Sigma+\text{h.c.})\text{Tr}\bar{\Psi}\Psi,\end{aligned}$$

$$\Psi = \begin{pmatrix} \Sigma^0/\sqrt{2} + \Lambda/\sqrt{6} & \Sigma^+ & p \\ \Sigma^- & -\Sigma^0/\sqrt{2} + \Lambda/\sqrt{6} & n \\ E^- & E^0 & -2\Lambda/\sqrt{6} \end{pmatrix},$$

K^- condensation in neutron matter is investigated by taking into account excitation of hyperons on the basis of $SU(3)_L \times SU(3)_R$ chiral symmetry. It is shown that the weak interaction plays an

平衡状態を求め、状態方程式が決まる。

Muto PTP (1993)



バリオン、メソン、ハイペロンが互いに相互作用する中、平衡状態に於けるポテンシャルが定まり、それぞれの化学ポテンシャルも決定される。
熱力学式 $dE = -Pd(1/n)$ (断熱)より圧力求まる ($P(n)$ が状態方程式)。だが一部未定係数。

Major goals of hypernuclear physics

Slide from E.Hiyama

To understand baryon-baryon interactions

Fundamental and important for the study of nuclear physics

Total number of
Nucleon (N) -Nucleon (N) data: 4,000

注: これでも不十分。
特に中性子過剰核側。



- Total number of differential cross section
Hyperon (Y) -Nucleon (N) data: 40
- **NO** YY scattering data

YN and YY potential
models so far proposed
(ex. Nijmegen,
Julich, Kyoto-Niigata)
have large ambiguity.

EOS List (これでも完全ではない)

Oertel et al. (2017)

Model	Nuclear interaction	Degrees of freedom	$M_{\max}, (M_{\odot})$	$R_{1.4M_{\odot}}, (\text{km})$	Ξ	Publicly available	References
H&W	SKa	$n, p, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	2.21 ^a	13.9 ^a		No	El Eid and Hillebrandt (1980) and Hillebrandt, Nomoto, and Wolff (1984)
LS180	LS180	$n, p, \alpha, (A, Z)$	1.84	12.2	0.27	Yes	Lattimer and Swesty (1991)
LS220	LS220	$n, p, \alpha, (A, Z)$	2.06	12.7	0.28	Yes	Lattimer and Swesty (1991)
LS375	LS375	$n, p, \alpha, (A, Z)$	2.72	14.5	0.32	Yes	Lattimer and Swesty (1991)
STOS	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z)$	2.23	14.5	0.26	Yes	Shen <i>et al.</i> (1998a, 1998b, 2011)
FYSS	TM1	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	2.22	14.4	0.26	No	Furusawa, Sumiyoshi <i>et al.</i> (2013)
HS(TM1)	TM1*	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	2.21	14.5	0.26	Yes	Hempel and Schaffner-Bielich (2010) and Hempel <i>et al.</i> (2012)
HS(TMA)	TMA*	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	2.02	13.9	0.25	Yes	Hempel and Schaffner-Bielich (2010)
HS(FSU)	FSUgold*	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	1.74	12.6	0.23	Yes	Hempel and Schaffner-Bielich (2010) and Hempel <i>et al.</i> (2012)
HS(NL3)	NL3*	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	2.79	14.8	0.31	Yes	Hempel and Schaffner-Bielich (2010) and Fischer, Hempel <i>et al.</i> (2014)
HS(DD2)	DD2	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	2.42	13.2	0.30	Yes	Hempel and Schaffner-Bielich (2010) and Fischer, Hempel <i>et al.</i> (2014)
HS(IUFSU)	IUFSU*	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	1.95	12.7	0.25	Yes	Hempel and Schaffner-Bielich (2010) and Fischer, Hempel <i>et al.</i> (2014)
SFHo	SFHo	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	2.06	11.9	0.30	Yes	Steiner, Hempel, and Fischer (2013)
SFHx	SFHx	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	2.13	12.0	0.29	Yes	Steiner, Hempel, and Fischer (2013)
SHT(NL3)	NL3	$n, p, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	2.78	14.9	0.31	Yes	Shen, Horowitz, and Teige (2011)
SHO(FSU)	FSUgold	$n, p, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	1.75	12.8	0.23	Yes	Shen, Horowitz, and O'Connor (2011)
SHO(FSU2.1)	FSUgold2.1	$n, p, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}$	2.12	13.6	0.26	Yes	Shen, Horowitz, and O'Connor (2011)

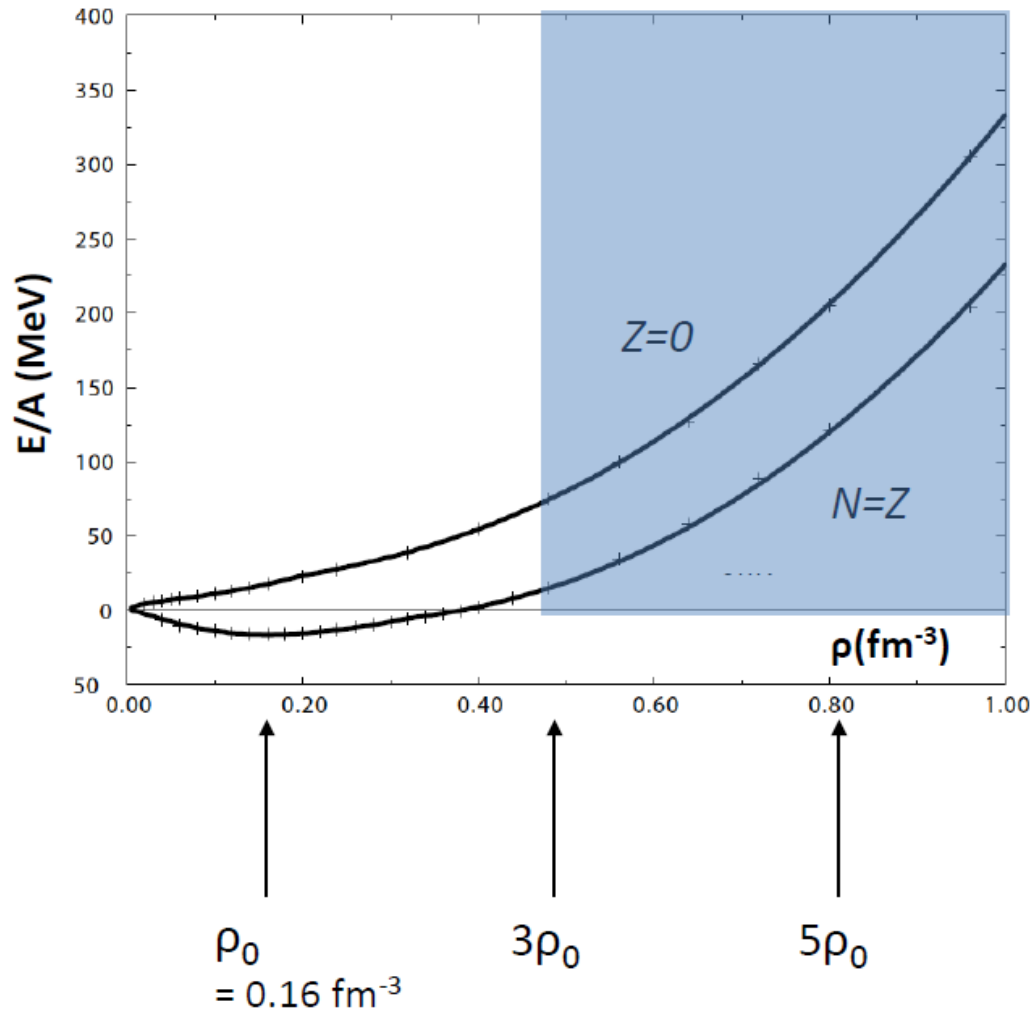
LS220 Λ	LS220	$n, p, \alpha, (A, Z), \Lambda$	1.91	12.4	0.29	Yes	Oertel, Fantina, and Novak (2012) and Gulminelli <i>et al.</i> (2013)
LS220 π	LS220	$n, p, \alpha, (A, Z), \pi$	1.95	12.2	0.29	No	Oertel, Fantina, and Novak (2012) and Peres, Oertel, and Novak (2013)
BHBA	DD2	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}, \Lambda$	1.96	13.2	0.25	Yes	Banik, Hempel, and Bandyopadhyay (2014)
BHBA ϕ	DD2	$n, p, d, t, h, \alpha, \{(A_i, Z_i)\}, \Lambda$	2.11	13.2	0.27	Yes	Banik, Hempel, and Bandyopadhyay (2014)
STOS Λ	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), \Lambda$	1.90	14.4	0.23	Yes	Shen <i>et al.</i> (2011)
STOSYA30	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), Y$	1.59	14.6	0.17	Yes	Ishizuka <i>et al.</i> (2008)
STOSYA30 π	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), Y, \pi$	1.62	13.7	0.19	Yes	Ishizuka <i>et al.</i> (2008)
STOSY0	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), Y$	1.64	14.6	0.18	Yes	Ishizuka <i>et al.</i> (2008)
STOSY0 π	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), Y, \pi$	1.67	13.7	0.19	Yes	Ishizuka <i>et al.</i> (2008)
STOSY30	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), Y$	1.65	14.6	0.18	Yes	Ishizuka <i>et al.</i> (2008)
STOSY30 π	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), Y, \pi$	1.67	13.7	0.19	Yes	Ishizuka <i>et al.</i> (2008)
STOSY90	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), Y$	1.65	14.6	0.18	Yes	Ishizuka <i>et al.</i> (2008)
STOSY90 π	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), Y, \pi$	1.67	13.7	0.19	Yes	Ishizuka <i>et al.</i> (2008)
STOS π	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), \pi$	2.06	13.6	0.26	No	Nakazato, Sumiyoshi, and Yamada (2008)

Model	Nuclear interaction	Degrees of freedom	$M_{\max}, (M_{\odot})$	$R_{1.4M_{\odot}}, (\text{km})$	Ξ	Publicly available	References
STOSQ209n π	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), \pi, q$	1.85	13.6	0.21	No	Nakazato, Sumiyoshi, and Yamada (2008)
STOSQ162n	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), q$	1.54			No	Nakazato, Sumiyoshi, and Yamada (2013)
STOSQ184n	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), q$	1.36	$\dots^b$		No	Nakazato, Sumiyoshi, and Yamada (2013)
STOSQ209n	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), q$	1.81	14.4	0.20	No	Nakazato, Sumiyoshi, and Yamada (2008, 2013)
STOSQ139s	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), q$	2.08	12.6	0.26	Yes	Sagert <i>et al.</i> (2012) and Fischer, Klähn <i>et al.</i> (2014)
STOSQ145s	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), q$	2.01	13.0	0.25	Yes	Sagert <i>et al.</i> (2012)
STOSQ155s	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), q$	1.70	9.93	0.25	Yes	Fischer <i>et al.</i> (2011)
STOSQ162s	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), q$	1.57	8.94	0.26	Yes	Sagert <i>et al.</i> (2009)
STOSQ165s	TM1	$n, p, \alpha, (A, Z), q$	1.51	8.86	0.25	Yes	Sagert <i>et al.</i> (2009)

Nuclear Force and dense EOS (nucleons only)

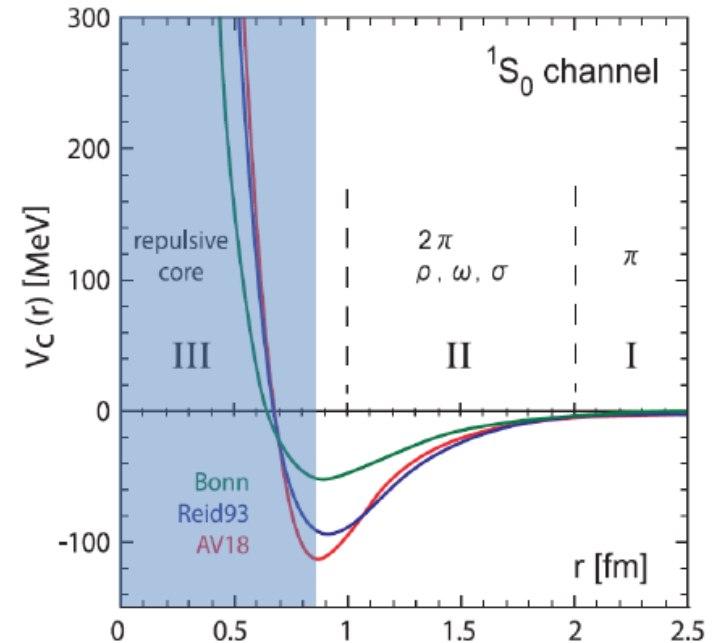
APR

Akmal, Pandharipande & Ravenhall, PRC58 ('98)

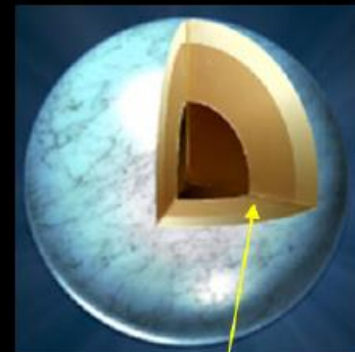
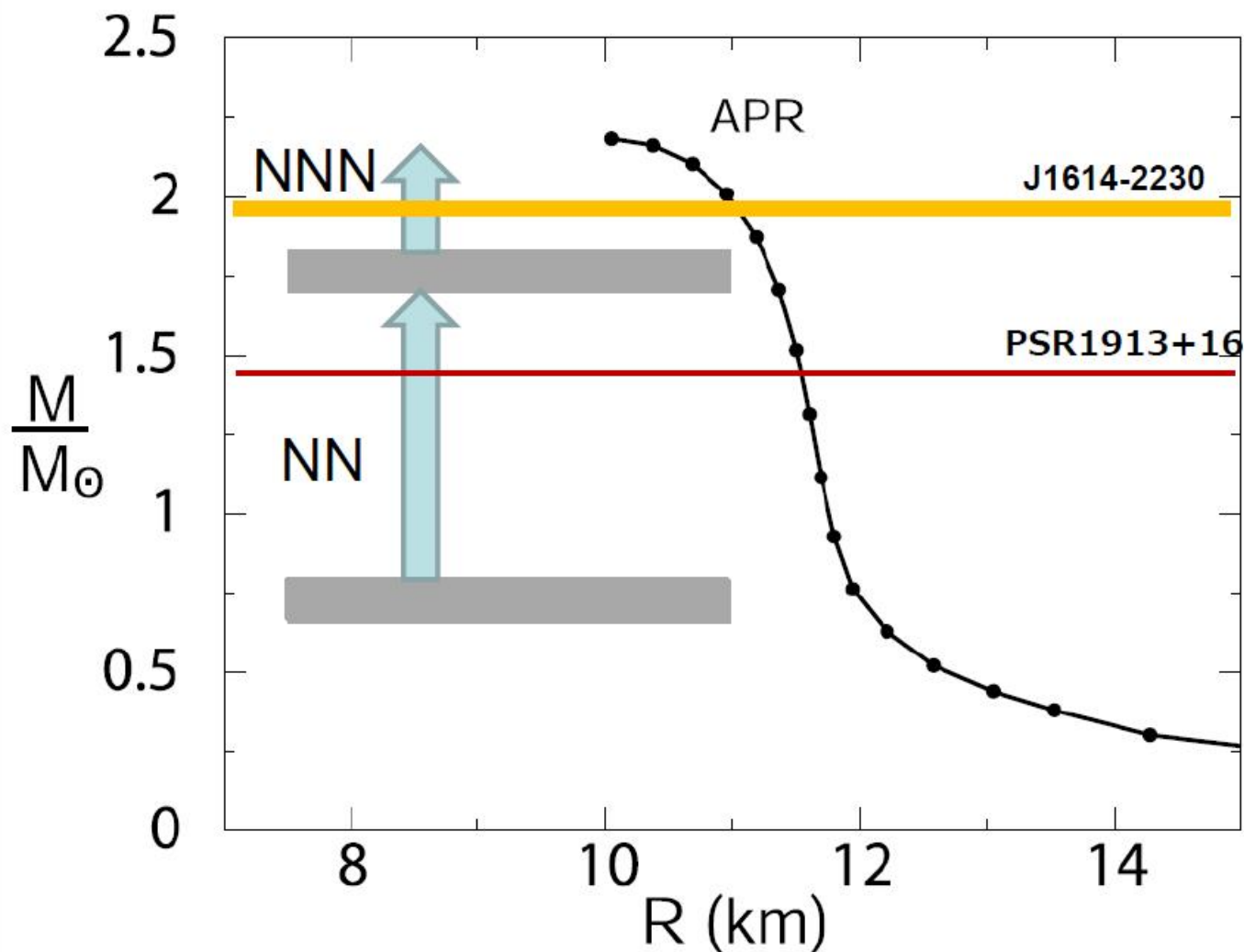


Slide from T.Hatsuda

Phenomenological nuclear force



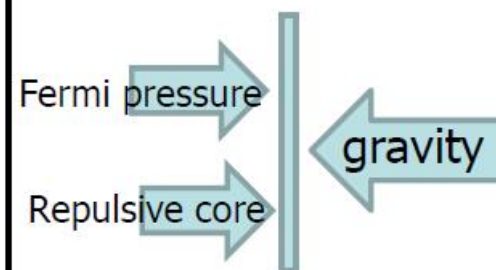
Mass-Radius relation of $N_{\star}$ (nucleons only)



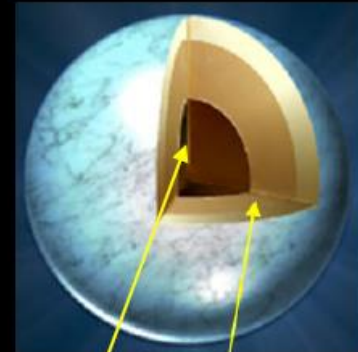
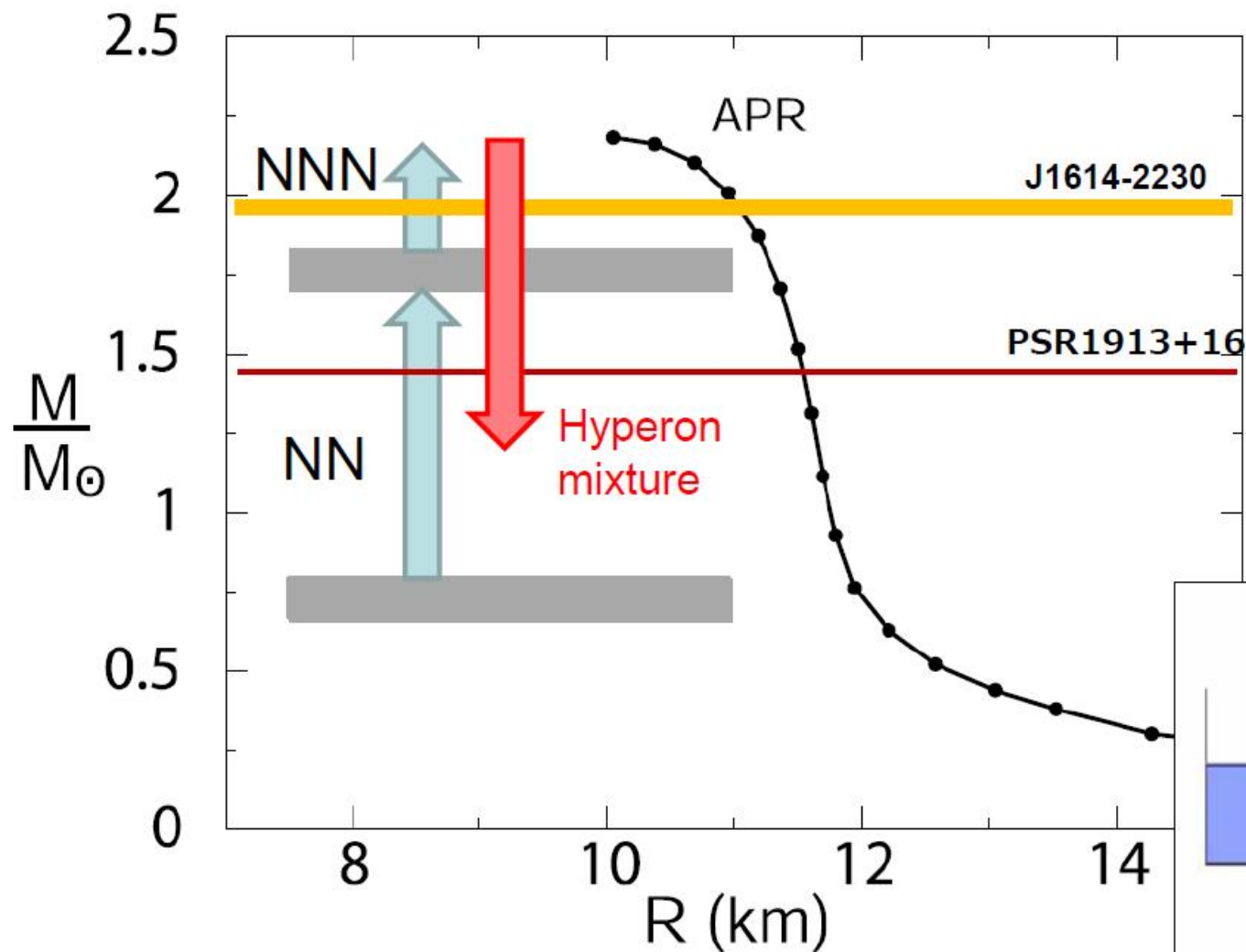
neutrons

Slide from T.Hatsuda

Pressure balance

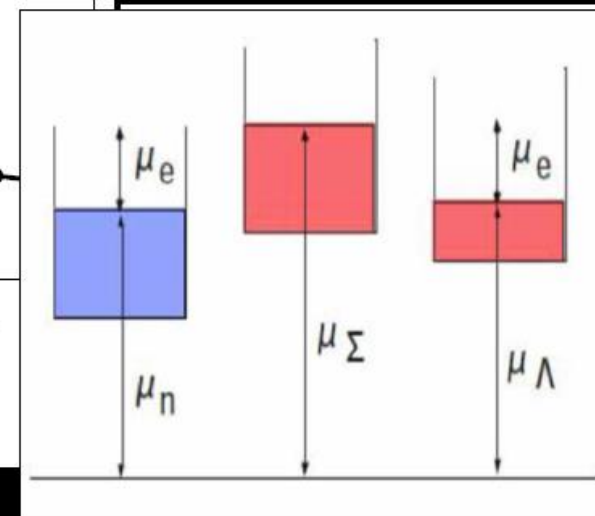


Hyperon Crisis (Takatsuka et al., 2002)



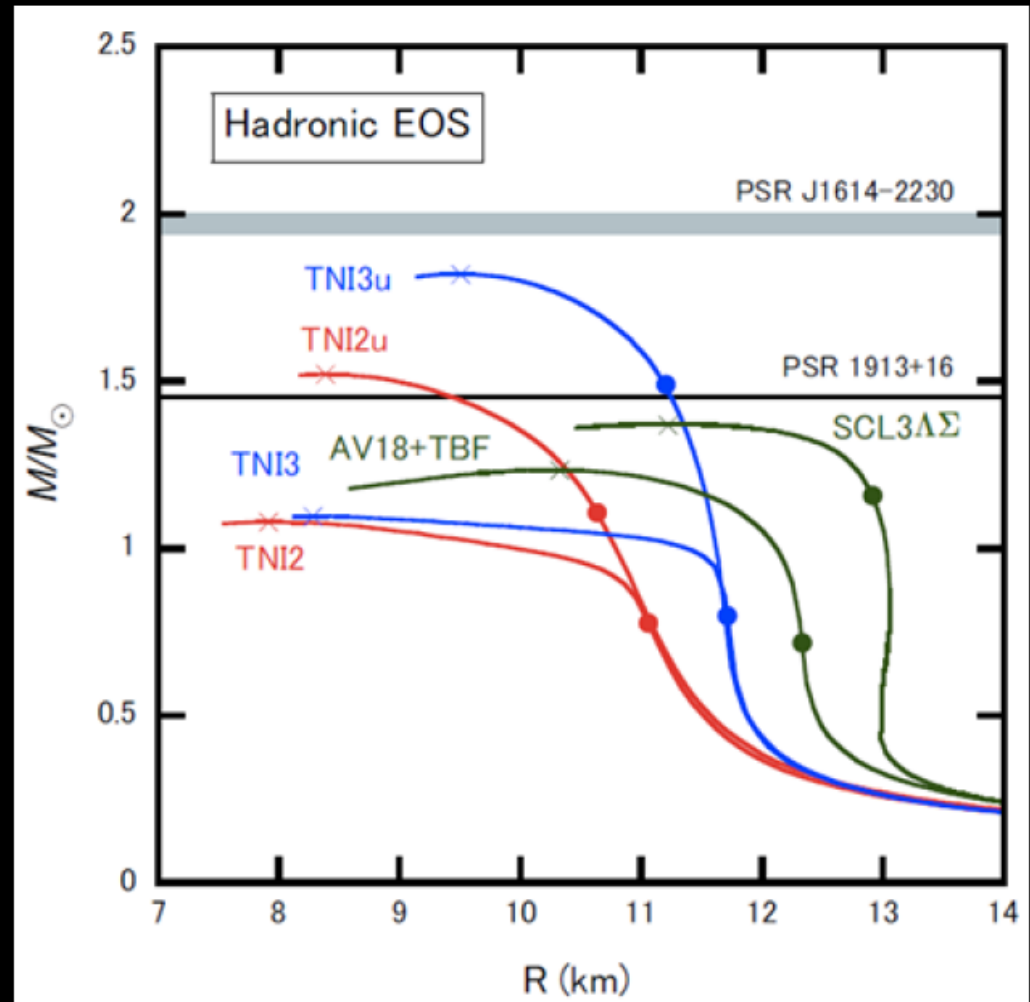
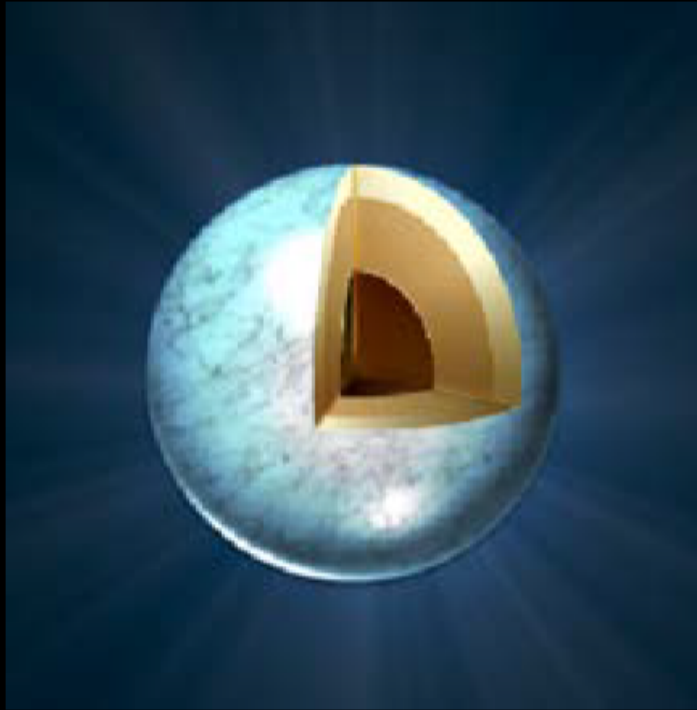
hyperons
neutrons

Slide from T.Hatsuda



Hyperon Crisis

Slide from T.Hatsuda



Masuda, Hatsuda & Takatsuka,
Astrophysical Journal Letters 764 (2013) 12

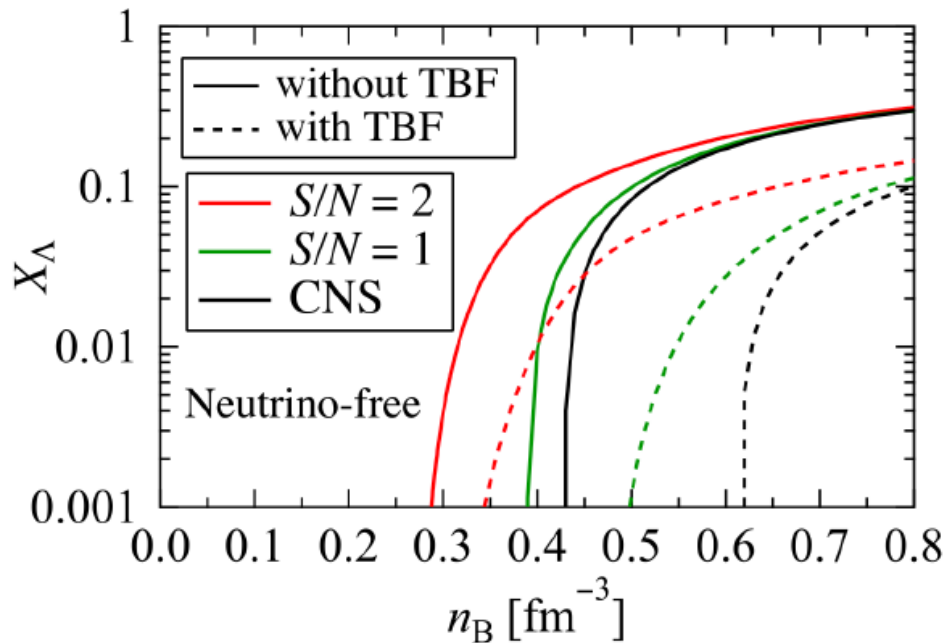
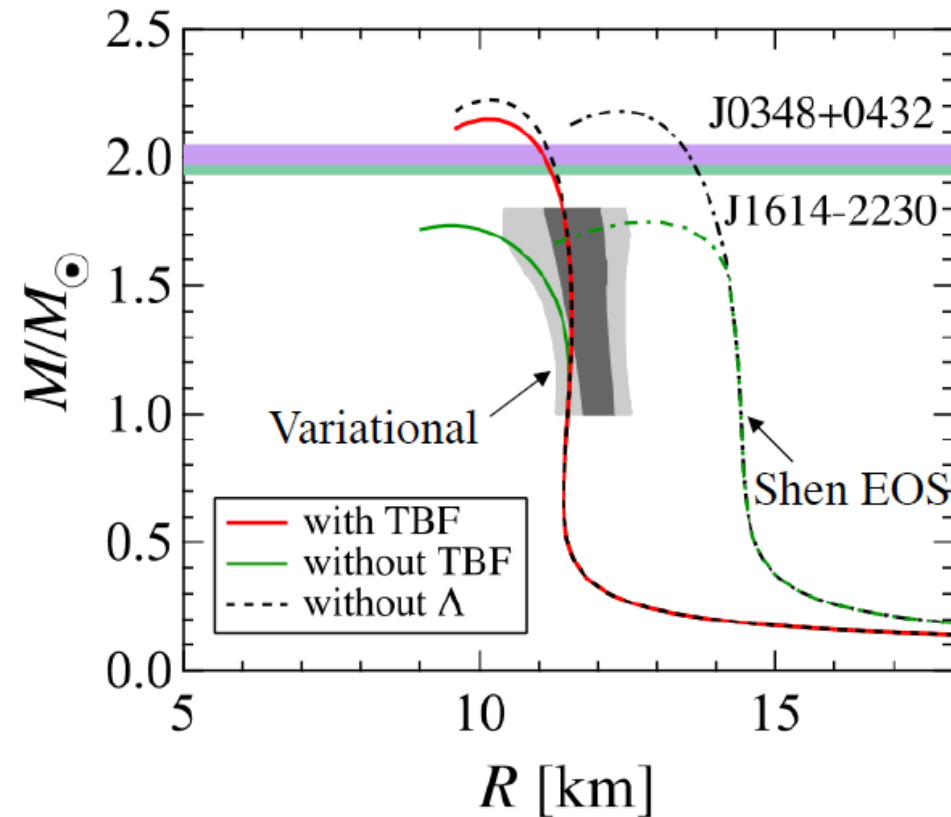
§ 高密度状態方程式：今後の展望

Extension to Hyperon Matter +3体力

*YN and YY interactions : constricted so as to reproduce the **light Λ hypernuclei** with the Gaussian expansion method*

Slide from H. Togashi

(E. Hiyama et al., PRC 66 (2002) 024007, PRC 74 (2006) 054312)



X_Λ in neutrino-free supernova matter

We need to consider an effective potential based on
Three-Baryon Force (TBF) for ΛNN , $\Lambda\Lambda N$, $\Lambda\Lambda\Lambda$ systems.

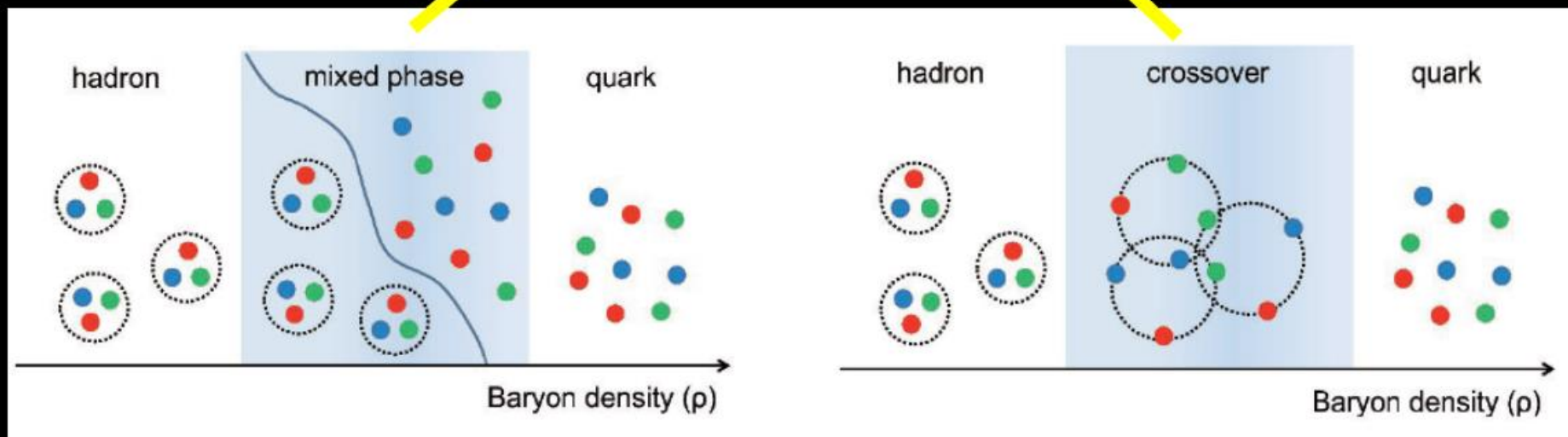
(Y. Yamamoto et al., PRC 90 (2014) 04580, HT et al., PRC 93 (2016) 035808)

First order or crossover in dense matter ?

クォーク相の現れ方
Slide from T.Hatsuda

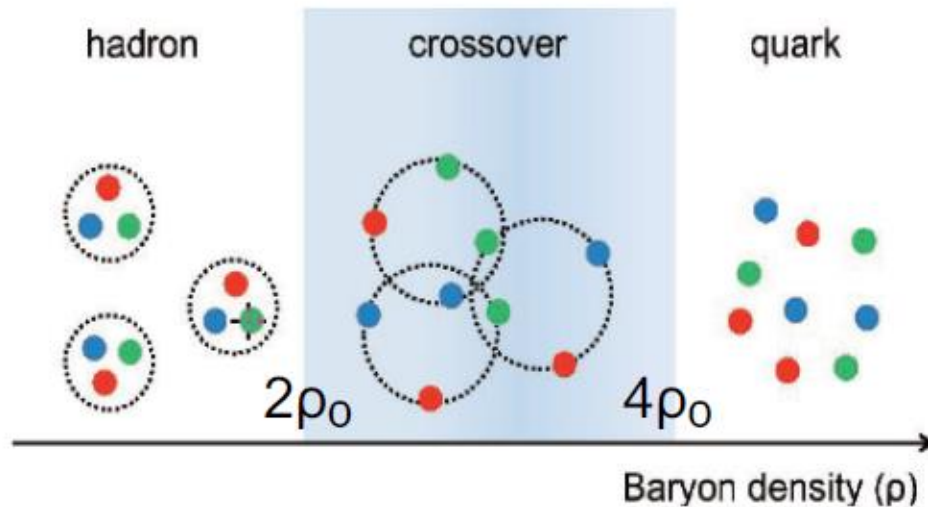
Baym & Chin
Phys.Lett. 62B (1976)241

Baym
Physica 96A (1979) 131



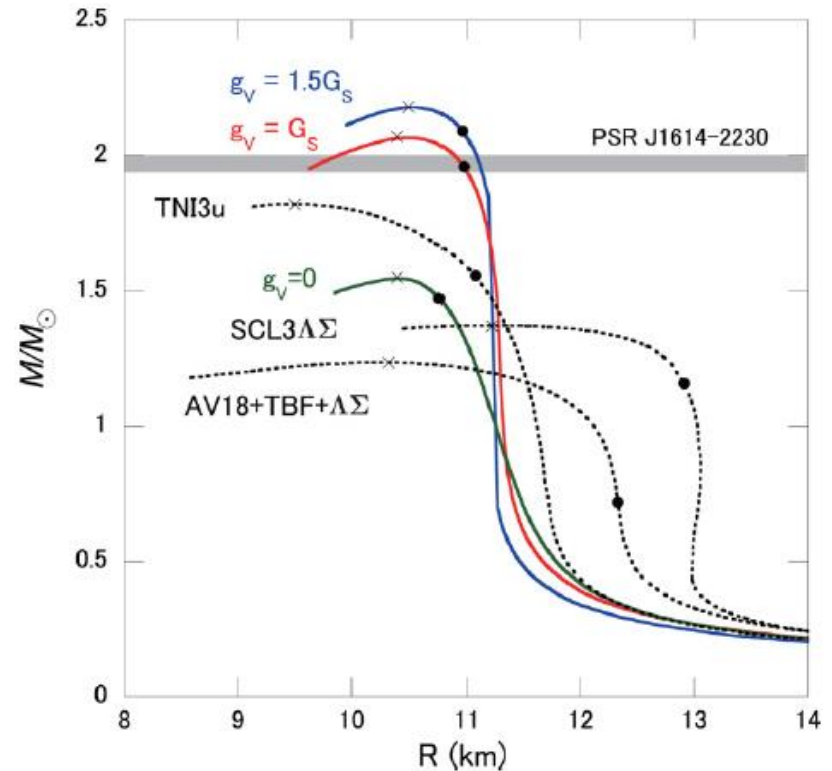
クォーク相入りEOSでもM-R関係を満たせる可能性

Masuda, Hatsuda, Takatsuka (2013a,b), (2016a,b)



$$\hat{E}(\rho) = \hat{E}_H(\rho)w_-(\rho) + \hat{E}_Q(\rho)w_+(\rho),$$

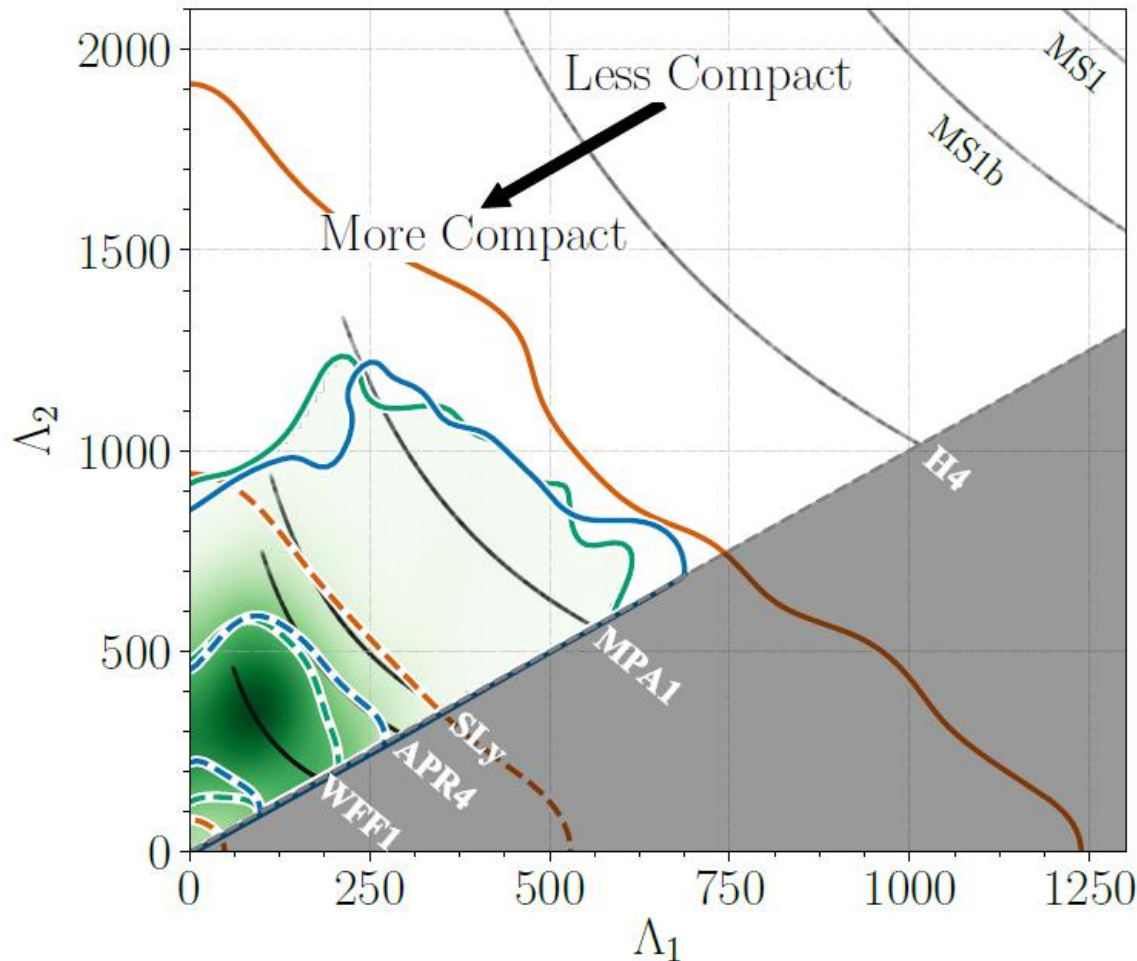
$$\mathcal{L}_{\text{NJL}} = \bar{q}(i\not{\partial} - m)q + \frac{G_S}{2} \sum_{a=0}^8 [(\bar{q}\lambda^a q)^2 + (\bar{q}i\gamma_5\lambda^a q)^2] \\ + G_D[\det\bar{q}(1 + \gamma_5)q + \text{h.c.}] - \frac{g_V}{2}(\bar{q}\gamma^\mu q)^2, \quad (1)$$



もう一度言おう、 上限値のみでなく、下限値も見えて来た。

LIGO & VIRGO Collaboratin: arXiv:1805.11581

See also De, Lattimer, Brown, Berger, Biwer arXiv:1804.08583 (PRL accepted)



実線: 90%信頼度
点線: 50%

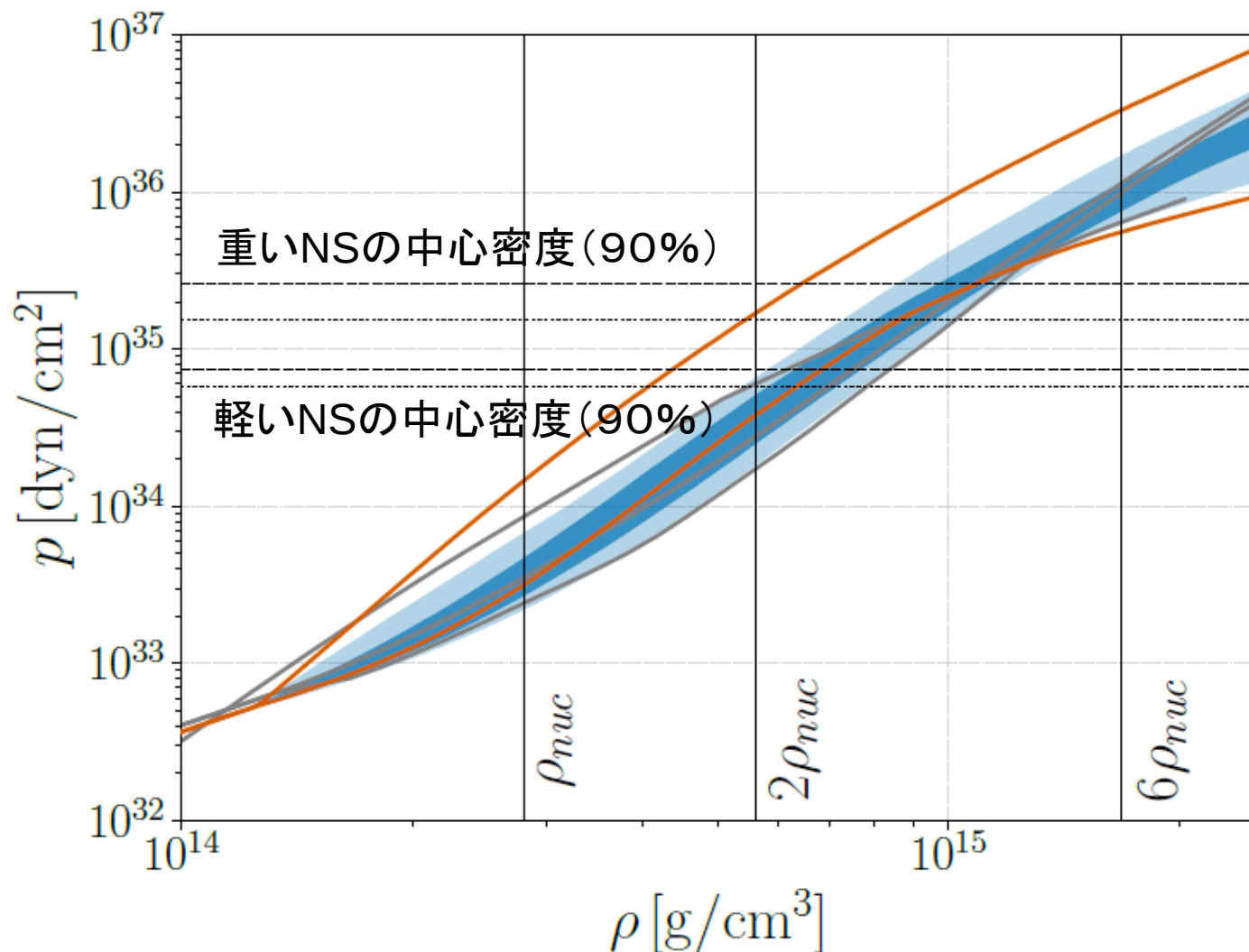
緑:
共通EOS。
上限質量>1.97M。
確率分布の濃淡付

青:
共通EOS
上限質量制限なし

オレンジ:
独立EOS(2017と
同じ)。
上限質量制限なし

中性子星内部の状態方程式に制限がついた！

LIGO & VIRGO Collaboratin: arXiv:1805.11581



M,Rは積分値。
それにとどまらず、
P(ρ)のプロファイルを示した！

濃い青: 50%
薄い青: 90%

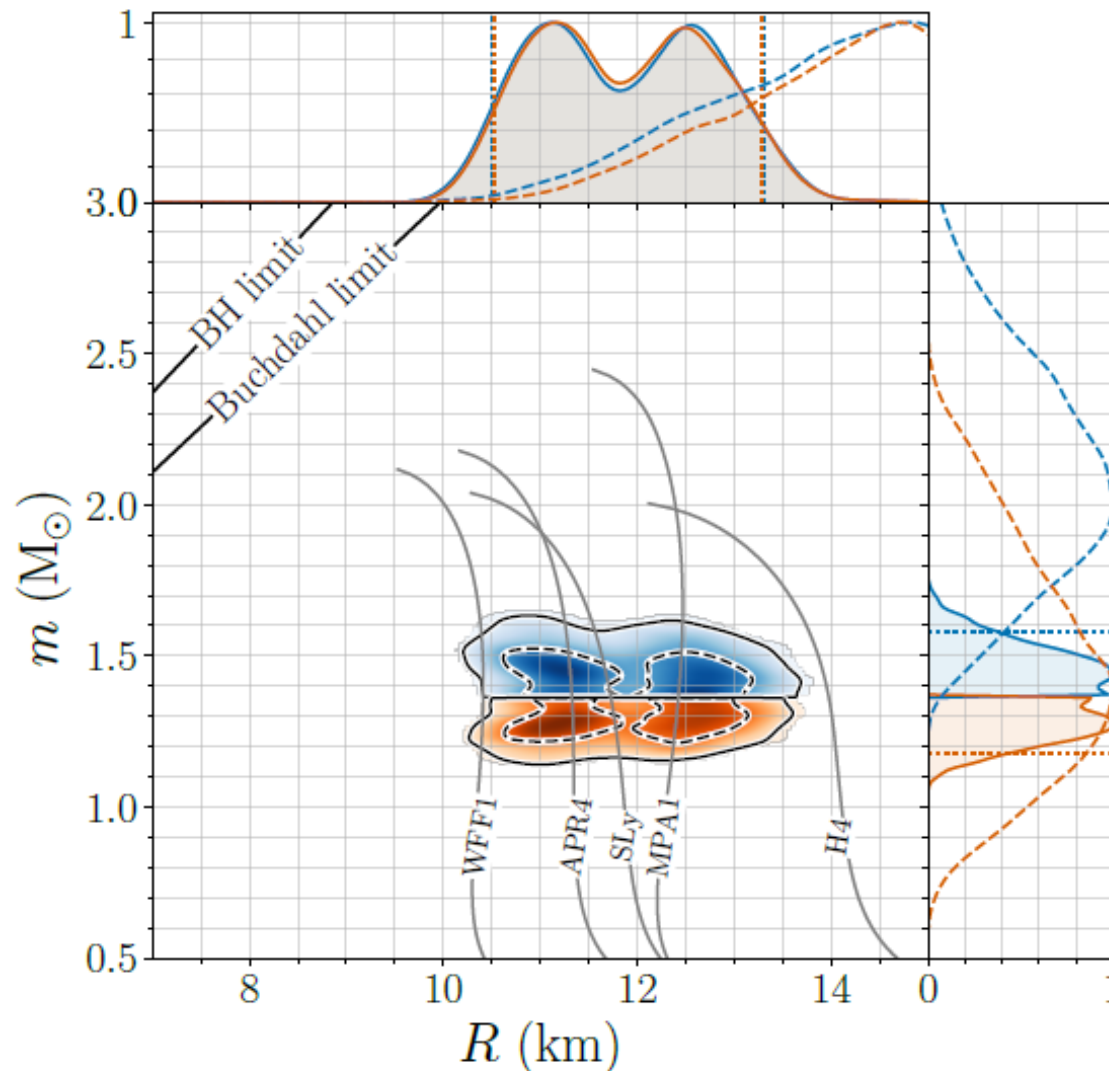
グレー3本は
上から順に
(at $2\rho_{nuc}$)
H4, APR4, WFF1

二つの中性子星の質量・半径推定値

LIGO & VIRGO Collaboratin: arXiv:1805.11581

arXiv:1805.11579

中性子星の最大
質量 $>1.97M_{\text{solar}}$
を前提とした解析。



$$R_1 = 11.9^{+1.4}_{-1.4} \text{ km}$$

$$R_2 = 11.9^{+1.4}_{-1.4} \text{ km}$$

Total Mass

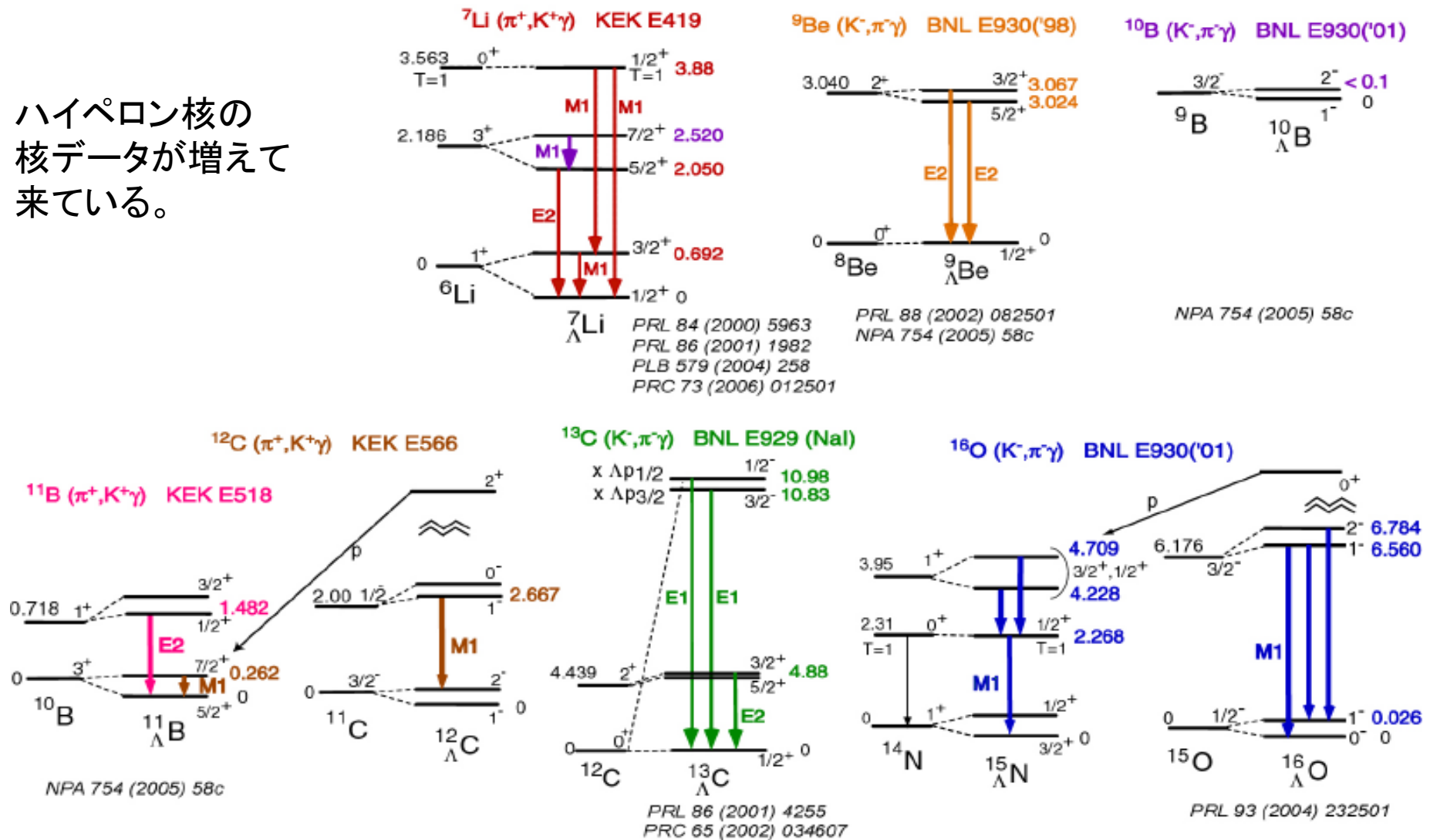
$$2.73^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$$

Mass Range

$$1.16 - 1.60 M_{\odot}$$

Hypernuclear γ -ray data since 1998 (slide from H.Tamura)

ハイペロン核の
核データが増えて
来ている。



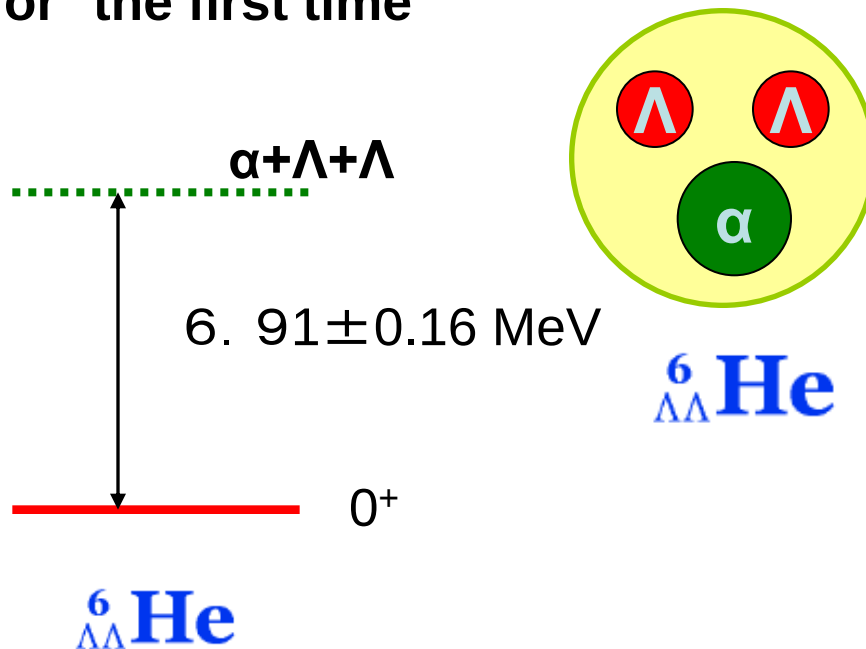
$$V_{\Lambda N} = V_0 + \sigma_{\Lambda} \cdot \sigma_N V_{\sigma\sigma} + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{s}_{\Lambda} + \mathbf{s}_N) V_{\text{SLS}} + \mathbf{L} \cdot (\mathbf{s}_{\Lambda} - \mathbf{s}_N) V_{\text{ALS}} + S_{12} V_{\text{tensor}} + \dots$$

- Millener (p-shell model),
- Hiyama (few-body)

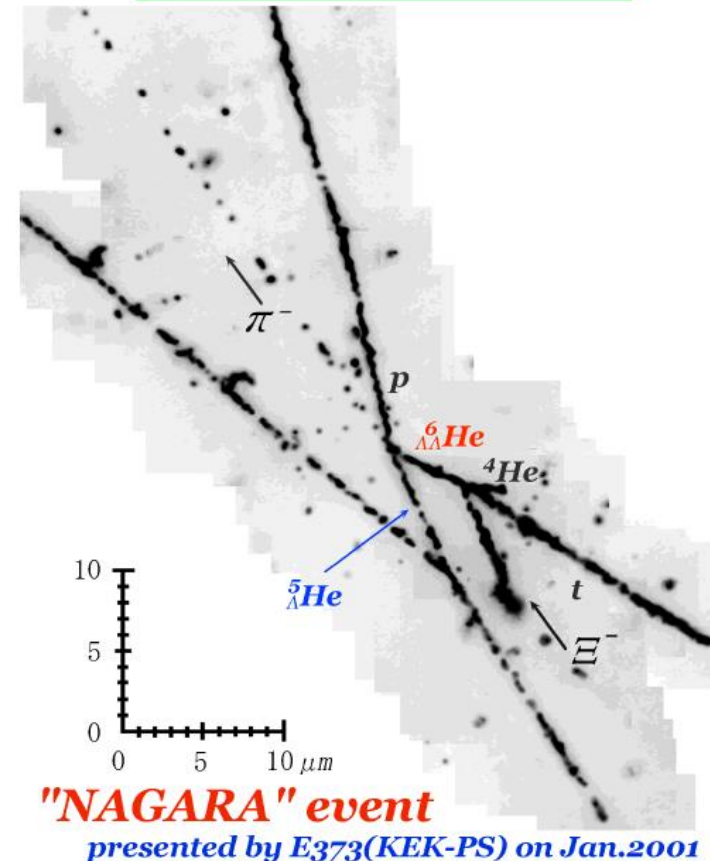
In 2001, the epoch-making data has been reported by the KEK-E373 experiment.

Observation of ${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$

Uniquely identified without ambiguity for the first time



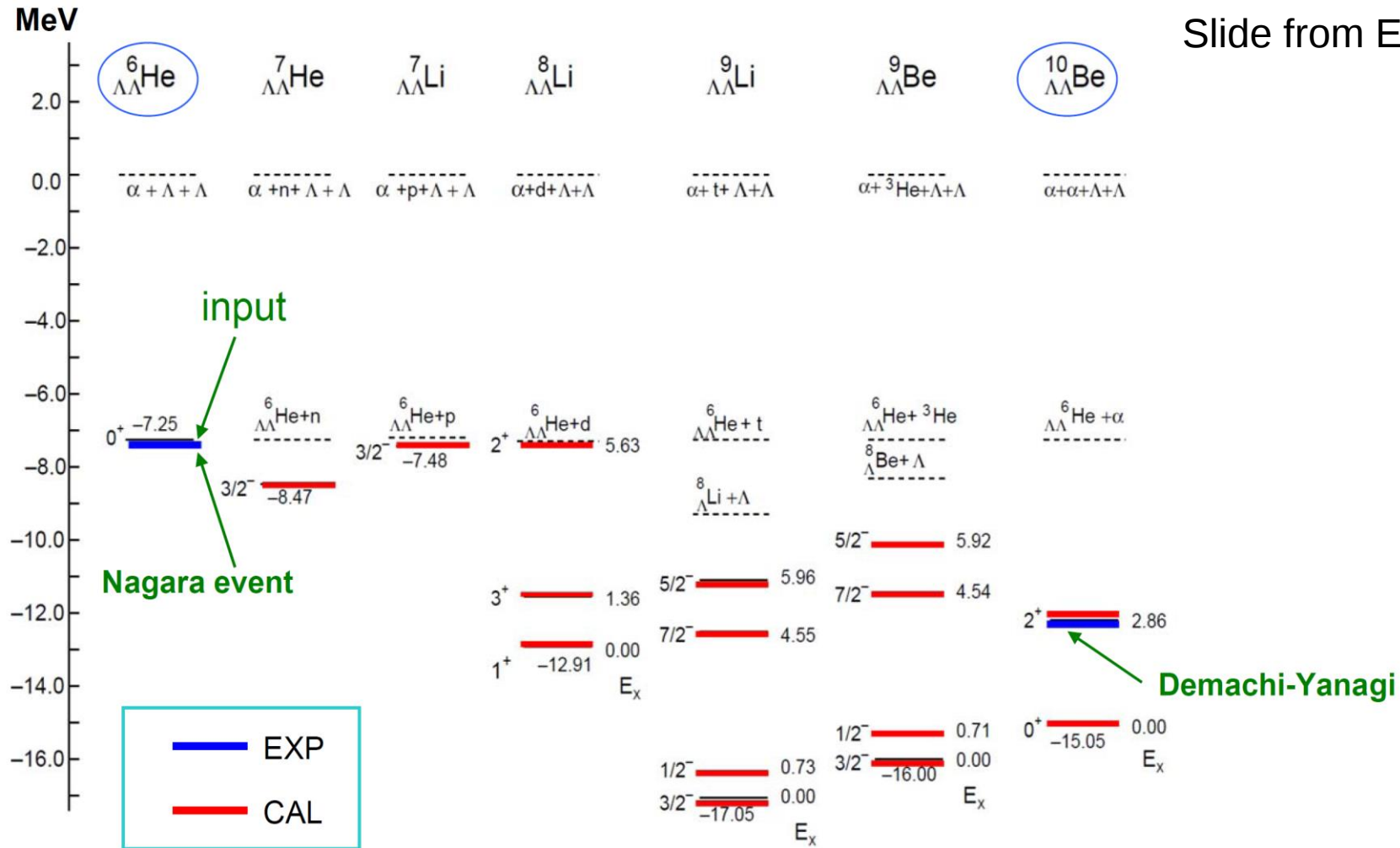
${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$ double-hypernucleus
Unique interpretation!!



Spectroscopy of $\Lambda\Lambda$ -hypernuclei

E. Hiyama, M. Kamimura, T. Motoba,
T. Yamada and Y. Yamamoto
Phys. Rev. 66 (2002) , 024007

Slide from E. Hiyama

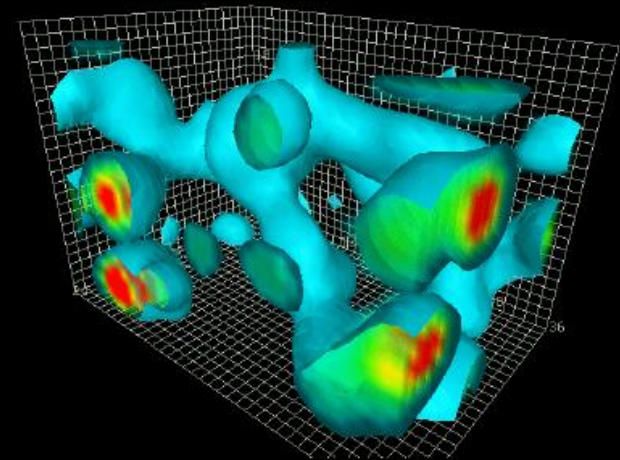
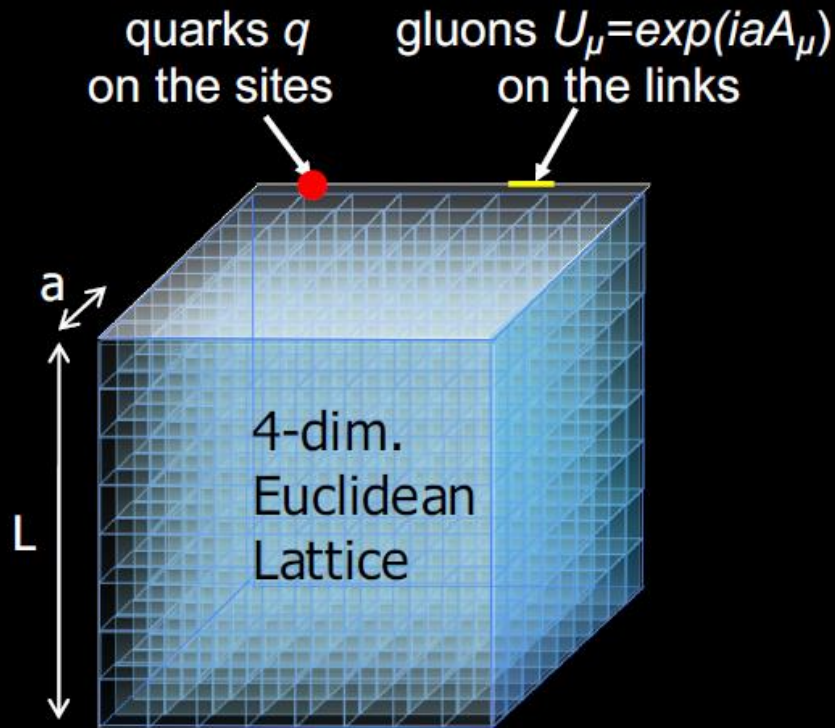


I have been looking forward to having
new data in this mass-number region.

Lattice QCD

Slide from T.Hatsuda

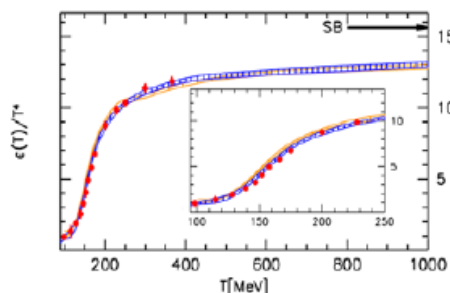
$$Z = \int [dU][dq d\bar{q}] \exp \left[- \int d\tau d^3x \mathcal{L}_E \right]$$



$10^7 - 10^9$ dimensional integral
→ Monte Carlo integration

Quantum Chromo Dynamics

Lattice gauge simulations



sign
problem



Phenomenological
nuclear force

Baryon interactions

Many-body
techniques

Equation of State for Hot Matter

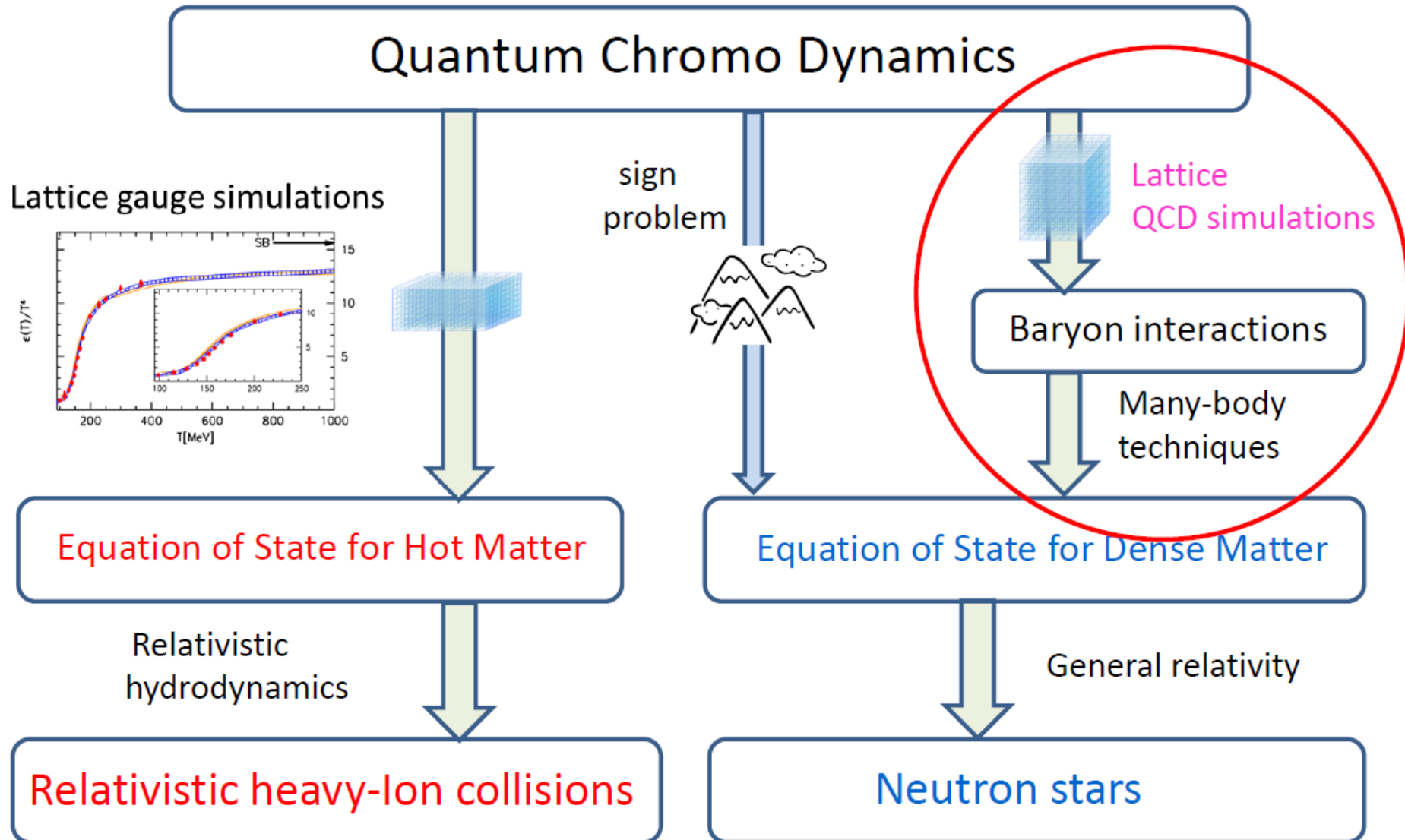
Relativistic
hydrodynamics

Relativistic heavy-ion collisions

Equation of State for Dense Matter

General relativity

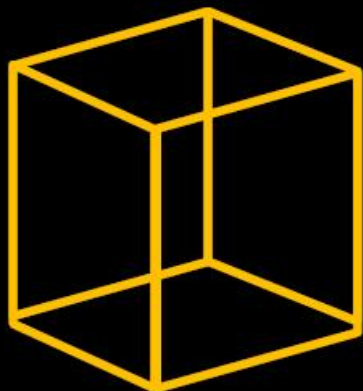
Neutron stars



-2014



T2K Tsukuba (0.1 PFlops)



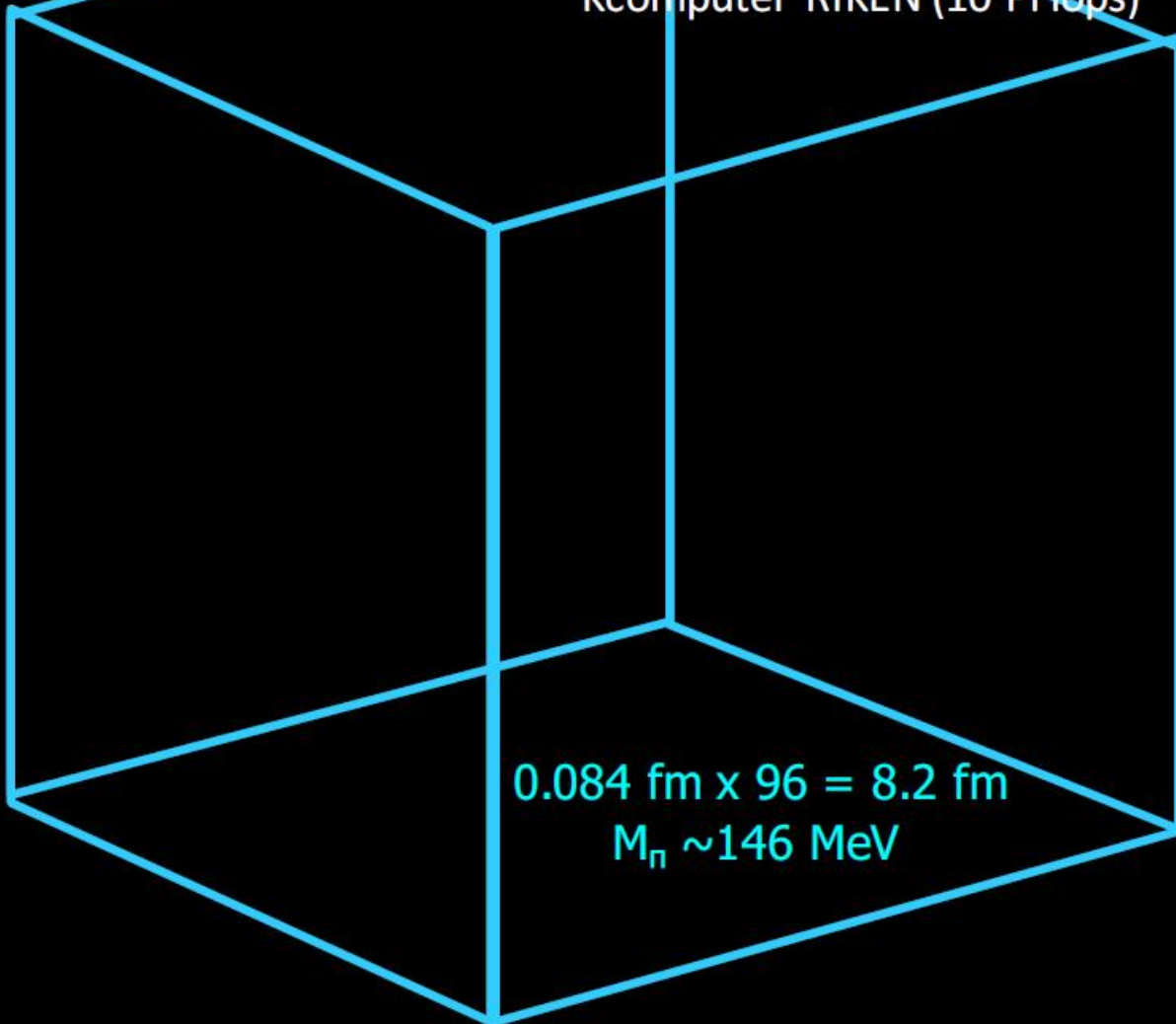
$$0.121 \text{ fm} \times 32 = 3.9 \text{ fm}$$
$$m_{\pi} = 350\text{--}1200 \text{ MeV}$$

2015-

Slide from T.Hatsuda



Kcomputer RIKEN (10 PFlops)



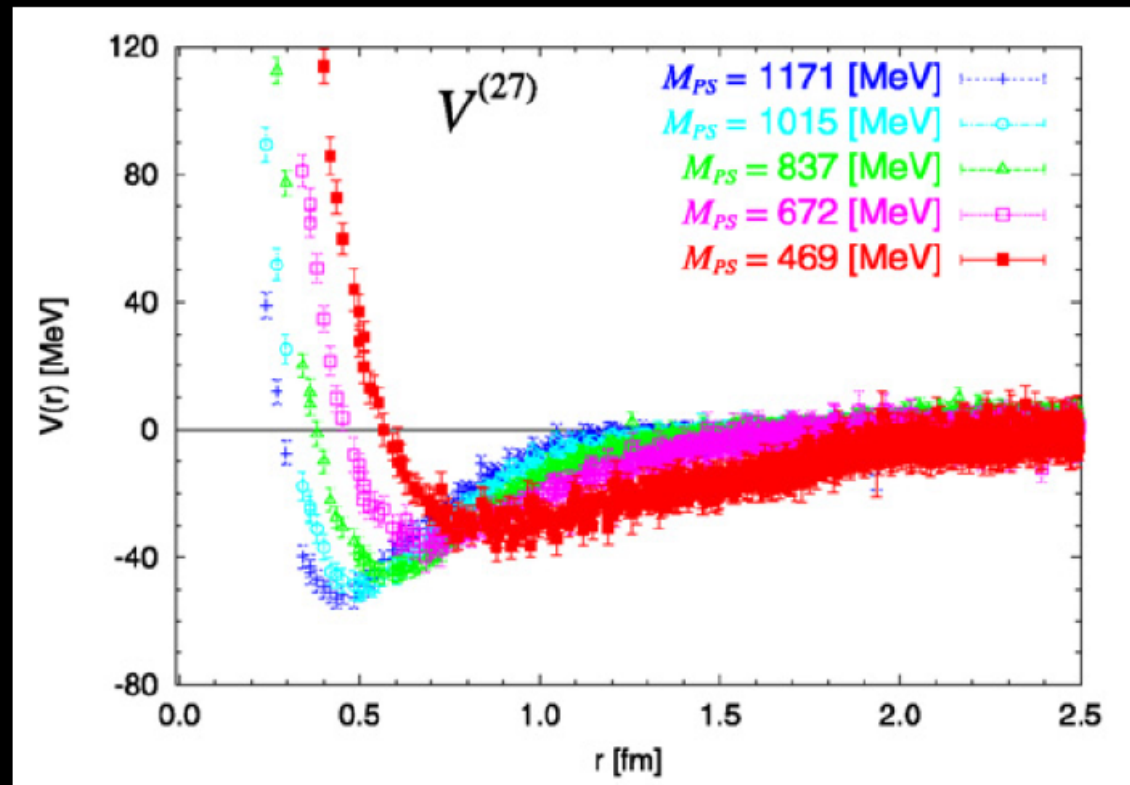
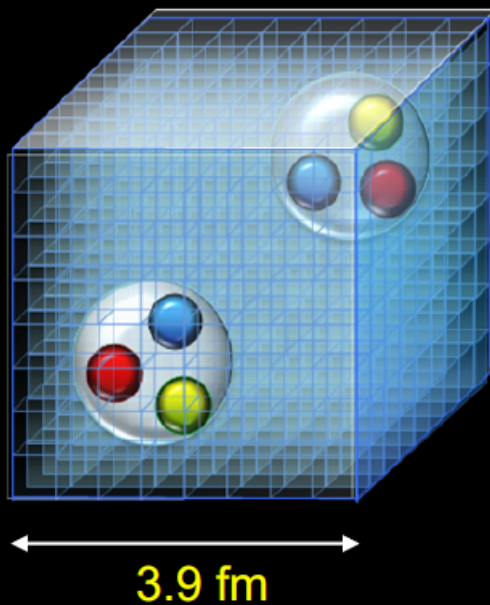
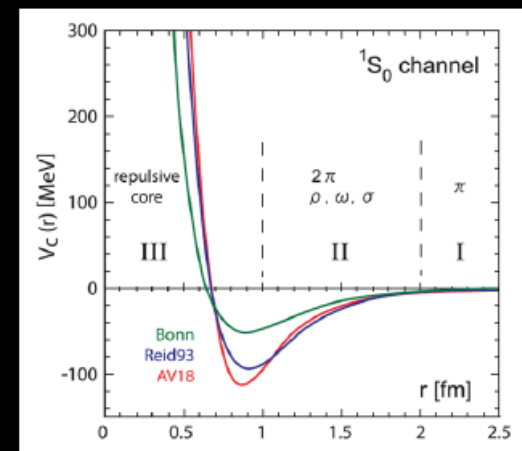
$$0.084 \text{ fm} \times 96 = 8.2 \text{ fm}$$
$$M_{\pi} \sim 146 \text{ MeV}$$

Qualitative studies (2010-2014)

LQCD simulations of BB force

with 3 degenerate flavors ($m_u=m_d=m_s$)

Slide from T.Hatsuda



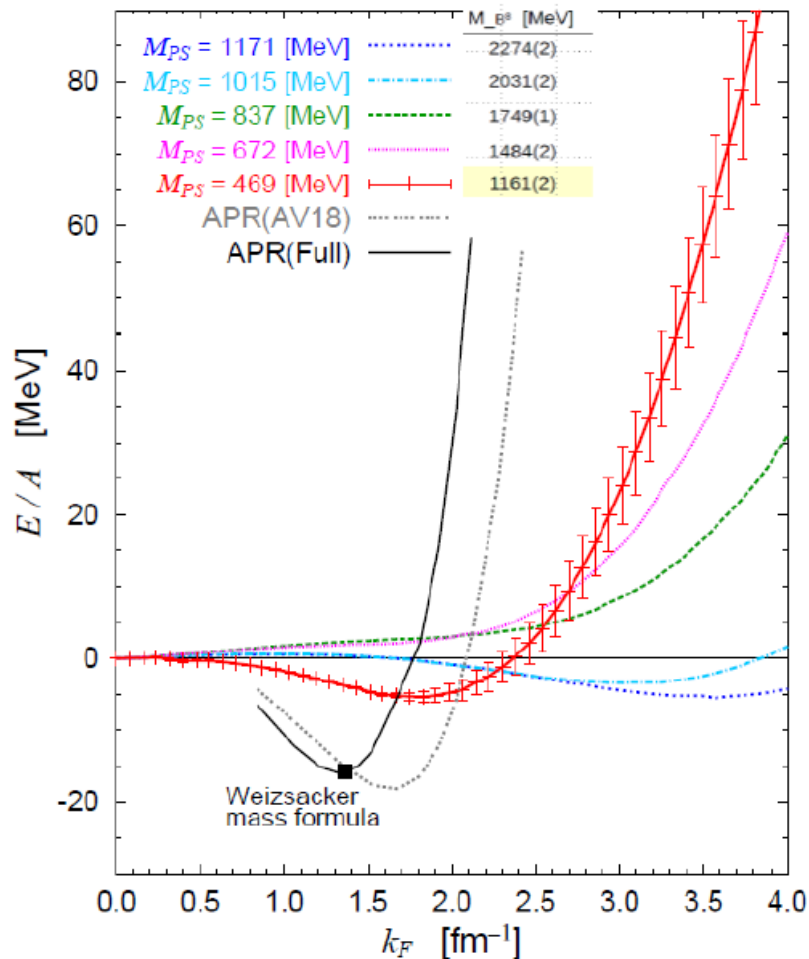
HAL QCD Coll., Phys. Rev. Lett. 106(2011) 162002
Nucl. Phys. A881 (2012) 28

Nuclear EOS from Lattice NN force + BHF calculation (NN force: 1S_0 , 3S_1 , 3D_1 channels only)

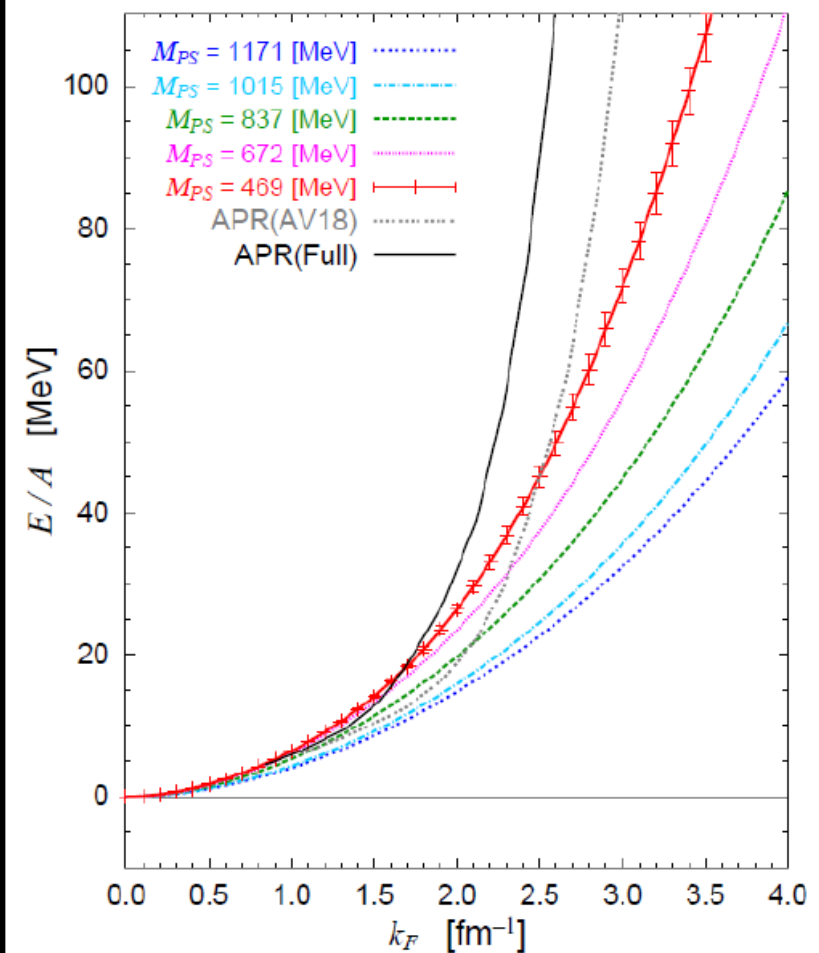
HAL QCD Coll., Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 112503

Slide from T.Hatsuda

Nuclear Matter

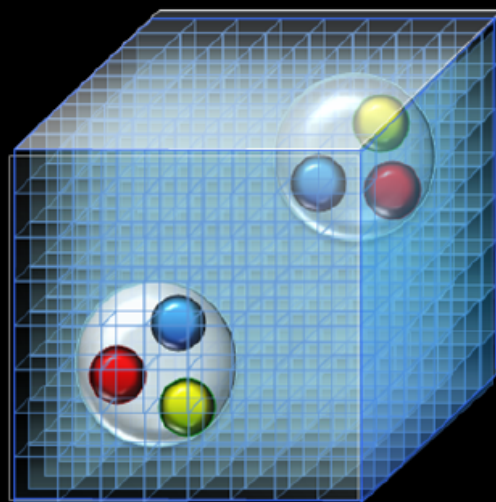


Neutron Matter



Quantitative studies (2015-)
LQCD simulations of BB force
at physical point ($m_u=m_d \neq m_s$)

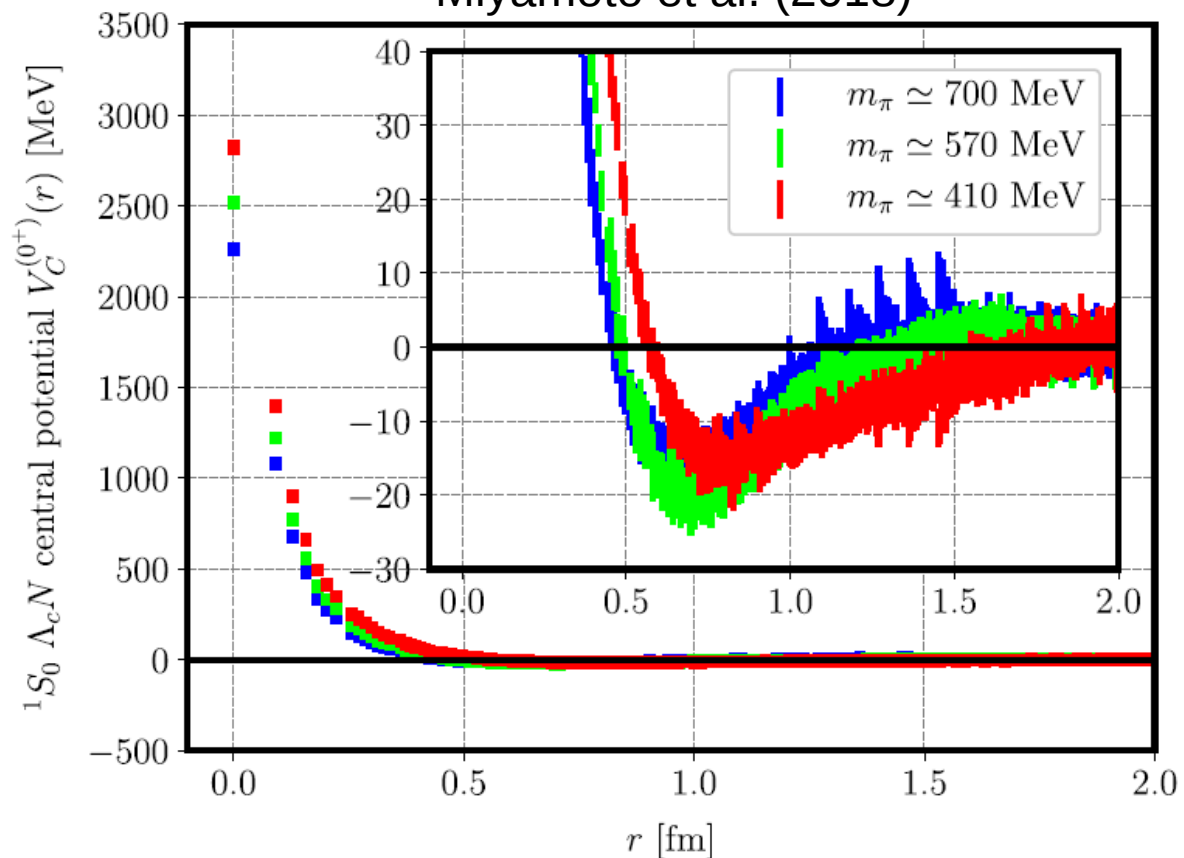
Slide from T.Hatsuda



8.2 fm

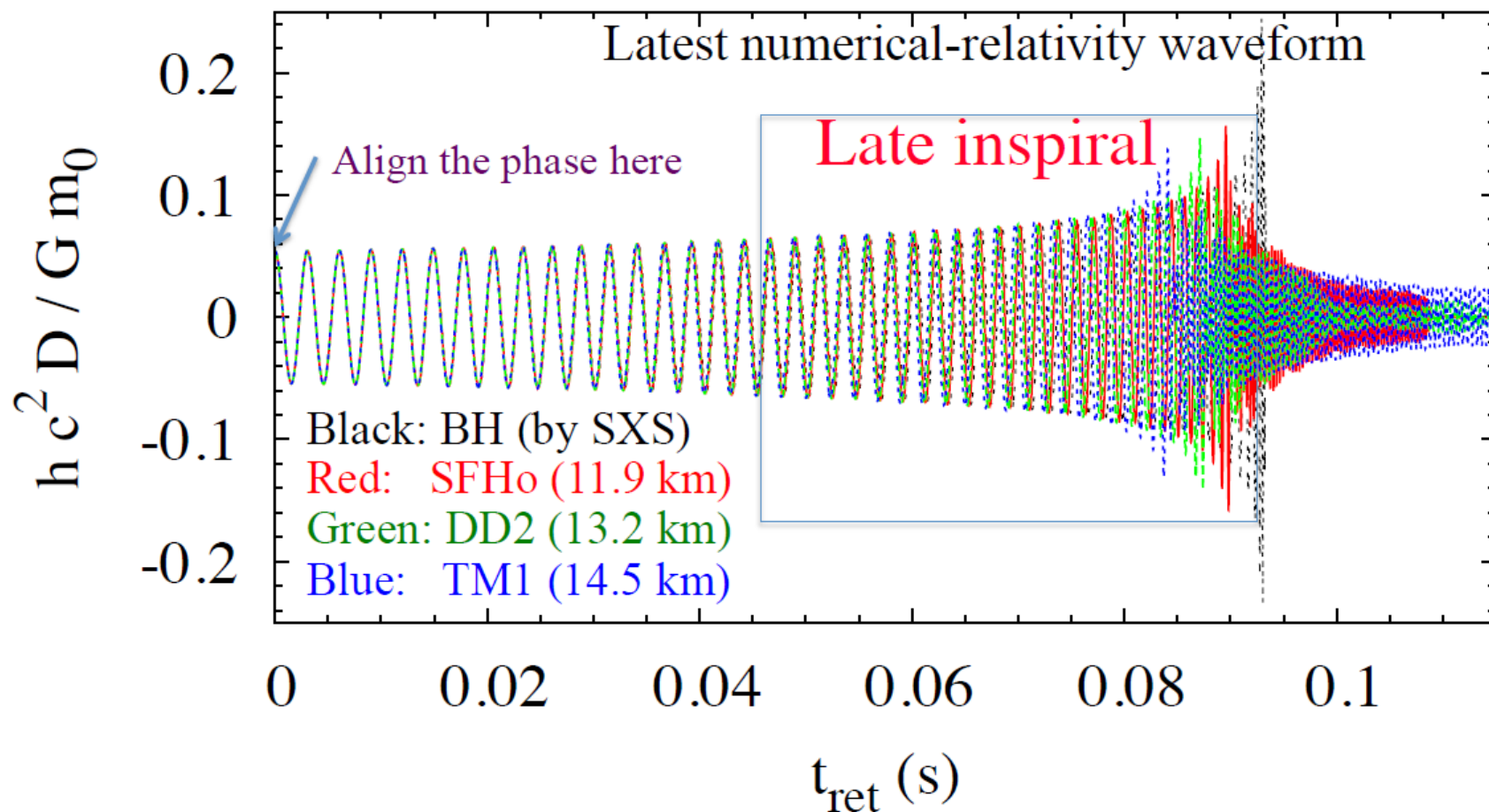
$M_\pi \sim 146 \text{ MeV}$

Miyamoto et al. (2018)



§ Future Prospects of Gravitational Wave Astronomy

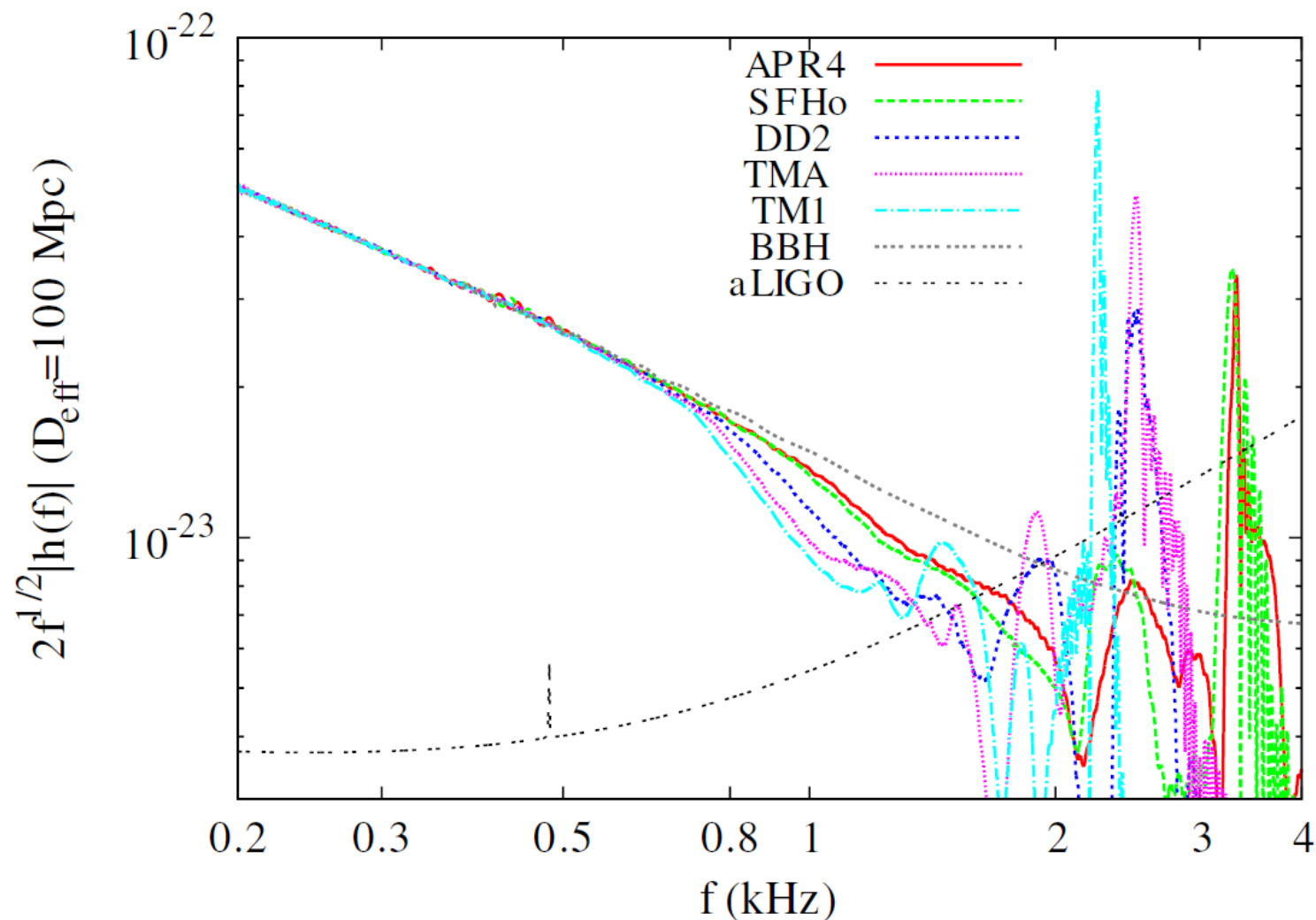
Gravitational waveform from NS-NS: (1.35-1.35 solar mass)



Hotokezaka et al. 2016 (Bernuzzi et al., Kiuchi et al. 2017,...)

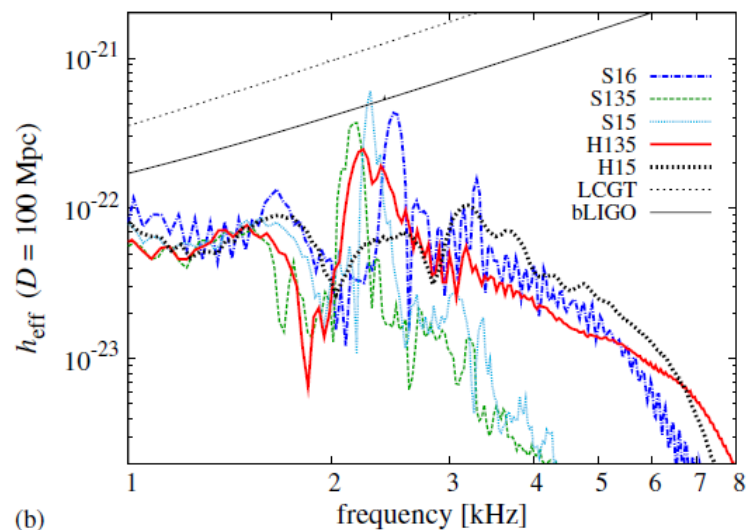
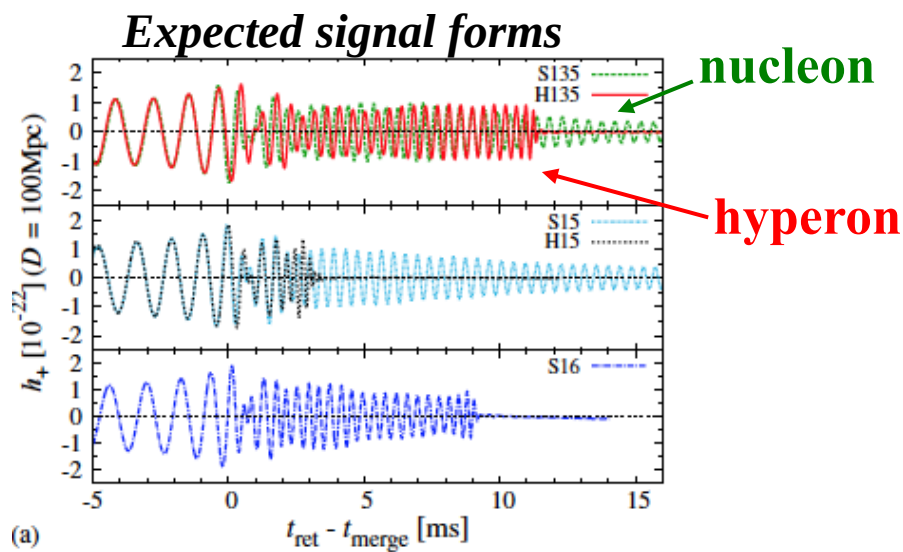
合体後の高周波重力波のEOS依存性

Hotokezaka, Kyutoku, Sekiguchi, Shibata PRD (2016).



重力波のハイペロンあり/なしに対する依存性

Y. Sekiguchi et al., PRL 107 (2011) 211101

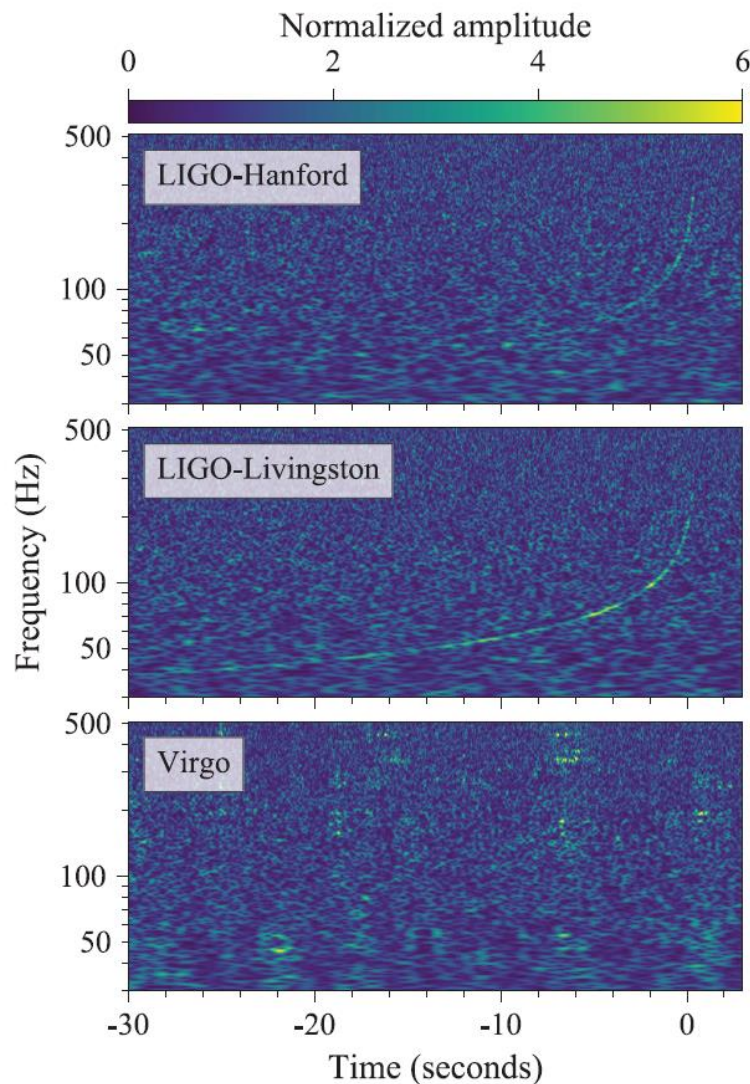


S: Original Shen EOS (ハイペロンなし)
H: Λ ハイペロン入り Shen EOS

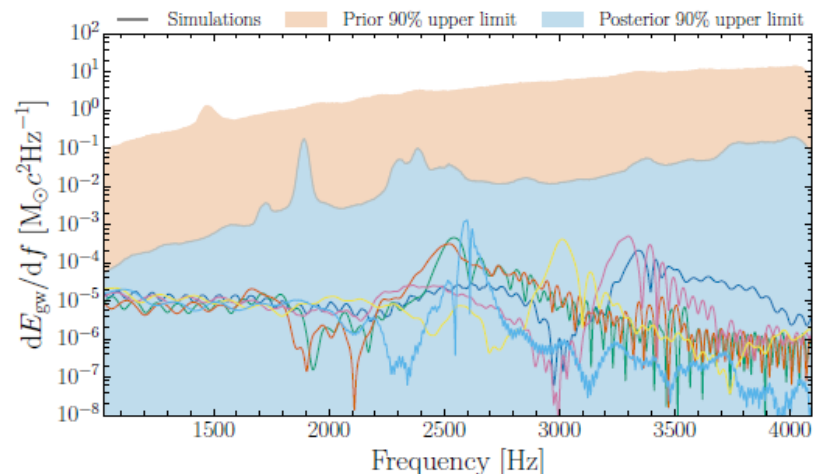
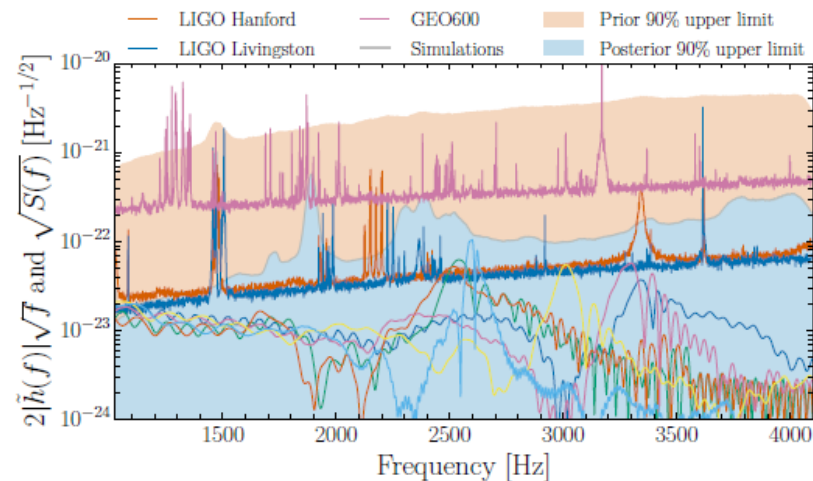
kHz以上の高周波で顕著な違いが期待される。

GW170817では高周波重力波見つかっていない

LIGO & Virgo Collaboration PRL (2017)



LIGO & Virgo Collaboration
arXiv:1805.11579



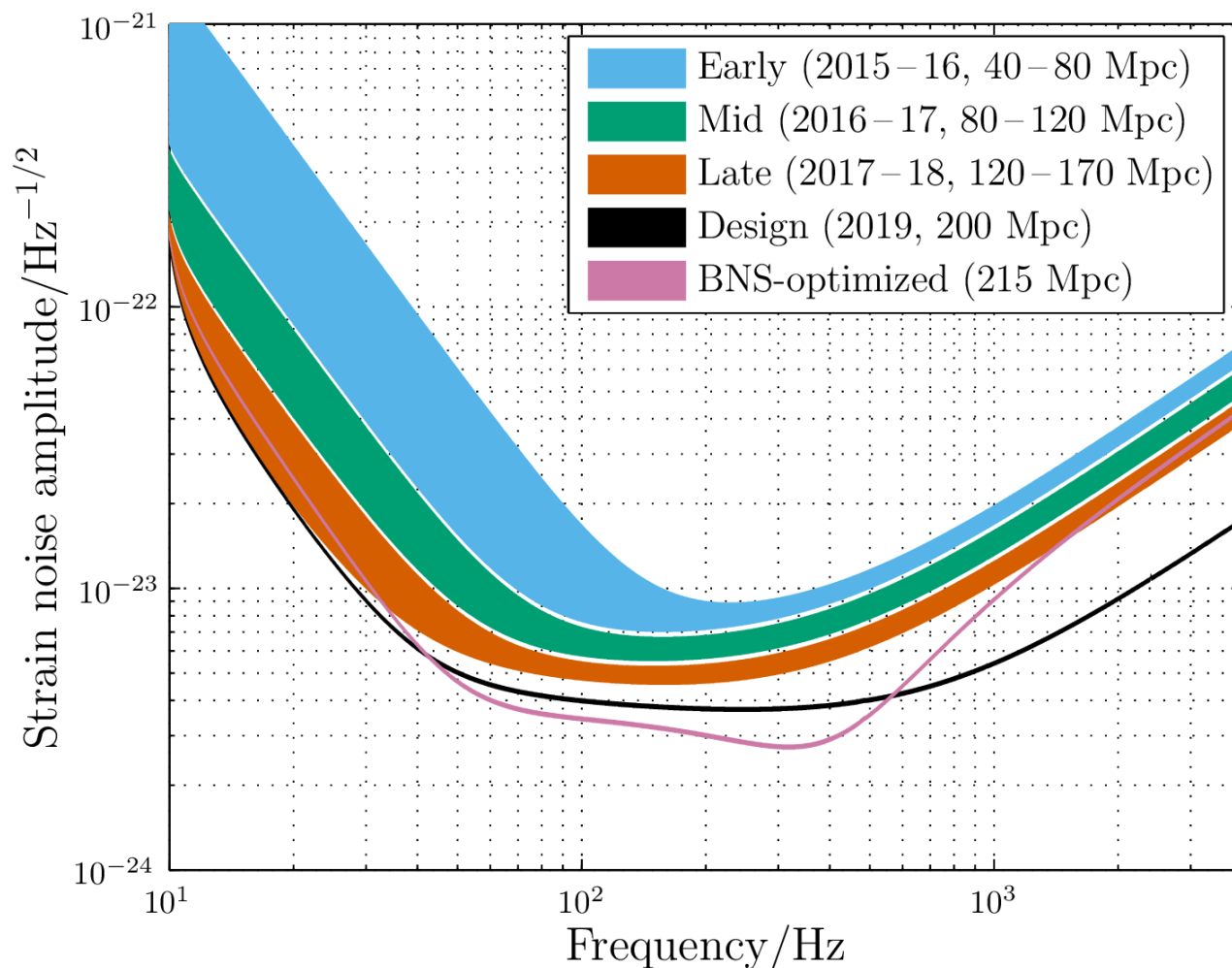
“This result is consistent with both prompt collapse to a BH and With a post-merger signal which is too weak to be measurable with our current sensitivity”

Planning for a bright tomorrow

From HP of LIGO Scientific Collaboration

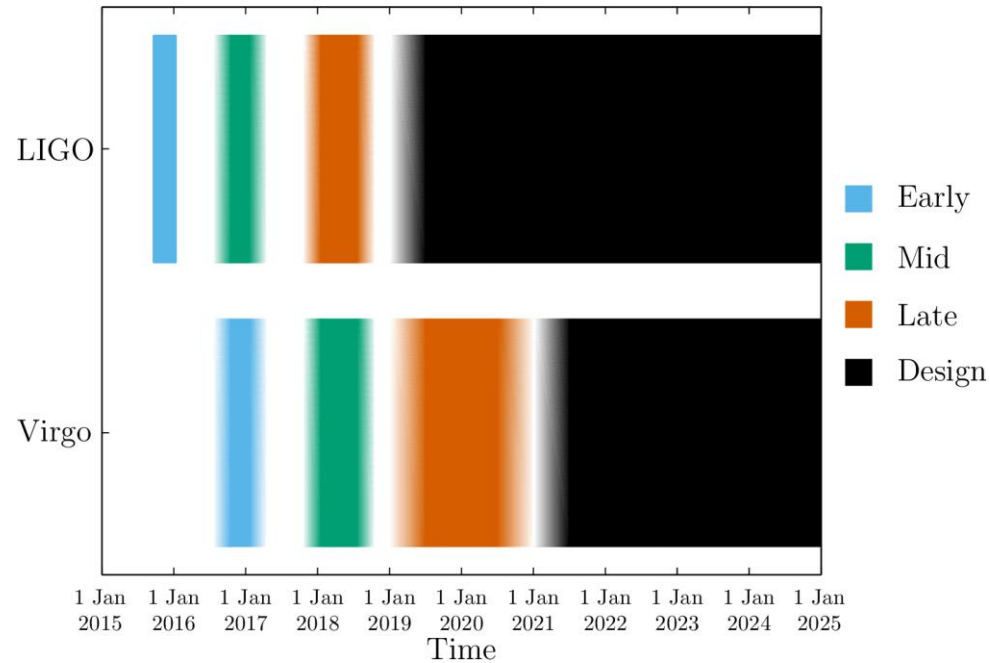
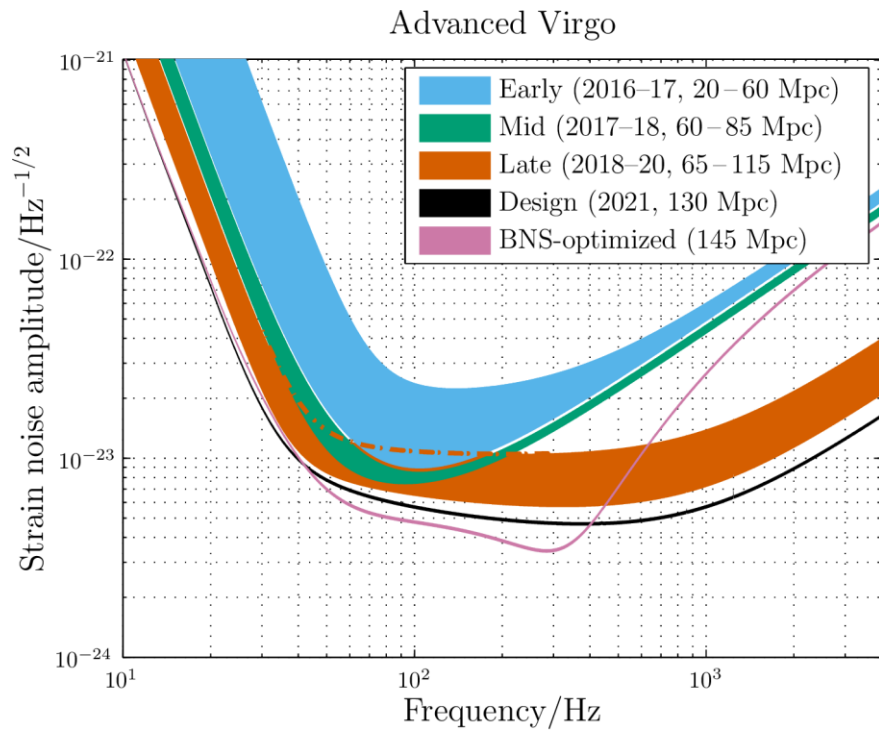
<https://www.ligo.org/science/Publication-ObservingScenario/index.php>

Advanced LIGO



高周波側で
約Factor 2
の改善か。

Time-Line of LIGO-VIRGO



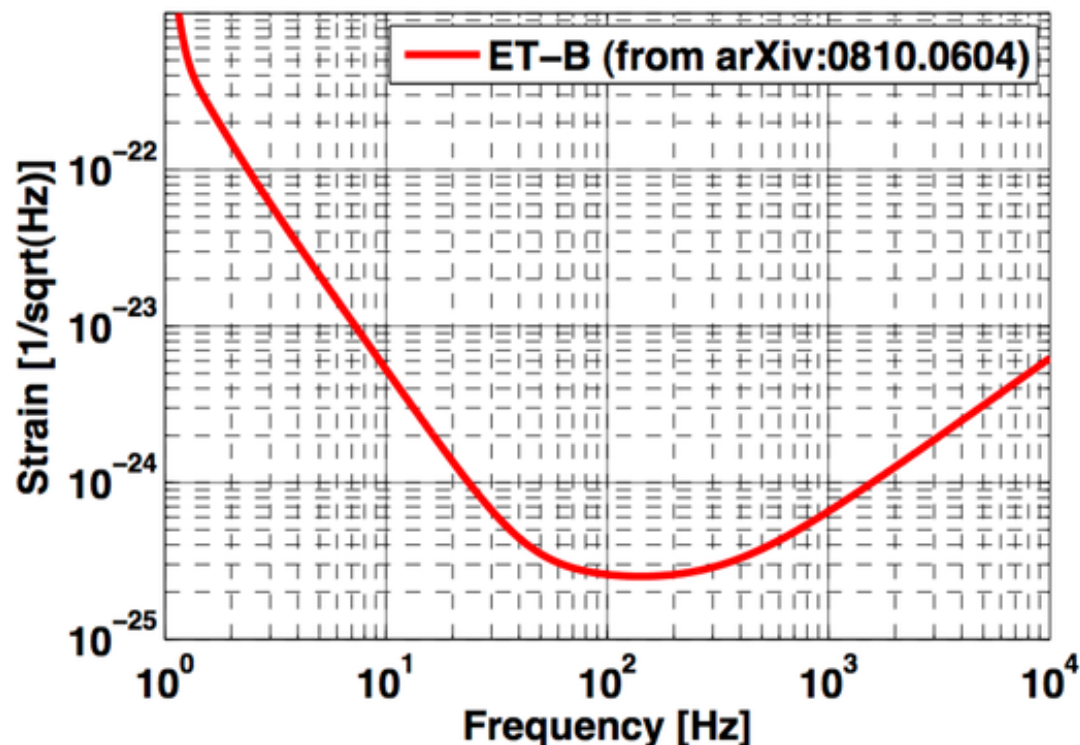
From LIGO HP

O3 will start early in 2019.

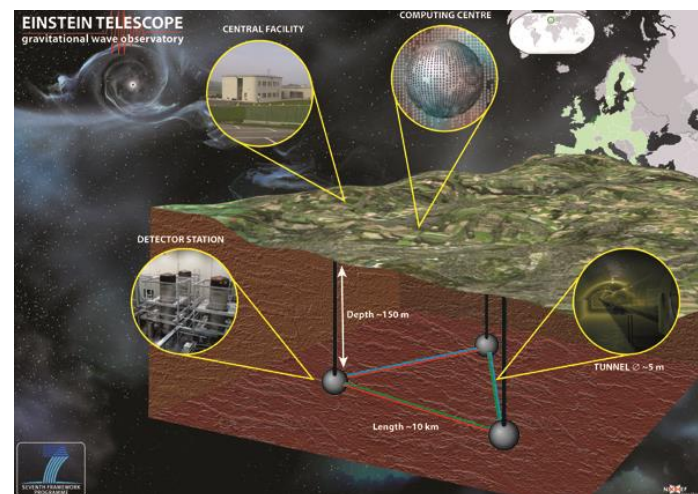
KAGRA may join O3 from late in 2019 (private communication).

次世代重力波望遠鏡：Einstein Telescope (ET) (計画中)

<http://www.et-gw.eu/index.php>



LIGO/VIRGO/KAGRAに比べて感度1桁程度向上
＝サーベイボリュームは1000倍。



第9回ET国際会議(2018)

連星中性子星合体シミュレーション



高見健太郎氏
(神戸高専/理研数理
創造プログラム)



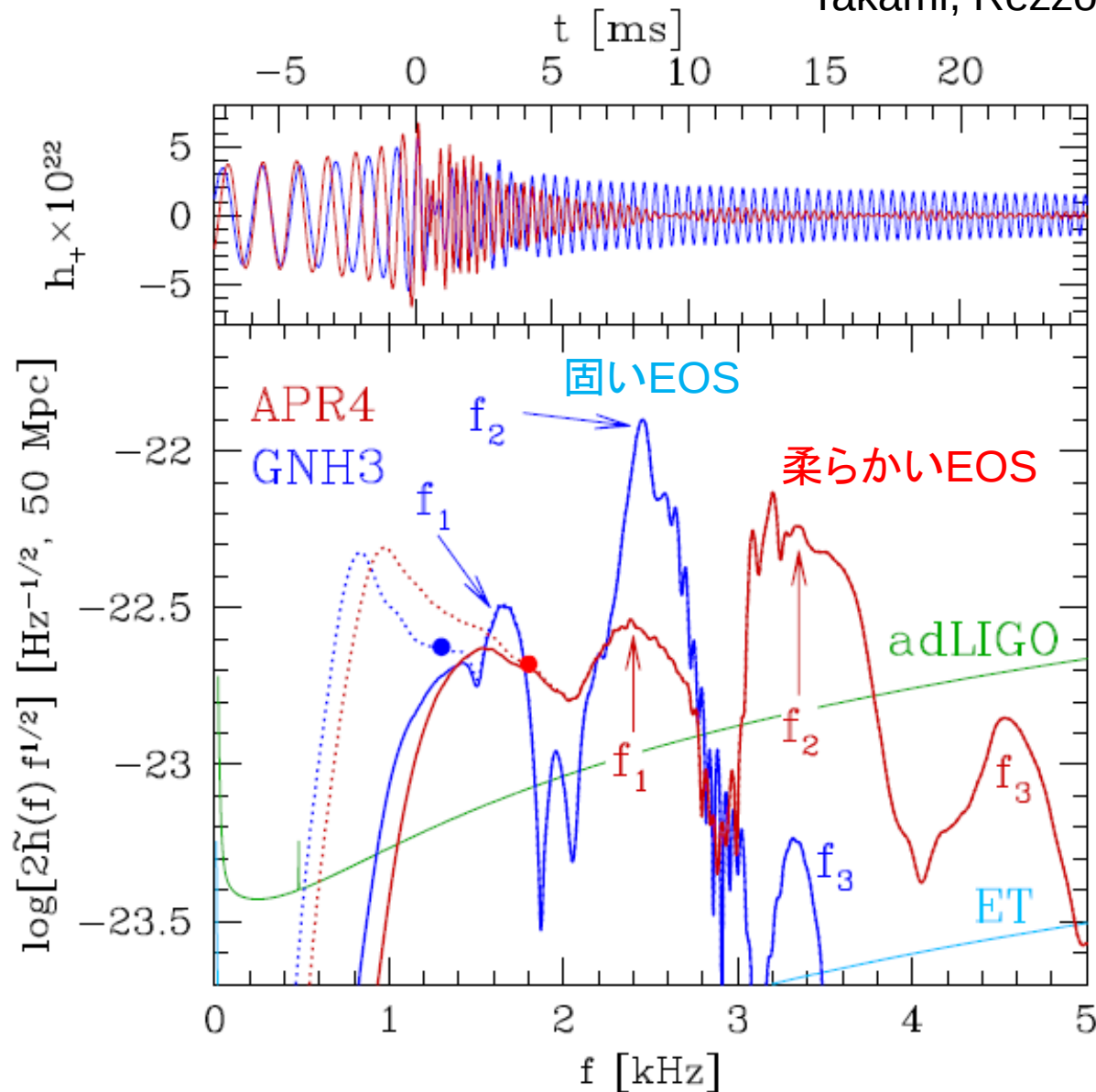
Luca Baiotti
(大阪大学)



Takami, Rezzolla, Baiotti PRD (2015)が
LIGOの連星中性子星合体重力波論文で
テンプレートとして採用されている
(arXiv:1805.11579)。

衝突後の高周波重力波

Takami, Rezzolla, Baiotti PRL (2014)

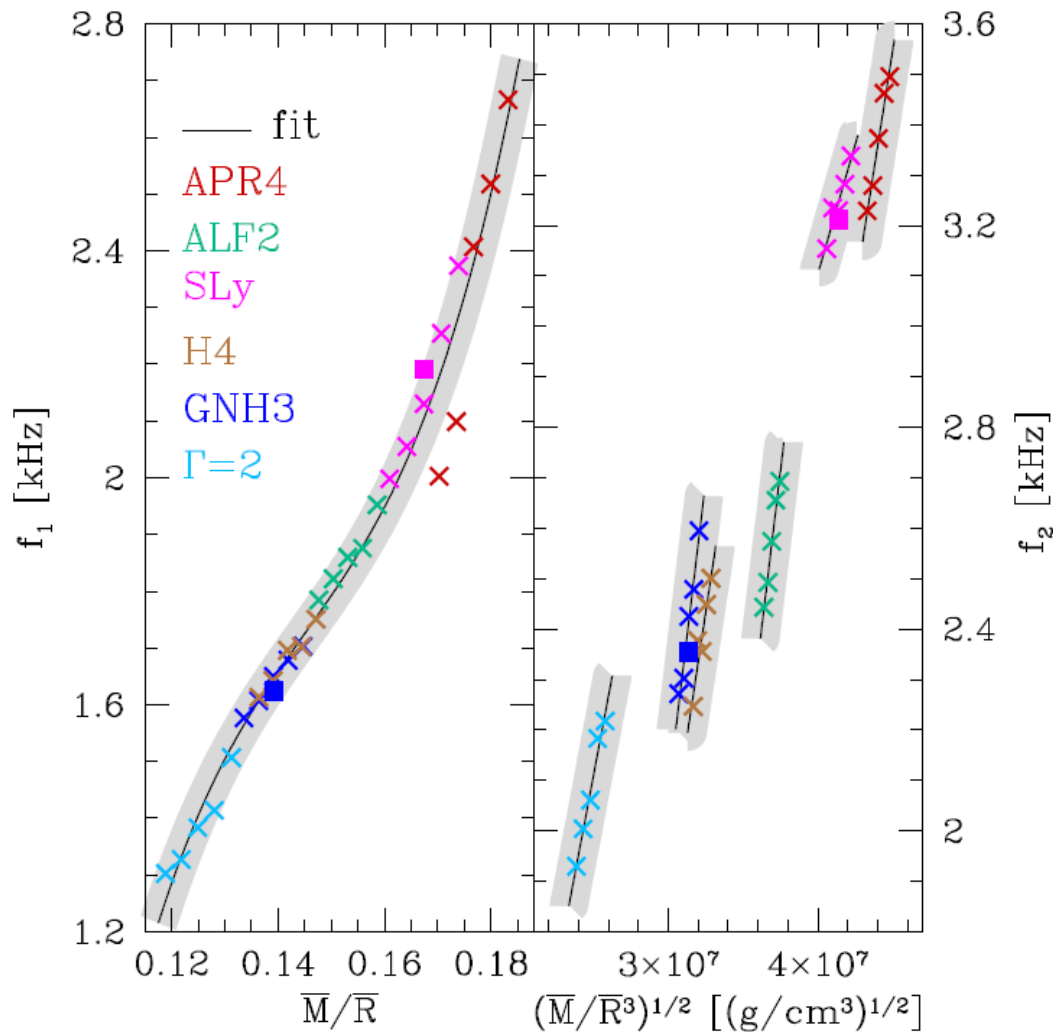


距離 $D=50\text{Mpc}$
(1pcは約3光年)。

Face-on-View
($\Theta=0$)。

衝突後のピーク周波数のM,R依存性

Takami, Rezzolla, Baiotti PRL (2014)

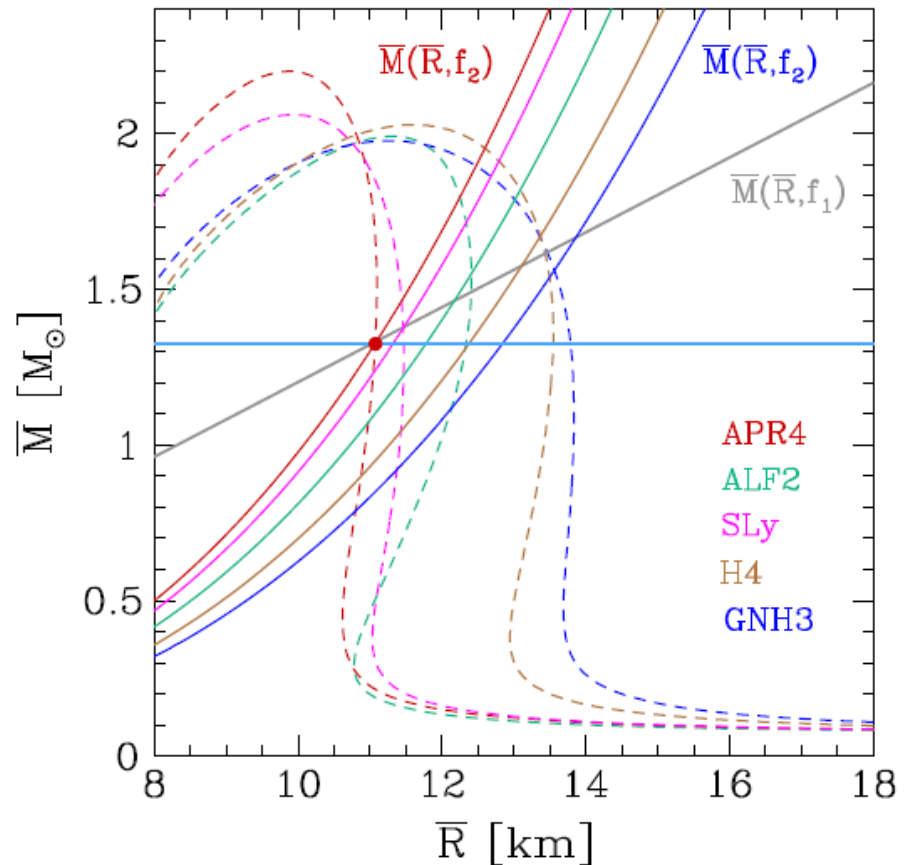
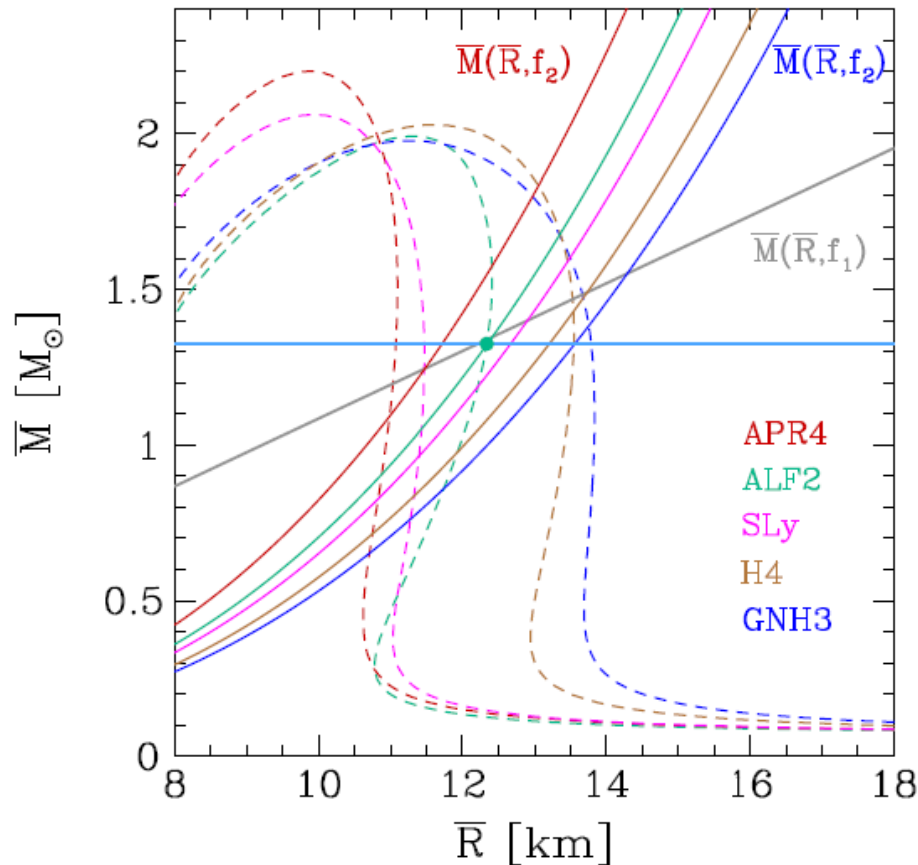


$$\bar{M} \equiv (M_1 + M_2)/2$$

$$\bar{R} \equiv (R_1 + R_2)/2$$

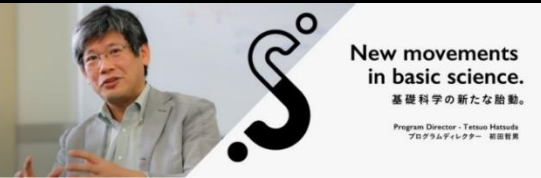
逆解きでEOSを決定する！

Takami, Rezzolla, Baiotti PRL (2014, 2015), Rezzolla & Takami (2016).



f_1, f_2 が観測から求まる→(各EOS毎に) M, R が求まる→クロスチェックとして別の重力波解析から求まる(M, R)と比較し、EOSを決定する。→更に別のクロスチェックとして、各EOS毎に中性子星の構造を解き(TOV方程式)、求まった M, R との比較をする。

連星中性子星合体シミュレーション



現在初田氏 (iTHEMS) 等が開発した
中性子星物質を表すクォーク・原子核
理論計算を用いて重力波形を計算する！
観測と整合するか？



高見健太郎氏
(神戸高专/理研数理
創造プログラム)



Yongjia
Huang氏
(紫金山天文台
中国)が今秋、
iTHEMSに合流！



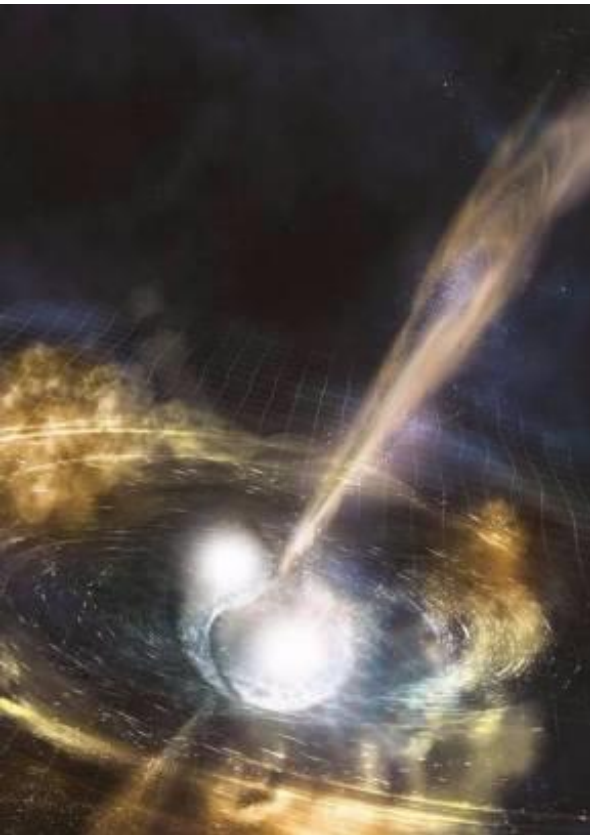
Luca Baiotti
(大阪大学)



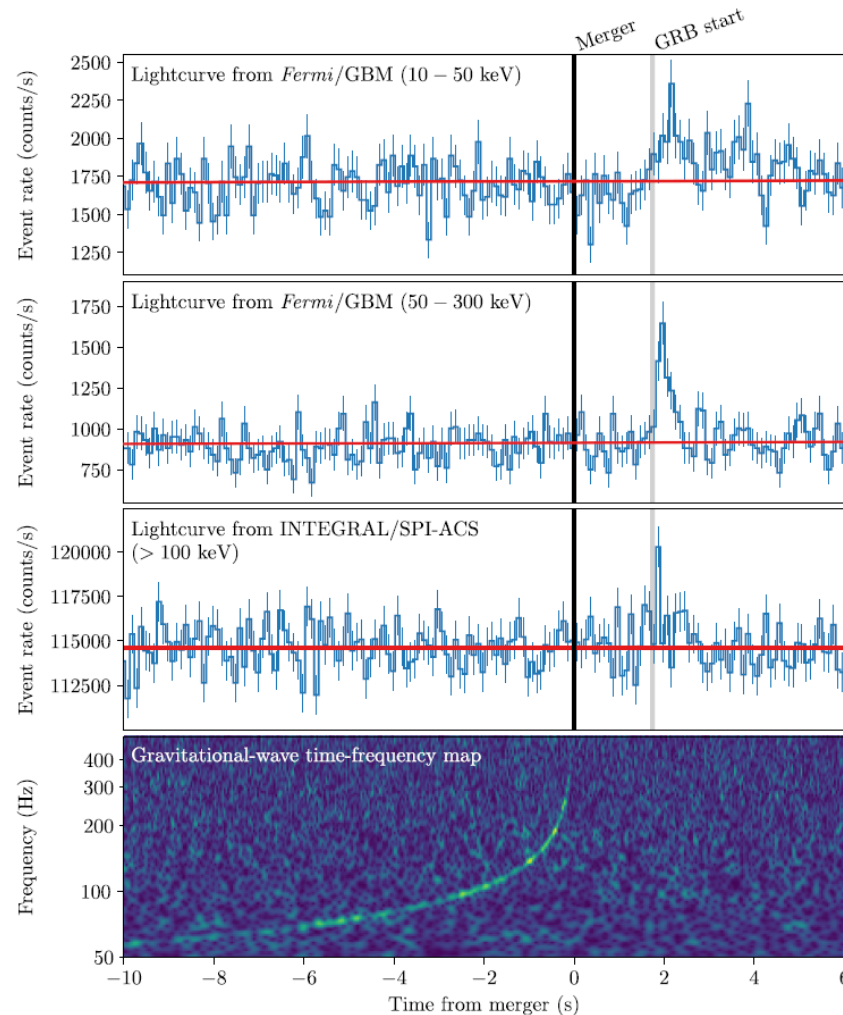
S.N. (ABBL/iTHEMS, RIKEN)

Takami, Rezzolla, Baiotti PRD (2015)が
LIGOの連星中性子星合体重力波論文で
テンプレートとして採用されている
(arXiv:1805.11579)。

連星中性子星合体でガンマ線バーストが発生した可能性が極めて高い。



連星中性子星合体からの
ガンマ線バースト想像図



フェルミ衛星
(低エネルギー)

フェルミ衛星
(高エネルギー)

インテグラル衛星

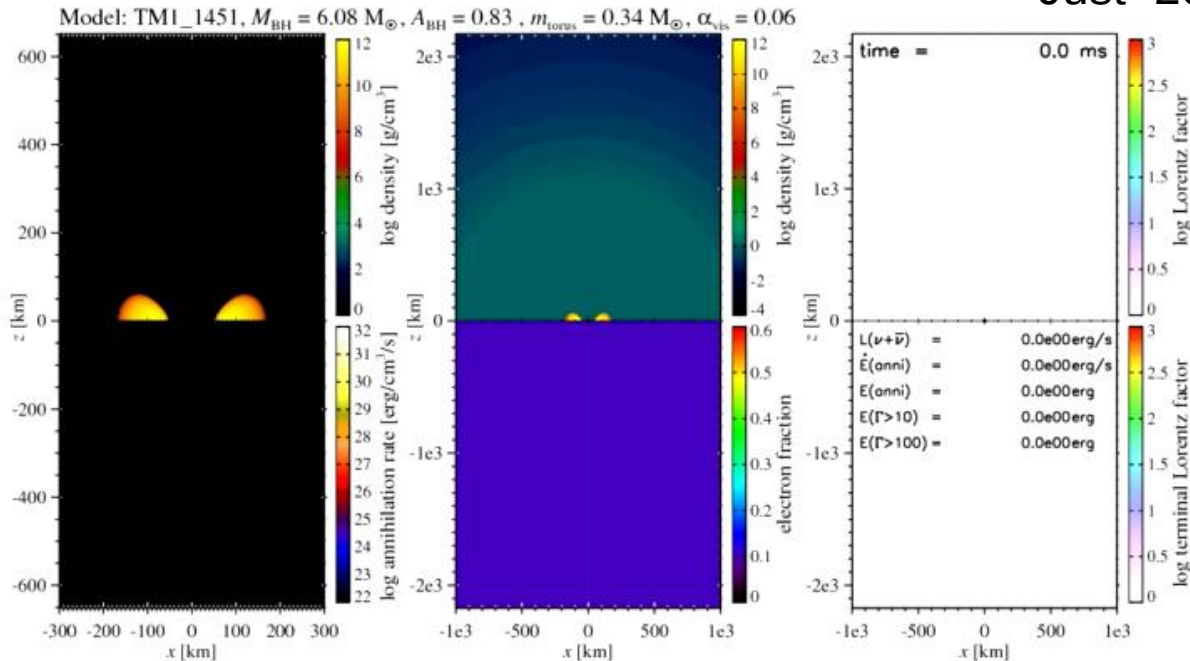
LIGOが検出した
重力波信号

時間(秒)

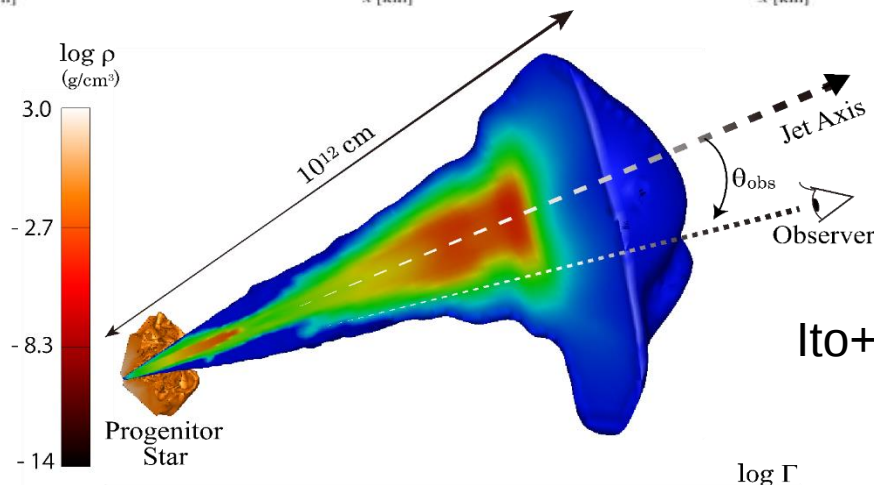
中性子星が合体した1.7秒後にガンマ線バーストが検出された！

ショートガンマ線バーストの形成理論

Just+2016



オリバー・ユスト研究員
(長瀧研)

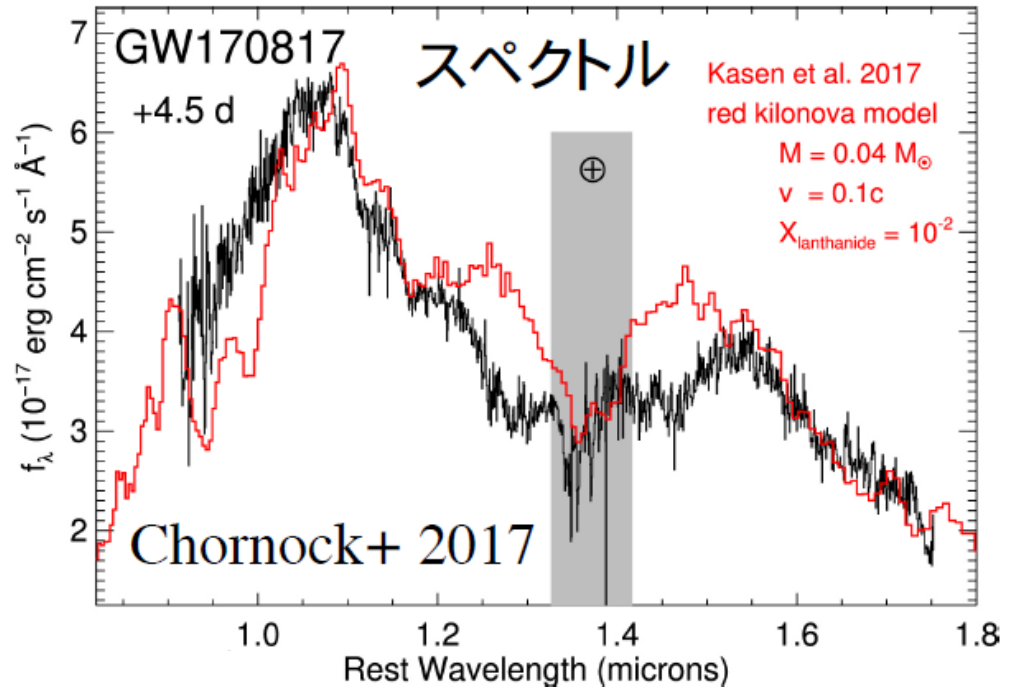
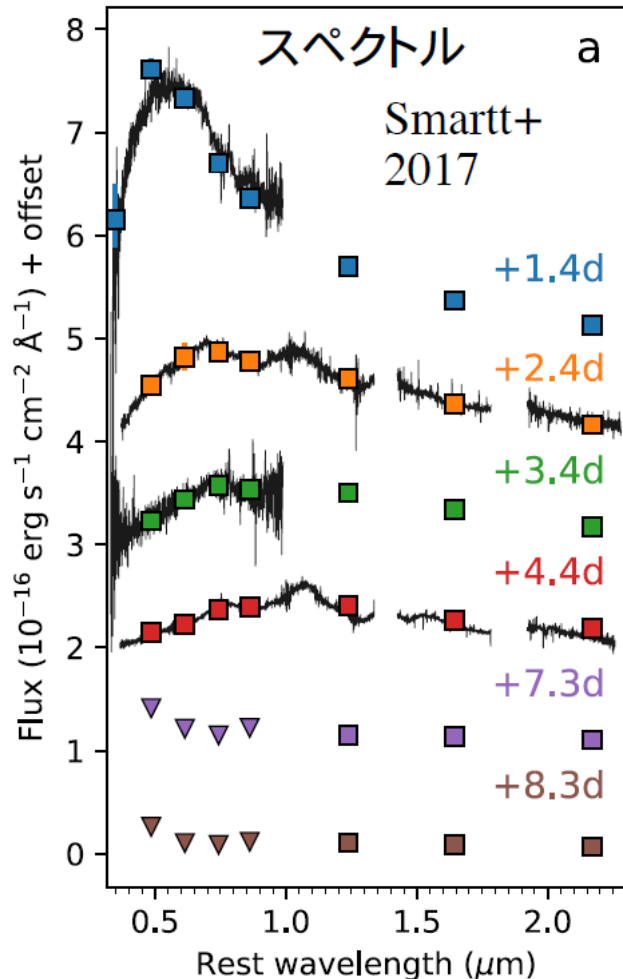


Ito+2017



伊藤裕貴 研究員
(長瀧研)

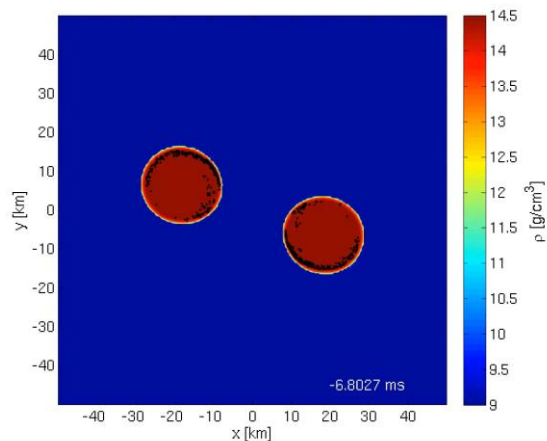
連星中性子星合体で(少なくとも)ランタノイド が生成された可能性が高い。。



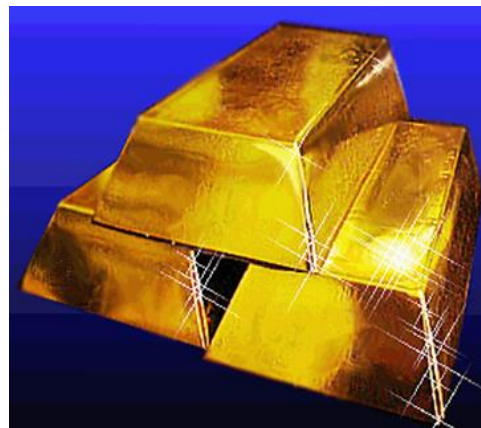
赤: 理論計算 (Kasen+17)
黒: 観測されたスペクトル

Tanaka+17、他。

連星中性子星合体に於ける R-Process元素合成の理論的研究



Simulations of NSM by
A. Bauswein (2015).



Gold Proton # = 79,
Atomic # = 197

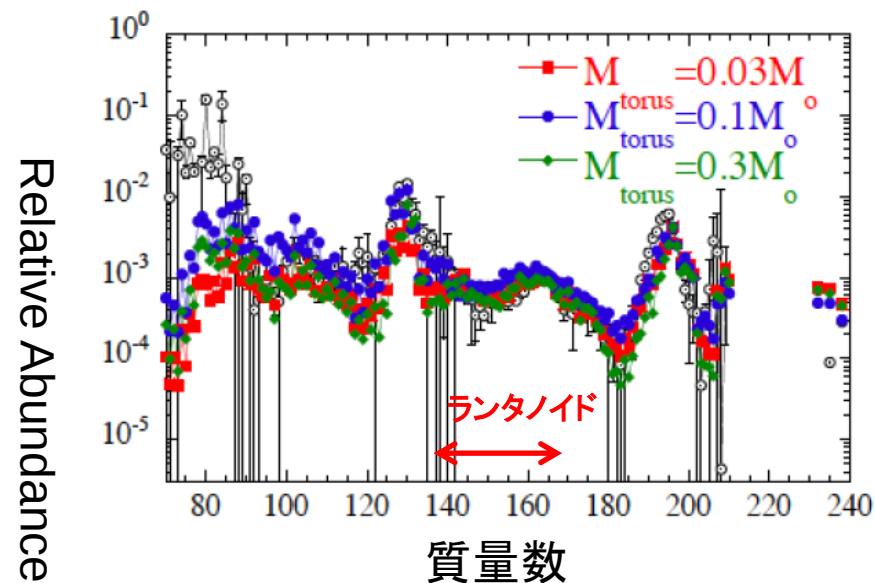
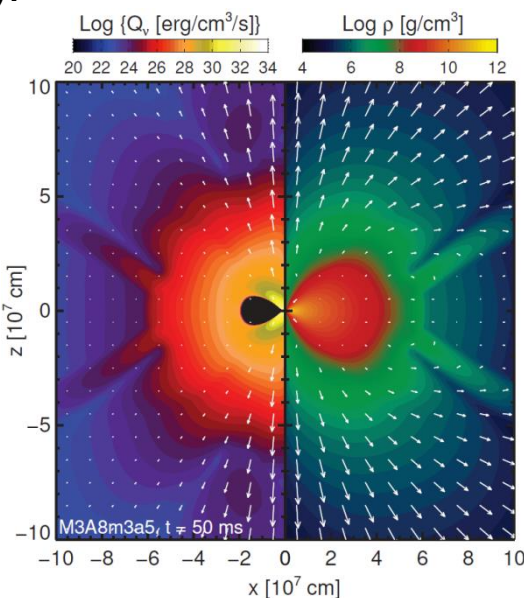


Uran
Proton # = 92, Atomic # = 238

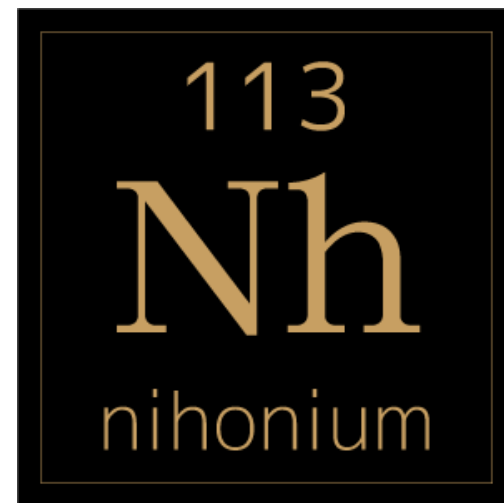
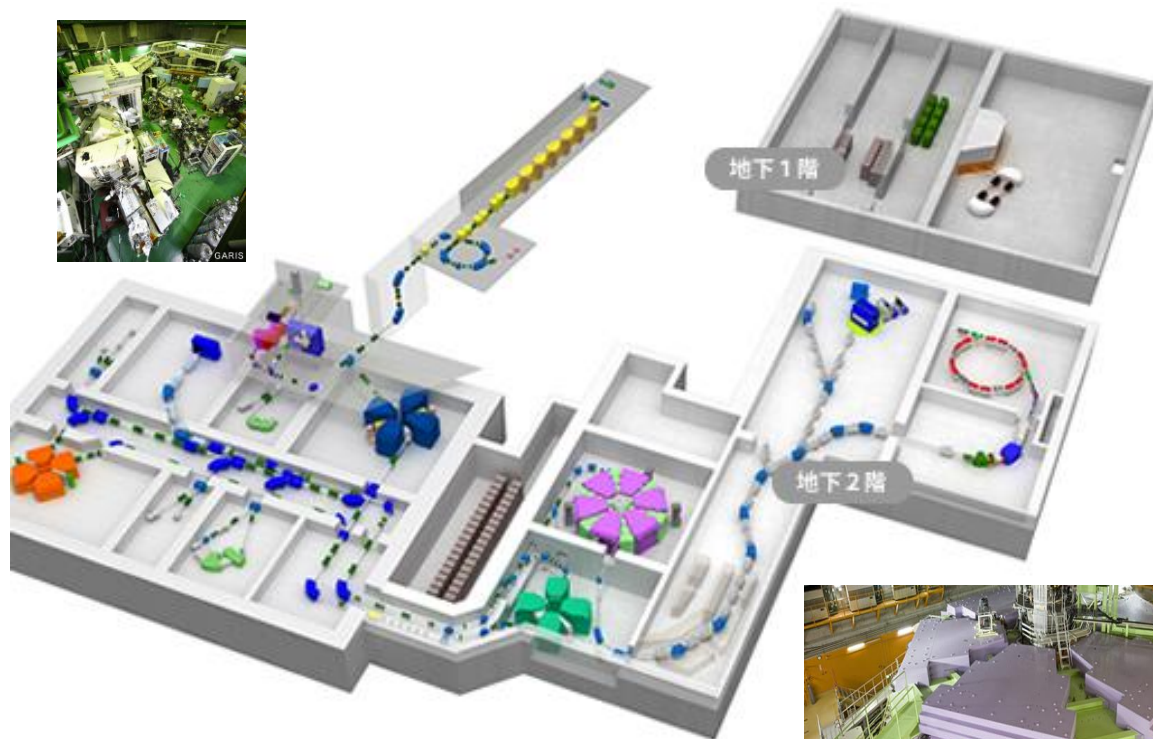


Oliver Just
(長瀧研)

Just et al. (2015).



理研原子核グループと共に元素の起源を解明する！



K. Morita



新元素：陽子数=113、陽子＋中性子数=278が理研和光で発見された！



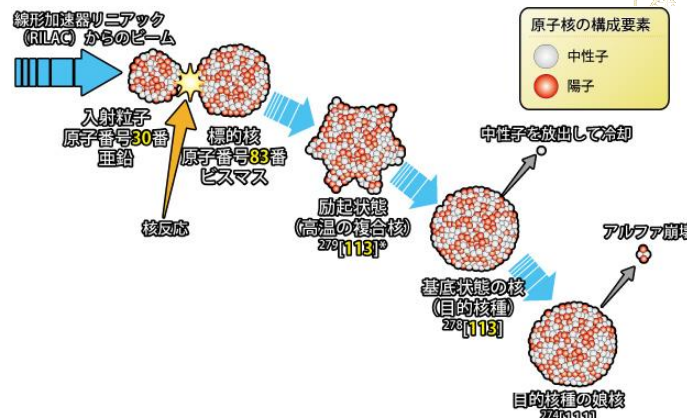
Y. Nishina



H. Yukawa



S. Tomonaga



「いけば、絶対に来る」

仁科加速器センター
超重力核融合研究チーム チームリーダー

理研
仁科センター
ホームページ
より。

謝辞

- 世話人のみなさま、いい機会をありがとうございました。
- この一週間(土日含め)家族の協力に感謝。



2018年7月 つくば山

まとめ

- 重力波によって質量、半径のみならず(半径は従来のX線バーストの解析と良く整合することが確認された！)、中性子星内部の状態方程式にも情報が得られてきた。
- LIGO/VIRGOの再観測は2019年初めから。
- 再観測では高周波側の感度が上がっている可能性がある。更に状態方程式に制限がつく可能性。
- 上記中性子星内部解を満たす状態方程式にも縮退はあるだろう(e.g. APRはハイペロンなし、クォークなし)。
- ハイペロン研究の進展(YN, YY相互作用の理解。三体力も)が必須。J-PARC, 少数多体計算。
- LQCDが進展すればYN, YY相互作用も第一原理計算出来る時代が来るだろう。
- ハドロン相ークォーク相への転移の理解が必要。

少なくとも今後10年は中性子星を中心とした原子核宇宙の研究が大きく進むだろう。