

中性子星物質の理論

Theory of Neutron Star Matter

京大基研 大西 明
Akira Ohnishi (YITP, Kyoto Univ.)

- 中性子星の基本的性質と中性子星核物質の状態方程式
- 対称エネルギーと非対称核物質の状態方程式
- ハイパー核物理と高密度核物質の状態方程式

新学術領域「中性子星核物質」
第5回ウインタースクール・研究会
「中性子星の核物質」
2017年2月16-18日
福島飯坂温泉 福すむ宿 福住旅館



高密度核物質と中性子星物質状態方程式

■ アブストラクト

中性子星は密度、構成要素ともにバラエティに富む多体問題の宝庫である。近年の実験・観測の進展により、実験データから示唆される相互作用の性質と観測データをつき合わせて中性子星核物質状態方程式を定量的に議論できる時代を迎えつつある。一方、核子以外のハドロンを含む従来の状態方程式では支えられない重い中性子星が最近見つかかり、大きなパズルとなっている。

本講義では中性子星の基本的性質について理解し、中性子星物質などの高密度核物質の状態方程式を記述する理論の枠組みについて学び、また近年の中性子星をめぐる物理の進展を概観することを目的とする。

中性子星の基本的性質と 中性子星核物質の状態方程式

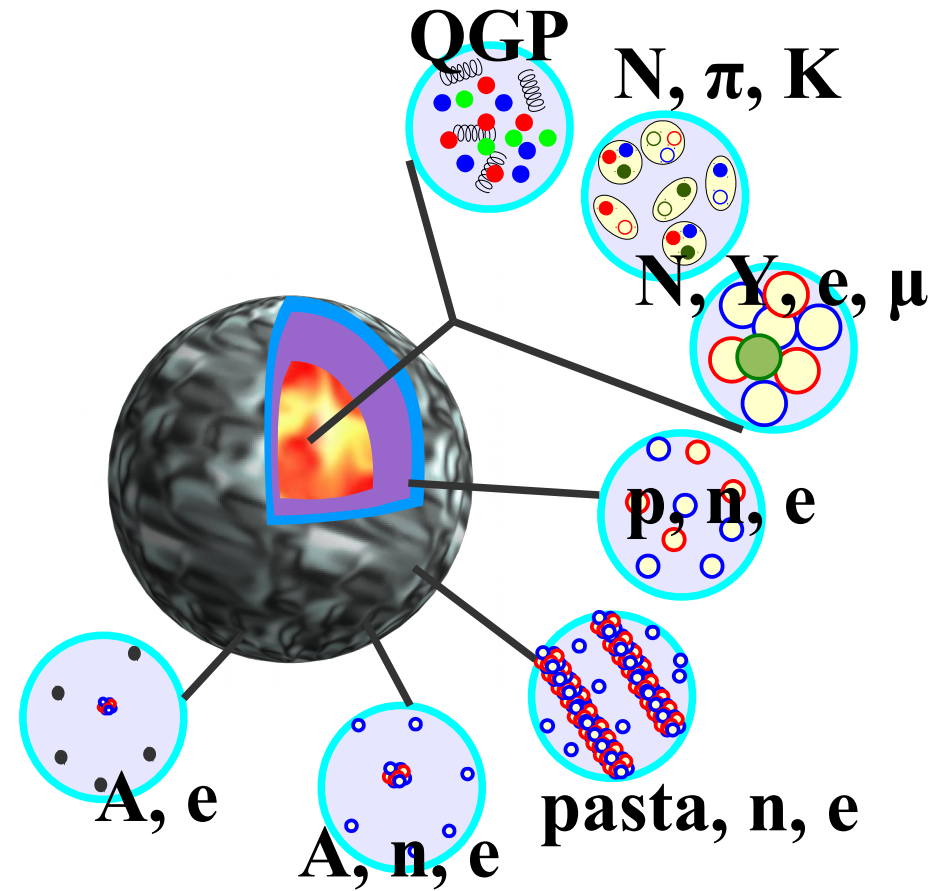
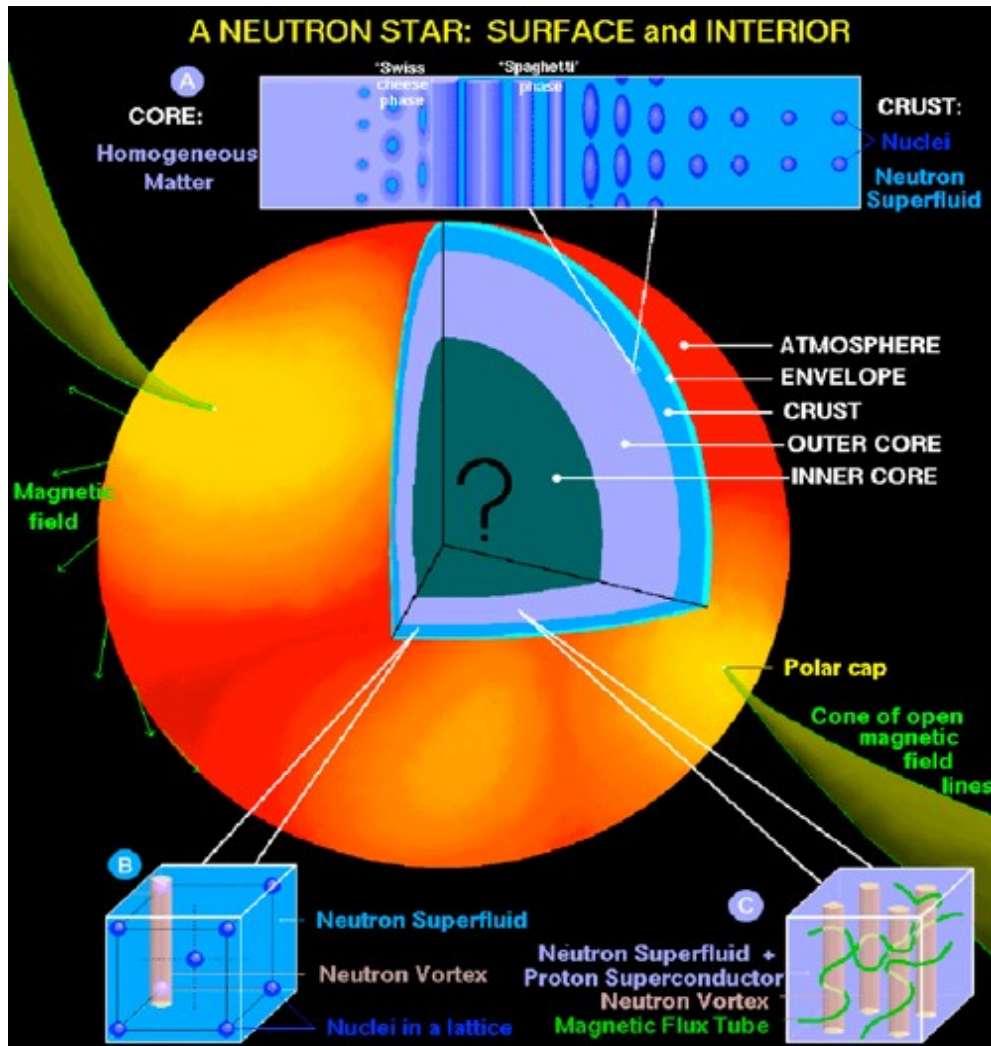
中性子星の基本的性質

- 質量 = 太陽質量の (1-2) 倍 : $M = (1-2) M_{\odot}$ ($M \sim 1.4 M_{\odot}$)
- 半径 = $5 \text{ km} < R < 20 \text{ km}$ ($R \sim 10 \text{ km}$)
→ 太陽程度に重いが、一つの県よりも小さい。
- ほぼ温度ゼロ
($T \sim 10^6 \text{ K} \sim 100 \text{ eV}$)
中性子のフェルミ・エネルギー
~ 数 10 MeV
- 多彩な構成要素
 $n, p, e, \mu, Y, K, \pi, q, g, qq, \dots$
- 中性子星物質
= 核力 (強い相互作用) で
支えられており、
多彩な構成要素を含み得る
高密度物質



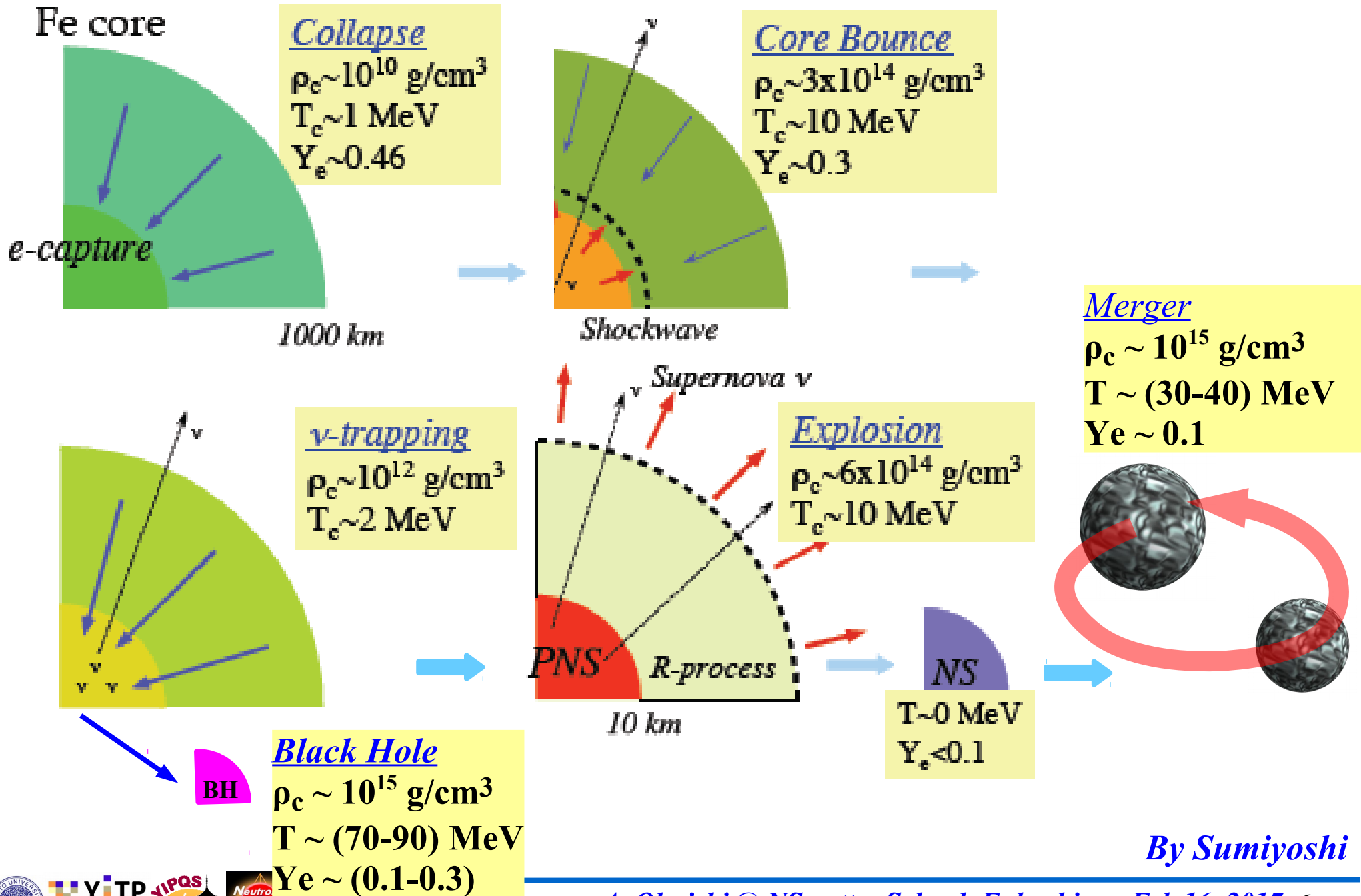
google & zenrin

中性子星の内側



Dany Page

中性子星の誕生と終焉

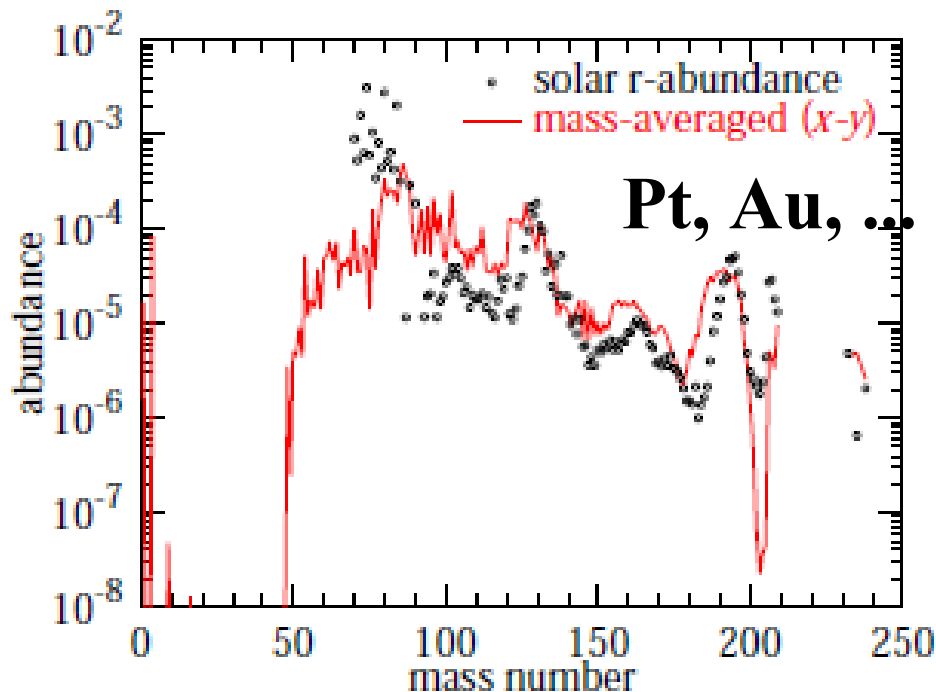
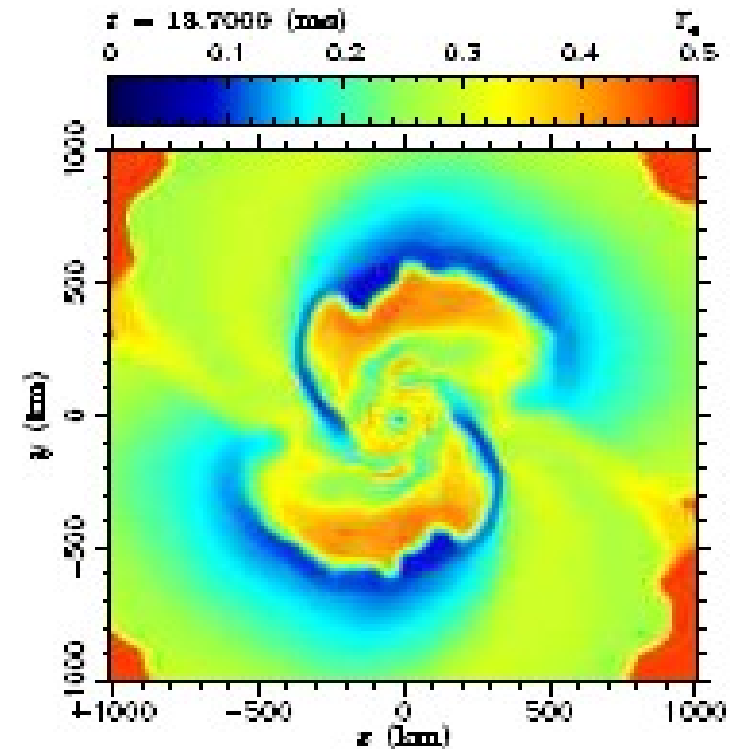
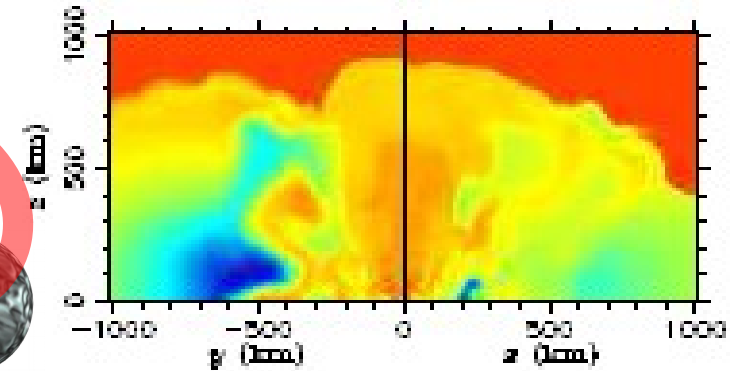
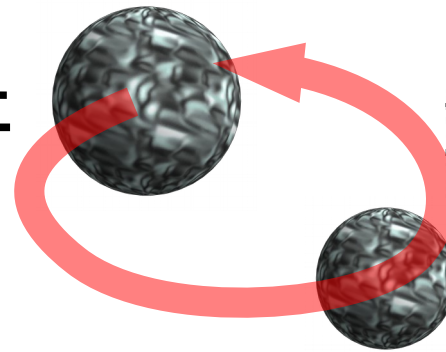


By Sumiyoshi

連星中性子星合体と元素合成

■ 元素合成の新しい可能性

- 連星中性子星合体
→ 電子 / バリオン比 (Y_e) に
大きな広がり
- 小さな Y_e → r 過程ピーク
大きな Y_e → $A < 130$
- 太陽系の元素組成をほぼ説明



Wanajo, Sekiguchi ('14)

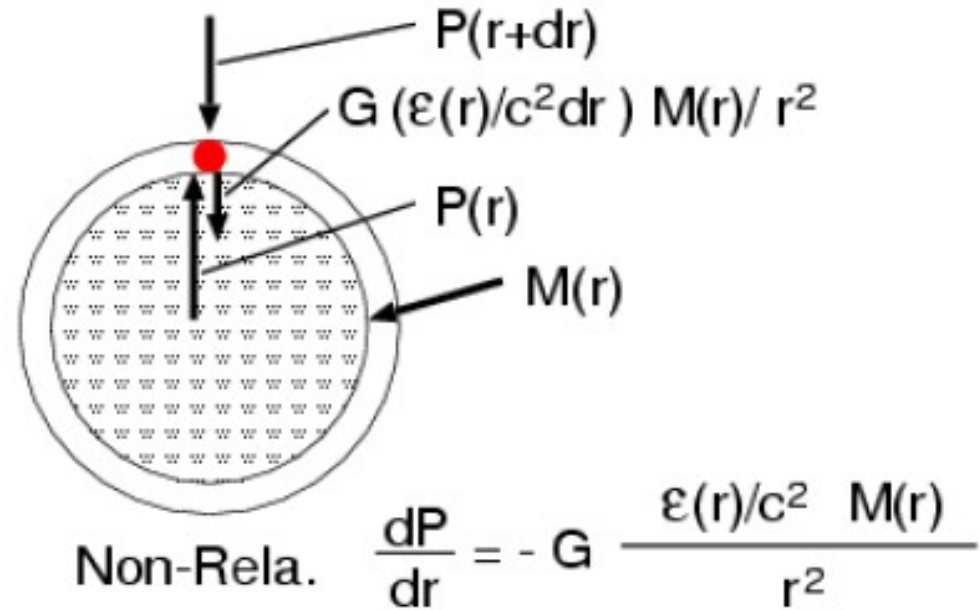
質量 - 半径曲線と状態方程式

- 質量 - 半径曲線 (M-R curve) と中性子星物質状態方程式は 1 対 1 対応

- 静水圧平衡 = 圧力差と重力の釣り合い

- 圧力差からの力
= $S (P(r+dr) - P(r)) \sim S dr dP/dr$
- 重力 = $- S dr G \epsilon(r)/c^2 M(r) / r^2$

- TOV 方程式 = 一般相対論的静水圧平衡 (Tolman-Oppenheimer-Volkoff equation)



$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{(\epsilon/c^2 + P/c^2)(M + 4\pi r^3 P/c^2)}{r^2(1 - 2GM/rc^2)}$$

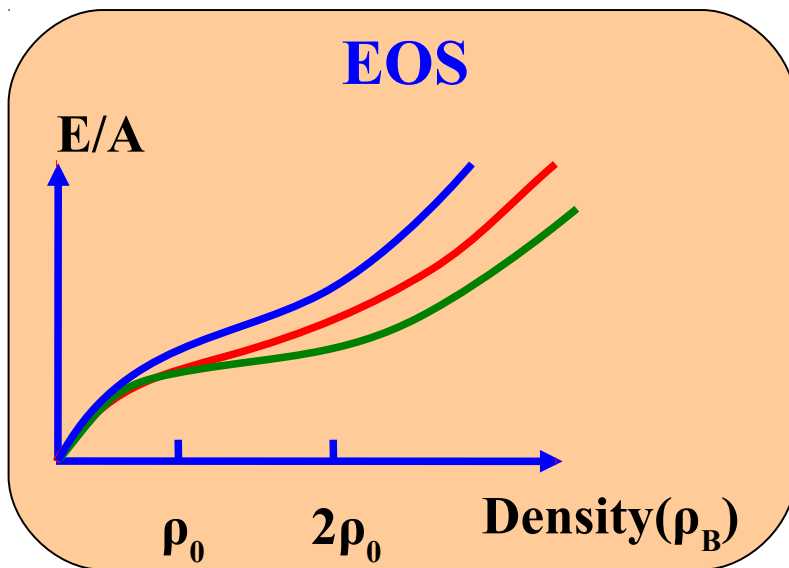
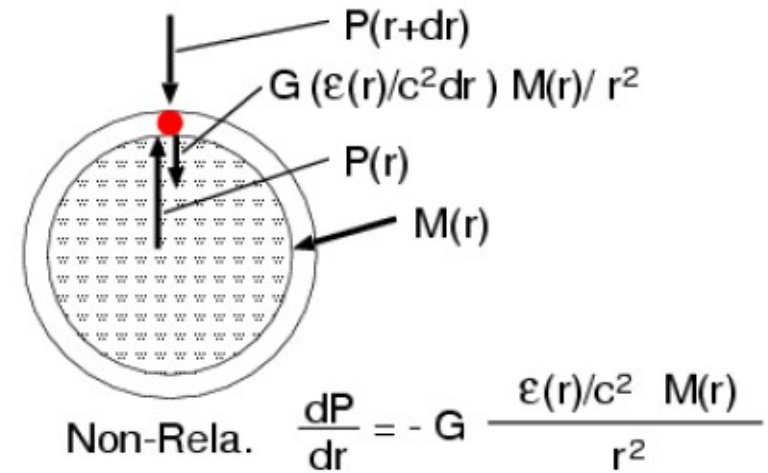
$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon/c^2, \quad P = P(\epsilon) \text{ (EOS)}$$

質量 - 半径曲線と状態方程式

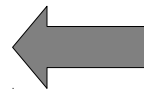
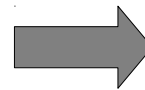
TOV equation

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{(\epsilon/c^2 + P/c^2)(M + 4\pi r^3 P/c^2)}{r^2(1 - 2GM/rc^2)}$$

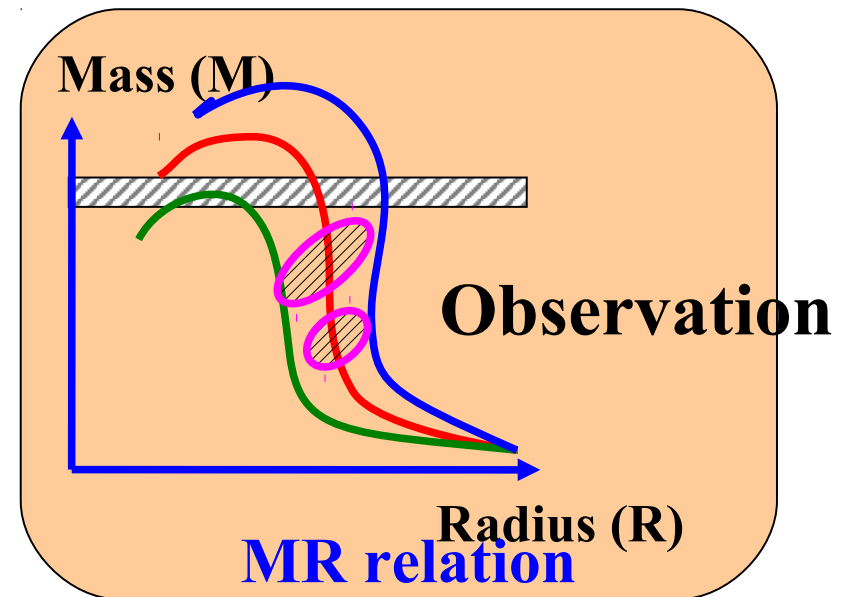
$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon/c^2, \quad P = P(\epsilon) \quad (\text{EOS})$$



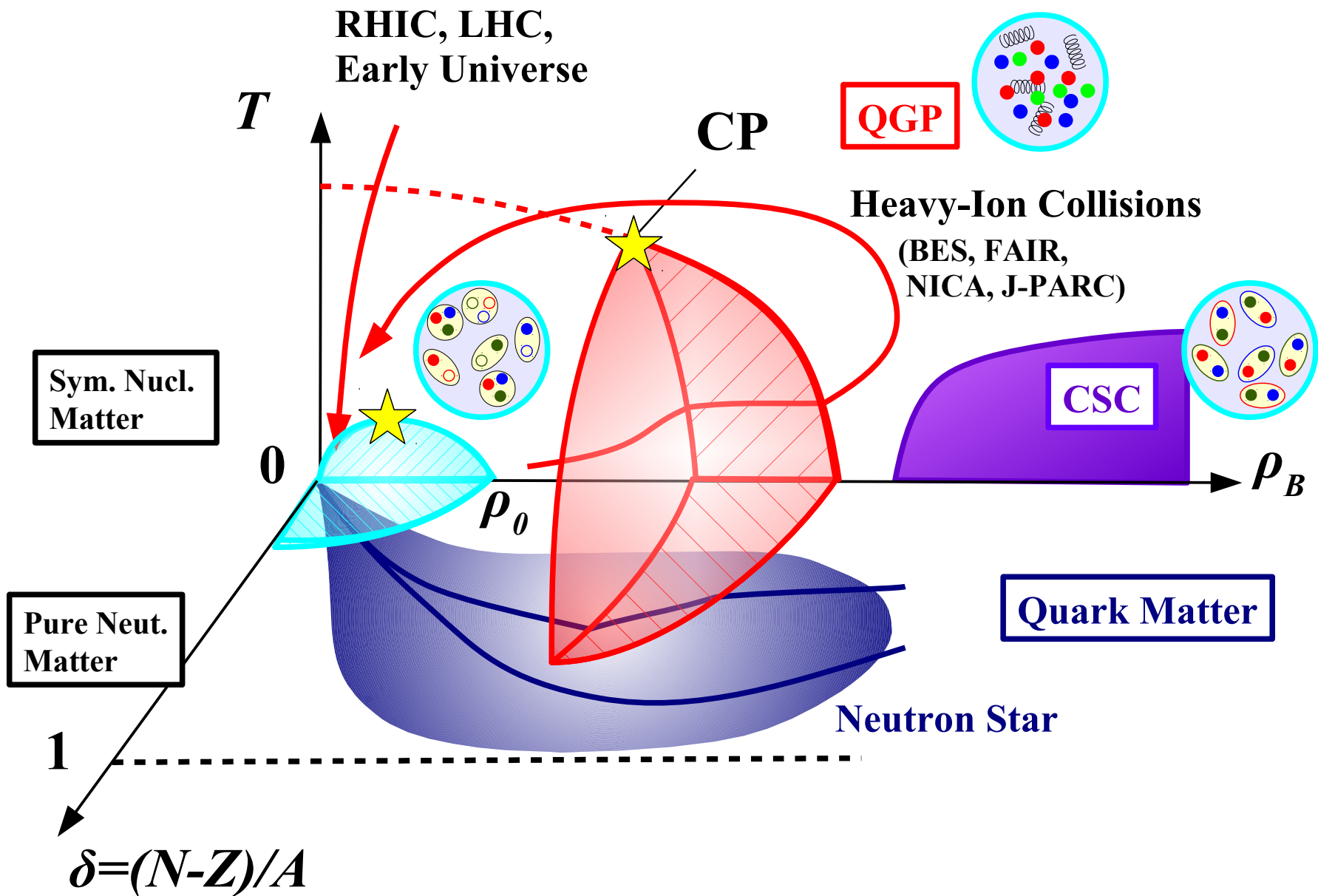
prediction



Judge



高密度物質の相図



中性子星が関わる物理の広がり

- 高密度物質の状態方程式
 - 核子以外の構成要素が作る安定な物質の実験室
 - 高密度での QCD 相転移は起こっているか？
- アイスピン非対称物質の状態方程式
 - 対称エネルギー = 中性子物質と対称物質のエネルギー差
→ 中性子過剰核実験と天体観測を結ぶ！
 - 核密度を越える領域でのバリオン超流動 → 中性子星冷却過程
 - 冷却原子でシミュレートされるユニタリ—気体がほぼ実現
- コンパクト星の天体物理学
 - 内側の構造は未解明
→ 質量・半径・温度・磁場などの測定による解明を待つ！
 - 連星中性子星合体は有望な重力波源・元素合成 site

新学術領域「中性子星核物質」(2012-)

High ρ (Group A)
head: Tamura, Takahashi

Hypernuclei, Kaonic nuclei
YN & YY int.,
Eff. Interaction
(Heavy-ion collisions)

J-PARC



PI: H. Tamura

Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter
+elec.+ μ

Nuclei+neutron gas+elec.

Nuclei + elec.

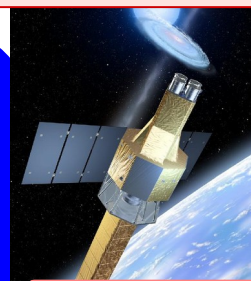
Low ρ (Group B)
head: Murakami,
Nakamura, Horikoshi

Sym. E, Pairing gap,
BEC-BEC cross over,
Cold atom, Unitary gas

NS Obs. (Group C)
head: Takahashi

Radius, Mass,
Temp. (Cooling),
Star quake, Pasta

ASTRO-H



Theory (Group D)
head: Ohnishi

RIBF



oled ⁶Li atoms

中性子星の質量と半径

中性子星の質量観測(1)

■ 中性子星を含む連星からのパルス観測

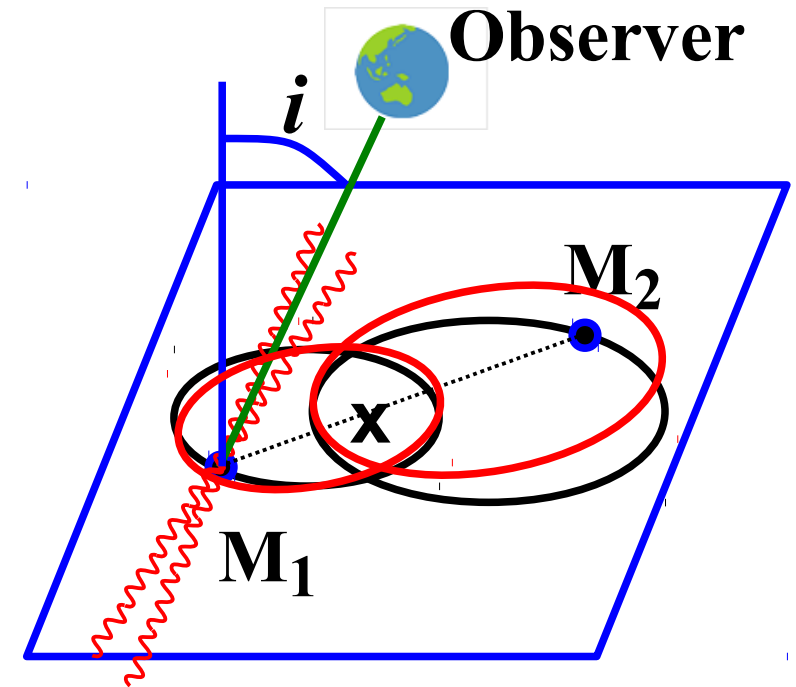
- 中性子星からのパルス間隔から視線速度が分かる。
(i = 視線と回転面の傾き)

$$K = v \sin i$$

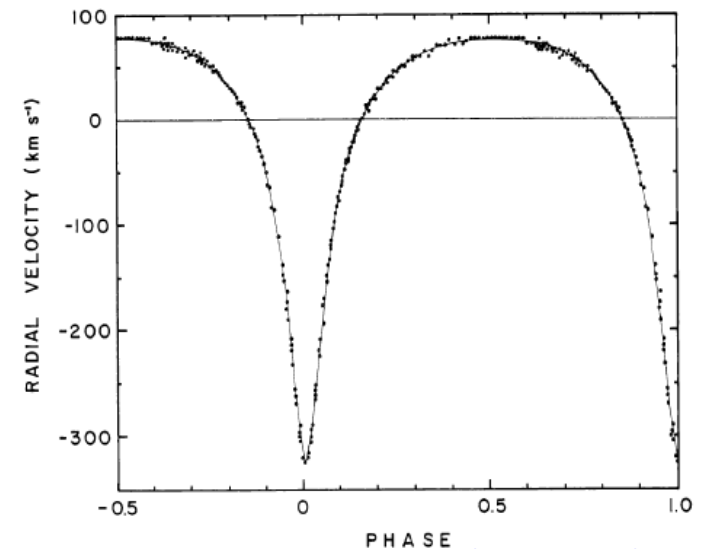
- 視線速度の時間依存性 → 離心率
- ケプラー運動
→ Mass function (観測可能量)

$$f \equiv \frac{(M_2 \sin i)^3}{M^2} = \frac{K^3 P (1 - e^2)^{3/2}}{2 \pi G}$$

$$(K = v \sin i, M = M_1 + M_2)$$



HULSE AND TAYLOR



Hulse-Taylor ('75)

中性子星の質量観測(2)

■ 一般相対論効果

- 近星点移動 (Perihelion shift)
質量の和 ($M=M_1+M_2$) に敏感

$$\dot{\omega} = 3 \left(\frac{2\pi}{P} \right)^{5/3} \frac{(GM)^{2/3}}{(1-e^2)c^2}$$

- Einstein delay
伴星の質量に敏感

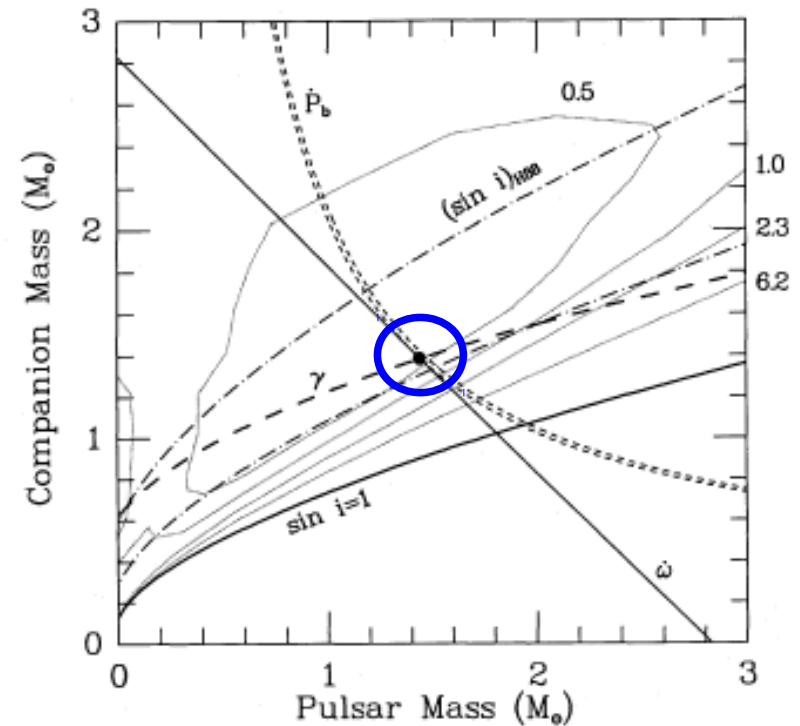
$$\Delta_E = \gamma \sin u$$

(u =eccentric anomaly)

$$\gamma = \frac{eP_b G m_2 (m_1 + 2m_2)}{2\pi c^2 a_R M} \quad \frac{a_R^3}{P_b^2} = \frac{GM}{4\pi^2} \left[1 + \left(\frac{m_1 m_2}{M^2} - 9 \right) \frac{GM}{2a_R c^2} \right]^2$$

- Shapiro delay (伴星の重力による遅れ)
傾きが大きい場合に顕著

$$\Delta_S = -2m \left[\ln \frac{r}{a} + \ln (1 - \sin i \sin \phi) \right]$$



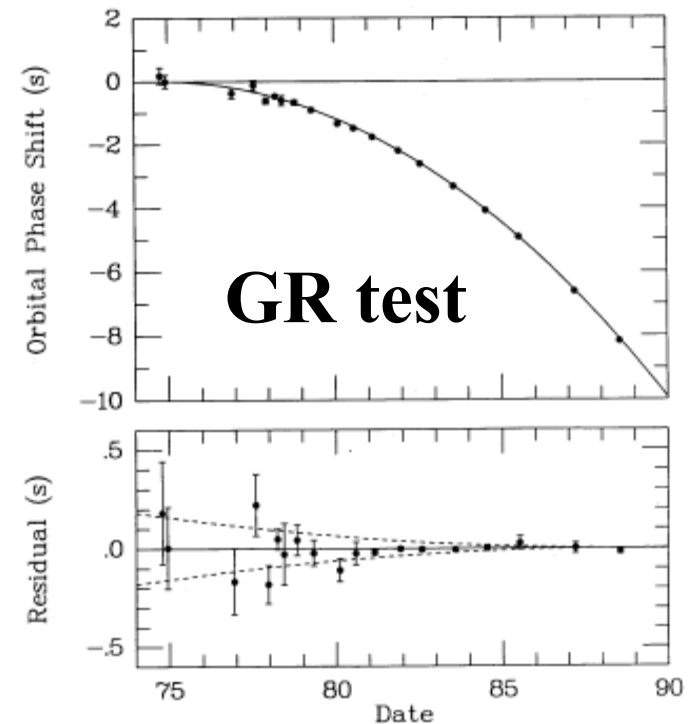
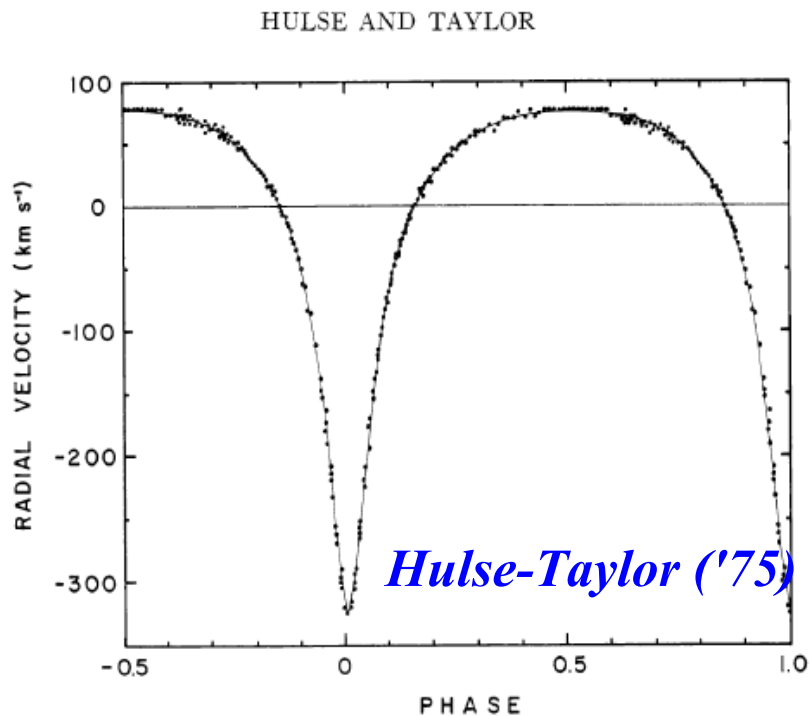
Taylor, Weisenberg ('89)

ハルス・テーラー・パルサー (PSR 1913+16)

- パルスが正確に測られている連星中性子星 (1993 Nobel prize to Hulse & Taylor)
→ 中性子星質量の正確な測定 & 重力波放出の間接的証拠

$$m_1 = 1.442 \pm 0.003 M_{\text{sun}}$$

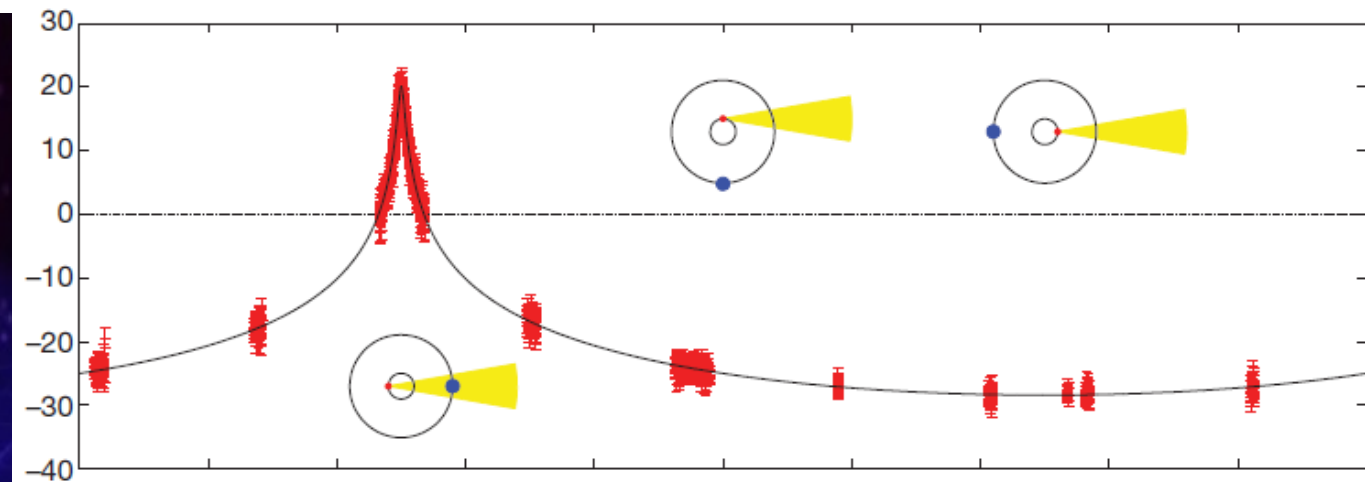
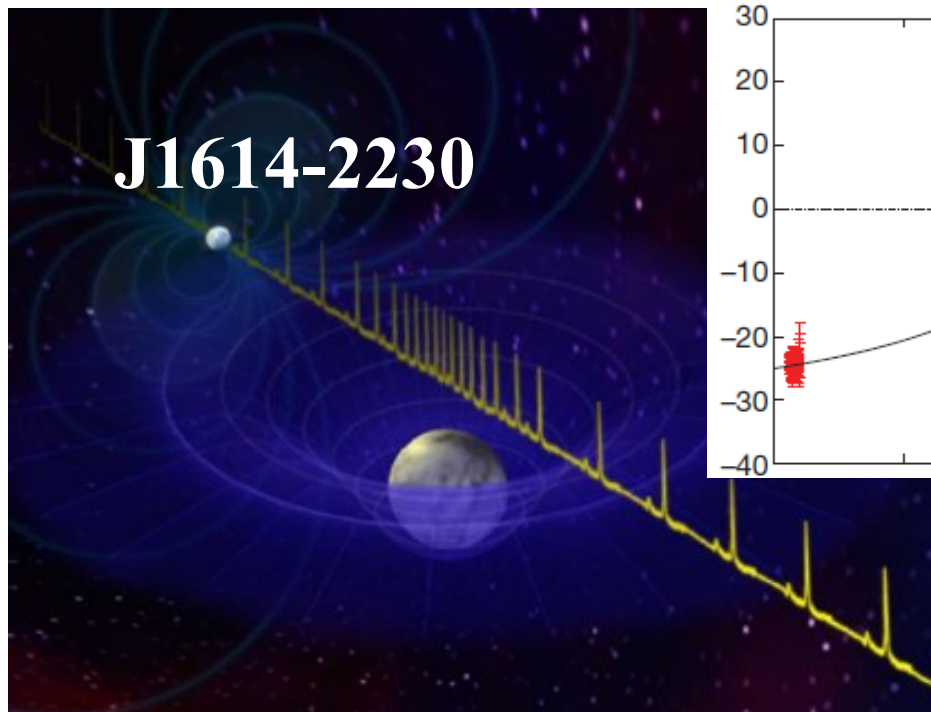
$$m_2 = 1.386 \pm 0.003 M_{\text{sun}}$$



Taylor, Weisenberg ('89)

重い中性子星 ($M \sim 2 M_{\odot}$)

- 一般相対論効果による Time delay
 - Einstein delay : パルサーの運動による遅れ
 - Shapiro delay : 伴星の重力場による遅れ
- 重い中性子星の発見 (J1614-2230)
 - Shapiro delay による質量の評価 $M = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$
Demorest et al. (2010)



$$\Delta_S = -2m \left[\ln \frac{r}{a} + \ln (1 - \sin i \sin \phi) \right]$$

Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081.

中性子星の質量

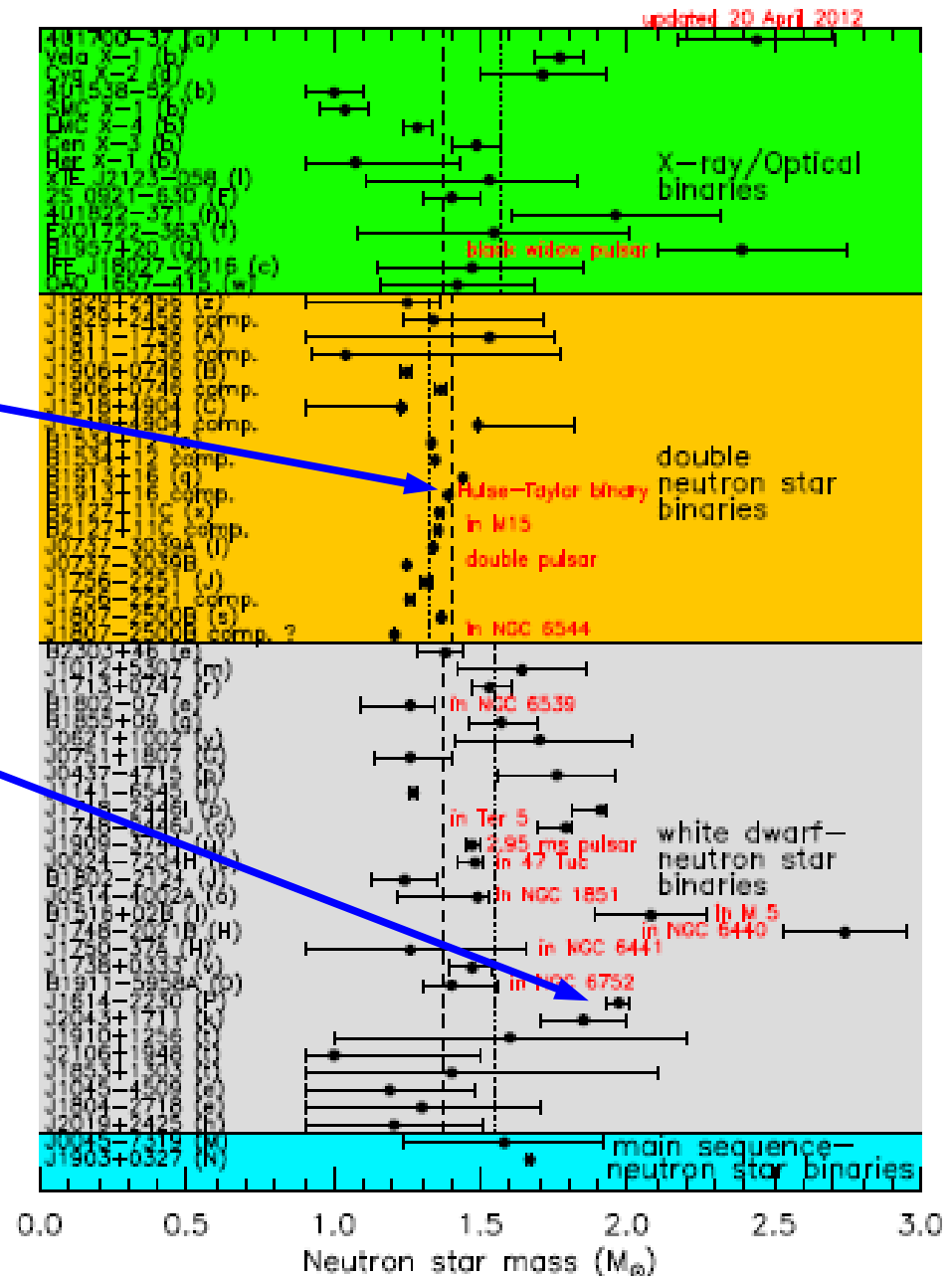
■ 連星をなす中性子星の質量は GR 効果を使って正確に求まる

- Perihelion shift+Einstein delay
 $\rightarrow M = 1.442 \pm 0.003 M_{\odot}$
 (Hulse-Taylor pulsar)
Taylor, Weisenberg ('89)
- Shapiro delay
 $\rightarrow M = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$
Demorest et al. ('10)
- Another obs.: $M = 2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$
Antoniadis et al. ('13)

Neutron Star Mass

$$M = (1-2) M_{\odot}$$

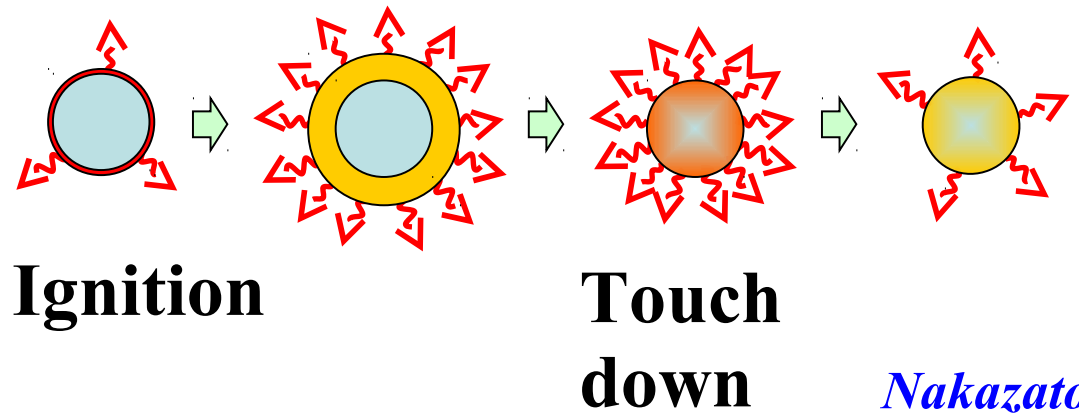
Canonical value = 1.4 M_⊙



Lattimer (2013)

中性子星の半径測定

- 1万~10万光年離れた10km程度の半径をどうやって測るか？
 - 銀河の大きさ $\sim 3 \times 10^{14}$ km (~ 10 kpc $\sim 3 \times 10^4$ light year)
- 模型に依存する解析が必要
- X-ray burster
 - 伴星からの降着によって時々水素・ヘリウム燃焼を起こす
 - 高温になり、中性子星が明るく輝く！
 - 中性子星の半径を測る3つの方法



中性子星の半径測定(1)

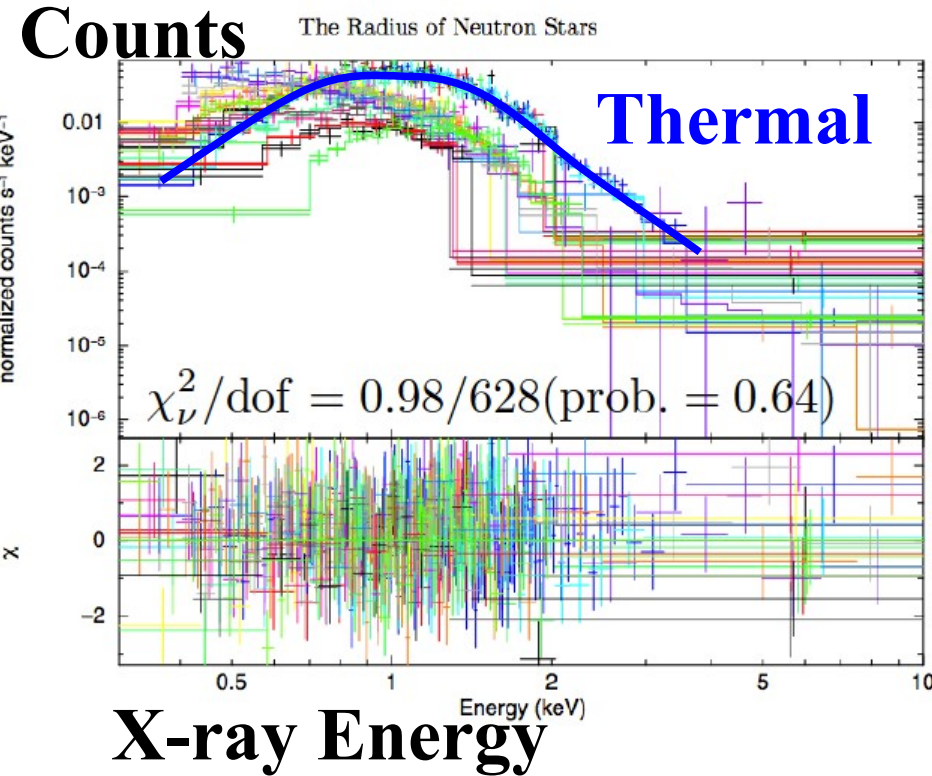
■ 表面からの黒体輻射

- ステファン・ボルツマン則を仮定
→ フラックス・温度・距離から
中性子星半径が推定可能

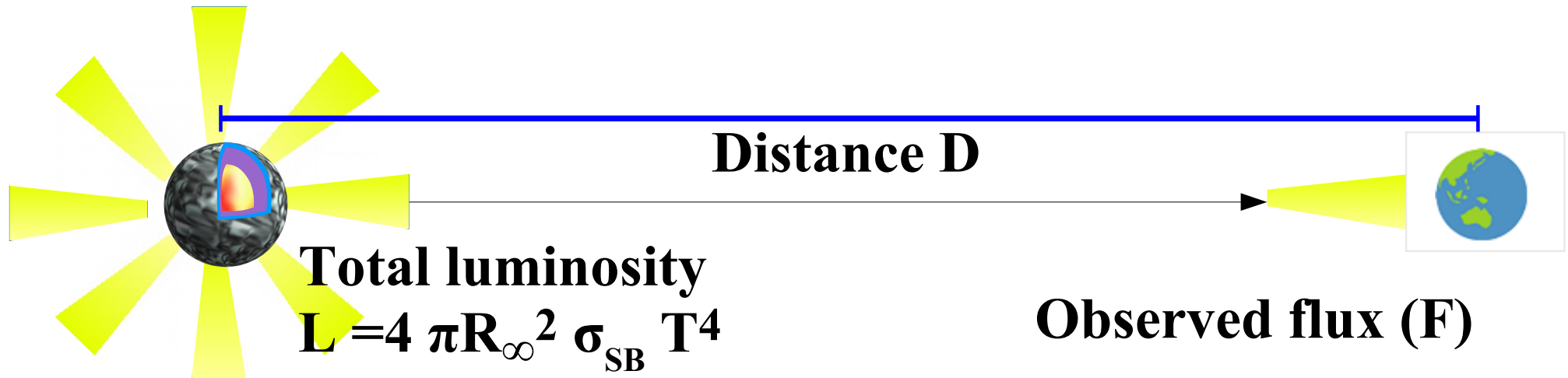
$$L = 4\pi R_{\infty}^2 \sigma_{\text{SB}} T^4, \quad F = \frac{L}{4\pi D^2}$$

$$\rightarrow R = \sqrt{\frac{F D^2}{\sigma_{\text{SB}} T^4} \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{1/2}}$$

$$(R_{\infty} = R(1 - 2GM/Rc^2)^{-1/2})$$



Guillot et al. (2013)



中性子星の半径測定(2)

■ エディントン限界

- 輻射圧 = 重力

$$\frac{4\pi r^2 \sigma_{\text{SB}} T^4}{4\pi r^2 c} \cdot N_e \cdot \sigma_{\text{T}}$$

$$= \frac{GM}{r^2} \cdot N_N \cdot m_N$$

$$\rightarrow R_{\infty}^2 = \frac{2GMcm_N}{\sigma_{\text{T}}\sigma_{\text{SB}}T^4} \frac{N_N}{N_e}$$

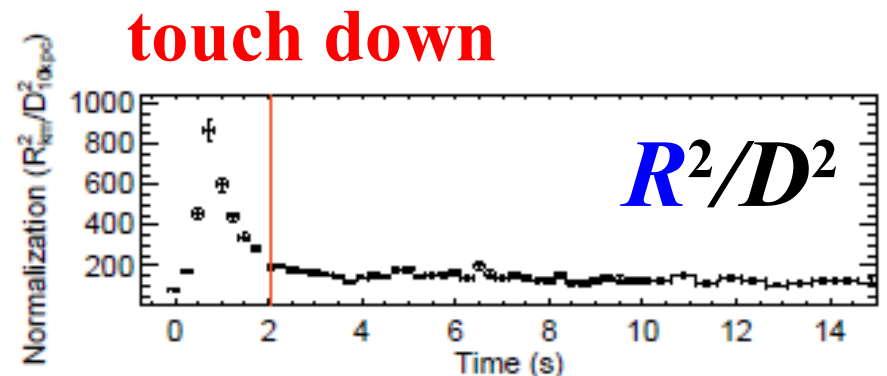
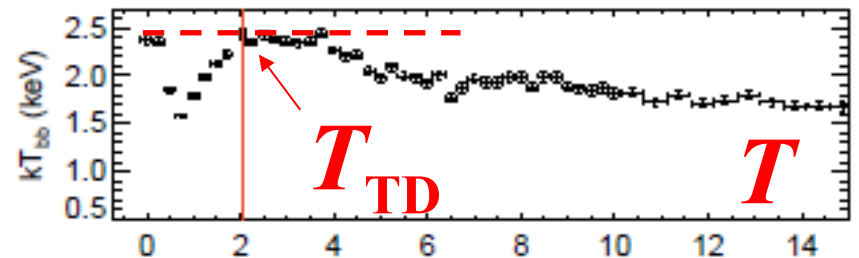
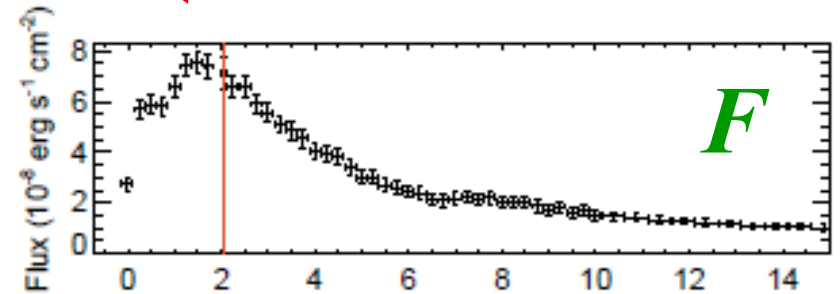
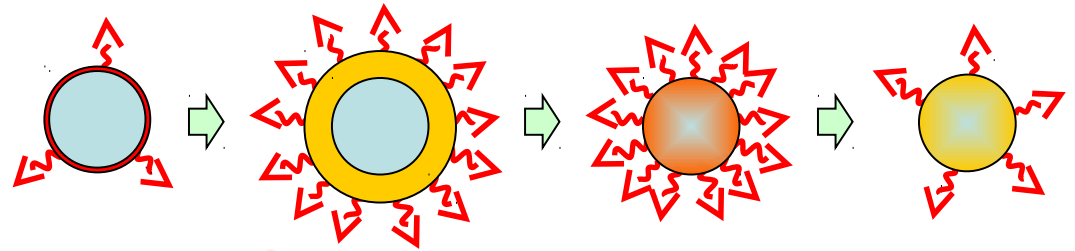
- タッチダウンでエディントン限界が達成されると仮定

- 電子・核子数比

$$N_e/N_N = (1+X)/2$$

(水素大気では $X=1$
軽元素大気では $X=0$)

- 半径の下限値を与える！



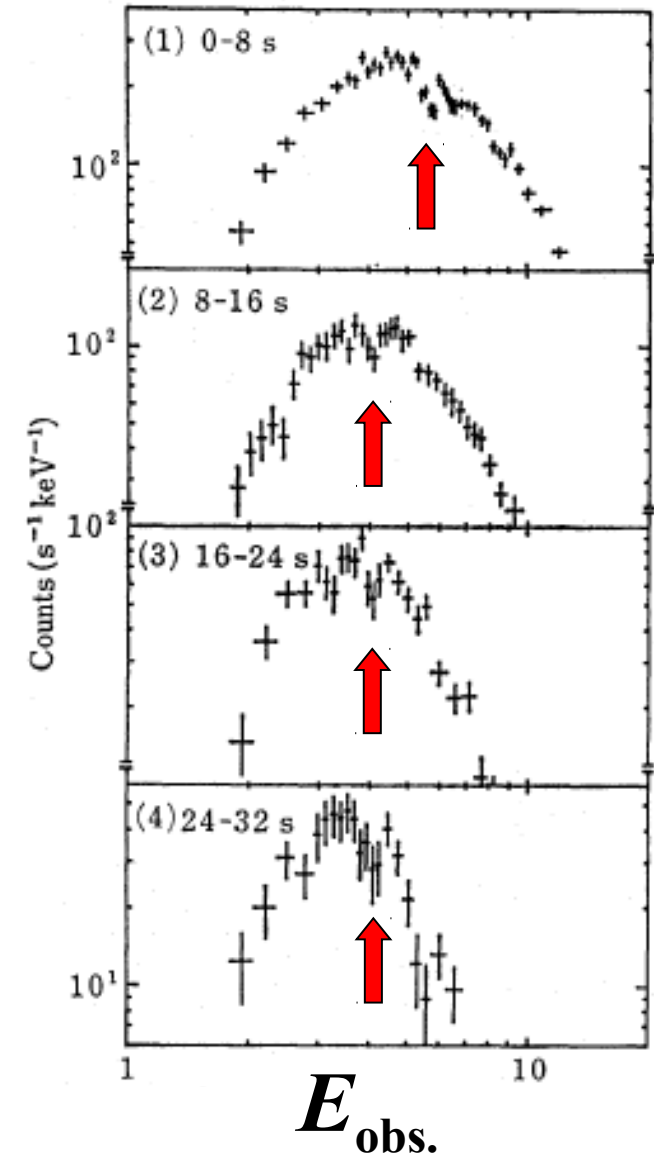
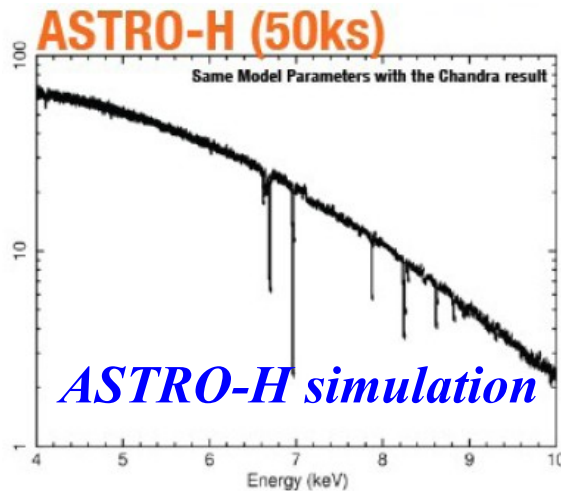
Guver et al., ApJ 747 (2012) 47

中性子星の半径測定(3)

- 吸収線の赤方偏移
 - 中性子星表面は鉄を含む
 - 鉄の吸収線の赤方偏移
~ R/M の直接測定

$$E_{\text{obs}} = E_{\text{surf}} \sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}$$

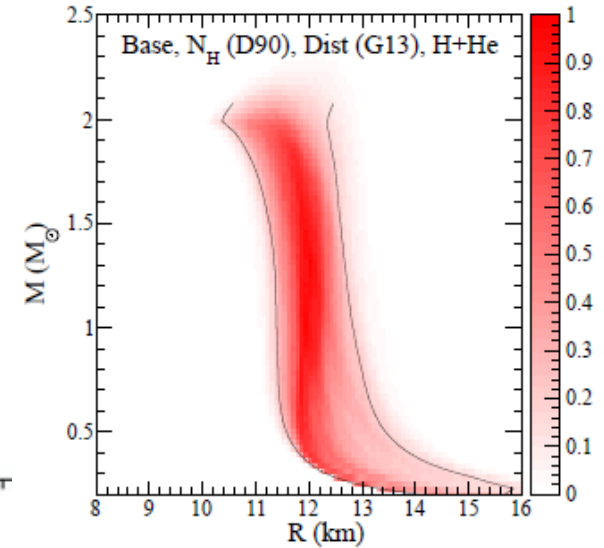
- ASTRO-H (Hitomi) によって鉄の吸収線から M/R が 1% の精度で測定されるはずであった。



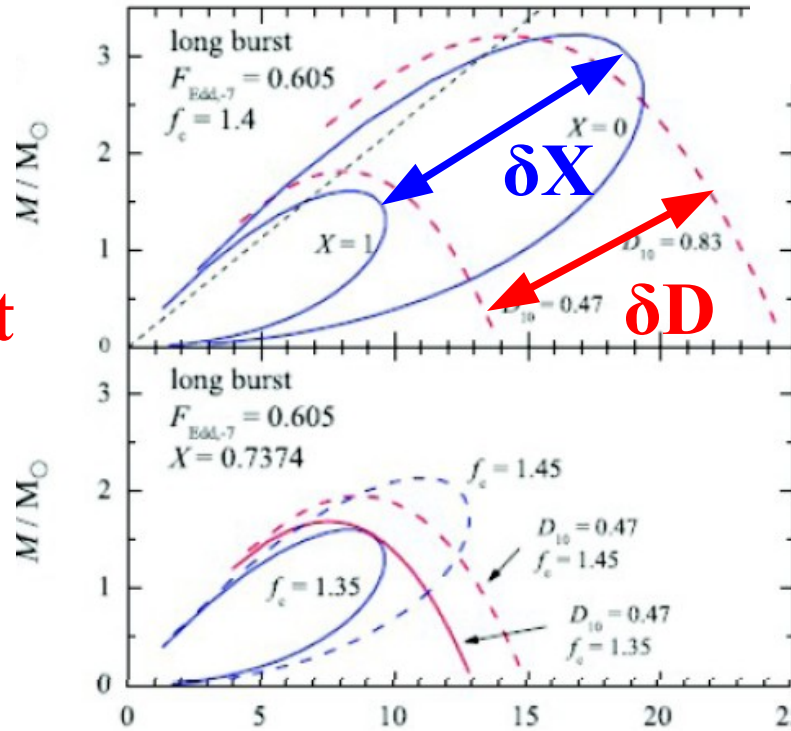
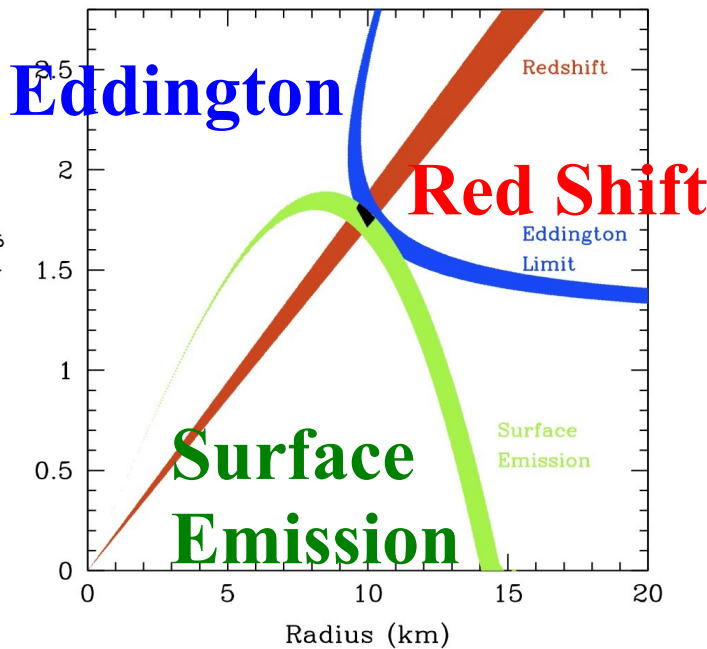
Waki et al.,
PASJ36('84)819

中性子星半径

- さて、3つの方法は同じ半径を与えるか？
 - 表面黒体放射とエディントン限界 (仮定) は距離、組成 (& 仮定) に大きな不定性をもつ。
 - Eddington limit を示す関数形？



Lattimer, Steiner (2014).



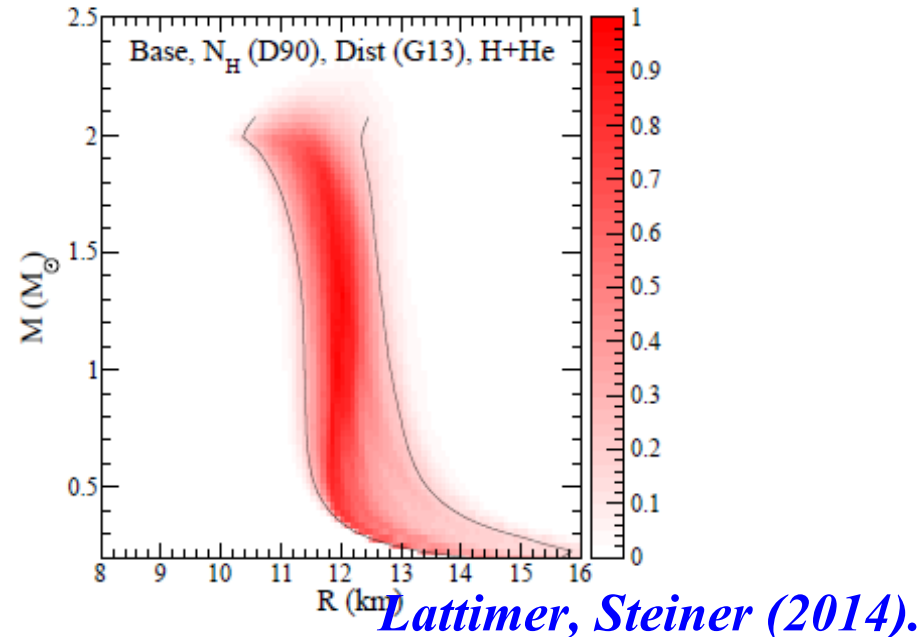
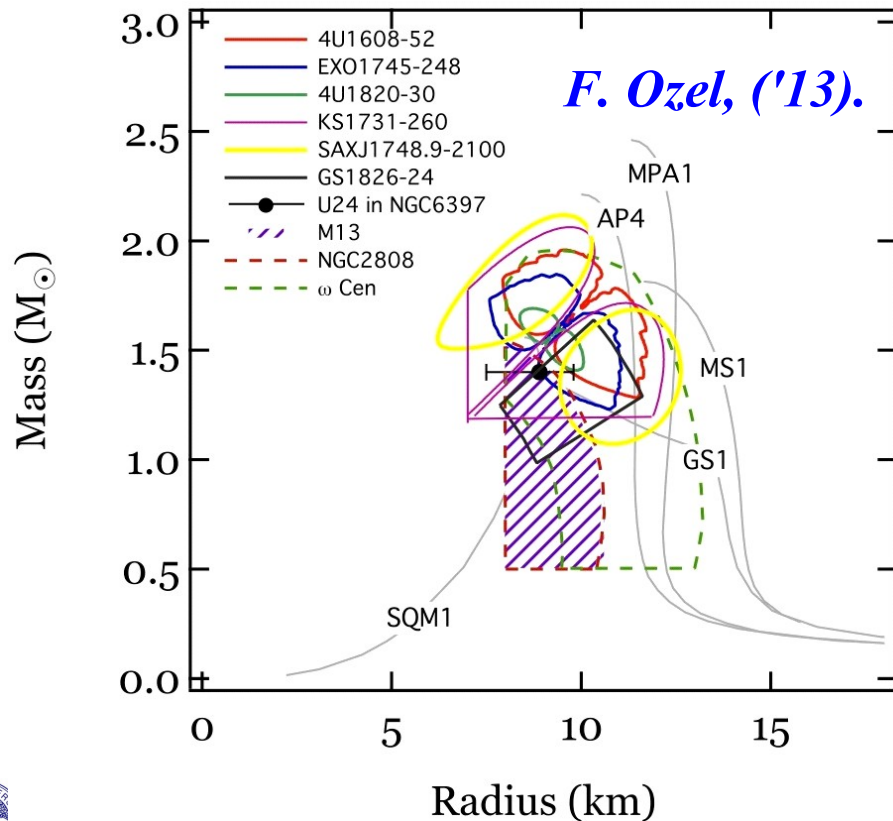
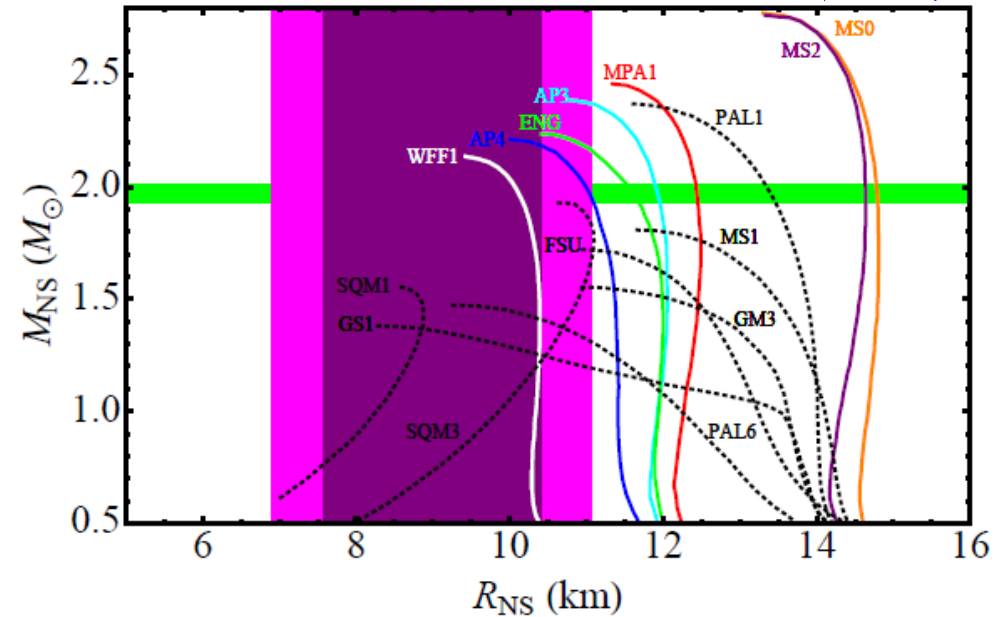
4U 1724-307, Suleimanov et al.,
ApJ742('11),122

Ozel et al.

中性子星の質量と半径

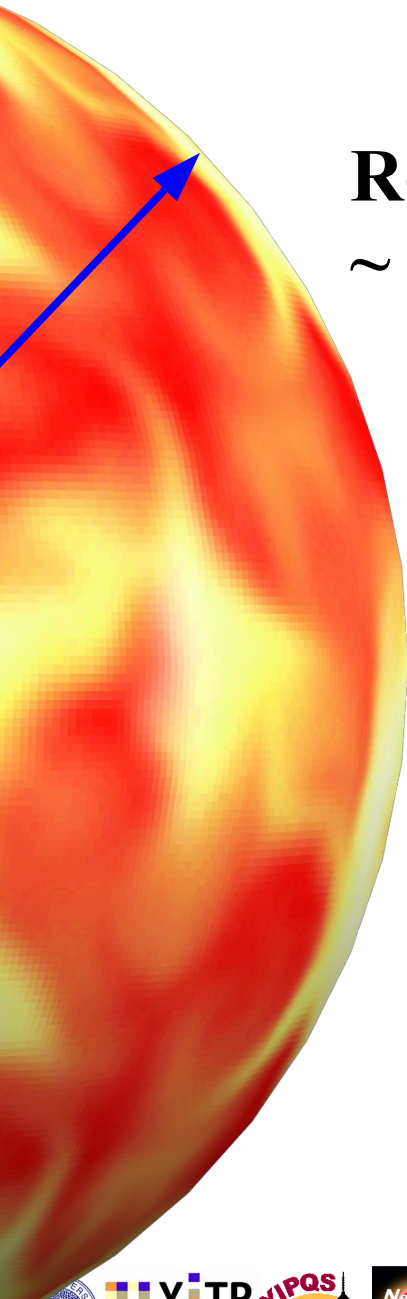
- 中性子星の半径は分析するグループにより大きく異なる
Ozel et al. / Guillot et al. $R \sim 9\text{km}$
Suleimanov+, $R_{1.4} > 13.9\text{ km}$
Lattimer+, $R_{1.4} = 12 \pm 1.4\text{ km}$

Guillot et al. (2013)

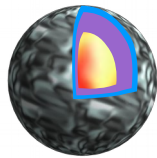


Lattimer, Steiner (2014).

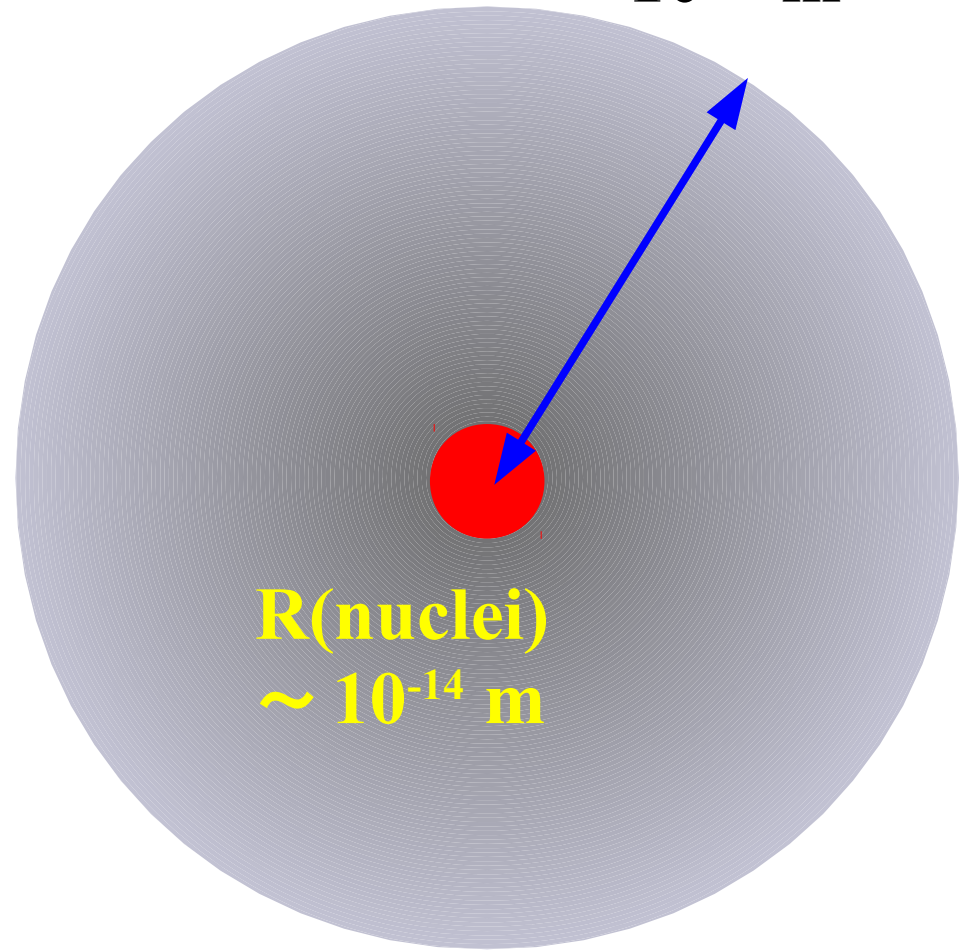
中性子星の密度



R(Sun)
 $\sim 700,000 \text{ km}$



R(NS) $\sim 12 \text{ km}$
M(NS) $\sim 1.4 M_{\odot}$



R(atom)
 $\sim 10^{-10} \text{ m}$

R(nuclei)
 $\sim 10^{-14} \text{ m}$

とても高い密度！

$$m_N \rho(\text{NS}) \sim (2-7) \times 10^{14} \text{ g / cm}^3 \sim (1-3) m_N \rho_0$$

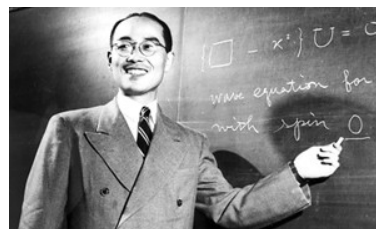
中性子星は核力 (強い相互作用) で支えられている!

- 中性子星の平均密度 $\sim (1-3) \rho_0$, 最大密度 $\sim (5-10) \rho_0$
→ 核力 (強い相互作用) によって支えられる。
(c.f. 白色矮星は電子の圧力で支えられている)

■ 核力

- 長距離: π 交換

Yukawa (1935)



- 中間レンジの引力

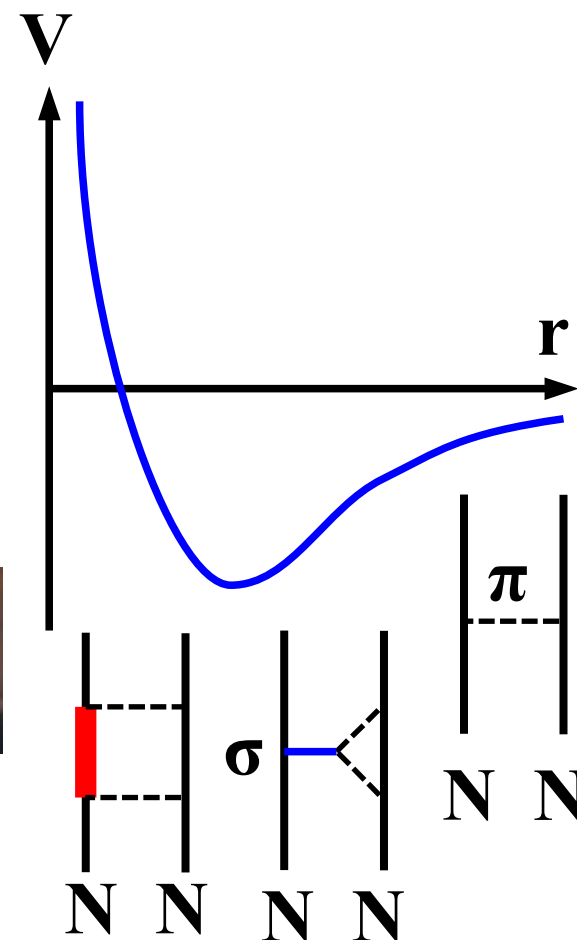
2 π exchange, σ exchange,

Nambu, Jona-Lasinio (1961)

- 短距離斥力

Vector meson exchange,
Pauli blocking btw. quarks
Gluon exchange

*Neudatchin, Smirnov, Tamagaki;
Oka, Yazaki; Aoki, Hatsuda, Ishii*



対称エネルギー

原子核質量

■ Bethe-Weizsacker の質量公式

- 原子核の束縛エネルギーは液滴模型でおおまかに記述可能
- 原子核半径 $R = r_0 A^{1/3}$

$$B(A, Z) = \underbrace{a_v A}_{\text{Volume}} - \underbrace{a_s A^{2/3}}_{\text{Surface}} - \underbrace{a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}}}_{\text{Coulomb}} - \underbrace{a_a \frac{(N - Z)^2}{A}}_{\text{Symmetry}} + \underbrace{a_p \frac{\delta_p}{A^{1/2}}}_{\text{Pairing}}$$

Volume
Surface
Coulomb
Symmetry
Pairing

$$A \propto \frac{4\pi}{3} R^3 \quad A^{2/3} \propto 4\pi R^2 \quad \propto \frac{Q^2}{R}$$

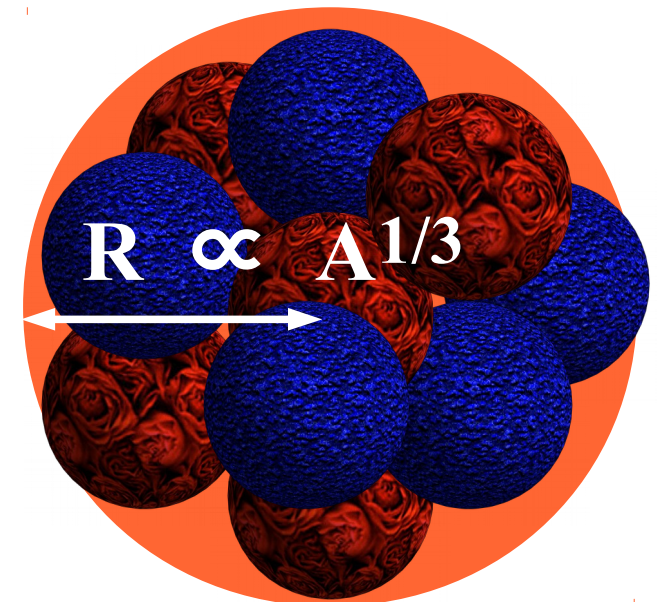
■ クーロン力を除けば無限系を考えられる

$$B/A = a_v(\rho) - a_a(\rho) \delta^2, \quad \delta = (N - Z)/A$$

$$a_v \approx 16 \text{ MeV}$$

$$a_a \approx 23 \text{ MeV} \quad (a_a(\text{vol}) \approx 30 \text{ MeV})$$

係数は密度に依存してよいだろう
→ 核物質の状態方程式



核物質状態方程式

- 核物質における核子当たりのエネルギー

$$E(\rho, \delta) = E_{\text{SNM}}(\rho) + E_{\text{Sym}}(\rho)\delta^2, \quad \delta = (N - Z)/A$$

- 飽和点 (ρ_0, E_0)

$$\rho_0 \sim 0.16 \text{ fm}^{-3}$$

$$E_0 = -a_v \sim -16 \text{ MeV}$$

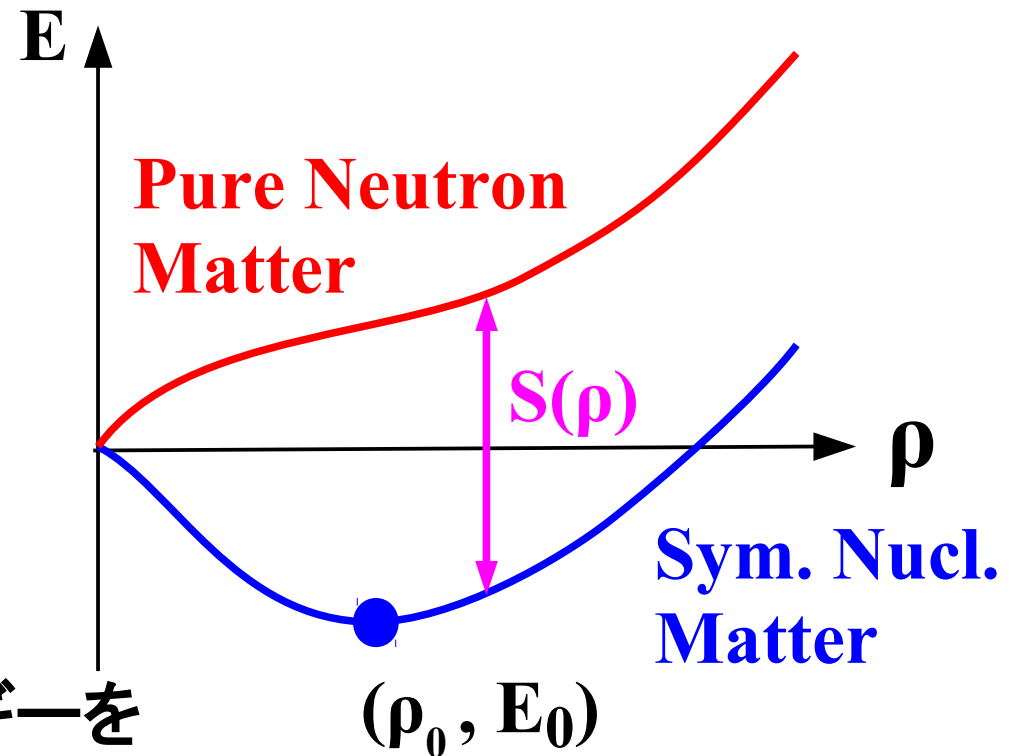
(原子核の半径と質量)

- 対称エネルギー

$$\begin{aligned} S(\rho) &= E_{\text{PNM}}(\rho) - E_{\text{SNM}}(\rho) \\ &= E(\rho, \delta=1) - E(\rho, \delta=0) \end{aligned}$$

$$S_0 = S(\rho_0) \sim 30 \text{ MeV}$$

(質量公式における対称エネルギーを
体積項と表面項に分解)



核物質状態方程式

- 核物質パラメータ: ρ_0, E_0, K, S_0, L
- 圧力 \propto 核子当たりエネルギーの密度微分

$$P = \rho^2 (\partial E / \partial \rho)$$

飽和密度における圧力

$$P = \rho_0 L / 3 \quad (\text{at } \rho = \rho_0)$$

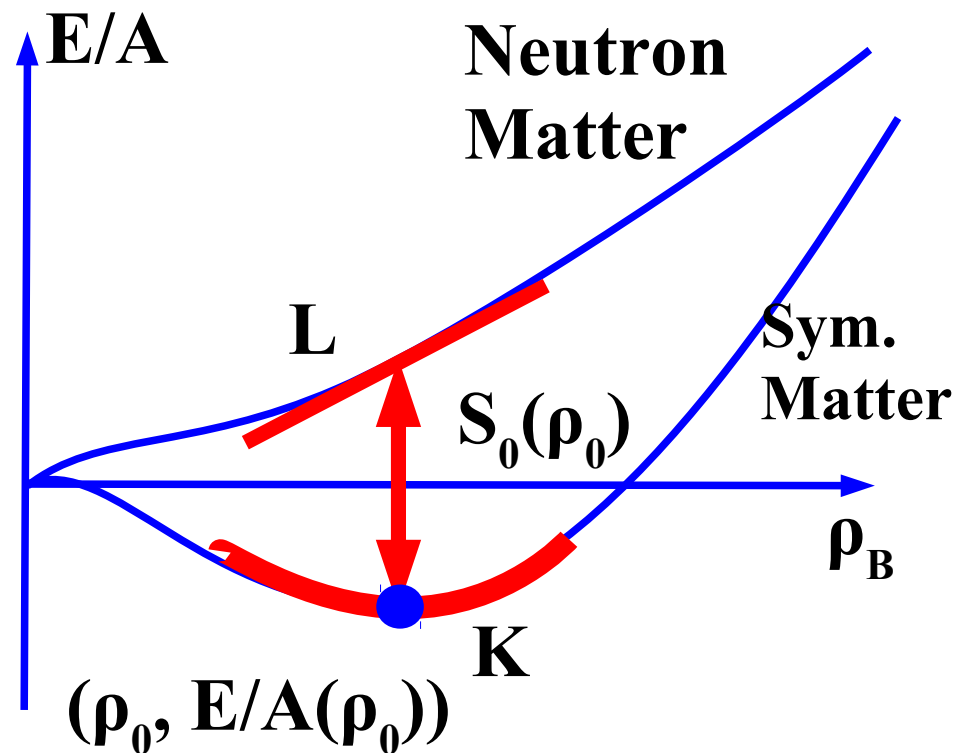
$$E/A(\rho, \delta) = \varepsilon(\rho) + E_{\text{sym}}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4)$$

Symmetric Nuclear Matter

$$\varepsilon(\rho) = \varepsilon(\rho_0) + \frac{K(\rho - \rho_0)^2}{18\rho_0^2} + O((\rho - \rho_0)^3)$$

Symmetry Energy ($\delta = (N - Z)/A = 1 - 2Y_p$)

$$E_{\text{sym}}(\rho) = S_0 + \frac{L(\rho - \rho_0)}{3\rho_0} + \frac{K_{\text{sym}}(\rho - \rho_0)^2}{18\rho_0^2} + O((\rho - \rho_0)^3)$$



中性子星物質状態方程式

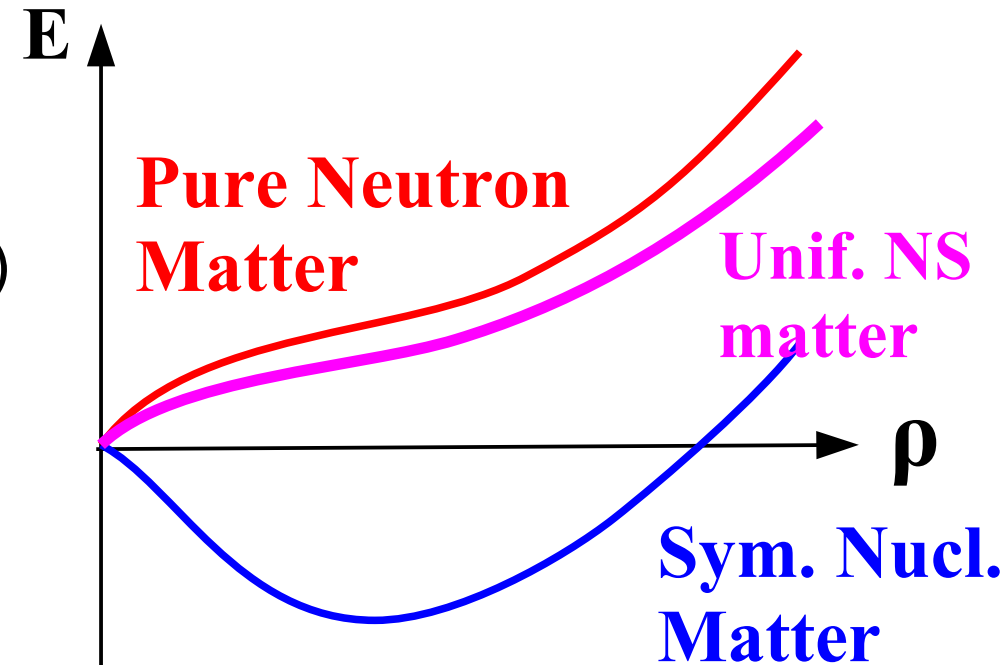
- 一様な中性子星物質 = 核子と電子の一様物質 ($3 \rho_0$ 程度まで)
- 電気的中性条件 → 電子数 = 陽子数 ($\rho_e = \rho_p = \rho(1 - \delta)/2$)

$$\begin{aligned} E_{\text{NSM}}(\rho) &= E_{\text{NM}}(\rho, \delta) + E_e(\rho_e = \rho_p) \\ &= E_{\text{SNM}}(\rho) + S(\rho)\delta^2 + \frac{\Delta M}{2}\delta + \frac{3}{8}\hbar k_F(1 - \delta)^{4/3} \end{aligned}$$

(電子質量は無視。 k_F = 対称核物質におけるフェルミ波数)

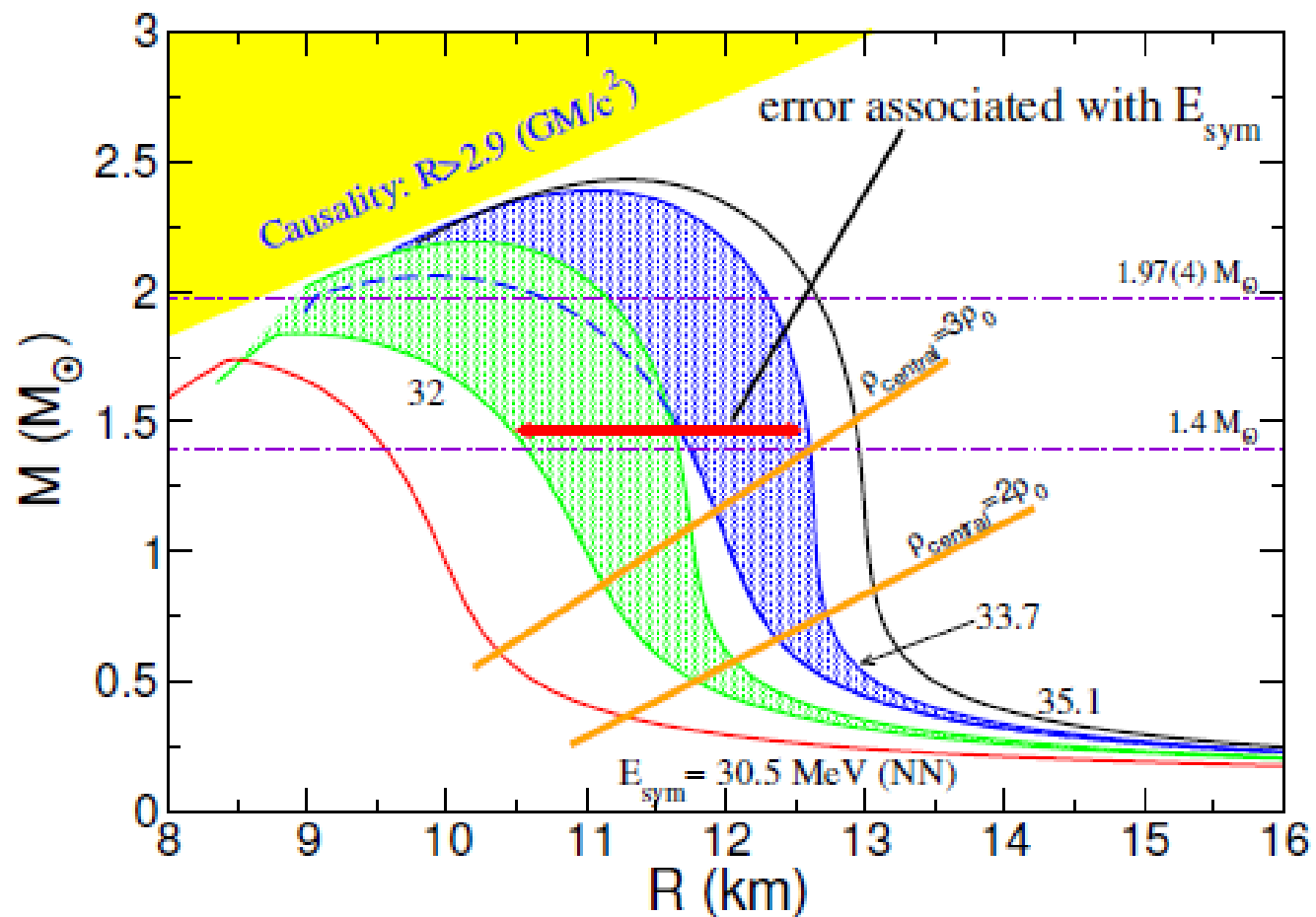
- 非対称度 δ はエネルギーを最小にするように選ばれる

$$E_{\text{NSM}}(\rho) \leq E_{\text{NM}}(\rho, \delta = 1) = E_{\text{PNM}}(\rho)$$



対称エネルギーと中性子星の質量・半径

- 飽和密度では対称核物質の圧力はゼロ
→ 飽和密度近辺では対称エネルギーからの圧力が支配的！
- S_0 の誤差 5 MeV → 半径の誤差 (3-4) km



Gandolfi, Carlson, Reddy, PRC 032801, 85 (2012).

核物質状態方程式の理論

■ Mean Field from Effective Int. ~ Nuclear Density Functionals

● Skyrme Hartree-Fock

- ◆ Non.-Rel., Zero Range, Two-body + Three-body (or ρ -dep. two-body)

$$\frac{E}{A} = \left\langle \frac{\mathbf{p}^2}{2m^*} \right\rangle + V(\rho, \delta), \quad V \simeq \frac{\alpha}{2} \frac{\rho}{\rho_0} + \frac{\alpha' \delta}{2} \frac{\rho}{\rho_0} + \frac{\beta}{1 + \gamma} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + \dots$$

● Relativistic Mean Field

- ◆ Relativistic, Meson-Baryon coupling, Meson self-energies

$$\frac{E}{A} = \left\langle \sqrt{\mathbf{p}^2 + (M - g_\sigma \sigma)^2} \right\rangle + g_\omega \omega + \frac{1}{\rho_B} \left[\frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega^2 + \dots \right]$$

■ Microscopic (ab initio) Approaches (starting from bare NN int.)

- Variational calculation
- Quantum Monte-Carlo
- Bruckner Theory (G-matrix)

現象論的EOS

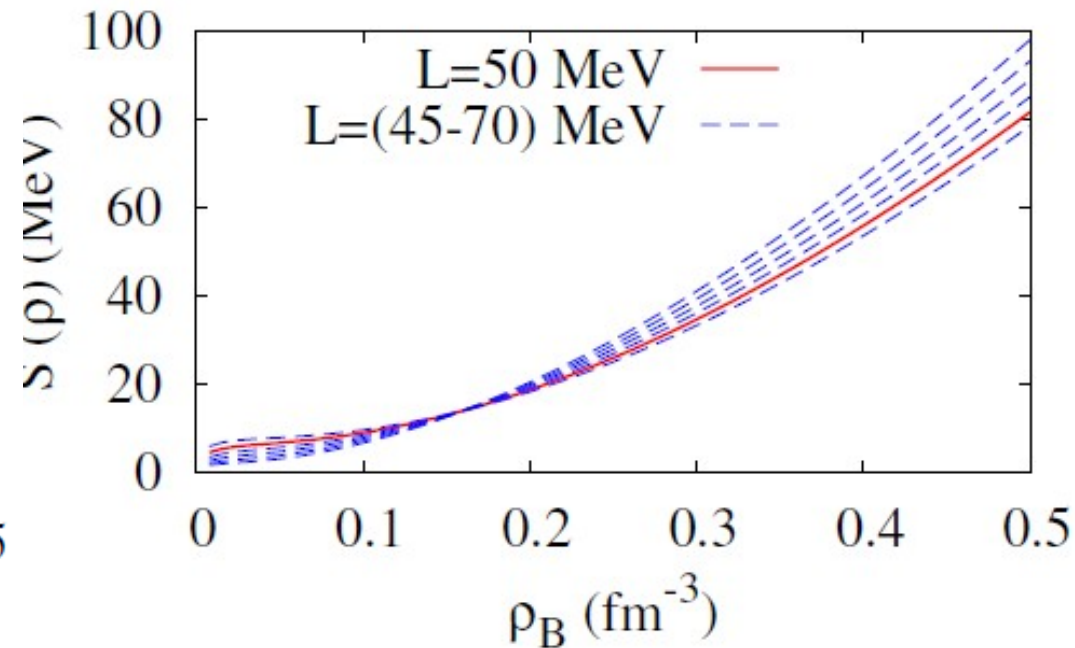
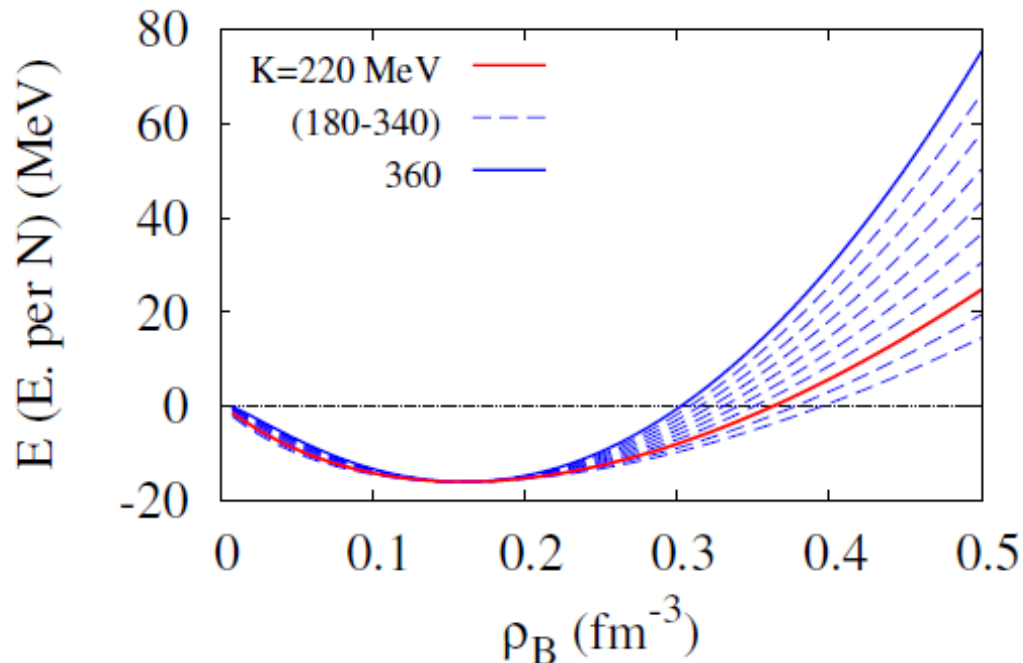
■ Skyrme 型相互作用に基づく関数形

- $(\rho_0, E/A(\rho_0), K) \rightarrow (\alpha, \beta, \gamma), L \rightarrow \gamma_{\text{sym}}$

$$S(\rho) = \frac{1}{3} E_F(\rho) + \left[S_0 - \frac{1}{3} E_F(\rho_0) \right] \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma_{\text{sym}}}$$

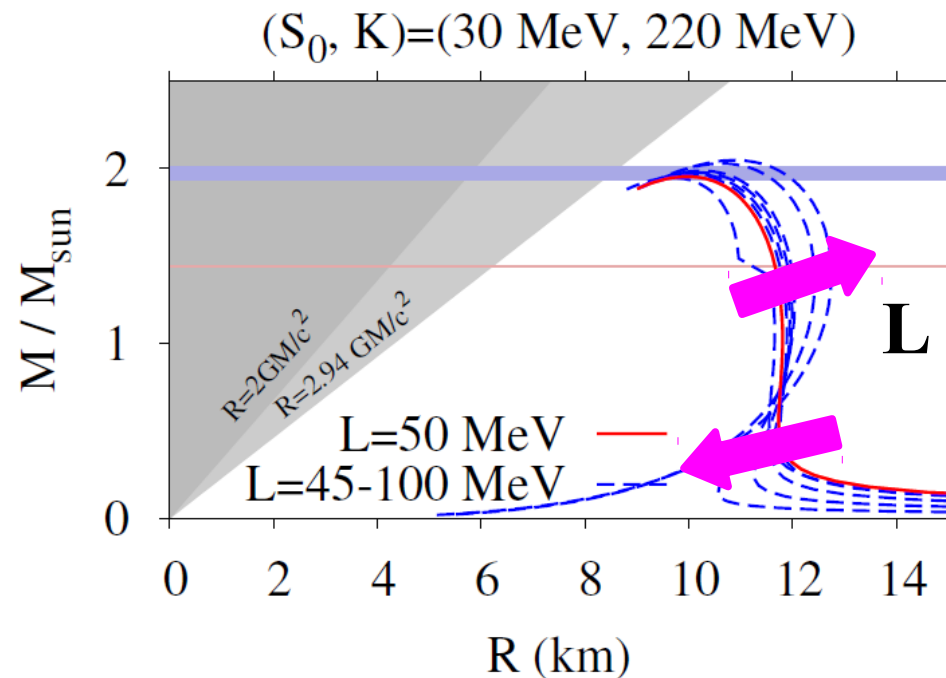
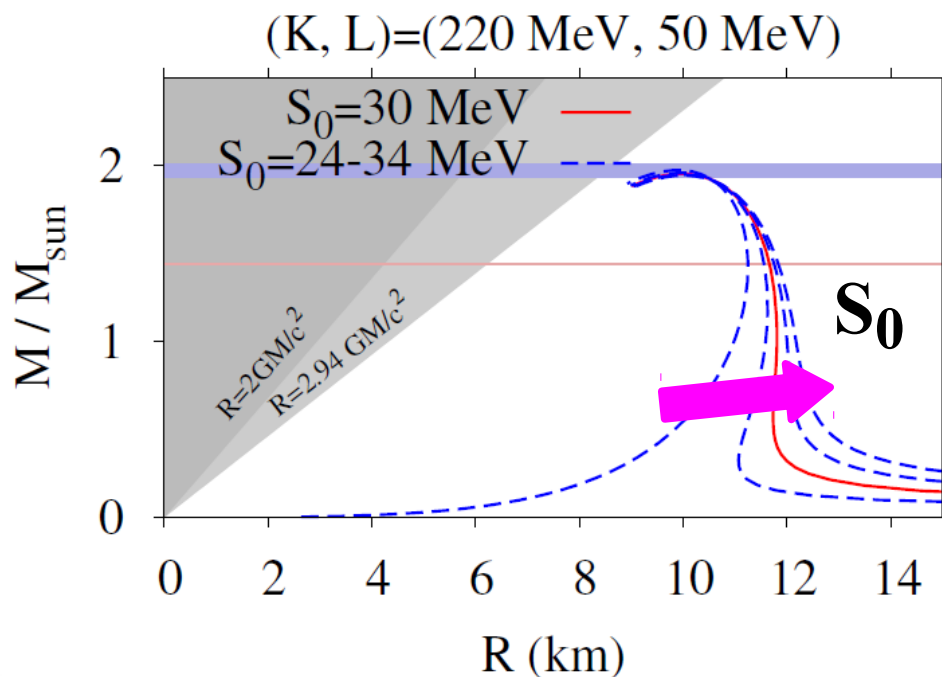
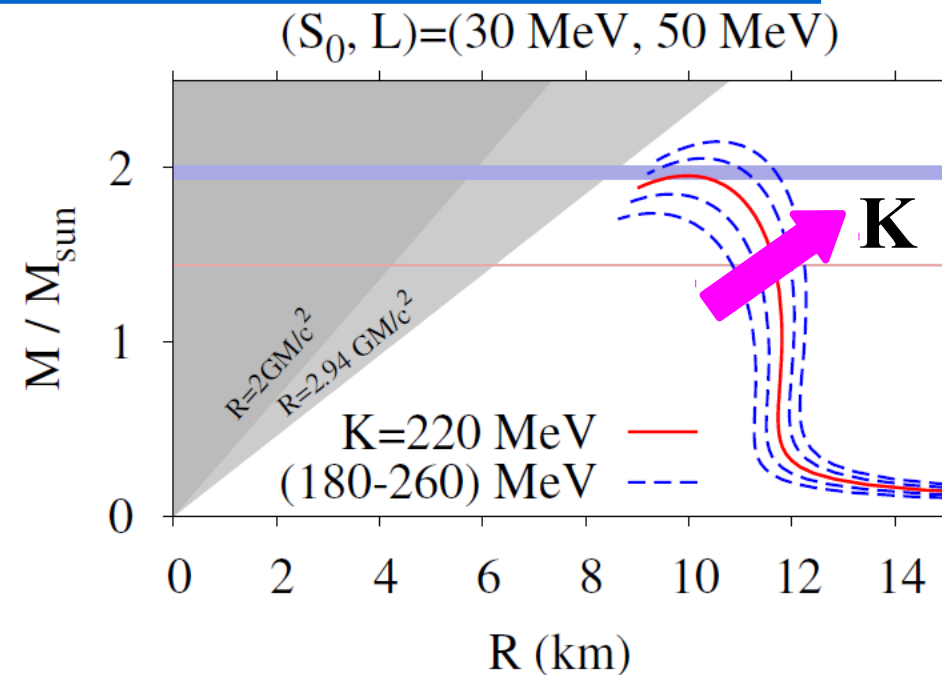
$$E_{\text{SNM}} = \frac{3}{5} E_F(\rho) + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \frac{\beta}{2 + \gamma} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1 + \gamma}$$

$K=220 \text{ MeV}, S_0=30 \text{ MeV}$



Simple parametrized EOS

- Larger $K \rightarrow M \uparrow, R \uparrow$
- Larger $S_0 \rightarrow R \downarrow$ at small M
- Larger L
 $\rightarrow R \uparrow(\downarrow)$ at large (small) M



対称エネルギーの実験的検証

- Nuclear Symmetry Energy workshop (← 1-2 年おきに開催)

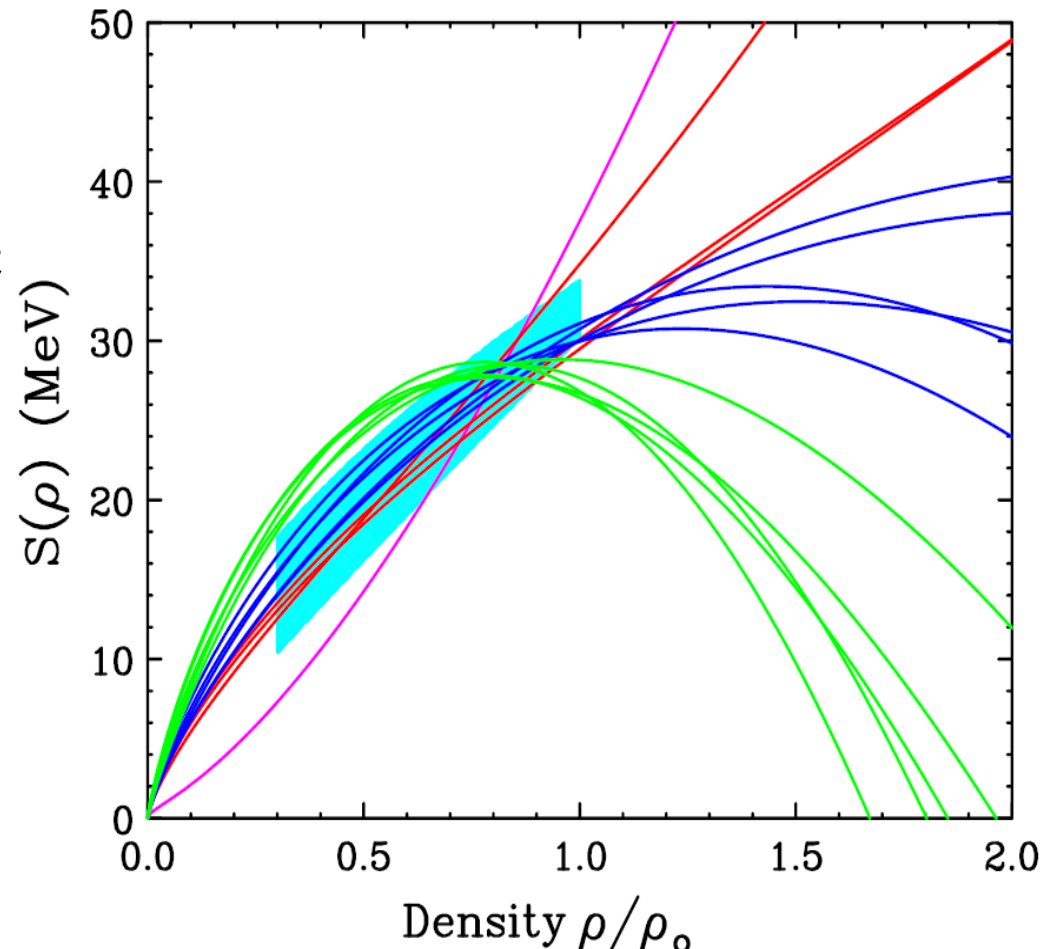
NuSym11 <http://www.smith.edu/nusym11>

$$E_{\text{sym}}(\rho_0) = 31-34 \text{ MeV}, L = 50-110 \text{ MeV}$$

多くの観測量から推定

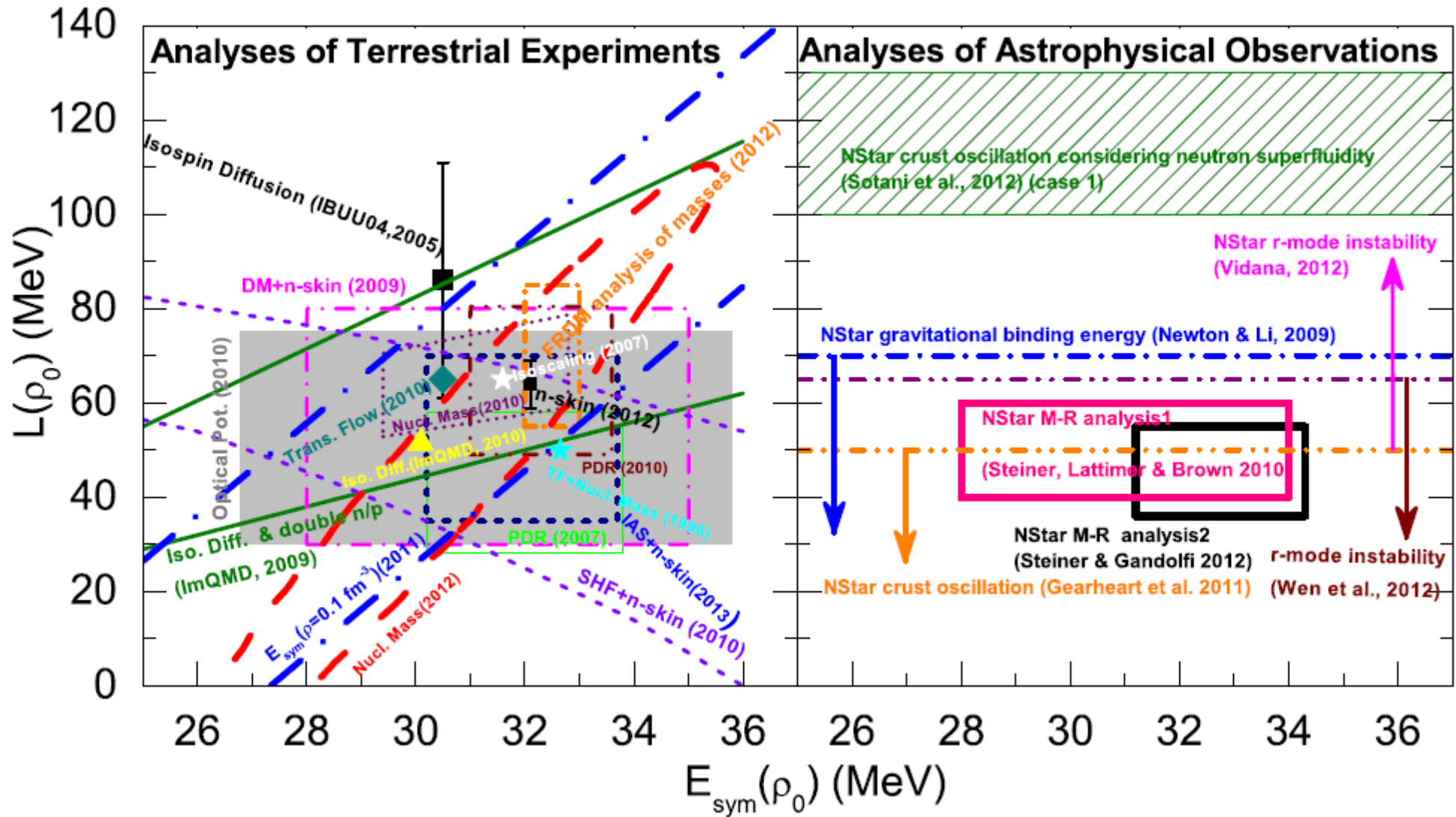
- 質量公式 *Moller ('10)*
- Isobaric Analog State
Danielewicz, Lee ('11)
- Pygmy Dipole Resonance
Carbone+ ('10)
- Isospin Diffusion
Tsang et al. ('04)
- Neutron Skin thickness
J.Zenihiro+ ('10)

- これらの多くは ρ_0 以下の密度での E_{sym} に敏感。



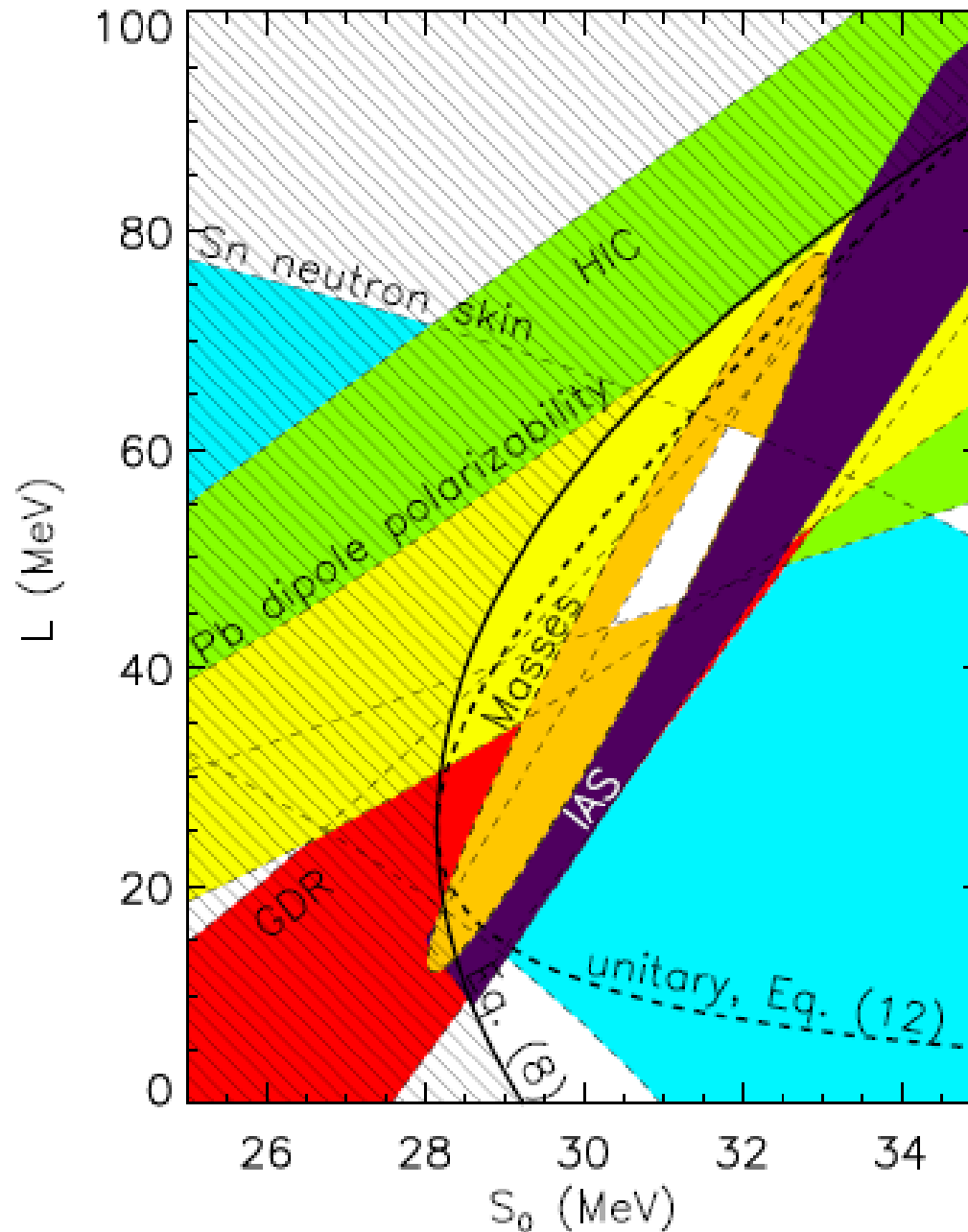
M. B. Tsang et al., Phys. Rev. C 86 (2012) 015803.

Nuclear Symmetry Energy (NuSYM 2013)



B. A. Li et al. ('13)

Nuclear Symmetry Energy



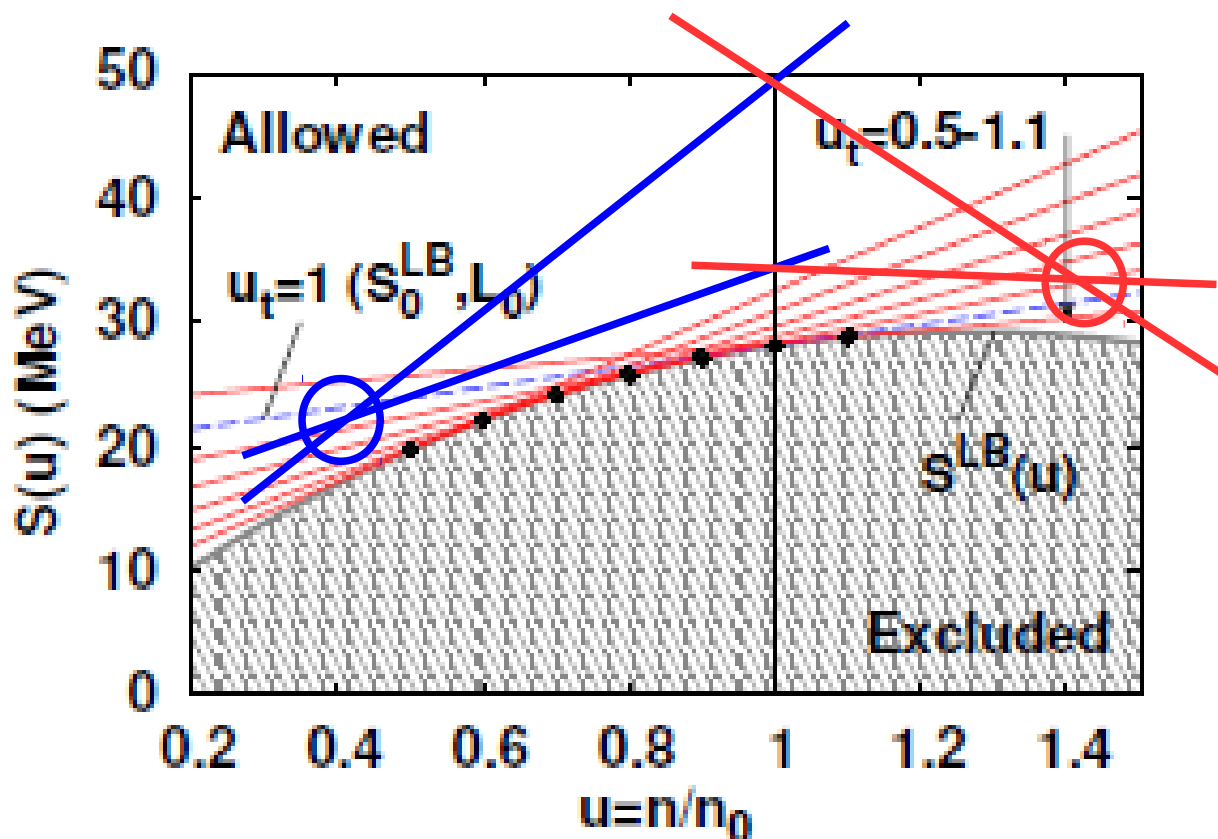
All Experiments
are consistent with
 $S_0=(30-32)$ MeV
 $L=(40-70)$ MeV

E.g. Sagawa @ NIC
→ $L=47$ MeV

*Lattimer, Lim ('13),
Lattimer, Steiner ('14)
Kolomeitsev, Lattimer,
AO, Tews ('16)*

S_0 と L の相関

- 低密度での対称エネルギーの大きさに敏感な観測量
→ S_0 と L に正の相関
- 高密度 ($\rho > \rho_0$) でのエネルギーの大きさに敏感な観測量
→ S_0 と L に負の相関



Skin Thickness & Dipole Polarizability

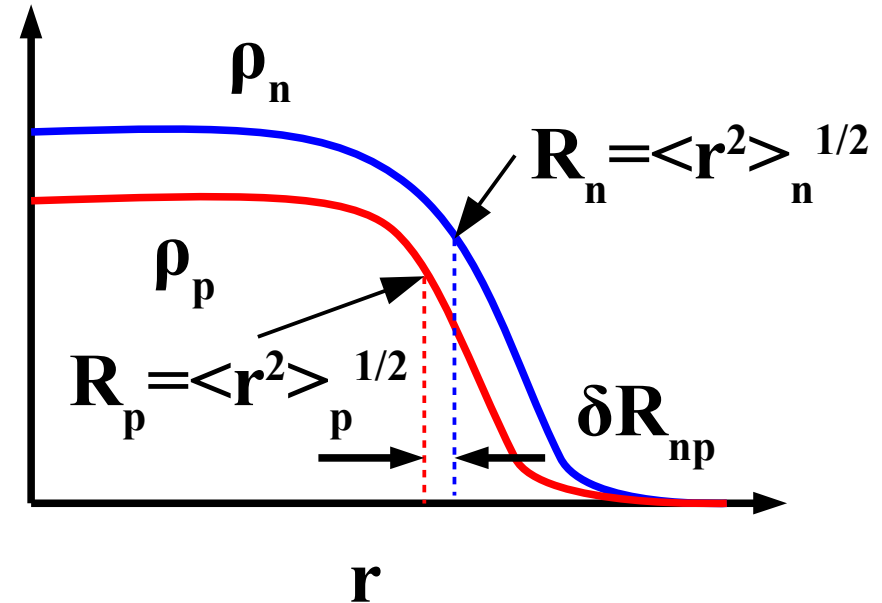
■ Skin Thickness δR_{np}

● Larger L

→ Small E_{sym} at low ρ

Large E_{sym} at high ρ

→ Larger δR_{np}



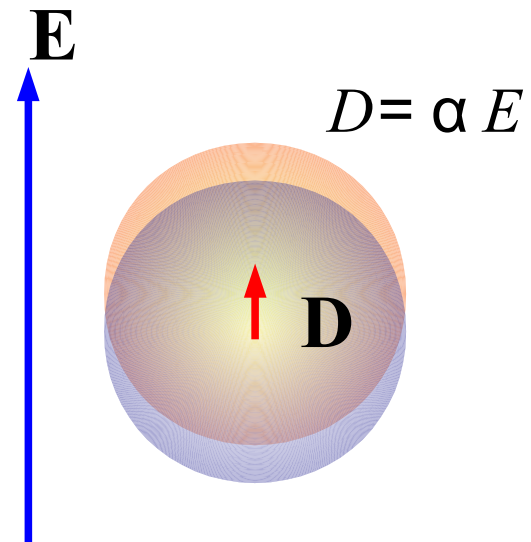
■ Electric Dipole Polarizability α

$$H = H_0 - e E \sum_{i \in p} x_i = H_0 - \hat{E} \hat{D}$$

$$|\psi\rangle = |0\rangle - \sum_{n>0} \frac{|n\rangle \langle n|V|0\rangle}{E_n - E_0} + O(E^2)$$

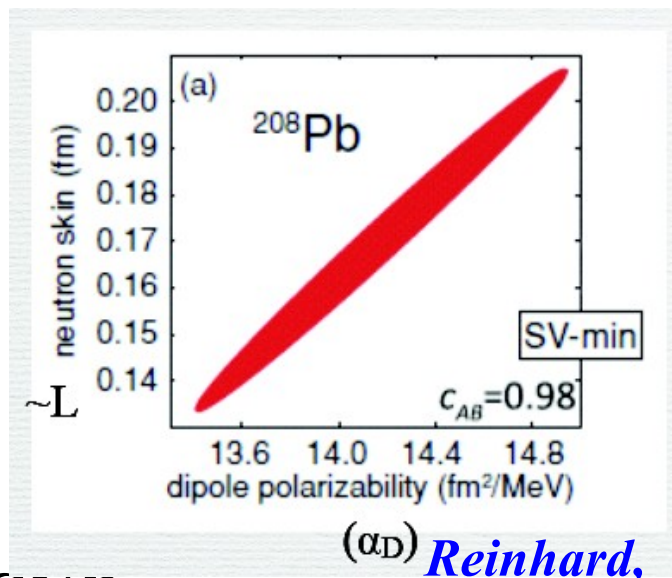
$$D = \langle \psi | \hat{D} | \psi \rangle = 2 E \sum_{n>0} \frac{\langle 0 | \hat{D} | n \rangle \langle n | \hat{D} | 0 \rangle}{E_n - E_0}$$

$$\alpha = \frac{8\pi}{9} \int \frac{dB(E1)}{\omega}$$

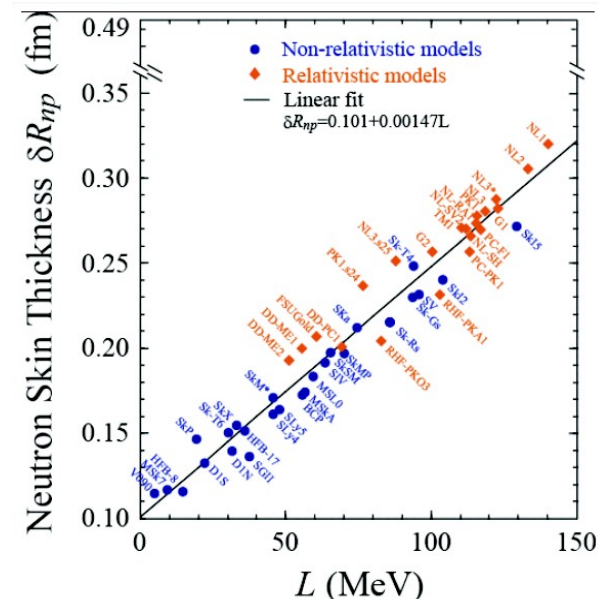


Skin Thickness & Dipole Polarizability

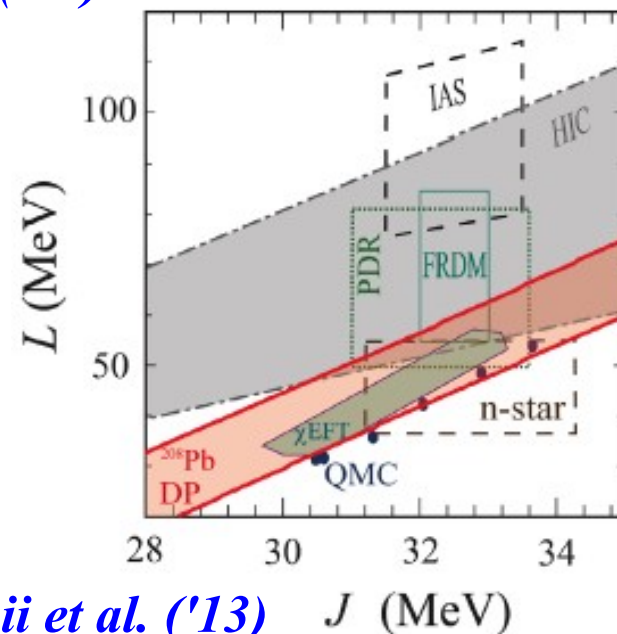
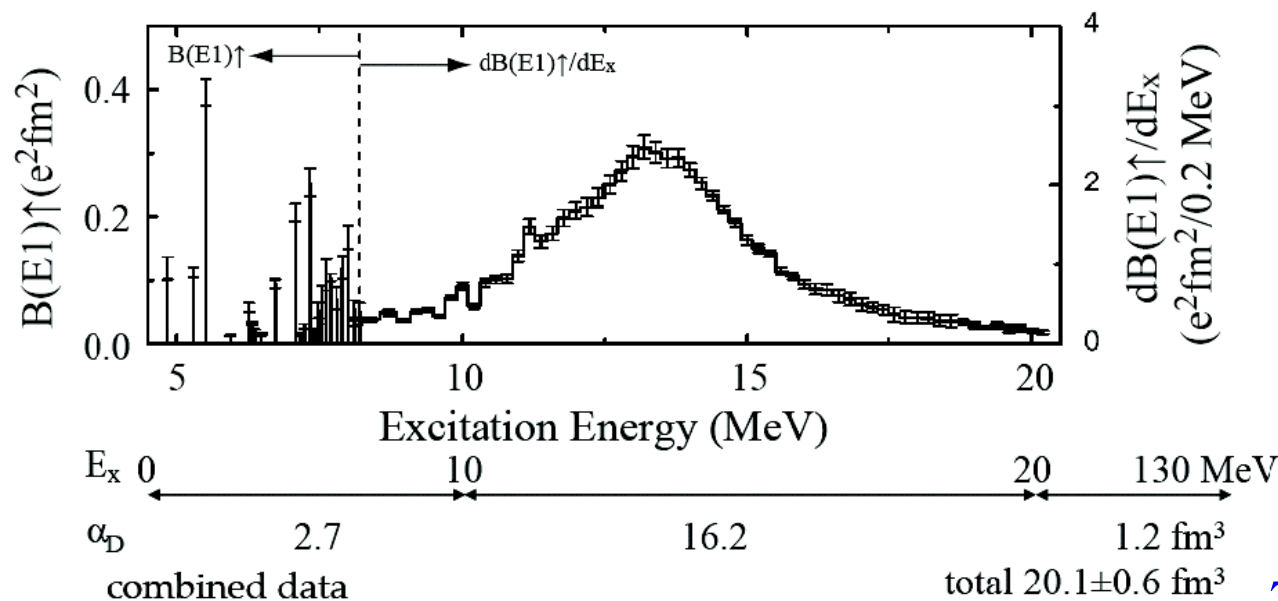
- Strong corr. btw α and skin thickness (smaller restoring force \rightarrow soft)
- Skin thickness is also correlated with L .
- Precise data from RCNP



(α_D) Reinhard, Nazarewicz ('10)



Roca-Maza et al. ('11)



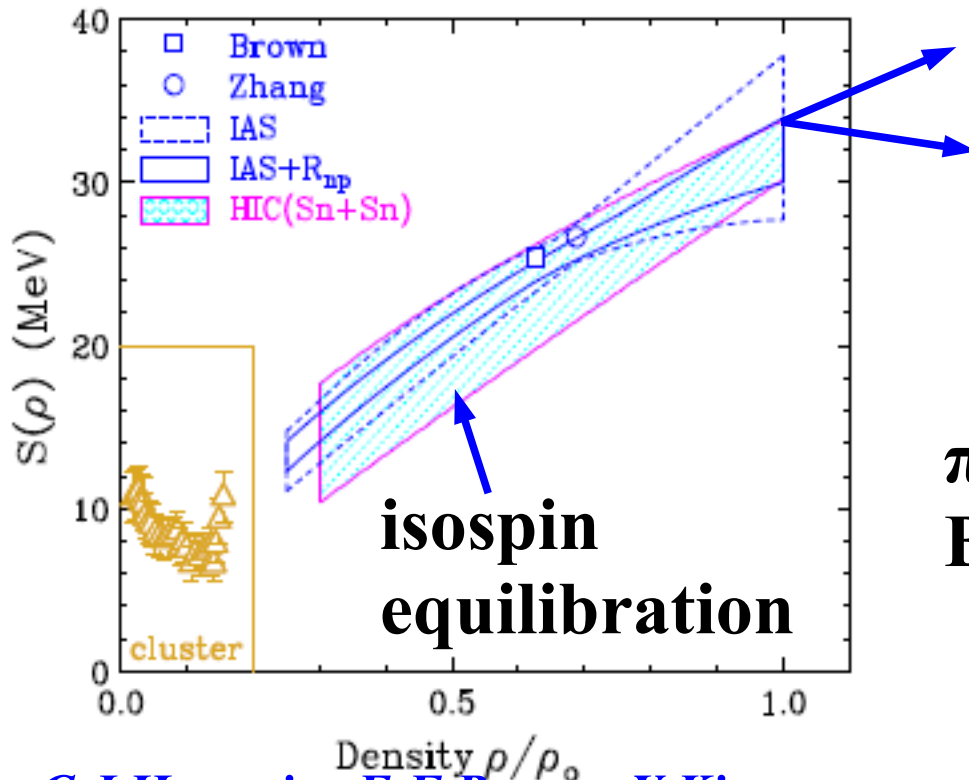
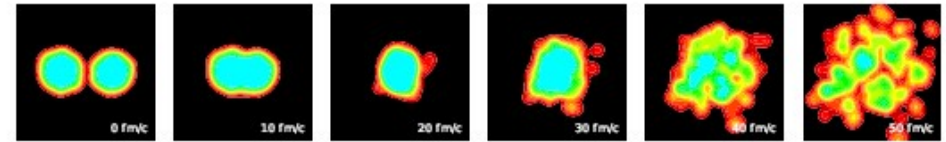
Tamii et al. ('13) J (MeV)

High Density Symmetry Energy

- Symmetry energy at $\rho=(2-4) \rho_0$ dominantly determines NS radius.

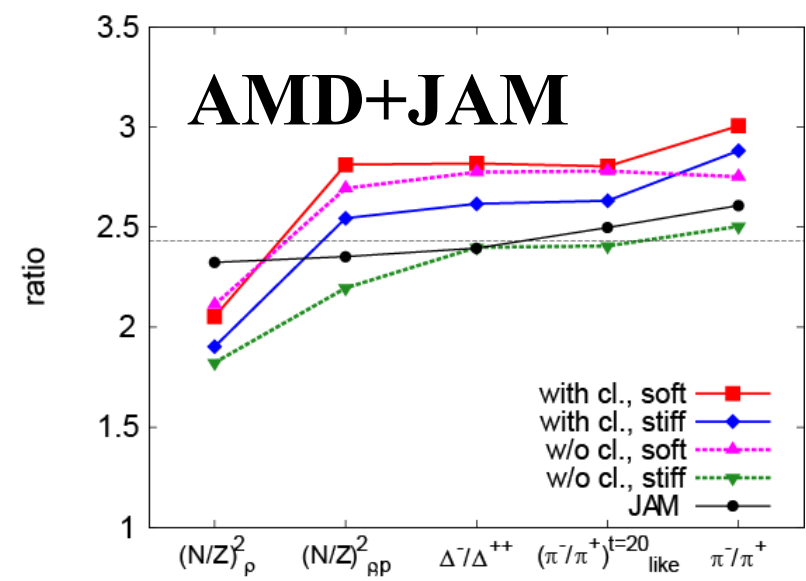
→ Central Heavy-Ion collisions at a few 100 MeV !

(Li, Trautmann, Murakami, Ono)



Let's wait for SπRIT B01 results (Murakami) ! More theor. work needed.

π^-/π^+
B.A.Li



C.J.Horowitz, E.F.Brown, Y.Kim, W.G.Lynch, R.Michaels, A. Ono, J. Piekarewicz, M. B. Tsang, H.H.Wolter (NuSYM13), JPG41('14) 093001

Ikeno, Ono, Nara, AO ('16)

冷却原子と中性子物質と対称エネルギー

*E. E. Kolomeitsev, J. M. Lattimer, AO, I. Tews,
arXiv:1611.07311*

現実的な中性子物質 EOS 構築へ向けて

■ 中性子過剰物質物質のキーワード

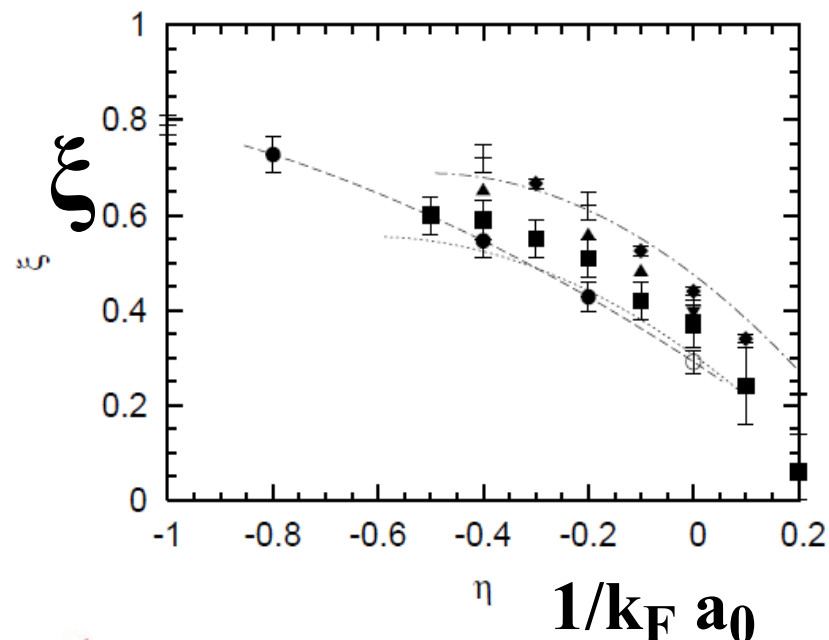
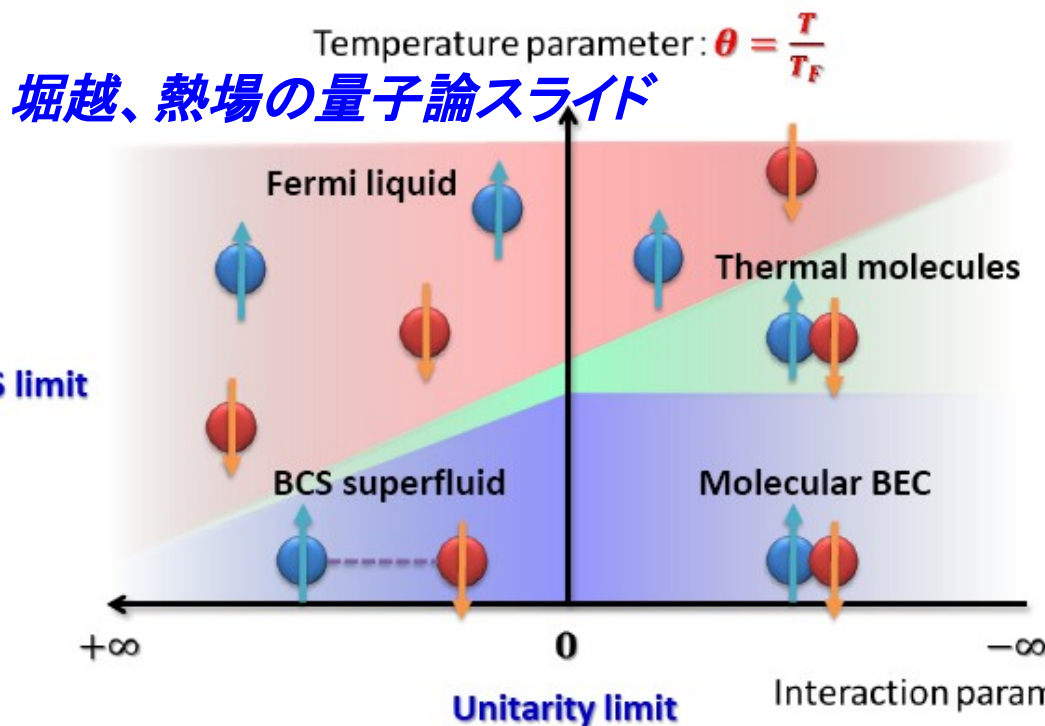
= 対称エネルギー・微視的相互作用・普遍性

● 低密度純中性子物質: 第一原理計算が可能 (e.g. Abe, Seki ('09); Takano)

● 大きな散乱長 ($a_0 \sim -16$ fm) \rightarrow 中性子物質 \sim ユニタリーガス

$$E^{Unitary} = \xi E^{Free} \quad \xi \approx 0.4 \text{ (Bertsch parameter)}$$

\rightarrow 理論計算手法のテスト、*finite* a_0 , r_{eff} を含む普遍的関数の探索



Abe, Seki ('09)

Another way to use Cold Atom EOS

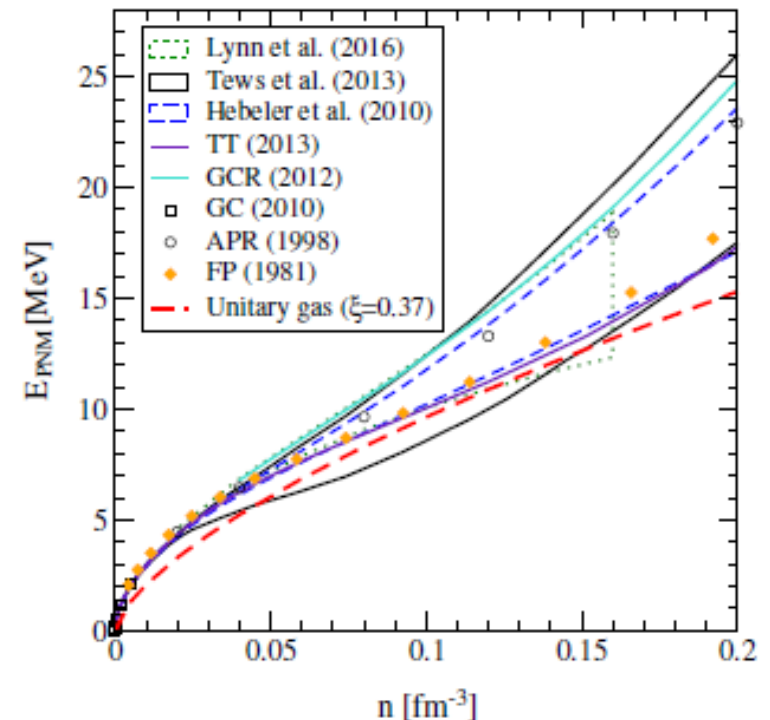
- Unitary gas EOS は ab initio pure neutron matter EOS の lower bound を与えているように見える。(Conjecture)

$$E_{\text{PNM}}(n) \geq E_{\text{UG}}(n)$$

$$E_{\text{UG}}(u) = \frac{3}{5} E_{\text{F}}(n) \xi = \frac{3\hbar^2 k_{\text{F}}^2}{10m_{\text{n}}} \xi = E_{\text{UG}}^0 u^{2/3}$$

$$(\xi \sim 0.37, u = n/n_0)$$

- これが正しいなら、対称エネルギーへの制限が与えられる！



Kolomeitsev, Lattimer, AO, Tews,
arXiv:1611.07311

Unitary Gas Constraint on Symmetry Energy

- 対称エネルギー = 純中性子物質エネルギー - 対称核物質エネルギー

$$S(u) = E_{\text{PNM}}(u) - E_{\text{SNM}}(u)$$

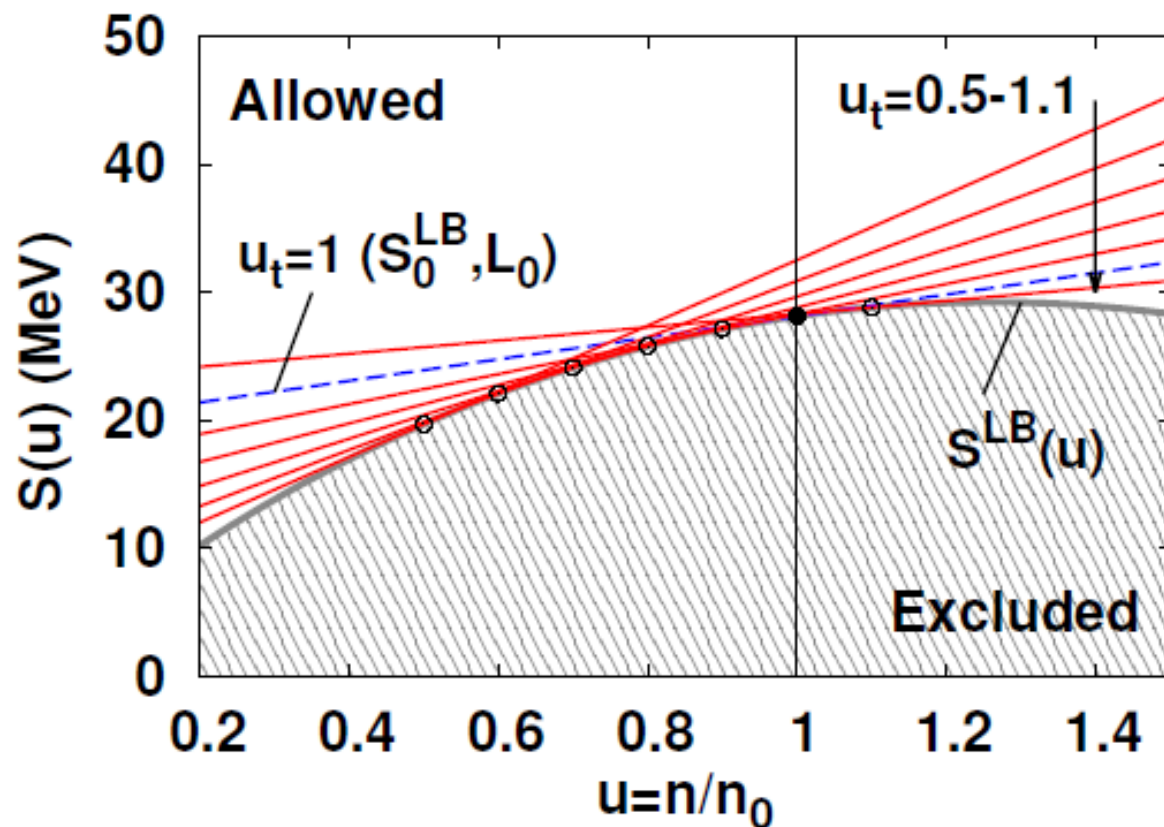
$$E_{\text{SNM}}(u) = E_0 + K (u - 1)^2 / 18 + \mathcal{O}[(u - 1)^3]$$

$$S(u) \geq E_{\text{UG}}^0 u^{2/3} - \left[E_0 + \frac{K}{18} (u - 1)^2 \right] \equiv S^{\text{LB}}(u)$$

- S_0 への制限

$$S_0 \geq E_{\text{UG}}^0 - E_0 \equiv S_0^{\text{LB}}$$

- $S_0 > S_0^{\text{LB}}$ では、L への制限



Kolomeitsev, Lattimer, AO, Tews,
arXiv:1611.07311

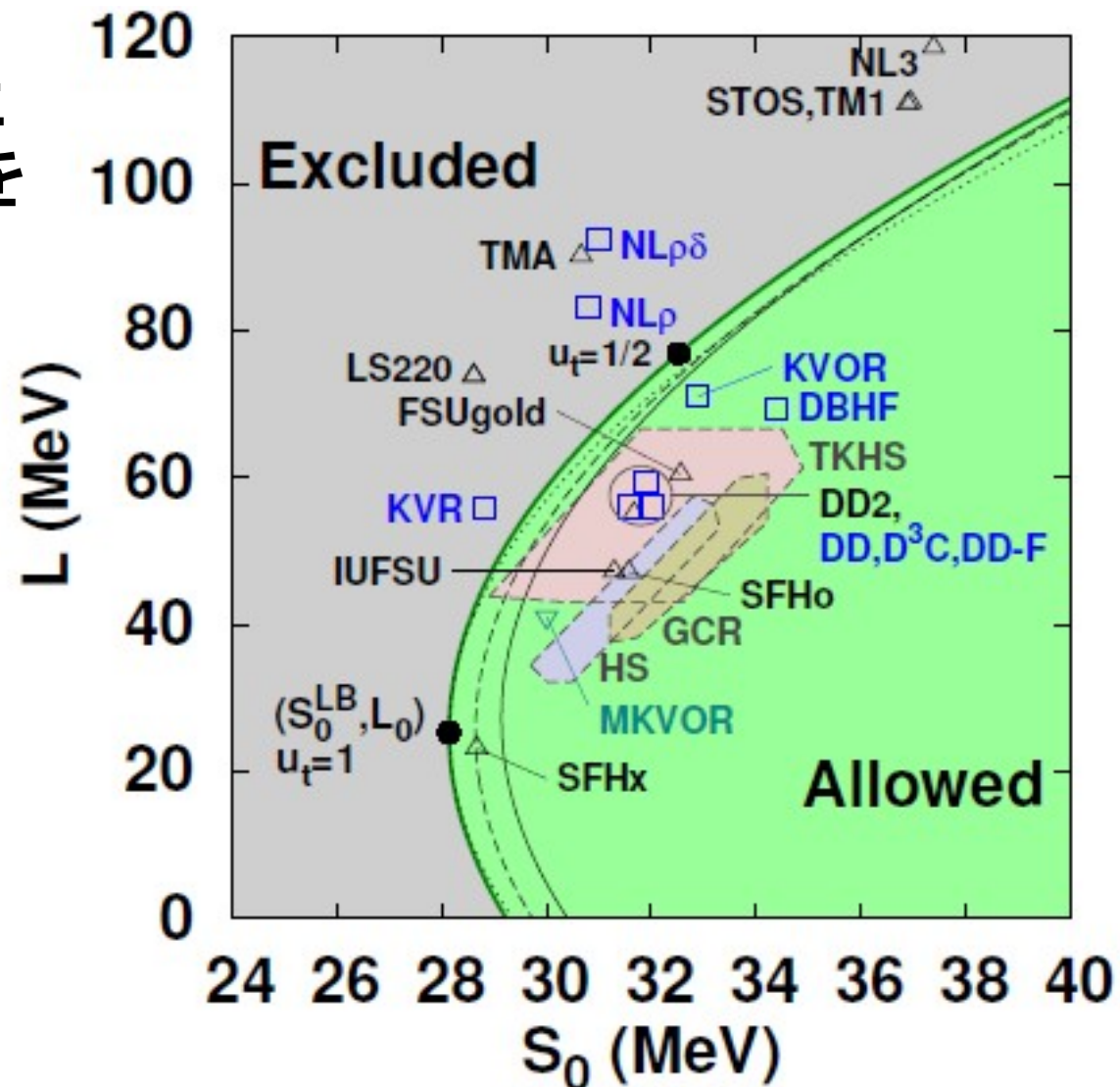
Unitary Gas Constraint on Symmetry Energy Parameters

- 最も conservative なパラメータ

$$E_0 = -15.5 \text{ MeV}, n_0 = 0.157 \text{ fm}^{-3}, K = 270 \text{ MeV}, \xi = 0.365$$

- Unitary Gas からの制限は、コンパクト天体現象の計算に用いられている多くの EOS を rule out

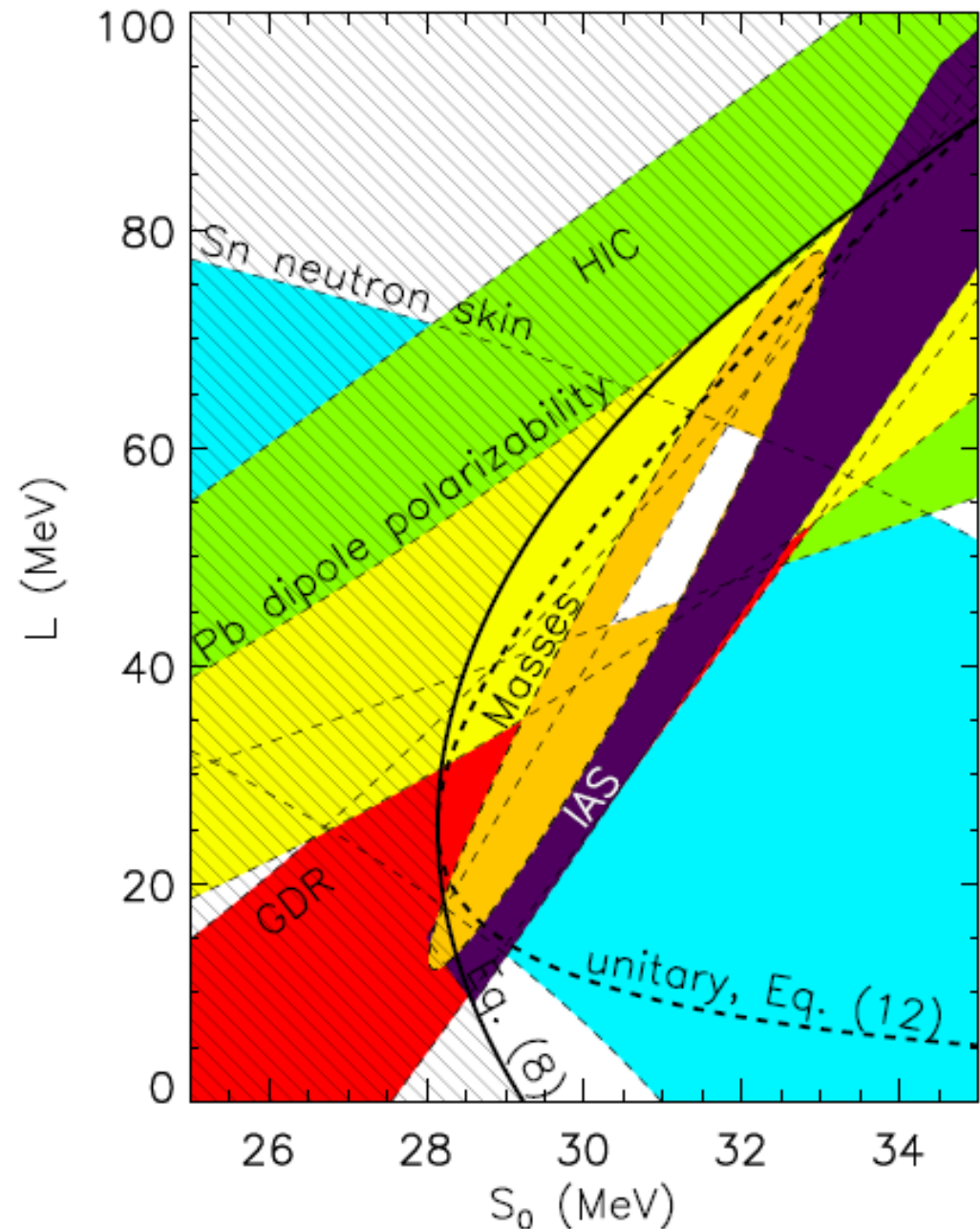
*Fisher et al. ('14),
Klahn et al. ('06)*



*Kolomeitsev, Lattimer, AO, Tews,
arXiv:1611.07311*

Unitary Gas Constraint vs Experimental Constraints

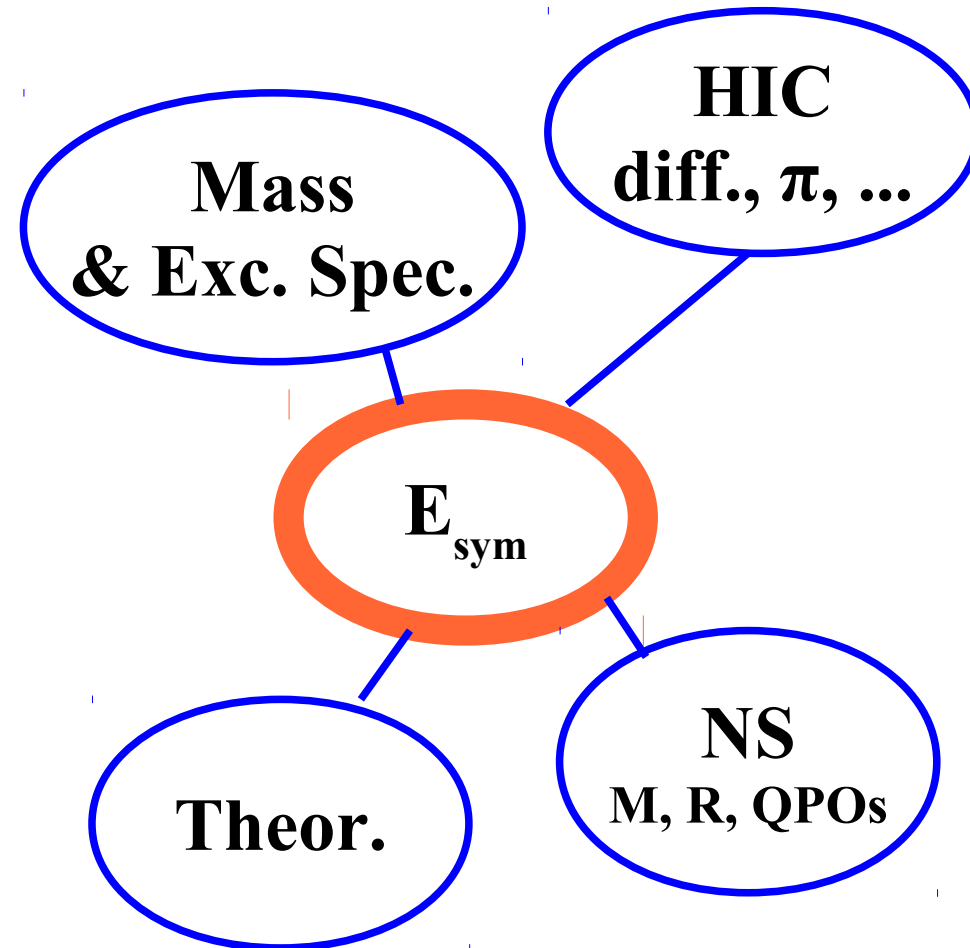
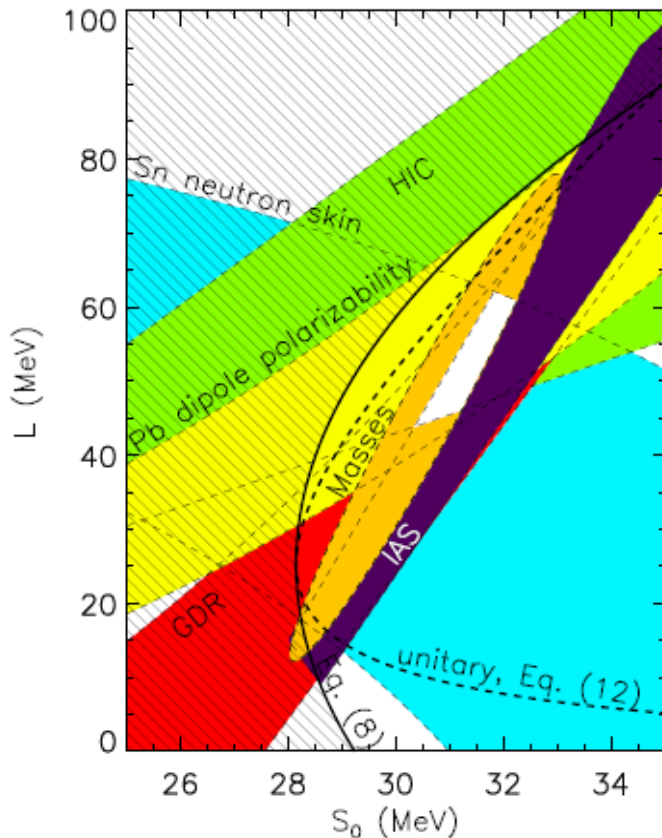
- Unitary gas constraint と実験による制限は consistent (残念ながら、より強い制限を与えることはできなかった。)



Kolomeitsev, Lattimer, AO, Tews,
arXiv:1611.07311

対称エネルギーのまとめ

- 対称エネルギーは中性子星物質 EOS に決定的、かつ原子核の様々な性質に関連する。
- 理論・実験による研究が進んでいる。
- 対称エネルギーを決める新しい（かつ精度のよい）観測を思いついたら、早めに提案を。

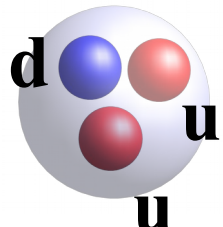


重い中性子星とハイペロン・パズル

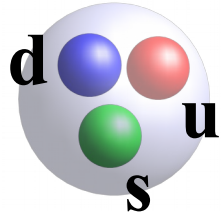
中性子星コアの組成

- 中性子星コアでは様々な粒子・相が現れると期待される！

- Strange Hadrons

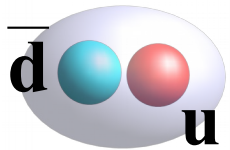


proton

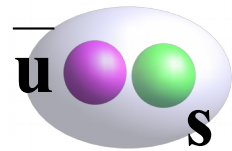


Λ hyperon

- Meson condensate (K , π)



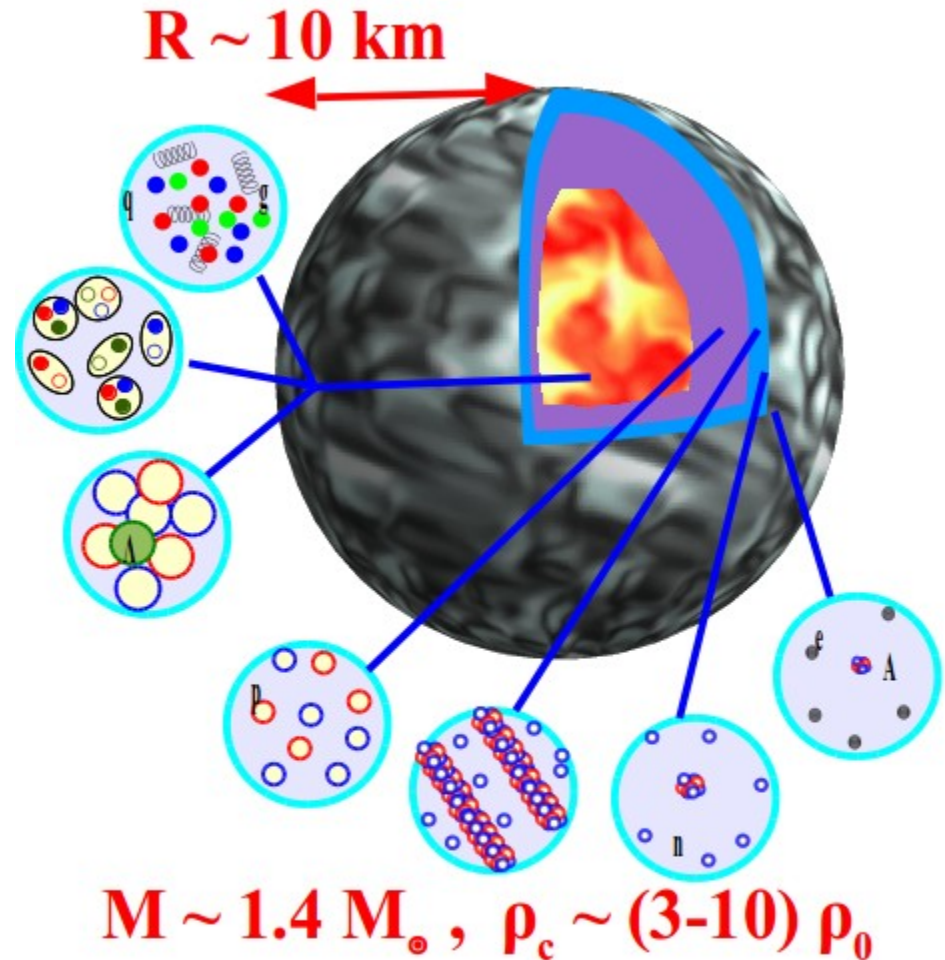
π



anti kaon

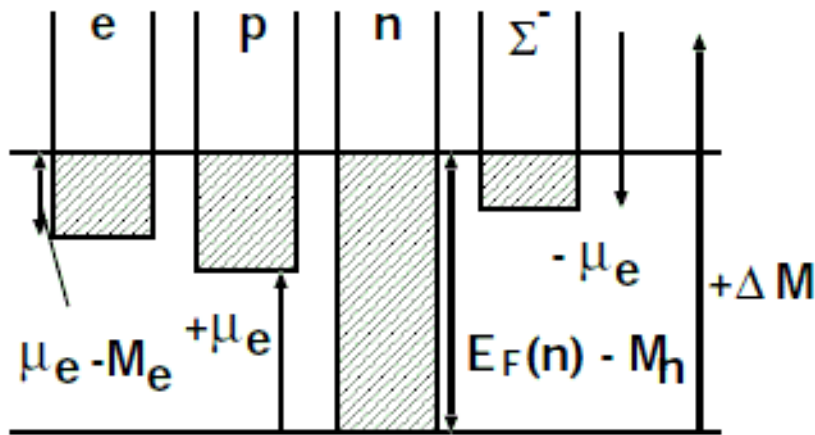
- Quark matter

- Quark pair condensate (Color superconductor)

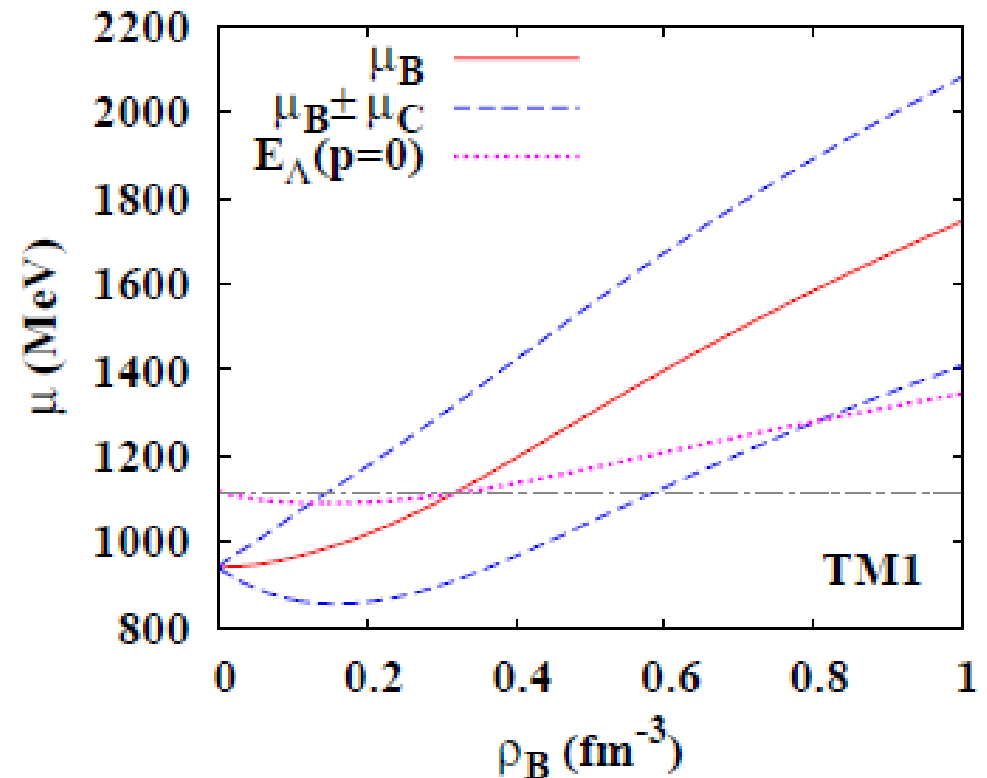


高密度物質におけるハイペロン

- 高密度 → 大きな中性子フェルミエネルギー → 様々な粒子・状態？
 - Nucleon superfluid (3S_1 , 3P_2), Pion condensation, Kaon condensation, Baryon Rich QGP, Color SuperConductor (CSC), Quarkyonic Matter, ...
 - Hyperons
 - Tsuruta, Cameron (66); Langer, Rosen (70); Pandharipande (71); Itoh(75); Glendenning; Weber, Weigel; Sugahara, Toki; Schaffner, Mishustin; Balberg, Gal; Baldo et al.; Vidana et al.; Nishizaki, Yamamoto, Takatsuka; Kohno, Fujiwara et al.; Sahu, Ohnishi; Ishizuka, Ohnishi, Sumiyoshi, Yamada; ...

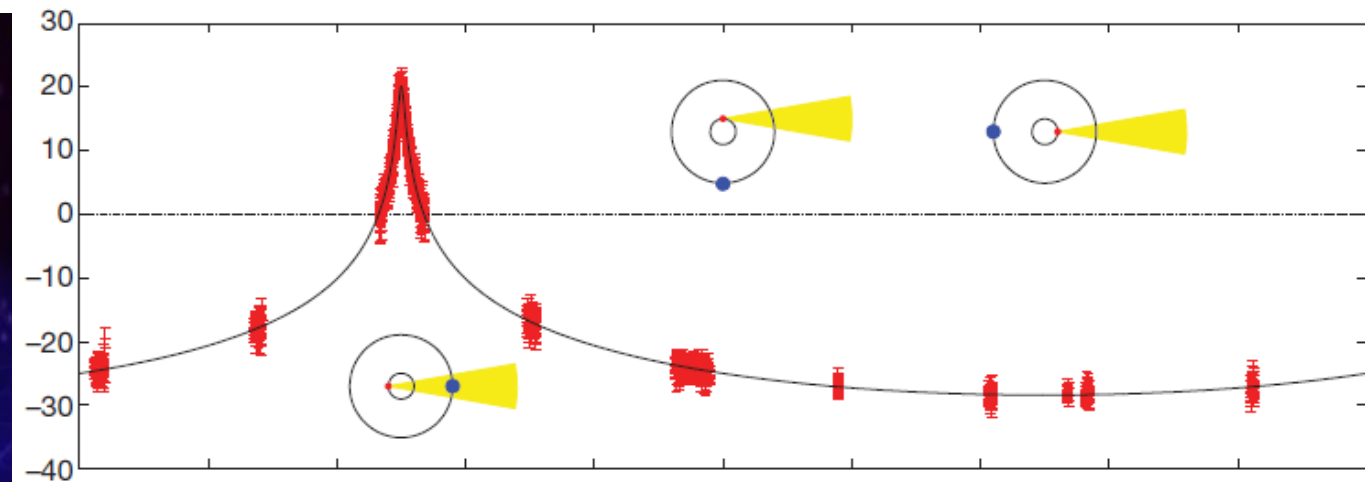
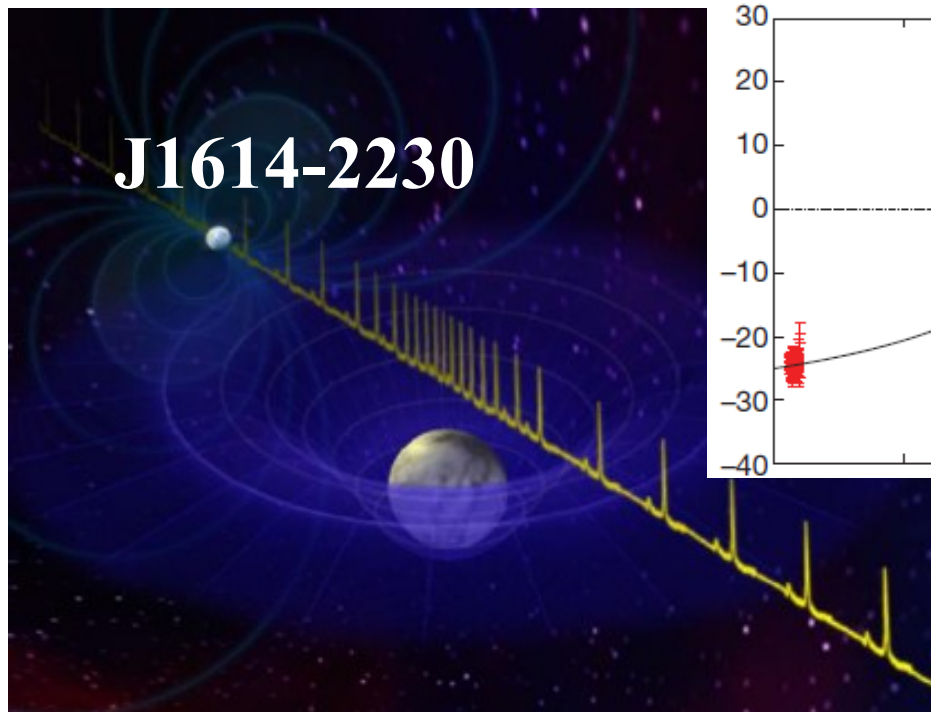


Chemical potential overtakes Λ mass → appearance of Λ



重い中性子星 ($M \sim 2 M_{\odot}$)

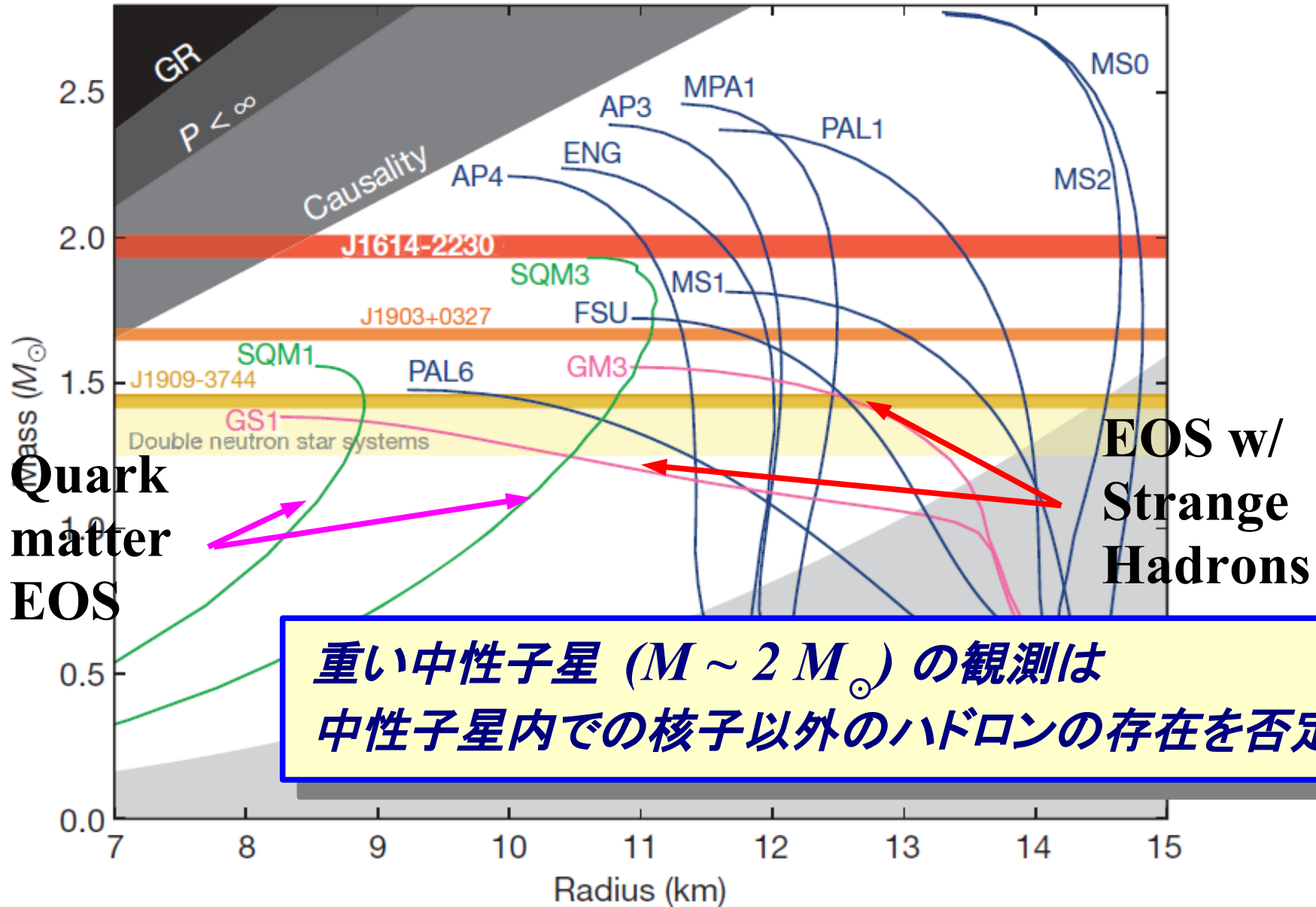
- 一般相対論効果による Time delay
 - Einstein delay : パルサーの運動による遅れ
 - Shapiro delay : 伴星の重力場による遅れ
- 重い中性子星の発見 (J1614-2230)
 - Shapiro delay による質量の評価 $M = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$
Demorest et al. (2010)



$$\Delta_S = -2m \left[\ln \frac{r}{a} + \ln (1 - \sin i \sin \phi) \right]$$

Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081.

ハイペロン・パズル



重い中性子星 ($M \sim 2 M_{\odot}$) の観測は
 中性子星内での核子以外のハドロン存在を否定する？

PSR J1614-2230: $1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$. *Demorest et al., Nature 467('10)1081 (Oct.28, 2010).*

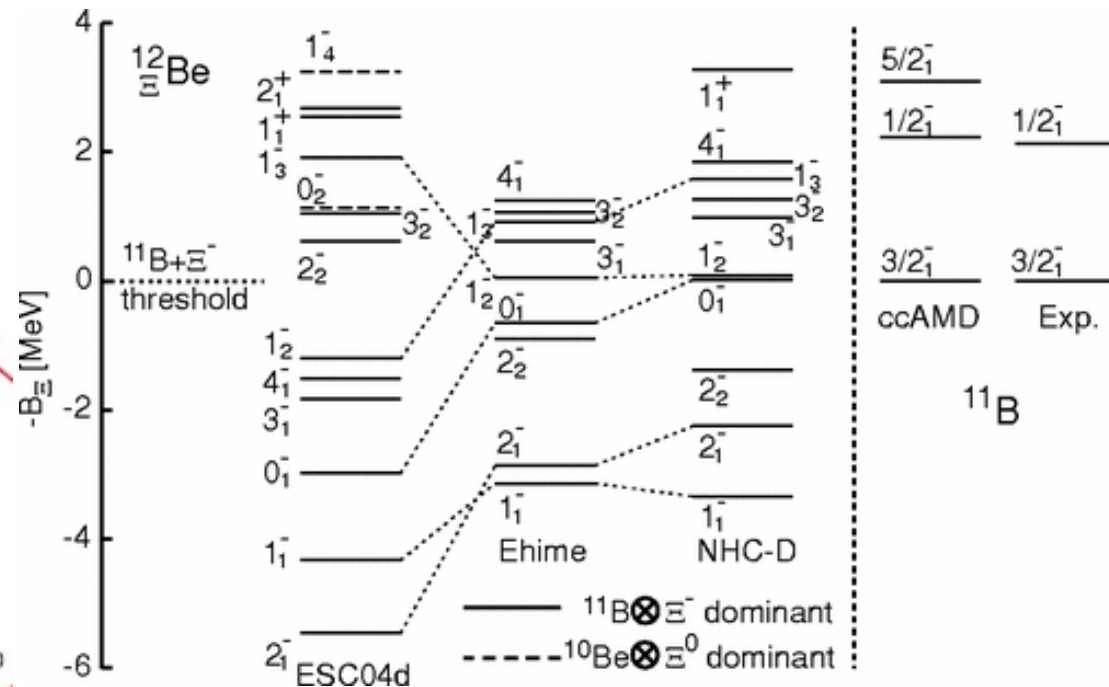
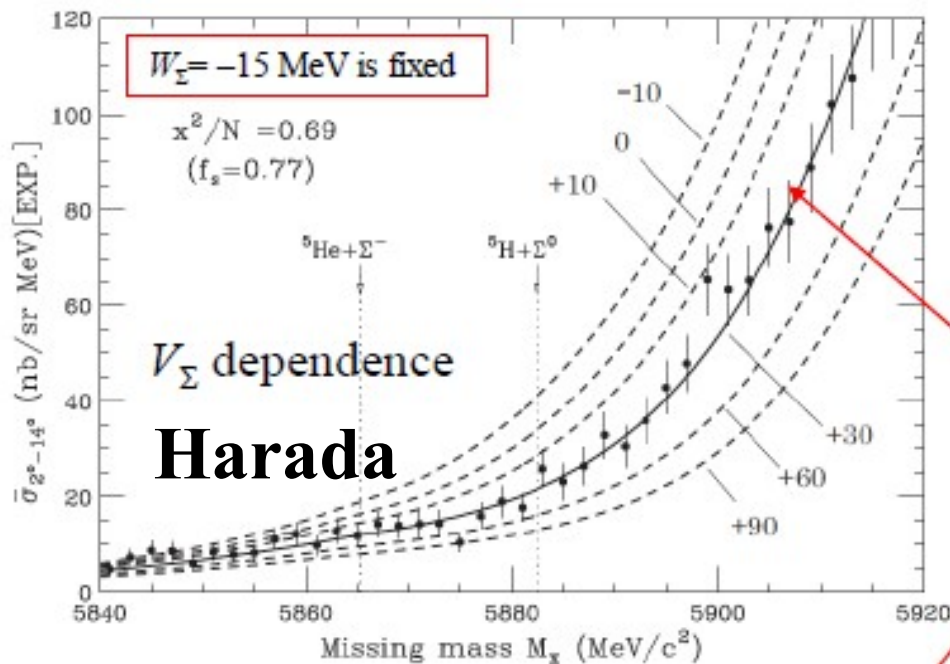
PSR J0348+0432: $2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$. *Antoniadis et al., Science 340('13)1233232.*

これまでに見落としがあったのか？

- 核物質中のハイペロン・ポテンシャル？
 - $U_{\Lambda}(\rho_0) \sim -30 \text{ MeV}$, $U_{\Sigma}(\rho_0) > +20 \text{ MeV}$, $U_{\Xi}(\rho_0) \sim -14 \text{ MeV}$
- ハイペロン・ハイペロン相互作用？
 - Nagara event $\rightarrow \Lambda\Lambda$ ポテンシャルは弱い引力。
 - 高密度で斥力的となる？
- 反 K 中間子と原子核のポテンシャル？
- Three-baryon (3B) interaction ?
- Quark matter core ?
- Modified gravity ?

核内での Σ 、 Ξ のポテンシャル？

- 新しい Σ 生成実験： ${}^6\text{Li}(\pi^-, \text{K}^+)\Sigma^- {}^5\text{He}$ と理論分析 (A02, Harada)
 $\rightarrow U_\Sigma \sim +30 \text{ MeV}$ (consistent)
- Ξ ハイパー核生成実験 $\rightarrow \text{B.E.} = \blacksquare \text{ MeV} \ \& \ (4 \text{ or } 1) \text{ MeV}$
 (A01, 山本さんの研究)
 \rightarrow これまで想定されていたポテンシャル ($U \sim -14 \text{ MeV}$) よりも深い



Matsumiya, Tsubakihara, Kimura, Dote, AO ('11)

A. Ohnishi @ NSmatter School, Fukushima, Feb.16, 2017 60

$\Lambda\Lambda$ ポテンシャル?

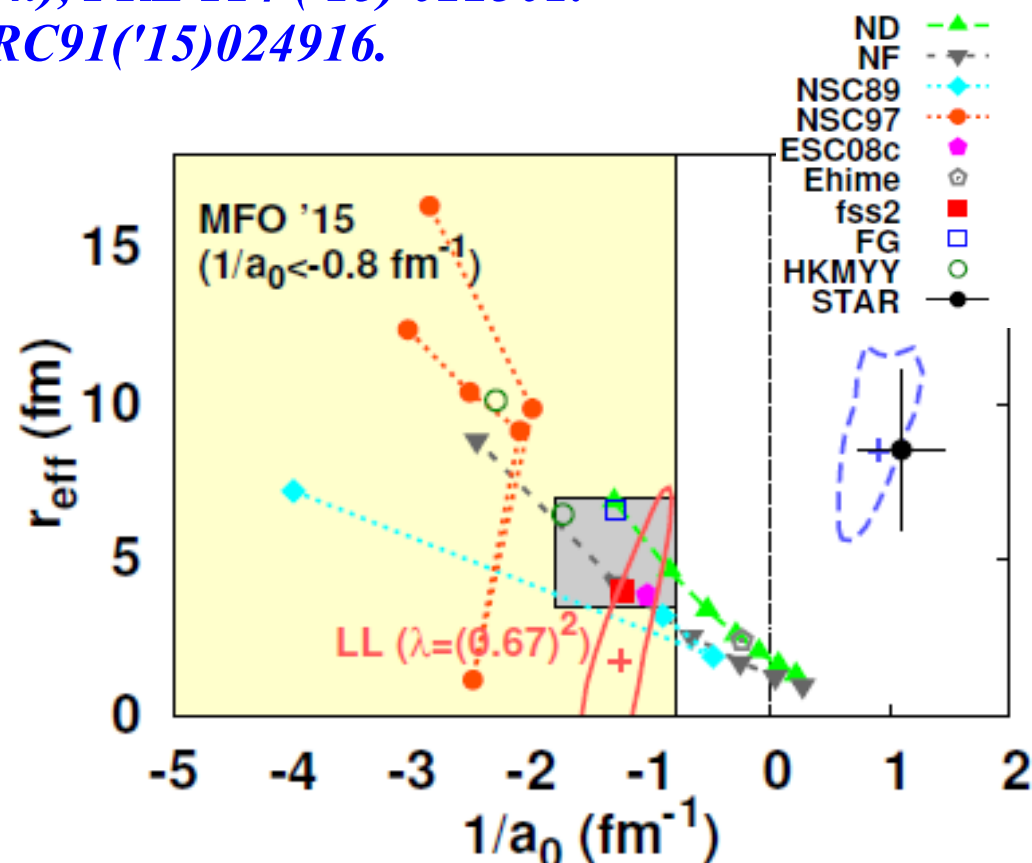
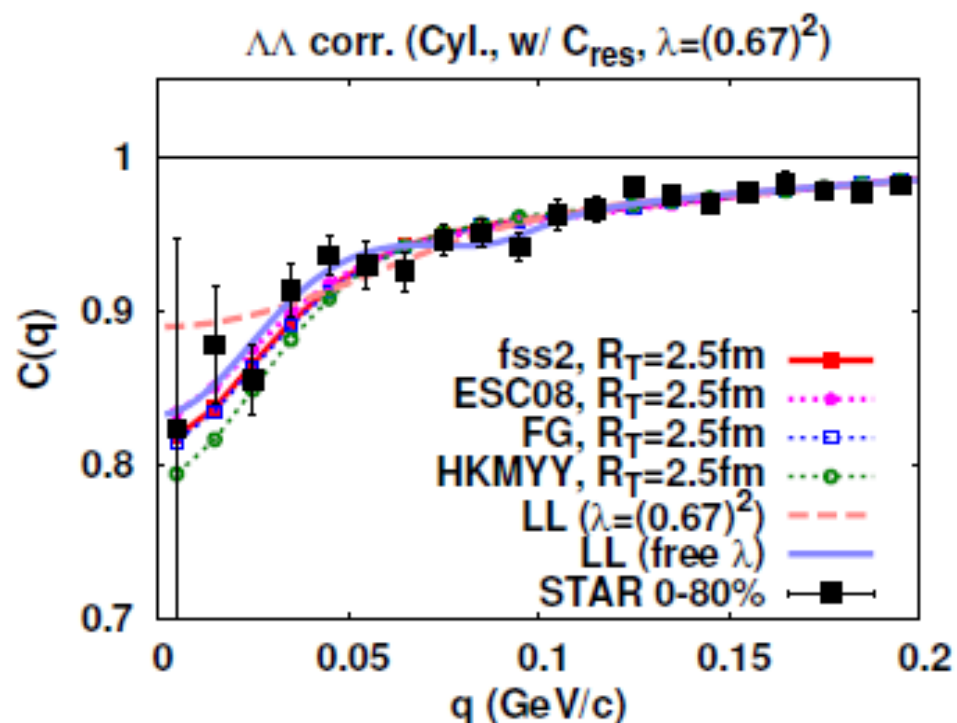
- Nagara Event $\rightarrow a_0(\Lambda\Lambda) = -0.575$ fm or -0.77 fm

Hiyama, Kamimura, Motoba, Yamada, Yamamoto ('02), Filikhin, Gal ('02)

- 新しい観測量: $\Lambda\Lambda$ correlation from HIC (Morita)
 $\rightarrow -1.25$ fm $< a_0(\Lambda\Lambda) < 0$ (Consistent with Nagara)

Exp: Adamczyk et al. (STAR Collaboration), PRL 114 ('15) 022301.

Theor.: Morita et al., T. Furumoto, AO, PRC91('15)024916.



これまでに見落としがあったのか？

- 核物質中のハイペロン・ポテンシャル？ ($U_{\Sigma} \sim +30 \text{ MeV}$)
 - $U_{\Lambda}(\rho_0) \sim -30 \text{ MeV}$, $U_{\Sigma}(\rho_0) > +20 \text{ MeV}$, $U_{\Xi}(\rho_0) \sim -14 \text{ MeV}$
- ハイペロン・ハイペロン相互作用？ ($U < -14 \text{ MeV}$)
 - Nagara event $\rightarrow \Lambda\Lambda$ ポテンシャルは弱い引力。OK
 - 高密度で斥力的となる？
- 反 K 中間子と原子核のポテンシャル？

- Three-baryon (3B) interaction ?
- Quark matter core ?
- Modified gravity ?

■ Three-baryon (3B) interaction ?

● “Universal” 3B repulsion

Nishizaki, Takatsuka, Yamamoto ('02), Tamagaki ('08), Yamamoto, Furumoto, Yasutake, Rijken ('13)

● Repulsive Λ NN potential (or density dep. Λ N pot.)

Lonardonì, Lovato, Gandolfi, Pederiva ('15), Togashi, Hiyama, Yamamoto, Takano ('16), Tsubakihara, Harada, AO ('16)

● Medium modification of baryons (Quark Meson Coupling model)

J.Rikovska-Stone, P.A.M.Guichon, H.H.Matevosyan, A.W.Thomas ('07), Miyatsu, Yamamuro, Nakazato ('13)

■ Quark matter NS core ?

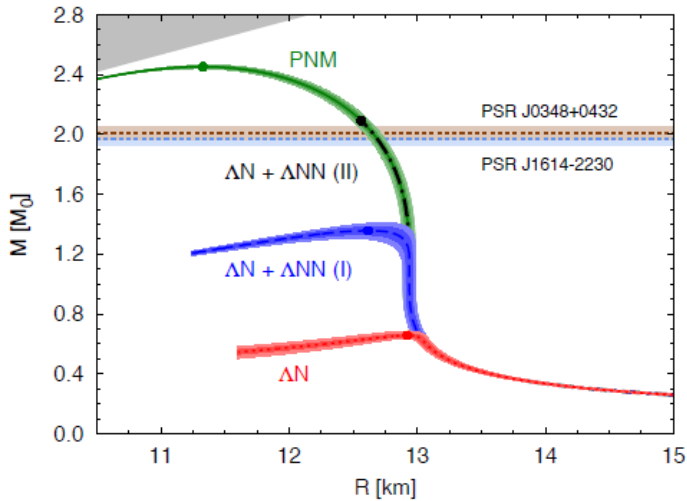
● First order phase transition

L. Bonanno, A. Sedrakian, Astron. Astrophys. 539 (2012) A16; M. Bejger, D. Blaschke, P. Haensel, J. L. Zdunik, M. Fortin, arXiv:1608.07049.

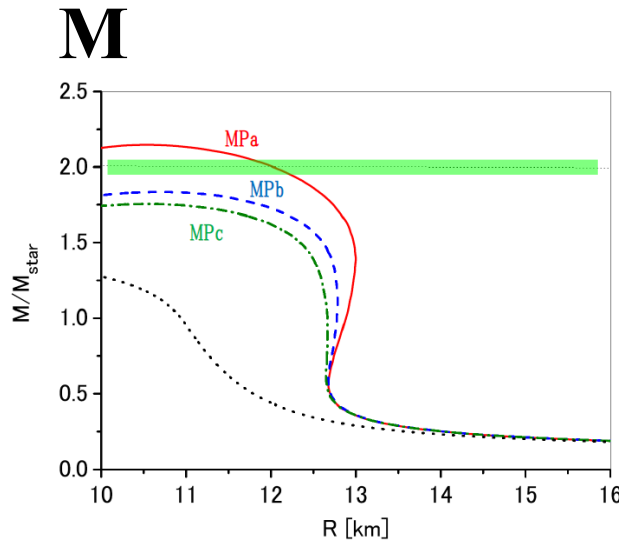
● Crossover transition to quark matter *Masuda, Hatsuda, Takatsuka ('12)*

■ Modified Gravity *Astashenok et al. ('14), M.-K. Cheoun's talk*

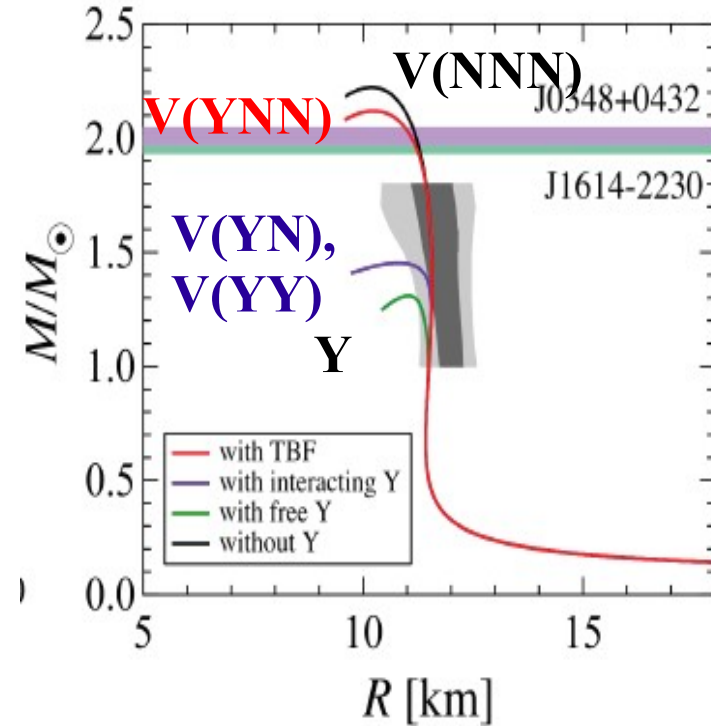
Hyperon Puzzle



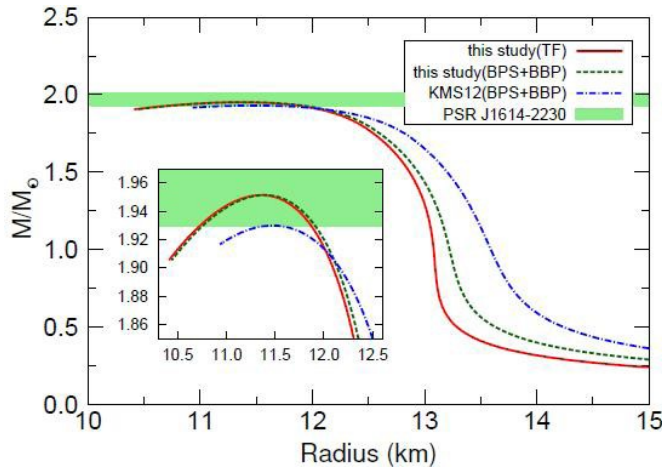
*Lonardonì, Lovato,
Gandolfi, Pederiva ('15),*



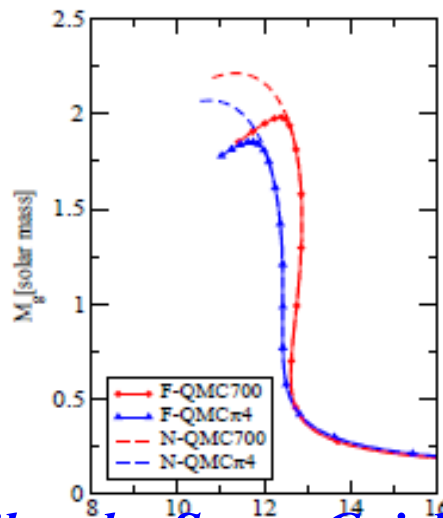
*Yamamoto, Furumoto,
Yasutake, Rijken ('13)*



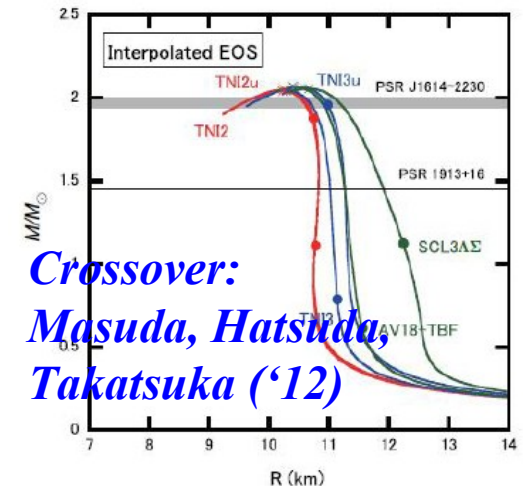
*Togashi, Hiyama, Takano,
Yamamoto ('16).*



*QMC, Miyatsu, Yamamuro,
Nakazato ('13)*



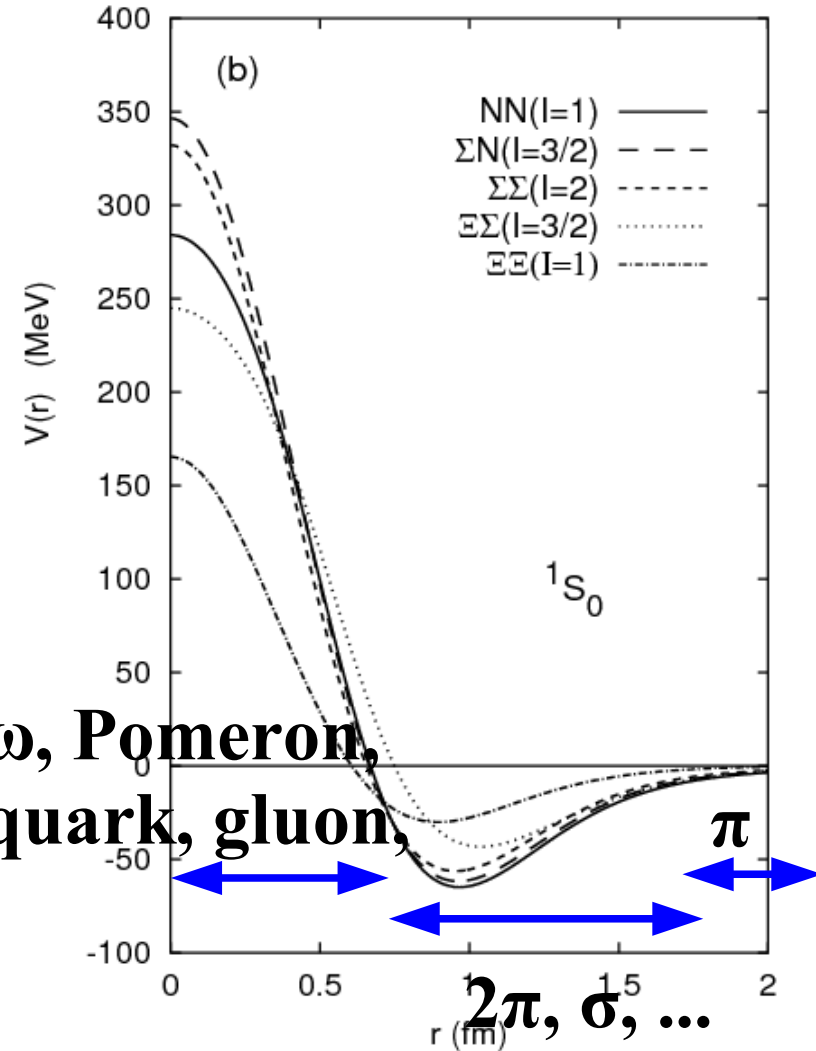
*Rikovska-Stone, Guichon,
Matevosyan, Thomas ('07),*



*Crossover:
Masuda, Hatsuda,
Takatsuka ('12)*

3 体斥力の起源は？

- 短距離の 2 体斥力 ($r < 0.6$ fm) の起源
vector boson exch., Pomeron exch.,
quark exclusion + one gluon exch., ...



*We may need quark-gluon DOF
to understand 3B repulsion.*

→ *Multi-pomeron exch.*
(Yamamoto, Rijken),
Lattice QCD 3B force
(HAL QCD),
Quark Cluster model
(Nakamoto)

*Fujiwara, Suzuki,
Nakamoto ('07)*

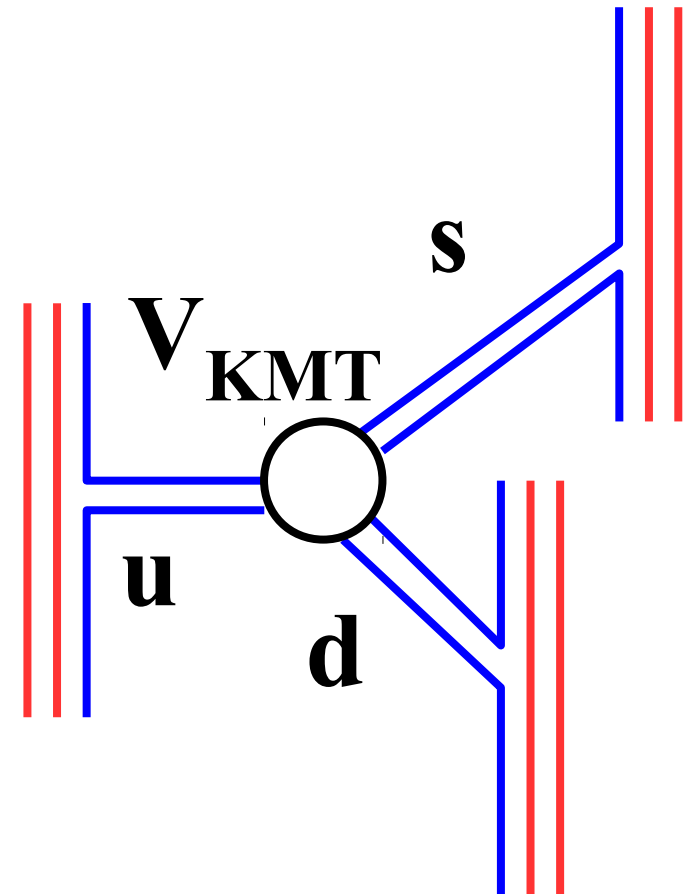
From 3-quark int. to 3B force

■ KMT interaction

Kobayashi, Maskawa ('70), 't Hooft ('76)

$$\mathcal{L} = g_D (\det \Phi + \text{h.c.}) , \quad \Phi_{ij} = \bar{q}_j (1 - \gamma_5) q_i$$

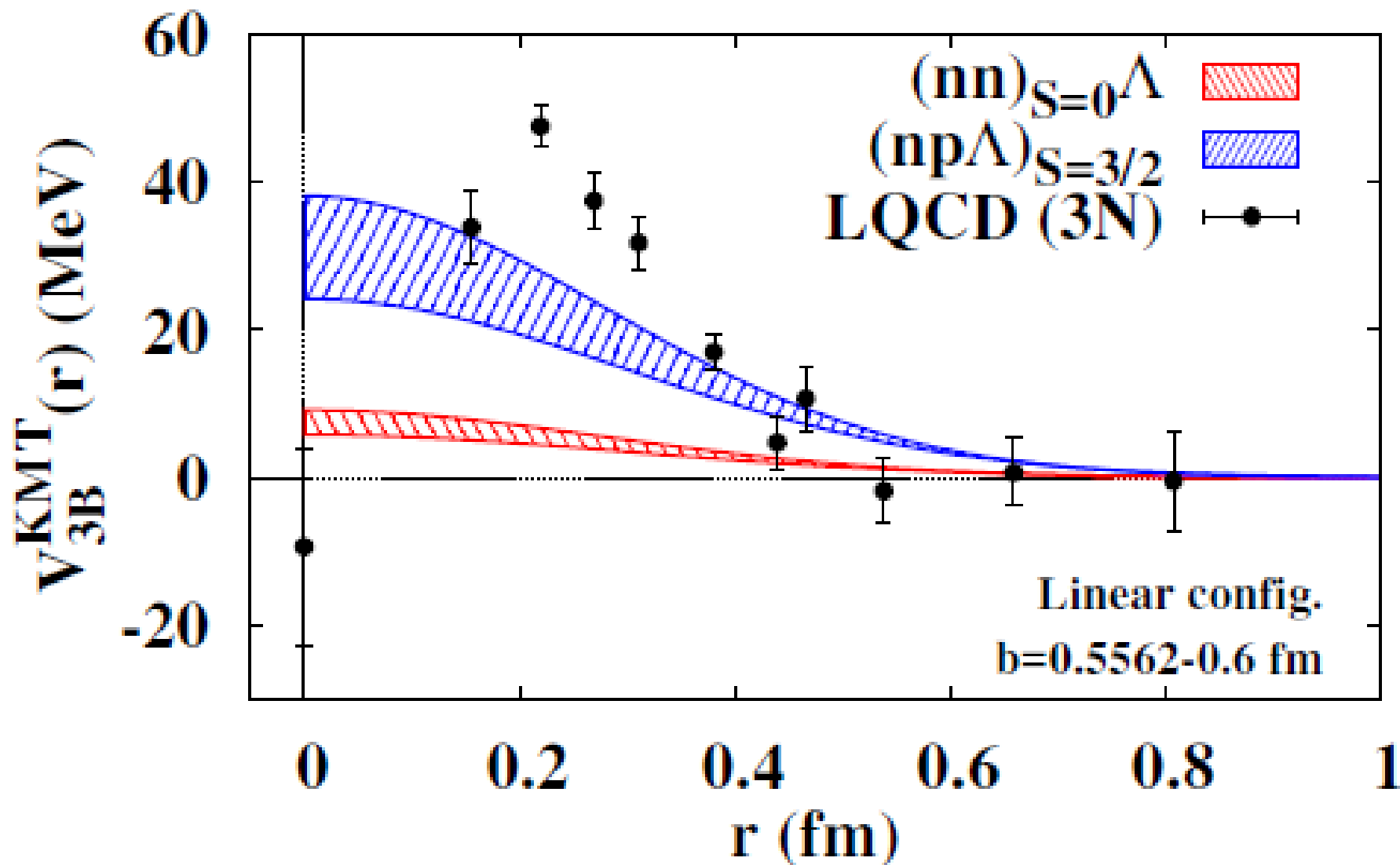
- Responsible for $U(1)_A$ anomaly
- 3-body int. among u,d,s quarks
- g_D is fixed by η - η' mass diff.
 - $g_D = -9.29$ *Hatsuda, Kunihiro ('94)*
 - 12.36 *Rehberg, Klevanski, Hufner ('96)*
- Repulsive in $\Lambda\Lambda$ system
 - Pushes up H particle energy.
 - Takeuchi, Oka ('91)*



Does the anomaly support NS ?

3B potential from KMT interaction

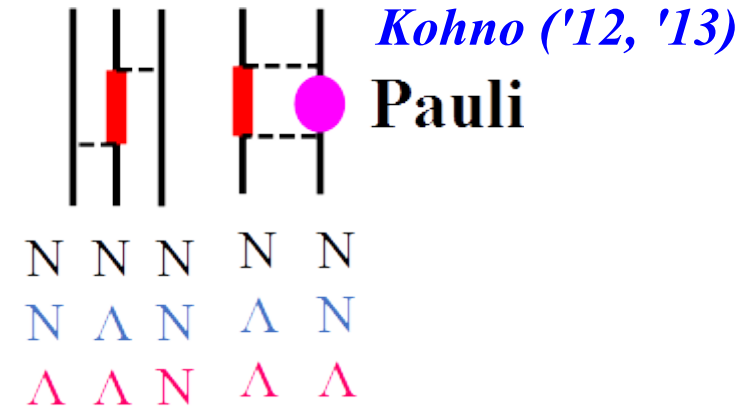
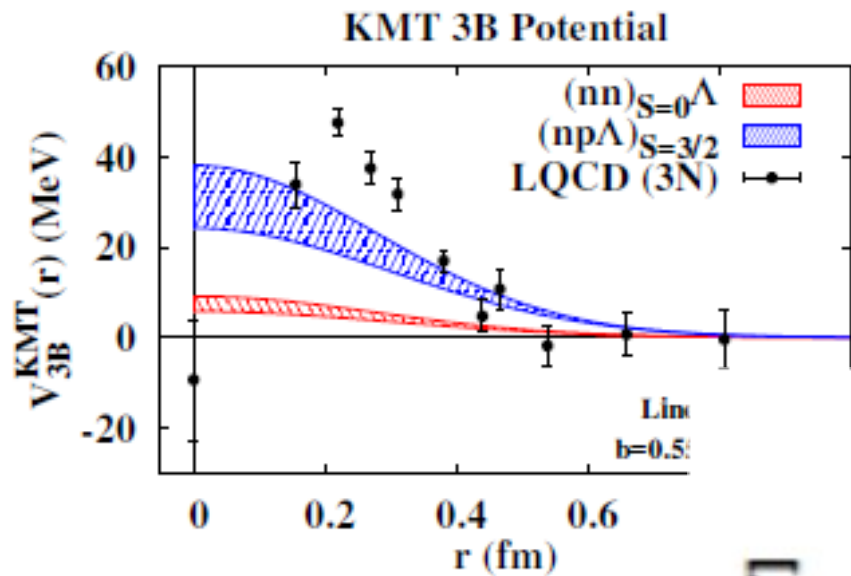
KMT 3B Potential



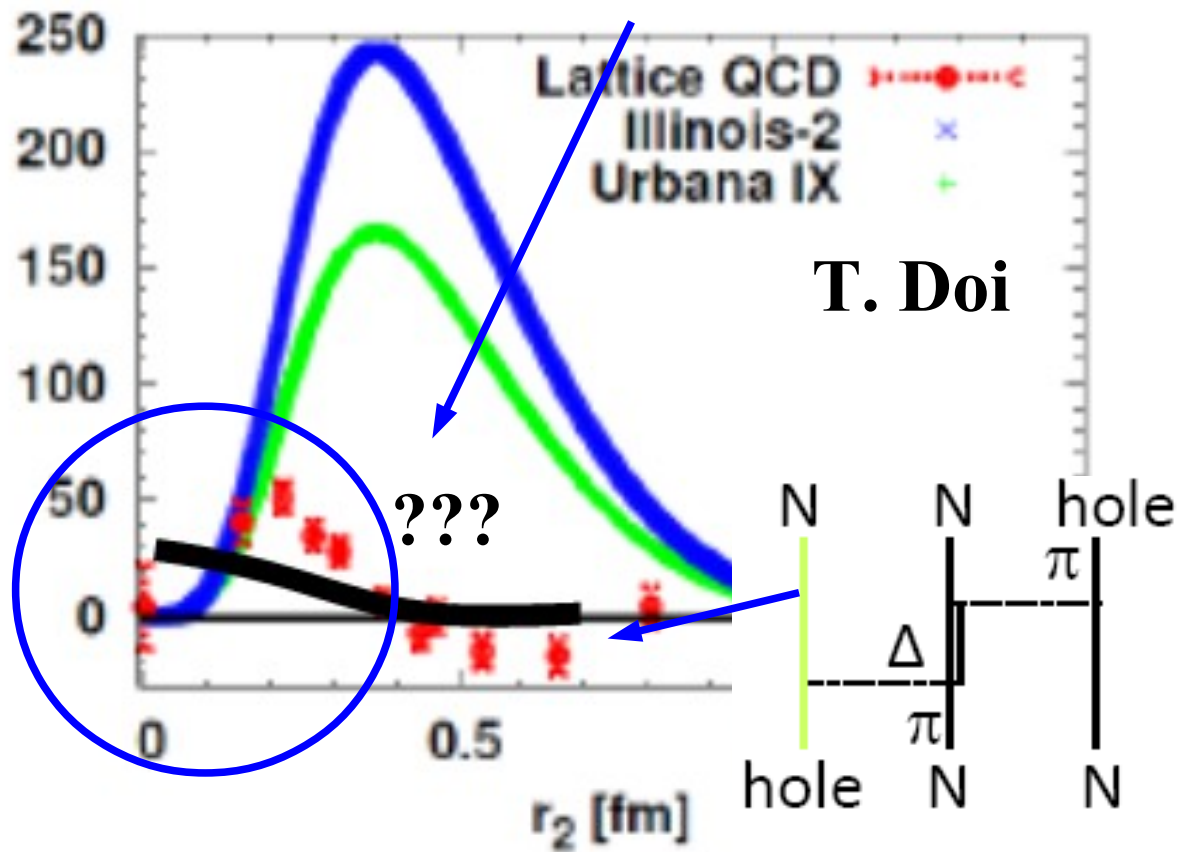
AO, Kashiwa, Morita, arXiv:1610.06306

Lattice data: Doi et al. (HAL QCD) ('07)

3B potential from KMT: Repulsive enough ?



Quarks



T. Doi

まとめ

- 中性子星は原子核物理学・天体物理学の様々な側面に関連する興味深い研究対象である。
- 中性子星物質状態方程式研究の進展
 - 対称エネルギーが理論的・実験的に定まってきた。
「飽和密度近辺での精密測定 + 高密度領域での測定」
 - ハイペロン・パズルの解決には
多体力 or クロスオーバー相転移 or GR の変更
が必要。
 Λ を含む少数系・多体系の精密な理論・実験、3 体力に敏感な観測
量の提案、クォークレベルからの研究、などが必要。
- 今後ますます新しいデータが出てくる！ Stay tuned！
 - 重力波、NICER、不安定核衝突 π 生成、ピグミー強度和、ダブルハイパー核、高エネルギー重イオン衝突、....