

原子核基礎論B

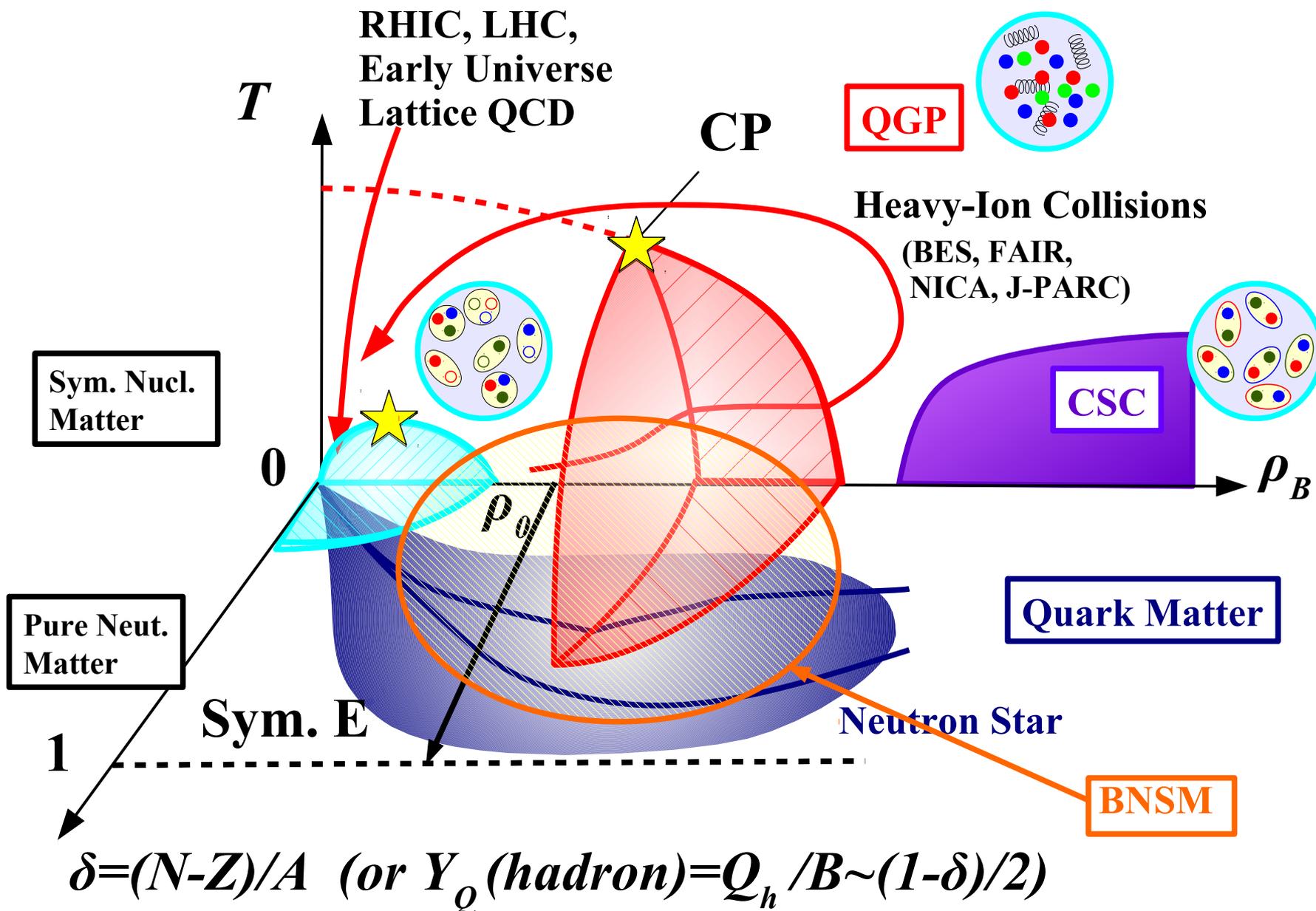
京大基研 大西 明

Akira Ohnishi (YITP, Kyoto U.)

1. 核力・特に非中心力や3体力 (1回)
2. 原子核構造を記述するための種々のモデルの最近の進展 (2回)
3. 最近の中性子過剰核の物理の最近の進展 (2回)
4. 原子核構造における異なる状態の混合や競合 (2回) 板垣
5. 高温・高密度核物質概観 (1回)(スライドで軽く)
6. 有限温度・密度における場の理論入門 (2回)
7. QCD 有効モデルにおける相転移と相図 (2回)
8. 有限温度・密度格子 QCD と符号問題 (1回)
9. 高エネルギー重イオン衝突における輸送理論 (1回) 大西

高温・高密度核物質概観

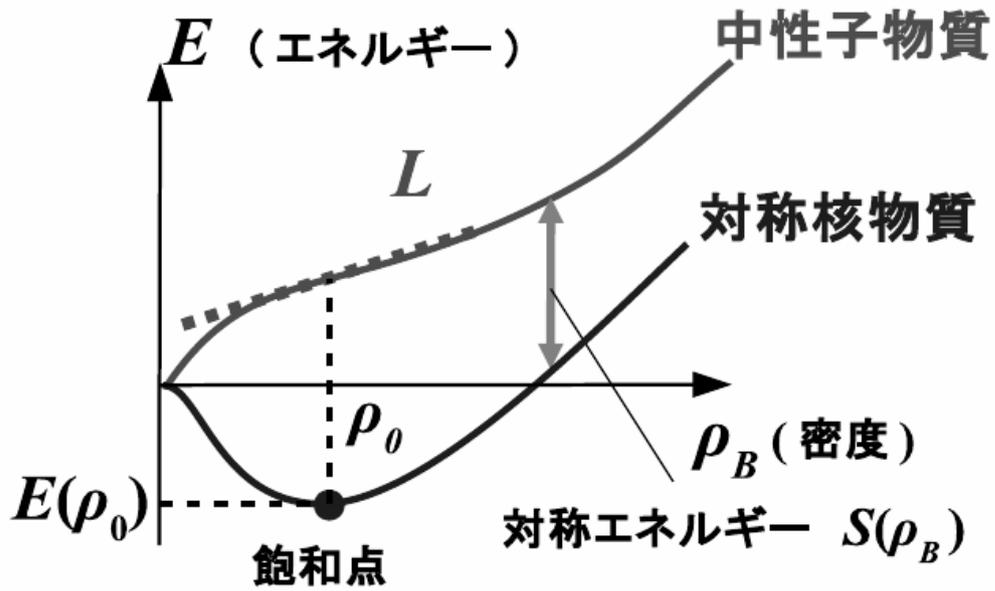
QCD 相図



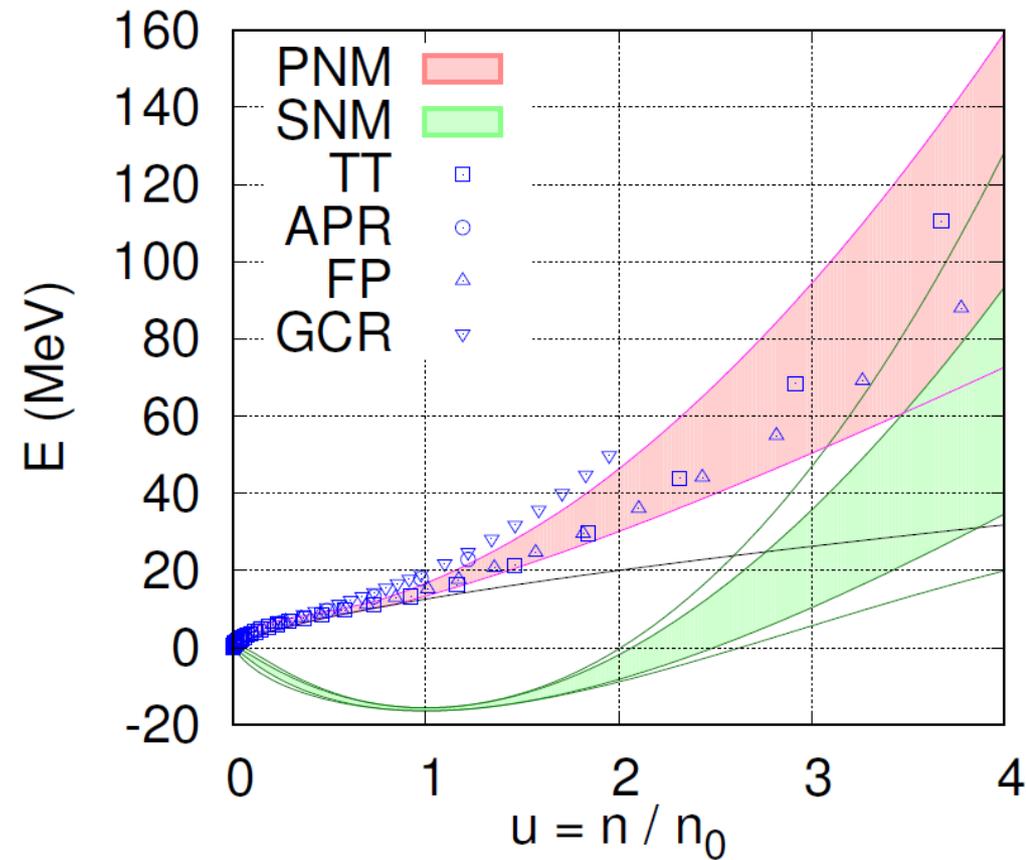
AO, JPS Conf. Proc. 20 (2018), 011035

核物質状態方程式

状態方程式 (EOS)



$$\varepsilon = \rho E, P = \rho^2 \frac{\partial E}{\partial \rho}$$

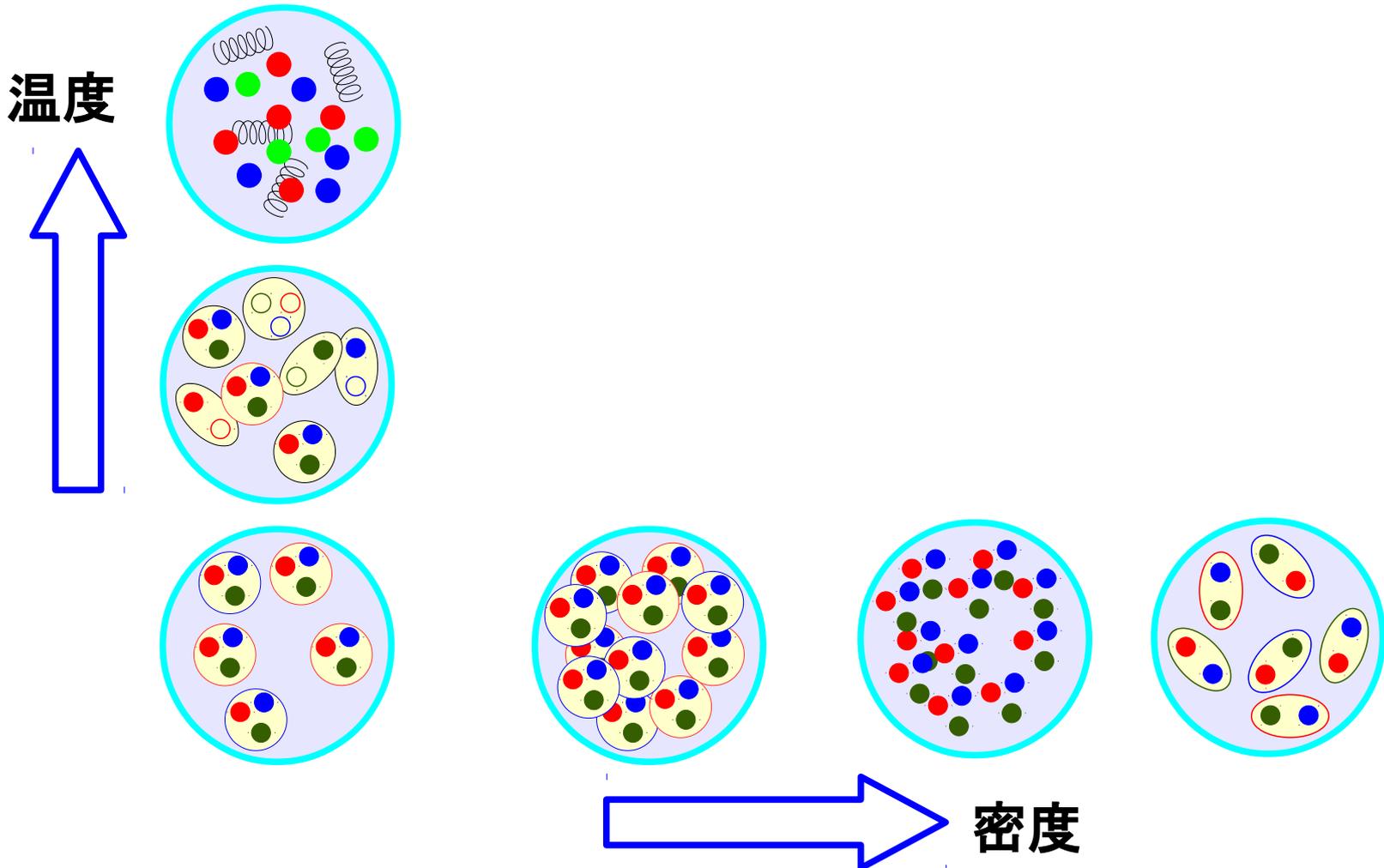


Based on Tews et al. ('17)

重イオン衝突で探る 高密度物質の相転移

QCD 相転移

- 漸近的自由性 (大きなエネルギースケールでは結合定数 $\rightarrow 0$)
→ 核物質 (ハドロン物質) は、高温・高密度においてはクォーク・グルーオンからなる物質になるはず (QCD 相転移)



QCD 相転移温度の簡単な評価

- Massless Free Gas (Stefan-Boltzmann 則)

$$P = \frac{\pi^2}{90} T^4 \left(\sum_B g_B + \frac{7}{8} \sum_F g_F \right)$$

- Hadron gas ~ massless free pion gas

$$P_H = \frac{\pi^2}{90} T^4 \times 3$$

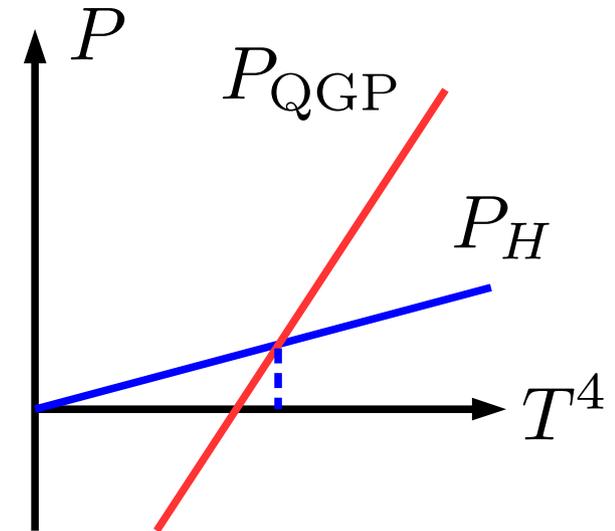
- Quark Gluon Plasma (QGP)

~ (massless free) quarks and gluons + vacuum

$$P_{\text{QGP}} = \frac{\pi^2}{90} T^4 \left(2 \times (N_c^2 - 1) + \frac{7}{8} \times 4 \times N_c \times N_f \right) - B$$
$$= \frac{\pi^2}{90} T^4 \times 37 - B$$

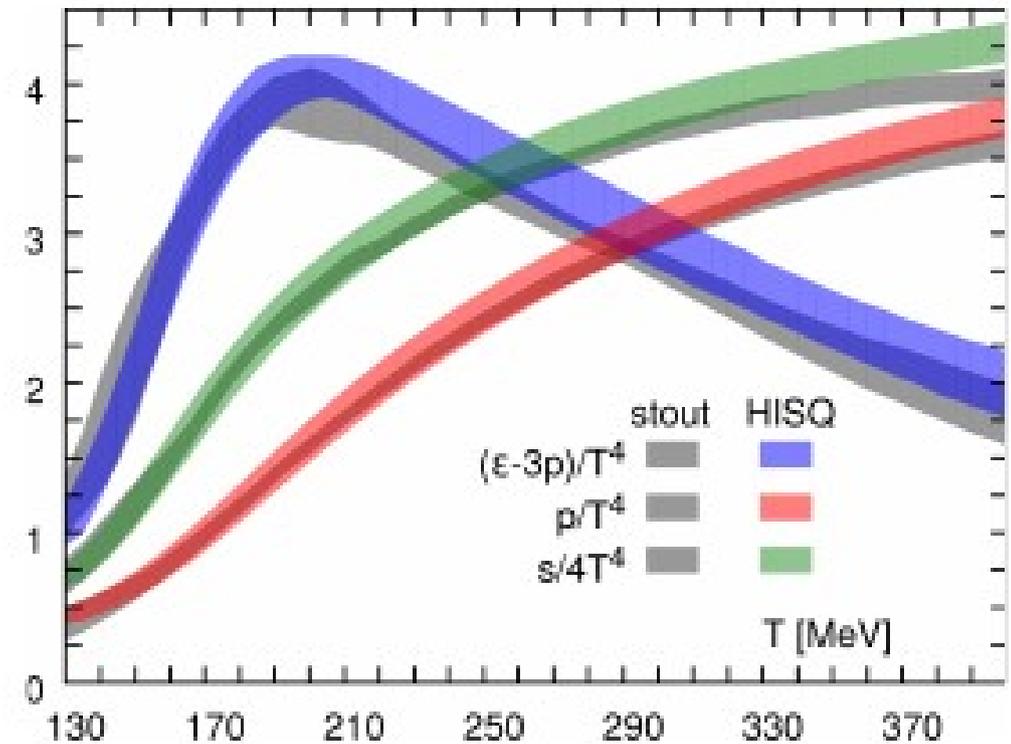
- QCD 相転移

$$P_H = P_{\text{QGP}} \rightarrow T_c = \left[\frac{90}{34\pi^2} \right]^{1/4} B^{1/4} \simeq 0.72 B^{1/4} \simeq 158 \text{MeV}$$



クォーク・グルーオン・プラズマの発見 (1)

- 量子色力学 (QCD) に基づく第一原理計算
= 格子 QCD シミュレーション
 - 図: T^4 で規格化したエネルギー密度と圧力
 - $T = 150\text{-}200$ MeV 程度で
急激なエネルギー密度の変化
 - 圧力はやや滑らかに
増加していく
- QGP への相転移
 $T_c = 154 \pm 9$ MeV

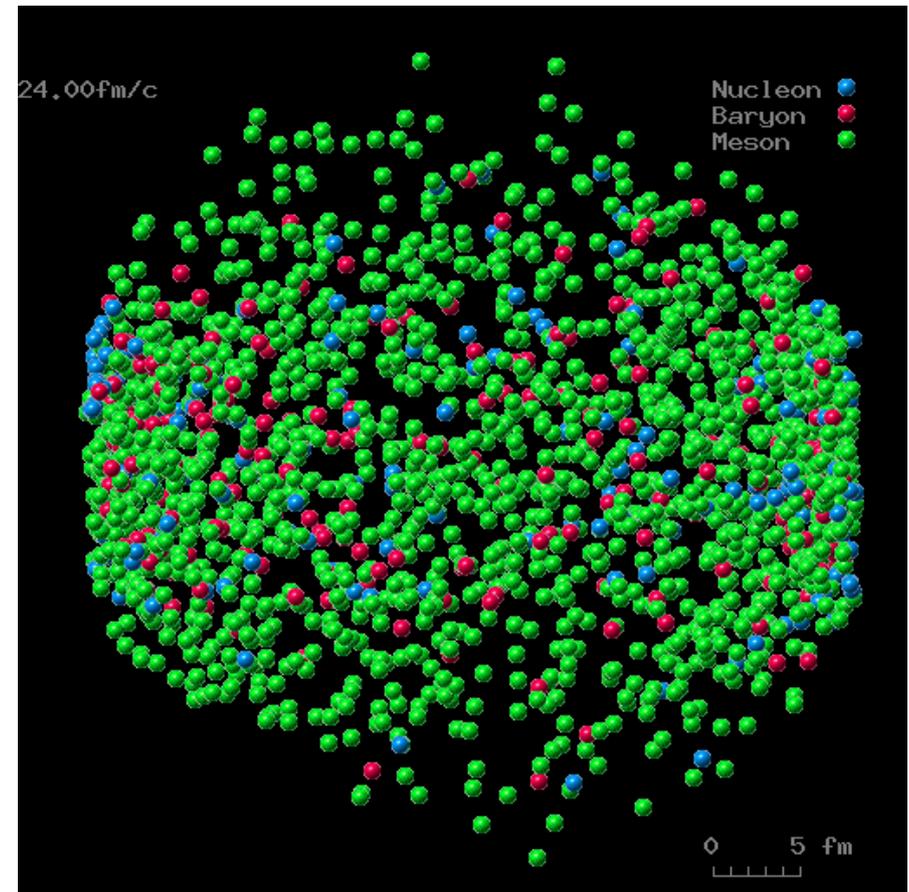
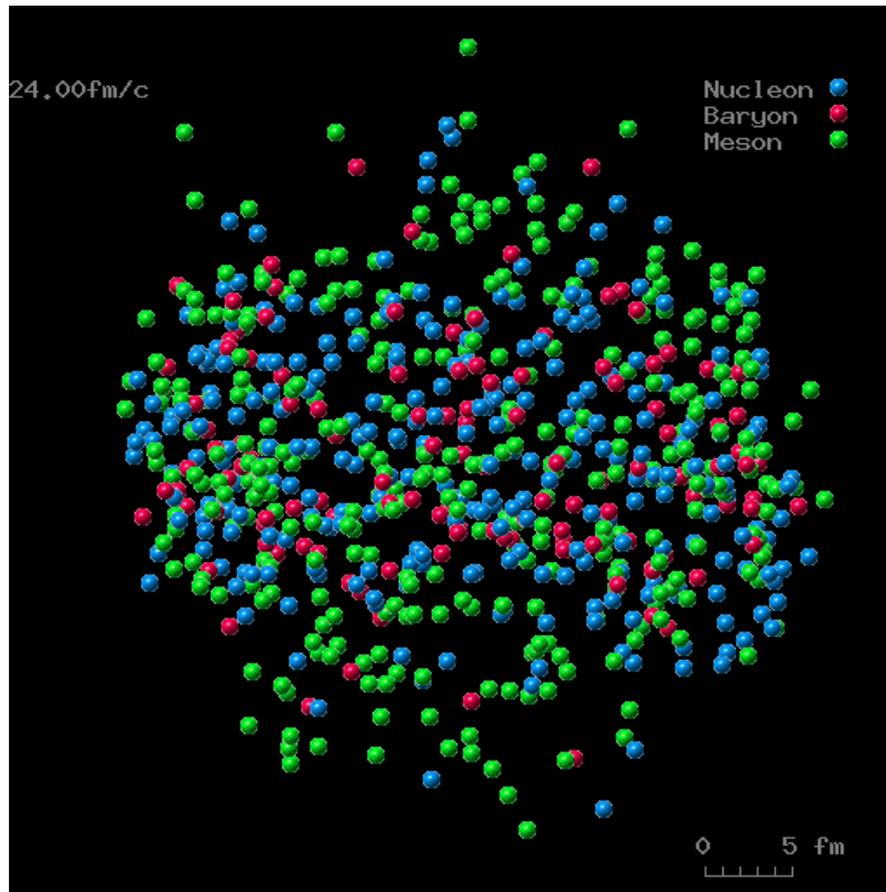


*A. Bazavov et al. [HotQCD], PRD90('14)094503.
S. Borsanyi et al., PLB 730 ('14) 99.*

How do heavy-ion collisions look like ?

Au+Au, 10.6 A GeV

Pb+Pb, 158 A GeV



$$\sqrt{s_{NN}} \sim 5 \text{ GeV}$$

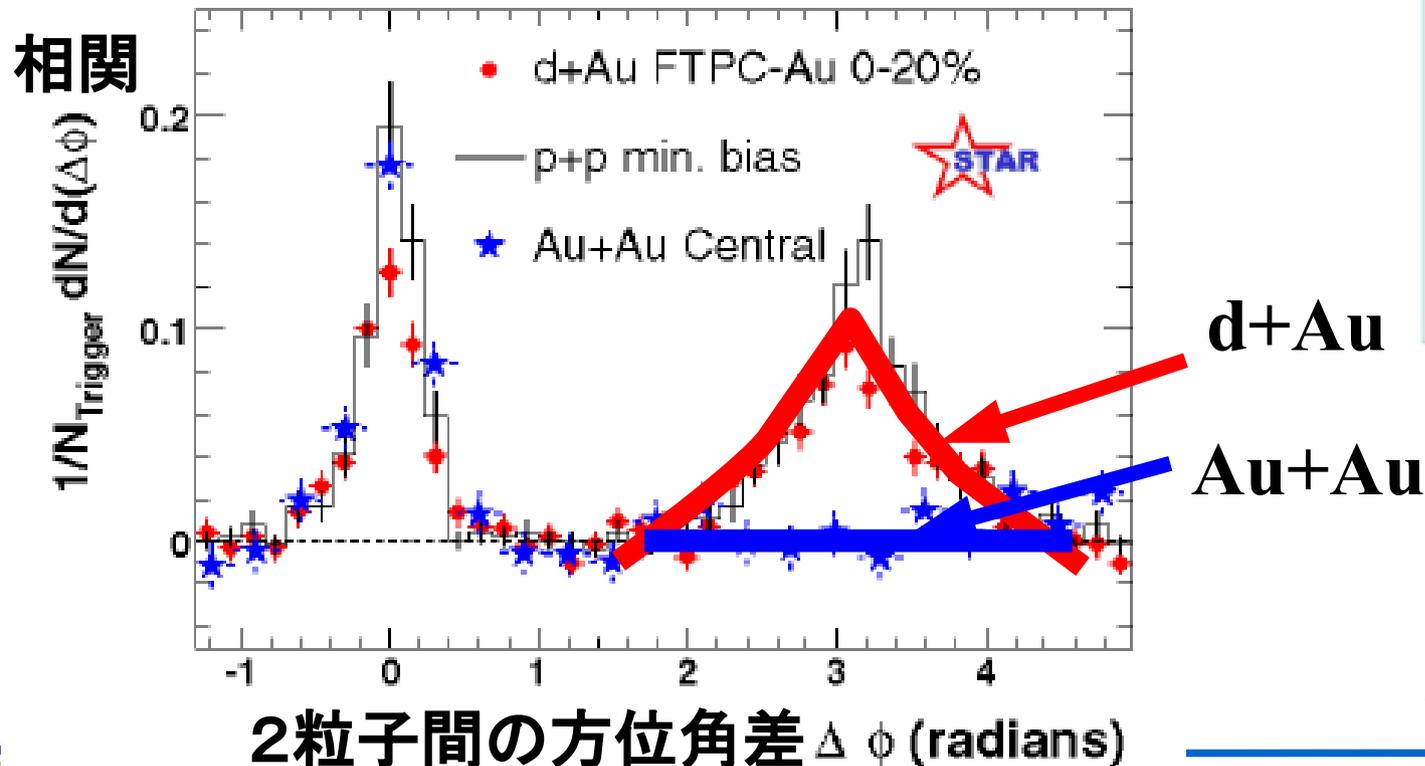
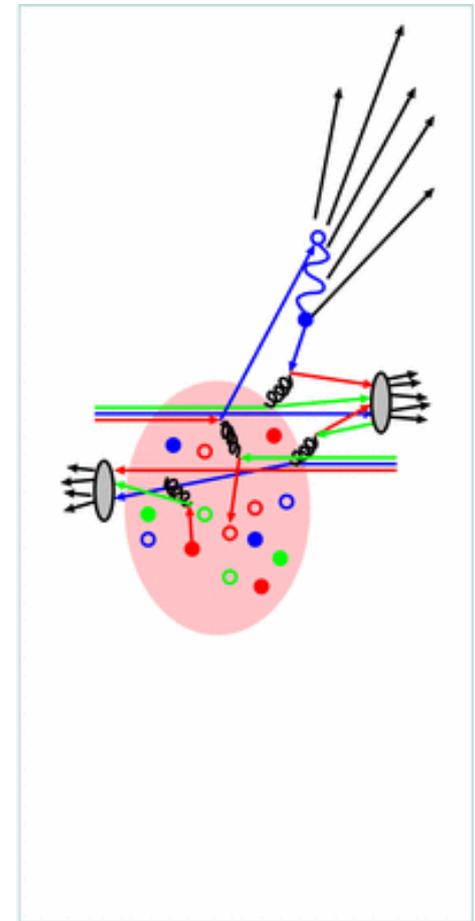
$$\sqrt{s_{NN}} \sim 20 \text{ GeV}$$

JAMming on the Web <http://www.jcprg.org/jow/>

クォーク・グルーオン・プラズマの発見 (2)

■ QGP 中でのジェットのエネルギー損失

- 真空中ではパートン (クォーク、グルーオン) が激しく散乱 + ハドロン化 → 強い方位角 180 度相関
- QGP が作られると色電荷の分布によりパートンがエネルギーを失う → 後方での方位角相関の消失
- RHIC での実験で d+Au ではそのまま、Au+Au 衝突では後方相関が消失



STAR, white paper

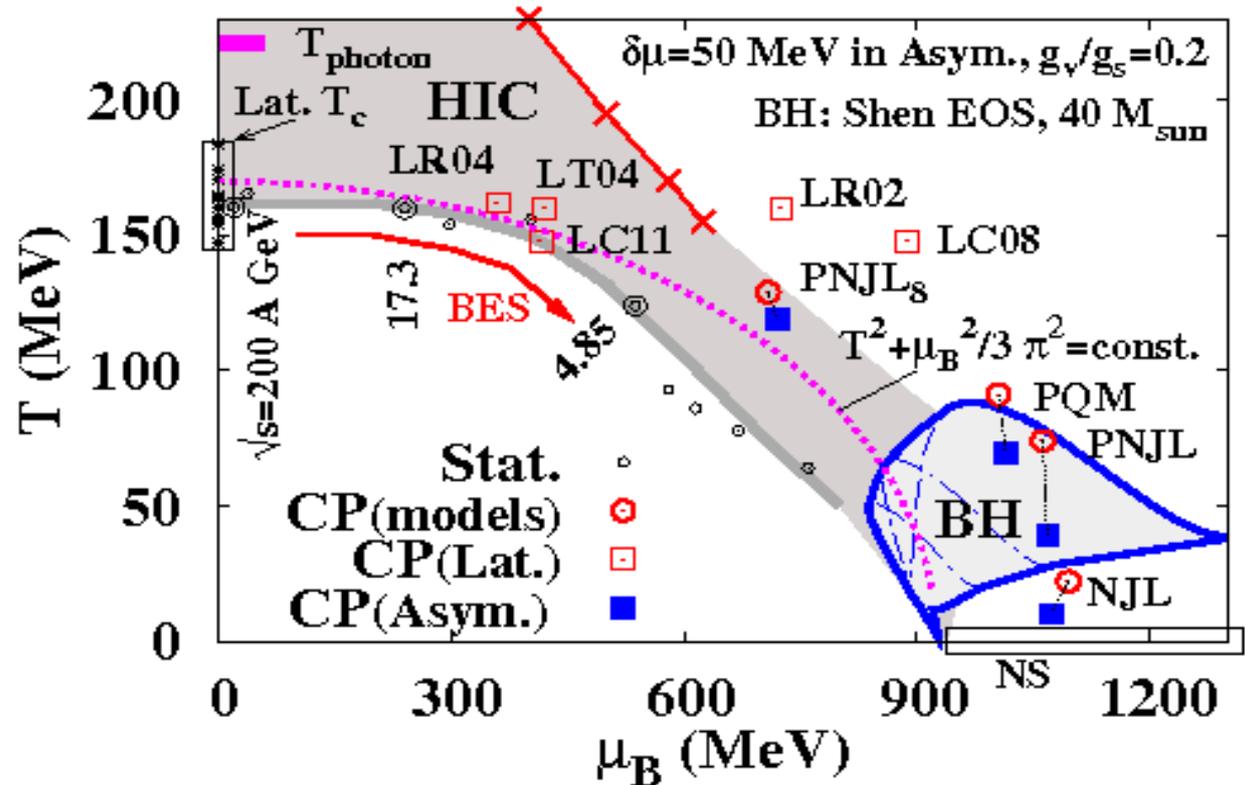
Chiral Transition at Finite μ

■ 格子 QCD 計算

- 符号問題のため、有限密度での精密計算は困難

■ 有効模型 (E.g. Nambu-Jona-Lasinio (NJL) 模型)

- 低温では1次相転移の可能性あり → QCD 臨界点
- 低温での相転移次数・臨界点の位置には大きな模型依存性

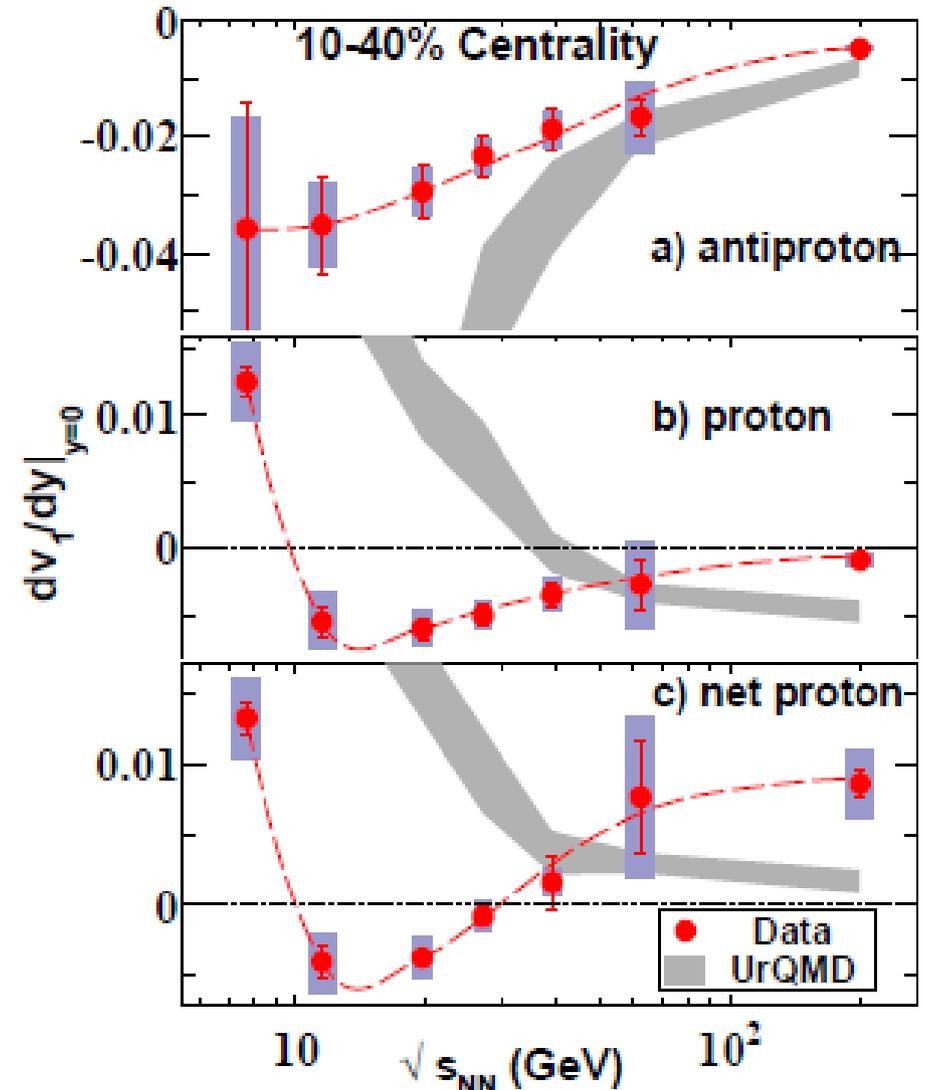
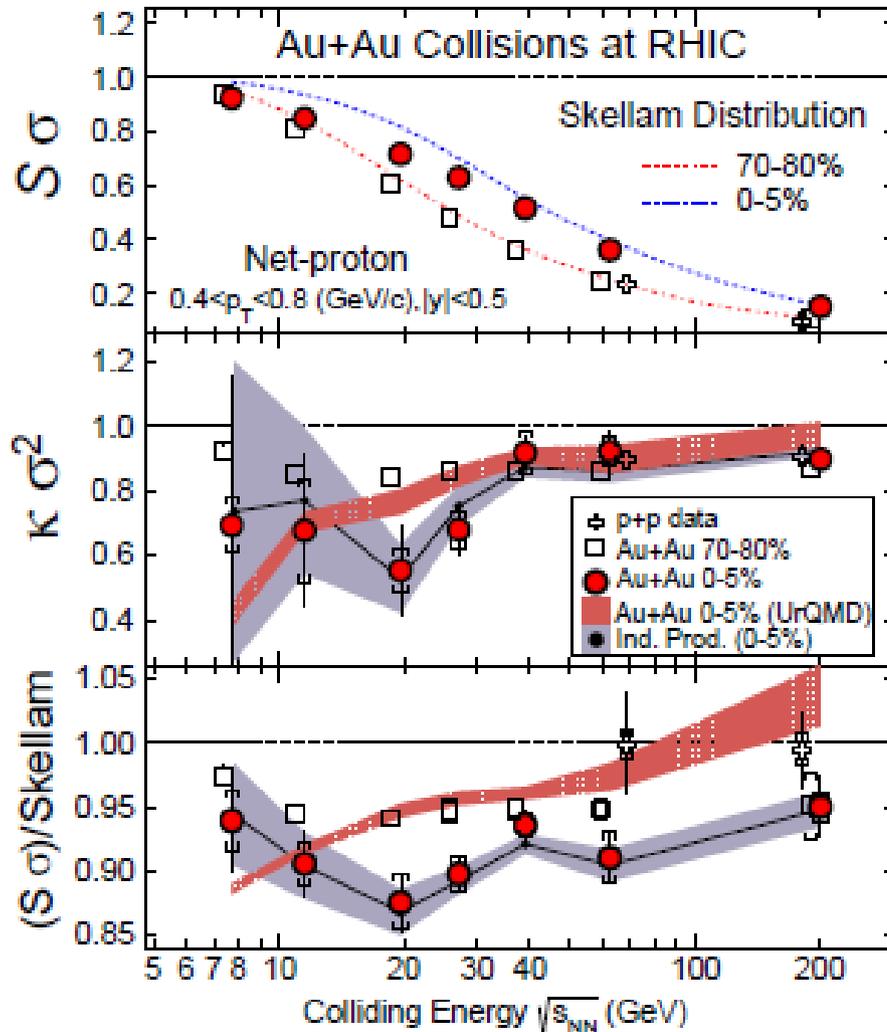


**クォーク・グルーオン・プラズマは
RHIC と LHC で (多分) 見つかった。**

**しかし低密度での転移はクロスオーバー
(真の相転移ではない)
1次、あるいは2次の QCD 相転移は
人類は見つけられるのか？**

QCD 一次相転移は見たか？

- 衝突エネルギー関数として非単調性が見えている ($\kappa\sigma^2$, dv_1/dy)

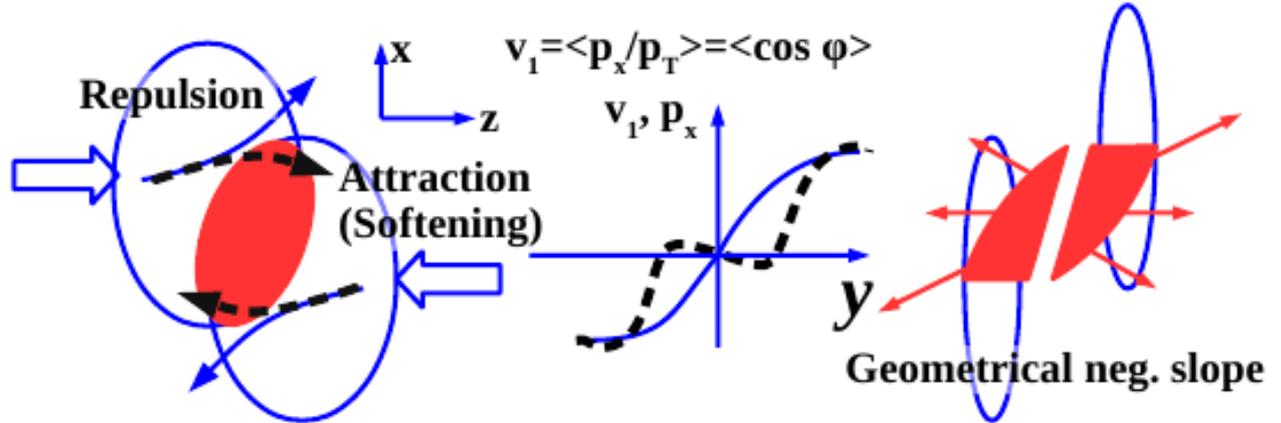


STAR Collab., PRL 112('14)032302.

STAR Collab., PRL 112('14)162301.

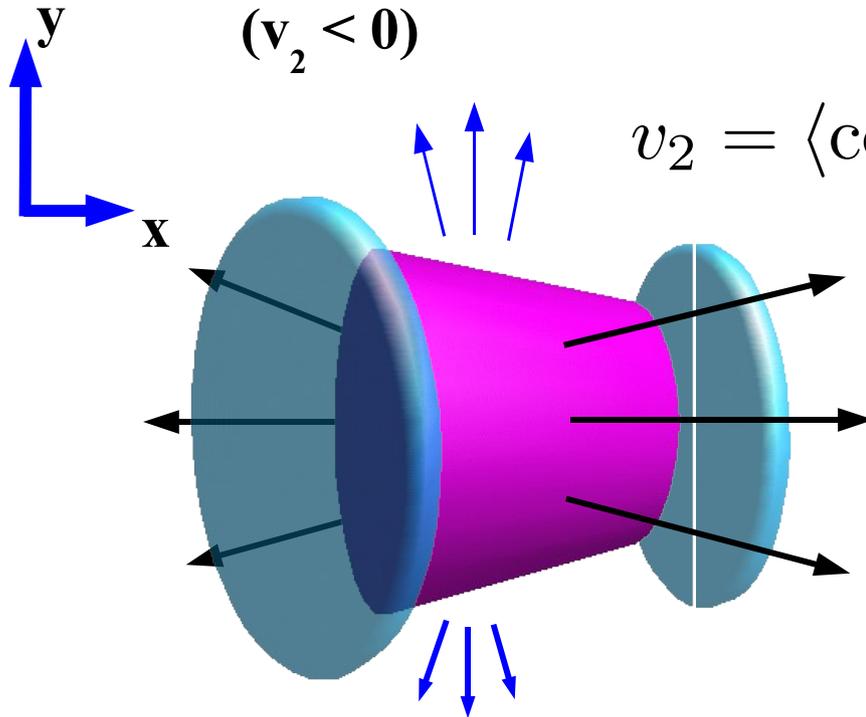
- Directed flow ($v_1, \langle p_x \rangle$), Elliptic flow (v_2)

→ 衝突初期に作られ、高密度の状態方程式 (EOS) に敏感



Out-of-Plane Flow
($v_2 < 0$)

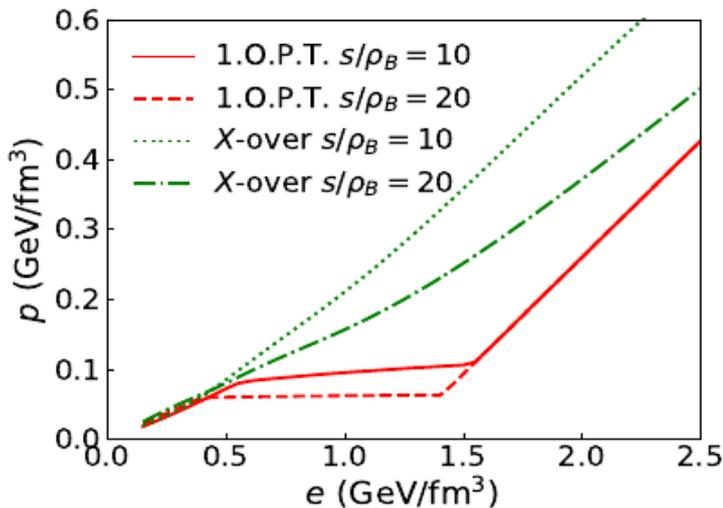
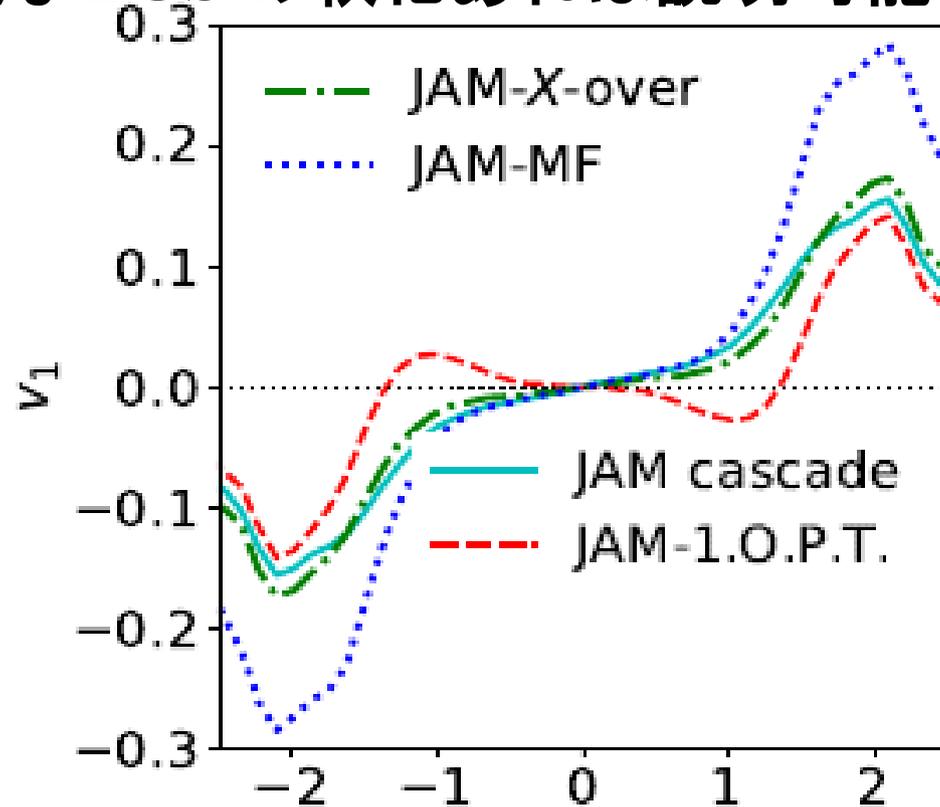
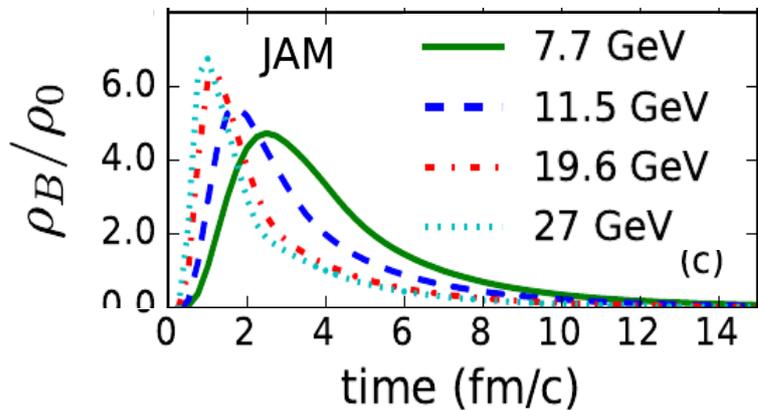
$$v_2 = \langle \cos 2\phi \rangle$$



In-Plane Flow
($v_2 > 0$)

負のフローとEOSの軟化

- ビリアル定理を使って任意のEOSを取り込めるように拡張した輸送モデルでの計算例
- $\sqrt{s_{NN}} = 11.5$ GeVで見られる負のフロー ($dv_1/dy < 0$)
 → $(5-10)\rho_0$ において急激なEOSの軟化あれば説明可能



Y.Nara, H.Niemi, AO, H.Stoecker, PRC94('16)034906.
Y. Nara, H. Niemi, AO, J. Steinheimer, X.-F. Luo,
H. Stoecker, EPJA 54 ('18)18

**$(5-10)\rho_0$ で QCD 相転移がありそう。
軟化が必要なことから (対称核物質では)
1 次相転移が想定される！？**

**中性子星で探る
高密度物質の状態方程式**

連星中性子星合体

■ GW170817

B. P. Abbott et al. (LIGO and Virgo)
PRL 119, 161101 (2017)

- 質量和 $M = 2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$
- それぞれの質量 1.17-1.60 M_{\odot}
→ 連星中性子星合体
(Binary Neutron Star Merger)
- Gamma Ray Burst (GRB170717A) が
1.7 s 後に起こる。
→ GRB の起源 (の一つ) を特定

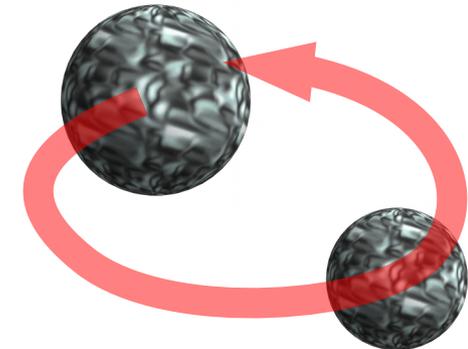
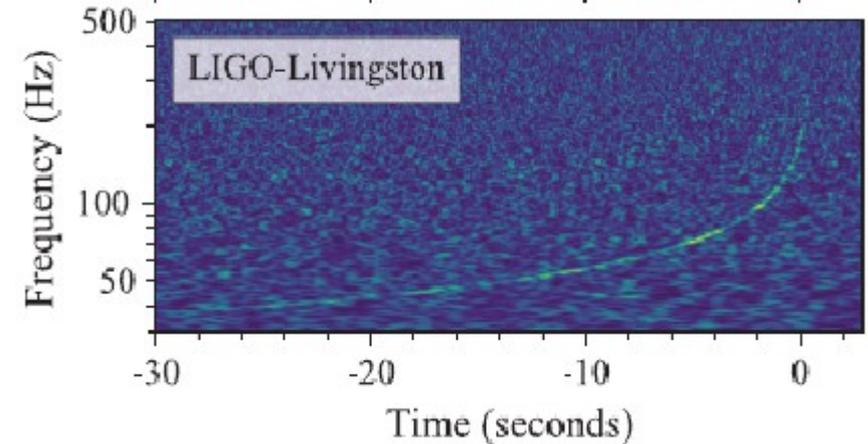
● inspiral (徐々に近づいていく段階) における振動数変化を観測
→ 中性子星半径を制限

- 放出された物質の速度から中性子星の最大質量を制限

M. Shibata et al., 1710.07579

$$M_{\max} = (2.15-2.25) M_{\odot} \text{ (c.f. ハイペロンパズル)}$$

- r- 過程元素生成の示唆



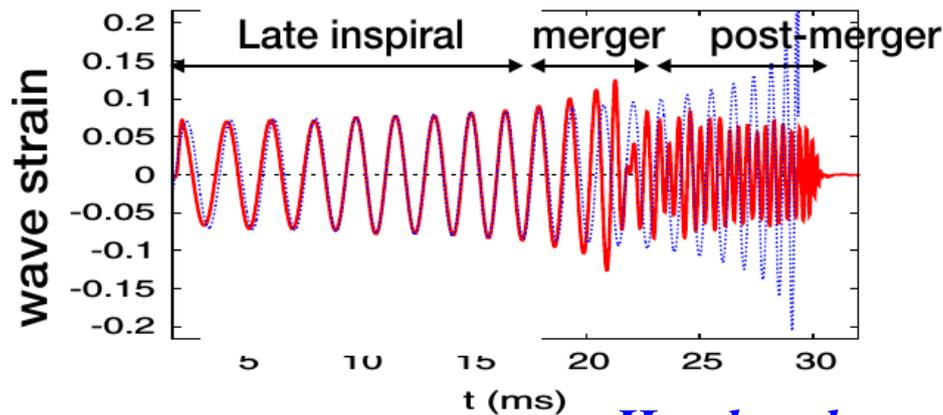
重力波から中性子星半径へ

■ Inspiral phase での重力波 → 潮汐変形により位相が進む

- Tidal deformability $Q_{ij} = -\lambda E_{ij}$, $\lambda = \frac{\Lambda}{G} (GM/c^2)^5$

- 大きな半径 (硬い EOS) → 変形しやすい → 大きな Λ

- 中性子星半径は対称エネルギーパラメータ (S_0, L) に大きく依存
→ 高次のパラメータの影響は？



Hotokezaka

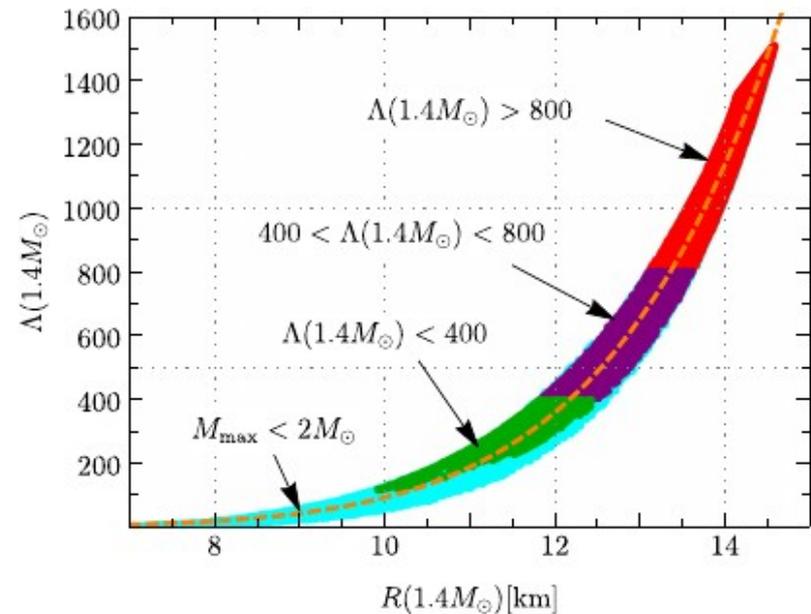
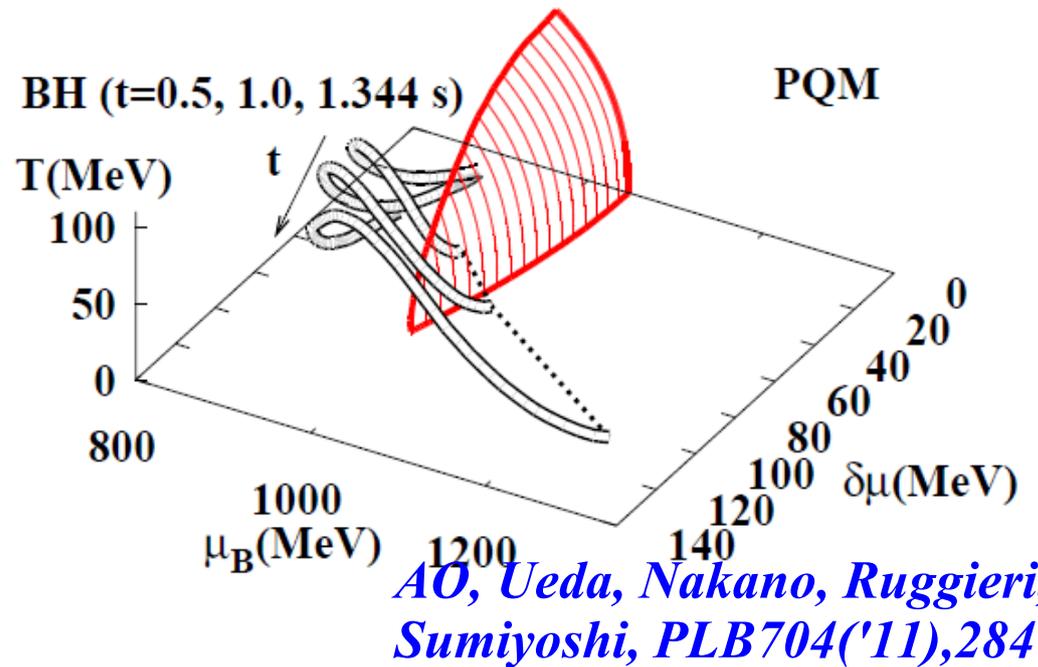
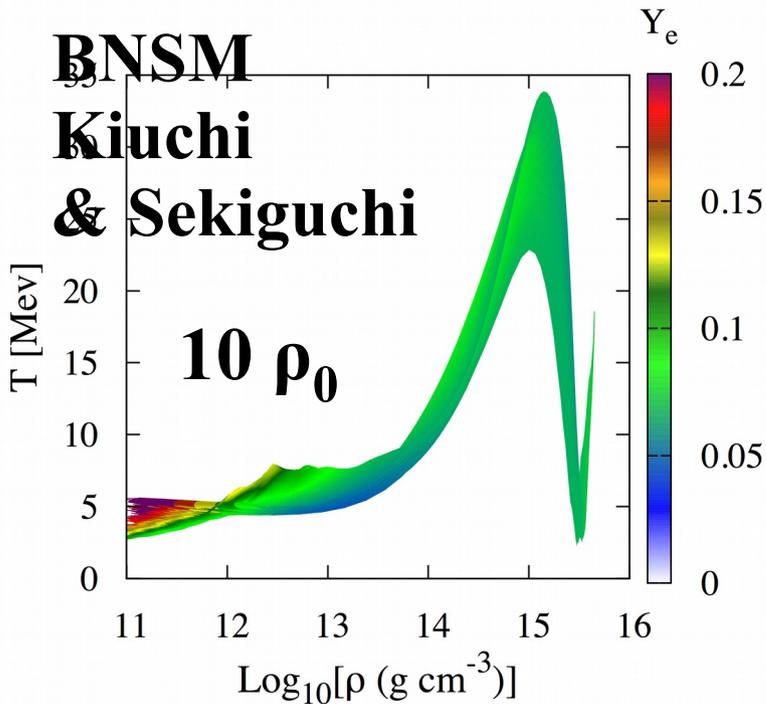
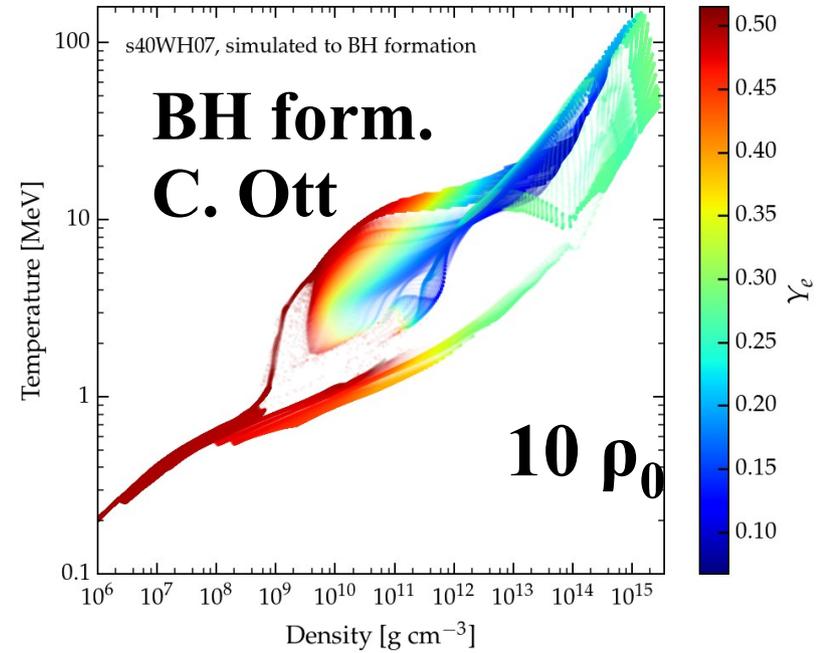
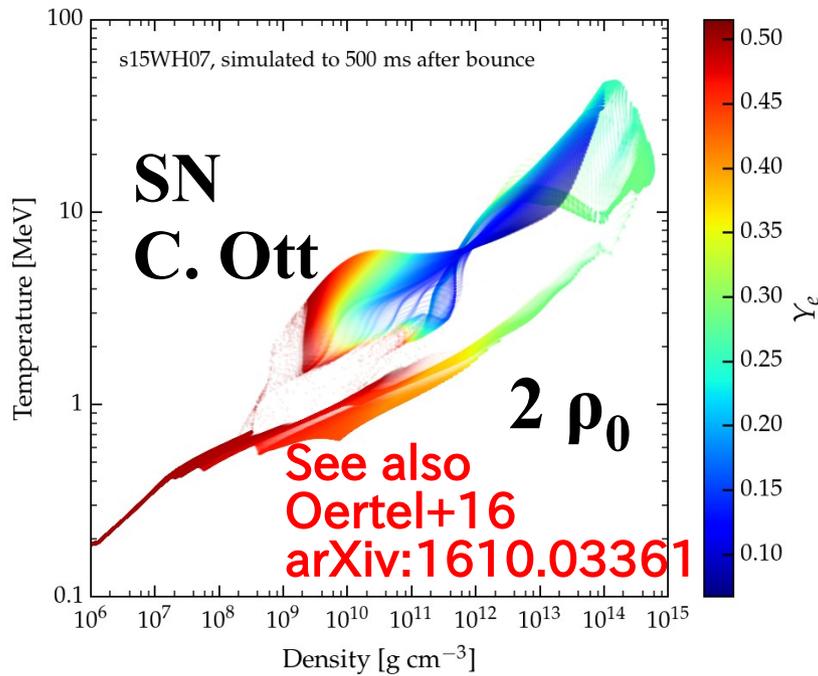


FIG. 2. The Λ values for stars with $M = 1.4 M_\odot$ as functions of the corresponding radius. The color coding follows Fig. 1, while the orange dashed line $\Lambda = 2.88 \times 10^{-6} (R/\text{km})^{7.5}$ has been included just to guide the eye.

(R-A) E. Annala+, PRL120('18)172703

(ρ, T, Y_e) during SN, BH formation, BNSM



中性子星の構造

- 中性子星の内側は見えないのに、
どうやって組成がわかるのですか？
→ 質量や半径からある程度推測できます。

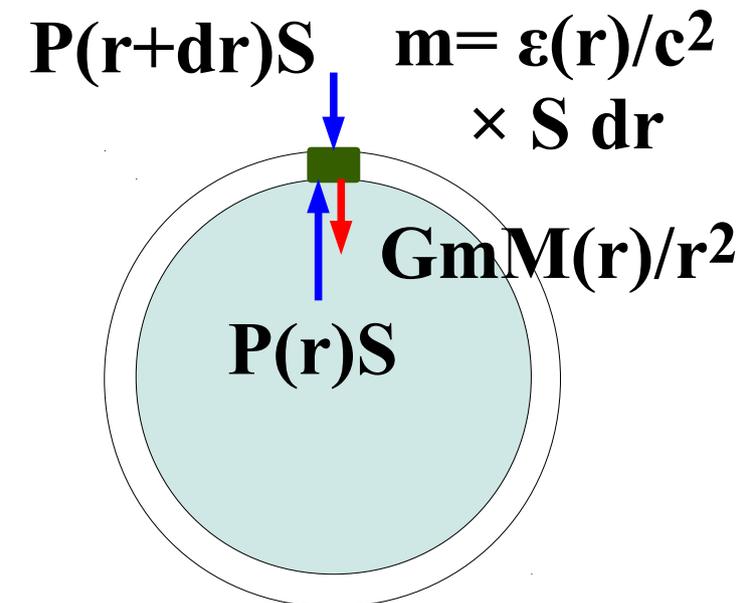
- 静水圧平衡
小さな箱を考えて、
外の圧力 + 重力 = 内の圧力

$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{M \epsilon / c^2}{r^2}$$

- Tolman-Oppenheimer-Volkoff 方程式
(一般相対論補正を含む静水圧平衡)

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

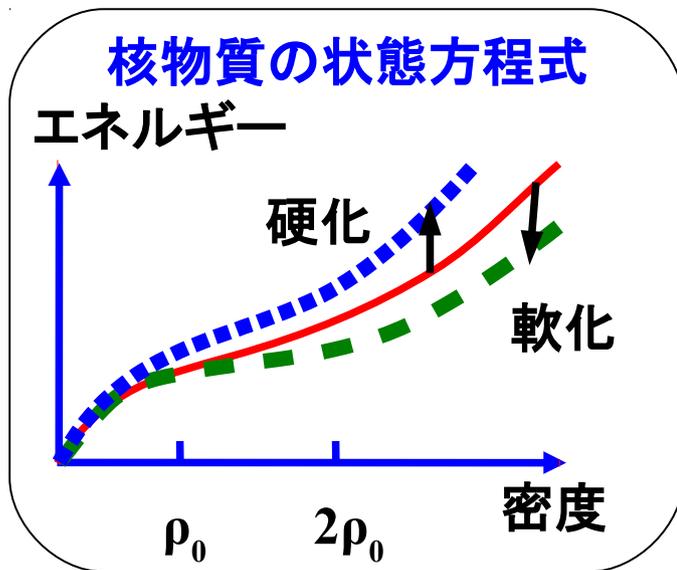
$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon / c^2, \quad P = P(\epsilon) \quad (\text{EOS})$$



$M(r)$: r までの質量
 $\epsilon(r)$: エネルギー密度
 $P(r)$: 圧力

状態方程式とMR(質量-半径)曲線

- 状態方程式が与えられると質量と半径の関係 (MR 曲線) が一意的に求まる。
→ 中性子星の MR 曲線は相互作用モデルを判別する

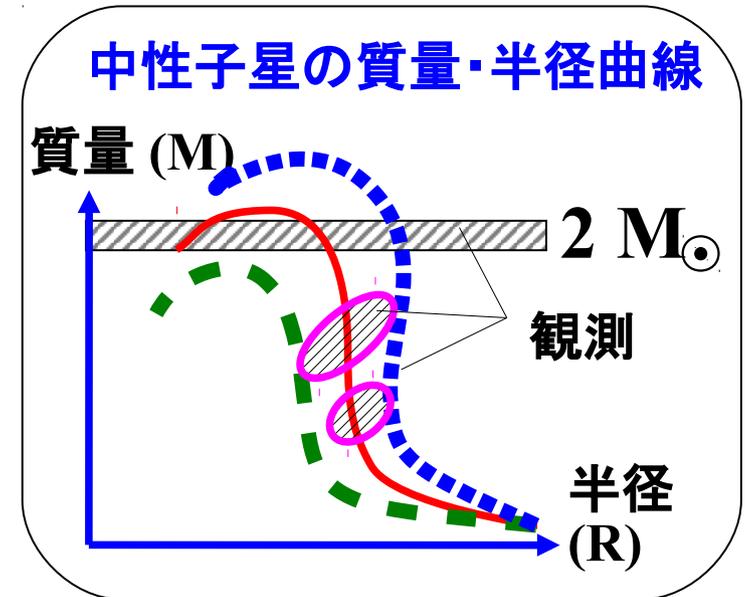


予言

TOV 方程式

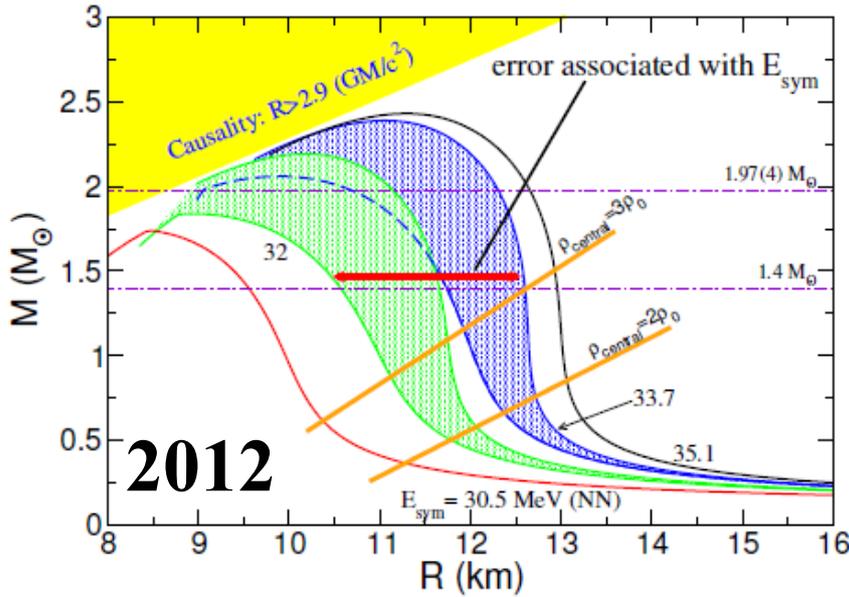
$$\frac{dP}{dr} \simeq -\frac{GM\epsilon/c^2}{r^2}$$

検証



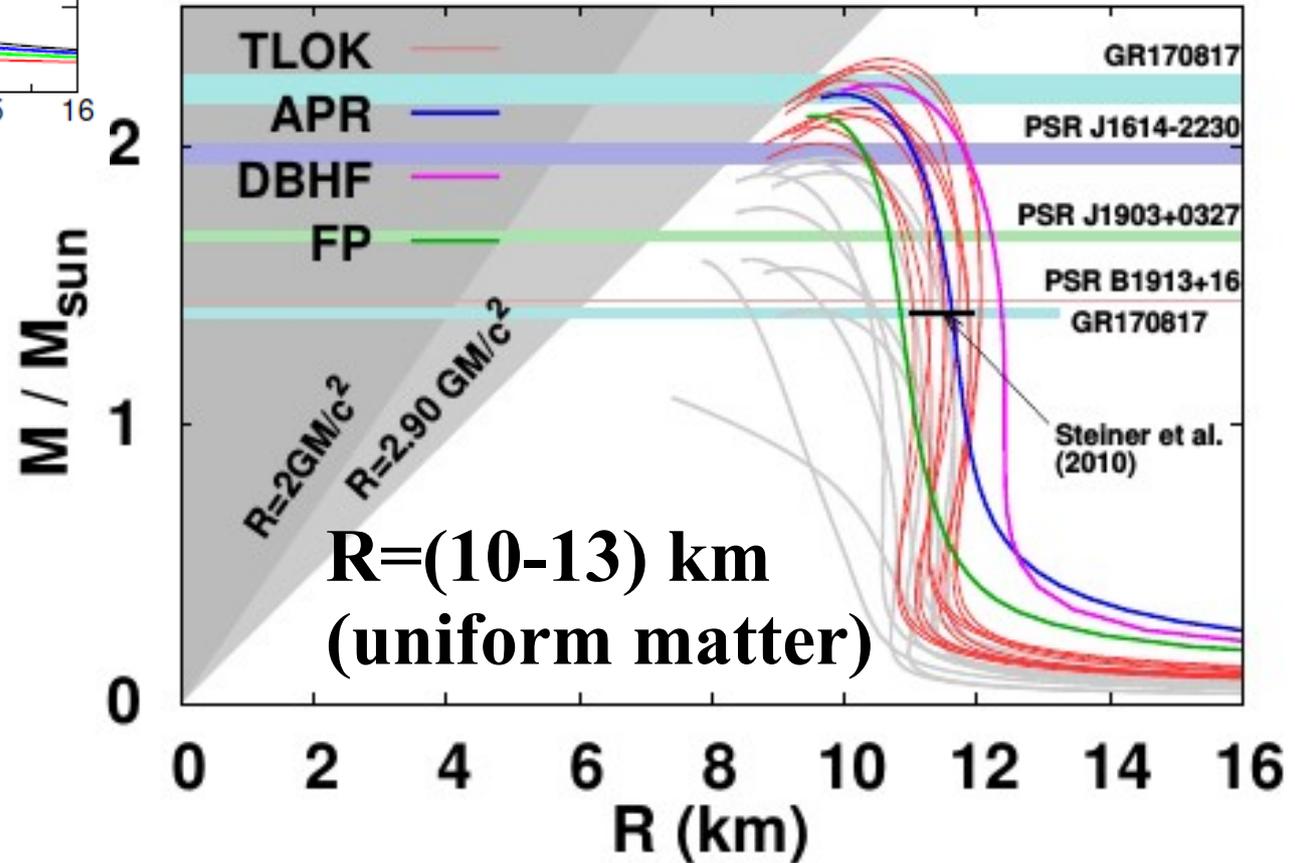
中性子星のMR 曲線

Based on Tews et al. ('17)



Gandolfi, Carlson, Reddy,
PRC85('12) 032801.

2017



質量公式と状態方程式

- $A \rightarrow \infty$ における核子あたりのエネルギー
(クーロンエネルギーは無視)

$$E = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{-B(A, Z)}{A} = \lim_{A \rightarrow \infty} \left[-a_v + a_s A^{-1/3} + a_a \frac{(N - Z)^2}{A^2} - a_p \frac{\delta_p}{A^{\gamma+1}} \right]$$
$$= -a_v + a_a \delta^2$$

- 密度と非対称度の関数と考えると、
核子あたりのエネルギーが最小となる密度が実現する

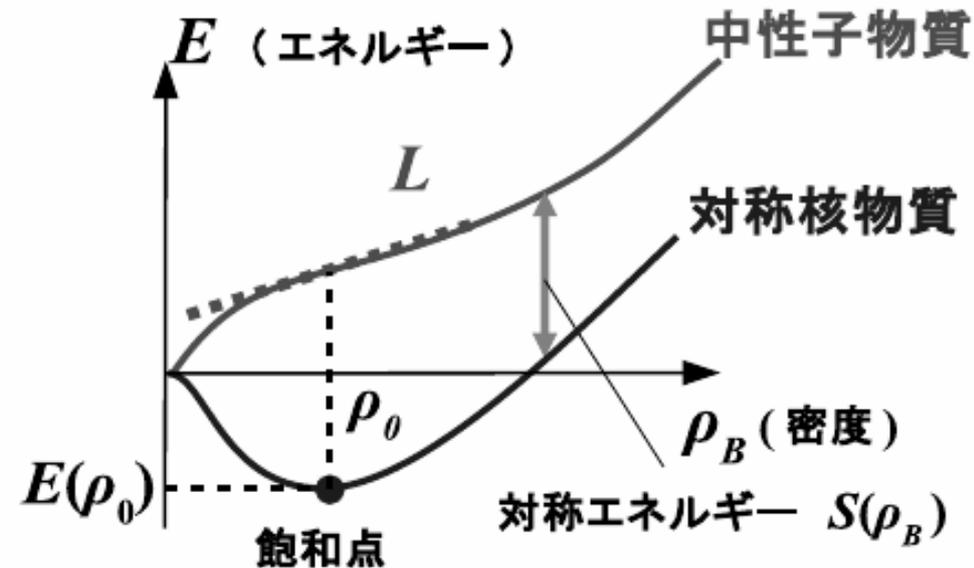
$$E = E(\rho_B, \delta)$$

→ 核物質の飽和性

- 飽和点

$$(\rho_0, E_0) \simeq (0.16 \text{ fm}^{-3}, -16 \text{ MeV})$$

状態方程式 (EOS)



対称エネルギー

■ 非対称核物質 ($N \neq Z$) のエネルギー

$$E(\rho_B, \delta) = E(\rho_B, \delta = 0) + S(\rho_B)\delta^2 \quad P = \rho^2 \partial E / \partial \rho$$

■ 対称エネルギー

$$S(\rho_B) = E(\text{中性子物質}) - E(\text{対称核物質})$$

■ 飽和密度でのパラメータ

- 非圧縮率 $K \equiv 9 \rho_0^2 \left. \frac{\partial^2 E(\rho_B)}{\partial \rho_B^2} \right|_{\rho_B = \rho_0}$

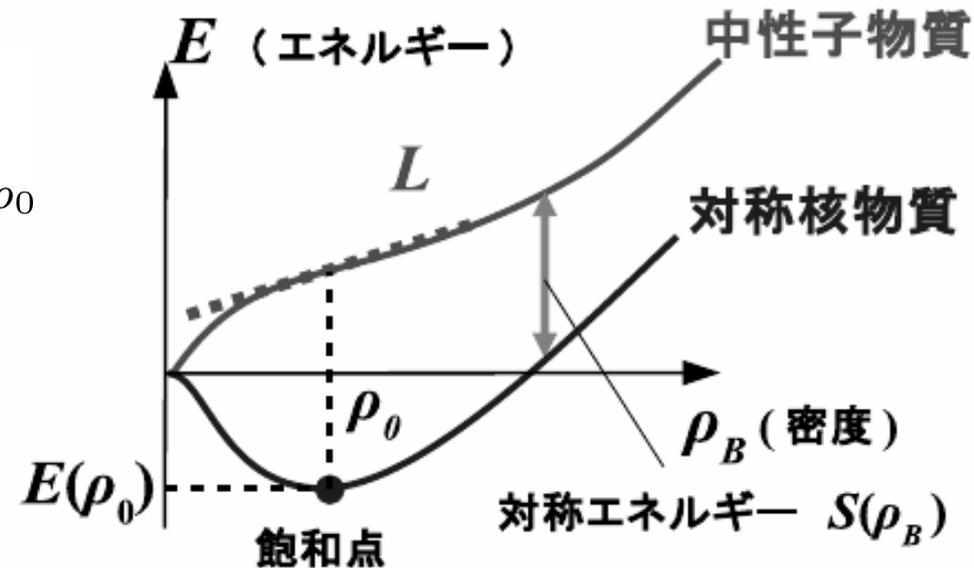
- 対称エネルギーの値と微分

$$S_0 \equiv S(\rho_0), \quad L \equiv 3\rho_0 \left. \frac{dS(\rho_B)}{d\rho_B} \right|_{\rho_B = \rho_0}$$

$$E(\rho_B, \delta) \simeq E_0 + S_0 \delta^2 + \frac{L}{3} x \delta^2 + \frac{K}{18} x^2$$

$$(x = (\rho_B - \rho_0) / \rho_0)$$

状態方程式 (EOS)

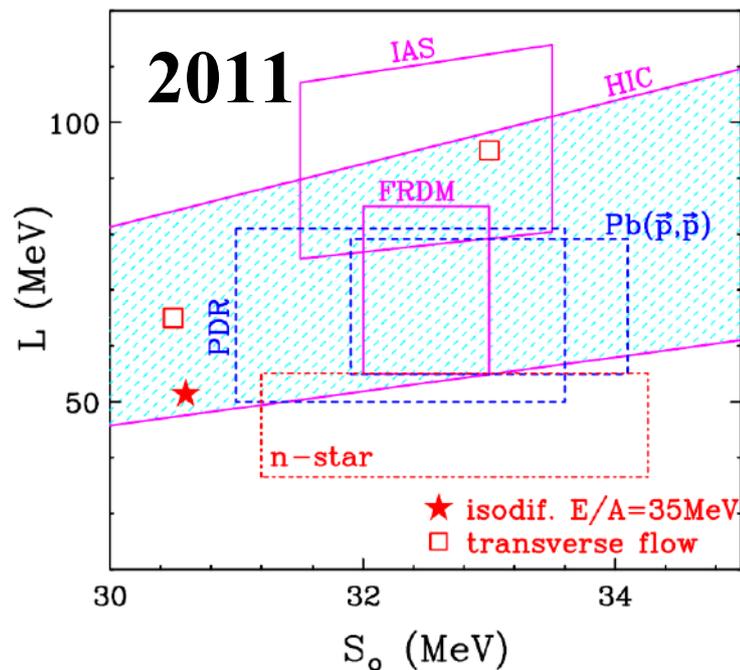


Unitary Gas Constraint on Symmetry Energy Parameters

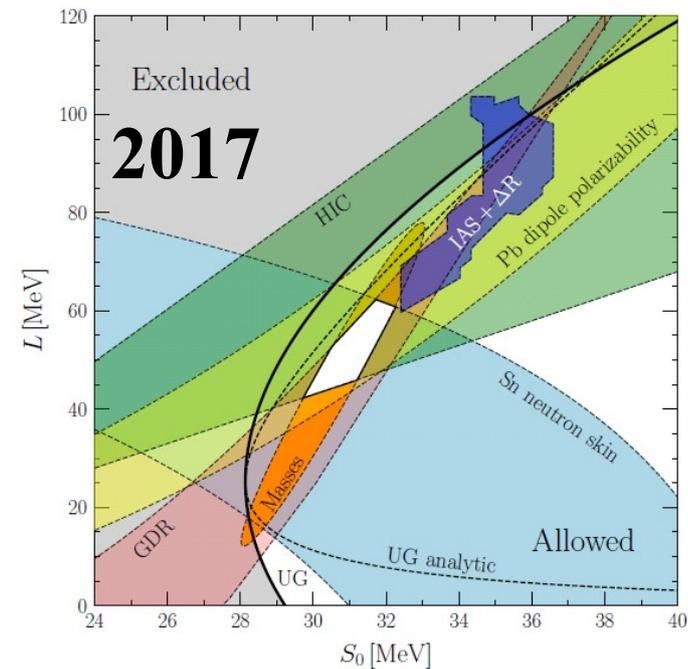
■ 対称エネルギー

- 様々な実験データを用いた絞り込み
(例: 不安定核衝突からの π 生成比、 $S\pi$ RIT 実験、Ikeno+('16))
- 「ユニタリーガスが中性子物質エネルギーの下限を与える」との conjecture から対称エネルギーパラメータ (S_0, L) を制限

I. Tews, J.M.Lattimer, AO, E.E.Kolomeitsev (TLOK), ApJ 848 ('17)105



Tsang et al. ('12): NuSYM 2011



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

対称エネルギーパラメータから状態方程式へ

■ 対称エネルギー (中性子物質と対称核物質のエネルギー差)

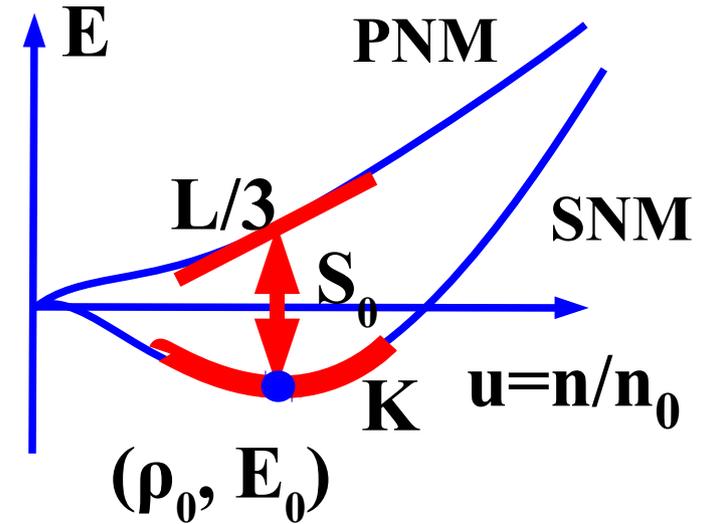
● 飽和点 & 対称エネルギーパラメータ

$$E_{\text{NM}}(u, \alpha) = E_{\text{SNM}}(u) + \alpha^2 S(u)$$

$$E_{\text{SNM}}(u) \simeq E_0 + \frac{K_0}{18}(u-1)^2 + \frac{Q_0}{162}(u-1)^3$$

$$S(u) \simeq S_0 + \frac{L}{3}(u-1) + \frac{K_s}{18}(u-1)^2 + \frac{Q_s}{162}(u-1)^3$$

$$(u = n/n_0, \alpha = (n_n - n_p)/n)$$



■ フェルミ運動量展開 $k_F \propto u^{1/3}$

$$E_{\text{SNM}}(u) \simeq T_0 u^{2/3} + \underbrace{a_0 u}_{\text{2体力}} + \underbrace{b_0 u^{4/3}}_{\text{密度依存力}} + \underbrace{c_0 u^{5/3}}_{\text{密度依存力}} + \underbrace{d_0 u^2}_{\text{密度依存力}}$$

$$S(u) \simeq T_s u^{2/3} + \underbrace{a_s u}_{\text{2体力}} + \underbrace{b_s u^{4/3}}_{\text{密度依存力}} + \underbrace{c_s u^{5/3}}_{\text{密度依存力}} + \underbrace{d_s u^2}_{\text{密度依存力}}$$

運動 E.

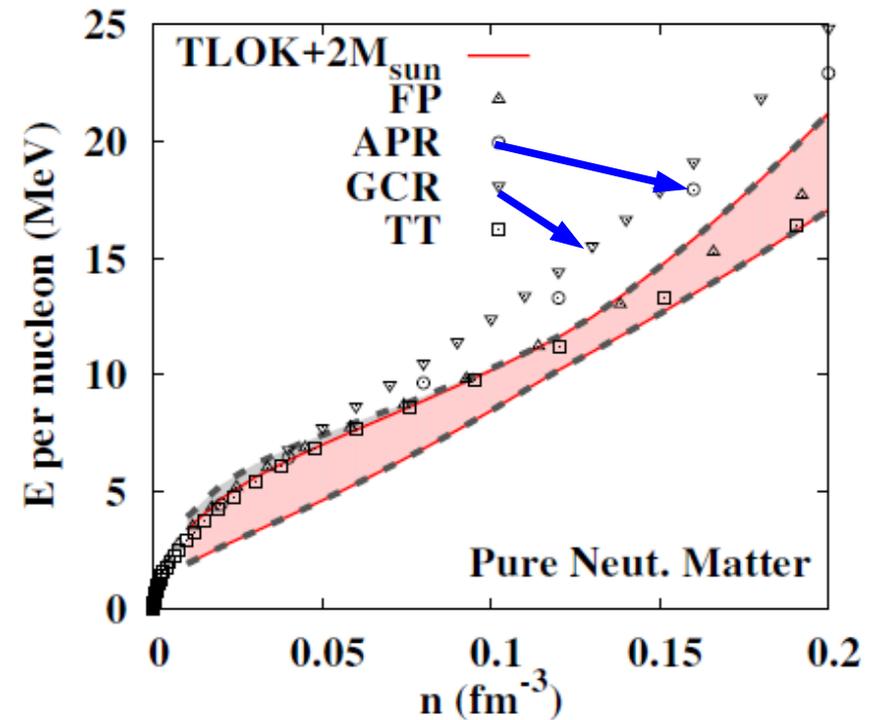
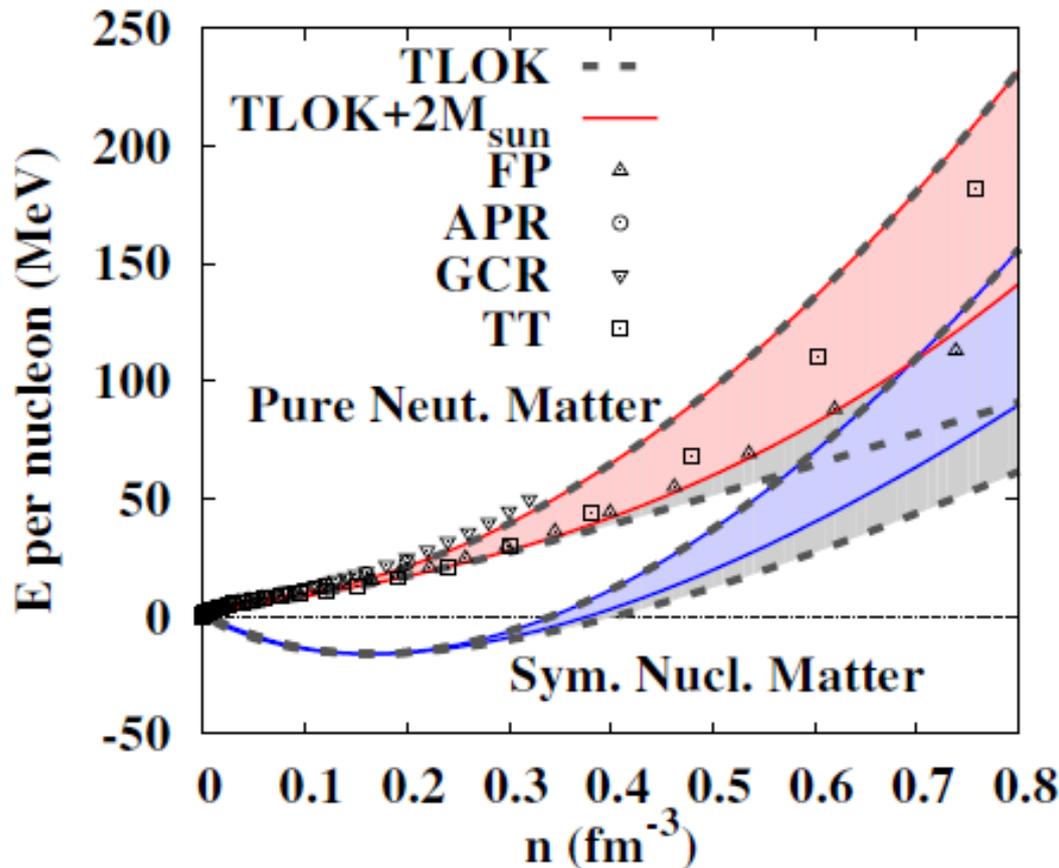
2 体力

密度依存力

有効質量 m^*

$TLOK+2M_{\odot}$ 条件に基づく状態方程式

- $2M_{\odot}$ 条件を加えることで EOS の下限があがる
- 変分計算 (Friedman-Pandharipande, Togashi-Takano) と無矛盾
- APR, GCR 状態方程式は S_0 が 5 角形の外
→ 第一原理計算の選別へ (?)



OKLTW, in prog.

Neutron Star MR curve

■ TLOK + 2 M_⊙ 条件 → R_{1.4}=(10.6-12.2) km

OKLTW, in prog.

■ 他の多くの結果と consistent

● LIGO-Virgo (Tidal deformability Λ from BNSM)

(10.5-13.3) km *Abbott+('18b)*

(9.1-14.0) km *De+('18) (Λ)*

● Theoretical Estimates

(10.7-13.1) km

Lattimer+, PRep.621('16)127

(10.0-13.6) km

Annala+, PRL120('18)172703

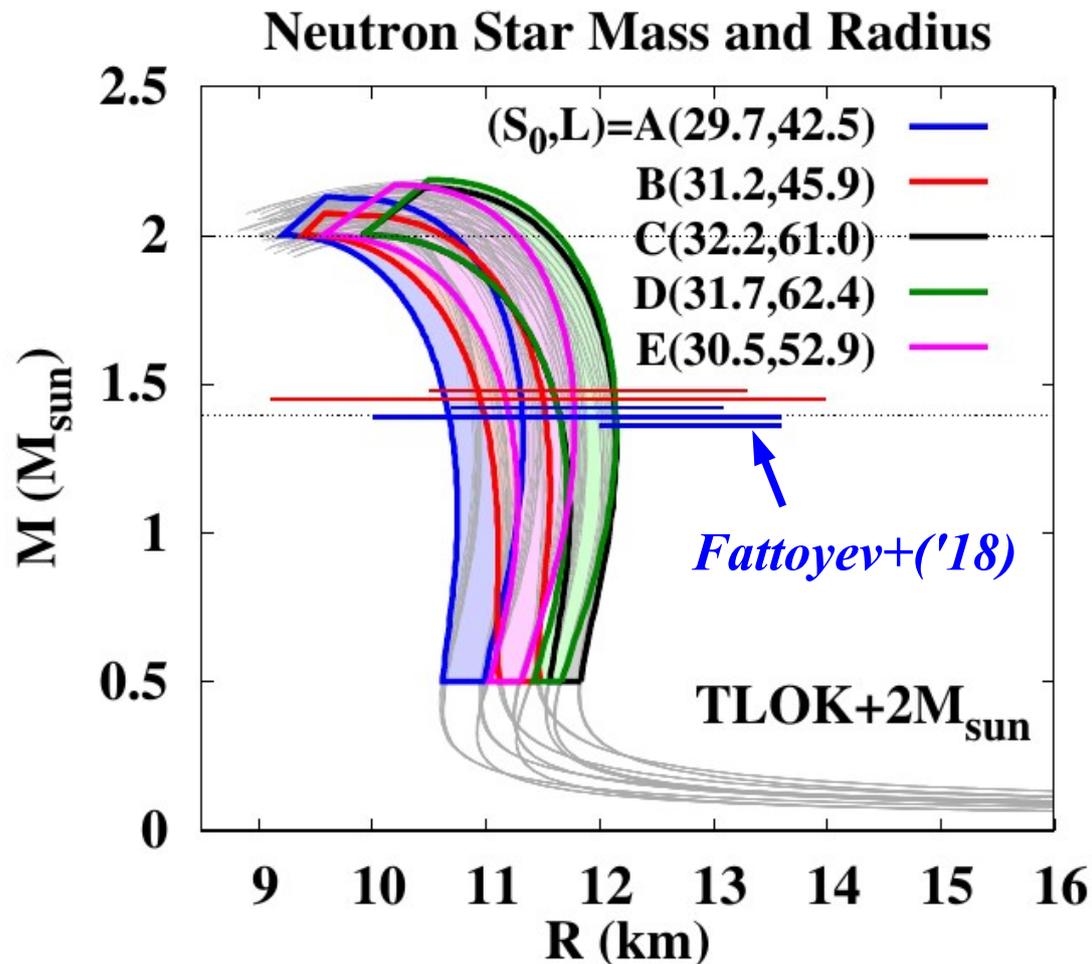
(9-13.6) km

Tews+, PRC98 ('18)045804

(12.0-13.6) km

*F.J.Fattoyev+(PREX),
PRL120 ('18)172702*

*Parity violating obs.
Large error bar*



原子核の情報 ($+2M_{\odot}$) から直接的に表した
中性子星物質状態方程式は
重力波からの半径制限と無矛盾。

$(2-3)\rho_0$ までは滑らかな外挿が成り立っているようである。

ただし、こうした EOS は
実際に高密度状態が作られる実験
(*e.g.* 重イオン衝突) で確かめられていない。

まとめ

- 高温・高密度核物質の理解が大きく進みつつある
 - 重イオン衝突・対称エネルギー・中性子星
- 高温・高密度核物質の理解に必要な理論の枠組み
 - 有限温度・密度における場の理論
 - QCD 有効模型における相転移と相図
 - 有限温度・密度格子 QCD と符号問題
 - 高エネルギー重イオン衝突における輸送理論
- 原子核基礎論 B 後半 (大西担当分) では、これらの内容について講義します。