

# 高密度クォーク・核物質の状態方程式と相転移

京大・基礎物理学研究所  
(原子核理論グループ)  
大西 明

- QCD 相図の物理
- カイラル対称性の自発的破れと回復
- 中性子星パズル : $2M_{\odot}$  の質量をもつ中性子星と状態方程式
- まとめ

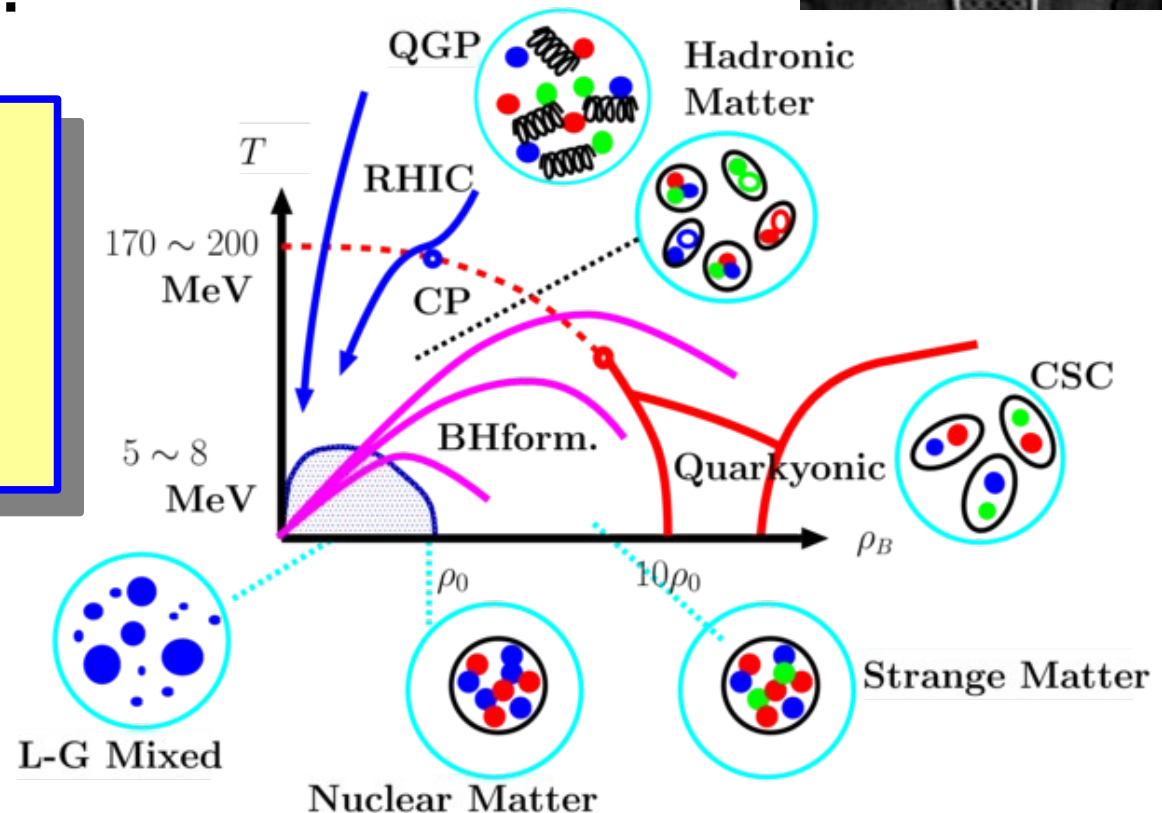
# QCD 相図の物理

- 高エネルギー重イオン衝突で探る QCD 相図
  - 超高温クォーク・グルーオン物質 ~ 初期宇宙物質
- コンパクト天体現象で探る QCD 相図
  - 超高密度クォーク・ハドロン物質



→ なぜ相転移が起こるのか？

キーワード  
 =カイラル対称性の  
 自発的破れとその回復  
 (南部陽一郎、  
 2008 年ノーベル物理学賞)



# 南部・ヨナラシーニヨ (NJL) 模型

## ■ カイラル対称性

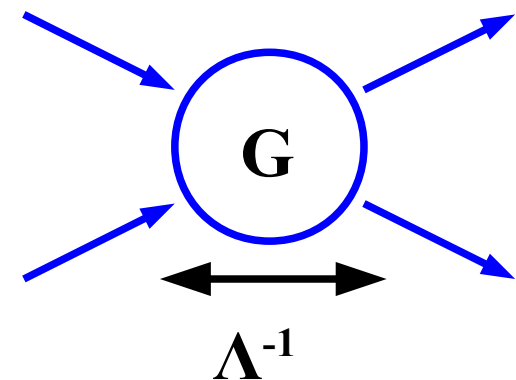
=質量ゼロの右巻き・左巻きクォークが独立な位相をもてる対称性

→  $S = \bar{q}q, P = \bar{q}i\gamma_5\tau q$  空間における回転

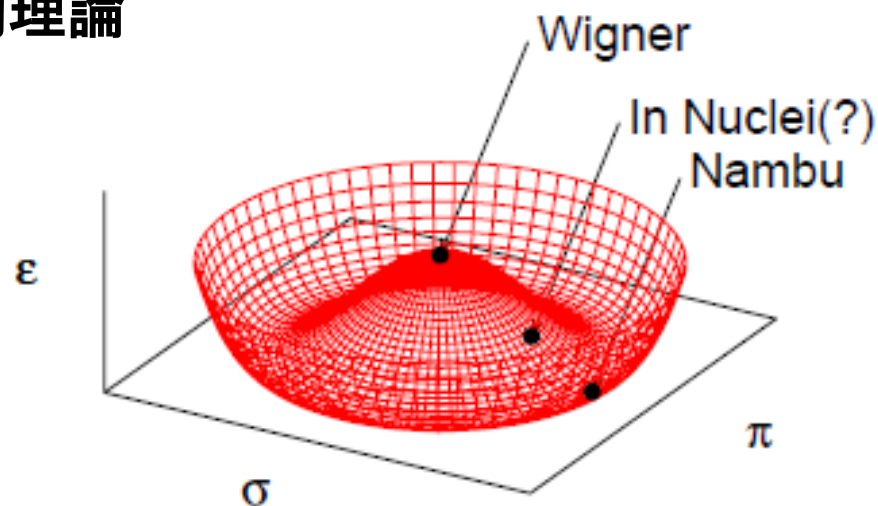
→  $S^2 + P^2 =$ カイラル変換しても一定

## ■ 南部・ヨナラシーニヨ (NJL) 模型

$$L = \bar{q}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)q + \frac{G^2}{2\Lambda^2} [(\bar{q}q)^2 + (\bar{q}i\gamma_5\tau q)^2]$$



- QCD の対称性を保った quark の有効理論 (m=0 で chiral sym. をもつ)



*Nambu, Jona-Lasinio ('61), Hatsuda, Kunihiro ('94)*

# カイラル対称性の自発的破れ

- ユークリッド化 : 時間発展  $\exp(-iHt) \rightarrow$  ボルツマン因子  $\exp(-H/T)$

$$L_E = \bar{q} (-i \gamma_\mu \partial_\mu + m) q - \frac{G^2}{2\Lambda^2} \left[ (\bar{q} q)^2 + (\bar{q} i \gamma_5 \boldsymbol{\tau} q)^2 \right]$$

$$(x_\mu)_E = (\tau = it, \mathbf{x}), \quad (\gamma_\mu)_E = (\gamma_4 = i \gamma^0, \boldsymbol{\gamma})$$

- 平均場近似 ( ~ 統計力学でスピン・スピン相互作用に用いる近似 )

$$-\frac{G^2}{2\Lambda^2} \left[ (\bar{q} q)^2 + (\bar{q} i \gamma_5 \boldsymbol{\tau} q)^2 \right] \rightarrow \frac{\Lambda^2}{2} (\sigma^2 + \pi^2) + G \bar{q} (\sigma + i \gamma_5 \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\pi}) q$$

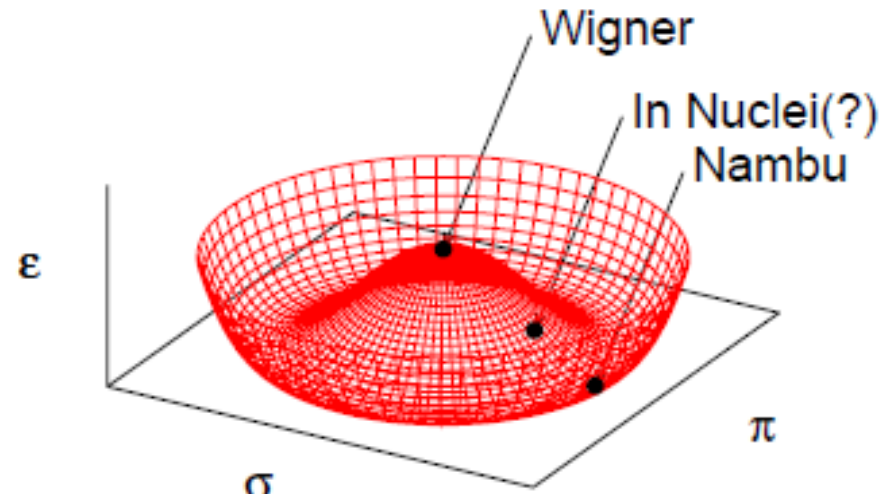
$$\rightarrow L_E = \bar{q} \left[ -i \gamma_\mu \partial_\mu + \underbrace{m + G \sigma}_{\text{質量}} + i G \gamma_5 \boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\pi} \right] q + \frac{\Lambda^2}{2} (\sigma^2 + \pi^2)$$

対称性の自発的破れ

= 作用が対称であっても、  
期待値は対称でなくてもよい

$$\langle \sigma \rangle \neq 0, \langle \pi \rangle = 0$$

→ クォークが  $G\sigma + m$  の質量を獲得

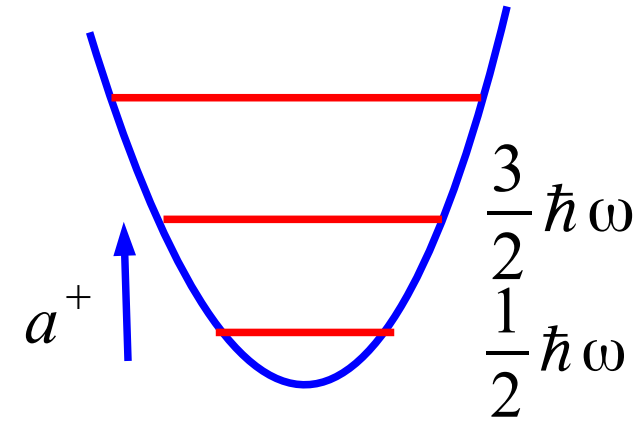


Nambu, Jona-Lasinio ('61)

# カイラル対称性の自発的破れ (cont.)

- なぜカイラル凝縮  $\sigma$  が期待値を持つか？  
→ ゼロ点エネルギー

- 場の理論 = それぞれの運動量に対する調和振動子の集まり  
→ ボソンでは  $\hbar\omega/2$ , フェルミオンでは  $-\hbar\omega/2$
- 自由エネルギー密度



ゼロ点エネルギー

$$F_{\text{eff}} = \frac{\Lambda^2}{2} \sigma^2 + d_f \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \left[ \frac{E_k}{2} - \frac{k^2}{3 E_k} \frac{1}{\exp(E_k/T) + 1} \right]$$

$$E_k = \sqrt{k^2 + M_q^2}, \quad M_q = G\sigma + m$$

- 自由エネルギーを最小にするカイラル凝縮 ( $\sigma$ ) が実現

$$\frac{\partial F_{\text{eff}}}{\partial \sigma} = 0 \quad \text{ギャップ方程式}$$

- 有限の  $\sigma \rightarrow$  クォーク質量の増大  
→ ゼロ点エネルギーの増大 → 自由エネルギーの減少

# カイラル対称性の自発的破れと回復

$$F_{\text{eff}} = \frac{\Lambda^2}{2} \sigma^2 + d_f \int \frac{d^3 k}{(2\pi)^3} \left[ \frac{E_k}{2} - \frac{k^2}{3 E_k} \frac{1}{\exp(E_k/T) + 1} \right]$$

## ■ 真空 (T=0)

ゼロ点

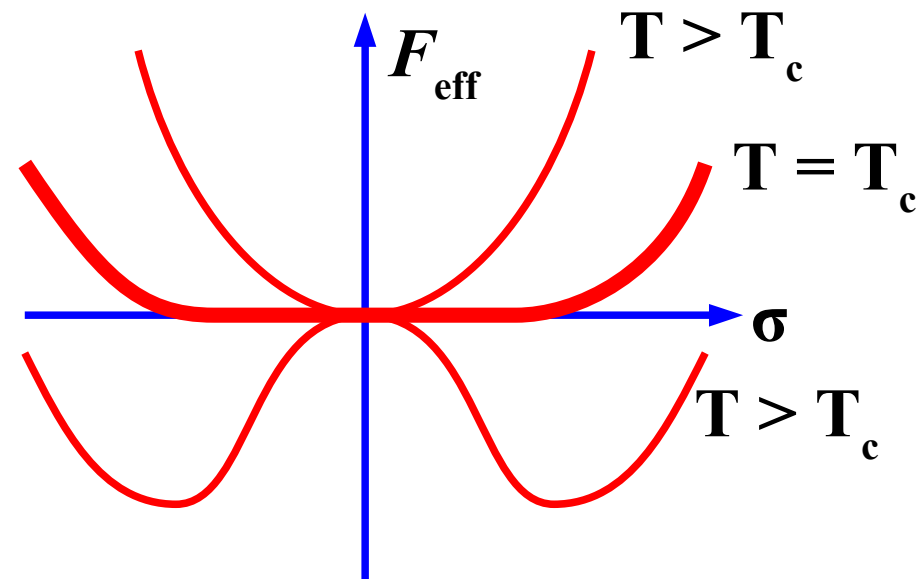
粒子圧力

- ゼロ点エネルギーが主要
- 結合定数  $G$  が大きければ、有限の  $\sigma$  で自由エネルギーが最小  
→ カイラル対称性の自発的破れ

## ■ 有限温度

- 粒子の圧力部分も存在
- 質量の増加 → 圧力減少  
→ 小さな  $\sigma$  が有利  
(カイラル対称性の回復)

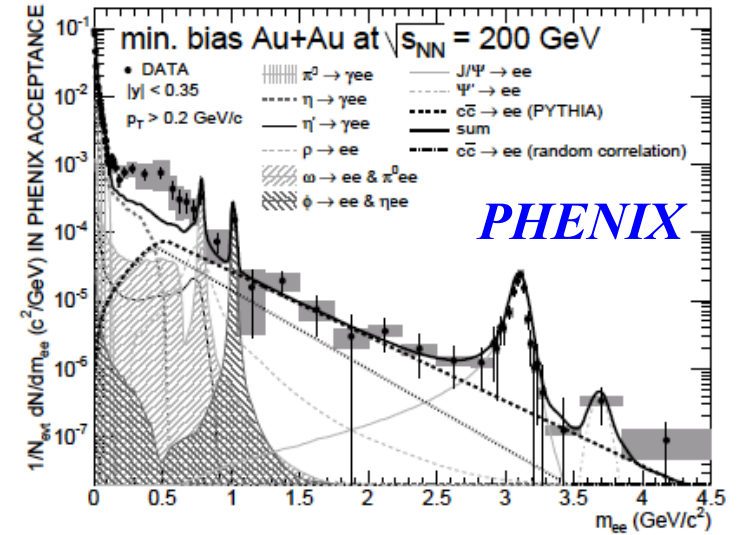
真空中で自発的に破れていても、  
温度が高くなると回復  
(カイラル相転移)



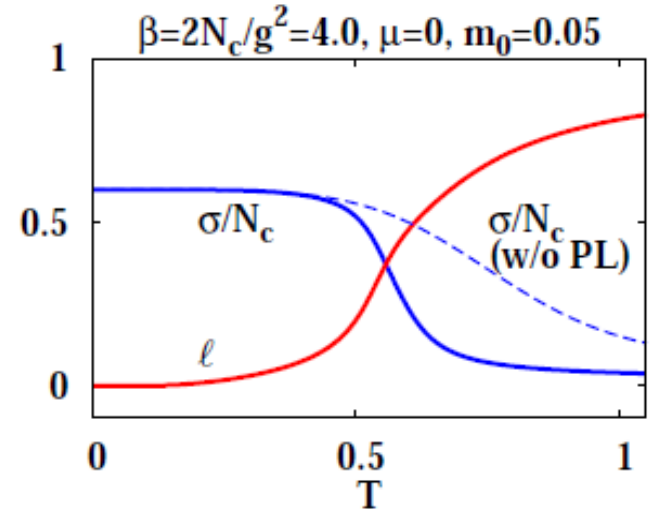
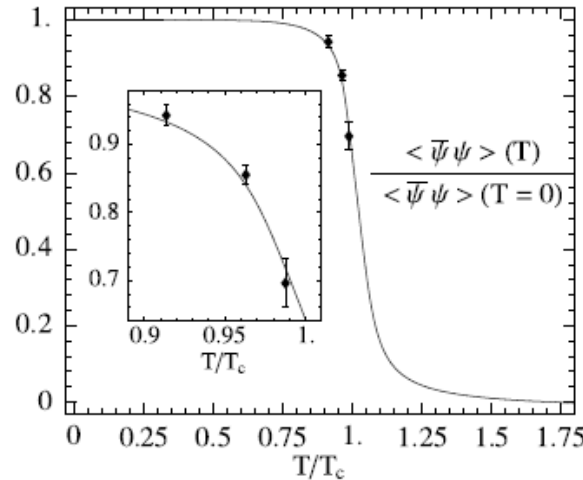
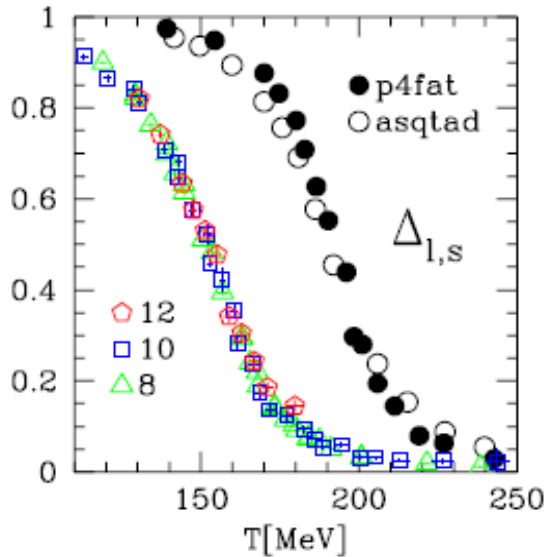
*Nambu, Jona-Lasinio ('61), Hatsuda, Kunihiro ('94)*

# カイラル対称性の回復

- 実験: ベクトル中間子の質量変化  
*CERES Collab., PRL75('95),1272;*  
*PHENIX Collab., arXiv:0706.3034;*  
*KEK-E325 Collab.(Ozawa et al.), PRL86('01),5019.*  
*Brown, Rho ('91), Hatsuda, Kunihiro ('94)*
- 理論: 格子 QCD モンテカルロ計算、  
 有効模型、強結合格子 QCD、....



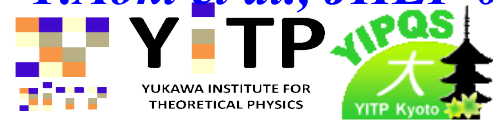
カイラル対称性の回復の観測的シグナルは？



*Rossner, Ratti, Weise,*  
*PRD75(07)034007*

*Nakano, Miura, AO,*  
*PRD83('11)016014*

*Y. Aoki et al., JHEP 0906(09) 088*

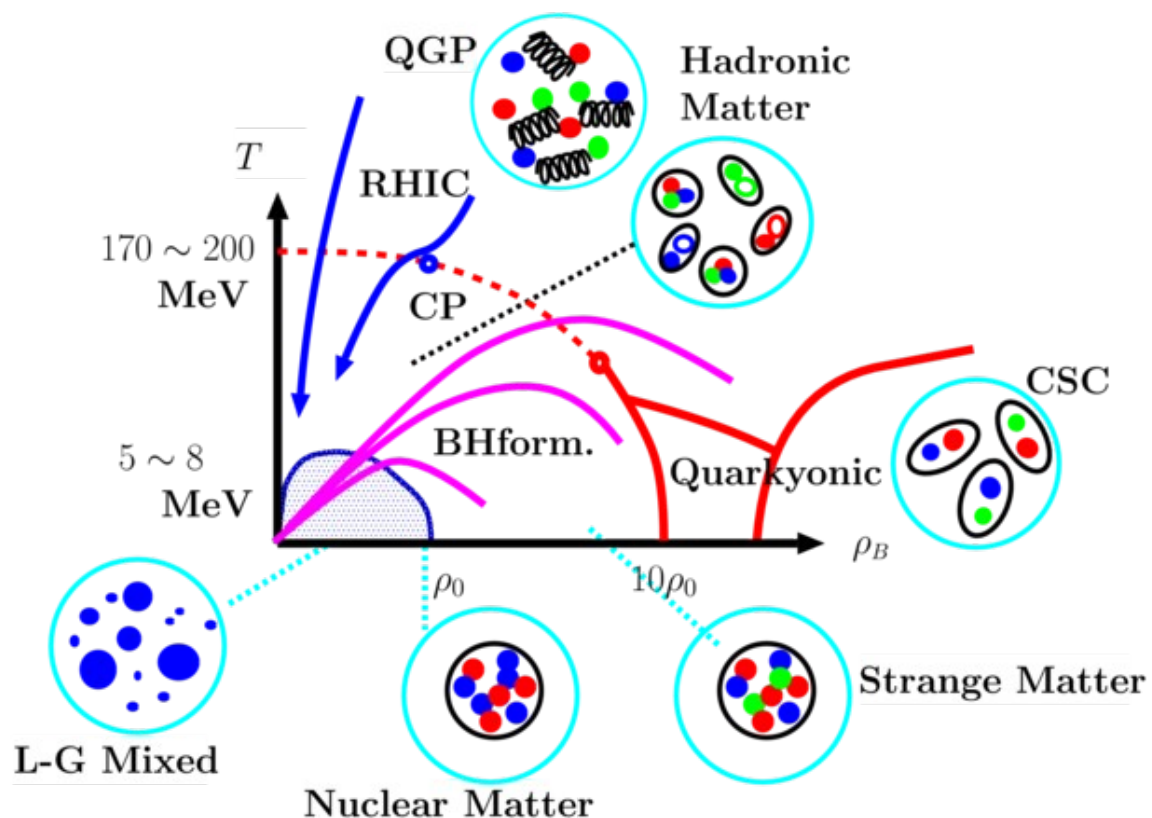




# 有限密度での QCD 相転移

- 高温での QCD 相転移研究
  - 高エネルギー重イオン衝突 (RHIC, LHC)
  - 格子 QCD モンテカルロ計算 (「京」)
- $\mu=0$  での相転移はクロスオーバー (滑らかな転移)
  - 「本当」の QCD 相転移 (1 次、2 次) はどこで起こるか?
  - 有限密度 (有限の化学ポテンシャル)

- 少し低いエネルギーでの重イオン衝突
- 中性子星内部
- ブラックホール形成過程
- 中性子星の合体
- ....



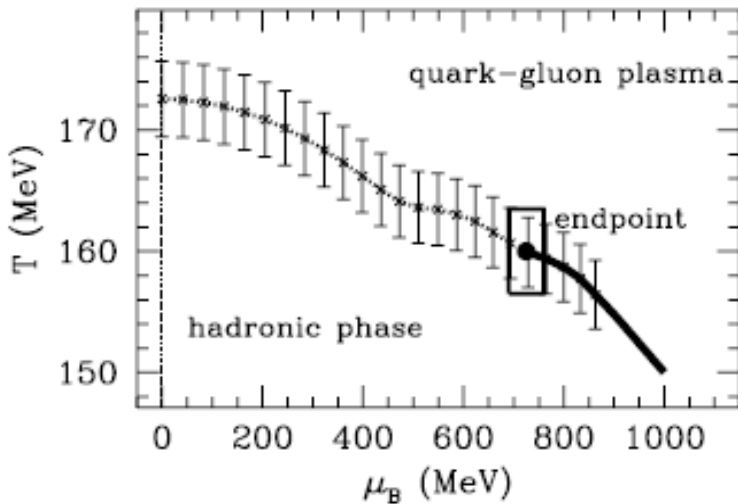
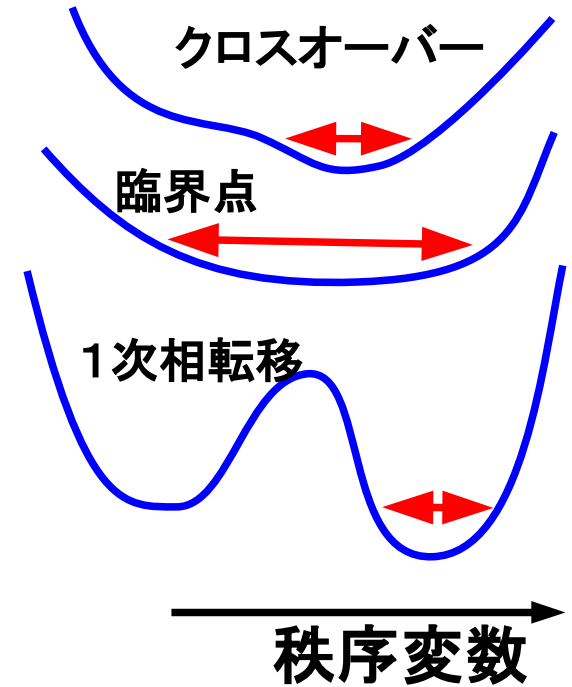


# 有限密度での QCD 相転移 (cont.)

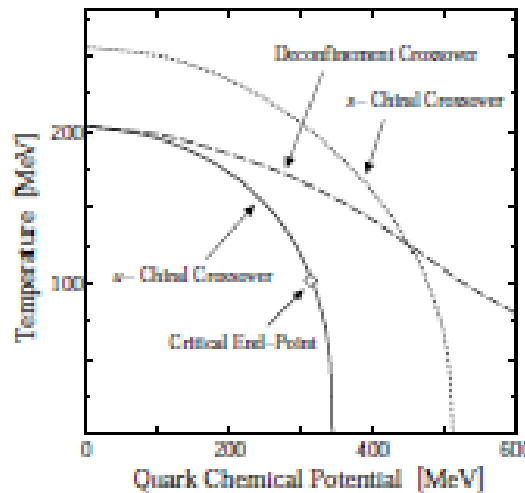
## ■ QCD の相構造

- 低密度側 = クロスオーバー  
(クォーク質量が0のときは2次)
- 高密度側 = 1次相転移
- 2つの相転移線を臨界点がつなぐ

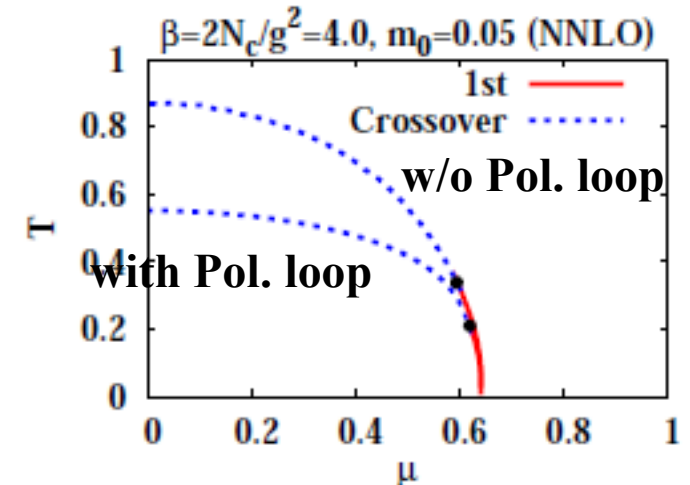
- 問題: 有限密度では第一原理計算  
(格子 MC 計算) ができない (符号問題)。  
→ 模型計算、近似計算が必要!



LQCD: Fodor, Katz ('02)



PNJL:  
Fukushima ('08)

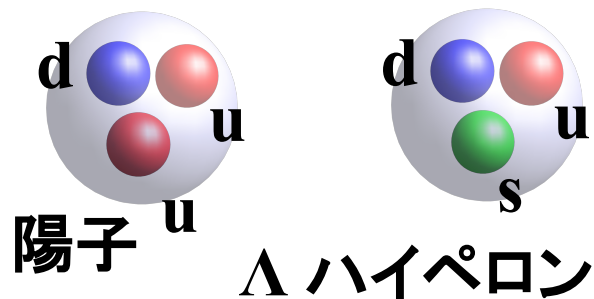


SC-LQCD  
Miura, Nakano, AO

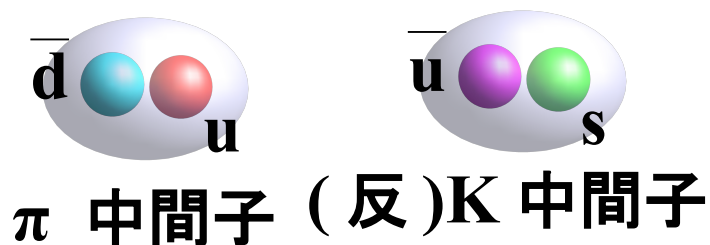
# 中性子星コアの状態

## ■ コア領域では様々な可能性

- ストレンジクォークを含むバリオン (ハイペロン) を含む物質

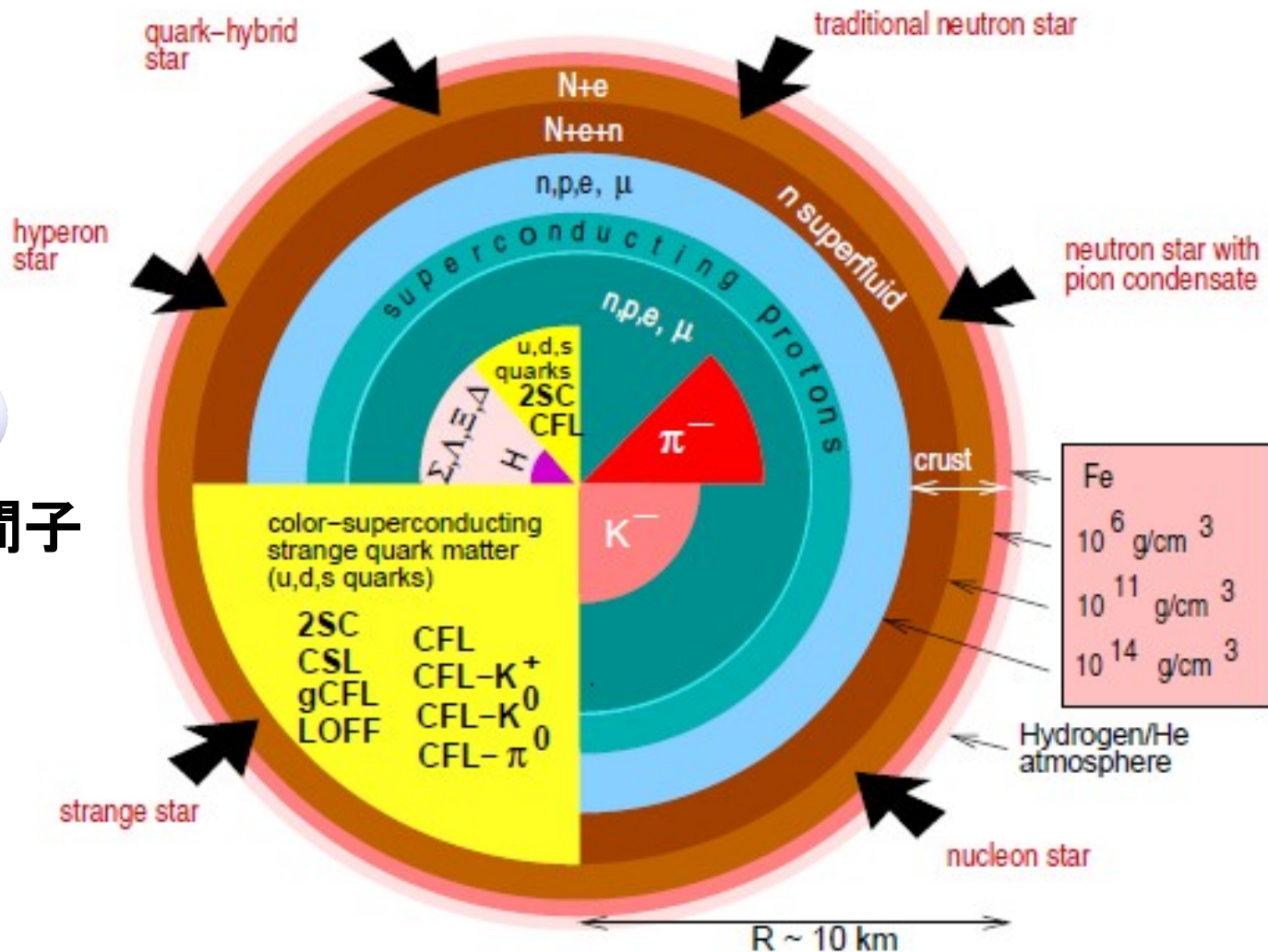


- 中間子凝縮 ( $K, \pi$ )



- クォーク物質

- クォーク対凝縮状態 (カラー超伝導)

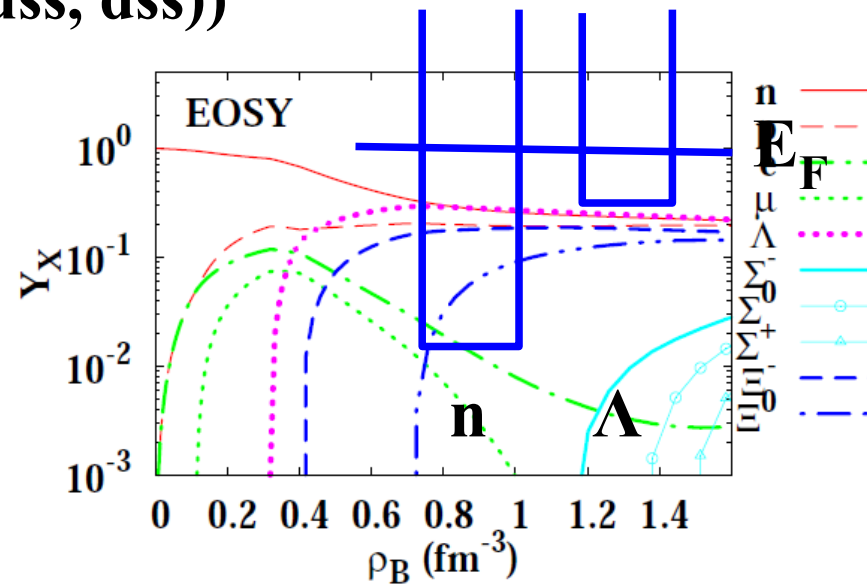


*F. Weber, Prog. Part. Nucl. Phys. 54 (2005) 193*

# 中性子星コアの状態 (cont.)

## ■ ハイペロン ( $\Lambda(uds)$ , $\Sigma(uus, uds, dds)$ , $\Xi(uss, dss)$ )

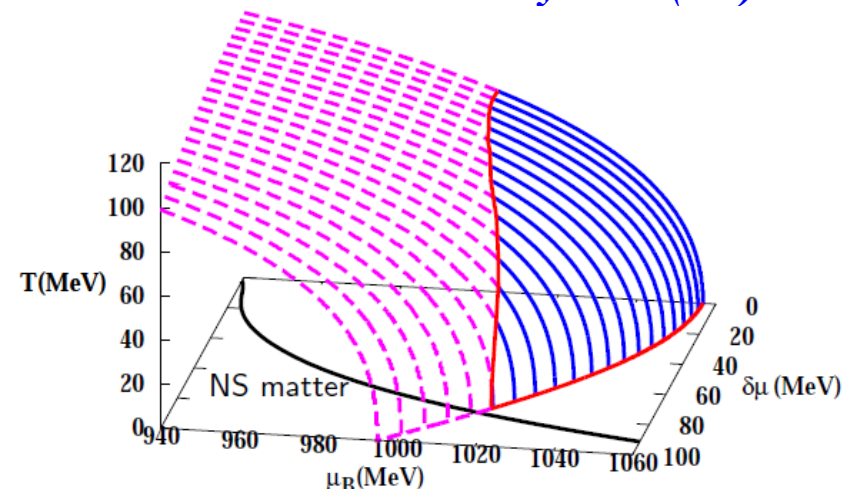
- 中性子のフェルミ・エネルギーが質量差 (+ ポテンシャルの差) を超えると現れる。
- ハイパー核 (ハイペロンを含む原子核) のデータを再現する理論模型  
→ 核密度の (2-4) 倍でハイペロン出現



Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada, *J. Phys. G35('08)085201*

## ■ クォーク物質

- QCD 有効模型 (NJL 模型等)  
→ 核子質量 + (100-200) MeV 程度の化学ポテンシャルでカイラル相転移 (ただし、原子核の飽和性などは再現していない)



高密度で現れるのは、  
ハイペロンか、クォークか、両方か？  
→ J-PARC での実験に期待！

上田 (修論)

# 重い中性子星ショック....

## ■ 2010年のビッグニュース

「 $1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$  の質量をもつ中性子星が発見された」

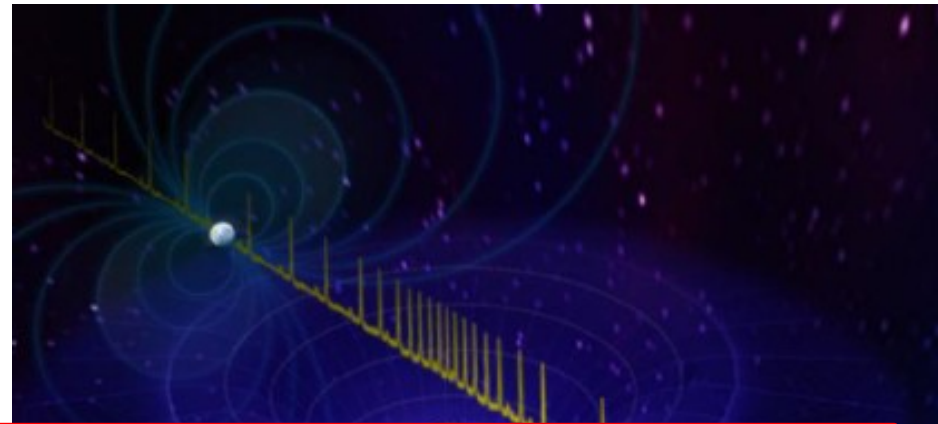
Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081 (Oct.28, 2010).

### ● 一般相対論に基づく観測

「パルサー(中性子星)からくる光が伴星(白色矮星)の近くを通り、時間が遅れる(Shapiro delay)。」

### 論文での主張

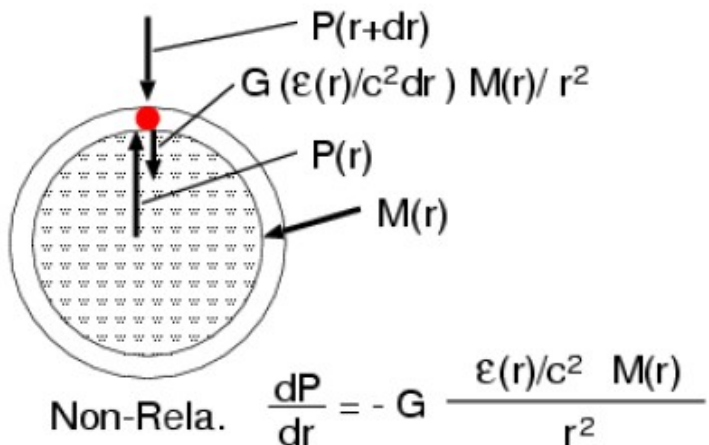
$(1.97 \pm 0.04) M_{\odot}$  の中性子星は、ハイペロン、中間子凝縮を含む状態方程式では支えられない。クォーク物質でも強い相互作用が必要である。



signature. We calculate the pulsar mass to be  $(1.97 \pm 0.04)M_{\odot}$ , which rules out almost all currently proposed<sup>2-5</sup> hyperon or boson condensate equations of state ( $M_{\odot}$ , solar mass). Quark matter can support a star this massive only if the quarks are strongly interacting and are therefore not 'free' quarks<sup>12</sup>.

# 状態方程式と中性子星の最大質量

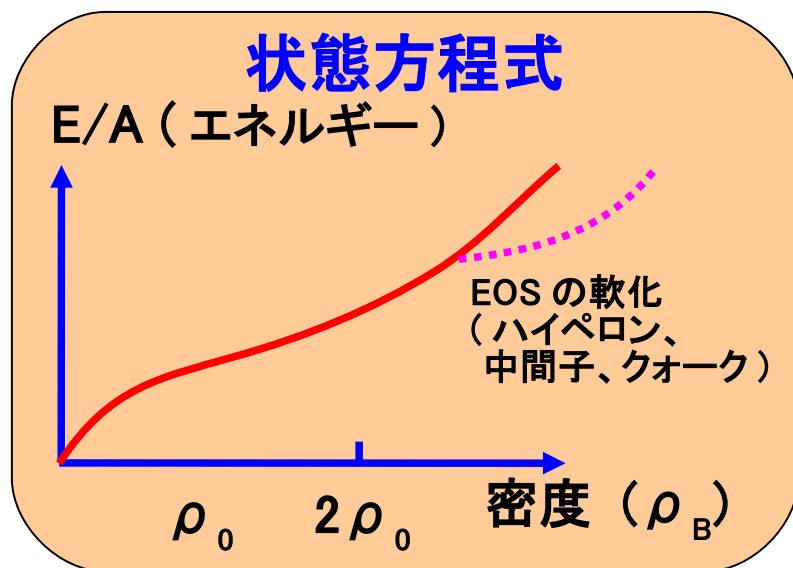
- TOV(Tolman-Oppenheimer-Volkoff) 方程式  
= 一般相対論での圧力と重力の釣り合いを記述



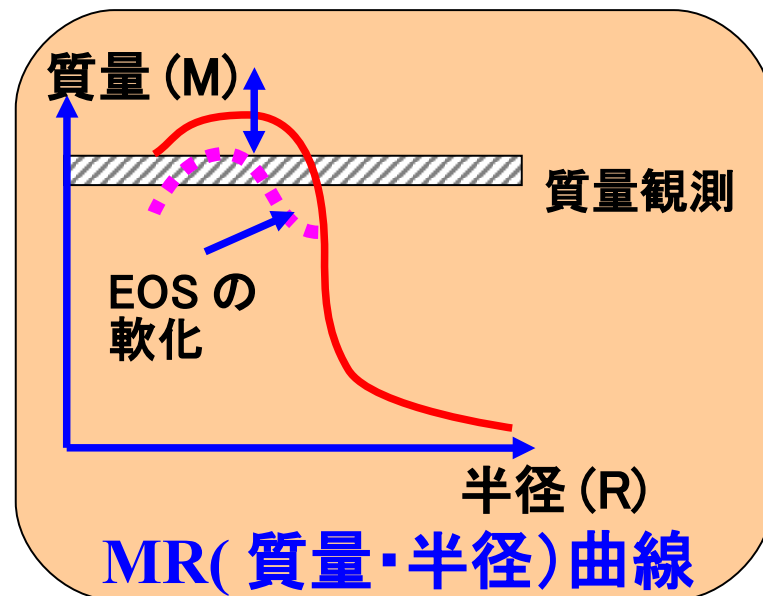
$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{(\epsilon/c^2 + P/c^2)(M + 4\pi r^3 P/c^2)}{r^2(1 - 2GM/rc^2)}$$

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

- 状態方程式 (EOS) を与えると質量・半径の関係式は一意的



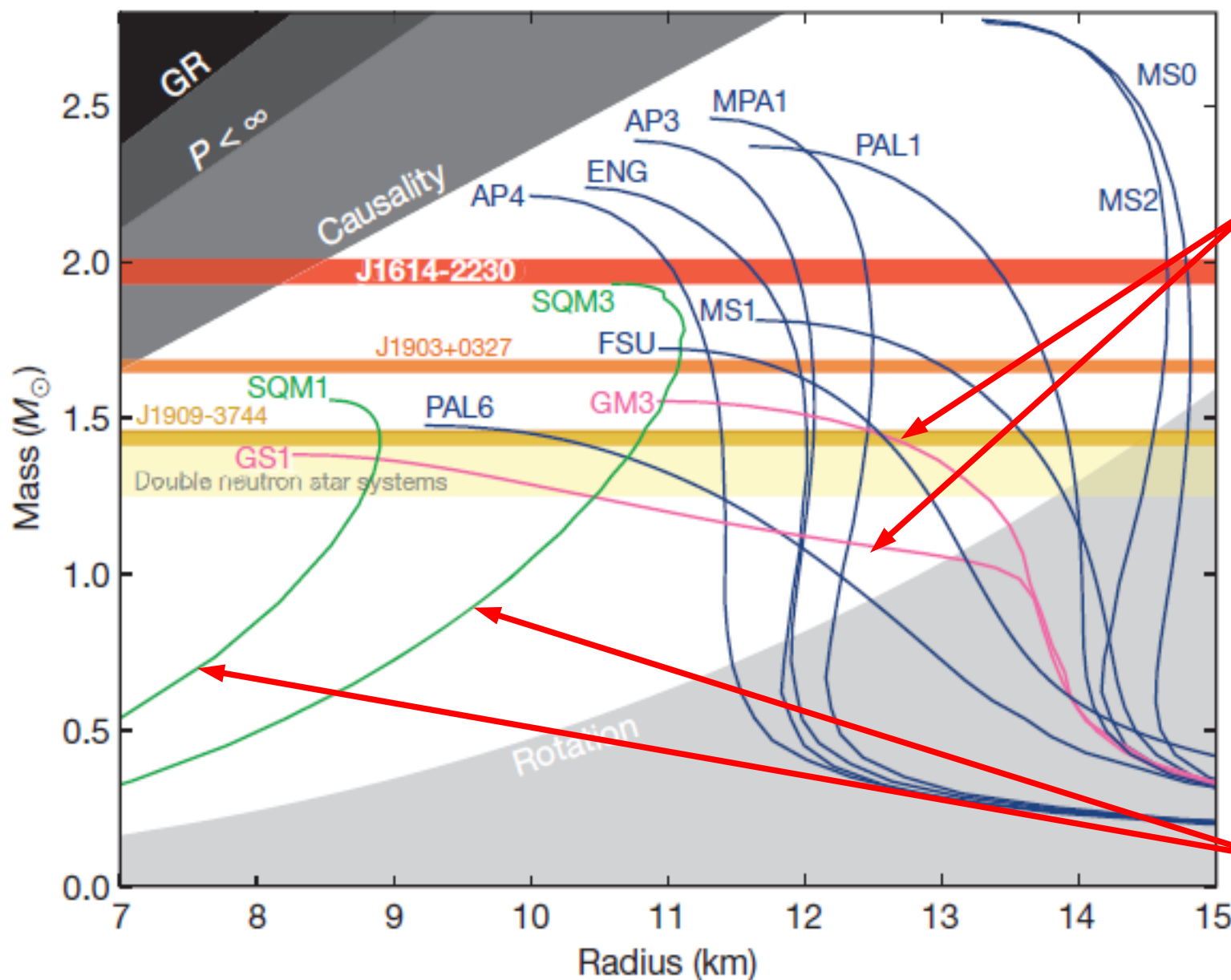
TOV 方程式





# $1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$ Neutron Star

*Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081 (Oct.28, 2010).*



ハイペロンを  
含む EOS

クォーク物質  
のみの EOS

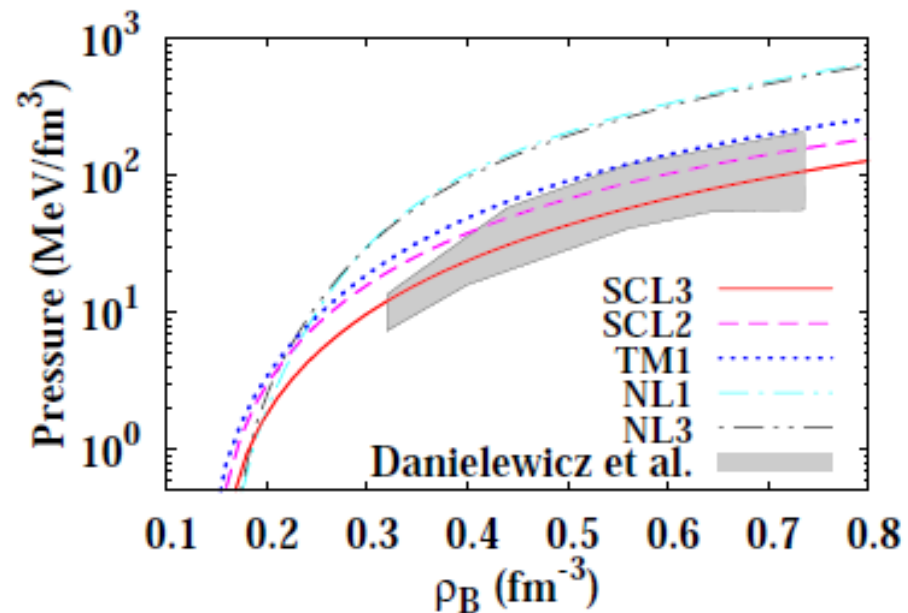
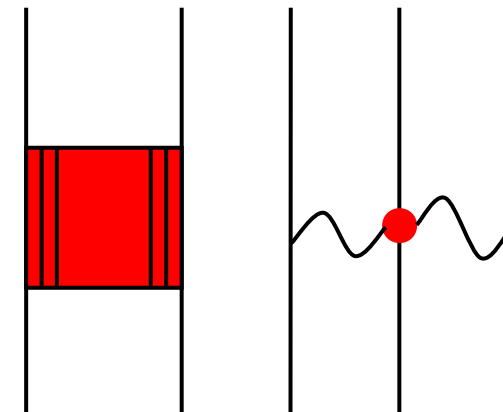
# さて、高密度物質で何がおこっているのか？

## ■ 2 倍の太陽質量の中性子星を支えるには？

- ハイペロンが出てこなければよい？  
→ なぜ出てこないかの説明が必要。  
現在のハイペロン - 核子相互作用の理解に間違いがある？  
核子 - 核子 - ハイペロンなどの 3 体力が必要？

*Nishizaki, Takatsuka, Yamamoto*

- 状態方程式を硬くすればよい？  
→ 硬すぎると重イオン衝突の分析と矛盾。  
核密度の (4-5) 倍以上で徐々に硬くなる機構は？
- 自由なクォークでは支えられない？  
→ 現在、世界中でクォーク物質の状態方程式を構築中



このパズルを解くのは誰？

*Tsubakihara et al., 2010*



# まとめ

- QCD 相転移は「自発的に破れたカイラル対称性の回復」でもある。
  - ゼロ点エネルギーにより有限のカイラル凝縮でエネルギー利得
  - 温度・密度効果はカイラル凝縮をこわす方向に働く。
  - カイラル相転移の実験的証拠は？
  - もう一つの側面＝カラーの非閉じ込め相転移。RHIC, LHC での観測
- 有限密度 QCD 相図
  - 低密度側 (クロスオーバー) と高密度側 (1 次相転移) を臨界点がつなぐ。
  - 第一原理計算が困難 → 模型、近似手法を用いた研究＋実験・観測
- 高密度物質の状態方程式
  - 高密度状態 → 様々な状態の発現が期待されている。
  - 中性子星：状態方程式と質量・半径曲線は1対1
  - $1.97 M_{\odot}$ 。中性子星の発見 → 高密度物質状態方程式に大きな制限