

---

**1000 兆 g/cc の世界**  
**--- 高密度物質の状態方程式と相図 ---**

大西 明 (基礎物理学研究所)

- Introduction --- 1000 兆 g/cc の世界
- 高密度物質の性質はどこまでわかっているか
- まとめ

物を圧縮していくとどのような状態になるだろうか？

通常物質は電子の圧力で支えられているが、密度が1000兆 g/cc 程度まで高くなると陽子・中性子の圧力が物質を支えるようになる。さらに高い密度ではストレンジネスという新しい自由度が現れ、ついにはクォークが開放された物質となる。このような「超高密度物質」は中性子星の中心部やブラックホール形成過程で作られると考えられており、また今年稼動する J-PARC にて、その理解が進むと期待されている。

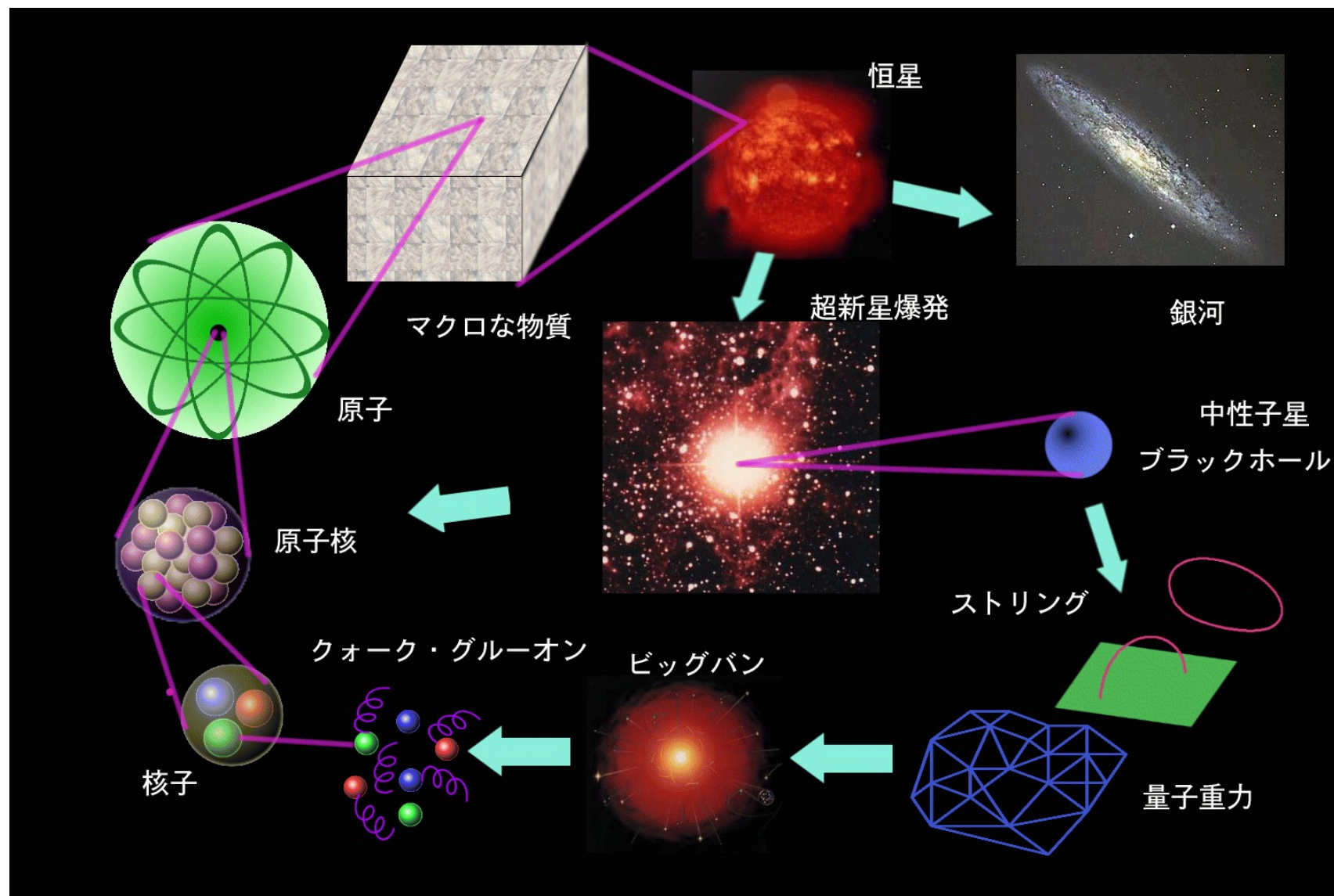
この講演では原子核物理学の立場から高密度物質の状態方程式と相図、および天体現象への影響について議論する。

---

# *Introduction*

*--- 1000 兆 g/cc の世界 ---*

# 物質は何からできているか？



# クォークとは何者か？

- 核子は u, d クォーク3つからできている

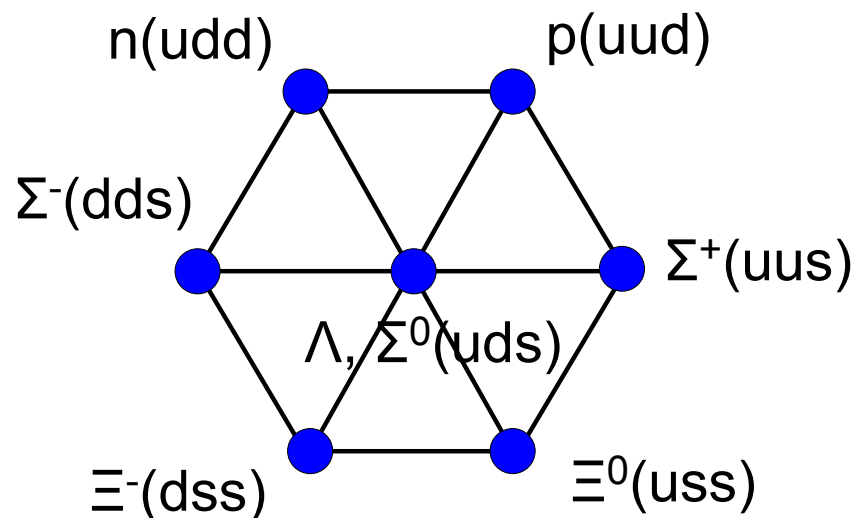
- 電荷は素電荷  $e$  の分数倍 ( $-1/3, 2/3$ )
- u, d クォークの質量は 5 MeV 程度

- 同じスピン・空間状態に3つはいれる  
→ スピン以外に「色」(r,g,b) の自由度を持つ

- 単独では観測されていない。

- 3クォーク (陽子等のバリオン)、クォーク・反クォーク対 (中間子) の「白色」の組み合わせ (ハドロン) で観測される。  
(s を含むバリオン = ハイペロン)
- 激しい電子衝突での散乱体としては見える

粒子	質量 (MeV)	電荷
n (中性子)	939	0
p (陽子)	938	1
d (down)	~ 5	- 1/3
u (up)	~ 5	2/3
s (strange)	~ 150	- 1/3
c (charm)	~ 1500	2/3
b (bottom)	~ 5000	- 1/3
t (top)	~ 180000	2/3

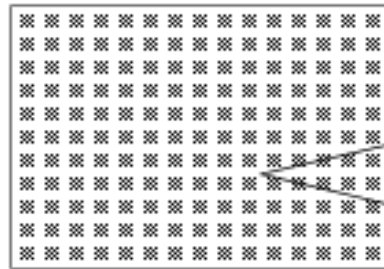


# 物質の大きさと密度

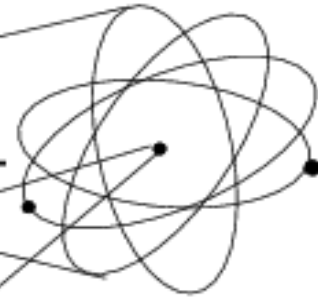
通常物質

原子

$1 \text{ g/cc}$

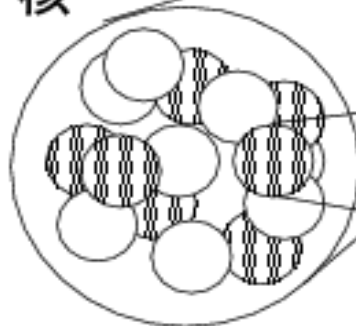


電子



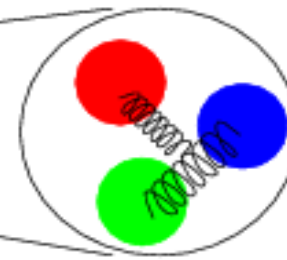
$10^{-8} \text{ cm}$   $1 \text{ g/cc}$

原子核



核子

$2.5 \times 10^{14} \text{ g/cc}$



$2 \times 10^{15} \text{ g/cc}$

$10^{-12} \text{ cm}$

$10^{-13} \text{ cm}$

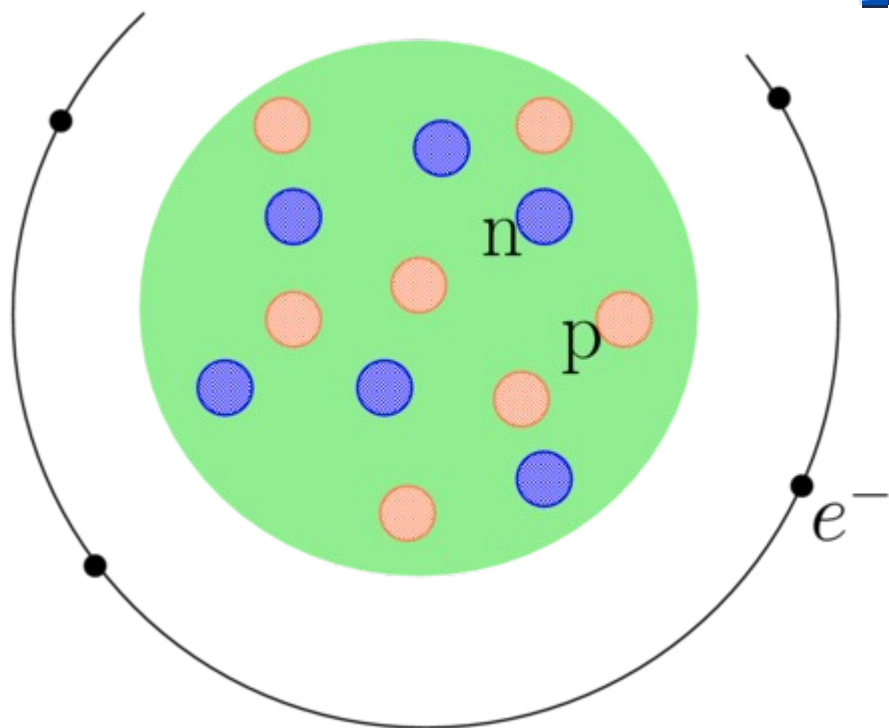
核子 (陽子, 中性子)

クォークとグルーオン

原子核・ハドロン・クォークの世界

=  $10^{14} - 10^{15} \text{ g/cc}$  (100-1000 兆  $\text{g/cc}$ ) の高密度物質

# 物質を圧縮していくと何が起こるか？ (1)



## ■ 原子核の性質

- Z 個の陽子 (p) と N 個の中性子 (n) からなる原子核 =  ${}^A_Z$  (質量数  $A=Z+N$ )
- 束縛エネルギーは「液滴模型」(ベーテ・ワイゼッカー公式) でよく記述できる。  
→ 非常に大きな系では束縛エネルギーが質量数に比例

$$B(A, Z) = a_{\text{vol}} A - a_{\text{sym}} A \left( \frac{N-Z}{A} \right)^2 - a_{\text{surf}} A^{2/3} - a_{\text{Coulomb}} \frac{Z^2}{A^{1/3}} + a_{\text{pair}} \delta(A, Z) A^{-3/4}$$

- 半径は質量数の  $1/3$  乗に比例

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (r_0 \simeq 1.1 \text{ fm})$$

(密度の飽和性)

原子核の中心付近の密度

$$= 2.5 \times 10^{14} \text{ g/cc}$$

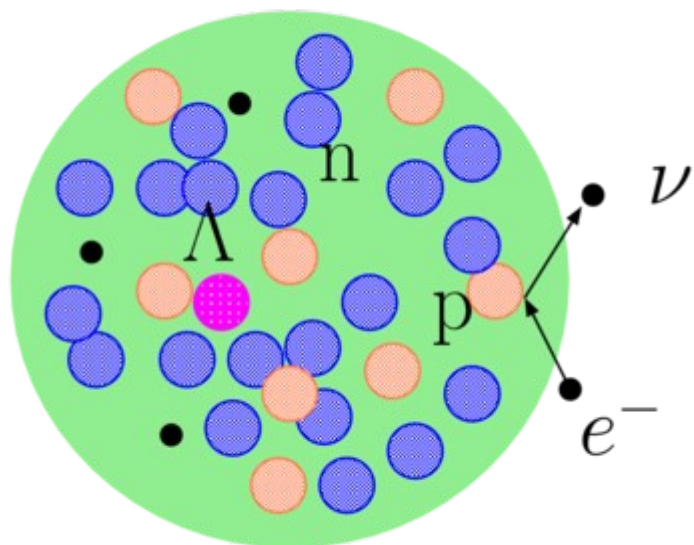
$$= 0.16 \text{ fm}^3$$

電子を含む原子全体の平均密度

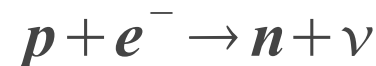
~ 通常物質の密度

$$= 1 \sim 10 \text{ g/cc}$$

# 物質を圧縮していくと何が起こるか？ (2)



- 電氣的に中性のまま圧縮すると、陽子が電子を吸収してニュートリノを放出（電子捕獲）



→ 物質の中性子化

- さらに圧縮すると、ストレンジクォークを含むハイペロンが出現

- 密度の増加
  - 中性子フェルミエネルギーの増加
  - ハイペロンの質量を越える
  - ハイペロンの出現



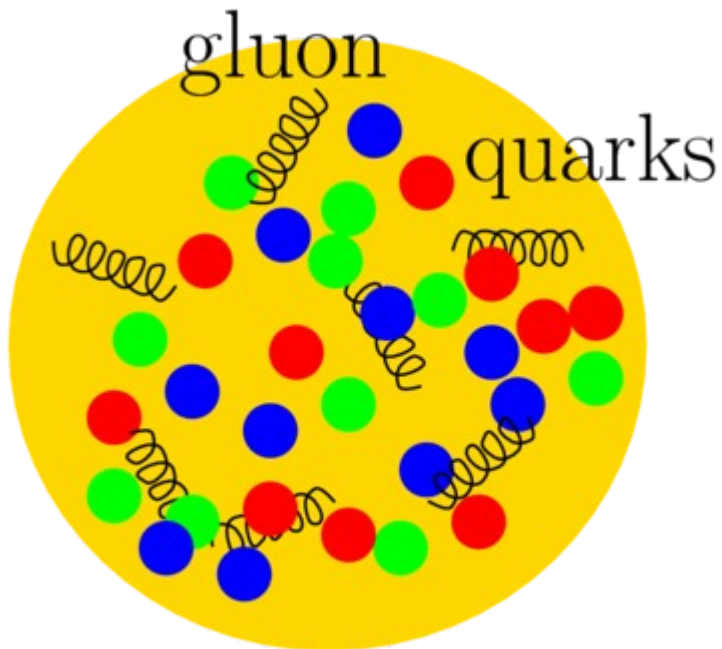
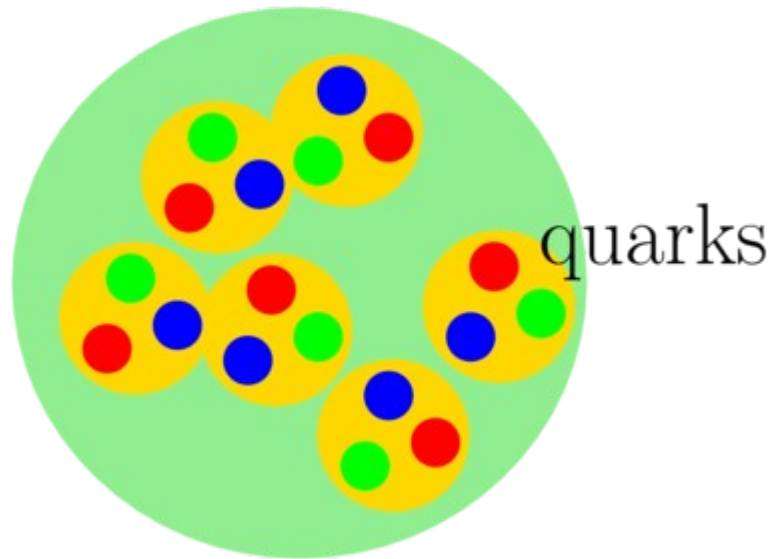
物質の密度

$$= (2-8) \times 10^{14} \text{ g/cc}$$

$$= (0.1-0.5) \text{ fm}^{-3}$$



# 物質を圧縮していくと何が起こるか？ (2)



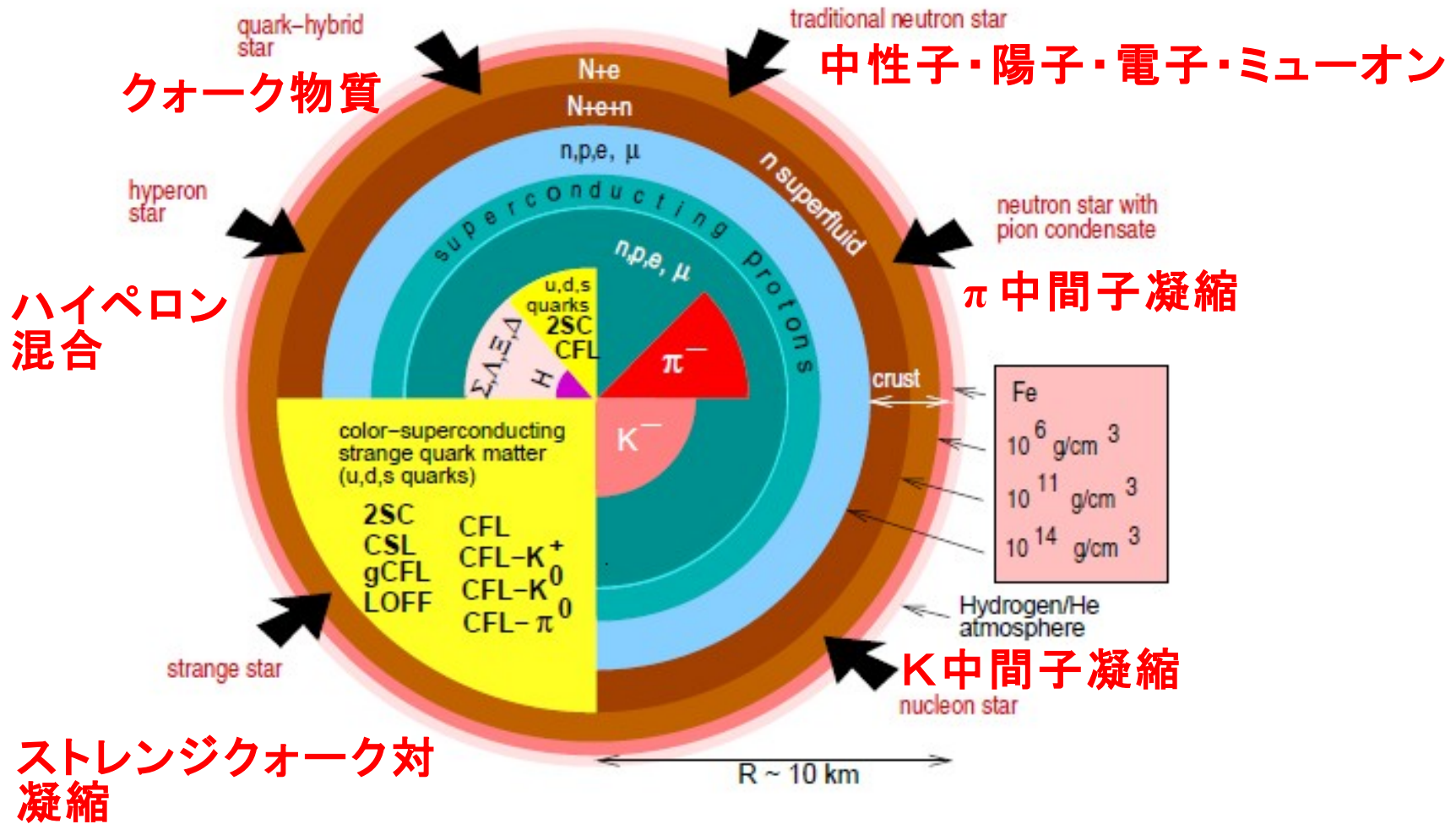
- 原子核密度の数倍を越えると、核子が重なり始める
  - 原子核密度  $\rho_0 \sim 0.16 \text{ fm}^{-3}$   
→ 核子間距離は 1.8 fm 程度
  - 核子の大きさ  $\sim 0.8 \text{ fm}$  程度  
→ 原子核密度の 10 倍程度で重なる
- 重なった核子の領域をクォークは自由に動き回る  
→ クォーク物質へ

物質の密度

$$\sim 2 \times 10^{15} \text{ g/cc} \sim 1 \text{ fm}^{-3}$$

$$\sim 2000 \text{ 兆 g/cc}$$

# 「中性子星」は何からできているか？



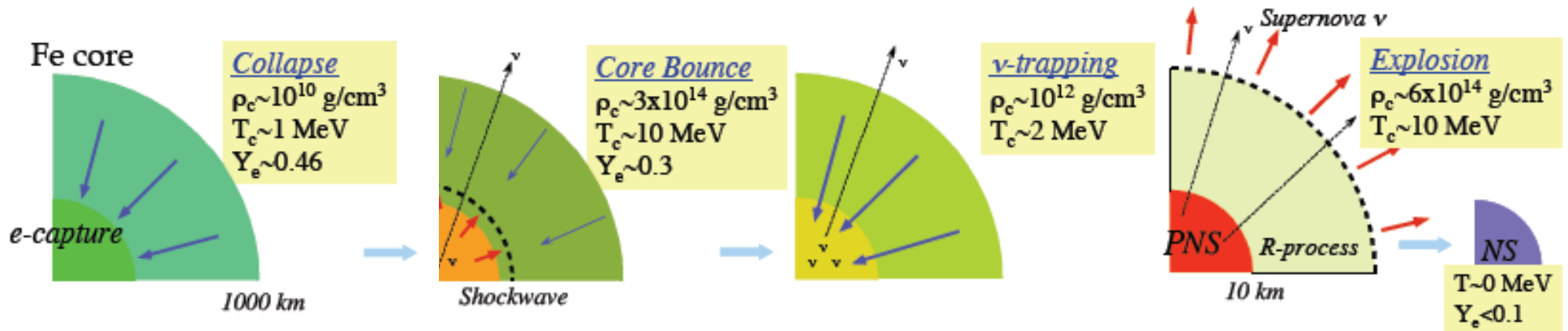
*F. Weber, Prog. Part. Nucl. Phys. 54 (2005) 193*

「中性子星」の内側  
→ (おそらく) ストレンジクォークを多く含む物質！

# 超新星爆発で現れる高密度物質

## ■ 超新星爆発

- 大きな星（質量が太陽の10倍程度以上）の最後
  - 重力崩壊して中心部の密度が原子核密度を越える  
密度  $\sim (4-6) \times 10^{14}$  g/cc (400-600 兆 g/cc)
  - 圧縮された核物質が反発して衝撃波を生み出す
  - 生まれたての中性子星からのニュートリノ放出による加熱と合わせて爆発



by Sumiyoshi

# 物質を熱していくと何が起こるか？

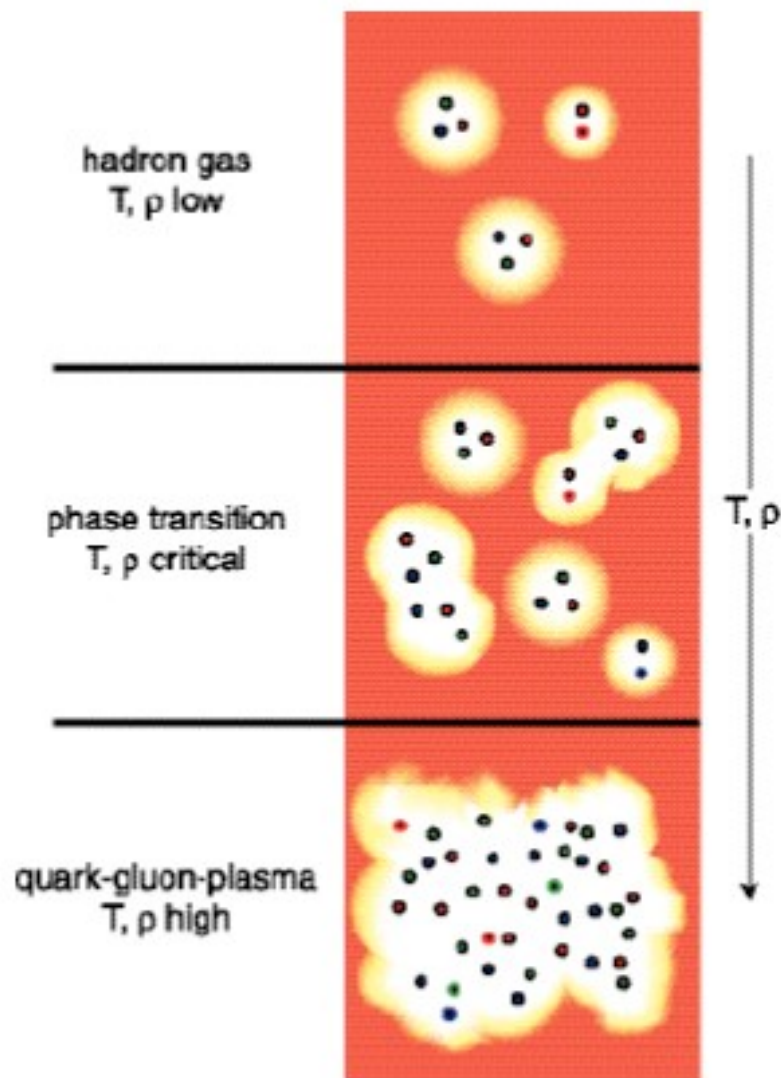
## ■ 理想気体の状態方程式

$$pV = nRT = N(R/N_A)T = NkT$$

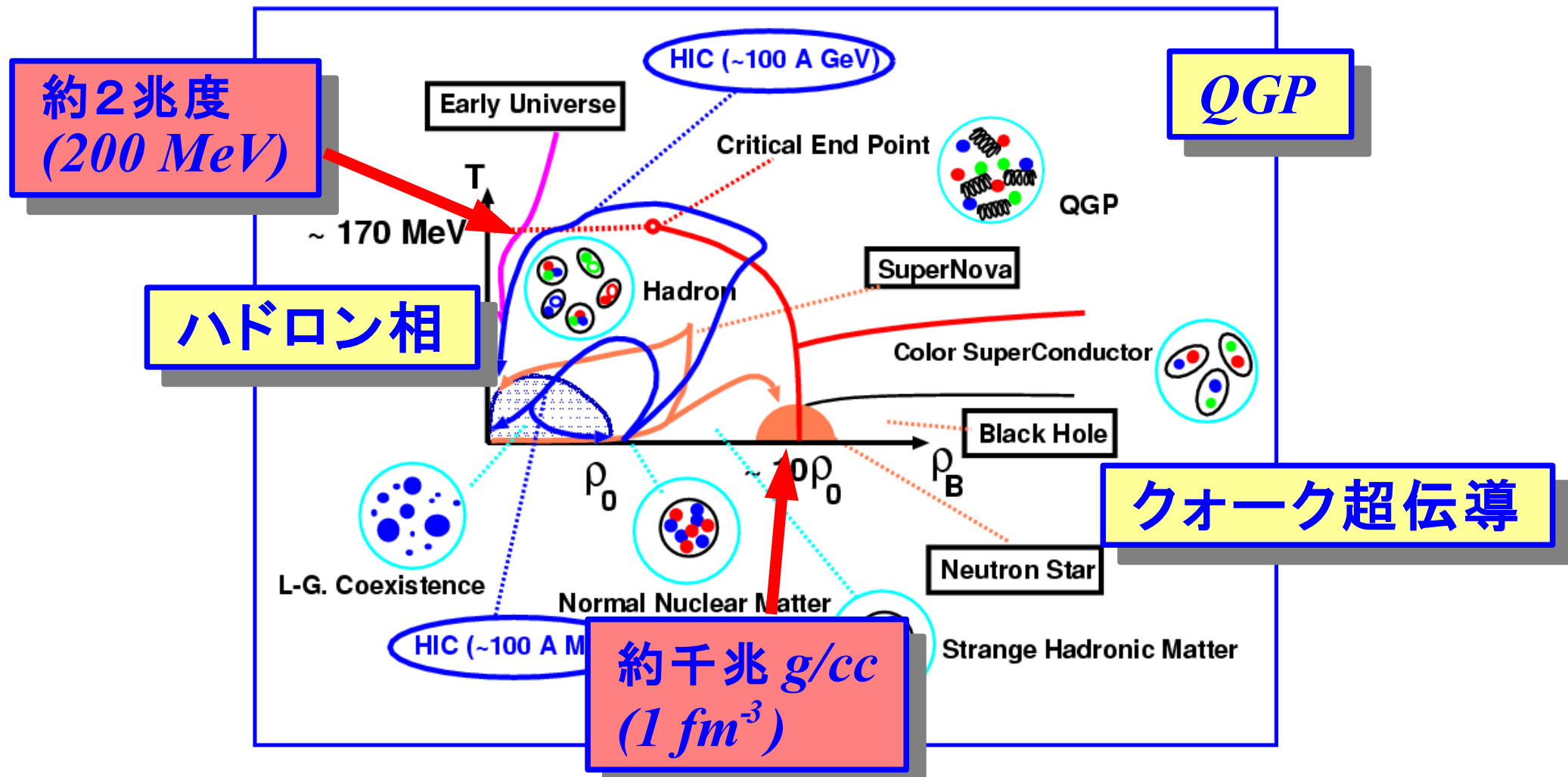
$k=1$  とすると、 $10^{10} \text{ K} = 1 \text{ MeV}$

## ■ 物質を熱していくと $N$ は増える！

- $T = 1 \text{ eV} (\sim 10^4 \text{ K})$   
→ 原子核と電子の「プラズマ」  
→  $N =$  「原子核の数」 + 「電子の数」
- $T = 10 \text{ MeV} \sim 60 \text{ MeV}$   
→  $N =$  「核子の数」 (原子核が壊れる)
- $T = 60 \text{ MeV} \sim 200 \text{ MeV}$   
→  $\pi$  粒子が生成されて粒子数が増加  
→  $N =$  「核子数」 + 「 $\pi$  粒子の数」
- $T > 200 \text{ MeV}$   
→ ハドロンが壊れてクォーク・グルーオン・プラズマができる  
→  $N =$  「クォーク数」 + 「反クォーク数」 + 「グルーオン数」  $\propto T^3$



# 宇宙と地上でのクォーク物質相転移



**QGP からハドロン相への相転移 (QCD 相転移)**  
 = この宇宙最後の「真空相転移」  
**高密度でのクォーク物質への相転移 = 物質の最後の姿**

---

1000 兆  $g/cc$  の世界は  
どこまで理解されているか？  
観測できるか？

# 高密度になると何がおこるか？

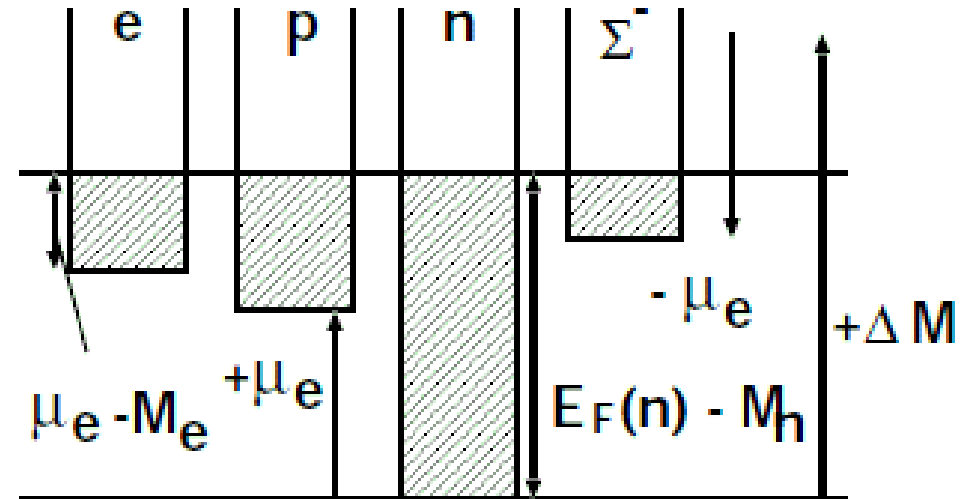
- 密度の上昇
  - フェルミエネルギーの上昇
  - 核子以外のバリオン(ストレンジクォークを含むハイペロン)等が現れる！
- 中性子星の中での化学平衡
  - 中性子・電子の化学ポテンシャルで決まる。

$$E_F(n) + U(n) = \mu_n$$

$$E_F(p) + U(p) = \mu_n - \mu_e$$

$$E_F(\Lambda) + U(\Lambda) = \mu_n - (M_\Lambda - M_N)$$

$$E_F(\Sigma^-) + U(\Sigma^-) = \mu_n - (M_\Sigma - M_N) + \mu_e$$



ハイペロン(ストレンジネスを含むバリオン)は非核子の最有力候補

$$\mu_B = E_F(n) + U(n) \geq M(Y) + U(Y) + Q_Y \mu_e$$

→ 物質の状態方程式、ハイペロンのポテンシャルはどこまでわかっているか？

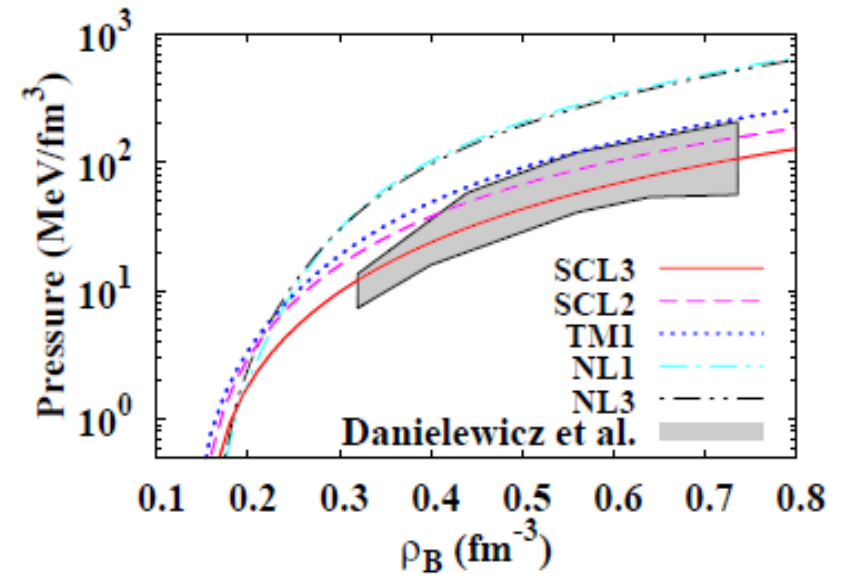
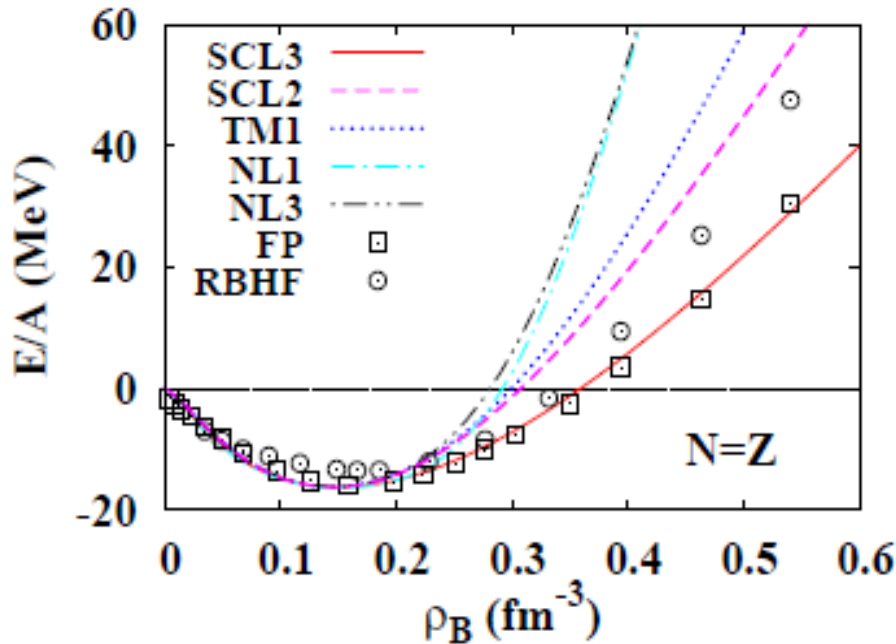
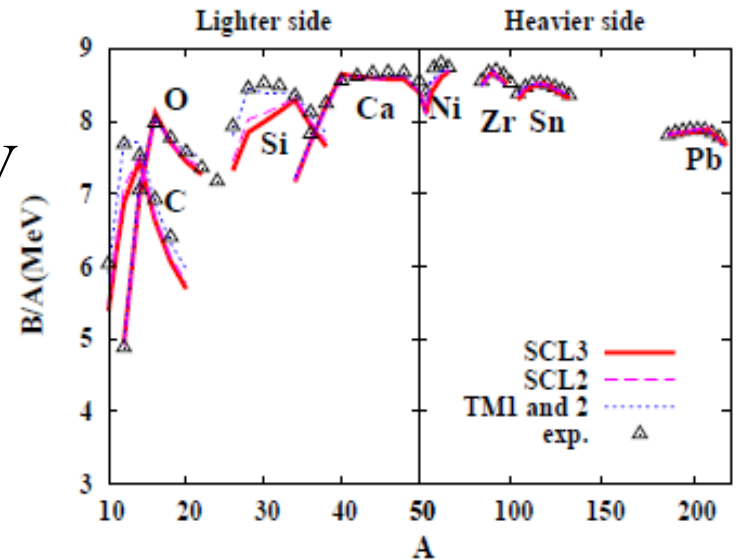
# 核物質の状態方程式

## ■ 核物質の飽和性

- 原子核密度 ( $\rho \sim 0.16 \text{ fm}^{-3}$ ) で最も安定
- 核子あたりの束縛エネルギー  $\sim 16 \text{ MeV}$

## ■ 高密度での「硬さ」はまだ不確定

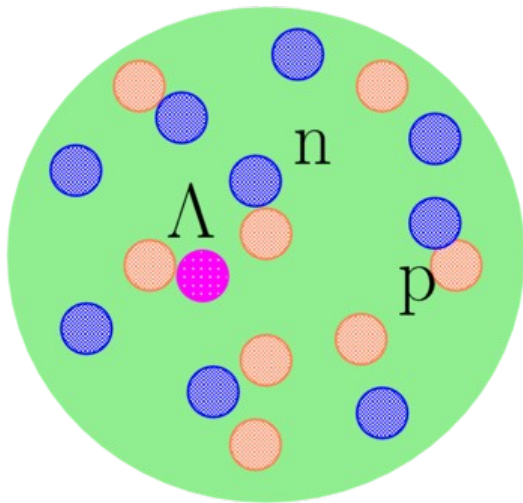
- 理論：核力から出発した多体計算、または平均場理論
- 実験：重イオン反応からの示唆



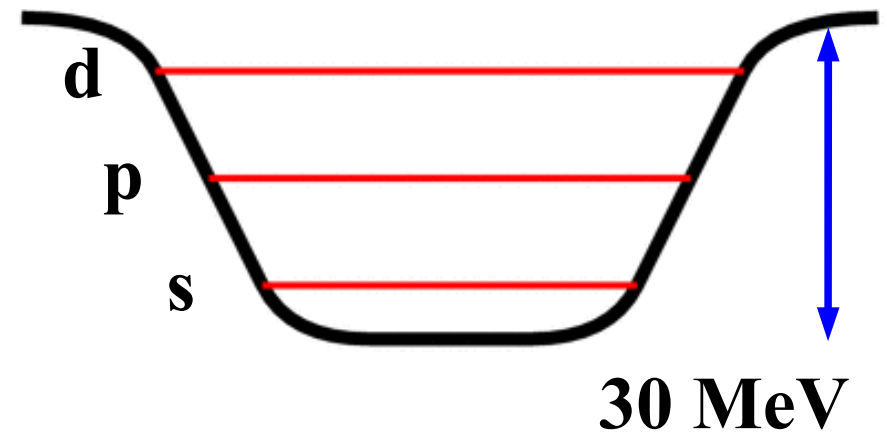
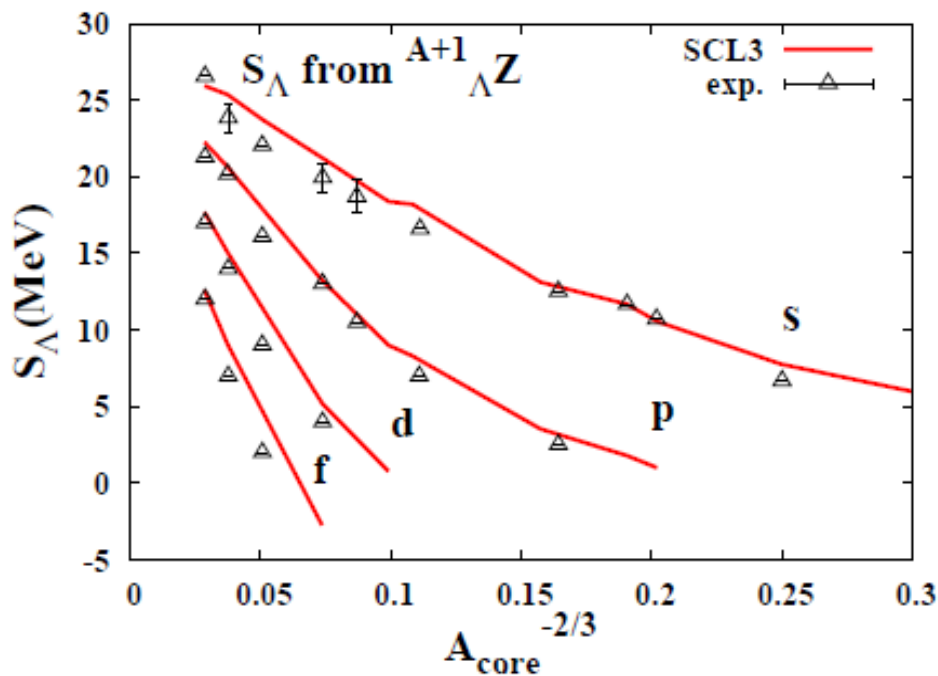
Tsubakihara et al., arXiv:0909.5058



# ハイペロン・ポテンシャル ( $\Lambda$ )



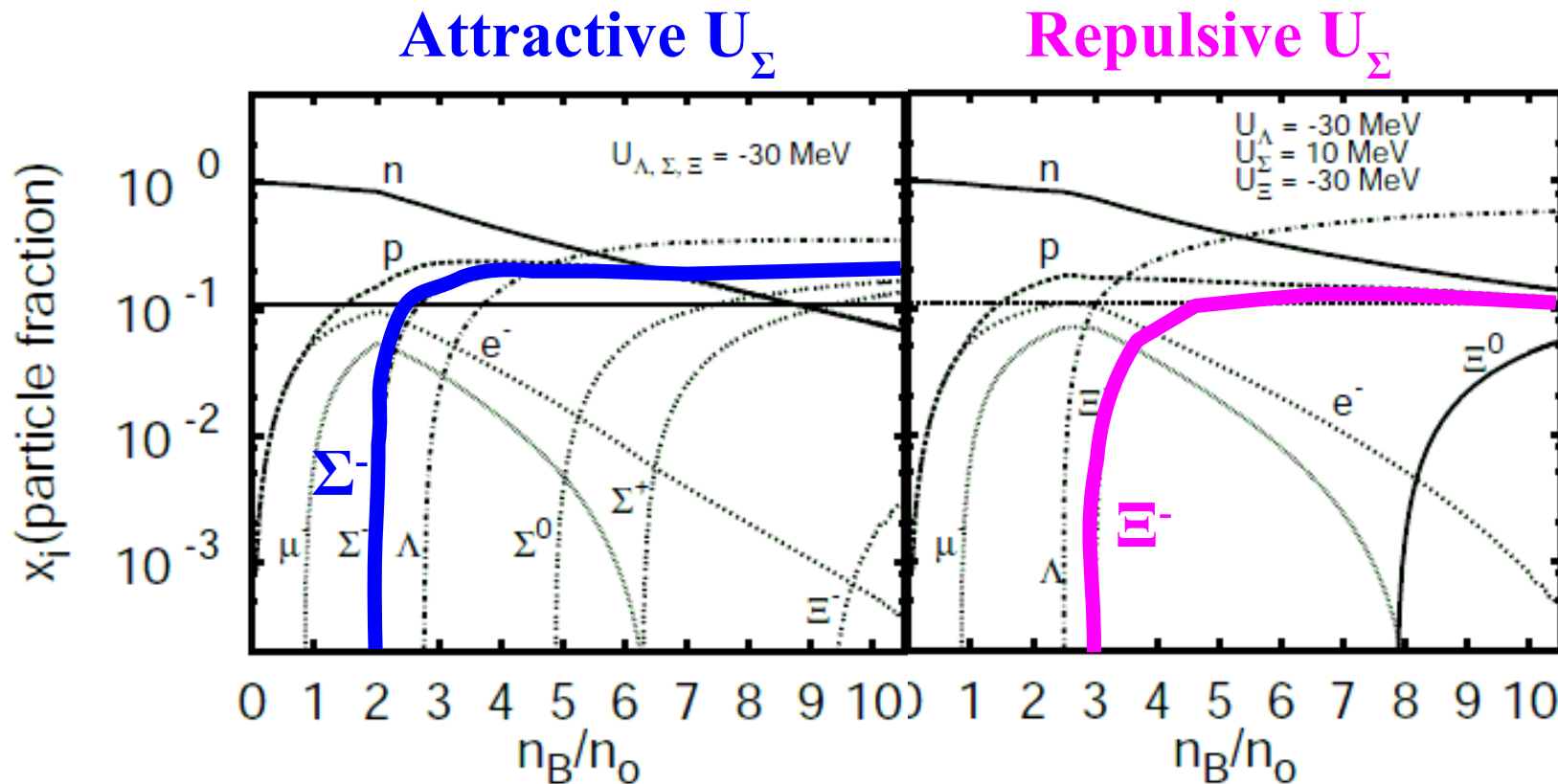
- $\Lambda$ : 多くの  $\Lambda$  ハイパー核の束縛エネルギーが測定されている  
 $\rightarrow \Lambda$  は原子核の中で、  
 $U(\Lambda) = -30 \text{ MeV}$   
 程度の深さのポテンシャルを感じている。



# ハイペロン・ポテンシャル ( $\Sigma, \Xi$ )

## ■ $\Sigma, \Lambda, \Xi$

- ハイパー核がほとんど観測されていない
- しかしポテンシャルの深さを変えると中性子星内部組成は大きく変化。(Balberg, Gal, 1997)



Sahu,  
AO, 2003

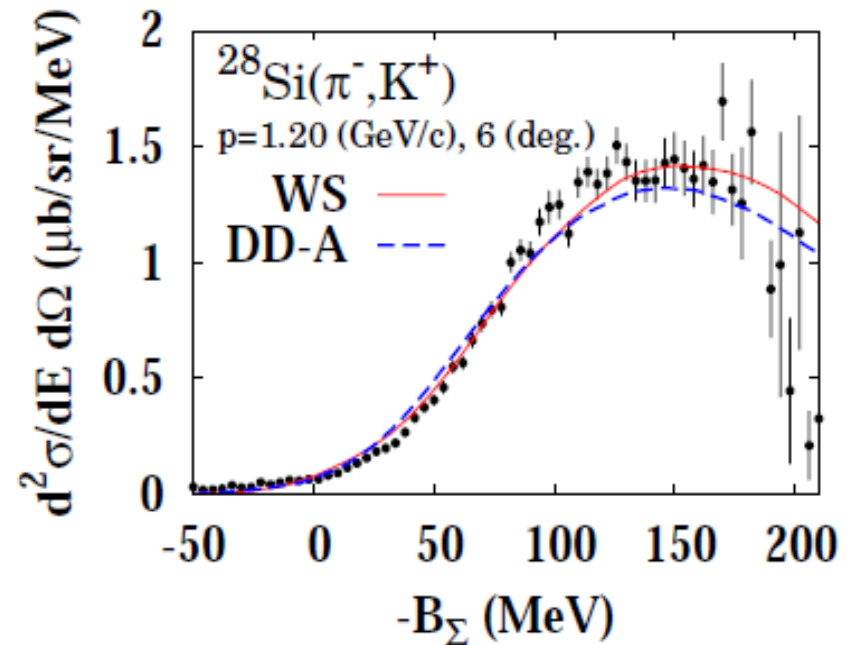
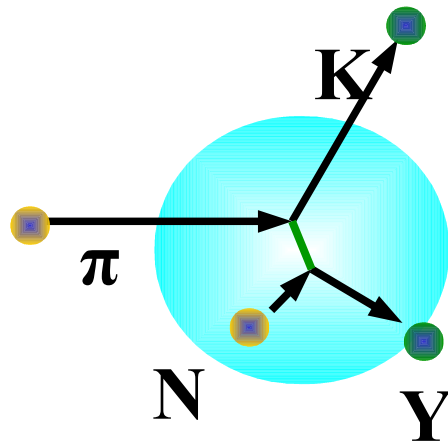
# 物質中の $\Sigma, \Xi$ のポテンシャル

- $\Sigma$  の束縛状態は一つだけ  ${}^4_{\Sigma}\text{He}$   
→ 軽すぎて「ポテンシャル」での扱いが困難
- $\Sigma$  (uus, uds, dds) のクォーク組成は  $\Lambda$  (uds) とほぼ同じ  
→ 単純には  $\Lambda$  と同じポテンシャル (軽いクォーク数にスケール)  
 $U_{\Lambda} \sim 2/3 U_N \rightarrow U_{\Sigma} \sim 2/3 U_N \sim -30 \text{ MeV}$

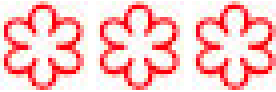


と期待

- 生成反応からの見積もり  
→ 引力的であればスペクトルが高エネルギー側にずれる
- 測定結果と理論分析

→  $U_{\Sigma} \sim + (10-60) \text{ MeV}$  程度の斥力  
(クォーク間の  
パウリ原理)



# ミシュラン風にいえば、

- $U_{\Lambda}(\rho_0) \sim -30 \text{ MeV}$  
  - **みなが認める深さ**
- $U_{\Sigma}(\rho_0) > +15 \text{ MeV}$  
  - **ハイペロン生成反応と  
 $\Sigma$  原子でのエネルギーシフト**  
実験：Noumi et al.  
理論：Harada-Hirabayashi, Kohno et al  
Maekawa et al.
- $U_{\Xi}(\rho_0) \sim -14 \text{ MeV}$  
  - **ハイペロン生成反応のテール、  
ツインハイパー核生成 (1例) のみの情報。**  
実験：Khaustov et al., Aoki et al.  
理論：Motoba et al., Maekawa et al., Harada et al.

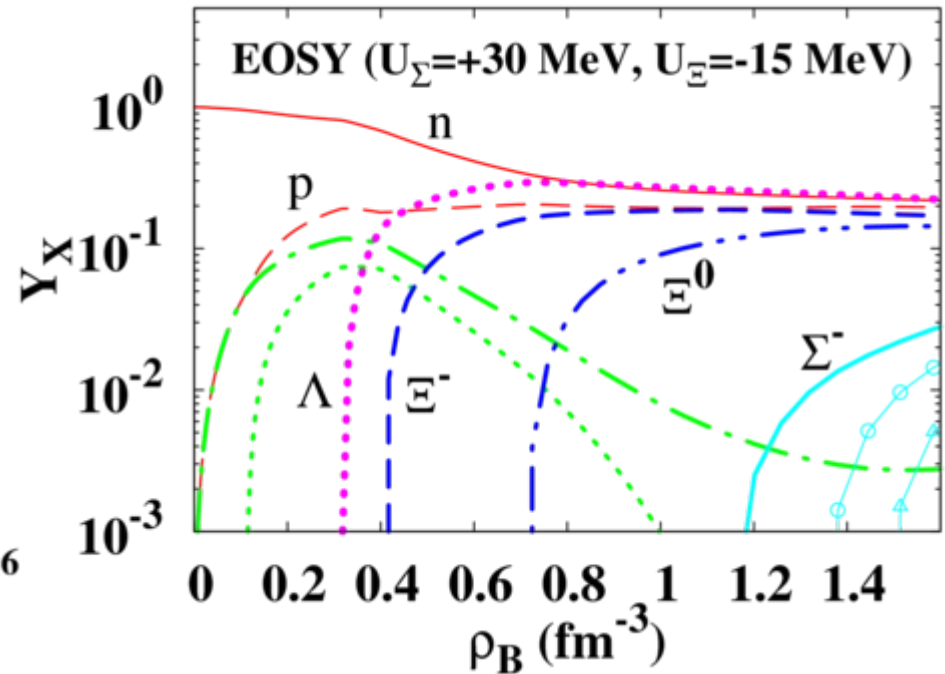
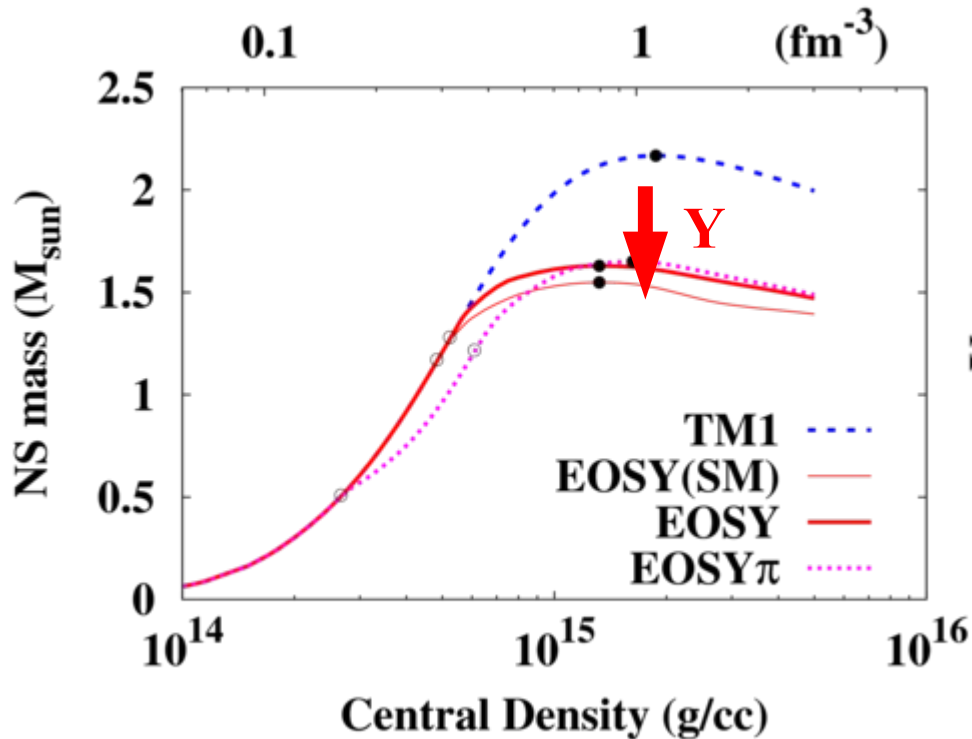


**J-PARCでの実験に大いに期待！**

# 中性子星へのハイペロンの影響

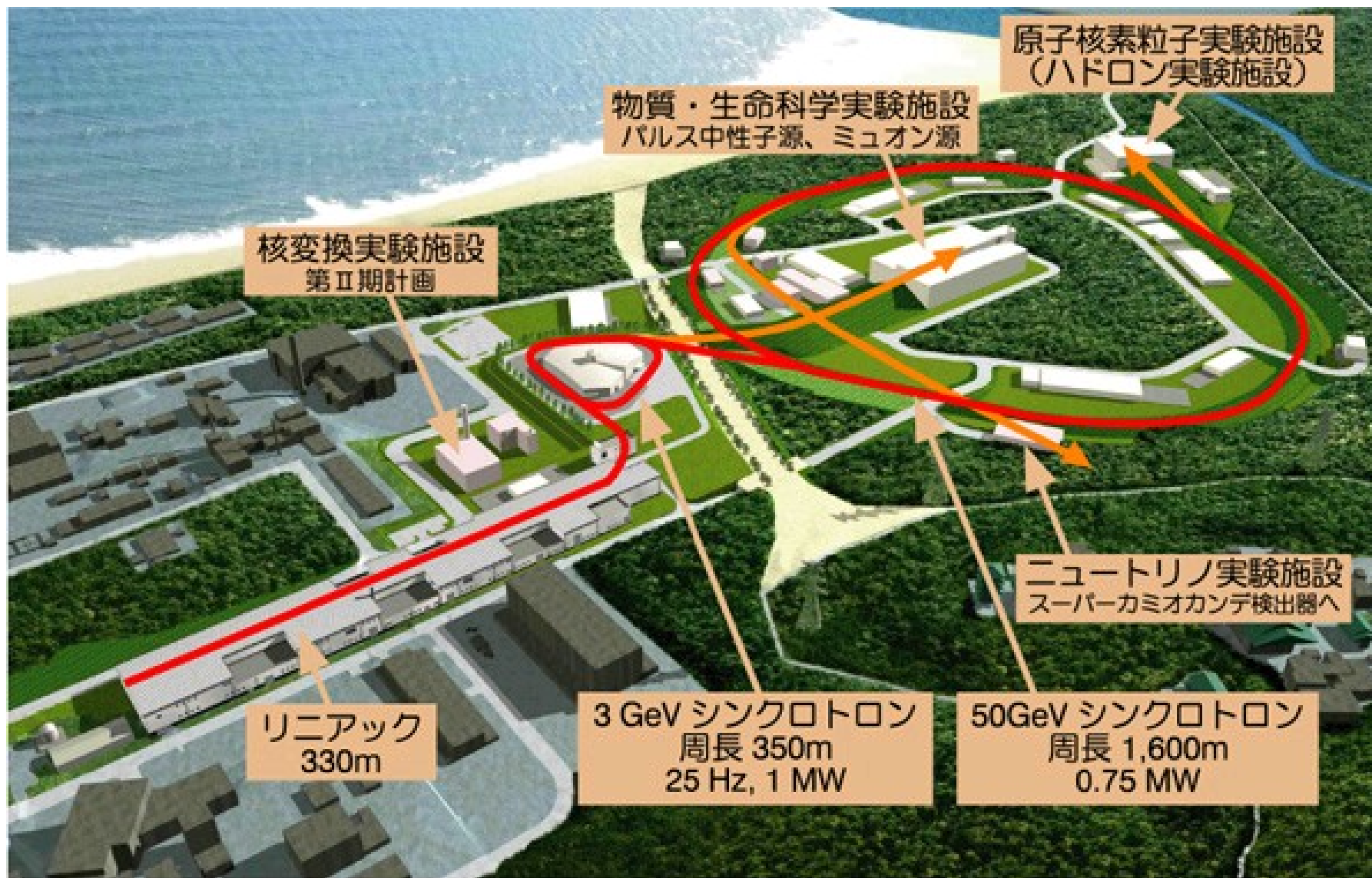
## ■ 中性子星のコア

- 原子核密度の5倍程度の高密度 (1000 兆 g/cc の世界)
- ハイペロンの割合 ~ 50 %  
→ 状態方程式がソフト化 → 支えられる最大質量が減少



中性子星は「中性子」星ではなく、(ハイペロンを含む)「バリオン」星  
→ ハイペロン以外の中間子は？ハイペロン間の相互作用は？

# 大強度陽子加速器施設 (J-PARC)



2009年よりテスト稼動中

<http://j-parc.jp/>

# ストレンジ・クォークで果てしなく広がる物質の世界

Nu ~ Nd ~ Ns



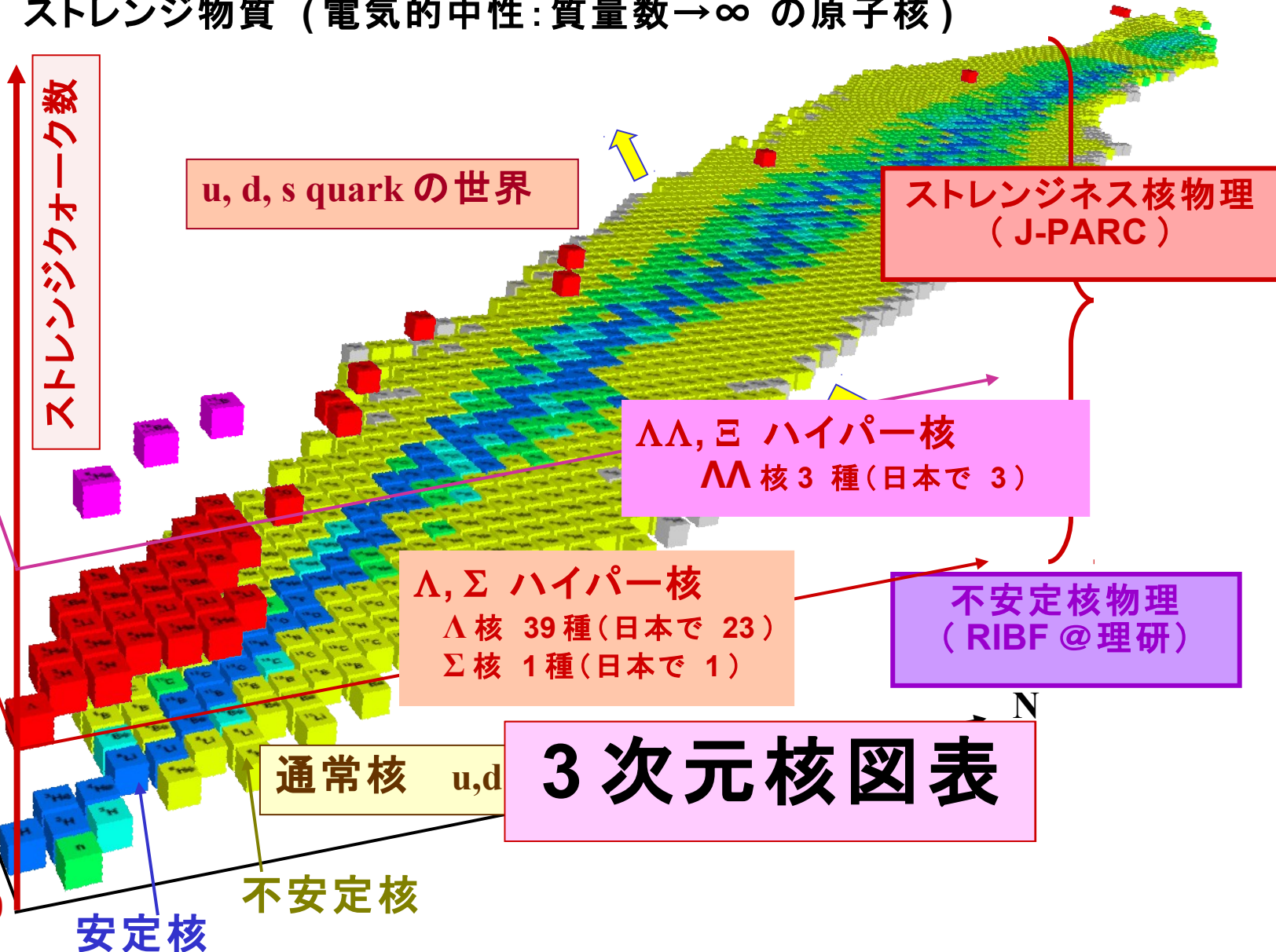
p, n,  $\Lambda$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$

高密度化



中性子星の中心部に存在？

ストレンジ物質 (電気的中性: 質量数  $\rightarrow \infty$  の原子核)

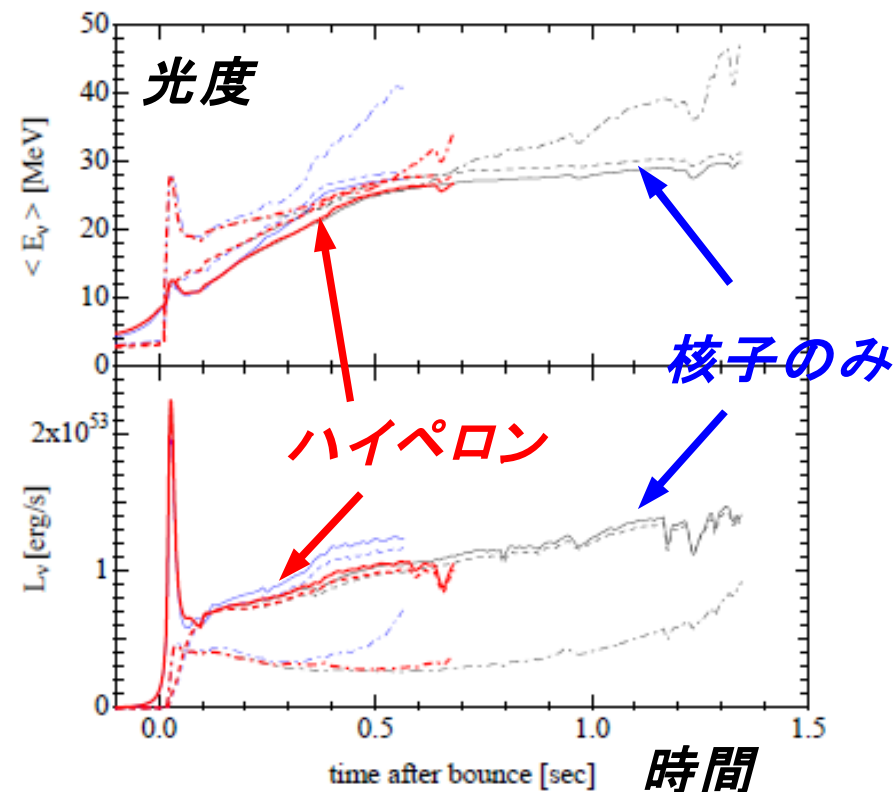
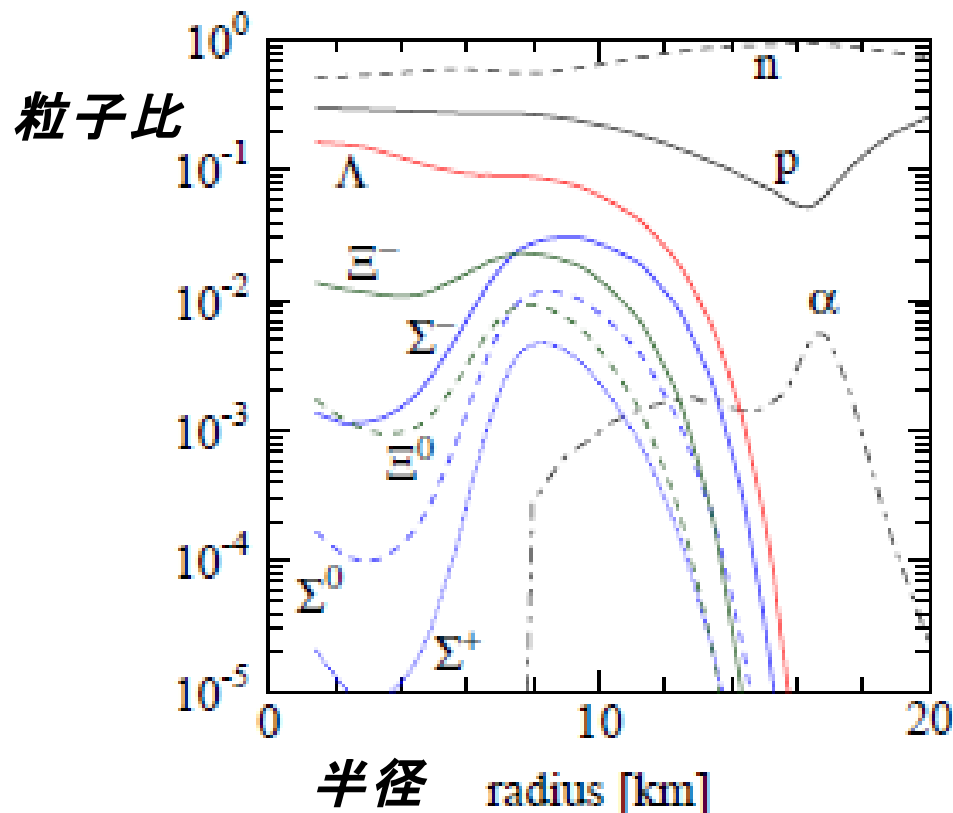


3次元核図表

by Tamura

# ブラックホール形成過程

- ブラックホール形成過程は高温状態
  - 多くのハイペロンが現れうる → 状態方程式がやわらかくなる
  - 早くつぶれてブラックホールができてしまう
  - 「短いニュートリノ放出時間 ~ 高密度でのハイペロン発現」



Sumiyoshi, Ishizuka, AO, Yamada, Suzuki, 2009

ブラックホール形成時からのニュートリノ・重力波観測に期待！



# ブラックホール形成時の温度と密度

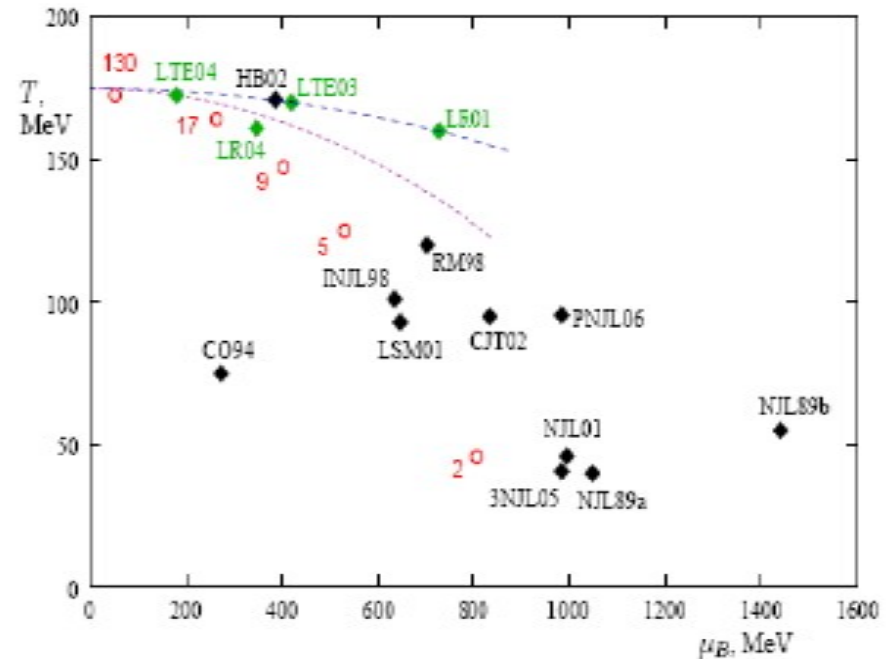
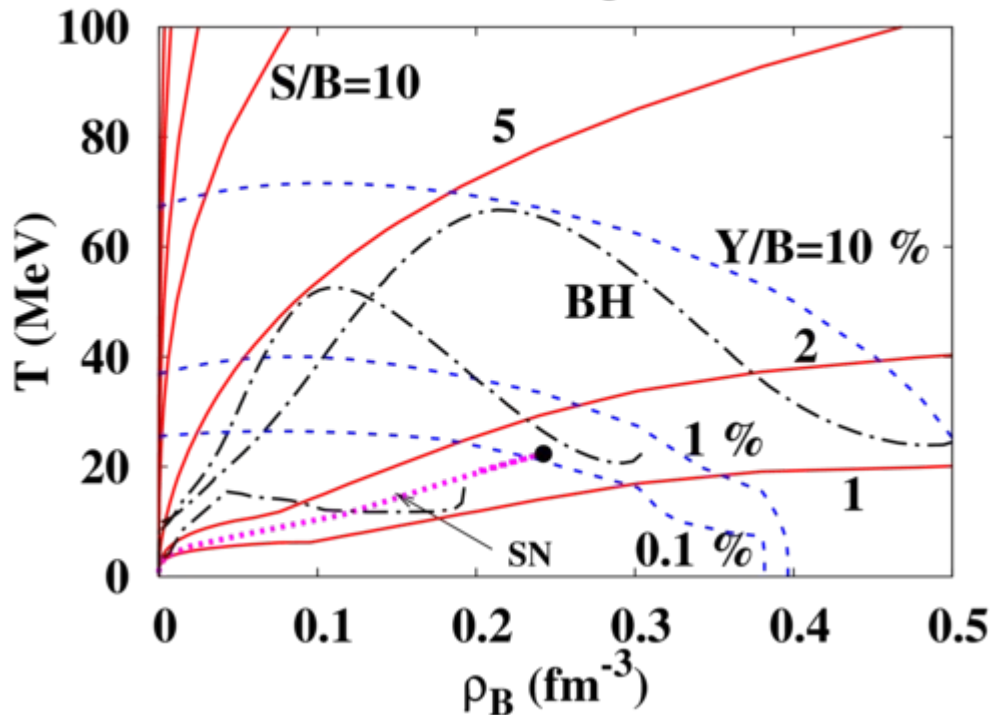
## ■ 40 Msun の星の重力崩壊

→ 0.7 秒程度で 70 MeV、 $0.6 \text{ fm}^{-3}$  に達し、  
ブラックホールが形成される

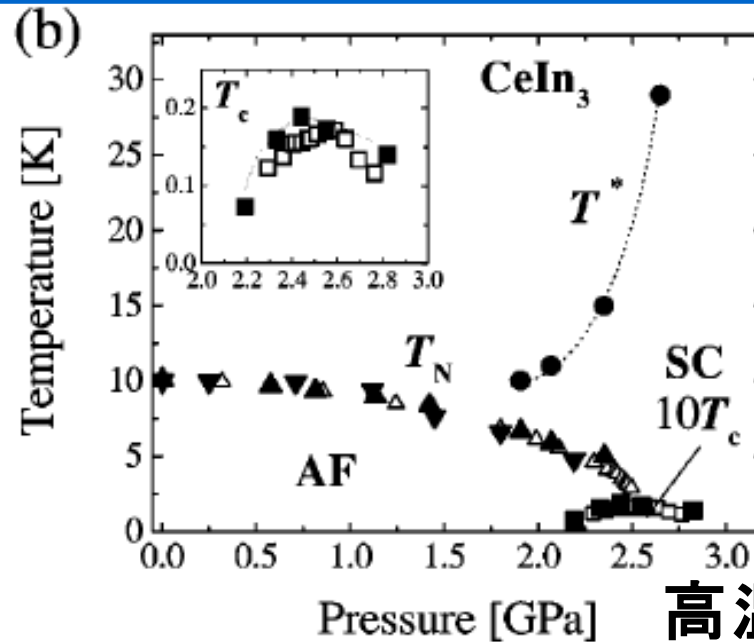
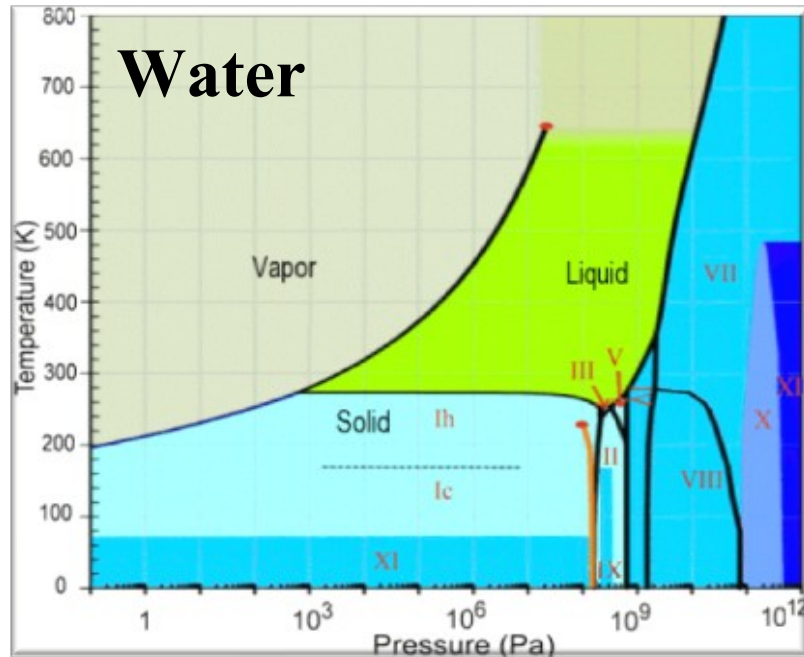
*Sumiyoshi et al. (05), Sumiyoshi, Ishizuka, AO, Yamada, Suzuki (09)*

## ■ 十分に高い温度と密度 → QCD 臨界点が見えるかも？

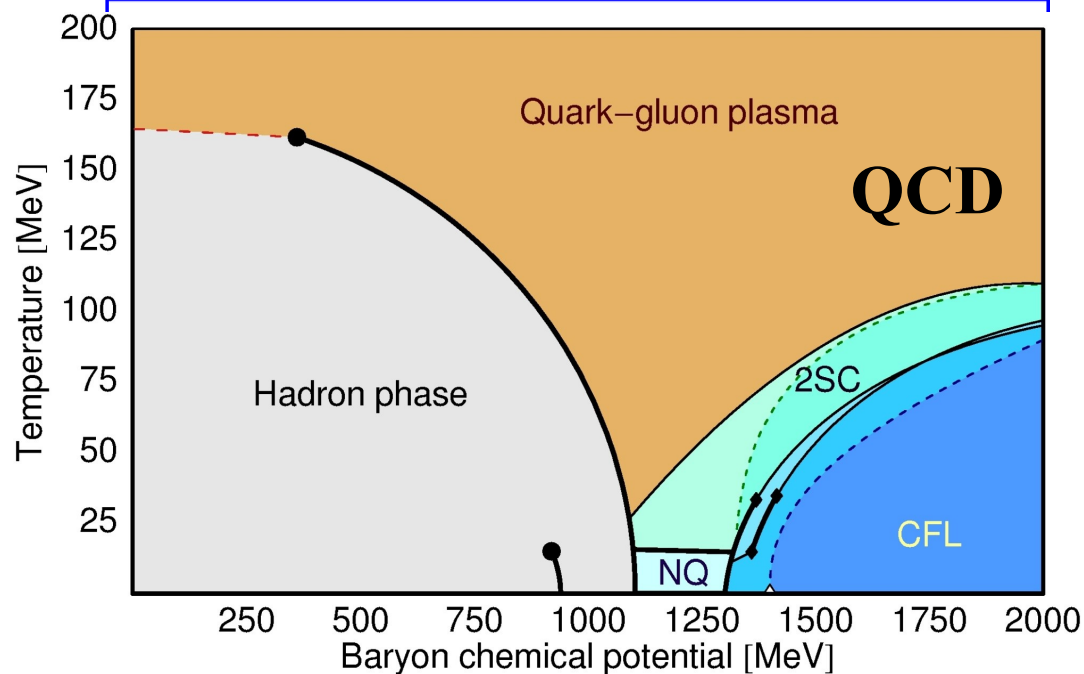
EOSY,  $Y_C=0.4$



# 物質の相図



高温超伝導体  
Kawasaki et al, 2001

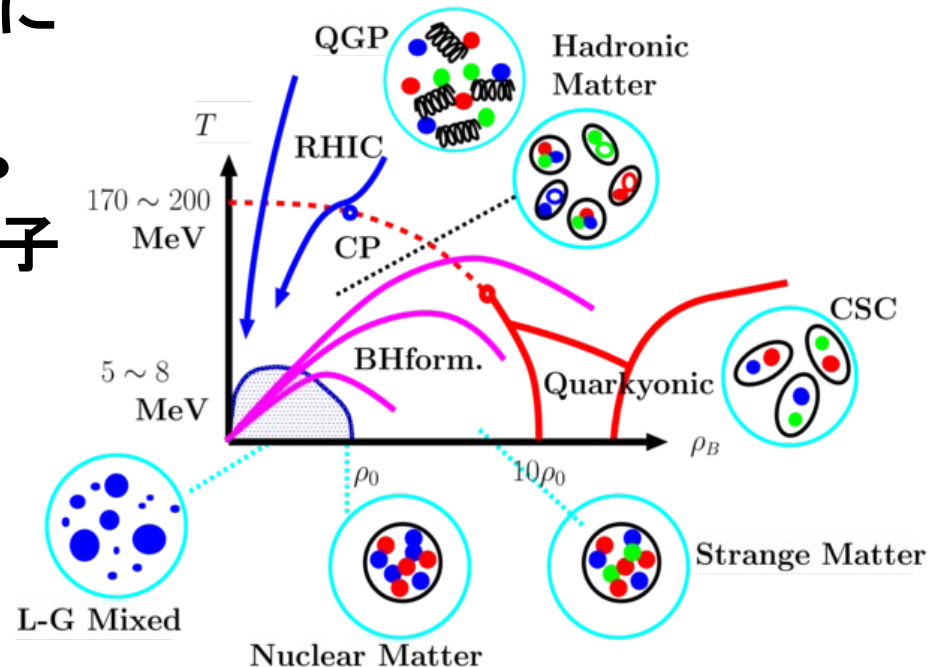


Ruster, Verth, Buballa,  
Shovkovey, Rischke, 2005

c.f. Zhang, Fukushima,  
Kunihiro, 2008

# Summary

- 原子核・ハドロン・クォークでできた物質の物理  
～ (100-1000) 兆 g/cc の世界
  - 中性子星コアやブラックホール形成時に到達
  - 高密度での圧力が超新星爆発の最初のショックを与える
- 高密度物質でのストレンジネス
  - 原子核密度の (2-3) 倍程度で  $\Lambda$  ハイペロンが現れる
  - $\Sigma, \Xi$  の現れ方はポテンシャルに依存 → J-PARC 実験
  - ハイペロン以外のハドロンは？  
K 中間子、 $\pi$  中間子、 $\eta$  中間子  
→ 「中間子物質」の可能性  
(池野、山縣、永広、比連崎)
- 高温・高密度物質の探索
  - QCD 臨界点探索の可能性



# *I would like to thank you for your attention, and !*

---

## ■ My Collaborators

- **Strong coupling lattice QCD: K. Miura (YITP), T.Z. Nakano (Kyoto U.), N.Kawamoto (Hokkaido U.)**
- **Hyperonic EOS for Supernovae: K. Sumiyoshi (Numazu), K. Tsubakihara (Hokkaido), C. Ishizuka (Keele), S. Yamada (Waseda), H. Suzuki (Tokyo Sci. U.)**
- **Chiral RMF / Hyperon production reactions: K. Tsubakihara, H. Maekawa, H. Matsumiya (Hokkaido), P.K. Sahu (India)**
- **$\Xi$  and  $\Lambda$  hypernuclei in AMD: M. Isaka, H. Matsumiya, M. Kimura (Hokkaido), A. Dote (KEK)**
- **pions in neutron star: D. Jido (YITP), T. Sekihara (Kyoto U.), K. Tsubakihara (Hokkaido)**
- **Heavy-Ion Collisions: Isse, Nara, Hirano, Kunihiro, Schafer, Muller**