

物理学特論I (中性子星と原子核物理)

1. 序論: 中性子星とは
 2. 中性子星の質量と半径
 3. 中性子星に関連する原子核・ハドロン物理学1
– 原子核の大きさと散乱の量子力学
 4. 中性子星に関連する原子核・ハドロン物理学2
– 原子核の質量と核物質状態方程式
 5. 中性子星に関連する原子核・ハドロン物理学3
– クォークとハドロン
 6. 中性子星核物質の状態方程式
 7. 中性子星の最近の話題と課題 – 中性子星の最大質量とハイペロンパズル
- セミナー: 最適化問題としての符号問題

クォーク物質

■ 量子色力学 (Quantum Chromodynamics; QCD)

- 強い相互作用の基礎理論
- クォークとグルーオンのダイナミクスを記述する非可換ゲージ理論
- 大きなエネルギースケールでは結合が弱くなる (漸近的自由性)
- 小さなエネルギースケールでは非摂動的
→ カラーの閉じ込め、カイラル対称性の自発的破れ

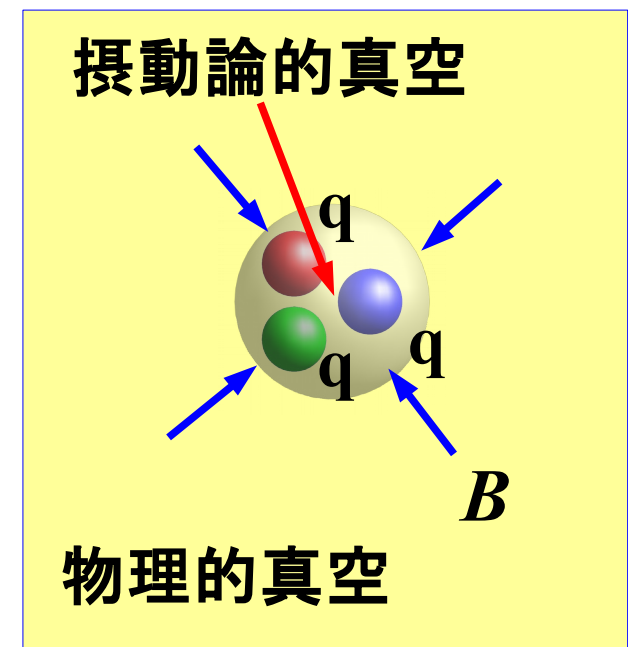
■ 真空の変化

- クォーク・反クォーク対、グルーオン対の凝縮により、エネルギーが下がる
→ 物理的真空
- クォークが動きまわる状態 (摂動論的真空) を作るには、余分なエネルギーが必要。

$$\varepsilon = \varepsilon_{qg} + B, \quad P = P_{qg} - B$$

$$B^{1/4} = 90 \sim 300 \text{ MeV}$$

ε_{qg}, P_{qg} = クォーク、グルーオンが担う
エネルギー密度・圧力



メモ：クォークがもつ量子数

■ クォークは色々な「座標」を持っている！

- 時間・空間座標 (x, t)
- スピン $(\uparrow, \downarrow)$
- フレーバー $(u, d, s, c, b, t (+ \text{more ?}))$
 - ◆ 強い相互作用ではフレーバー (クォークの種類) は保存
 - ◆ 軽い3つのクォーク (u, d, s) からなる系には近似的な $SU(3)_f$ 対称性がある。 ($N_f=3$)
- カラー (R, G, B)
 - ◆ 厳密な $SU(3)_c$ 対称性 (ゲージ対称性) がある。
(カラー空間で回しても (unitary 変換しても) 同じエネルギー)
 - ◆ 観測される粒子は常にカラー 1 重項
(カラー空間の回転で「回らない」スカラー)
c.f. 単独のクォークはカラー 3 重項 ($N_c=3$)

カラー (R, G, B)

$q_f^a(x, t)$

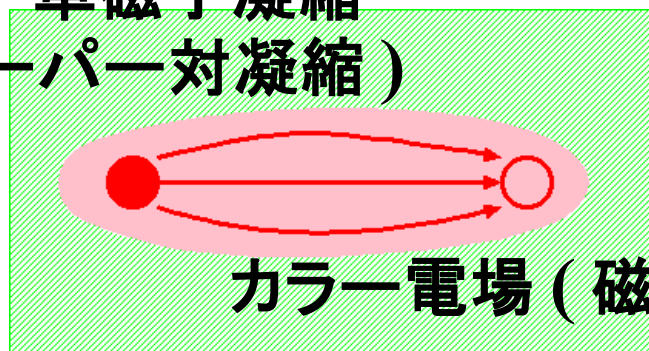
フレーバー $(u, d, s, \dots)$

4-spinor
(spin と粒子・反粒子)

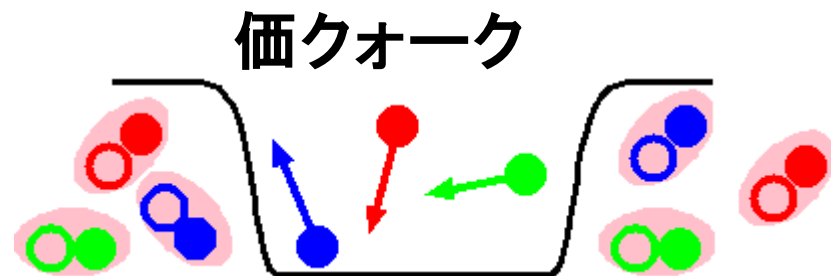
量子色力学 (QCD) の「真空」

- 色の閉じ込め：クォーク間には「ひも」のような力が働く
 - クォーク間の電場はひも状に絞られている ($\Leftrightarrow$ 超伝導体での磁場)
 - 引き離そうとするとクォーク対生成により色は閉じ込められたまま
- 質量の獲得：核子は「モーゼの道」の中の3クォーク状態
 - QCD 真空ではクォーク・反クォーク対が凝縮
→ 凝縮体を「押しのける」のにエネルギーが必要 → 大きな質量

カラー単磁子凝縮
(クーパー対凝縮)



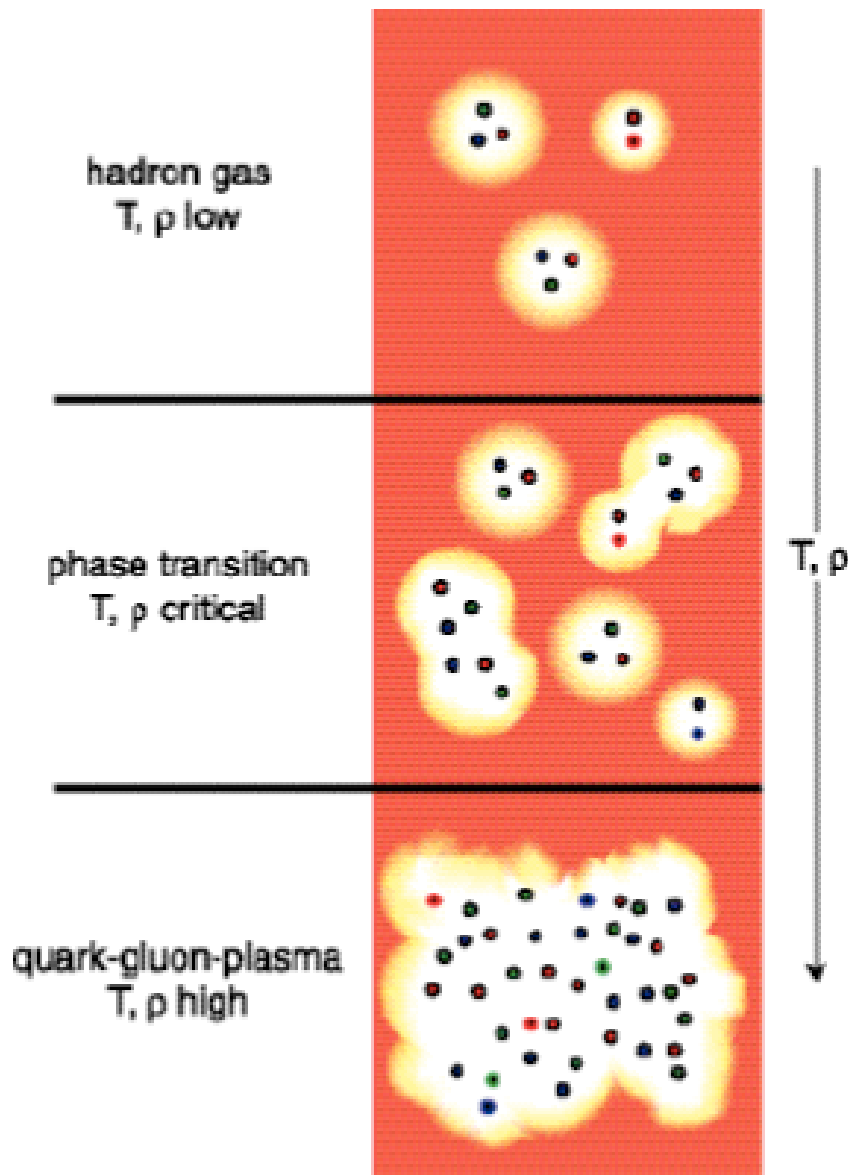
カラー電場 (磁場)



クォーク・反クォーク対凝縮

QCD 真空には「カラー単磁子」と「クォーク・反クォーク対」が凝縮！

なぜ高温で QGP への相転移がおこるか？ (I)



■ ハドロン物質を熱する / 圧縮するとどうなるか？

- ハドロン (核子や中間子) は、
1 fm 程度の大きさを持ち、
クォークと力を媒介するグルーオン
からできている。(クォーク3つか、
クォーク・反クォーク対)
- 温度の増加により、
多くの中間子が作られる
→ クォーク・反クォークの数が
増えて、ハドロンが「重なる」
- 核子内部の密度まで圧縮する
→ 核子同士が「重なる」

温度・密度を十分上げれば、
大きな体積でクォークが
自由に動き回るはず

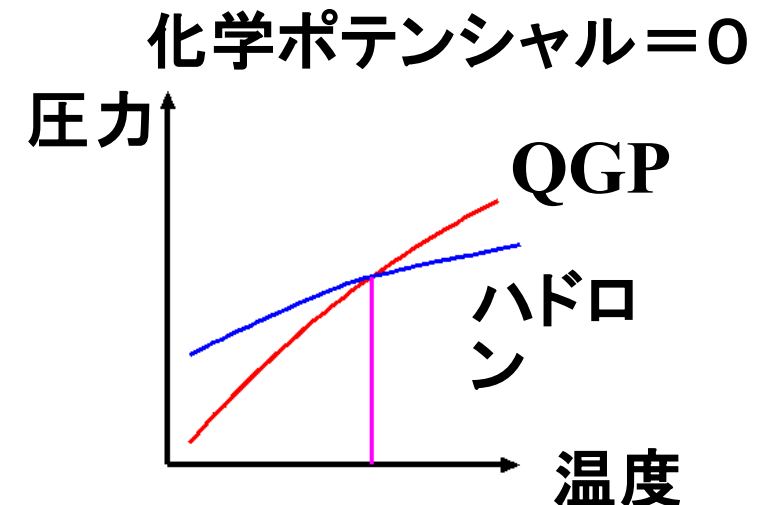
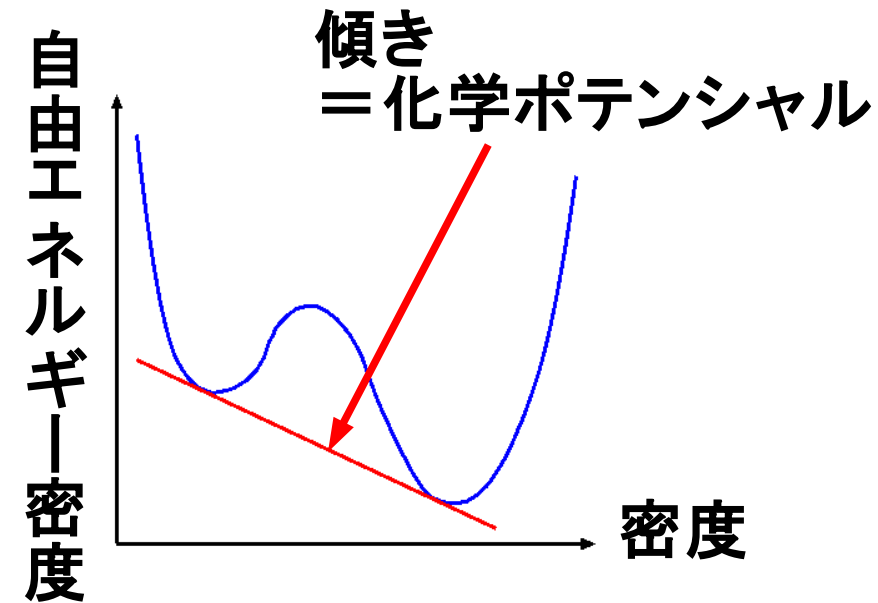
なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？(II)

■ 直感的理解

- 温度・密度の増加により、クォーク・反クォークの数が増え、ハドロンが「重なる」

■ 相転移とは何か？

- 2つの異なる状態の間で、温度、圧力、化学ポテンシャルが等しい時、2つの状態は「相平衡」(自由エネルギーの2重接線)
- クォークの数 = 反クォークの数の場合
→ クォークの化学ポテンシャルは 0。
→ 圧力の大きな相が全体を占める！



なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？ (III)

- 質量0の粒子の大自由エネルギー＝－(圧力)
→ ステファン・ボルツマン則 (T^4 に比例)

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

- ハドロン相 ∼ 3種類の質量0の π 粒子

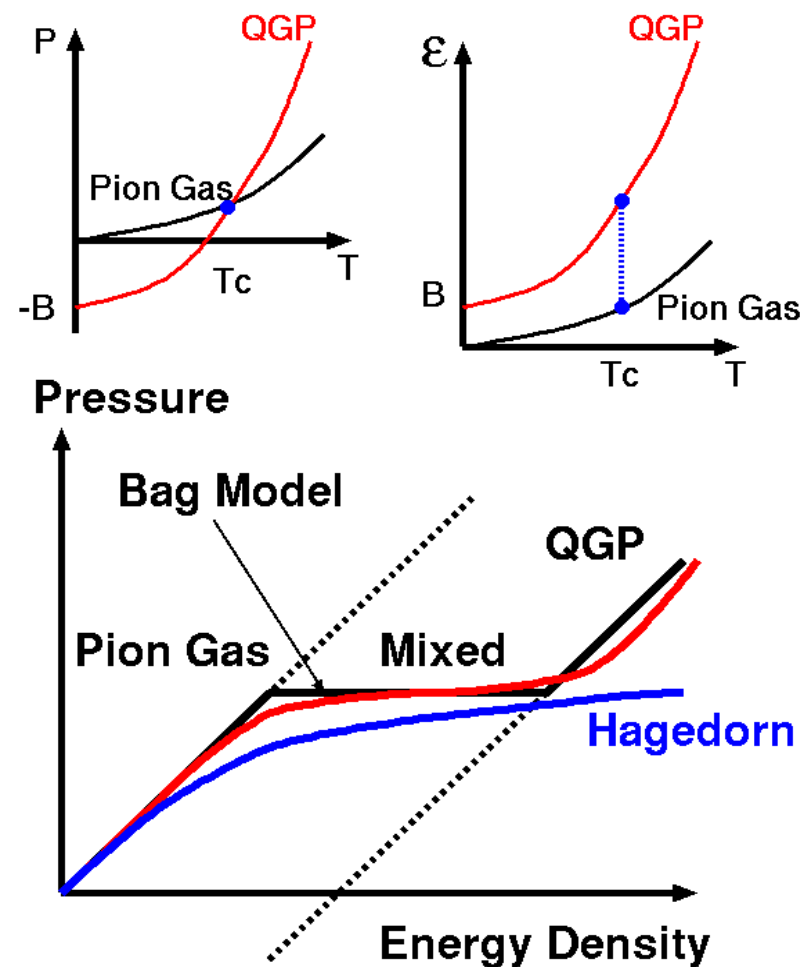
$$P_\pi = \frac{\pi^2}{30} T^4, \quad \epsilon_\pi = \frac{\pi^2}{10} T^4$$

- QGP ∼ 質量0のクォーク・グルーオンと「真空」の負圧力

$$P_{QGP} = \frac{37\pi^2}{90} T^4 - B \quad \epsilon_{QGP} = \frac{37\pi^2}{30} T^4 + B$$

QGPへの相転移 = 自由度増加

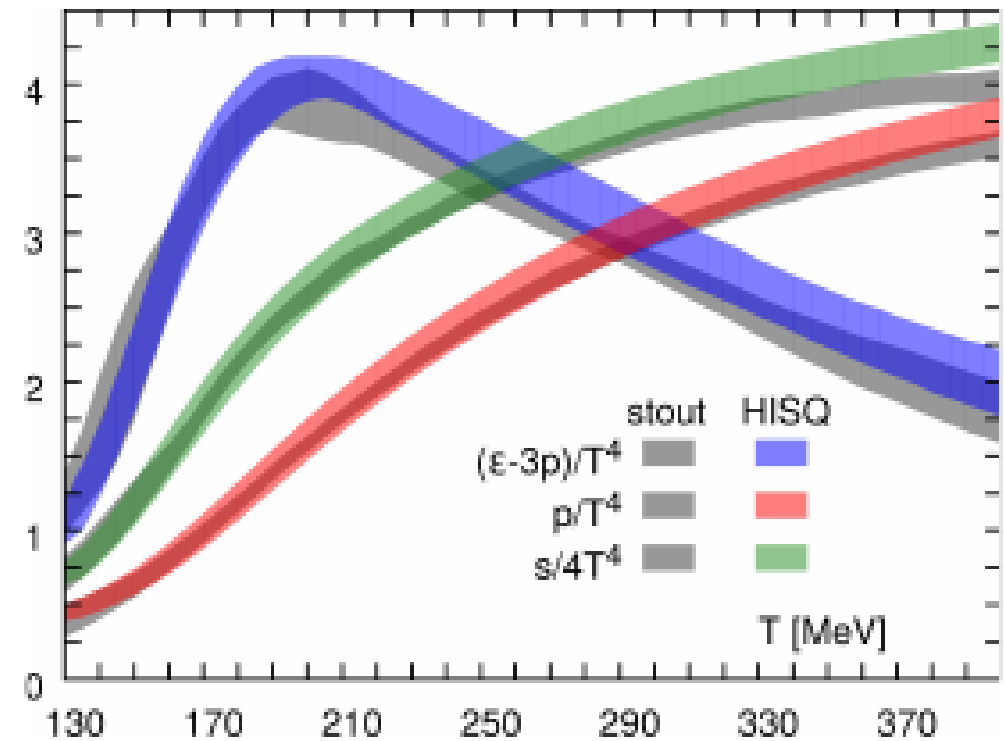
$$DOF = 2(\text{spin}) \times 2(q, \bar{q}) \times 3(\text{color}) \times 2(\text{flavor}) \times 7/8(\text{Fermion}) + 2(\text{spin}) \times 8(\text{color})$$



なぜ高温で QGP への相転移がおこるか？ (IV)

- 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.

ハドロン

■ ハドロン

= クォーク・グルーオンから作られる、強い相互作用をする粒子

● バリオン (3つのクォーク)

Λ (uds), Σ^- (dds), Σ^0 (uds), Σ^+ (uus), Ξ^- (dss), Ξ^0 (uss)

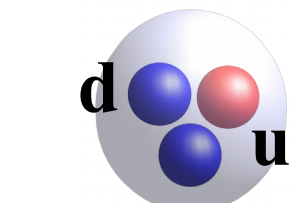
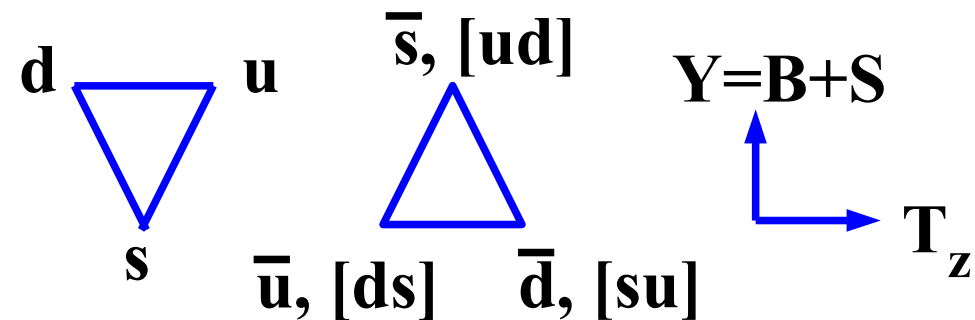
→ s クォークを含むバリオン = ハイペロン

● 中間子 (メソン、クォークと反クォーク)

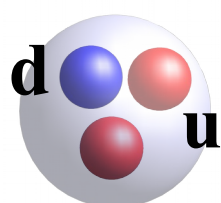
π^- ($d\bar{u}$), π^0 ($(u\bar{u}-d\bar{d})/\sqrt{2}$), π^+ ($u\bar{d}$),

K^- ($s\bar{u}$), $\bar{K}^0$ ($s\bar{d}$), K^+ ($u\bar{s}$), K^0 ($d\bar{s}$),

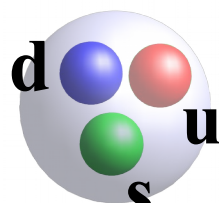
η ($(u\bar{u}+d\bar{d}-2s\bar{s})/\sqrt{6}$)



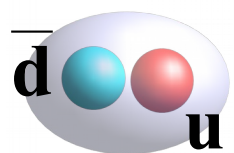
中性子 d



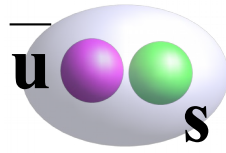
陽子 u



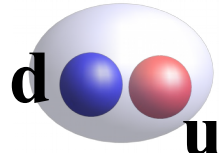
Λ ハイペロン



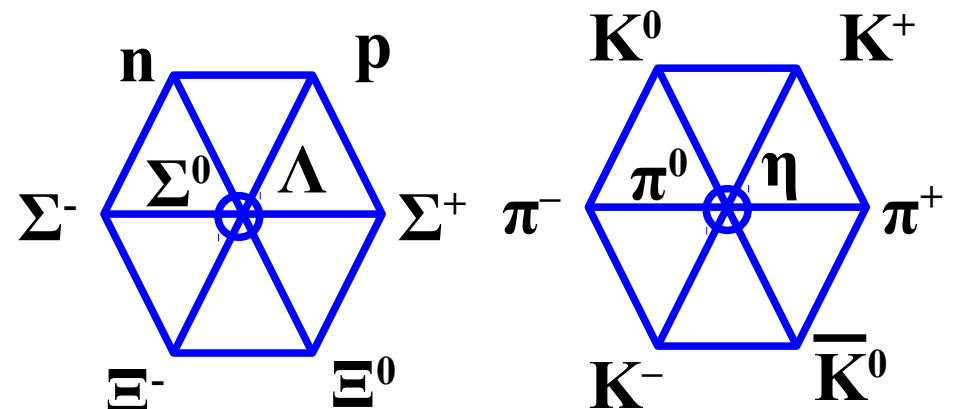
π 中間子



K 中間子



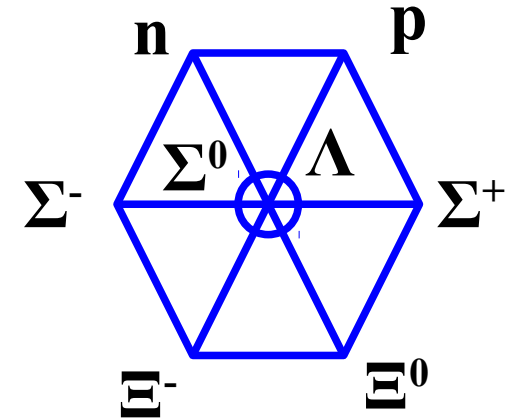
クォーク対



Hyperons (Baryons with Strangeness)

■ Ground state baryon $SU(3)_f$ octet ($J^\pi=1/2^+$)

Baryon	M(Mev)	S	Comp.
n	940	0	udd
p	938	0	uud
Λ	1116	-1	$(uds-dus)/\sqrt{2}$
Σ^+	1189	-1	uus
Σ^0	1193	-1	$(uds+dus)/\sqrt{2}$
Σ^-	1197	-1	dds
Ξ^0	1315	-2	uss
Ξ^-	1321	-2	dss



メモ: カラー1重項の作り方

- クォーク (カラー3重項) からカラー 1 重項を作るには？
→ RGB 成分をベクトルの成分と考える。

$$\vec{q} = (q_R, q_G, q_B)^T$$

- ベクトルからスカラーを作る方法

- 内積 → 中間子

$$\vec{q}_1^\dagger \cdot \vec{q}_2 = q_1^{a*} q_2^a$$

- スカラー3重積 → バリオン

$$(\vec{q}_1 \times \vec{q}_2) \cdot \vec{q}_3 = \varepsilon_{abc} q_1^a q_2^b q_3^c$$

- 4つのクォーク、5つのクォーク、... からでもスカラーは作れる。
(Exotic hadrons)

- なぜ3つの種類のクォーク (u,d,s) から8重項が現れる？
→ 9種類の $\bar{q}q$ の組み合わせのうち、
ひとつはフレーバー空間でのスカラー、残りが8重項。

- 粒子の発現条件 (温度 $T=0$ の場合)
 - = その粒子が加わることによって、エネルギーが下がるか？
 - = 一粒子エネルギー < 化学ポテンシャル
- フェルミ分布・ボーズ分布

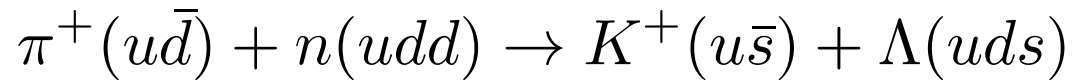
$$f_{F,B}(E) = \frac{1}{\exp((E - \mu)/T) \pm 1}$$

- フェルミオン $\rightarrow \mu > E(p=0) \sim M$ になると $T=0$ で現れる
- ボゾン
 - $\rightarrow \mu = E(p=0) \sim M$ になるとボーズ・アインシュタイン凝縮 ($\mu > M$ では分布関数と粒子数が発散)

ハドロン-原子核ポテンシャルの深さは？

- 原子核中にハドロンを生成
 - 束縛状態あり → 束縛エネルギーからポテンシャルを決定
 - 束縛状態無し → スペクトルの形からポテンシャルを推定
- 様々なハドロンと原子核のポテンシャルが生成反応により調べられてきた。

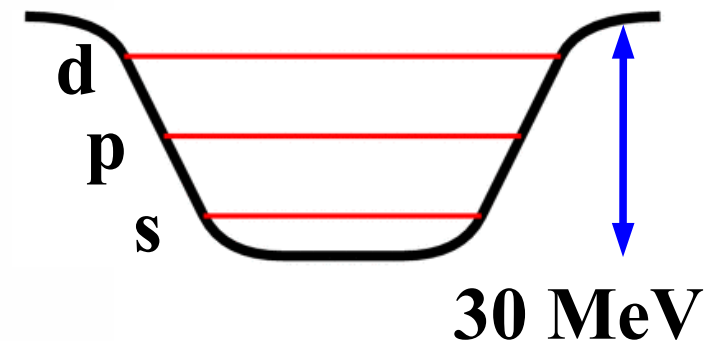
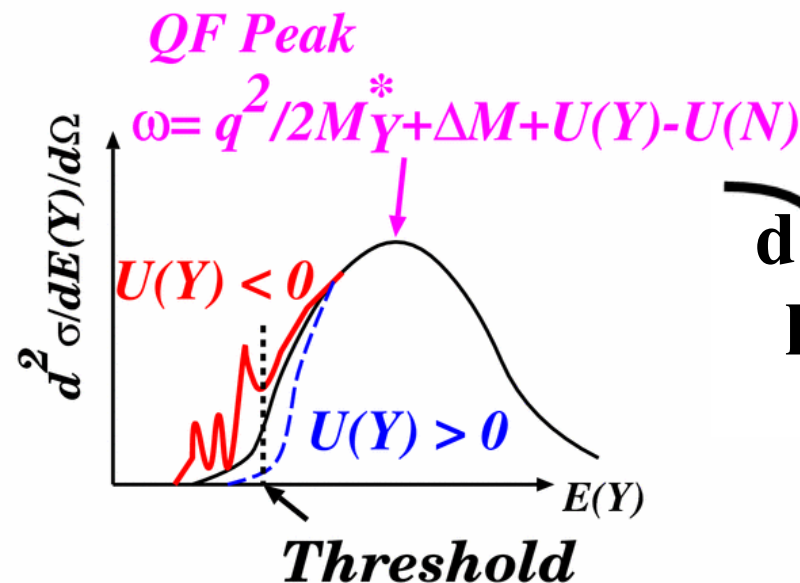
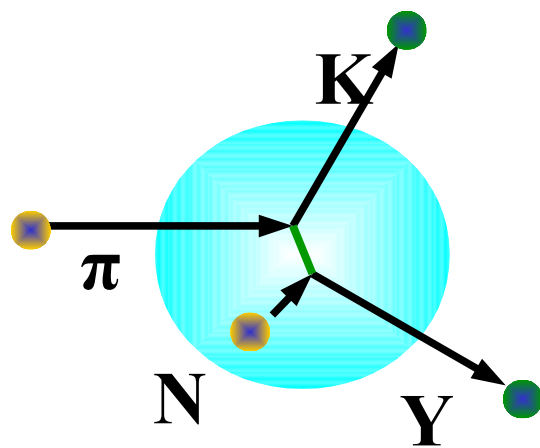
- ハイパー核生成反応



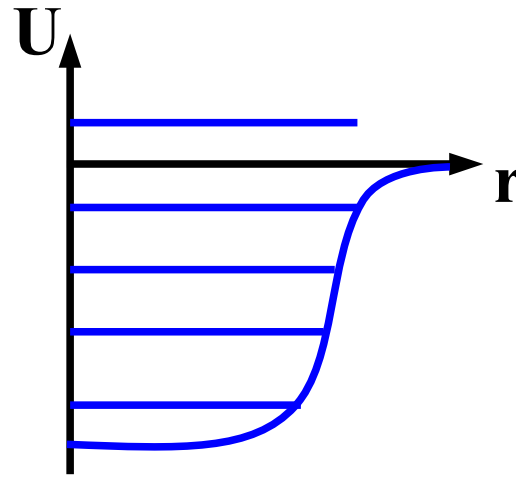
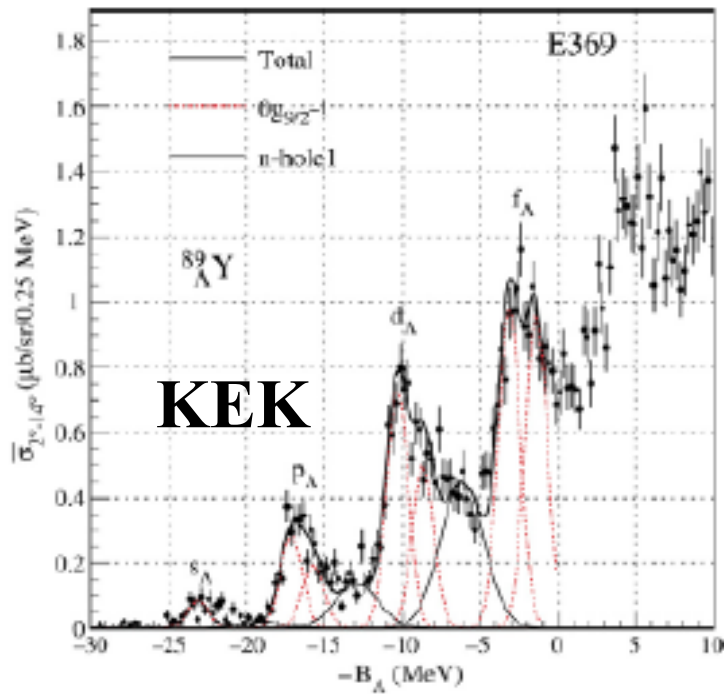
- パイ中間子原子生成反応



- 反 K 中間子原子核生成反応

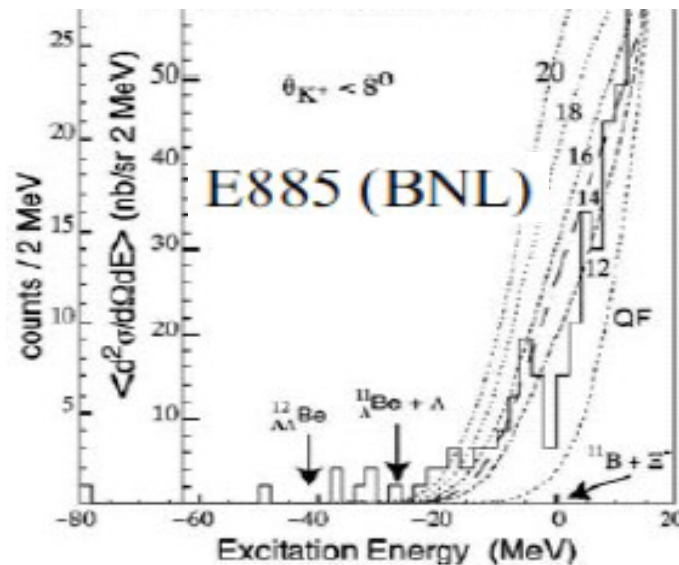


Λ , Σ^- , Ξ^- , K^- 核



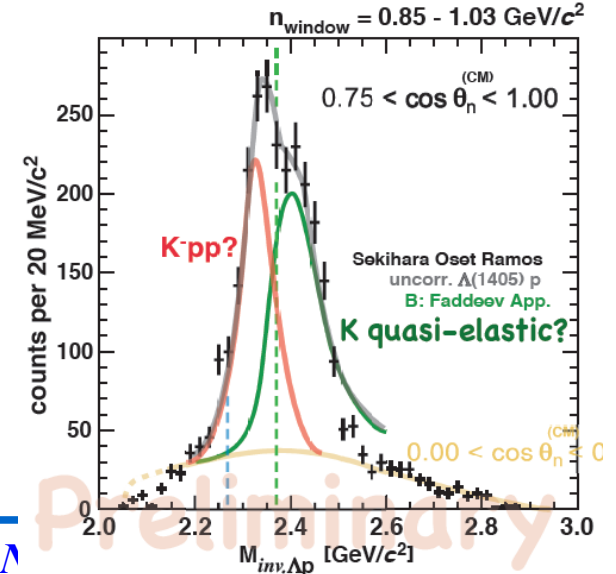
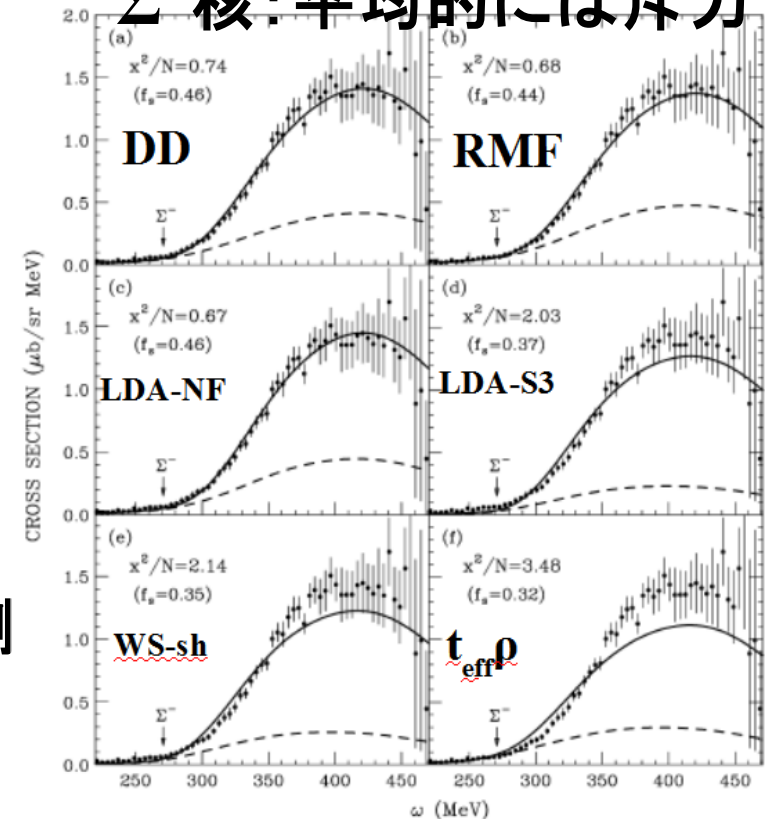
Λ 核: 明白な
一粒子状態を観測

Ξ 核: 弱い引力
最近のデータでも
束縛状態の存在を示す



K^- 核は存在しそう。
ただしゆるい束縛
(J-PARC E15
preliminary)

Σ^- 核: 平均的には斥力



中性子星中のハドロン

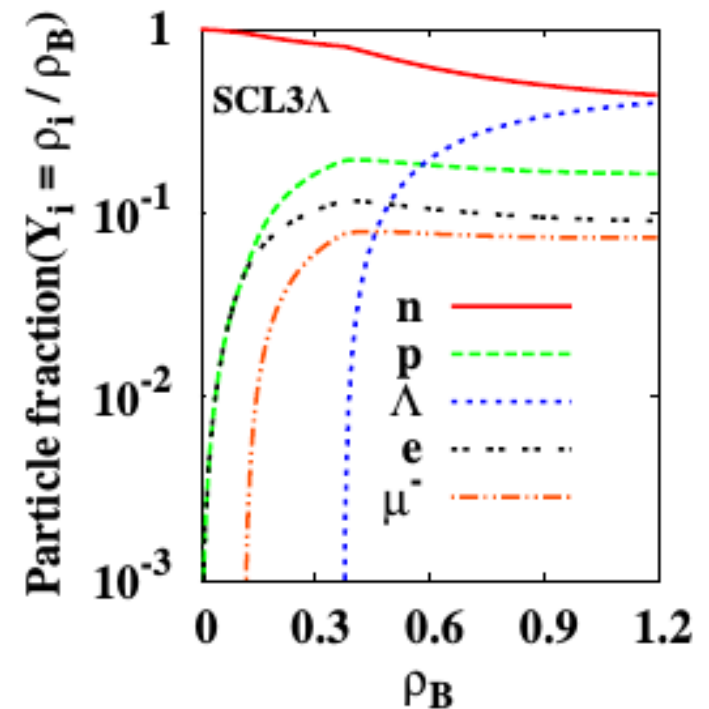
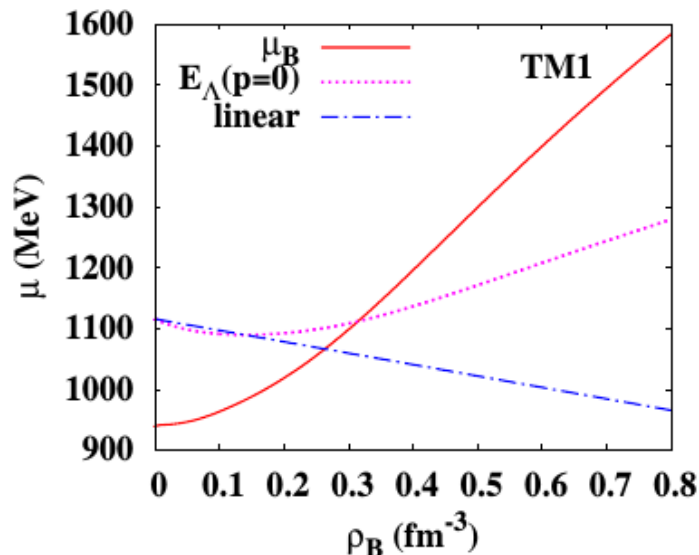
■ 中性子星での化学平衡

- 保存量 = バリオン数と電荷 $\mu_h = B_h \mu_B - Q_h \mu_e$
 $\mu_B > 0, \mu_e > 0$ なので、負電荷をもつバリオンが有利 (Σ^- , Ξ^-)

- 一粒子エネルギー $E_h = \frac{\delta \varepsilon}{\delta \rho_h}$

核子との相互作用が引力の粒子が有利
 (Λ , K^- , $\bar{K}$)

- ハイパー核データ $U_\Lambda(\rho_0) \sim -30$ MeV
 → 中性子星で現れることが自然



*K. Tsubakihara, H. Maekawa, H. Matsumiya,
 A. Ohnishi, Phys. Rev. C 81 (2010) 065206.*