

ハドロンスペクトロスコピー

岡 真

東京工業大学大学院理工学研究科

三者若手夏の学校 2011年8月17日

はじめに

物理の研究の本質

物理現象の記述に最も適切な**変数** (座標系, 自由度)の選択

原子核・ハドロン物理の理解に適当な変数はなにか？

原子核物理

新しい変数 (自由度) の導入の歴史

1932 ~ 核子 (p, n)

1934 ~ 中間子 (π, ρ, \dots) => 核力、 π 凝縮、平均場

1950 ~ ハイペロン (Λ, \dots) => ハイパー核、一般化された核力

1980 ~ クォーク (u, d, \dots) => EMC効果

1990 ~ 中間子原子核 (K, \dots)

はじめに

ハドロン物理

- 1960 ~ カイラル対称性、有効理論 $\Rightarrow \pi, \sigma, \rho, ..$
- 1964 ~ クォーク模型 $\Rightarrow SU(3)$ 対称性
- 1966 ~ カラー、グルーオン \Rightarrow QCD
- 1968 ~ 高エネルギー反応 パarton構造、漸近的自由性
- 1983 ~ スカーミオン、カイラル摂動論・有効理論
- 2000 ~ QGP, カラー超伝導、AdS-CFT双対性

高温、高密度核物質 で新しい自由度

カラーの解放

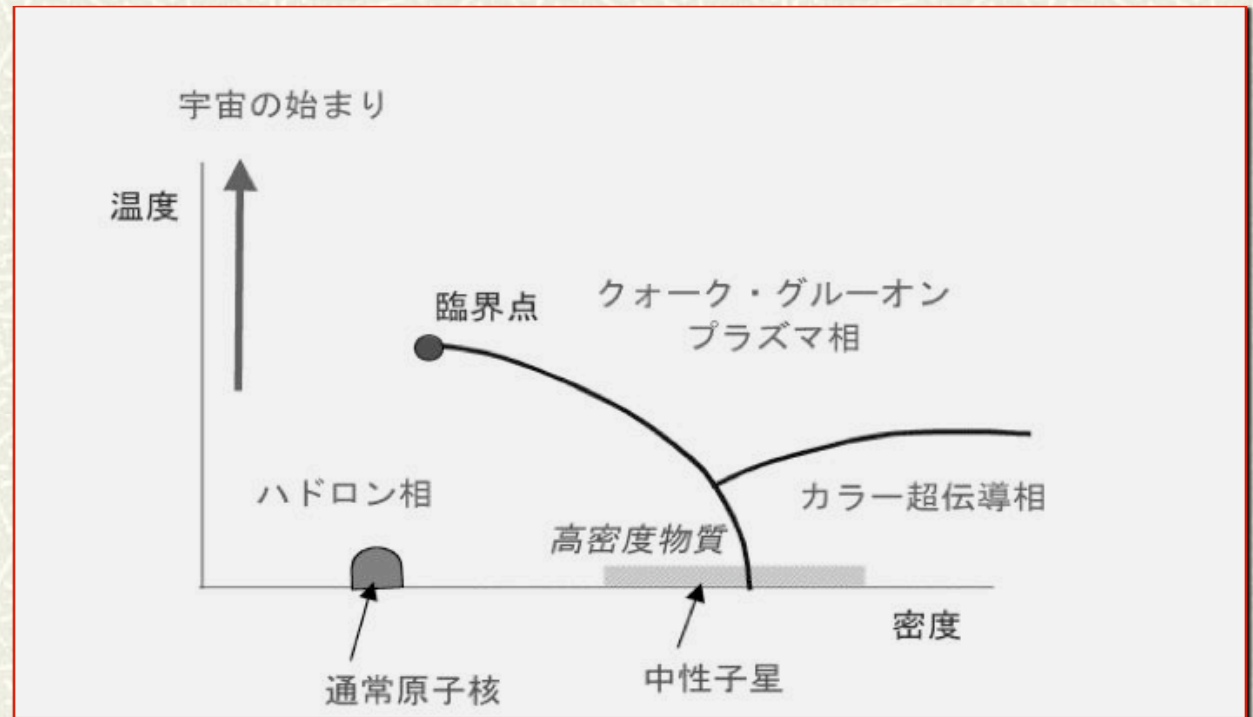
カイラル対称性回復 $\langle \bar{q}q \rangle$ オーダーパラメータ

カラー超伝導 $\langle qq \rangle_{color}$

はじめに

ハドロン・原子核物理の目標は

QCDの相図上の各領域で、最も適切な力学変数を見つける



なぜハドロンスペクトルか？

そのために

1. ハドロン相互作用に関する物理現象の解明

多種類のハドロン、多彩で複雑な反応、相互作用、構造

メソンとバリオン 基底状態と共鳴状態（幅も1~500 MeV）

フレーヴァー（u, d, s, c, b, t）

束縛状態（原子核、ダイバリオン、分子共鳴）

基本理論：QCD クォークとグルーオンのカラーゲージ理論

でもカラー（クォークやグルーオン）は見えない（閉じ込め）

2. 新しい形態の物質構造の探索

高温、高密度での新しい物質相（宇宙初期、高密度星）

エキゾチックハドロン（ペンタクォーク、ダイバリオン）

なぜハドロンスペクトルか？

QCDにとってハドロンスペクトル研究が重要な理由

1. QCDの**真空**が複雑 (T, ρ) 相図

強い相関 カイラル対称性の破れ、カラーの閉じ込め

ハドロンは対称性の破れた基底状態の励起モード

メソン $J^{\pi} = 0^{-} \Rightarrow 0^{+} \Rightarrow 1^{-}$

バリオン $1/2^{+} \Rightarrow 1/2^{+} \Rightarrow 1/2^{-}$

(例) 原子核 $0^{+} \Rightarrow 2^{+} \Rightarrow 4^{+}$ 変形核の回転

2. 多様な**励起状態**の発見

クォークの励起 スピンや軌道運動

ハドロンの 分子共鳴 状態

エキゾティック ハドロン (多クォーク、グルー)

3. **カラー閉じ込め**機構の解明

なぜハドロンスペクトルか？

古い問題： **クォークか？ ハドロンか？**

基底状態のバリオンとメソンではクォーク模型による分類が大成功！

しかし 励起状態は？

スカラー中間子

a_0, f_0 は $q\bar{q}$ か？ tetra- q か？ $K\bar{K}$ 束縛状態か？

負パリティバリオン

P波 qqq か？ penta- q か？ ハドロン共鳴か？

$\Lambda(1405)$ 最も軽い負パリティバリオンの正体は？

ハドロンスペクトル

3つの異なる見方

QCD

quark+gluon

**color gauge
symmetry**

Quark model

constituent quark

**global color
symmetry**

Effective theory

hadrons

no color (singlet)

Chiral Symmetry Breaking

various phases

lattice QCD

**vacuum conden-
sates**

massive quarks

SU(6) symmetry

**hamiltonian
approach**

NG bosons

chiral effective theory

chiral perturbation

講義 1

現代的視点・核物理の視点から

- ◆ 基本概念 ハドロン・クォークとQCD
- ◆ ストレンジネス
- ◆ 一般化された核力とJ-PARCのストレージング核物理

基本概念

- ハドロン (hadron)
- クォーク (quark)
- QCD (Quantum Chromodynamics)

ハドロン

- ハドロン

強い相互作用に関わる素粒子

- バリオンとメソン

バリオン (重粒子) 陽子、中性子、ハイペロン

メソン (中間子) パイオン、K、 ρ 、 J/ψ

- 強い相互作用

ex. 核力 (湯川理論)

陽子・中性子の力 原子核を束縛する

ハドロン

- 強い相互作用の保存則

バリオン数 = $3 \times$ クォーク数 (統一理論で破れる?)

フレーヴァー ストレンジネス、チャーム、ボトム、トップ
(弱い相互作用で破れる)

- 素粒子の基本相互作用

標準理論	{	電弱相互作用	{	電磁相互作用
		強い相互作用		弱い相互作用

統一原理：ゲージ場の理論

クォーク

■ 標準理論 ゲージ場の理論

		スピン	強い相互作用	電弱相互作用
フェルミオン	クォーク	1/2	○	○
	レプトン	1/2	×	○
ボソン	ゲージボソン	1	—	—
	ヒッグス	0	×	○

■ 強い相互作用のゲージ理論

QCD (Quantum Chromodynamics)

カラー電荷 SU(3)ゲージ対称性

ハドロン=クォーク+グルーオン



クォーク

■ クォークの量子数

カラー SU(3) ゲージ対称性の基本表現 $3 = (R, B, G)$

スピン $1/2$ (\uparrow, \downarrow)

カイラル (R, L) 対称性は破れている

フレーヴァー (u, d) (c, s) (t, b)

弱アイソスピン $Q_R = 0$ $Q_L = 1/2$

■ グルーオンの量子数

カラー SU(3) ゲージ対称性の随伴表現 $N^2 - 1 = 8$ 成分

スピン 1 (ただし、質量 0 なので、2成分)

フレーヴァーなど他の量子数は持たない

QCD: Gauge invariance

- QCD (Quantum Chromodynamics) Lagrangian

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2} \text{Tr}\{G^{\mu\nu} G_{\mu\nu}\} + \bar{q}(i\gamma \cdot D - M)q$$

$$q = \begin{pmatrix} q^R(x) \\ q^B(x) \\ q^G(x) \end{pmatrix} \quad A^\mu = \sum_{a=1}^8 \frac{\lambda^a}{2} A^{a\mu}$$

$$G^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu + ig[A^\mu, A^\nu]$$

- Local gauge invariance

$$q(x) \rightarrow q'(x) = U(x)q(x)$$

$$D_\mu q(x) \rightarrow U(x)D_\mu q(x)$$

$$A_\mu(x) \rightarrow A'_\mu(x) = U(x)A_\mu U^{-1} + \frac{i}{g} \partial_\mu U(x)U^{-1}(x)$$

QCD:

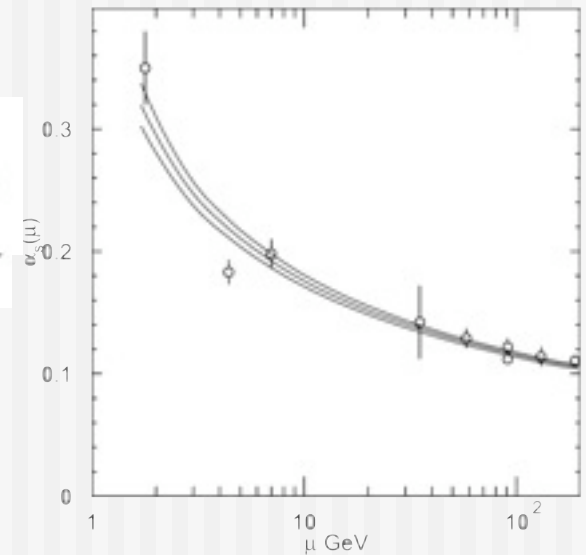
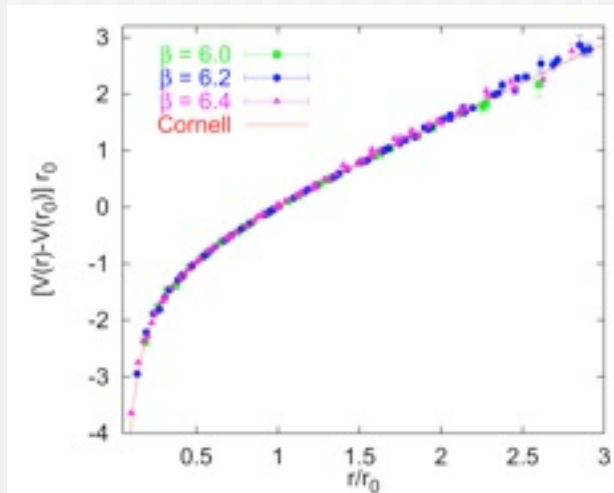
Asymptotic freedom/ Confinement

- Asymptotic freedom

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{12\pi}{(33 - 2N_f) \ln \frac{Q^2}{\Lambda^2}} + (\text{higher order terms})$$

$$\Lambda = \Lambda_{QCD} \approx 280\text{MeV}$$

- Quark confinement



Quenched Wilson SU(3) Lattice
G.S. Bali, Phys. Rept. 343 (2001) 1

QCD:

Nontrivial vacuum

- quark condensates *break chiral symmetry*

$$\langle \bar{u}u \rangle \equiv \langle 0 | : \bar{u}u : | 0 \rangle \approx \langle \bar{d}d \rangle \approx (-230\text{MeV})^3 \quad \langle \bar{s}s \rangle \approx 0.8 \langle \bar{u}u \rangle$$

- gluon condensate *breaks scale invariance*

$$\langle G^2 \rangle \equiv \langle 0 | : \frac{\alpha_s}{\pi} G^{\alpha\mu\nu} G_{\mu\nu}^\alpha : | 0 \rangle \approx (330\text{MeV})^4$$

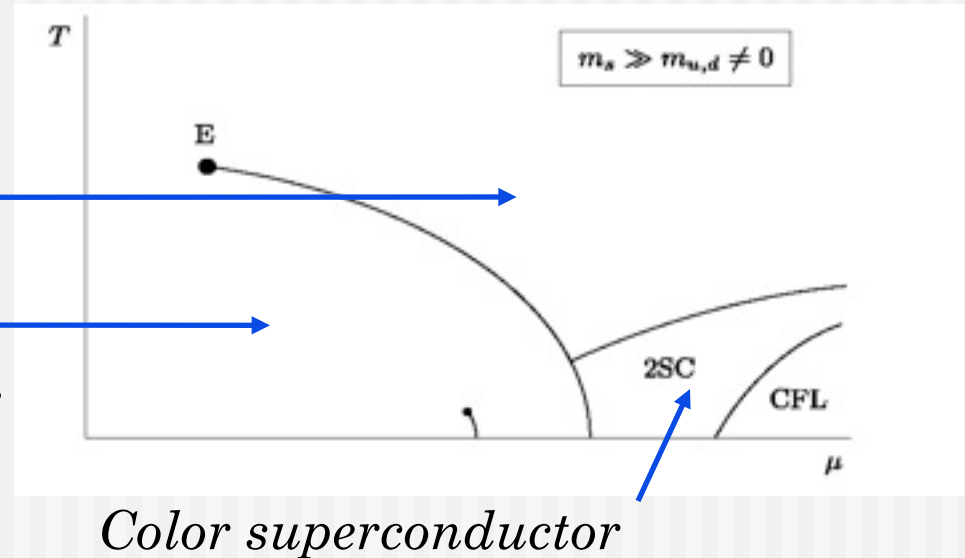
- instantons *nontrivial topology*

$$\int G_{\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu} d^4x \neq 0$$

QCD: Ground state phases

Quark-gluon plasma phase
Wigner phase

Hadron phase
Nambu-Goldstone phase



Chiral symmetry restoration

NG phase

Wigner phase

$$\langle \bar{q}q \rangle \neq 0$$



$$\langle \bar{q}q \rangle = 0$$

QCD: Phase transition

Lattice QCD at finite T

F. Karsch, hep-lat0106019

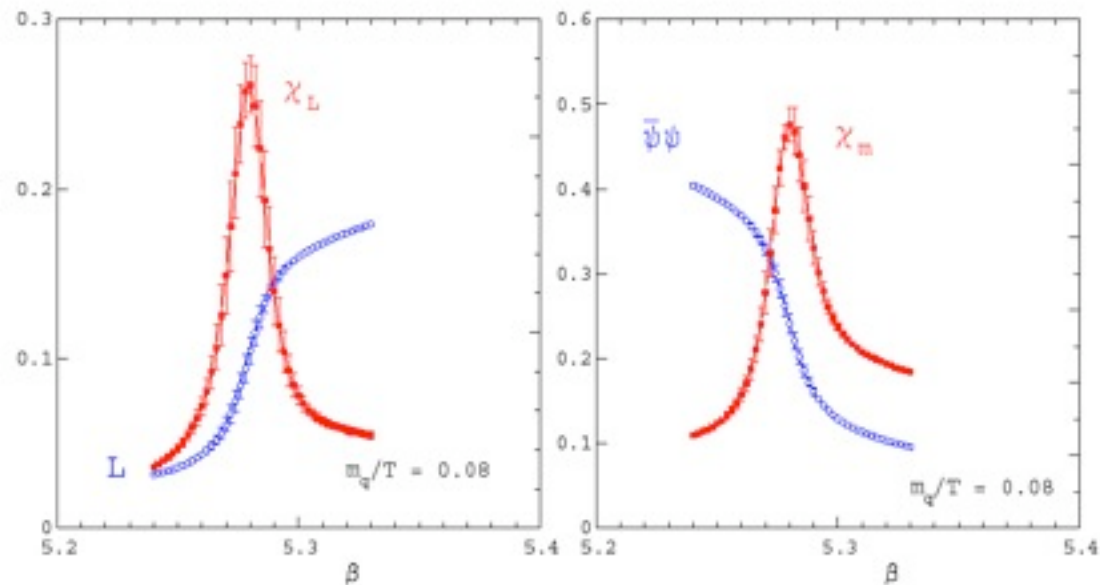


Fig. 2. Deconfinement and chiral symmetry restoration in 2-flavour QCD: Shown is $\langle L \rangle$ (left), which is the order parameter for deconfinement in the pure gauge limit ($m_q \rightarrow \infty$), and $\langle \bar{\psi}\psi \rangle$ (right), which is the order parameter for chiral symmetry breaking in the chiral limit ($m_q \rightarrow 0$). Also shown are the corresponding susceptibilities as a function of the coupling $\beta = 6/g^2$.

QCD: Phase transition

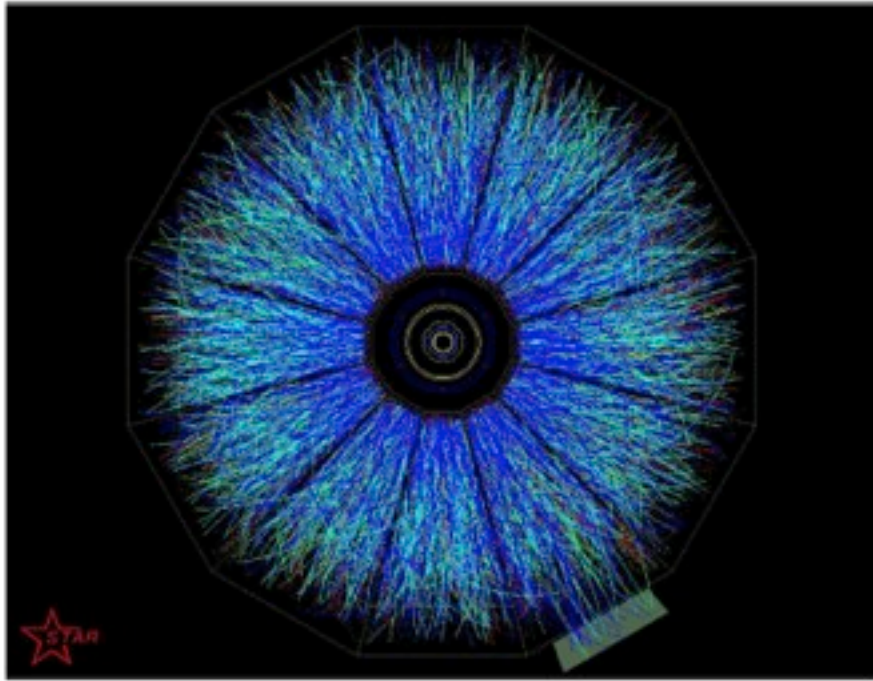


図 2: Brookhaven 研究所の RHIC 加速器。重イオンを右回りと左回りの 2 つのリング上で核子あたり 100GeV まで加速し、4ヶ所で衝突させて生成される粒子などを観測する。偏極した陽子を加速して陽子中のグルーオンなどの持つスピンを測る実験も行われている。

ストレンジネス

フレーヴァー発見の歴史

新粒子の発見 宇宙線 (エマルジョン実験)

パイオン (1947)

V粒子 (1947)

対生成 保存則 (強い相互作用)

寿命が長い 保存則を破る崩壊 (弱い相互作用)

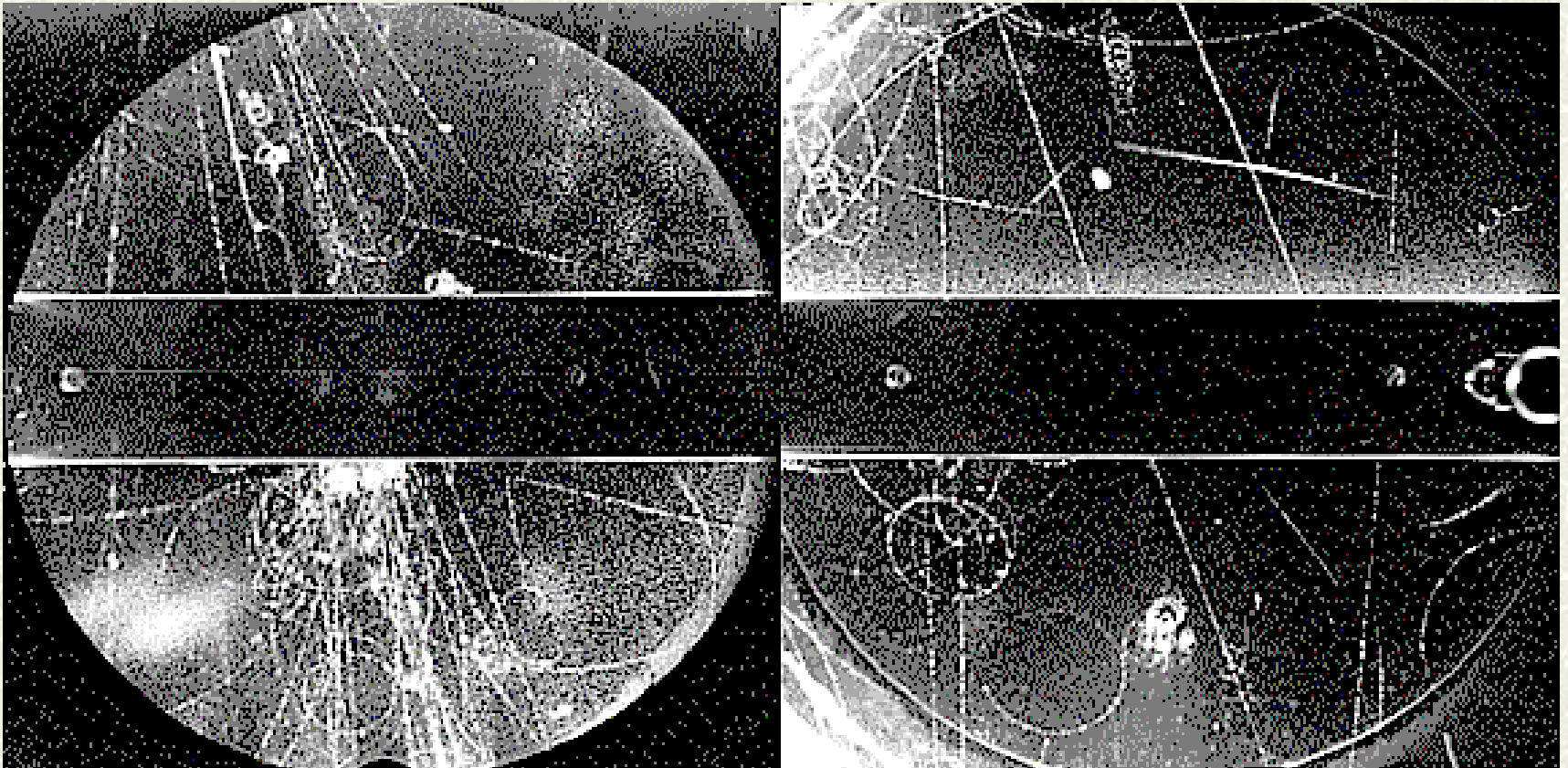
保存則に対応する量子数

多数の新しいハドロンの分類

ハドロンの対称性

新しいクォークの種類

ストレンジネス



V粒子 (K中間子) の発見 (1947)

ストレンジネス

■ 第2世代の役割？

$$\begin{array}{ccc} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \end{array}$$

■ なぜストレンジネスが面白いのか？

- 新しいアイディアの宝庫
- QCDの非摂動現象を最もよく反映
- 有限密度QCDへの手掛り コンパクト星理解の鍵

ストレンジネス

→ 素粒子・原子核物理に質的に新しく面白い対象を導入

第2世代ハドロンの発見 Nishijima-Gell-Mann
SU(3)対称性 とクォーク模型 \Leftrightarrow SU(2) アイソスピン
非レプトン弱過程 $K \rightarrow \pi\pi, \Lambda \rightarrow N\pi$ $\Delta I=1/2$ 則
世代間混合の発見 CKM行列 CPの破れ

→ ハイパー核の発見 Λ が核内で独立粒子として振舞う

新しい弱相互作用 $\Lambda N (\Sigma N) \Rightarrow NN, \Lambda\Lambda \Rightarrow \Sigma N, \Lambda N$
 Σ ハイパー核、ダブルハイパー核 \rightarrow さらにチャームへ
一般化された核力の解明へ向けて

ストレンジネス

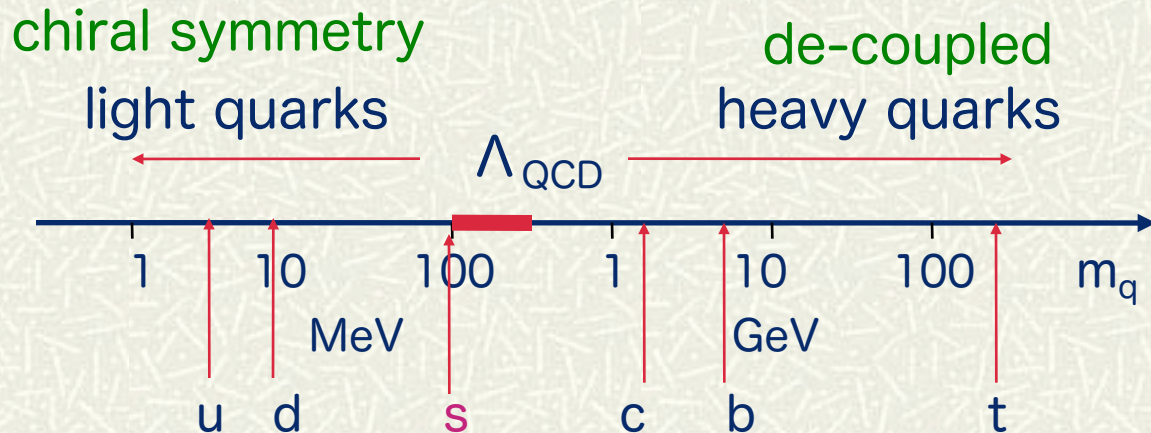
m_s と Λ_{QCD}

QCD のスケール $\Lambda_{\text{QCD}} = 100\text{-}200 \text{ MeV}$

ストレンジクォークの質量 $m_s \sim \Lambda_{\text{QCD}}$.

ストレンジネスはQCDの非摂動現象に敏感

カイラル有効理論の成否 $m_s/\Lambda_{\text{QCD}} \sim m_K^2/\mu$



ストレンジネス

- エキゾティックハドロン、原子核
 - ダイバリオン、ストレンジレット
 - K束縛原子核、K凝縮
 - ペンタクォーク
 - 安定なストレンジレット？

- 中性子星はストレンジネスを持った巨大原子核！
 - ストレンジネスによって変わる状態方程式
 - K凝縮、 Λ , Σ , Ξ 混合
 - 荷電平衡条件が s クォークを混ぜる！
 - YN, YY 相互作用が状態方程式を左右する

ストレンジネス

$Nu \sim Nd \sim Ns$



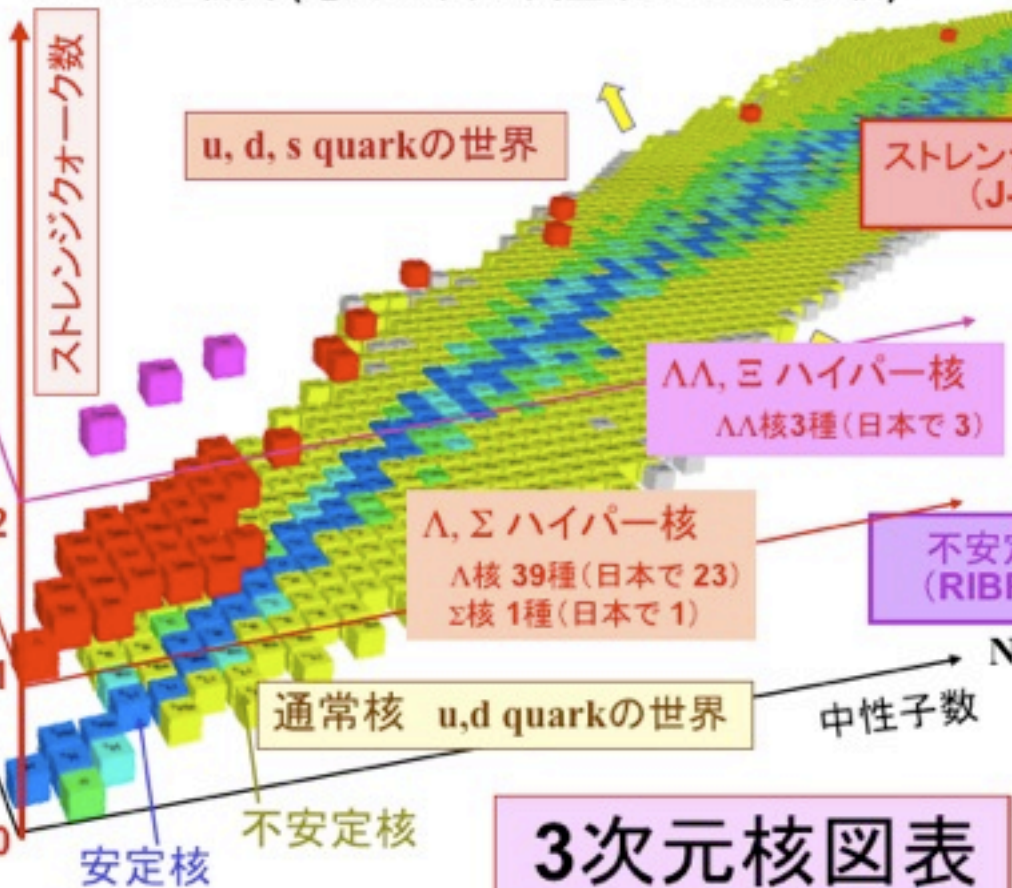
$p, n, \Lambda, \Xi^0, \Xi^-$

高密度化



Z
陽子数

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)

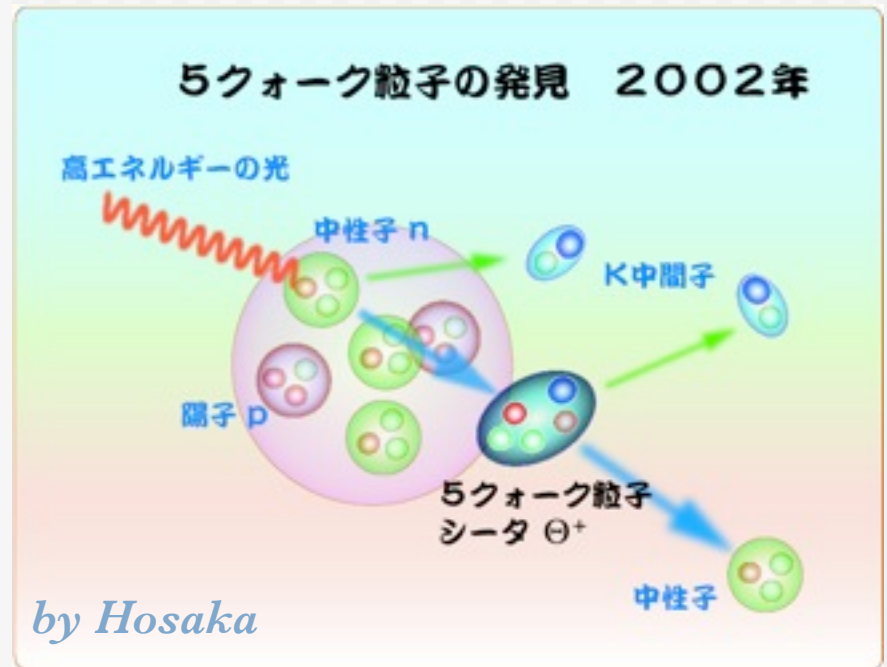
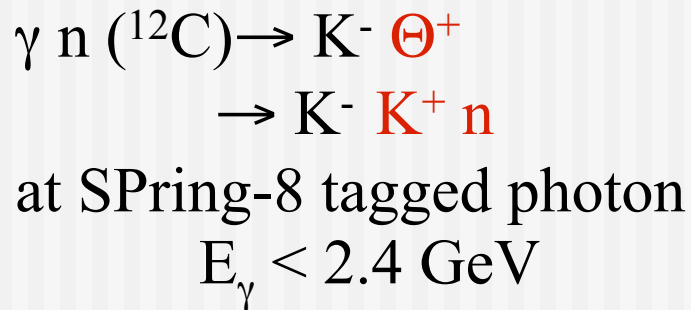


ストレンジネス核物理 (J-PARC)

Penta-quark@SPring-8

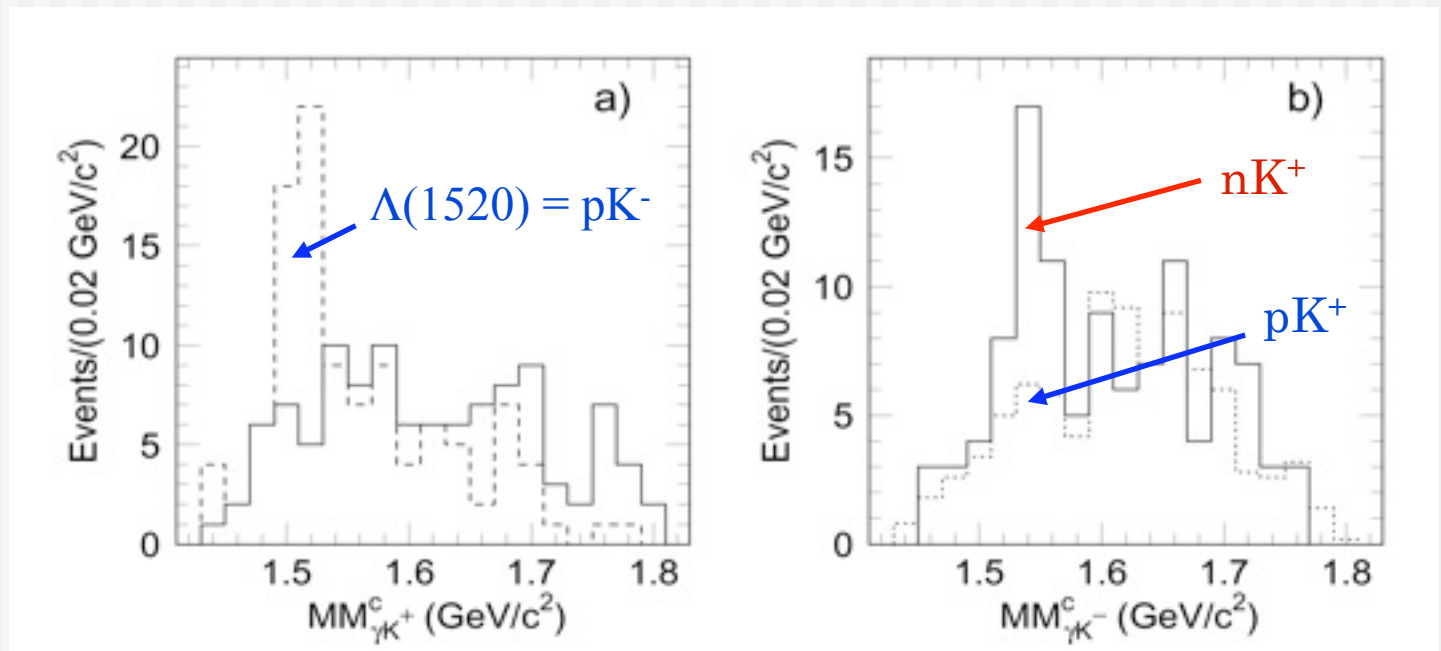
Evidence for Narrow $S=+1$ Baryon Resonance in Photo-production from Neutron

T. Nakano et. al. (LEPS collaboration), Phys. Rev. Lett. 91, 012002 (2003)



Penta-quark@SPring-8

T. Nakano et al. (LEPS collaboration)



$M = 1540 \pm 10$ MeV, $\Gamma < 25$ MeV, 4.6σ

Penta-quark@SPring-8

- Θ^+ decays to $n(udd) + K^+(u\bar{s})$
- Conservation laws of strong interaction

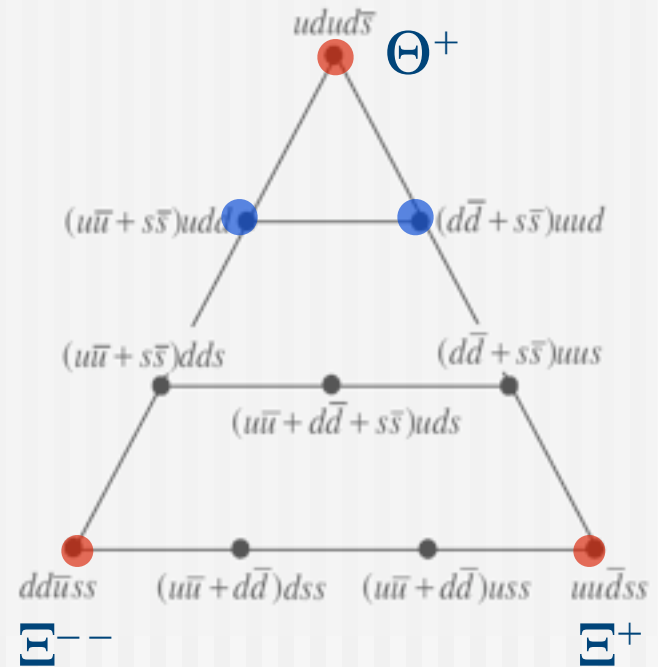
$$S = +1, B=1, Q=+1 \longrightarrow uudd\bar{s}$$

$$\longrightarrow Y = B+S = 2$$

$$\longrightarrow \text{SU}(3) 10^*, 27, \dots$$

- 10^* genuine penta-quarks

$$\Theta^+(I=0), \Xi(I=3/2) ddss\bar{u}, uuss\bar{d}$$



J-PARC (大強度陽子加速器)@東海村

■ ストレンジネス核物理の展開



ストレンジネス核物理

- JPARCのハドロン物理の最重要課題
 - ハイパー核 ($S=-1, -2$) の生成、構造、崩壊の研究を通じて一般化された核力の性質を解明する
- KEK PS, BNL AGS等での実験成果を元に
 - $S=-1$ のハイパー核物理の精密化
 - K 中間子の物理への発展
 - $S=-2$ ハイパー核物理の開拓

一般化された核力

■ 核力の特異性 3領域

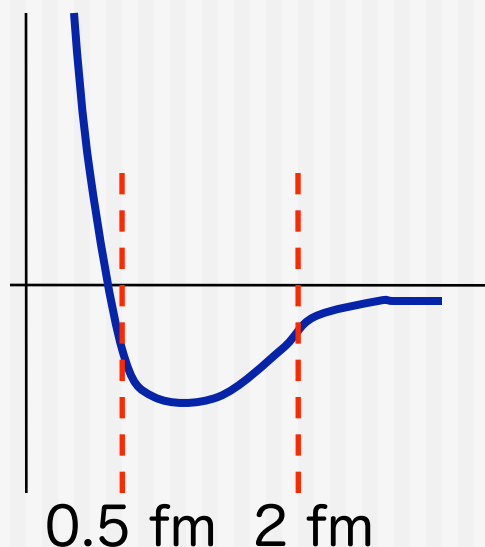
核力 = OPE + 中距離引力 + 短距離斥力

引力と斥力 ~ 数100 MeV

⇔ 重陽子の束縛エネルギー 2 MeV

OPEの到達距離 ~ 1 fm

⇔ 重陽子のサイズ ~ 4 fm



■ 他のバリオン間のも同じ性質を持つのか？

中間子交換力はSU(3)対称性を用いて一般化

短距離斥力は共通なのか？ 起源は？

一般化された核力

- OBEPによるアプローチ

Nijmegen potential HC, SC, NSC97, ESC04, ESC06

Julich potential (← Bonn potential)

- 短距離斥力の起源をクォーク構造に求めて

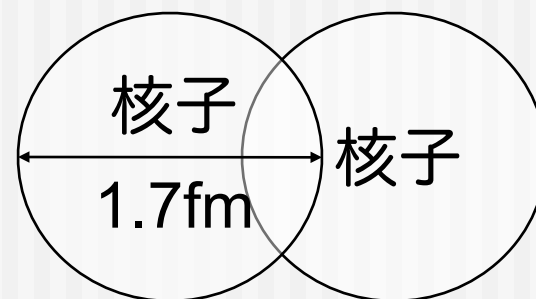
Quark antisymmetrization Tamagaki, Neudachin, Smirnov (1977)

Quark Cluster Model Oka, Yazaki (1980)

- 短距離核力 $R \sim 1 \text{ fm}$

核子の励起状態 $300 \sim 500 \text{ MeV}$

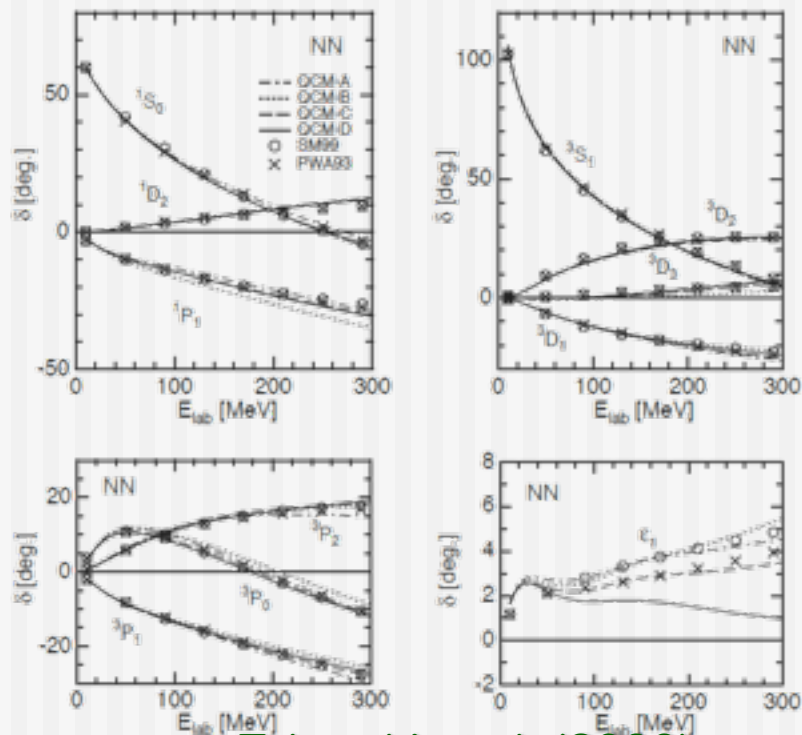
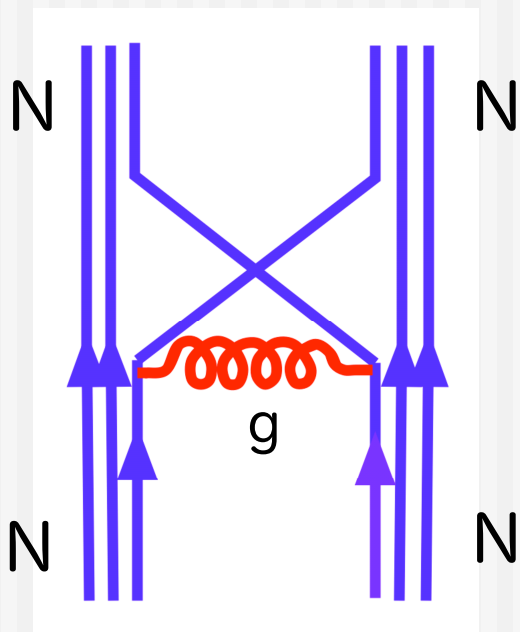
斥力芯の強さ $500 \sim 1000 \text{ MeV}$



一般化された核力

■ Quark Cluster Model

クォーク交換（反対称化）に起因する短距離斥力



一般化された核力

$$SU(6) \supset SU(3) \text{ flavor} \times SU(2) \text{ spin}$$

$$[3] \underline{56} \begin{cases} 8 (S=1/2): N \ \Lambda \ \Sigma \ \Xi \\ 10 (S=3/2): \Delta \ \Sigma^* \ \Xi^* \ \Omega \end{cases}$$

SU(3) flavor

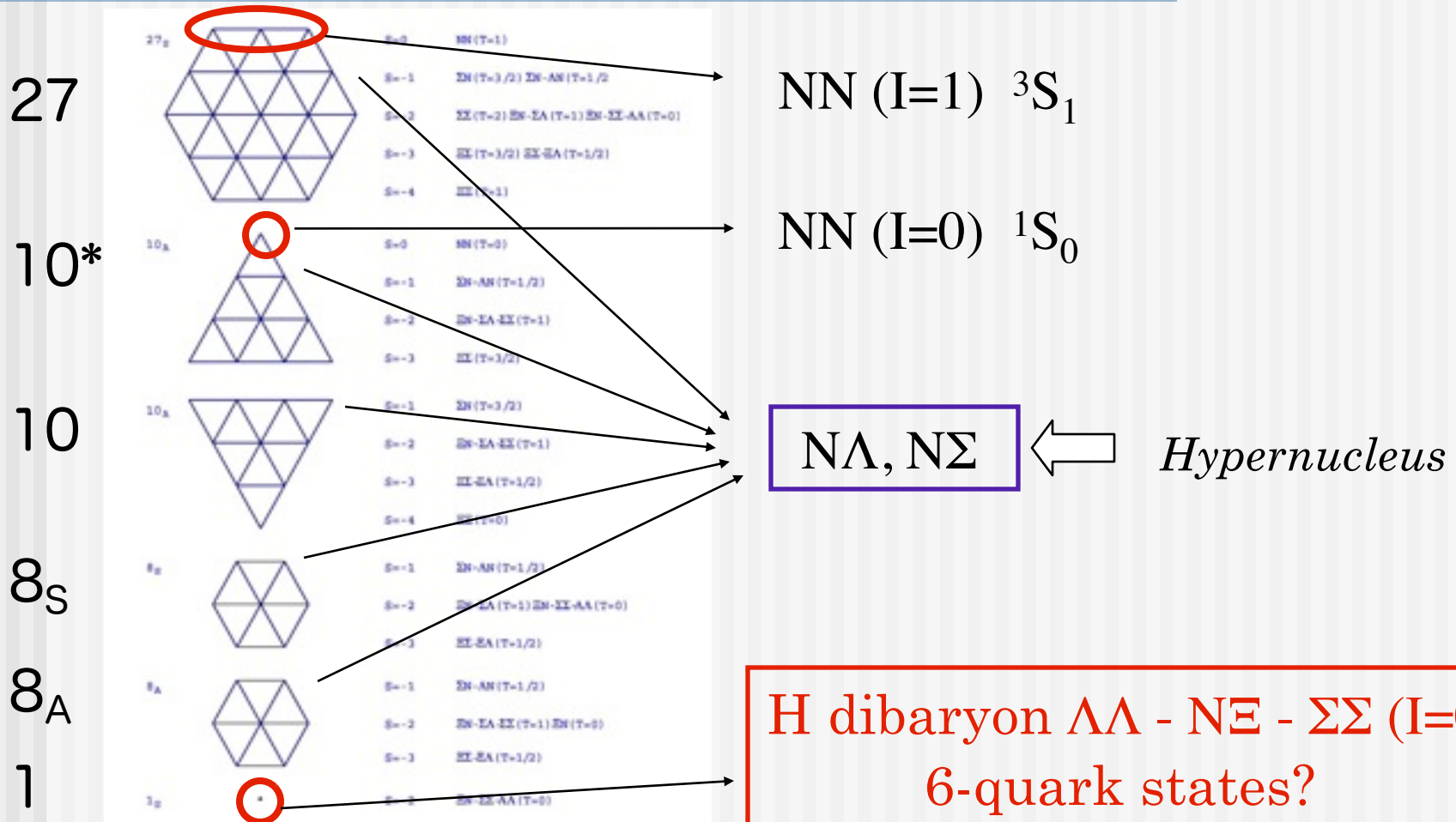
$$8 \times 8 = 1 + 8_S + 27 + 8_A + 10 + 10^*$$

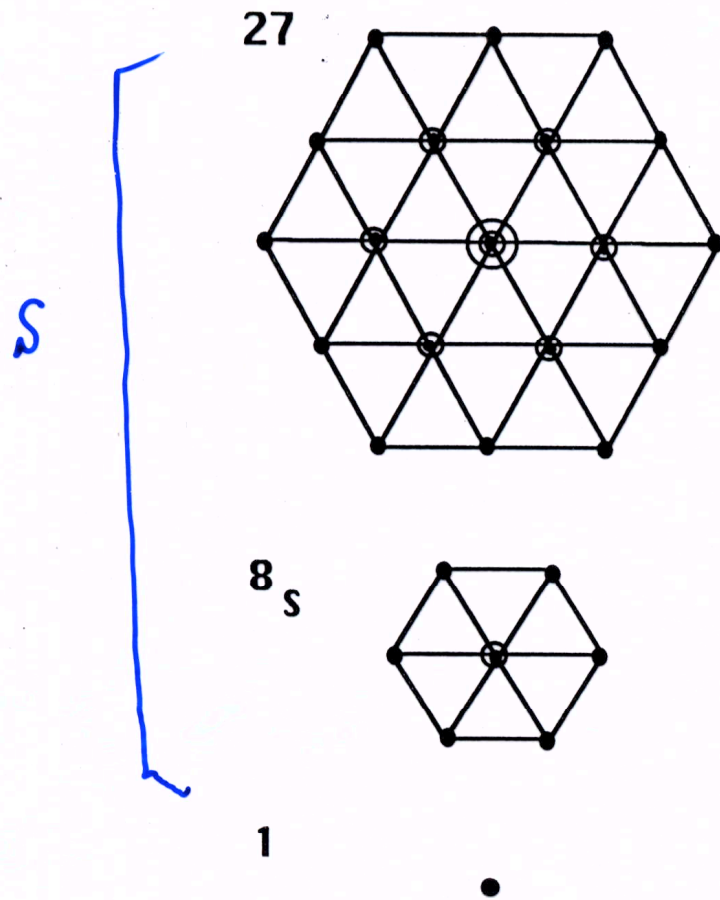
Symmetric Antisymm

$\Lambda\Lambda - N\Xi - \Sigma\Sigma (I=0)$ $NN (I=1)$ $NN (I=0)$

M. O. , K. Shimizu, K. Yazaki, PLB130 (1983) 365, NPA464 (1987) 700

一般化された核力





NN(I=1)

singlet even

$\Sigma N(I=3/2), \Sigma N-\Lambda N(I=1/2)$

$\Sigma \Sigma(I=2), \Xi N-\Sigma \Sigma-\Sigma \Lambda(I=1), \Xi N-\Sigma \Sigma-\Lambda \Lambda(I=0)$

$\Xi \Sigma(I=3/2), \Xi \Sigma-\Xi \Lambda(I=1/2)$

$\Xi \Xi(I=1)$

$\Sigma N-\Lambda N(I=1/2)$

$\Xi N-\Sigma \Lambda(I=1), \Xi N-\Sigma \Sigma-\Lambda \Lambda(I=0)$

$\Xi \Sigma-\Xi \Lambda(I=1/2)$

$\Xi N-\Sigma \Sigma-\Lambda \Lambda(I=0)$

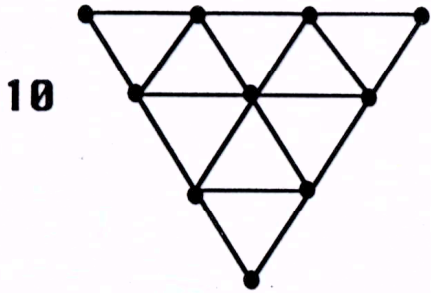
H dibaryon

SU(3) 対称性に従うか？ 破れは？

$\Lambda N-\Sigma N, \Lambda \Lambda-\Xi N-\Sigma \Sigma$ 混合

triplet even

A



10

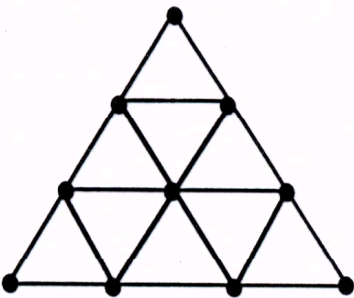
$\Sigma N(I=3/2)$

$\Xi N - \Sigma \Sigma - \Sigma \Lambda(I=1)$

$\Xi \Sigma - \Xi \Lambda(I=1/2)$

$\Xi \Xi(I=0)$

$\overline{10}$



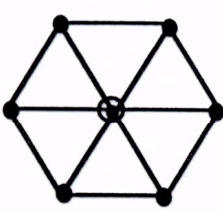
$NN(I=0)$

$\Sigma N - \Lambda N(I=1/2)$

$\Xi N - \Sigma \Lambda(I=1)$

$\Xi \Sigma(I=3/2)$

8_A



$\Sigma N - \Lambda N(I=1/2)$

$\Xi N - \Sigma \Sigma - \Sigma \Lambda(I=1), \Xi N(I=0)$

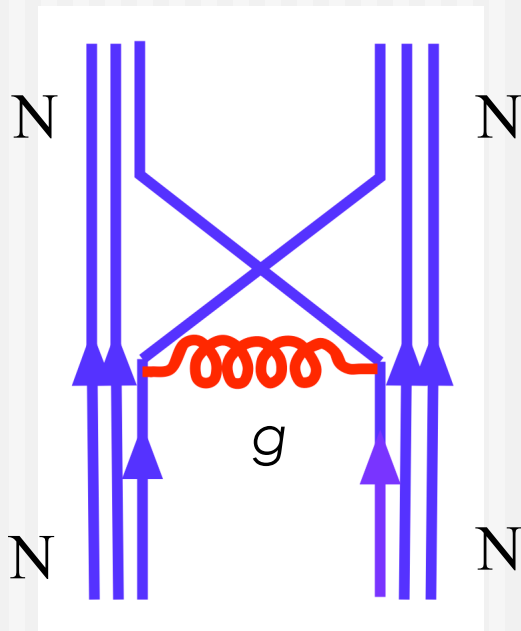
$\Xi \Sigma - \Xi \Lambda(I=1/2)$

Short range BB interaction

- NN: Quark exchange force

Fujiwara

NN Short-range repulsion



Pauli exclusion principle

Neudatchin-Smirnov-Tamagaki (1977)

+

color magnetic interaction

Oka-Yazaki (1980)

+

instanton induced interaction

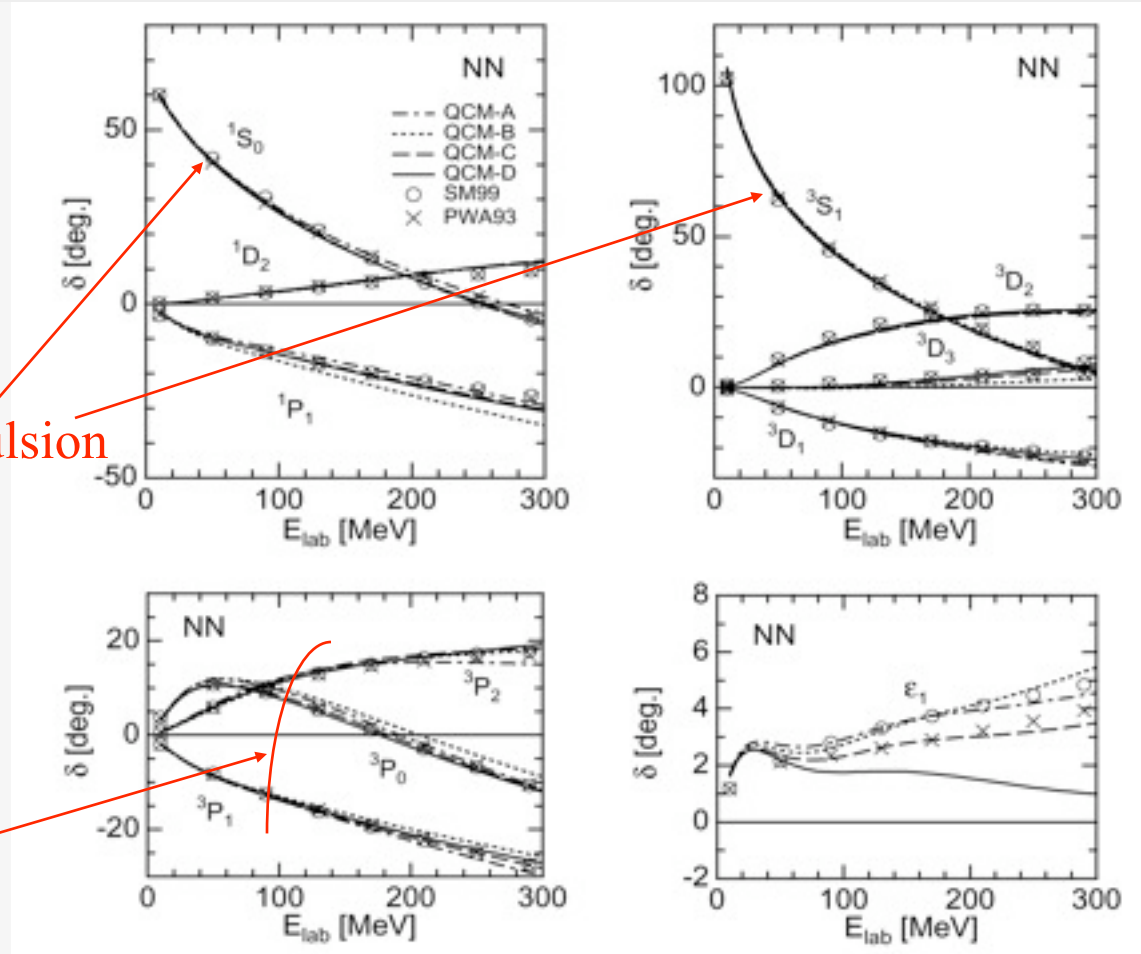
Takeuchi-Oka (1989)

+ long range meson exchange force **PS+S+V**

S. Takeuchi, O. Morimatsu, Y. Tani, Makoto Oka,
Prog.Theor.Phys.Suppl.137 (2000) 83-120

S wave
 Strong short range repulsion

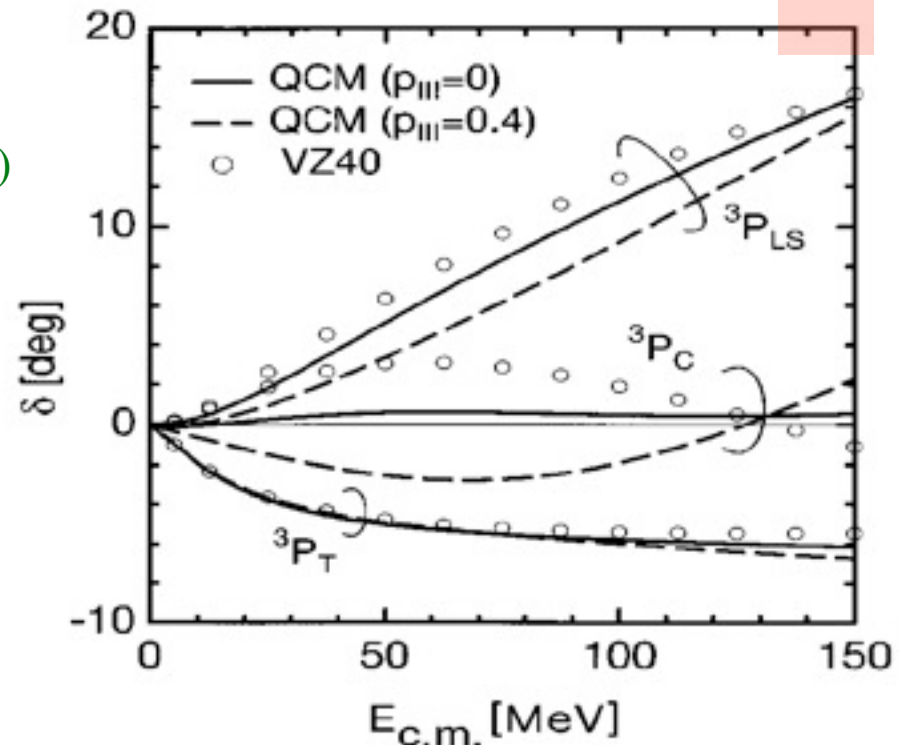
P wave LS force



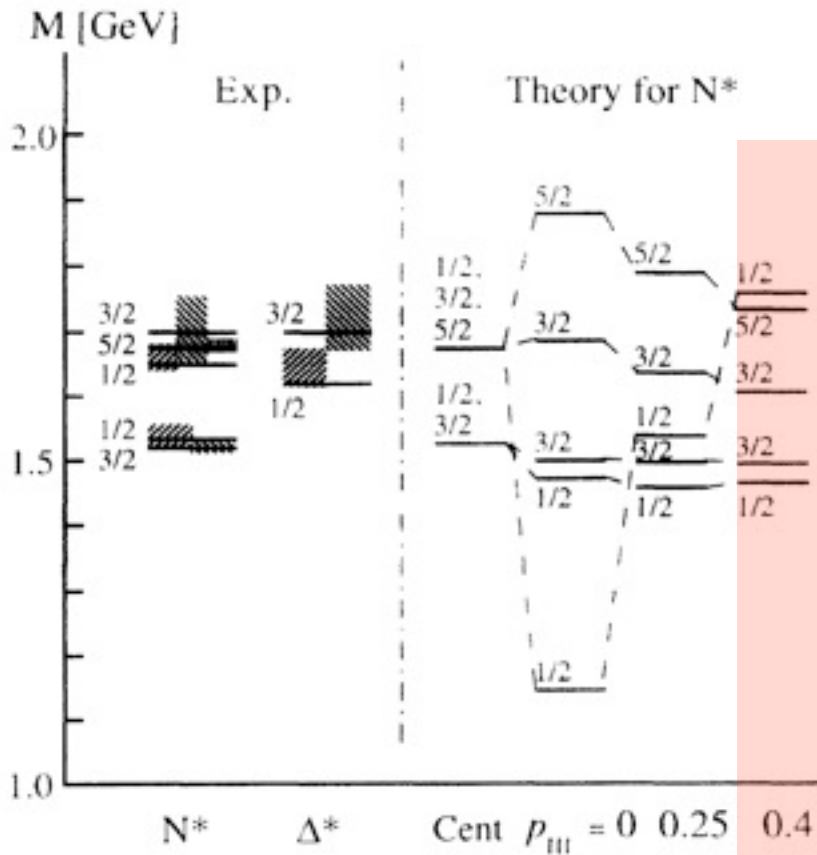
LS force in the NN interaction

Strong LS force
in NN P-wave scattering

S. Takeuchi, PR D53 (1996)



III in the baryon spectrum



Weak LS force
in the *P* wave baryons

S. Takeuchi (1994)

p_{III} = part of III(KMT)
in the hyperfine splitting
keeping N- Δ mass diff.

$$H_{\text{quark}} = K + (1 - p_{III}) V_{\text{OGE}} + p_{III} V_{\text{III}} + V_{\text{conf}}$$

Strong Antisymmetric LS Force from *quark exchange*

$$V_{SLS} = V_S(r)(\vec{\sigma}_Y + \vec{\sigma}_N) \cdot \vec{L}$$

$$V_{ALS} = V_A(r)(\vec{\sigma}_Y \ominus \vec{\sigma}_N) \cdot \vec{L}$$

- explains weak LS force on Λ in nuclei
- no ALS for ΣN ($I=3/2$)

MEX
QEX

Morimatsu, Shimizu, Yazaki
Tani, Takeuchi, Oka

