



ストレンジネス核物理

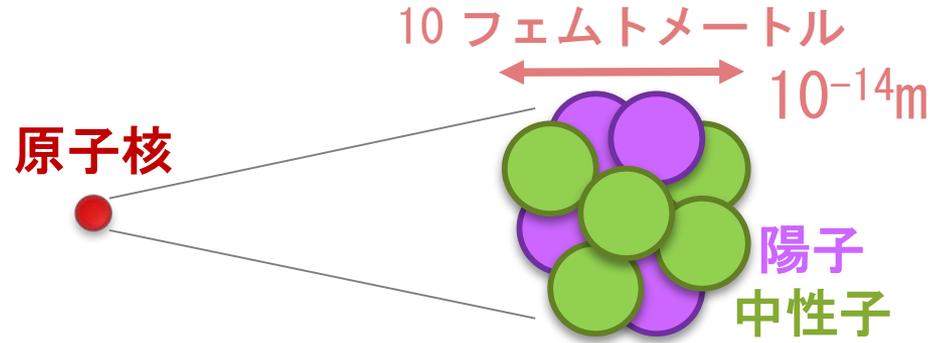
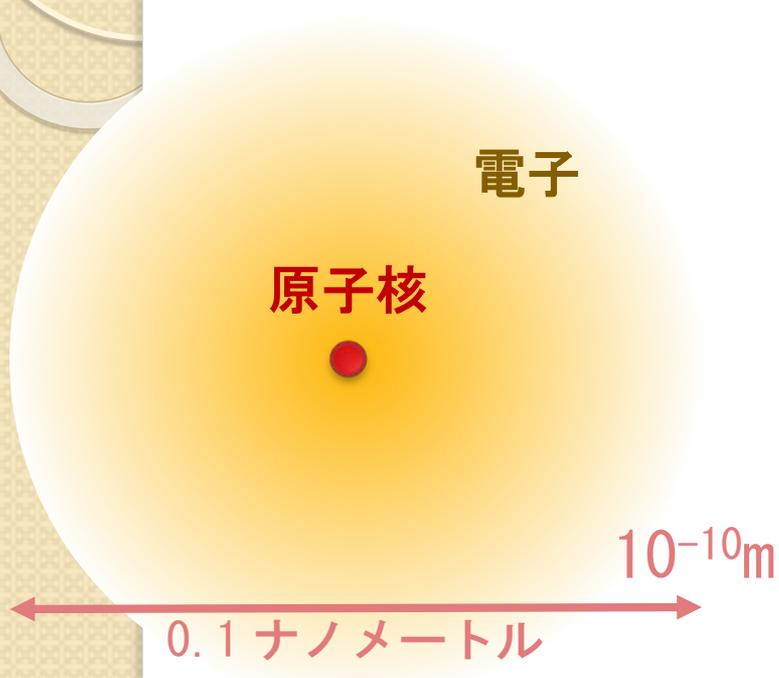
阪口 篤志

ストレンジネス核物理

- ストレンジネス
 - クォーク : up, down, **strange**, charm, bottom, top
ストレンジネス : $S = -1$
 - 現実にはハドロンとして存在
 - **ハイペロン** (バリオン) や **K中間子** (メソン)
- このストレンジネスを原子核に導入
 - **新たな原子核**を作る
 - 自然界にはない **ハイパー核** や **K中間子核** を作る
 - **ストレンジネス導入の効果**
 - **原子核が変化 (触媒効果)**
 - 原子核が縮むなど
 - **ハイペロンやK中間子が変化 (媒質効果)**
 - ハドロンの質量変化など

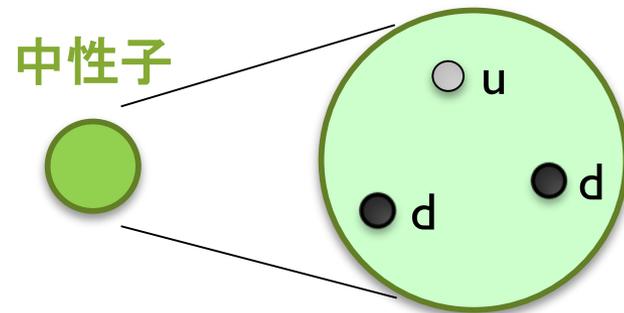
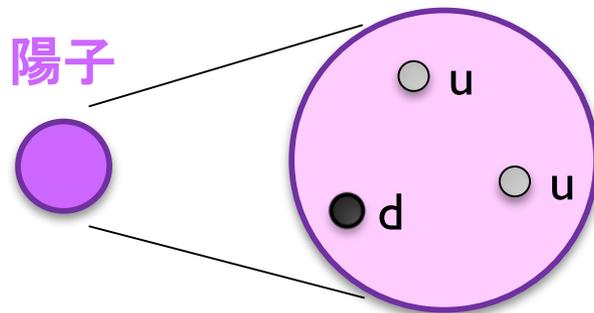
原子核

- 色々な側面を持つ原子核



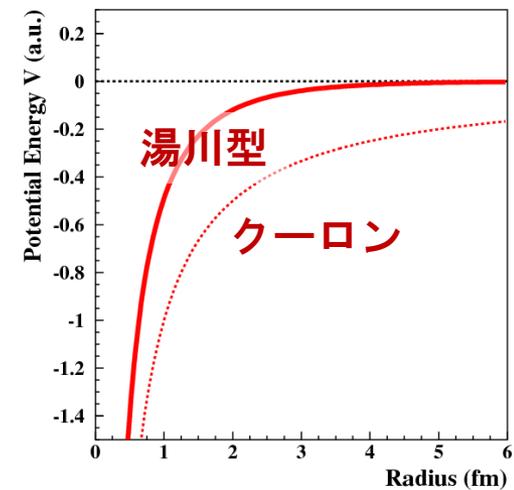
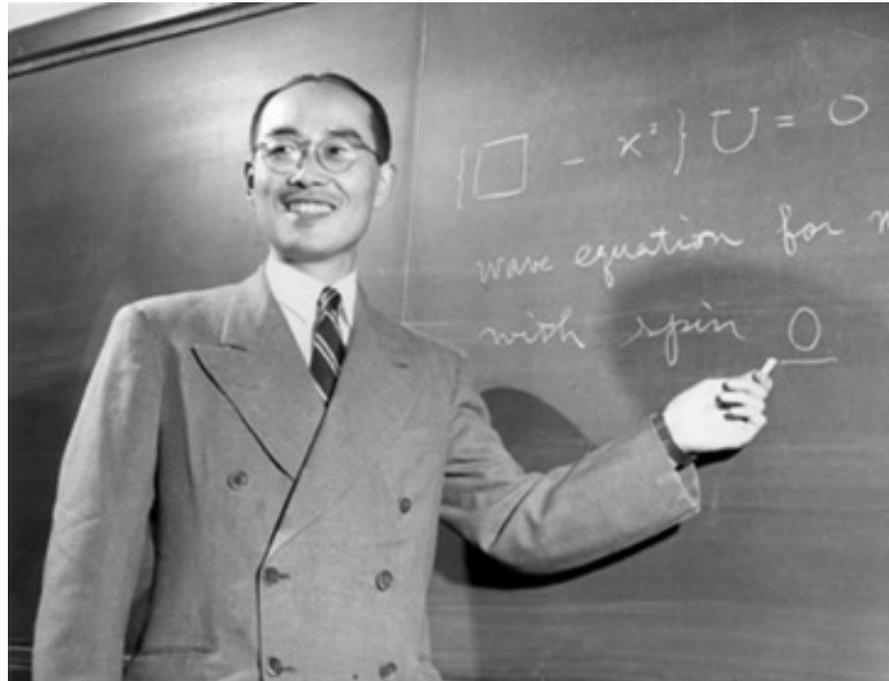
極低温：クーパー対、超伝導状態
密度大：核子の空間占有率約15%
少し粘性のある流体

高エネルギー実験の人曰く
「原子核は物性研究なんだね」

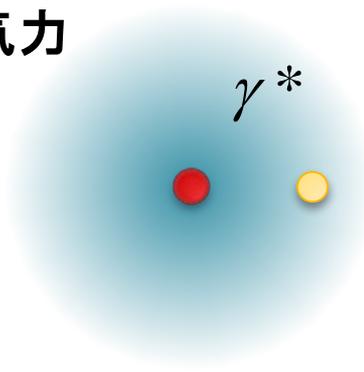


核力

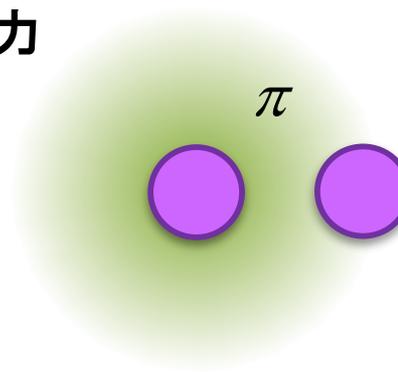
- **パイ中間子交換モデル ⇒ 中間子交換モデル**



電磁気力



核力

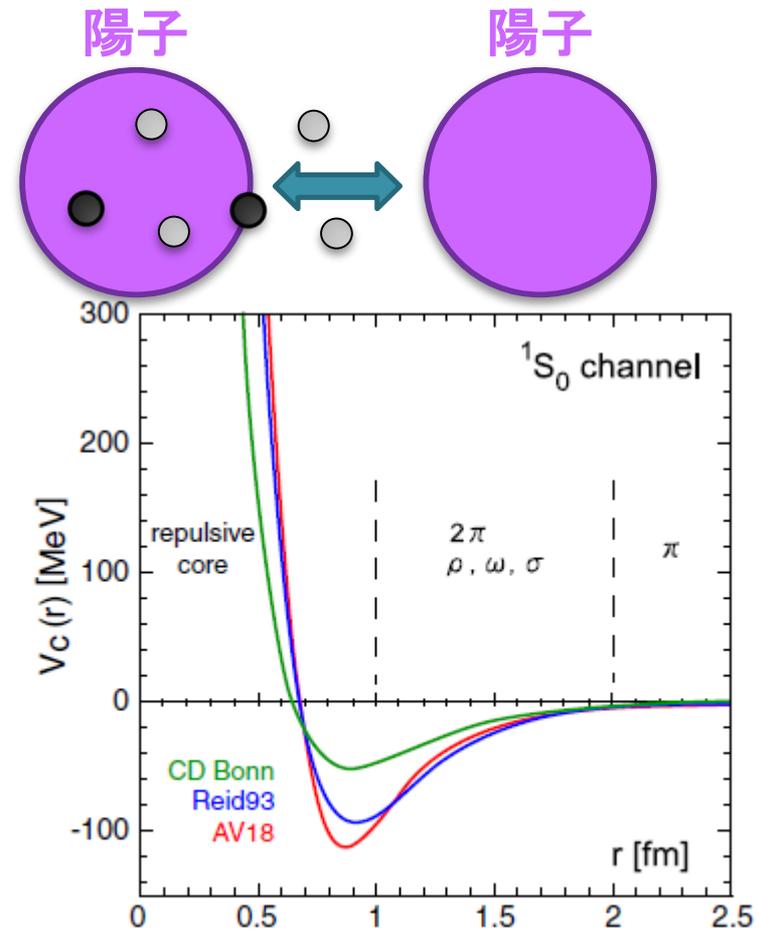


$$U_{12} = g_1 g_2 \frac{e^{-mcr/\hbar}}{r}$$

現実の核力

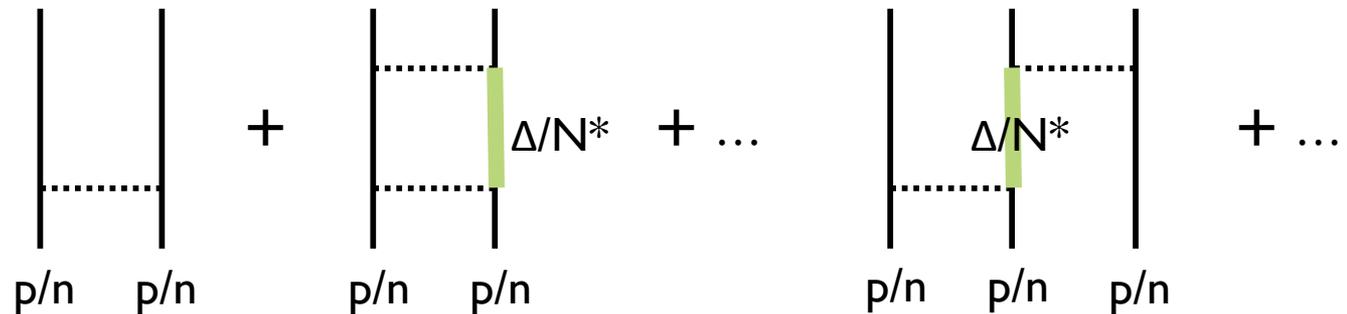
- 陽子-陽子、陽子-中性子の**二体散乱**で研究
 - パイ中間子交換
 - 同時に 2π 交換
 - 他の中間子交換
 - π より重い中間子
 - ρ 、 ω 、 σ 中間子

- **短距離で強い斥力**
 - 引力と斥力がバランス
 - 斥力の起源はまだ謎
 - クォーク間の力？
 - クォーク交換の力？



三体力

• 二体力と三体力



二体力の寄与
二体散乱で研究可能

三体力の寄与
原子核の中でしか起こらない

• 三体力の役割

- 原子核密度程度 ($\sim 0.17 \text{fm}^{-3}$) では寄与は小さい
 - d+p 散乱の精密測定などである程度分かる
- **密度が大きくなると重要度が増す**

$$U_2 \propto \rho \quad \Leftrightarrow \quad U_3 \propto \rho^2$$

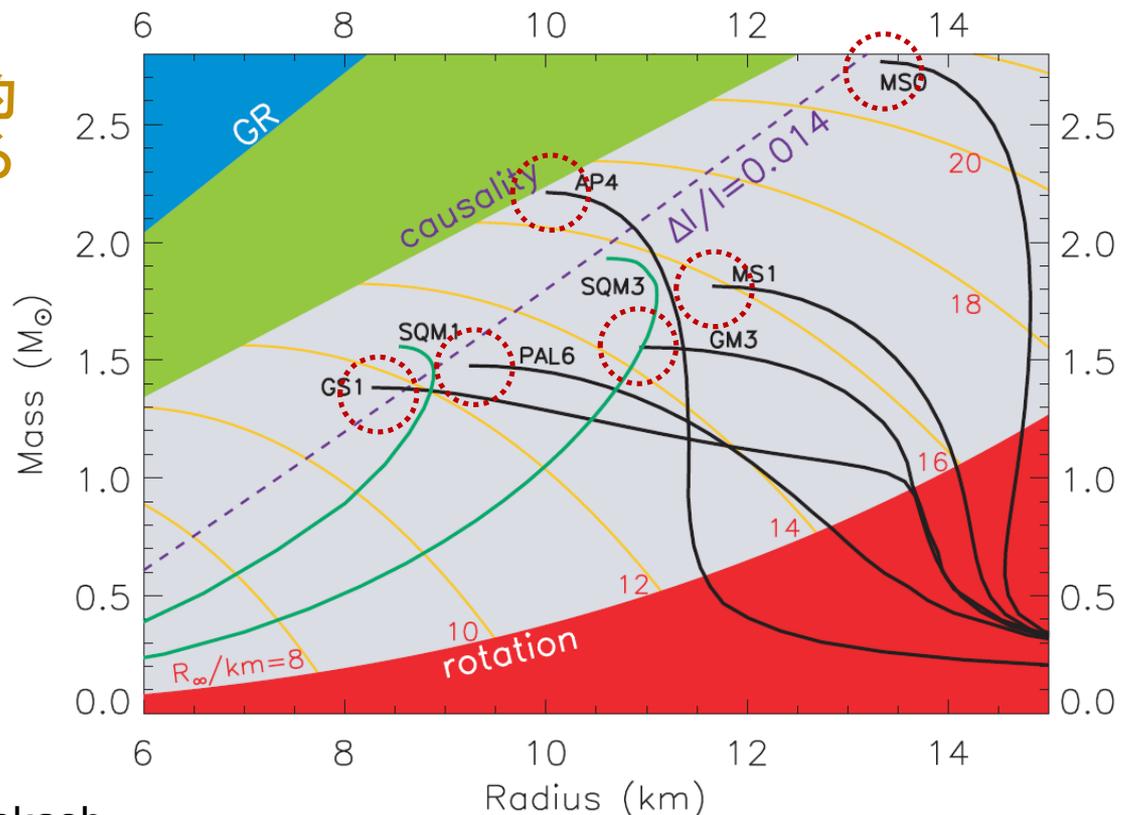
核力と中性子星

- 中性子星の中の核物質の状態方程式
 - カーブの違いは核力の斥力や三体力と関係
 - 質量を増やすとどこかでブラックホールになる

天体観測で比較的よく分かっている

最近発見 →

昔言われていた質量上限 →

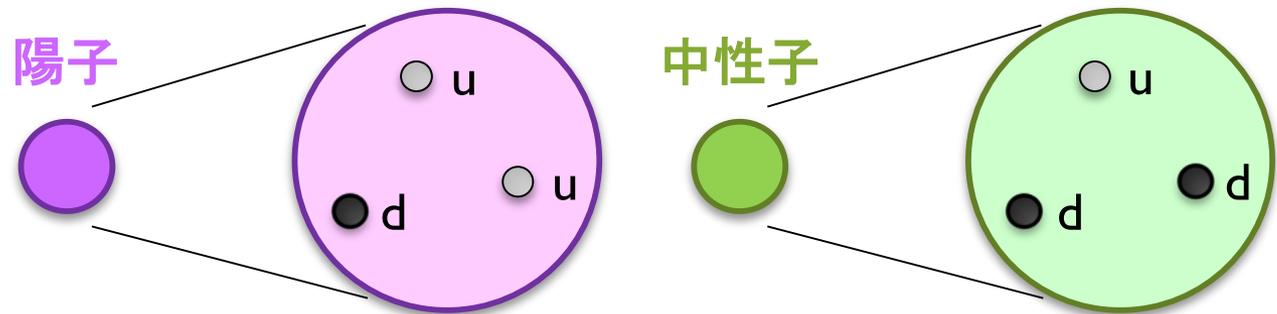


J.M. Lattimer and M. Prakash
 Science 304 (2004) 536.

あまりよく分かっていない

ハドロンの質量

- 陽子や中性子の**質量の起源**は？
 - 陽子や中性子は**クォーク**で出来ている



- アップ (u) 、ダウン (d) クォークの質量
 - 高エネルギー実験で調べてみると

$$m_u = 1.7 - 3.3 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_d = 4.1 - 5.8 \text{ MeV}/c^2$$

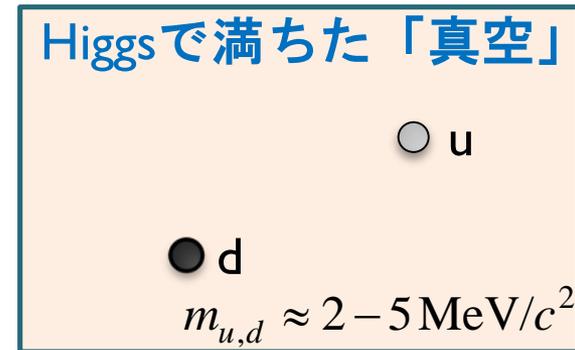
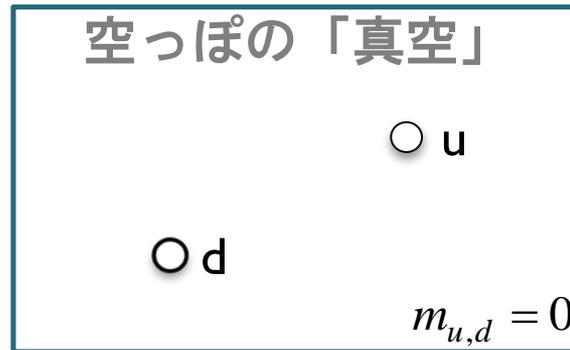
$$\frac{3m_{u,d}}{m_{\text{陽子,中性子}}} \approx 0.01$$

- 素粒子論（標準理論）では「**質量0**」

質量の起源

- Higgs 機構

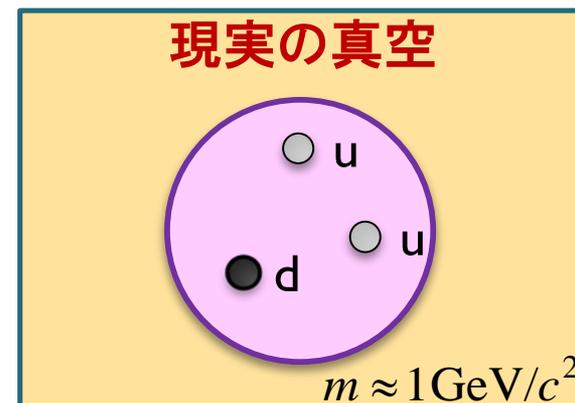
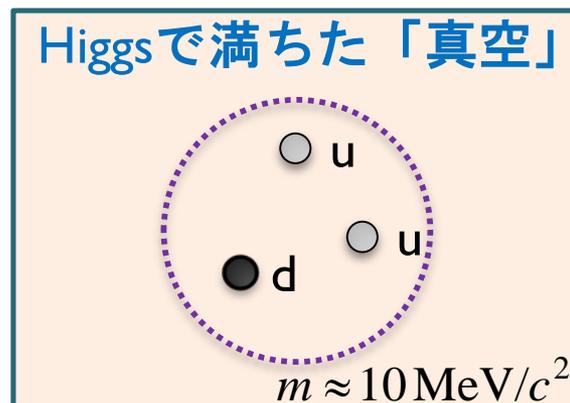
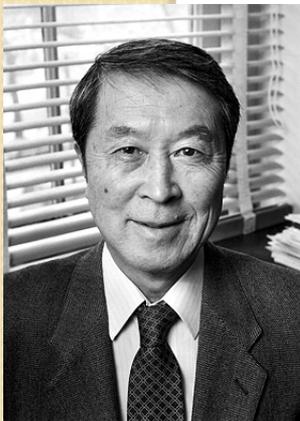
- クォークに質量を与える



- 自発的対称性の破れ

- 陽子・中性子に質量を与える

質量は真空（環境）が
変われば変化する



質量は人工的に変化可能？

- バリオンや中間子については自明でない
 - 周りの密度を高くする

陽子・中性子が近くにいる
(原子核)
相対的に真空部分が減少
質量が変化？

$m \approx 1 \text{ GeV}/c^2$

- 周りの温度を高くする

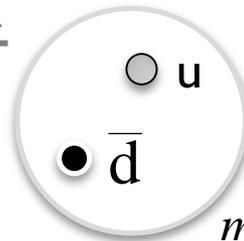
熱で中間子が多数生成
相対的に真空部分が減少
質量が変化？

$m \approx 1 \text{ GeV}/c^2$

ストレンジネスを持つ粒子

• メソン

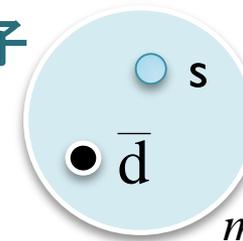
パイ中間子



$S = 0$

$m \approx 140 \text{ MeV}/c^2$

K中間子



$S = -1$

$m \approx 490 \text{ MeV}/c^2$

$$m_s - m_{u,d} \approx 90 \text{ MeV}/c^2$$

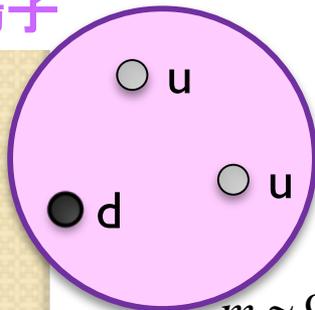


$$m_K - m_\pi \approx 350 \text{ MeV}/c^2$$

• バリオン

- ラムダ (Λ) シグマ (Σ) グザイ (Ξ)、...

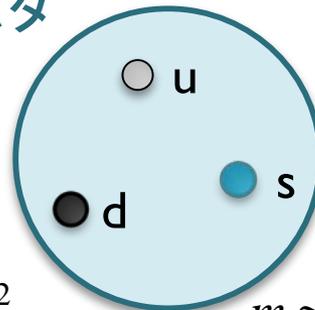
陽子



$S = 0$

$m \approx 940 \text{ MeV}/c^2$

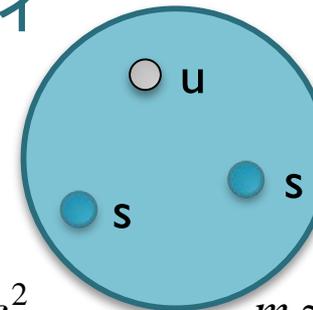
ラムダ



$S = -1$

$m \approx 1115 \text{ MeV}/c^2$

グザイ



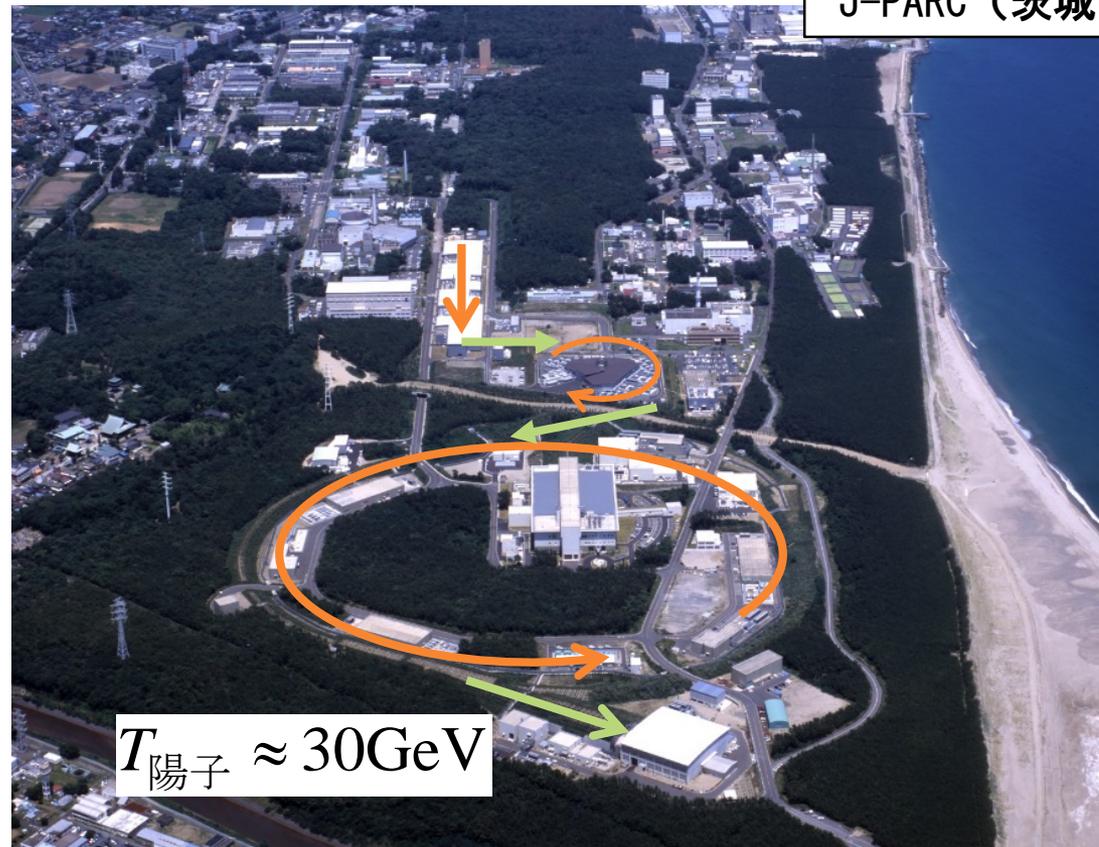
$S = -2$

$m \approx 1315 \text{ MeV}/c^2$

実験施設

- 国内では J-PARC が稼働中
 - 海外では GSI, JLab, Mainz/MAMI, Dubna など

J-PARC (茨城県東海村)

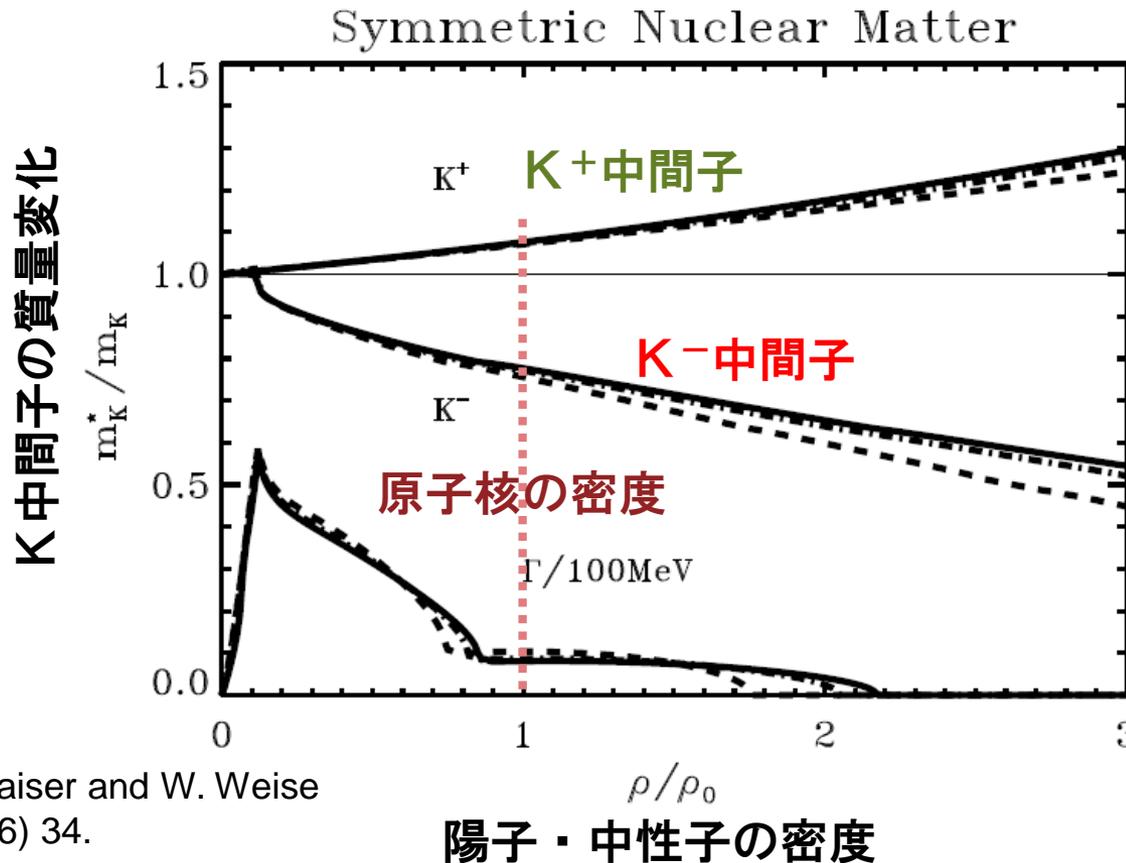


<http://j-parc.jp/Hadron/ja/index.html>

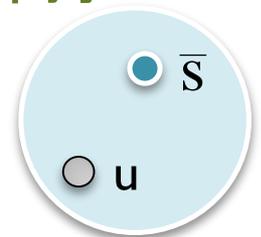
K中間子原子核

- K中間子を原子核に埋め込む
 - 原子核の中でK中間子の質量が変化
 - 質量軽くなる ≈ 強い引力がある

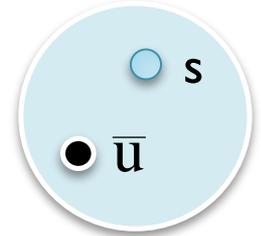
$U_K \approx -100\text{MeV}$
核力の2.5倍



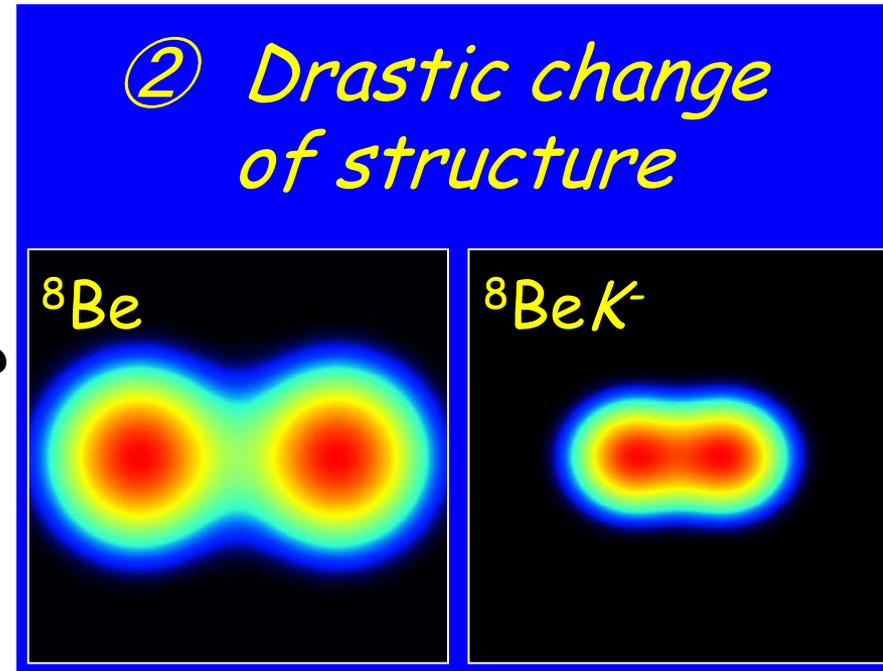
K⁺中間子



K⁻中間子

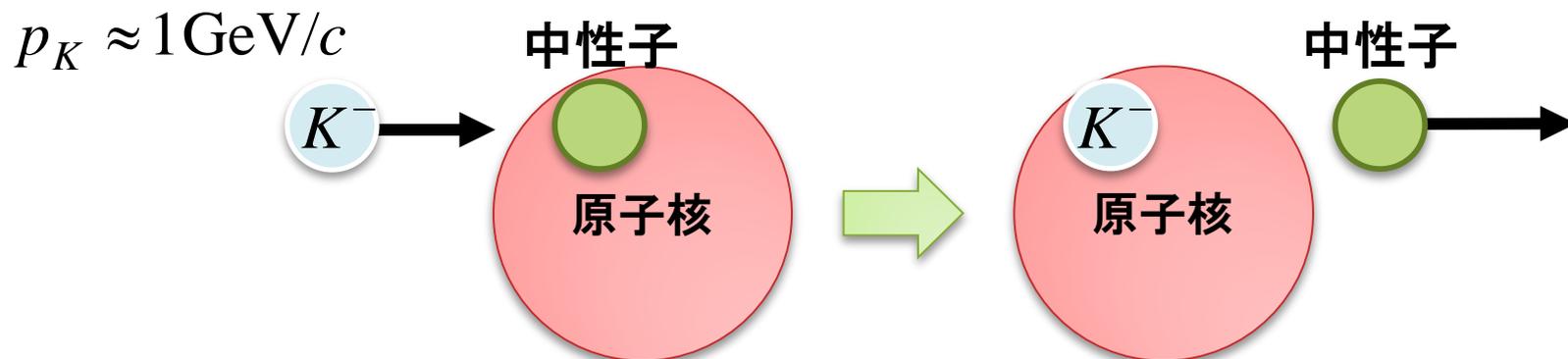


- 原子核自体変化？
 - K^- の触媒効果
 - 原子核の密度上昇？
 - 通常の2倍程度



A. Doté / KEK

- K中間子を埋め込む方法
 - K^- 中間子と中性子の玉突き反応



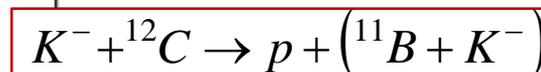
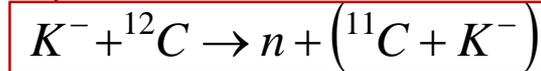
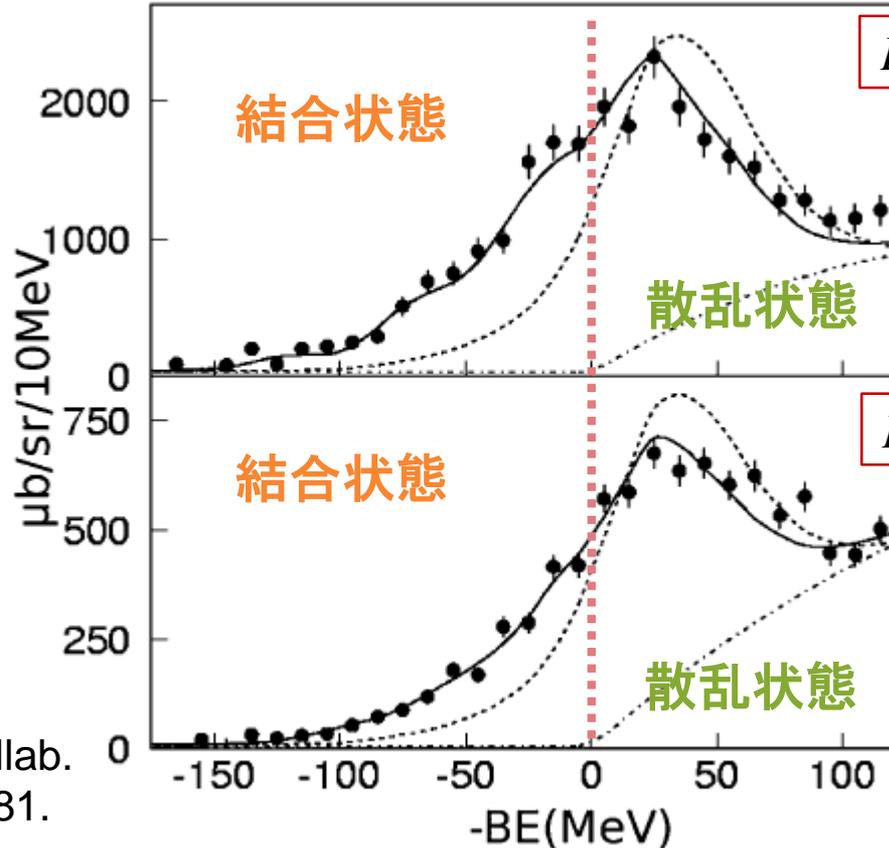
● **KEK-E548** : 炭素や酸素原子核に埋め込む

強い引力
の兆候

$$U_K \approx -190\text{MeV}$$

$$U_K \approx -160\text{MeV}$$

T. Kishimoto et al.
KEK-PS-E548 Collab.
PTP 118 (2007) 181.



質量軽い 引力 ←————→ 質量重い 斥力

進行中 ● **J-PARC E15** : ヘリウム3原子核に埋め込む

ハイパー核

• ハイペロンを原子核に埋め込む

◦ $SU_F(3)$ 対称性

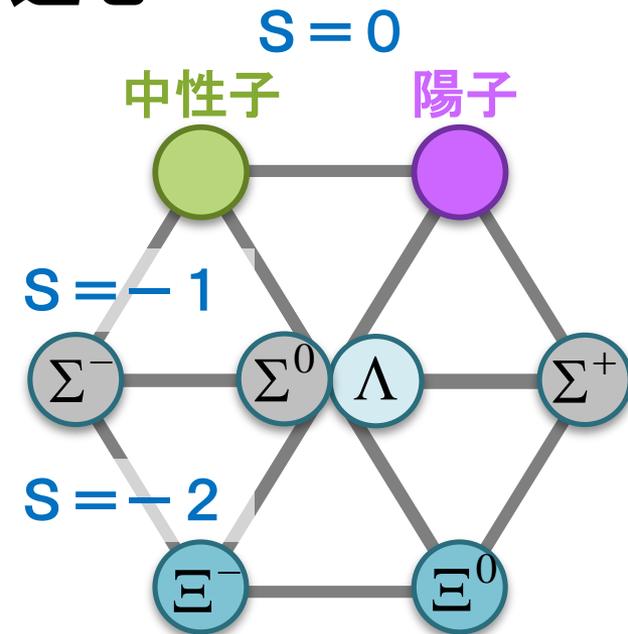
- u, d, s の 3 種類
- 相互作用は color に依る
- 質量差が無視できる
- クォークの組み合わせ方

◦ 陽子・中性子の仲間達

- オクテット・バリオン
 - ラムダ、シグマ、グザイハイペロン

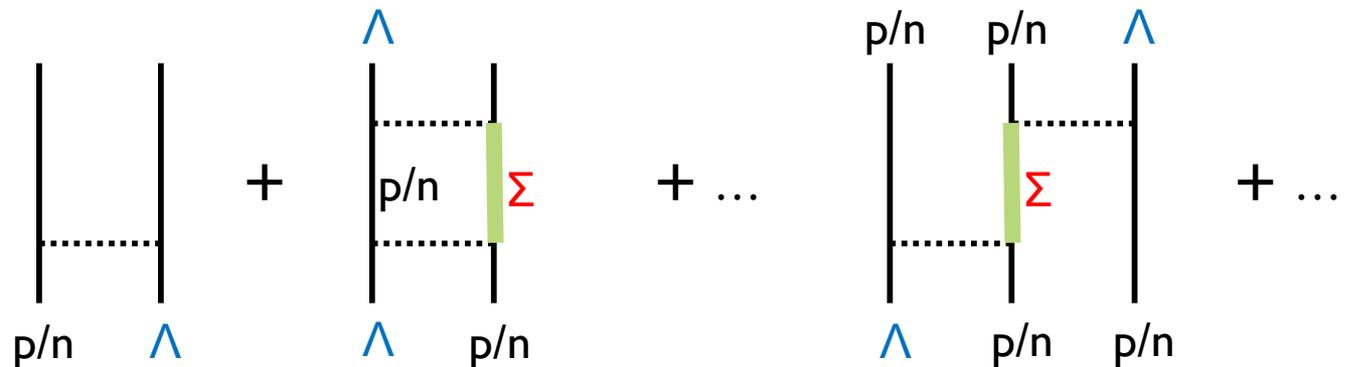
◦ これらを埋め込んだハイパー核

- ラムダ・ハイパー核 研究はよく進んでいる
- シグマ・ハイパー核 発見されたのは1例のみ
- グザイ・ハイパー核 今後研究が進む予定



ラムダ・ハイパー核

• ラムダ (Λ) ・ハイパー核と三体力

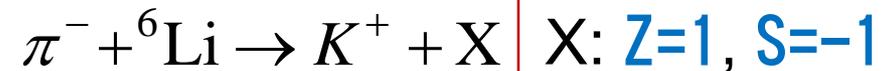


- ストレンジネスが関係する三体力
- 中性子過剰なラムダ・ハイパー核では三体力が大きくなる可能性（あるいは陽子過剰）
- ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ ：陽子 1 + 中性子 4 + ラムダ 1
 - 三体力の試金石となるラムダ・ハイパー核
 - 三体力が弱い：安定か不安定かの境目
 - 三体力が強い：十分安定になると思われる

中性子過剰ラムダ・ハイパー核

- ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ の探索実験：J-PARC E10

- 2重荷電交換反応



$$p_{\pi} \approx 1.2 \text{ GeV}/c$$

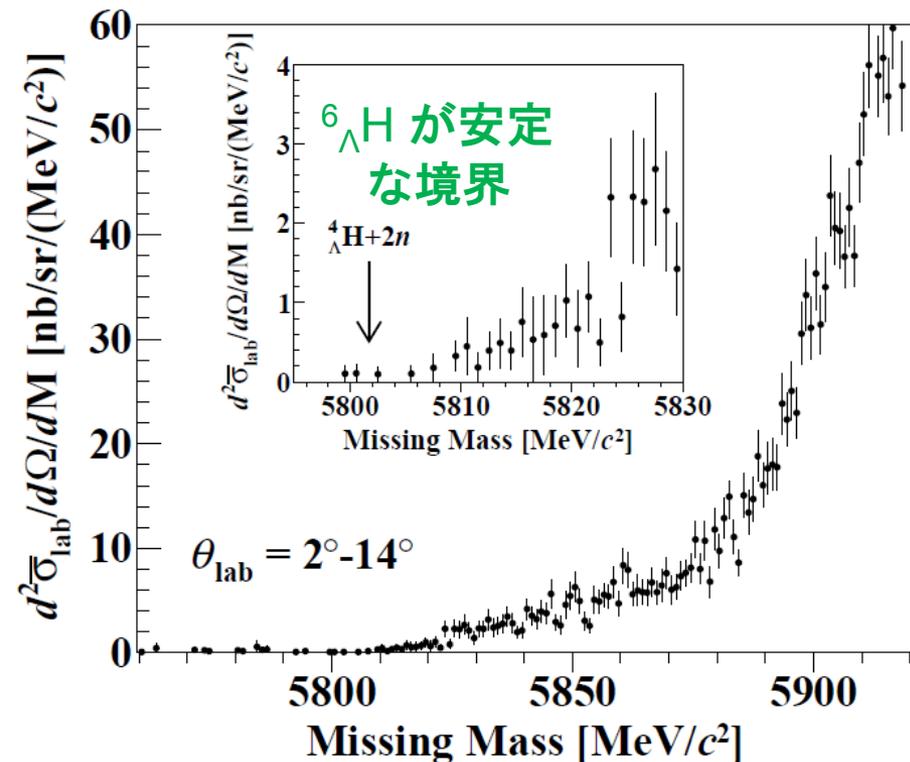
- Missing-mass 分光

- Xの質量を測る

このハイパー核では
三体力の寄与は小さい？

他の研究グループ

${}^6_{\Lambda}\text{H}$ を見つけた
別の方法で ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ を探す



H. Sugimura et al., PLB 729 (2014) 39.

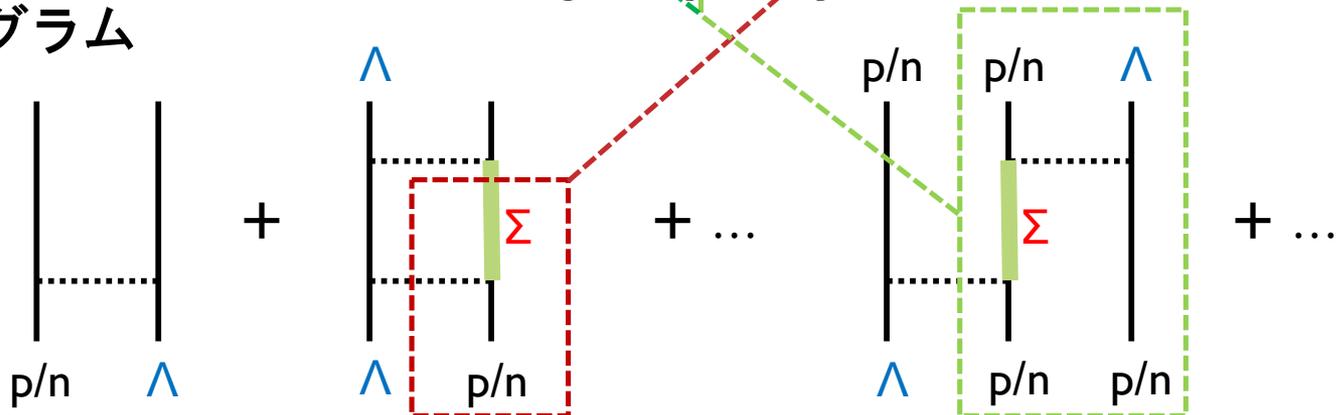
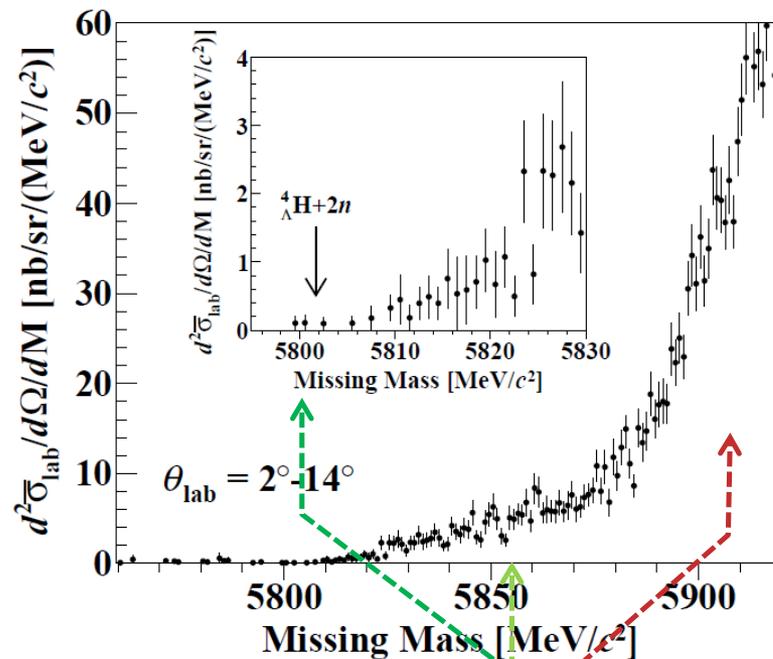
進行中 • ${}^9_{\Lambda}\text{He}$ の探索も必要

Missing-mass 分布の別の見方

2重荷電交換反応の
スペクトラム

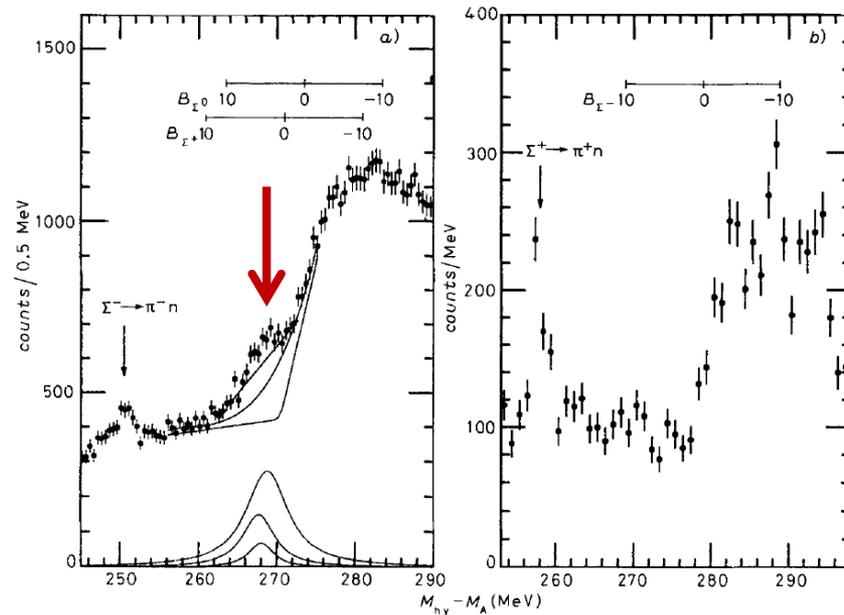
この反応を総合的に
理解したい

三体力のダイアグラム

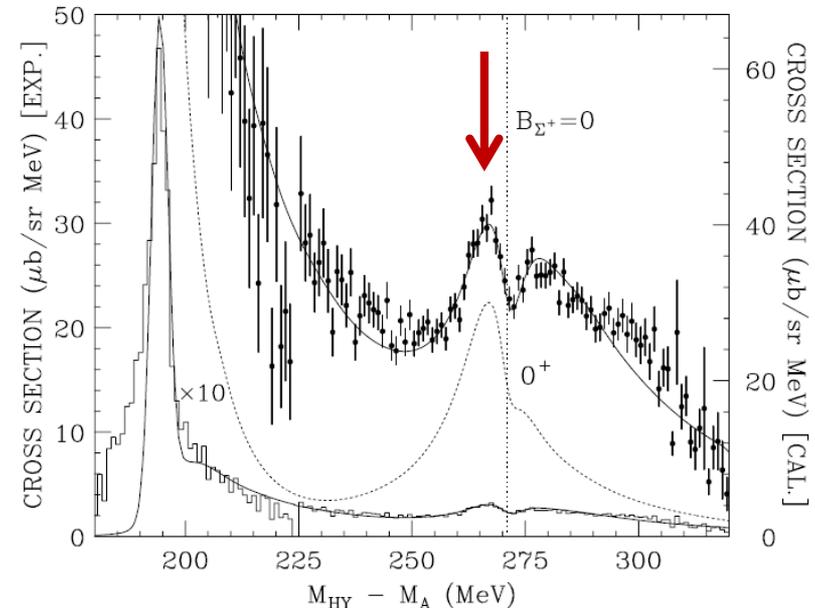


シグマ・ハイパー核

- 現在まで1例 (${}^4_{\Sigma}\text{He}$) のみ発見



R.S. Hayano et al., Nuovo Cim. A102 (1989) 355.

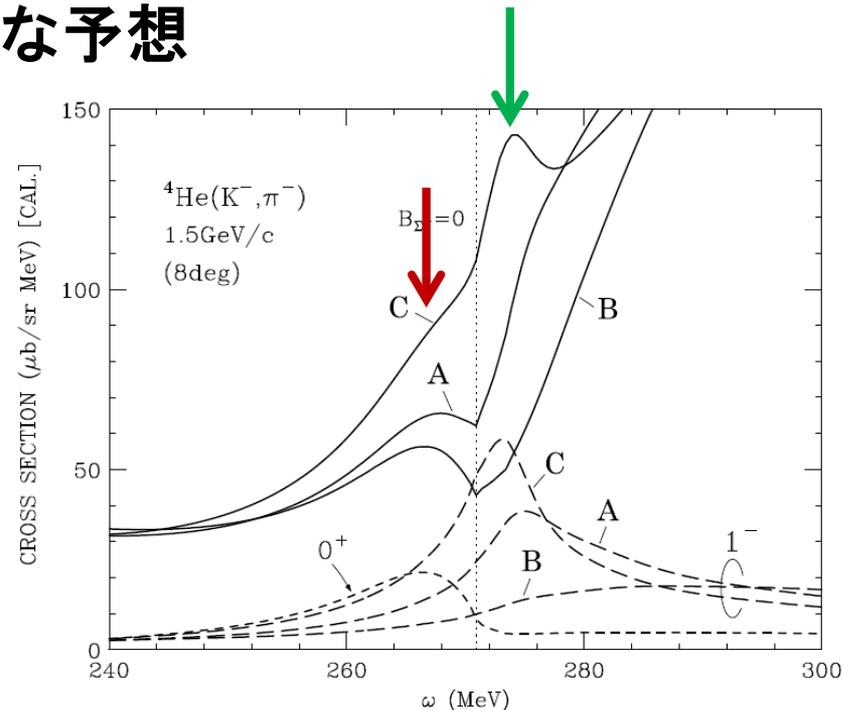


T. Nagae et al., PRL 80 (1998) 1605.
(PRL 81 (1998) 5787.)

- シグマ・ハイペロンと原子核の相互作用は**斥力**
- **引力**成分はあるが**質量数とともに減少**
- シグマの相互作用はこれ以上理解が進まず

${}^4_{\Sigma}\text{He}$ の励起状態の探索

- シグマ・ハイペロンに引力が働く稀な核
 - 基底状態 (s-state) に加え p-state が見えるかも
 - 理論的な予想



T. Harada and Y. Hirabayashi,
PLB 740 (2015) 312.

- 進行中**
- 以前の実験との違いは運動量移行の大きさ
 - 1.5 GeV/c の ${}^4\text{He}(K^-, \pi^-)$ 反応を用いた探索