

原子核理論の現状と展望

KEK 肥山詠美子

1) Introduction

若手を呼んだので、原子核理論全体のレビューを期待しているわけではない。

私が今まで行なって来た研究を例として挙げながら次のことを熱意を込めて語ること

- ・ ストレンジネス核物理が何を目指しているのか
- ・ 何を明らかにするために JHF が必要なのか
- ・ 私が今後 JHF にどういう実験を望むのか

ハイパー核の実験と密接に関した自分の研究

1)~3)の意義と今後JHFで発展させるべきこと

1) ΛN スピン軌道力の大きさ

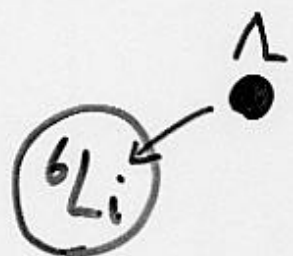
次の3つの実験が
既に委員会に
話題になっている。

${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ と ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$ の励起エネルギーの LS splitting

BNL-E929, E930

2) ハイパー核の $B(E2)$ の測定と

サイズ"の縮みの検証 KEK-E419



$\Rightarrow {}^6\text{Li}$ のサイズ"が"
約2割 shrink

3) ${}^6_{\Lambda}\text{He}$ の発見と $\Lambda\Lambda$ 相互作用 Λ の新しい

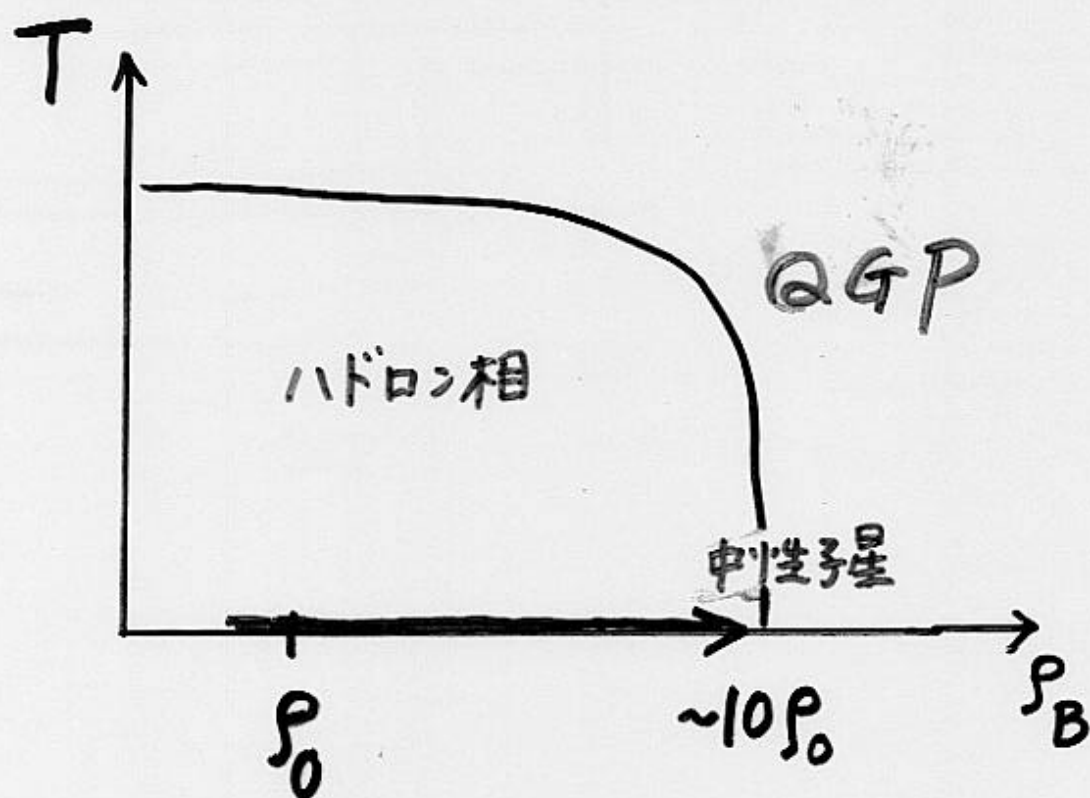
光の投げかけ

KEK-E373

$A=7\sim 10$ のダブル Λ ハイパー核レベルの予言

「温度0における低密度の極限から高密度に至る
核物質の物理」

ハドロン物質相図



→
ストレンジネス物理
が 目指す 方向

高密度になると
ストレンジネスが
重要になる



- 中性子星
- 重イオン衝突

2) 研究法

物理学の様々な分野

量子力学的 3 体系あるいは 4 体系のシュレディンガー方程式を厳密に解き、基底状態や励起状態の精密なエネルギーと波動関数を得ることに帰着する問題が多い

私の基本的な研究目的の一つ

少数粒子系、特に量子力学的 3 体問題、4 体問題の普遍的な計算法、他の分野にも輸出できる計算法を確立すること

粒子の組み合わせや相互作用の種類を
限定しない普遍的な3体・4体問題の解
法を確立すること

3体問題・・・1980年代後半にようや
く確立

4体問題・・・限定された相互作用を使
用した4体計算がよう
やく限られたグループ
によって2001年可能

利か
とい
は

九大流組替えチャネル結合法
無限小変位ガウス・ローブ法

||
3 体系・4 体系の問題を容易に厳密
に解く理論

Particle Data (1998)

8

Review of Particle Physics: C. Caso et al. (Particle Data Group), European Physical Journal C3, 1 (1998)



$$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+) \text{ Status: } ****$$

陽子

p MASS

The mass is known much more precisely in u (atomic mass units) than in MeV; see the footnote. The conversion from u to MeV, $1 u = 931.49432 \pm 0.00028$ MeV, involves the relatively poorly known electronic charge.

VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
<u>938.27231 ± 0.00028</u>	¹ COHEN	87	RVUE 1986 CODATA value
... We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ...			
938.2796 ± 0.0027	COHEN	73	RVUE 1973 CODATA value
¹ The mass is known much more precisely in u : $m = 1.007276470 \pm 0.000000012 u$.			

$\bar{p}$ MASS

See, however, the next entry in the Listings, which establishes the $\bar{p}$ mass much more precisely.

VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
... We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ...			
938.30 ± 0.13	ROBERTS	78	CNTR
938.229 ± 0.049	ROBERSON	77	CNTR
938.179 ± 0.058	HU	75	CNTR Exotic atoms
938.3 ± 0.5	BAMBERGER	70	CNTR

$\bar{p}/p$ CHARGE-TO-MASS RATIO, $| \frac{q_{\bar{p}}}{m_{\bar{p}}} | / (\frac{q_p}{m_p})$

A test of CPT invariance. Listed here are measurements involving the inertial masses. For a discussion of what may be inferred about the ratio of $\bar{p}$ and p gravitational masses, see ERICSON 90; they obtain an upper bound of 10^{-6} – 10^{-7} for violation of the equivalence principle for $\bar{p}$'s.

VALUE	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
<u>1.0000000015 ± 0.0000000011</u>	² GABRIELSE	95	TRAP Penning trap
... We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ...			
1.0000000023 ± 0.0000000042	³ GABRIELSE	90	TRAP Penning trap

² Equation (2) of GABRIELSE 95 should read $M(\bar{p})/M(p) = 0.9999999985$ (11) (G. Gabrielse, private communication).

³ GABRIELSE 90 also measures $m_{\bar{p}}/m_{e^-} = 1836.152660 \pm 0.000083$ and $m_p/m_{e^-} = 1836.152680 \pm 0.000088$. Both are completely consistent with the 1986 CODATA (COHEN 87) value for m_p/m_{e^-} of 1836.152701 ± 0.000037 . We use the CODATA values of the masses (they come from an overall fit to a variety of data on the fundamental constants) and don't try to take into account more recent measurements involving the masses.

反陽子
mass
なし
参考データ
ナシ目バラバラ

Particle Data (2000)

9

Citation: D.E. Groom et al. (Particle Data Group), Eur. Phys. Jour. C15, 1 (2000) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

p

$I(J^P) = \frac{1}{2}(\frac{1}{2}^+)$ Status: ****

陽子

p MASS

The mass is known much more precisely in u (atomic mass units) than in MeV; see the footnote. The conversion from u to MeV, $1\text{ u} = 931.494013 \pm 0.000037\text{ MeV}/c^2$ (MOHR 99, the 1998 CODATA value), involves the relatively poorly known electronic charge.

VALUE (MeV)	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
938.27200 ± 0.00004	OUR AVERAGE		
938.271998 ± 0.000038	¹ MOHR	99	RVUE 1998 CODATA value
... We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. ...			
938.27231 ± 0.00028	² COHEN	87	RVUE 1986 CODATA value
938.2796 ± 0.0027	COHEN	73	RVUE 1973 CODATA value

¹ The mass is known much more precisely in u: $m = 1.00727646688 \pm 0.00000000013\text{ u}$.

² The mass is known much more precisely in u: $m = 1.007276470 \pm 0.000000012\text{ u}$.

反陽子

$|m_p - m_{\bar{p}}|$

m_p

$|m_p - m_{\bar{p}}|/m_p$

CPT 不変性のテスト

A test of CPT invariance. Note that the $\bar{p}/p$ charge-to-mass ratio, given below, is much better determined.

VALUE	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
$< 5 \times 10^{-7}$	³ TORII	99	SPEC $\bar{p}e^- \text{He atom}$

³ TORII 99 uses the more-precisely-known constraint on the $\bar{p}$ charge-to-mass ratio of GABRIELSE 95 (see below) to get this result. This is not independent of the TORII 99 value for $|q_p + q_{\bar{p}}|/e$, below.

$< 5 \times 10^{-7}$

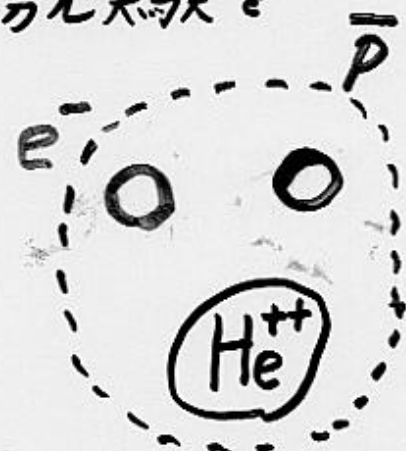
反陽子ヘリウム原子
の測定による

日本の ASACUSA グループ が CERN で行った
反陽子ヘリウム原子の超精密レーザー分光実験を

東北大学 量子化学

木野 康志氏 (九大卒) が

我々の精密3体理論を
使って解析し決定



反陽子ヘリウム
原子 (3体系)

ストレンジネス核物理が目指す物理の
足場を固めるための目的

- (1) 核子+ハイペロンの多体系の特徴
を理解しなければいけない
- (2) YN 相互作用、YY 相互作用を理解
すること
- (3) 中性子星の内部の研究や、重イオン研究
に(1),(2)で得られた情報を渡すこと

JHF=ストレンジネス核物理が目指す物
理を理解するために材料を提供
する重要な Facility

私の研究担当:(1),(2),(3)の重要課題に対
して精密少数粒子系理
論という武器を持って
切り込んでいく

3. 相互作用の決め方

ストレンジネス核物理の大きな
研究目的の1つ

バリオン間相互作用を統一的に理
解すること

一般に相互作用を決める

||

常識的：素過程の散乱実験を詳細に行う

しかし、不可能な場合、しかも理論側のモデルが提案する相互作用がまだ不定性の大きい不十分なものであるとき、一体どうやって相互作用を決めていったらよいのか？

「ハイパー核の bound state の研究
からバリオン間相互作用を決めて行く」

多体系→素過程：非常識な考え

現在の常識

「ハイパー核の構造からバリオン間
相互作用を決めていこう」

理論・実験とタイアップした相互作用の 決め方

- i) meson exchange
constituent quark model
- ii) 相互作用の特徴を捉えようとする
ハイパー核のスペクトロスコピー
の実験

Tamura et al.

Ge 検出器を用いた γ 線分光技術の急速な
発展



ハイパー核の励起準位からの γ 線を数
keV の精度で測定

- iii) 実験結果と YN, YY 相互作用を結び
つけるための精密理論計算

4. ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$, ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$ とスピン軌道力

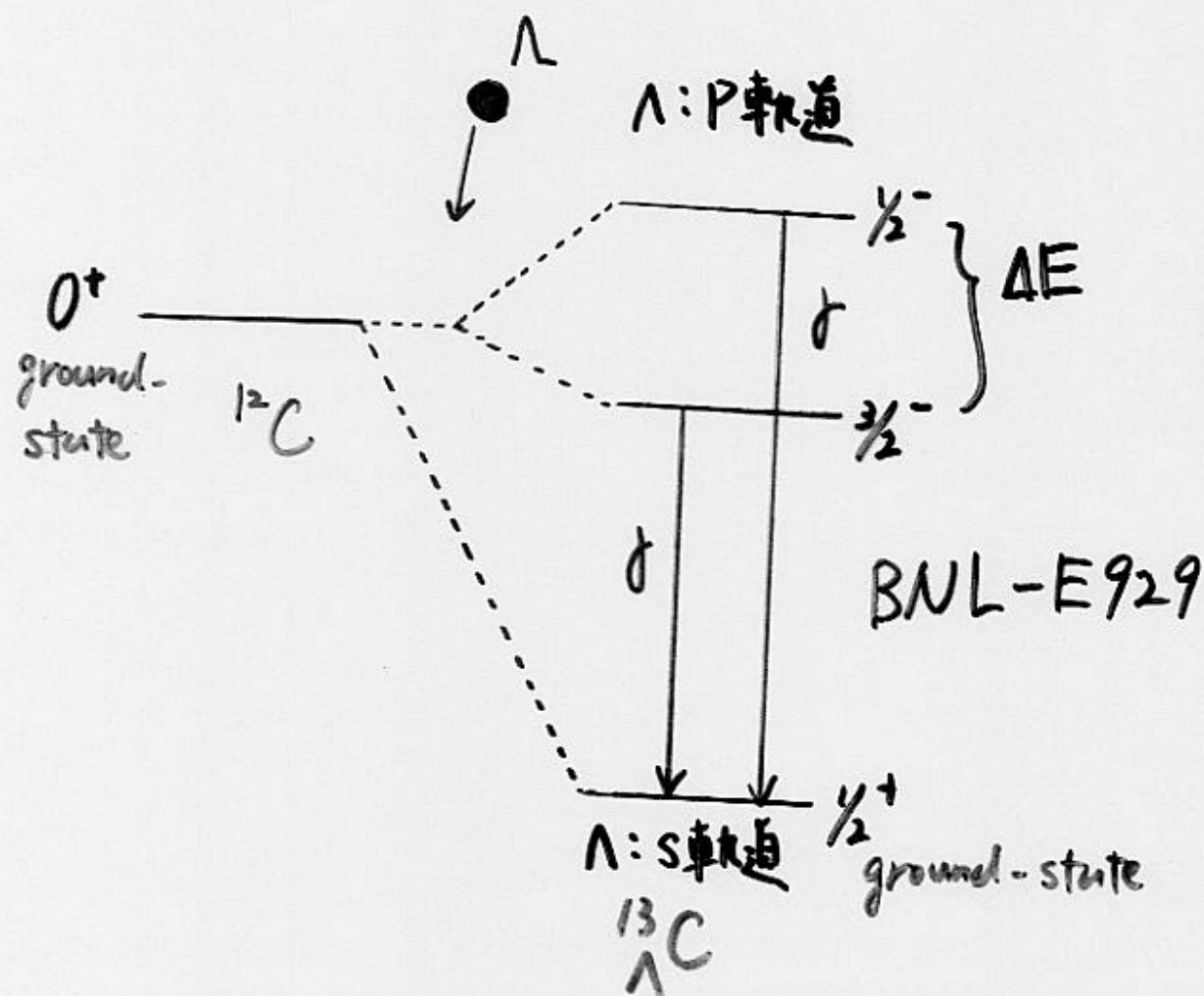
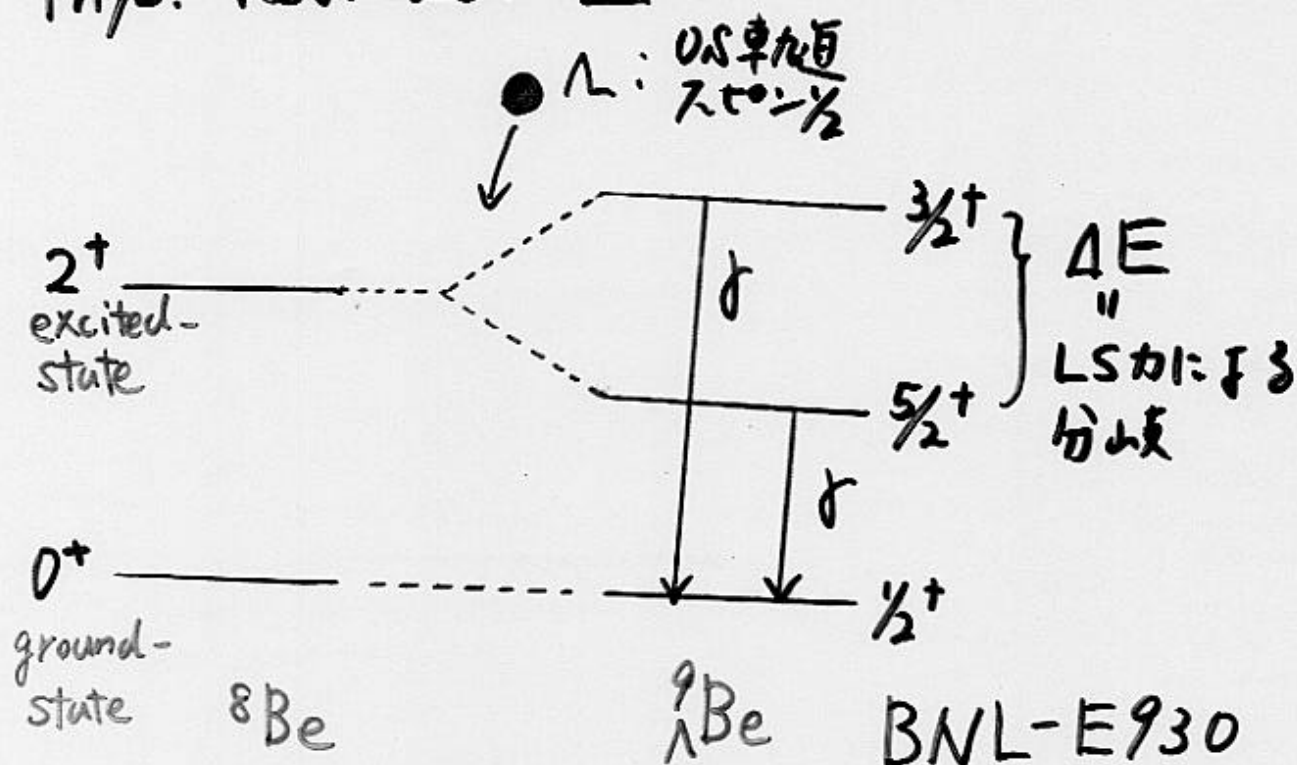
通常原子核の世界を大きな特徴の一つ
強いスピン軌道力 LS 力があり、
魔法数の基礎になっている

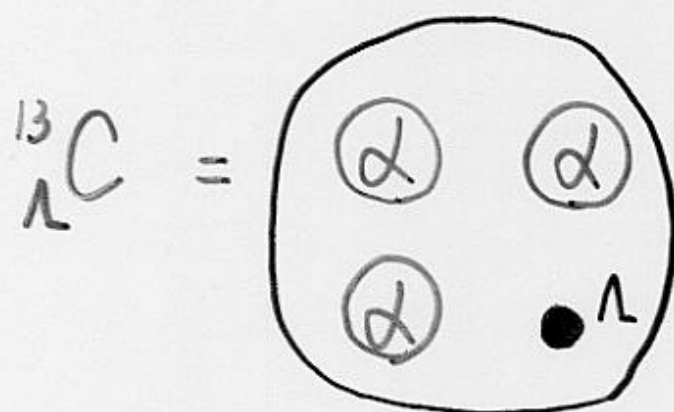
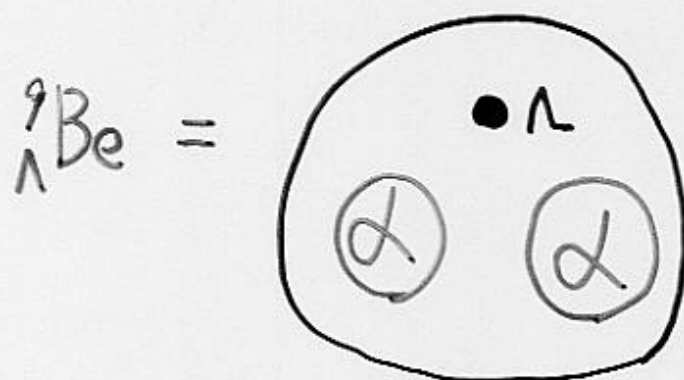
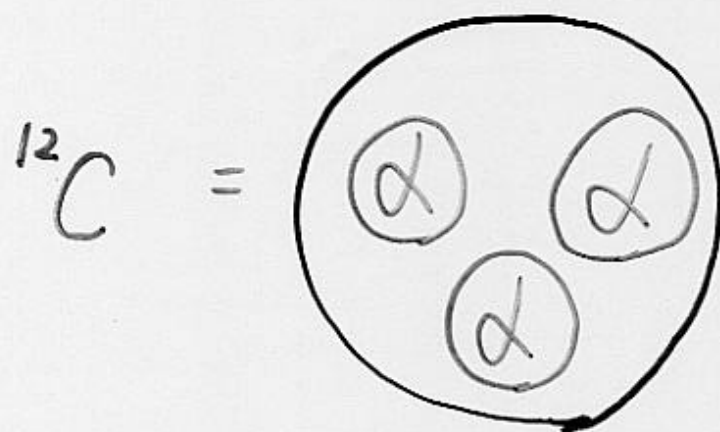
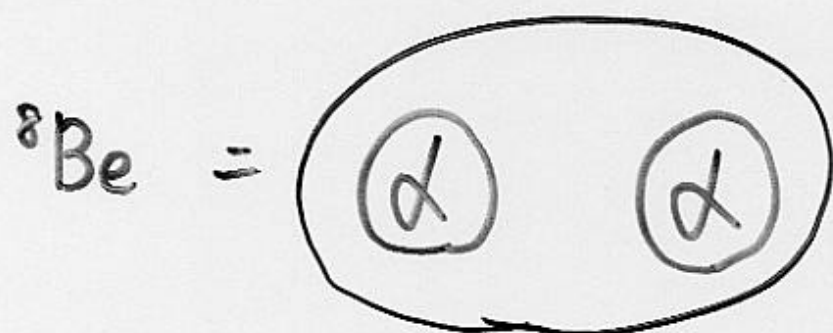
ハイペロンー核子間のスピン軌道力の
大きさは？

ハイペロンー核子間の偏極散乱データがない
ので、スピン軌道力の大きさは実験的に全く分かっていない。

E. Hiyama et al.

Phys. Rev. Lett. 85, 270 (2000)





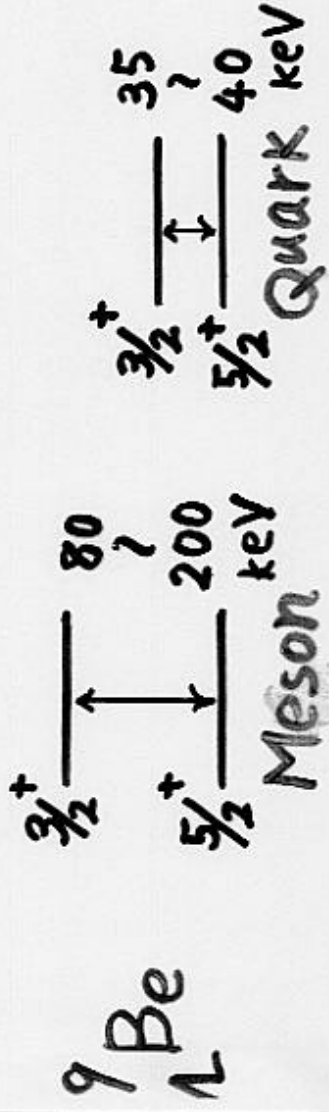
YN interaction

- meson exchange model
- constituent quark model

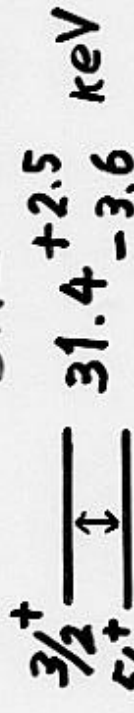
ΛN スピン軌道力 と ハイパ-核 エネルギーレベル

CAL: E. Hiyama et al.

Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 270



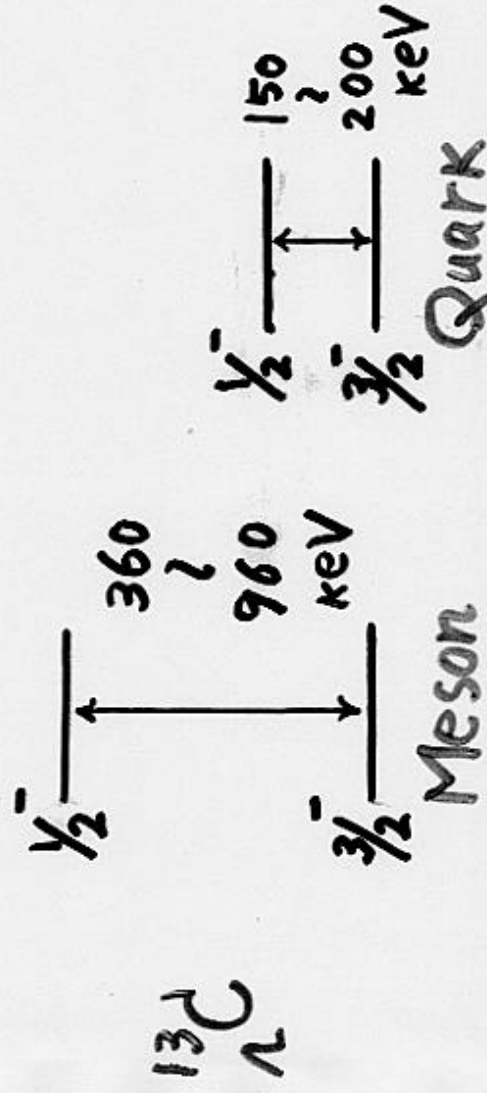
BNL-E930



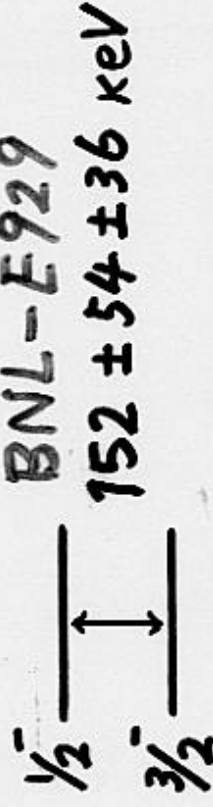
H. Aikawa et al.

Phys. Rev. Lett.

88 (2002) 82501



BNL-E929



S. Ajimura et al.

Phys. Rev. Lett.

86 (2001) 4255

i) ΛN OLSF は NN の $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{30}$ (quark)

ii) Quark model < Meson-exch model

理由

$$NN \text{ の } LS \text{ 力} = U \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) v_+(r)$$

Symmetric LS $\updownarrow$

$$YN \text{ の } LS \text{ 力} = U \cdot (\sigma_1 + \sigma_2) v_+(r) \\ + U \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) v_-(r)$$

Anti-symmetric LS $\updownarrow$

- Constituent quark model では

$$S-LS + A-LS \approx 0 \quad \text{ほぼ"キャンセル"}$$

- meson exchange model では

$$S-LS + A-LS \approx S-LS$$

≈ 0

この差が決め手

この実験と理論から定量的に分ったこと

• NN の LS 力は 非常に小さい

の ようになるためには $S-LS$ をキャンセル
するくらい大きな $A-LS$ が必要

新しい疑問

- ・ Σ - N スピン軌道力の大きさ？

ΣN 散乱実験



JHF $\wedge$

- ・ $\wedge\wedge$ スピン軌道力の大きさ？



ダブルラムダハイパー核のスピン軌道力



JHF

ハミルトニアンが決まってくる



- 陽子、中性子と第 3 の粒子・ハイペロンで構成される多体系の新しい特徴を正確に捉えることができる
- 通常原子核世界では考えられなかった新しい現象を予言し、発見し、説明することができる。

ストレンジネス核物理が目指す物理の足場を固めるための目的

(1) 核子+ハイペロンの多体系の特徴を理解しなければならない

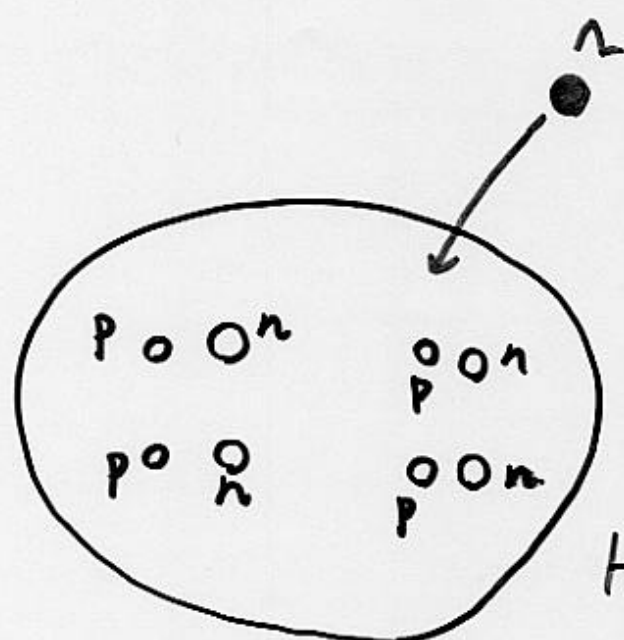
(2) YN 相互作用、YY 相互作用を理解すること

(3) 中性子星の内部の研究や、重イオン研究に(1),(2)で得られた情報を渡すこと

5. Λ 粒子を入れると原子核は縮む?

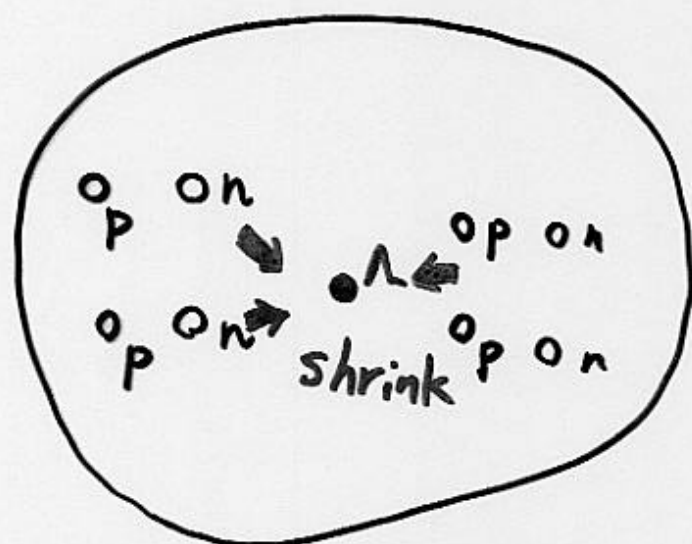
通常原子核の常識: 原子核は丸い

かたい
圧縮にたい



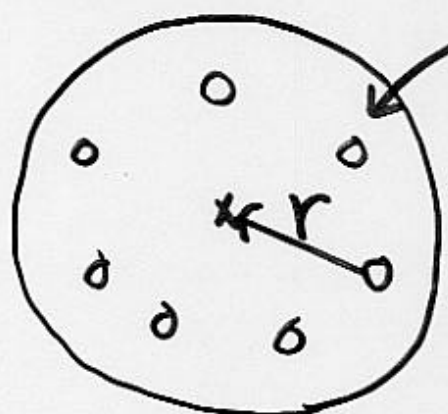
How is structure?

原子核



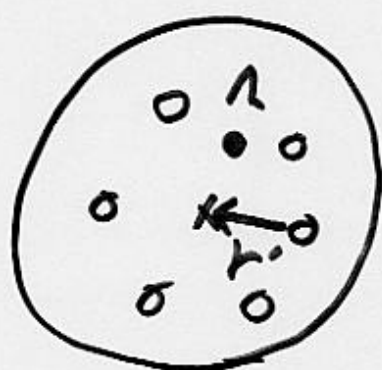
従来の原子核の常識を超えた現象
どうやって検証?

原子核



Λ

ハイパー核



$\Rightarrow$

$$r > r'$$

電気4重極遷移確率: $B(E2)$

$$B(E2) \propto |\langle \Psi_i | r^2 Y_{2\mu}(\hat{r}) | \Psi_f \rangle|^2$$

サイズが4乗に比例

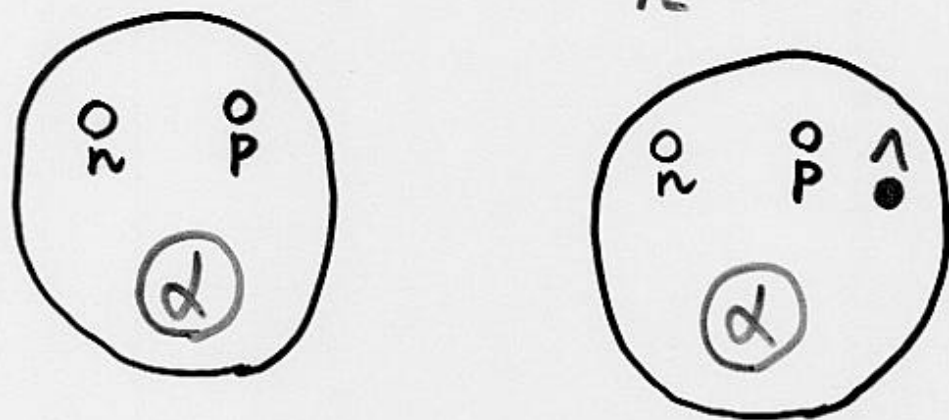
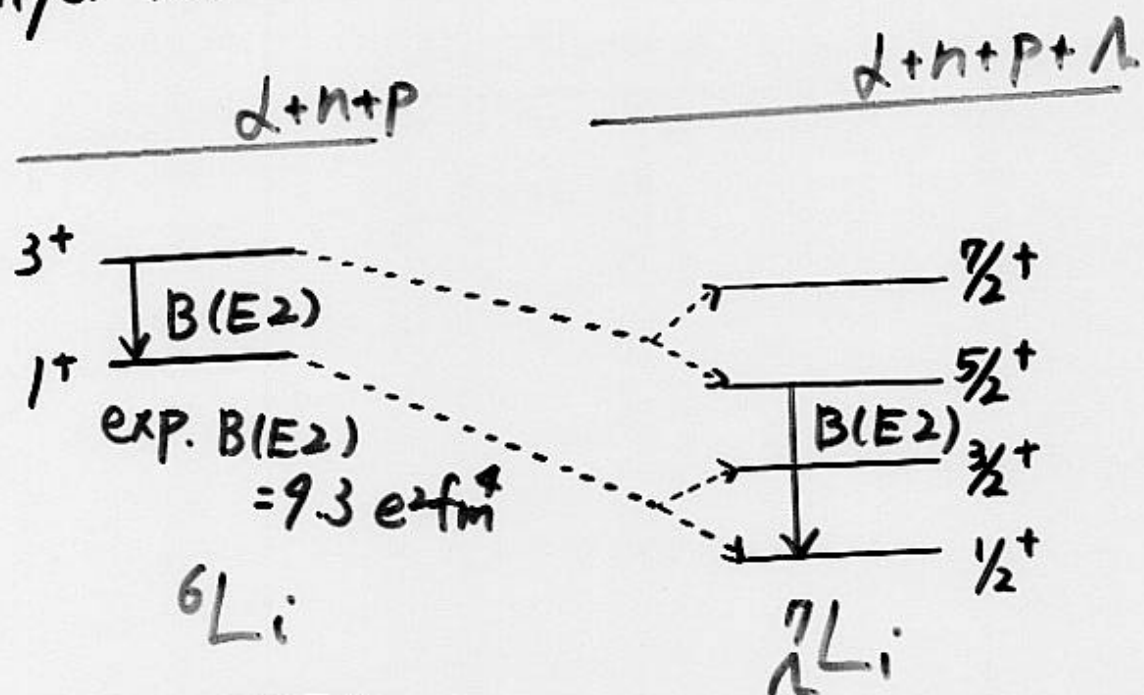
10数年前

Bando, Ikeda, Motoba and Yamada

核のサイズが縮まれば半径の4乗に
比例する $B(E2)$ に現われる

どのハイパー核の実験をすれば: 縮む
効果を検証できるのか

E. Hiyama, M. Kamimura, K. Miyazaki, and
T. Motoba
Phys. Rev. C 59 (1999), 2351



$$B(E2) \approx |\langle \Psi_i | r^2 Y_{2\mu}(\hat{r}) | \Psi_f \rangle|^2$$

$\Downarrow$

$$\frac{r_{\Lambda}^2({}^7\text{Li})}{r_{\alpha}^2({}^6\text{Li})} \approx \left[\frac{B(E2: {}^7\text{Li})}{B(E2: {}^6\text{Li})} \right]^{1/4}$$

$\nwarrow \text{known}$

E. Hiyama et al.

Phys. Rev. C 59 (1999), 2351



λ が ^6Li 原子核に入ると、
原子核が 22% 縮むと
予想。

KEK-E419 Tamura et al.

K. Tanida et al.

Phys. Rev. Lett. 86, 1982 (2001)

原子核が 19% 縮む。

ハイパー核における初めての $B(E2)$ の測定
初めてのサイズ²の測定

今後のハイパー核分野研究を大いに発展させる
画期的な実験

新しい疑問

あらゆる原子核に Λ を入れると
すべての原子核が縮むのか？

E. Hiyama et al. prog. Theor. Phys. 97
(1997)

答え： NO と予言

縮む、縮まないの
規則性

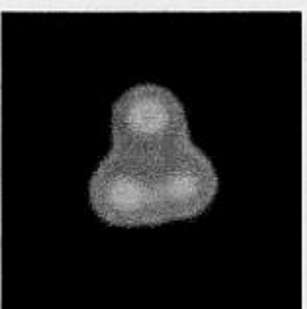
- (1) 質量数 $A=11$ 以上の安定原子核の基底状態に Λ 粒子を入れても原子核はほとんど縮まない
- (2) ある種の励起状態に Λ 粒子を入れ³⁶
原子核は最大で 30% 縮むことを予言

原因：原子核の状態によって、核子の密度分布が異なる

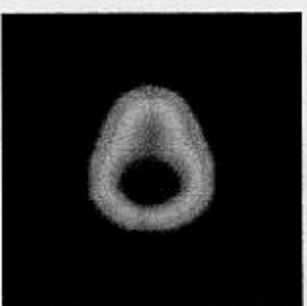
核内での核子の密度分布

不安定核の世界：中性子過剰原子核の基
底状態の核子の密度
分布の形は驚くほど
様々

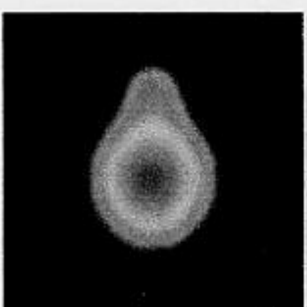
Bアインシュタインの構造変化 (AMD計算)



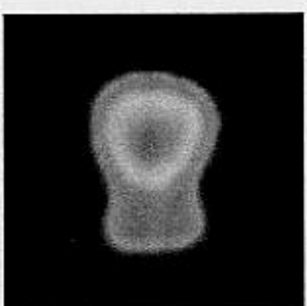
中性子6個の
ホウ素原子核



中性子8個



中性子10個



中性子12個

中性子数
の増加

Calculated by

Enyo-Kanada

JHF の加速器 + Ge 検出器

核子とハイペロンで構成されるハイパー核の今までの常識を越えた新しい現象を発見するため

例) サイズが縮む効果の規則性を確める
奇妙な形をしたハイパー核が現れる
かも...

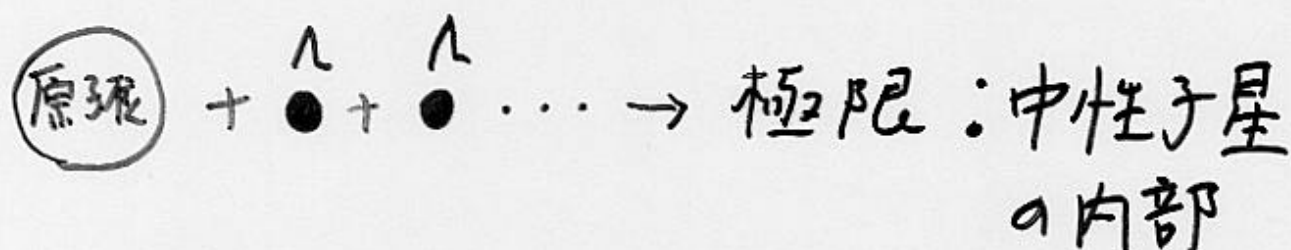
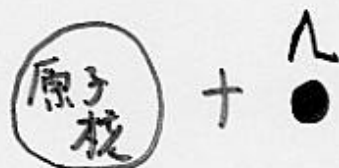
$A \geq 11$ の原子核に Λ を入れたハイパー核
中性子過剰核に Λ を入れたハイパー核の

例: B アイソトープ + Λ

のエネルギーレベルの $B(E2)$ の大きさを可能な限り測定して欲しい。

6. マルチの世界

これまでの話



の内部



この理解のためには、
出発点となる $\Lambda\Lambda$ 相互
作用、 YY 相互作用がい
必要

ストレンジネス核物理が目指す物理の
足場を固めるための目的

(1) 核子+ハイペロンの多体系の特徴
を理解しなければならない

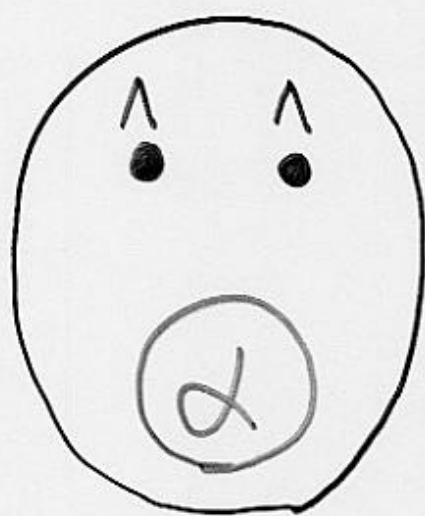
(2) YN 相互作用、 YY 相互作用を理解
すること

(3) 中性子星の内部の研究や、重イオン研究
に(1),(2)で得られた情報を渡すこと

7. ダブルラムダハイパー核

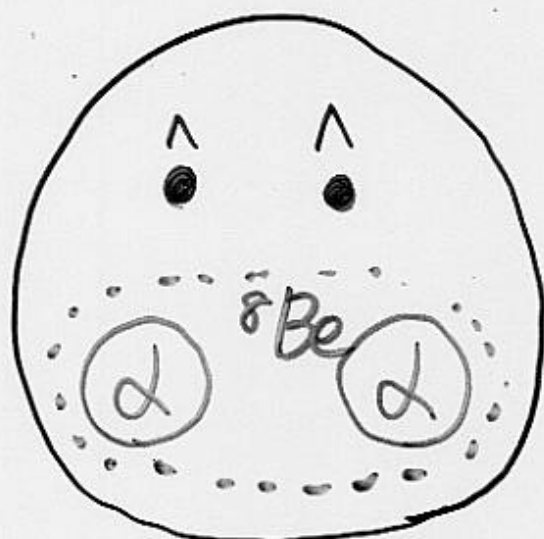
KEK-E373 $\rightarrow$ YY 相互作用に光を当てる画期的な結果

${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ の基底状態の発見
ナガライベント



${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$

2- Λ separation energy = 7.25 ± 0.1 MeV



$^{10}_{\Lambda\Lambda}\text{Be}$ の発見

デマチヤナギイベント

$2 - \Lambda$ separation energy = 12.33 MeV

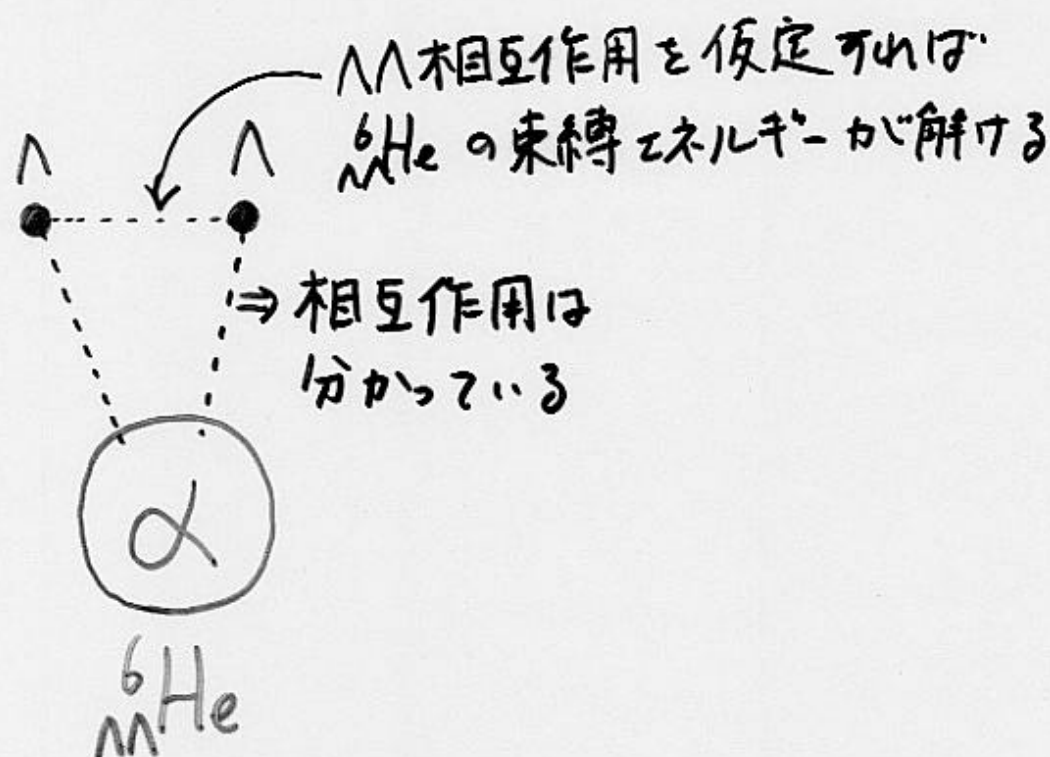
基底状態なのか、励起状態なのか分からない

今問題となっていること

(1) ナガライベント (${}^6_{\Lambda}\text{He}$) から $\Lambda\Lambda$ 相互作用はどのくらいの強さであるか？

(2) ナガライベントから得られた $\Lambda\Lambda$ 相互作用でデマチャナギイベント (${}^{10}_{\Lambda}\text{Be}$) を consistent に理解できるか？
実験が決定できなかった部分を理論が助けることができるか？

ナガライベントから $\Lambda\Lambda$ 相互作用はどのくらい強いのか？

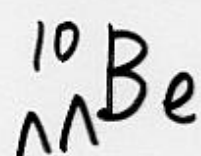
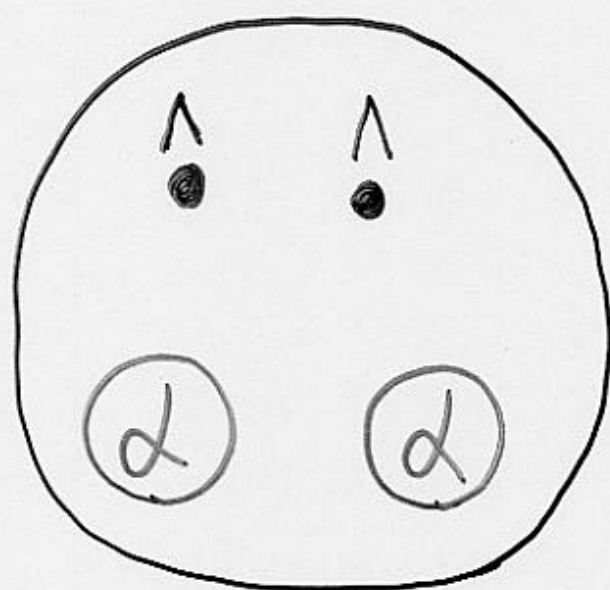


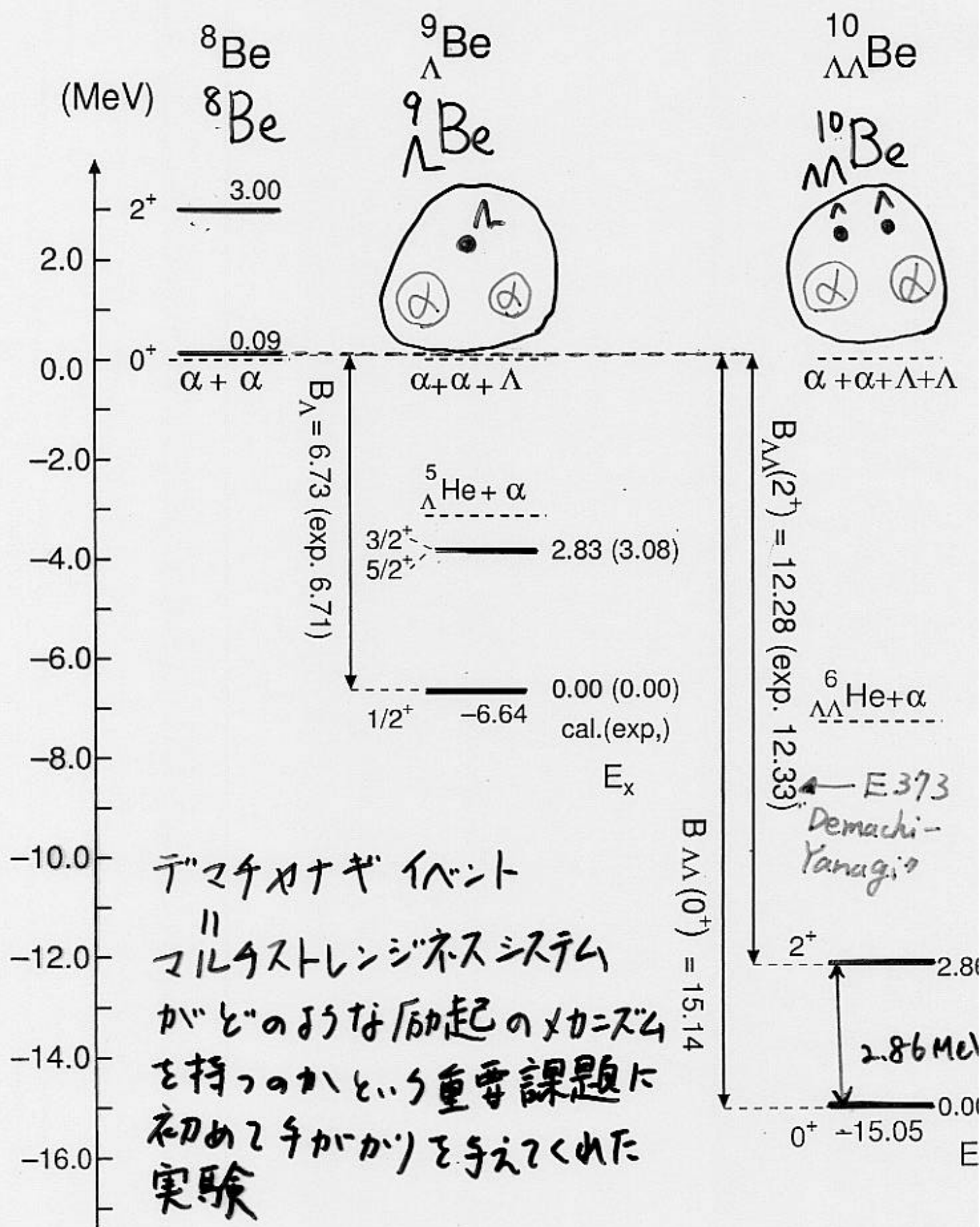
$$2-\Lambda \text{ separation energy} = 7.25 \pm 0.1 \text{ MeV}$$

$\Lambda\Lambda$ 相互作用は引力

$\Lambda\Lambda$ 間の bond energy $\approx 1 \text{ MeV}$

ナガライベントから得られた $\Lambda\Lambda$ 相互作用でデマチャナギイベントを consistent に理解できるか？





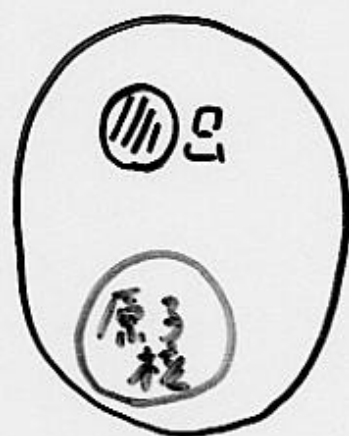
ΞN 相互作用は? } $\Rightarrow$ JHF で
 $\Sigma\Sigma$ 相互作用は? } $\gamma\gamma$ 散乱実験



かなり困難



ダブル
 ハイパー核

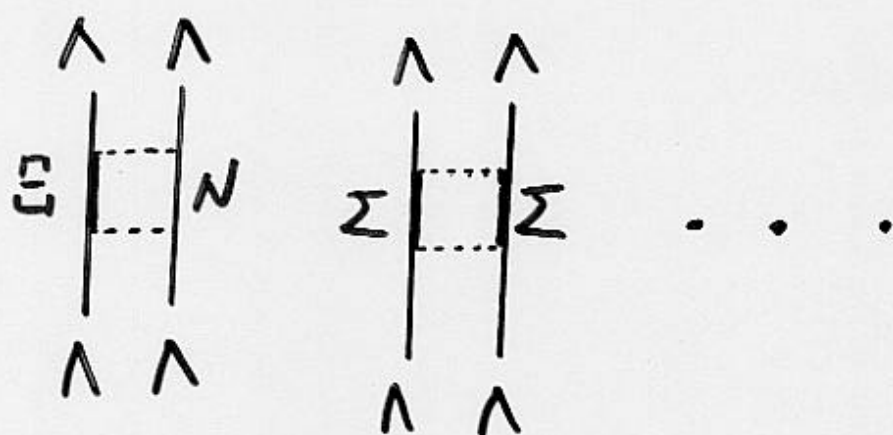


ハイパー核

JHF で

$S = -2$ のハイパー核をどんどん作って、
 そのスペクトロスコピーを行うことが
 必要

8. $\Lambda\Lambda - \Xi N - \Sigma\Sigma$ 結合



通常原子核 $NN \rightarrow N\Delta$

$$M(\Delta) - M(N) = 250 \text{ MeV}$$

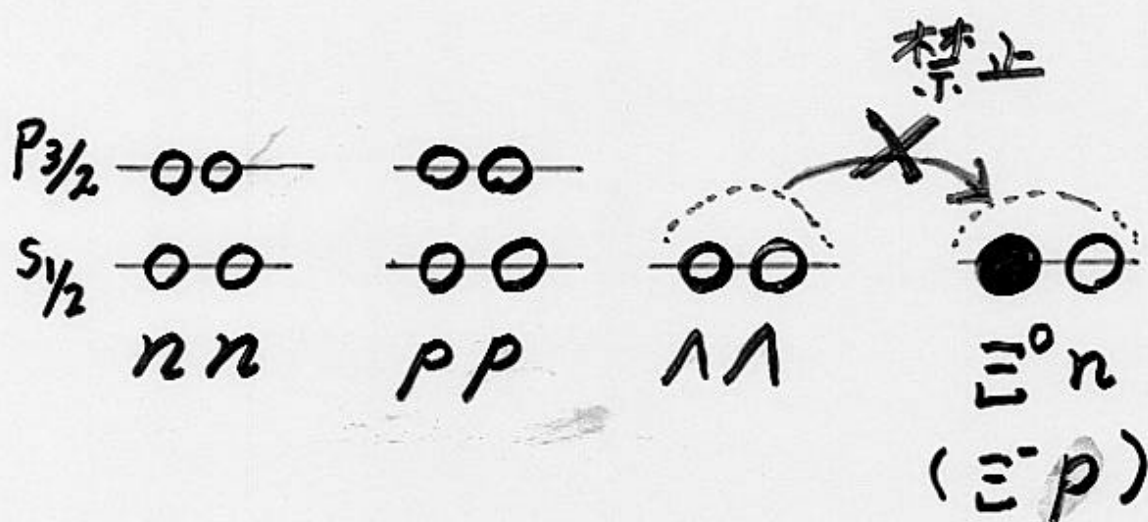
$\Lambda\Lambda$ と ΞN の質量差 = 30 MeV 弱

↓

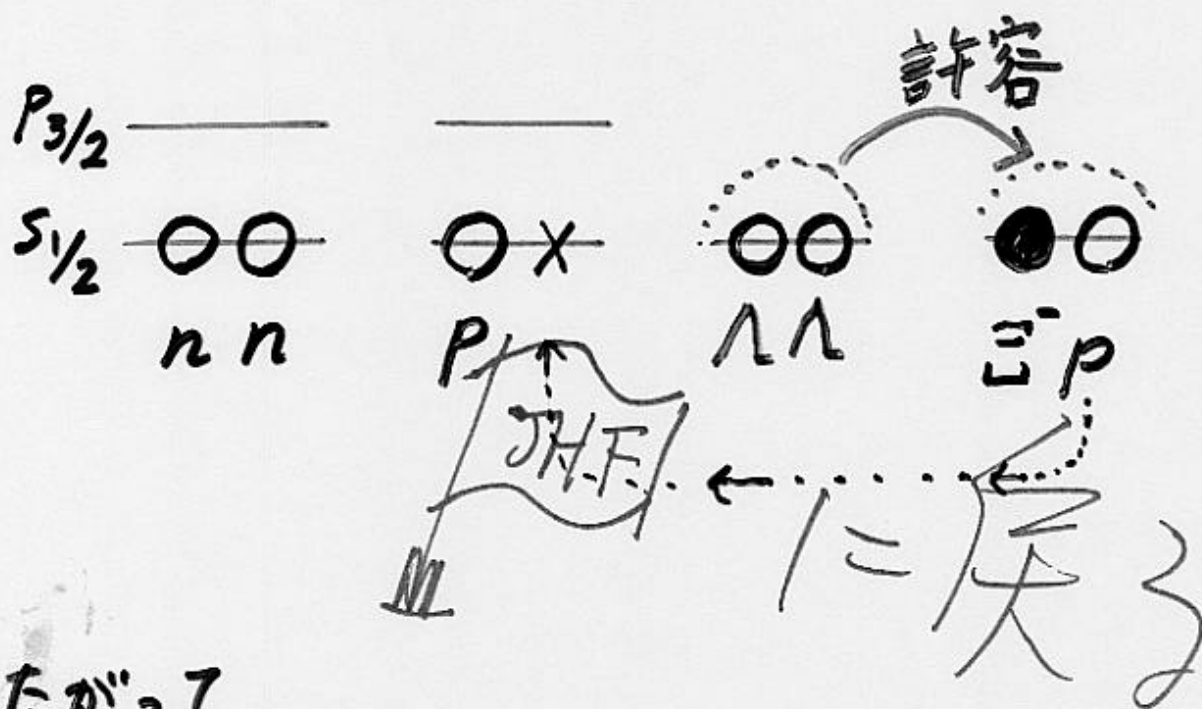
$\Lambda \rightarrow \Xi N$ に変換可
確率はかなりありそう

$\Lambda\Lambda - \Xi N$ 粒子変換相互作用が
効かない例, 効く例

効かないはず: $A \geq 6$ のダブル Λ ハイパー核

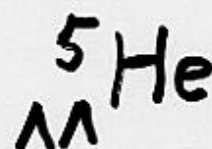
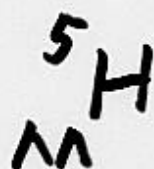
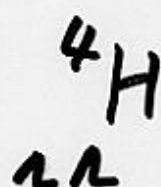
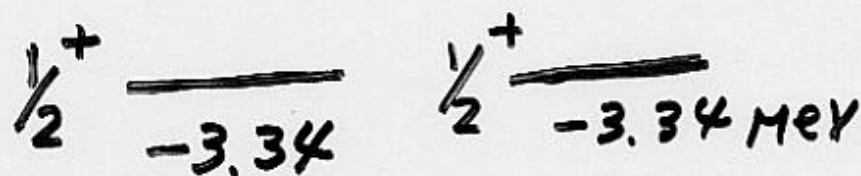
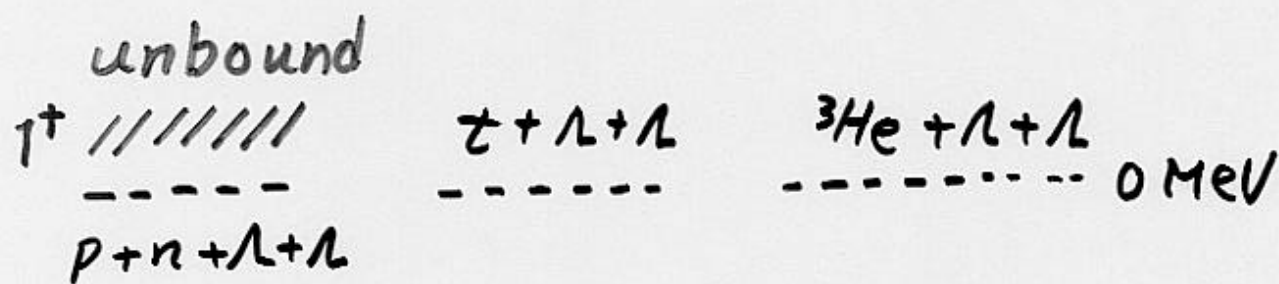


効くはず: $A \leq 5$ のダブル Λ ハイパー核



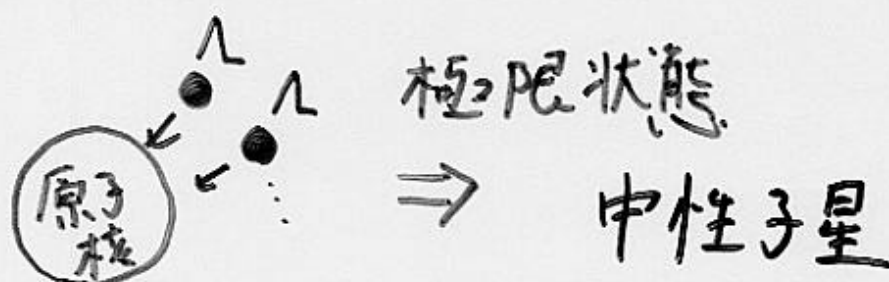
したがって,

$A \leq 5$ のダブル Λ ハイパー核では
 $\Lambda\Lambda$ - ΣN 相互作用が効いてくるはず"なので
 (それを入っていない) 私の予言計算は
 実馬券とある程度ずれるはず。



JHF がそれを暴いてくれるのを待っている。
 その「ずれ」が分ったら、 $\Lambda\Lambda$ - ΣN 相互作用が
 どういう大きさであるべきか、
 理論的に明らかにします。

中性子星の問題



中心部：重力による運動エネルギー



質量エネルギー

中性子を Λ 粒子に変えて、より安定な状態に移る
ナガライベントの解析で作った $\Lambda\Lambda$ 相互作用



中性子星の研究へ

ストレンジネス核物理が目指す物理の
足場を固めるための目的

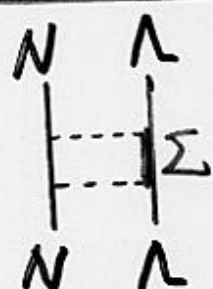
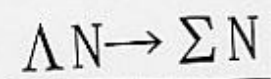
- (1) 核子+ハイペロンの多体系の特徴を理解しなければいけない
- (2) YN 相互作用、 YY 相互作用を理解すること

(3) 中性子星の内部の研究や、重イオン研究に(1),(2)で得られた情報を渡すこと

$\Lambda\Lambda$ - EN -22

8. $\Lambda N - \Sigma N$ 結合

$\Lambda \Lambda \rightarrow \Xi N \rightarrow \Sigma \Sigma$ に変換する相互作用 + ハイパー核の研究は、まだわずかしかなされていない。



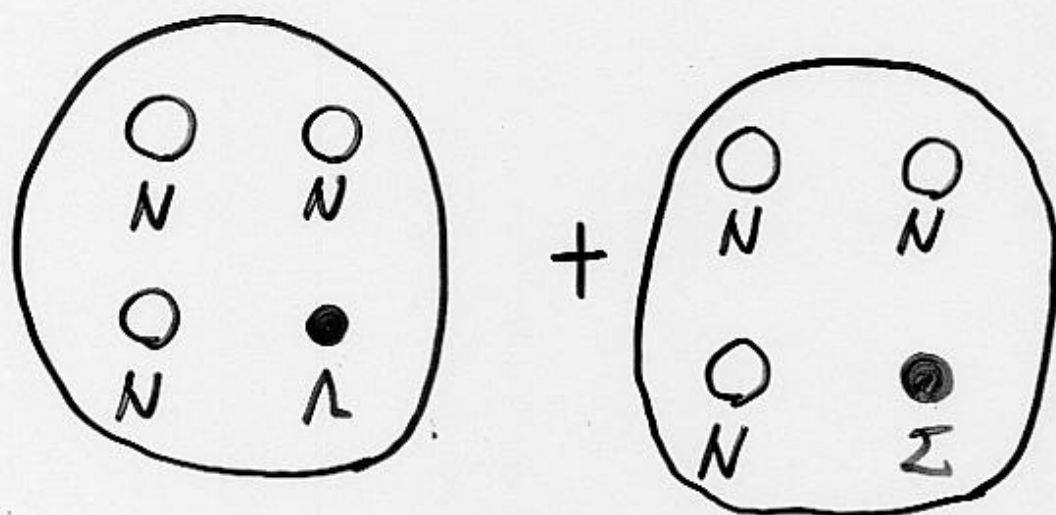
シグマ・ラムダ
ハイパー核の構造
の研究

話題となっていること

- ハイパー核の中での Λ 粒子がどのくらいの確率で Σ 粒子に変わっているのか？
- Σ 粒子は重要な役割を果たしているのか？
- 実験と理論計算の比較によって $\Lambda N - \Sigma N$ 結合相互作用の不定性をなくすこと

最近私が行なった研究とその研究を JHF において如何に深めて行くべきか

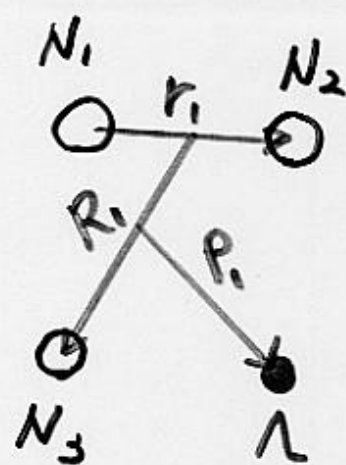
${}^4_{\Lambda}\text{H}$, ${}^4_{\Lambda}\text{He}$: 核内における $\Lambda \rightarrow \Sigma$ 粒子変換
 Λ カ = Σ の研究に適した系



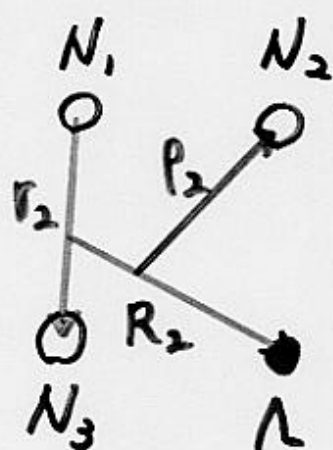
$(3N + \Lambda)$ + $(3N + \Sigma)$

Configuration

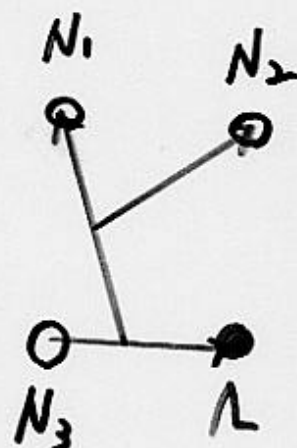
チャンネル



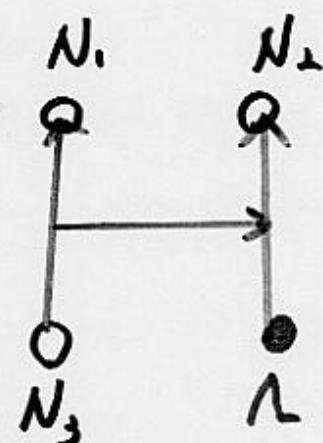
$C=1$



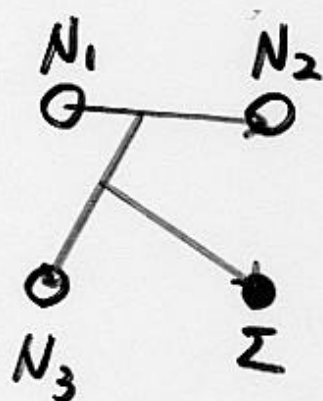
$C=2$



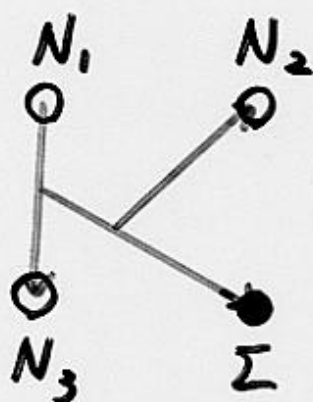
$C=3$



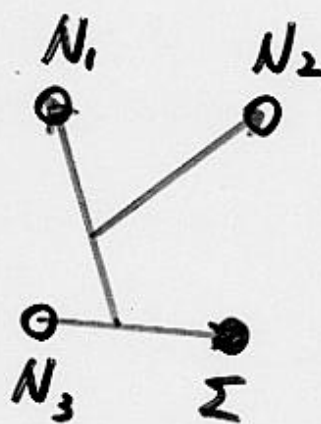
$C=4$



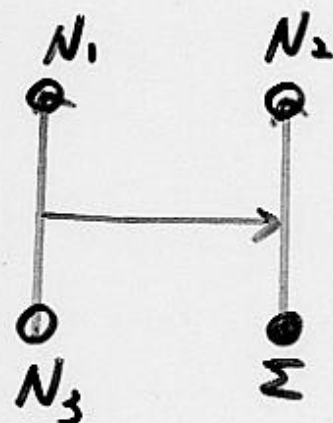
$C=5$



$C=6$



$C=7$

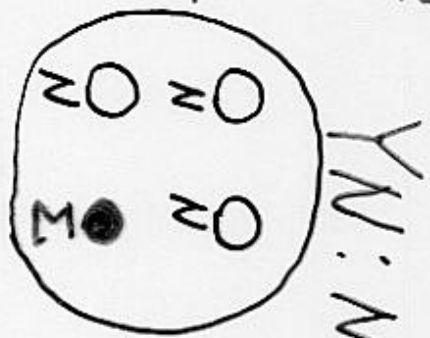
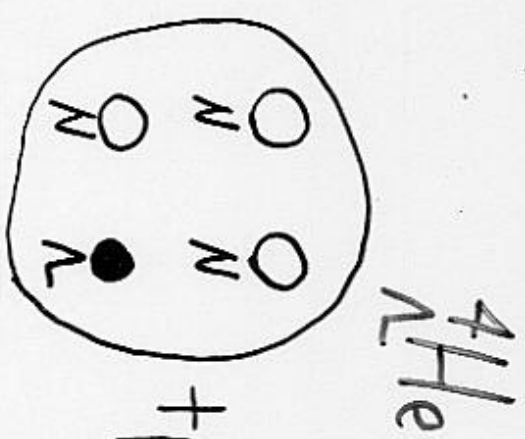
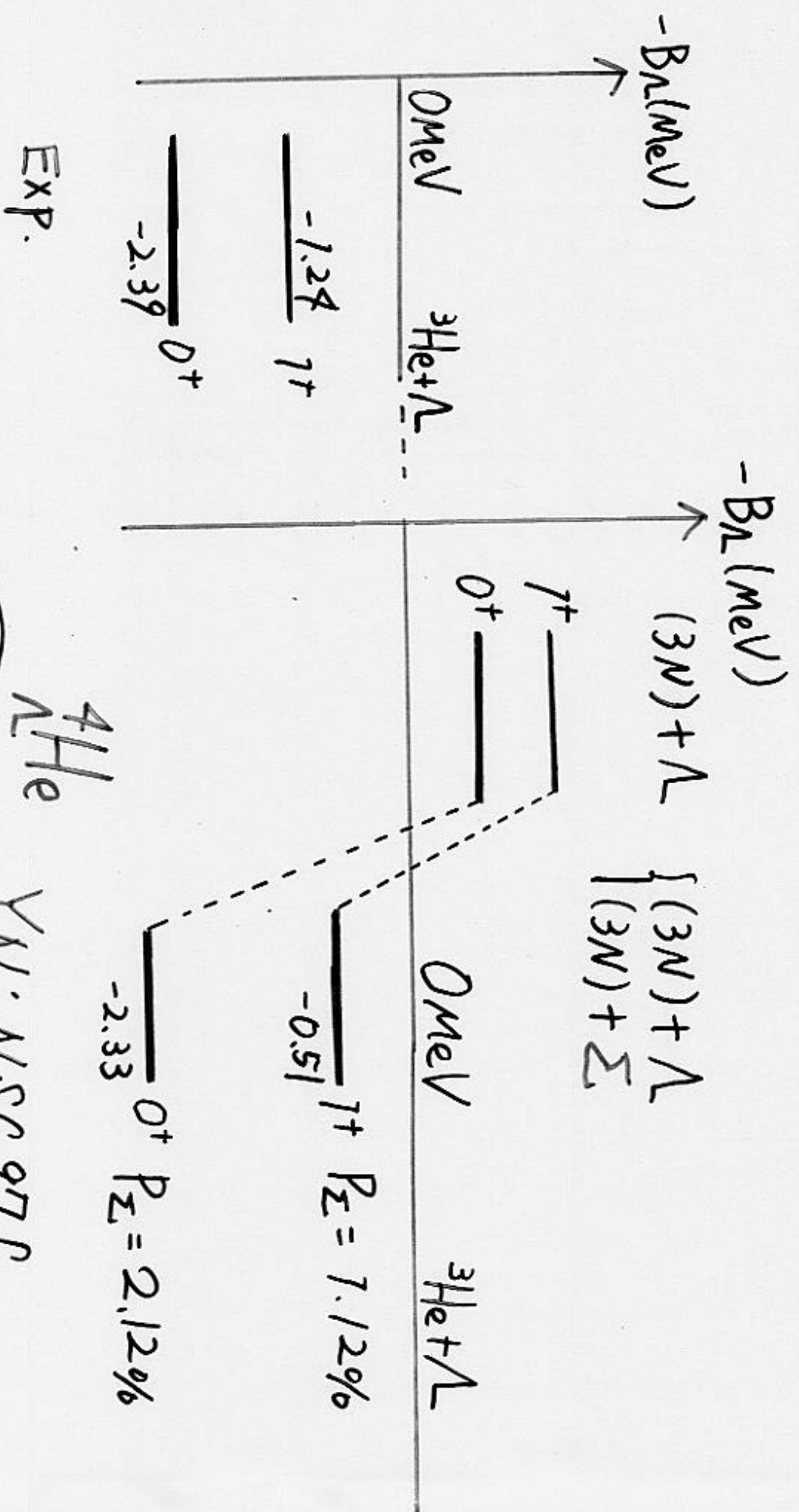


$C=8$

現在まで知られた 4 体問題の中で
最も難しい、challenging な課題

E. Hiyama et al.

Phys. Rev. C 65, 11301 (2002)



YN: NSC97f

Phys. Rev. C65,
 11301 (2002)

JHF 実験への提案

$\Lambda N - \Sigma N$ 結合相互作用に関する情報を得るために

・ ΥN 散乱実験

$$\Lambda p \rightarrow \Lambda p, \Sigma^{\pm} p \rightarrow \Sigma^{\pm} p$$

$$\Sigma^{-} p \rightarrow \Lambda n$$

ハイパー核内での粒子変換メカニズムや Σ 粒子の役割を解明するためには

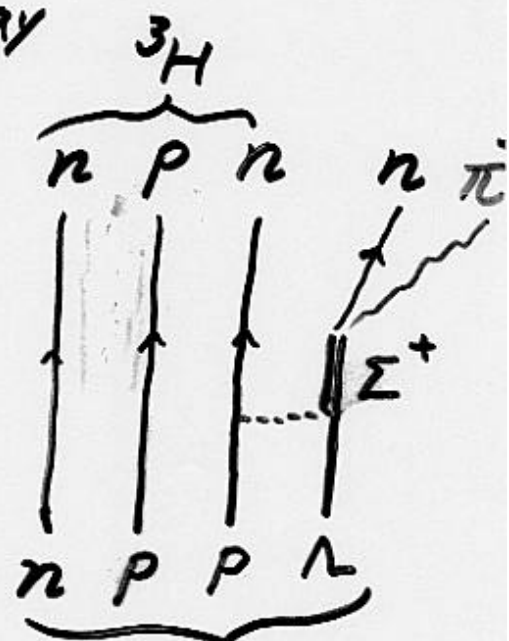
・ ${}^4_{\Lambda}H$, ${}^4_{\Lambda}He$ の磁気モーメント, M1 遷移確率
weak decay

・ weak decay 特には

$${}^4_{\Lambda}He \rightarrow {}^3H + \pi^+ + n$$

$$\text{free } \left(\begin{array}{l} \Lambda \rightarrow \pi^0 + n \\ \Lambda \rightarrow \pi^- + p \end{array} \right)$$

no π^+



$${}^4_{\Lambda}He: \Lambda \text{ が一旦 } \Sigma^+ \rightarrow \pi^+ + n$$

核内の Σ の役割を暴き出す絶好の実験

JHF 2!!

まとめ

ストレンジネス核物理が目指す物理の
足場を固めるための目的

(1) 核子+ハイペロンの多体系の特徴
を理解する。

例： ${}^6_{\Lambda}\text{Li}$ 原子核に Λ 粒子を入れると原子
核が縮む

(2) YN 相互作用、 YY 相互作用を理解
すること

例： ${}^9_{\Lambda}\text{Be}$ 、 ${}^{13}_{\Lambda}\text{C}$ のスピン軌道力

$\Lambda\Lambda$ 相互作用とダブル Λ ハイパー
核

$\Lambda N - \Sigma N$ 結合相互作用と ${}^4_{\Lambda}\text{He}$

(3) 中性子星の内部の研究や、重イオン研究
に(1),(2)で得られた情報を渡すこと

例： $\Lambda\Lambda$ 相互作用を中性子星の研究へ

ストレンジネス $S=-1, -2$ の世界の特徴
を着実に捉えて行こうとしている
JHF が、もし実現不可能になれば、
低密度から高密度までの核物質の研
究にとって多大な損失となる。