Few-body problem in hypernuclear physics

肥山詠美子（九大/理研）

原子核物理学分野で目指す物理

QCD

Lattice QCD

ハドロン

現実的相互作用（YN、YY、メソン－バリオン）の統一的な研究

有限温度における
高密度状態の物理
（中性子星内部の研究）

多体系のダイナミクス

Cluster模型

Shell 模型

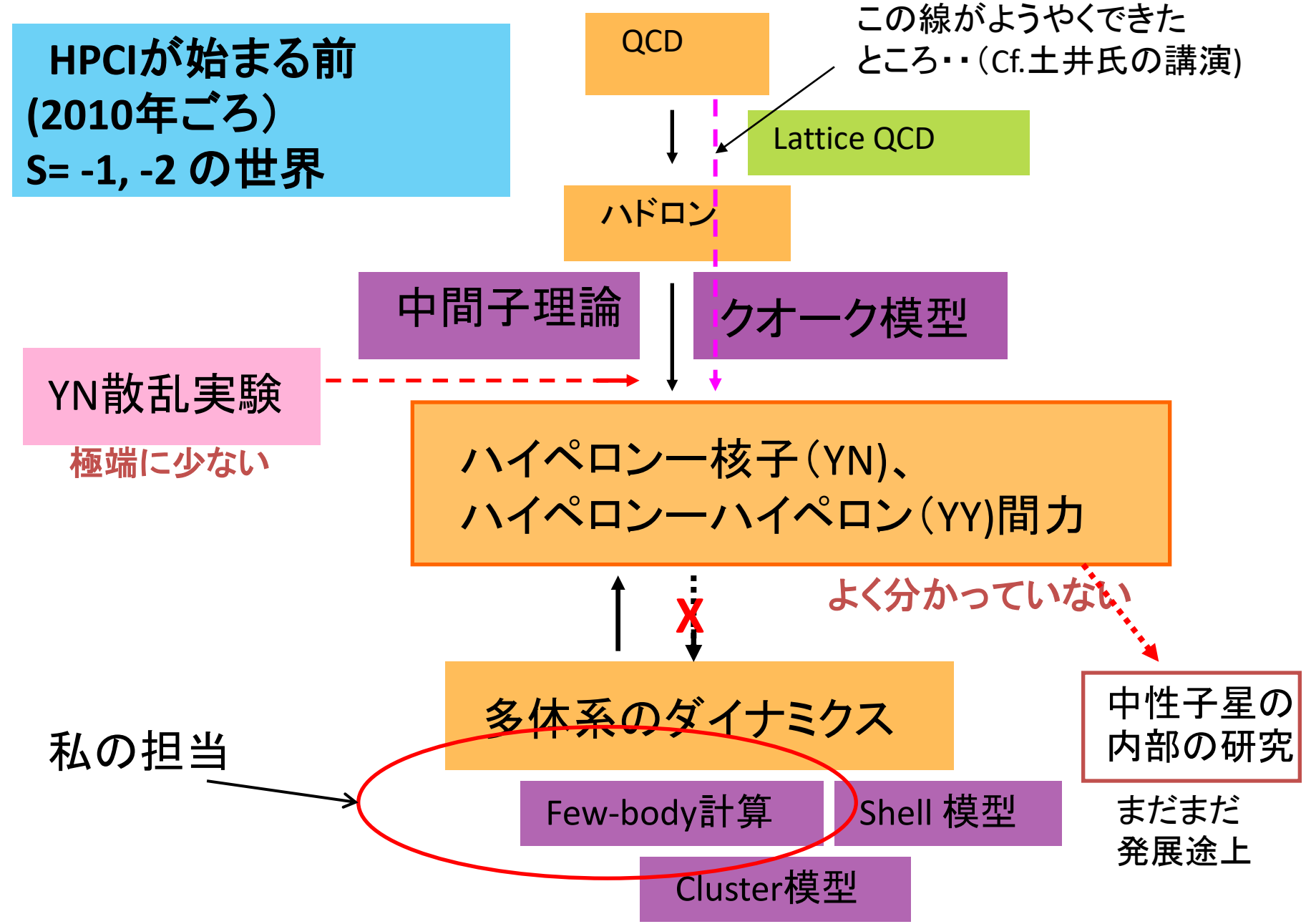
Few-body計算

今は予想もできない現象を予言可能
チャーム核、オメガハイペロンを原子核に入れた
ハイパー核、いろいろなメソンを原子核に入れた
エキゾチックな原子核を予言

J-PARCへ

つまり、QCDベースで、
原子核や巨大な原子核の
極限である中性子星を
理解することが原子核分野の
研究目的である。

HPCIが始まる前
(2010年ごろ)
S= -1, -2 の世界



まずは、構造の研究から、相互作用を決めるのが、先決なのが現状だった。

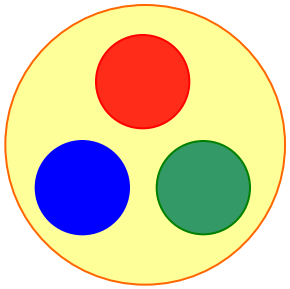
量子力学的3体系、4体系のシュレディンガー方程式を

厳密に（近似的ではなく）解く方法

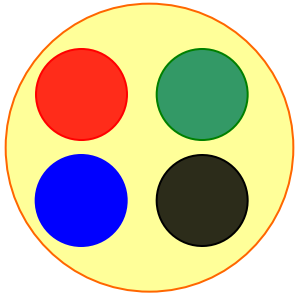
汎用性が高いので、物理学のさまざまな分野に適用。
精密に解くことによって初めて解明できる物理がある
ことを明らかにしてきた。

3体問題シュレーディンガー方程式　：　6変数2階偏微分方程式

$$\left[a\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)+A\left(\frac{\partial^2}{\partial X^2}+\frac{\partial^2}{\partial Y^2}+\frac{\partial^2}{\partial Z^2}\right)+V(x,y,z,X,Y,Z)\right]\Psi(x,y,z,X,Y,Z)$$
$$=E\,\Psi(x,y,z,X,Y,Z)$$



3体問題



4体問題

少数多体系のシュレーディンガー方程式を精密に解く

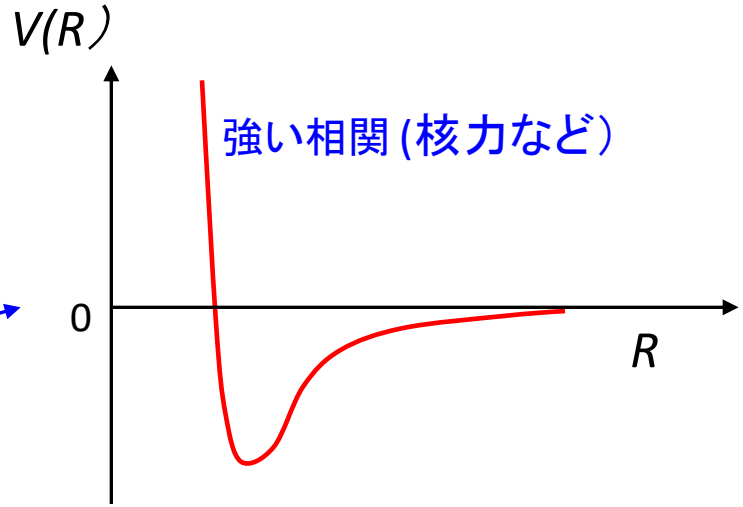
ガウス展開法

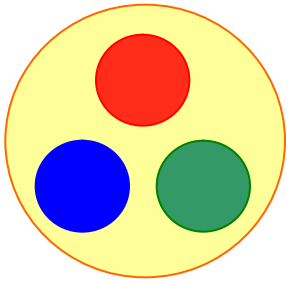
クーロン3体問題は
10桁の精度

・構成粒子は何でもよい、
質量、電荷を問わない。

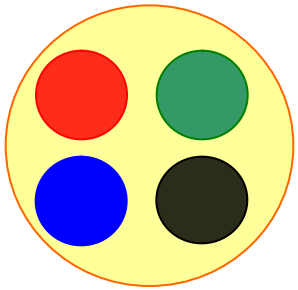
（電子、陽子、中性子、クオーク、・・・・・）

・粒子間に強い相関がある場合
にも精密に適用できる。



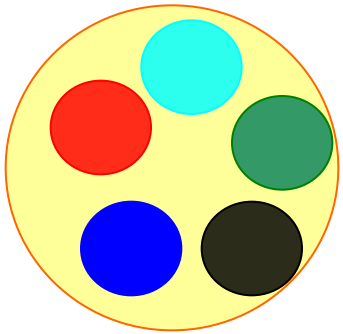


3体問題



4体問題

現在は、
さらに

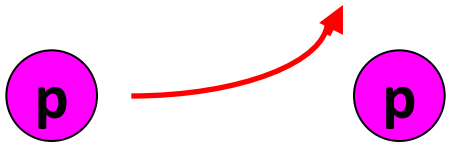


5体問題

ハイパー核物理分野の目的の一つ

すべてのバリオン間相互作用を決定すること

相互作用を決める方法：2粒子の2体散乱実験



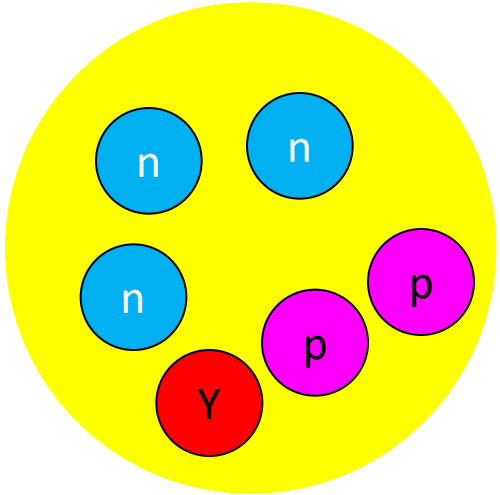
核子ー核子間 散乱実験データ：4000個 → 核子ー核子間 相互作用の研究が飛躍的に発展

↕

ハイペロンー核子間 散乱実験データ：40個
ハイペロンーハイペロン間 散乱実験データ：0個 → ハイペロンー核子間、ハイペロンーハイペロン間相互作用の理論的研究がまだ不十分

原因：現在の世界のハイパー核実験施設での
ハイペロンー核子散乱実験が非常に難しい

相互作用を決めるための新たな方法



ハイパー核
の構造

相互作用の決定

実験と理論がタイアップした
現在のハイパー核物理の流れ

相互作用を決めるストラテジー

ハイペロン(Y)-核子(N)、ハイペロン(Y)-ハイペロン(Y)相互作用
中間子理論　:まだこのころは、格子QCDに基づいた相互作用
クオーク理論:　　が提供されていなかった

①使用

③改良点を指摘

ハイパー核構造の精密計算

私の少数粒子系
精密計算法

No direct
information

X

② 比較

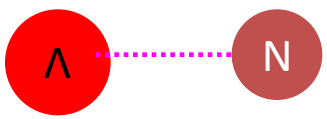
ハイパー核の高分解能の分光実験
Ge検出器を用いたガンマ線分光技術の発展

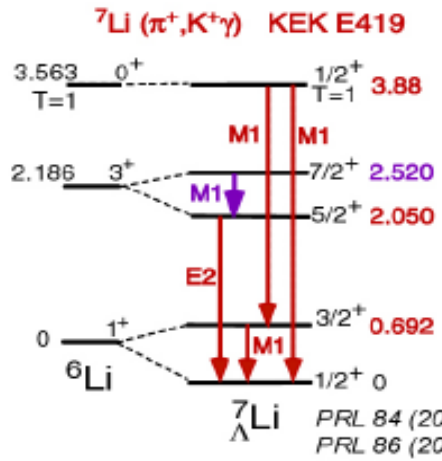
↓

ハイパー核の励起準位からのガンマ線を数keVの精度で測定可能

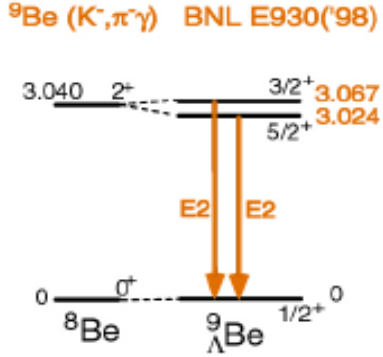
Hypernuclear γ-ray data since 1998

Taken by Tamura

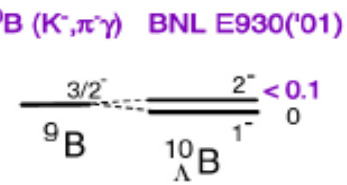




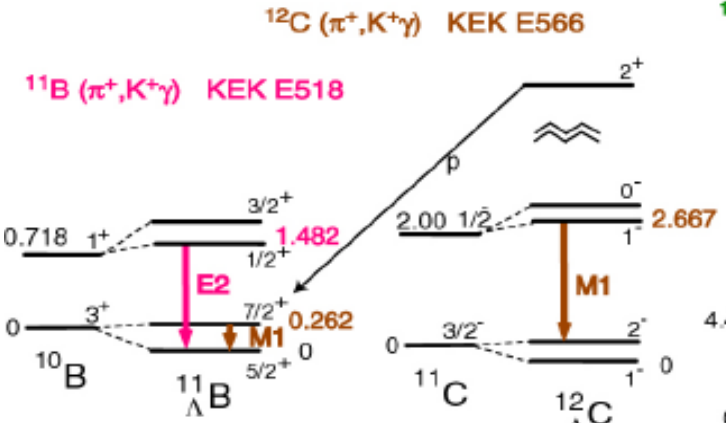
PRL 84 (2000) 5963
PRL 86 (2001) 1982
PLB 579 (2004) 258
PRC 73 (2006) 012501



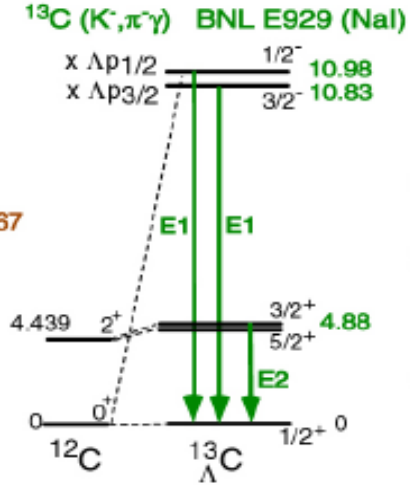
PRL 88 (2002) 082501
NPA 754 (2005) 58c



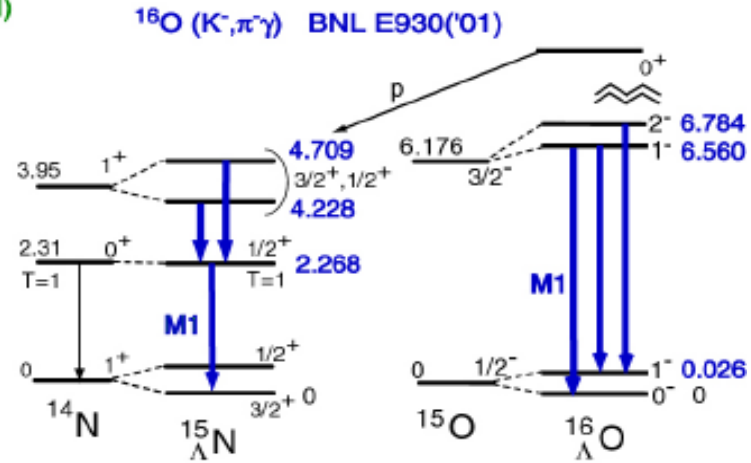
NPA 754 (2005) 58c



NPA 754 (2005) 58c



PRL 86 (2001) 4255
PRC 65 (2002) 034607



PRL 93 (2004) 232501

$$V_{\Lambda N} = V_0 + \boldsymbol{\sigma}_\Lambda \cdot \boldsymbol{\sigma}_N V_{\sigma\cdot\sigma} + \mathbf{L}\cdot(\mathbf{s}_\Lambda + \mathbf{s}_N) V_{\mathrm{SLS}} + \mathbf{L}\cdot(\mathbf{s}_\Lambda - \mathbf{s}_N) V_{\mathrm{ALS}} + S_{12} V_{\mathrm{tensor}} + \cdots\cdots$$

- Millener (p-shell model),
- Hiyama (few-body)

- １９９８年～これまで、ΛN相互作用の詳細が
- おおよそわかってきた。

- では、S=-2の世界は？

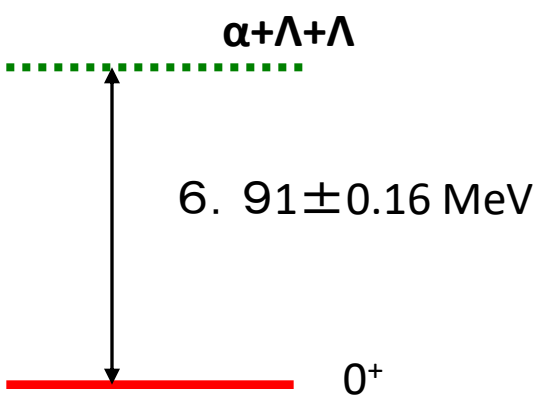
- ΛΛ相互作用やΞN相互作用は？

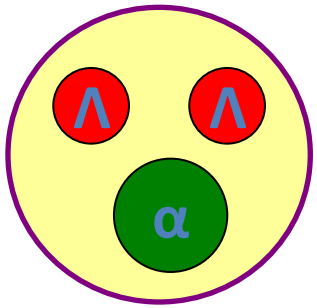
ΛΛ散乱実験、ΞN散乱実験はJ-PARC施設でも難しいので、ダブルラムダハイパー核やグザイハイパー核を人工的に生成して、その構造を研究する必要がある。

In 2001, the epoch-making data has been reported by the KEK-E373 experiment.

Observation of $^{6}_{\Lambda\Lambda}$He

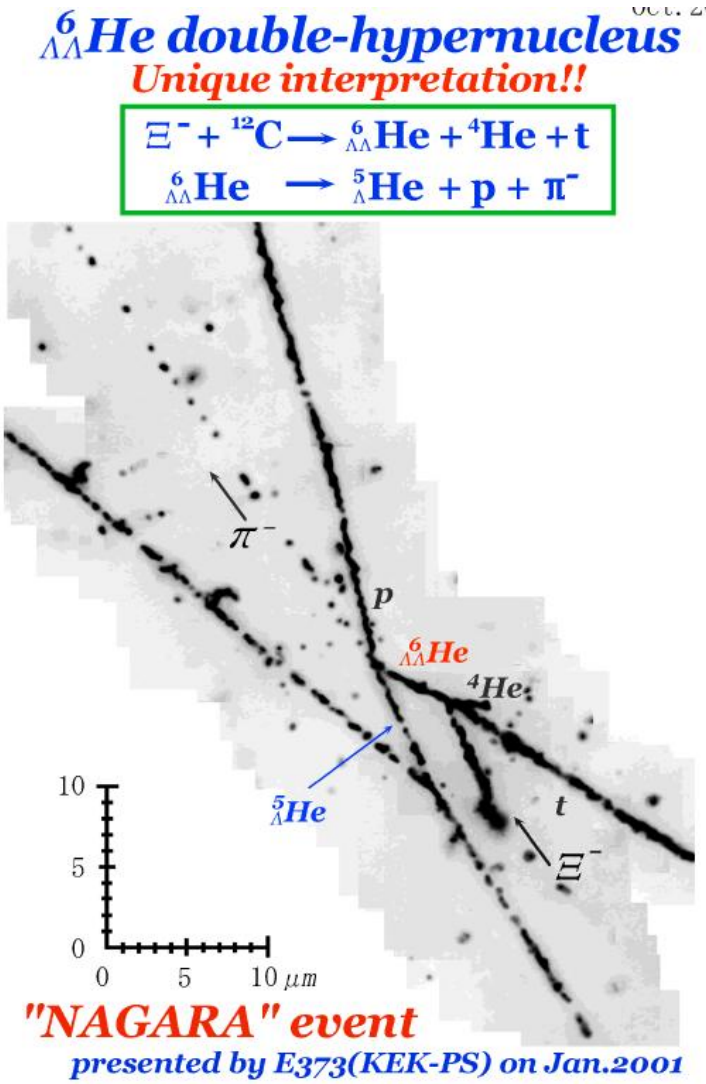
世界初の不定性なく発見された
ダブルラムダハイパー核
この束縛エネルギーからΛΛ相互作用の
$^{1}S_{0}$の引力の望ましい強さが分かった。





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

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



H. Takahashi *et al.*, PRL 87, 212502-1 (2001)

Strategy of how to determine YY interaction from the study of light hypernuclear structure

YY interaction
Nijmegen model D

① use

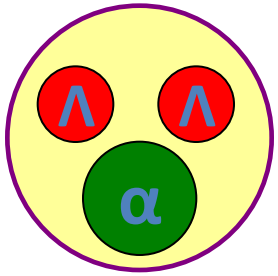
③ Suggest reducing the strength of spin-independent force by half

Accurate structure calculation

② compare between the theoretical result and the experimental data of the biding energy of $^{6}_{\Lambda\Lambda}$He

Spectroscopic experiments
Emulsion experiment (KEK-E373)
by Nakazawa and his collaborators

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



④ prediction of new double Λ hypernuclei

- E07 Approved proposal at J-PARC

"Systematic Study of double strangness systems at J-PARC"

by Nakazawa and his collaborators

この実験が、昨年J-PRACで行われ、新しい実験データが今後出てくることが期待

It is difficult to determine
- (1) spin-parity
- (2) whether the observed state is the ground state or an excited state

My theoretical contribution using few-body calculation

Emulsion experiment ⟷ **comparison** ⟷ **Theoretical calculation**

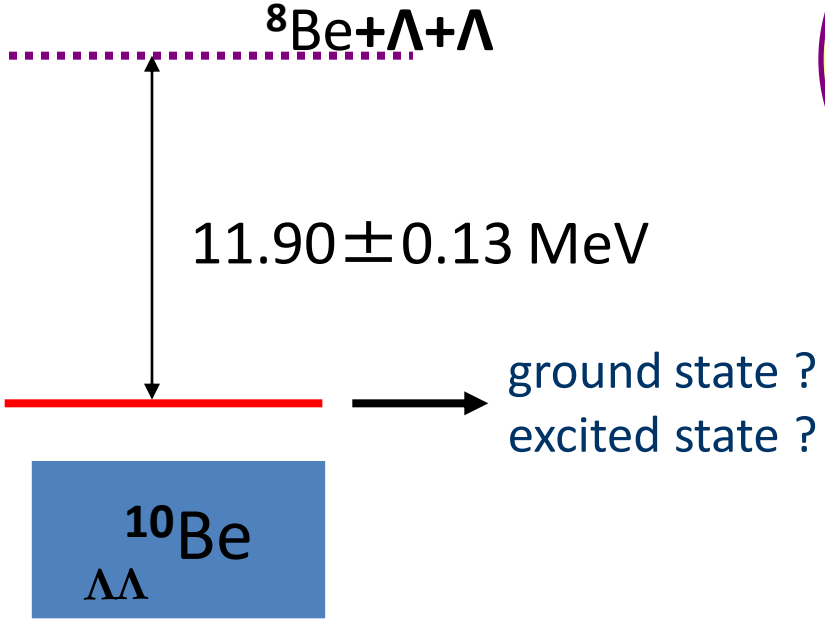
input: ΛΛ interaction to reproduce the observed binding energy of $^{6}_{\Lambda\Lambda}$He

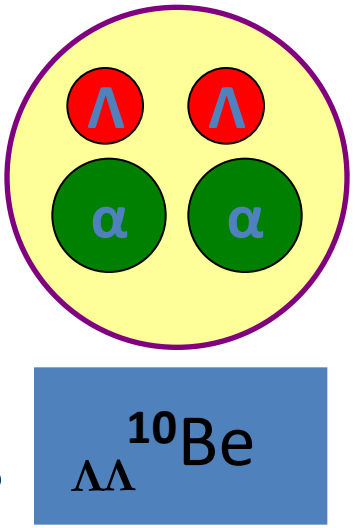
↓

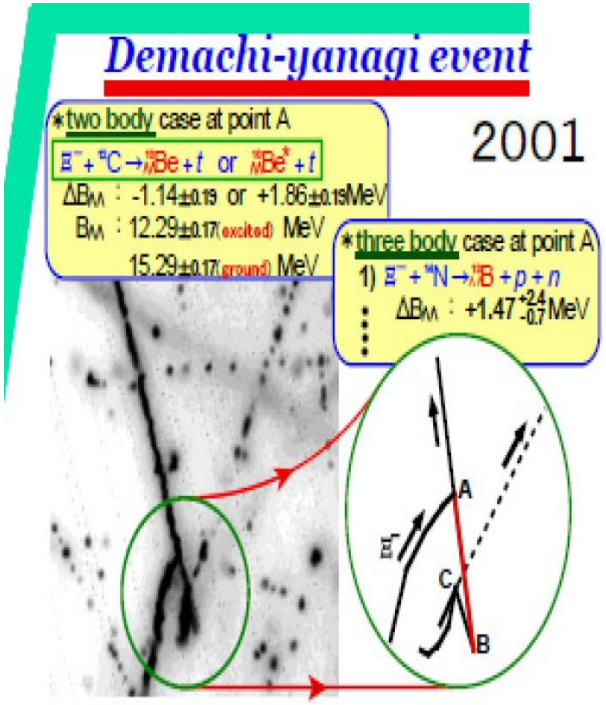
the identification of the state

Successful example to determine spin-parity of double Λ hypernucleus --- Demachi-Yanagi event for $^{10}_{\Lambda\Lambda}$Be

Observation of $^{10}_{\Lambda\Lambda}$Be --- KEK-E373 experiment

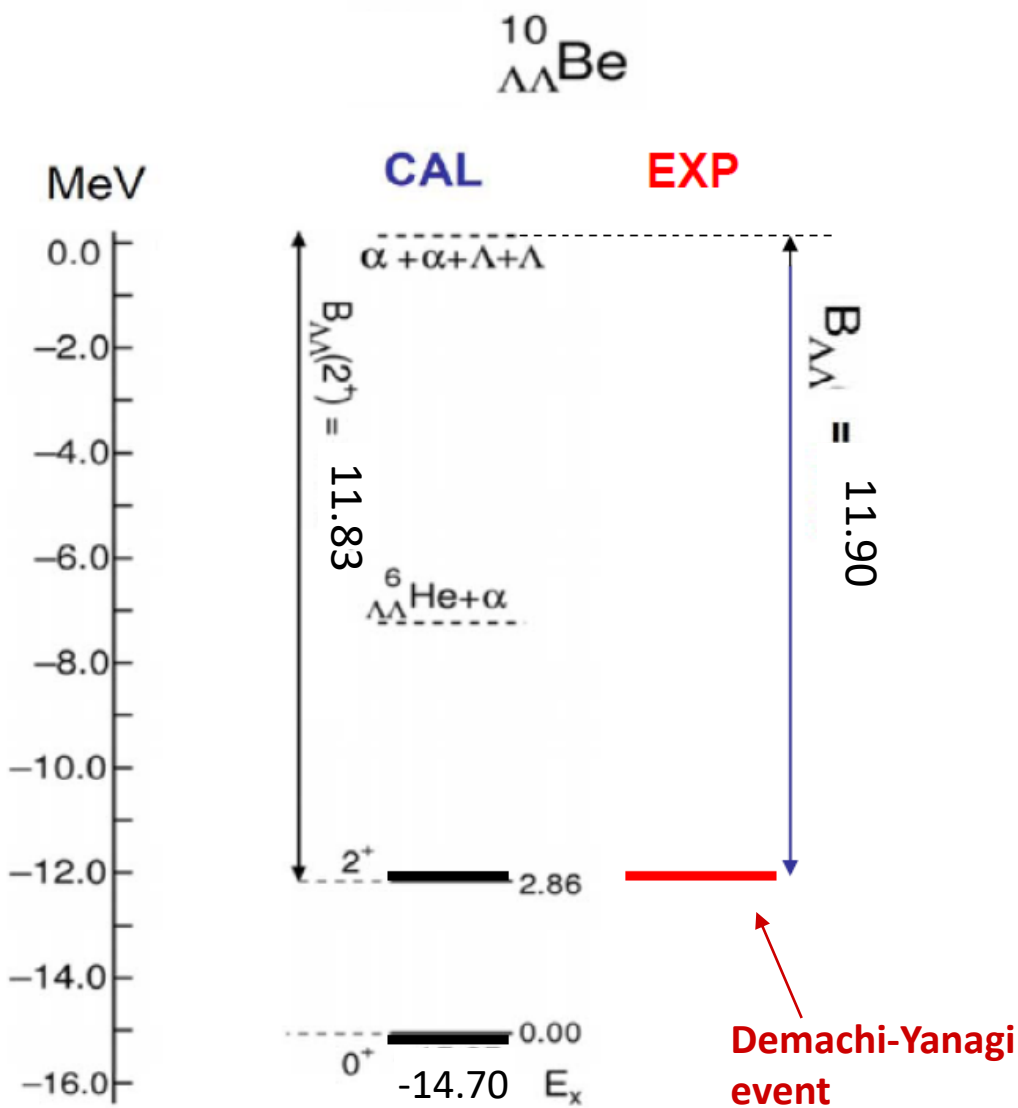


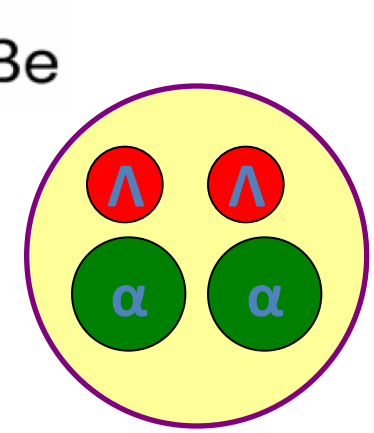




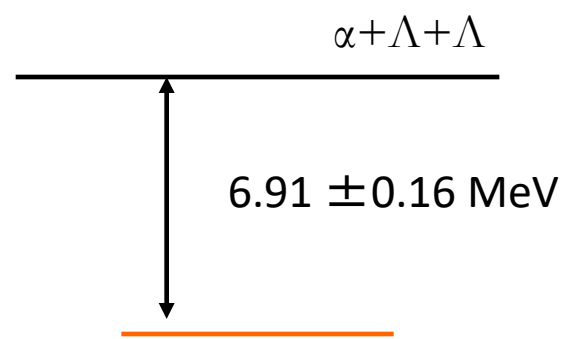
Demachi-Yanagi event

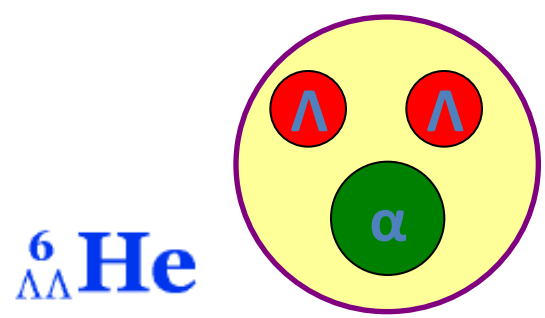
Successful interpretation of spin-parity of $^{10}_{\Lambda\Lambda}$Be



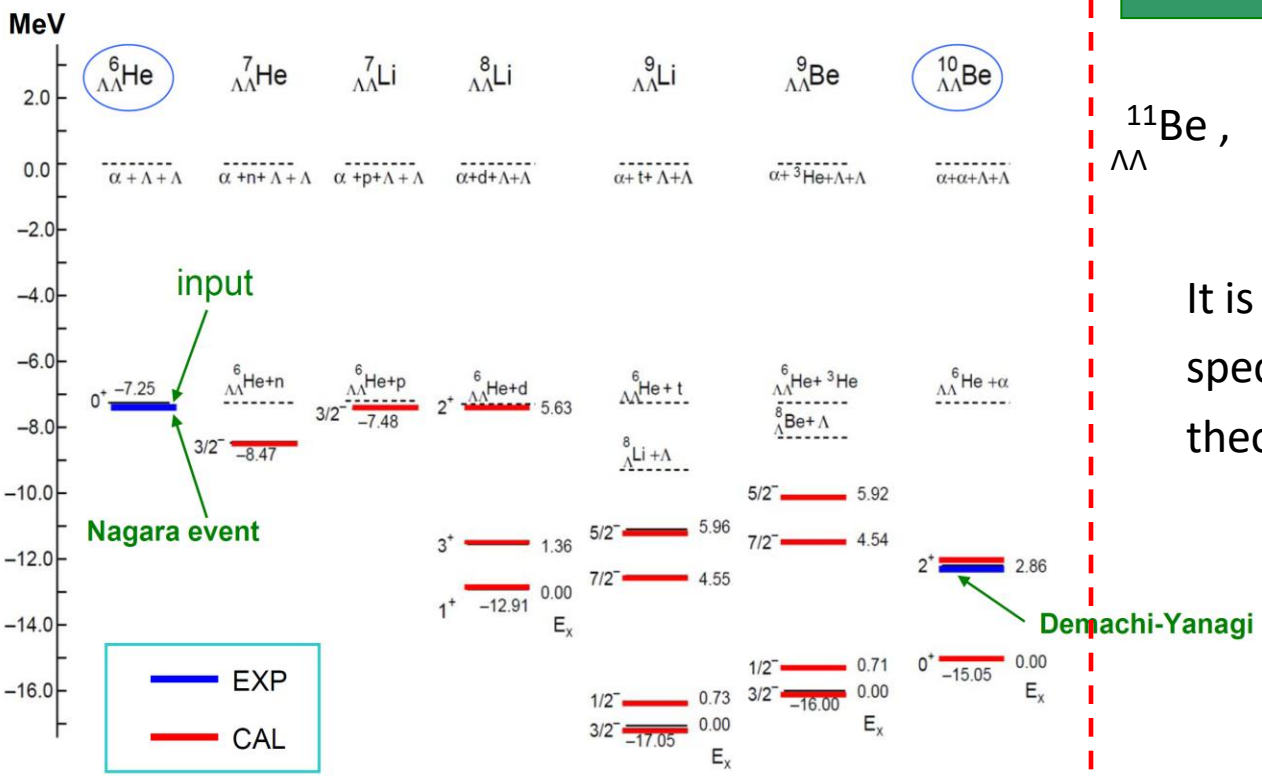


E. Hiyama, M. Kamimura,T.Motoba, T. Yamada and Y. Yamamoto
Phys. Rev. 66 (2002) , 024007





Spectroscopy of ΛΛ-hypernuclei



At J-PARC

$^{11}_{\Lambda\Lambda}$Be , A=12, 13, 14,15,16

It is necessary to predict energy spectra in these mass region theoretically.

2011年以降

構造研究からΛN相互作用＋そのΛΛ相互作用
　を使用したEOSの研究へつながりつつある。

しかし、まだ発展途上

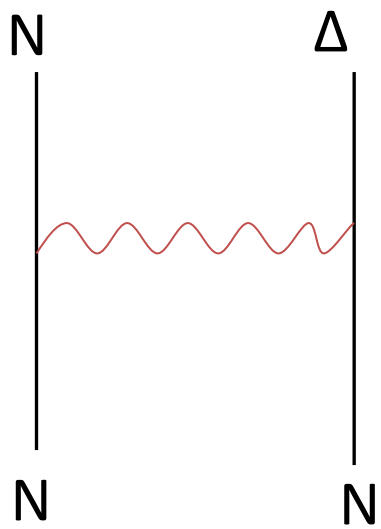
理由：ΛΛ相互作用が完全ではないから

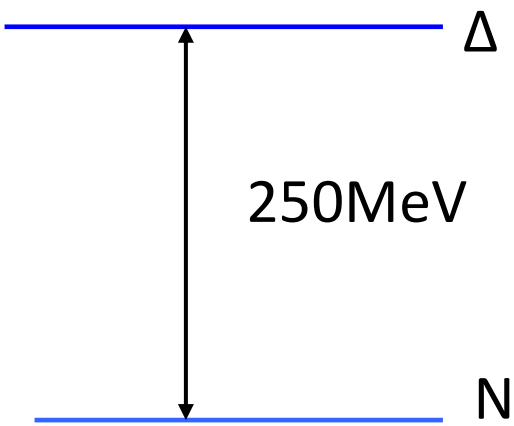
何が必要か？

ΛΛ相互作用において、今後必要な部分は？

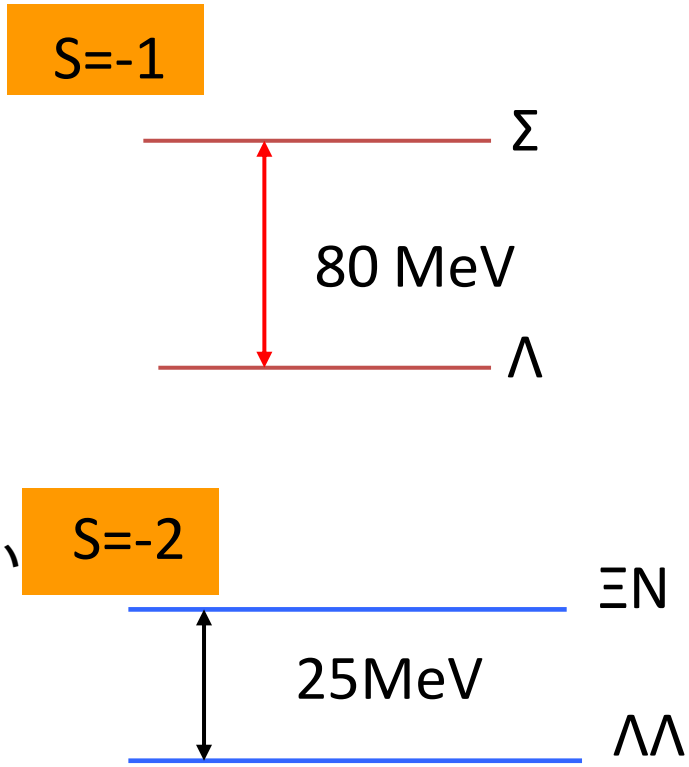
$^1S_0$ ➡ この部分は決まった。

今後：P-波相互作用、ΛΛ-ΞN相互作用の情報が必要

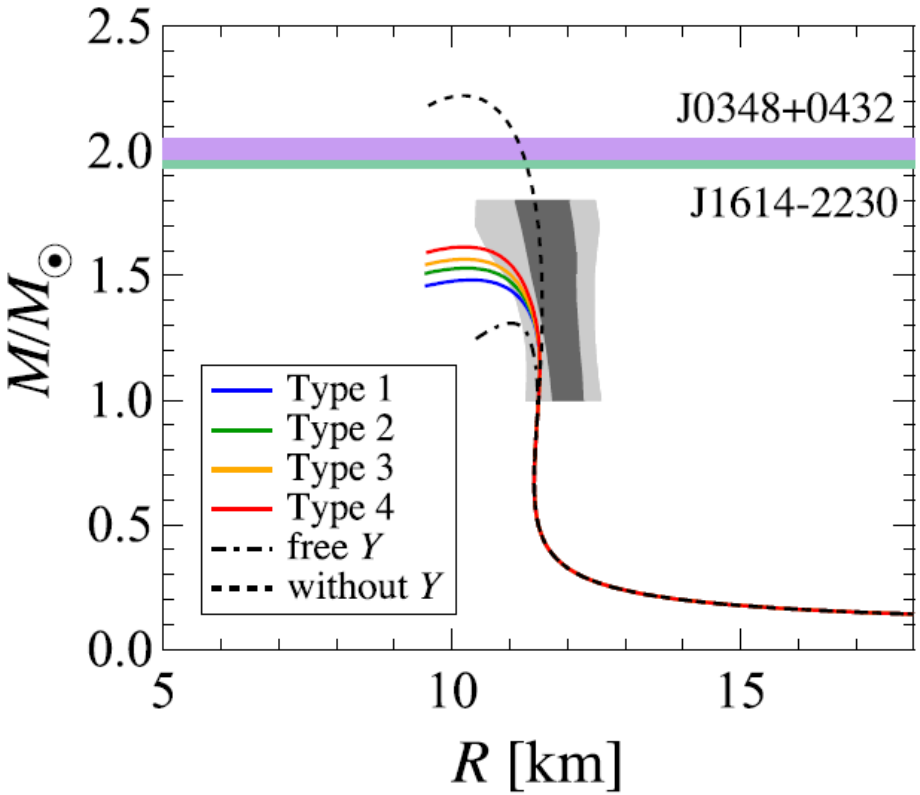




N-Δの質量差が大きいので、
原子核にΔの影響は考えない



In ΛΛ interaction, what is important to study?
p-wave state of ΛΛ interaction



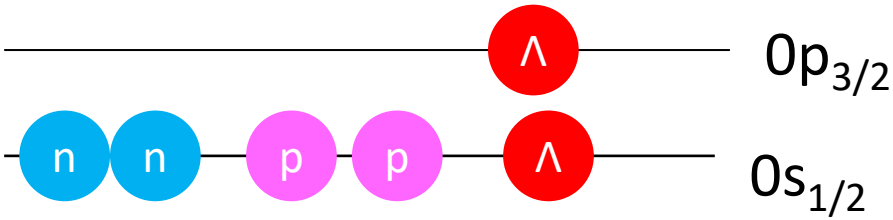
H. Togashi, E.H.,
Y. Yamamoto, and M. Takano,
PRC93, 035808 (2016).

TYPE1:attractive ➡ TYPE2:less attractive ➡ TYPE4:repulsive

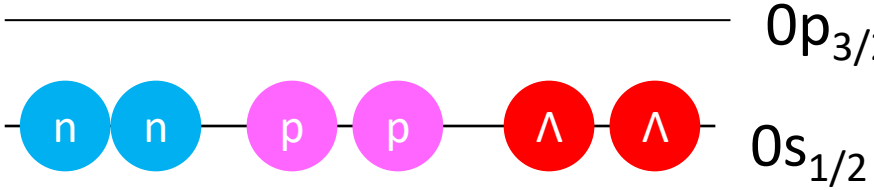
⬇

ΛΛ相互作用のp波で20%ほど中性子星の最大質量が異なる。

Similar with odd-state of ΛN interaction



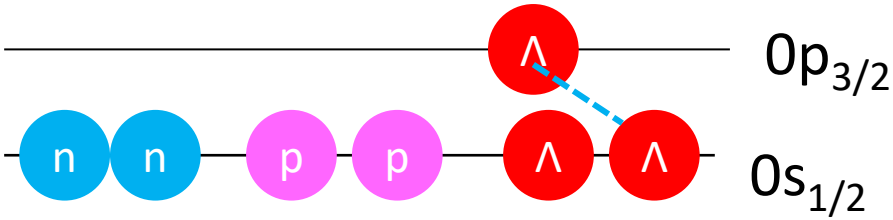
ダブルラムダハイパー核の
励起状態



ダブルラムダハイパー核の
基底状態

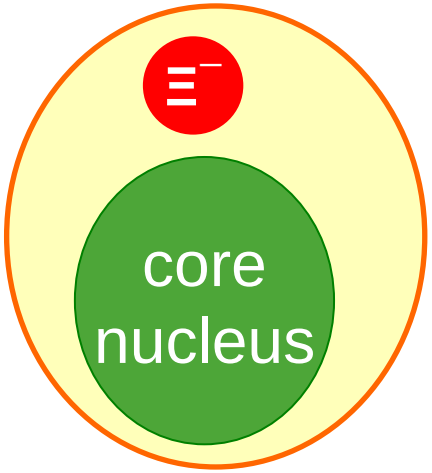
今までこの状態の
ハイパー核が
見つかっている。

今後、このような状態が実験で見つかれば
ΛΛ相互作用のp波の項が決まる。



または、トリプルラムダハイパー核が実験で生成することができるので
あれば、P波が分かる。

グザイハイパー核は？



For the study of ΞN interaction, it is important to study the structure of Ξ hypernuclei.

しかし、2015年まで、グザイハイパー核が束縛状態として発見されたことがなかった。

そのため、ΞN相互作用が引力か斥力が分からなかった。

PTEP

Prog. Theor. Exp. Phys. **2015**, 033D02 (11 pages)
DOI: 10.1093/ptep/ptv008

The first evidence of a deeply bound state of Xi^{-}–^{14}N system

K. Nakazawa[1,*], Y. Endo[1], S. Fukunaga[2], K. Hoshino[1], S. H. Hwang[3], K. Imai[3], H. Ito[1], K. Itonaga[1], T. Kanda[1], M. Kawasaki[1], J. H. Kim[4], S. Kinbara[1], H. Kobayashi[1], A. Mishina[1], S. Ogawa[2], H. Shibuya[2], T. Sugimura[1], M. K. Soe[1], H. Takahashi[5], T. Takahashi[5], K. T. Tint[1], K. Umehara[1], C. S. Yoon[4], and J. Yoshida[1]

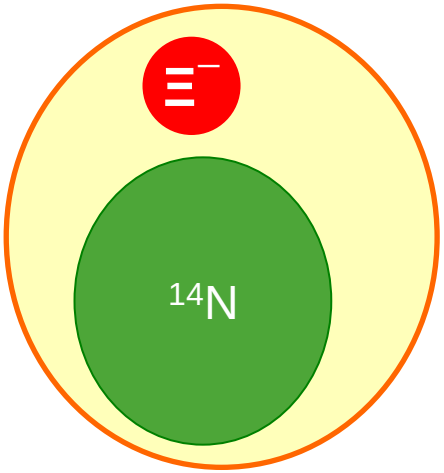
[1]*Physics Department, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan*
[2]*Department of Physics, Toho University, Funabashi 274-8510, Japan*
[3]*Advanced Science Research Center, JAEA, Tokai 319-1195, Japan*
[4]*Department of Physics, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea*
[5]*Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, Tsukuba 305-0801, Japan*
*E-mail: nakazawa@gifu-u.ac.jp

Received October 27, 2014; Revised December 25, 2014; Accepted January 9, 2015; Published March 5, 2015

^{14}N-Ξ-

0 MeV

-4.38 ± 0.25 ～-1.10 ± 0.25 MeV



Kiso event

初のグザイハイパー核の束縛状態としての発見
ΞN相互作用が引力であることが分かった。

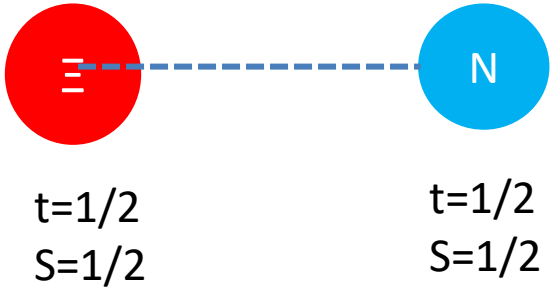
$$V_{\Xi N} = V_0 + \sigma\cdot\sigma\, V_{\sigma\cdot\sigma} + \tau\cdot\tau\, V_{\tau\cdot\tau} + (\sigma\cdot\sigma)(\tau\cdot\tau)\, V_{\sigma\cdot\sigma\ \tau\cdot\tau}$$

この相互作用自身が引力であることが分かった

Talked by Tamura

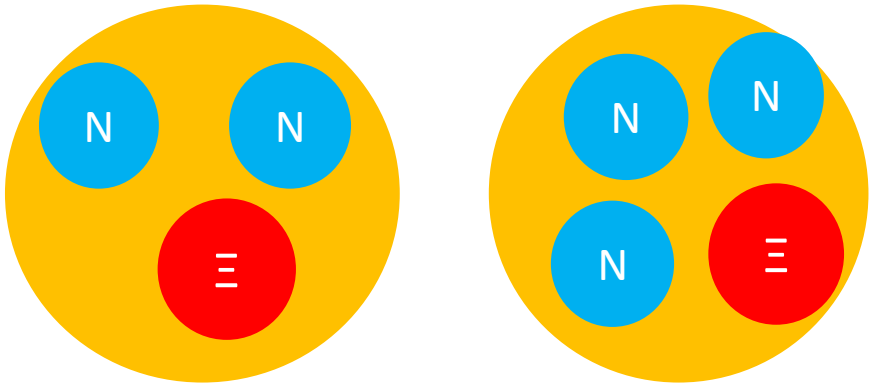
グザイハイパー核での重要な課題:

ΞN interaction: T=0, S=0
T=0, S=1
T=1, S=0
T=1, S=1



これらの4つの項が引力なのか？それとも斥力なのか？
このことを確かめるためにベストなグザイハイパー核は？

どうやって実験的に生成するのか？

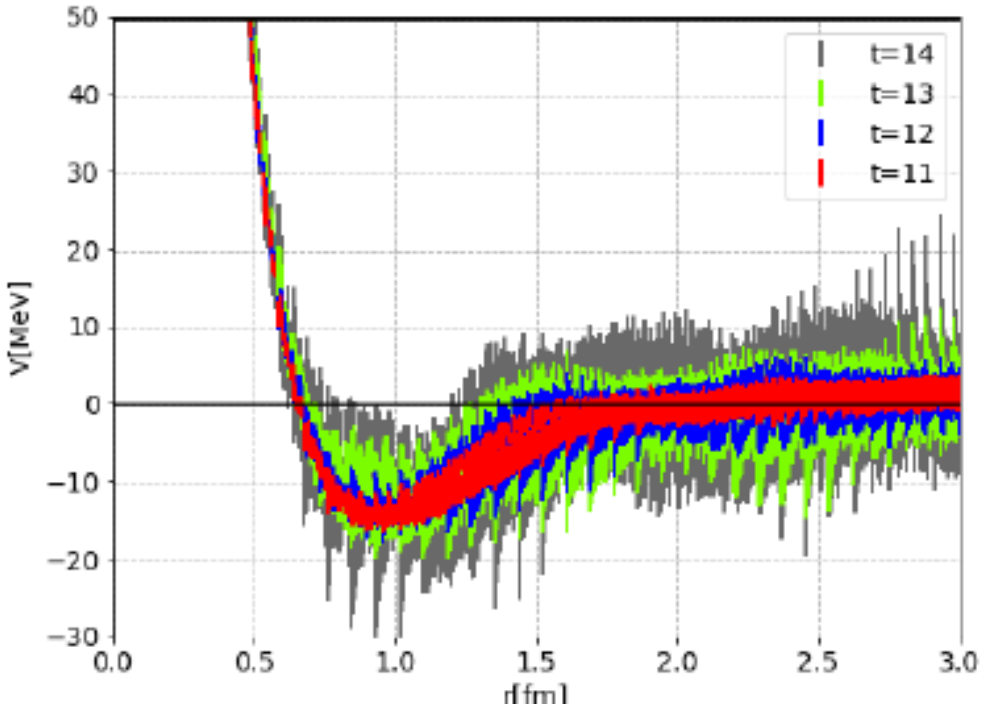


これらのs殻ハイパー核がベストな核

これらの原子核の結合をエネルギーを計算するために、
信頼できるΞN相互作用を使用しなければいけない。

不定性が大きいが、Nijmegenグループが提案したポテンシャルモデルは存在した。

$$V_{N\Xi}(r) = V_0 1 + V_\sigma(\sigma\cdot\sigma) + V_\tau(\tau\cdot\tau) + V_{\sigma\tau}(\sigma\cdot\sigma)(\tau\cdot\tau)$$



t=11
t=12
t=13
t=14

ΞN interaction by HAL QCD collaboration

近年HAL QCD グループによって、ΞN相互作用が提案
（Cf. Talked by Doi, provided by K. Sasaki）

arXiv:submit/2875357 [nucl-th] 7 Oct 2019

Possible lightest Ξ Hypernucleus with Modern ΞN Interactions

E. Hiyama
Department of Physics, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 819-0395 and
Strangeness Nuclear Physics Laboratory, RIKEN Nishina Center, Wako, 351-0198, Japan

K. Sasaki
Center for Gravitational Physics, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

T. Miyamoto
Center for Gravitational Physics, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan and
Quantum Hadron Physics Laboratory, RIKEN Nishina Center, Wako, 351-0198, Japan

T. Doi
Quantum Hadron Physics Laboratory, RIKEN Nishina Center, Wako, 351-0198, Japan and
Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences Program (iTHEMS), RIKEN, Wako, 351-0198, Japan

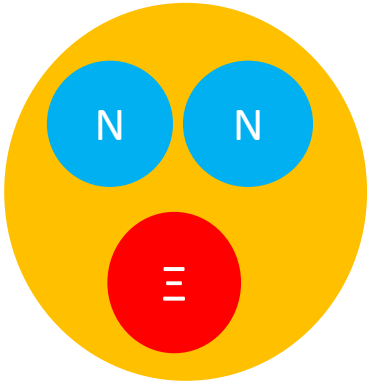
T. Hatsuda
Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences Program (iTHEMS), RIKEN, Wako, 351-0198, Japan and
Quantum Hadron Physics Laboratory, RIKEN Nishina Center, Wako, 351-0198, Japan

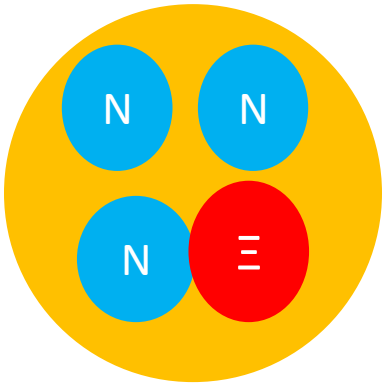
Y. Yamamoto
Physics Section, Tsuru University, Tsuru, Yamanashi 402-8555, Japan and
Strangeness Nuclear Physics Laboratory,RIKEN Nishina Center, Wako, 351-0198, Japan

Th. A. Rijken
Institute for Theoretical Physics, University of Nijmegen, Njjmegen, The Netherlands
(Dated: October 7, 2019)

Experimental evidence exists that the Ξ-nucleus interaction is attractive. We search for $NN\Xi$ and $NNN\Xi$ bound systems on the basis of the AV8 NN potential combined with either a phenomenological Nijmegen ΞN potential or a first principles HAL QCD ΞN potential. The binding energies of the three-body and four-body systems (below the $d+\Xi$ and ^{3}H/^{3}He$+\Xi$ thresholds, respectively) are calculated by a high precision variational approach, the Gaussian Expansion Method. Although the two ΞN potentials have significantly different isospin (T) and spin (S) dependence, the $NNN\Xi$ system with quantum numbers ($T=0, J^\pi=1^+$) appears to be bound (one deep for Nijmegen and one shallow for HAL QCD) below the ^{3}H/^{3}He$+\Xi$ threshold. Experimental implications for such a state are discussed.

One of the major goals of hypernuclear physics is to under- "KISO" event [14], which provides useful information on the





I show my new results of these light systems.

NN interaction: AV8 potential

ΞN interaction :

Nijimegen extended soft core potential (ESC08c)

Realistic potential (only ΞN channel)

ΞN interaction by HAL collaboration (Lattice QCD calculation)

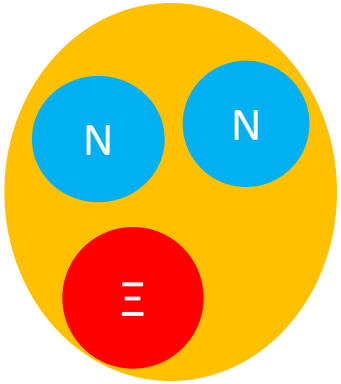
The potential was made by K. Sasaki and Miyamoto.

Property of the spin- and isospin-components of ESC08 and HAL

V(T,S)	ESC08c	HAL
T=0, S=1	strongly attractive	Weakly attractive
T=0, S=0	weakly repulsive	Strongly attractive
T=1, S=1	strong attractive	Weakly attractive
T=1, S=0	weakly repulsive	Weakly repulsive

Although the spin- and isospin-components of these two models are very different between them.

It is interesting to see the difference in the energy spectra in s-shell Ξ hypernuclei.



T=1/2, J=1/2$^+$ and J=3/2$^+$

ESC08c

Unbound

0 MeV d+ Ξ

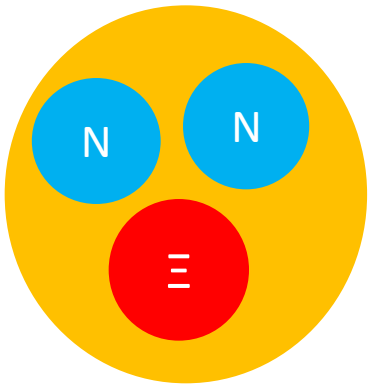
No bound state

J=1/2+

0 MeV d+ Ξ

-2.57 MeV

J=3/2$^+$



T=1/2, J=1/2$^+$ and J=3/2$^+$

HAL potential

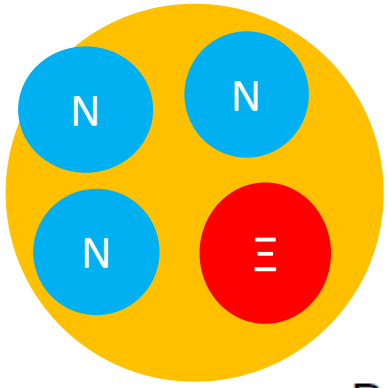
0 MeV d+ Ξ

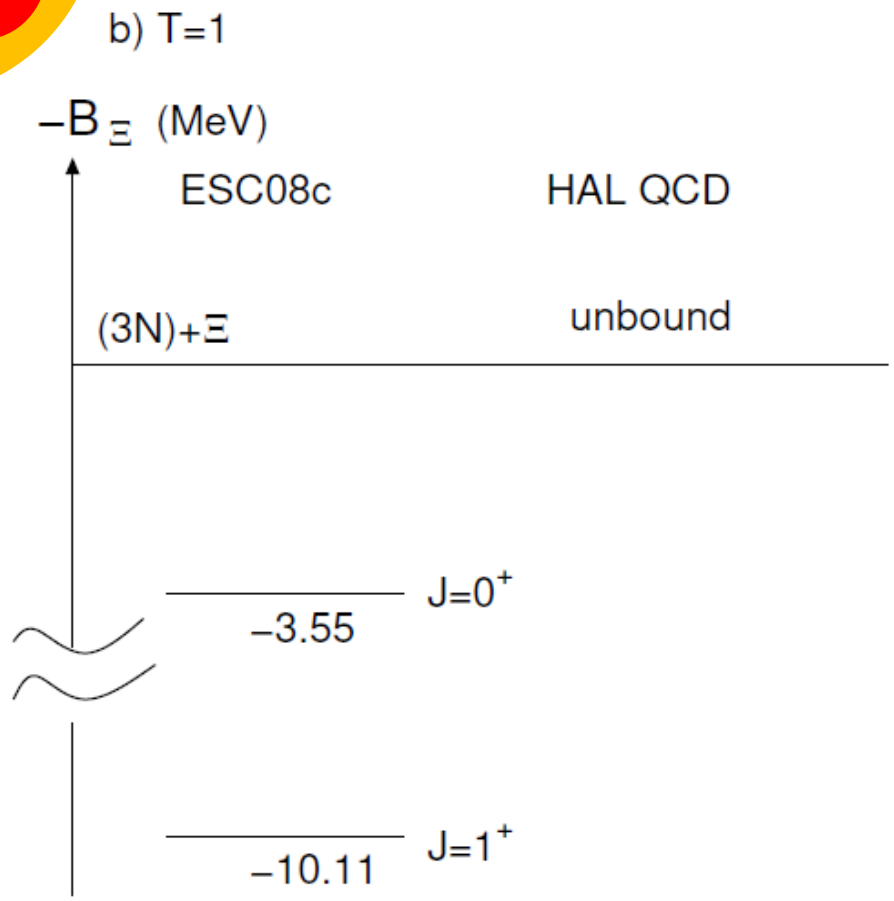
0 MeV d+ Ξ

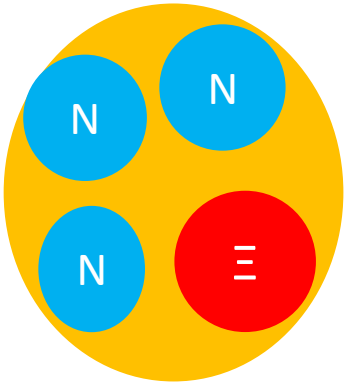
No bound state

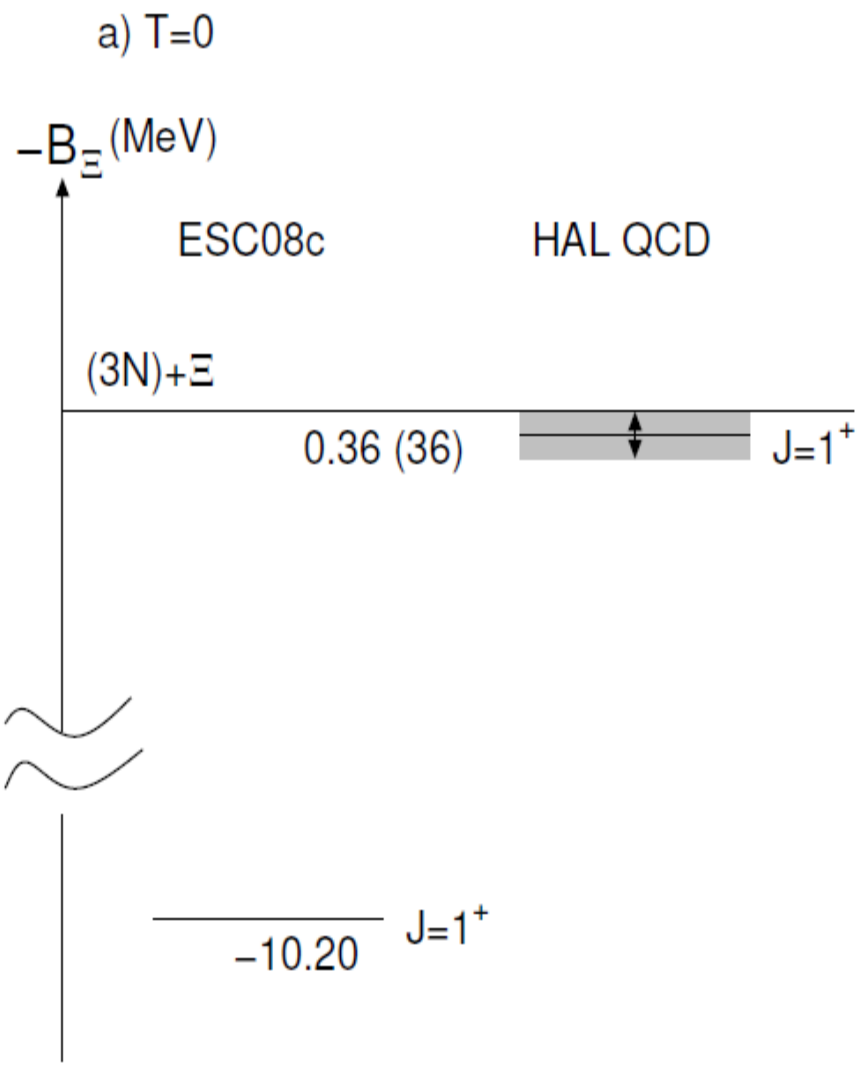
J=3/2$^+$

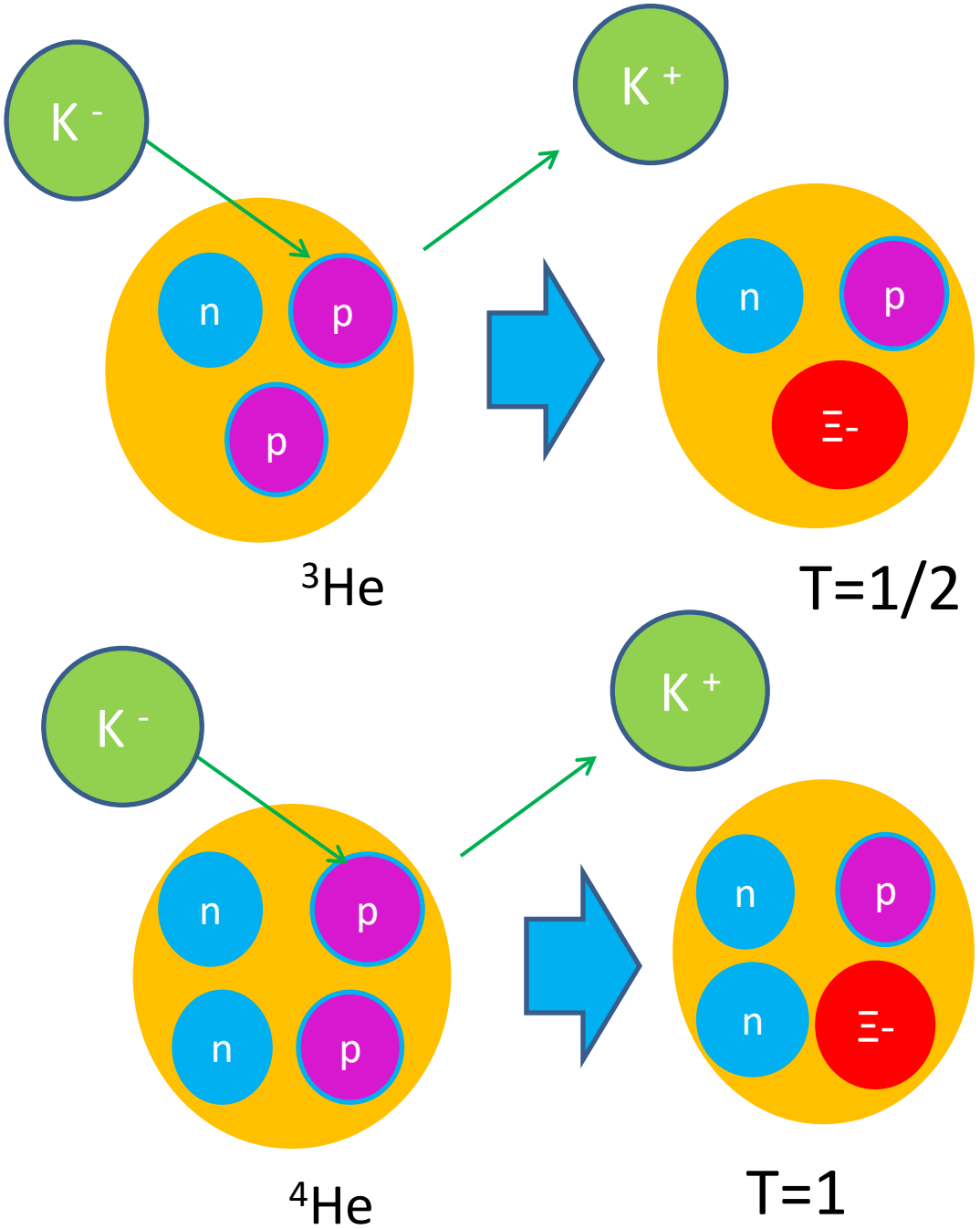
J=1/2+


N
N
N
Ξ


b) T=1
−B Ξ (MeV)
ESC08c
HAL QCD
(3N)+Ξ
unbound
J=0+
−3.55
J=1+
−10.11


N
N
N
Ξ


a) T=0
−B_Ξ (MeV)
ESC08c
HAL QCD
(3N)+Ξ
0.36 (36)
J=1+
−10.20
J=1+



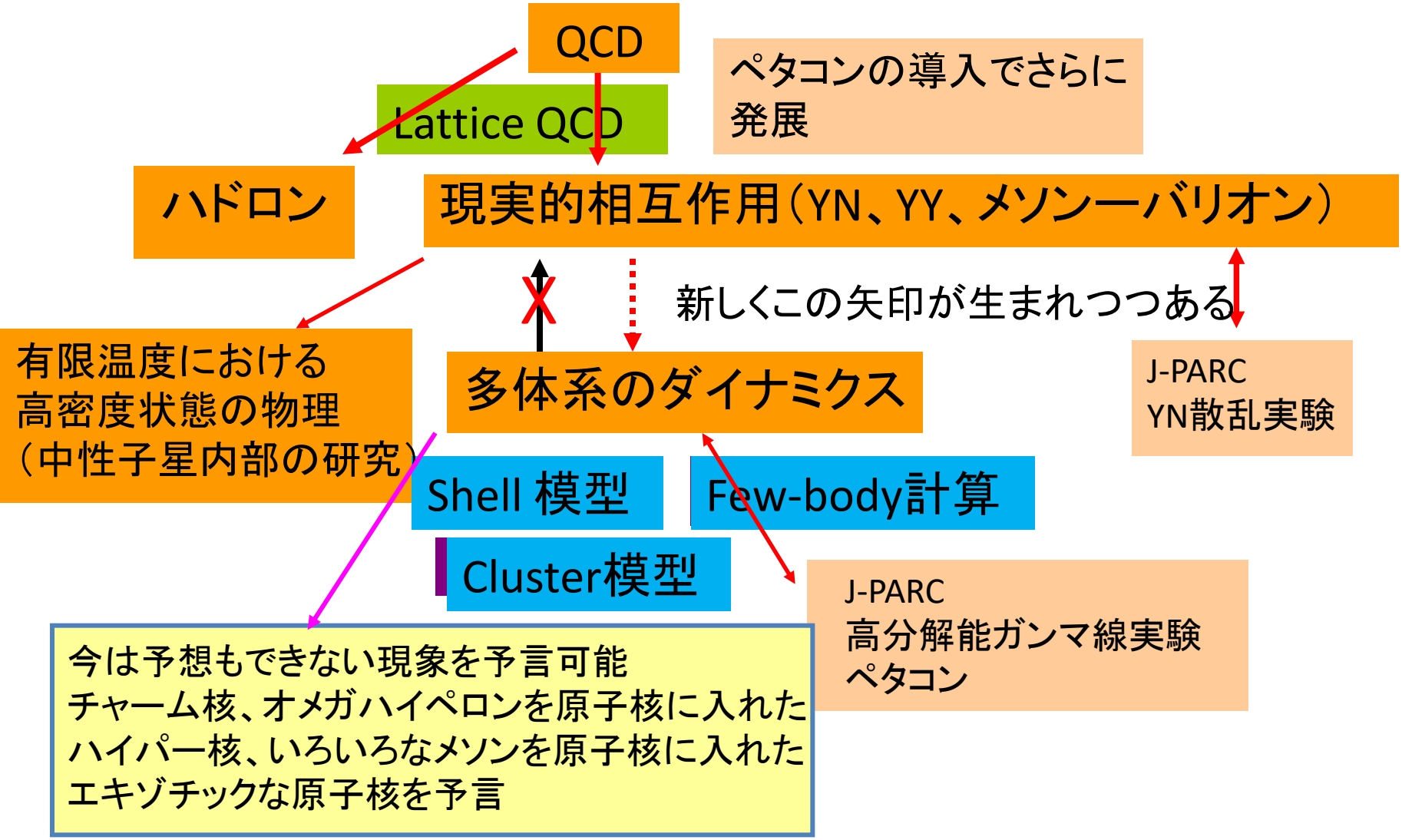
どうやって生成するのか？

^{3}Heや^{4}Heターゲットで
(K^-,K^+)反応でJ-PARC
生成可能。

別の方法として重イオン
反応実験もある。

現在からこれらのS=-1、S=-2の世界

（personal view)



おわり