

# 弱束縛量子多体系における 2粒子相関のダイナミクス

萩野浩一

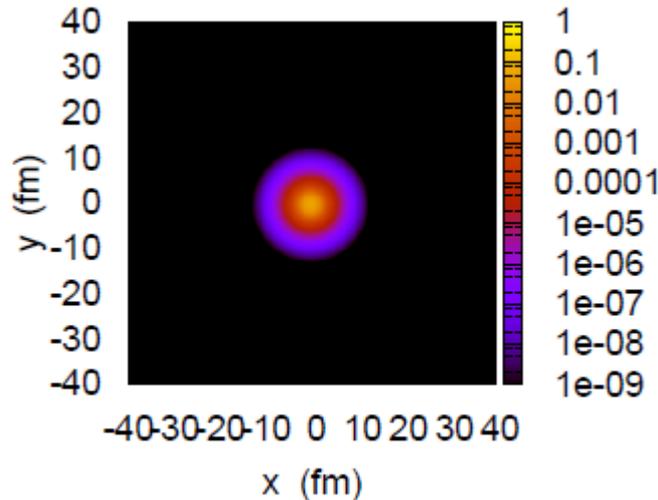
東北大学大学院理学研究科  
物理学専攻



東北大学

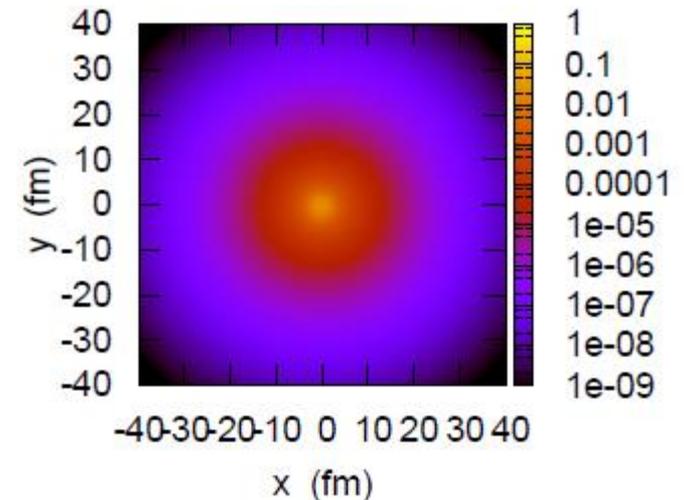
[hagino@nucl.phys.tohoku.ac.jp](mailto:hagino@nucl.phys.tohoku.ac.jp)

[www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/~hagino](http://www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/~hagino)



弱束縛

井戸型ポテンシャル  
( $l=0$  束縛状態)



# 講義の内容(予定)

## 1. イントロダクション: 中性子過剰核の物理

この講義で何をカバーするのか(概観)

## 2. 1粒子ハロー核の性質

角運動量とハロー現象

## 3. 非束縛核と共鳴現象

ポテンシャル共鳴の一般論

1陽子放出

## 4. 変形した不安定核

結合チャンネル系の束縛状態と共鳴状態

## 5. 原子核における対相関と2中性子ハロー核

ボロミアン核、ダイニュートロン相関

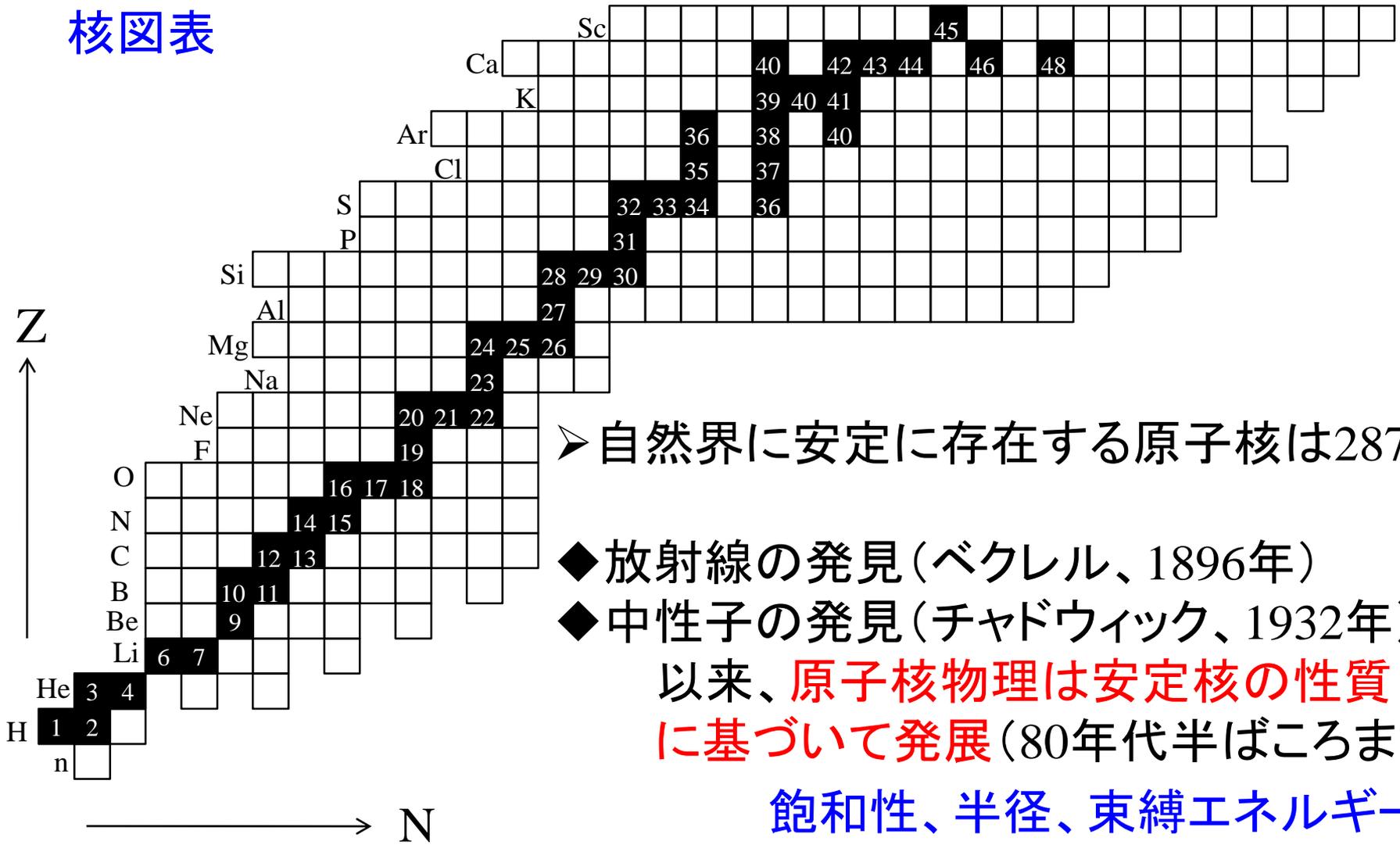
## 6. 3体模型による記述

## 7. 2核子放出崩壊現象(2陽子放出、2中性子放出)

ハドロン分野のM1やM2が聞いても面白いと思える講義(にしたい)

# イントロダクション

## 核図表



➤ 自然界に安定に存在する原子核は287種

- ◆ 放射線の発見 (ベクレル、1896年)
  - ◆ 中性子の発見 (チャドウィック、1932年)
- 以来、**原子核物理は安定核の性質に基づいて発展** (80年代半ばころまで)

飽和性、半径、束縛エネルギー  
魔法数と独立粒子描像、、、、

# 原子核物理は安定核の性質に基づいて発展

→ そうは言っても、自然な疑問として

「陽子数が与えられたときに、中性子は何個まで安定にくっつくのか？」

古くから関心は持たれていた。

“Int. Symp. on why and how should we investigate nucleides far off the stability line”, Lysekil, Sweden (1966). など

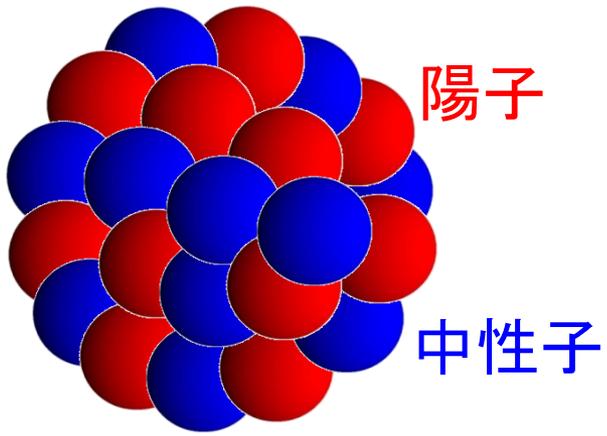
当時、関心が持たれていた事

- 何個まで中性子は束縛するか？
- 安定核で作られたモデルはどのくらい成り立つか？
- r-プロセス元素合成



今もあまり変わらない(?)

+ 弱束縛になることによって見え始める物理はあるか？



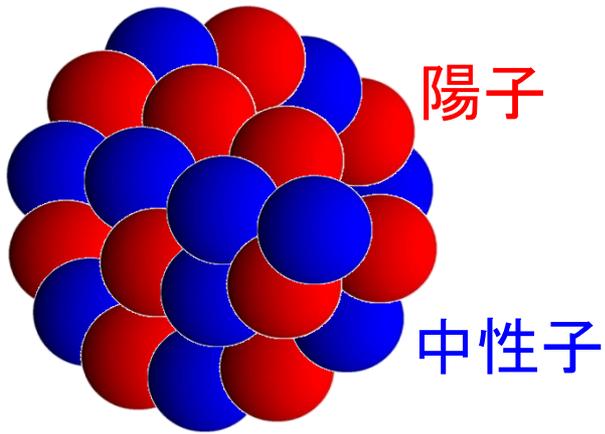
原子核 = 強い相互作用をする  
粒子(核子)の集合体

- 有限量子多体系
- 自己束縛系

- 核子はじっとしているわけではない  
(比較的自由に動きまわっている)
- ただし、完全に自由というわけではない(相関)  
お互いに飛び出すことのないよう  
に引っ張りあいながら一定の形  
を保っている

「自己束縛系」

陽子と中性子という2種類の粒子が織りなす相関  
→ 豊富で多様な物理現象



陽子

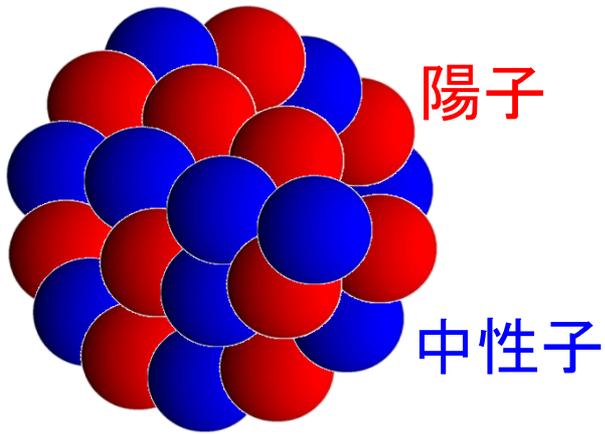
中性子

- 核子はじっとしているわけではない  
(比較的自由に動きまわっている)
- ただし、完全に自由というわけではない  
お互いに飛び出すことのないよう  
に引っ張りあいながら一定の形  
を保っている

自己束縛系

(例えば)ここに外から光を当てて熱くしてやったら核子は  
どんな振る舞いをする?

核子の動きが激しくなるだけ?

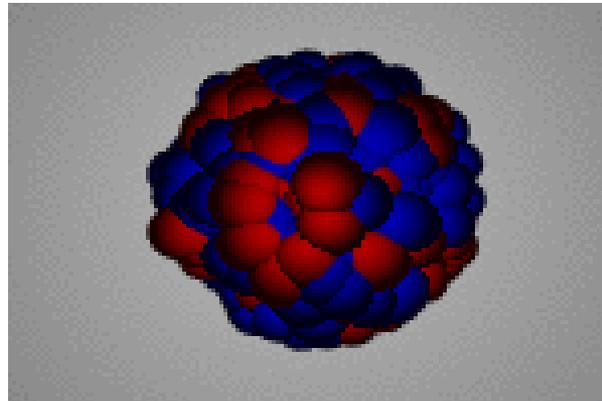


- 核子はじっとしているわけではない  
(比較的自由に動きまわっている)
- ただし、完全に自由というわけではない  
お互いに飛び出すことのないよう  
に引っ張りあいながら一定の形  
を保っている

自己束縛系

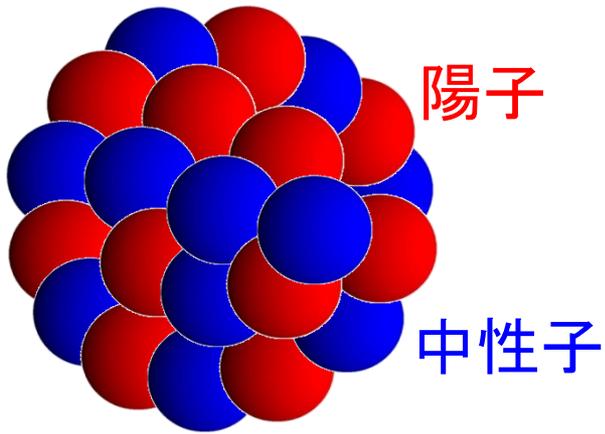
(例えば)ここに外から光を当てて熱くしてやったら核子は  
どんな振る舞いをする?

核子の動きが激しくなるだけ?



規則正しい運動  
をすることがある

集団運動

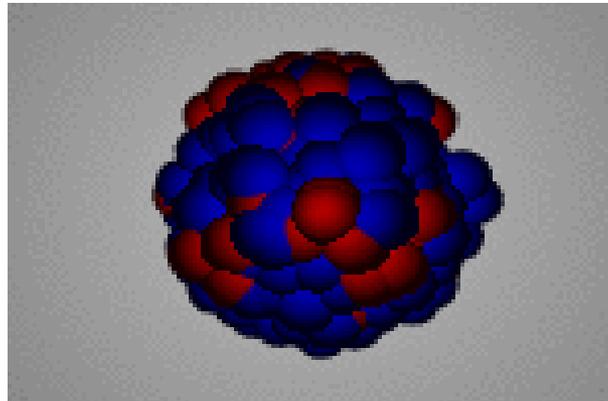
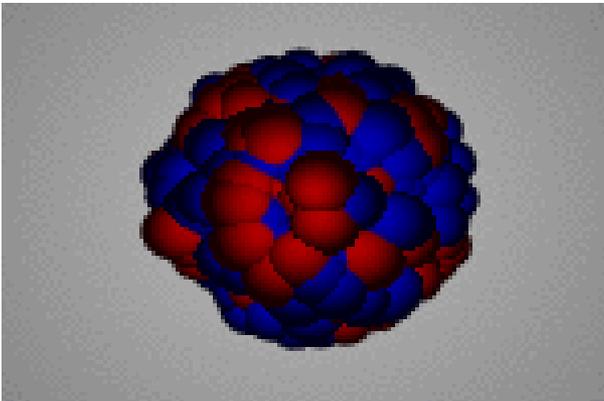


- 核子はじっとしているわけではない  
(比較的自由に動きまわっている)
- ただし、完全に自由というわけではない  
お互いに飛び出すことのないよう  
に引っ張りあいながら一定の形  
を保っている

自己束縛系

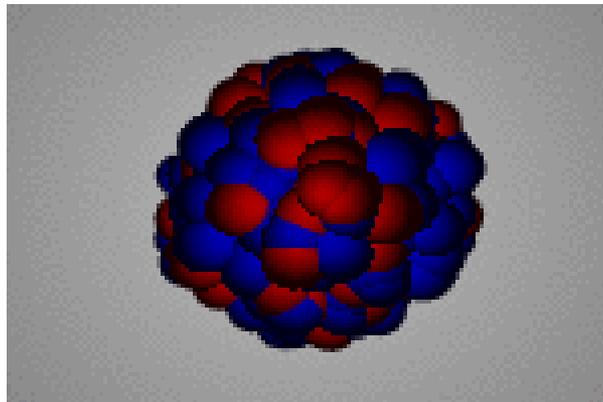
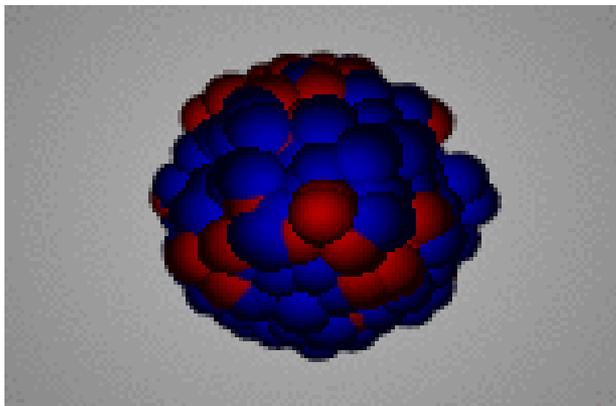
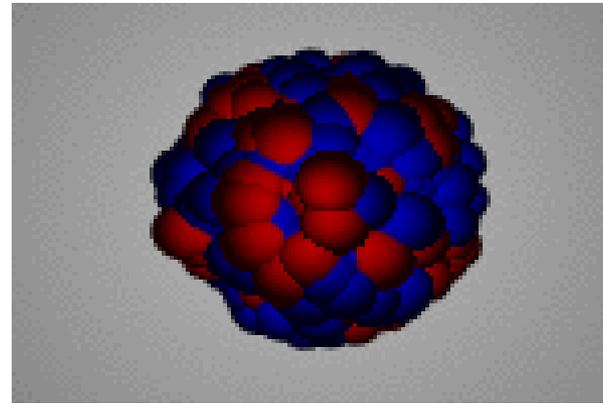
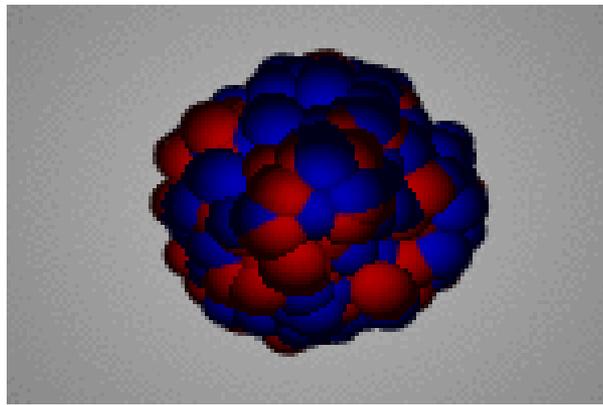
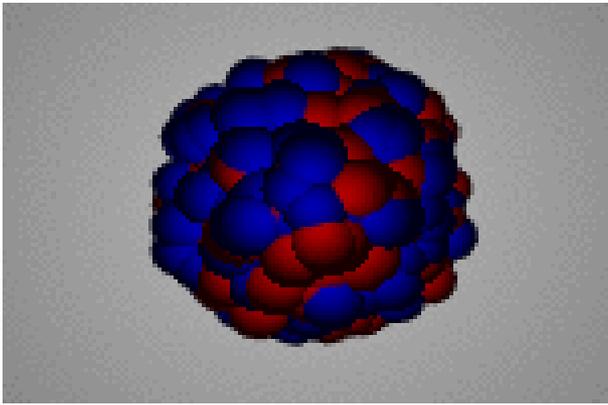
(例えば)ここに外から光を当てて熱くしてやったら核子は  
どんな振る舞いをする?

核子の動きが激しくなるだけ?



規則正しい運動  
をすることがある

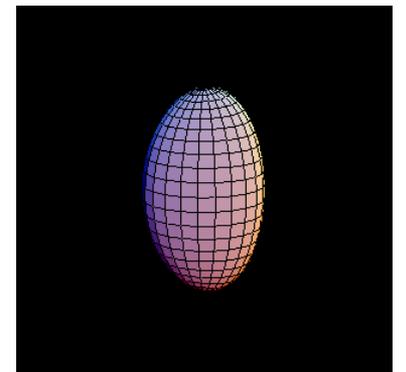
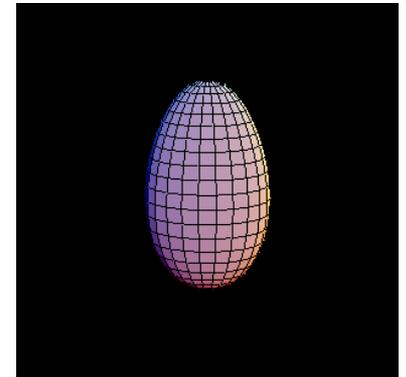
集団運動

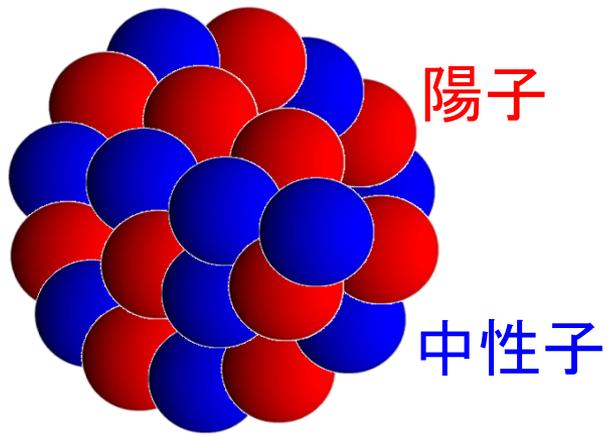


規則正しい運動  
をすることがある

集団運動

バラエティー  
豊か





原子核 = 強い相互作用をする  
粒子(核子)の集合体

- 有限量子多体系
- 自己束縛系

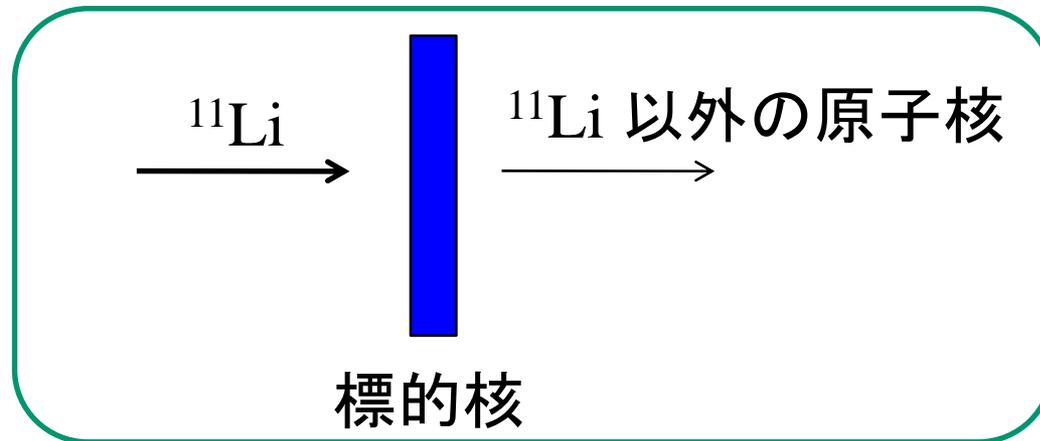
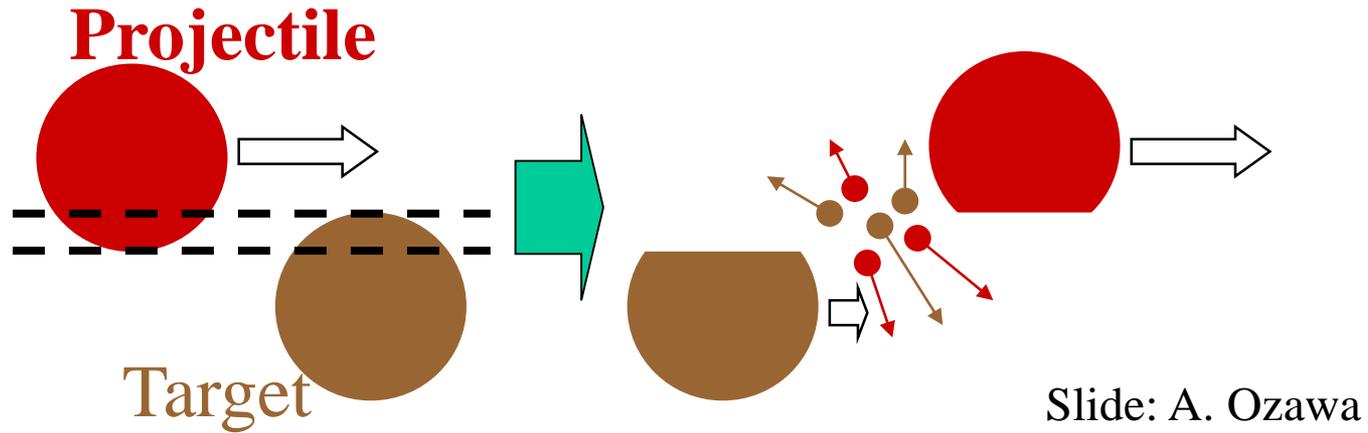
陽子と中性子という2種類の粒子が織りなす相関  
→豊富で多様な物理現象

### 不安定核の物理:

陽子・中性子数の人工的制御によって原子核の新しい形態  
を明らかにする

中性子過剰・陽子過剰な原子核の性質は?  
安定な原子核に比べて何が変わるのか?

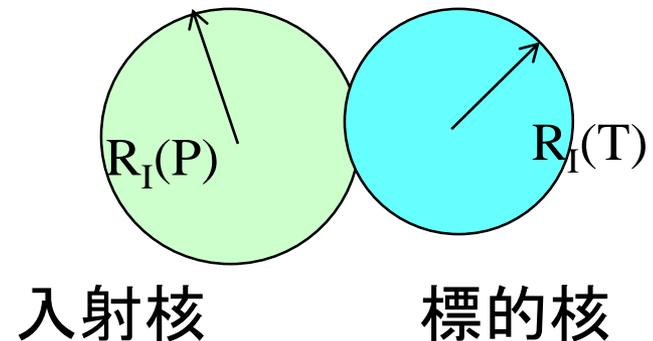
# 不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)



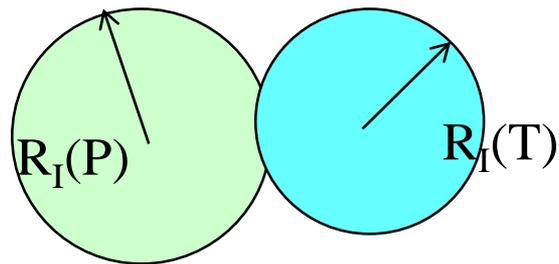
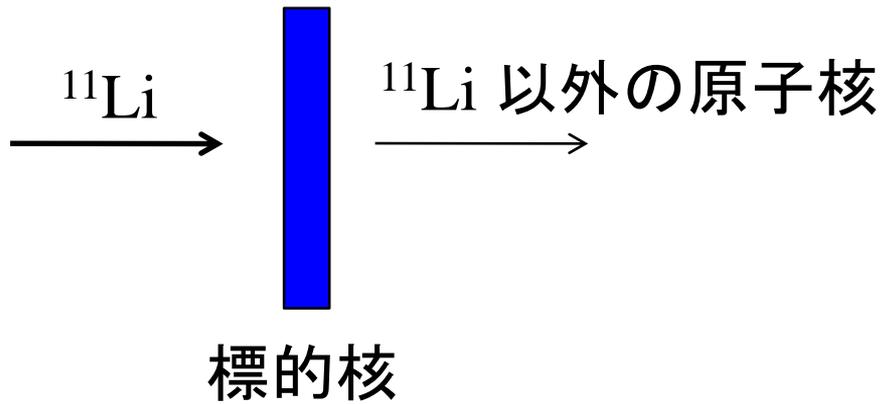
2つの原子核が重なった時に  
反応が起こるとすると

$$\sigma_I \sim \pi [R_I(P) + R_I(T)]^2$$

→  $R_I(P)$



# 不安定核研究の本格的幕開け: 相互作用断面積測定 (1985)

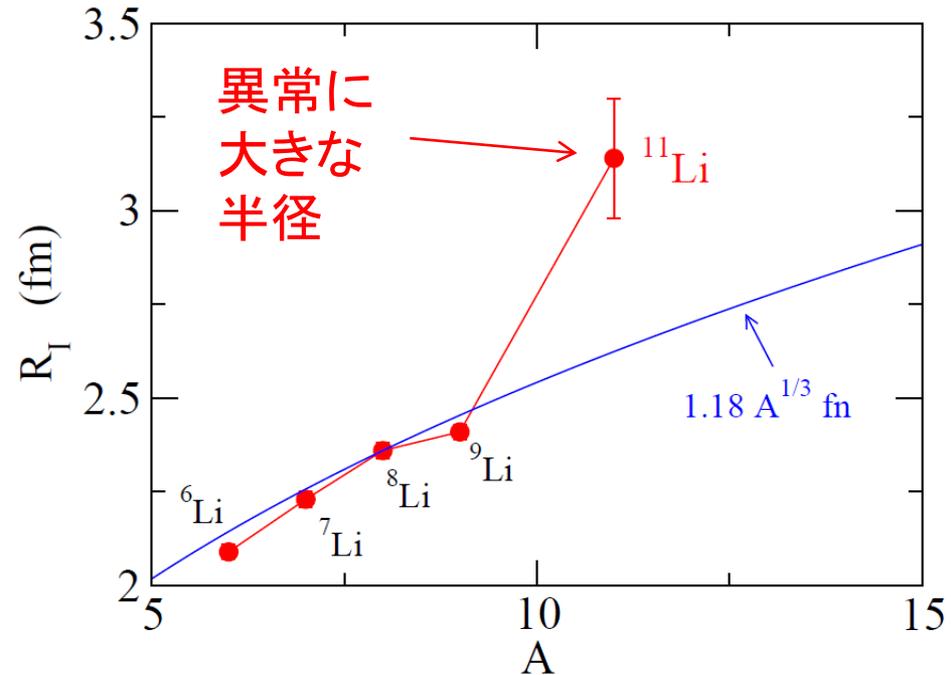


入射核 標的核

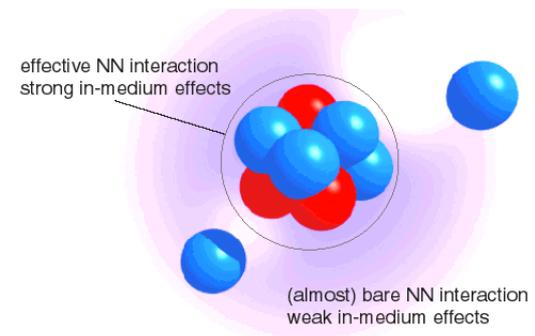
2つの原子核が重なった時に  
反応が起こるとすると

$$\sigma_I \sim \pi [R_I(P) + R_I(T)]^2$$

$$\longrightarrow R_I(P)$$



I. Tanihata et al., PRL55 ('85) 2676

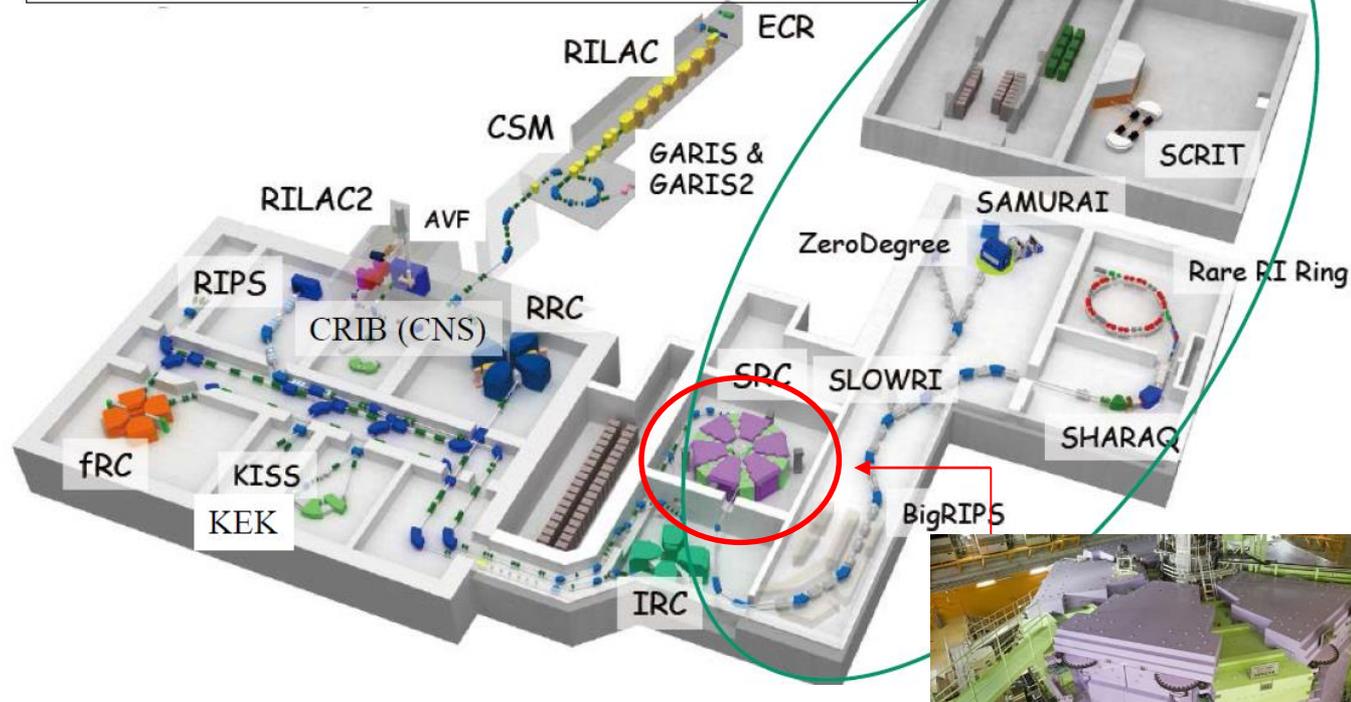


ハローの発見

# 新世代不安定核ビーム施設: 理研 RIBF (2007~)

## 世界最大強度で不安定核を作り出す施設

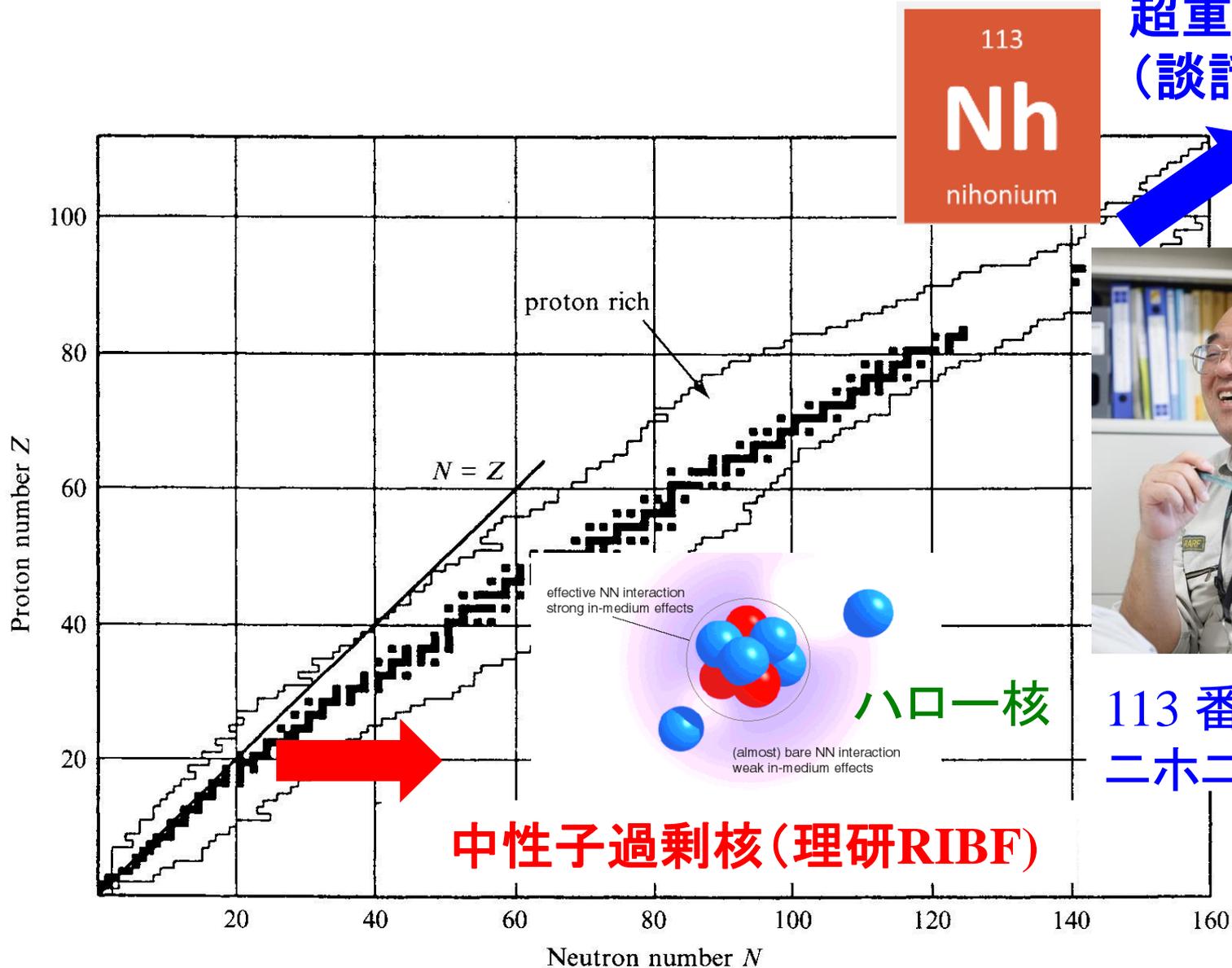
RI 「放射性同位元素 (RI)」を  
B 「ビーム」としてとりだし  
F 「ファクトリー」のように大量生産する。



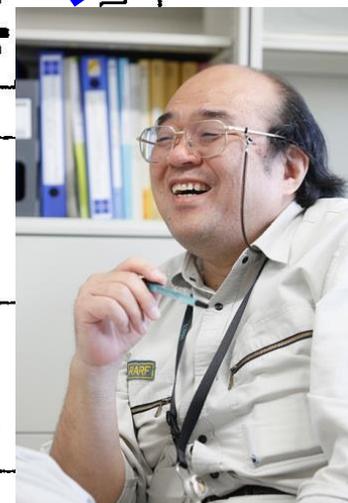
- 不安定原子核の物理
- 元素の起源の研究
- 超重元素 (新元素113番) の研究

スライド: 櫻井博儀氏

# 核図表の拡大: 原子核物理のフロンティア



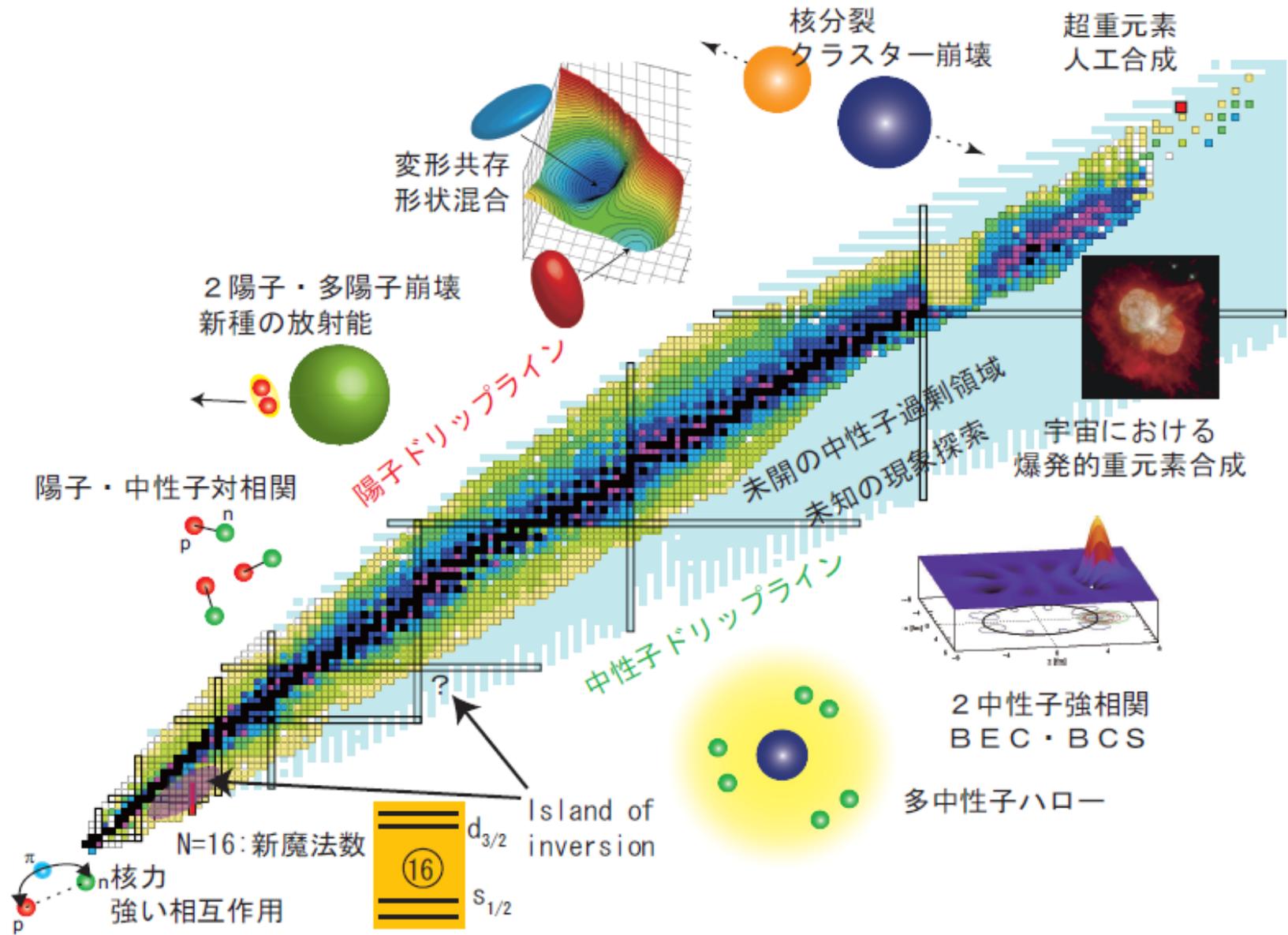
超重核  
(談話会で)



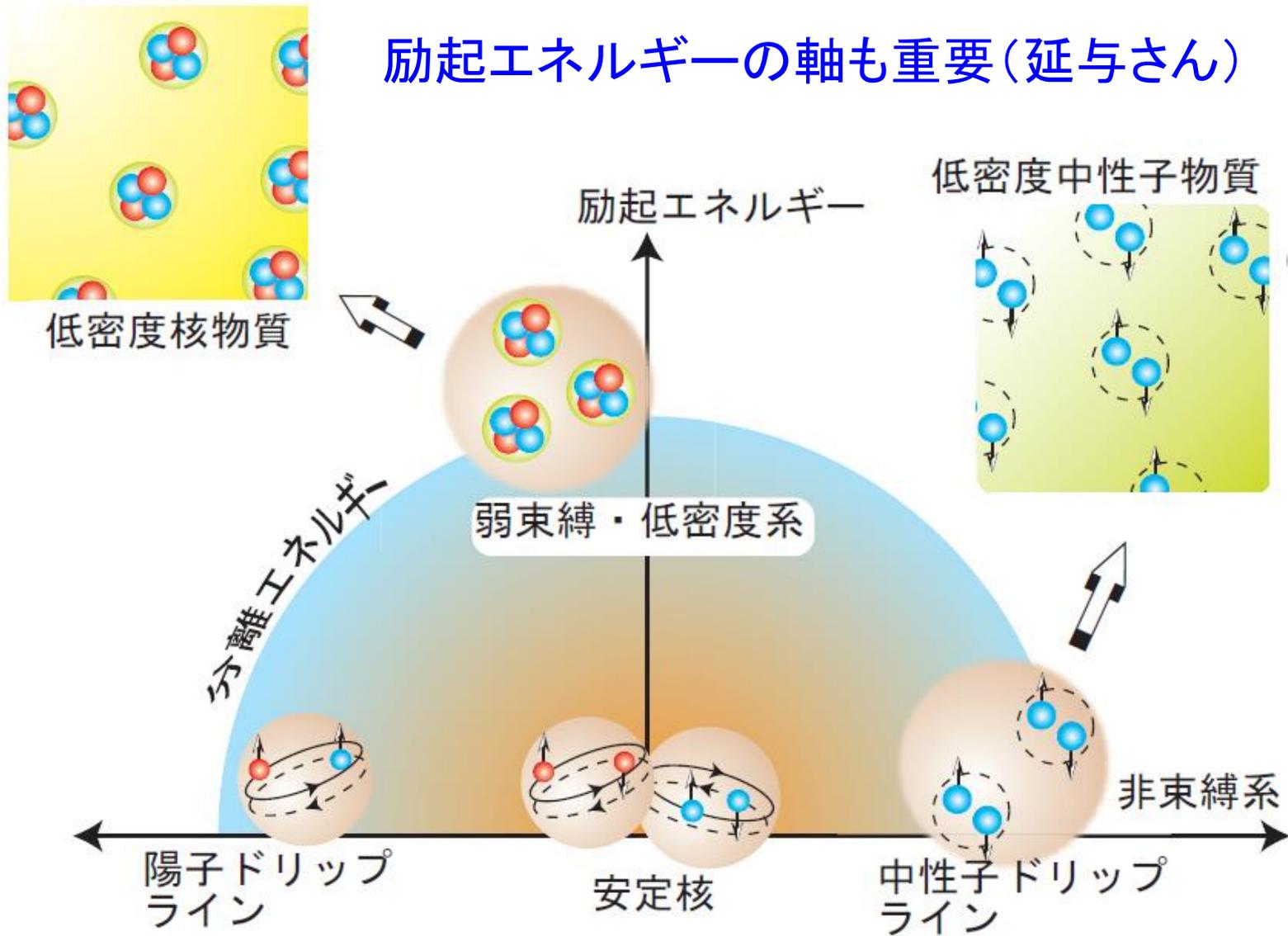
113 番元素  
ニホニウム

中性子過剰核(理研RIBF)

# 陽子過剰核・中性子過剰核の物理



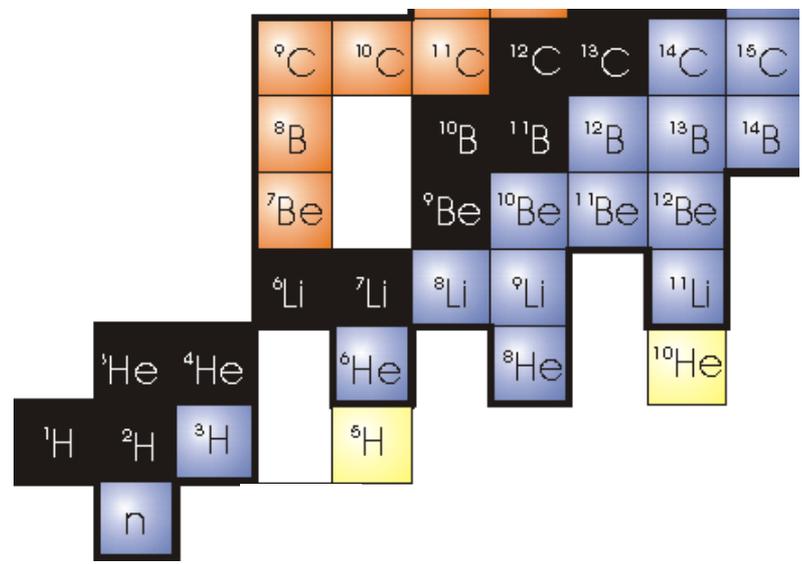
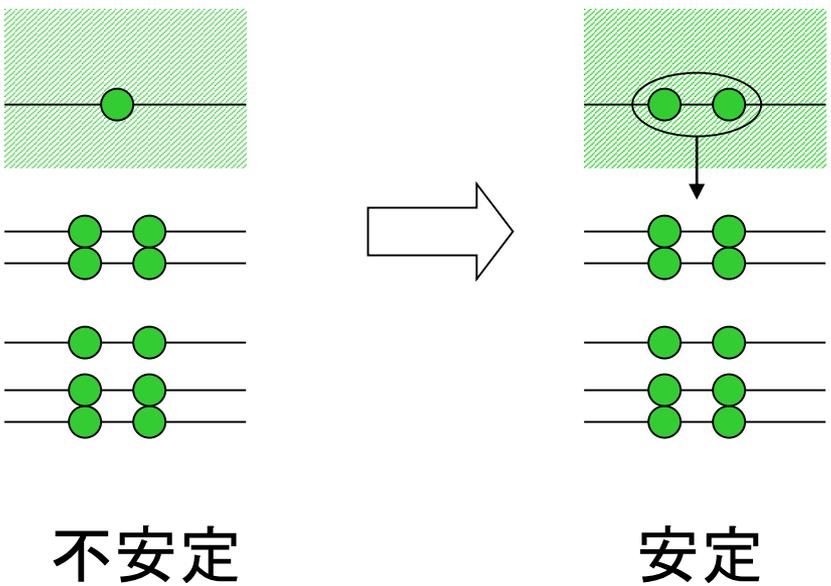
# 励起エネルギーの軸も重要(延与さん)



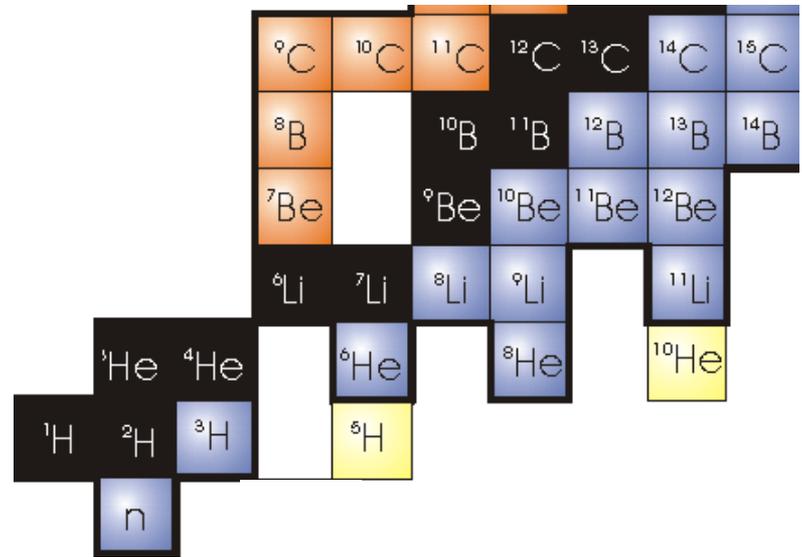
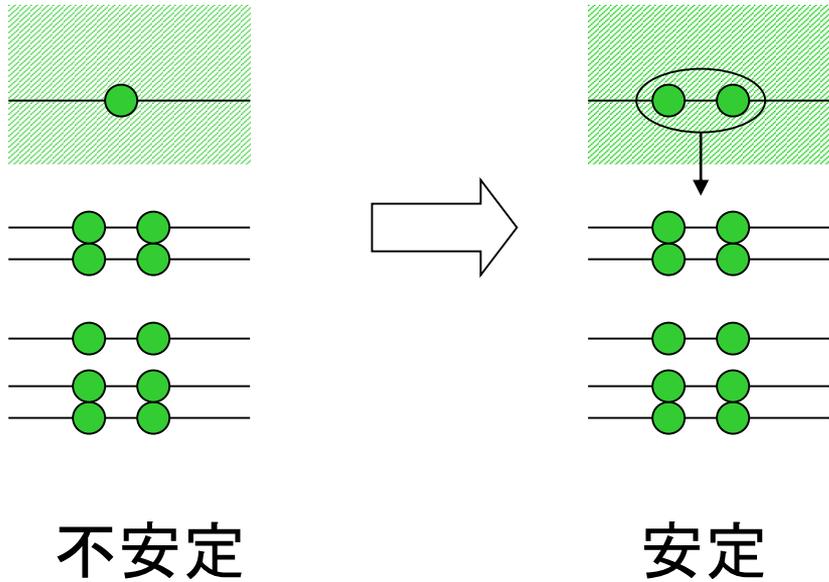
安定核でも励起エネルギーを上げれば弱束縛になる



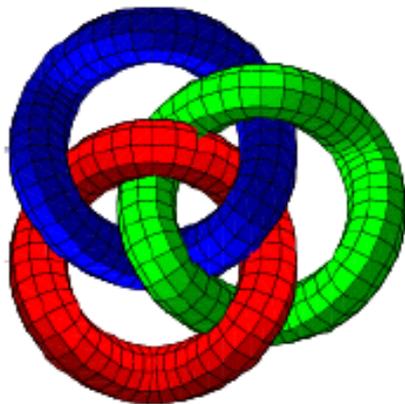
# 核子間の対相関のため



# 核子間の対相関のため



## ボロミアン原子核

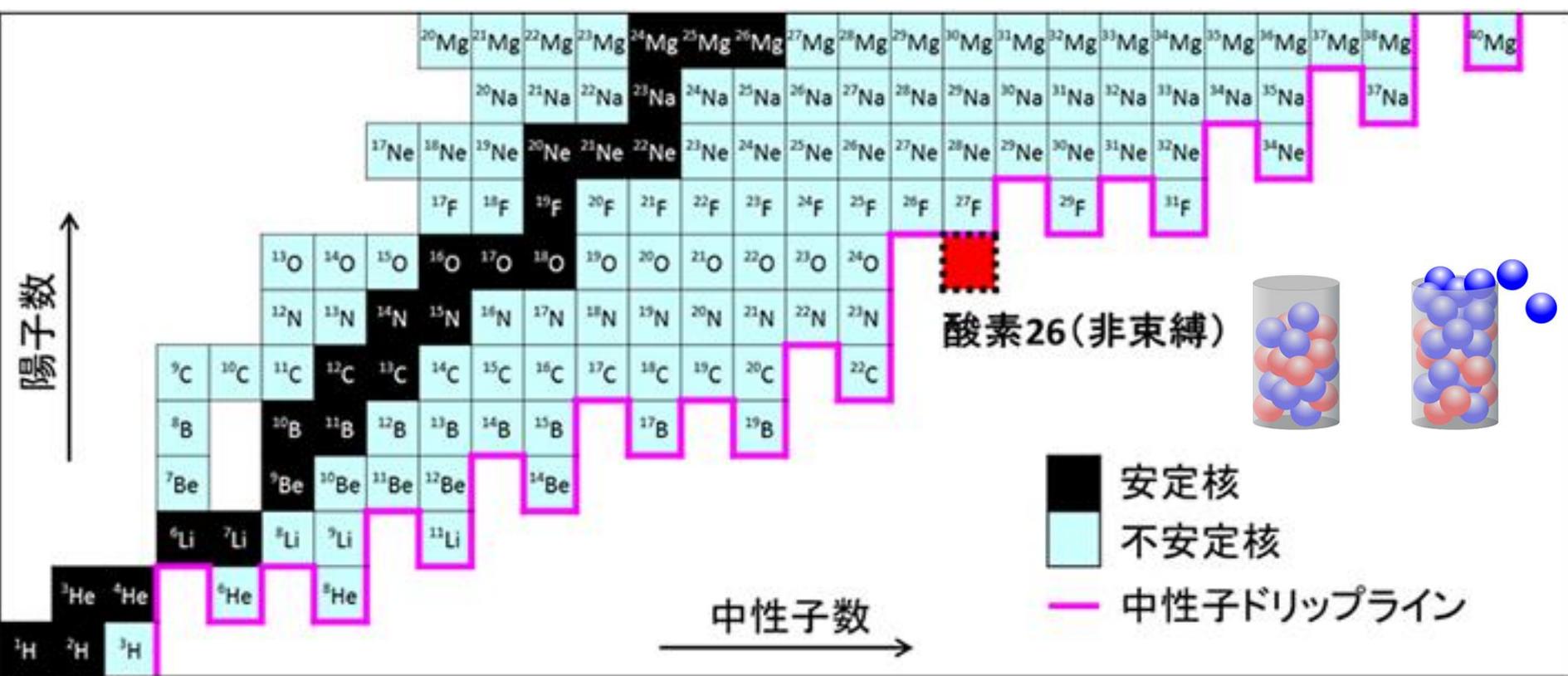


2体では束縛しないが3体系として束縛

$${}^6\text{He} = {}^4\text{He} + n + n$$

$${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + n + n \quad \text{など}$$

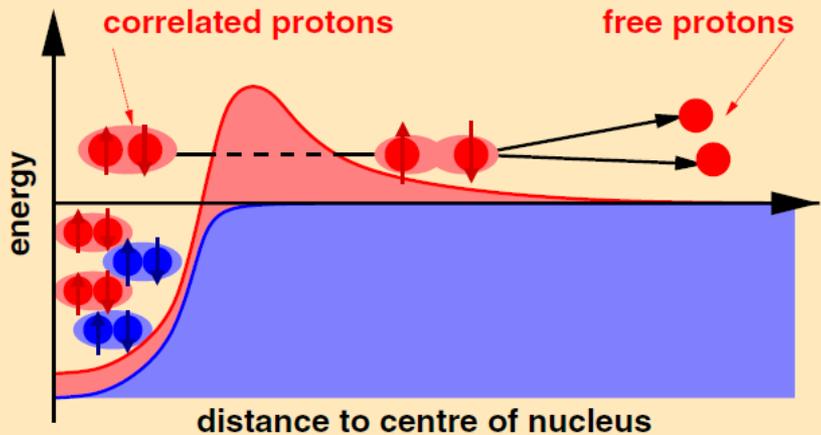
ボロミアン原子核のダイナミクス  
:3日目の講義で



東工大プレスリリースの図より

- ✓ なぜドリップラインがギザギザなのか? → 対相関のため
- ✓ ドリップラインを越えても、障壁があれば共鳴状態として原子核が存在

共鳴状態の崩壊に対相関がどのような影響を与える?  
3日目の講義で

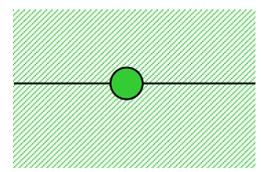


障壁:

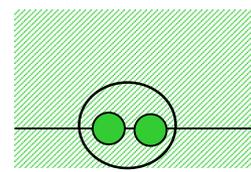
- ✓ クーロン+遠心力(陽子の場合)
- ✓ 遠心力(中性子の場合)

B. Blank and M. Ploszajczak, Rep. Prog. Phys. 71('08)046301

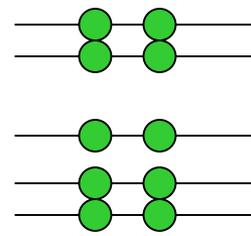
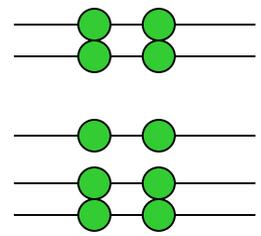
共鳴状態



→ 崩壊



→ 崩壊



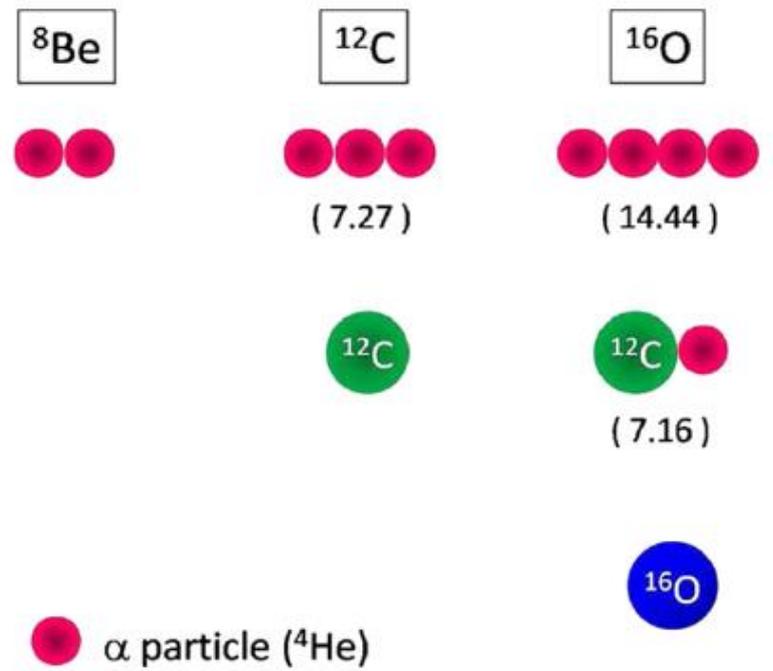
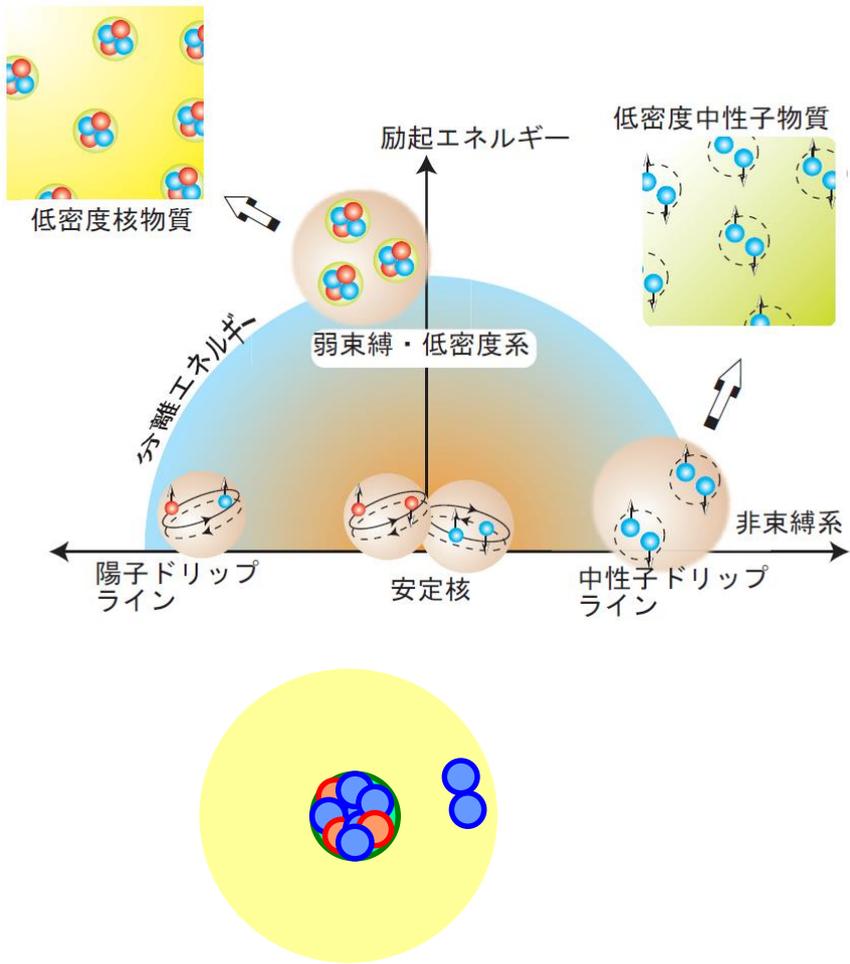
1粒子放出の場合

2粒子放出の場合

ドリップラインの物理 = 弱束縛核の物理  
と多体共鳴の物理

# ハドロン物理との共通項?

## ➤ クラスタ化



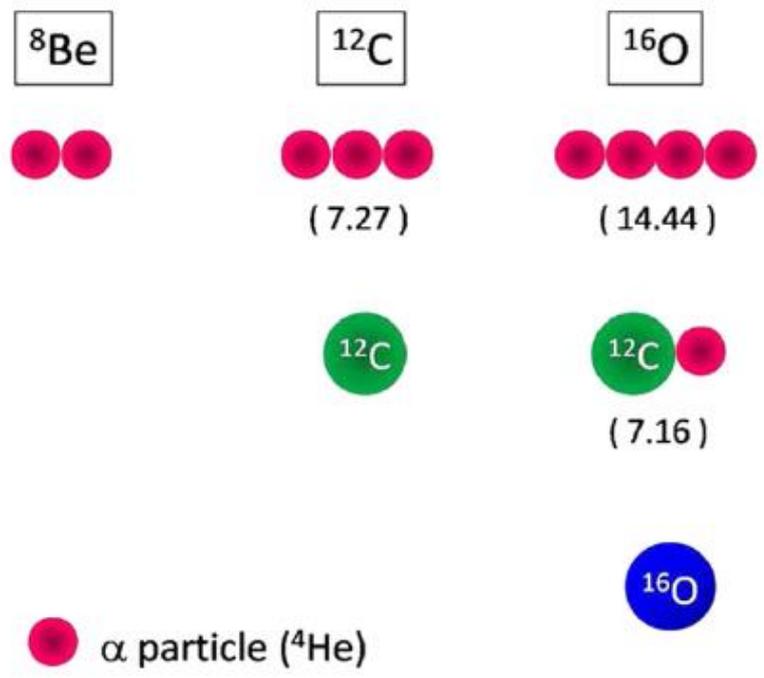
IKEDA Diagram  
しきい値則

D. Jenkins, J. Phys. G43 ('16) 024003

ダイニュートロン相関  
(最外殻2中性子のクラスター)

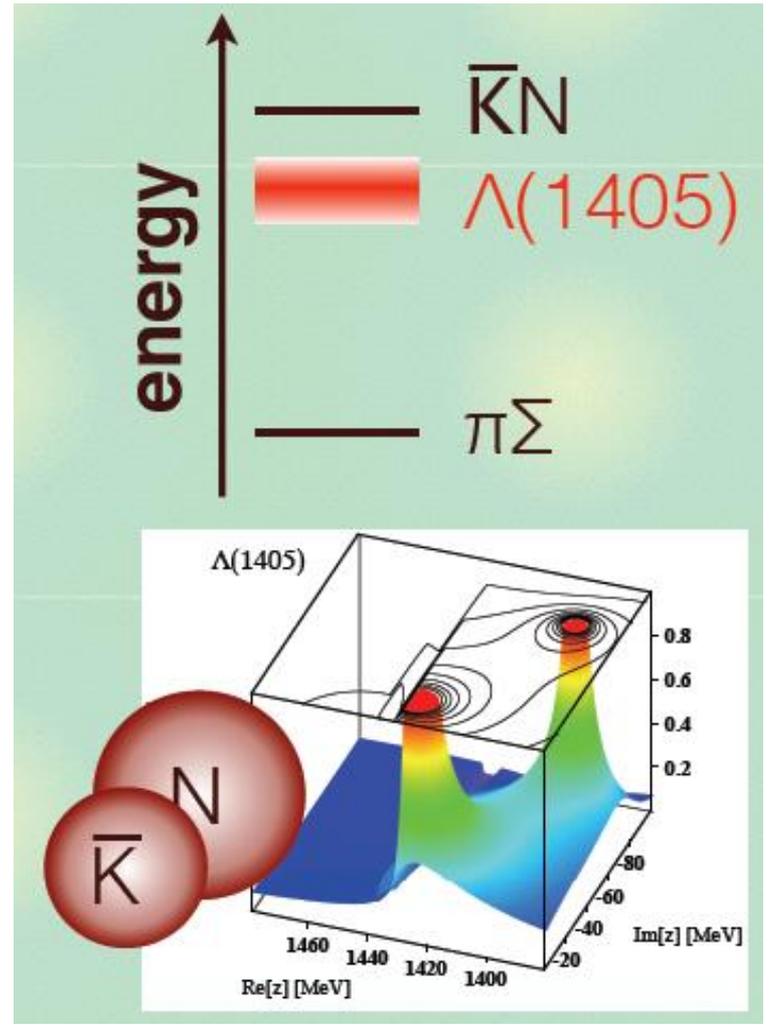
# ハドロン物理との共通項?

## ➤ クラスター化



IKEDA Diagram

D. Jenkins, J. Phys. G43 ('16) 024003

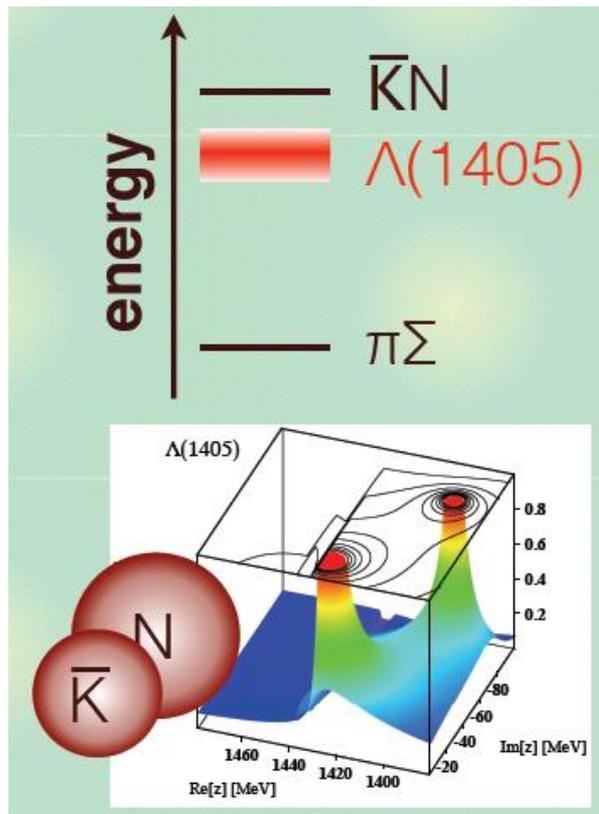
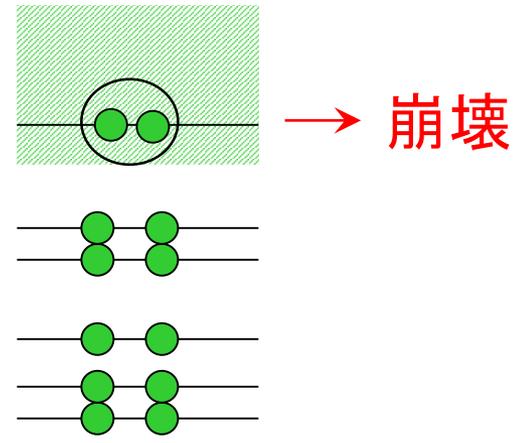


兵藤哲雄氏のスライドより

# ハドロン物理との共通項?

## ➤ 共鳴状態の物理

ドリップラインの物理 = 弱束縛核の物理  
と多体共鳴の物理



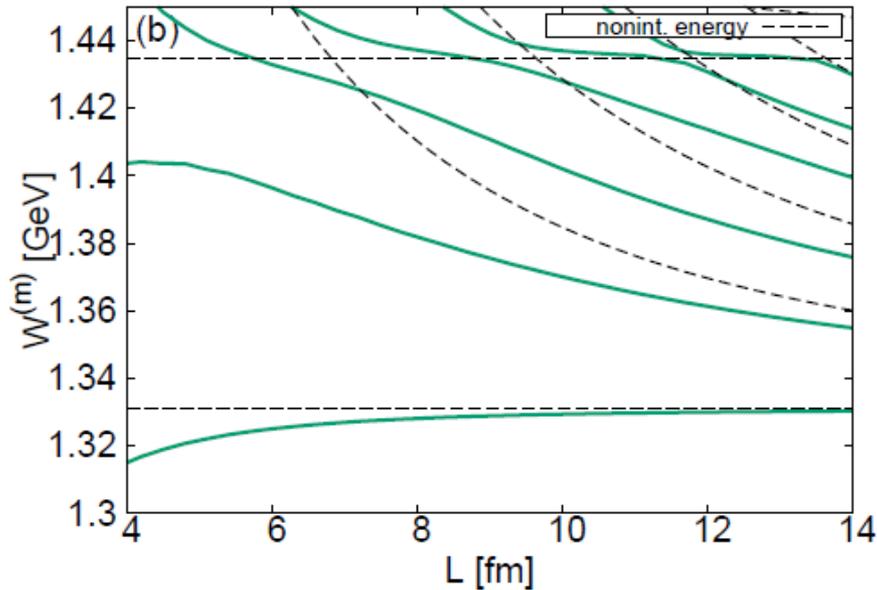
多くのハドロン共鳴

共鳴状態の一般論:  
明日の講義で

# ハドロン物理との共通項?

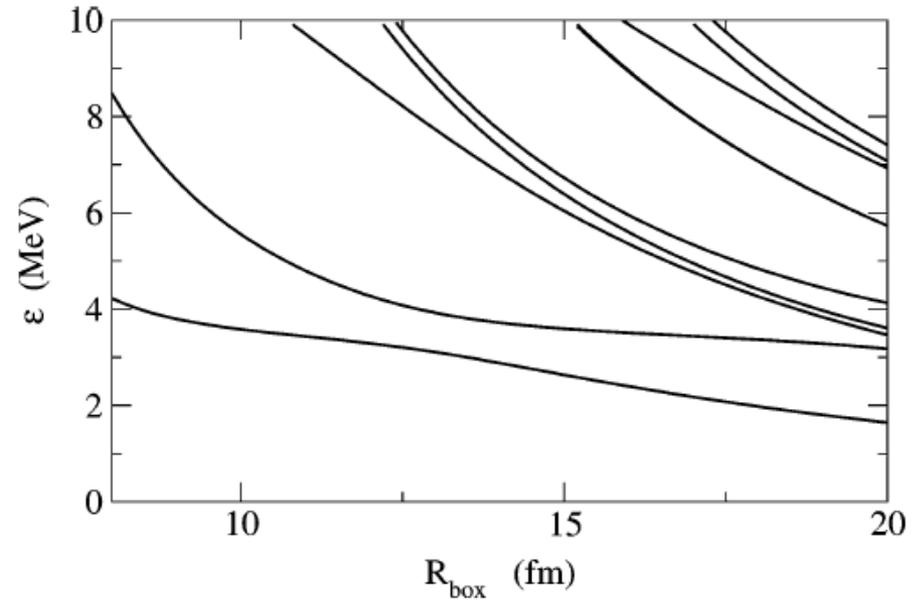
## ➤ 共鳴状態の物理

KbarN -  $\pi\Sigma$  系  
の固有エネルギー



Y. Tsuchida and T. Hyodo,  
arXiv: 1703.02675

$^{44}\text{S}$  系の中性子一粒子エネルギー  
(変形 $\rightarrow$ 結合チャンネル)



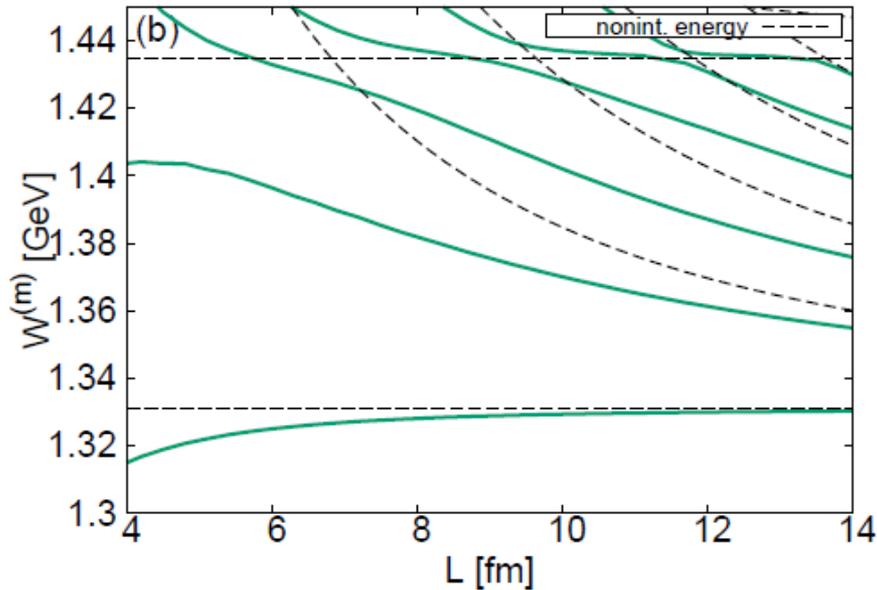
K. Hagino and N. Van Giai,  
Nucl. Phys. A735 ('04) 55

結合チャンネル系の共鳴現象: 明日の講義で

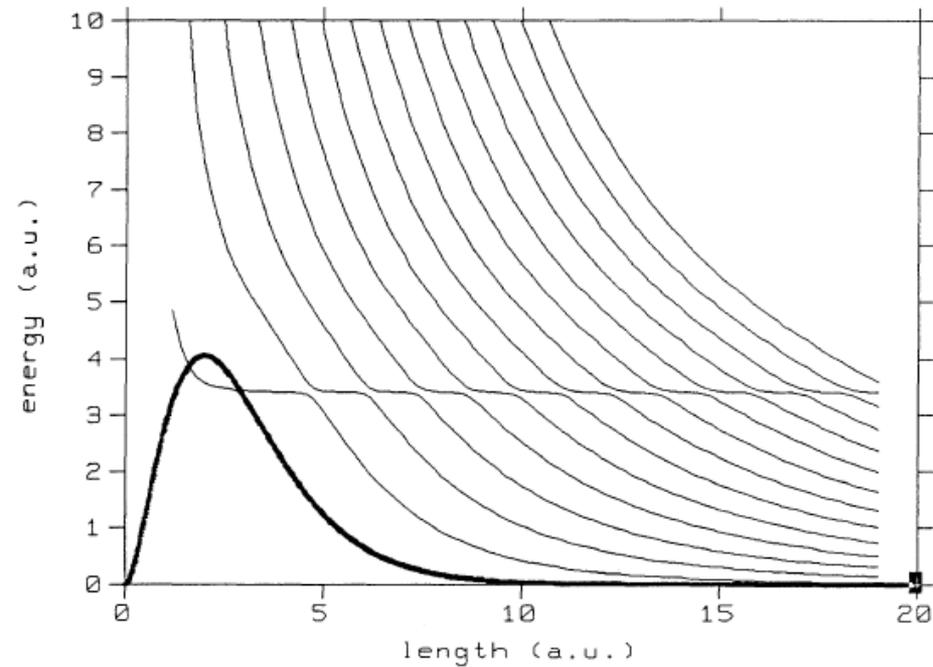
# ハドロン物理との共通項?

## ➤ 共鳴状態の物理

KbarN -  $\pi\Sigma$  系  
の固有エネルギー



Y. Tsuchida and T. Hyodo,  
arXiv: 1703.02675



V.A. Mandelshtam, T.R. Ravuri,  
and H.S. Taylor, PRL 70 ('93) 1932

A.U. Hazi and H.S. Taylor,  
PRA 1 ('70) 1109

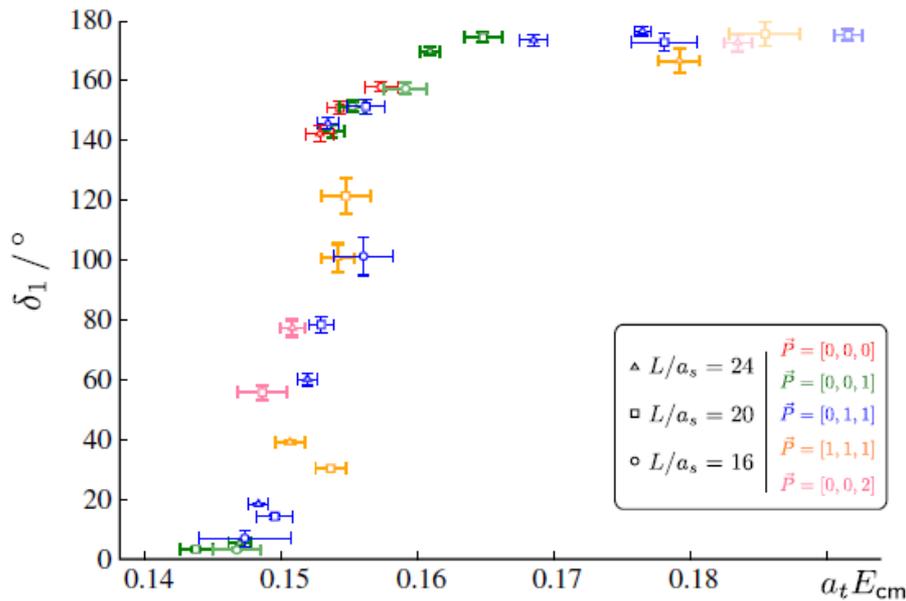
“stabilization method” (量子化学)

何故共鳴準位は安定化するのか? → 明日の講義で

# 共鳴 $\longleftrightarrow$ 位相のずれ (phase shift) の振る舞い

明日の講義で

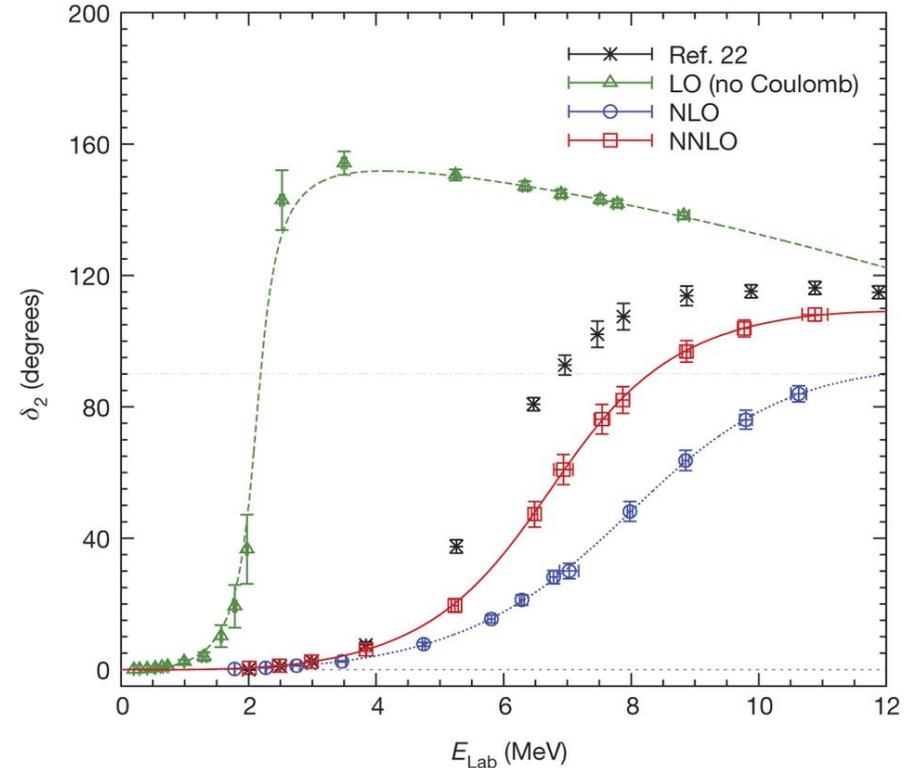
## Lattice QCD による phase shift の計算 ( $\pi$ - $\pi$ 散乱)



J.J. Dudek, R.G. Edwards, C.E. Thomas,  
PRD87 ('13) 034505

Lüscher の方法

## $\alpha\alpha$ 散乱の lattice 計算



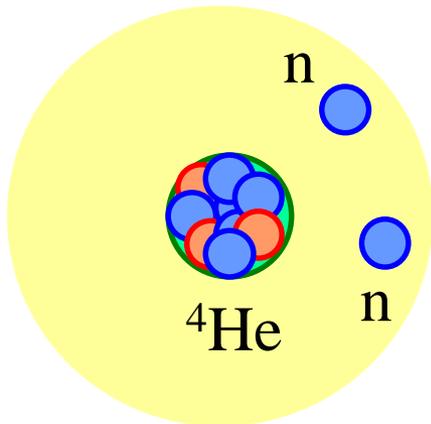
S. Elhatisari, D. Lee, et al.,  
Nature 528 ('15) 111

# ハドロン物理との共通項?

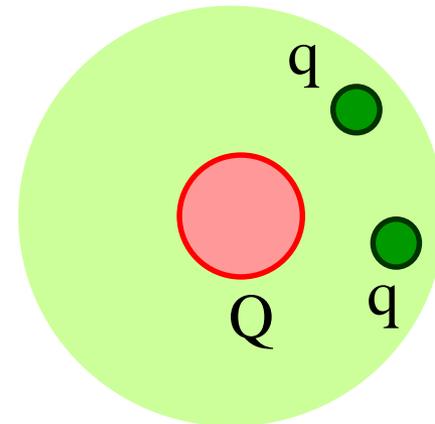
## ➤ 3体系の物理

$${}^6\text{He} = {}^4\text{He} + n + n$$

$${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + n + n$$



チャーム・クォークを  
含んだバリオン

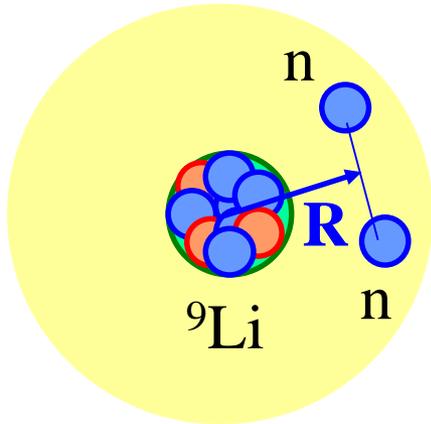


# ハドロン物理との共通項?

## ➤ 3体系の物理

$${}^6\text{He} = {}^4\text{He} + n + n$$

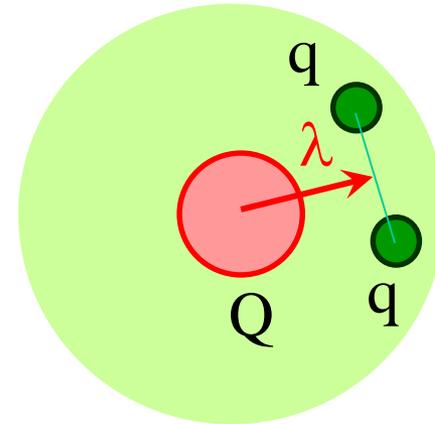
$${}^{11}\text{Li} = {}^9\text{Li} + n + n$$



$$\hat{T}_{E1} \propto R$$

E1励起

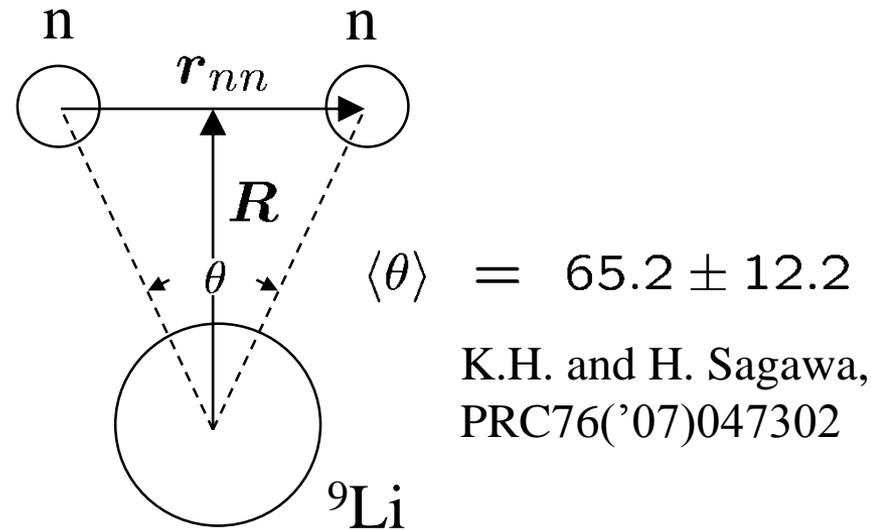
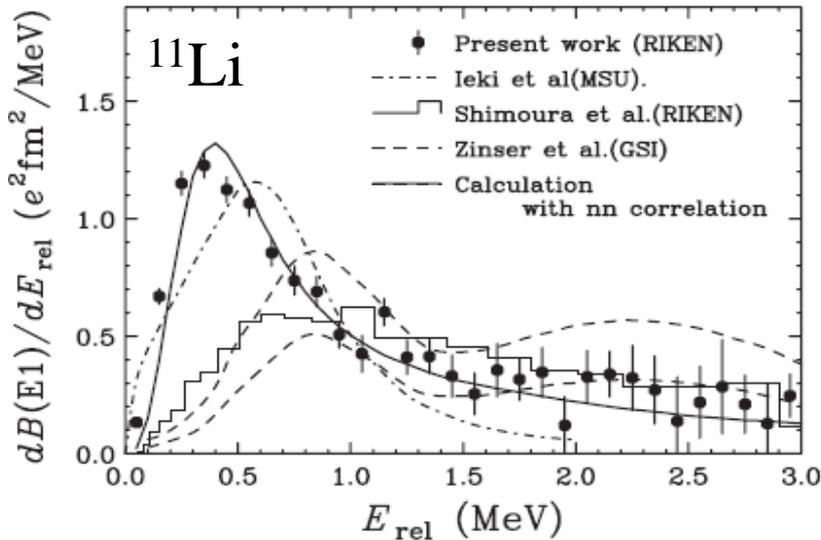
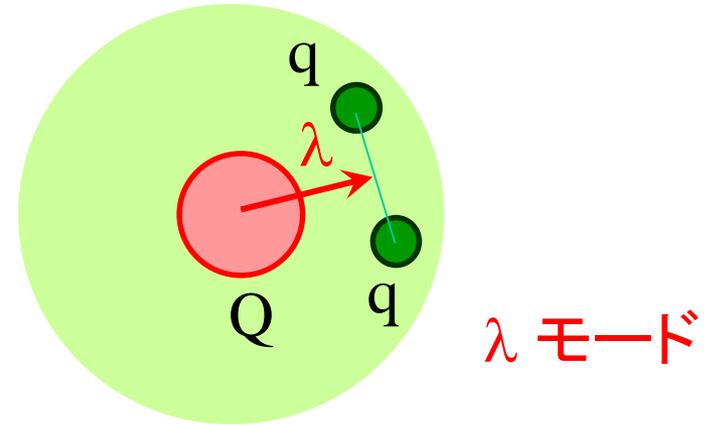
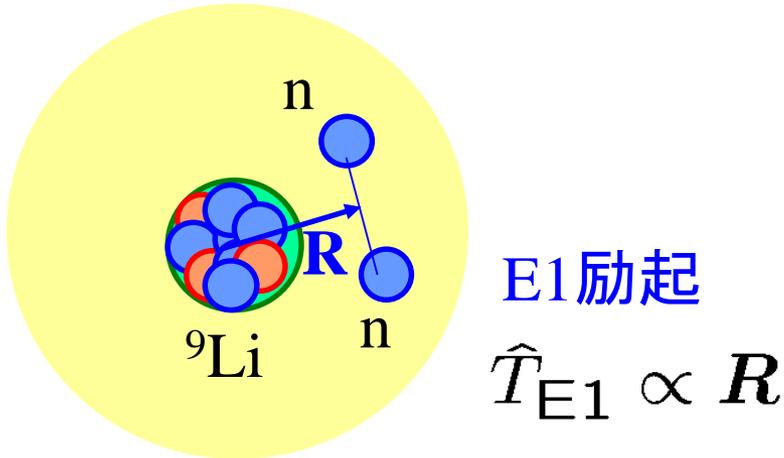
チャーム・クォークを  
含んだバリオン



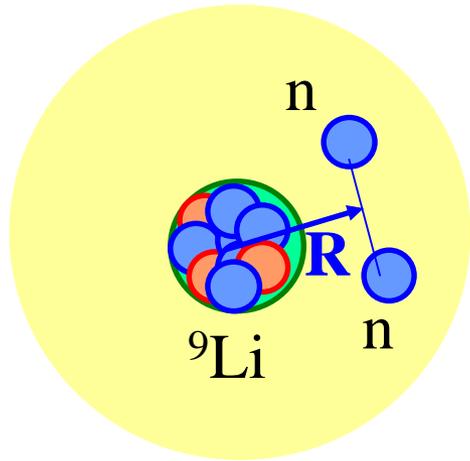
λモード

# ハドロン物理との共通項?

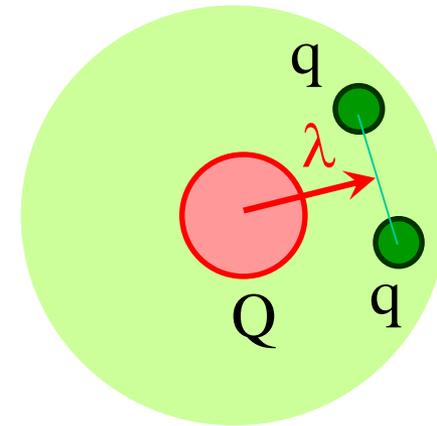
## ➤ 3体系の物理



# ハドロン物理との共通項?

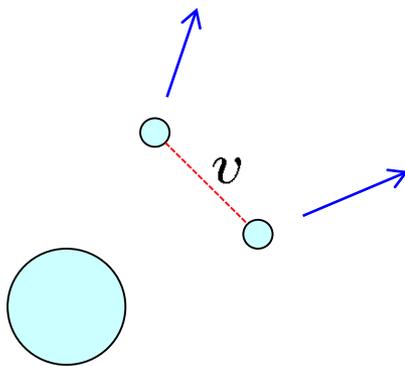


E1励起  
 $\hat{T}_{E1} \propto R$

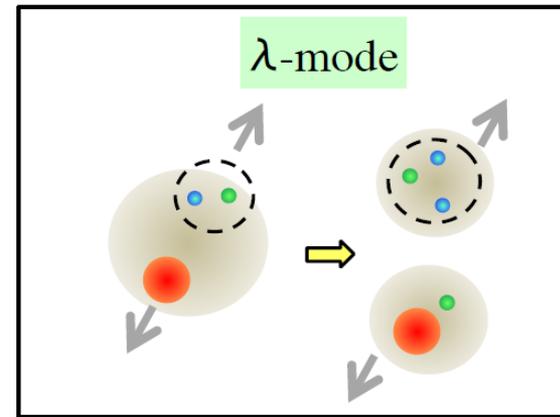


λモード

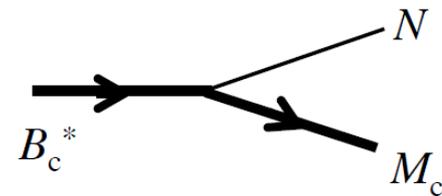
終状態



終状態: 閉じ込め



不変質量を組めば  
 同じように議論できる?



スライド: 保坂淳氏

## ➤ 講義ノート

<http://www.nucl.phys.tohoku.ac.jp/~hagino/lecture2.html>

「東北大学原子核理論」→「萩野浩一」  
→「講義ノート」→「他大学での集中講義」

## ➤ 成績

出席＋レポート

### レポート問題:

この講義で自分が新たに知ったトピックスまたは新たに理解したトピックスに関し、A4一枚(以上)で説明してください。

### 提出先:

[hagino@nucl.phys.tohoku.ac.jp](mailto:hagino@nucl.phys.tohoku.ac.jp) にメール  
受領確認のメールを出します。

### ×切:

7月7日(でいいですか?)