

反対称化分子動力学法による 原子核クラスター現象の解明

京都大学 延与佳子

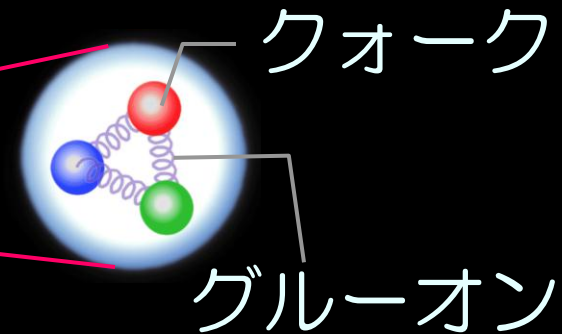
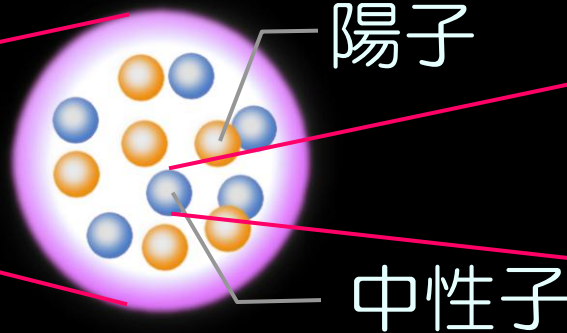
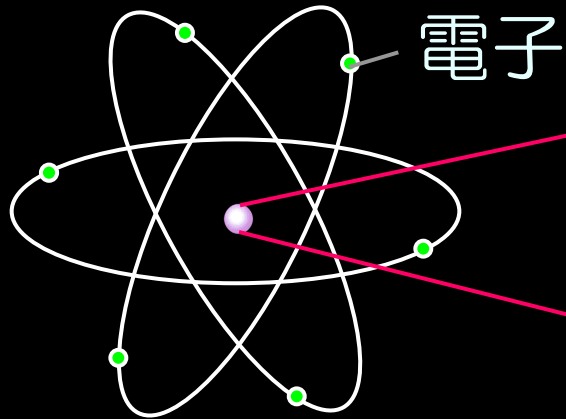
1. はじめに
2. クラスターを記述する理論模型
3. クラスター現象
4. まとめ

1. はじめに

原子

原子核

核子



サイズ 10^{-10}m

数 fm

1 fm

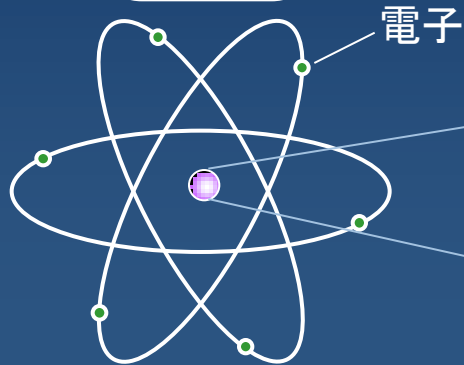
励起
エネルギー eV

MeV

GeV

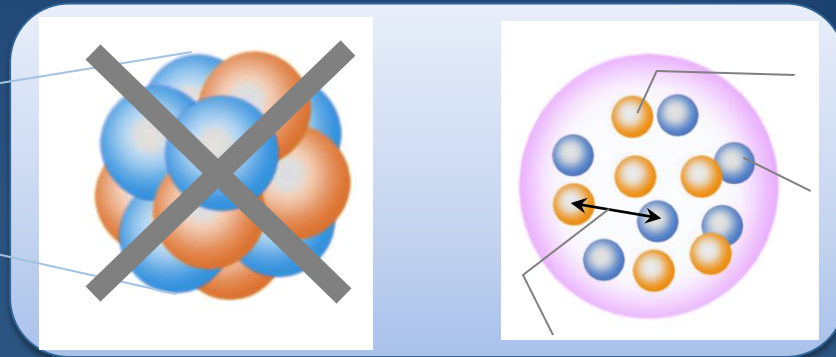
有限量子多体系

原子



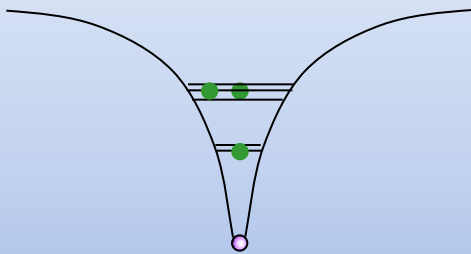
原子核

陽子と中性子の多体系



電子の運動

原子核からの
クーロン力で束縛



核子の運動

核子が自己束縛

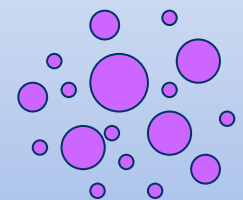
1. 平均場中での独立粒子描像
基底状態近傍

2. 多核子相関

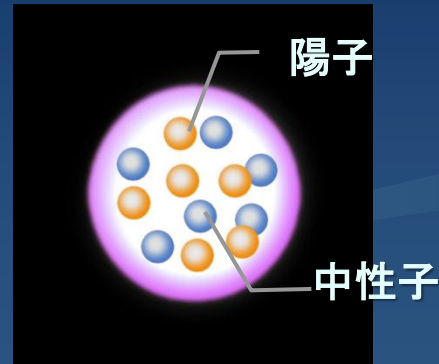
3. エネルギーと密度の飽和則
少しのエネルギーで
複数の塊に分かれる

有限の量子
フェルミオン系

軌道、殻構造



原子核の多面性

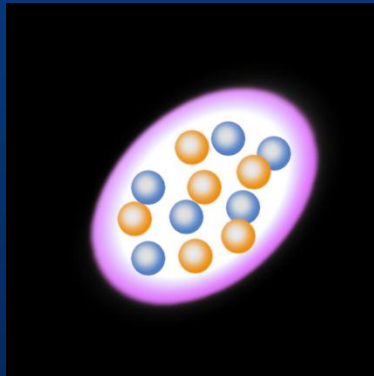


- 2種フェルミオン
- 有限系
- 自己束縛

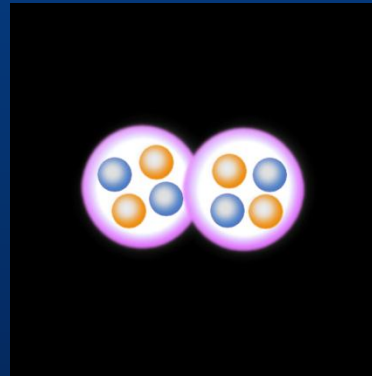
中性子を追加

アイスピンの変化による多様性

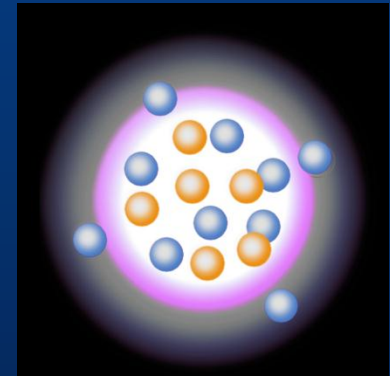
変形構造



クラスター構造



中性子ハロー・スキン



クラスター

有限量子多体系における核子運動

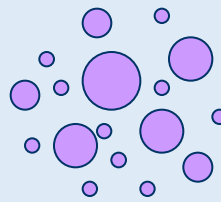
核子が自己束縛

1. 平均場中での独立粒子描像
基底状態近傍

2. 強い多核子相関

3. エネルギーと密度の飽和則
少しのエネルギーで
核子がバラバラ

軌道、殻構造



一粒子運動と多核子相関



多様な現象

[飽和則] エネルギー/質量数 $\sim 8\text{MeV}$, 大きさ $\propto(\text{質量数})^{1/3}$

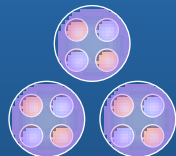
1核子あたりのエネルギー(体積)が原子核によらず一定であるという経験則

励起状態のクラスター構造

基底状態



励起状態

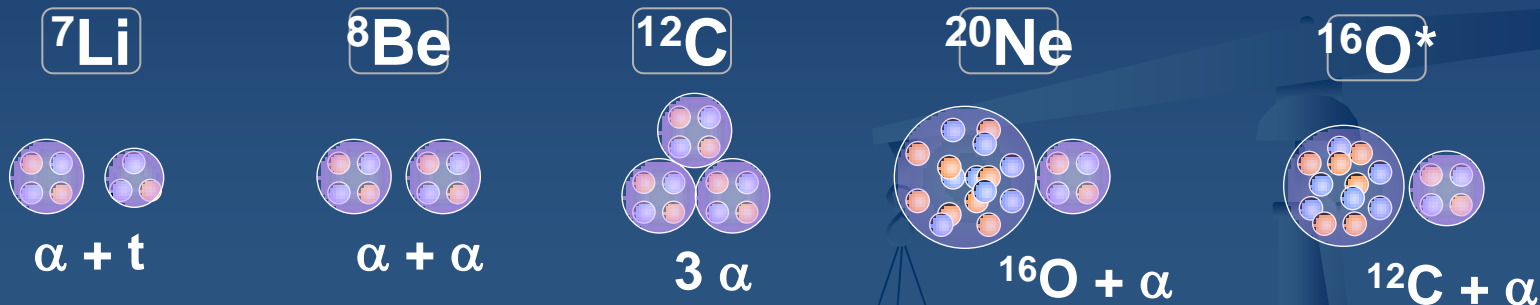


空間的な多核子相関=クラスター

平均場中の独立粒子描像
とクラスターの共存がたびたび起こる

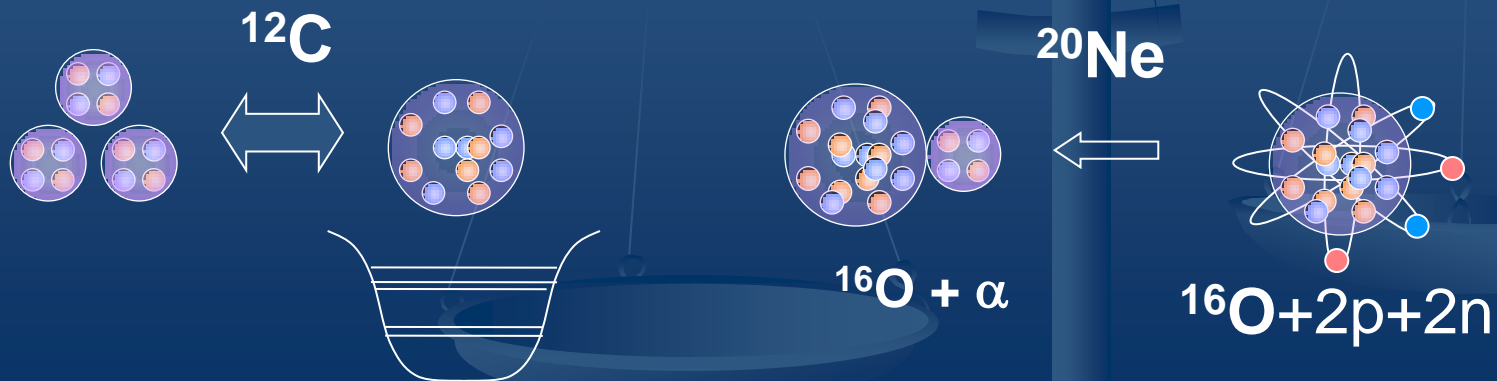
典型的なクラスター構造

軽い安定核のクラスター構造: ${}^7\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{16}\text{O}^*$, ...

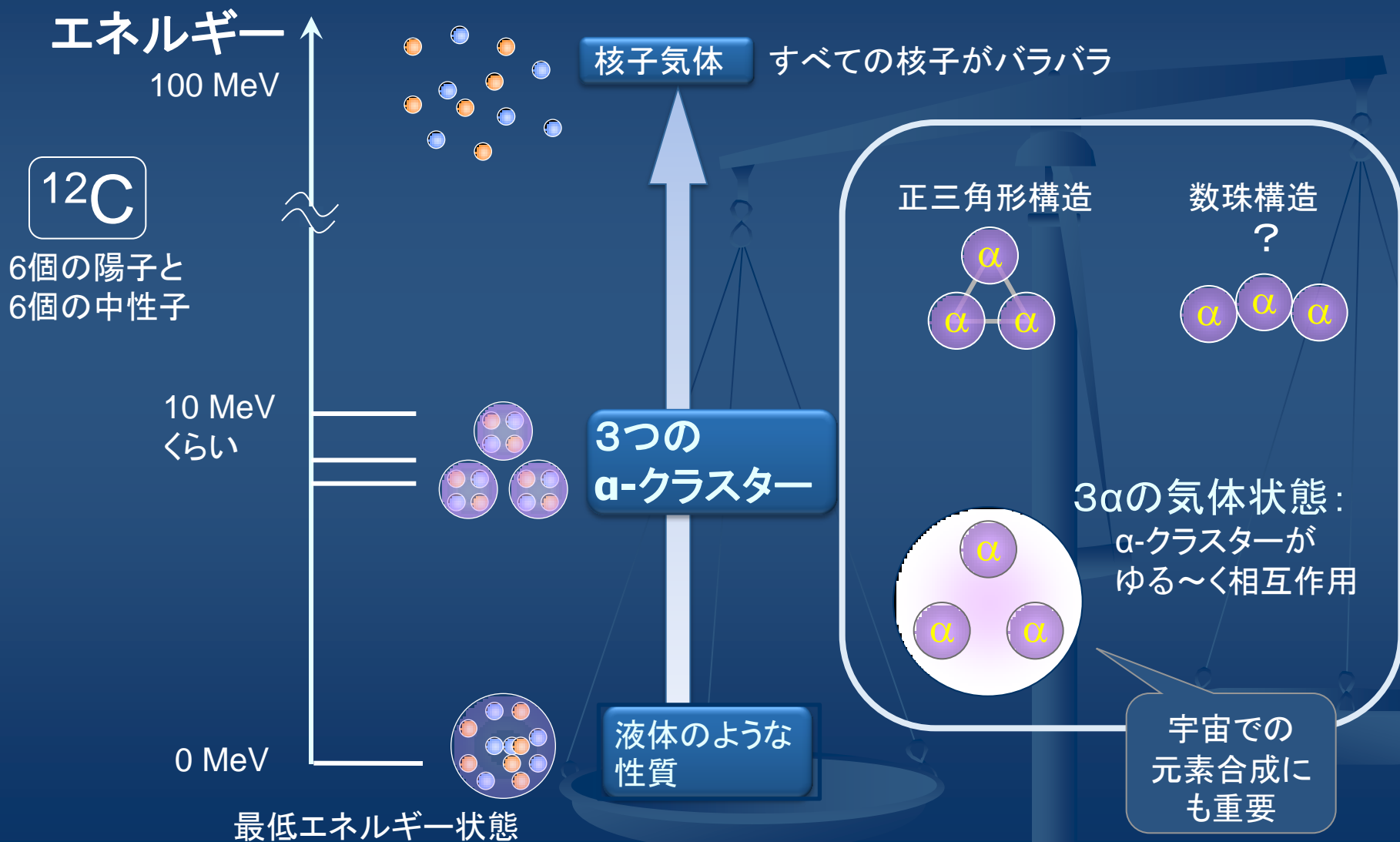


非常に軽い核では
平均場が形成しにくい

核子相関 \leftrightarrow 独立粒子運動の競合



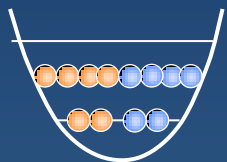
励起エネルギーに依存した多様性



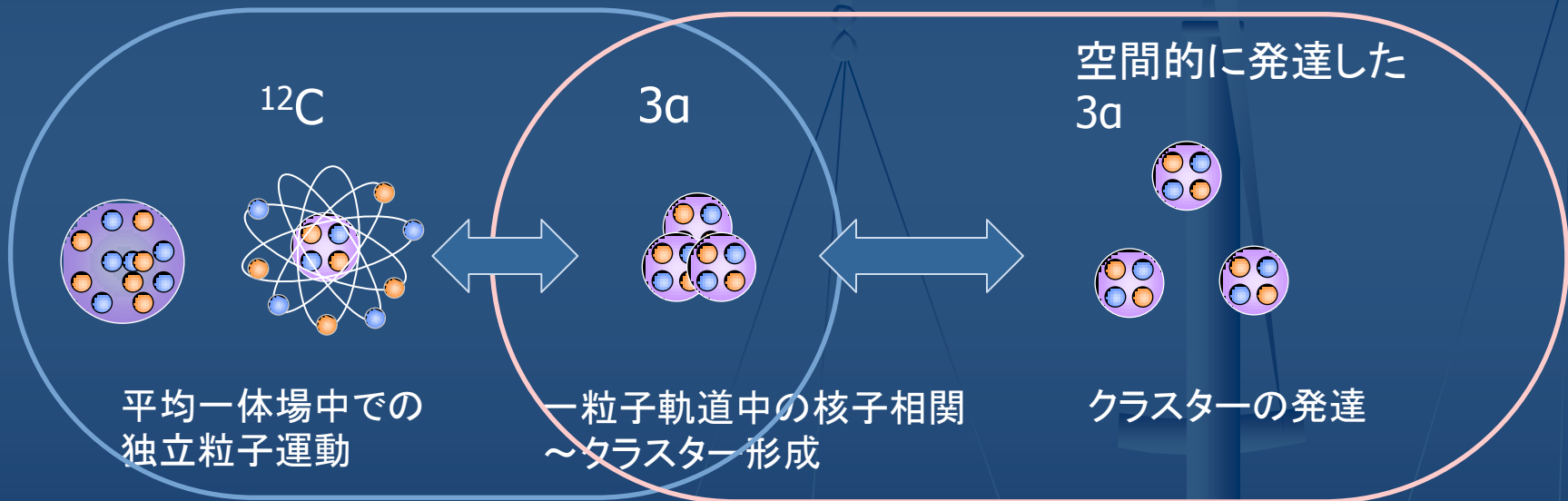
シェル構造とクラスター構造の共存

シェル模型構造・平均場構造

クラスター構造



^{12}C



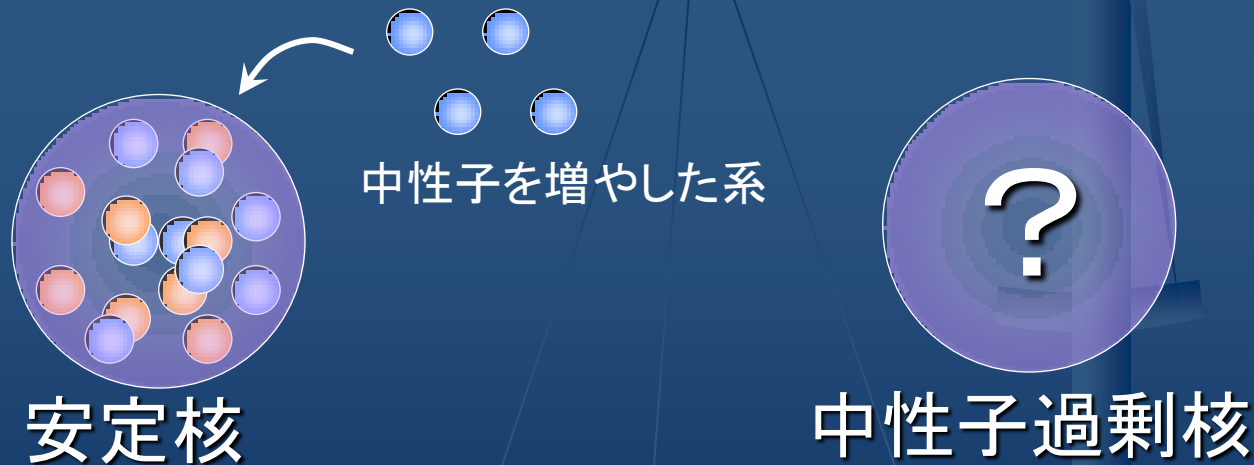
^{12}C
基底状態

^{12}C
励起状態

いま、不安定核が面白い

- 大型加速器施設(理研RIBFなど)での不安定核ビームといった実験技術の進歩
- 2種フェルミオン混合系の不思議:
陽子数と中性子数を自在(?)に変えてみる

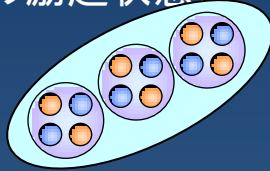
陽子と中性子の数がアンバランスな原子核



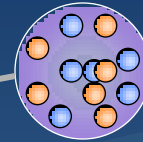
シェル構造とクラスター構造の共存がますます重要
→両方を記述できる理論モデルが必要……AMD法の開発

不思議な構造

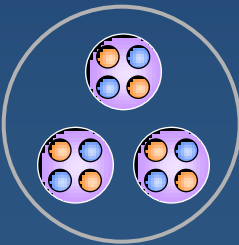
(炭素14の励起状態)



通常の球形原子核
(酸素16など)

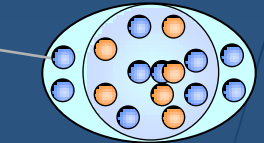


同位体(中性子数の異なる原子核)

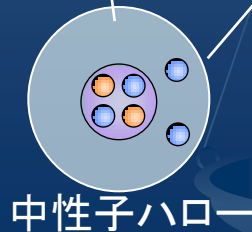


クラスター気体
(炭素12の
励起状態)

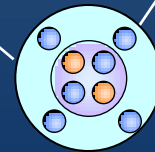
酸素	^{12}O	^{13}O	^{14}O	^{15}O	^{16}O	^{17}O	^{18}O	^{19}O	^{20}O	^{21}O	^{22}O		
窒素	^{11}N	^{12}N	^{13}N	^{14}N	^{15}N	^{16}N	^{17}N	^{18}N	^{19}N	^{20}N	^{21}N		
炭素	^8C	^9C	^{10}C	^{11}C	^{12}C	^{13}C	^{14}C	^{15}C	^{16}C	^{17}C	^{18}C	^{19}C	^{20}C
ホウ素	^8B	^9B	^{10}B	^{11}B	^{12}B	^{13}B	^{14}B	^{15}B	^{17}B	^{19}B			
ベリリウム	^7Be	^8Be	^9Be	^{10}Be	^{11}Be	^{12}Be	^{14}Be						
リチウム	^6Li	^7Li	^8Li	^9Li	^{11}Li								
ヘリウム	^3He	^4He	^6He	^8He									
水素	^1H	^2H	^3H										
		n											



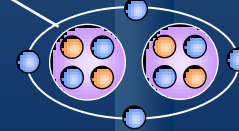
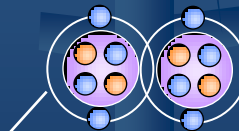
陽子と中性子の
異なる変形
(炭素16)



中性子ハロー



表面の中性子層



ベリリウム同位体の
分子的構造

2-1. クラスターの理論模型



多体系の理論模型

有限の量子多体系

構成要素:陽子、中性子

核力:2体力 → よくわかってきたが複雑(斥力芯、テンソルなど)

3体力以上(N体力) → わかってない(詳細や起源)

質量数Aの原子核=A粒子系の計算

シュレディンガー方程式の解

$$H = \sum_{i=1}^A \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 \right) + \sum_{i<j}^A V(i, j) \quad \text{2体力の場合}$$

$$H\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_A) = E\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_A)$$

核子が多いと、変数が多すぎて厳密に解けない。

最近A<10の精密計算が可能になってきたところ

理論模型と有効相互作用

模型(モデル)計算

多体問題をモデル化して近似:

モデル空間制限(基底のtruncation, 変数の数を減らす)

波動関数 $\Psi \rightarrow$ モデル波動関数 Φ

核力 $V(i, j) \rightarrow$ 有効核力 $V^{\text{eff}}(i, j)$

$$H^{\text{eff}} \Phi = E \Phi$$

良いモデルとは

- ・精密さ、定量性、再現性、予言力
- ・構造の特徴をつかむ
- ・使い易さ

汎用性(一般の原子核、物理量の計算)

コンピュータによる数値計算 ← 最近の発展

計算コードの高速化

CPUの向上に付随して計算が進歩

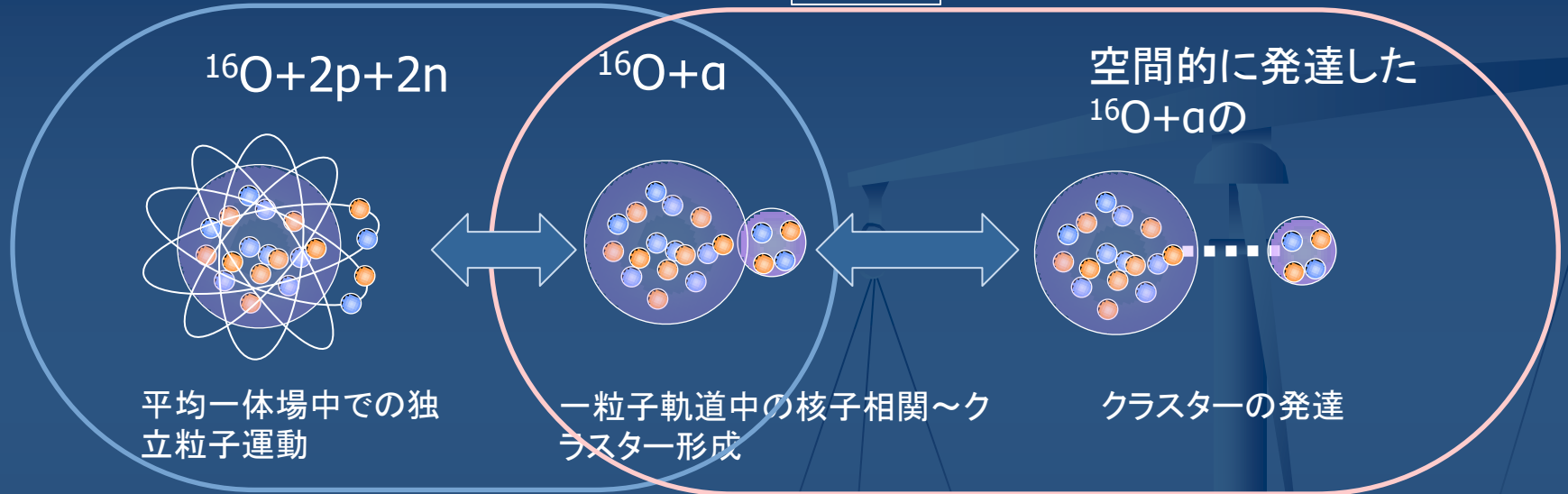
重要な自由度だけ扱う
自由度を落とす: 平均化
とか不活性芯の仮定など。
何が重要かは系や状態
による = モデルの特徴

クラスター構造を記述するには

シェル模型構造・平均場構造

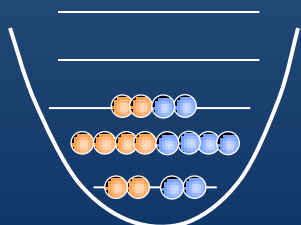
^{20}Ne

クラスター構造

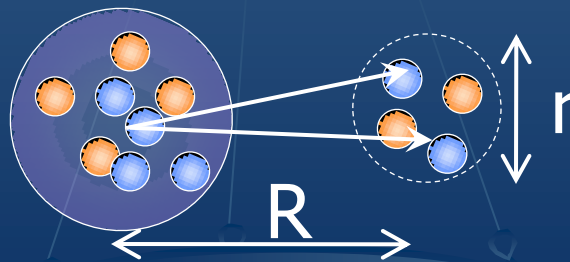


シェル模型：
原点を中心とした調和振動子の解で展開。

空間的に発達したクラスター構造の記述には
シェル模型は向いてない



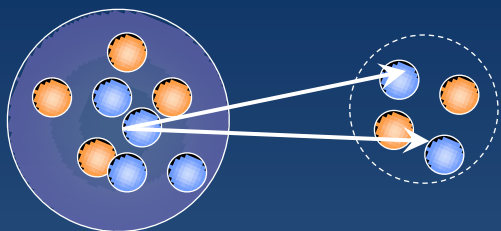
$$R_{nl}(r_i) Y_l^m(\hat{r}_i)$$



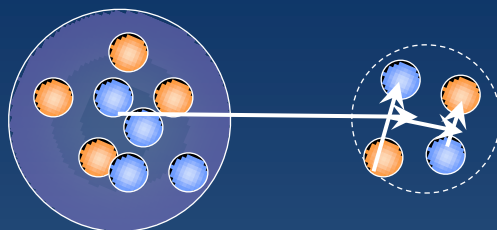
R大の波動関数
 $l = R \times p \sim R/r$

べらばーに高いn,
高いlの基底が必要

一中心



多中心



クラスター構造で重要な自由度:

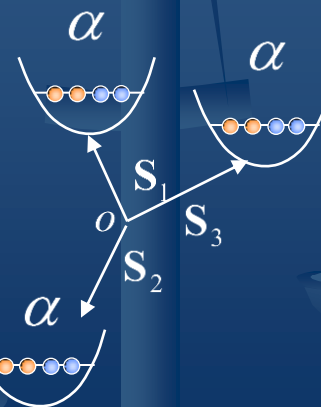
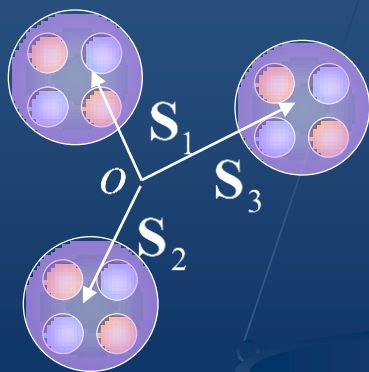
- ・構成クラスターの種類
- ・クラスター間の相対運動

どんなクラスターが形成されて、位置がどのくらい離れているか

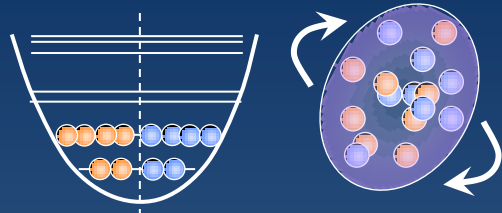
クラスターモデルの1例: Brinkモデル (多中心モデル)

\mathcal{A}

反対称化演算子
Slater determinant



むかし話



液滴模型
N. ボーア

シェル構造
メイヤー・イエンセン

集団運動模型
ボーア・モッテルソン

シェル模型,
平均場理論 密度汎関数法

1949, 1953

初期

微視的なクラスター模型

不安定核

クラスターと
平均場の
共存・競合

1930's

1960's

1970-80's

1990's- より大きな原子核

Bethe et al.
α-粒子の
複合体

非常に軽い核
微視的なクラスター
模型

p-, sd-シェルの
原子核

不安定核のクラスター
新しいクラスター構造・模型



^8Be



^{12}C



^{20}Ne



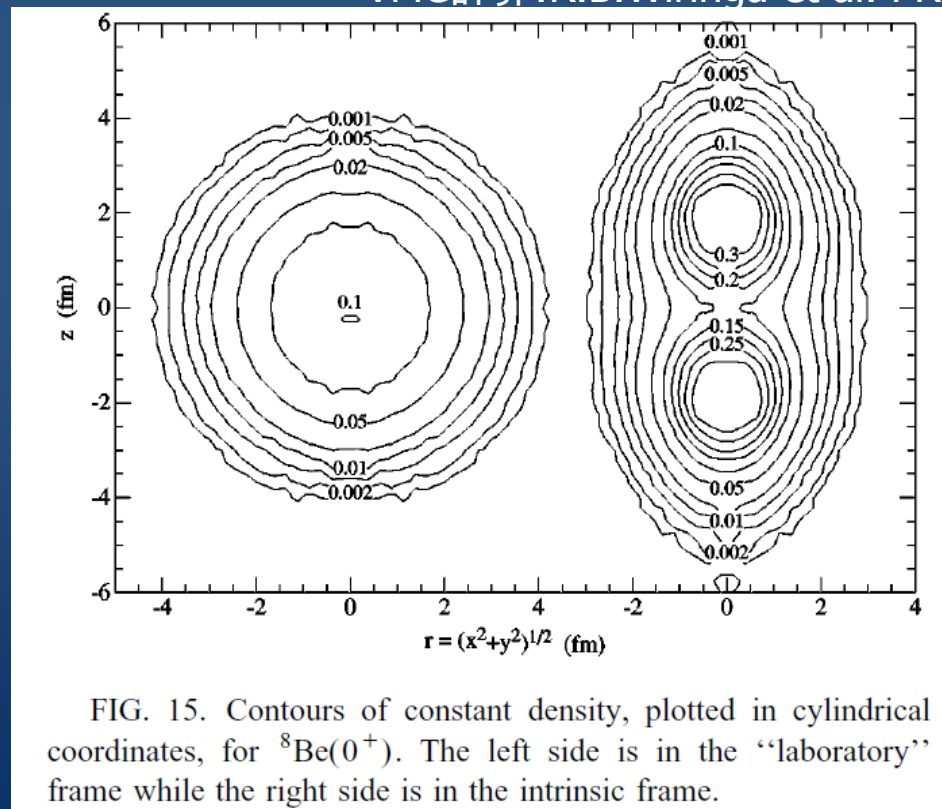
精密8体計算による ${}^8\text{Be}$ の 2α 構造

${}^8\text{Be}$: 2α 構造

1960's: 微視的なクラスター模型で研究された

2006: 現実的核力を用いた8体精密計算で
 2α クラスター構造の形成が確認された

VMC計算: R.B. Wiringa et al. PRC 62, 014001(2006)

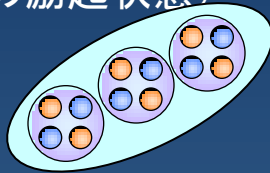


2-2. 反対称化分子動力学 (AMD法)

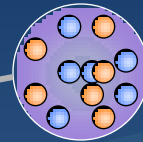
ウィキペディアにも
載ってます

不思議な構造

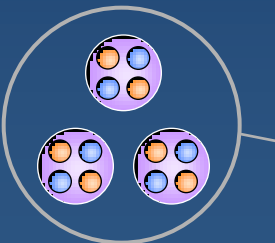
(炭素14の励起状態)



通常の球形原子核
(酸素16など)

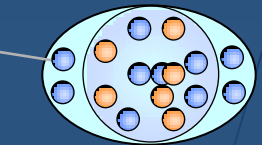


同位体(中性子数の異なる原子核)

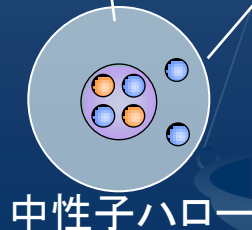


クラスター気体
(炭素12の
励起状態)

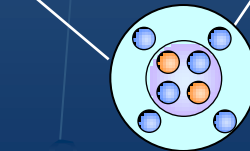
酸素	^{12}O	^{13}O	^{14}O	^{15}O	^{16}O	^{17}O	^{18}O	^{19}O	^{20}O	^{21}O	^{22}O		
窒素	^{11}N	^{12}N	^{13}N	^{14}N	^{15}N	^{16}N	^{17}N	^{18}N	^{19}N	^{20}N	^{21}N		
炭素	^8C	^9C	^{10}C	^{11}C	^{12}C	^{13}C	^{14}C	^{15}C	^{16}C	^{17}C	^{18}C	^{19}C	^{20}C
ホウ素	^8B	^9B	^{10}B	^{11}B	^{12}B	^{13}B	^{14}B	^{15}B	^{17}B	^{19}B			
ベリリウム	^7Be	^8Be	^9Be	^{10}Be	^{11}Be	^{12}Be	^{14}Be						
リチウム	^6Li	^7Li	^8Li	^9Li	^{11}Li								
ヘリウム	^3He	^4He	^6He	^8He									
水素	^1H	^2H	^3H										
		n											



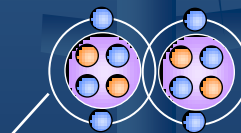
陽子と中性子の
異なる変形
(炭素16)



中性子ハロー



表面の中性子層



ベリリウム同位体の
分子的構造

原子核構造におけるAMD法

AMD波動関数

$$\Phi = c\Phi_{\text{AMD}} + c'\Phi'_{\text{AMD}} + c''\Phi''_{\text{AMD}} + \dots$$

$$\Phi_{\text{AMD}} = \det \{ \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_A \}$$

スレーター
行列式

$$\varphi_i = \phi_{\mathbf{Z}_i} \chi_i \begin{cases} \text{空間部分} \\ \phi_{\mathbf{Z}_i}(\mathbf{r}_j) \propto \exp \left[-\nu \left(\mathbf{r} - \frac{\mathbf{Z}_i}{\sqrt{\nu}} \right)^2 \right] \\ \chi_i = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} + \xi_i \\ \frac{1}{2} - \xi_i \end{pmatrix} \times \begin{matrix} p \text{ or } n \\ \text{アイソスピン} \end{matrix} \\ \text{内部スピン} \end{cases}$$

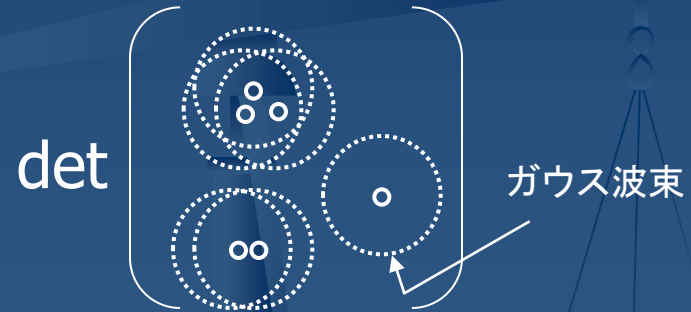
ガウス波束

$$\Phi_{\text{AMD}}(\mathbf{Z})$$

$$\mathbf{Z} = \{ \mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_A, \xi_1, \dots, \xi_A \}$$

変分パラメータ:

全ての核子の波束中心とスピンの向き



変分法

$$\delta \frac{\langle \Phi | H | \Phi \rangle}{\langle \Phi | \Phi \rangle} = 0$$

モデル波動関数:

$$\Phi$$

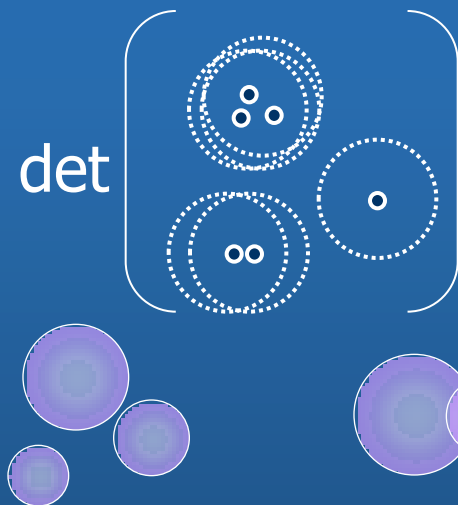
有効ハミルトニアン:

(現象論的相互作用: MV1 force)

$$H^{\text{eff}} = \sum_{i=1} t_i + \sum_{i < j} v_{ij}^{\text{eff}} + \sum_{i < j < k} v_{ijk}^{\text{eff}}$$

AMD 模型空間

det



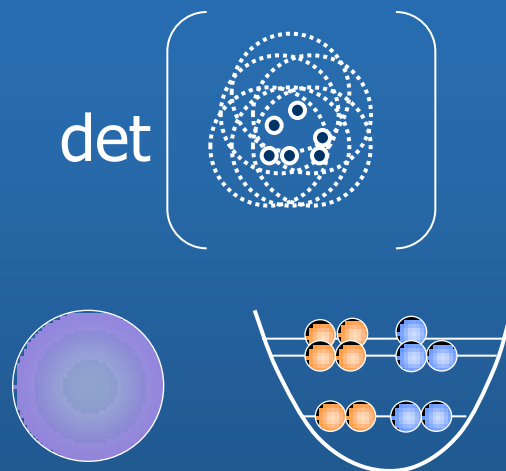
様々なクラスターの状態

一般の原子核へ
適用可能



系統的な研究

det



シェル模型的状态

エネルギー変分

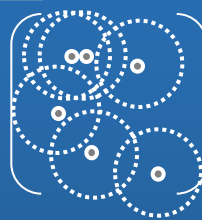
エネルギー曲面

$$\frac{d\mathbf{Z}}{dt} = (\lambda + i\mu) \frac{1}{i\hbar} \frac{\partial E}{\partial \mathbf{Z}^*}$$

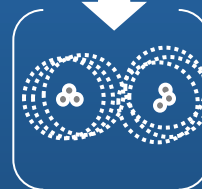


モデル空間 (Z plane)

ランダムに選んだ
初期状態



エネルギー最低状態
を得る

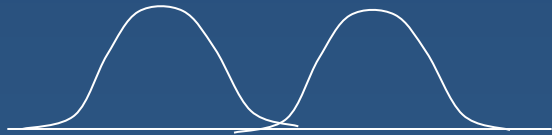


ガウス波束軌道における反対称化の効果

同種粒子が2個の場合



$\phi_1(r_1)$ $\phi_2(r_2)$



反対称化

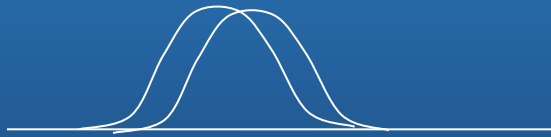
$$\text{Slater det.} \begin{pmatrix} \phi_1(r_1) & \phi_2(r_1) \\ \phi_1(r_2) & \phi_2(r_2) \end{pmatrix}$$

$$= \phi_1(r_1)\phi_2(r_2) - \phi_1(r_2)\phi_2(r_1)$$

$$= \phi_1'(r_1)\phi_2'(r_2) - \phi_1'(r_2)\phi_2'(r_1)$$

$$\begin{cases} \phi_1' \propto \phi_1 + \phi_2 \\ \phi_2' \propto \phi_1 - \phi_2 \end{cases}$$

二つの粒子波束が近づいた場合



$$\phi_1' = \text{[Gaussian]} + \text{[Gaussian]} = \text{[Wider Gaussian]}$$

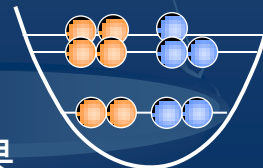
s-orbit

$$\phi_2' = \text{[Gaussian]} + \text{[Inverted Gaussian]} = \text{[Node at center]}$$

p-orbit

$$\text{det} \left(\begin{matrix} \text{[Circular pattern]} \\ \text{[Circular pattern]} \end{matrix} \right)$$

反対称化の効果



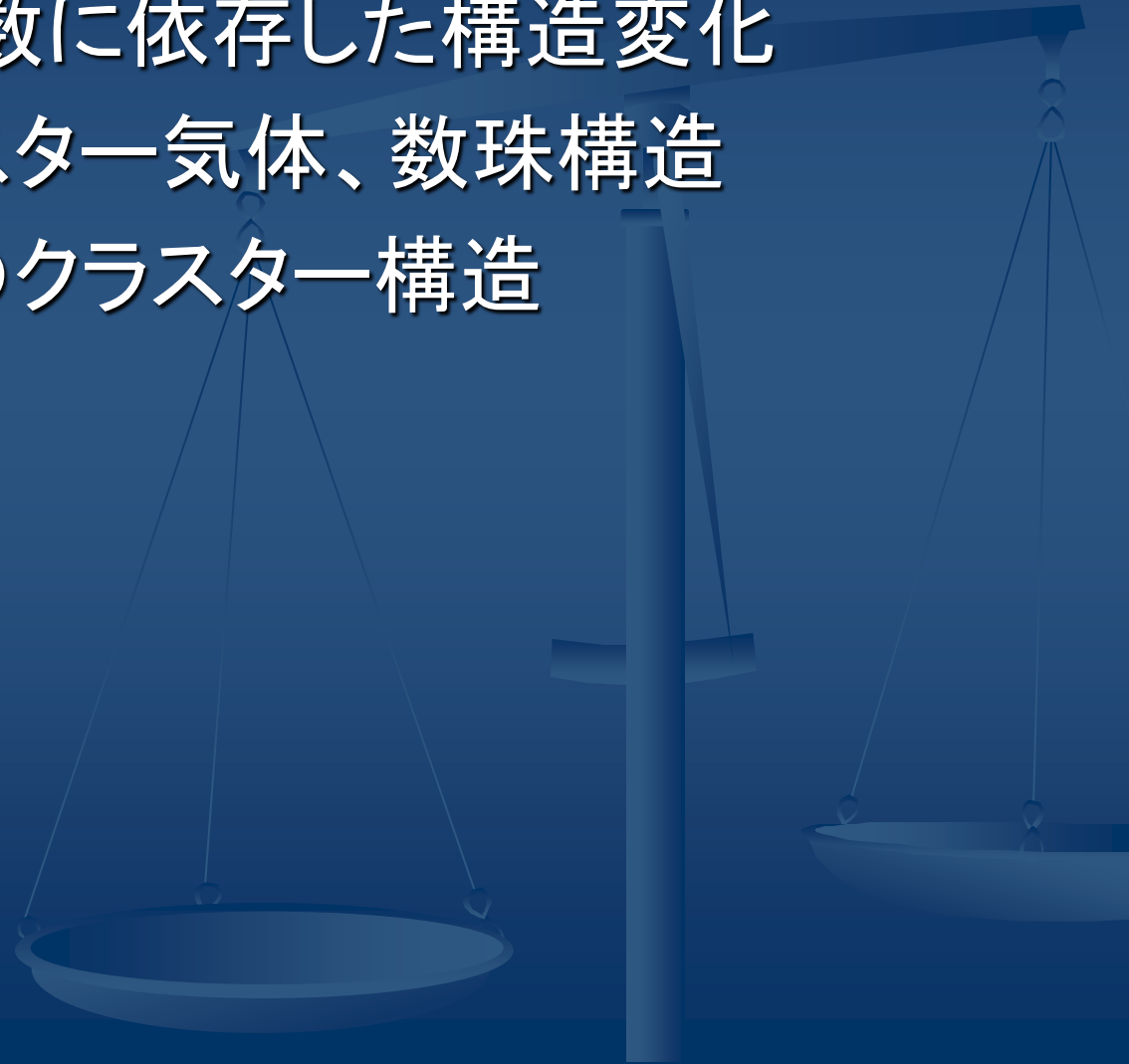
$$\Phi_{\text{AMD}}(\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots, \mathbf{Z}_A)$$

3.原子核の不思議な現象

キーワードは
不安定核
クラスター

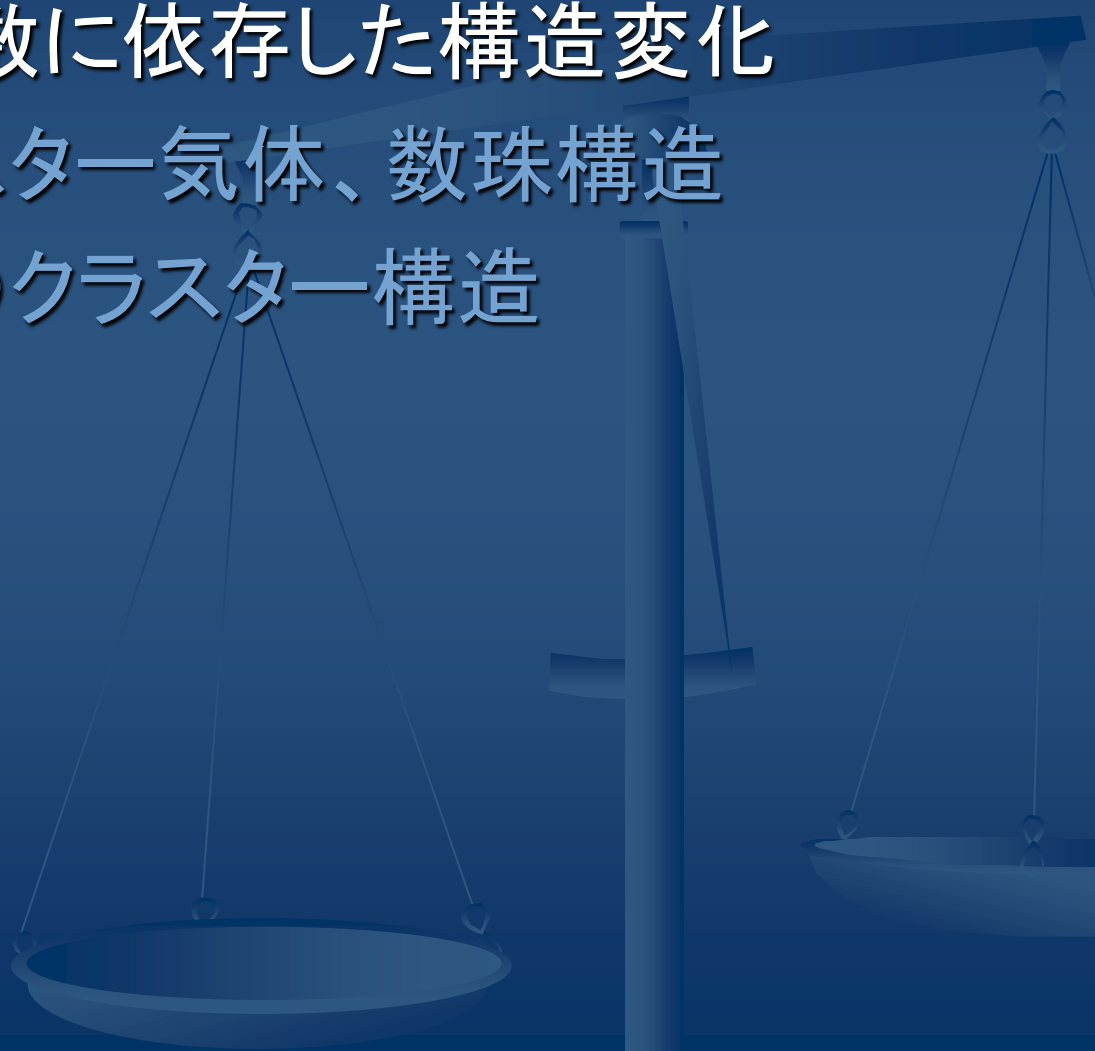
原子核の不思議な現象

- 陽子数・中性子数に依存した構造変化
- C同位体のクラスター気体、数珠構造
- 中性子過剰Beのクラスター構造



原子核の不思議な現象

- 陽子数・中性子数に依存した構造変化
- C同位体のクラスター気体、数珠構造
- 中性子過剰Beのクラスター構造



B同位体の不思議な構造

(反対称化分子動力学法
による理論計算)

^{13}B

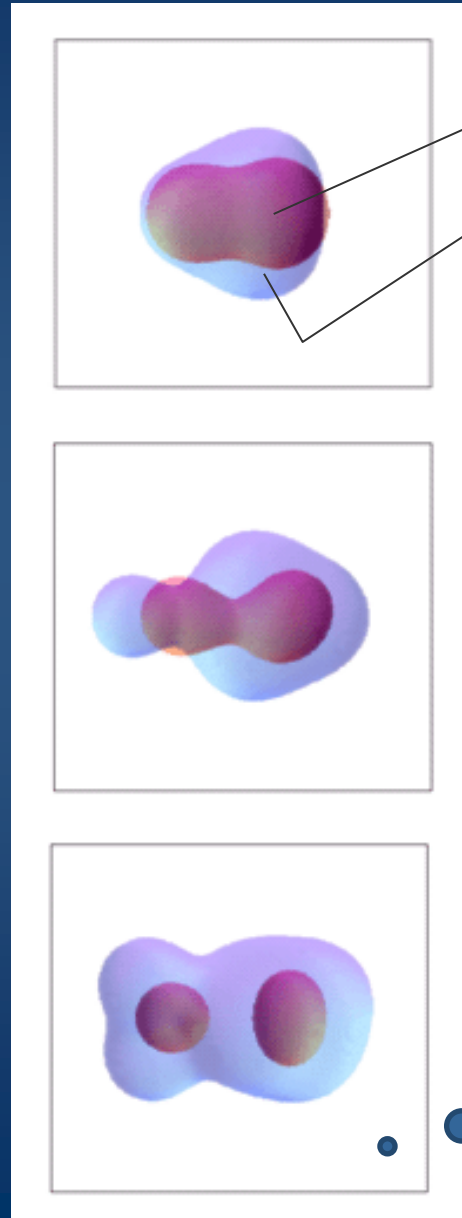
5個の陽子
8個の中性子

^{15}B

5個の陽子
10個の中性子


^{17}B


5個の陽子
12個の中性子



陽子の密度分布

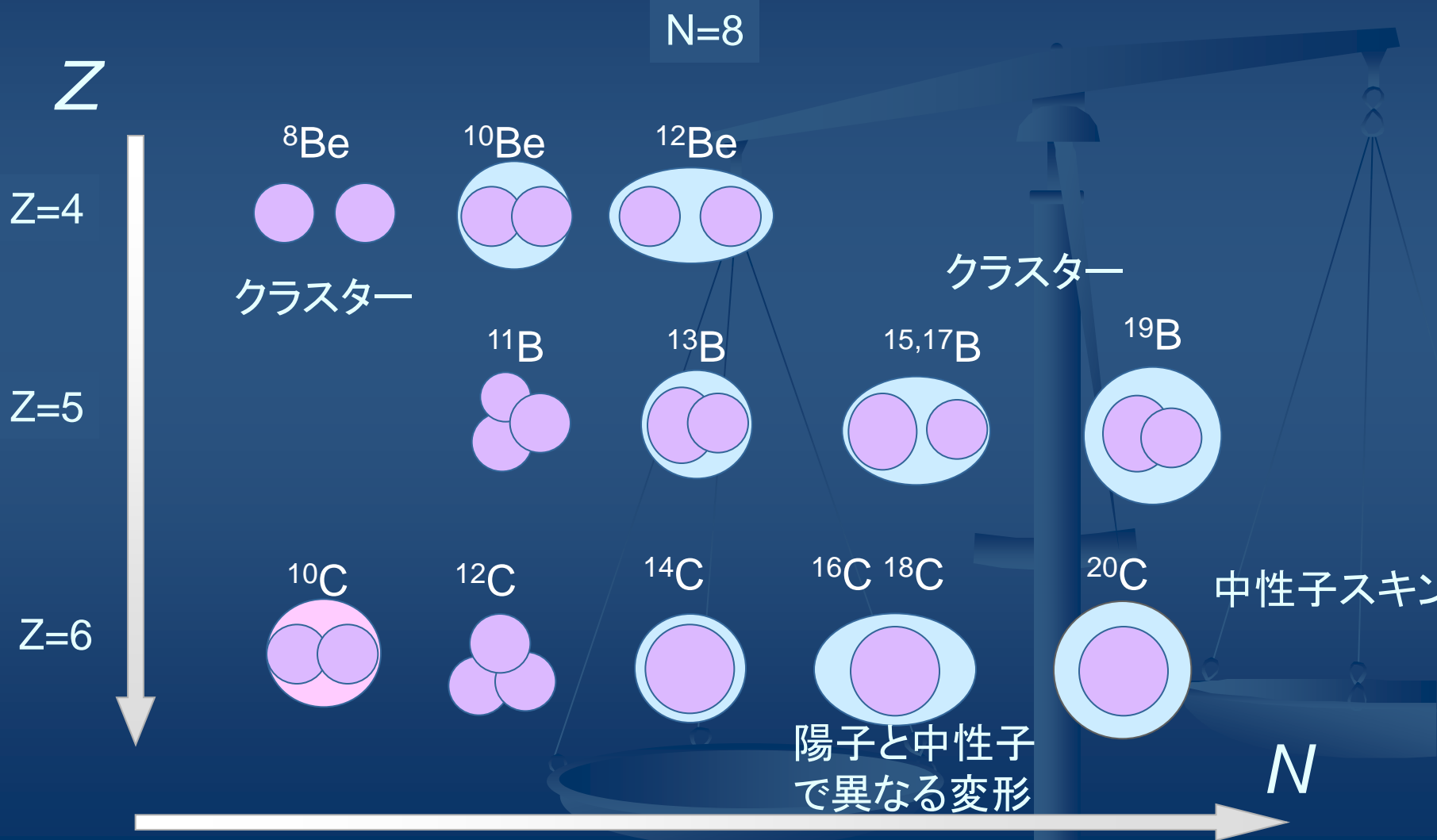
中性子の密度分布

+ 
中性子を
2個加える

+ 
中性子を
2個加える

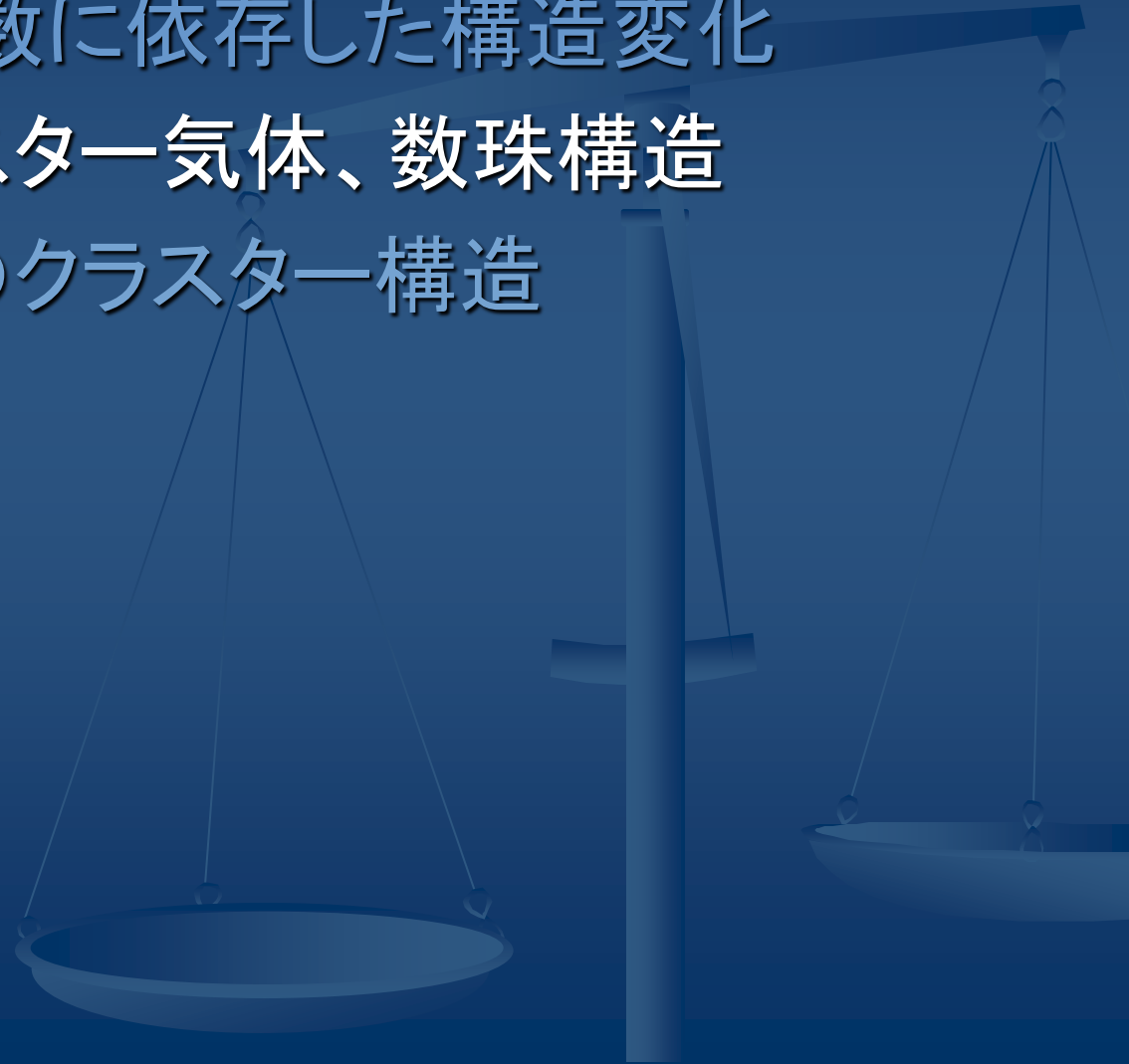
なんと!
クラスターが
発達

陽子数と中性子数に依存して構造が変化



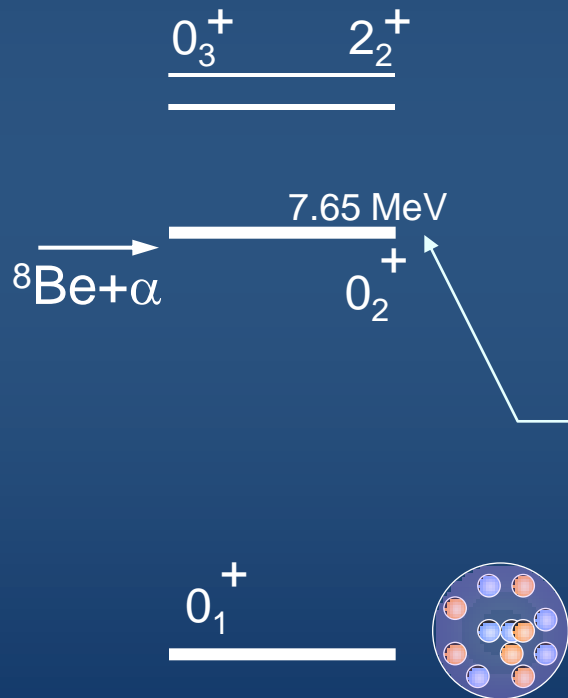
原子核の不思議な現象

- 陽子数・中性子数に依存した構造変化
- C同位体のクラスター気体、数珠構造
- 中性子過剰Beのクラスター構造

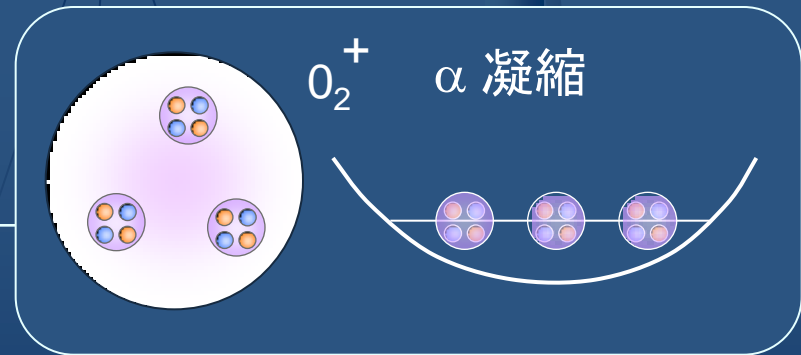


^{12}C の励起状態の 3α の気体状態

^{12}C



Tohsaki et al.(2001)
Funaki et al. (2003)

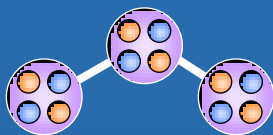


最近、 $^{16}\text{O}^*$ でも予言された
Funaki et al. 2010

C励起状態の 3α の数珠構造？

^{12}C

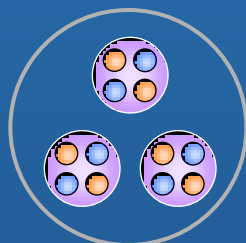
3α の数珠構造？



0_3^+ 2_2^+

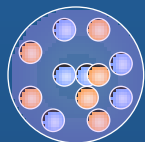
$^8\text{Be} + \alpha$

7.65 MeV
 0_2^+



3α の気体状態

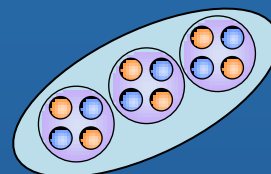
0_1^+



$^{14,16}\text{C}$

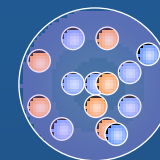
余剰中性子による安定化

Y.K-E.ら, Itagakiら, Suharaら



励起状態に
数珠構造？

0_1^+



^{14}C 励起状態の 3α 数珠構造

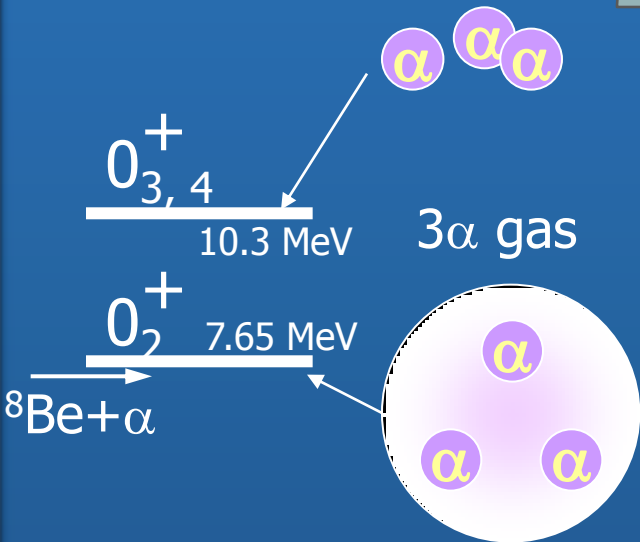
^{12}C

2つの
余剰中性子

^{14}C

AMD計算 by T.Suhara and Y.K-E,
Phys.Rev.C82:044301,2010.

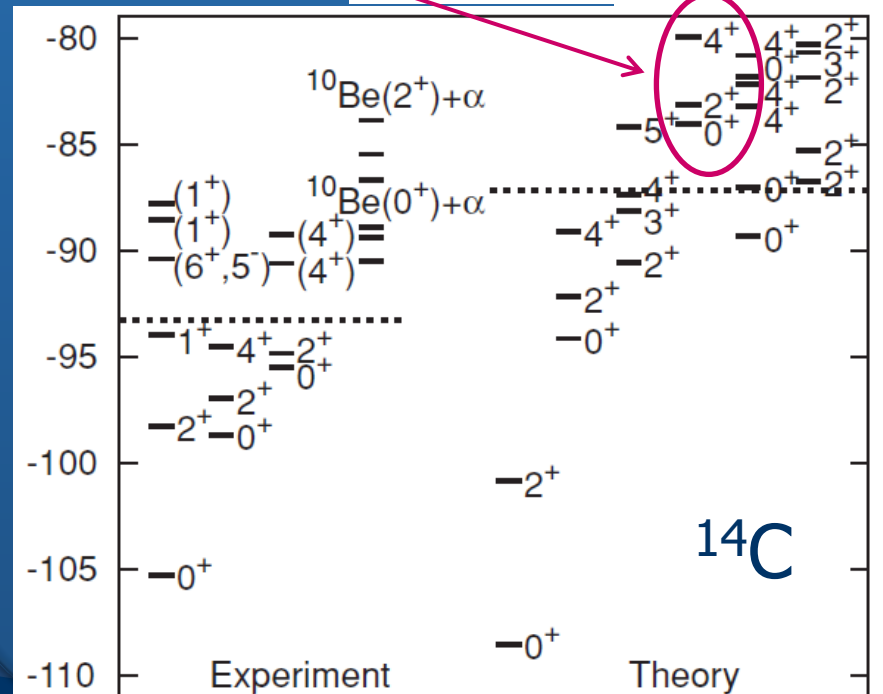
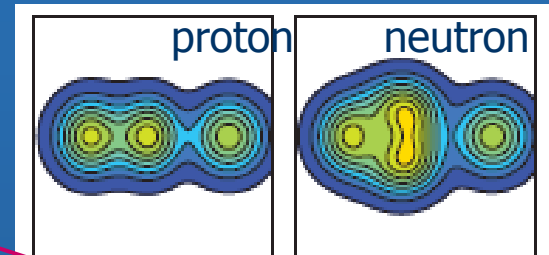
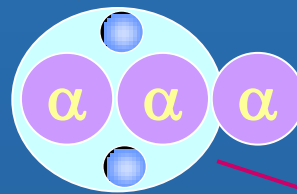
3α chain-like



cluster & shell

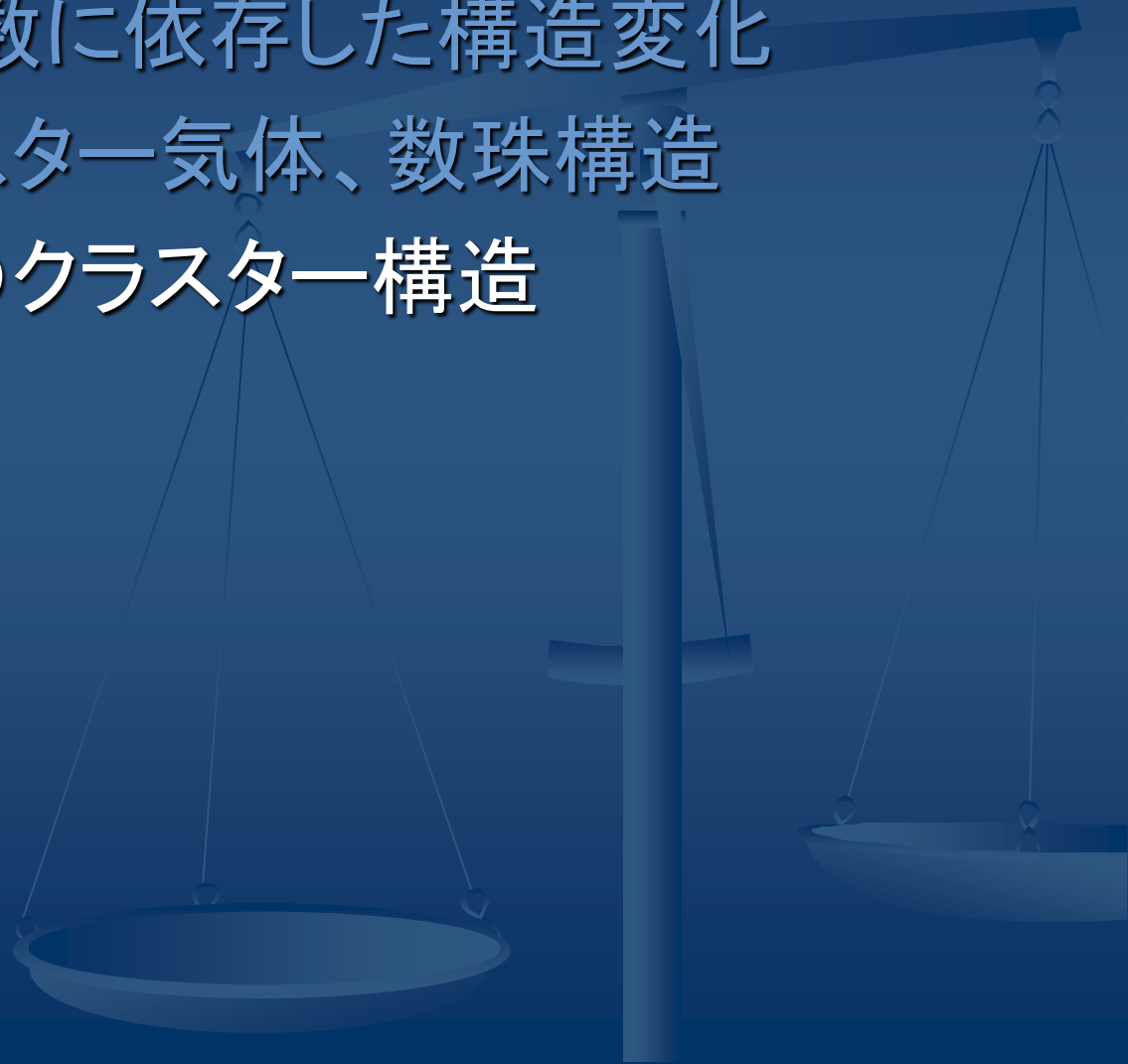


3α 数珠構造



原子核の不思議な現象

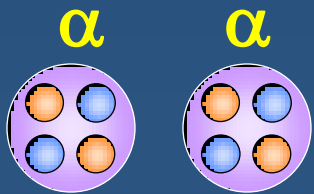
- 陽子数・中性子数に依存した構造変化
- C同位体のクラスター気体、数珠構造
- 中性子過剰Beのクラスター構造



中性子過剰なBeのクラスター構造

${}^8\text{Be}$

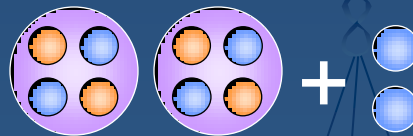
4個の陽子
4個の中性子



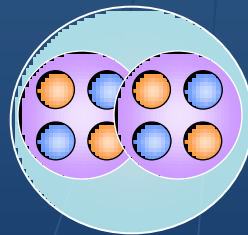
発達した
2 α -クラスター

${}^{10}\text{Be}$

4個の陽子
6個の中性子



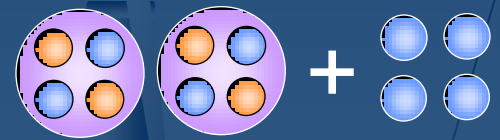
||



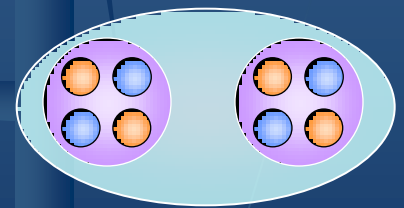
クラスター減衰

${}^{12}\text{Be}$

4個の陽子
8個の中性子



||

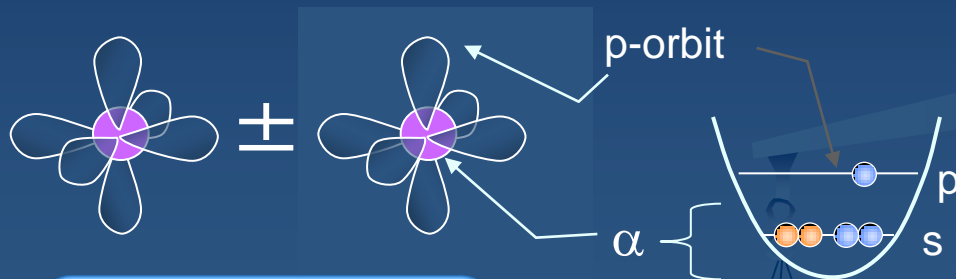


クラスターが
再び発達

Beアイトープの構造変化はなぜ起こるか？

分子軌道のアイデア：
2 α +中性子の描像

Okabe et al., Seya et al.,
W. von Oertzen, Itagaki et al.



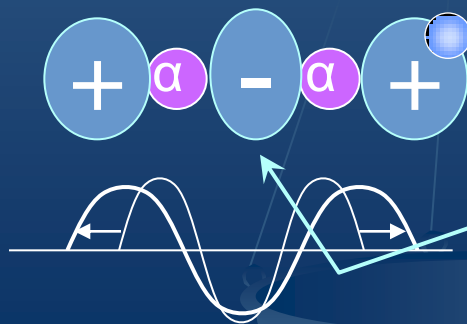
α -clusterのまわりの許される軌道のうち最もエネルギーの低いのはp-軌道。

各々の α 粒子のp-軌道の線形結合で分子軌道が形成される。

π -orbital



σ -orbital



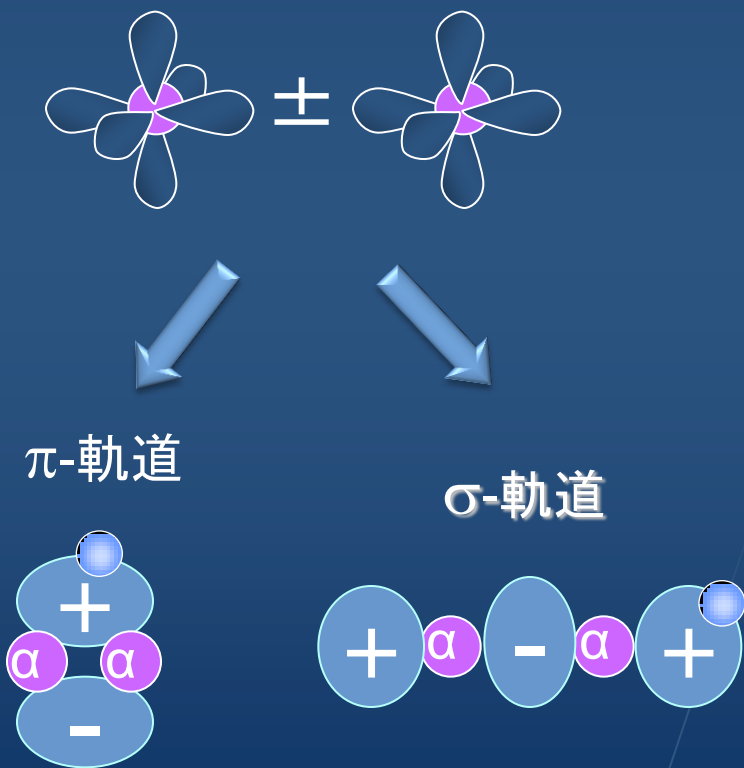
運動エネルギーを得

余分な中性子が2 α 周りの分子的軌道に入る

中性子が間に割り込んでクラスターが発達

クラスター発達のメカニズム (Beの場合)

2α-クラスターが発達すると
その周りに分子的軌道が形成される



^{12}Be



^{10}Be



$2\alpha + \pi^2$



^{12}Be

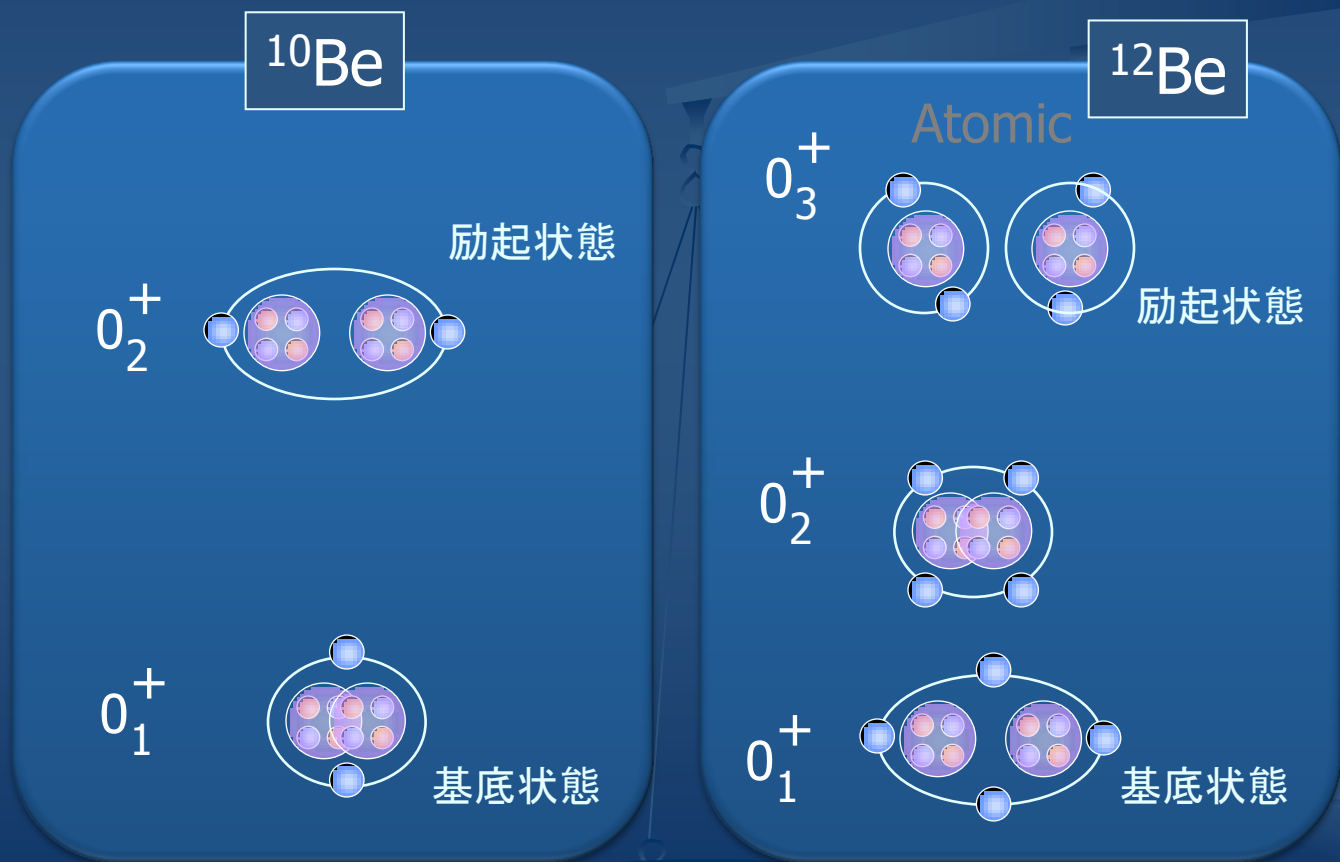


$2\alpha + \pi^2 + \sigma^2$



Beアイトープの基底・励起状態 のクラスター構造

Excitation
energy



N

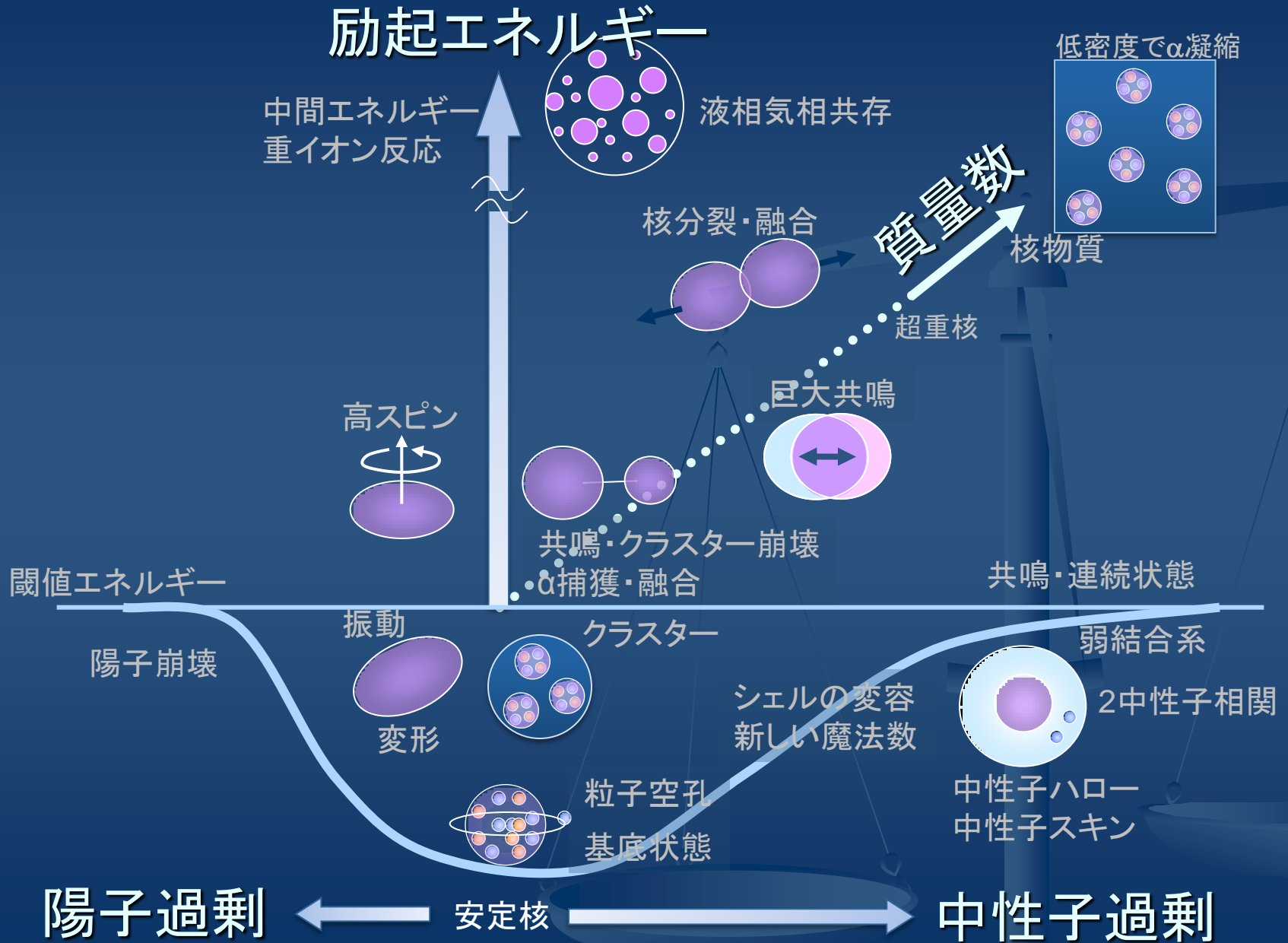
4.まとめ

- 原子核の多面性: クラスタと平均場の共存・競合
- キーワード: 不安定原子核、クラスタ
- 理論模型: 既存のクラスタ模型
→ 反対称化分子動力学 (AMD法)
- 陽子数・中性子数に依存した構造変化
- C同位体のクラスタ気体、数珠構造
- Be同位体のクラスタ構造

今後

- アイソスピン非対称度/励起エネルギーを変化させたときに出現する構造。新しい現象
- 多様な新しい現象を解明しつつ、原子核の本質的理解と有限フェルミオン系の普遍性の解明に迫る。

核子多体系の多様な現象



おしまい

