

核物理の新しい時代

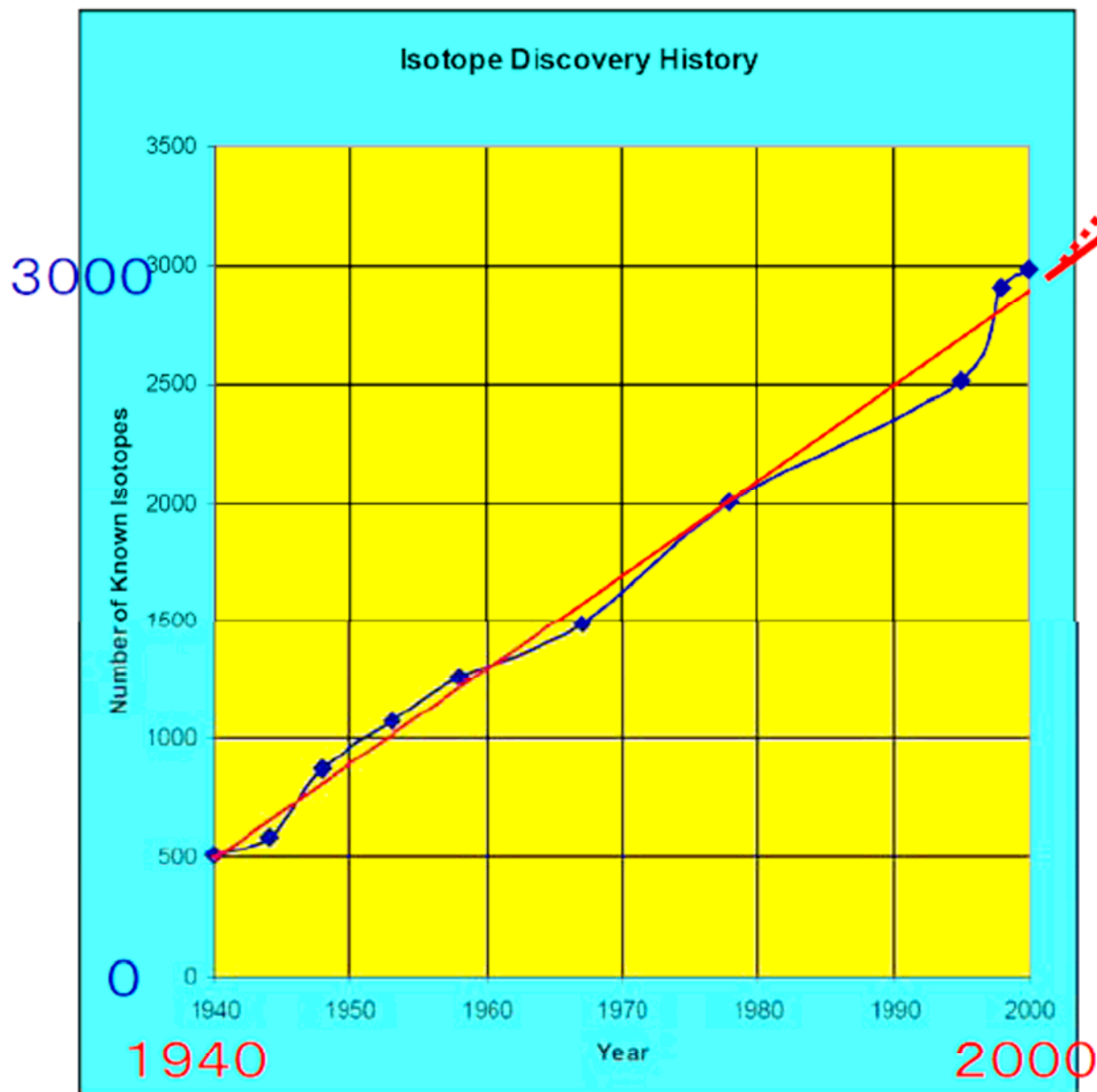
ドリップする限界の原子核



安定核



中性子がドリップ寸前の原子核



原子核の 発見の歴史

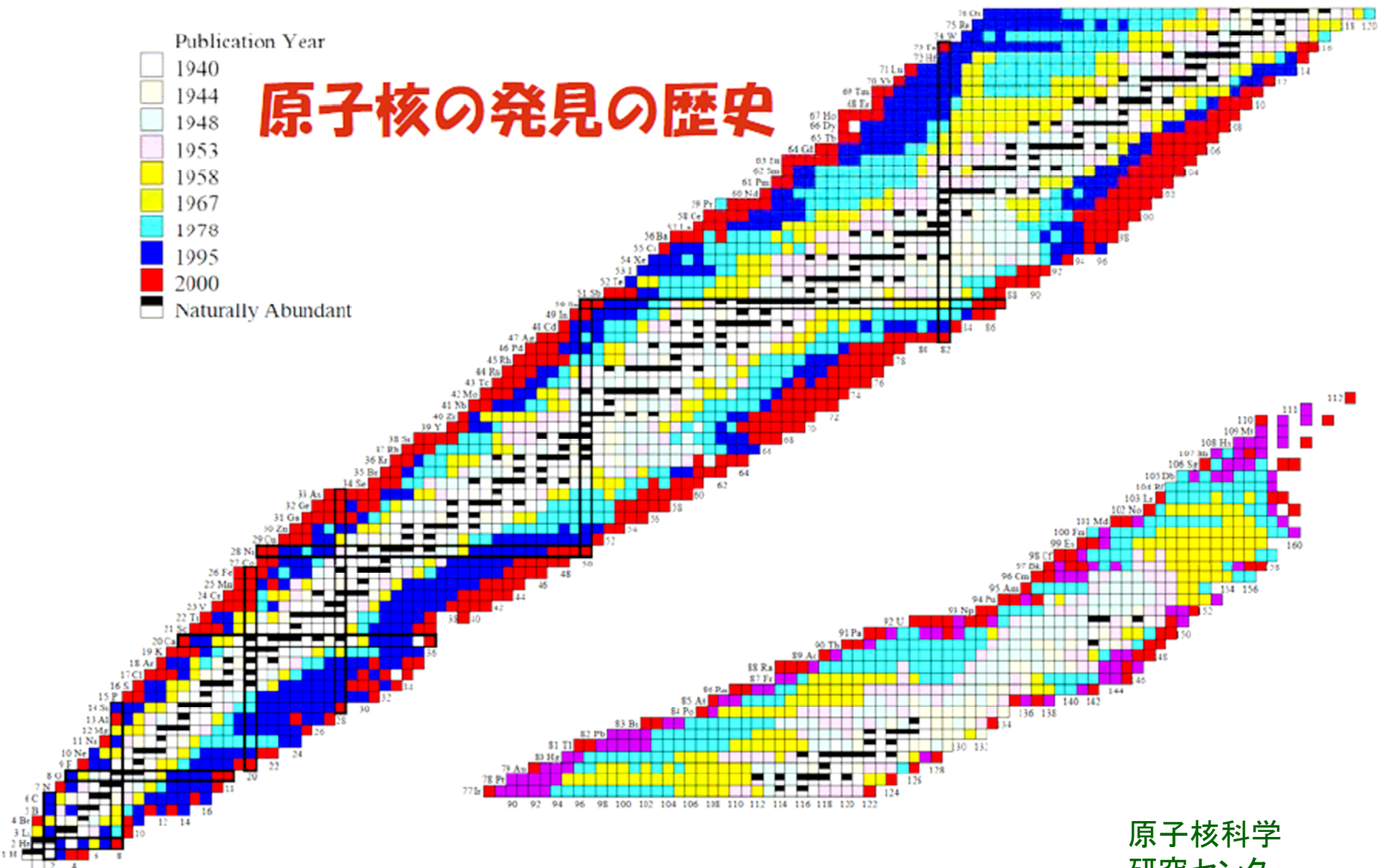
原子核科学
研究センター
下浦亨教授作成

The number of isotopes in each edition of the *Table of Isotopes* is plotted versus the publication year. The last data point represents the number of isotopes included in the 2000 *Wallet Cards*. The red line is a linear fit to the data.

Evolution of the *Table of Isotopes*



原子核の発見の歴史



原子核科学
研究センター
下浦亨教授作成

いくつかの質問

- 問い 中性子だけから作られた原子核や陽子だけから成る原子核が存在しますか。人工的に作ることは可能ですか。存在しないとするとそれは何故ですか。
- 問い 中性子は不安定で β 崩壊によって陽子に崩壊します。それでは何故、原子核の中に入った中性子は崩壊せずに安定に存在できるのですか。
- 問い 陽子数が同じで中性子数の異なる原子核をアイソトープといいます。アイソトープにいくらでも中性子を追加していくことは可能ですか。限界があるならその限界は何によって決められているのですか。
- 問い 天然に存在する最も重い原子核は何ですか。重い原子核の限界は何によって決められているのですか。

いくつかの質問(続き)

問い あなたは陽子数のもっとも大きい超重原子核が最近日本で作られたことを知っていますか。この超重原子核の陽子数はいくらですか。

問い 1個の核子あたりの結合エネルギーはFeやNiのあたりで最大になります。それでは、どのようにしてFeやNiより重い元素が作られたのですか。なぜ、Pbのような重い原子核は核分裂してより軽い原子核に崩壊しないのですか。

問い 自然に存在する原子核の大多数は陽子数も中性子数も偶数ですが、なぜ奇数のものは少ないのですか。

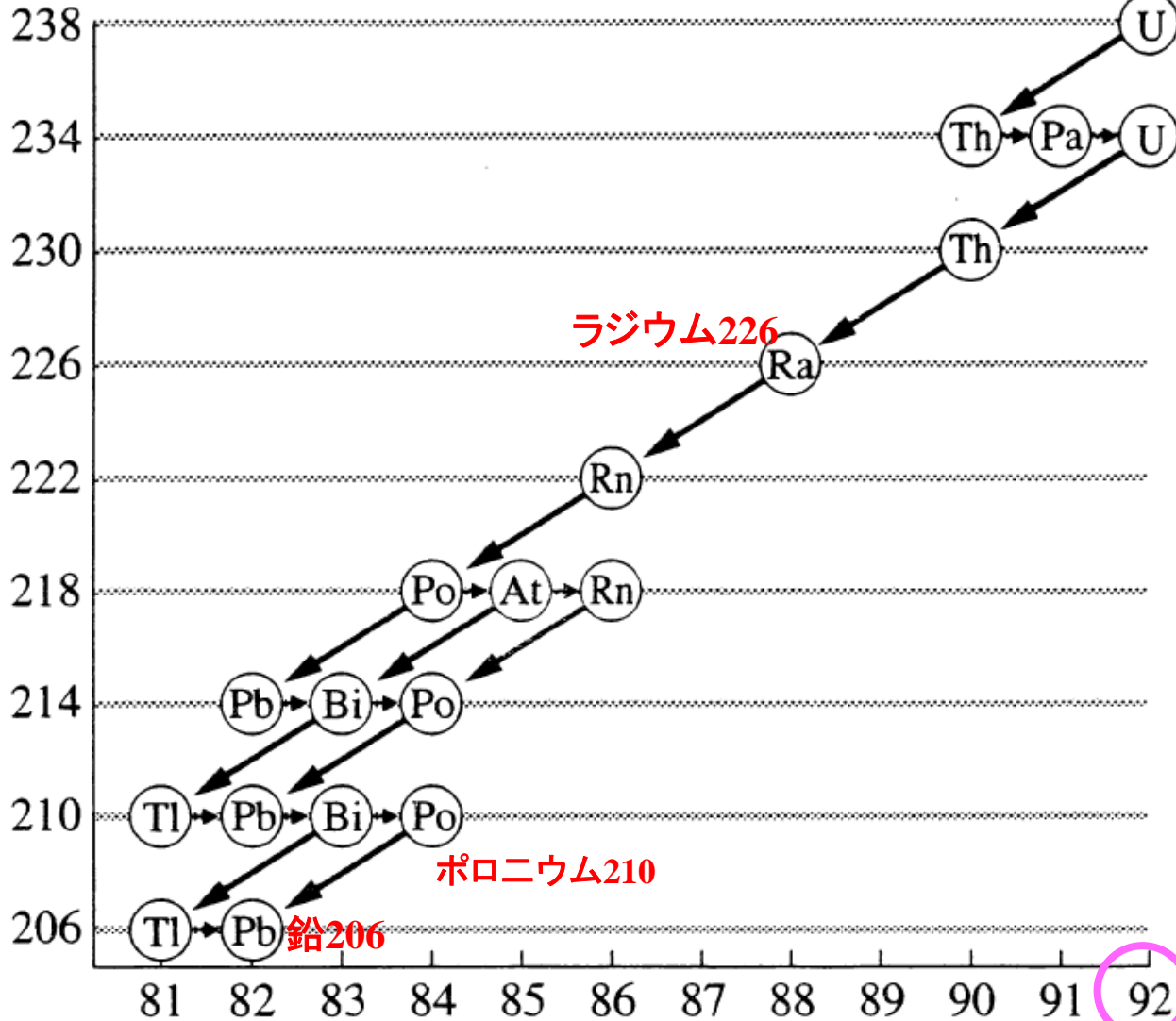
問い ^{235}U は熱中性子によって核分裂するのに ^{238}U は核分裂しないのは何故ですか。

質問(緊急追加)

問い ポロニウム210はどの様にして作りますか。何故、危険なのですか。

質量数 A

ウラン238



α 崩壊 β 崩壊

原子番号 Z

核物理の新しい時代



ドリップする限界の原子核

- 1930年代** 自然に存在する放射線を使った原子核研究
(中性子の発見1932, 湯川中間子論1935, 核分裂の発見1938)
- 1950年代** 加速器を使った原子核研究
(安定核の基底状態近傍の性質:
シェルモデル1949 と 集団運動モデル1953)
- 1970年代** あらゆる安定核ビームを使った核物理の開花
(高励起、高速回転など極限状態にある原子核:
量子多体系としての原子核に対する微視的理論の進展)
- 2000年代** 不安定核ビームを使った核物理の時代
2007年 いよいよ理研RIBF稼動 !!



33. ユダヤ人迫害の手はイタリアに伸びローラ・フェルミを脅かした。1938年、この夫妻に与えられたノーベル賞は脱出行の経済的な支えとなった。二人の子供たち、ジュリオとネラを連れ、彼らはストックホルムからニューヨークに向かった。「私たちはフェルミ家のアメリカ支部を設立した」と冗談を言った

**Richard Rhodes, The making of the atomic bomb
(原子爆弾の誕生、紀伊国屋書店、1995)より**



29. 1937年、59歳となったリーゼ・マイトナー。1938年のクリスマスの時期にストックホルムで彼女は、オットー・ハーンからウラニウムに遅い中性子を当てるとバリウムが生成されるというハーンとフリッツ・シュトラスマンの驚くべき発見を知らされた。これはウラン原子が分裂する最初の証拠だった

核図表

横軸に中性子数、縦軸に陽子数をとり、存在する(可能性のある)原子核を表にしたもの。

陽子数(元素の種類)

RIBF計画

RIビーム(RI:ラジオアイソトープ)を不安定核とよび、これらの核を加速し、さまざまな核と衝突させることにより、核の構造・反応機構を知る。日本の理研によって行われる。

陽子ドリップライン

陽子を詰めていったときの理論的境界線

ジャポニウム!?
原子番号113発見!!

未開の領域

Pb 82

既知

RIBF計画

Sn 50

安定核(安定線)

126

ウラン合成過程
不安定核を経由してできる

中性子ドリップライン

中性子を詰めていったときの理論的境界線
この線より中性子が多いと自然に中性子がこぼれ落ちる

Ni 28

Ca 20

O 8

He 2

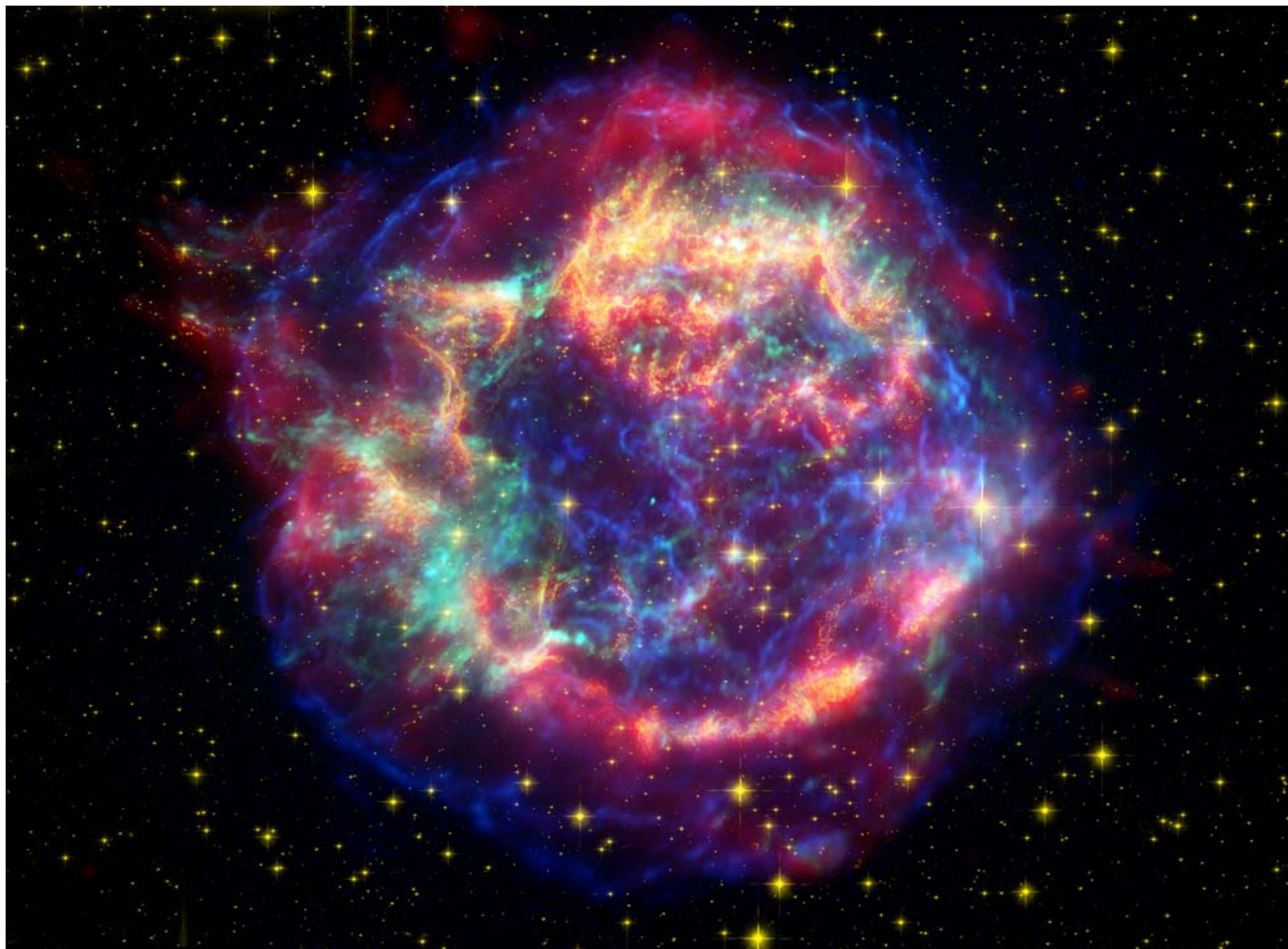
軽核領域

酸素(O)、窒素(N)、炭素(C)がある領域
近年このあたりで短い寿命のハロー核が見つかったり
新しい魔法数(16)が発見されたりしている。

マジックナンバー(魔法数)
特に安定な(壊れにくい)中性子(陽子)の数

中性子数(同位体の種類)

出典:理研RIBFウェブサイト<http://www.rarf.riken.jp/>より



超新星カシオペアA (NASAによる合成写真)

原子核



この描像は間違っている！

原子核

原子核は

- 1) 量子力学の世界 \Rightarrow 粒子性と波動性
- 2) フェルミ粒子の集団 \Rightarrow パウリ原理
- 3) 有限個数の多体系 \Rightarrow 表面効果

\Rightarrow メゾスコピック系



奇妙な性質

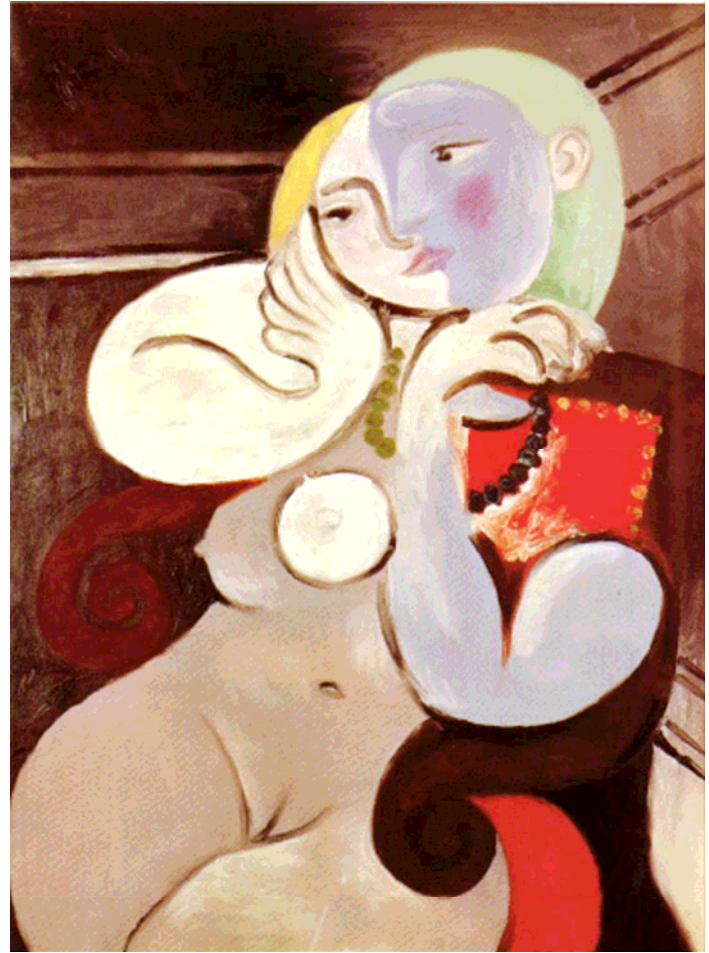
- a) 強い力で結合した高密度のシステムなのに
..... 核子は独立に運動する
- b) 協同して..... 集団運動する
- c) お互いに衝突して..... カオス的に振る舞う

この描像は間違っている！

このようにお互いに矛盾する性質を

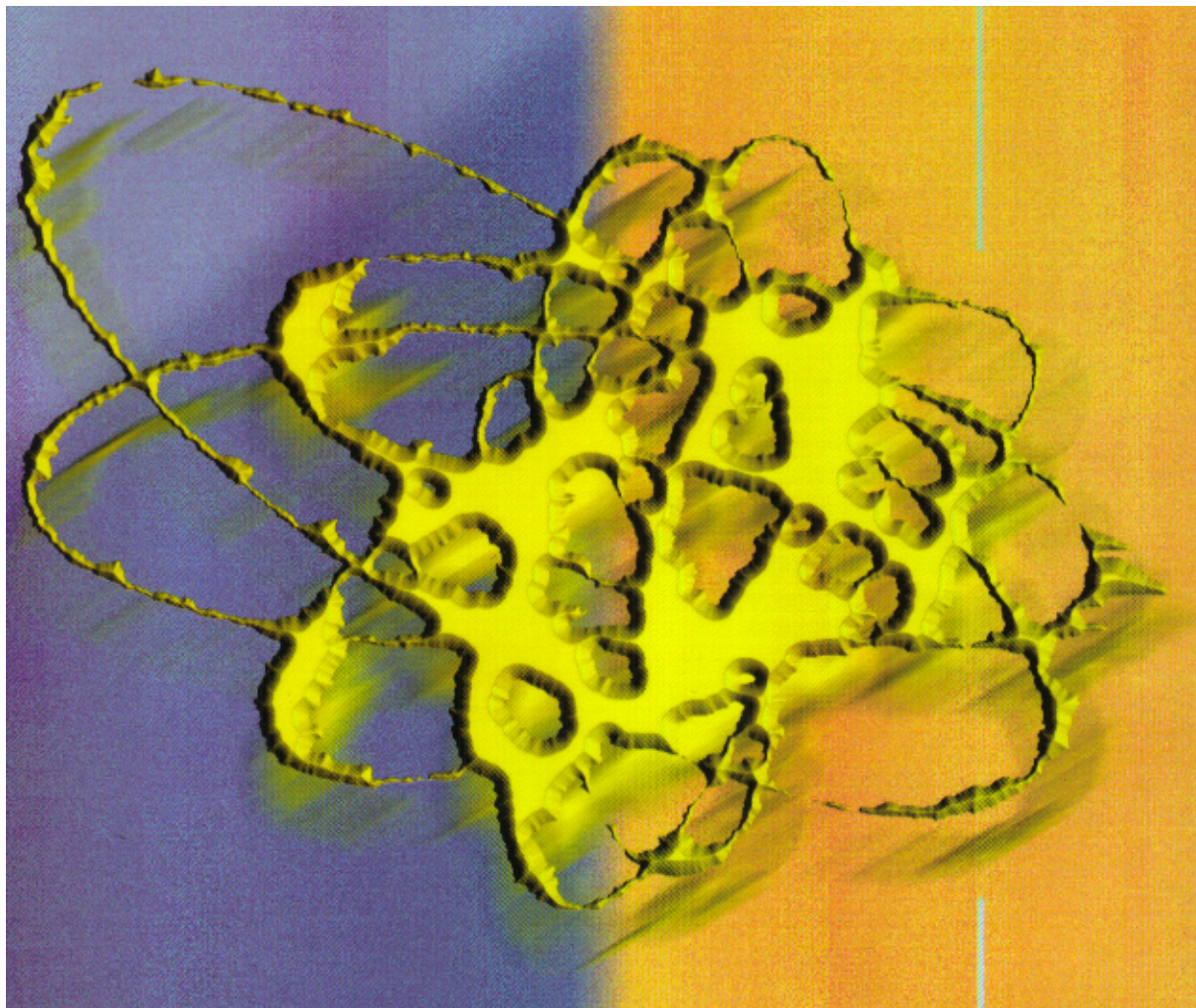
..... どのように考えたら

..... 統一的に理解できるだろうか？



ピカソの絵ふたつ

原子核に対する一つの芸術的イメージ

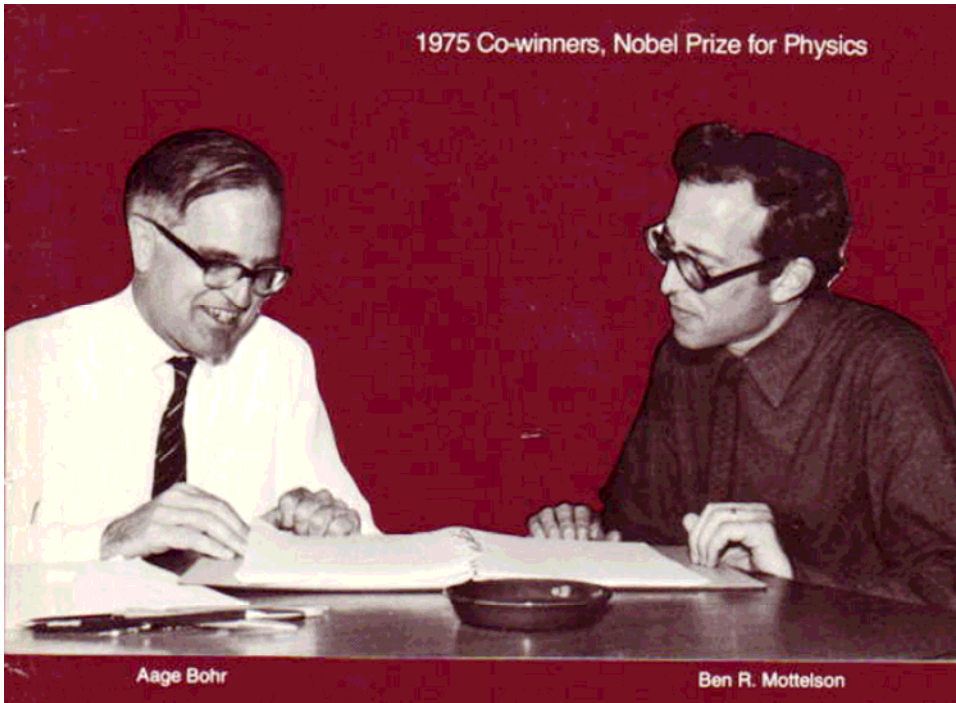


Aage Bohr and Ben R. Mottelson,
Nuclear Structure, Vol. 1 and 2,
World Scientific 1998版のカバー

Bohr-Mottelson

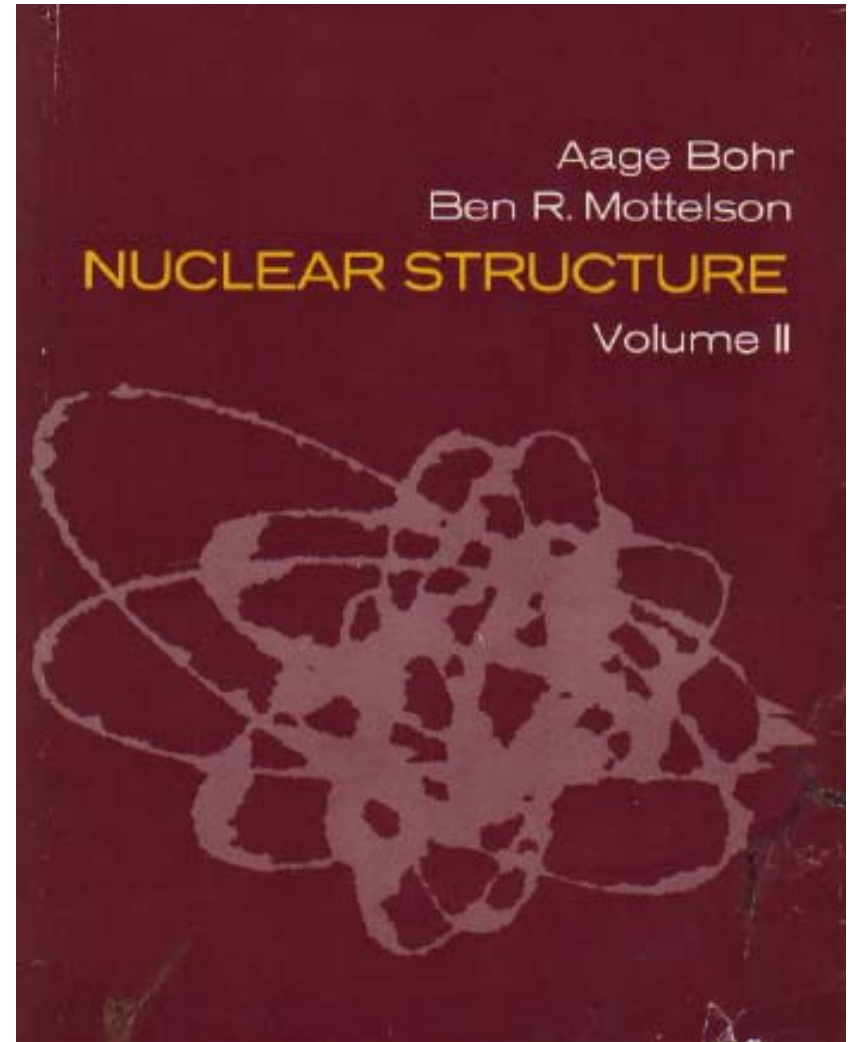


1975 Co-winners, Nobel Prize for Physics

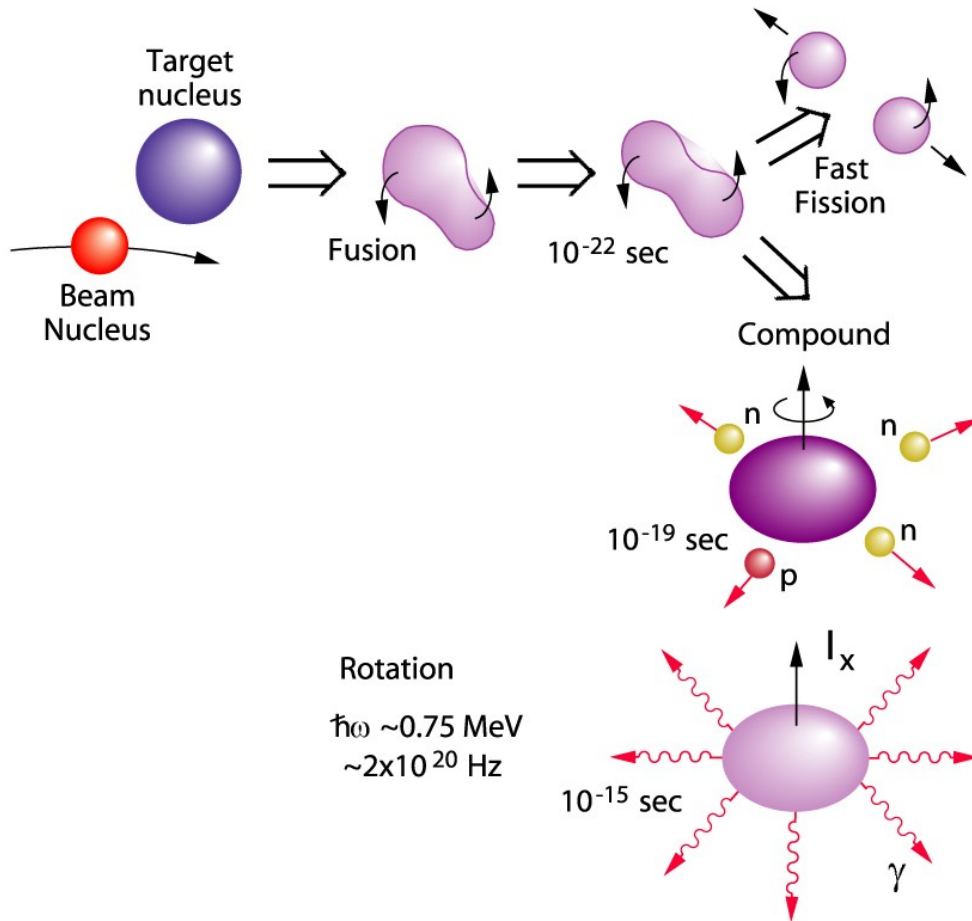


Aage Bohr

Ben R. Mottelson



重イオン融合反応による生成



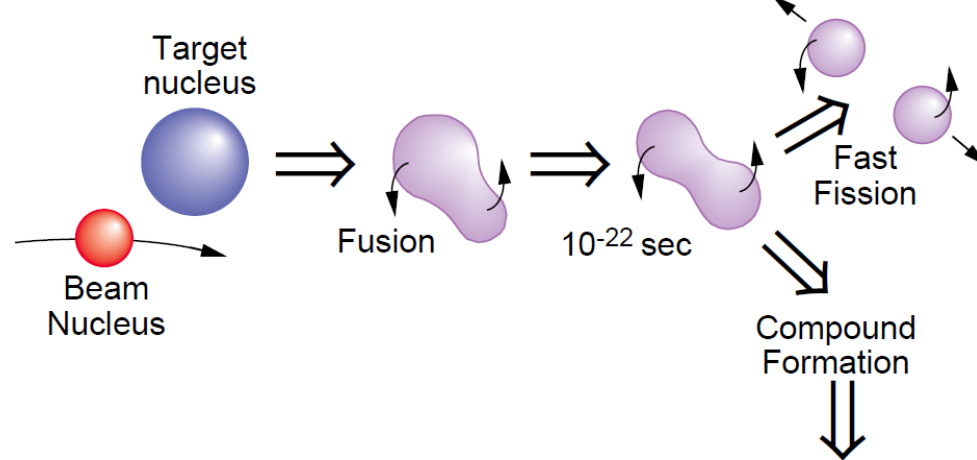
高温・高速回転



低温・高速回転



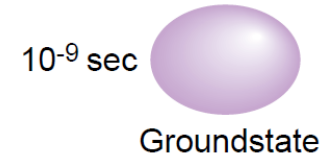
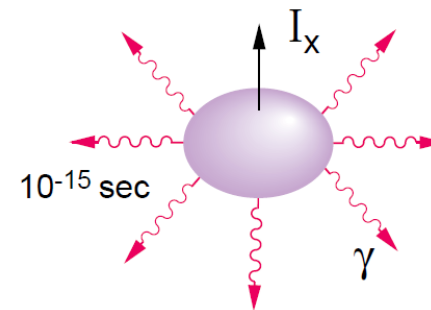
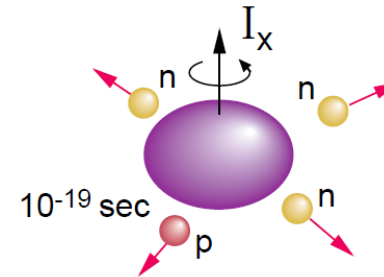
絶対零度・高速回転



$$\hbar\omega \sim 0.75 \text{ MeV}$$

$$\sim 2 \times 10^{20} \text{ Hz}$$

Rotation



1970年代以降、

- ・安定核どうしの衝突によって、高い励起状態、高スピン状態など極限状況の原子核を研究する道がひらけた。
- ・量子多体論にもとづく核構造論・核反応論(微視的モデル)がおおいに進展した。

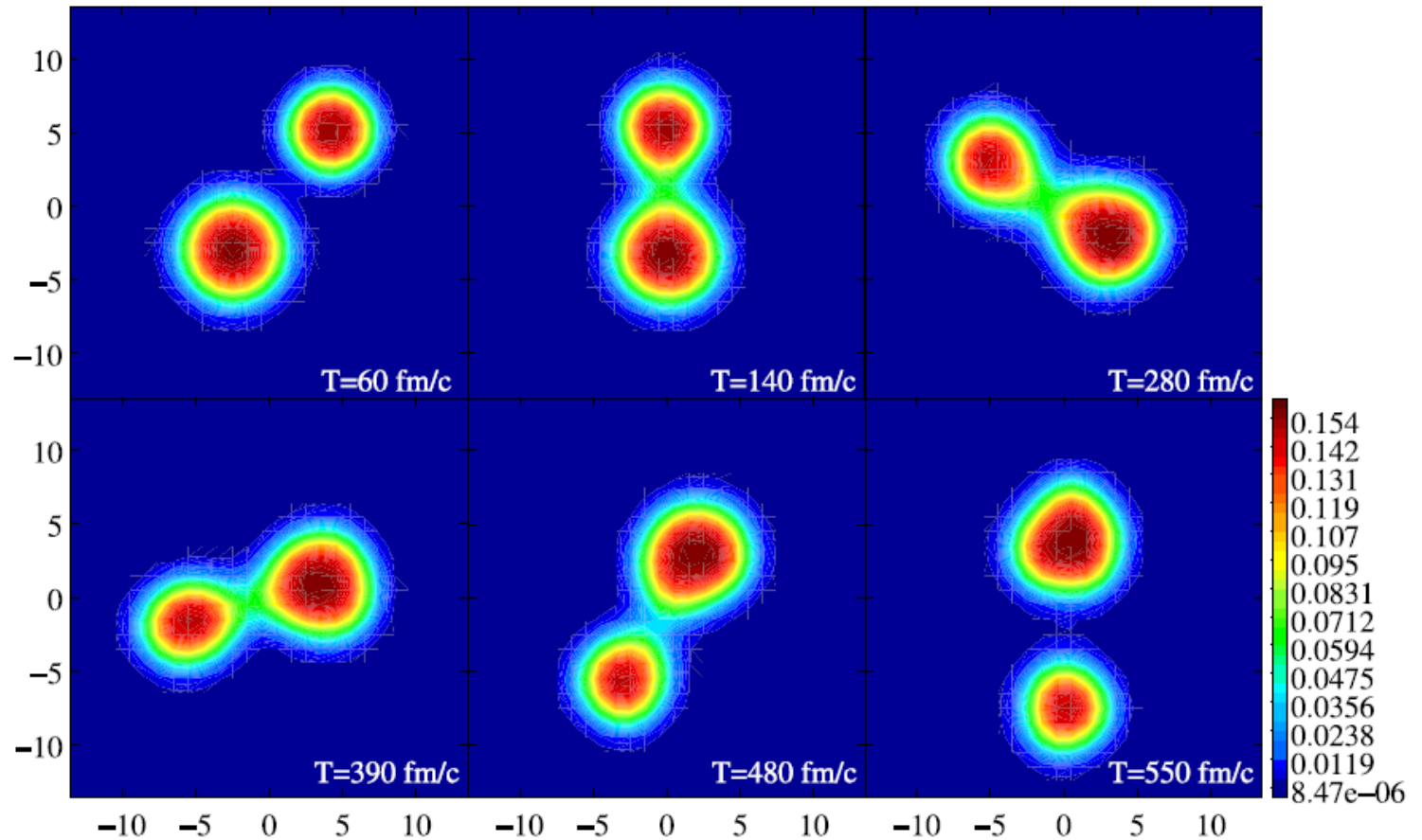
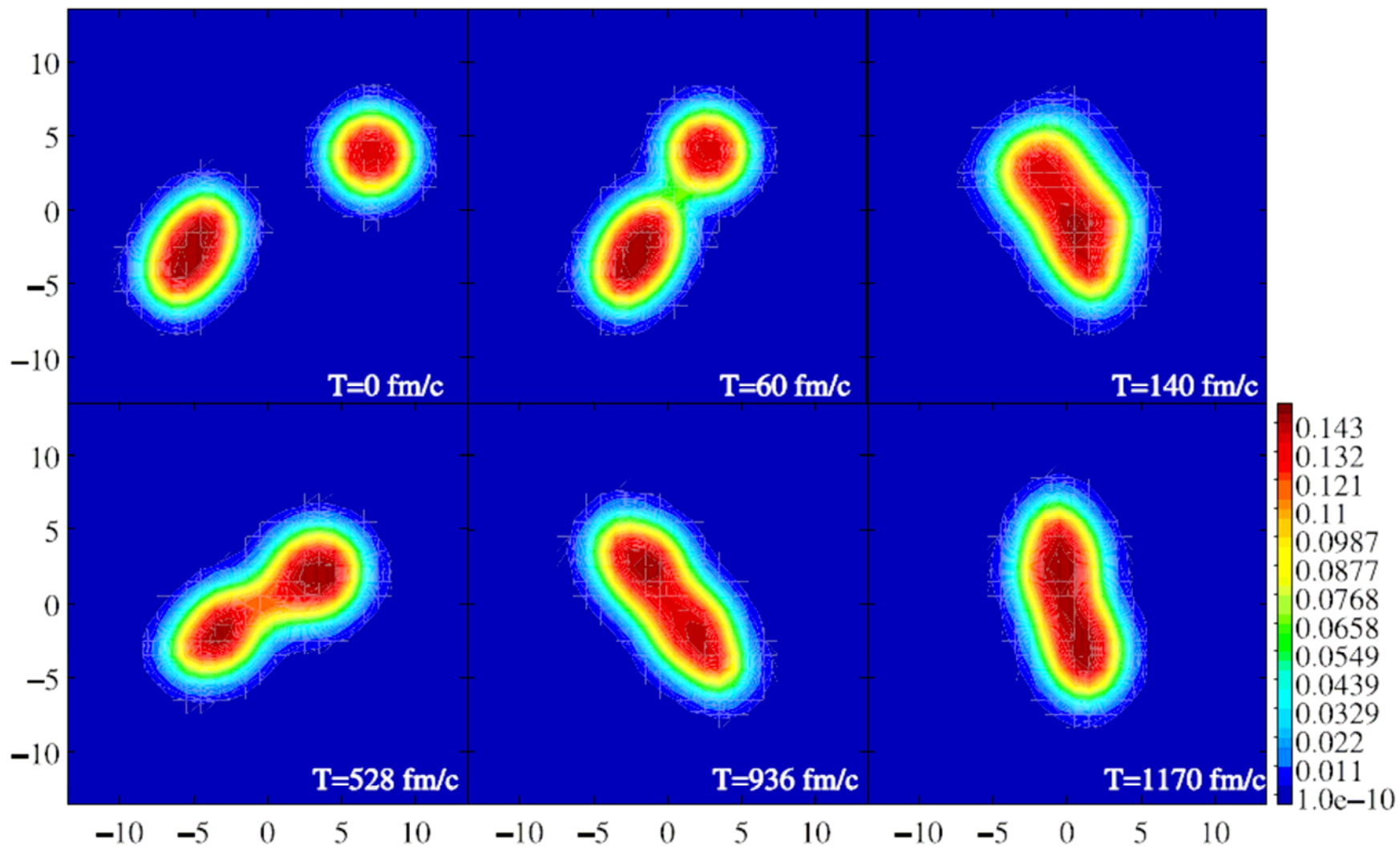
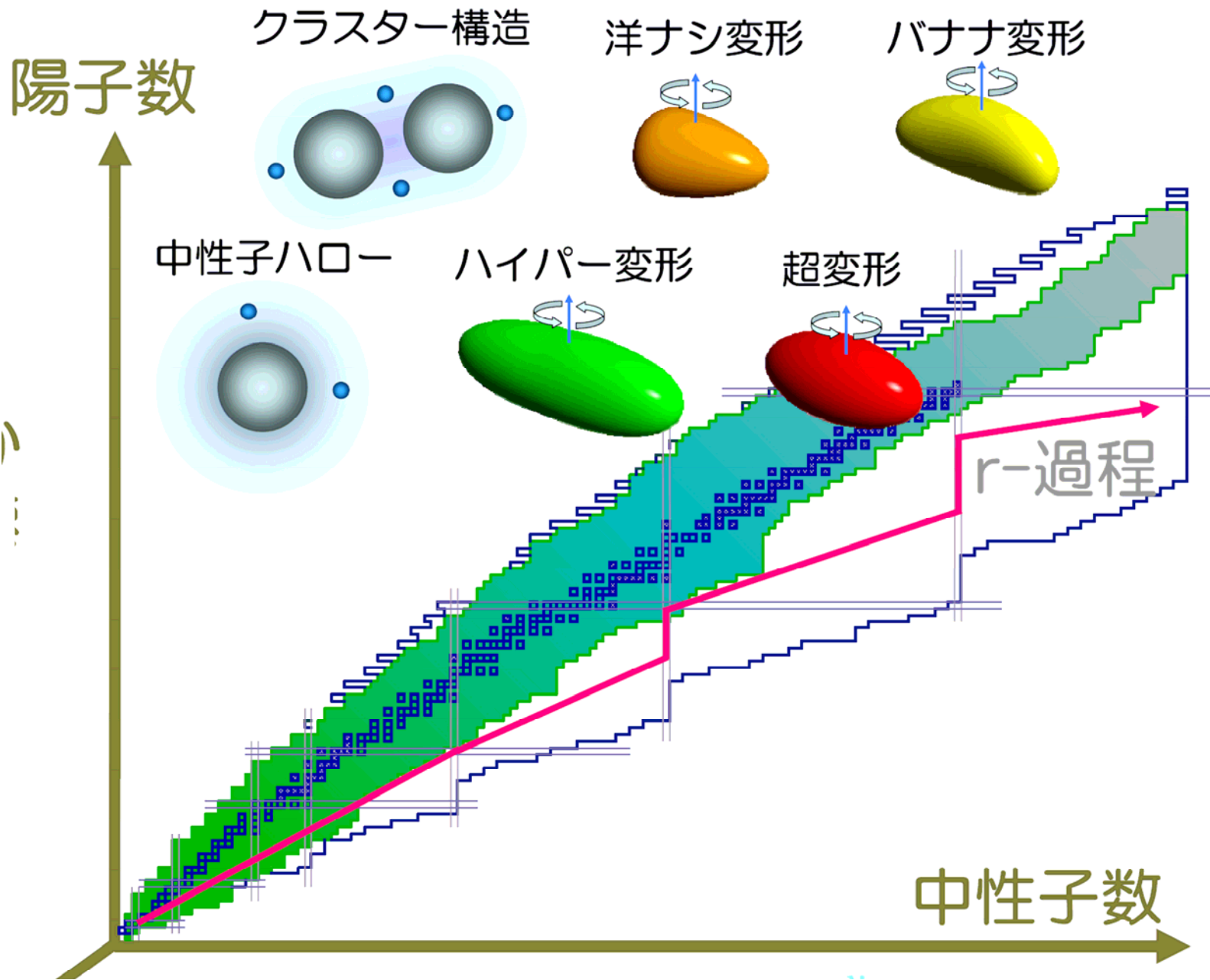
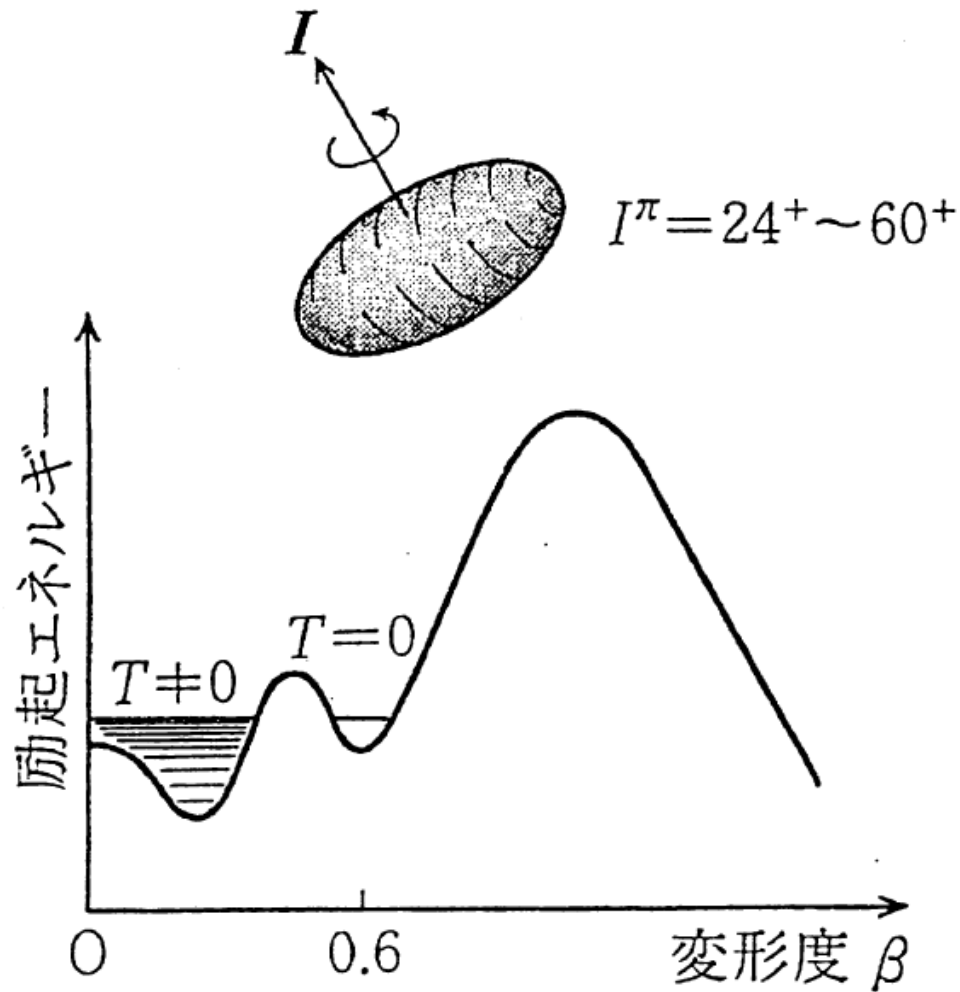


FIG. 4: (Color online) TDHF time-evolution for the $^{16}\text{O} + ^{28}\text{O}$ collision at an impact parameter of $b = 7.6$ fm, just above the fusion region, using the SLy5 interaction. The initial energy is $E_{cm} = 43$ MeV.





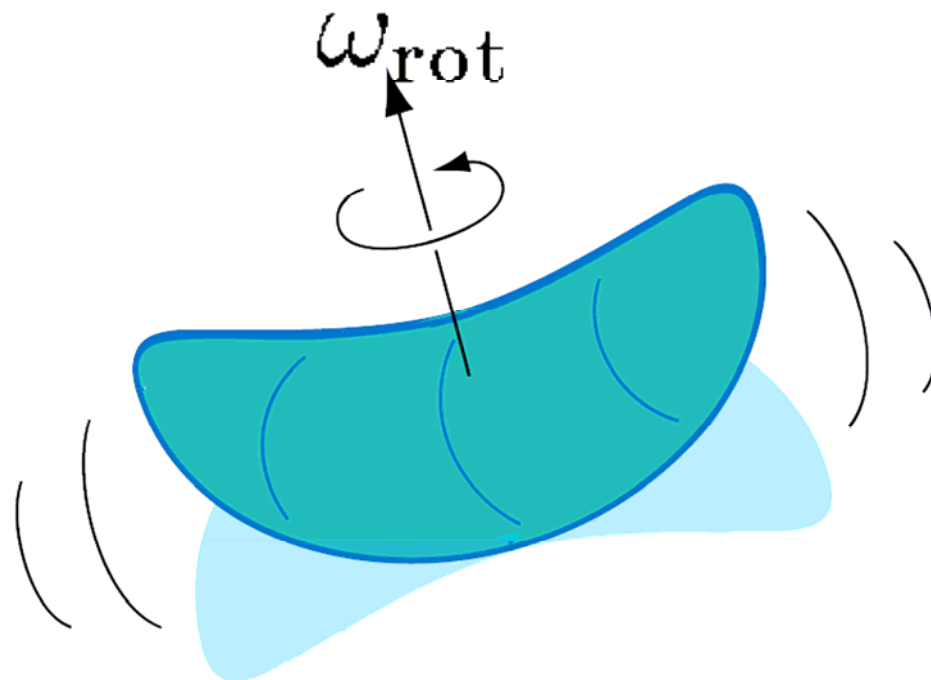
高速回転する超変形状態

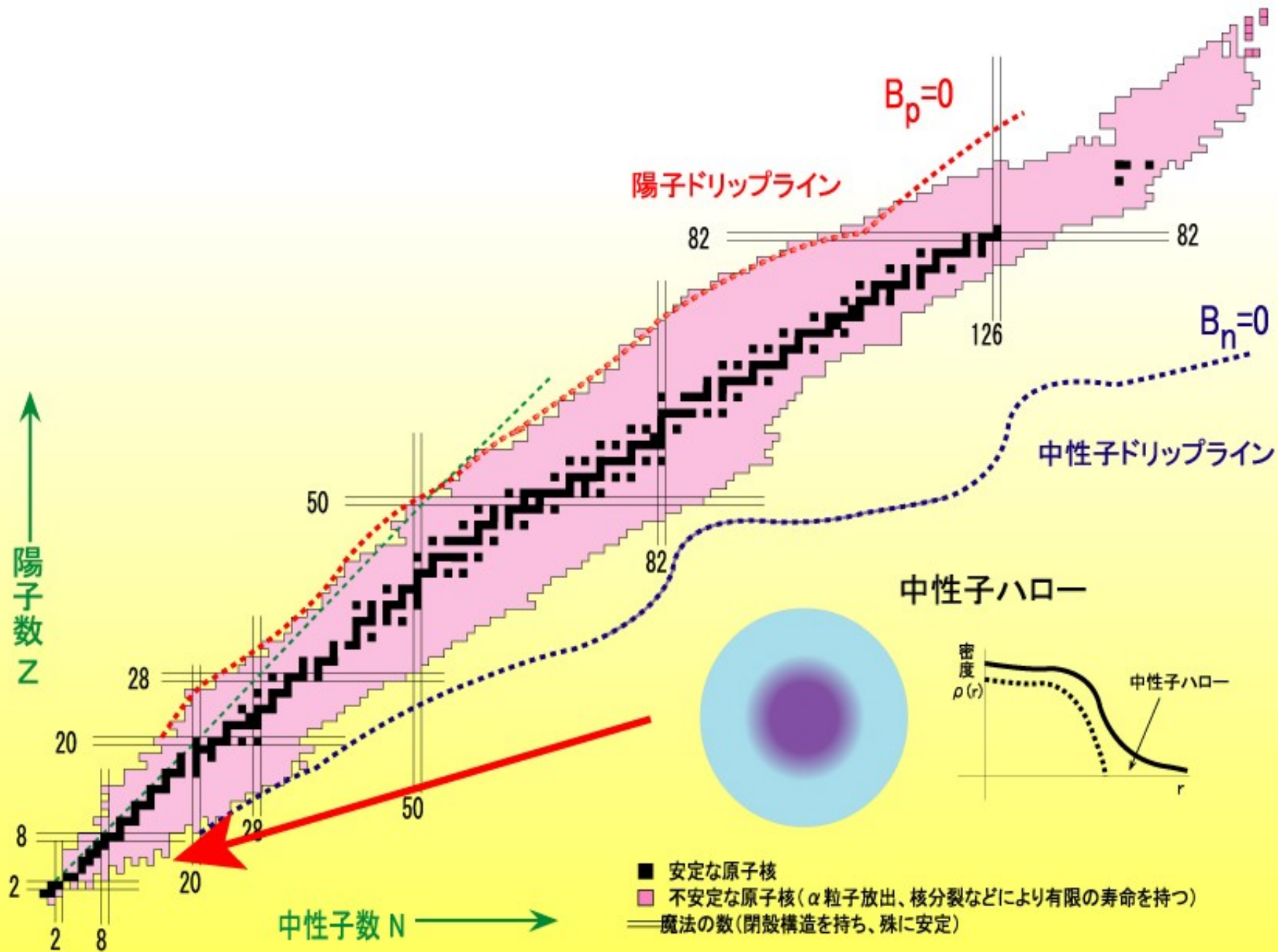


平均場の第2極小点
(二つの真空)

超変形状態から
常変形状態への
巨視的トンネル現象

バナナ振動しつつ高速回転する超変形核





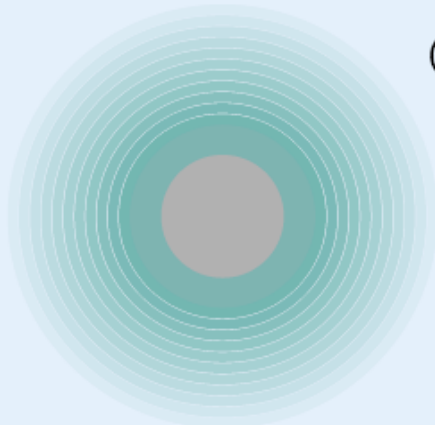
安定核



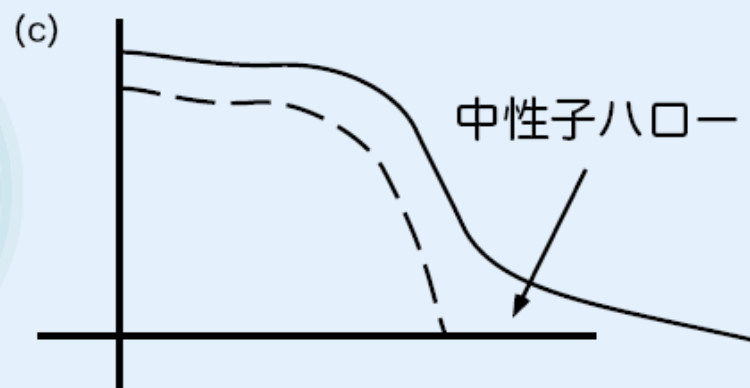
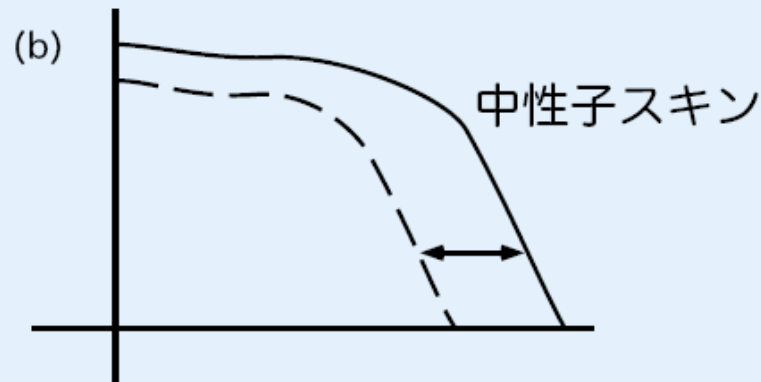
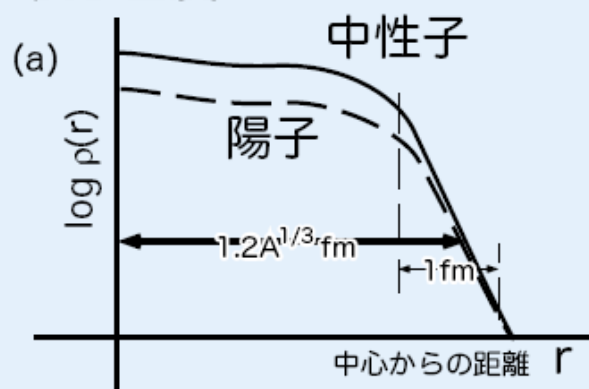
中性子スキン



中性子ハロー

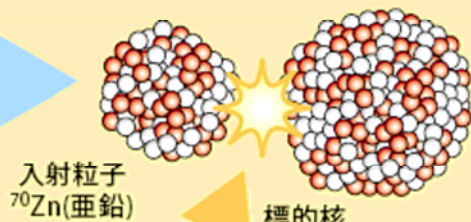


核子密度



113番元素の発見

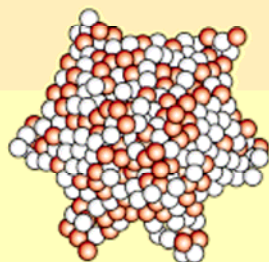
線型加速器リニアック (RILAC)
からのビーム



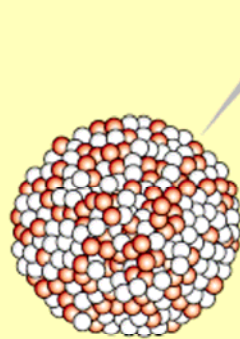
入射粒子
 ^{70}Zn (亜鉛)

標的核
 ^{209}Bi (ビスマス)

核反応



励起状態 (高温の複合核)
 $^{279}[113]^*$



基底状態の核 (目的核種)
 $^{278}[113]$

中性子を放出して冷却

アルファ崩壊

目的核種の娘核
 $^{274}[111]$

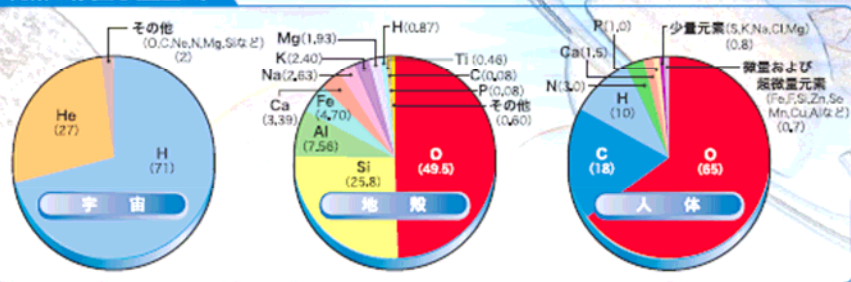
原子核の構成要素

- 中性子
- 陽子

時間経過



元素の存在比 (重量%)



元素周期表

Periodic Table of the Elements

自然も暮らしもすべて元素記号で書かれている

2

ベリリウム 9.012
4 Beryllium



湯川秀樹
(1949年ノーベル物理学賞受賞)
未知の高粒子、中間子の存在を予言



江崎玲於奈
(1973年ノーベル物理学賞受賞)
半導体エサキ・ダイオードを発明



利根川進
(1987年ノーベル生理学医学賞受賞)
免疫グロブリンの構造を解明



野依良治
(2001年ノーベル化学賞受賞)
不斉合成のための触媒分子を開発



田中耕一
(2002年ノーベル化学賞受賞)
生体高分子の構造解析の手法を開発

マグネシウム 24.305
12 Magnesium



朝永振一郎(1965年ノーベル物理学賞受賞)
素粒子をつつくりこみ理論を展開



原 謙一(1981年ノーベル化学賞受賞)
フロンティア軌道理論を開拓



白川英樹(2000年ノーベル化学賞受賞)
導電性ポリマーの発見と開発



小柴昌俊(2002年ノーベル物理学賞受賞)
宇宙からのニュートリノの検出に成功

金 197.0
79 Gold

金貨(世界通貨)や装飾品
電子回路用の電極
ガラスの着色(赤色切り子)
抗リウマチ剤(Auの化合物)

水銀 200.6
80 Mercury

液体金属: 温度計や体温計
蛍光灯にはHg蒸気を封入
掃除機などの水銀ボタン電池
水俣病は有機水銀が原因

タリウム 204.4
81 Thallium

放射性同位体は心筋の診断剤
低温用温度計(HgにTlを混ぜる)
遠赤外線用の光学材料
ネズミの駆除に使うこともある

鉛 207.2
82 Lead

鉛蓄電池や自動車バッテリー
活字用合金、はんだ(Pb-Sn合金)
放射線のしゃへい剤(鉛ガラス)
はテレビのブラウン管に使用

ビスマス 209.0
83 Bismuth

低融点合金(ヒューズや火災
用自動スプリンクラーの口金)
セラミックスやガラスの製造
次硝酸ビスマスは胃かいよう薬

ポロニウム (210)
84 Polonium

キュリー夫妻が発見
アルファ線源や中性子源
原子力電池
最も毒性が強い元素

レントゲニウム (272)
111 Roentgenium

半減期
 0.0001 秒

112 元素 (277)

半減期 0.00028 秒

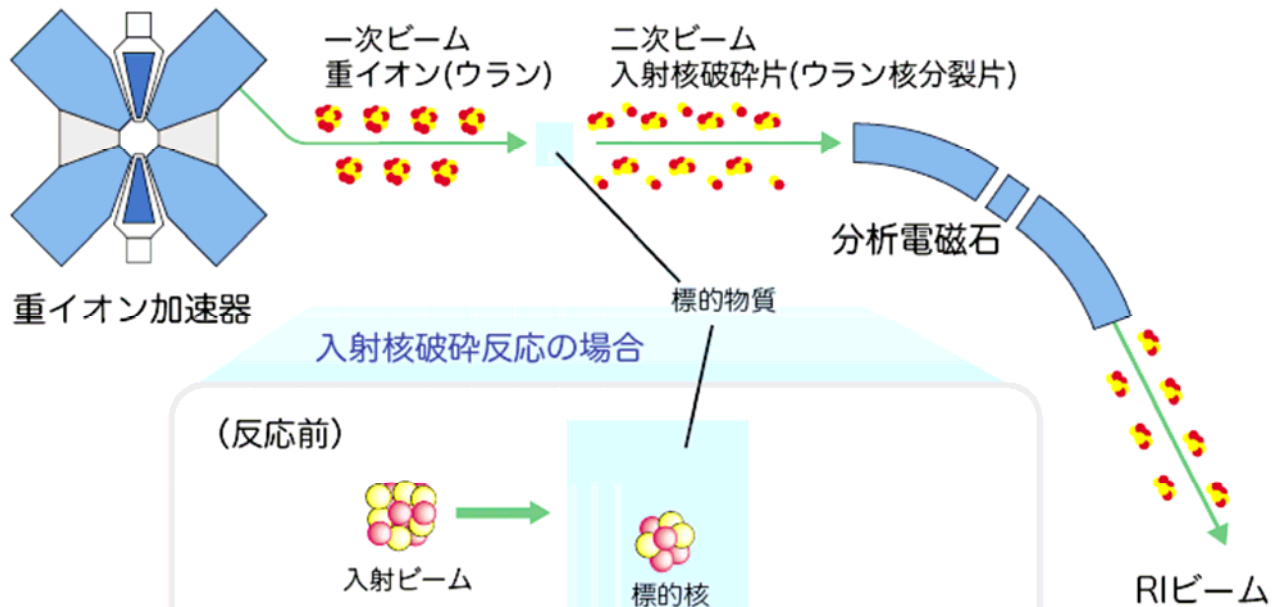
113 元素 (278)

2004年7月23日、日本の理
化学研究所で発見された新
元素、
半減期 0.0003 秒

※ここに示した原子量は、各元素の詳しい原子量の値を有効数字4桁に四捨五入して安定同位体がなく、同位体の天然存在比が一定しない元素はその元素の代表的な同位体名を記すこととする。
※元素名のうち、AlはAluminium, CsはCaesiumと表記することもある。
※半減期は同位体のうち最も長いものを示してある。

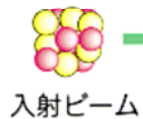
仁科・湯川・朝永



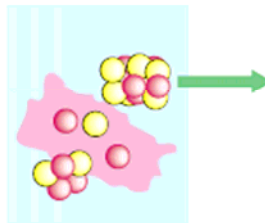


入射核破砕反応の場合

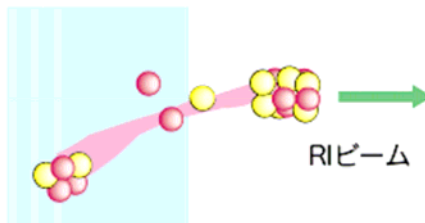
(反応前)



(反応中)



(反応後)



RIBFによる核図表の拡大

核図表の拡大

軽核から中重核へ
3000種から4000種へ

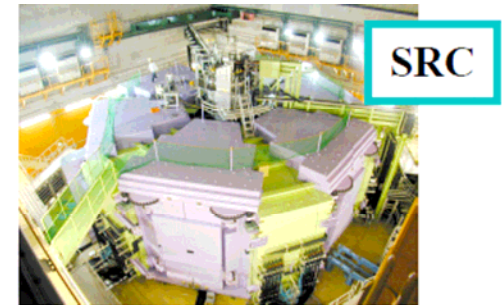
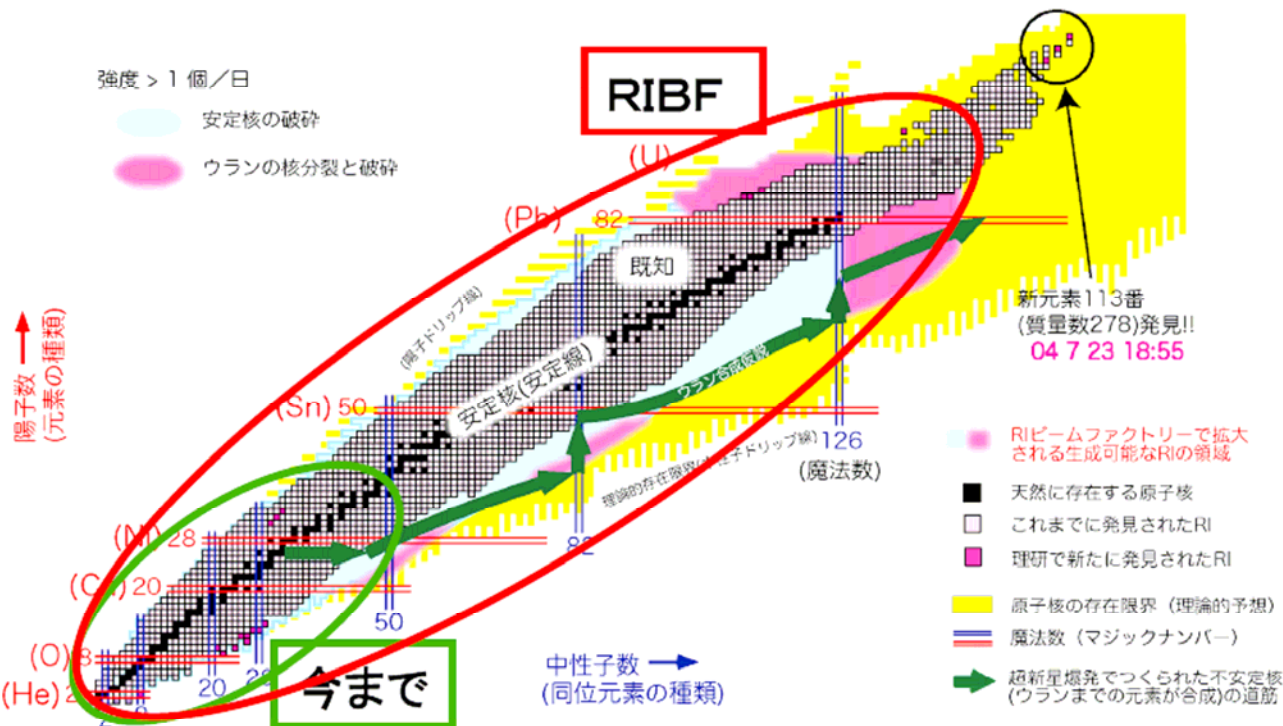
- 1) 究極の原子核モデルの構築
- 2) 元素の起源の解明

RIBFとは

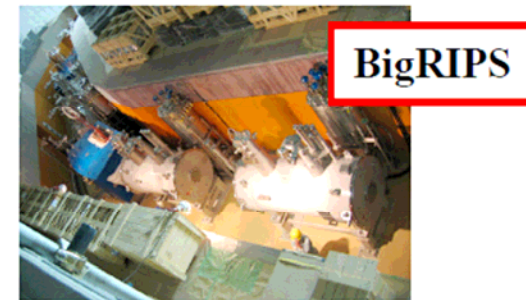
超伝導リングサイクロトロン(SRC)による
高エネルギー・大強度ウランビームの加速

+

BigRIPSにより、ウラン核分裂片の収集分離
=> 多量の中性子過剰核(N>Z)製造



+



RIBFの目指す物理

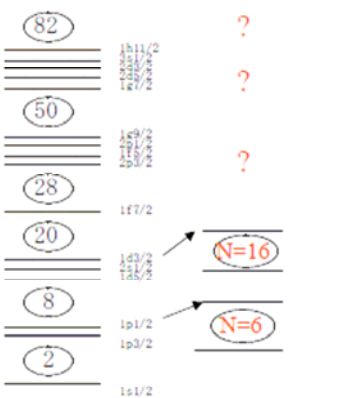
陽子数・中性子数が極端に異なる未知核の諸問題

「殻構造の変化」

中性子過剰核の諸性質
質量・寿命・形状等

“magicity loss” $N=8, 20, \dots$
“new magic numbers” $N=6, 16, \dots$
large changes of shell structures

Stable Nuclei Neutron-rich Nuclei



新しい原子核画像の構築

核内有効相互作用や励起モードの
アイソスピン依存性と密度依存性？
マイクロからバルクへ？

元素の起源の解明

ウランまでの元素合成過程(r-過程)？
超新星爆発機構・中性子星の外殻構造？

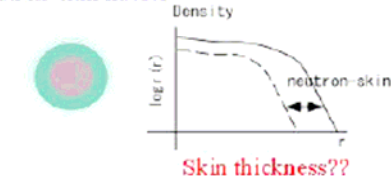
「新しい核物質の形態」

非対称核物質の状態方程式

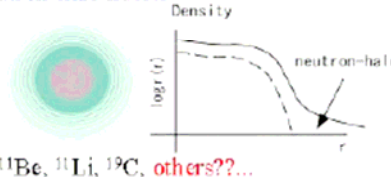
Nuclear Matter

isospin dependence of nuclear radii
 $r = r_0 \times A^{1/3}$ ($r_0=1.2$ fm) ?
new forms of nuclei

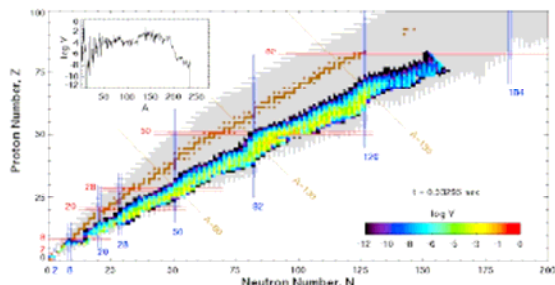
neutron-skin nuclei



neutron-halo nuclei



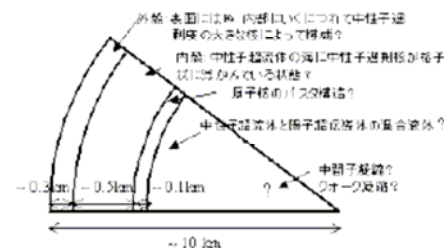
r-過程



超新星爆発機構

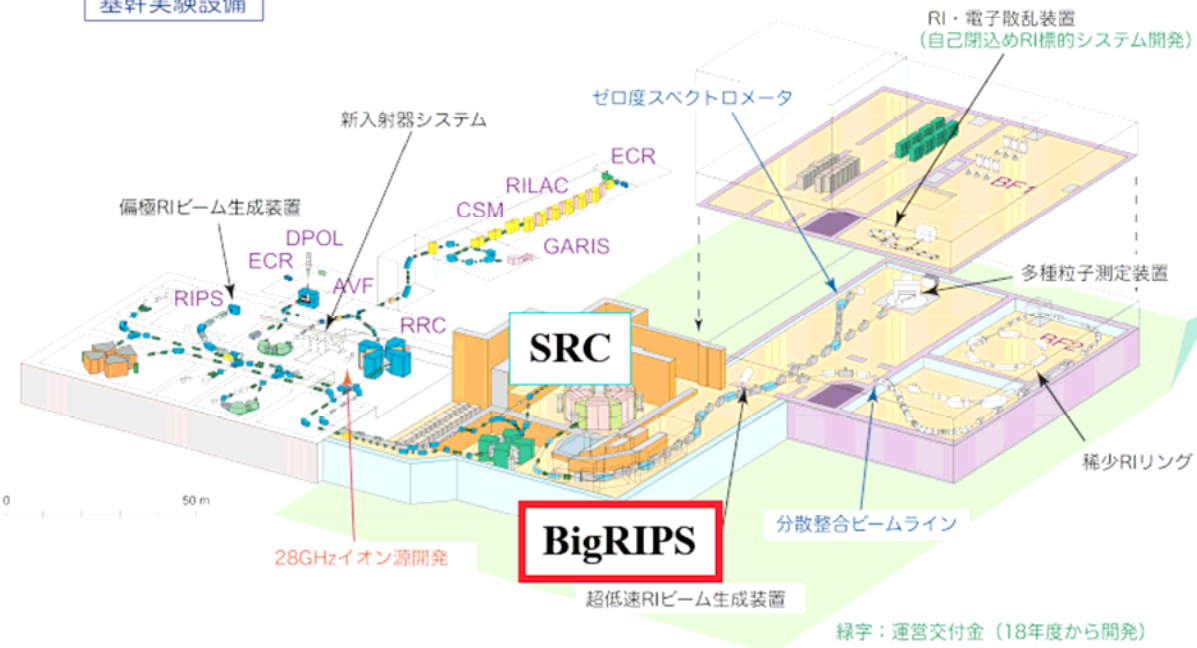


中性子の内部構造(予想)



基幹実験設備で目指すもの

基幹実験設備



緑字：運営交付金（18年度から開発）
 橙字：運営費交付金（19年度から開発）
 青字：施設整備費補助金（19年度から整備）
 黒字：施設整備費補助金（20年度以降整備）

未知の原子核の
 様々な異常領域を探る



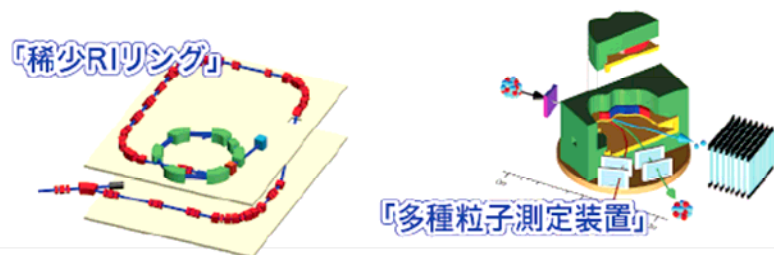
原子核全体の磁石の強さを測定し
 原子核のミクロな構造を知る



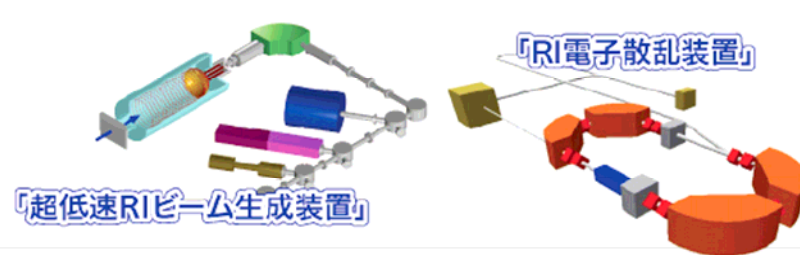
原子核の新共鳴状態の探索



中性子過剰核の性質を調べ、
 ウラン合成仮説を解明し元素起源の謎に挑戦



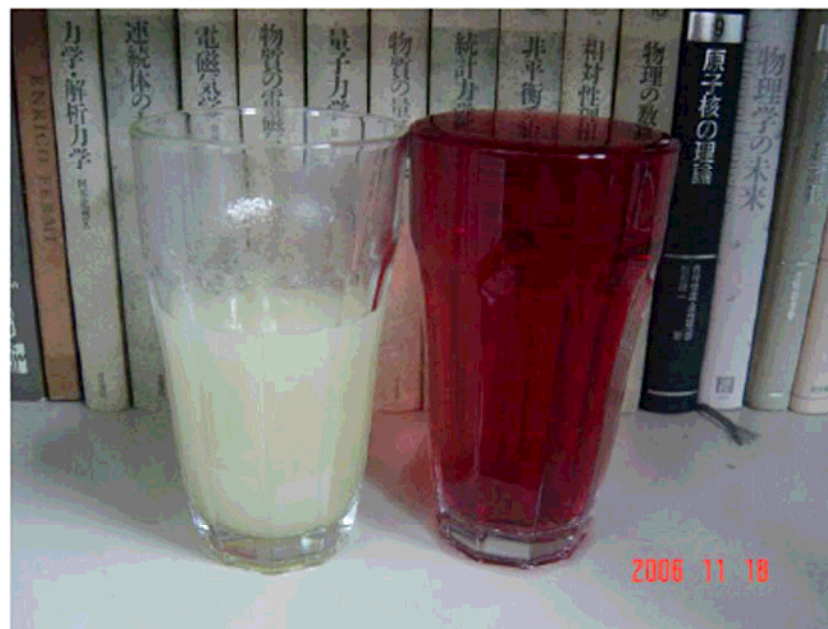
原子核を構成する陽子、中性子の分布を測定し
 核物質の新しい形態を明らかにする



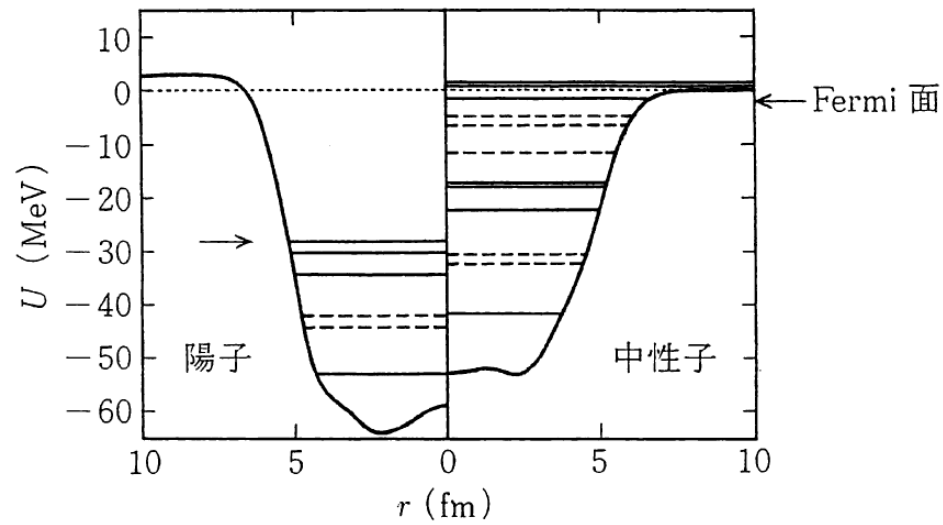
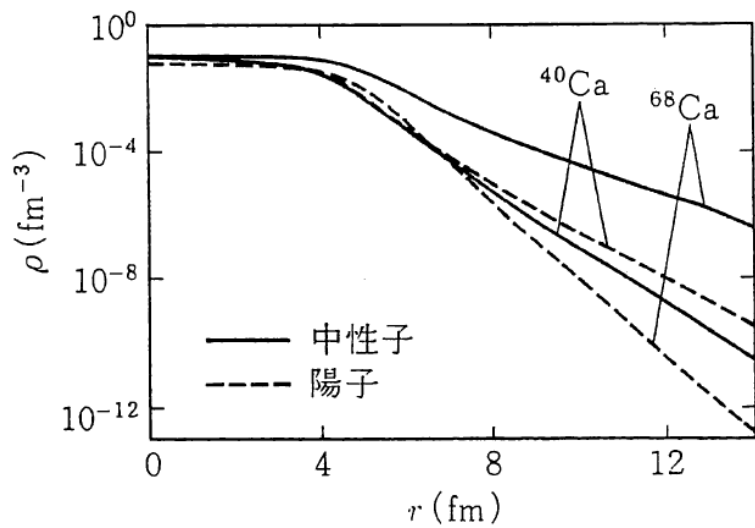
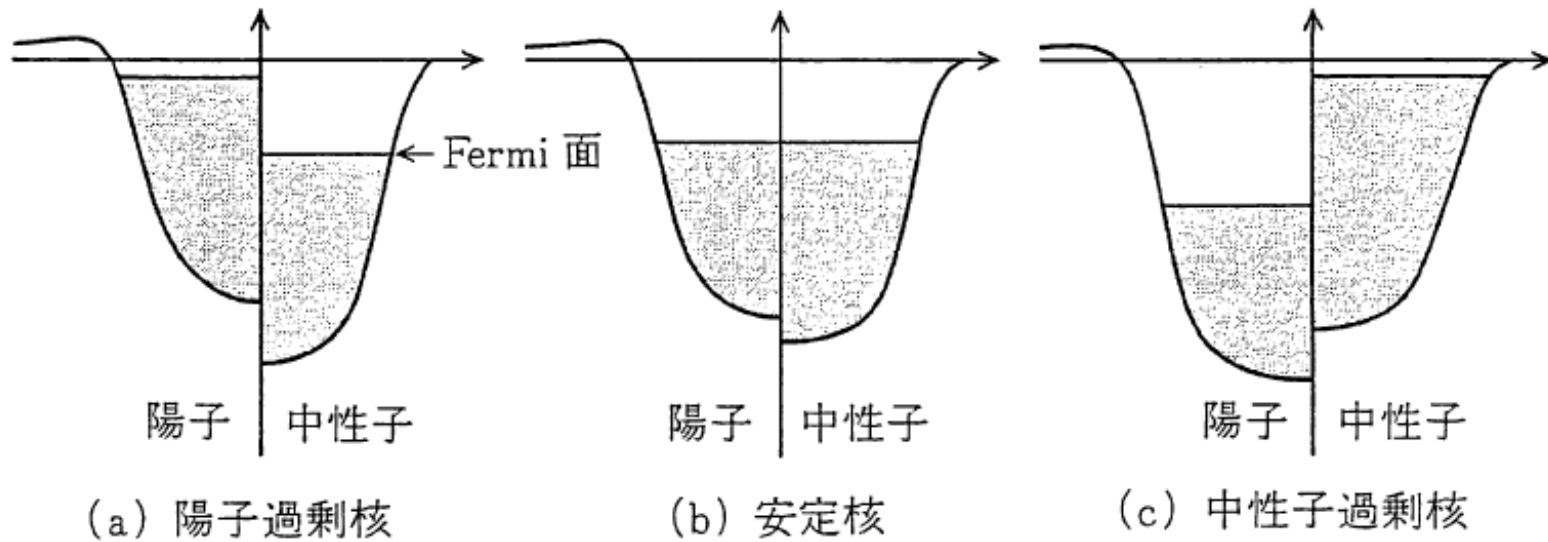
安定核



中性子がドリップ寸前の原子核



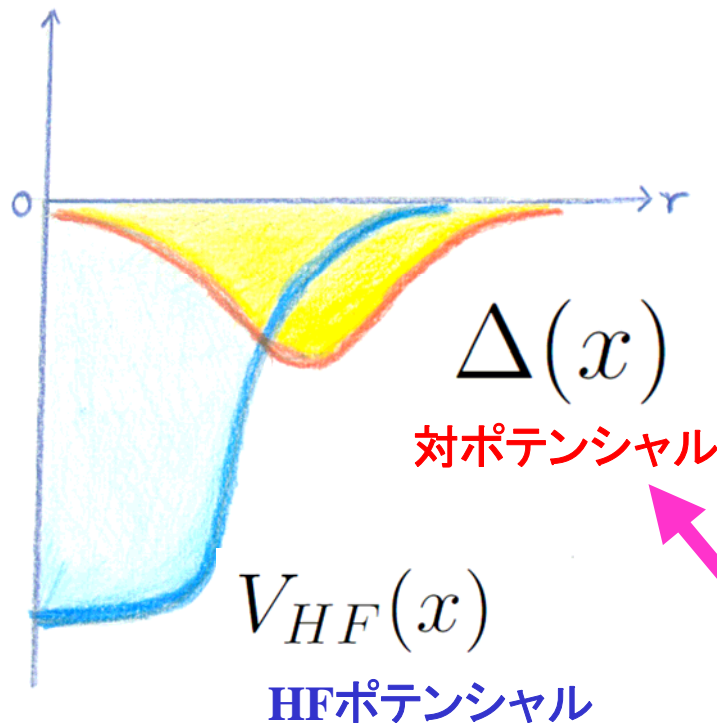
不安定核の平均場の特徴



BCS準粒子と異なる 新しい準粒子描像

Hartree-Fock-Bogoluibov平均場

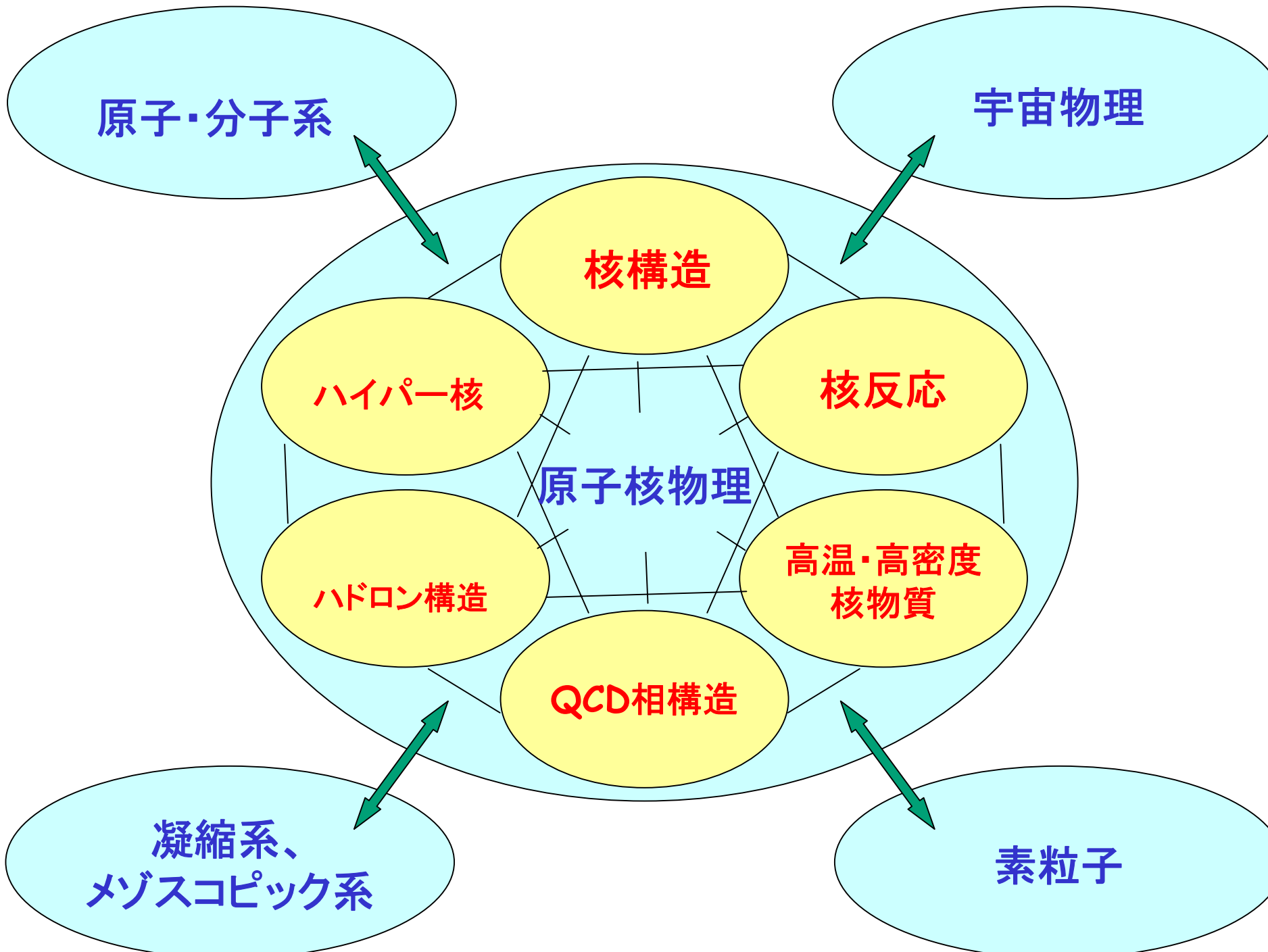
$$\begin{pmatrix} t + V_{HF}(x) - \lambda & \Delta(x) \\ -\Delta^*(x) & -t - V_{HF}(x) + \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(x) \\ v(x) \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} u(x) \\ v(x) \end{pmatrix}$$



$E > |\lambda|$ の準粒子波動関数は

上成分	$u(x)$	非局在
下成分	$v(x)$	局在

密度分布の表面より外に
広がっている!!



原子・分子系

宇宙物理

核構造

ハイパー核

核反応

原子核物理

ハドロン構造

高温・高密度
核物質

QCD相構造

凝縮系、
メゾスコピック系

素粒子

核物理の新しい時代



ドリップする限界の原子核

- 1930年代** 自然に存在する放射線を使った原子核研究
(中性子の発見1932, 湯川中間子論1935, 核分裂の発見1938)
- 1950年代** 加速器を使った原子核研究
(安定核の基底状態近傍の性質:
シェルモデル1949 と 集団運動モデル1953)
- 1970年代** あらゆる安定核ビームを使った核物理の開花
(高励起、高速回転など極限状態にある原子核:
量子多体系としての原子核に対する微視的理論の進展)
- 2000年代** 不安定核ビームを使った核物理の時代
2007年 いよいよ理研RIBF稼動 !!

現代物理学

- ・小レポートは毎回、
「本日の講義で印象に残った内容を
具体的かつ簡潔に記述せよ。
(感想を含んでもよい。)」

レポートを提出した学生から順次退室。

- ・A5用紙、縦置き、氏名と学籍番号記入
- ・レポート採点： 2点、1点、0点（欠席者も0点）