

不安定核ビームで探る原子核の多様な構造

下田研 小田原厚子

有限量子多体系

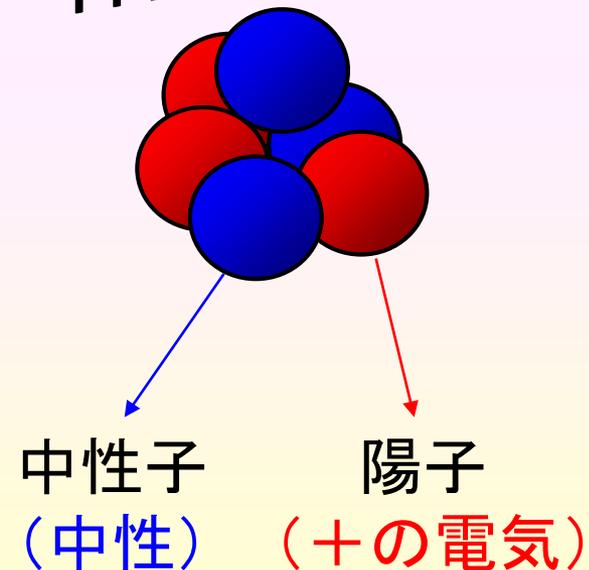
原子核 :

2種類のフェルミオン
(陽子と中性子)
からなる**多体系**

強い相互作用(結合)と
弱い相互作用(不安定)

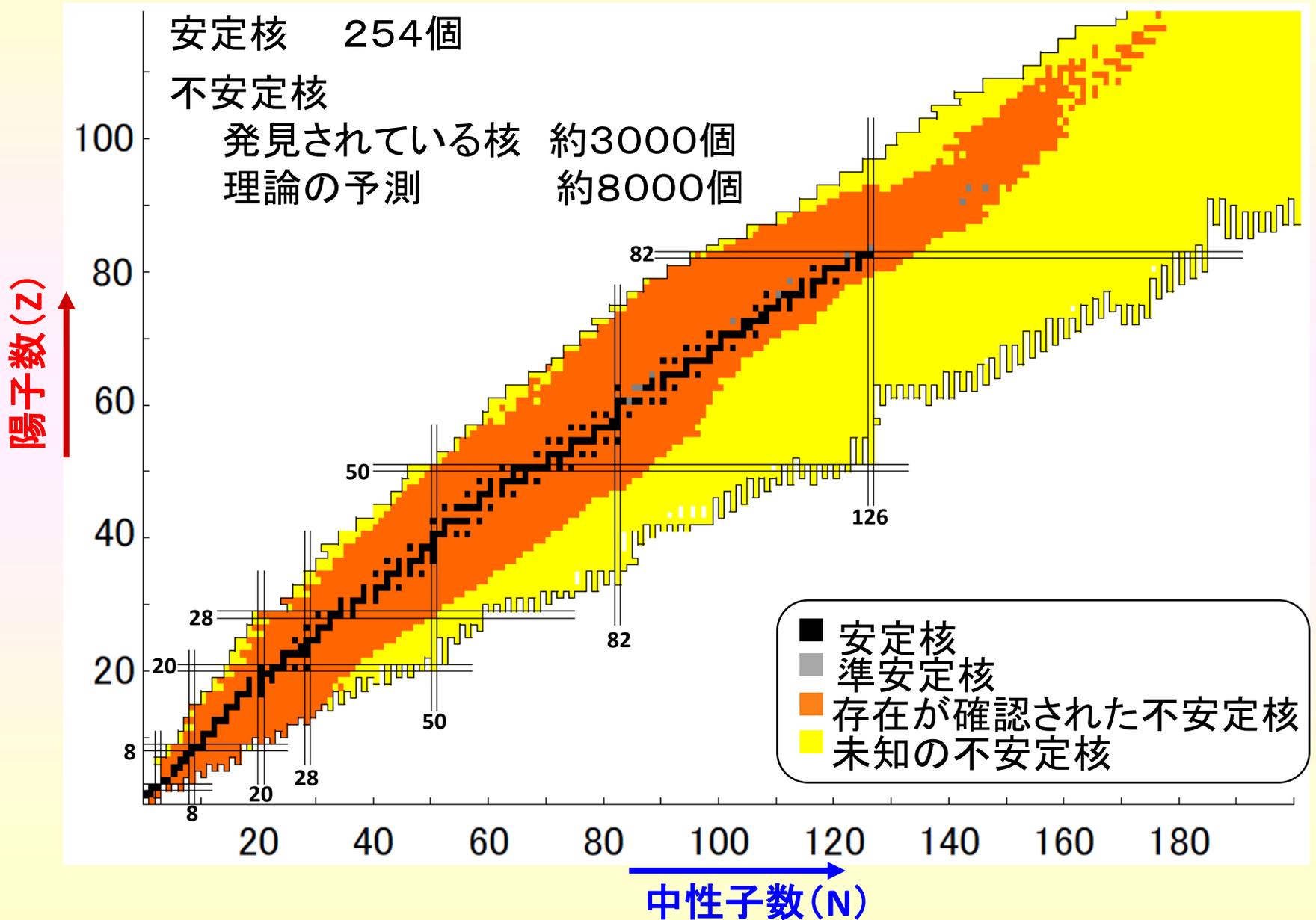
原子核を実験的に研究

10^{-14} m の世界



核物性

核図表 2012年11月



原子核分野の究極的な目標は？

従来の教科書に載っているような原子核の情報



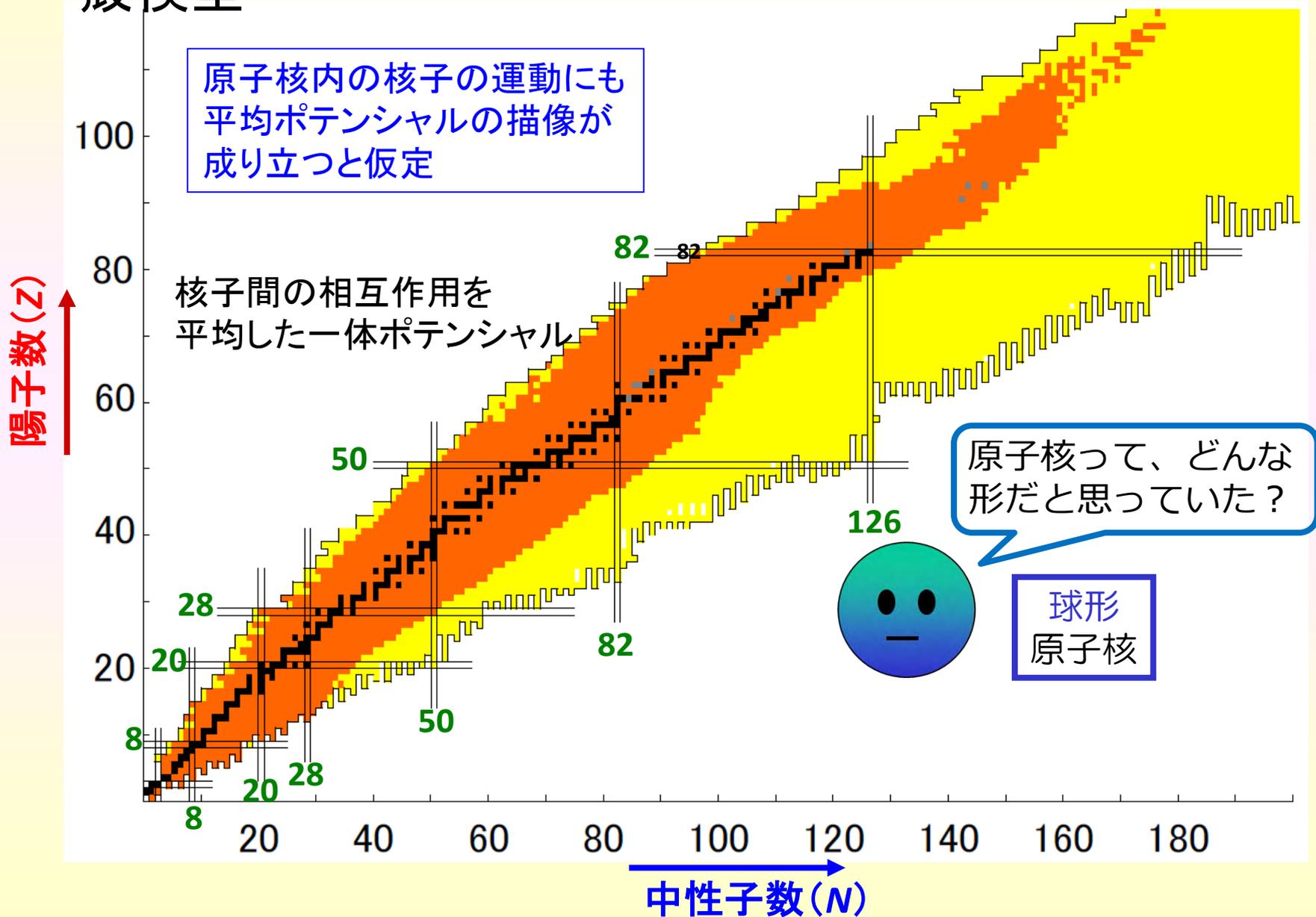
様々な模型
(モデル)で説明

単一粒子模型 殻模型

魔法数の存在

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

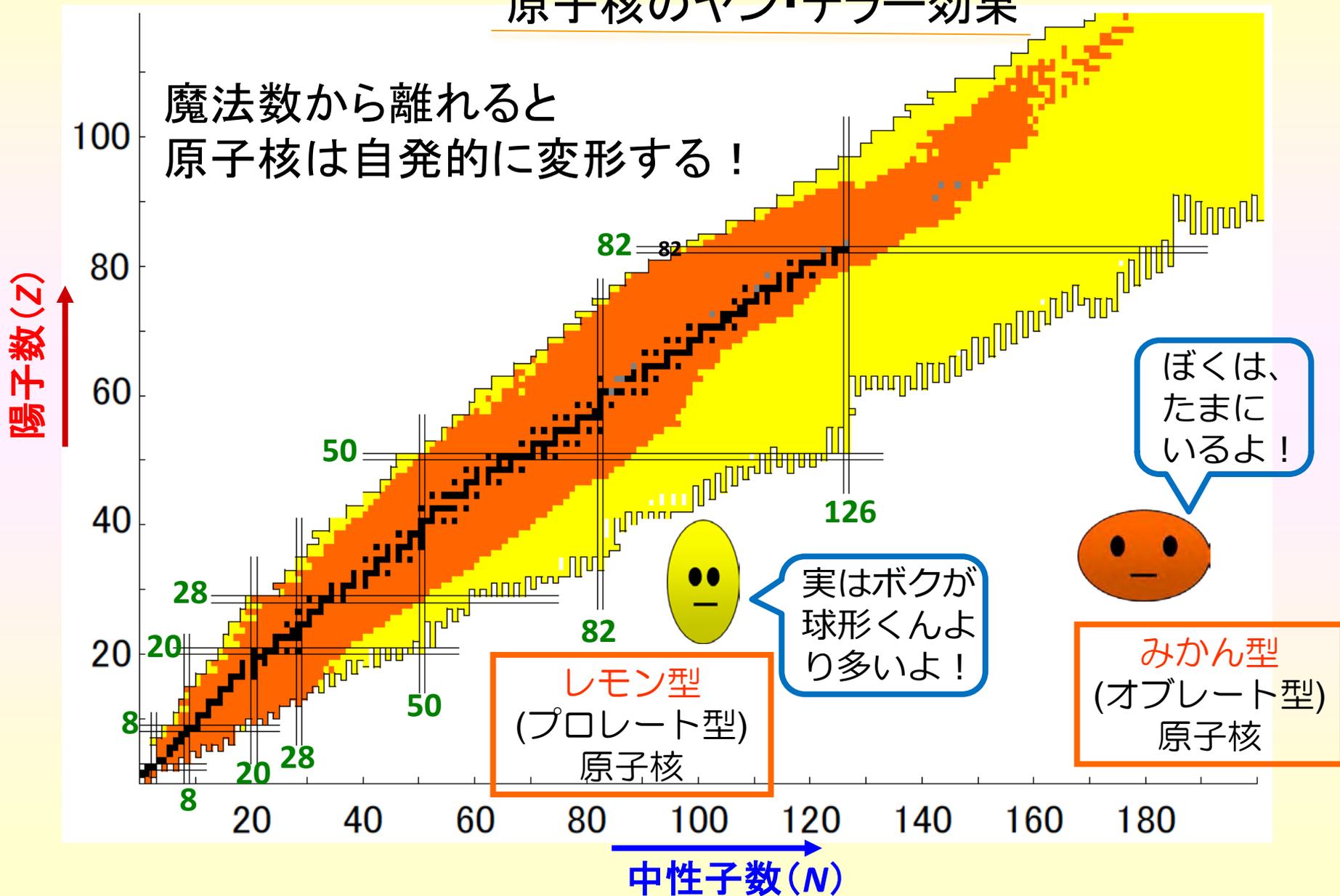
原子内の電子軌道の
閉殻効果と類似



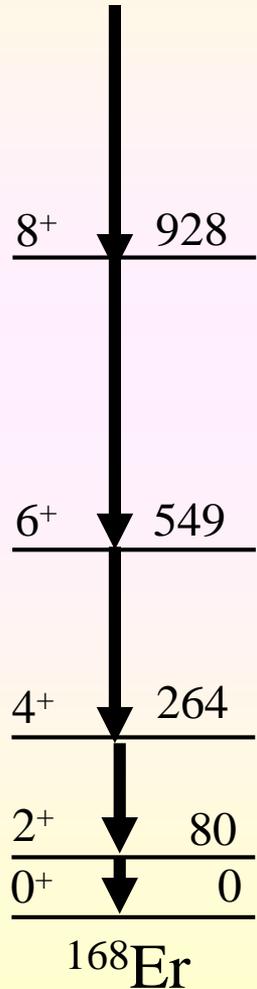
集団運動模型

原子核の自発的対称性の破れ

原子核のヤン・テラー効果



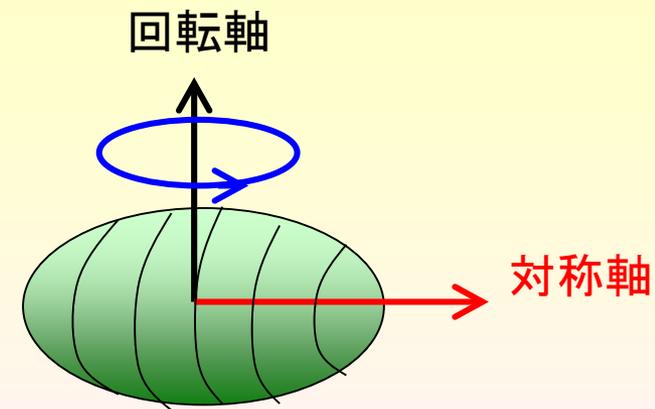
原子核の回転



原子核は変形すると、
対称性が悪くなる。
対称性を回復しようとして、
回転をはじめる。

→ **自然は対称性を好む**

原子核が**プロレート**変形すると回転する。
対称軸と回転軸は垂直。
対称軸まわりの回転は存在しない。
(量子力学的には、
対称軸まわりの状態は区別できない。)



原子核の特徴

1. 独立粒子模型

核子はそれぞれ → 殻模型
原子核の中の軌道を動く

しかし、

2. 集団運動

核子は協力して → 回転、振動
原子核全体として運動

さらに、

3. 原子核の高温状態ではカオス的に振る舞う

原子核分野の究極的な目標は？

従来の教科書に載っているような原子核の情報



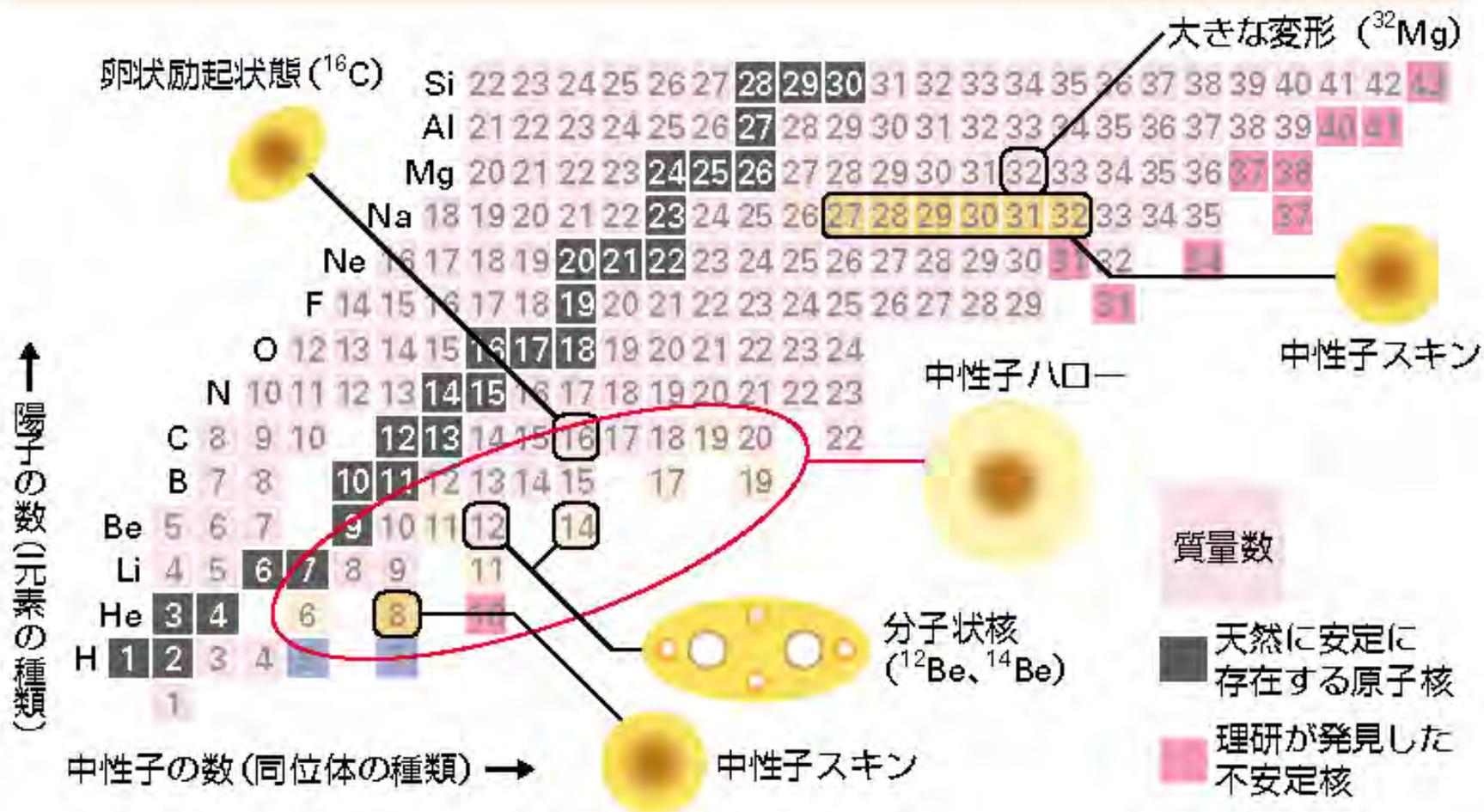
様々な模型
(モデル)で説明

最近の発展：
原子核の存在限界
極限状況での
原子核の振る舞い



近年の加速器や検出器の発展から

安定領域から離れた原子核の構造：原子核物理学の最前線



中性子の数が過剰に多い不安定核では、中性子だけが周辺部に広がった中性子スキンや中性子ハロー、さらには分子状の原子核など、安定核では見られない異常な構造が発見されている。 ^{16}C では、原子核の周辺部分がだ円形で、中性子だけが運動している卵状励起状態にあることも分かった。

原子核分野の究極的な目標

従来の教科書に載っているような原子核の情報



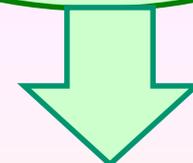
様々な模型
(モデル)で説明

最近の発展：
原子核の存在限界
極限状況での
原子核の振る舞い



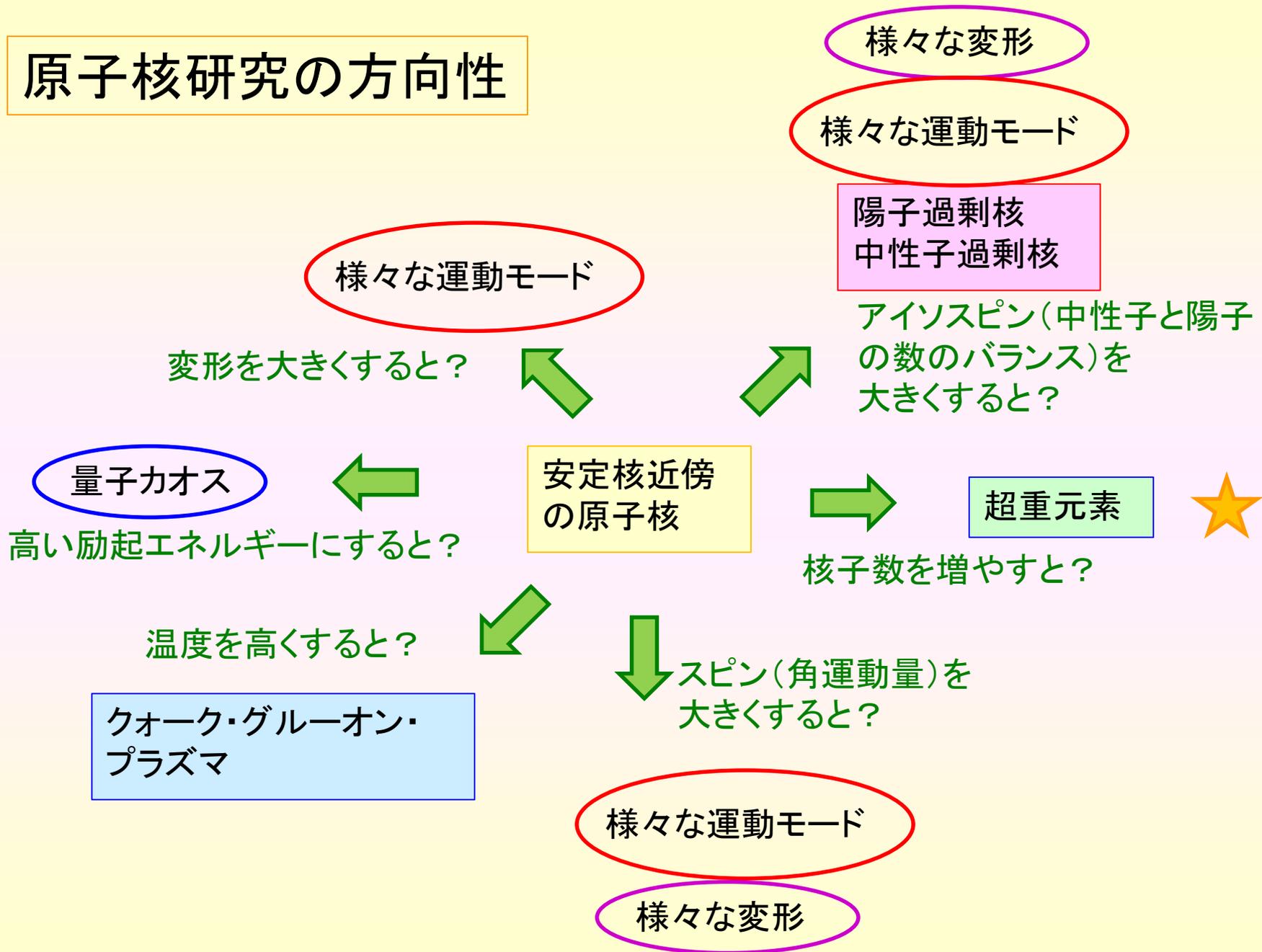
近年の加速器や検出器の発展から

有限量子多体系を
核力に基づいて
統一的に理解する



究極的な
統一理論

原子核研究の方向性



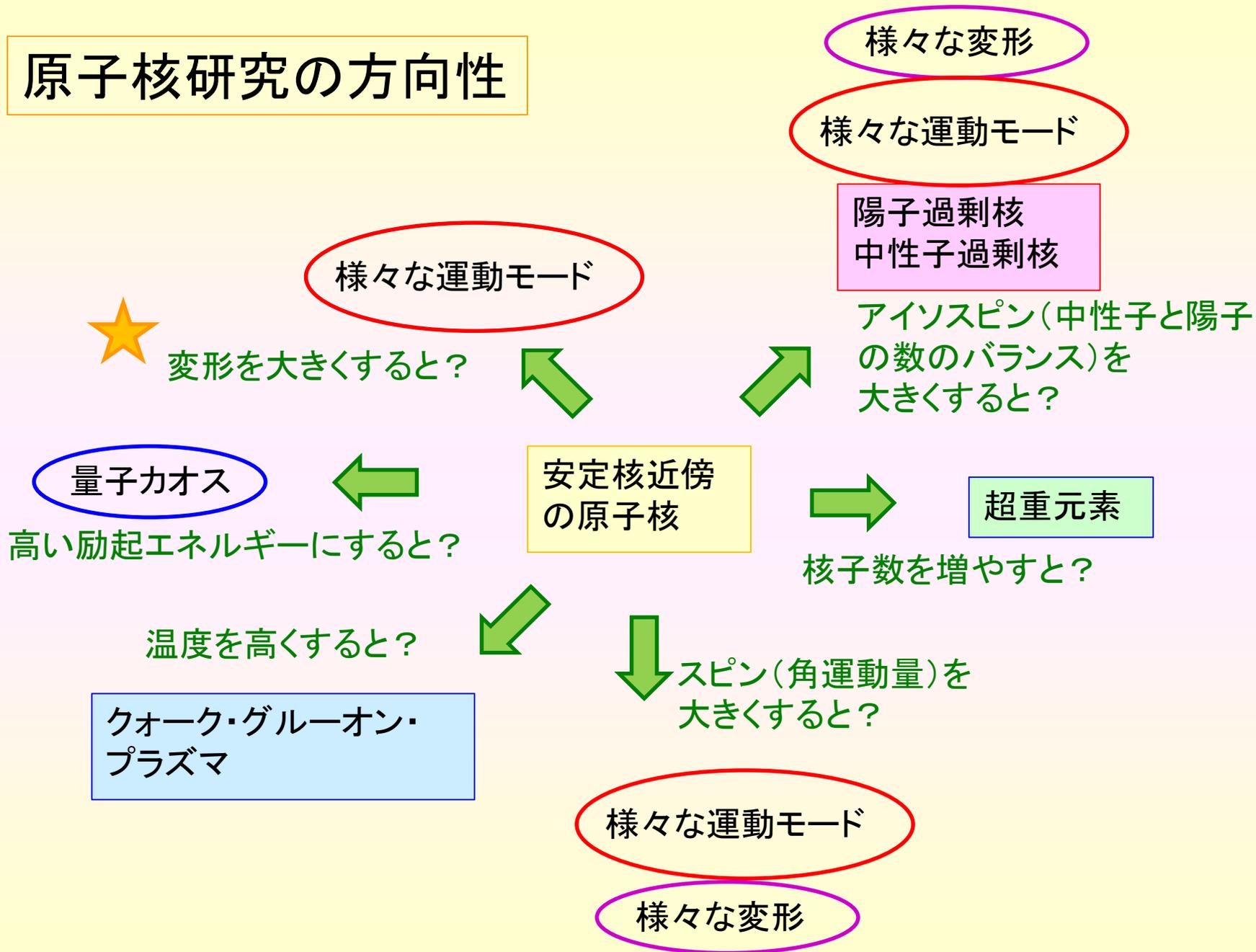


114
Fl
(flerovium)

116
Lv
(livermorium)

113
命名権は？

原子核研究の方向性



いろいろな形の原子核



球形くん



レモン型くん

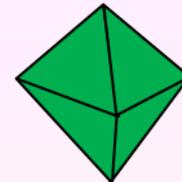
[その他の仲間]



みかん型
くん



西洋なし
型くん



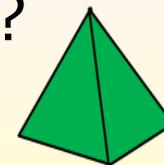
ダイヤモンド
型くん?



ラグビーボー
ル型くん



バナナ型
くん?



ピラミッド
型くん?

まだまだ見つからない変な形の原子核



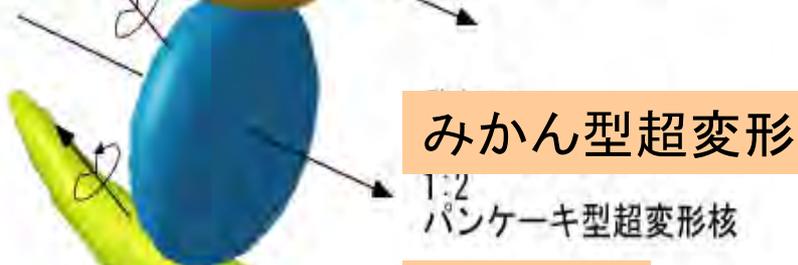
ラグビーボール型

2:1 超変形核



ラグビーボールよりもっと伸びた型

3:1 極超変形核



みかん型超変形

1:2
パンケーキ型超変形核



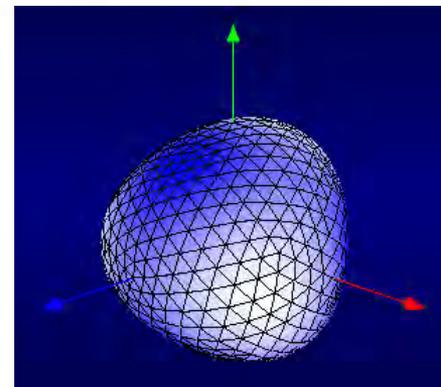
バナナ型

バナナ型超変形核

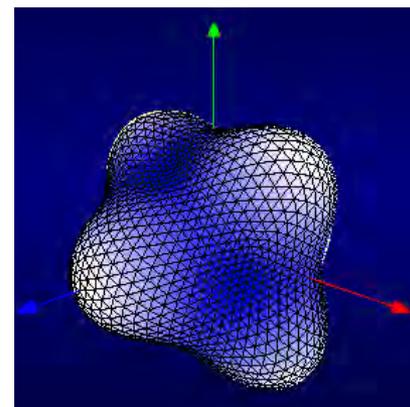


ひょうたん型

ひょうたん型超変形核

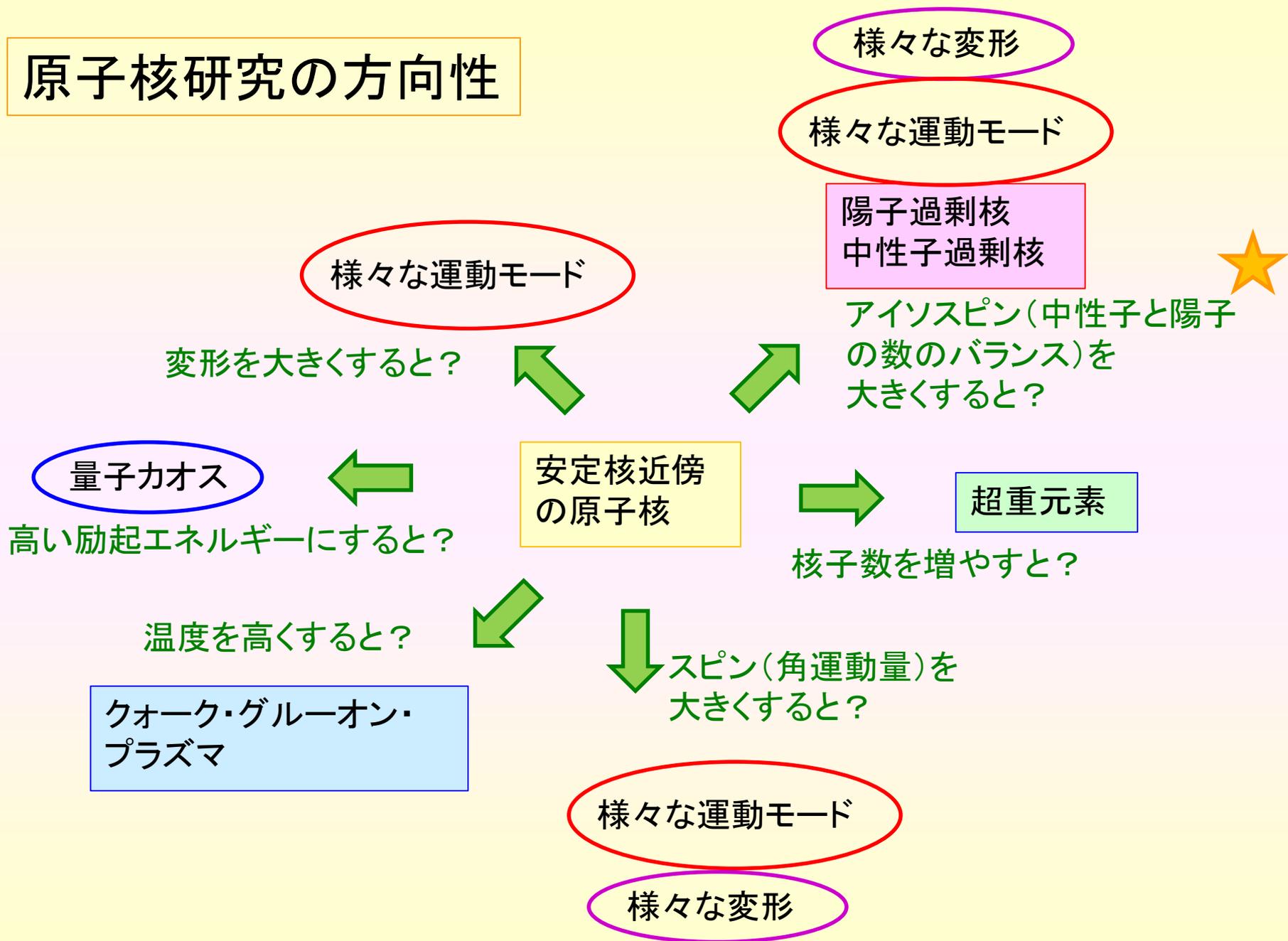


正四面体？

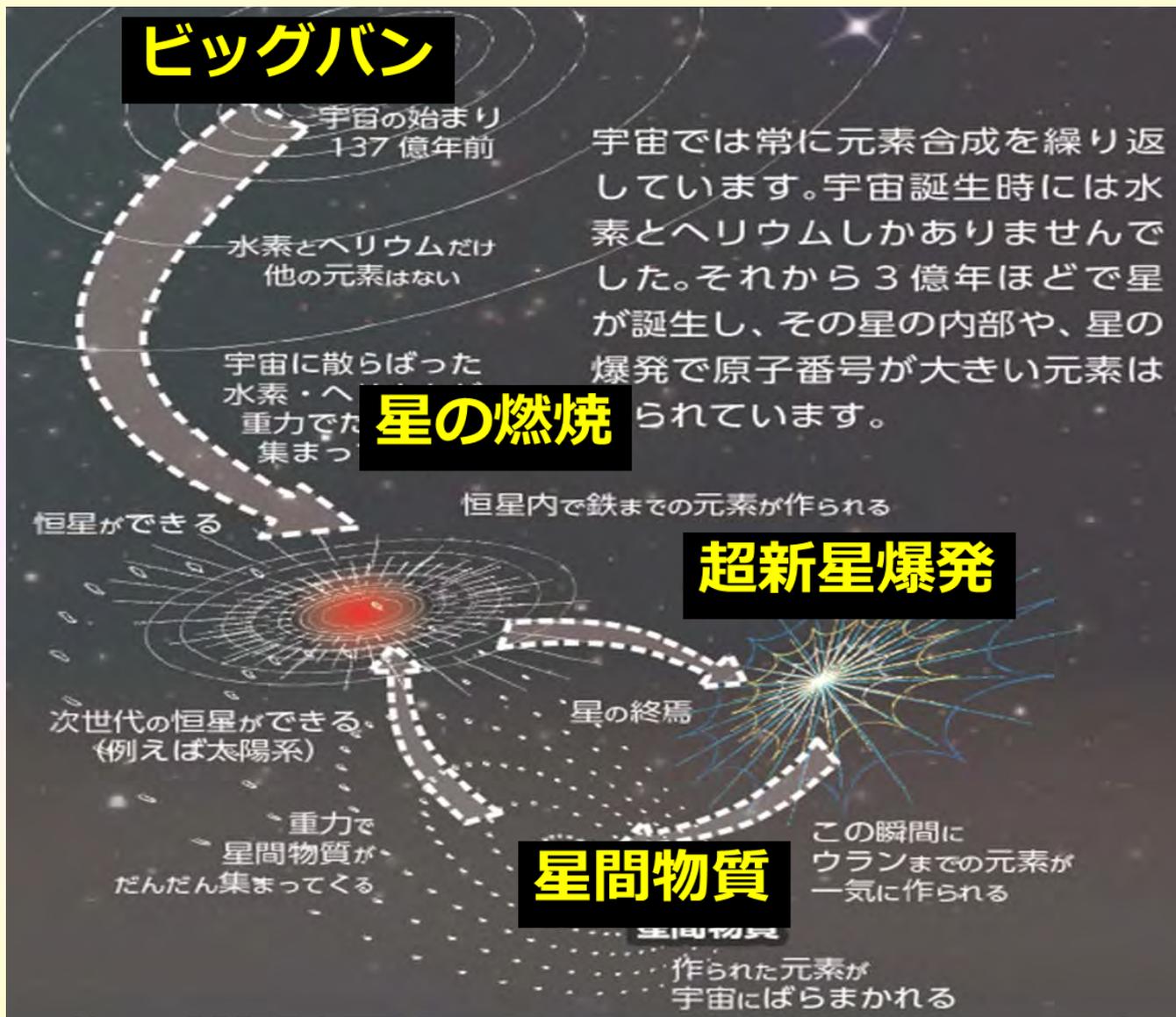


正八面体？

原子核研究の方向性



星の一生



核図表の上で眺めた元素合成過程

- 安定核
- 準安定核
- 存在が確認された不安定核
- 未知の不安定核

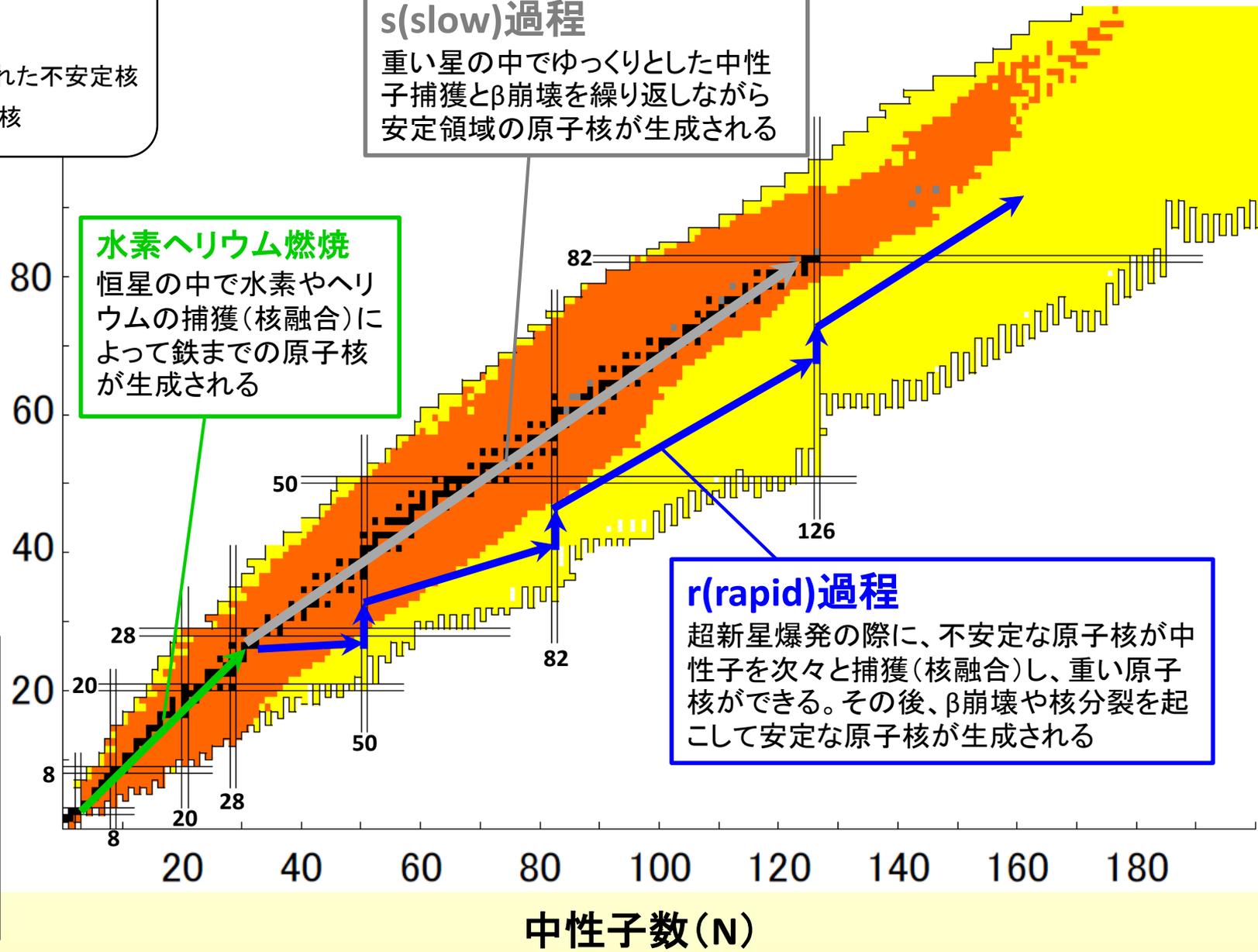
陽子数 (Z)

水素ヘリウム燃焼
恒星の中で水素やヘリウムの捕獲(核融合)によって鉄までの原子核が生成される

s(slow)過程
重い星の中でゆっくりとした中性子捕獲とβ崩壊を繰り返しながら安定領域の原子核が生成される

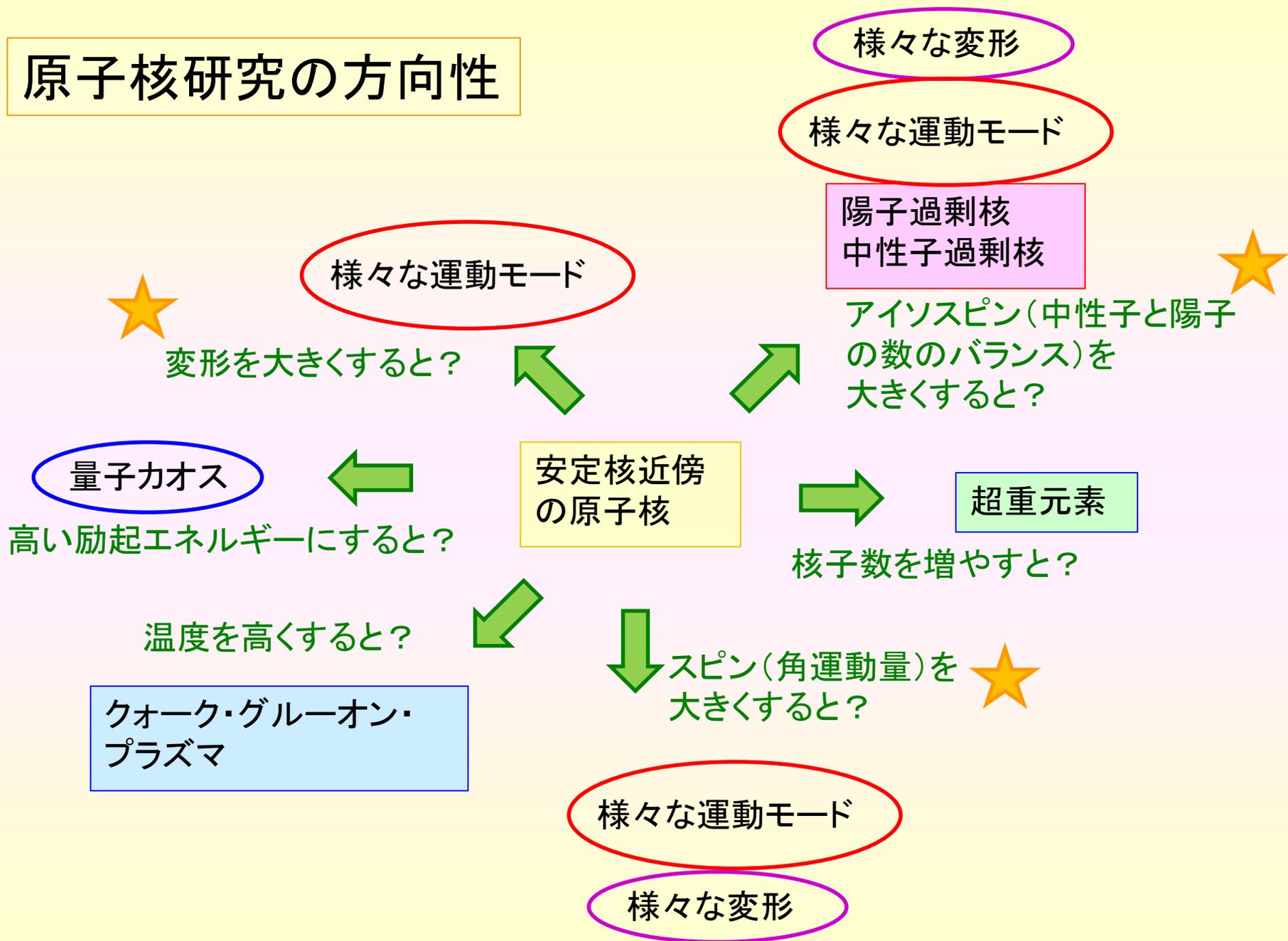
r(rapid)過程
超新星爆発の際に、不安定な原子核が中性子を次々と捕獲(核融合)し、重い原子核ができる。その後、β崩壊や核分裂を起こして安定な原子核が生成される

**ビッグバン
元素合成**
ビッグバン直後の3分間程度のあいだにリチウムまでの原子核が生成された



中性子数 (N)

原子核研究の方向性



下田グループの研究テーマ

1. 偏極ビームを用いた安定領域から遠く離れた不安定原子核の励起状態の構造研究

[TRIUMF (カナダ)]

2. 不安定核ビームを用いた原子核の高スピン状態の構造研究

[大阪大学核物理研究センター (RCNP)]

3. 宇宙での元素合成で重要な中性子過剰核の構造研究

[理化学研究所 RIビームファクトリ]

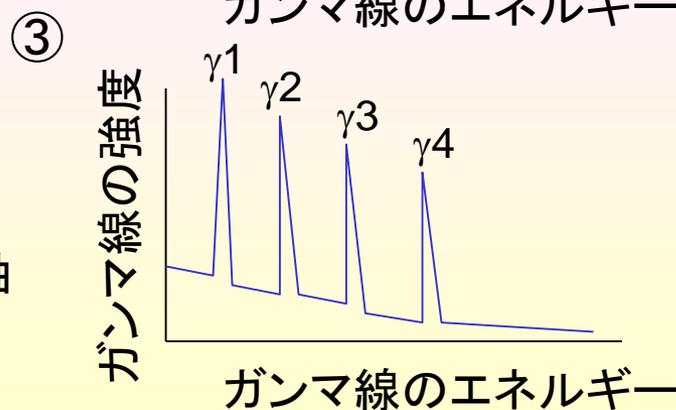
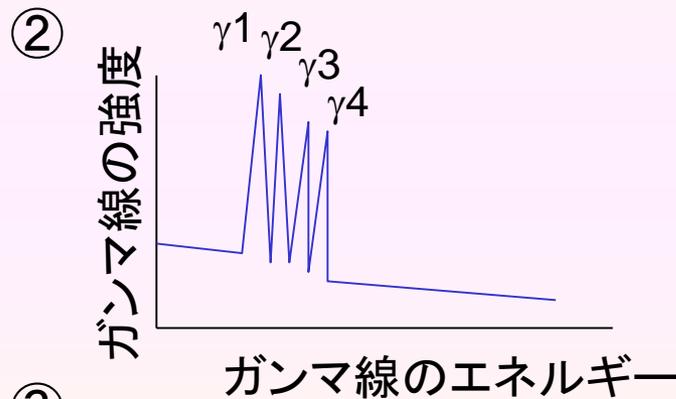
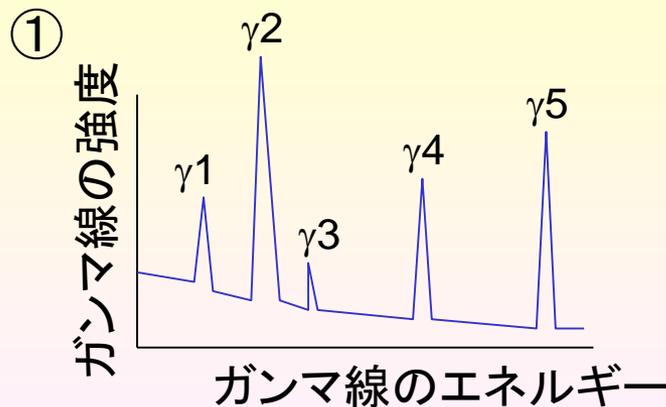
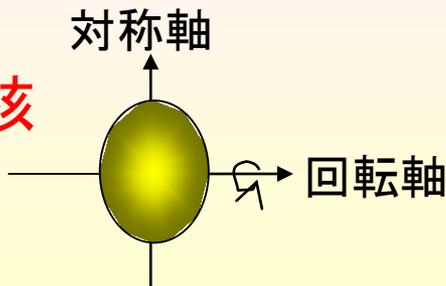
ガンマ線のエネルギーと強度の
パターンから原子核構造が
わかる！
(原子核の形、原子核の運動
など)

① 球形
(単一粒子的
ガンマ線遷移)



② 原子核の振動

③ レモン型原子核
の回転



下田研究室の最新研究

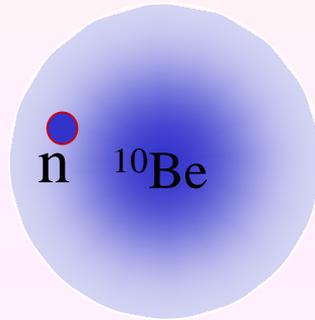
1. TRIUMF (カナダ) 実験



スピン偏極した不安定核で探る 中性子過剰核の特異な構造

TRIUMF
(カナダ)

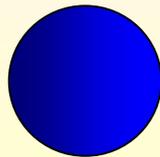
1. 偏極した ^{11}Li のベータ遅延中性子崩壊による
中性子過剰な ^{11}Be の構造の研究



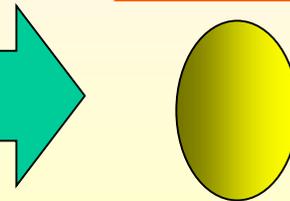
中性子ハロー核

2. 偏極した Na のベータ遅延ガンマ崩壊による
中性子過剰な Mg の構造の研究

中性子数20
魔法数
↓
球形



実際は

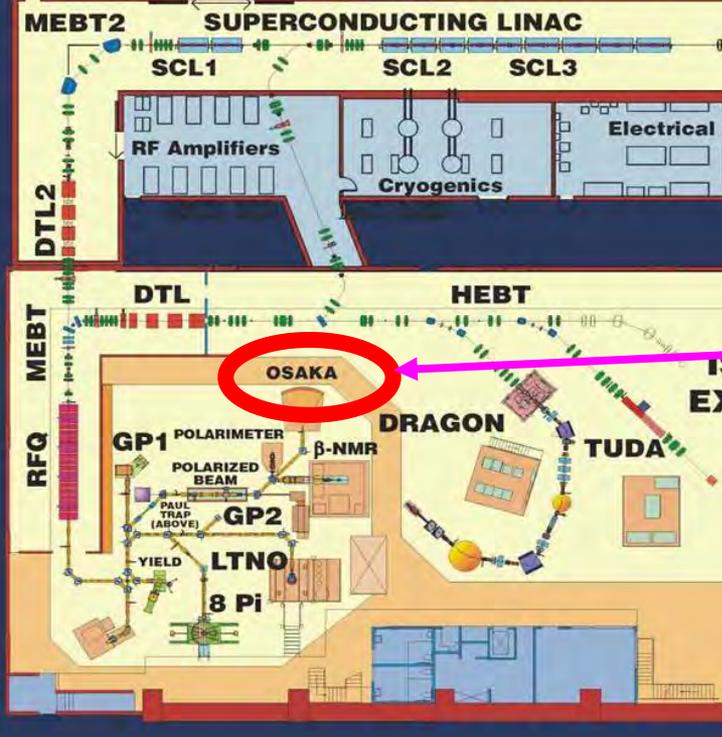


レモン形？

魔法数が
壊れている！

TRIUMF ISAC (Isotope Separator / Accelerator)

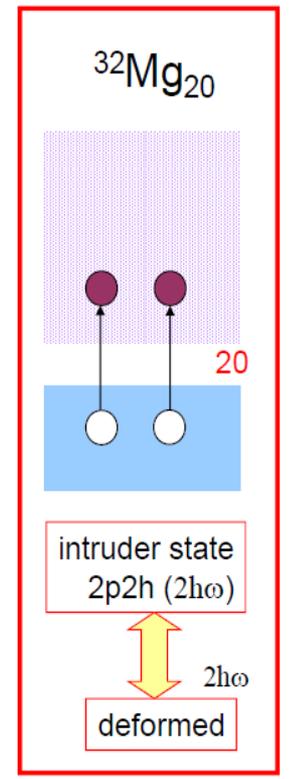
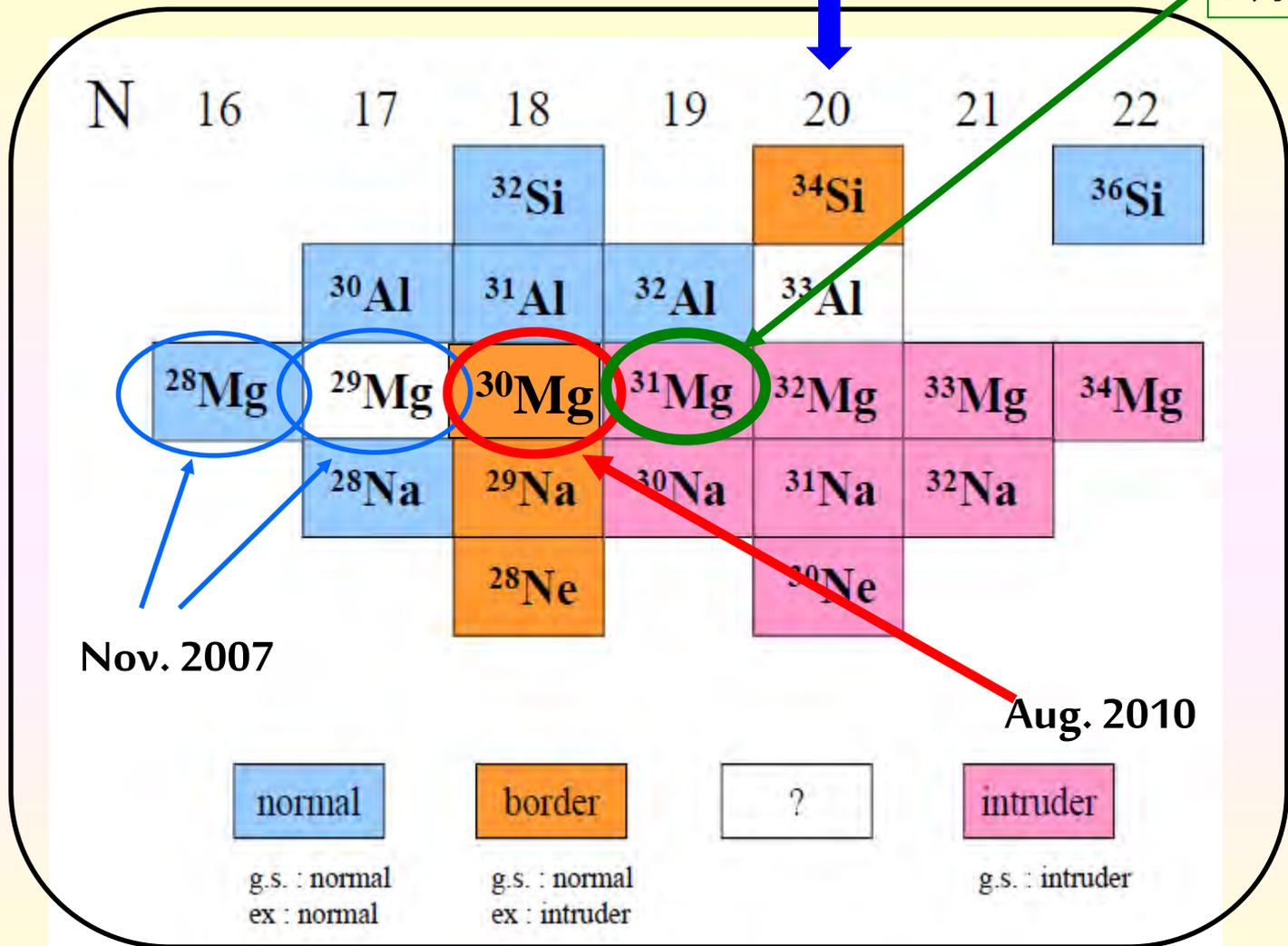
The ISAC - II Accelerator Floor



Island of inversion

magic number?

2014年8月末から
9月はじめ



E.K. Warburton et al.,
Phys. Rev. C 41 (1990) 1147

Which level has the intruder configuration?
How does shell structure evolve with N?

Mg ($N=16\sim 20$)の原子核の形 球型から変形へ

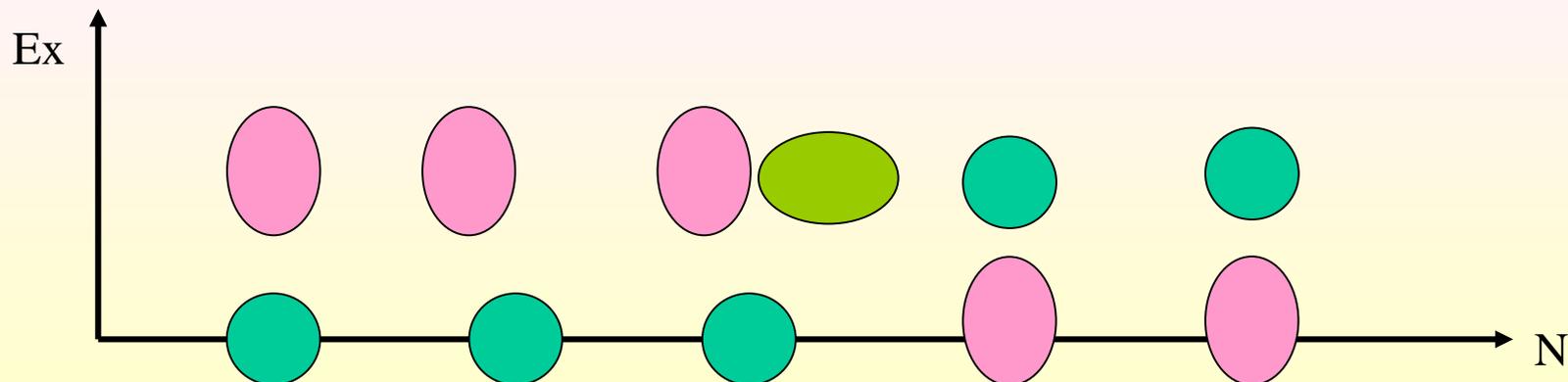
island of inversionの境界を横切って...

^{30}Mg : 変形共存 : 球型、プロレート型、オブレート型
 γ 振動

^{28}Mg , ^{29}Mg , ^{30}Mg , ^{31}Mg , ^{32}Mg

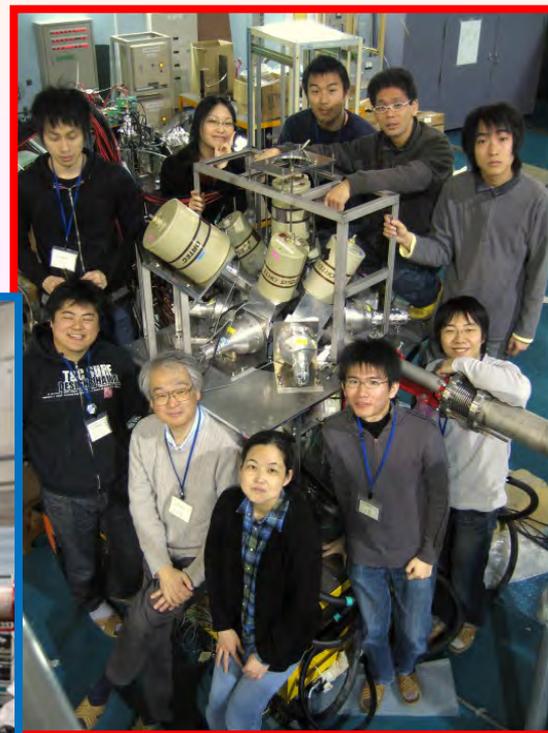
$N = 16, 17, 18, 19, 20$

基底状態、励起状態での原子核の形は？



下田研究室の最新研究

2. 大阪大学核物理研究センター(RCNP)実験



アイソマー探査実験

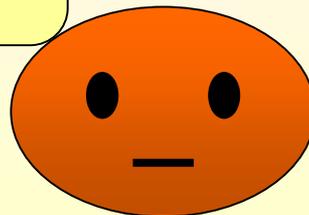
アイソマー : ある程度の寿命をもった状態
(~ナノ秒)

効率よく、原子核の特異な構造を
みつけることができる。

高スピンシェイプアイソマーの研究

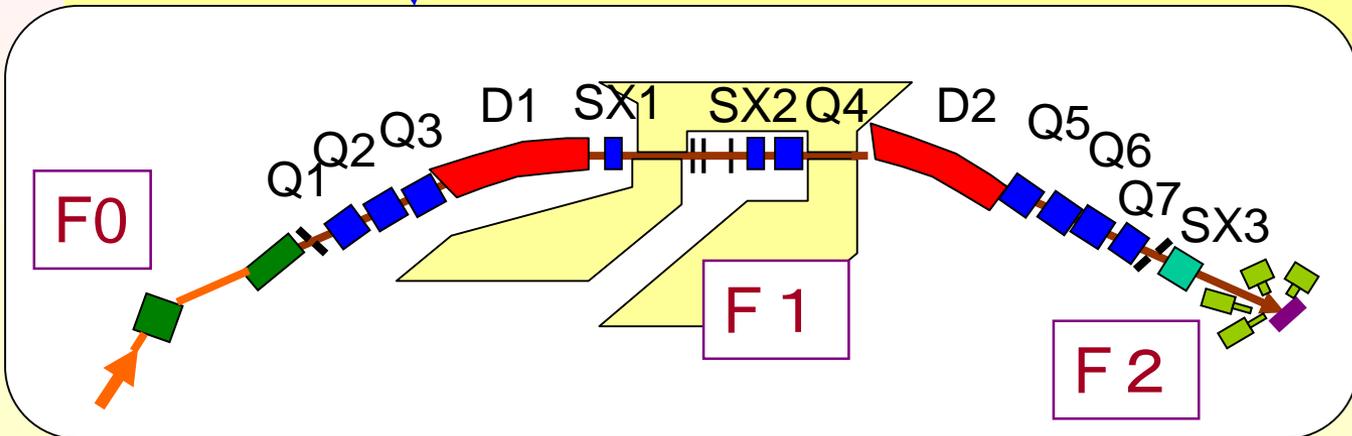
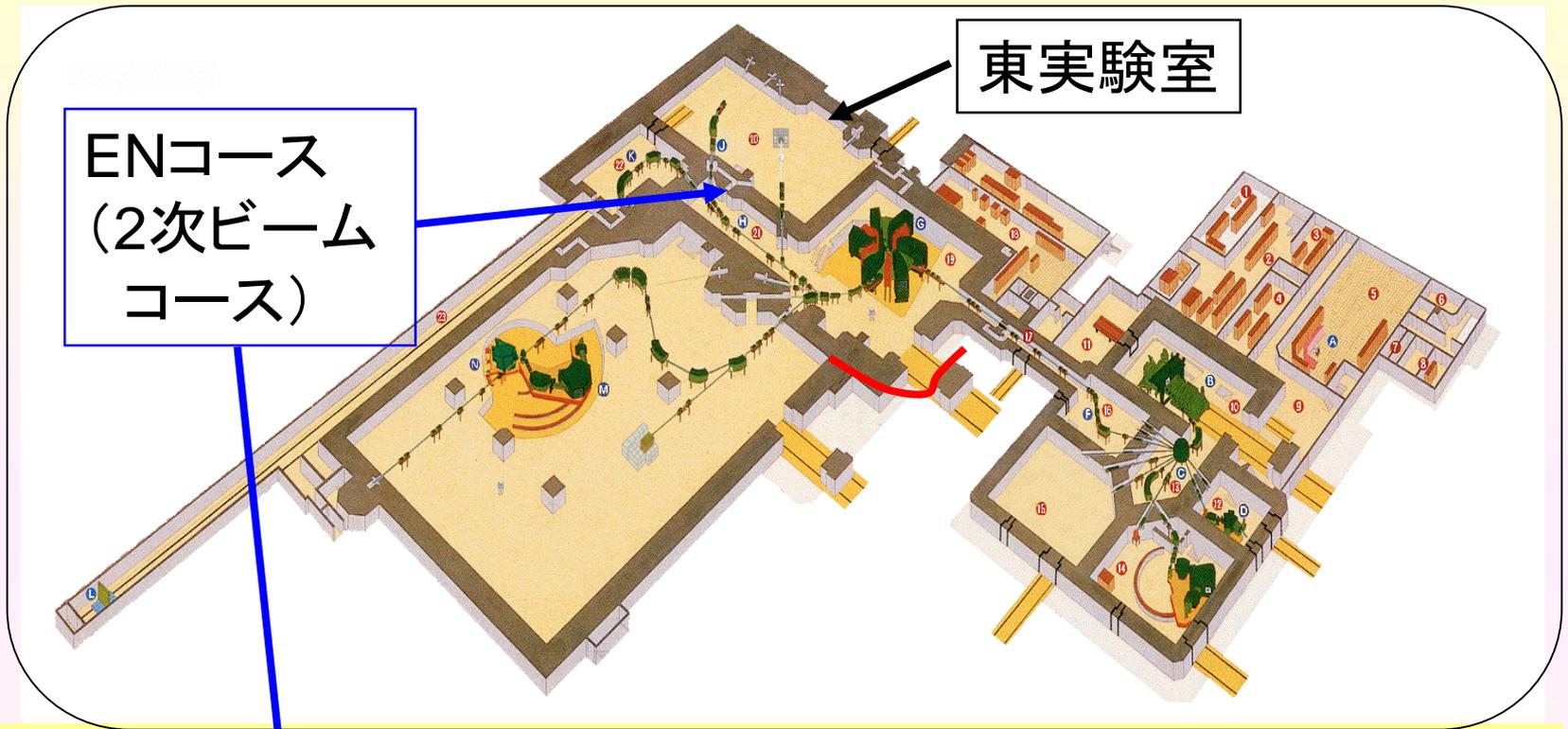
シェイプアイソマー : 大きな変形の違いが
原因のアイソマー

高スピンシェイプアイソマーは
みかん型です。



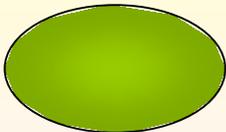
みかん型
(オブレート型)
原子核

RCNPでの不安定核ビーム生成装置



オブレート変形
β~-0.19

$\frac{49/2^+}{35\text{ns}} \quad 8.989$	$\frac{(27^+)}{8.597} >2\mu\text{s}$	$\frac{(49/2^+)}{0.96\mu\text{s}} \quad 8.786$	$\frac{(27^+)}{10\text{ns}} \quad 8.649$	$\frac{49/2^+}{510\text{ns}} \quad 8.588$	$\frac{(27^+)}{1.310\mu\text{s}} \quad 8.620$	$\frac{(49/2^+)}{28\text{ns}} \quad 8.523$	$\frac{8.533}{751\text{ns}}$
--	--------------------------------------	--	--	---	---	--	------------------------------



中性子数83同調体の
高スピンアイソマー

odd nuclei

$$[v(f_{7/2}h_{9/2}i_{13/2})\pi h_{11/2}^2]_{49/2^+}$$

odd-odd nuclei

$$[v(f_{7/2}h_{9/2}i_{13/2})\pi(h_{11/2}^2d_{5/2})]_{27^+}$$

^{146}Gd

準二重閉核

準魔法数 64

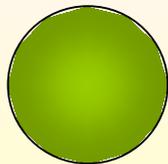
魔法数 82

$$\frac{27/2^-}{3.582} \quad 27\text{ns}$$

$$\frac{21/2^+}{2.760} \quad 14.4\text{ns}$$

$$\frac{27/2^+}{2.661} \quad 0.5\text{s}$$

$$\frac{(17^+)}{3.125} \quad 84\text{ns}$$



[球形]

$$\frac{13/2^+}{1.228} \quad 5.750\text{ns}$$

$$\frac{9^+}{0.841} \quad 0.71\mu\text{s}$$

$$\frac{13/2^+}{1.105} \quad 14\text{ns}$$

$$\frac{11^-}{1.769} \quad 4.5\text{ns}$$

$$\frac{9^+}{0.666} \quad 235\mu\text{s}$$

$$\frac{13/2^+}{0.997} \quad 22\text{ns}$$

$$\frac{11^-}{1.096} \quad 22\text{ns}$$

$$\frac{13/2^+}{1.073} \quad 12.5\text{ns}$$

$$\frac{(11^-)}{1.596} \quad 18\text{ns}$$

$$\frac{7^+}{4.5\text{ns}} \quad 0.328$$

$$\frac{4^-}{80\text{ns}} \quad 0.110$$

$$\frac{9^+}{0.50} \quad 24.0\text{s}$$

$$\frac{9^+}{2\text{m}} \quad 0.090$$

$$\frac{7/2^-}{60\text{m}} \quad 4.23\text{m}$$

$$\frac{2^-}{78\text{s}}$$

$$\frac{7/2^-}{\text{stable}} \quad 0$$

$$\frac{5^-}{363\text{d}} \quad 0$$

$$\frac{7/2^-}{340\text{d}} \quad 0$$

$$\frac{4^-}{4.59\text{d}} \quad 0$$

$$\frac{7/2^-}{38.1\text{h}} \quad 0$$

$$\frac{2^-}{0} \quad 0$$

$$\frac{7/2^-}{0} \quad 0$$

$$\frac{2^-}{0} \quad 0$$

$^{143}_{60}\text{Nd}$

$^{144}_{61}\text{Pm}$

$^{145}_{62}\text{Sm}$

$^{146}_{63}\text{Eu}$

$^{147}_{64}\text{Gd}$

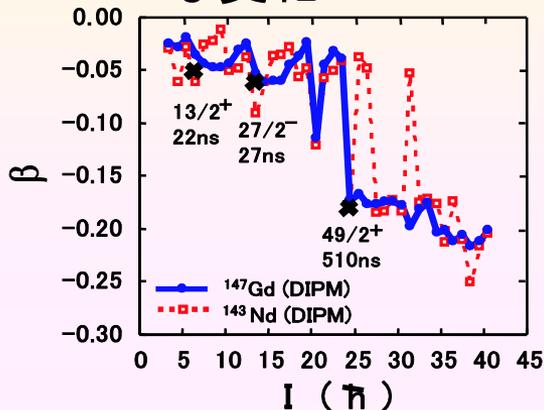
$^{148}_{65}\text{Tb}$

$^{149}_{66}\text{Dy}$

$^{150}_{67}\text{Ho}$

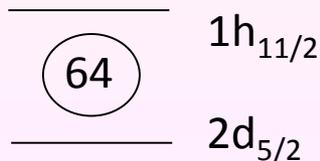
励起状態がある寿命を持つ状態の広い陽子数に対する研究から得られた面白い結果

1. 原子核の形の大きな変化



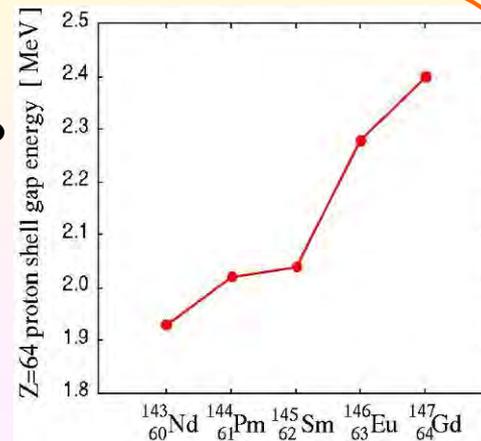
A. Odahara et al.,
J. Phys. Soc. Jpn **77** (2008) 114201

2. 陽子数64の準魔法数が消失か？



deformed independent particle model (DIPM)
by H. Sagawa

A. Odahara et al., Nucl. Phys. **A620** (1997) 363



3. 実験から得られた対相関エネルギー

odd-even mass difference

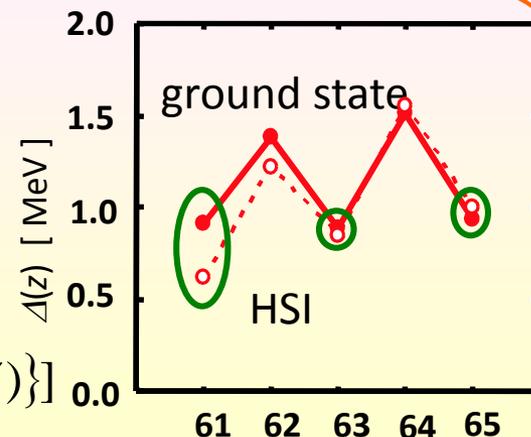
$B(Z)$: binding energy

$E(Z)$: excitation energy of the HSI

$$\Delta(Z) = \frac{\pi_Z}{2} [\{B(Z-1) + E(Z-1)\} + \{B(Z+1) + E(Z+1)\} - 2\{B(Z) + E(Z)\}]$$

A. Odahara et al., Phys. Rev. C **72** (2005) 061303

原子核の超伝導状態



不安定核ビームを作り出し、それが入射する核融合反応を起こす

熱い原子核から放出されるガンマ線をつかまえる



安定核ビームと安定核ターゲット
の組み合わせで生成できない
原子核

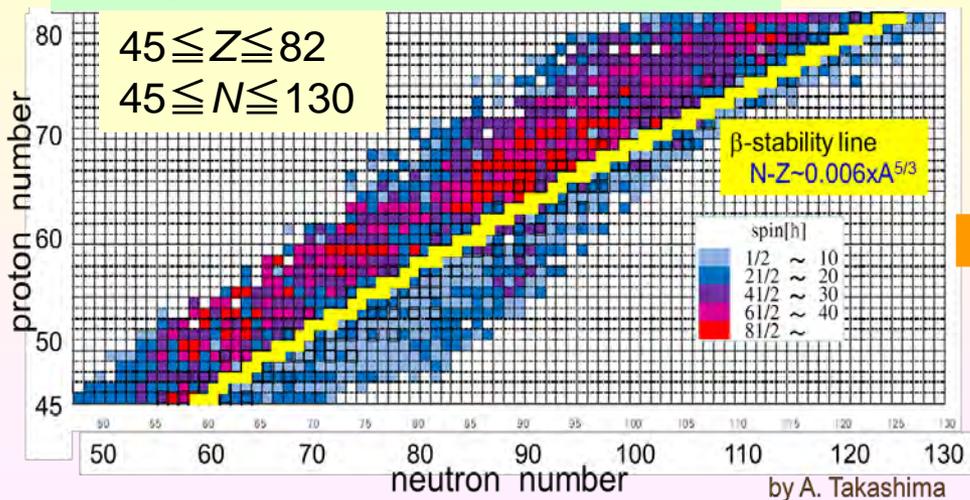


不安定核をビームとして、
生成する。

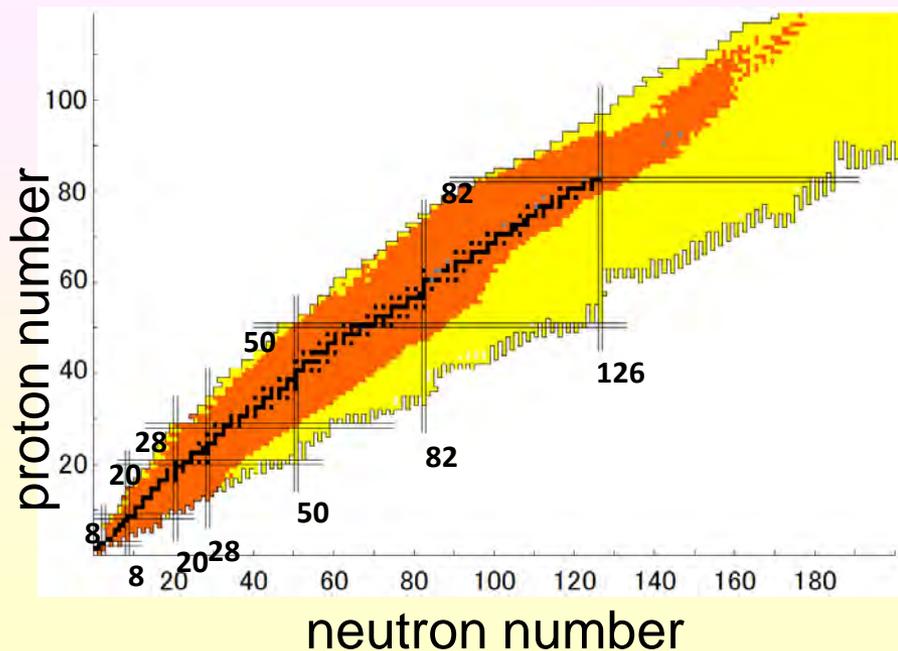
Nuclear Chart :
Experimental maximum spins
reported in NNDC (-2008)

except for SD spins
which are mostly
not confirmed

実験で生成された
最大角運動量を示す
核図表



低エネルギー
不安定核ビームの開発
at 大阪大学RCNP



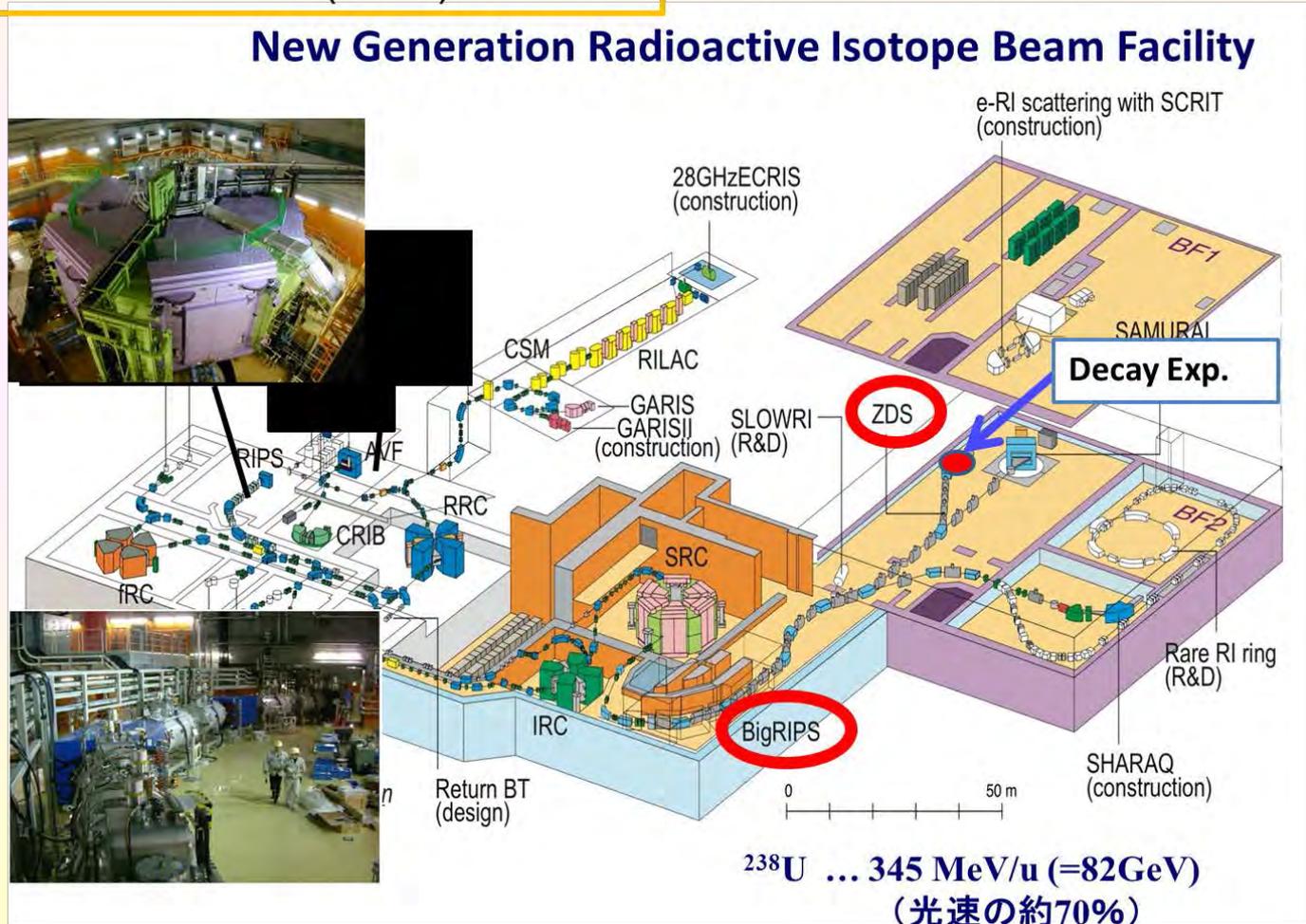
極端に中性子が多い
原子核の研究

飛行核分裂反応
— EURICA キャンペーン
実験 —
at 理研RIBF

下田研究室の最新研究

3. 理化学研究所RIビームファクトリでの実験

RIビームファクトリ (RIBF) at 理研



EURICA (EUroball-RIKEN Cluster Array) プロジェクト

at 理研 RIBF

BigRIPS と Zero-degree separators

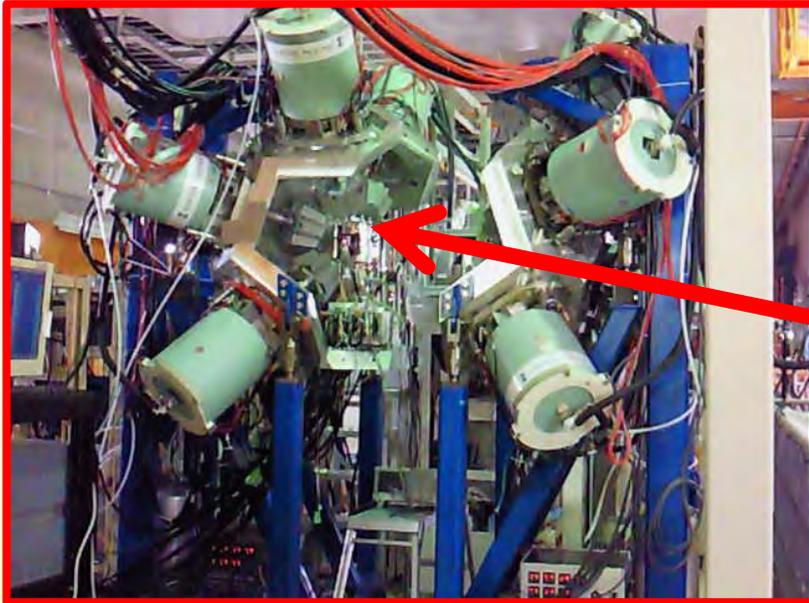
decay spectroscopy

β崩壊安定線から遠く離れた原子核のβ崩壊とアイソマー探査実験

EURICA

12台の EUROBALL
クラスター型ゲルマニウム検出器

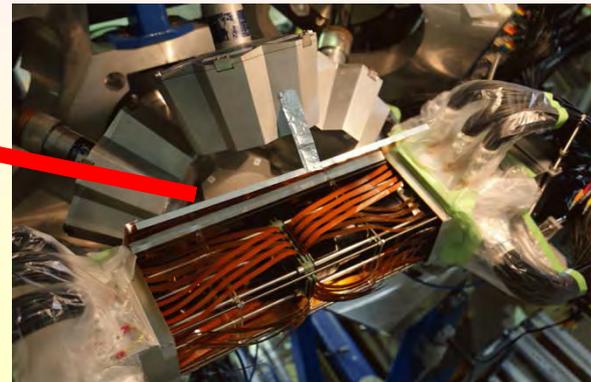
ガンマ線の検出



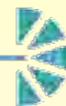
WASABI (Wide-range Active
Silicon Strip Stopper Array
for Beta and Ion detection)

5台の 両面ストリップ型シリコン検出器
40x60x1 mm (40x60 strips)

不安定核ビームとβ線の検出



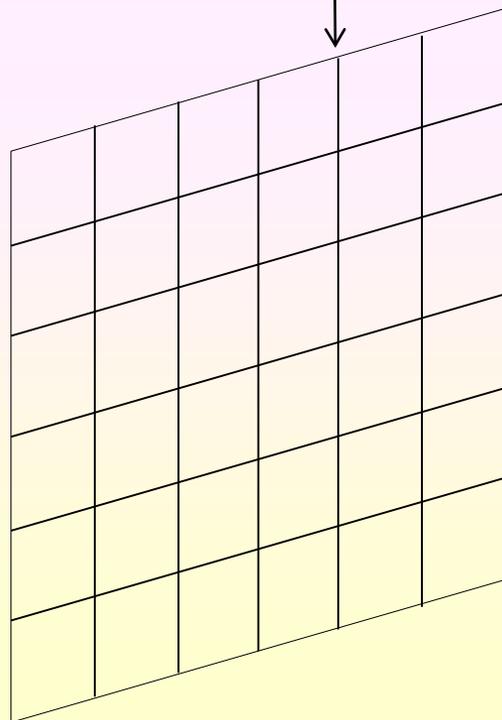
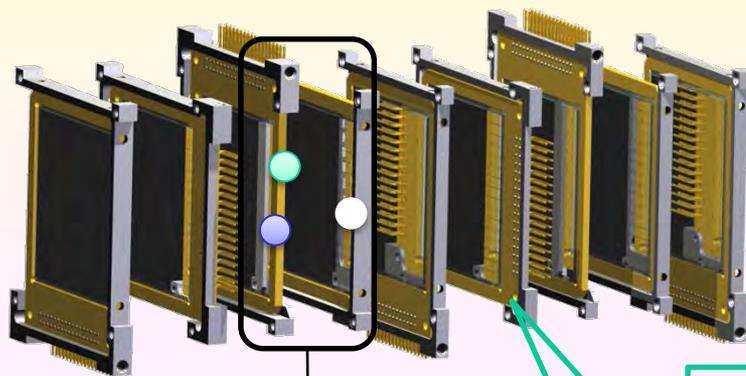
原理 ~RIとβ線の検出~



①粒子識別された
二次ビームの埋め込み

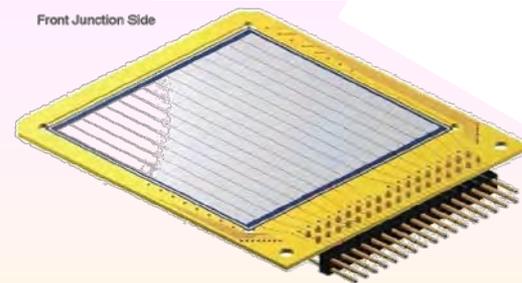


~100cps



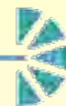
9枚の
両面ストリップ型
シリコン検出器
(DSSD)

Front Junction Side



ストリップ数	16×16本
ストリップ間隔	3.1mm
有感面積	50×50mm ²
厚さ	~1000μm

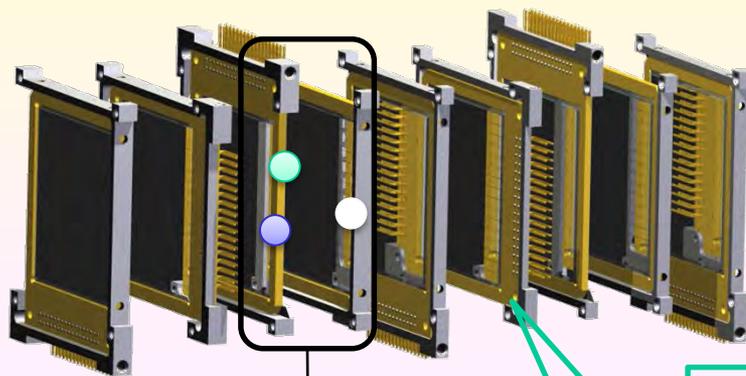
原理 ~RIとβ線の検出~



①粒子識別された
二次ビームの埋め込み

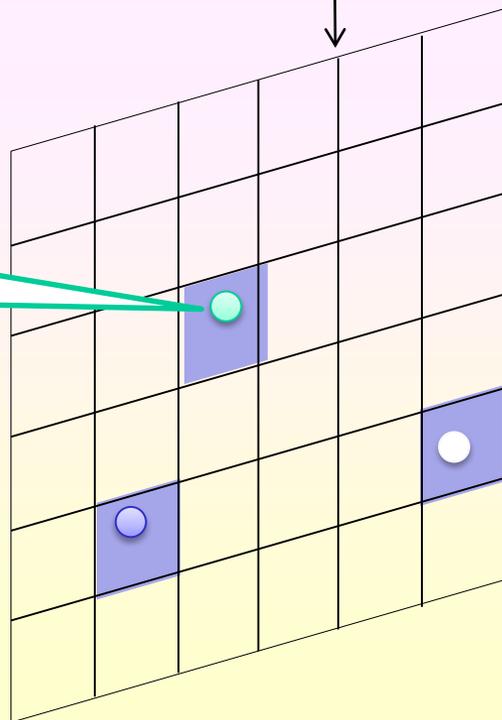


~100cps

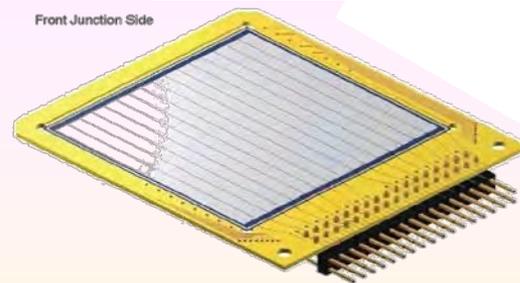


9枚の
両面ストリップ型
シリコン検出器
(DSSD)

②RI検出

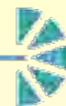


Front Junction Side



ストリップ数	16×16本
ストリップ間隔	3.1mm
有感面積	50×50mm ²
厚さ	~1000μm

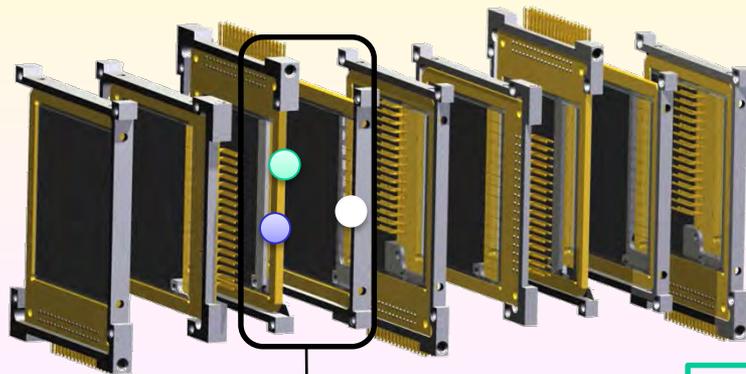
原理 ~RIとβ線の検出~



①粒子識別された
二次ビームの埋め込み

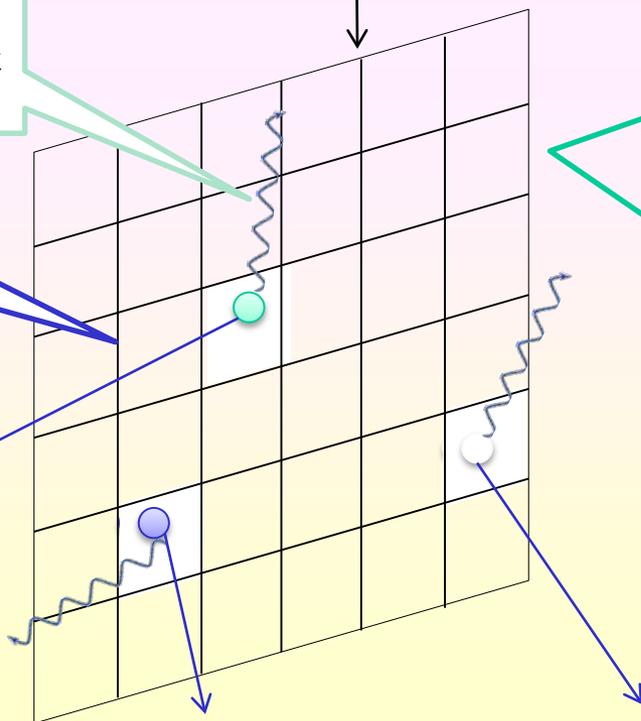


~100cps



③β線

④γ線



DSSD

1. RIのストッパー
2. RI検出
3. β線検出



β線はRIと同じ場所から

放出される。

→同じ場所で検出されたβ線は
そのRIに由来している。

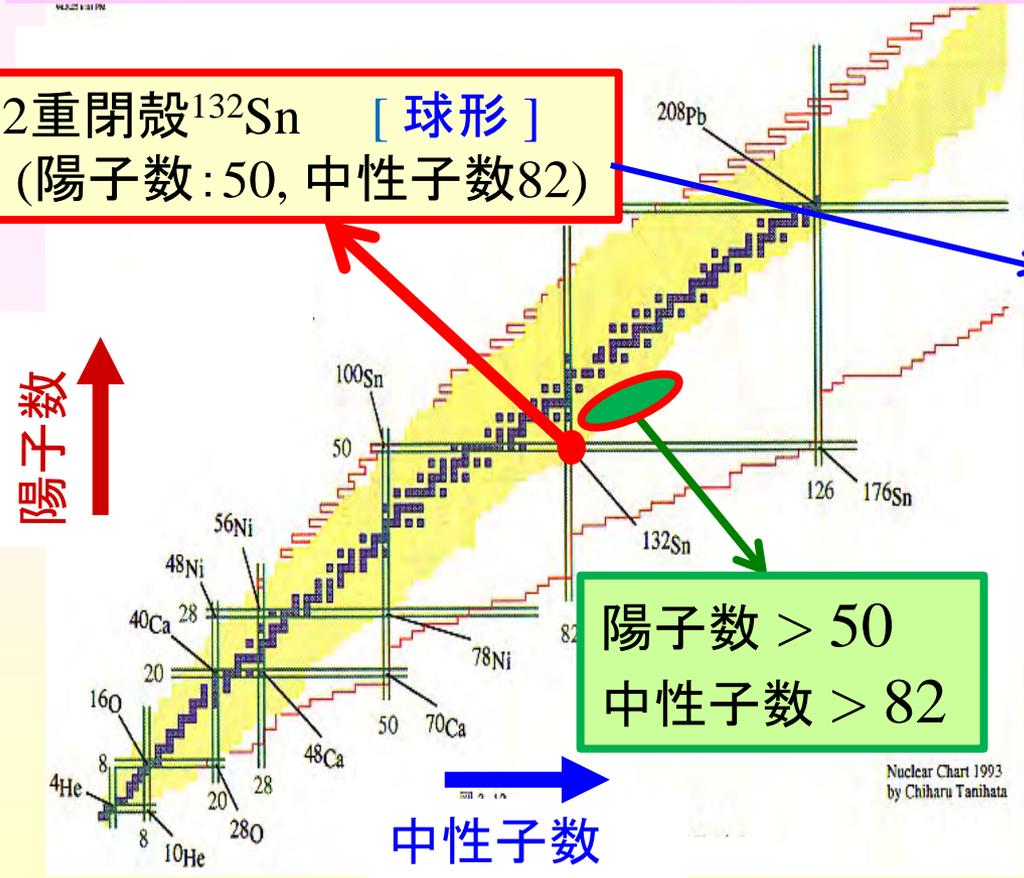
NP1112-RIBF87

EURICAキャンペーン実験
ベータ崩壊
アイソマー探査

Shape evolution in neutron-rich $A \sim 140$ nuclei
beyond the doubly-magic nucleus ^{132}Sn

実験責任者： 小田原厚子 (阪大理) Radomira Lozeva (IPHC, フランス) Changbum Moon (Hoseo University, 韓国)

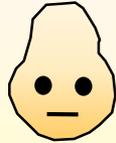
2重閉殻 ^{132}Sn [球形]
(陽子数: 50, 中性子数82)



中性子の数が増えると、
原子核の形・運動が変化する！



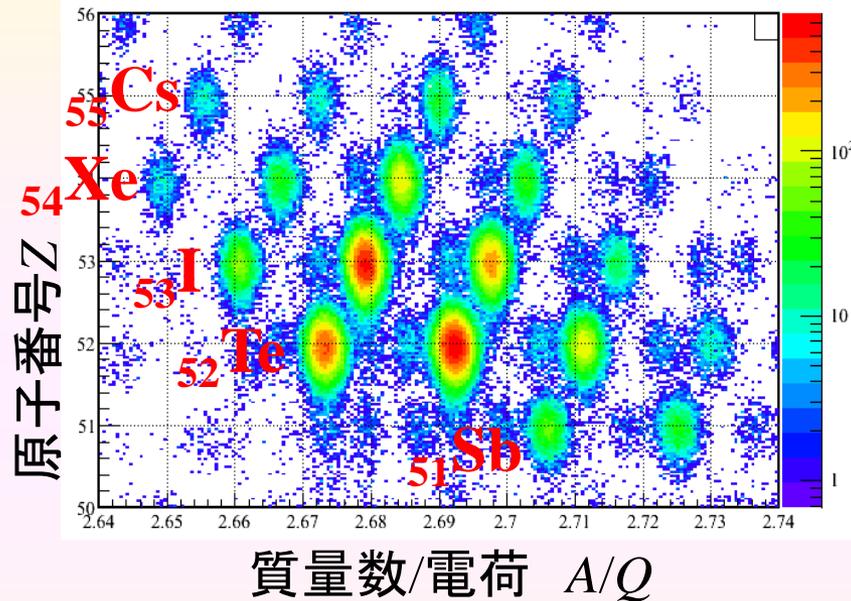
[レモンの形
に変形すると
原子核は
回転する！]



[原子核は
振動する！]
珍しい、西洋なし
の形の原子核が
現れるかも...。

中性子数

今回の実験で生成された、通常より
中性子の多い原子核



今回生成された原子核のベータ崩壊は
過去に観測されたことがない。



すべて、世界初のデータばかり

現在、データ解析が進行中

今回期待できる新しい結果

1. ベータ崩壊の半減期の初めての決定
10個くらいの原子核で？
2. 新しい同位元素???
見つかるかな...？
3. 新しいアイソマー（寿命をもつ励起状態）
「これがあると、原子核の特殊な構造を
発見できる可能性が高くなる...」
おおざっぱな解析で、少なくとも
5個以上の原子核に存在...？
4. ベータ崩壊の様子を初めて詳細に決定
今回、生成したすべての原子核で！

RIBFができるまでは研究できなかった、
中性子の多い原子核で、
不思議な形をした原子核、
これまでとは異なる運動をする原子核
などを探査して、
原子核構造を明らかにしていきます。

下田グループの将来計画の一部

高スピンアイソマービーム (HSIB)

ビームの特徴

ビーム自身が高スピン状態、
励起状態である。

アイソマービームを用いる目的と目指す物理

基底状態の安定核ビームや不安定核ビームで生成できない原子核の高スピン状態の多様な核物性を明らかにするため、高スピンアイソマービームを用いた殻構造や核反応の研究を行う。

(例)

(1) 極限高スピン状態の探査

未発見の極超変形核 (hyper deformation核) の探索

(2) エキゾチック変形核の運動状態の探査

三軸非対称原子核の新たな運動モード、オブレート型超変形核の回転運動、オブレート変形核の歳差運動

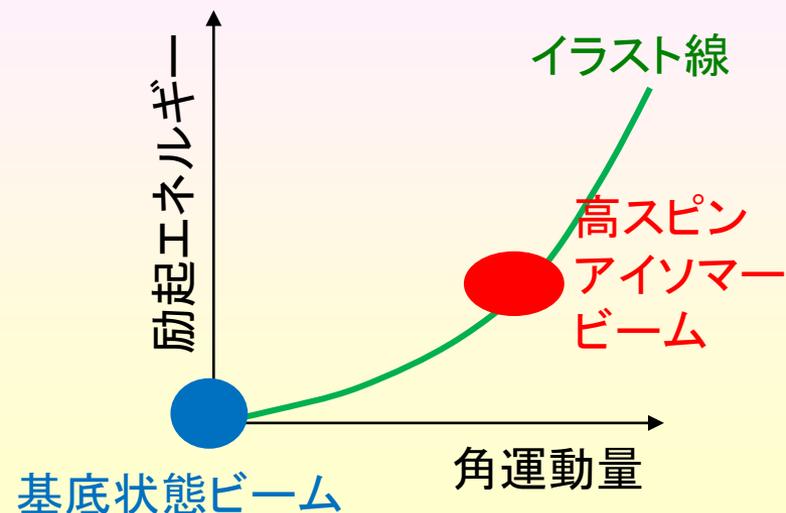
(3) 高スピン状態の核反応のメカニズム

高スピン原子核から(へ)の核子移行反応のメカニズム

(4) 高スピン+高励起状態の核物性の解明

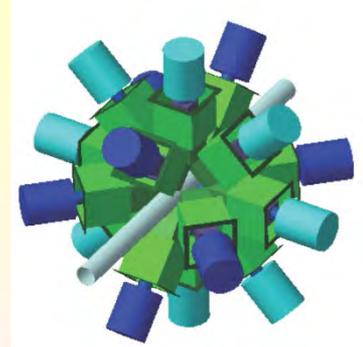
高スピンアイソマーの上に立つ巨大共鳴

(5) 超重元素の合成



RCNP
future plan

Clover Array Gamma-ray spectrometer
at RCNP/RIBF for Advanced research
(CAGRA)



10 clovers + Compton suppression shields
from CloverShare in USA

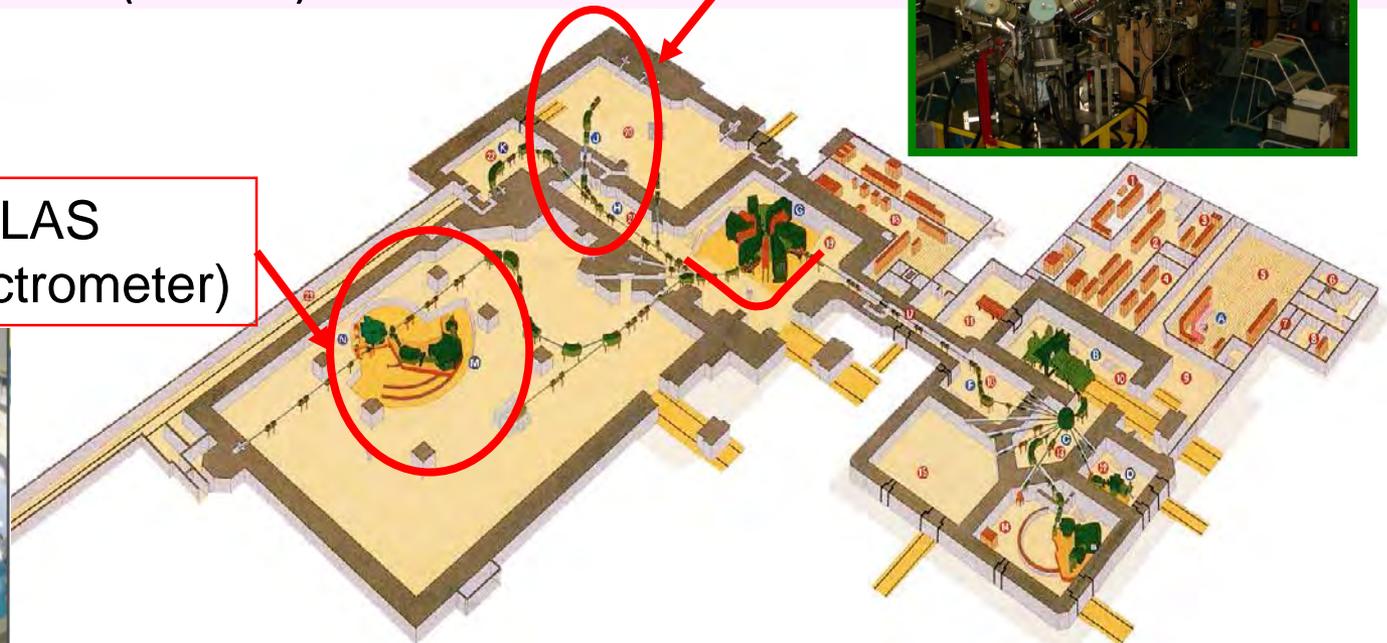
6 clovers + Compton suppression shields
from Tohoku University.

N. Aoi (RCNP), E. Ideguchi (RCNP), A. Tamii (RCNP),
M.P. Carpenter (ANL), V. Werner (Yale),
P. Fallon (LBNL), T. Koike (Tohoku)

EN beam line
(secondary beam line)



Grand Raiden & LAS
(double arm spectrometer)



まとめ

日本の核物理の将来レポート : 精密核物理

