

新しい超新星爆発の 原子核宇宙温度計の探索

日本原子力研究所/国立天文台
早川岳人

コンテンツ

1. 元素合成過程
2. 原子核宇宙温度計
3. 新しい原子核宇宙温度計の可能性
4. 研究計画
5. これまでの取り組み

目的

天文学・宇宙物理・惑星科学・地球科学へのツールを提供する

•天文学

宇宙とは何か？
恒星、銀河の進化

•隕石の研究(惑星学)

太陽系の生成
局所的な元素合成

•原子核宇宙時計

元素合成の年代測定
銀河系の年齢

•原子核宇宙温度計

元素合成の行われた
恒星環境の温度測定

観測・手法提案

発見事実

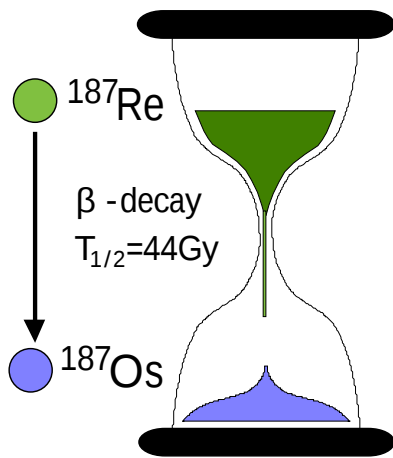
宇宙核理論

要求

宇宙核実験

データ

原子核宇宙時計



原子核時計とは ^{187}Re など長寿命の半減期を持つ放射性同位元素。親核と娘核の比から親核の生成された年代を評価するツール

R. Cayrel, Nature, 409, 691 (2001).

天体観測による元素測定。金属欠乏星のU-Thによる年代測定

M. Schönbachler, Science, 295, 1705 (2002).

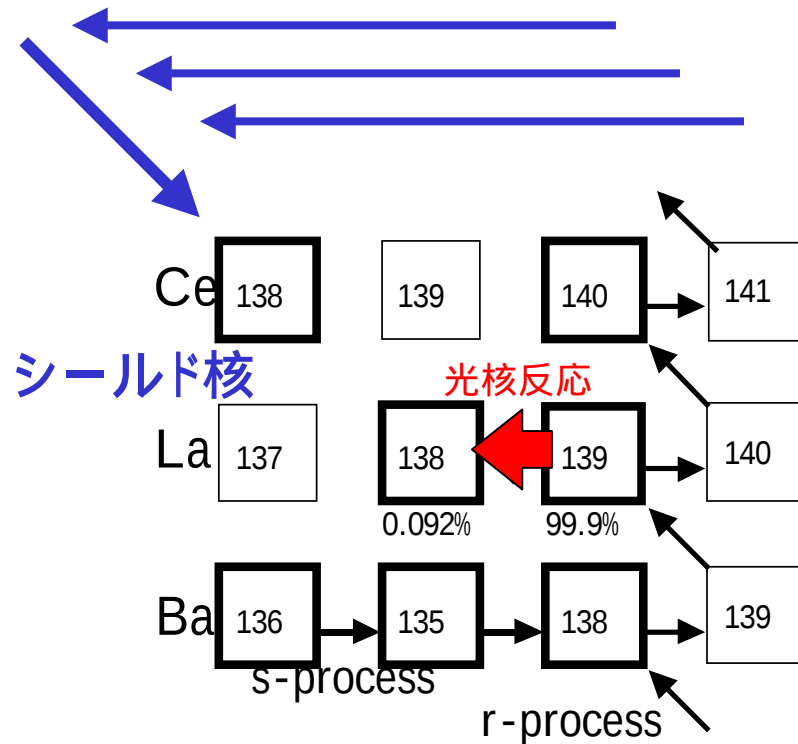
原始隕石中の前太陽系グレインに含まれるNbとZrの精密な分析から、 ^{92}Nb の太陽系初期量を精密測定

^{92}Nb と ^{146}Sm が γ 過程の原子核宇宙時計として提案されている



$^{93}\text{Nb}(\gamma, n)^{92}\text{Nb}$, $^{147}\text{Sm}(\gamma, n)^{146}\text{Sm}$ 反応断面積の精密測定を提案

138Laと180Taの重要性



p核の生成パス

- (γ, n) 反応によって直接生成
- より重い元素の光核反応で生成された原子核の β 崩壊

通常のp核は上記の2種類のパスの両方を経由して生成される。

180Taと138Laのみは、直接反応のみで生成される。



この2つのp核は γ 過程のモデル計算との比較に最も適している

原子核宇宙温度計の分類

原子核宇宙温度計とは、元素が生成された恒星環境の温度を推定する手段である。

1. 核異性体型 (温度のみ強く依存)
 - a. ^{176}Lu (s過程)
 - b. ^{180}Ta 起源が不明 (p過程、s過程、 ν 過程か?)
2. イオン化効果型 (温度、中性子密度、電子密度等に依存)
 ^{164}Er など(s過程)
3. フロー分岐型 (温度、中性子密度、電子密度等に依存)
 ^{79}Se 、 ^{85}Kr 、 ^{151}Sm など (s過程)

原子核宇宙温度計 核異性体型

H. Beer, PRC, 21, 534 (1980)

•高温な恒星中では、最大MeV領域のエネルギーの輻射が存在するため、常に一定の確率で励起状態が存在する。



•核異性体経由が存在する場合には、励起状態経由で核異性体が生成される。

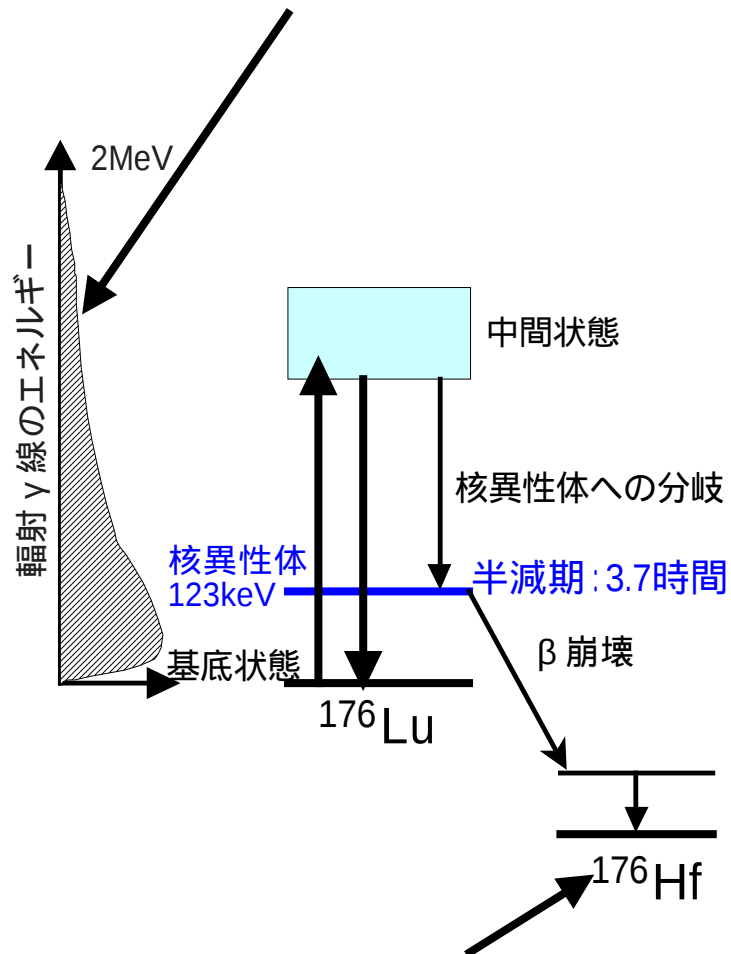


•核異性体が β 崩壊する場合には、一定の割合で、原子核が β 崩壊によって消滅する。



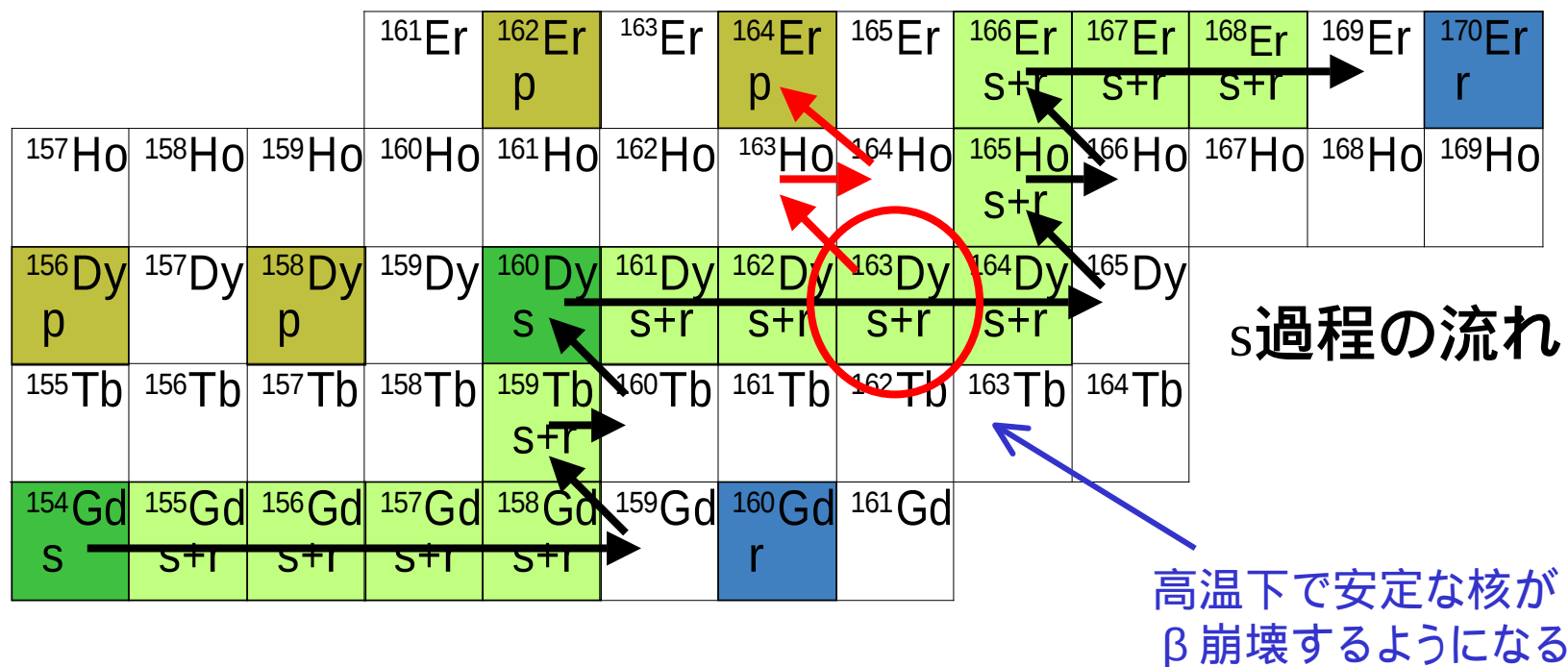
•同位体比と遷移確率のデータから、元素合成過程の恒星の温度を推定

分布は温度に依存



生成量は温度に依存

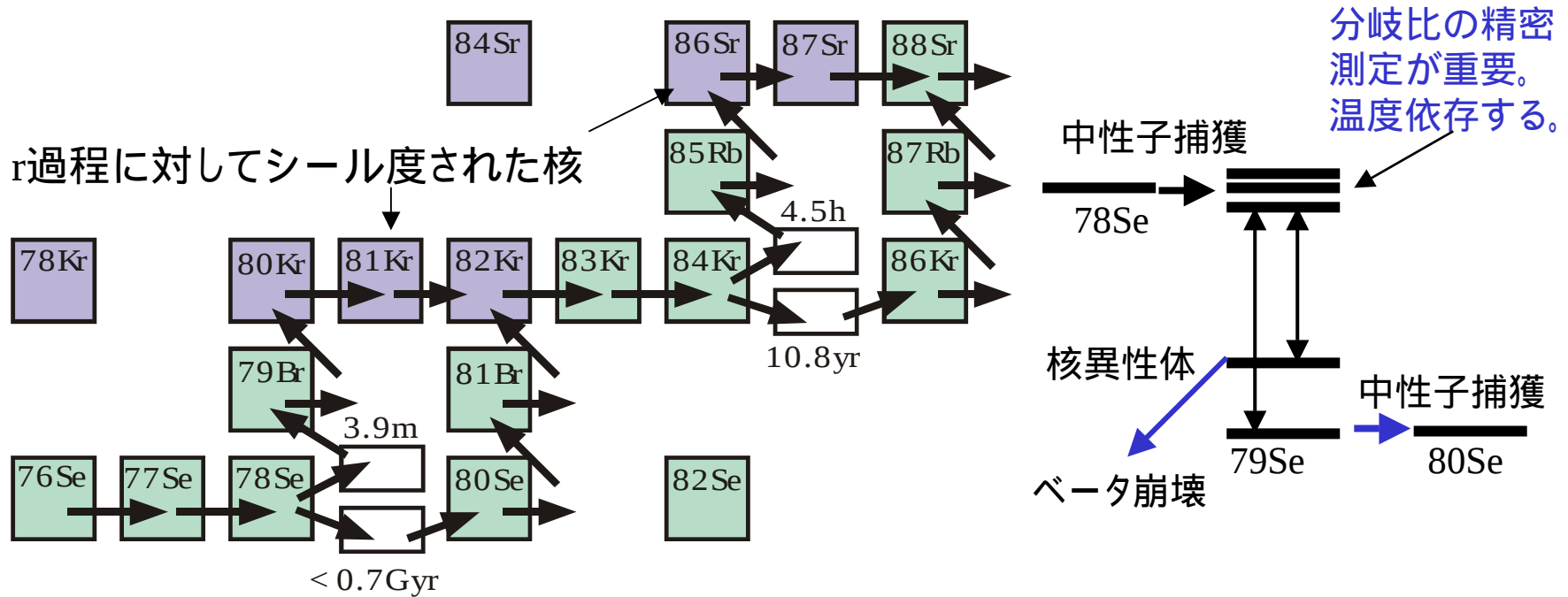
原子核宇宙温度計 イオン化効果型



K.Takahashi, Nucl. Phys. A404, 578 (1983).

- 高温中では、イオン化効果(と核異性体経由)によって安定核が β 崩壊するようになる。そのため、s過程の分岐が発生する。
- ^{164}Er はr過程に対してシールドされており、また通常のs過程では生成できない。

原子核宇宙温度計 分岐型



F.Kappeler, J. Phys. G. 88 (1988)S297

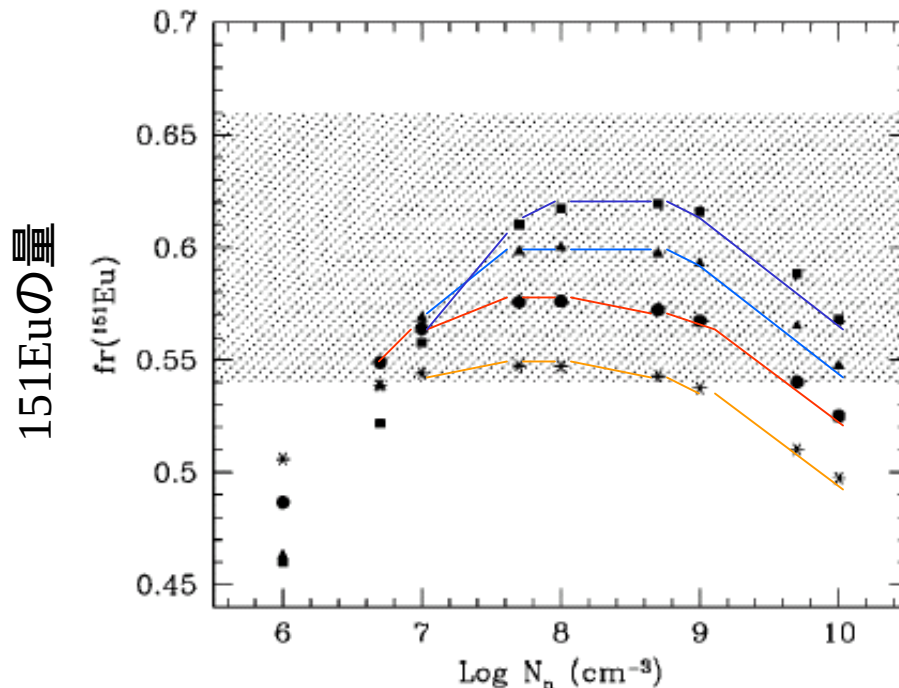
s過程の分岐を利用した温度計

- 分岐の割合は、**温度**、**中性子密度**、電子密度に関連する。
- 基底状態と核異性体への分岐、基底状態と核異性体間の遷位確立が重要。
- 弱い分岐はr過程に対してシールドされているので純s核。

151Euと153Euの同位体分離による原子核 宇宙温度計の適用

S過程がエンハンスされた金属欠乏星における最初のEuの同位体分離の観測

← 通常はr過程がエンハンスされている。



中性子密度

← S過程のモデル計算によると151Euの量は、中性子密度依存性は低い。

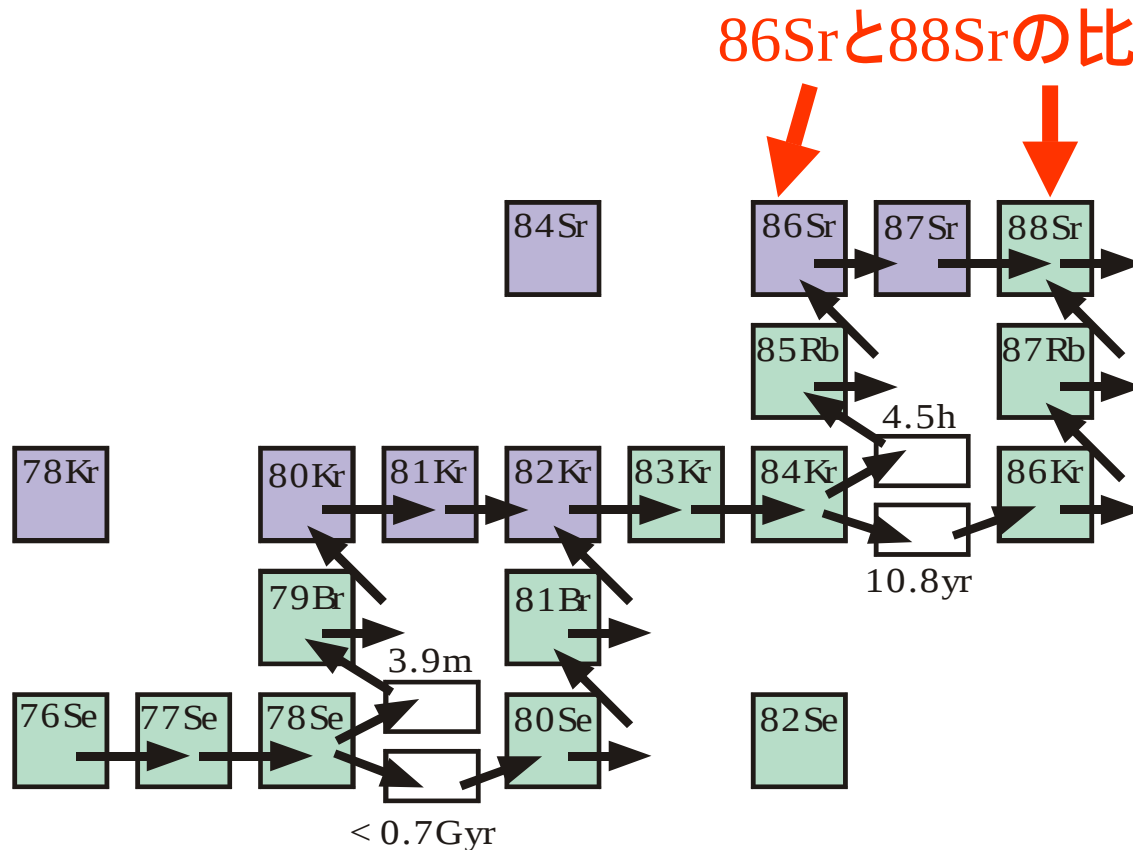
しかし、温度依存性は高い。

↓
そのため原子核宇宙温度計として有効。

隕石中のプレソーラーグレインへの応用

G. K. Nicolussi, Phy. Rev. Lett. 81, 3583 (1998)

s過程起源の原始隕石のSrの同位体比を計測。86Srと88Srの比から
元素が生成された環境を推定。Kr原子核宇宙温度計を適用。

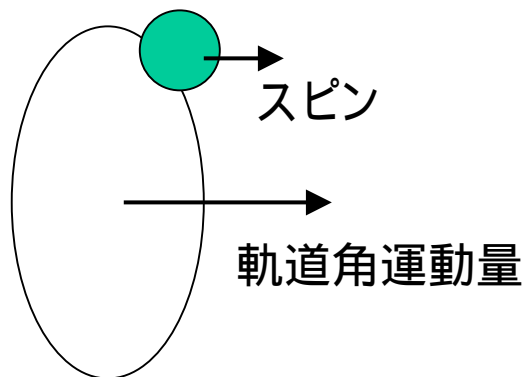


新しい原子核宇宙温度計の可能性

もしも、 ^{138}La に β 崩壊する核異性体が存在すれば、 γ 過程の新しい原子核宇宙温度計になるかもしれない。

ガラガー・モスコフスキー・ルール

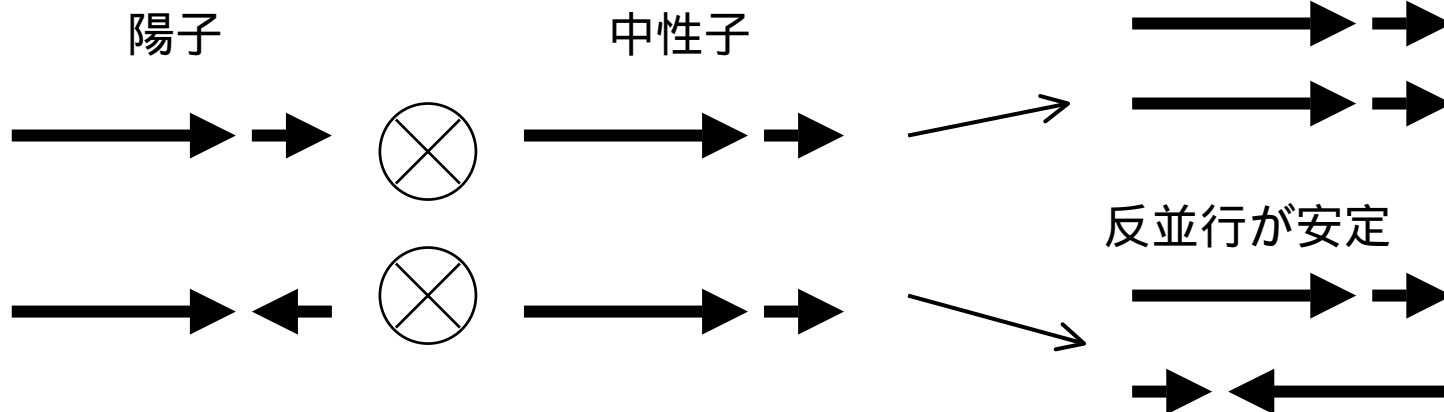
核子の角運動量



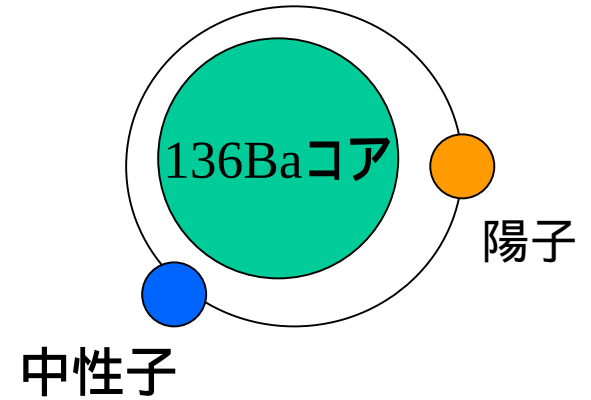
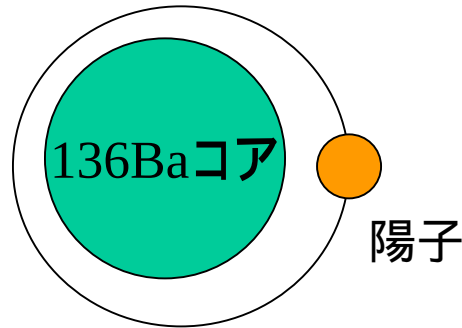
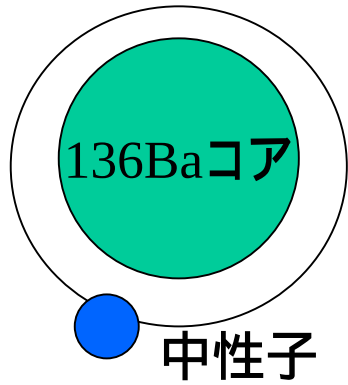
ガラガーモスコフスキールール

半経験的に、奇奇核の基底状態の核運動量を近傍の奇核の核運動量から、推定して法則性を見出した。

核子のスピンと、軌道核運動量の向きによって、カップリングした場合の安定な組み合わせが決まる



138Laの核構造



$11/2^-$ 662

ガラガー・モスコフスキー
ルールで反並行が安定

$(2)^+$ 192

$(3)^+$ 161

$(2)^+$ 116

$(3)^+$ 73

(1^+) 0+11 keV?

未発見

5^+ 0

$3/2^+$ 0

$5/2^+$ 11

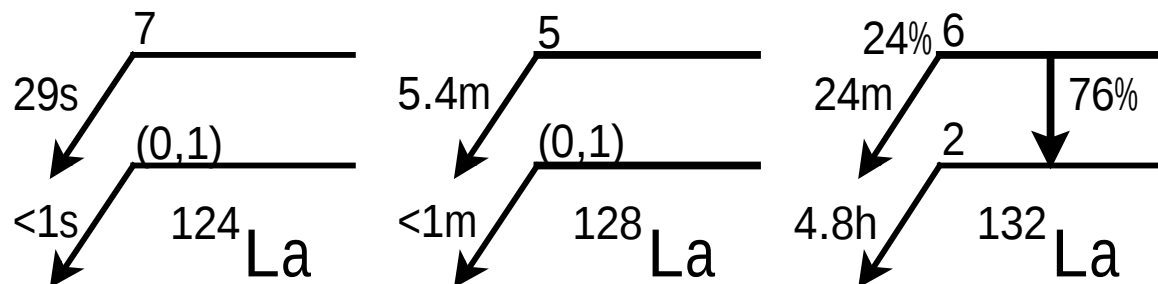
$7/2^+$ 0

137Ba
136Baコア + 中性子

137La
136Baコア + 陽子

138La
136Baコア + 陽子 + 中性子

奇奇La同位体の核異性体



La奇奇核同位体の核異性体の例 ベータ崩壊する核異性体が多数存在



奇奇核は陽子と中性子の自由度があるため、励起状態に多数の状態が存在しうる。そのため低い励起エネルギーにスピンギャップが大きい状態存在して、 β 崩壊する核異性体になる。

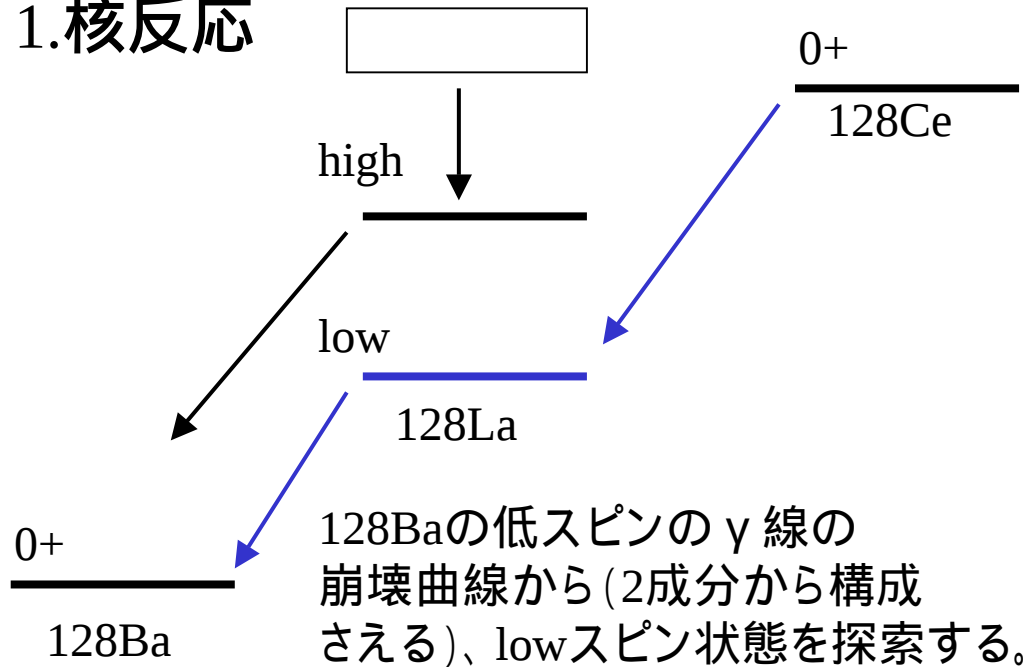
T. Hayakawa, Z. Phys. A358, 15 (1997)

ベータ崩壊の実験によって核異性体を発見した。

- 核異性体は近年になっても発見されており、これからも発見される可能性は大
- Laの同位体には核異性体が多数存在しているので、他のLaにも存在する可能性が大

核異性体探索の実験方法と ^{138}La の場合

1. 核反応



低スピン核異性体の発見方法

- 親核(左図の ^{128}Ce)を核反応で生成する。
- ^{128}Ce の基底状態は偶偶核なので $0+$ である。
- $0+$ 状態から β 崩壊で低スピン状態を生成する。

一方、近年主流の重イオンによる核反応ではhighスピン状態が強く生成される。

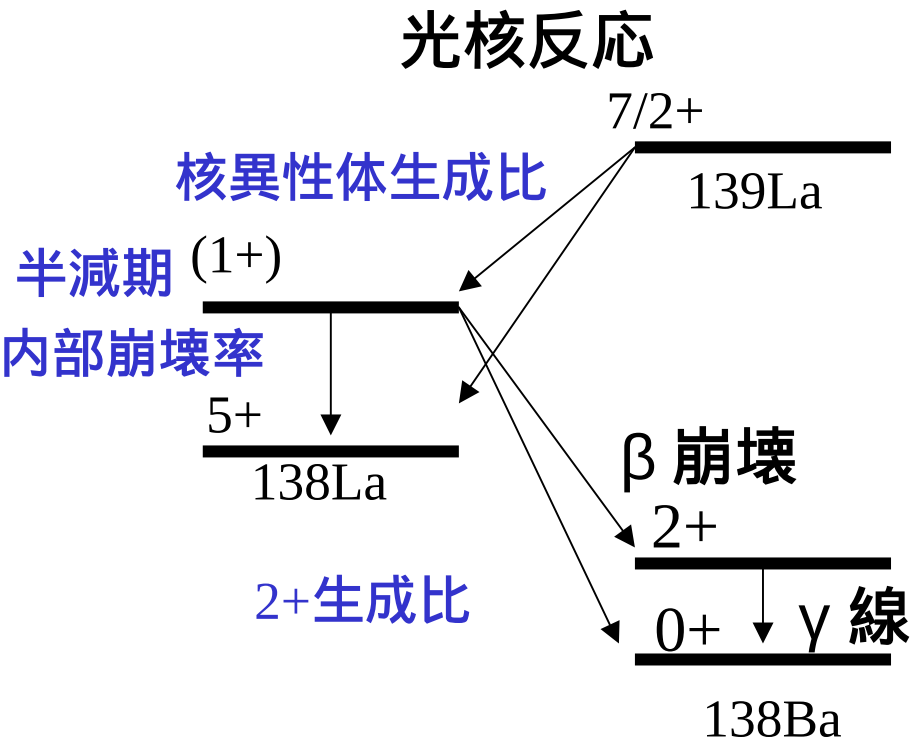
しかし、 ^{138}Ce は安定核なので、この方式の実験は不可能だった

2. 基底状態の崩壊

^{138}La の約 105 Gyr の半減期で崩壊する準安定状態である。

そのため、多量のLaを集めることで β 崩壊の実験を行ってきた。

実験方法



1. ^{139}La に、超伝導ウィグラーからの γ 線を照射する。
2. (γ, n) 反応で ^{138}La 核異性体を生成する。
同時に中性子計測による全反応断面積測定を行う。
3. ^{138}Ba の $2+$ 状態に β 崩壊した後に γ 線を放射するので、この崩壊曲線を計測する。
核異性体生成比を決める。

問題点

未知の物理量が4個もあり、生成量を正確に見積もれない。
多分、 ^{176}Lu の1/100から100倍程度ではないだろうか。

これまでの取り組み

筑波大タンデム加速器を用いて、
核異性体探索を行った。

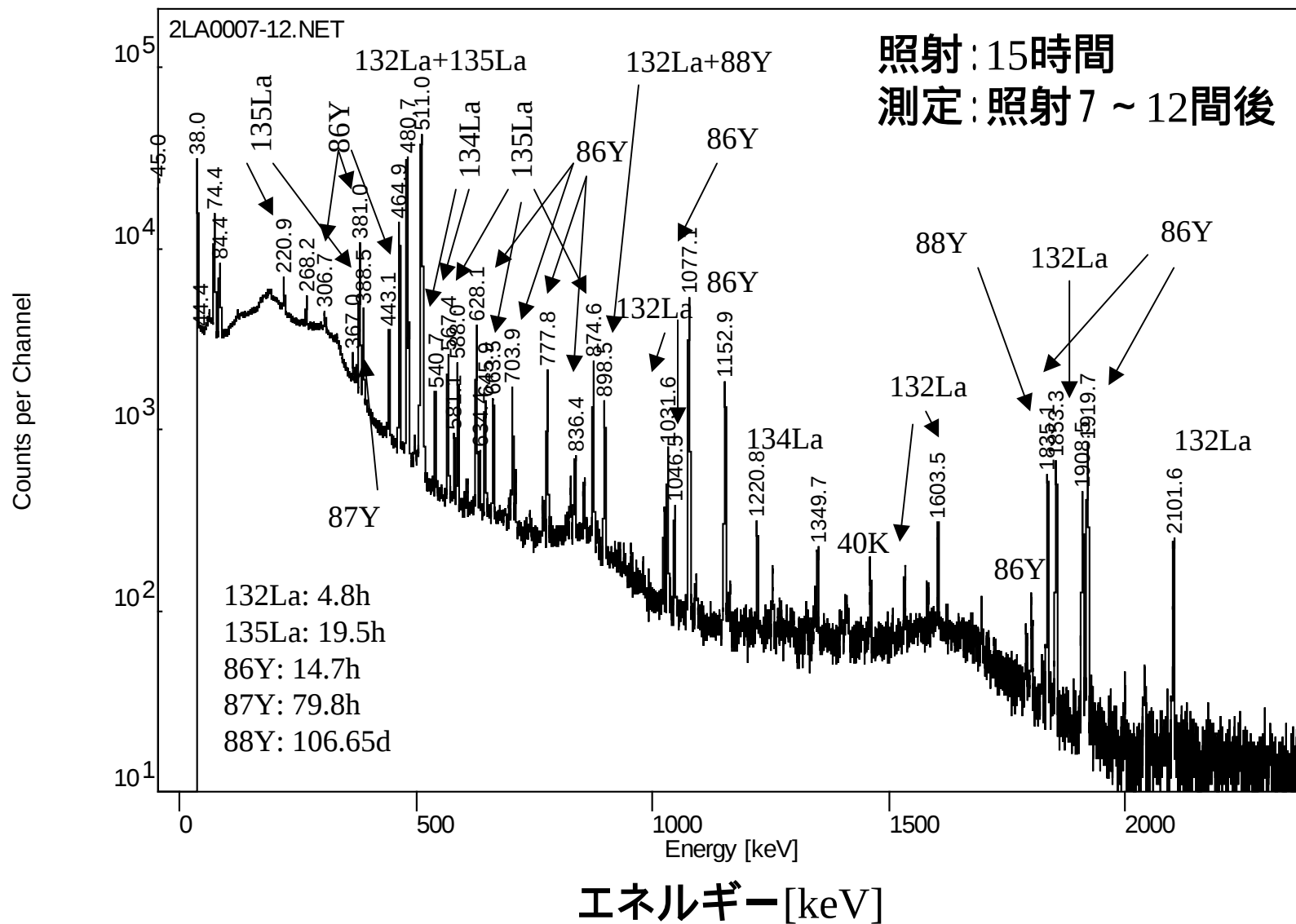
ビーム： 陽子、 $E=10\text{ MeV}$

ターゲット： $^{\text{nat}}\text{BaCO}_2$ 粉末の炭酸バリウムを圧縮して固める

核反応： $^{138}\text{Ba}(p,n)^{138}\text{La}$ 反応

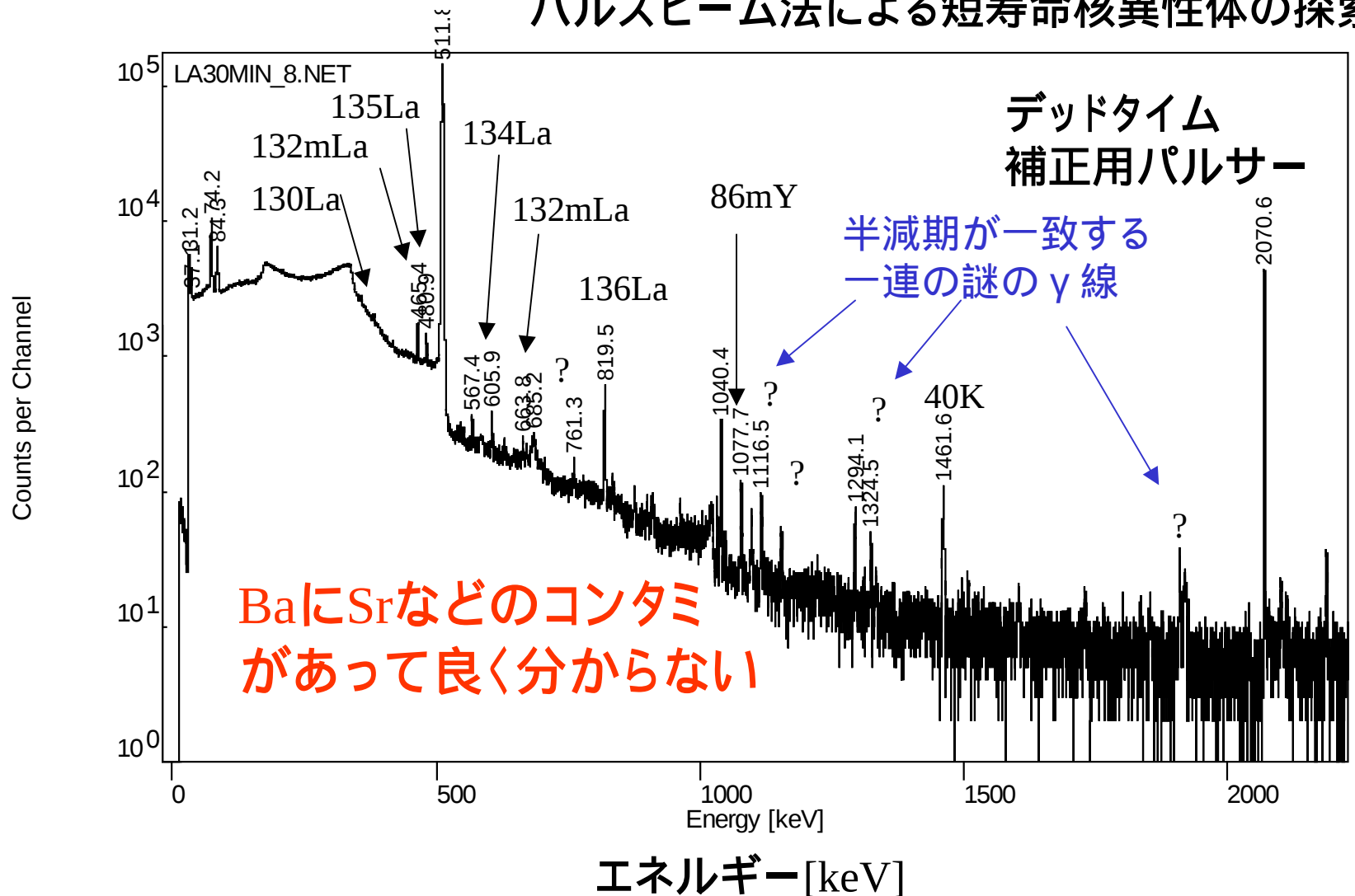
実験方法： パルスビーム法

実験のスペクトルの例 1



実験のスペクトルの例2

パルスビーム法による短寿命核異性体の探索



超伝導ウィグラーによる研究提案

他の手段による核異性体の探索



超伝導ウィグラーによる全反応断面積測定

発見

未発見

超伝導ウィグラーによる核異性体探索

発見

超伝導ウィグラーによる核異性体の生成確率測定(^{180}Ta 型実験)



超伝導ウィグラーによる核異性体と基底状態間の遷移確率測定(^{176}Lu 型)

まとめ

- 原子核宇宙温度計は重要なツールである。
- 既存の原子核宇宙温度計は、ほとんどがs過程用である。
- ここで、新しい γ 過程の原子核宇宙時計の可能性を指摘した。

この研究の長所

1. 成功すれば、 ^{176}Lu や ^{180}Ta の核異性体の発見に匹敵するインパクトがある。
2. 照射フラックスを気にしないので実験が楽である。

短所

1. 存在しないかもしれない。