

# 原子核の物理

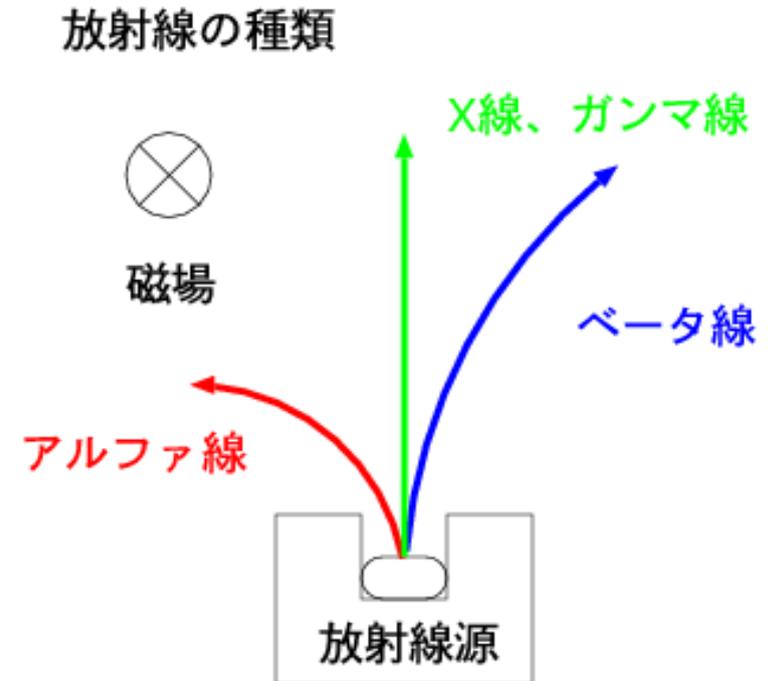
大学院理学研究院・物理学部門、  
大学院理学研究科・宇宙物理学専攻  
原子核理論研究室 大西 明

- 原子核とはどのようなものか？
  - 放射線の発見と原子核
  - 原子の有核構造と原子核の大きさ
- 現在の原子核物理学 — 最近の話題から —
  - クォーク・グルーオン・プラズマの探索
  - 超重元素の生成
- 社会における原子核
  - 放射線の利用
  - 核エネルギーの利用
- まとめ
- レポート 放射線の利用，核エネルギーの利用

<http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/~ohnishi/Sougou/index.html>

# 放射線の発見と原子核

- 1895 レントゲン、X線を発見
- 1896 ベクレル、自然放射能の発見
- 1897 トムソン、電子を発見
- 1898 キュリー夫妻、ポロニウム・ラジウムを発見
- 1911 ラザフォード、原子の有核構造発見
- 1929 ガモフ、アルファ崩壊を量子力学のトンネル効果で説明
- 1931 ヴァンデ・グラーフ、加速器を製作
- 1932 チャドウィック、中性子を発見
- 1932 ローレンス、サイクロトロンを製作
- 1935 湯川、中間子論

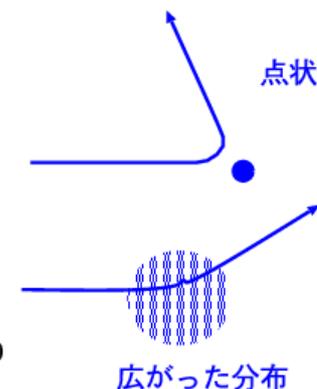
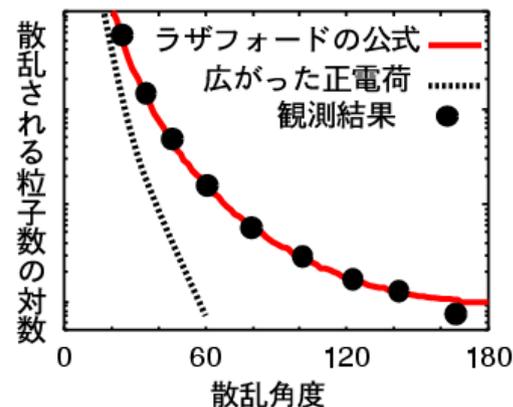
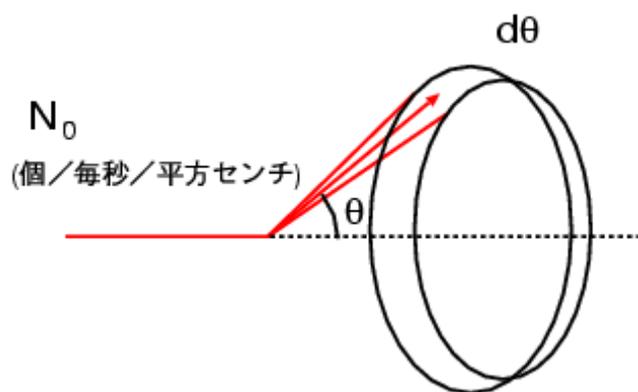


アルファ線 = 正電荷をもつ重い粒子  
ベータ線 = 負電荷をもつ軽い粒子  
X線、ガンマ線 = 電荷を持たない

これらの放射線は何からでてくるのだろうか？

# 原子の有核構造

- 荷電粒子(アルファ粒子)と原子核の衝突実験 (Rutherford, 1911)



- ラザフォードの公式(正電荷が一点に集まっているとしたとき)

$$dN(d\theta \text{ の間に観測される粒子の数}) \propto \frac{\sin\theta d\theta}{\sin^4(\theta/2)}$$

- 観測結果:ラザフォードの公式で説明可能

正電荷は原子の大きさ程度に広がっているのではなく、  
 $10^{-12} \text{ cm}$  程度の領域に点状に集中している → 原子核の発見

# 原子核の大きさと強い力

## ■ 原子と原子核の大きさ

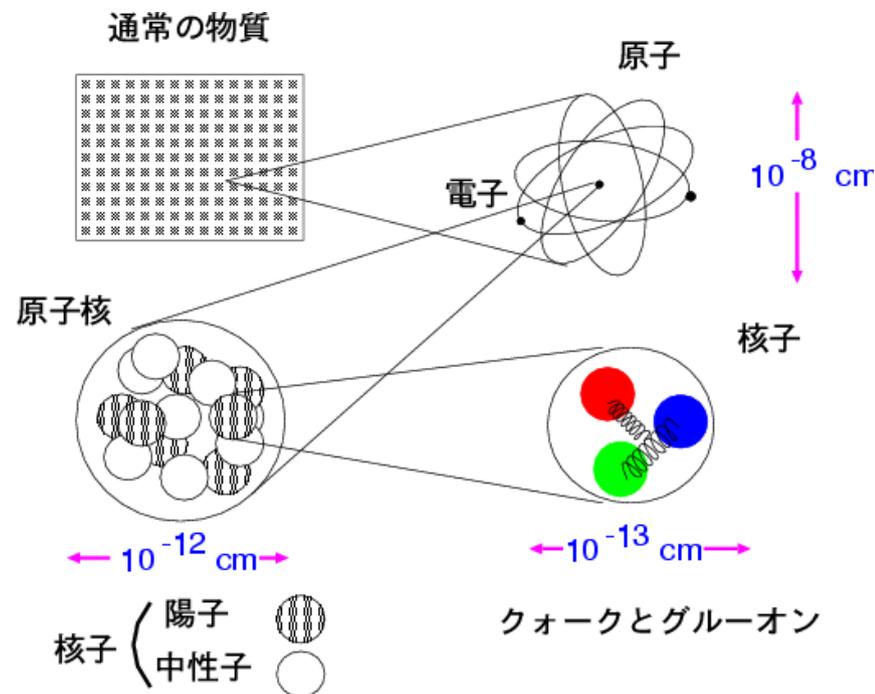
- 原子核  $10^{-12}$  cm  $\rightarrow$  10 cm に拡大
- 原子  $10^{-8}$  cm  $\sim$  1 km

## ■ 原子核には、

**「正電荷のみ」が「狭い領域」に**  
閉じ込められている。

- 重力・電磁気力では説明不可能
- 不確定性関係：  
狭い領域に閉じ込められた粒子  
は 大きな運動エネルギーをもつ。

**$\rightarrow$  新しい強い力の必要性**

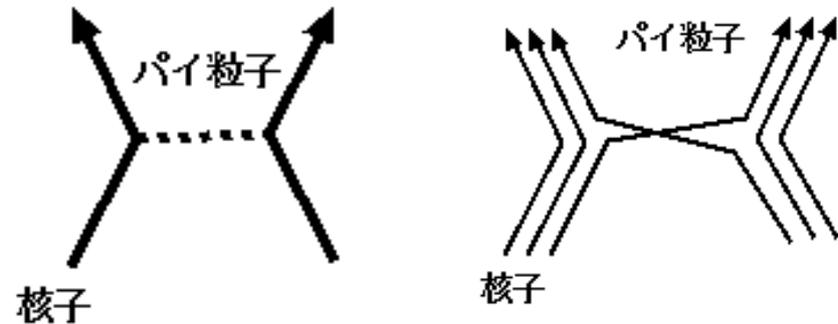


核子を原子核内で閉じ込めている力を核力とよび、  
 $\pi$  中間子 (当時未発見) の交換によりもたらされる。  
湯川秀樹 (1934 国内発表、1935 英文発表、1949 ノーベル賞)

# 核力とは

## ■ 湯川理論

- 核子間の短距離で強い力は、パイ粒子を交換することにより生み出される。→ 素粒子物理学の始まり



## ■ 現代的理解

- 基本的相互作用：クォークとグルーオンの相互作用（量子色力学）
- 遠距離の力：クォークと反クォークの対でできたパイ粒子の交換
- 中間距離の引力：2つのパイ粒子の交換や他の軽い中間子の交換
- 短距離の斥力：クォークのパウリ原理とグルーオン交換、及び重い中間子の交換

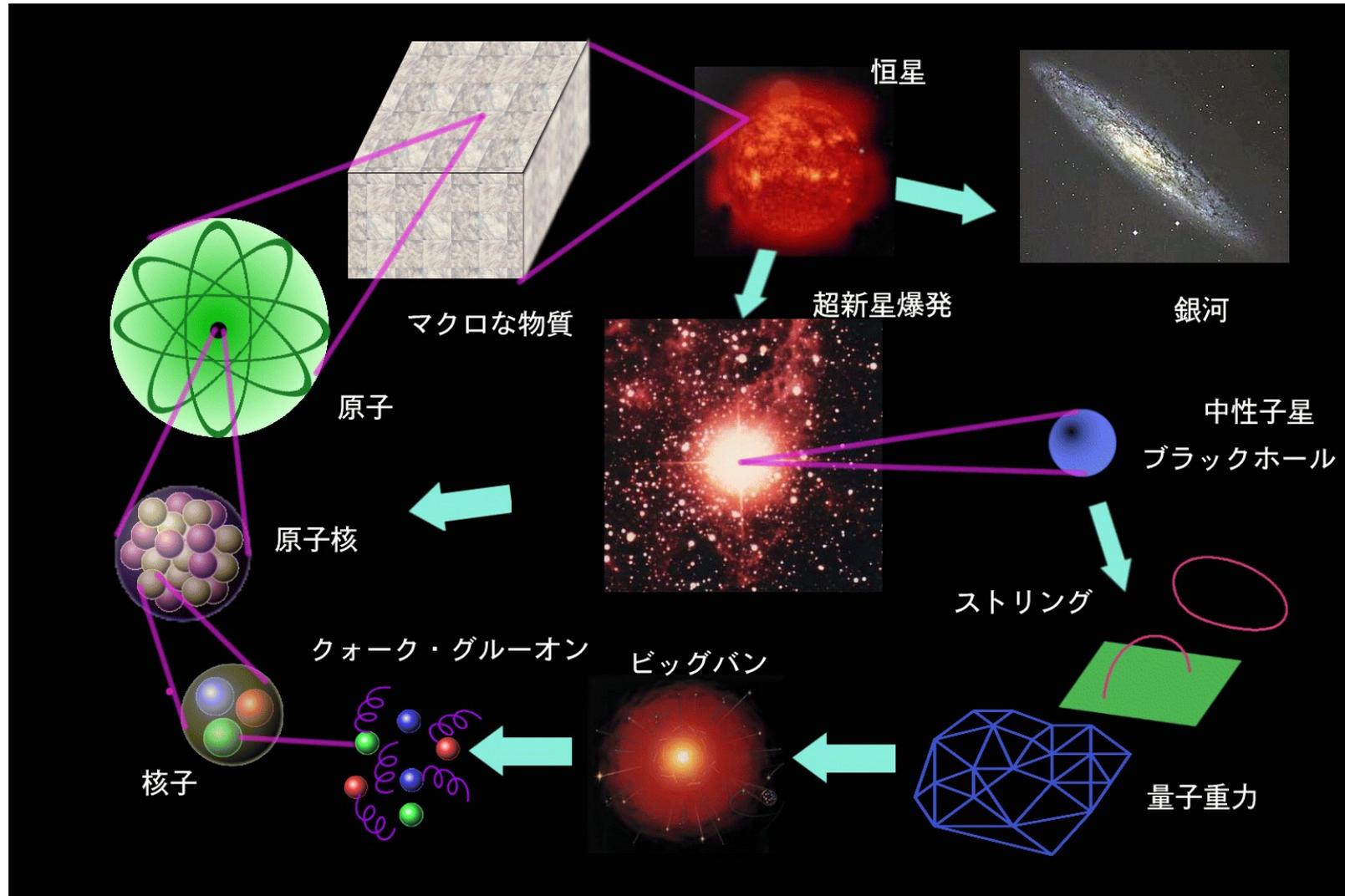
湯川理論＝「粒子の交換により力が媒介される」  
→ 現在の全ての基本的相互作用の基礎

# 現在の原子核物理学 — 最近の話題から —

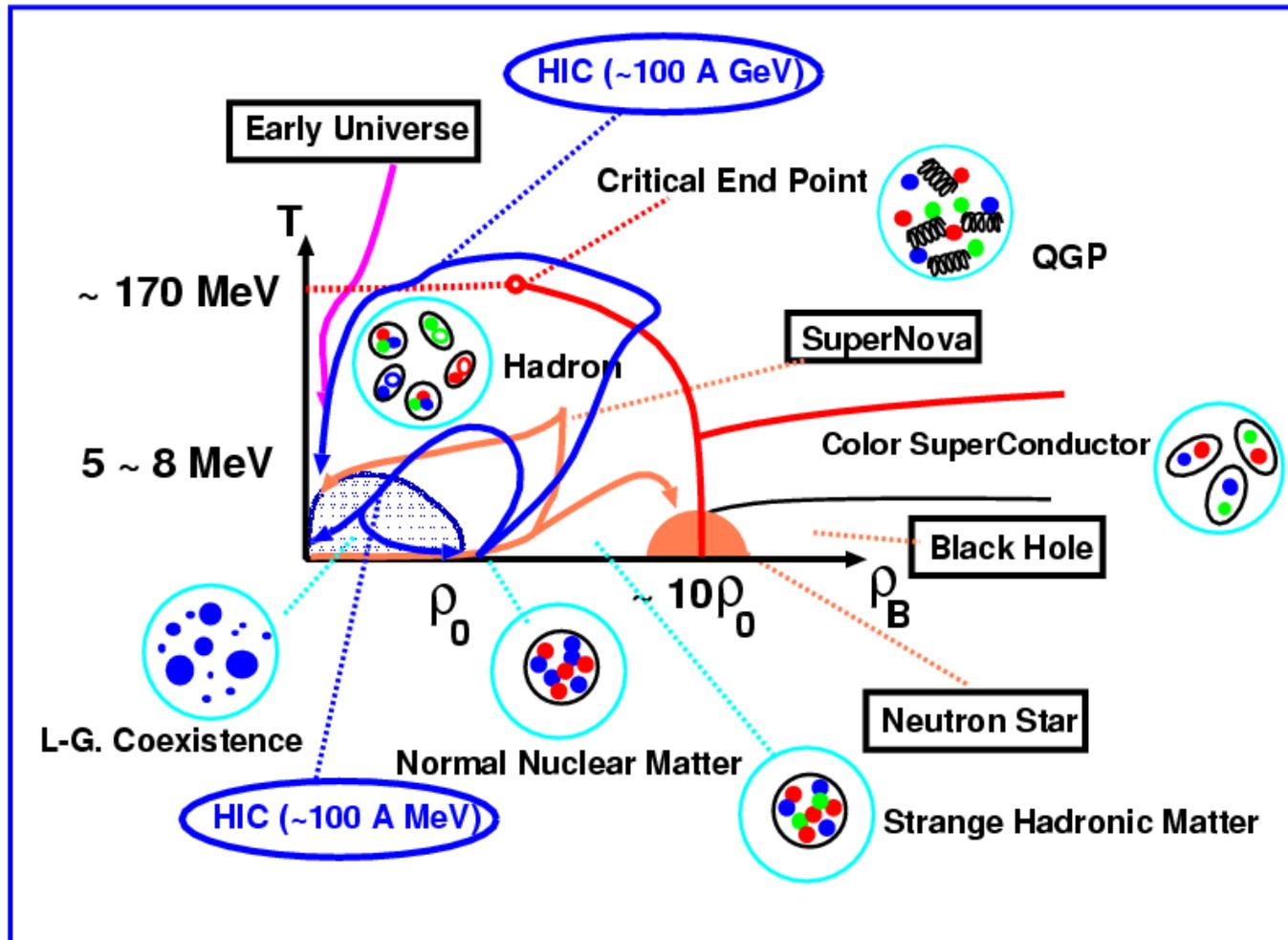
- 地上で作る小さなビッグバン
  - クォーク・グルーオン・プラズマの探索
- 周期律表にジャポニウムが加わるか？
  - 超重元素の生成

# 物質は何からできているか？

- 原子 → 原子核 → 核子  
→ クォーク (= 現時点で「最小」と考えられている粒子)



# 宇宙と地上でのクォーク物質相転移

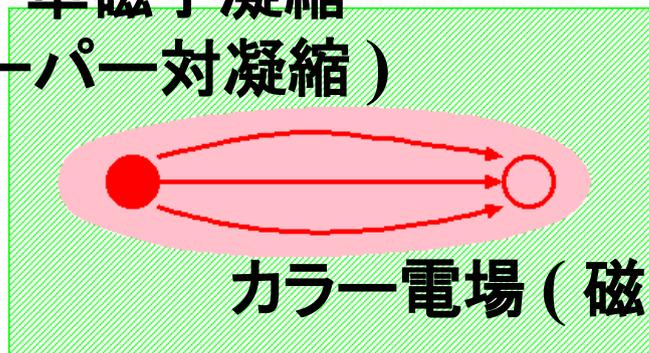


- QGP からハドロン相への相転移 (QCD 相転移) = この宇宙最後の「真空相転移」である！

# 量子色力学 (QCD) の「真空」

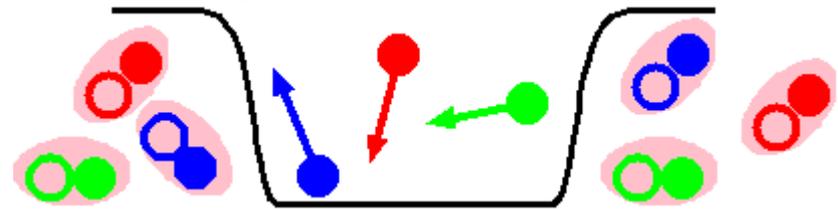
- 色の閉じ込め：クォーク間には「ひも」のような力が働く
  - クォーク間の電場はひも状に絞られている ( $\Leftrightarrow$  超伝導体での磁場)
  - 引き離そうとするとクォーク対が生成されて色は閉じ込められたまま。
- 質量の獲得：核子は「モーゼの道」の中の3クォーク状態
  - QCD 真空ではクォーク・反クォーク対が凝縮
    - 凝縮体を「押しよける」のにエネルギーが必要
    - 5 MeV の質量のクォークが3つで 1000 MeV の大きな質量

カラー単磁子凝縮  
(クーパー対凝縮)



カラー電場 (磁場)

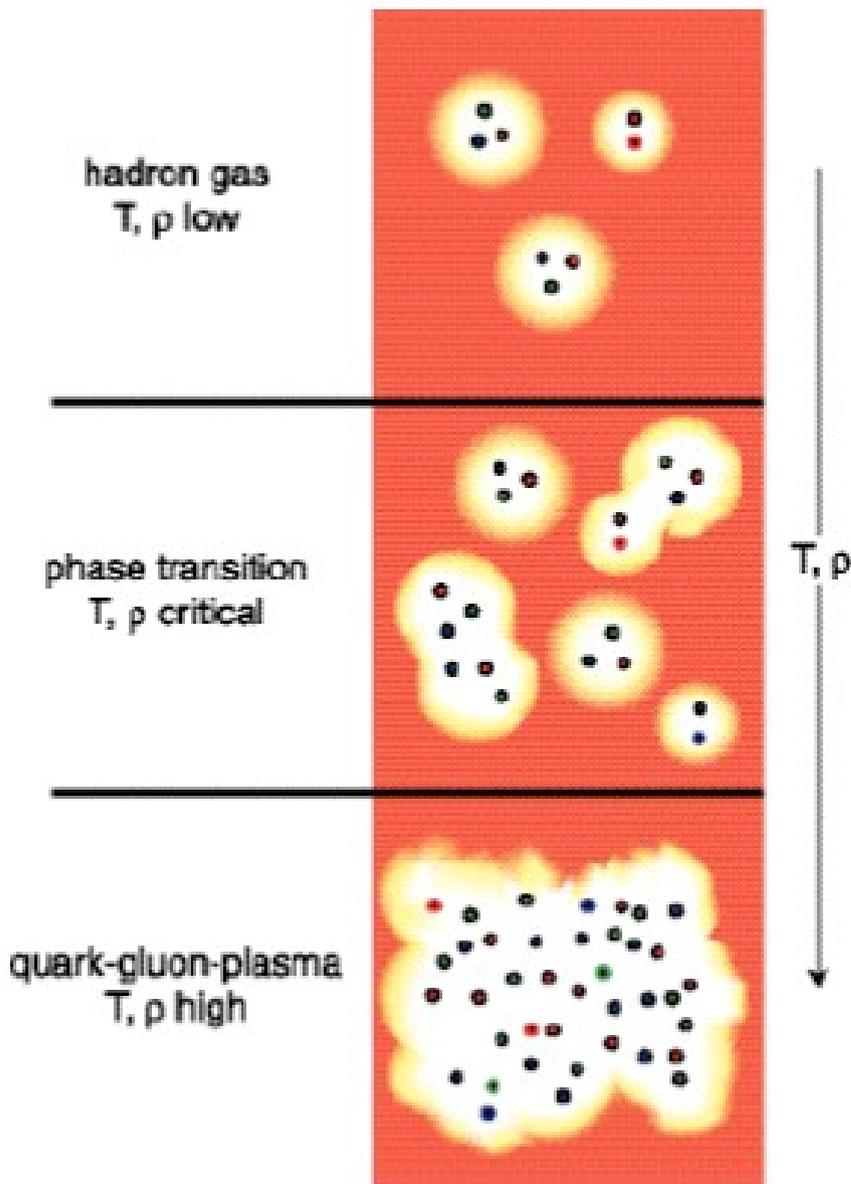
価クォーク



クォーク・反クォーク対凝縮

QCD 真空には「カラー単磁子」と「クォーク・反クォーク対」の凝縮体

# なぜ高温でQGP への相転移がおこるか？



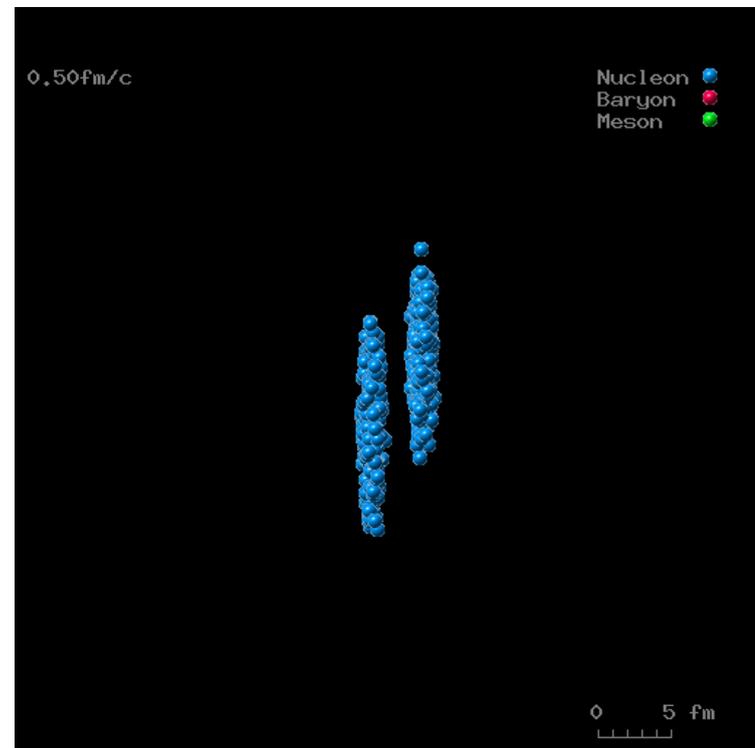
## ■ ハドロン物質を熱する / 圧縮するとどうなるか？

- ハドロン (核子や中間子) は、  
1 fm 程度の大きさを持ち、  
クォークと力を媒介するグルーオン  
からできている。(クォーク3つか、  
クォーク・反クォーク対)
- 温度の増加により、  
多くの中間子が作られる  
→ クォーク・反クォークの数が  
増えて、ハドロンが「重なる」
- 核子内部の密度まで圧縮する  
→ 核子同士が「重なる」

温度・密度を十分上げれば、  
大きな体積で  
クォークが自由に動き回るはず

# クォーク・グルーオン・プラズマを作るには？

- クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)
  - 大きな体積中をクォークとグルーオンが閉じ込めから解放され、凝縮のない単純な真空を動き回っている状態
  - 初期宇宙等の「超高温状態」( $\sim 10^{12}$  K) や、中性子星中心部などの「超高密度状態」( $\sim 10^{15}$  g/cc) で実現
  - 実験室での QGP 生成  
→ 高エネルギーの重イオン反応

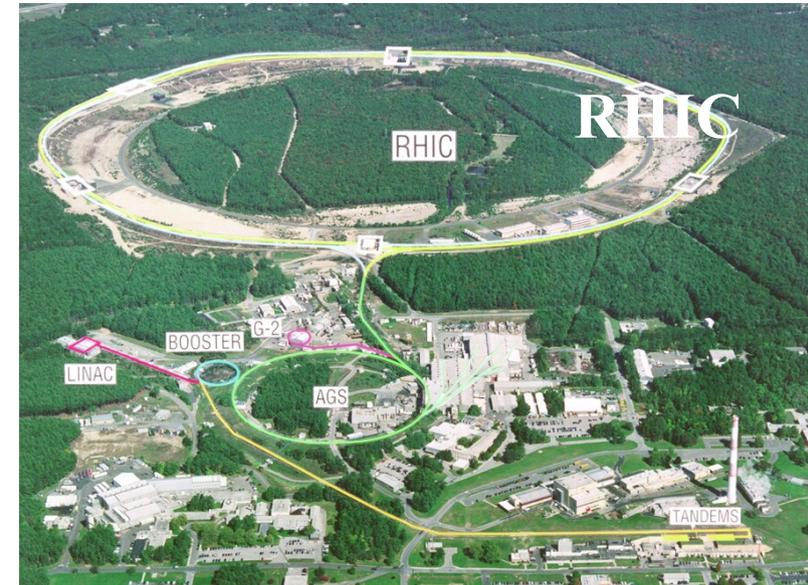


高エネルギー原子核反応での  
QGP 生成  
= 地上の “Big Bang” 再現実験

# 高エネルギー原子核衝突実験

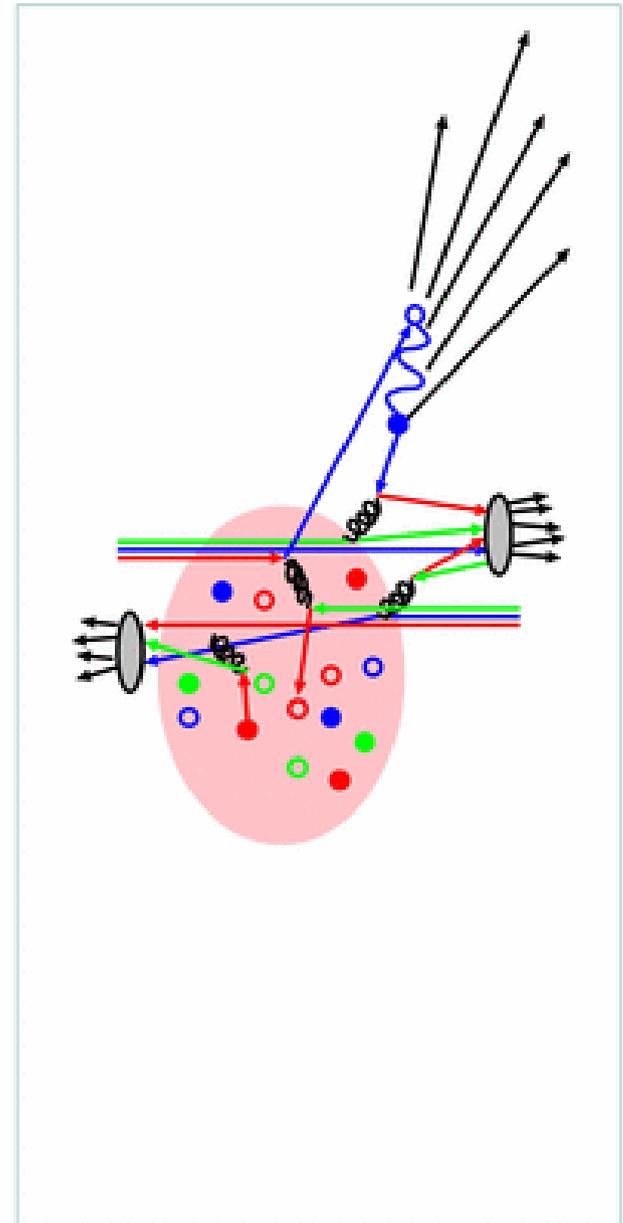
- ランダウの昔から核物理屋は重イオン反応でQGPを作りたかった！

- LBL-Bevalac: 800 A MeV
- GSI-SIS: 1-2 A GeV
- BNL-AGS (1987-): 10 A GeV
- CERN-SPS (1987-): 160 A GeV
- **BNL-RHIC (2000-): 100+100 A GeV**
- **CERN-LHC (2008(?) -): 3 + 3 A TeV**



# QGP 生成のシグナル

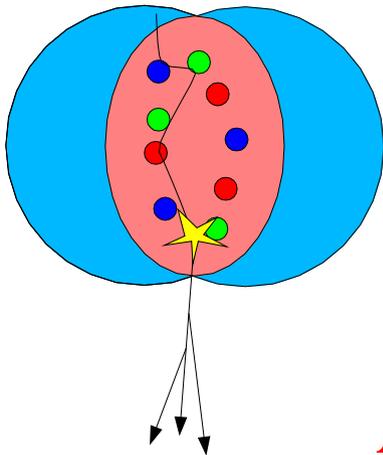
- QGP が作られると何が起こるか？
  - 初期の核子内のパートン (クォーク、グルーオン) の激しい散乱
    - QGP が生成されると、カラー電荷を持った粒子 (クォーク、グルーオン) が熱的に分布
      - **クォークやグルーオンがエネルギーを損失** (ジェット抑制、Jet Quenching)  
c.f. 荷電粒子は電子と散乱してエネルギーを損失)
  - 早い段階で熱平衡化
    - (熱平衡が仮定される) 流体力学的振る舞い



# QGP 生成の実験的証拠：ジェット抑制

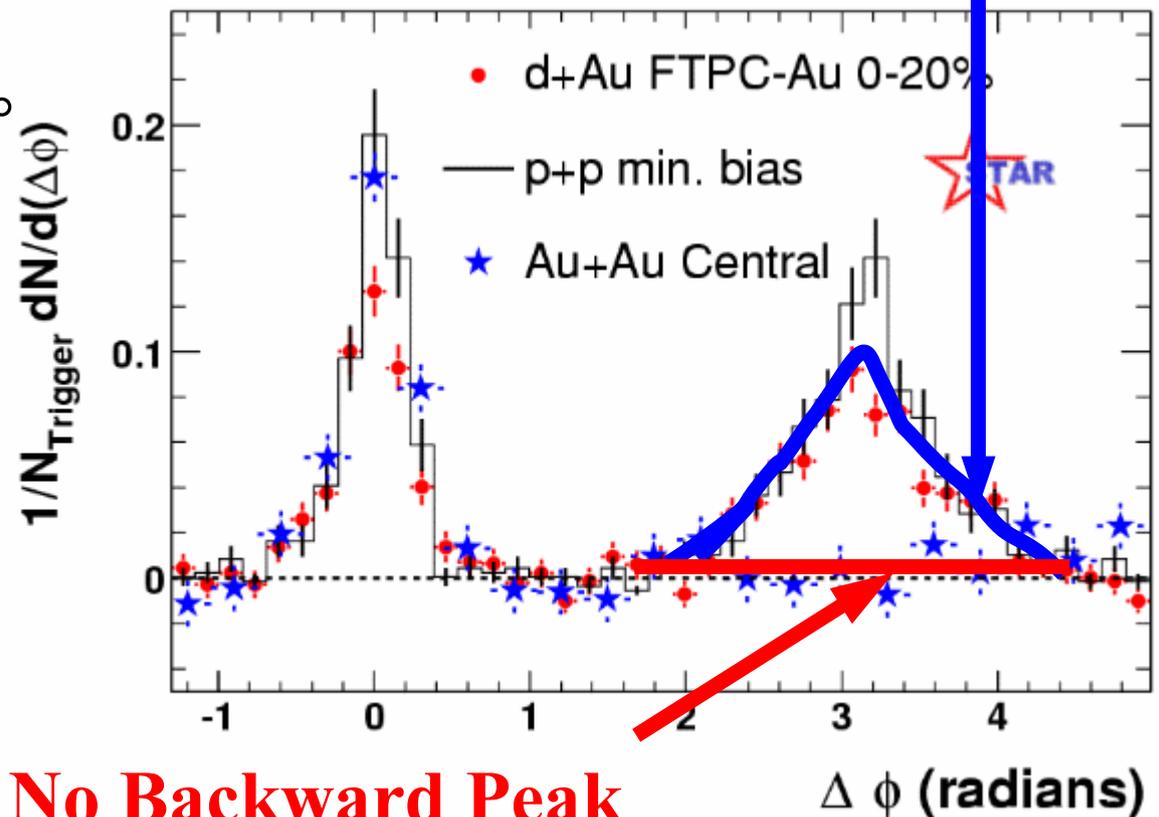
- ジェットが消えているなら、核子衝突で見えている裏側の相関が消えるはず。

- d+Au では消えていない
- Au+Au では消える

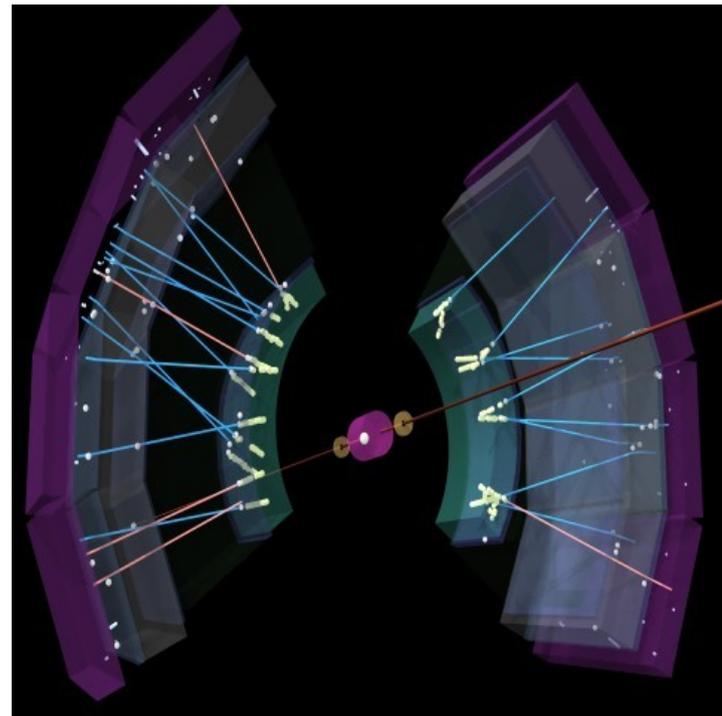
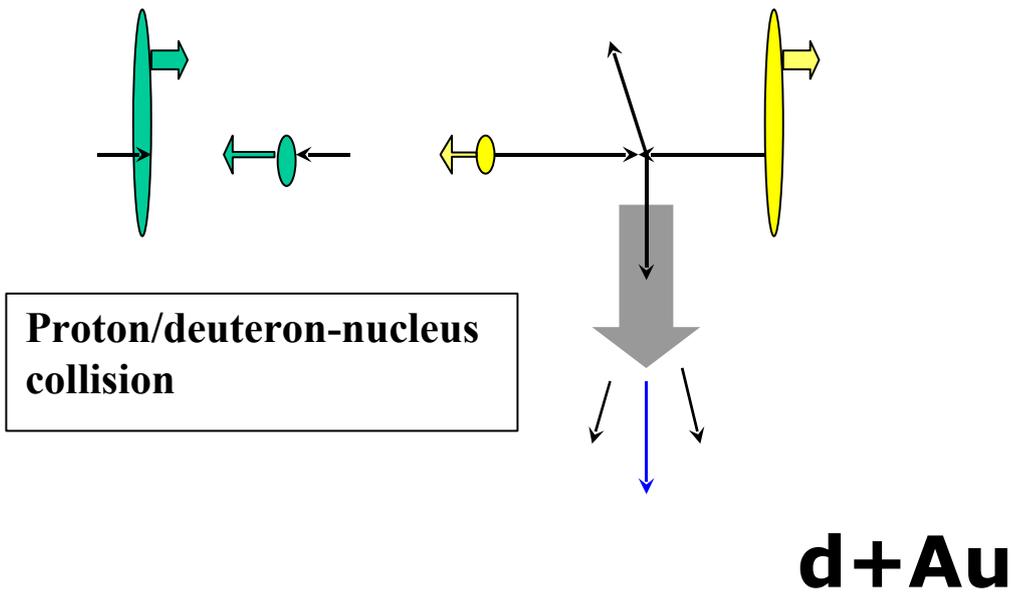
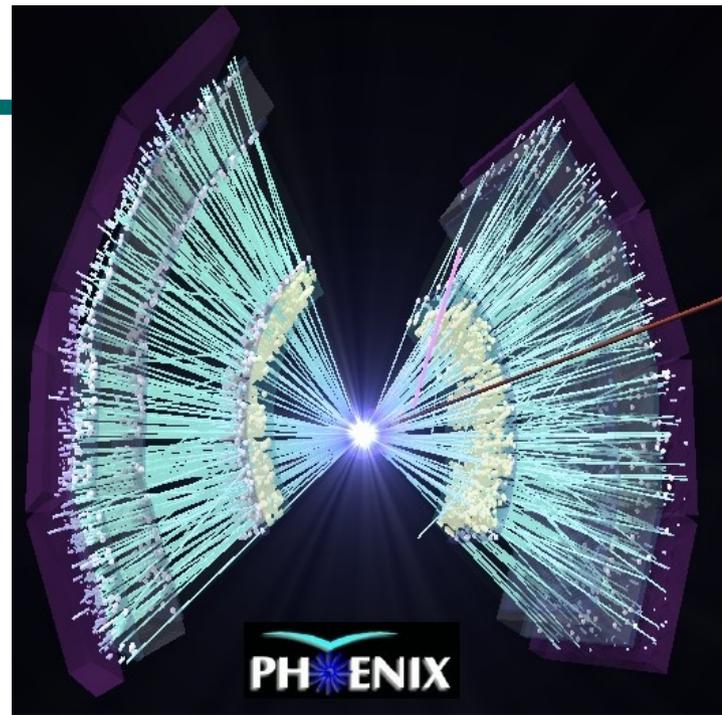
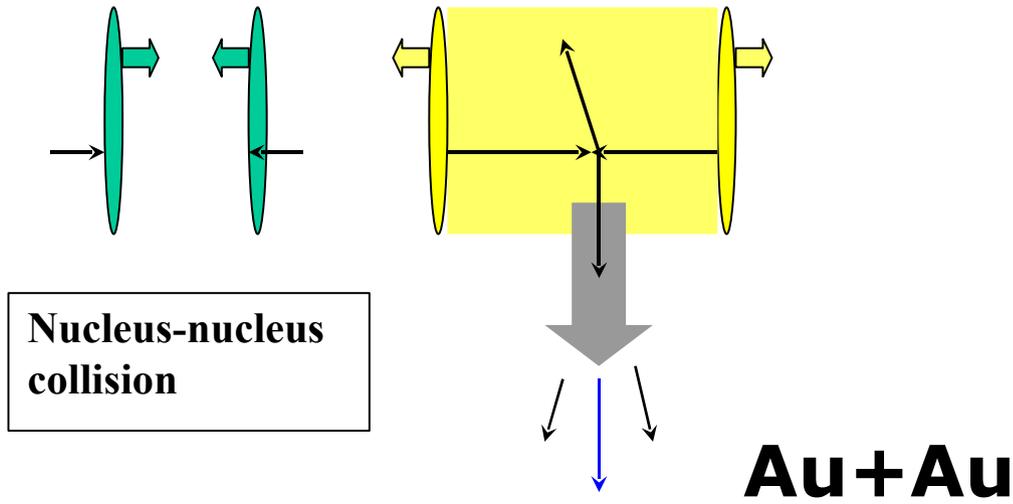


**Au + Au: No Backward Peak**

STAR  
**d + Au: Backward Peak**

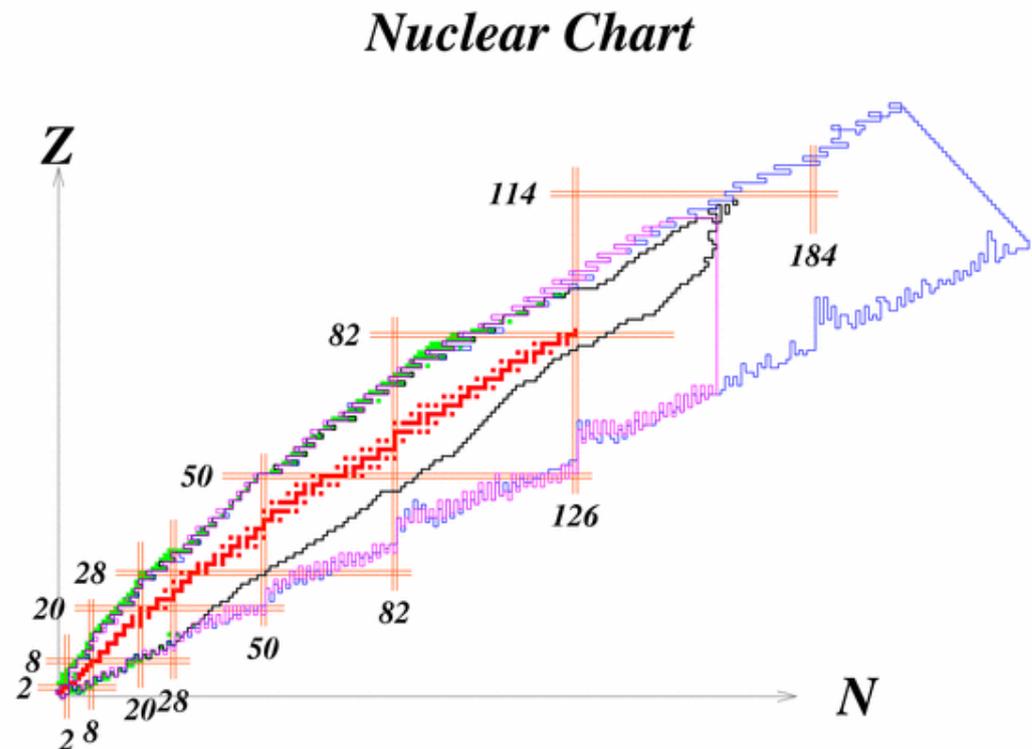


大きな原子核の衝突で裏側の相関が見えなくなる  
→ ジェットが抑制されて、ジェットが一本しか見えていない  
→ QGP 生成のシグナル

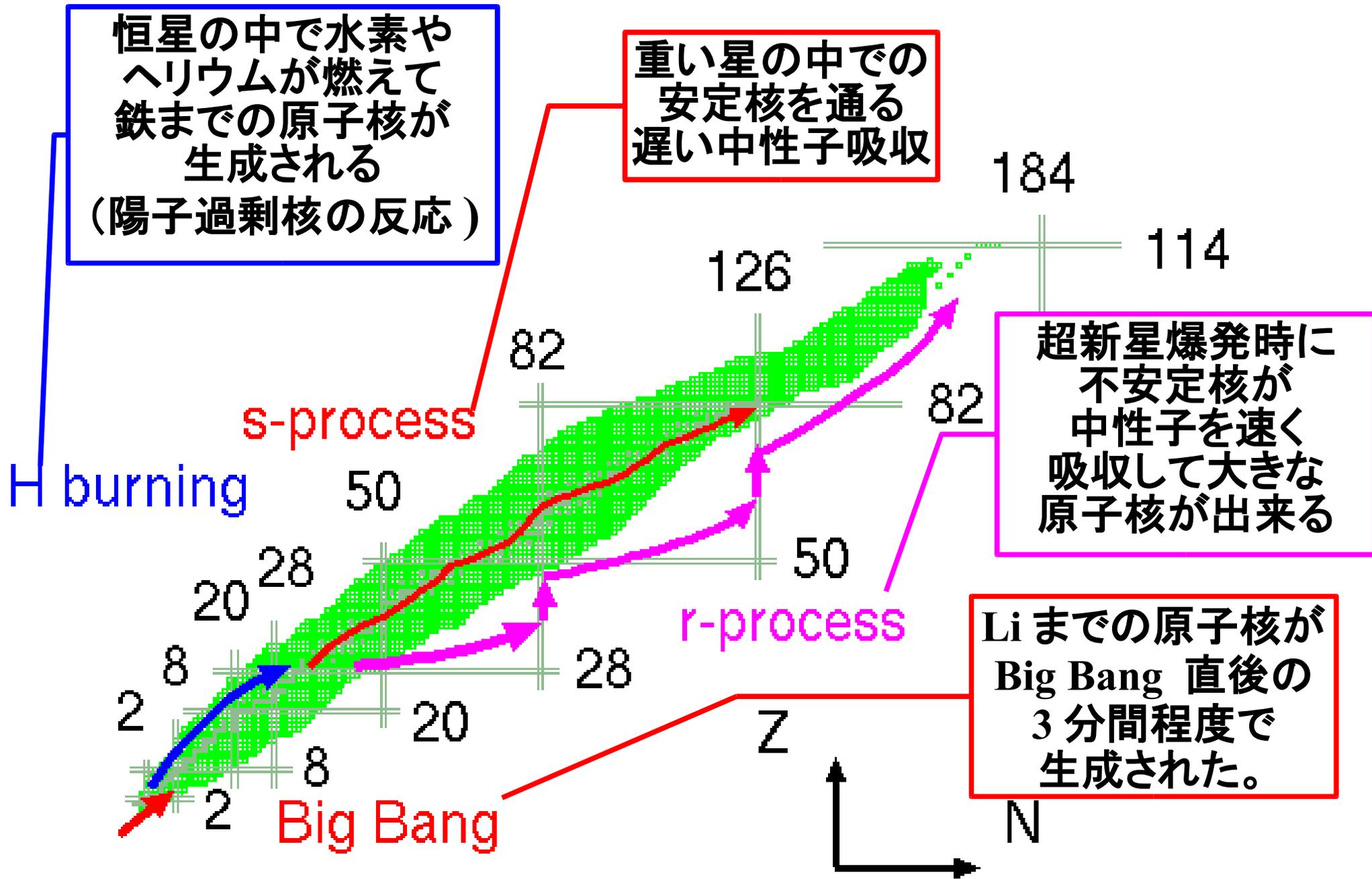


# Nuclear Chart (核図表)

- これまでに見つかっている原子核 ~ 2000 種類
- 存在が期待されている原子核 ~ 6000 種類
  - 理研の次期加速器で、未発見の 4000 種のうち、1000 種程度見つける予定。
  - スレンジネスを含む原子核はもっとある  
→ KEK + 原研の次期加速器で 3次元核図表作成
- 中性子数・陽子数がある特別な値 (魔法数) となるとき原子核は特に安定 (~希ガス)



# 元素の起源：不安定な多くの原子核がかかわる！



恒星の中で水素やヘリウムが燃えて鉄までの原子核が生成される  
(陽子過剰核の反応)

重い星の中での安定核を通る遅い中性子吸収

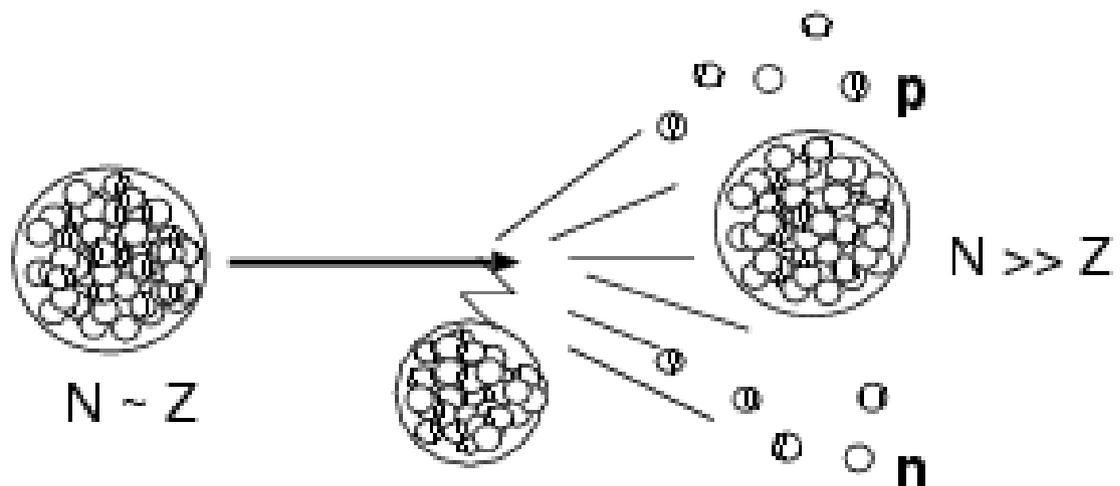
184 114

超新星爆発時に不安定核が中性子を速く吸収して大きな原子核が出来る

Liまでの原子核がBig Bang直後の3分間程度で生成された。

# 不安定な原子核の作り方

- 安定核 ( $N \approx Z$ ) を他の原子核に衝突させると、確率は小さいが中性子数の大きな原子核が生成される。



- 中性子過剰核の特徴
  - 束縛エネルギーが小さい。
  - 半径が極端に大きい
  - 低励起の状態が多い。
  - 重い原子核の合成に非常に重要



# 原子番号 $Z=113$ の新元素の発見

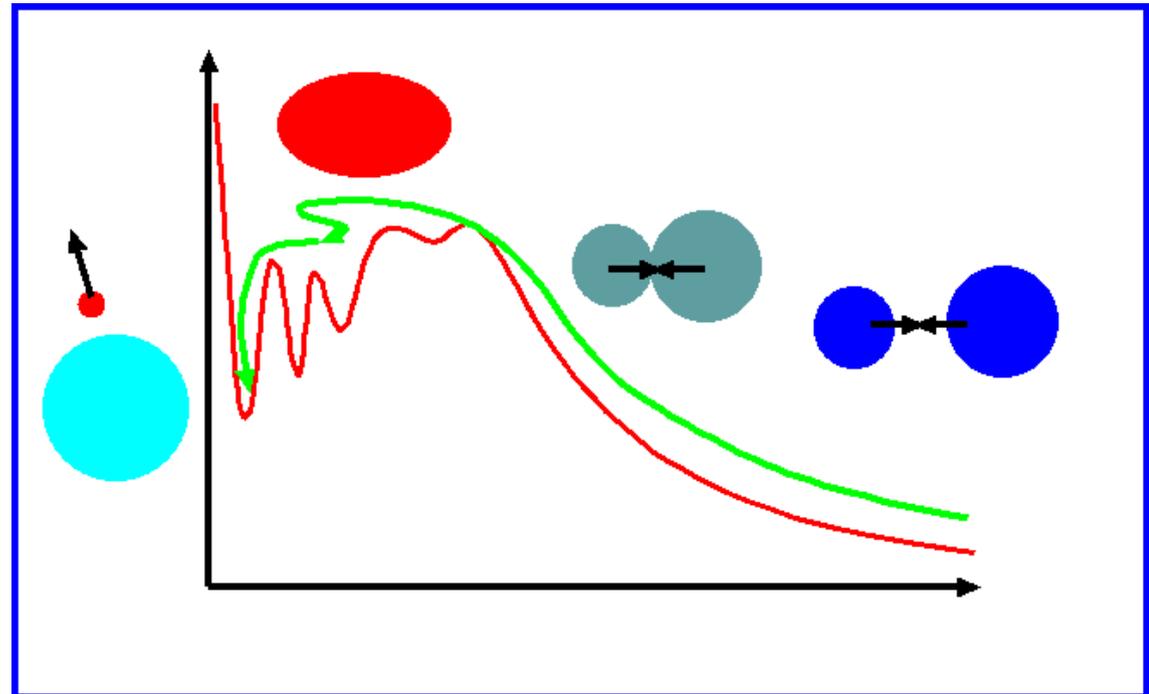
- これまでの超重元素 ( $Z > 92$ ) 生成
  - アメリカ、ロシア、ドイツの独占
  - $Z=93$  (ネプチニウム, Np) ~  $Z=103$  → アメリカ
  - $Z=104$  ~  $106$  (シーボルギウム, Sg) → アメリカ・ロシア
  - $Z=107$  ~  $112$  → ドイツ
- なぜ作るのが難しいか？
  - 大きな核の融合 → クーロン障壁以上の大きなエネルギーが必要
  - ウランより陽子数の大きな原子核は、少しの励起でもすぐ核分裂
- **多くの問題を乗り越えよ！**
  - 分裂をいかにおさえるか？
    - 「中性子過剰ビーム」で速く中性子を放出させる
  - もっとも適したエネルギーは？ 多く作る反応は？
    - これまでのデータから推測、理論計算
  - できれば必ず観測するには？
    - 新たな観測装置の開発

# 重い原子核の融合反応

- 重い原子核の低エネルギーでの衝突
  - 近づいて接触 → 多くの場合はクーロン障壁により反射
  - クーロン障壁を越えた場合、励起・変形した原子核ができる  
→ 熱いままであれば、すぐに核分裂
  - 中性子を放出すれば、冷却するとともに量子効果（魔法数効果）によりポテンシャルが変化 → 超重核の生成
  - 複数の  $\alpha$  粒子を放出して既知の原子核に到達  
→ 超重核の同定

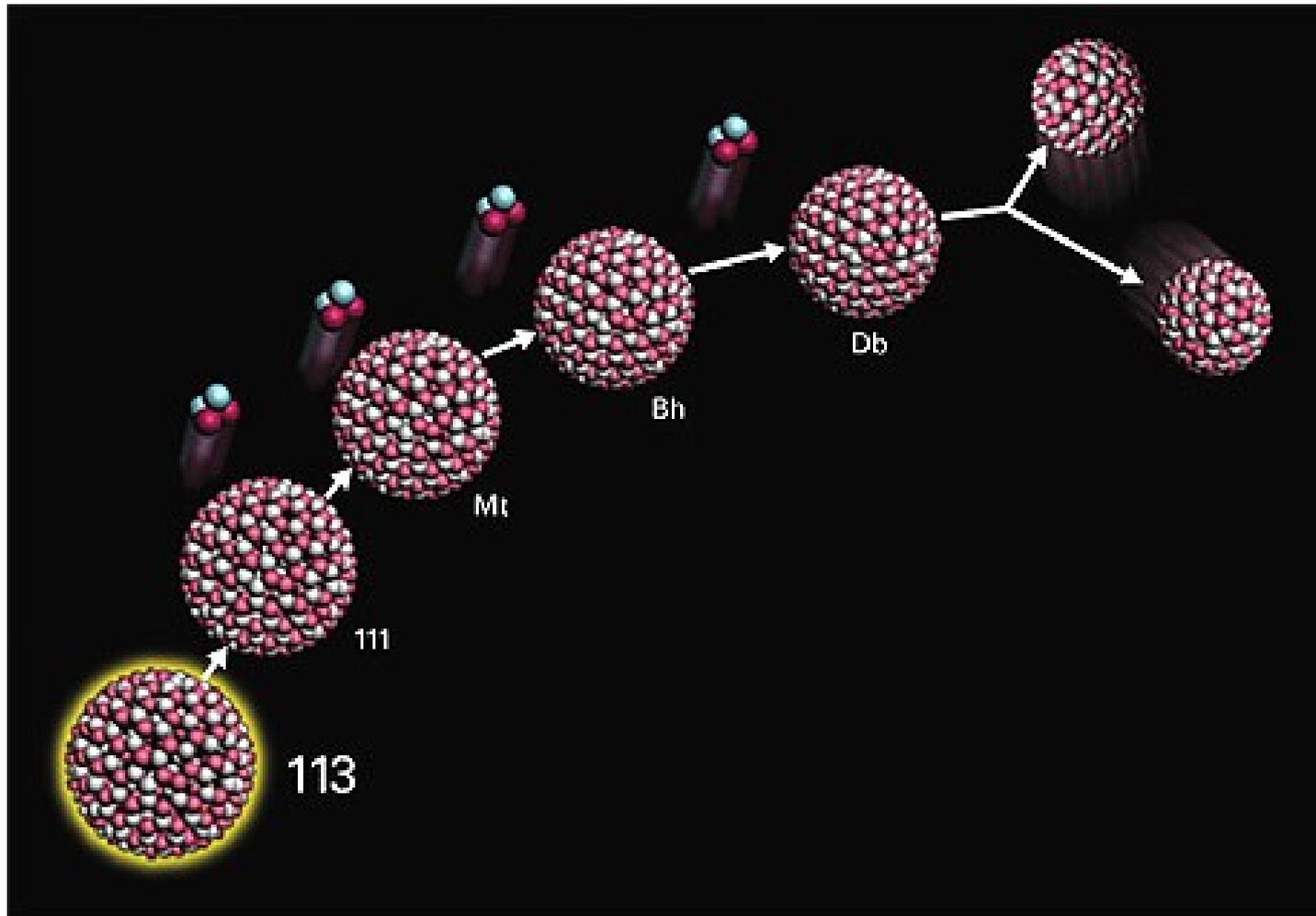
## 超重核探索

= 反応機構の解明  
+ 量子効果の解明  
(*Shell Effects*)



# 原子番号 $Z=113$ の新元素の発見

- ジャポニウム計画 (1999年10月～)  
→ 新元素  $Z=113$  の発見: 理化学研究所 (2004/09/28)



# ジャポニウムの作り方

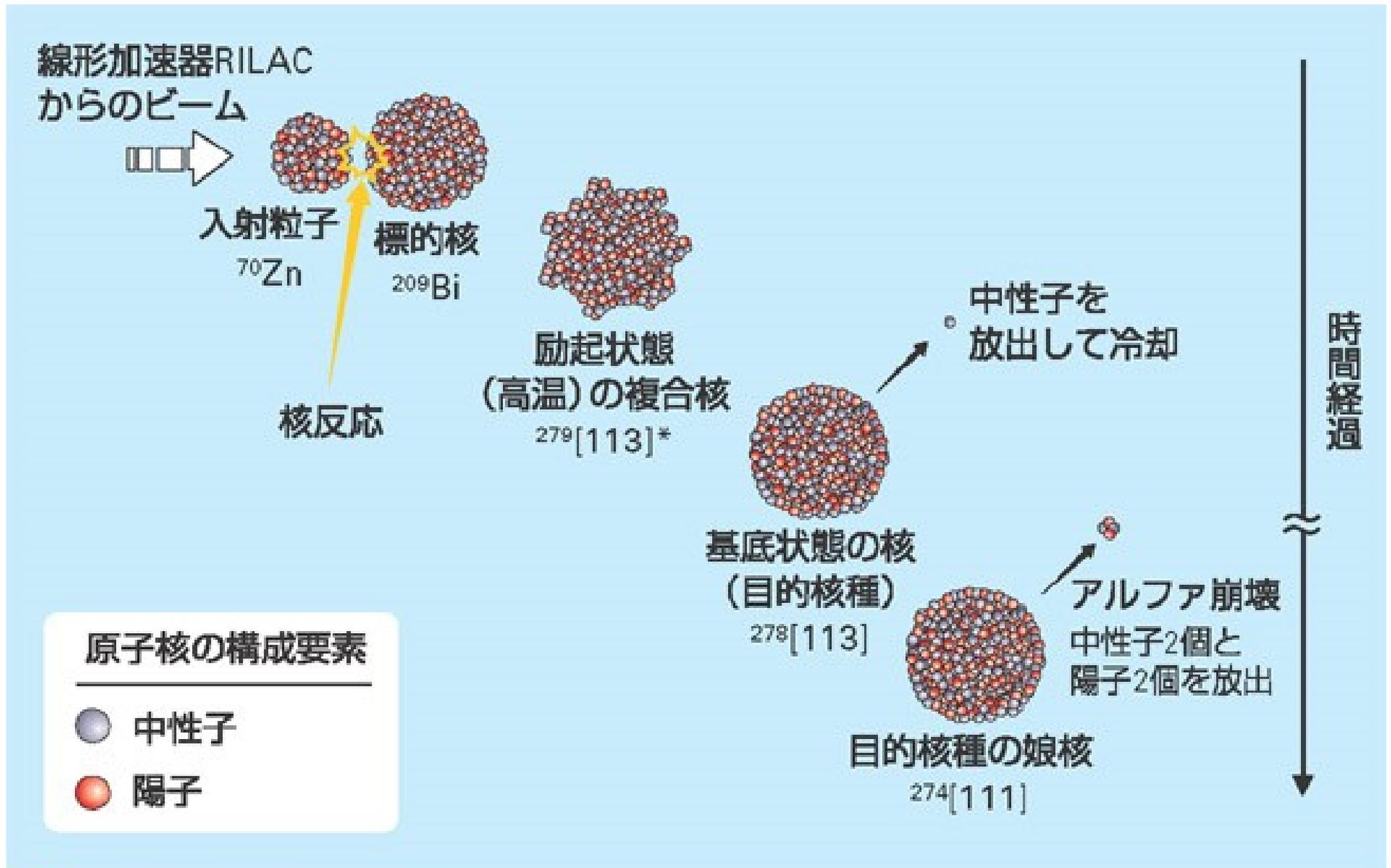
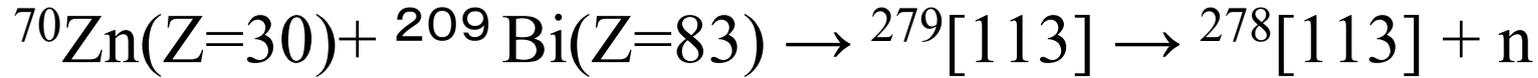


図1 原子番号113元素の合成と崩壊連鎖

# ジャポニウムの作り方

## ■ 超重元素生成の核反応



- $\alpha$  崩壊を繰り返して、既知の原子核にたどり着く  
→ 新原子核の  $(Z,N)=(113,166)$  は确实
- ロシアの報告では  $Z=114, 115$  生成を主張しているが、既知の原子核にたどりついていない
- バークレイの  $Z=118$  は捏造だった

- ジャポニウム？
- ニッポニウム？
- リケニウム？

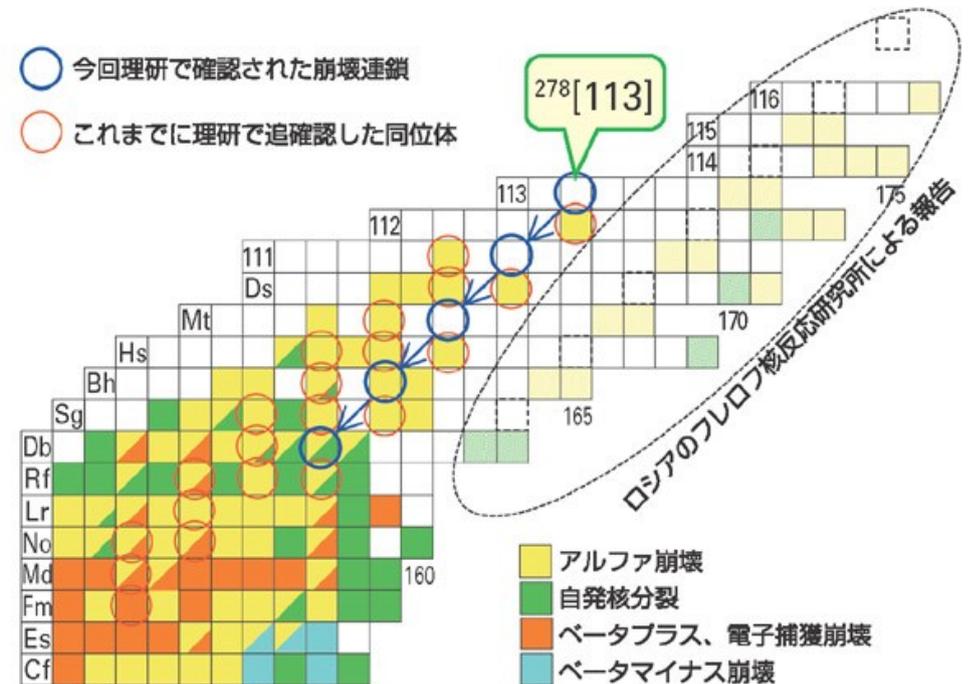


図3 核図表の終端部分  
核図表とは、原子核の陽子数（原子番号）を縦軸とし、中性子数を横軸にして表示したものである。

# 社会における原子核

- 放射線の利用
- 核エネルギーの利用
- 核エネルギーの問題点 ... 核変換処理

# 放射線の利用

- 農業・工業での利用
  - トレーサーとしての利用、内部の透視
  - 遺伝子変換、遺伝子解析
  - 蛍光塗料、グロー放電管
  - 火災報知器
- 医学利用
  - レントゲン、CT Scan
  - 血液照射
  - **がん治療**



# 核エネルギーの起源

- 質量とエネルギーの等価原理 :  $E = Mc^2$  (Einstein)  
(質量はそれ自体でエネルギー)
  - 質量の総和の変化 = 取り出しうるエネルギー
  - 1 グラムの物質の (質量) エネルギー  
= 石炭 3,000 ~ 4,000 トンを燃やしたエネルギー
- 原子核の質量欠損 (質量保存則の破れ) = 結合エネルギー

(質量欠損)

= (陽子数) x (陽子の質量)

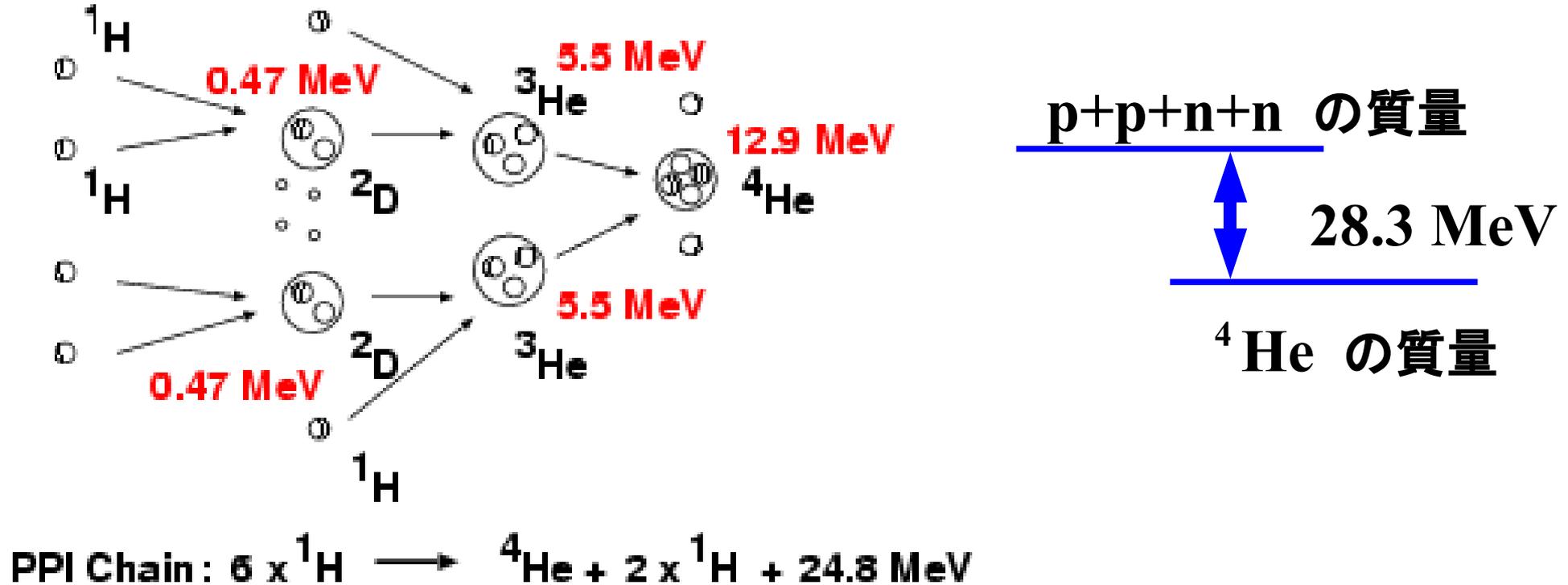
+ (中性子数) x (中性子の質量)

- (原子核の質量)

原子核では質量欠損が質量の約 1% にも達する。

# 核融合：太陽のエネルギー源

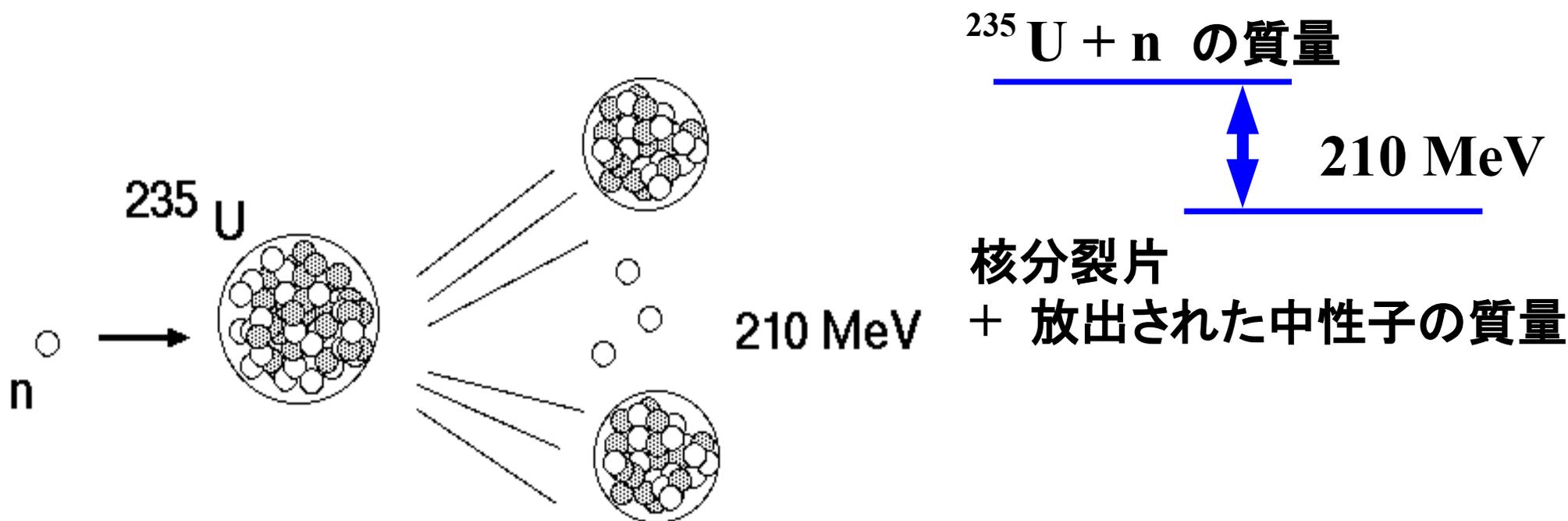
- ${}^4\text{He}$  原子核の大きな束縛エネルギー (28.3 MeV) を利用して、水素原子核 (陽子) を燃やす。



質量エネルギーの 0.7% を放出

# 核分裂：原子力発電のエネルギー源

- $^{235}\text{U}$  の不安定性（小さな束縛エネルギー）を利用して、核分裂によりエネルギーを取り出す。
  - 連鎖反応による連続的な発熱。



質量エネルギーの  $0.1\%$  を放出

# 核エネルギー利用の課題と問題点

- 発電装置の安全性
  - 放射能漏れ、 $^{235}\text{U}$  の濃縮 (JCO)、原子炉の暴走
- 核燃料サイクル
  - $^{235}\text{U}$  の濃縮 (濃縮ウラン) → 核燃料
    - 使用済み核燃料の再処理
    - 高速増殖炉による利用 ( $^{239}\text{Pu}$  の生成と利用)
- 核廃棄物処理
  - 低レベル廃棄物
  - 高レベル廃棄物 (ガラス固化 + 埋め立て、あるいは消滅処理)
- 劣化ウラン弾
  - 濃縮ウランの残り ( $^{238}\text{U}$ ): 比重が高い、放射性
- 原子爆弾の燃料としてのプルトニウム

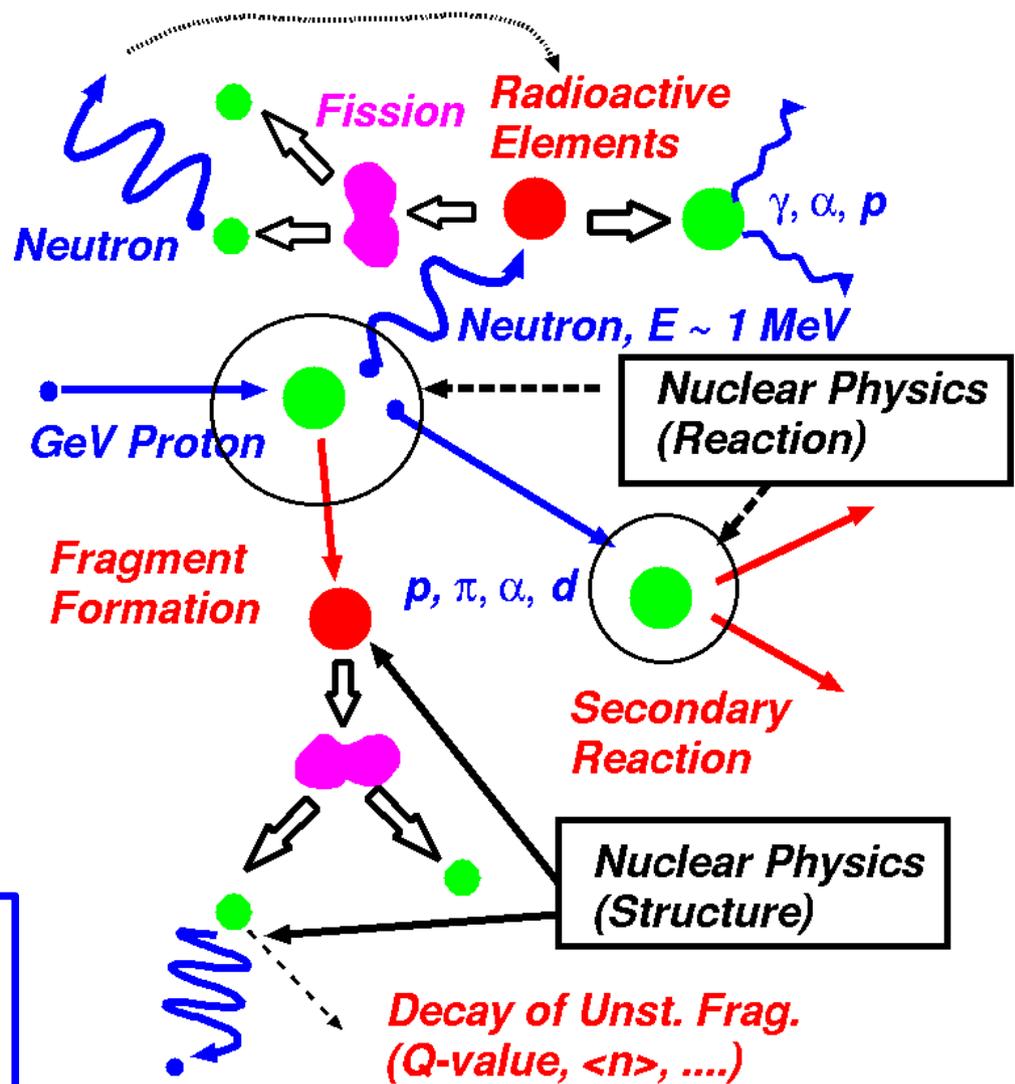
# 長寿命放射性核の核変換

## ■ 高レベル核廃棄物の問題点

- 高い放射能
- 寿命が長い(管理・保管すべき期間が数万年！)

## ■ 核変換処理

- 加速器駆動炉によってエネルギーを取り出しながら長寿命放射性核を減らす。
- 99.5% 変換すれば500年程度で天然ウランと同じ放射線レベルまで低下



国内でも  
高エネルギー加速器研究機構と  
日本原子力研究所の統合計画  
(J-PARC) にて研究開始

# まとめ

- 放射線と原子核の有核構造 ... 原子核の発見
  - 小さな領域、大きな束縛エネルギー → 強い力の必要性
- 最近の原子核物理学の話題 2 つ
  - 地上での原子核物理の研究  
= 宇宙での「真空相転移」、「元素合成」のシミュレーション
  - 地上で作る小さなビッグバン  
= クォーク・グルーオン・プラズマの生成  
→ 色電荷が開放されているとクォークはエネルギーを失いやすい
  - 超重元素の生成  
→ 中性子放出による冷却のしやすさが重要
- 放射線と核エネルギーの社会利用
  - 放射線: 物質を透過する、物質を変化させる
  - 核エネルギー: 核融合・核分裂  
→ 質量エネルギーを取り出す

# レポート課題

- 以下のいずれかについて論ぜよ。

- 不確定性関係を使って原子核内の核子の運動エネルギーを見積もれ。この運動エネルギーは水素原子の電子の束縛エネルギー (約 10 eV) の何倍程度か？

(ヒント：原子核の半径を 5 fm (1 fm =  $10^{-15}$  m) として半径程度に位置の不確定性があるとする。核子の質量、プランク定数は以下の値を利用せよ。ここで  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ 、1 eV は素電荷が 1 V の電圧で得るエネルギーである。)

$$mc^2 = 1000 \text{ MeV} \quad \hbar c = 200 \text{ MeV fm}$$

不確定性関係：  $\Delta x \times \Delta p \sim \hbar$

運動エネルギー：  $\frac{p^2}{2m} = \frac{(pc)^2}{2mc^2} \sim \frac{(\Delta pc)^2}{2mc^2}$

- 今後、原子力エネルギーを安全に利用していくために必要な技術的開発、政治的判断等について論ぜよ。あるいは原子力エネルギーに替わるエネルギー源について考察し、その利点と欠点について議論せよ。