

原子核の物理

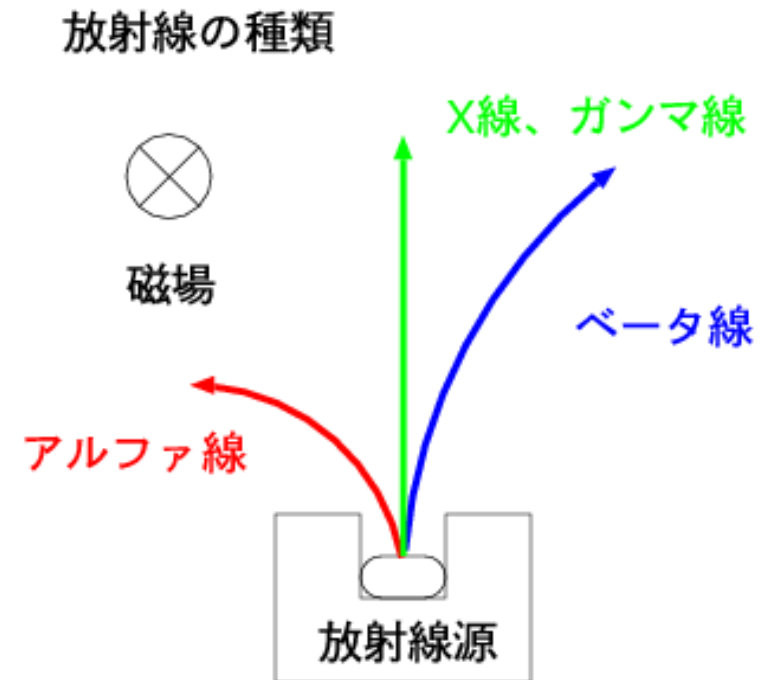
大学院理学研究院・物理学部門、
大学院理学研究科・宇宙理学専攻
原子核理論研究室 大西 明

- 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

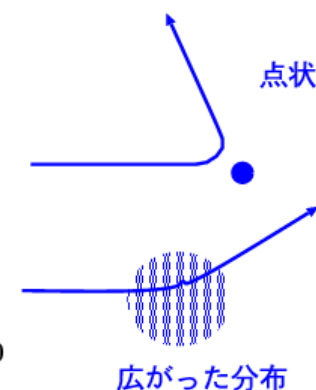
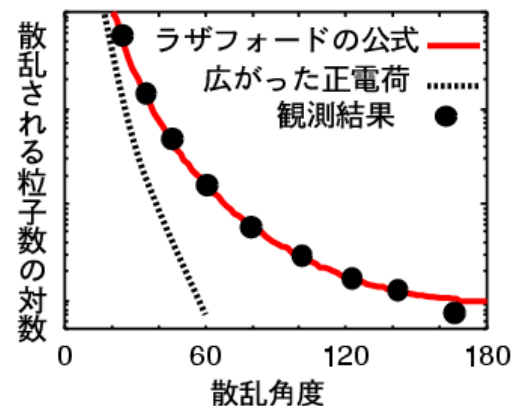
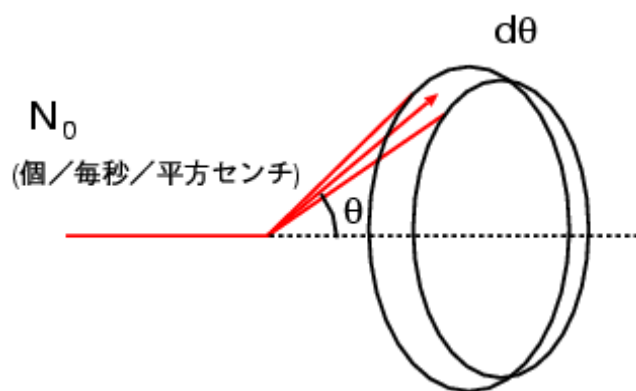


アルファ線 = 正電荷をもつ重い粒子
ベータ線 = 負電荷をもつ軽い粒子
X線、ガンマ線 = 電荷を持たない

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} 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

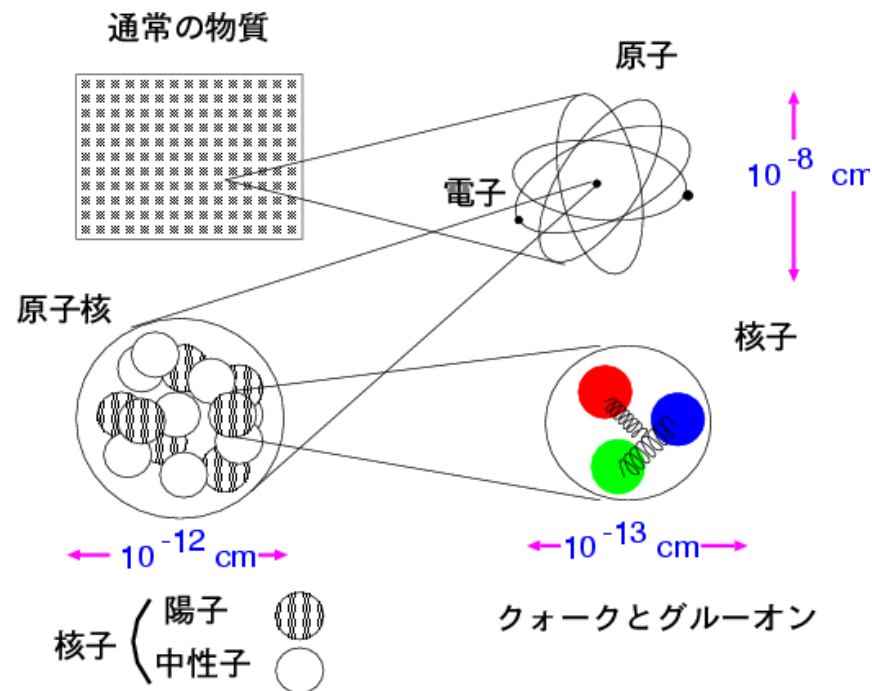
- 原子核 10^{-12} cm \rightarrow 10 cm に拡大
- 原子 10^{-8} cm \sim 1 km

■ 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

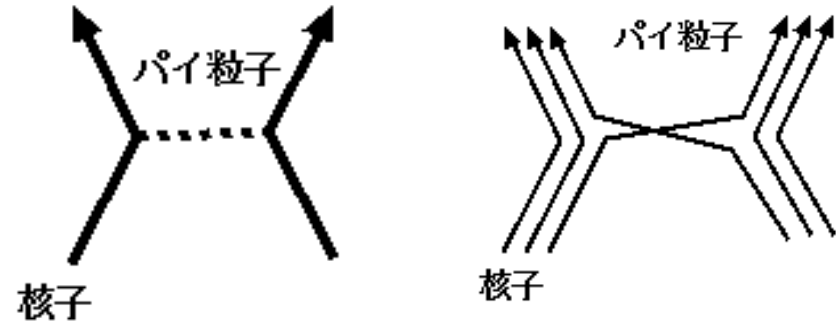


核子を原子核内で閉じ込めている力を核力とよび、
 π 中間子 (当時未発見) の交換によりもたらされる。
湯川秀樹 (1934 国内発表、1935 英文発表、1949 ノーベル賞)

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

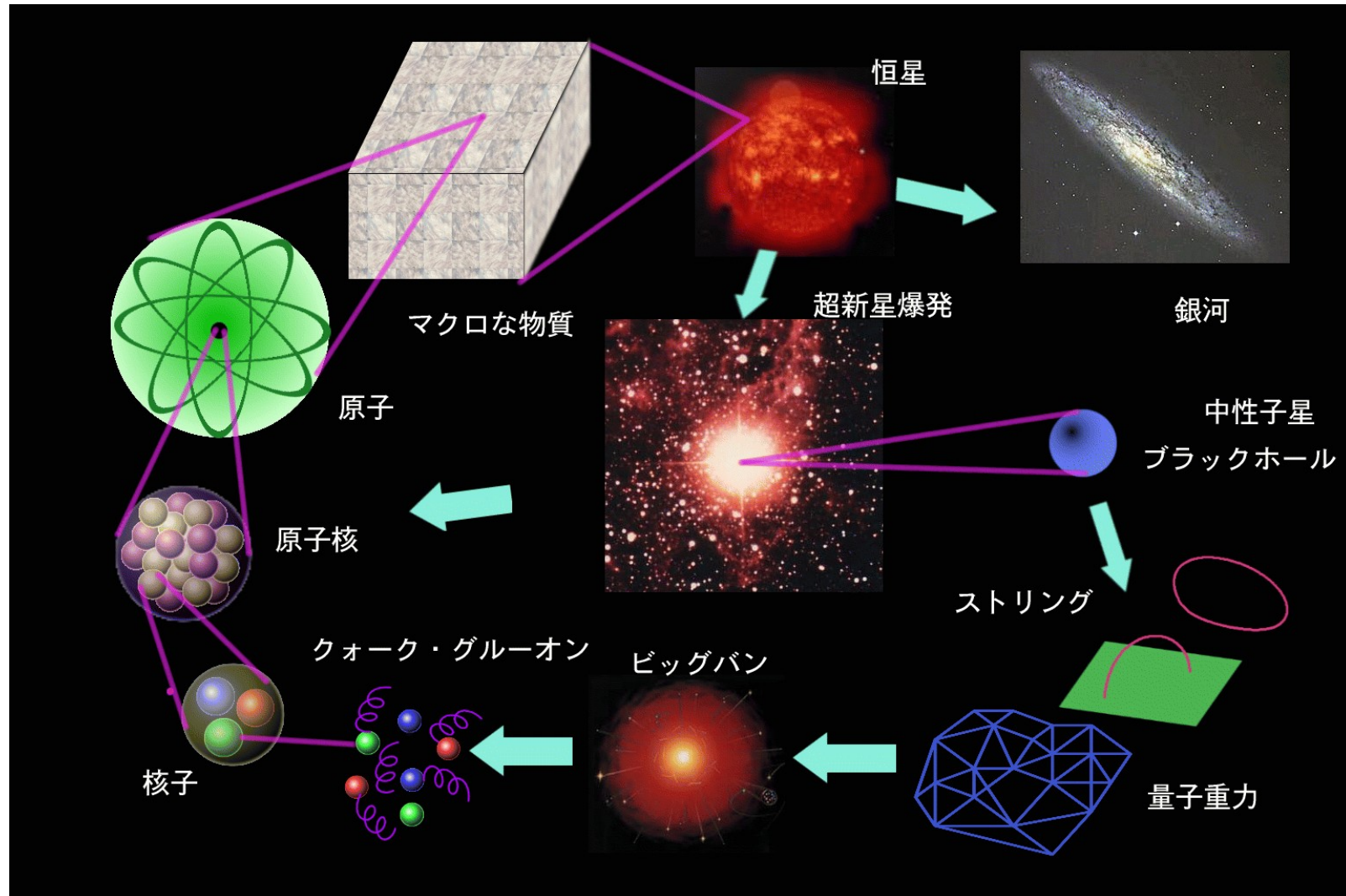
湯川理論＝「粒子の交換により力が媒介される」
→ 現在の全ての基本的相互作用の基礎

現在の原子核物理学 — 最近の話題から —

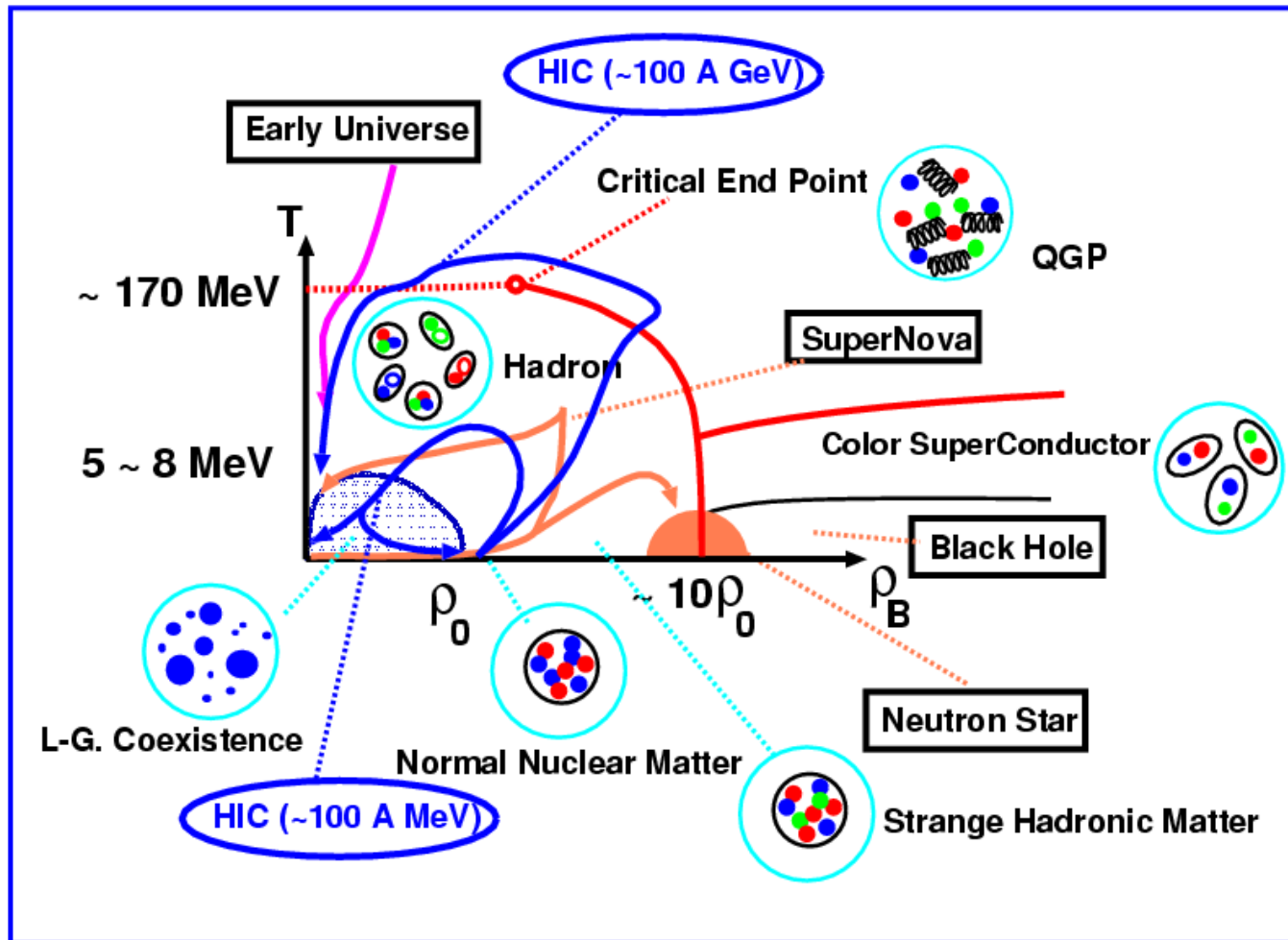
- 地上で作る小さなビッグバン
 - クォーク・グルーオン・プラズマの探索
- 周期律表にジャポニウムが加わるか？
 - 超重元素の生成

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

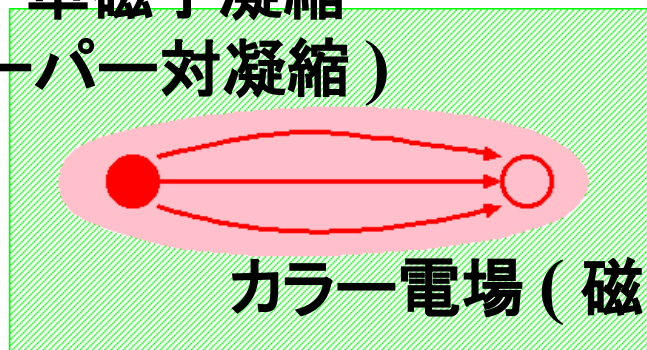


- QGP からハドロン相への相転移 (QCD 相転移) = この宇宙最後の「真空相転移」である！

量子色力学 (QCD) の「真空」

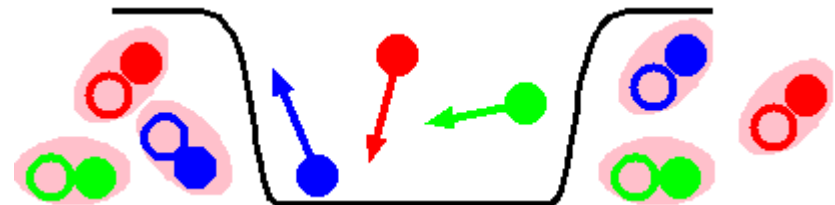
- 色の閉じ込め：クォーク間には「ひも」のような力が働く
 - クォーク間の電場はひも状に絞られている (\Leftrightarrow 超伝導体での磁場)
 - 引き離そうとするとクォーク対が生成されて色は閉じ込められたまま。
- 質量の獲得：核子は「モーゼの道」の中の3クォーク状態
 - QCD 真空ではクォーク・反クォーク対が凝縮
 - 凝縮体を「押しよける」のにエネルギーが必要
 - 5 MeV の質量のクォークが3つで 1000 MeV の大きな質量

カラー単磁子凝縮
(クーパー対凝縮)



カラー電場 (磁場)

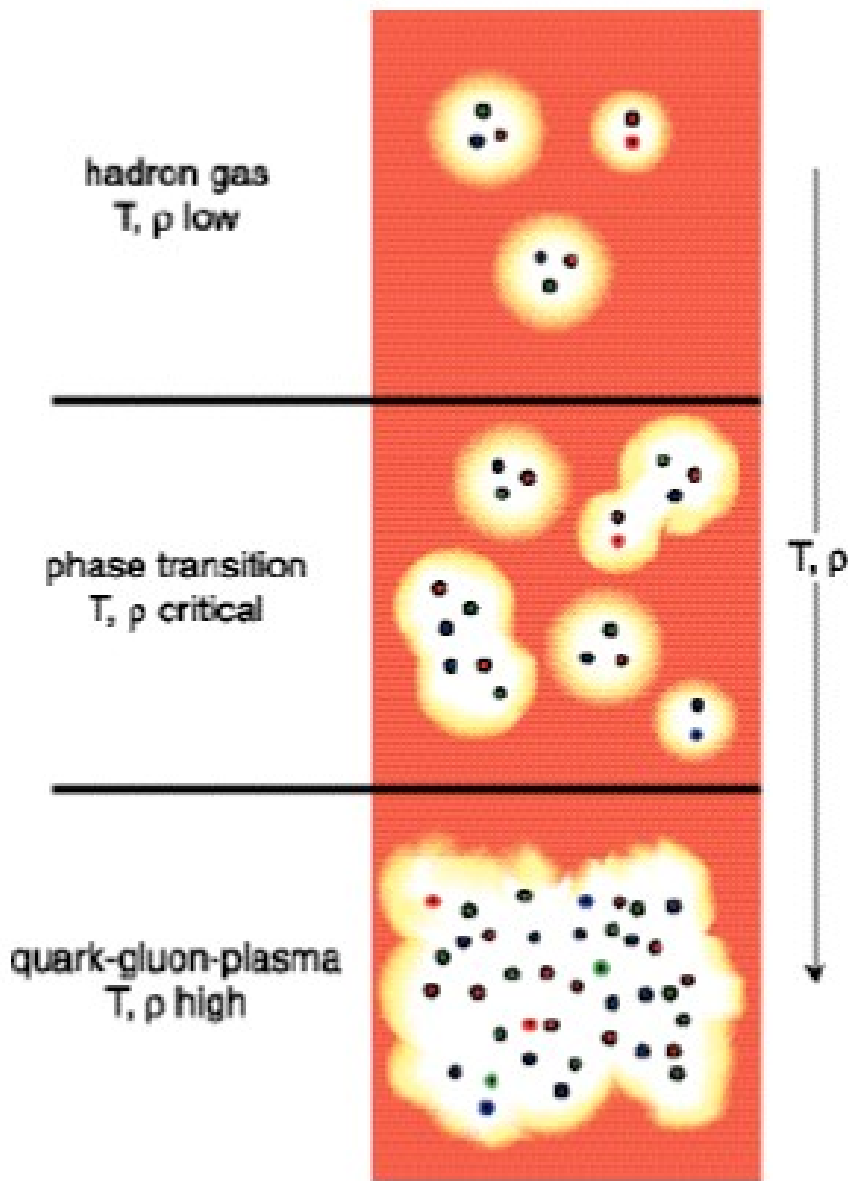
価クォーク



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？



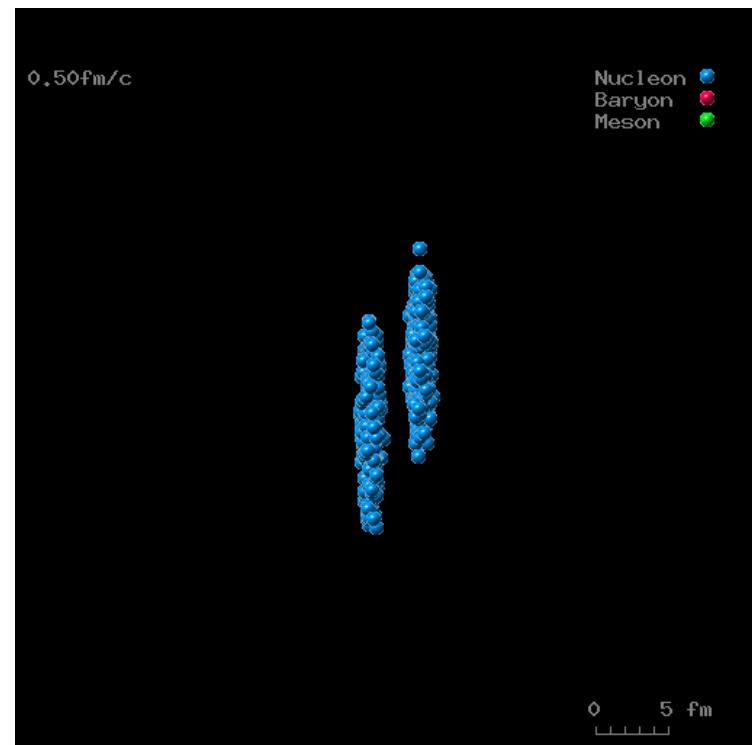
■ ハドロン物質を熱する / 圧縮するとどうなるか？

- 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

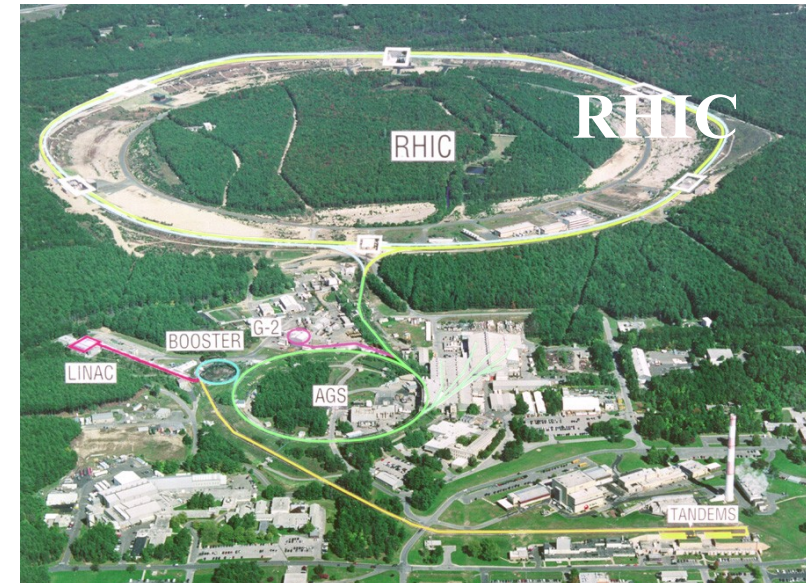


高エネルギー原子核反応での
QGP 生成
= 地上の “Big Bang” 再現実験

高エネルギー原子核衝突実験

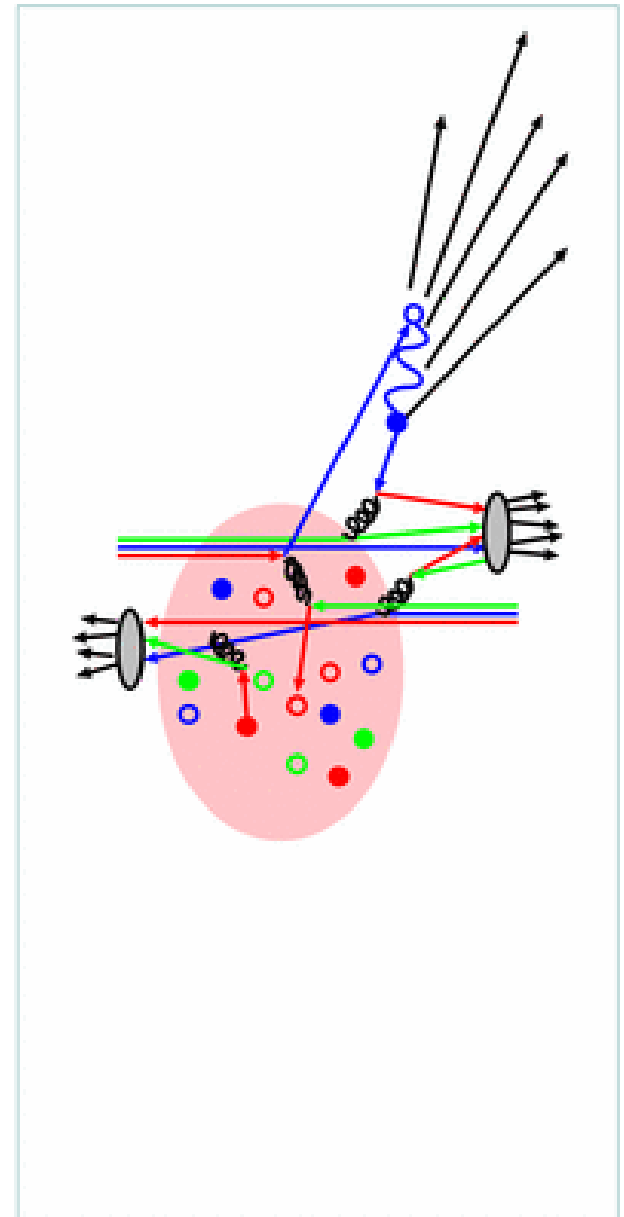
- ランダウの昔から核物理屋は重イオン反応でQGPを作りたかった！

- 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

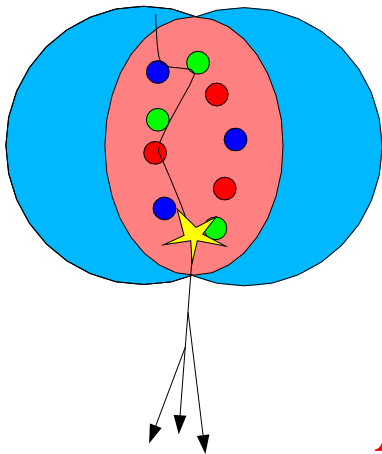
- QGP が作られると何が起こるか？
 - 初期の核子内のパートン (クォーク、グルーオン) の激しい散乱
 - QGP が生成されると、カラー電荷を持った粒子 (クォーク、グルーオン) が熱的に分布
 - **クォークやグルーオンがエネルギーを損失** (ジェット抑制、Jet Quenching)
c.f. 荷電粒子は電子と散乱してエネルギーを損失)
 - 早い段階で熱平衡化
 - (熱平衡が仮定される) 流体力学的振る舞い



QGP 生成の実験的証拠：ジェット抑制

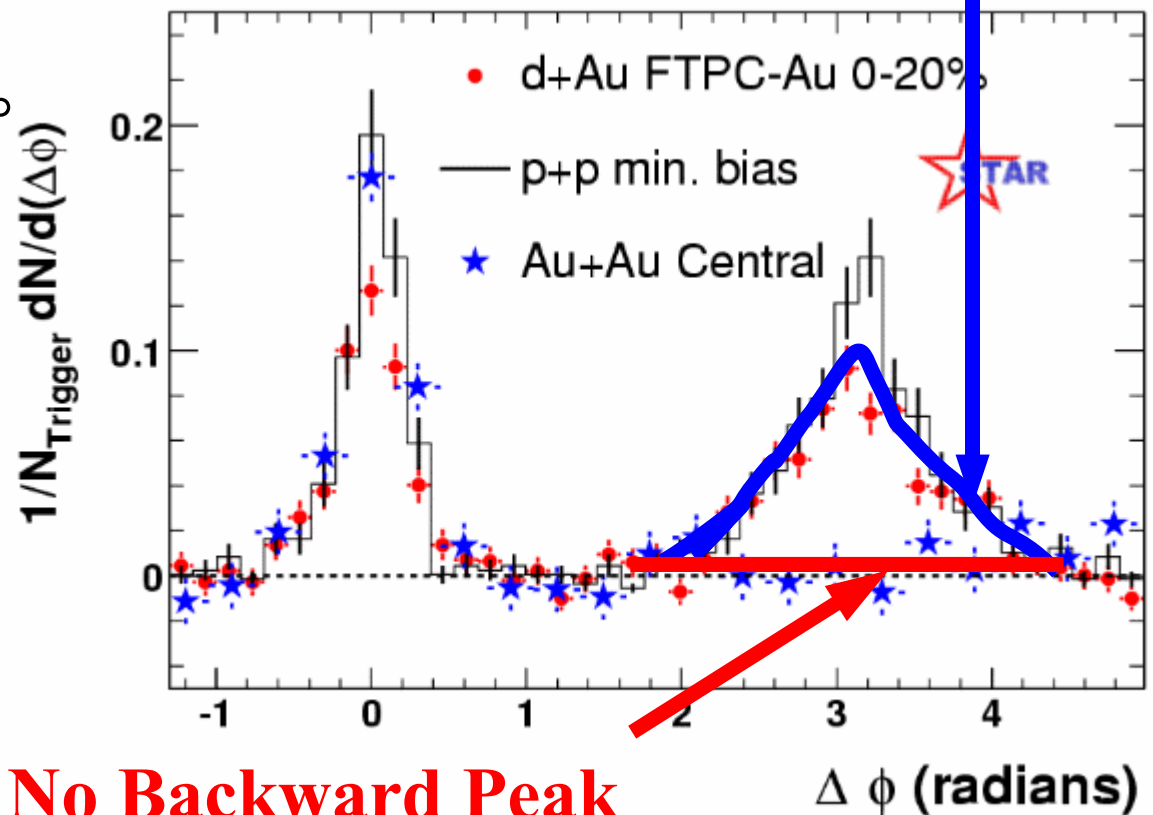
- ジェットが消えているなら、核子衝突で見えている裏側の相関が消えるはず。

- d+Au では消えていない
- Au+Au では消える

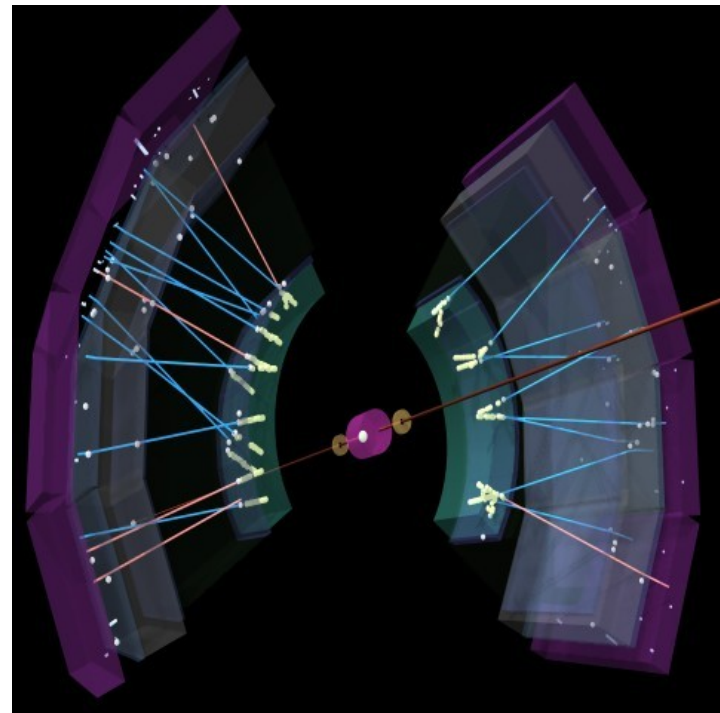
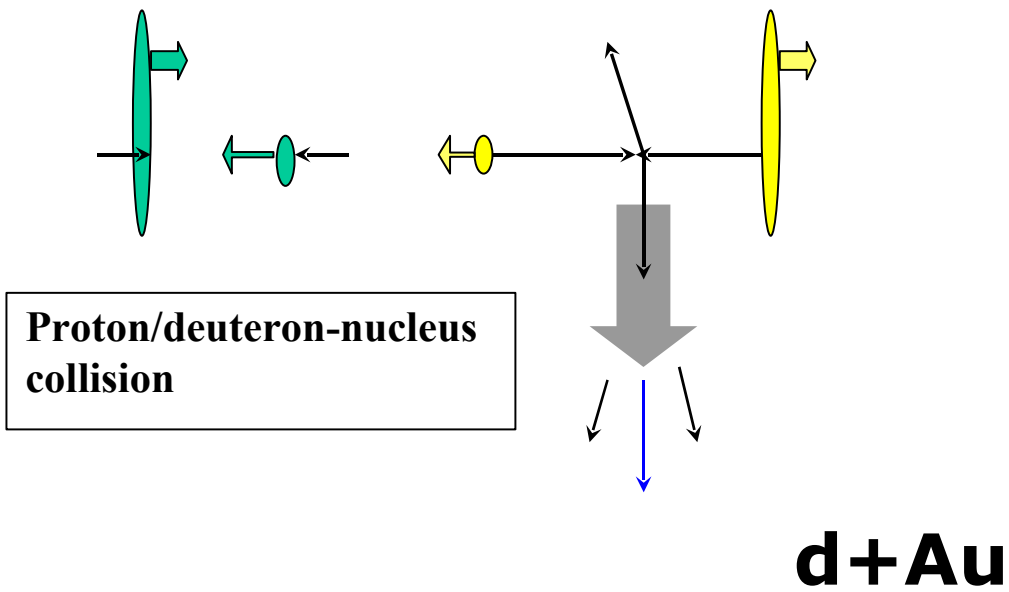
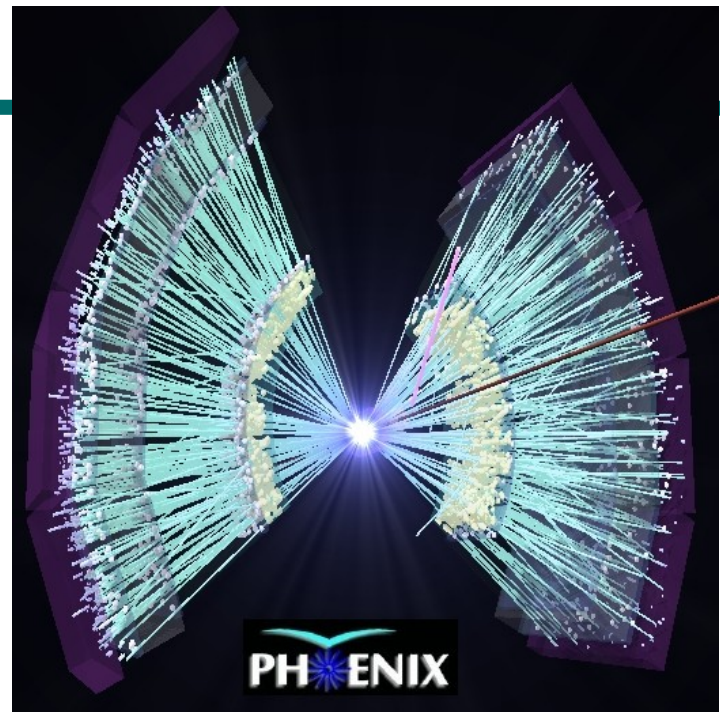
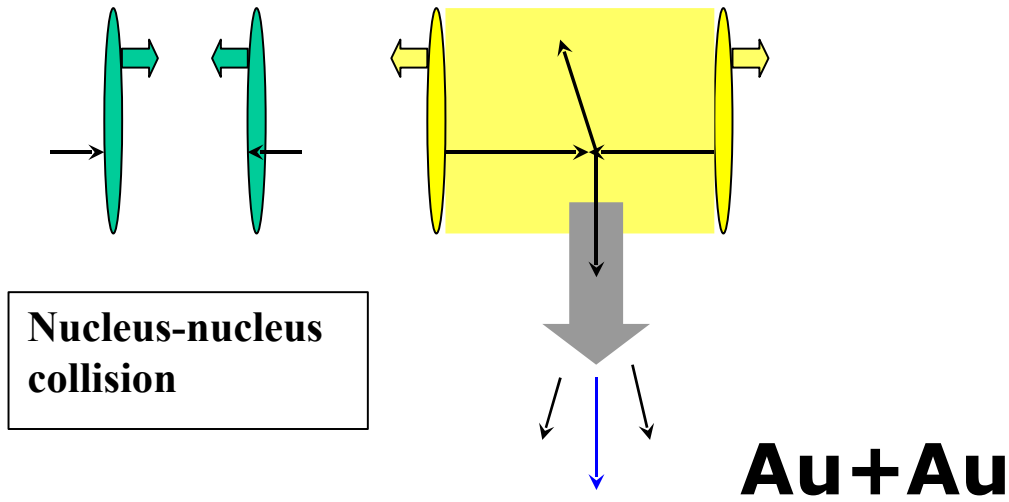


Au + Au: No Backward Peak

STAR
d + Au: Backward Peak

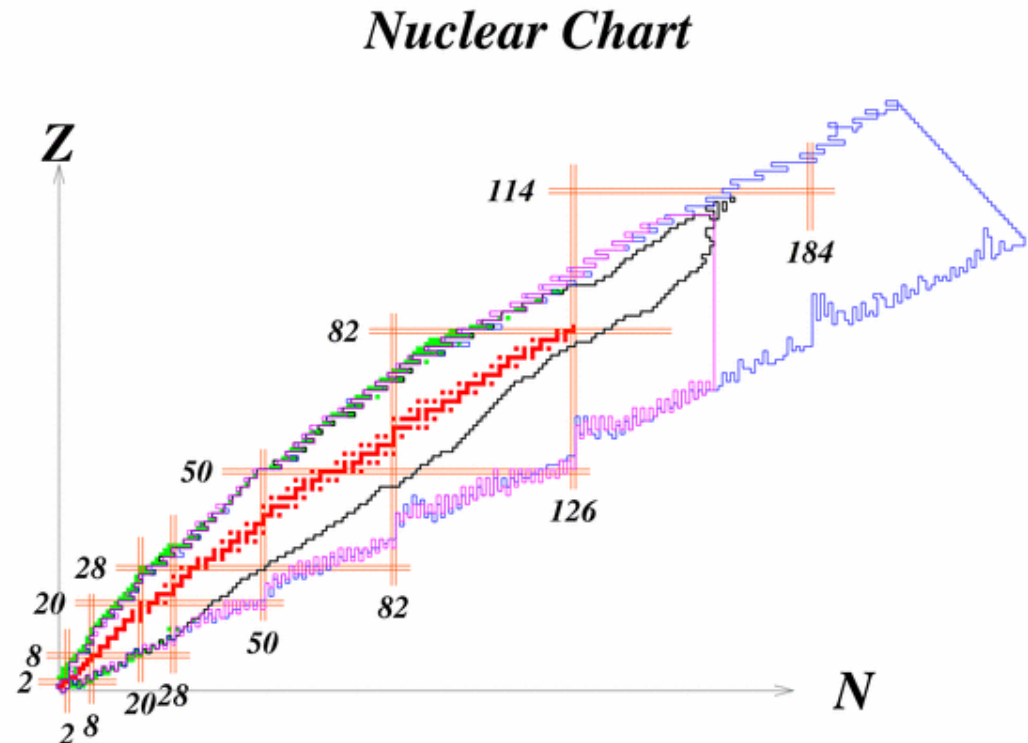


大きな原子核の衝突で裏側の相関が見えなくなる
→ ジェットが抑制されて、ジェットが一本しか見えていない
→ QGP 生成のシグナル

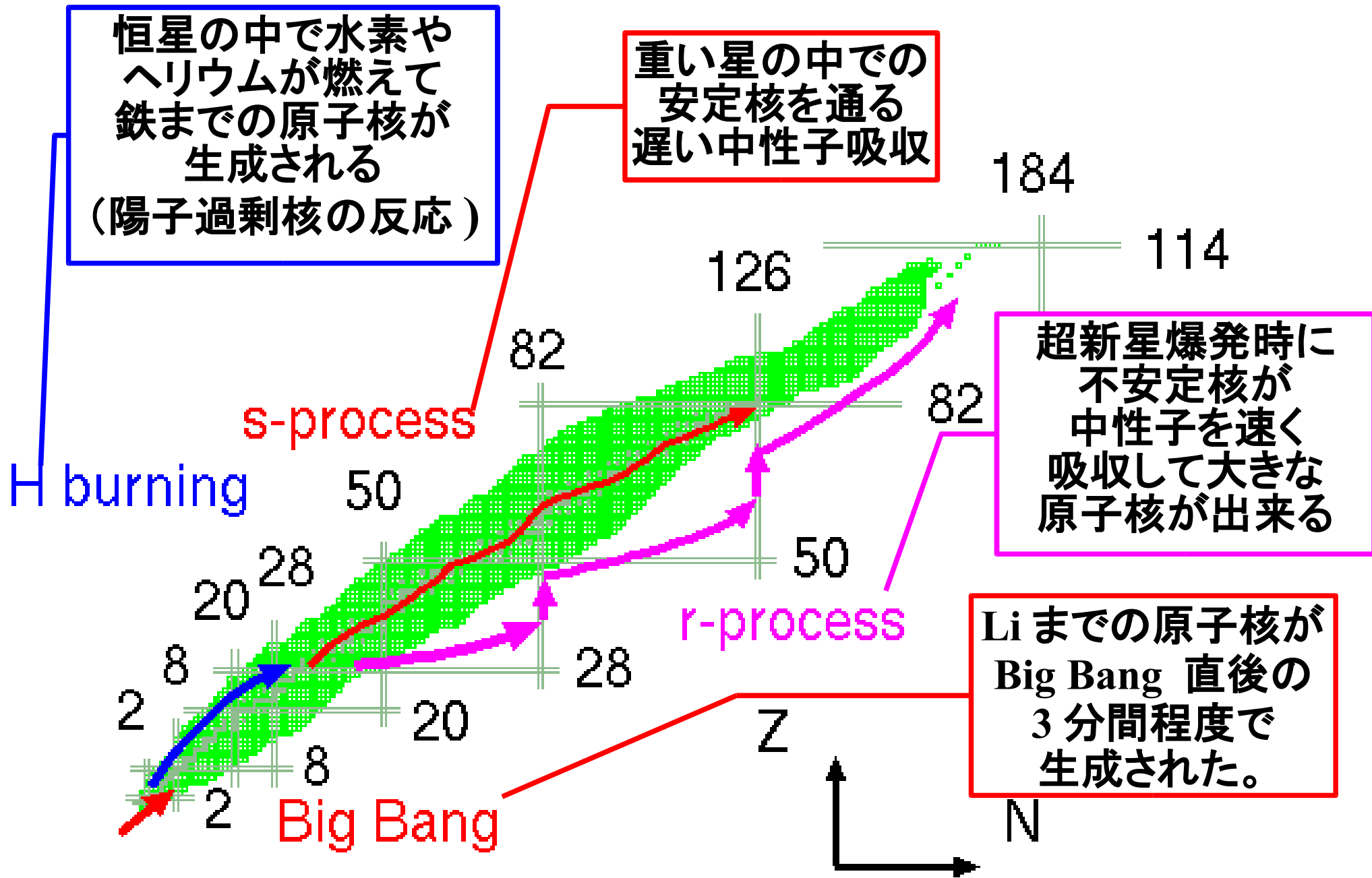


Nuclear Chart (核図表)

- 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)

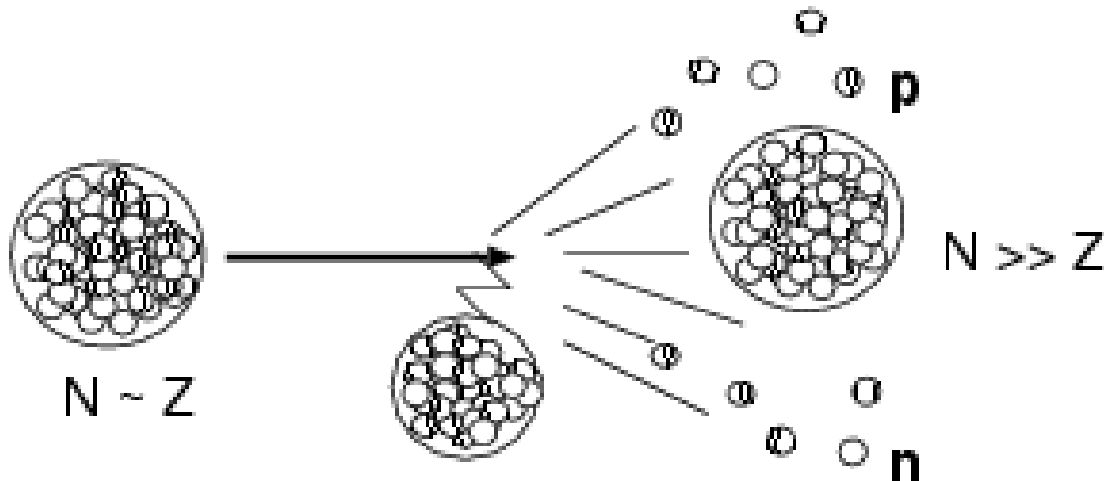


元素の起源：不安定な多くの原子核がかかわる！



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

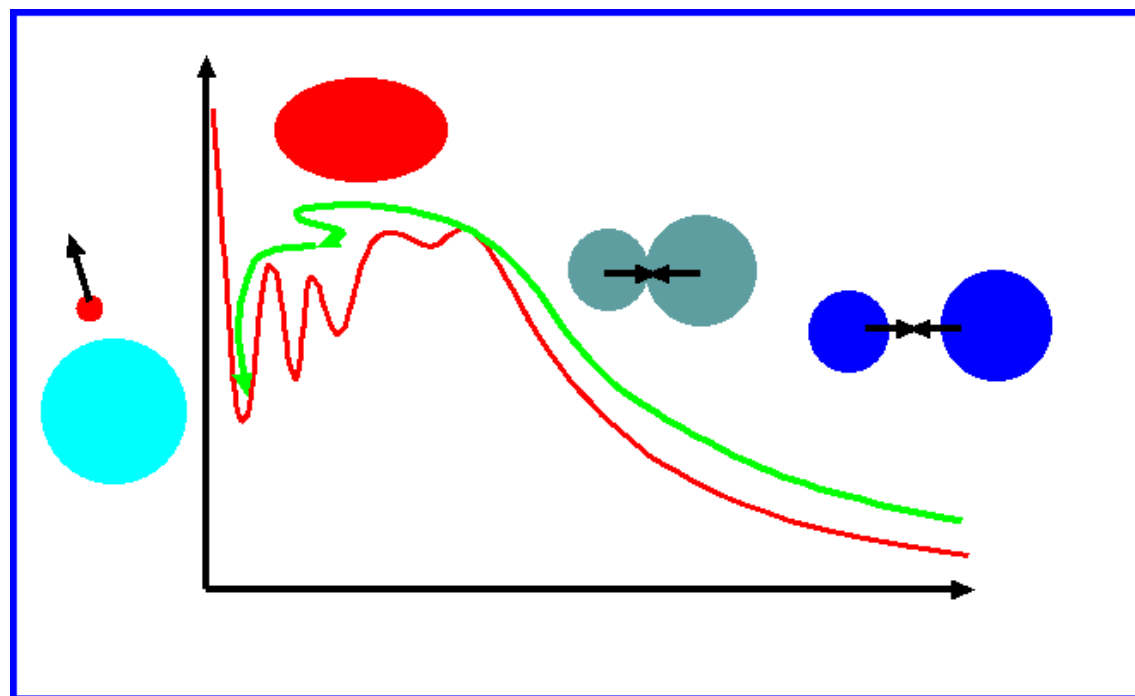
- これまでの超重元素 ($Z > 92$) 生成
 - アメリカ、ロシア、ドイツの独占
 - $Z=93$ (ネプチニウム, Np) ~ $Z=103$ → アメリカ
 - $Z=104$ ~ 106 (シーボルギウム, Sg) → アメリカ・ロシア
 - $Z=107$ ~ 112 → ドイツ
- なぜ作るのが難しいか？
 - 大きな核の融合 → クーロン障壁以上の大きなエネルギーが必要
 - ウランより陽子数の大きな原子核は、少しの励起でもすぐ核分裂
- **多くの問題を乗り越えよ！**
 - 分裂をいかにおさえるか？
 - 「中性子過剰ビーム」で速く中性子を放出させる
 - もっとも適したエネルギーは？ 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 α 粒子を放出して既知の原子核に到達
→ 超重核の同定

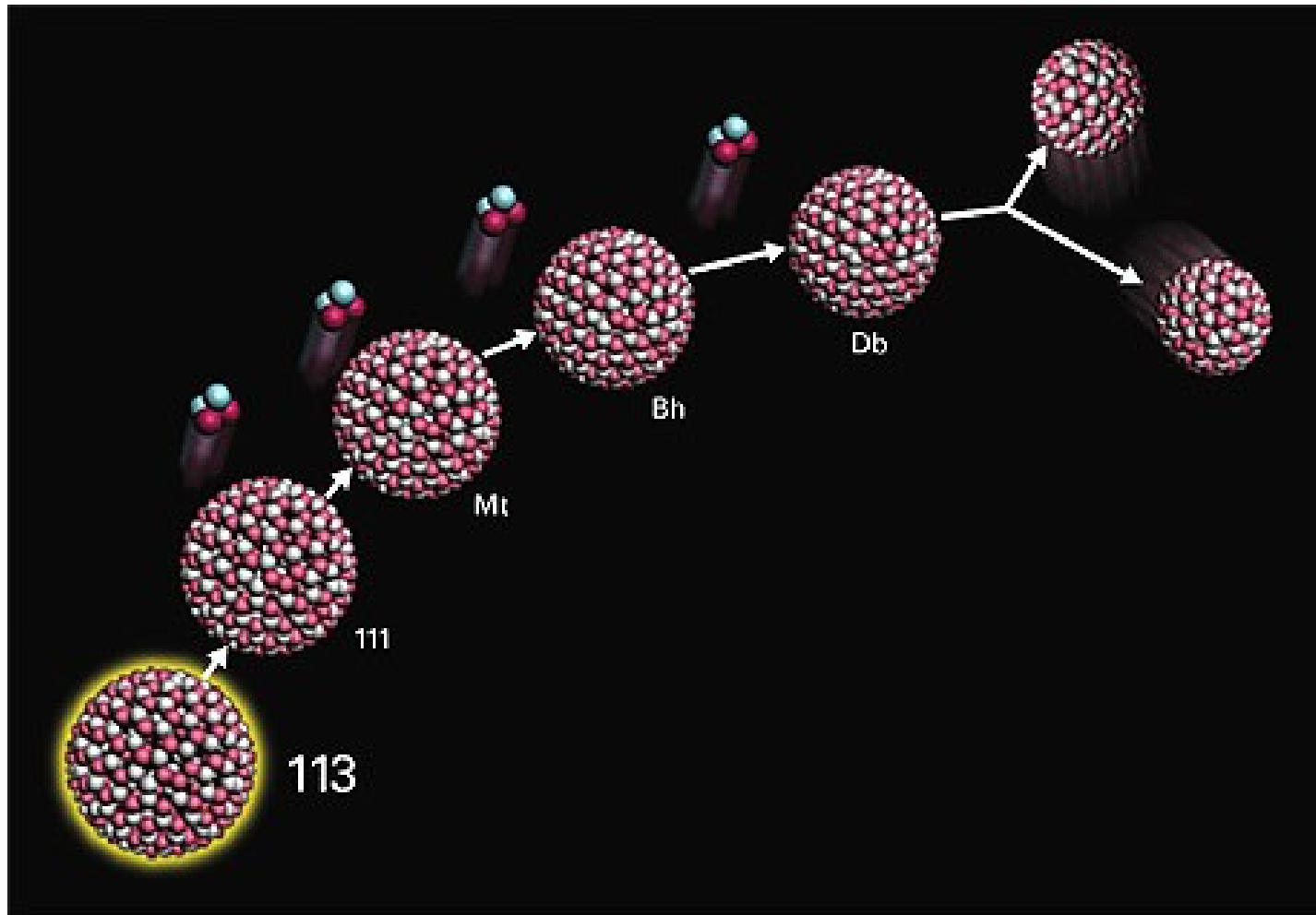
超重核探索

= 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

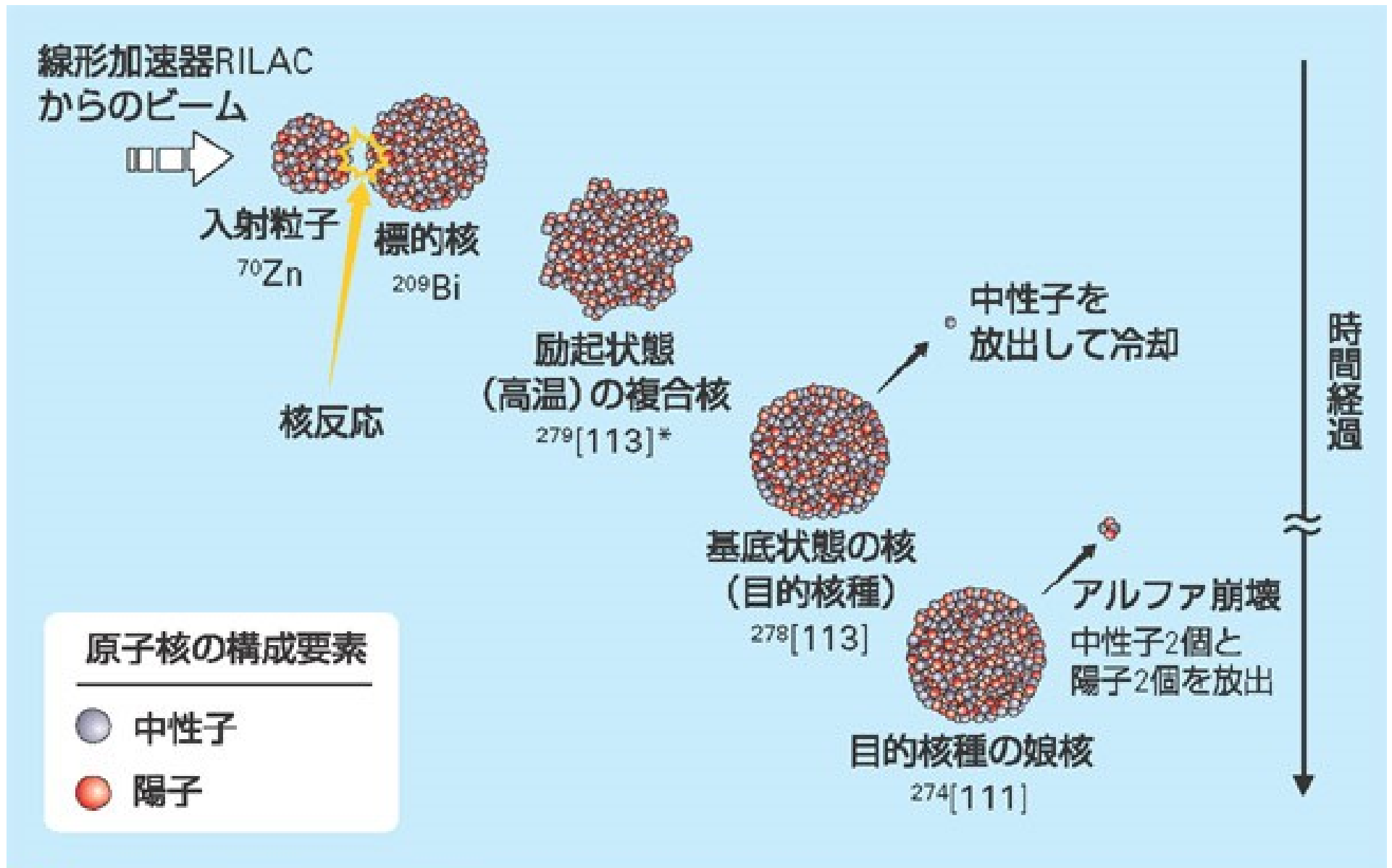
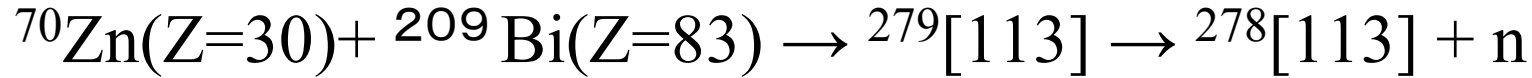


図1 原子番号113元素の合成と崩壊連鎖

ジャポニウムの作り方

■ 超重元素生成の核反応



- α 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？

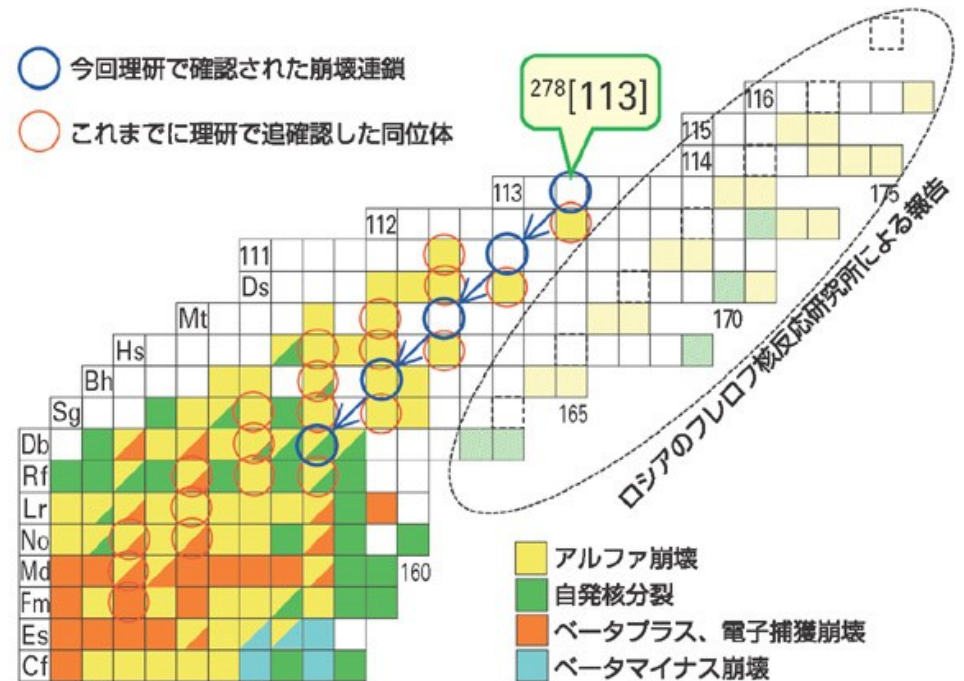


図3 核図表の終端部分
核図表とは、原子核の陽子数（原子番号）を縦軸とし、中性子数を横軸にして表示したものである。

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)

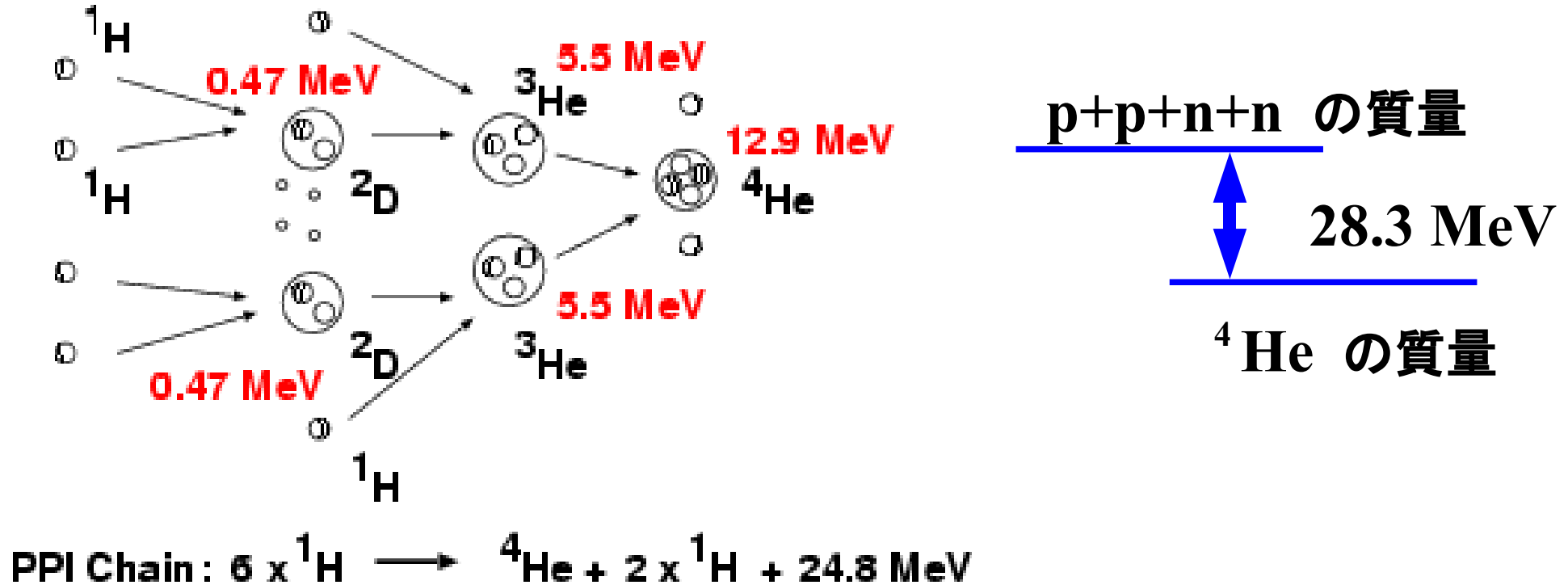
+ (中性子数) x (中性子の質量)

- (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

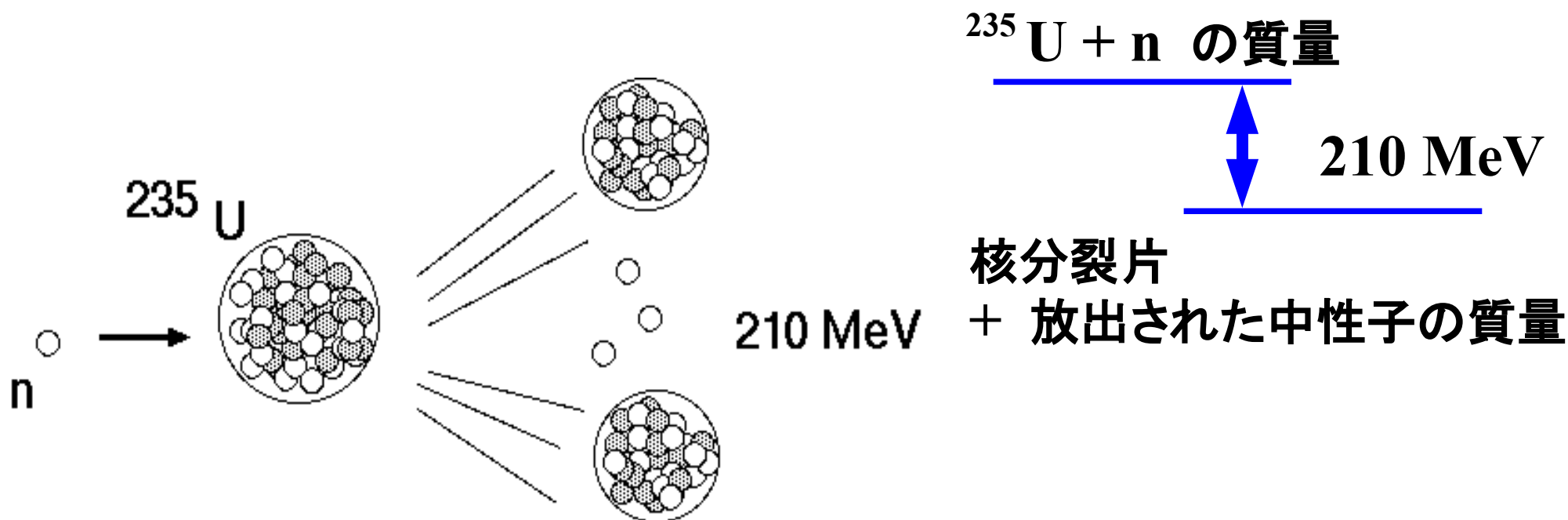
- ${}^4\text{He}$ 原子核の大きな束縛エネルギー (28.3 MeV) を利用して、水素原子核 (陽子) を燃やす。



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}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。



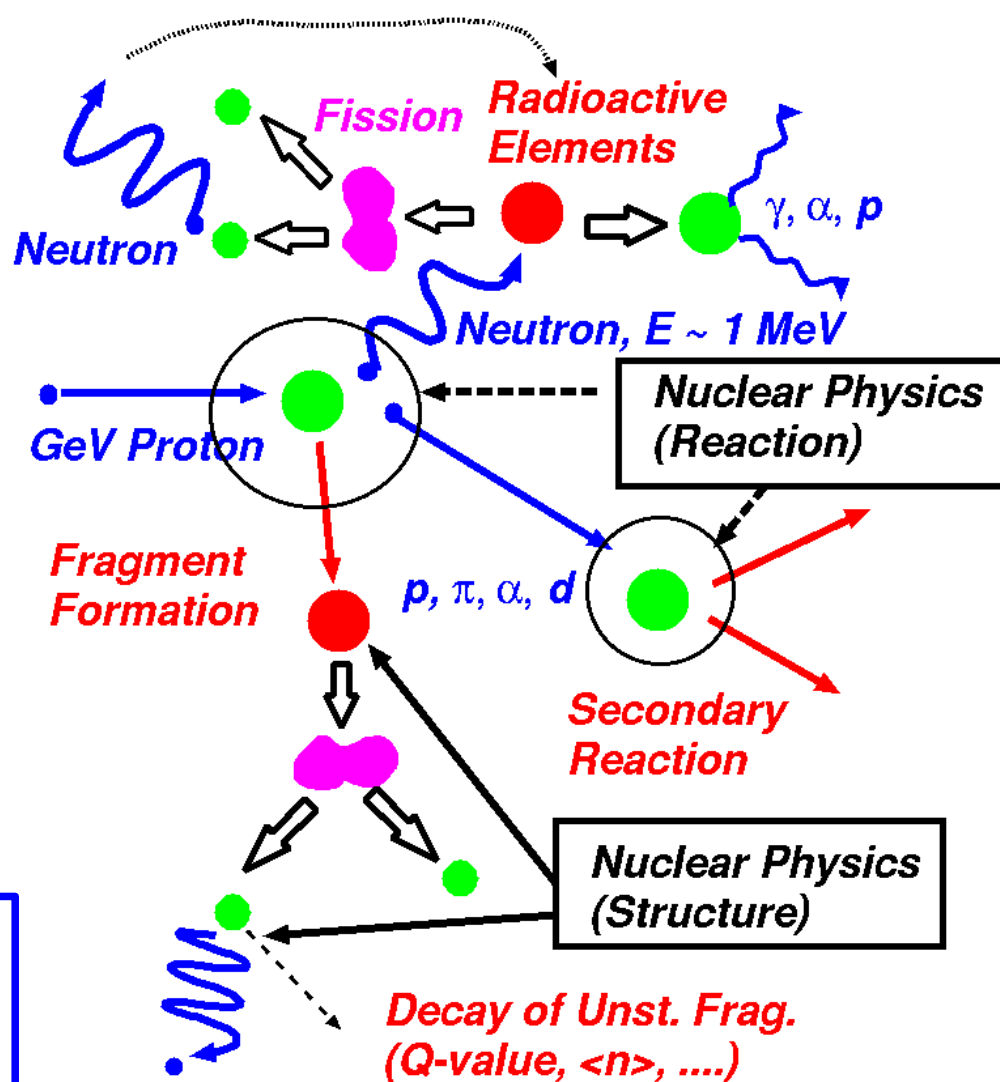
質量エネルギーの 0.1% を放出

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}U の濃縮 (JCO)、原子炉の暴走
- 核燃料サイクル
 - ^{235}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}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}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 ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$) 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。