

原子核物理への招待

理学部・物理学科・原子核理論研究室
大西 明

原子核とはどんなものか？

- 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

自然の階層と原子核

- 強い力とは？
- 4つの力と自然の階層
- 宇宙の進化と原子核

原子核物理学研究のフロンティア

- 自然界に存在しない原子核
- 元素の起源
- クォークは見えるか？

社会における原子核

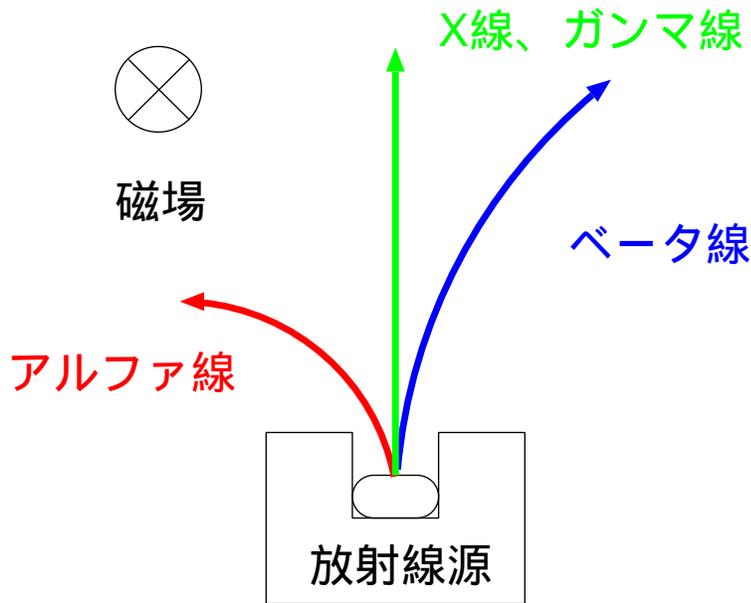
- 放射線の利用
- 核エネルギー

<http://phys.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

放射線の種類

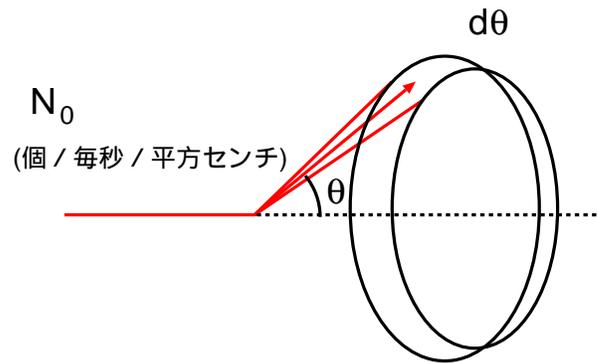


- アルファ線 = 正電荷をもつ重い粒子
- ベータ線 = 負電荷をもつ軽い粒子
- X線、ガンマ線 = 電荷を持たない

… これらの放射線は何から出て来るのだろうか？

原子の有核構造 (Rutherford, 1911)

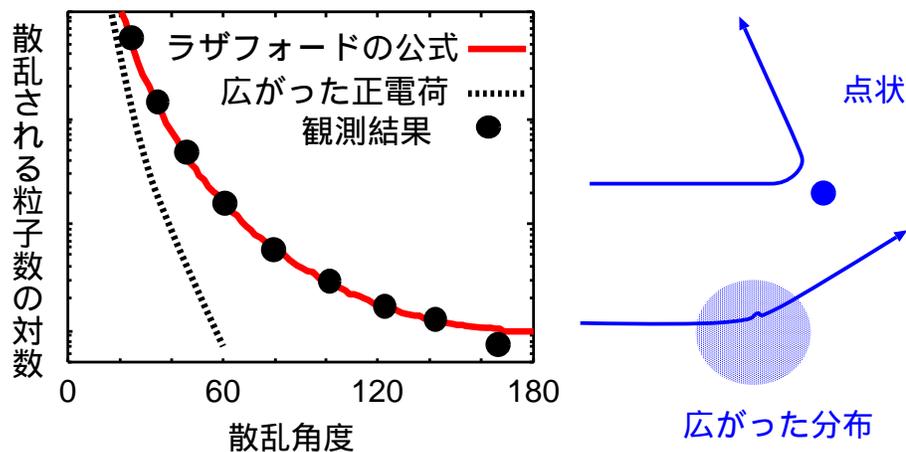
● 荷電粒子 (アルファ粒子) と原子との衝突実験



ラザフォードの公式 (正電荷が 1 点に固まっているとした時)

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

● 観測結果の概念図

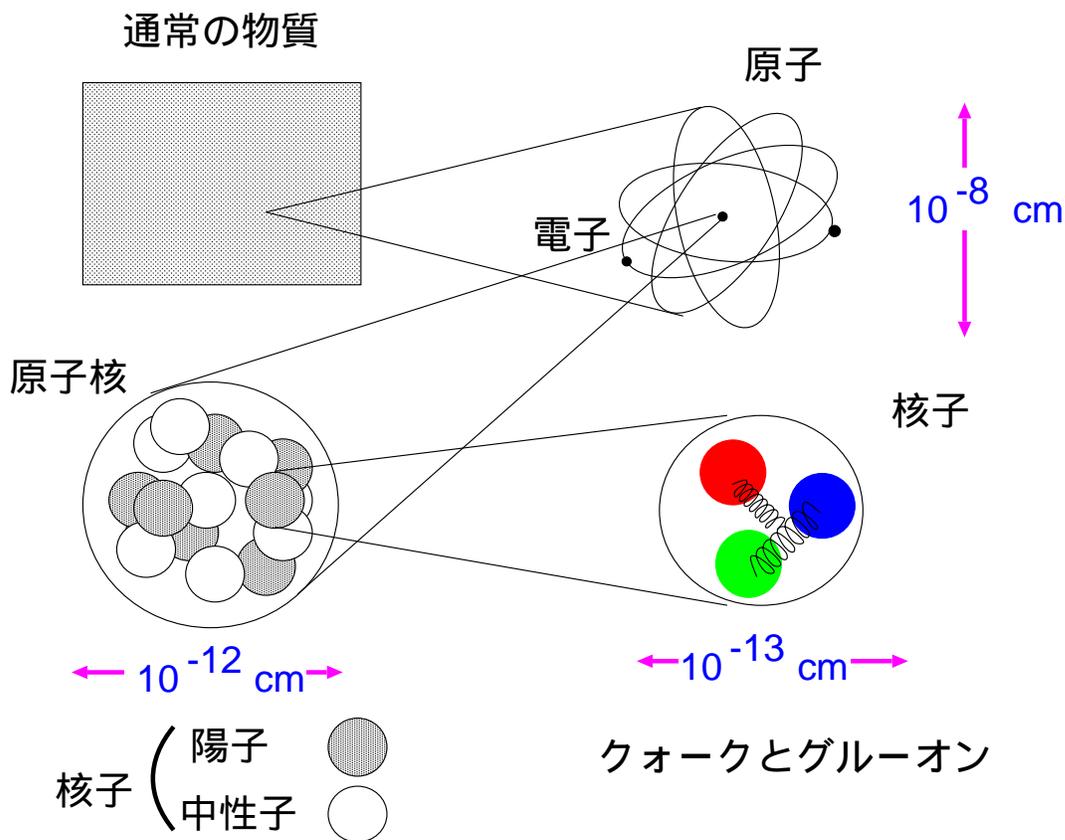


非常に後方でだけ、ラザフォードの公式とずれる
= 正電荷は原子の大きさ程度に広がっているのではなく、
 10^{-12} cm 程度の領域に点状に電荷が集中している
→ **原子核の発見**

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 → 10 cm に拡大すると
原子 10^{-8} cm ~ 1 km



● (重力でも電磁気力でもない) 新しい強い力の必要性

★ 量子力学の不確定性関係

粒子の位置と運動量は同時に精度良く決められない。
= 狭い領域に閉じ込められた粒子は大きな運動量を持つ。

★ 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

= 電磁気力では閉じ込められない。

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

原子核の束縛エネルギー

● エネルギーの単位

★ $1 \text{ eV} =$ 電子 1 個に 1 V の電圧をかけたエネルギー
(エレクトロン・ボルト)

★ $1 \text{ MeV} = 100$ 万倍
(メガ・エレクトロン・ボルト、メブ)

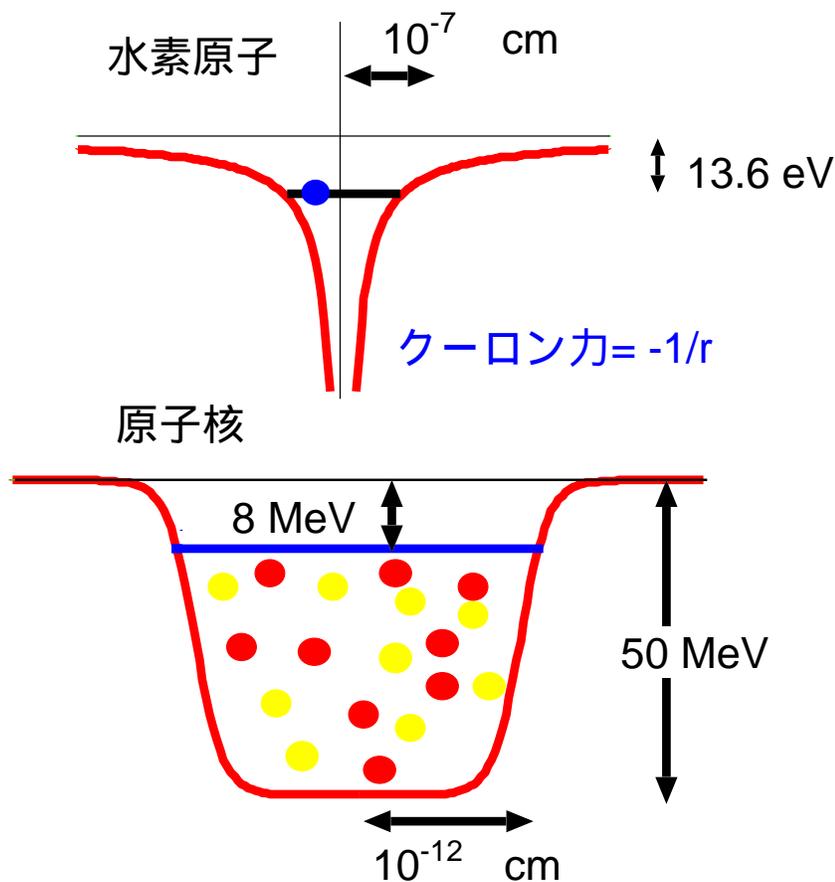
例: 水素原子の束縛エネルギー $= 13.6 \text{ eV}$

… 電位でいえば -13.6 V

原子核の核子の束縛エネルギー $\sim 8 \text{ MeV}$

… 電位でいえば -800 万 V

● 電子・核子の束縛の様子

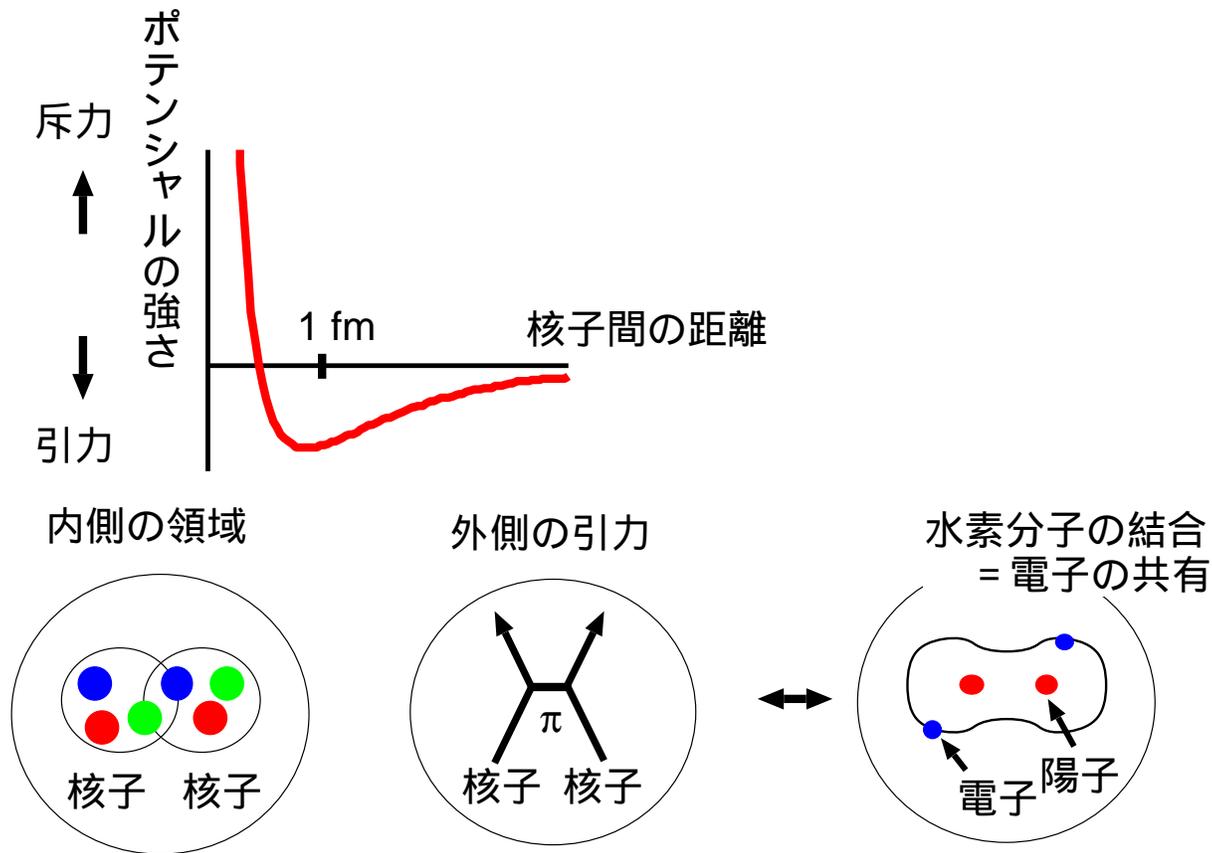


電磁気力でいえば、 1 cm あたりに 10^{18} ボルトの電圧をかける力と同じ。

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。

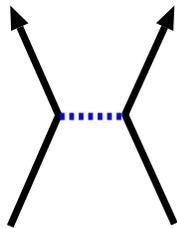


… 素粒子物理学の始まり

● 現代的な理解

- ★ 外側の引力 = 1つのパイ中間子の交換
- ★ 中間領域の引力 = 2つのパイ中間子の交換
- ★ 内側の斥力 = クォークのパウリ原理とグルーオンの交換

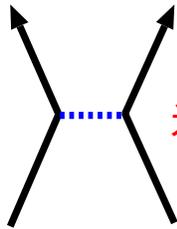
自然界の4つの基本的相互作用



重力子

重力 10^{-38}

非常に弱いがいいつでも引力
星や銀河の運動、地上での重力



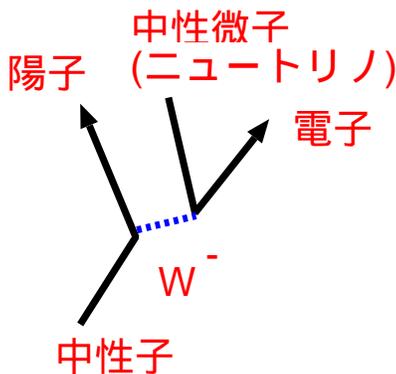
光子

電磁気力 10^{-2}

同じ電荷 = 斥力
異なる電荷 = 引力

電子 陽子

原子・分子・マクロな物質を
作っている力



中性微子

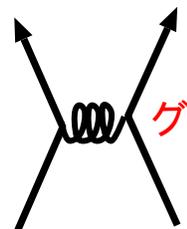
(ニュートリノ)

電子

弱い力 10^{-5}

粒子の種類を変える力
原子核のベータ崩壊を起こす力

中性子



グルーオン

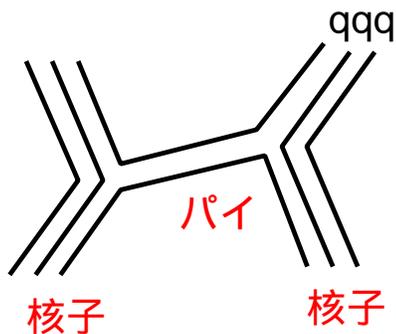
強い力 1

赤、緑、青の3種類の電荷

核子やクォークを束縛している力

クォーク クォーク

例

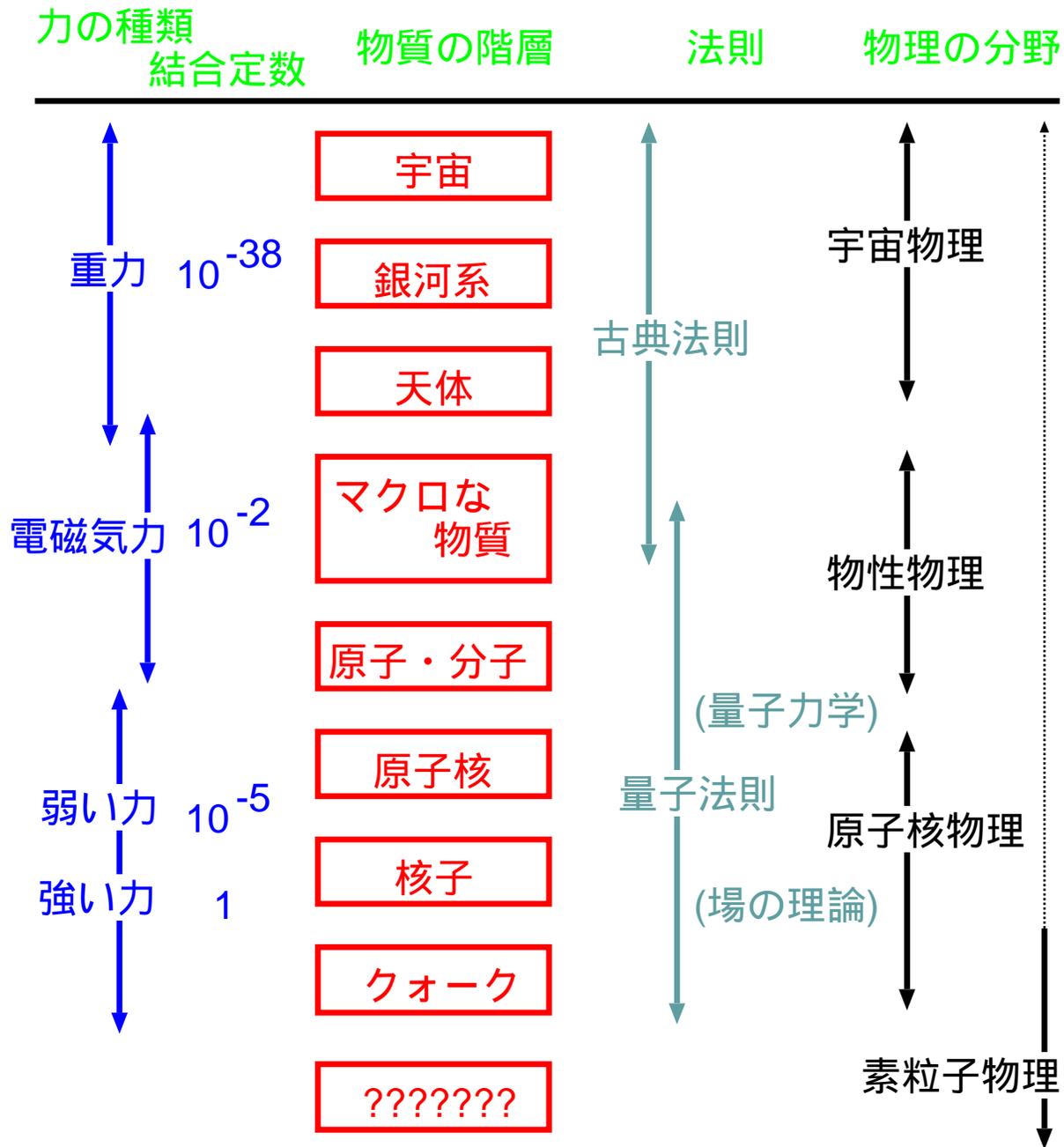


核子

核子

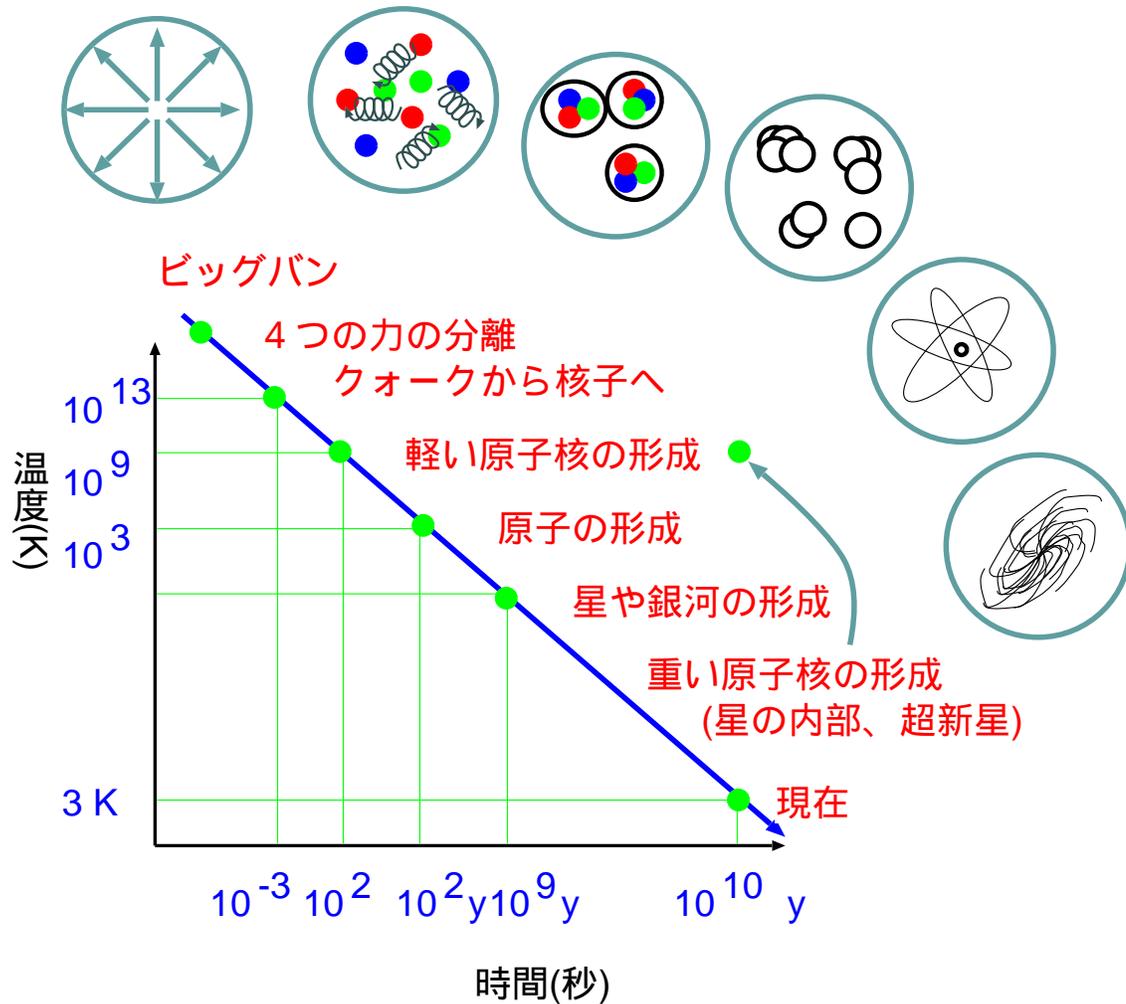
パイ粒子交換
= クォーク(反クォーク)対交換

4つの基本的相互作用と自然の階層



- 自然の階層における原子核物理
= 強い力で相互作用する物質の性質の解明

宇宙の進化と階層構造



● 宇宙における原子核物理

1. 初期宇宙におけるクォークから核子への相転移
… 宇宙の密度揺らぎを生み出したのか？
2. 初期宇宙における軽い原子核の生成
… 元素はどこからきたのか？
3. 星の内部、超新星爆発時における元素生成
… 重い元素はいかにして作られたのか？
4. 超新星爆発と中性子星の形成
… 原子核はどのくらい固いか？
5. 中性子星内部の構造
… クォークは自然界に (ばらばらで) 存在するか？

原子核物理学のフロンティア

● 原子核物理学の基本課題

= 「強い力で相互作用する粒子・物質の様々な性質の解明」

● 原子核の特徴

1. 強い力で相互作用する系

2. 量子効果の強い系

★ 量子力学、相対論、場の理論

3. 有限多体系

★ 離散・融合、回転・振動

★ 様々な変形 … ラグビーボール型、オレンジ型、洋なし型、ブドウ型 …

4. 幾つかの階層が接近した系

原子核 (10^{-12}cm) \leftrightarrow 核子 (10^{-11}cm) \leftrightarrow クォーク

… 階層をまたぐ物理、様々な相の物理

● 現在の原子核物理学の課題

1. 地上に自然に存在しない原子核を作る。

2. 宇宙で元素がどのように作られたか、実験で確かめる。

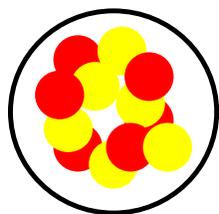
3. クォークとグルーオンでできたプラズマ (ミニ・ビッグバン) を作る。

…

自然に (地上に) 存在しない原子核の研究

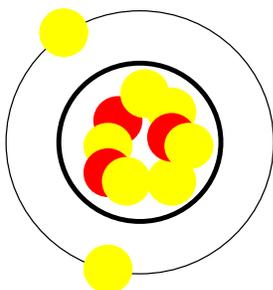
● 中性子過剰核、ハイパー核

通常の原子核



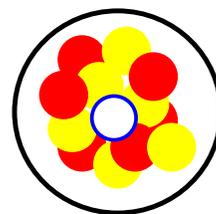
$$Z = N$$

中性子過剰核



$$Z \ll N$$

ハイパー核



$$S \neq 0$$

| | | |
|----------------|---|-------------|
| 陽子 | ● | 陽子数 Z |
| 中性子 | ● | 中性子数 N |
| 超核子 (ハイペロン) | ○ | ハイペロン数 $-S$ |

● 超重核 (Super Heavy Element = SHE)

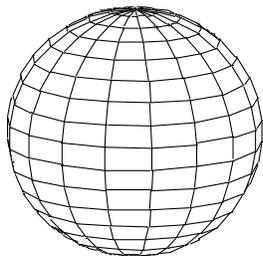
ウラン ($Z=92$) 以上の地上に自然に存在しない元素

… 発見すると元素表に名前が残る (現在は人の名前はつかない)

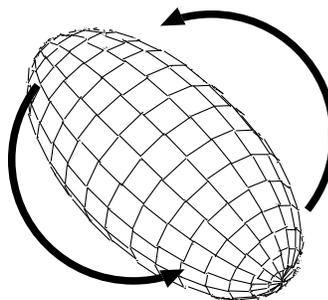
例: ノーベリウム、ローレンシウム、フェルミウム、...

● 超変形核

通常の原子核

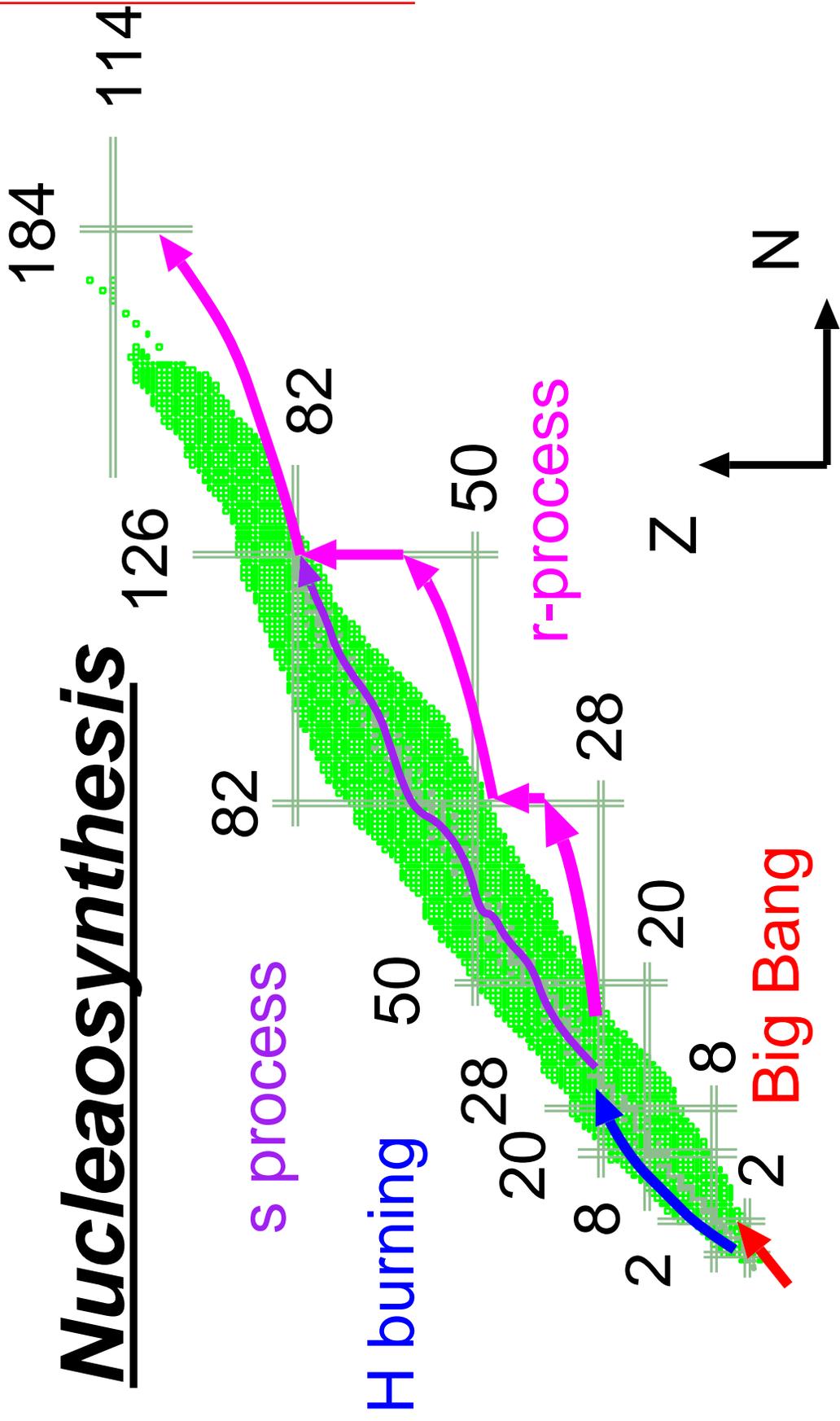


超変形核



元素合成のメカニズム

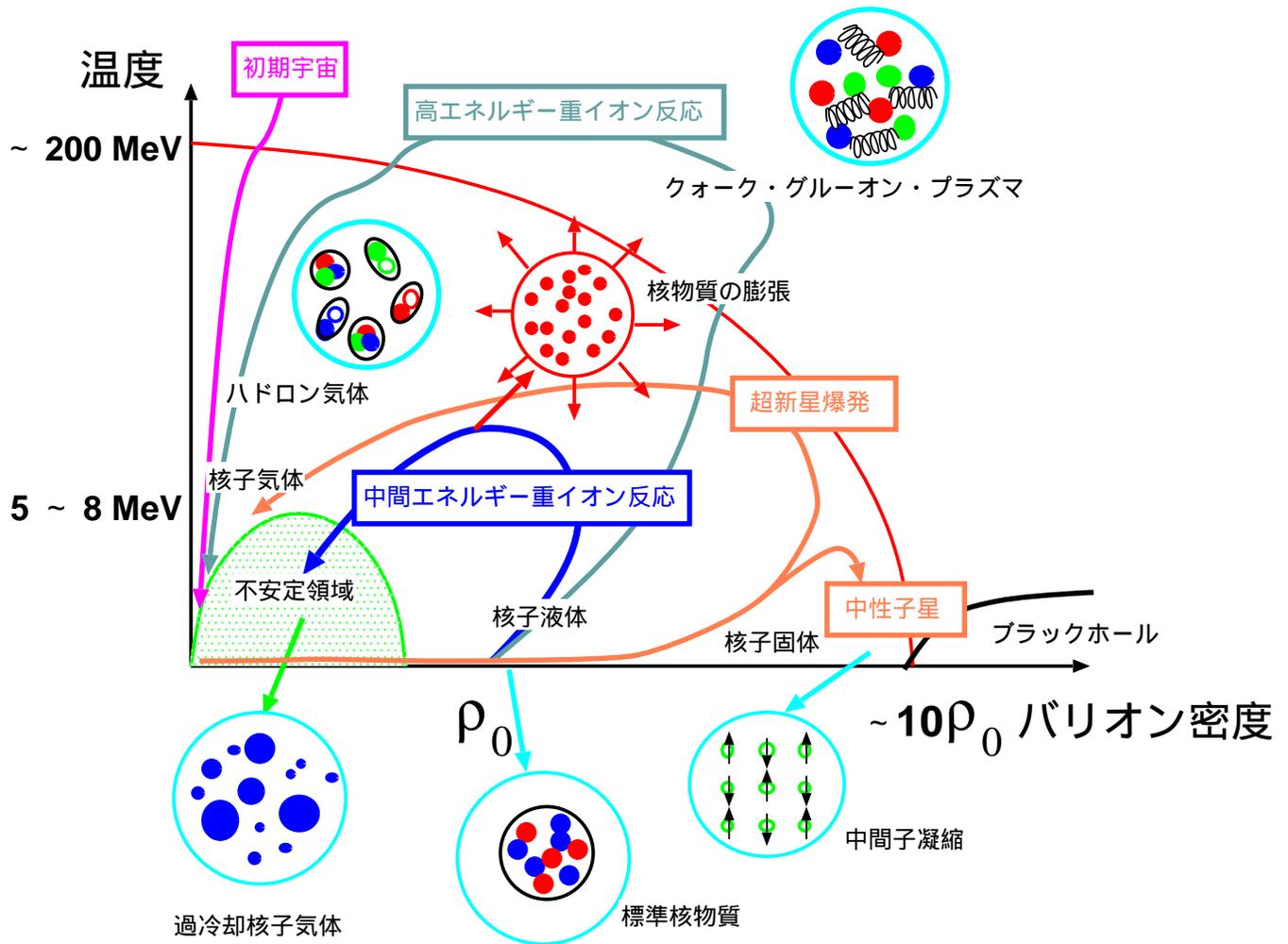
Nucleosynthesis



物質の相を探る

● 核物質の様々な相

- ★ 核物質の液相・気相・混合相
- ★ クォーク・グルーオン相とハドロン相
- ★ ストレンジ物質

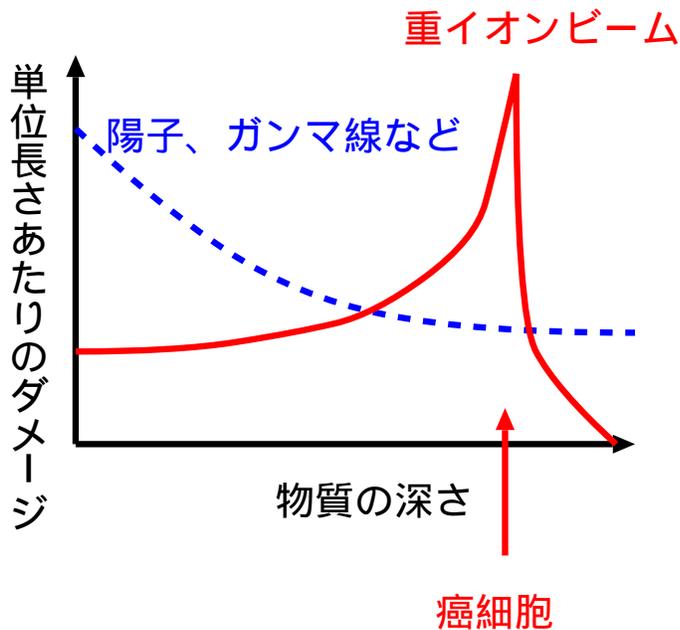


放射線の利用

● 医学利用

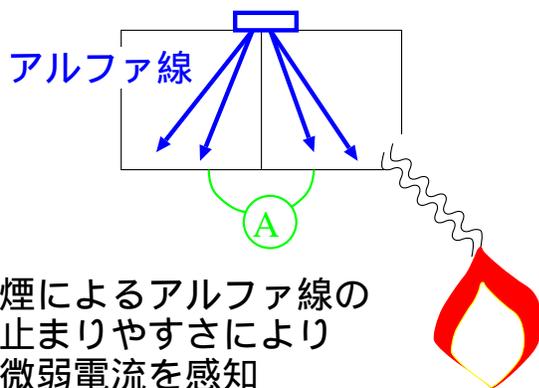
- ★ 血液照射、CT Scan、レントゲン、...
- ★ 癌治療

重イオンビームで癌細胞を狙い打ち



● 農業・工業への利用

- ★ 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
- ★ 火災報知器



核エネルギーの起源

- 質量とエネルギーの等価原理 (Einstein)

$$E = Mc^2$$

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

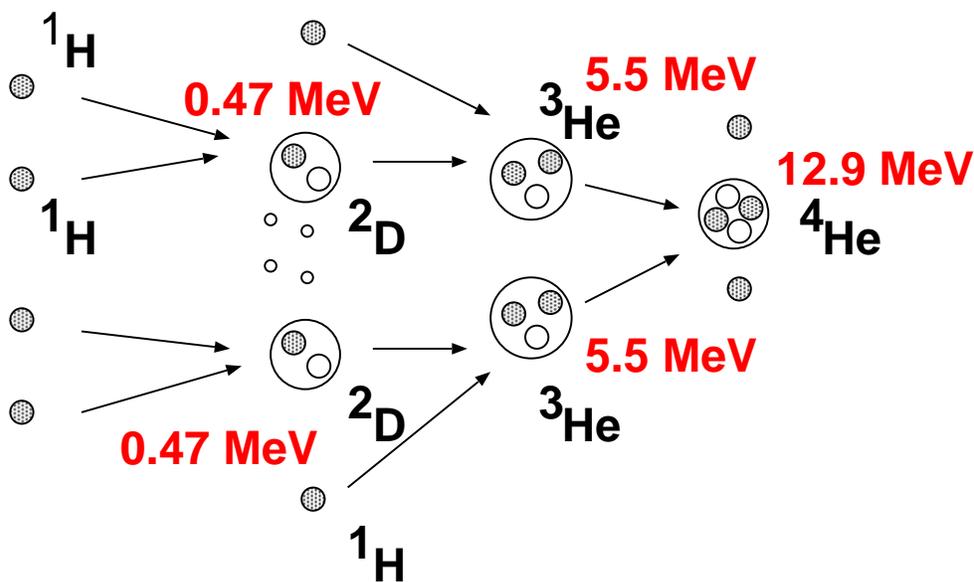
- 原子核の質量欠損 (質量保存則の破れ) = 結合エネルギー

(質量欠損)

$$= (\text{陽子数}) \times (\text{陽子の質量}) + (\text{中性子数}) \times (\text{中性子の質量}) \\ - (\text{原子核の質量})$$

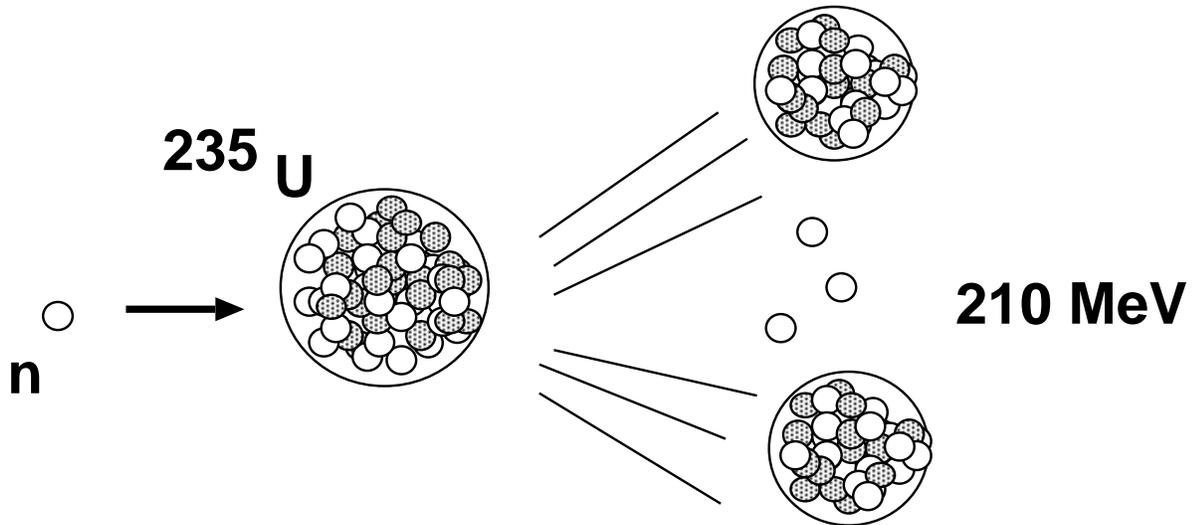
原子核では質量欠損が質量の約 1 % にも達する。

- 核融合 … 太陽のだすエネルギー源



核エネルギーの利用

- 核分裂 … 原子力発電、原子爆弾のエネルギー



- 原子力発電の課題

1. 発電装置の安全性

2. 核燃料サイクル

- ★ ^{235}U の濃縮 (濃縮ウラン)
- ★ 使用済核燃料の再処理・再利用
- ★ 高速増殖炉による利用 (^{239}Pu の生成、利用)

3. 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 or 消滅処理 (オメガ計画)

まとめ

1. 放射線と原子の有核構造 → 原子核の発見
2. 非常に大きな束縛 (結合) エネルギー → 強い力の必要性
3. 自然の階層の中での原子核物理学
= 強い力で相互作用する粒子・物質の性質の解明
4. 自然の進化の中での原子核物理学
= 初期宇宙での相転移、様々な段階での元素合成、
星の最終段階 (超新星爆発、中性子星)、...
5. 社会での利用
放射線の利用、エネルギーの利用