

■ 第三回 (11/19): 最近の研究より

- 原子核物理学で最近進展している研究内容のうち、不安定核、超重元素、クォーク・グルーオン・プラズマの3つのトピックスについて紹介します。
- 不安定核における性質の変化
- 超重元素の生成
 - Japonium は周期表に現れるか？
- クォーク・グルーオン・プラズマ生成
 - 地上でミニ・ビッグバンはできたか？
- まとめ

■ 資料は

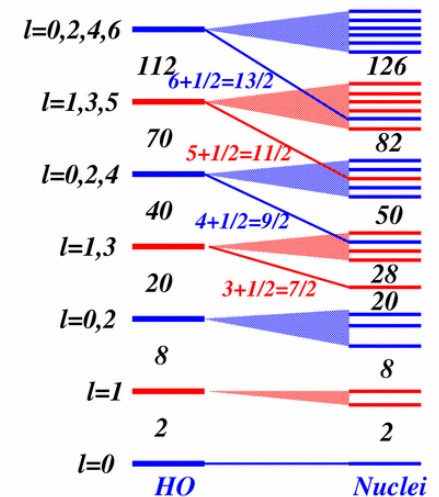
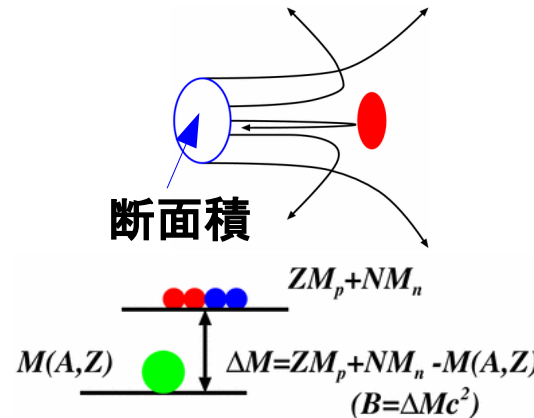
<http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/~ohnishi>
からリンクしておきます。
(物理のホームページ (<http://phys.sci.hokudai.ac.jp>)
→ 研究室・教官一覧 → 大西でたどり着けます。)

前回までの復習

- 原子核の表現方法： ${}^A_Z X_N$
 - Z: 陽子数 (= 原子番号)、N: 中性子数、A=Z+N: 核子数、X: 元素記号

- 原子核の大きさ： $R \approx 1.1 A^{1/3} \text{ fm}$

- 密度の飽和性
- 直径 $\sim 10^{-12} \text{ cm}$ \sim 原子の 1 万分の 1
- 粒子をぶつけて「断面積」から求める



- 原子核の質量
= 「核子質量の和」 - 「束縛エネルギー / c^2 」

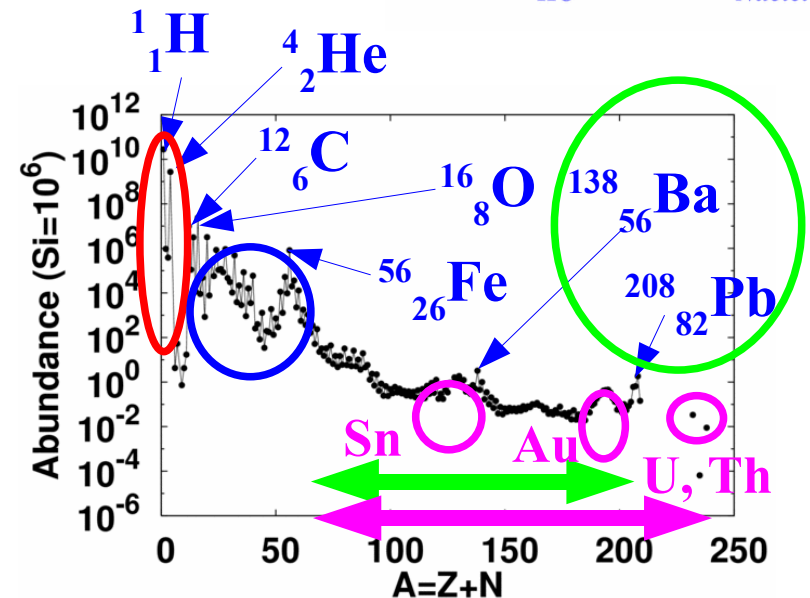
- 核融合するとき、質量欠損をエネルギーとして取り出せる ($E=mc^2$)

- 原子核の Shell 構造 (量子力学)

- 調和振動子ポテンシャル + スピン軌道力
→ 魔法数 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

- 元素が合成されたのは、ビッグバン、恒星、超新星爆発

- 原子核の魔法数と多くの不安定核が大きな役割

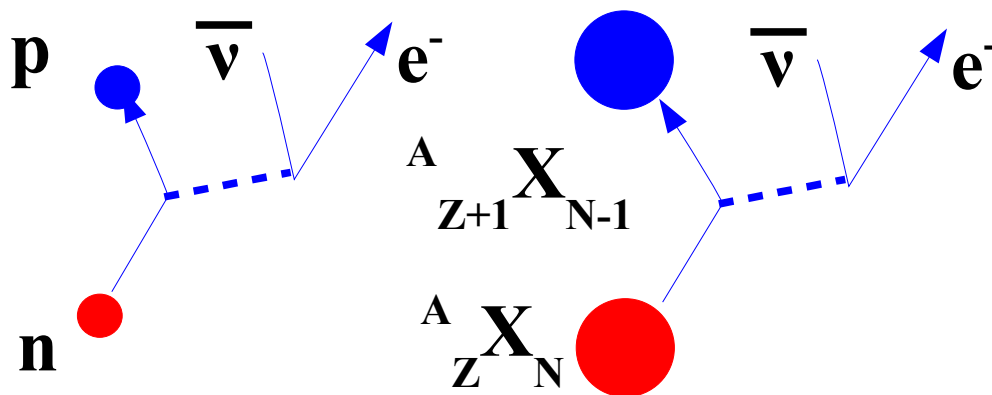


不安定核(1)

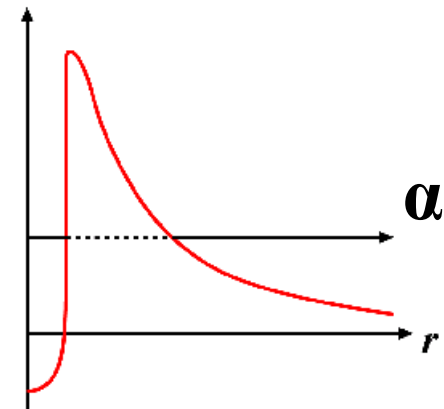
■ 原子核の種類

- 安定核：崩壊しない原子核 (256 種)
- 不安定核： α 崩壊、 β 崩壊等により他の原子核に変わる原子核
(既発見～2500種、存在予想～7000種)
- 非束縛核：陽子、中性子、 α 粒子等を放出してすぐに崩壊してしまう
「共鳴」として存在する状態 (通常、原子核とは呼ばない)

ほとんどの原子核は「不安定核」である！
→ どうやって作るか？ その性質は？

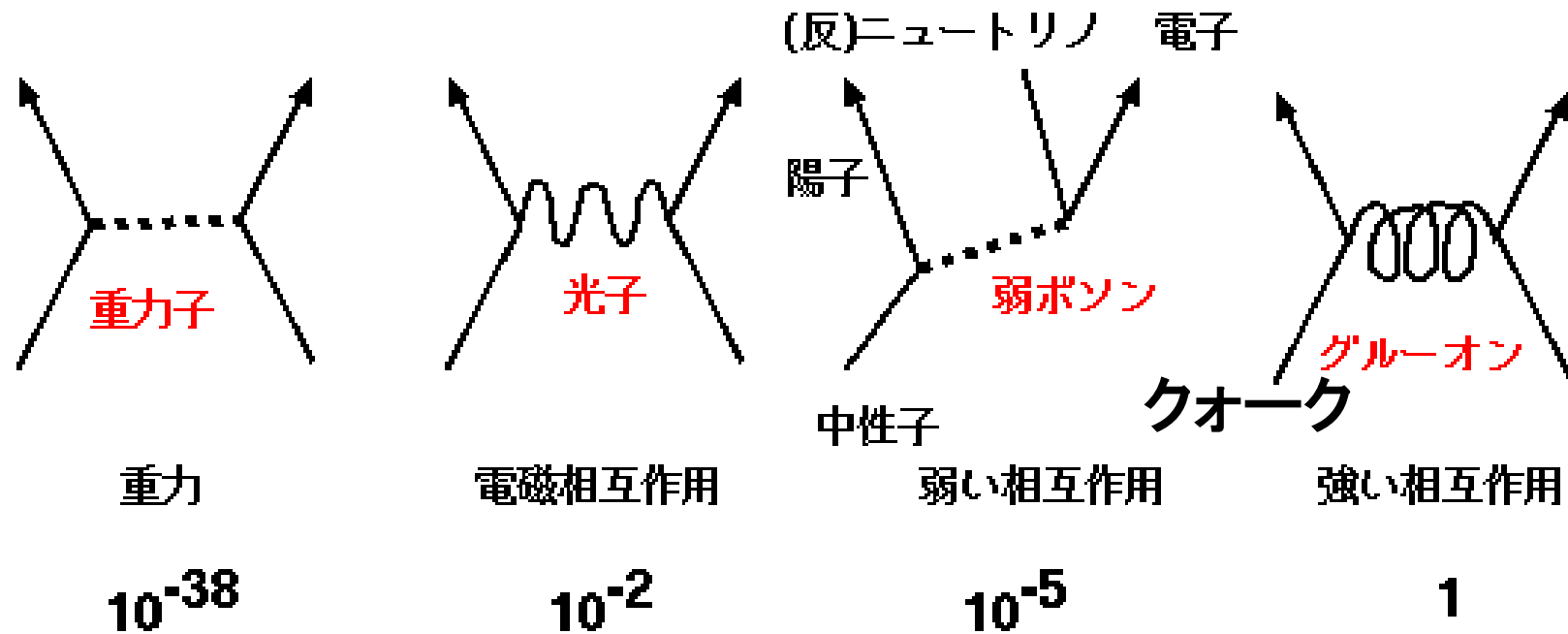


β 崩壊 (弱い相互作用により、中性子が電子と反ニュートリノを放出して陽子に変わる)



α 崩壊 (トンネル効果により、 α 粒子が原子核の中から確率的に飛び出す)

補足-4つの力と自然の階層



- **重力**：非常に弱いですが、いつでも引力。星や銀河の運動、地上での重力。
- **電磁気力**：正負の電荷に働き、原子・分子・マクロな物質を作る。
- **弱い力**：粒子の種類を変える力。原子核の β 崩壊など。
- **強い力**：赤、緑、青の3種類の電荷。核子を作っており、核力のもと。

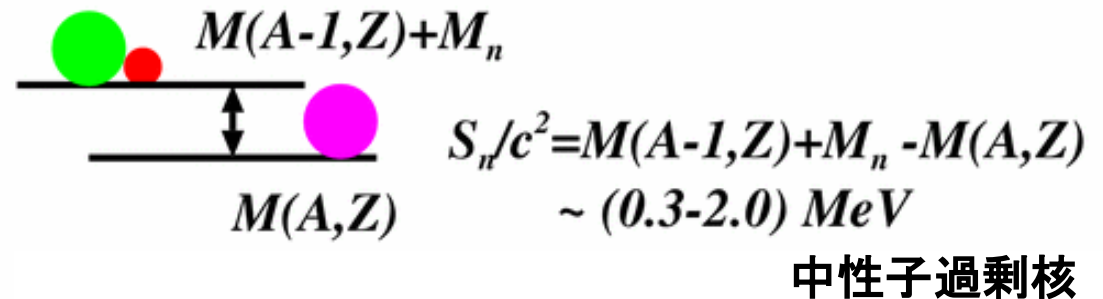
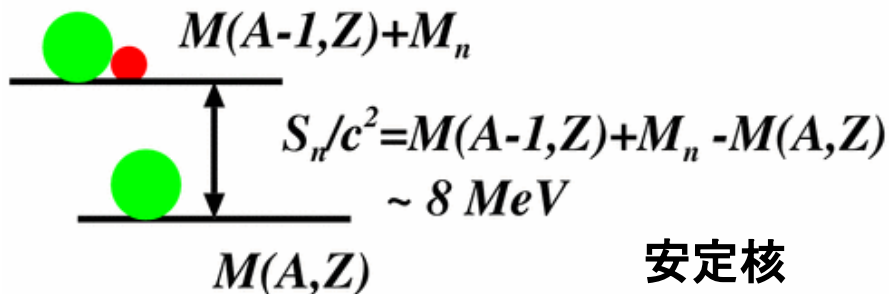
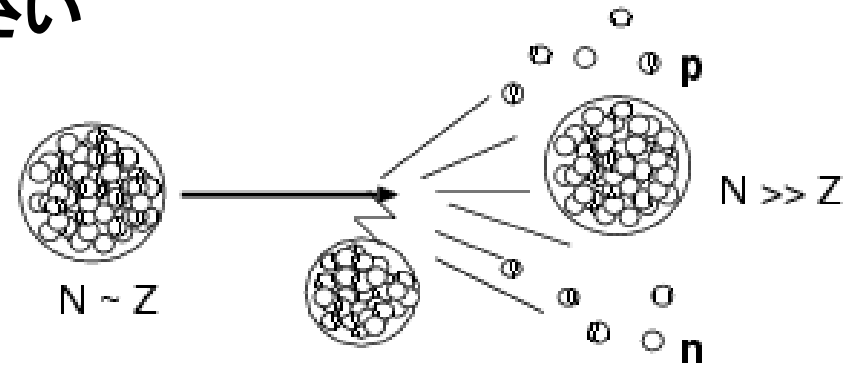
現代的な力(強い力、弱い力)はいずれも原子核で見つかった。

不安定核(2) —不安定核の作り方

- 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。
→ 壊れ方から性質を調べる、又は
壊れる前に他の原子核にぶつけて性質を調べる

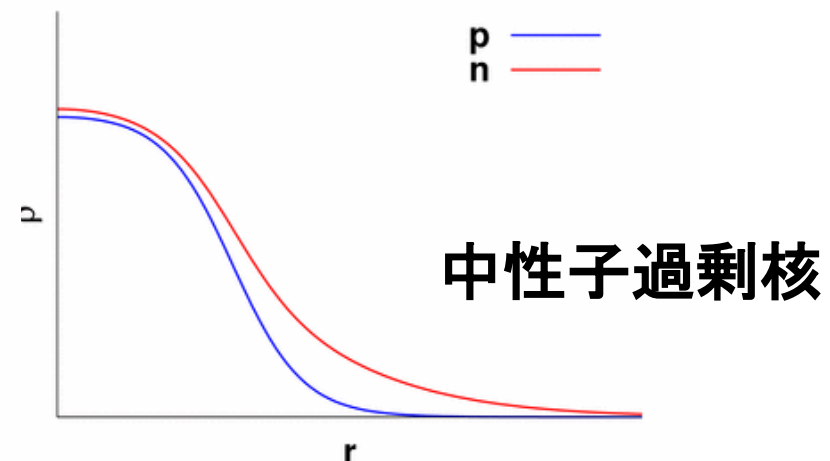
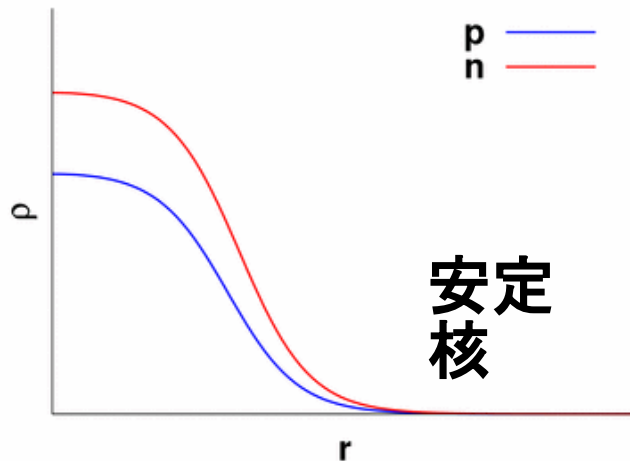
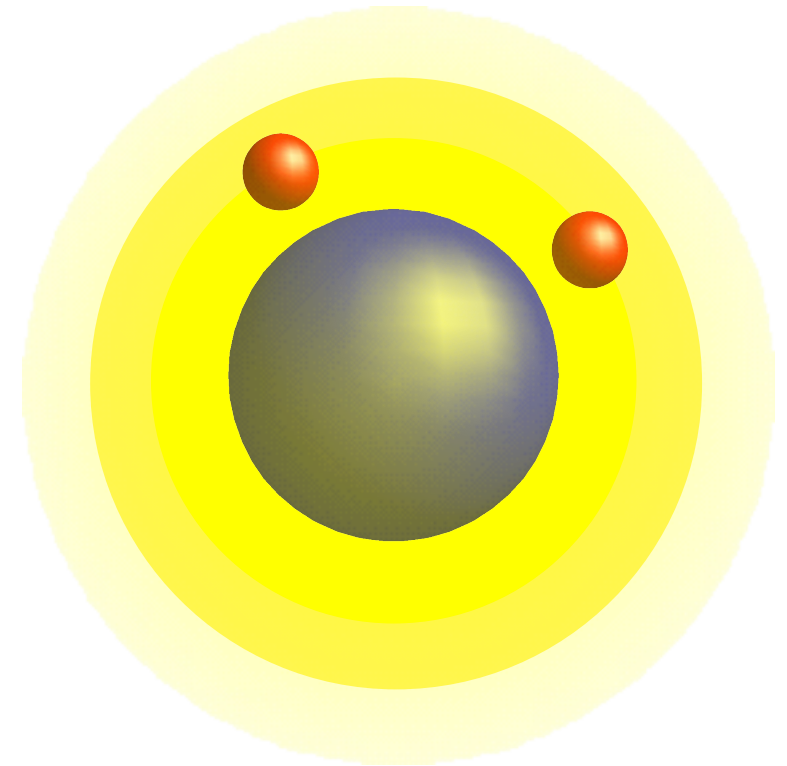
- これまでに分かってきた中性子過剰核 ($N \gg Z$) の性質

- 中性子の分離エネルギー (S_n) が小さい
- 相互作用断面積が極端に大きい
→ 半径が大きい
- 形が変化しやすい
- 魔法数が安定核から変化している



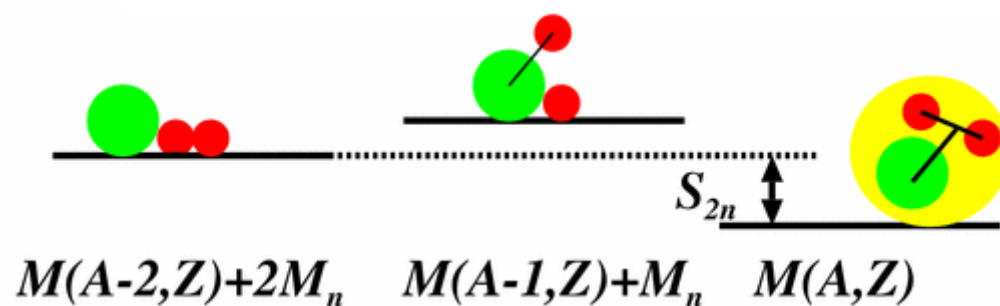
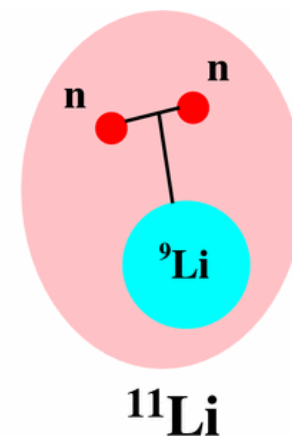
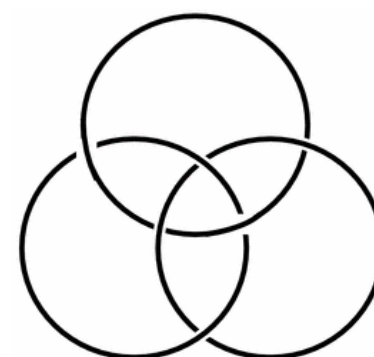
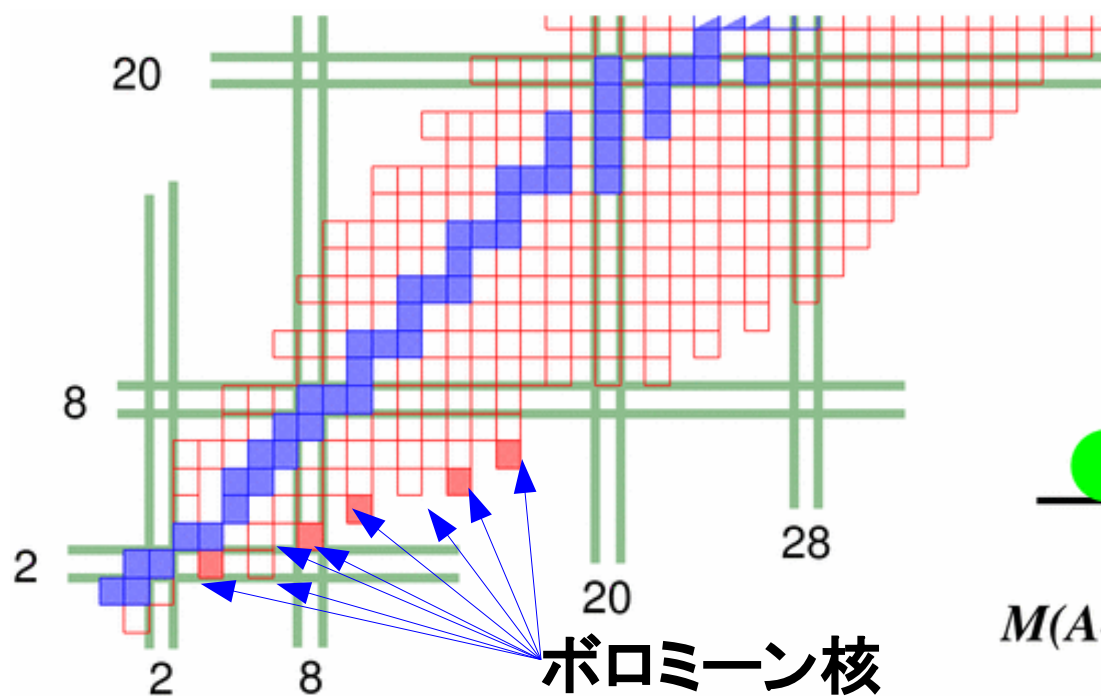
不安定核(3) —中性子過剰核の半径

- 安定核の半径 $R \sim 1.1 A^{1/3}$ (fm)
→ 密度は原子核によらず一定
- 中性子過剰核の半径
 $R \gg 1.1 A^{1/3}$ (fm)
(公式はまだない)
→ 外側の中性子が大きく広がっている
= ハロー構造
(ハロー = 太陽の回りに見える暈)



不安定核(4) - ボロミーン核

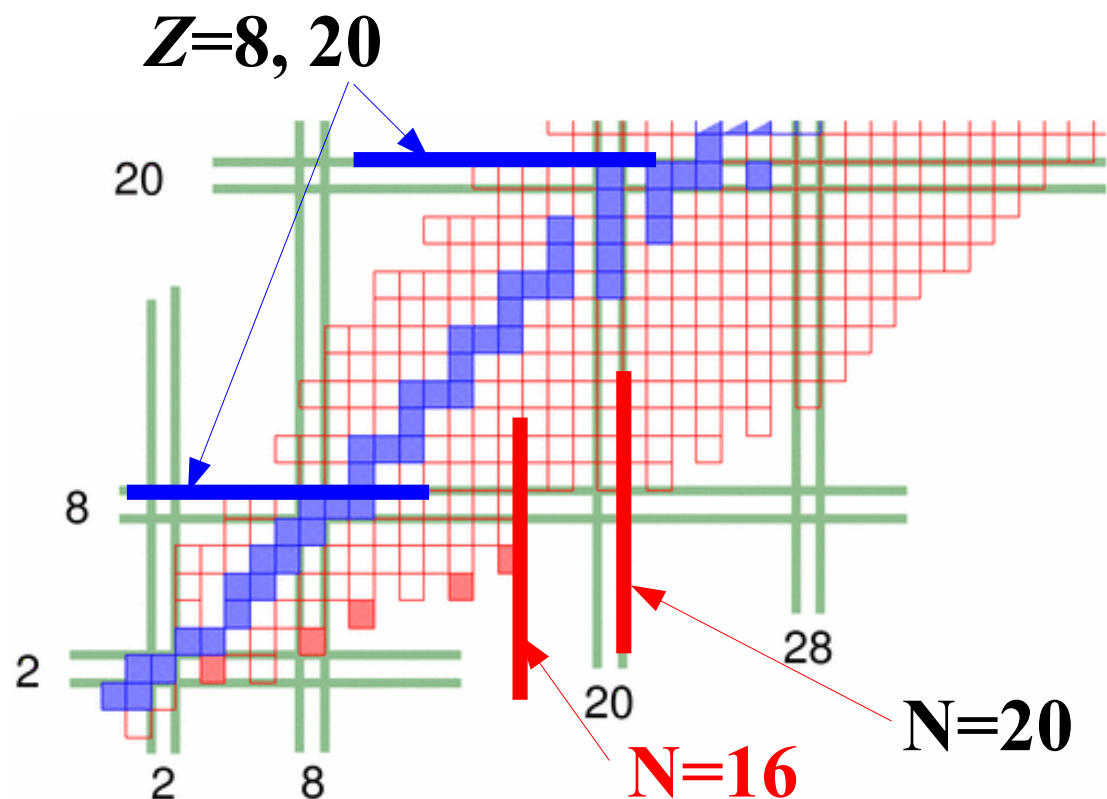
- 1つの中性子は束縛しないが、2つの中性子を加えると束縛する核
 → ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{14}\text{Be}$, ${}^{17}\text{B}$, ${}^{19}\text{B}$, ${}^{18}\text{C}$, ${}^{20}\text{C}$, ${}^{24}\text{O}$,
- ボロミーン核：2体では束縛しないが3体で束縛
- コアの原子核からのポテンシャルのみで束縛しているのではない
- その束縛のメカニズムは???



不安定核(5) —魔法数の変化

- $N=20$ は中性子過剰核でも魔法数か？
 - 魔法数になると、原子核は安定化する
→ $Z=8, 20$ では、小さな N でも原子核が存在
 - $N=20$ では小さな Z まで原子核が束縛していない！
 - むしろ $N=16$ で束縛する原子核が小さな Z 方向に伸びている

- 中性子過剰核では、魔法数 $N=20$ が消滅し、新たな魔法数 $N=16$ が現れる
 - 提案されているメカニズム
原子核の変形、
スピン・軌道力の変化、
テンソル力、
核内パイオン効果
(未確定)



超重元素(1)ー生成の歴史

- 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

超重元素(2)ー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

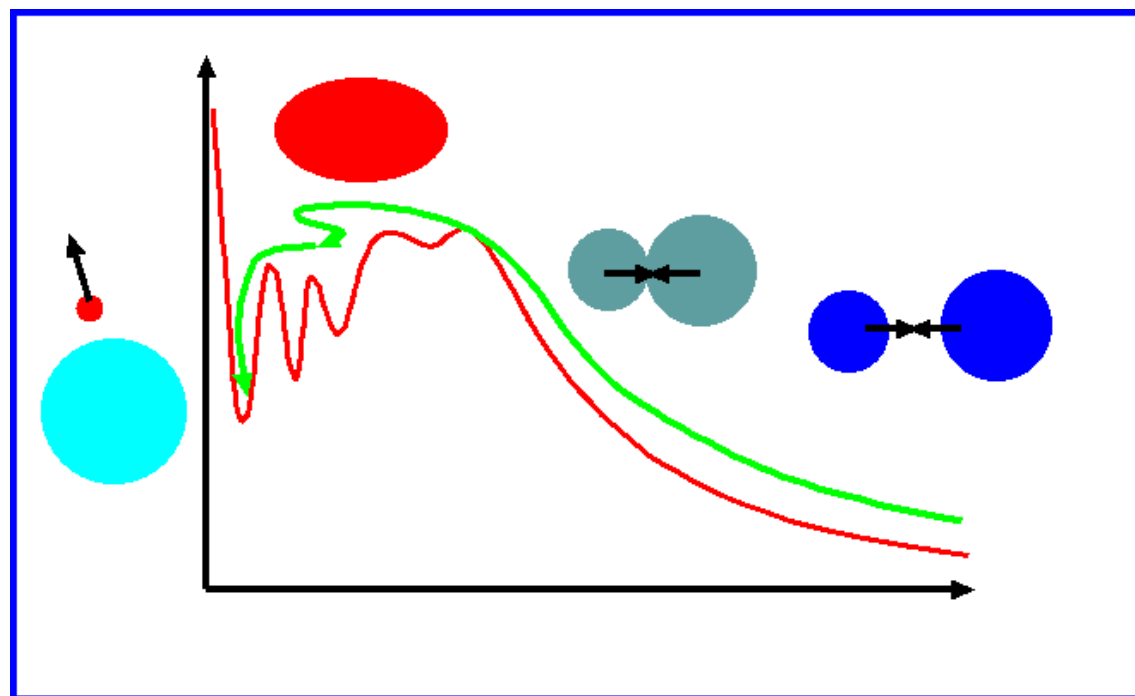
= 「反応機構

+ 中性子束縛エネルギー

+ 量子効果

(Shell Effects)....」

の解明



超重元素(3)ジャポニウム の作り方

■ 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)

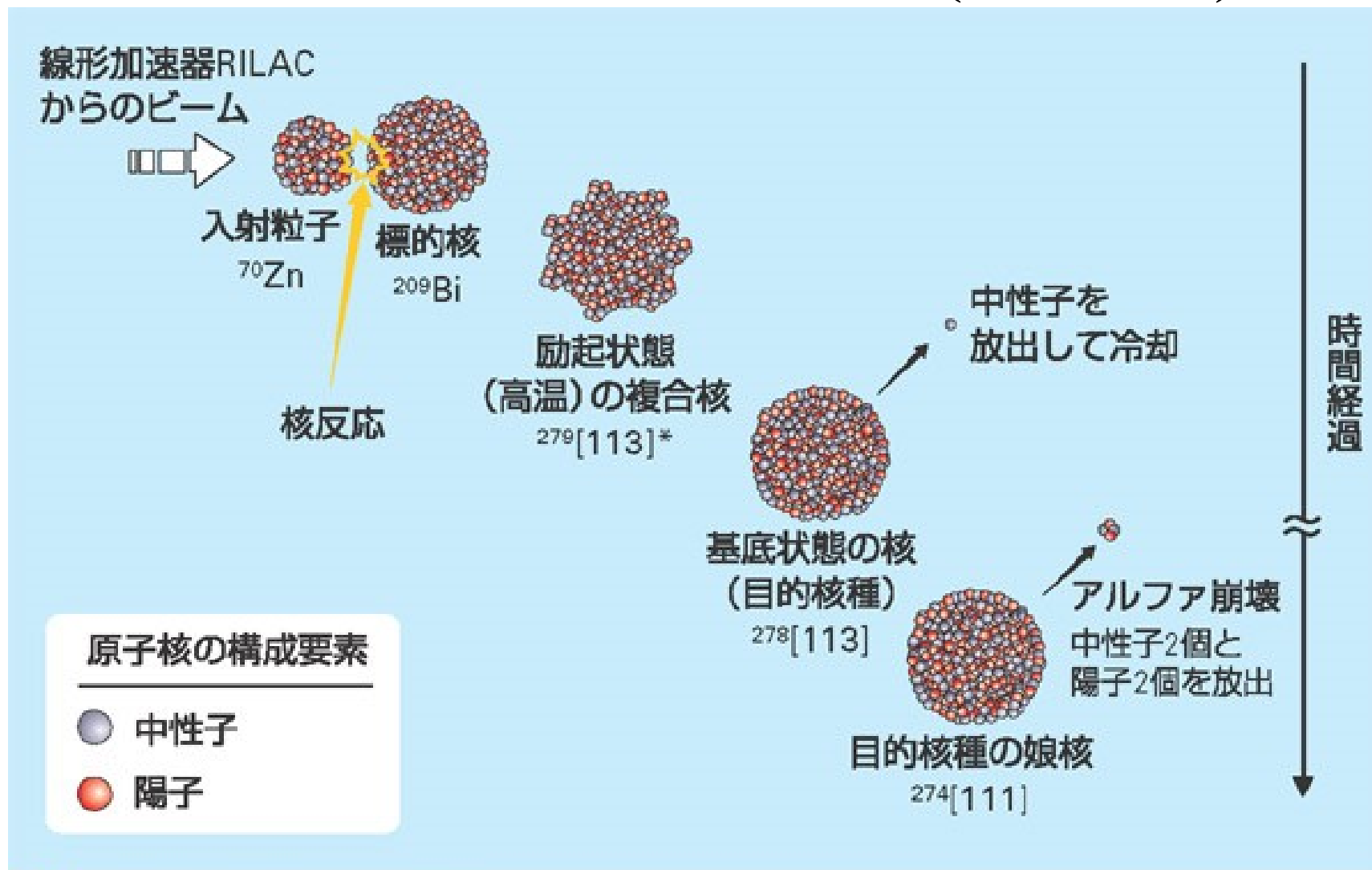
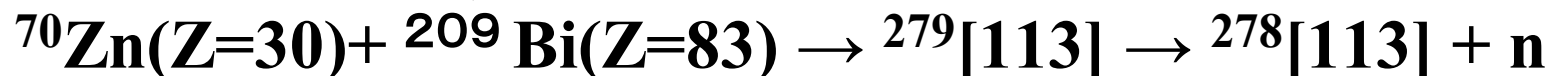


図1 原子番号113元素の合成と崩壊連鎖

超重元素(4)ー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 $(Z,N)=(113,166)$ は確実
- 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

- 現時点で命名権は日本にある
ジャポニウム？
ニッポニウム？
リケニウム？

- ごく最近のニュース
「アメリカ・ロシアのチームが
 $Z=118$ の原子核を合成」

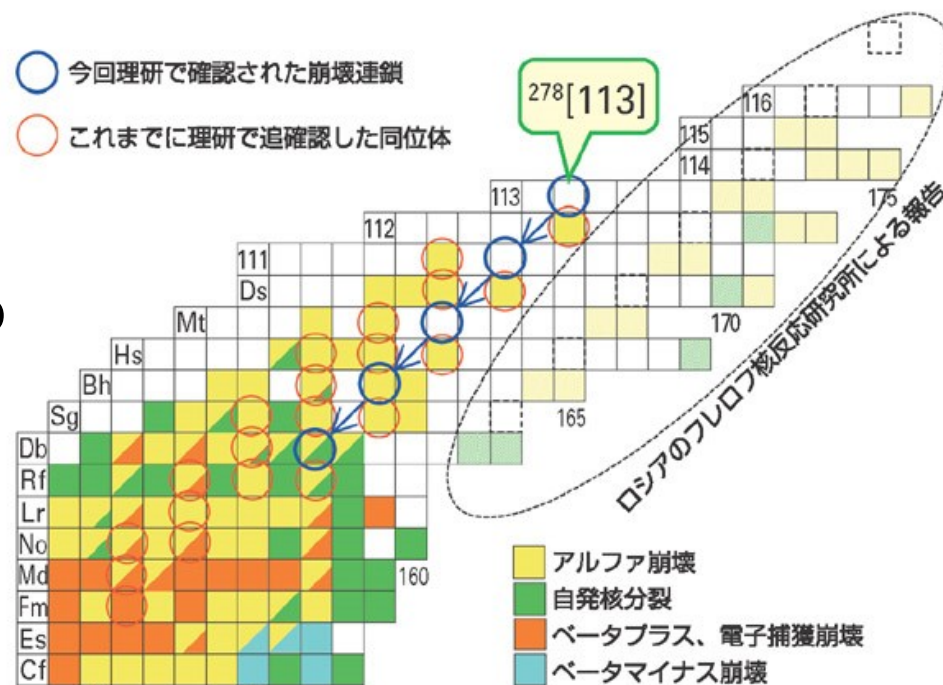
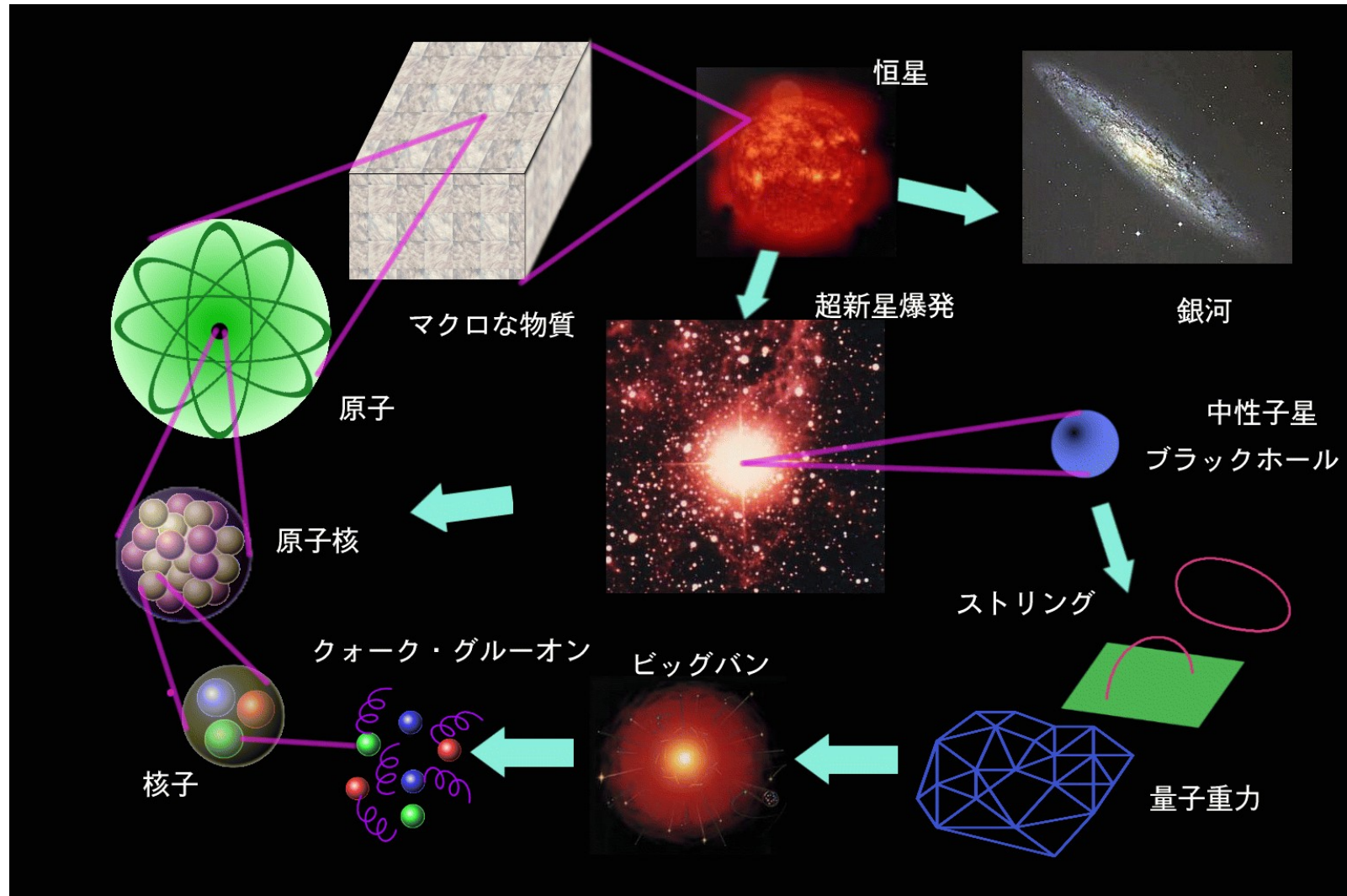


図3 核図表の終端部分
核図表とは、原子核の陽子数（原子番号）を縦軸とし、中性子数を横軸にして表示したものを。

クォーク(1) ー物質は何からできているか？

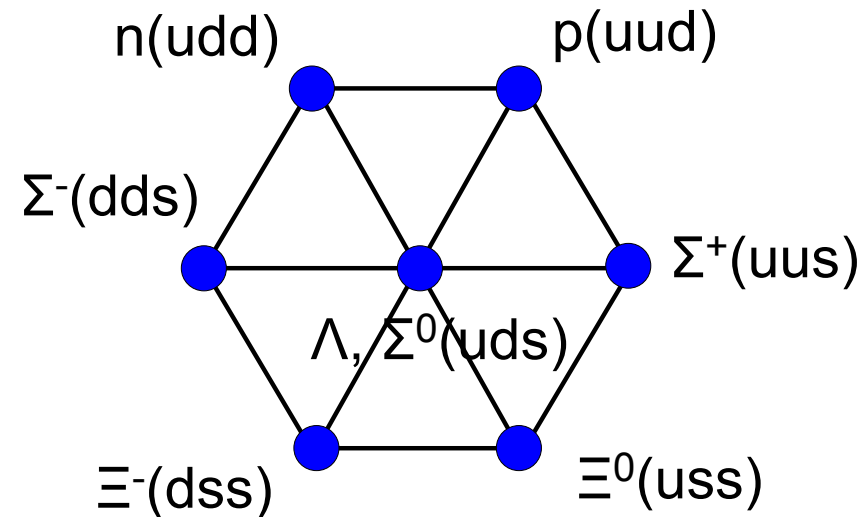
- 原子 → 原子核 → 核子 → クォーク
クォーク = 現時点で「最小」と考えられている物質の主要構成粒子



クォーク(2) —クォークとは何者か？

- 核子は u, d クォーク3つからできている
 - 電荷は素電荷 e の分数倍 (-1/3, 2/3)
 - 質量は 5 MeV 程度
 - なぜ3つあつまると重くなるのか？
- 同じスピン・空間状態に3つはいれる
 - スピン以外に「色」(r,g,b) の自由度を持つ
- 単独では観測され(てい)ない。
 - 3クォーク (陽子等のバリオン)、クォーク・反クォーク対 (中間子) の「白色」の組み合わせ (ハドロン) で観測される。
 - 激しい電子衝突での散乱体としては見える
 - なぜクォークの色は「閉じ込め」られているのか？

粒子	質量 (MeV)	電荷
n (中性子)	939	0
p (陽子)	938	1
d (down)	~ 5	- 1/3
u (up)	~ 5	2/3
s (strange)	~ 150	- 1/3
c (charm)	~ 1500	2/3
b (bottom)	~ 5000	- 1/3
t (top)	~ 180000	2/3



■ クォークのカラー自由度

- 3つの複素数成分 (r、g、b)をもち、この空間で「回転」する。
- ハドロン(核子や中間子)は「色」を持たない。
(カラー空間での回転について不変)
- 核子(バリオン)はクォーク3個、中間子はクォークと反クォークからできている。
- 核子(バリオン=3クォーク状態): $\vec{c}_1 \cdot \vec{c}_2 \times \vec{c}_3$
 - カラーベクトルの3重積なので回転しても不変
- 中間子(クォーク・反クォーク状態): $\vec{c}_1^+ \cdot \vec{c}_2$
 - カラーベクトルの内積なので回転しても不変

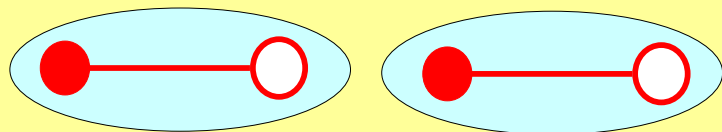
■ 21世紀最初のビッグニュース

- クォーク(反クォーク)5個からなる粒子(ペンタクォーク)が見つかった。(大阪大学・核物理研究センター、SPRING8)

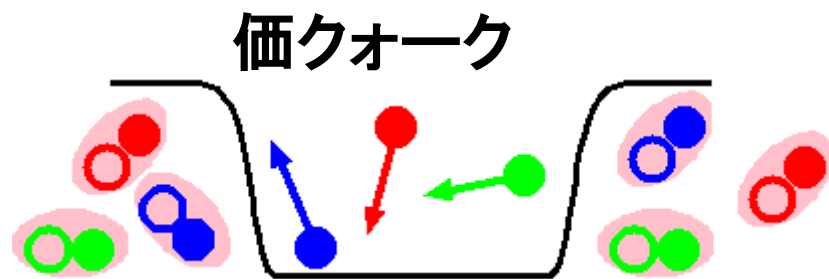
クォーク(3) — 量子色力学 (QCD) の「真空」

- 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)



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

QGP(1) — 物質を熱していくと何が起こるか？

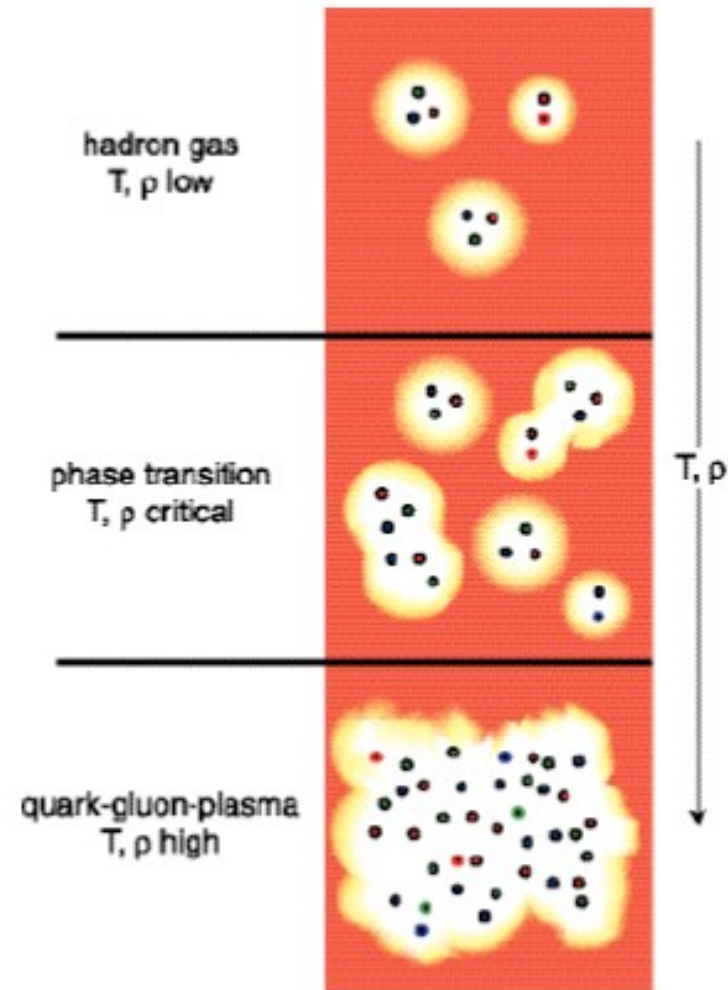
■ 理想気体の状態方程式

$$pV = nRT = N(R/N_A)T = NkT$$

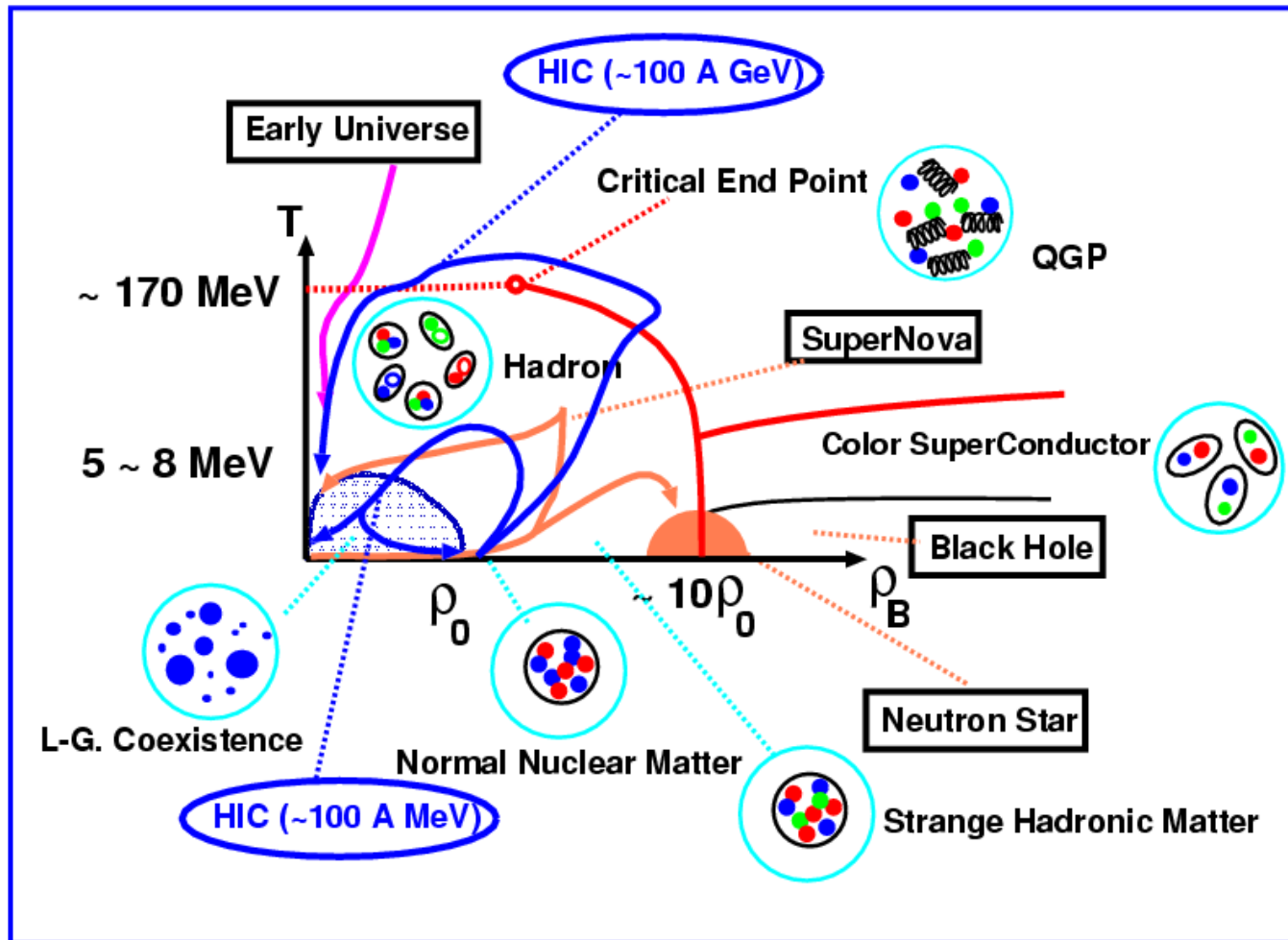
$k=1$ とすると、 $10^{10} \text{ K} = 1 \text{ MeV}$

■ 物質を熱していくと N は増える！

- $T = 1 \text{ eV}$ ($\sim 10^4 \text{ K}$)
→ 原子核と電子の「プラズマ」
→ $N =$ 「原子核の数」+「電子の数」
- $T = 10 \text{ MeV} \sim 60 \text{ MeV}$
→ $N =$ 「核子の数」(原子核が壊れる)
- $T = 60 \text{ MeV} \sim 200 \text{ MeV}$
→ π 粒子が生成されて粒子数が増加
→ $N =$ 「核子数」+「 π 粒子の数」
- $T > 200 \text{ MeV}$
→ ハドロンが壊れてクォーク・グルーオン・プラズマができる
→ $N =$ 「クォーク数」+「反クォーク数」+「グルーオン数」 $\propto T^3$



宇宙と地上でのクォーク物質相転移

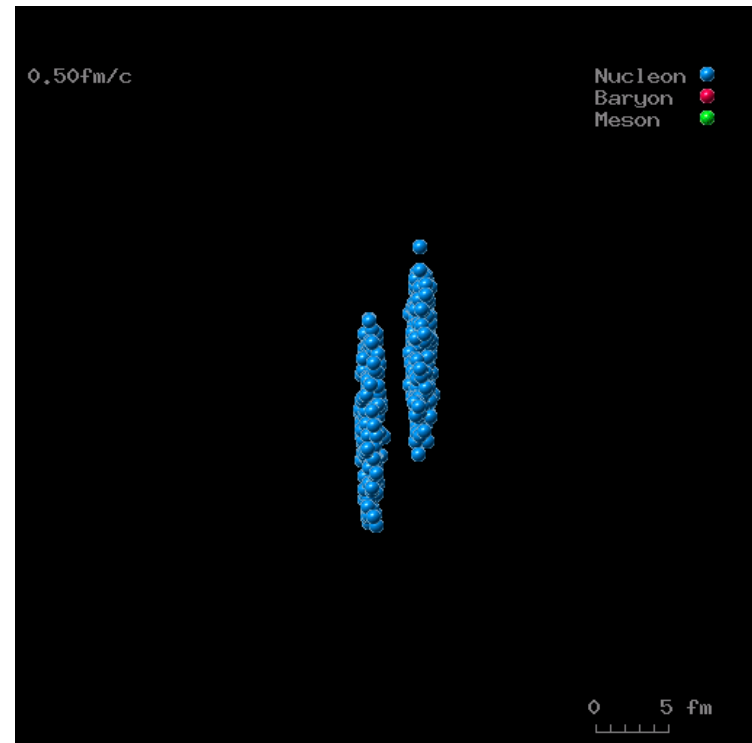


- QGP からハドロン相への相転移 (QCD 相転移)
= この宇宙最後の「真空相転移」である！

QGP(2) – 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)

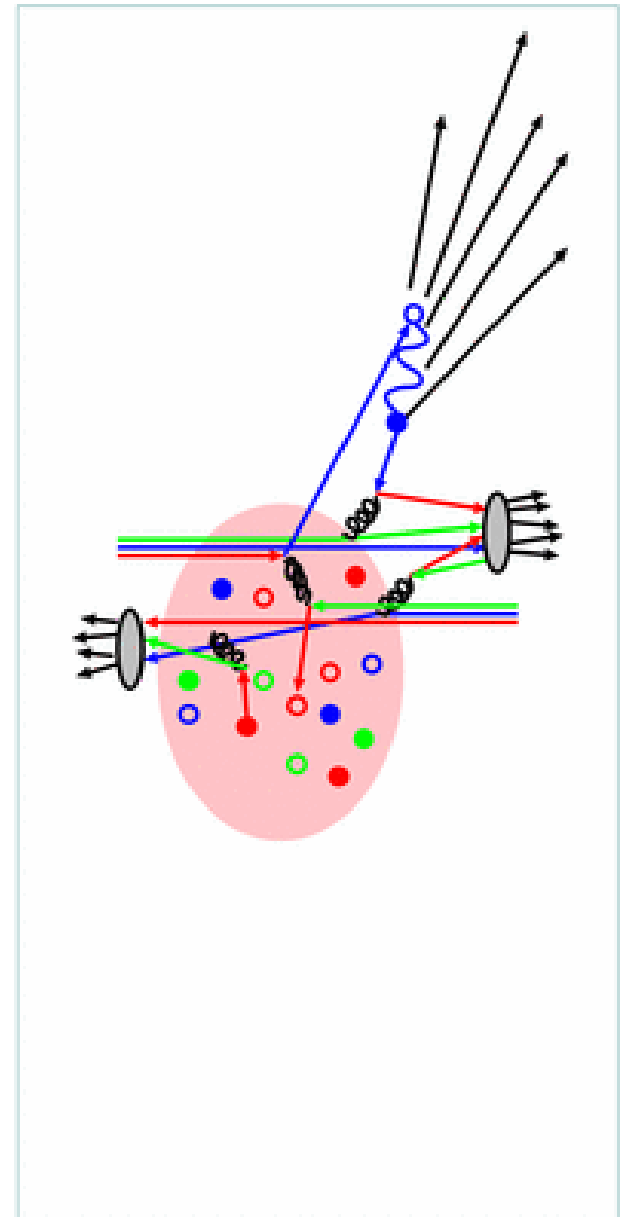
- 大きな体積中をクォークとグルーオンが閉じ込めから解放され、凝縮のない単純な真空を動き回っている状態
- 初期宇宙等の「超高温状態」($\sim 10^{12}$ K) や、中性子星中心部などの「超高密度状態」($\sim 10^{15}$ g/cc) で実現
- 実験室での QGP 生成
→ 高エネルギーの重イオン反応

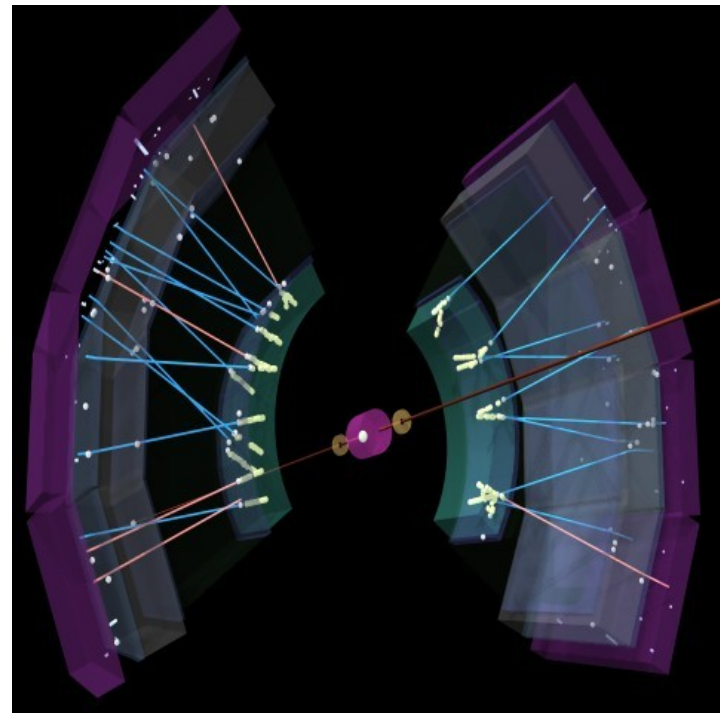
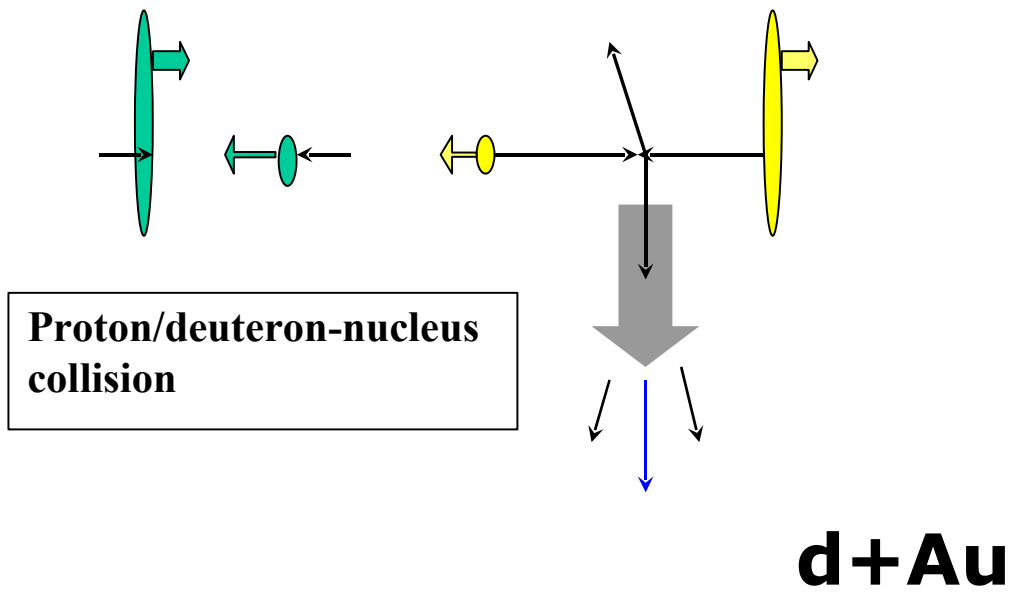
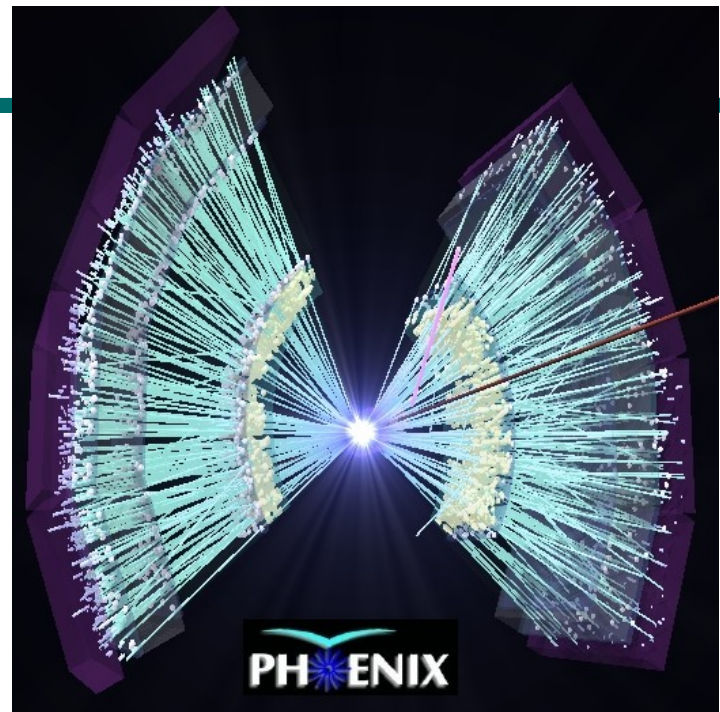
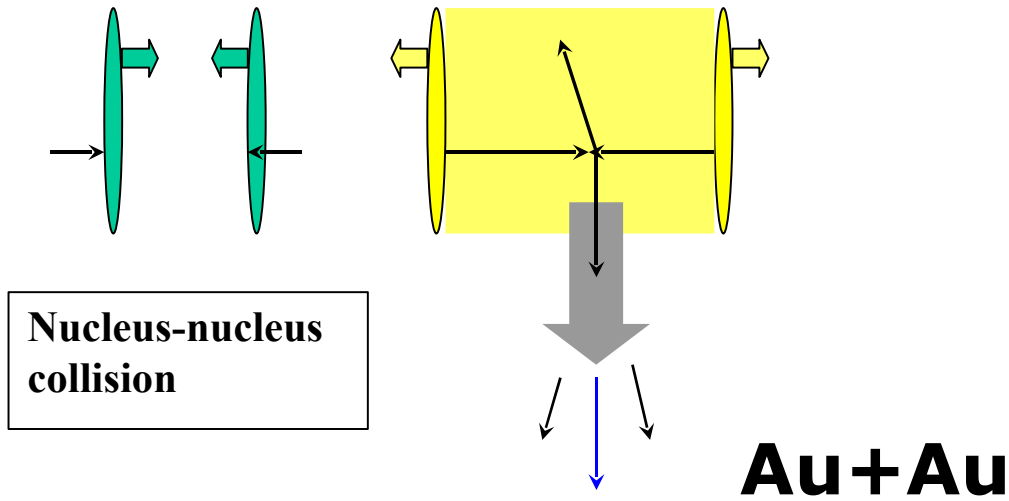


高エネルギー原子核反応での
QGP 生成
= 地上の “Big Bang” 再現実験

QGP(3) — 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
 - 他の証拠の例
 - 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 はほとんど完全流体

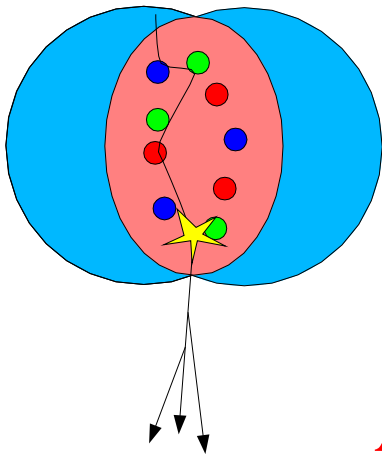




QGP(4) — 生成の実験的証拠：ジェット抑制

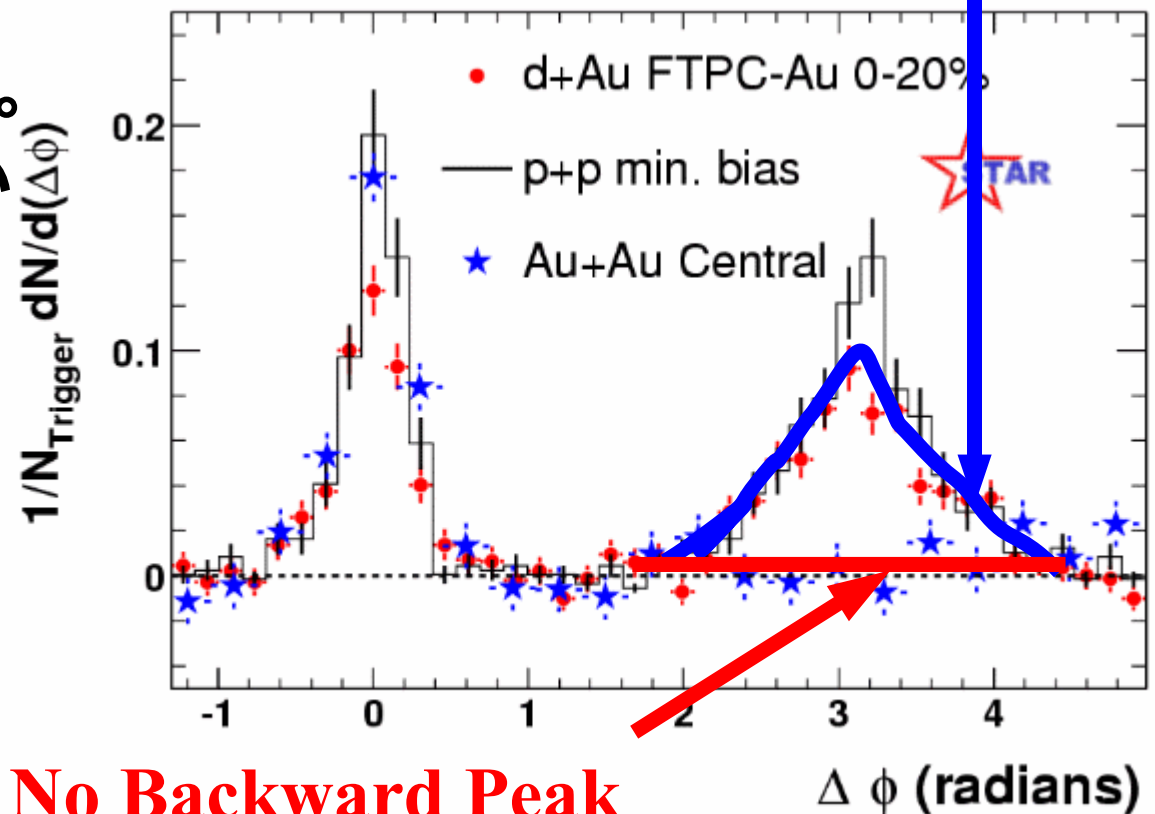
- ジェットが消えているなら、核子衝突で見えている裏側の相関が消えるはず。

- 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

第三回のまとめ

- 我々の回りにある原子核はほとんど「安定核」であるが、「種類の数」で見れば原子核のほとんどは「不安定核」であり、その性質は「安定核」と大きく異なっているようである。
 - 束縛エネルギー・密度の飽和性が満たされない。
 - ポテンシャルによる束縛で理解できない、魔法数が増える、...
- 超重元素を作るのは難しいが、最近日本で $Z=113$ の元素を発見
 - 困難さ: クーロン・エネルギーにより、核分裂しやすい
 - 面白さ: 大きな原子核における「魔法数」の研究、反応のメカニズム、大きな角運動量での電子の性質、周期律表に名前が残る！
- クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 生成は、小さなビッグバンの地上での再現実験である。
 - カラーの閉じ込めからの解放
 - クォーク・グルーオンが大きなエネルギー損失
 - RHIC 実験で生成されたようである。
- 資料は <http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/~ohnishi> からリンクしておきます。

レポート問題 (Part3)

- 第一回 (1 問)、第二回 (3 問)、第三回 (3 問) の 7 問から 2 問選択し、解答用紙 (A4 一枚、裏も可) に解答して提出すること。
 - 身近にも放射線をだして崩壊する不安定核は存在する。その例を 2 つ以上あげ、どのように利用されているか (またはどのような害があるか) を述べよ。
 - 超重元素生成の意義 (科学的意義、社会的意義) について述べよ。(各人の見解を交えてよい。)
 - 非常に簡単な模型では、クォーク・グルーオン・プラズマは、「真空の圧力」にクォークとグルーオンの圧力が打ち勝つときに作られると考えてよい。真空の圧力を $B = (200 \text{ MeV})^4$ とし、クォークとグルーオンをあわせた数密度が $\rho = N/V = 37 \pi^2 T^3/90$ であるとして、理想気体の状態方程式から、相転移温度 T_c を求め、最新の数値計算の結果 $T_c = 170 \text{ MeV}$ と比較せよ。(ここでは、 $\hbar = c = k = 1$ という自然単位系を用いている。)