
原子核物理学最先端

--- クォークからエキゾチックな原子核まで ---

大西 明

大学院理学研究科・宇宙理学専攻

2つの話題を紹介します。

Little Bang = 地上での “Big Bang”

... 高エネルギー原子核衝突での
クォーク・グルーオン・プラズマ生成

周期表にジャポニウムが加わるか？

... 超重元素の合成

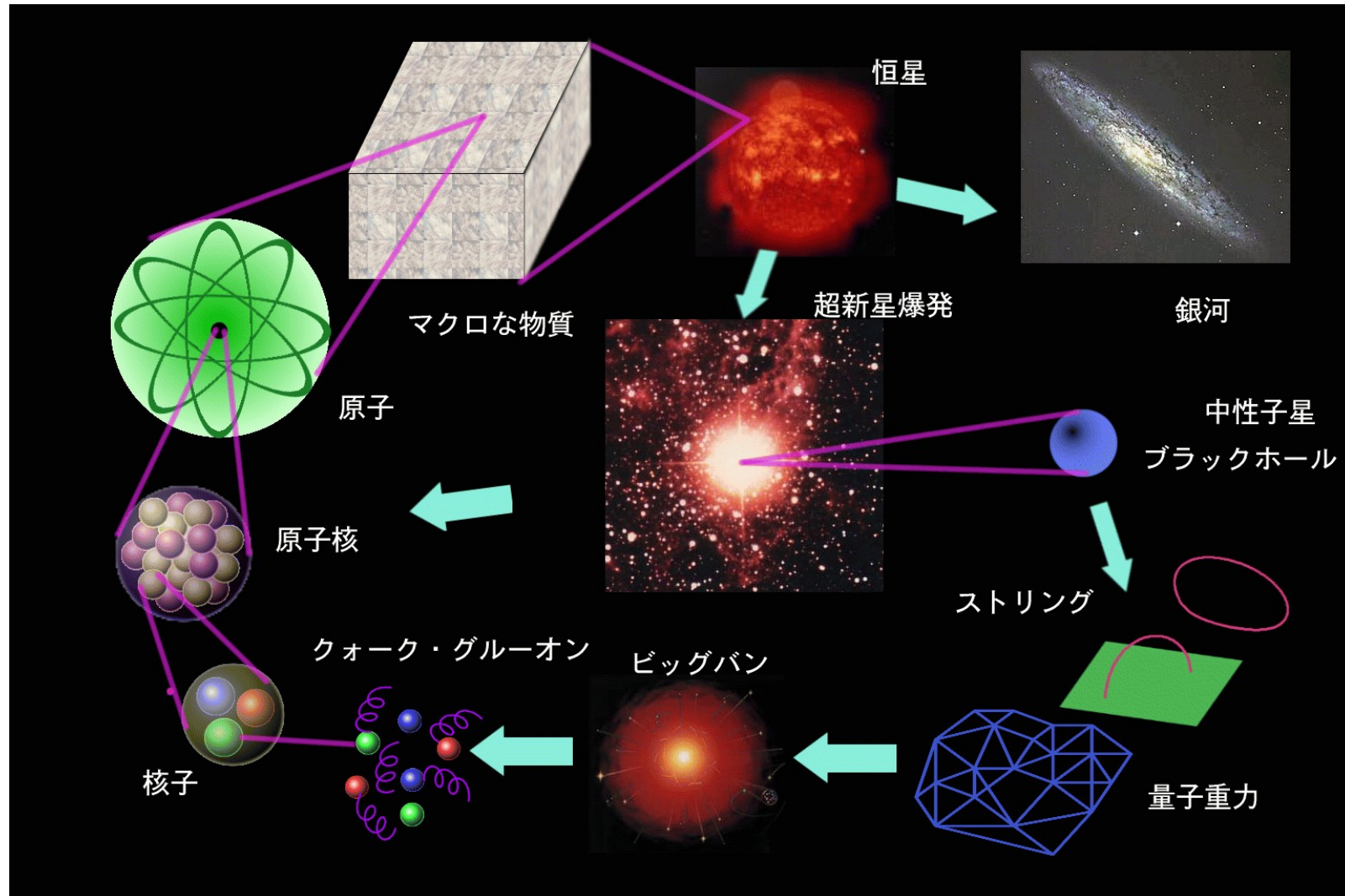
スライドの pdf は、

<http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/~ohnishi>
からリンクしてあります。

Little Bang = 地上での “*Big Bang*”
--- 高エネルギー原子核衝突での
クォーク・グルーオン・プラズマ生成 ---

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)



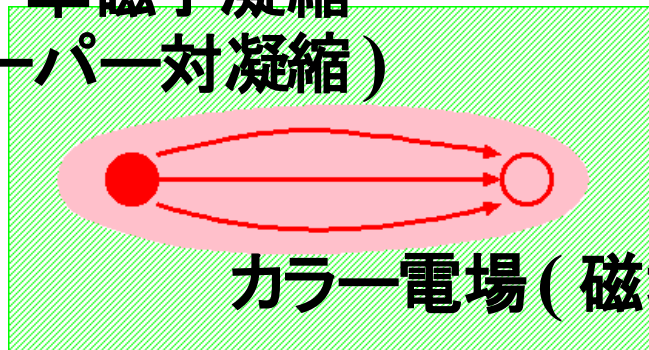
クォークの不思議

- 6種類の香り(フレーバー)をもつ
 - up, down, strange, charm, top, bottom
- フェルミオンなのに、同じ状態に3つ入れる。
 - Δ 粒子=同じ種類・同じ向きのクォークが3つ同じ空間軌道にある
→ フレーバー、スピン以外に、「色」(r, g, b) 自由度をもつ。
- **クォークの「色」は閉じこめられている**
 - クォーク単独では観測され(てい)ない
 - 3つのクォークの集合(核子など)、クォークと反クォークの対(π 粒子など)の形(ハドロン)でのみ観測される
- **小さい質量のクォークが集まると重くなる。**
 - u, d クォークの質量は 5 MeV 程度 → 3つ集まると 1000 MeV

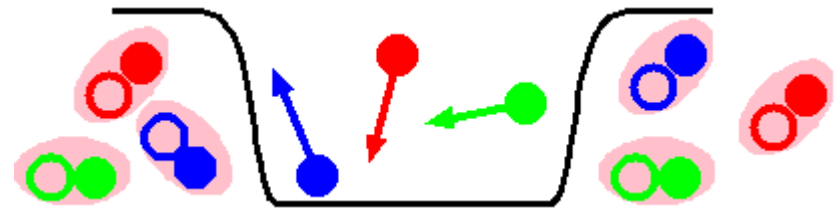
量子色力学 (QCD) の「真空」

- 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 → 大きな質量

カラー単磁子凝縮
(クーパー対凝縮)



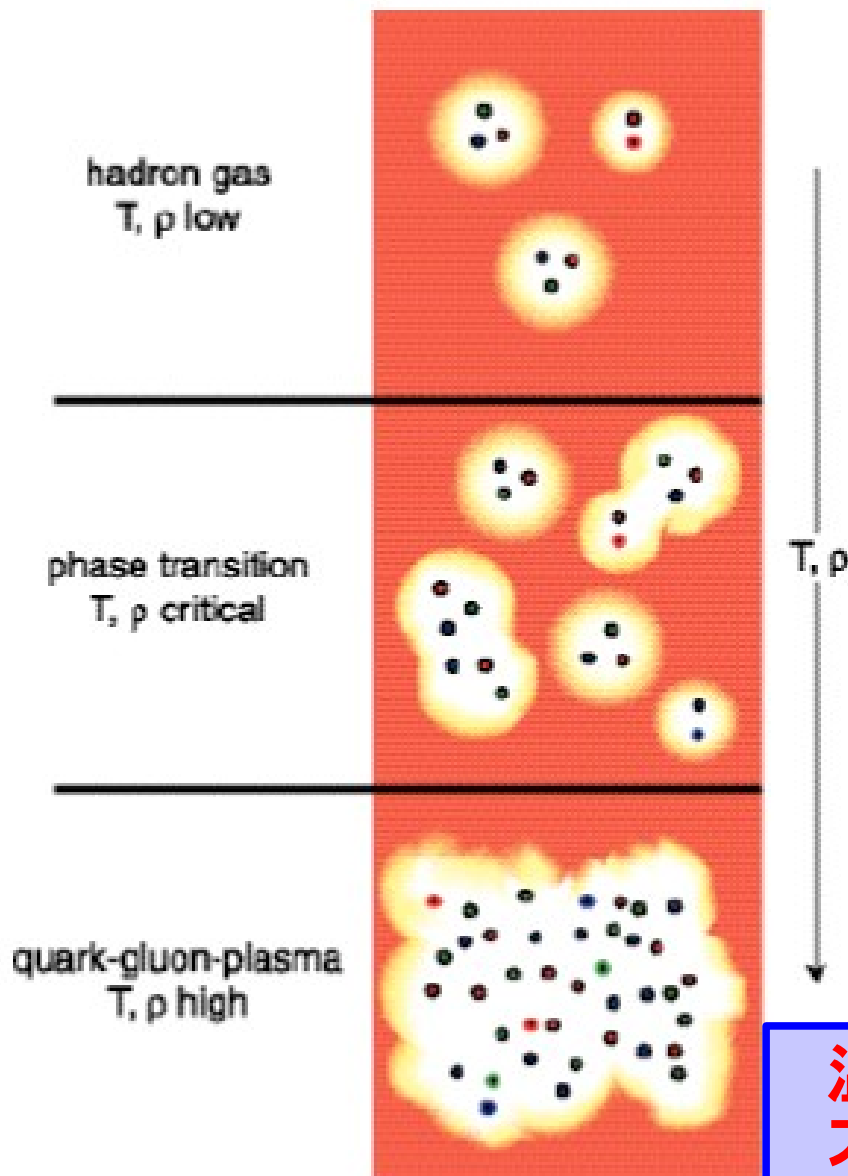
価クォーク



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」が凝縮！

なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？(I)



■ 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

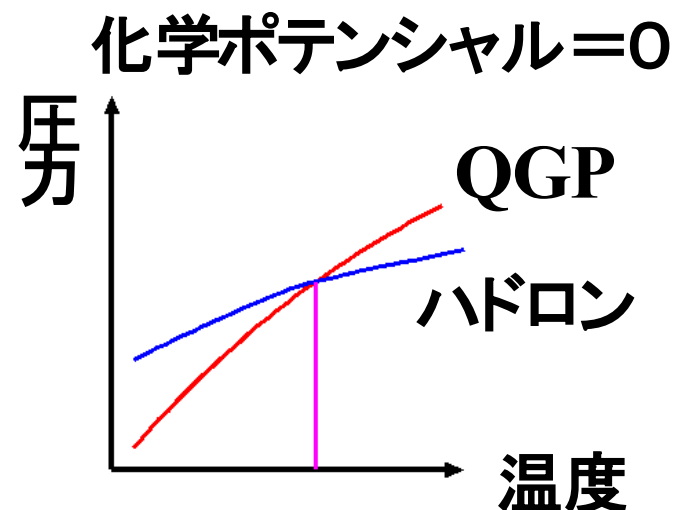
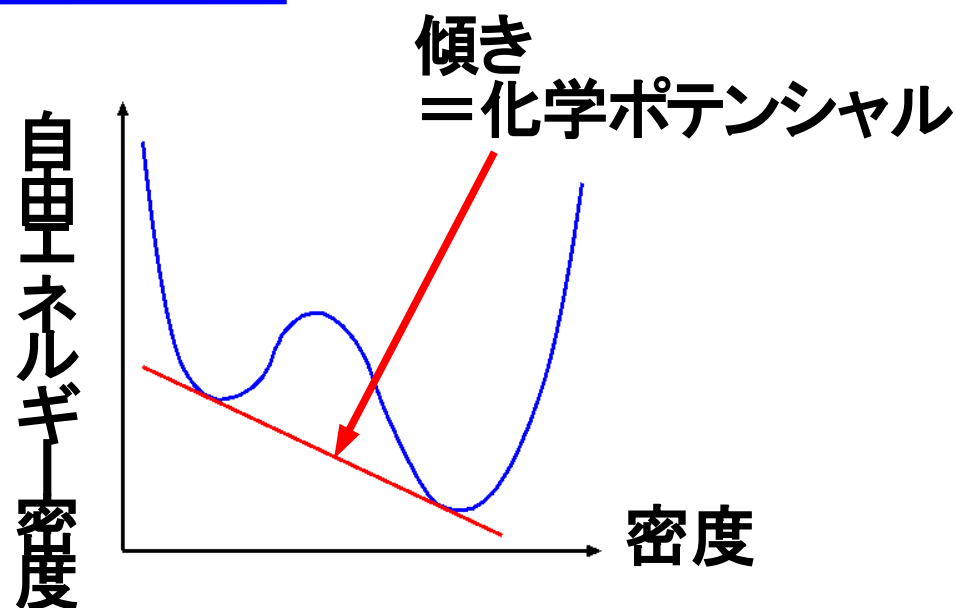
なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？(II)

■ 直感的理解

- 温度・密度の増加により、クォーク・反クォークの数が増え、ハドロンが「重なる」

■ 相転移とは何か？

- 2つの異なる状態の間で、温度、圧力、化学ポテンシャル（一粒子の作られやすさ）が等しい時、2つの状態は「相平衡」（自由エネルギーの2重接線）
- クォークの数と反クォークの数が等しい時、クォークの化学ポテンシャルは 0。
→ 圧力の大きな相が全体を占める！



なぜ高温でQGPへの相転移がおこるか？ (III)

- 質量0の粒子の大自由エネルギー = - (圧力)
→ ステファン・ボルツマン則 (T^4 に比例)

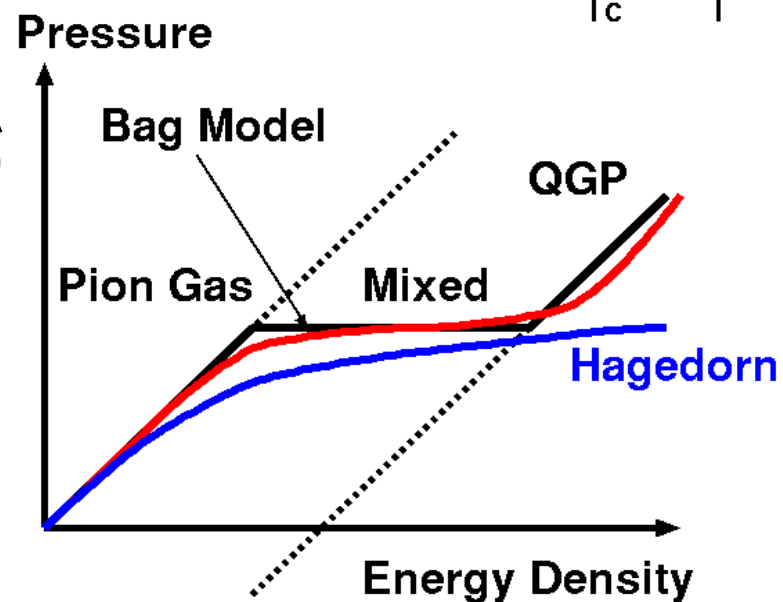
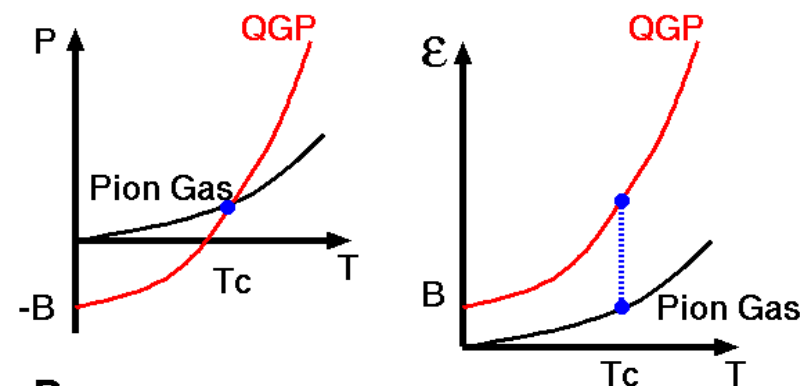
$$\Omega = -\frac{\pi^2 V}{90} \left(\sum_B g_B + \frac{7}{8} \sum_F g_F \right) T^4,$$

- ハドロン相 ~ 3種類の質量0の π 粒子

$$P_\pi = \frac{\pi^2}{30} T^4, \quad \epsilon_\pi = \frac{\pi^2}{10} T^4$$

- QGP ~ 質量0のクォーク・グルーオンと「真空」の負圧力

$$P_{QGP} = \frac{37\pi^2}{90} T^4 - B \quad \epsilon_{QGP} = \frac{37\pi^2}{30} T^4 + B$$



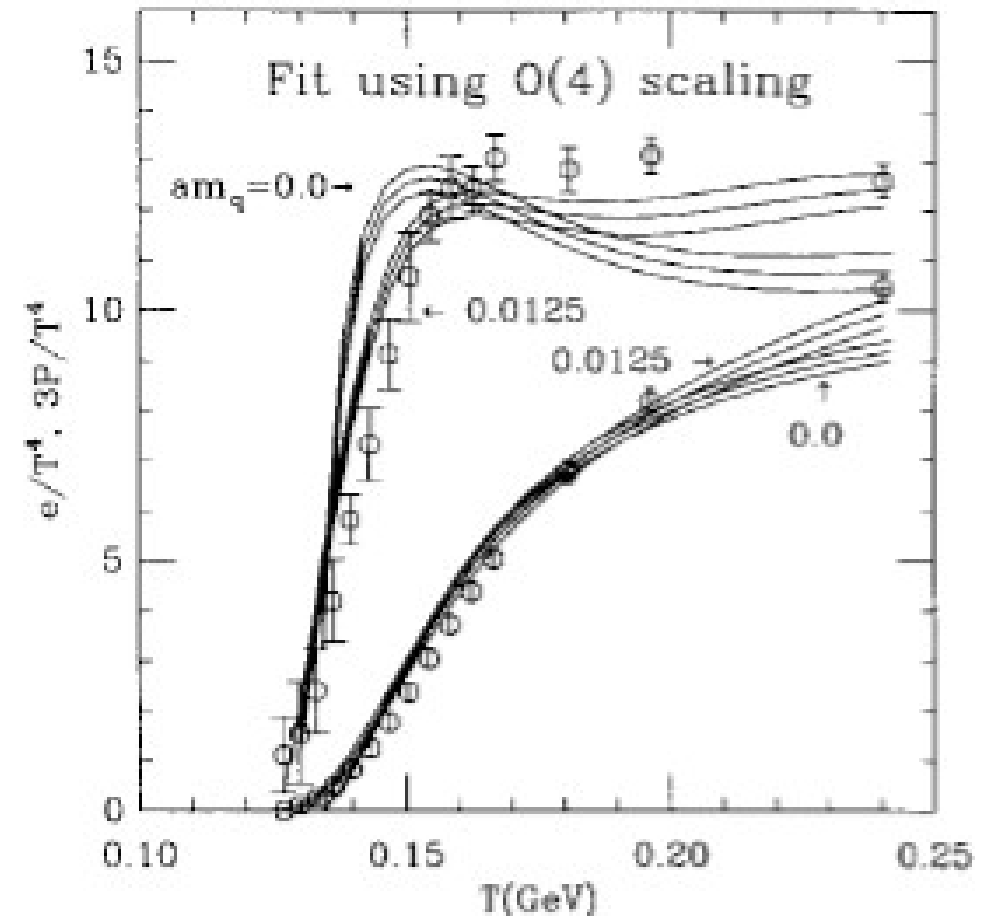
QGPへの相転移 = 自由度増加

$$DOF = 2(\text{spin}) \times 2(q, \bar{q}) \times 3(\text{color}) \times 2(\text{flavor}) \times \frac{7}{8}(\text{Fermion}) + 2(\text{spin}) \times 8(\text{color})$$

なぜ高温で QGP への相転移がおこるか？ (IV)

- 量子色力学 (QCD) に基づく第一原理計算
= 格子 QCD シミュレーション

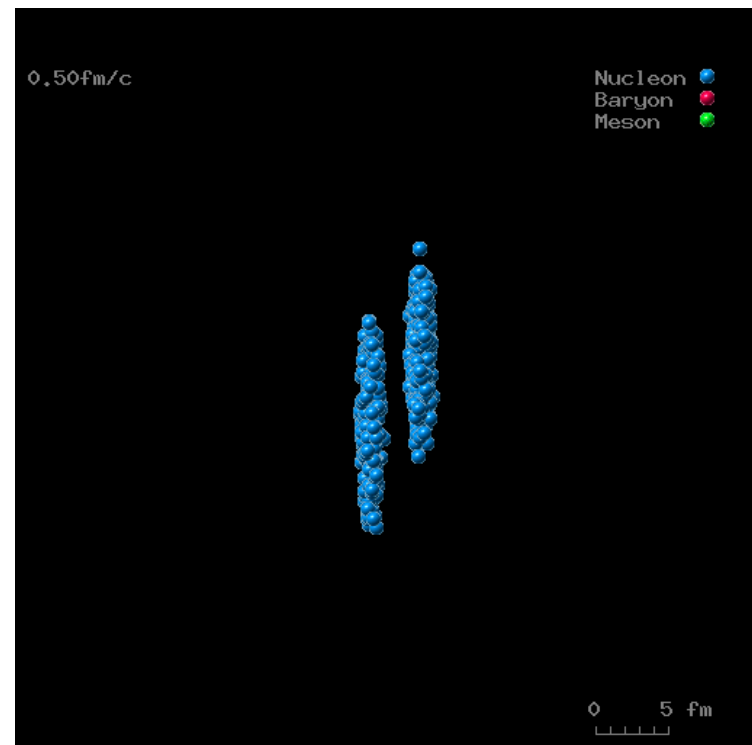
- 図: T4 で規格化したエネルギー密度と圧力
 - $T = 150\text{-}200$ MeV 程度で急激なエネルギー密度の変化
 - 圧力はやや滑らかに増加していく
- QGP への相転移



クォーク・グルーオン・プラズマを作るには？

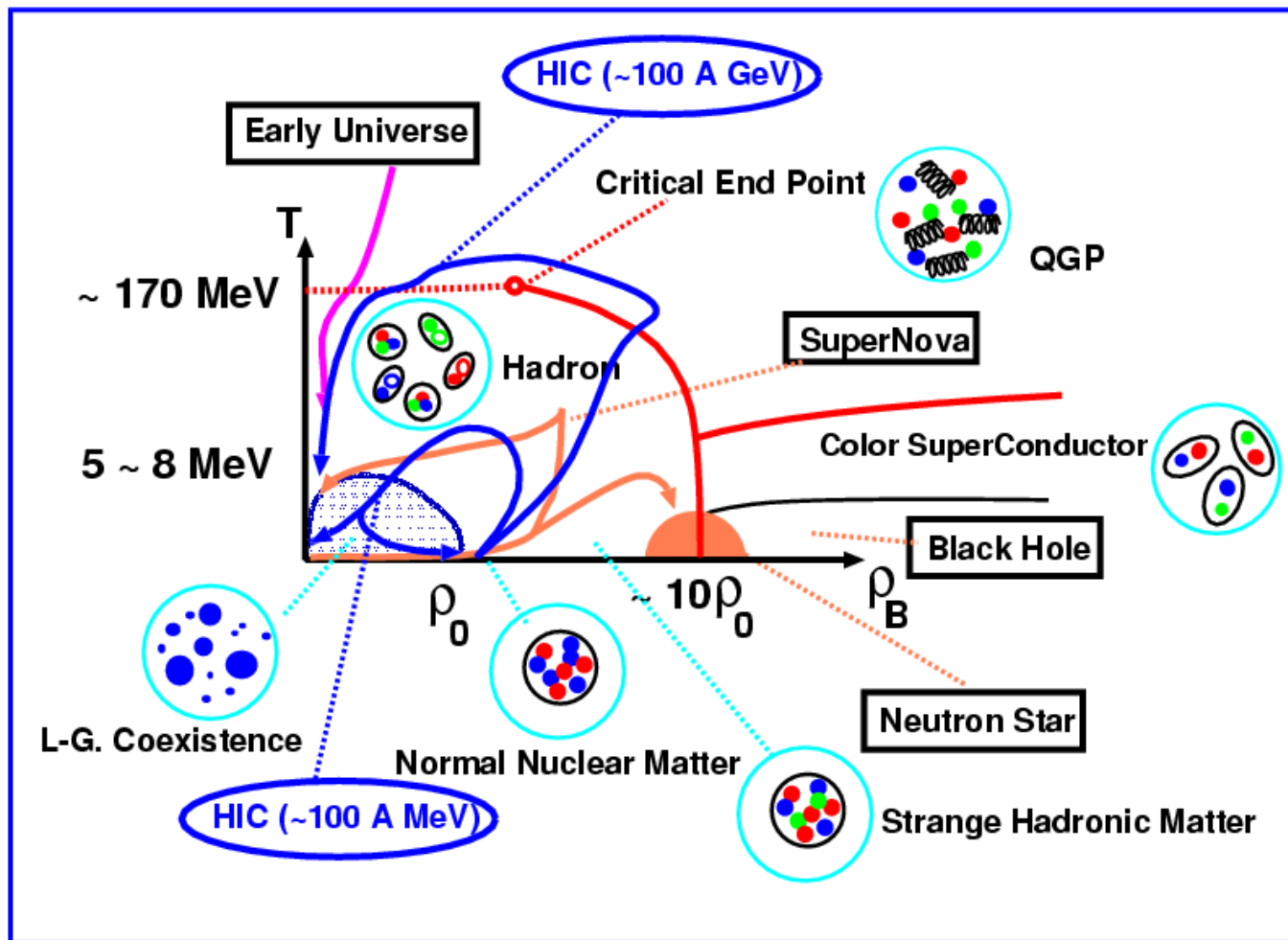
■ クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

- 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



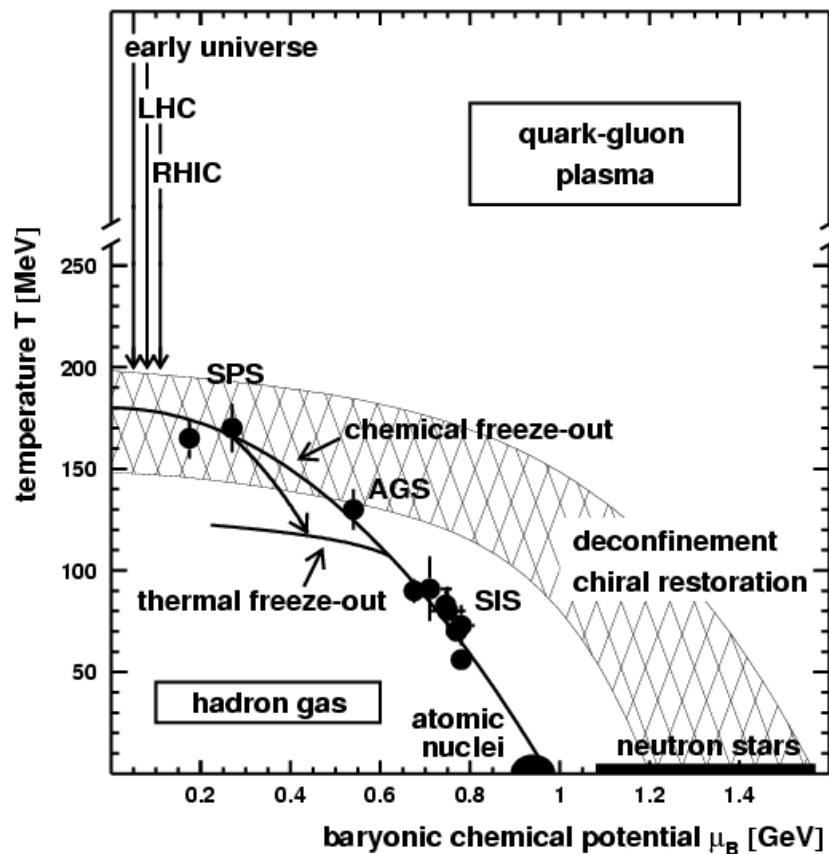
高エネルギー原子核反応での
QGP 生成
= 地上の “Big Bang” 再現実験

宇宙と地上でのクォーク物質相転移

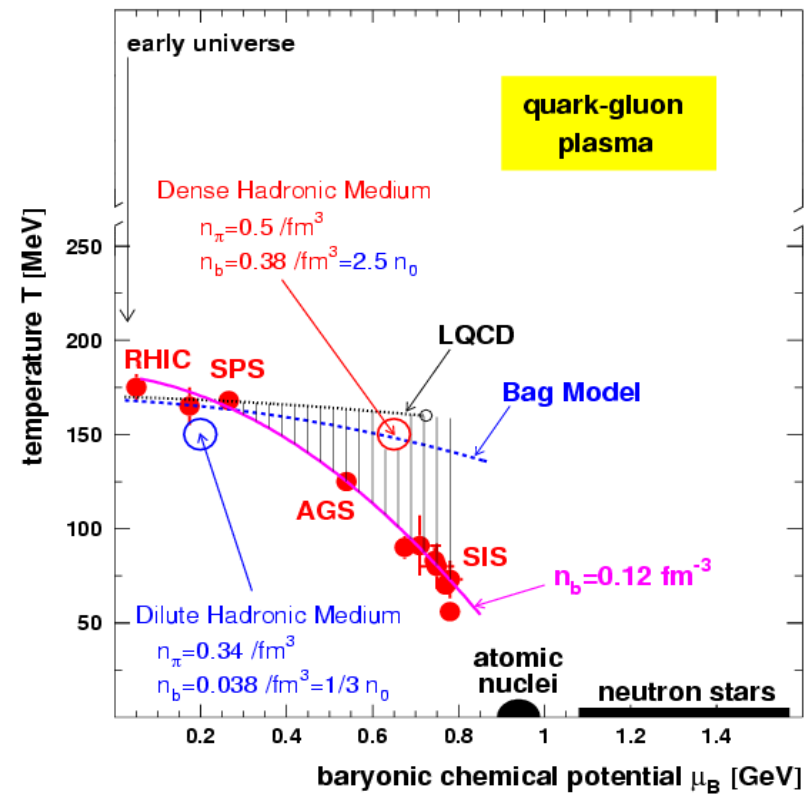


- QGP からハドロン相への相転移 (QCD 相転移) = この宇宙最後の「真空相転移」である！

実験ではどの温度まで見えているか？



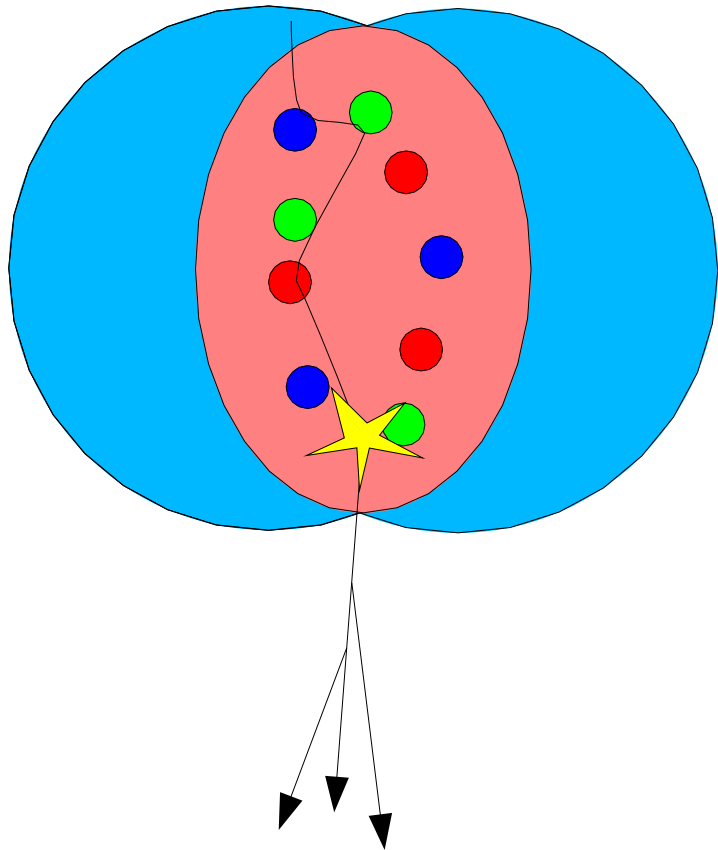
1998 (J. Stachel et al.)



2002 (Braun-Munzinger et al.
J. Phys. G28 (2002) 1971.)

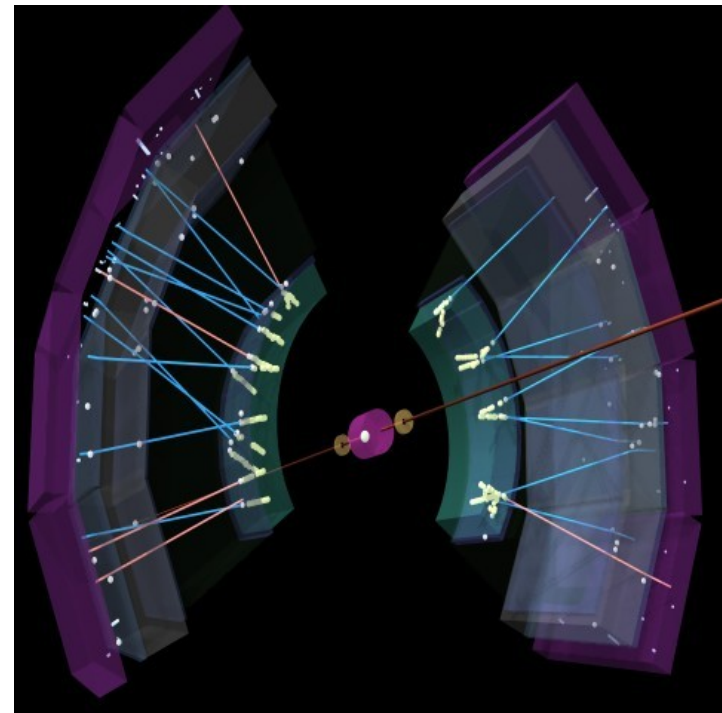
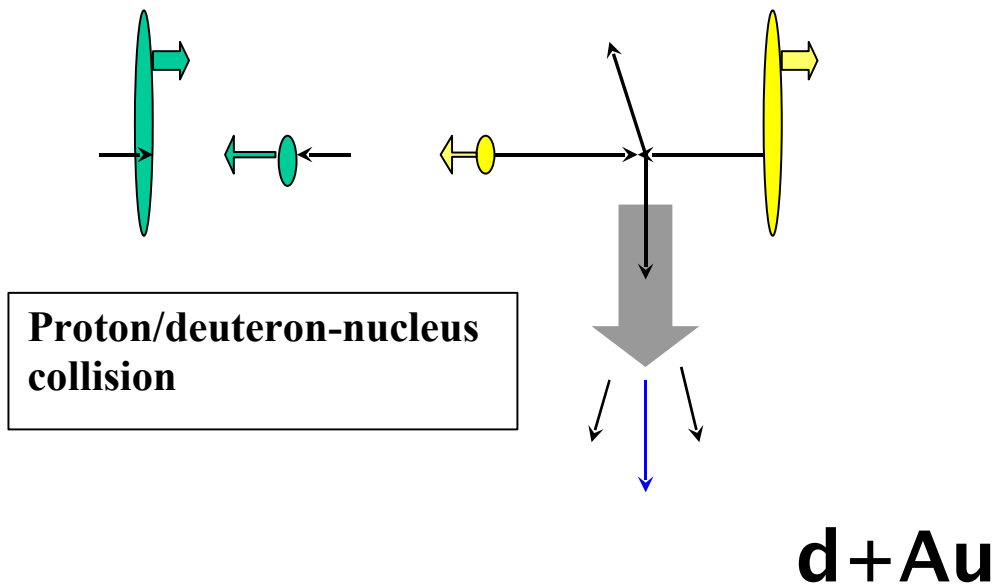
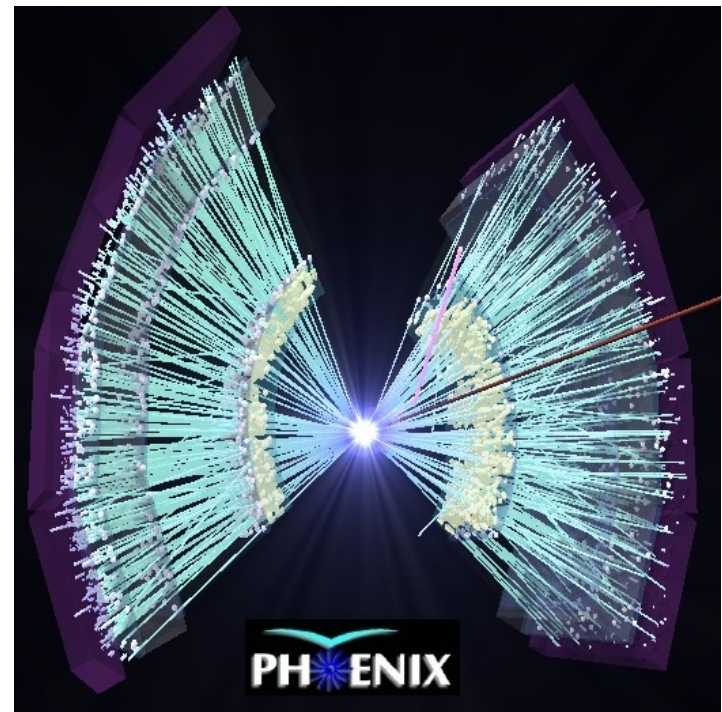
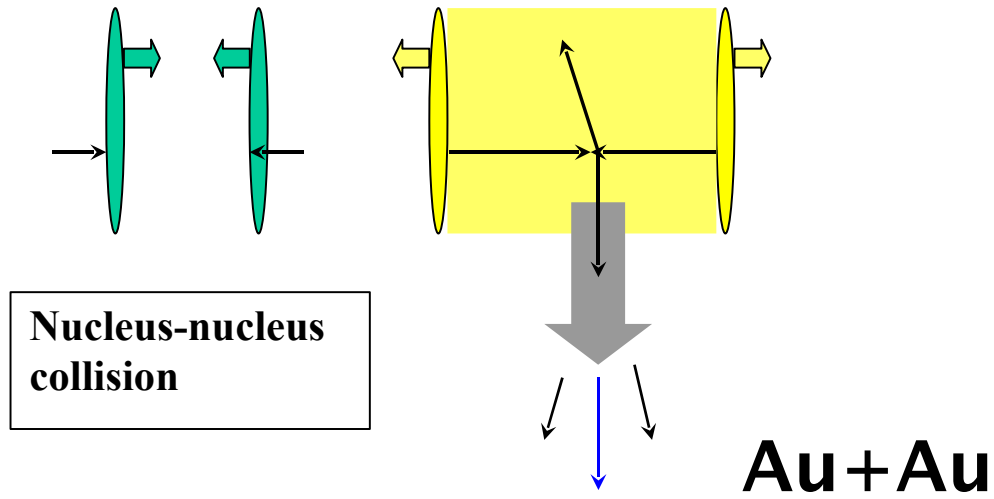
格子 QCD が予言する相転移温度と
非常に近い温度でハドロンが作られている！

QGP 生成の実験的証拠：ジェット抑制 (I)



- 物質中での粒子のエネルギー損失
 - 荷電粒子は電子を弾き飛ばしてエネルギーを損失(フェルミの理論)
 - 光は荷電粒子が分布していると散乱されやすい
(宇宙の晴れ上がり=原子の形成)
- クォーク、グルーオン
 - ハドロン相では色電荷が分布していないため、エネルギー損失小
 - 色電荷分布があれば、大きなエネルギー損失

by Esumi

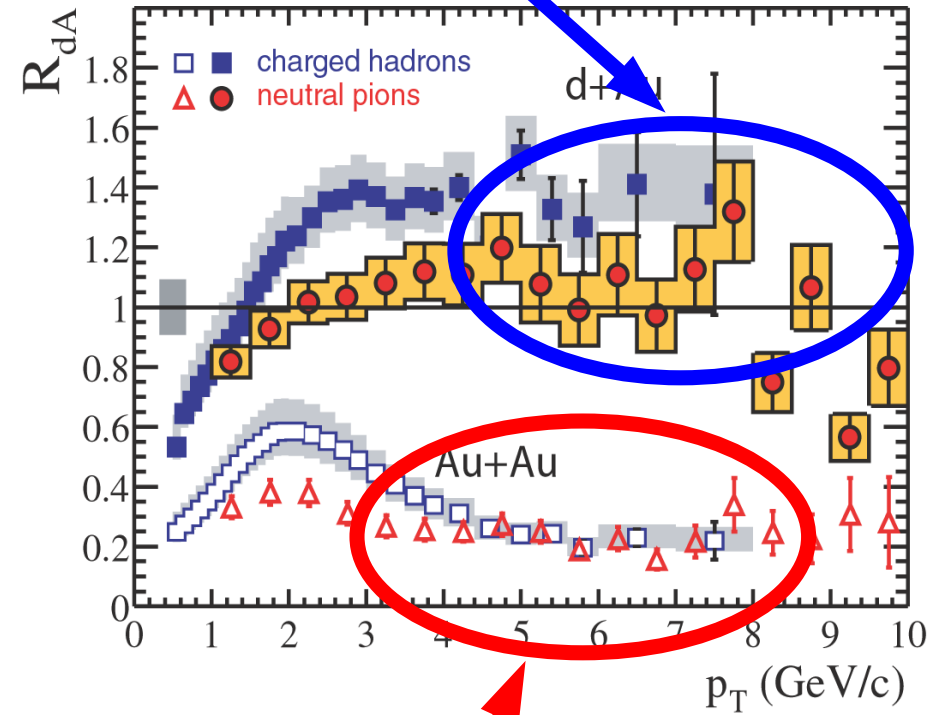


QGP 生成の実験的証拠：ジェット抑制 (2)

- 原子核抑制因子 R_{AB}
 = 核子同士の衝突の積み重ねを基準とした粒子放出確率
 $R_{AB} \geq 1$ (抑制なし)
 $R_{AB} < 1$ (抑制あり)

- 本当にジェット抑制は見えるか？
 - 大きな原子核衝突では Yes !
 - d+Au 衝突では No !
- エネルギー密度が大きくなったときにだけ、ジェット抑制が起こる
 → QGP の形成

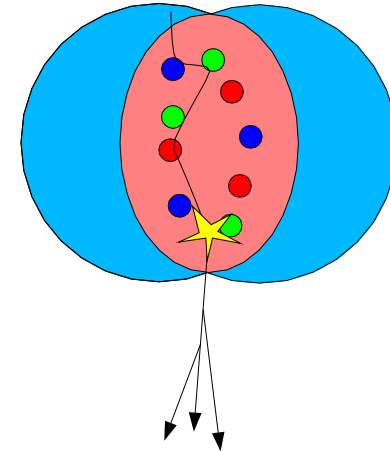
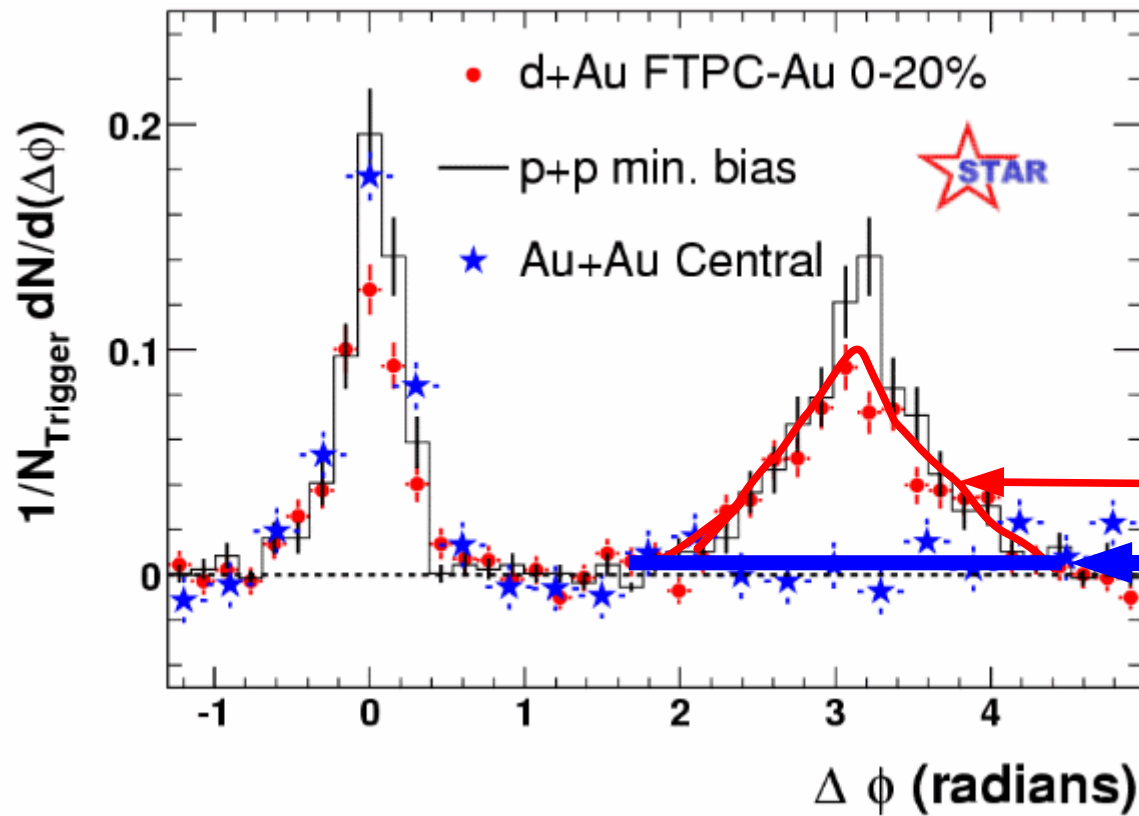
d + Au: Initial State Effects



Au + Au: Initial State + Final State Effects

$$R_{AB}(p_T) = \frac{d^2 N / dp_T d\eta}{T_{AB} d^2 \sigma^{pp} / dp_T d\eta}$$

QGP 生成の実験的証拠：ジェット抑制 (2)



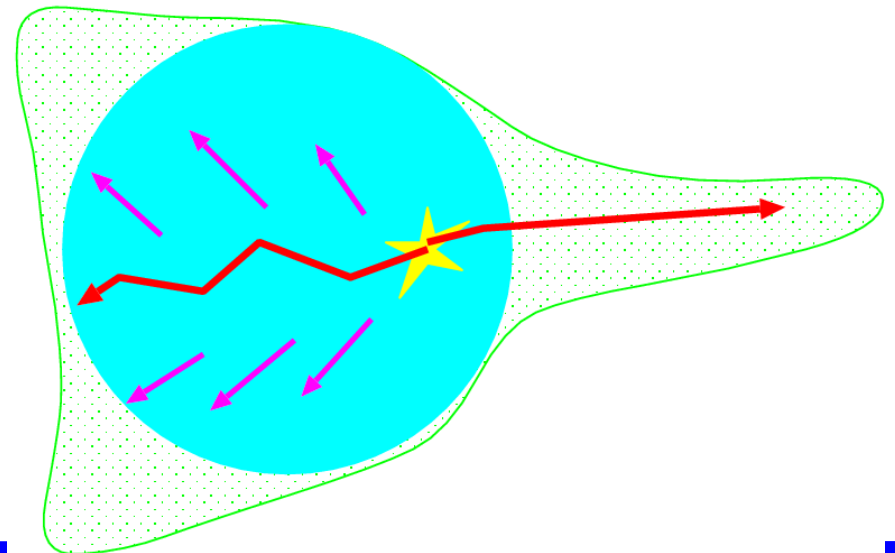
d + Au: Backward Peak
Au + Au:
No Backward Peak

STAR

ジェットが抑制されると、裏側の相関が見えなくなる
→ ジェットが一本しか見えない

失われたエネルギーはどこへいった？

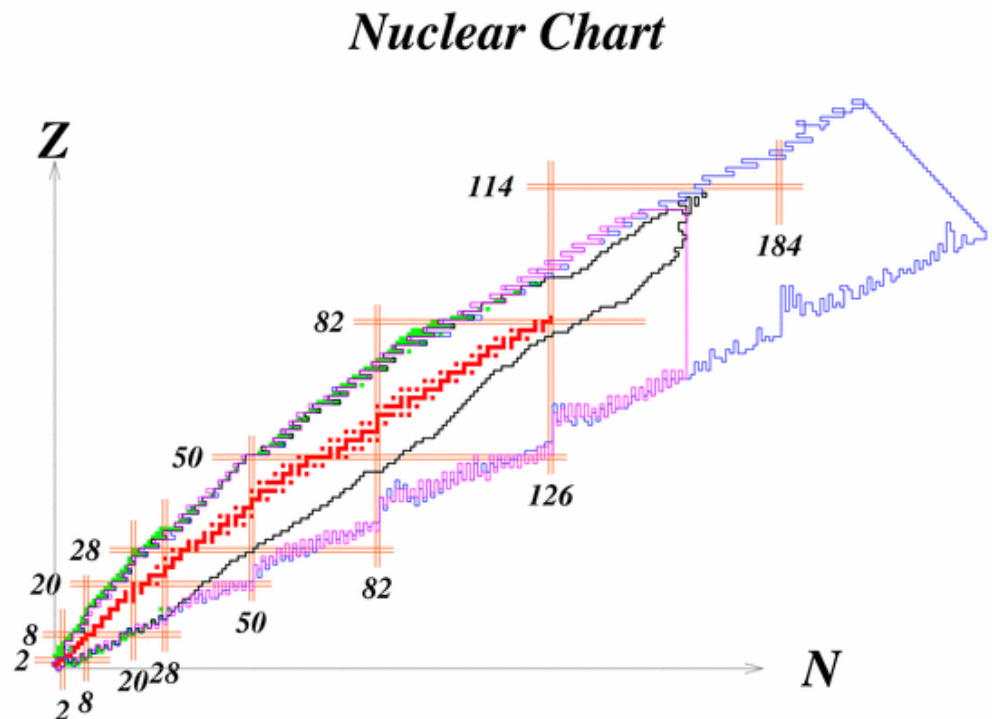
- Backward Peak の消失
 - 媒質に 10 GeV オーダーのエネルギーを供給
 - 熱平衡化？ 集団運動？
- 最近の実験データ (2005 ~)
 - 180 度より小さい角度にエネルギーがより多く放出されている
 - **ジェットによる衝撃波生成**
 - QGP の「音速」($v^2 = d\varepsilon/dp$) 測定の可能性



周期表にジャポニウムが加わるか？
--- 超重元素の合成 ---

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)

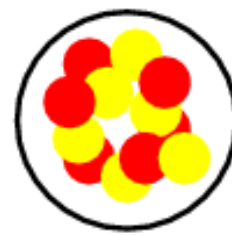


自然界に存在しない原子核

- 中性子過剰核：陽子に比べて中性子がずっと多い
- ハイパー核：陽子・中性子のほかに、新しい種類のクォーク(ストレンジクォーク)を含む粒子が入る

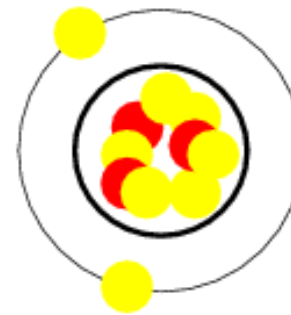
- 超重核：ウラン($Z=92$) 通常の原子核

より原子番号の大きな元素の原子核
→ 発見(生成)すると周期律表に名前が残る。
(ノーベリウム、フェルミウム、カリフォルニウム、現在は「人名」はつかない。)



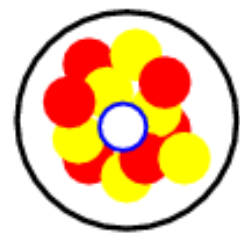
$$Z = N$$

中性子過剰核



$$Z \ll N$$

ハイパー核

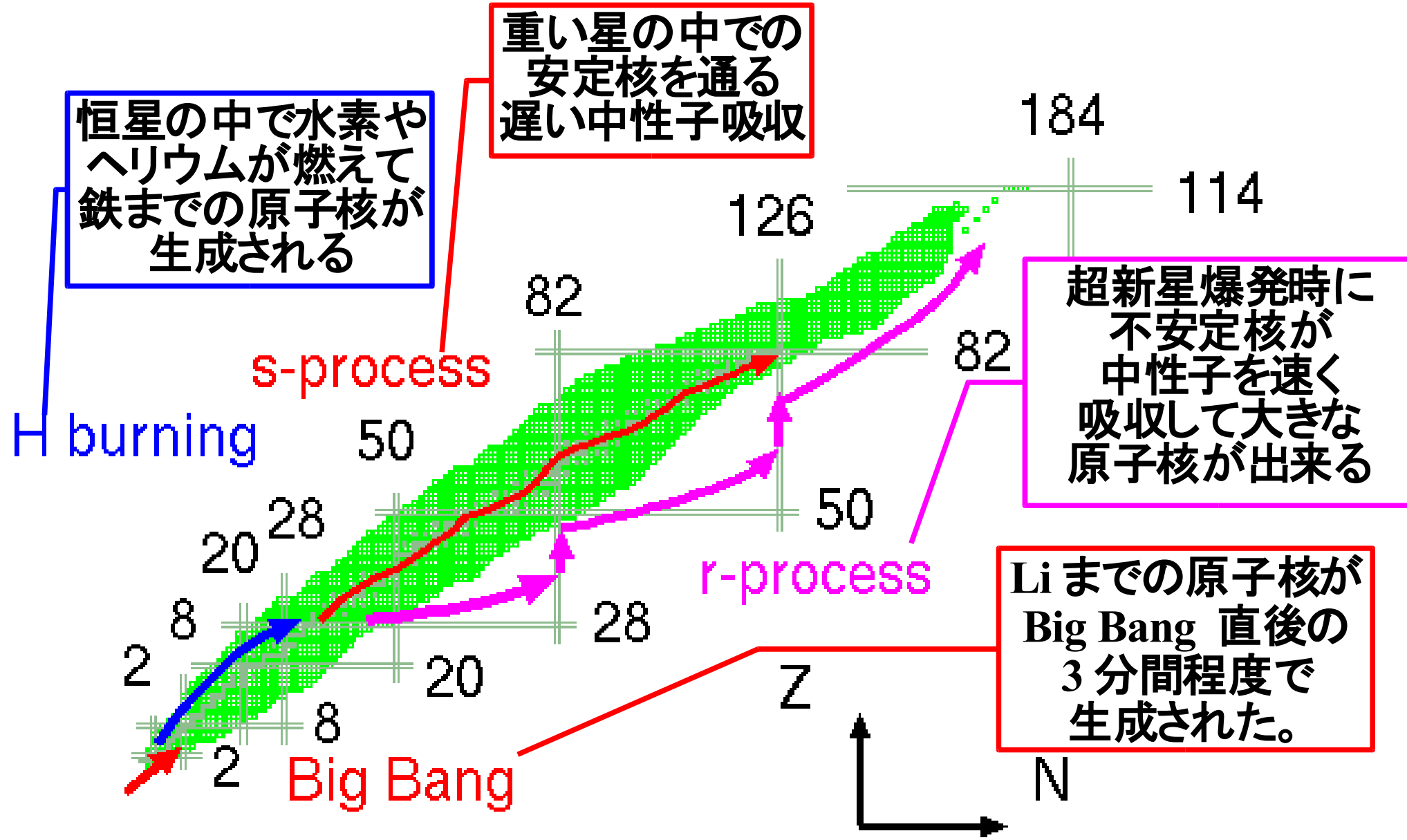


$$S \neq 0$$

陽子 ●
中性子 ●
超核子 ○
(ハイペロン)

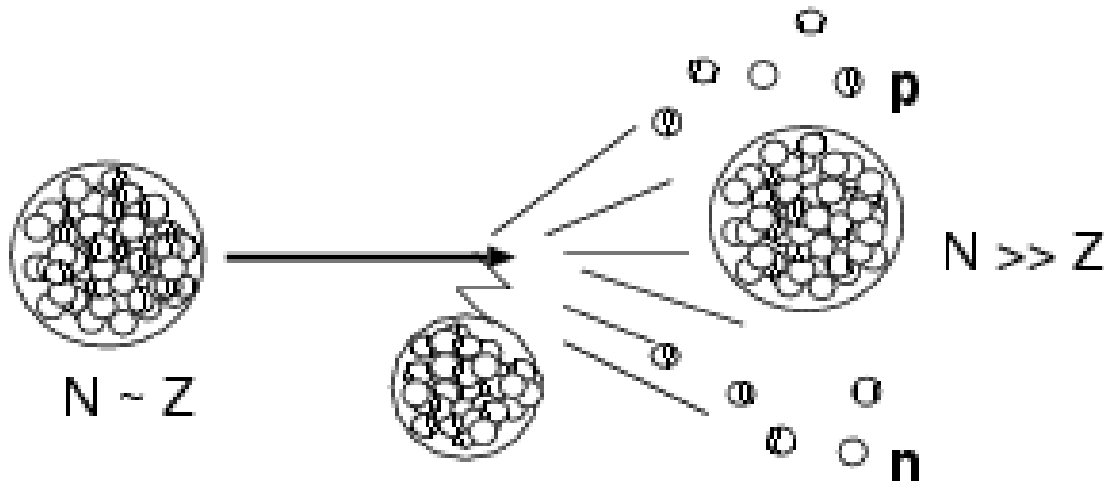
陽子数 Z
中性子数 N
ハイペロン数 $-S$

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



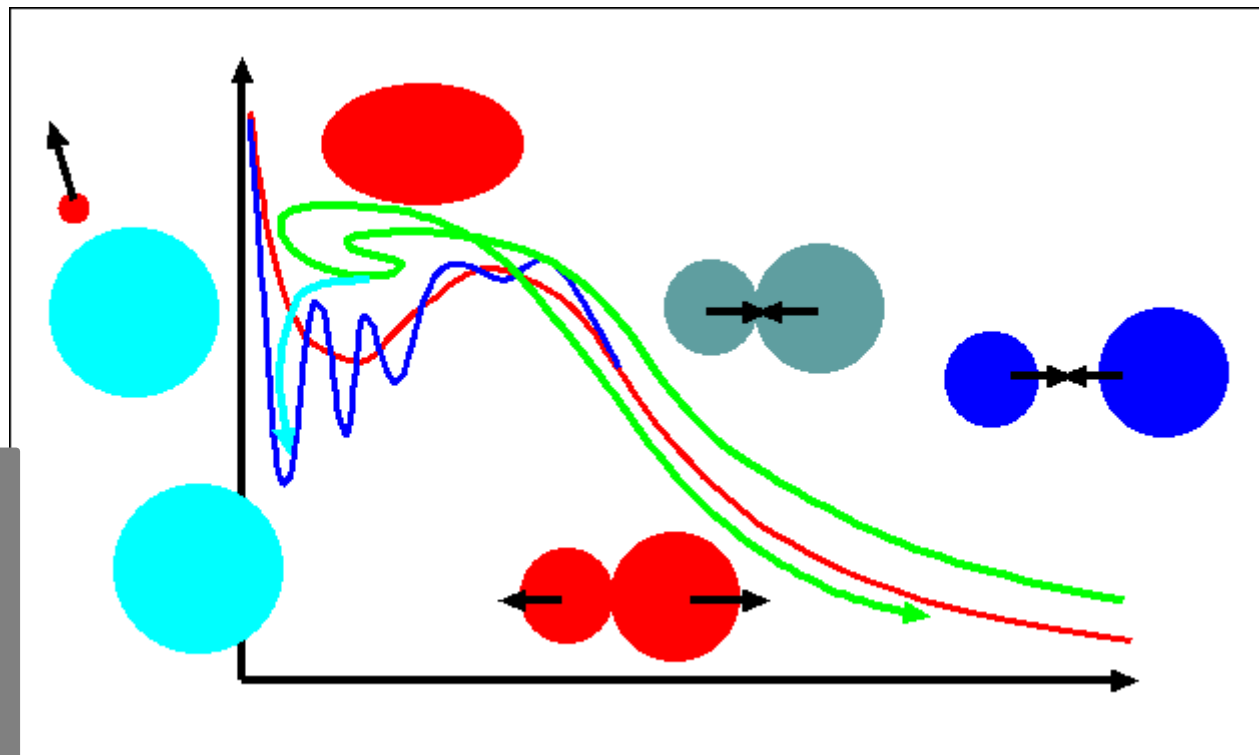
原子番号 $Z=113$ の新元素の発見

- 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？
 - ウランより陽子数の大きな原子核は、少しのエネルギーですぐに核分裂してしまう。
 - 陽子数の大きな原子核を融合させるためには、高いクーロン障壁を超えるエネルギーで衝突させなければならない。
→ もっとも適したエネルギーは？
生成確率が少ないので、強いビームと敏感な観測器が必要

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
- 中性子を放出して冷却 → 量子効果（殻効果）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

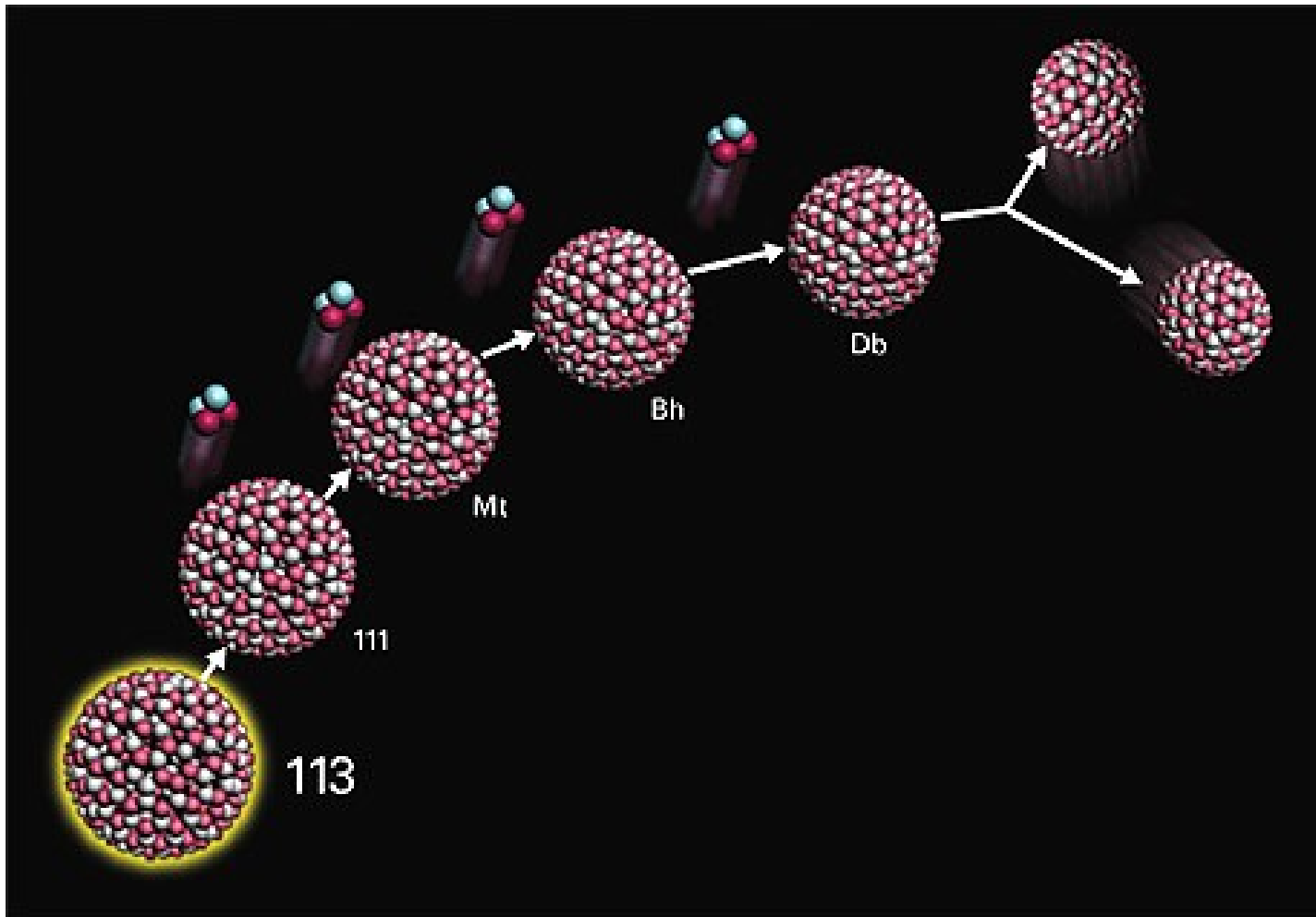


超重核探索

= 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

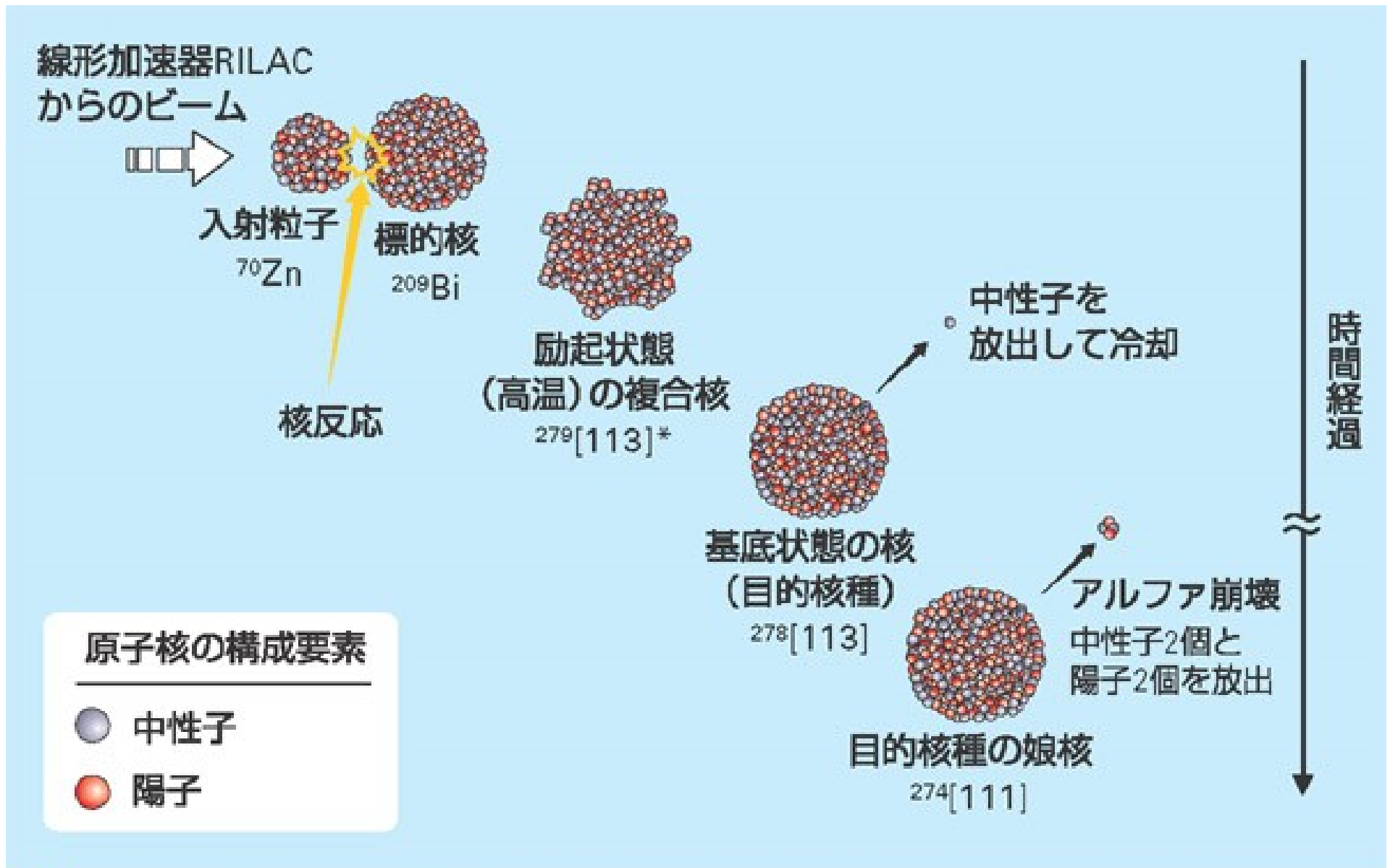
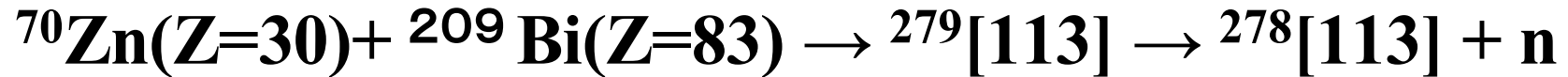


図1 原子番号113元素の合成と崩壊連鎖

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

- ジャポニウム？
ニッポニウム？
リケニウム？

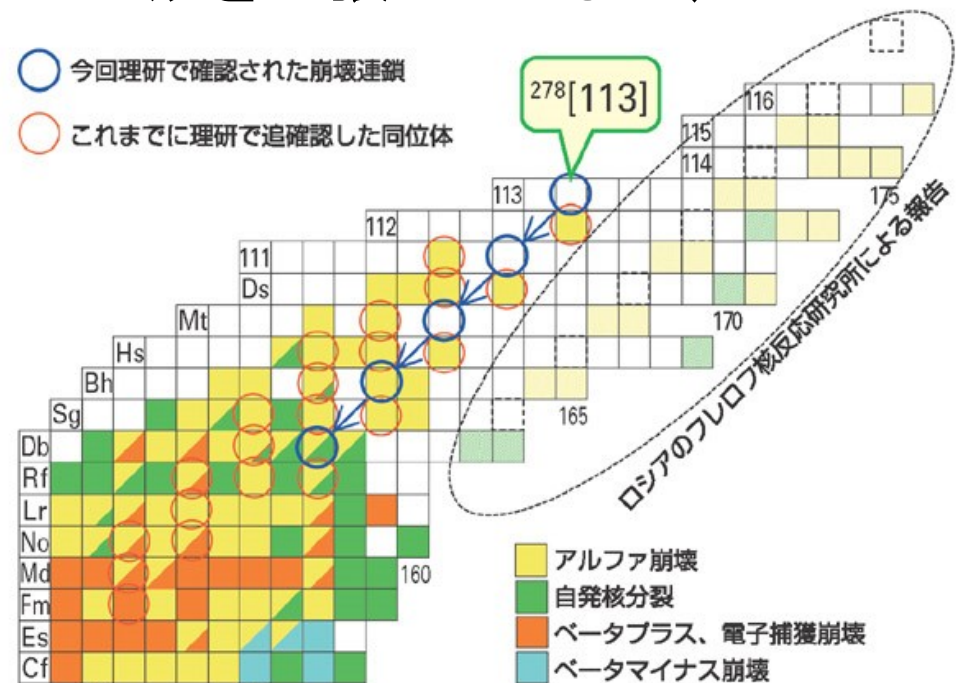


図3 核図表の終端部分
核図表とは、原子核の陽子数（原子番号）を縦軸とし、中性子数を横軸にして表示したものを。

超重元素生成はなぜ難しいか？

■ 超重元素生成の問題点

- Z が大きな核ではクーロンエネルギーが大きい。
→ 融合せずに跳ね返る、すぐに核分裂する。

→ 核分裂をいかにおさえるか？

■ 提案されている超重元素生成の機構

- Cold Fusion (ドイツ、理研) : できるだけ低いエネルギーで反応を起こし、1個の中性を放出してエネルギーを奪い、核分裂を抑える
- Hot Fusion (ロシア、日本(理論)) : 比較的高いエネルギーで反応を起こし、摩擦によりエネルギーを損失させ魔法数効果により安定させる

→ いずれにせよ「中性子過剰核ビーム」を用いて
速く中性子を放出させて冷やすことが重要！

まとめ

- 原子核物理学における最近の話題のうち、2つについて解説
 - 「クォーク・グルーオン・プラズマの生成」
 - 「超重元素の生成」
- クォーク・グルーオン・プラズマ
 - QGP への相転移 = 自由度変化
 - QGP は作られているようだ。その物性はまだまだ？だらけ。
- 超重元素
 - 欧米以外で初めての超重元素生成に成功
 - 宇宙での重い元素の生成機構解明に光
 - 現在建設中の加速器により、超重元素を含む 1000 個程度の新しい原子核が作られる予定
(これまで見つかっている原子核 = 約 2000 種類)
- 実験・理論ともに研究対象を広げている。

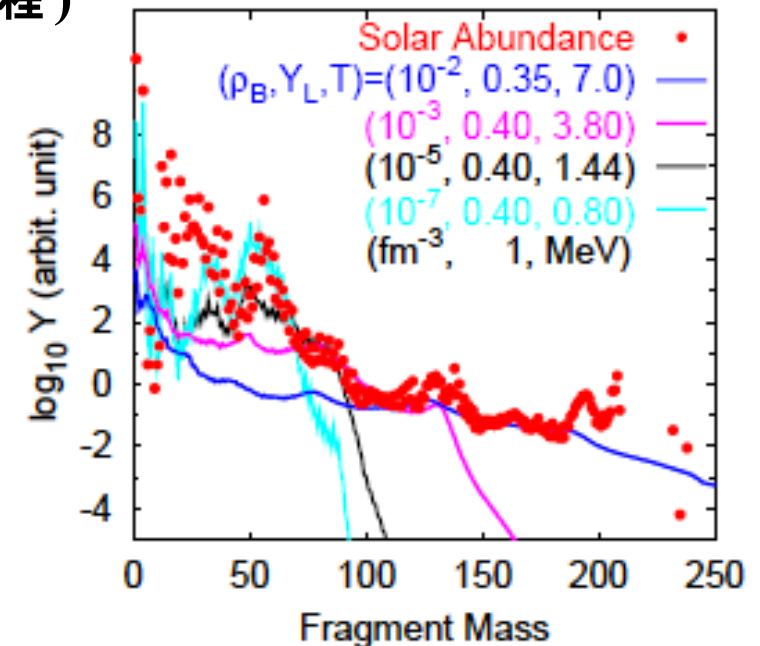
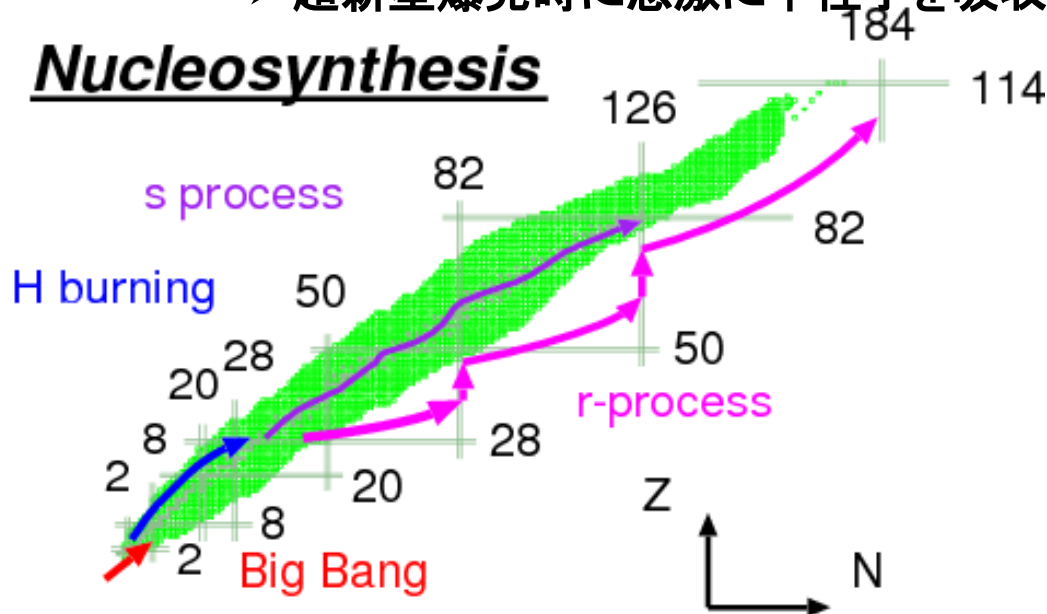
レポート

- 専門が物理でない学生：
講義の感想 (2 行以上) + 下の問題のうち 1 問
- 専門が物理の学生 (量子物理学、宇宙物理学の素核宇)：
講義の感想 (2 行以上) + 下の問題のうち 2 問
 - 化学ポテンシャルが 0 の場合、質量 0 の自由粒子において エネルギー密度、圧力が T^4 に比例することを示せ。
 - 宇宙初期で非常に温度が高かった場合には、「質量 0」とみなせる粒子にはどのような種類があったと考えられるか述べよ。
 - 我々の体をつくる様々な元素は、宇宙のどこでつくられたか？ 元素を大まかな種類に分けて答えよ。
 - 超重元素生成の科学的意義、社会的意義について答えよ。
 - 太陽系を構成している元素の比から、宇宙の歴史について何が分かるか？

Backup

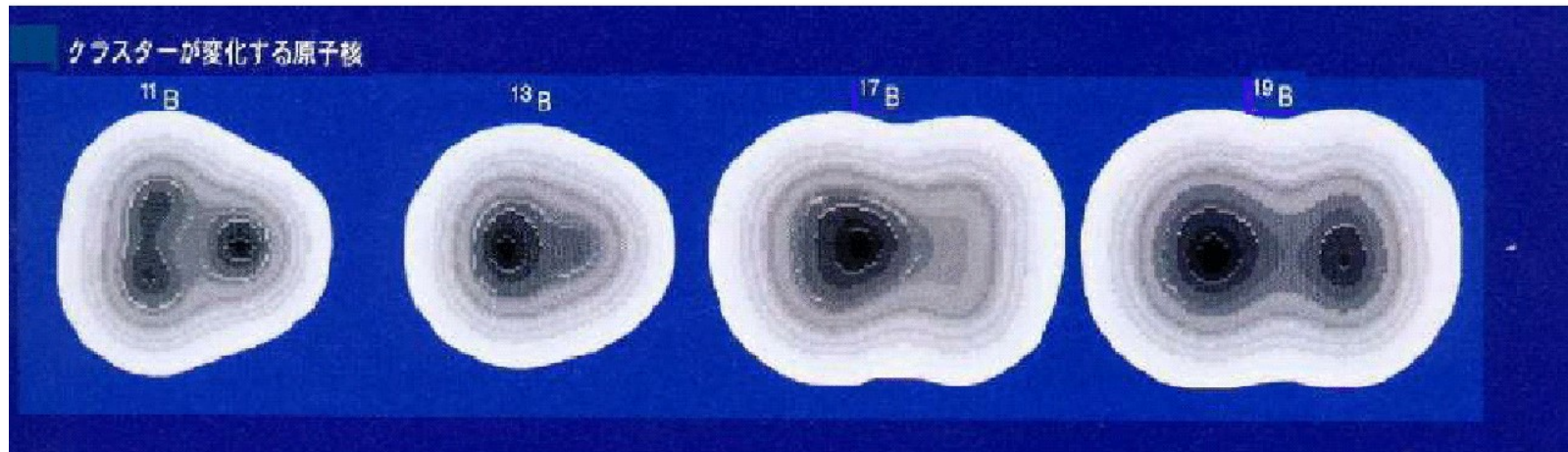
宇宙の物質循環

- 宇宙の物質進化: 重力エネルギーを利用して核反応を起こし、組成を変化させる。
 - 初期宇宙: Li までの原子核
 - 恒星中: 水素、ヘリウムの燃焼により 鉄までの元素を生成
 - 重い元素
 - 大質量星においてゆっくり中性子を吸収 (s-過程)
 - 超新星爆発時に急激に中性子を吸収 (r-過程)



有限量子多体系

- 様々な形、離散・融合クラスター構造、超変形核、.....

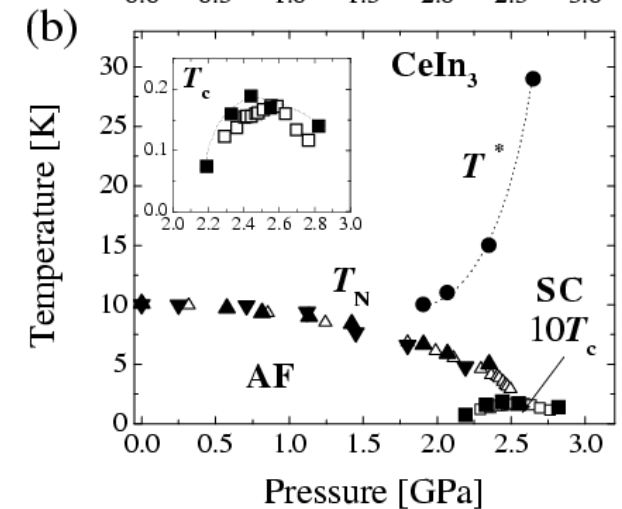
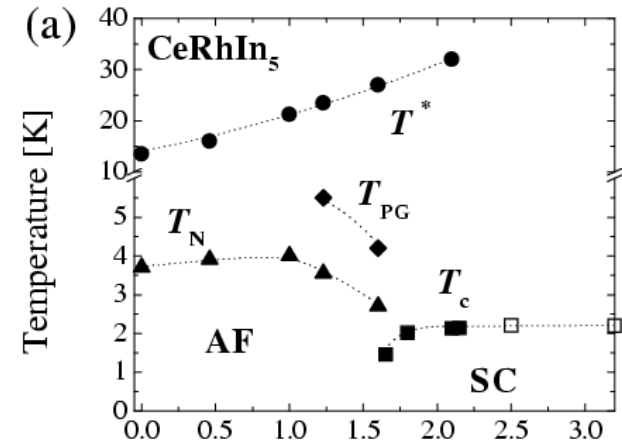
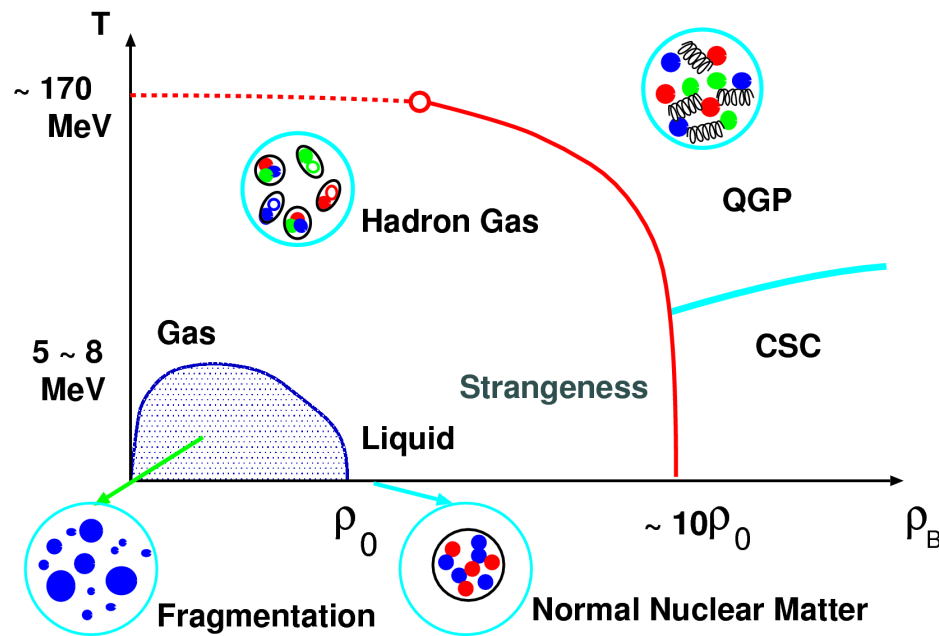


- 束縛・共鳴・散乱状態
 - 量子化学との「計算の精密さ」を競い合う枠組み開発
 - フェルミオン、ボソンの凝縮
 - 核子のペアリング相互作用 (BCS より早い！)
 - α 粒子のボーズ・アインシュタイン凝縮
- BEC、BCS のクロスオーバー

ハドロン物質の相転移

2 種類の相転移

- QCD 相転移:
クォーク・グルーオンからハドロンへ
→ 超伝導物質と類似の相構造
- 液相・気相相転移:
核子から原子核へ



(Kawasaki et al., cond -mat/0110620.)

粒子の新しいカテゴリー
Penta Quark

Penta Quark (1): 背景

■ 20世紀での「真実」

- 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

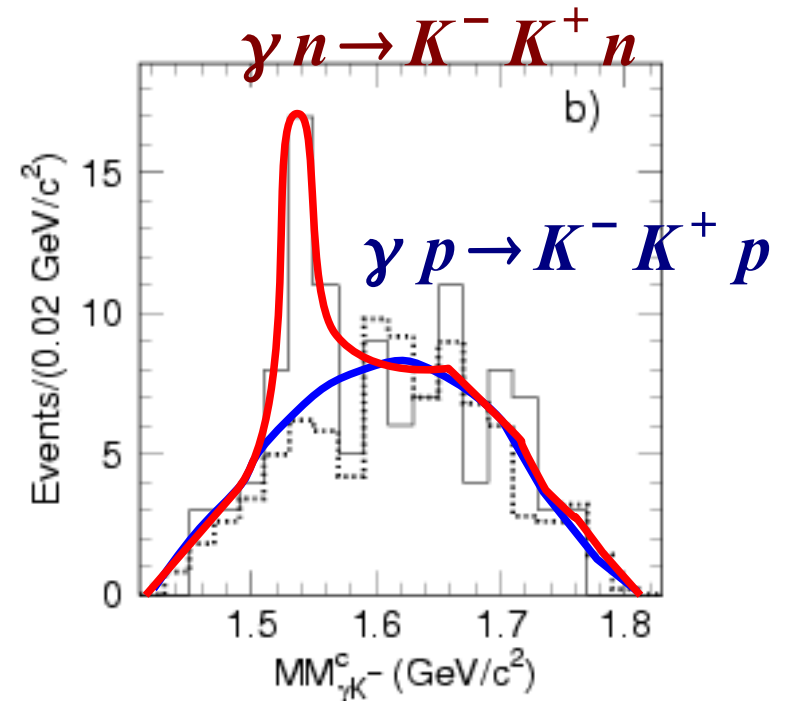
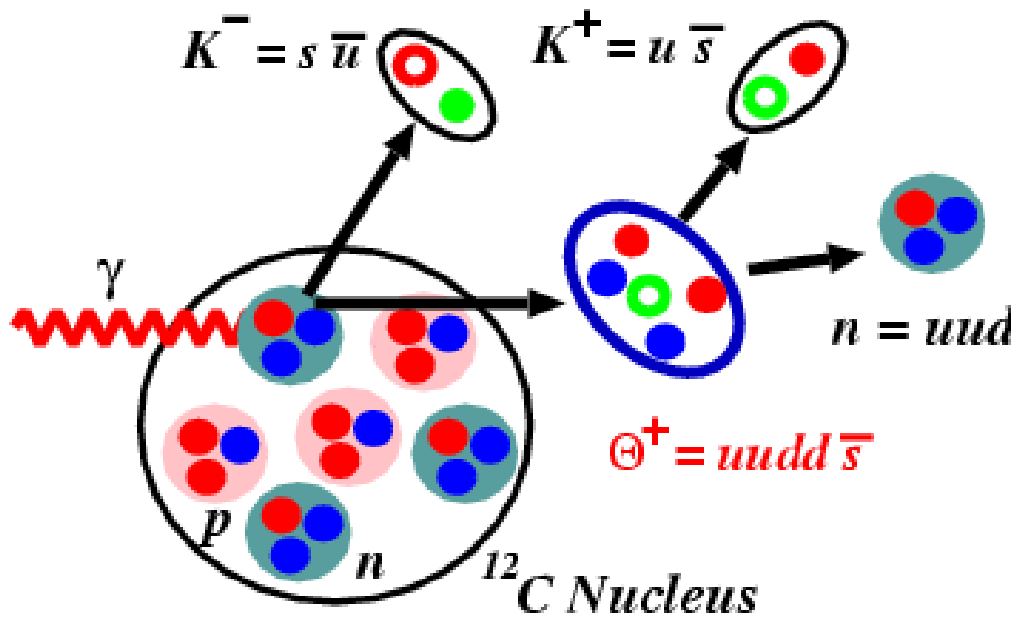
- クォーク(反クォーク)5個からなる粒子(ペンタクォーク)が見つかった。(大阪大学・核物理研究センター、SPring8)

Penta Quark (2): 発見

■ ペンタクォーク発見の実験 (LEPS @ SPring8)

- 高エネルギーの光を中性子に当てて、5クォーク状態(3クォークでは表せない状態)を作って崩壊過程を観測。

$$\gamma + n \rightarrow K^- + \Theta^+, \quad \Theta^+ \rightarrow K^- + n, \quad \Theta^+ = uudd\bar{s}$$



T. Nakano et al.(LEPS Collab.)Phys.Rev.Lett.91 (2003)012002.

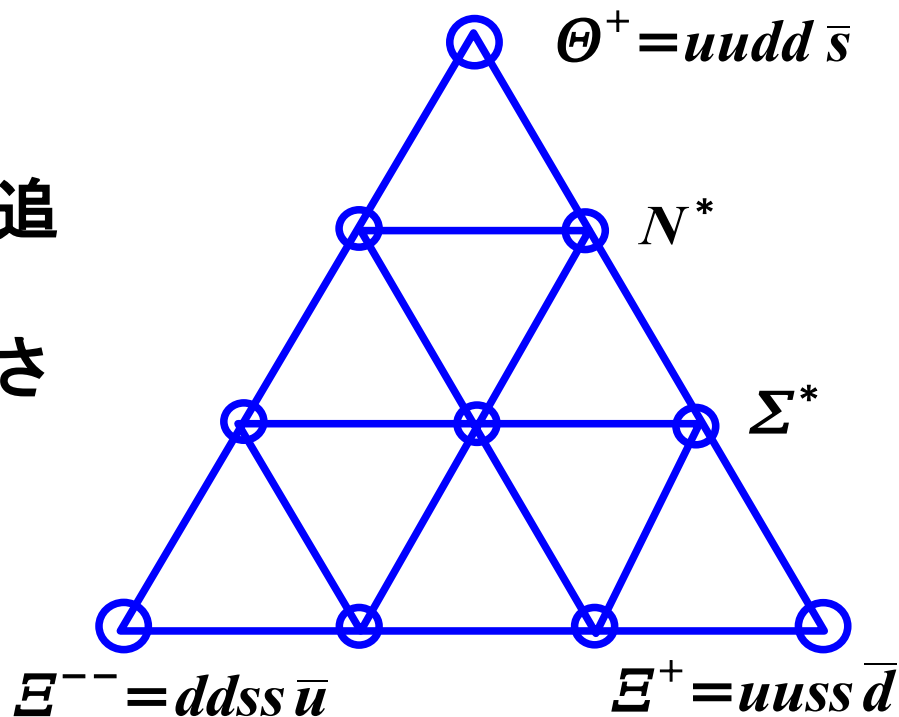
Penta Quark (3): 意義

■ ペンタクォーク発見の意義

- 30年ぶりの「新種」の粒子発見 (予想外！)
- 世界中の加速器で日本の実験を追試、再確認
- 他の「ペンタクォーク」状態も预言されており、発見された。
- 質量・寿命が現存の理論で説明不可能

■ 「素粒子」の種類

- レプトン(電子、ニュートリノ等)、ゲージボソン(光、弱ボソン)クォーク
- ハドロン: バリオン、中間子



ハドロン分光学のルネッサンス
エキゾチックハドロン探索の創始

ペンタクォーク

Penta Quark (4): 問題点

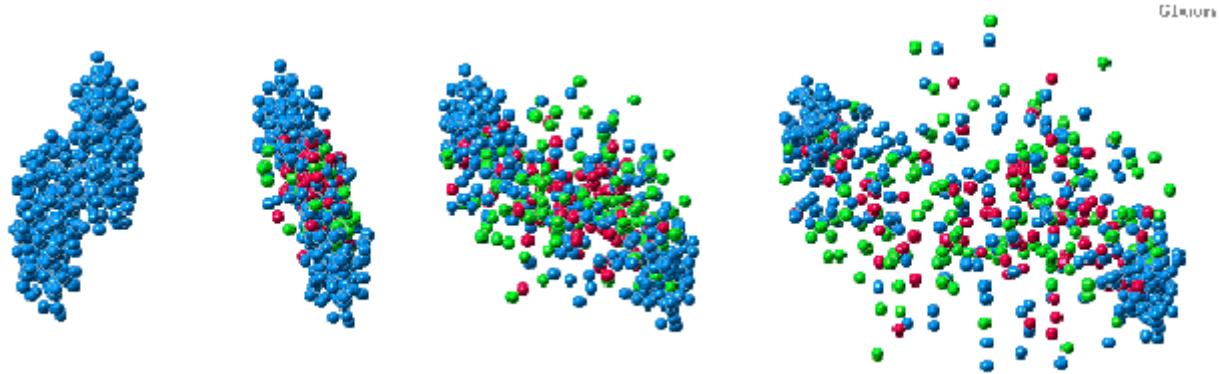
- 5 クォーク状態としては質量が小さく、幅が狭い。
 - 現時点では理論的に説明できない
Lattice QCD → 連続状態のみが見えている
非相対論的なクォーク模型 → 500 MeV も質量大
→ Missing Key は何か？
- 実験的な状況: 実験グループによる矛盾
 - SPring8 での実験: $\gamma + d \rightarrow \Theta^+ + \Lambda(1520)$ 反応において明確なピーク
 - KEK での実験: $K^+ + p \rightarrow \pi^+ + \Theta^+$
明確なピークはないが、盛り上がりはある。
 - JLab での実験: 実験の統計を上げるとピークが消えた。

より多くのデータと革新的な理論的發展が必要

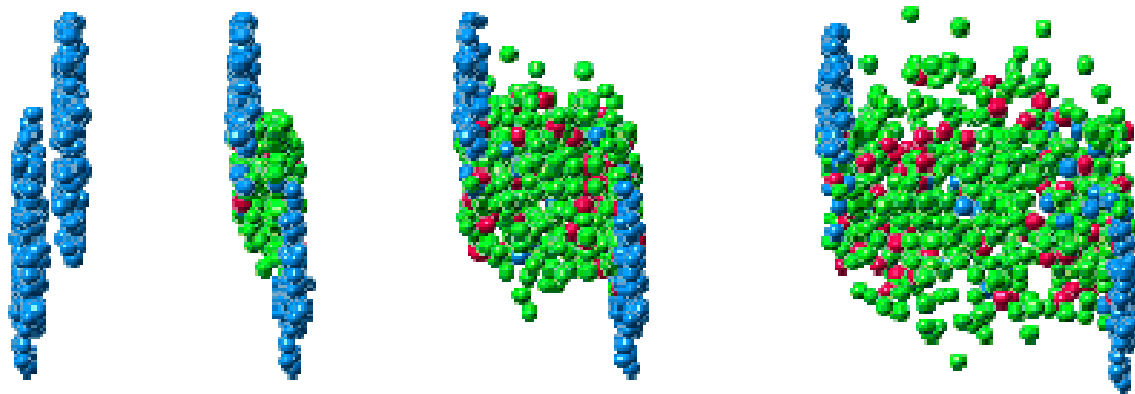
高エネルギー重イオン反応と QCD 相転移

JAMming on the Web <http://nova.sci.hokudai.ac.jp/~ohtsuka/>

AGS



SPS



High Energy Heavy-Ion Collision Experiments

- 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 (2004(?)-): 3 + 3 A TeV

