

# 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  
北海道大学・大学院理学研究科・物理学専攻

# 目次

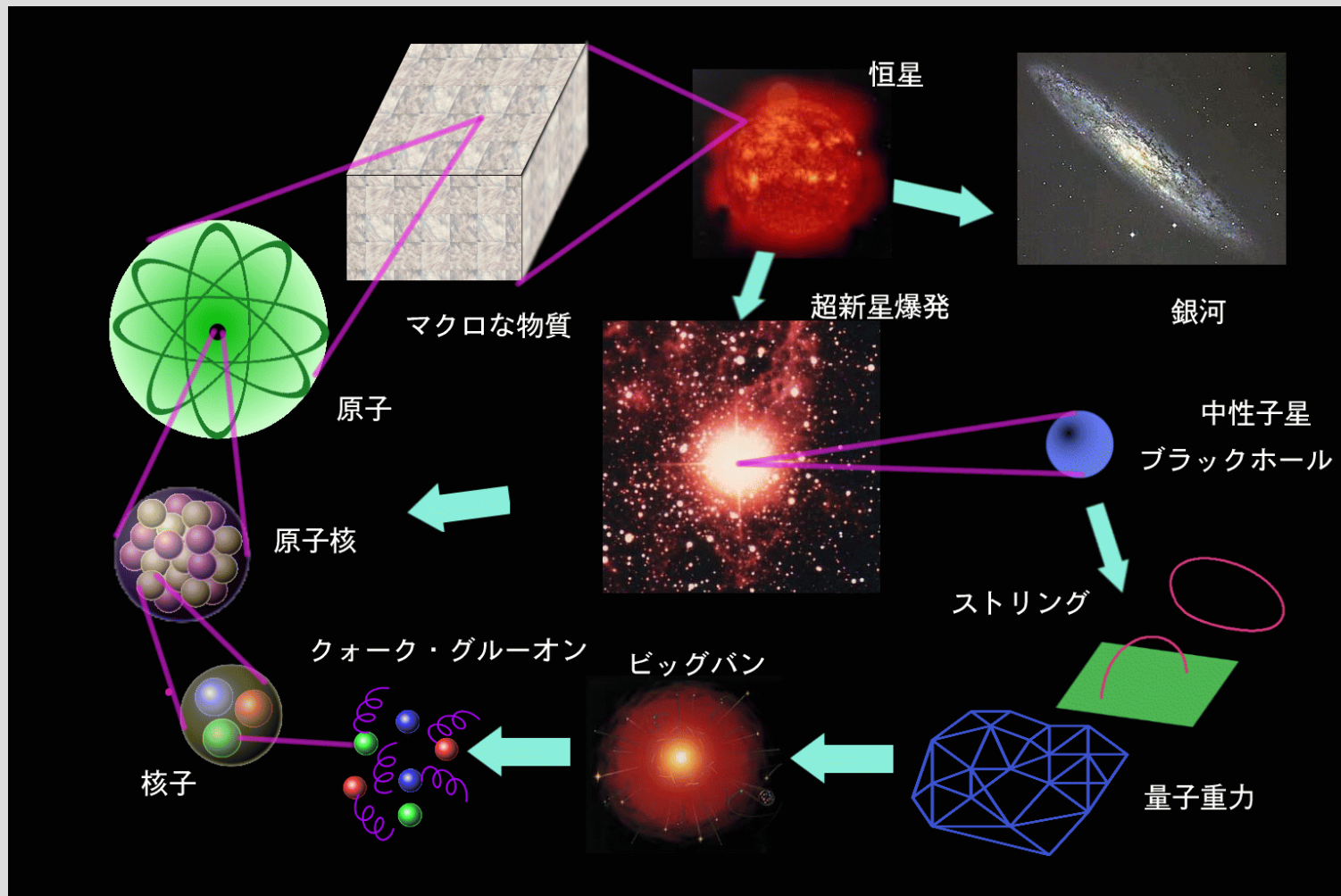
- 物理学における「原子核」の位置づけ
  - 物質の階層構造
  - 宇宙の物質循環
  - 有限量子多体系
  - ハドロン物質の相図
- 最近の話題
  - 30年ぶりの新しい種類の粒子：ペンタクォーク
  - 究極の高密度物質：クォーク・グルーオン・プラズマ
  - 周期表が変わる？：超重元素の合成

## 物理学における「原子核」の位置づけ

- 物質の階層構造
- 宇宙の物質循環
- 有限量子多体系
- ハドロン物質の相図

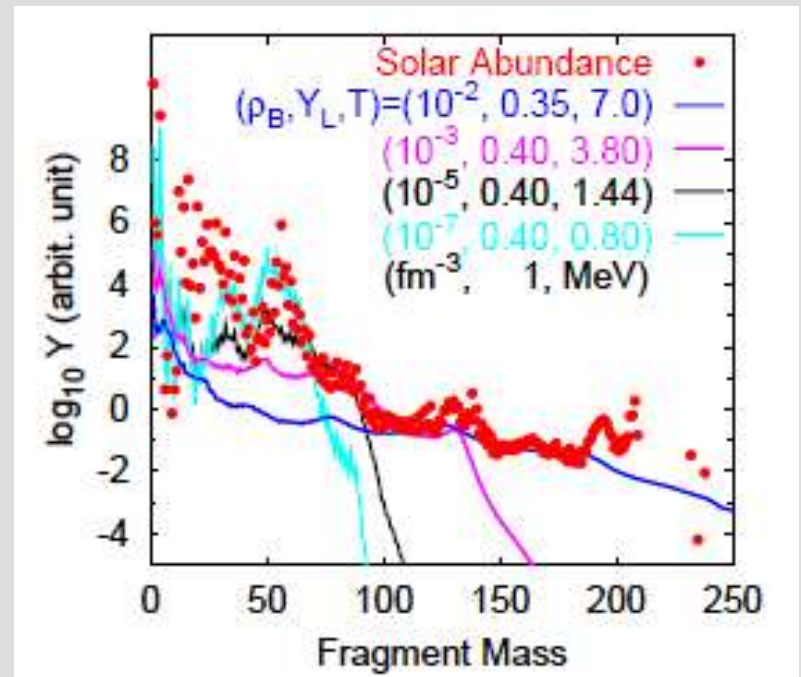
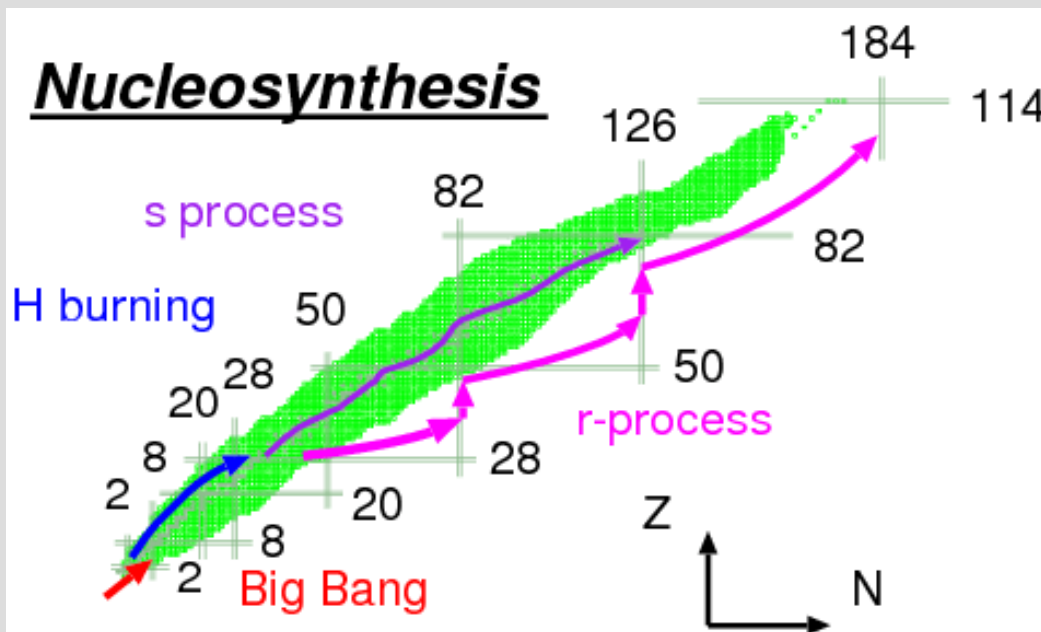
# 物質の階層構造

- 原子核  
= 「強い相互作用」により運動する物質の階層を構成

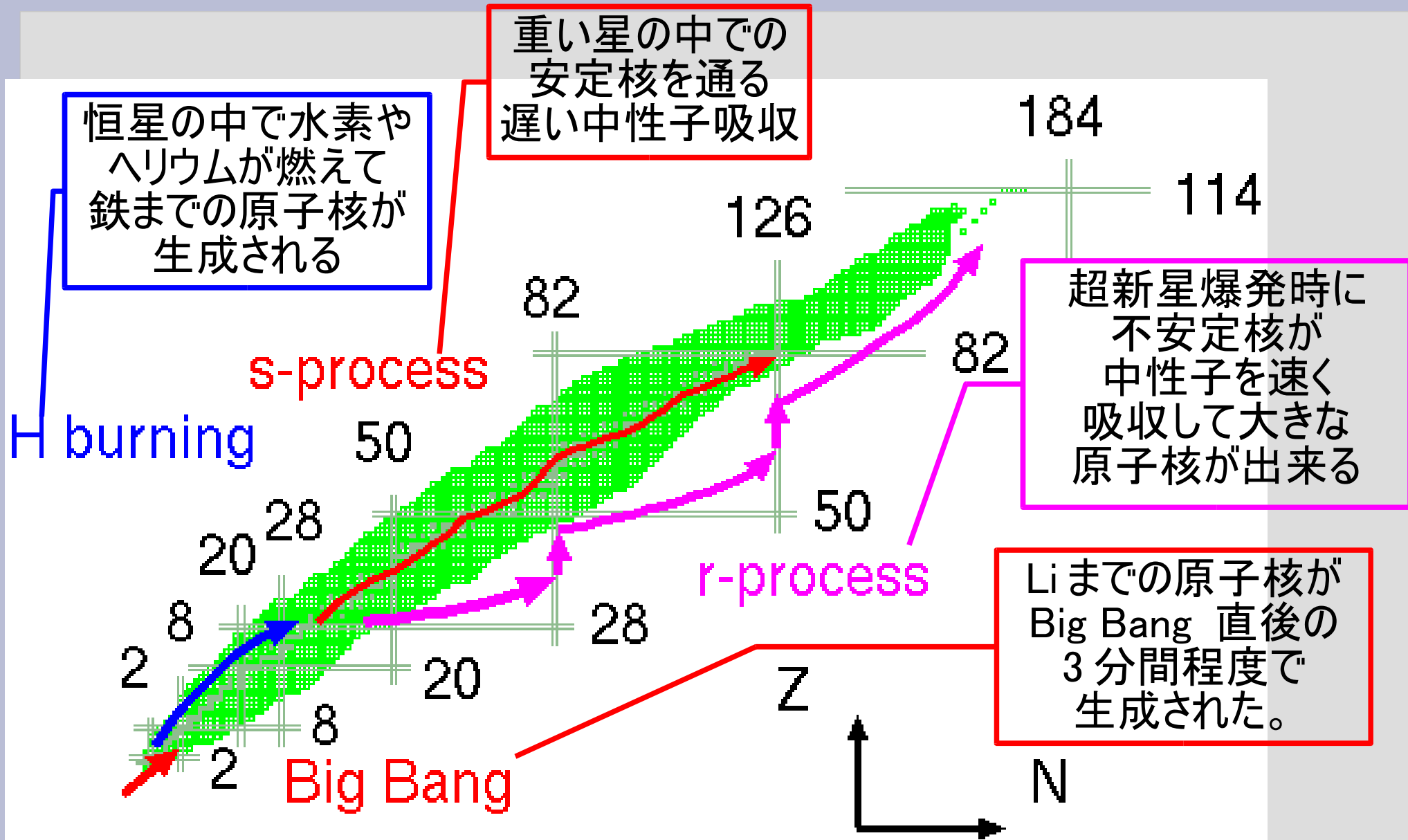


# 宇宙の物質循環

- 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)

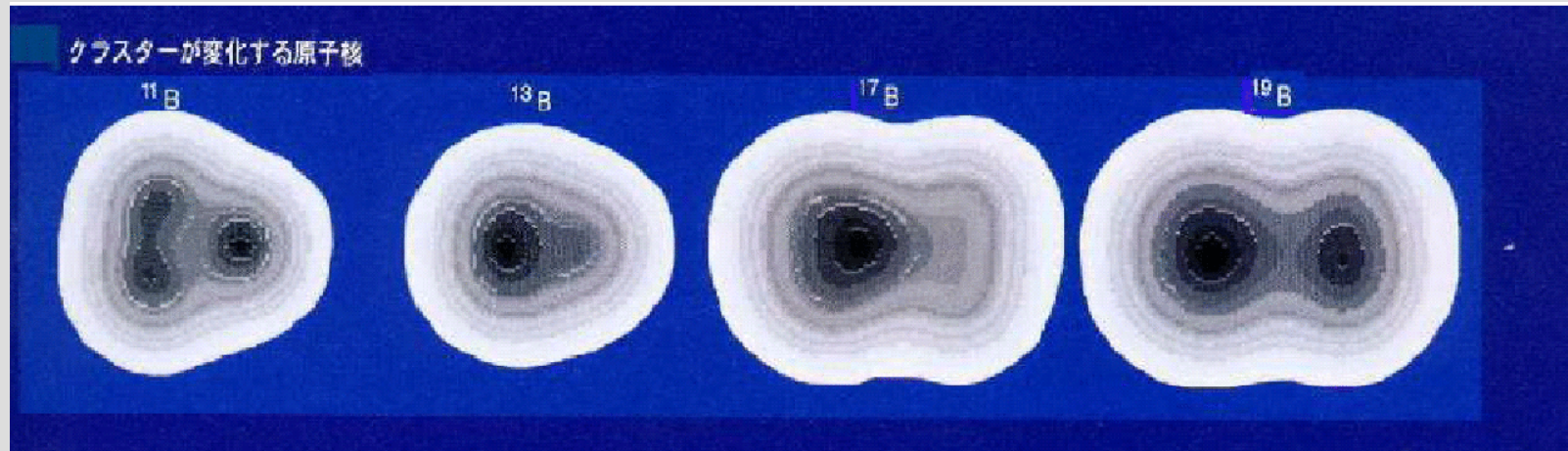


# 元素の起源



# 有限量子多体系

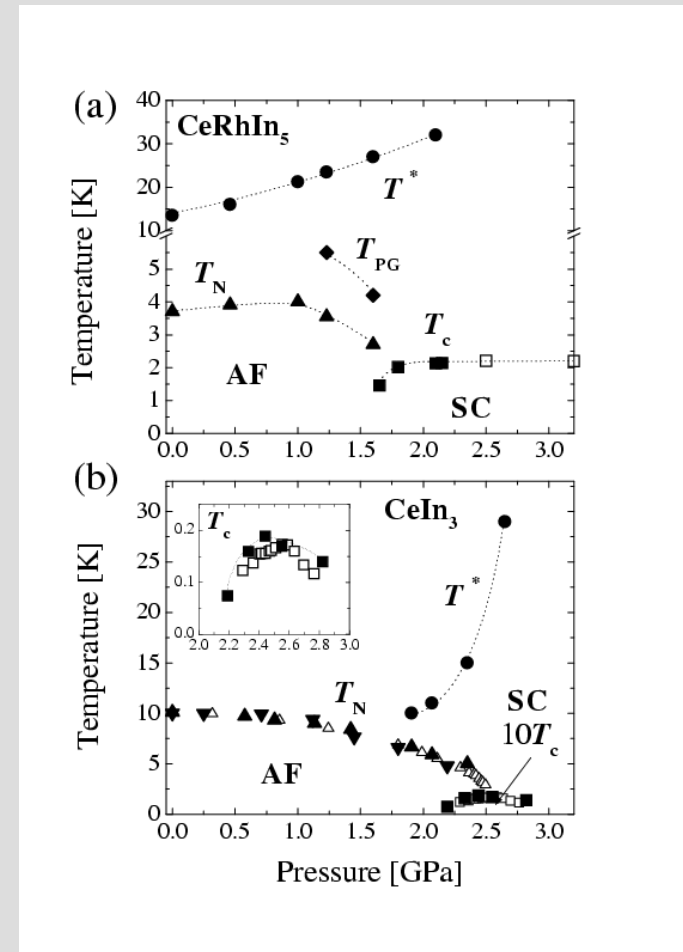
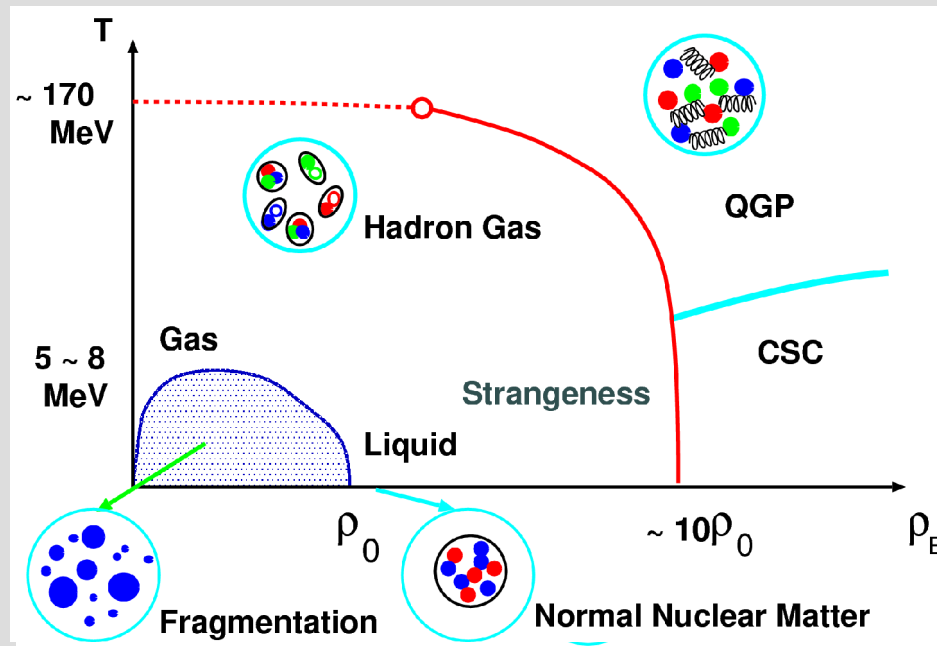
- 様々な形、離散・融合
  - クラスタ構造、超変形核、.....



- 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！)
    - $\alpha$  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

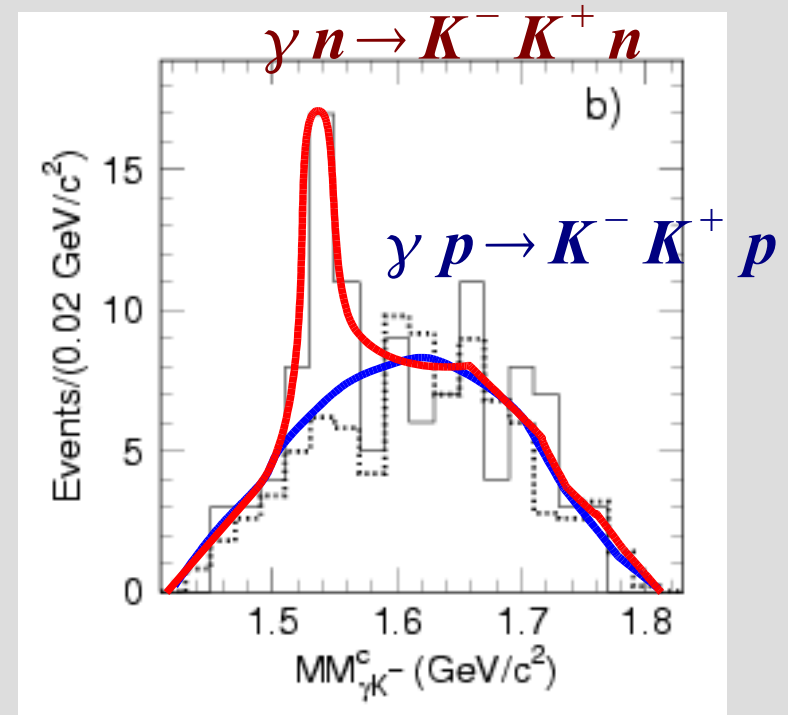
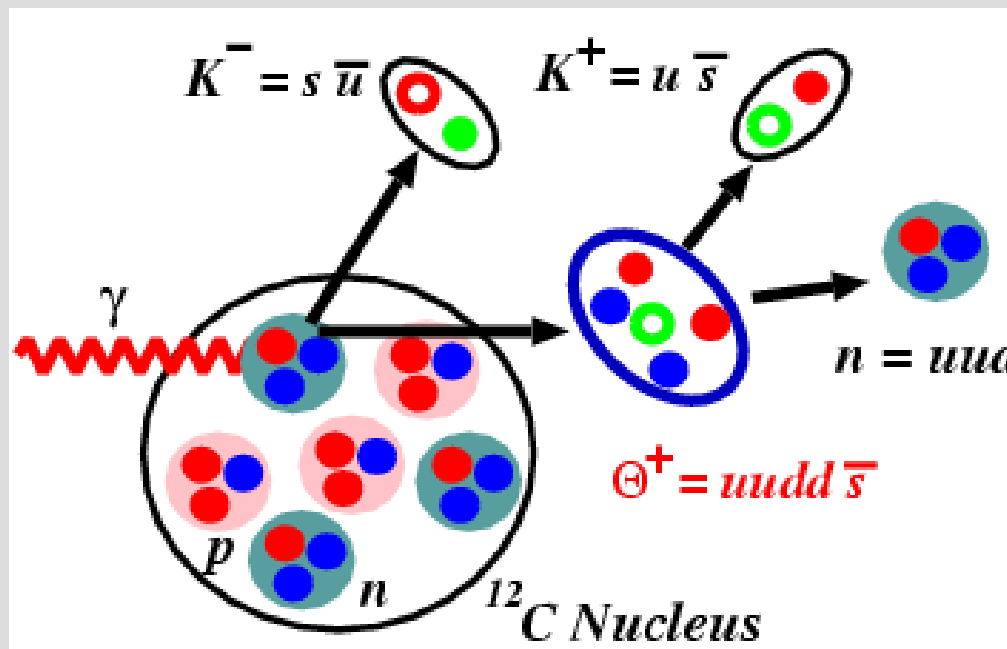
# Penta Quark (1): 背景

- 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。

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

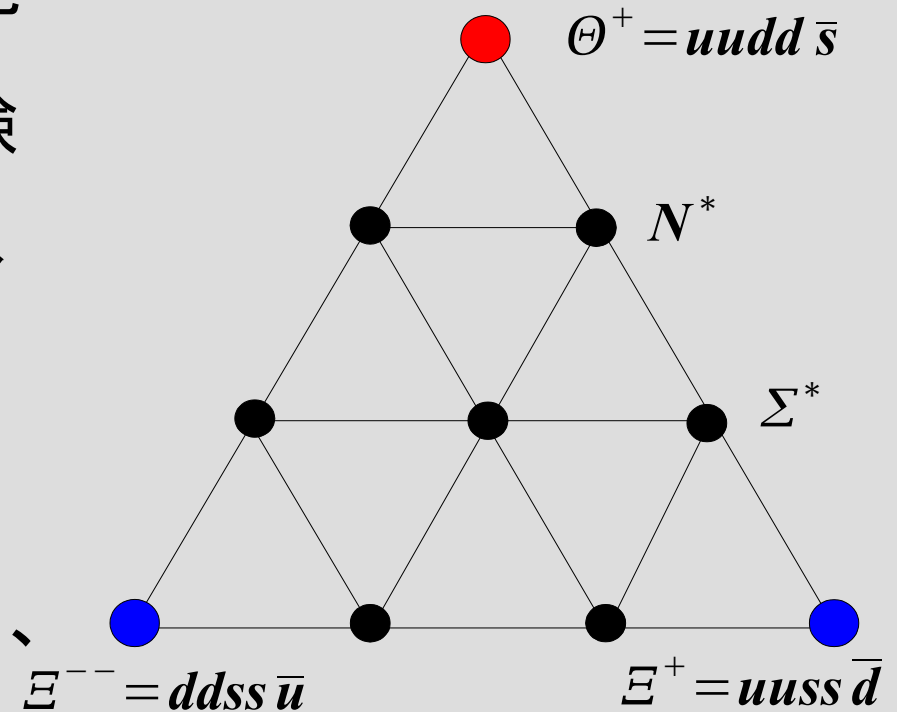


T. Nakano et al.(LEPS Collab.)Phys.Rev.Lett.91 (2003)012002.

# 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」状態も予想されており、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

**ペンタクォーク**



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

## 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。

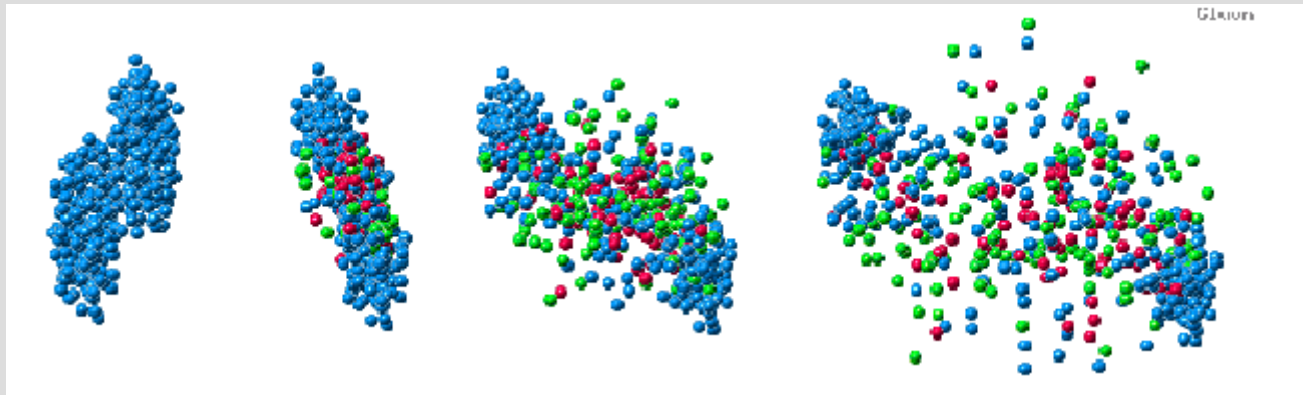
より多くのデータと革新的な理論的發展が必要

究極の高密度物質  
Quark Gluon Plasma

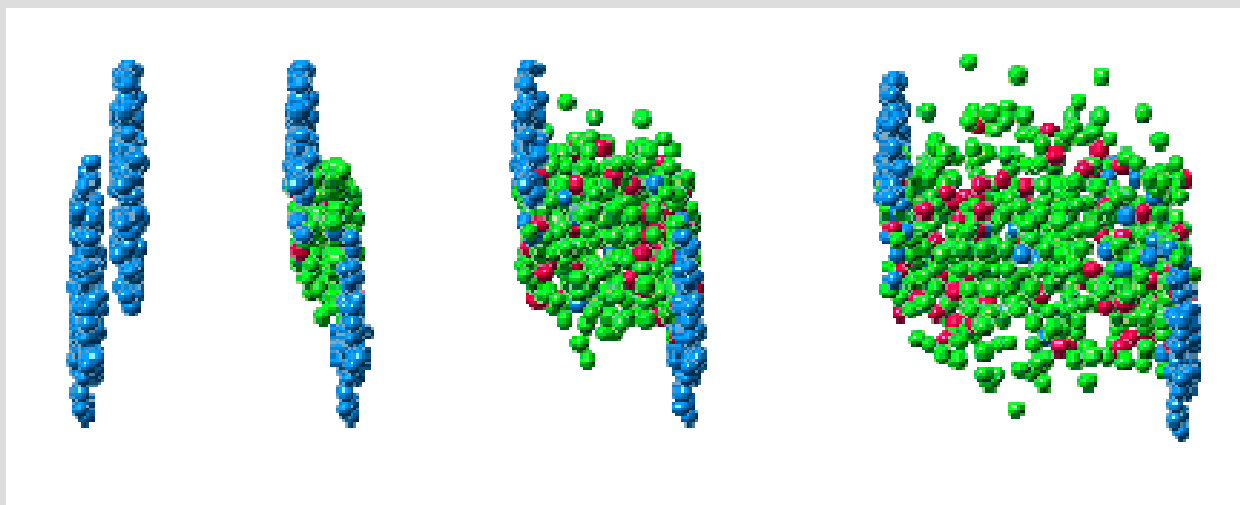
# 高エネルギー重イオン反応と QCD 相転移

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

AGS

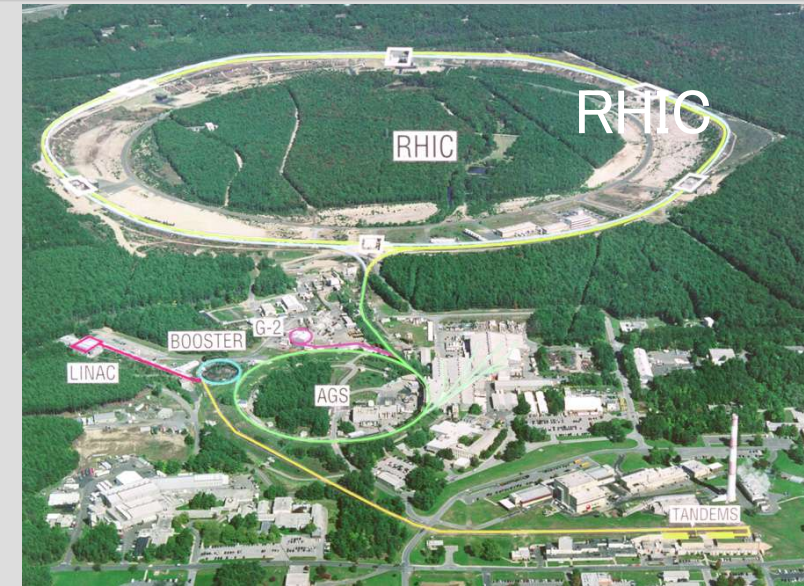


SPS



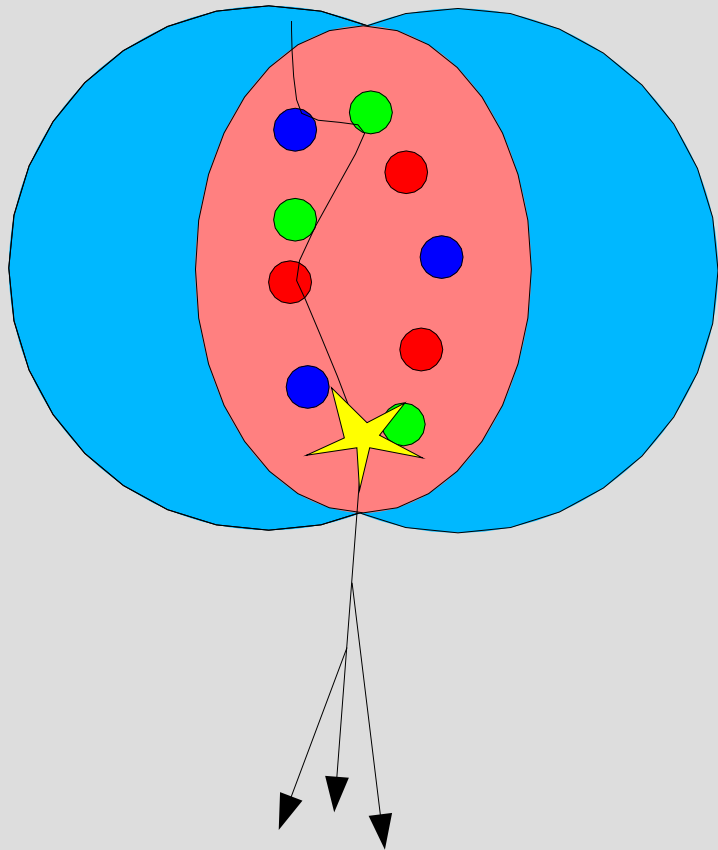
# High Energy Heavy-Ion Collision Experiments

- 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



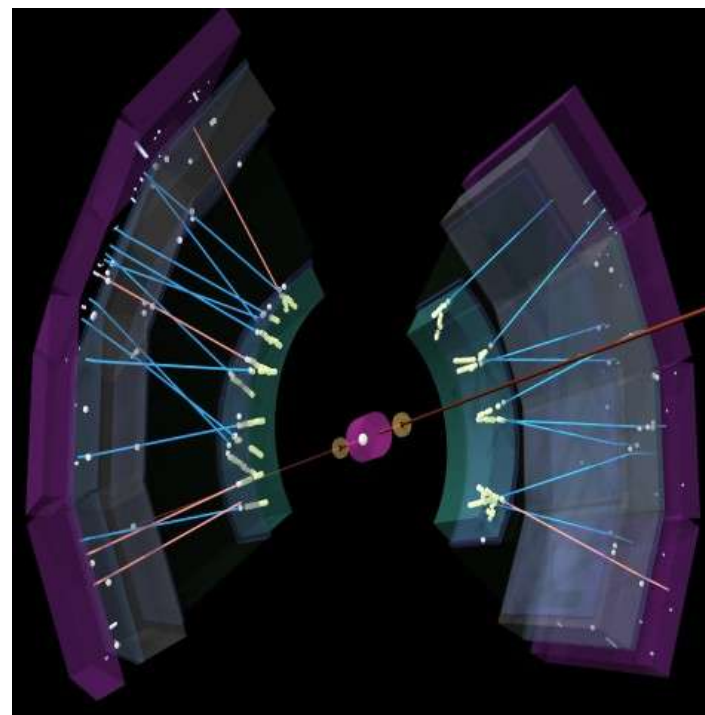
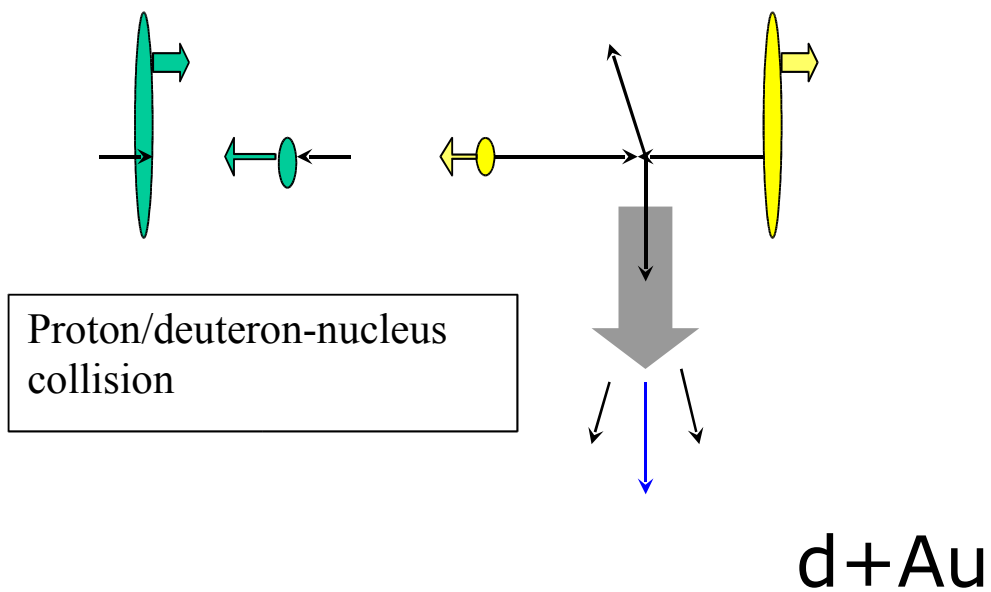
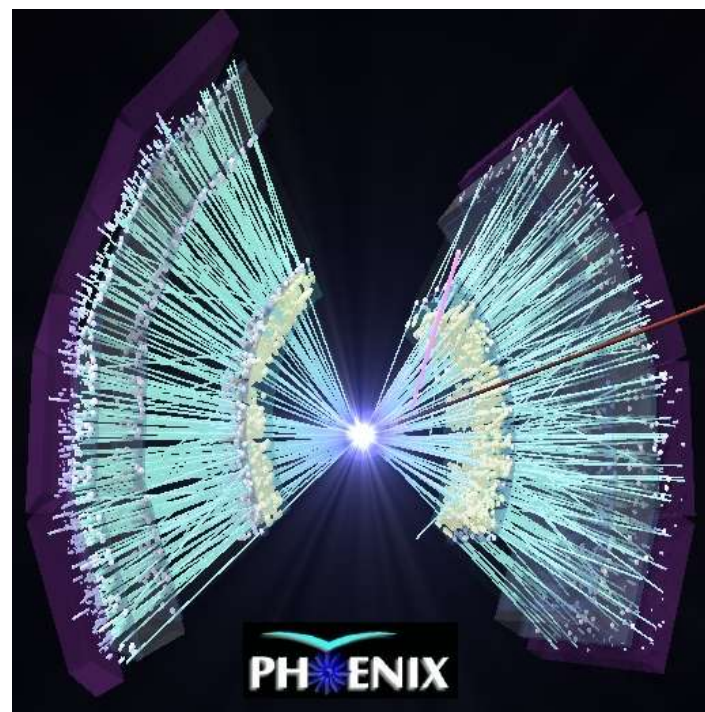
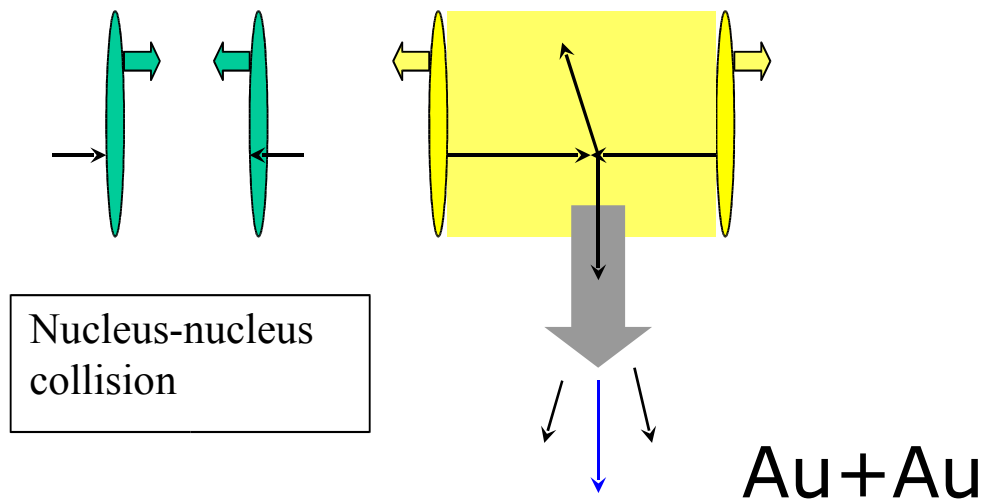


# RHIC におけるジェット抑制 (I)



- 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

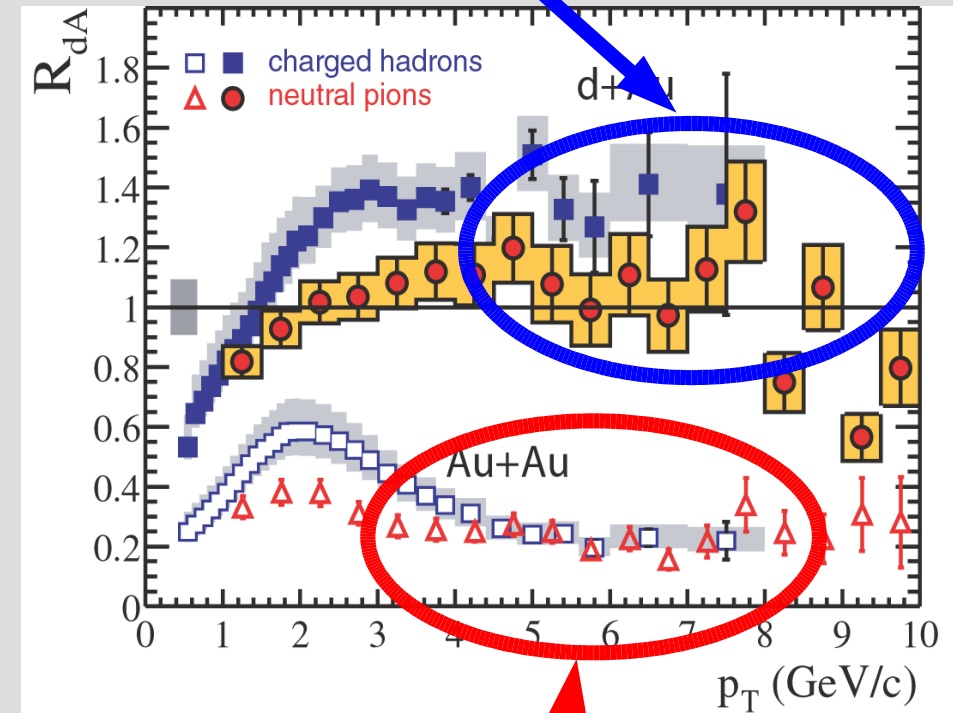
by Esumi, Matter03



# RHIC におけるジェット抑制 (2)

d + Au: Initial State Effects

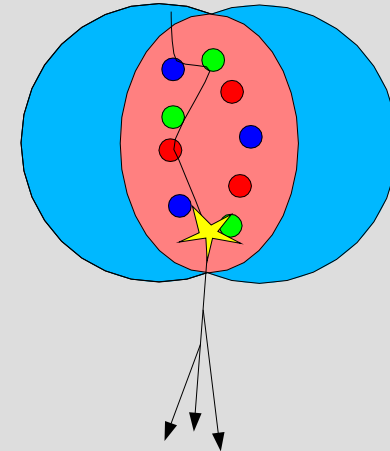
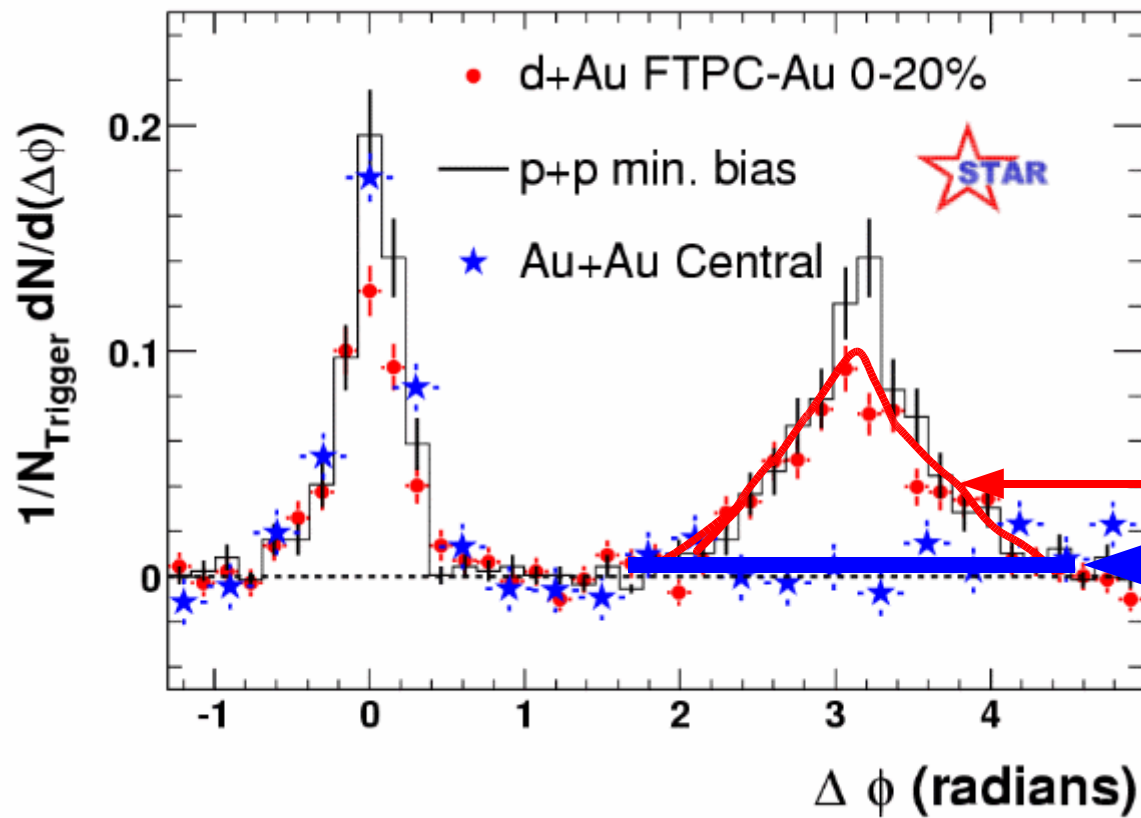
- 本当にジェット抑制は見えるか？
  - 大きな原子核衝突 (Au+Au) では Yes!
  - d+Au 衝突では No!
- エネルギー密度が大きくなったときにだけ、ジェット抑制が起こる  
→ QGP の形成



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

Au + Au:  
Initial State  
+ Final State Effects

# RHIC におけるジェット抑制 (3)



d + Au: Backward Peak

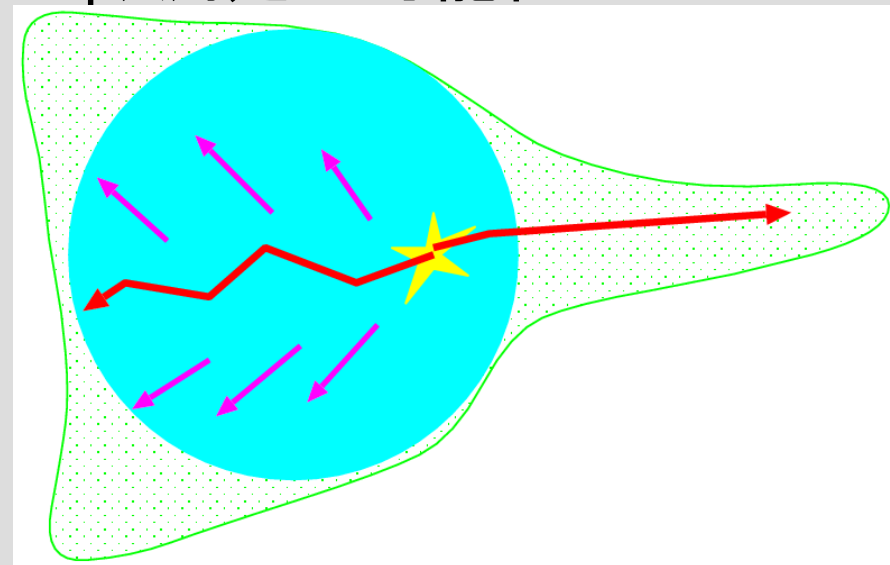
Au + Au:  
No Backward Peak

STAR (nucl-ex/0306024)

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



# 超重元素 (SHE) の発見

—— 周期律表に「ジャポニウム」が入る? ——

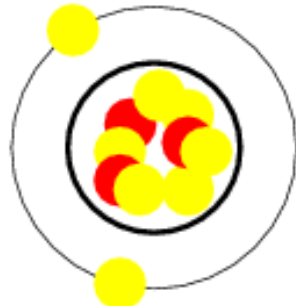
# 自然界に存在しない原子核

通常の原子核



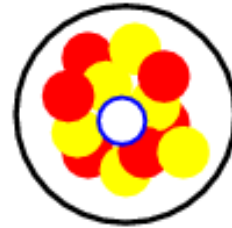
$$Z = N$$

中性子過剰核



$$Z \ll N$$

ハイパー核



$$S \neq 0$$

陽子 ●  
中性子 ●  
超核子 ○  
(ハイペロン)

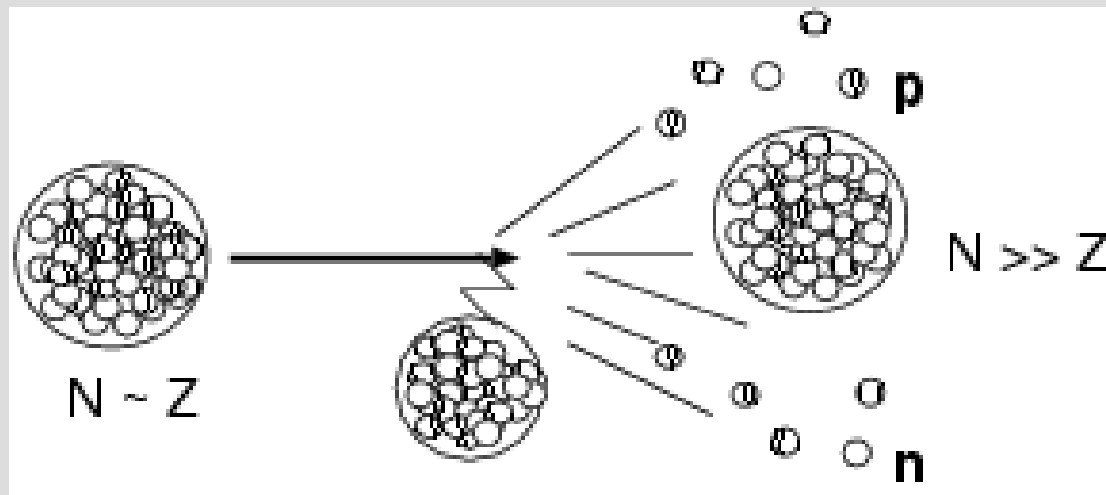
陽子数  $Z$   
中性子数  $N$   
ハイペロン数  $-S$

- ★ 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  
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( $Z=92$ )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、...)

# 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 (1)

- 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
- 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)

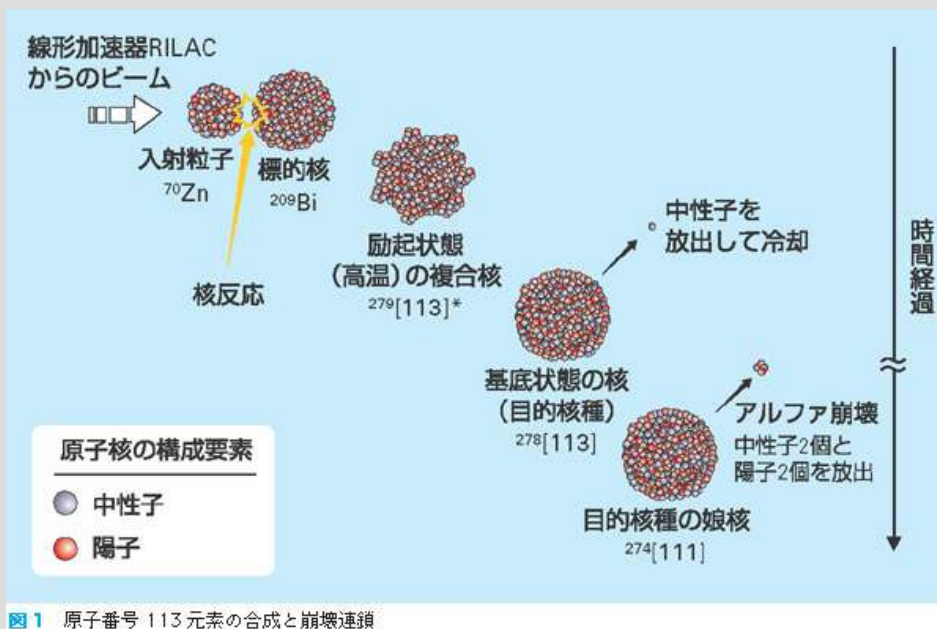
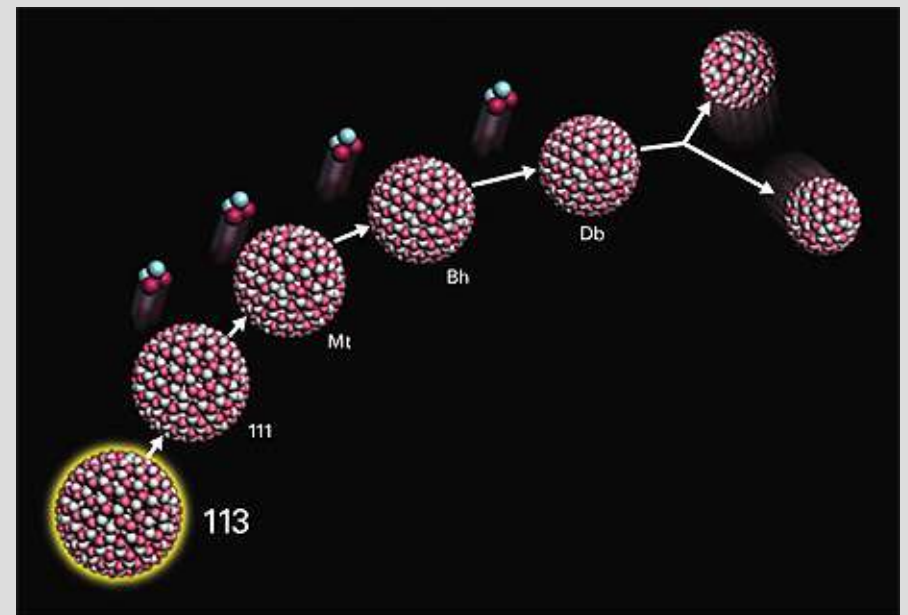
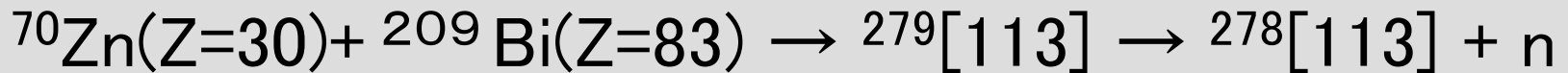


図1 原子番号113元素の合成と崩壊連鎖



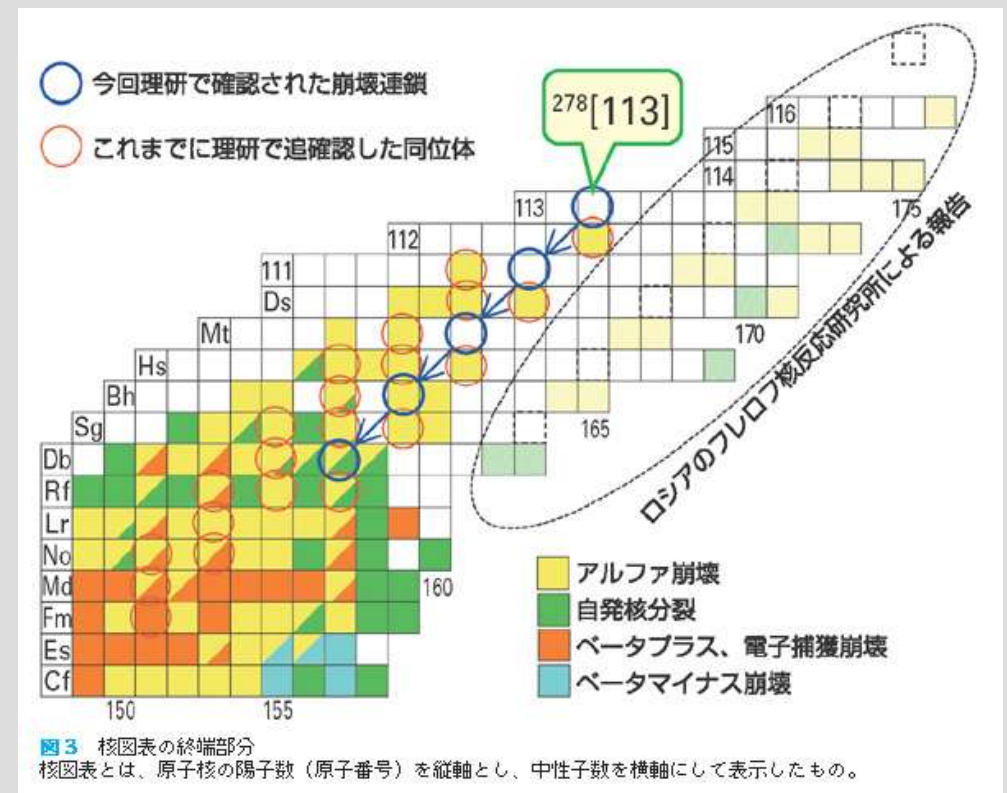
# 原子番号 Z=113 の新元素の発見 (2)

- 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

- ジャポニウム？  
リケニウム？



# 超重元素生成の今後

- 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個の中性子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、  
シェル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」で  
クーロンエネルギーを下げるのが前提**

# まとめ

- 物理学における「原子核」の位置づけ
  - 物質の階層構造
  - 宇宙の物質循環
  - 有限量子多体系
  - ハドロン物質の相図
- 最近の話題
  - 30年ぶりの新しい種類の粒子：ペンタクォーク
  - 究極の高密度物質：クォーク・グルーオン・プラズマ
  - 周期表が変わる？：超重元素の合成