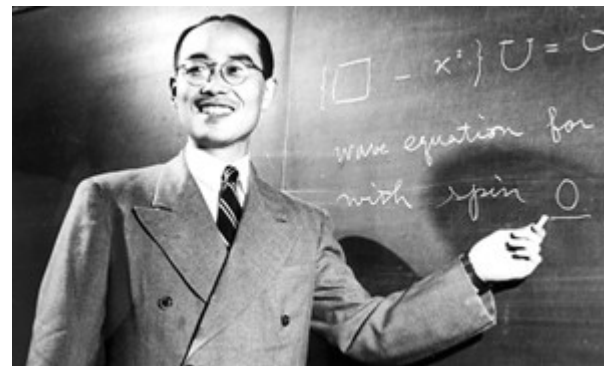


クォークから超新星爆発へ

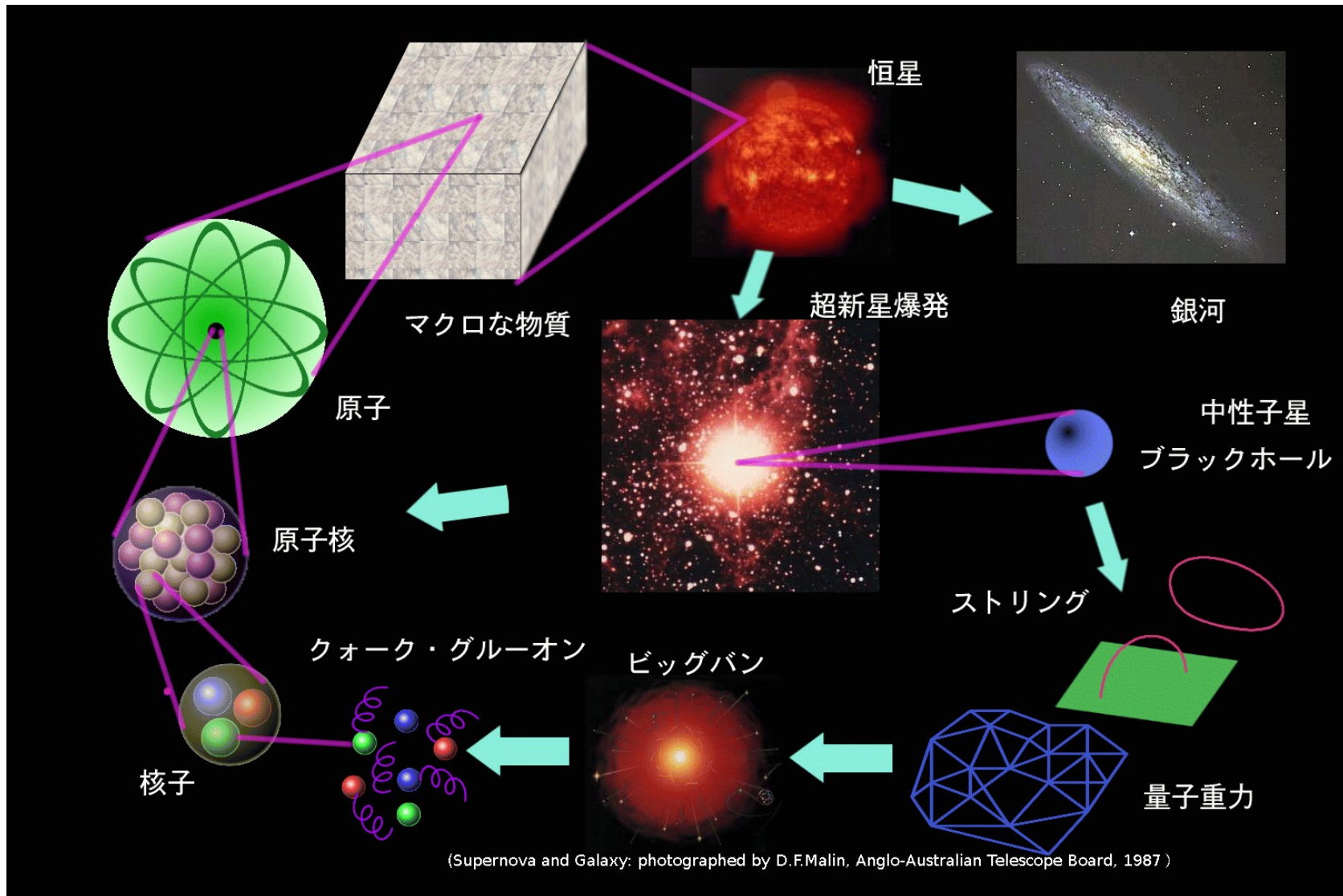
--- 原子核物理学から探る宇宙の相転移と元素合成 ---

大西 明 (京都大学・基礎物理学研究所)

- Introduction: 物質の構成要素と宇宙の歴史
- ビッグバンとクォーク物質の相転移
- 元素の起源と超新星爆発
- まとめ



物質の構成要素

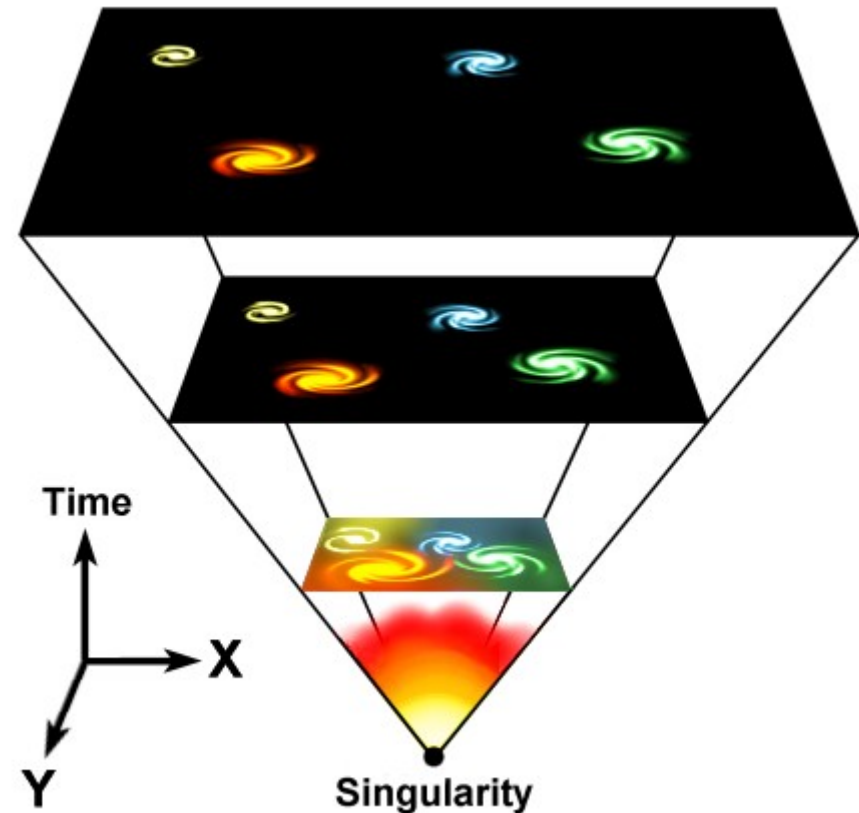


クォークは現在分かっている最小の物質構成粒子

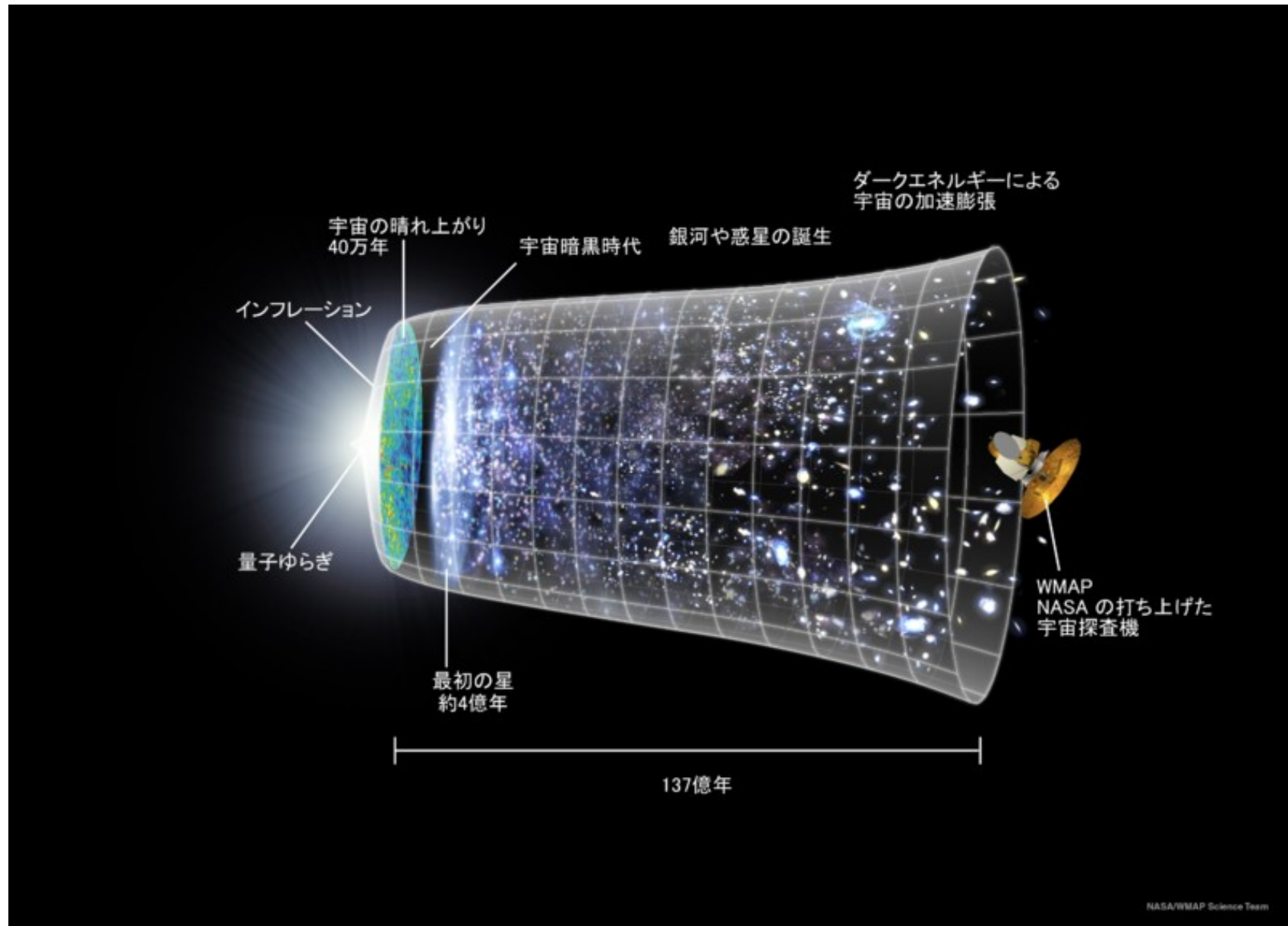
<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~ohnishi/works/>

宇宙の歴史

- ビッグバン ($t=0$): 宇宙の始まり。とてつもないエネルギーの塊
- インフレーション ($t=10^{-34}$ 秒): 相転移にともなう急速な膨張
- クォーク物質の相転移 ($t=10^{-5}$ - 10^{-4} 秒, $T=2 \times 10^{12}$ K (2 兆度))
クォークとグルーオンから陽子や中性子が作られる。
- ビッグバン元素合成 ($t=1$ -200 秒, $T=10^9$ K (10 億度))
陽子と中性子から
Liまでの原子核が作られる。
- 宇宙の晴れ上がり
($t=38$ 万年, $T=3000$ K)
電子が原子核と結合して原子を作り、
光が自由に飛び回れるようになる。
- 初代の星形成 ($t \sim 4$ 億年)
核融合反応によって
新たな光が生まれる。
- 現在 ($t \sim 137$ 億年, $T=2.73$ K)
晴れ上がり時点での
宇宙背景放射の観測 (WMAP)



宇宙の歴史



<http://map.gsfc.nasa.gov/> および Wiki-pedia (宇宙のインフレーション)

アウトライン

- クォークから超新星爆発へ
--- 原子核物理学から探る宇宙の相転移と元素合成 ---
- 1時間目：クォーク物質の相転移
 - 理想気体の状態方程式と物質の相転移
 - クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)
 - 地上でつくる小さなビッグバン (リトルバン)
--- 高エネルギー重イオン衝突で作るクォーク・グルーオン・プラズマ
- 2時間目：元素の起源
 - 原子核の表し方・大きさ・質量
 - 元素はどこで作られたか？
ビッグバン元素合成、恒星での元素合成・超新星元素合成
(クーロン・ポテンシャルと温度)
 - 地上でシミュレーションする超新星元素合成
不安定核物理学の進展
- まとめ

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

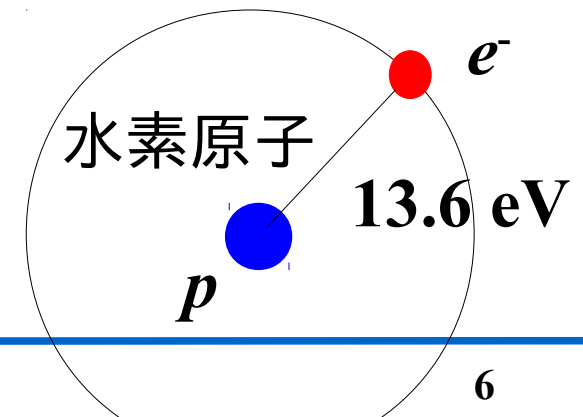
$$pV = nRT = N(R/N_A)T = NkT$$

R = 気体定数、 N_A = アボガドロ数、 k = ボルツマン定数

$k=1$ とおいて、温度をエネルギーの単位で測る (10^{10} K = 1 MeV)
(1 MeV = 10^6 eV。1 eV は素電荷に 1 V をかけたエネルギー)

■ 物質を熱していくっても、理想気体の状態方程式は大体正しい。 ただし、粒子数は温度とともに変化する。

- $T = 10^5$ K ~ 10 eV → 原子核と電子がバラバラの「プラズマ」状態
→ $N =$ 「原子核の数」 + 「電子の数」
- $T = 10$ MeV ~ 60 MeV → 核子の気体 → $N =$ 「核子の数」
- $T = 60$ MeV ~ 200 MeV
→ π 粒子が生成されて粒子数が増加
- $T > 200$ 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



物質の相転移現象

- 2つの異なる状態が接するとき、同じ温度 (*) で圧力の高い状態が全体を占める。

→ 相転移現象

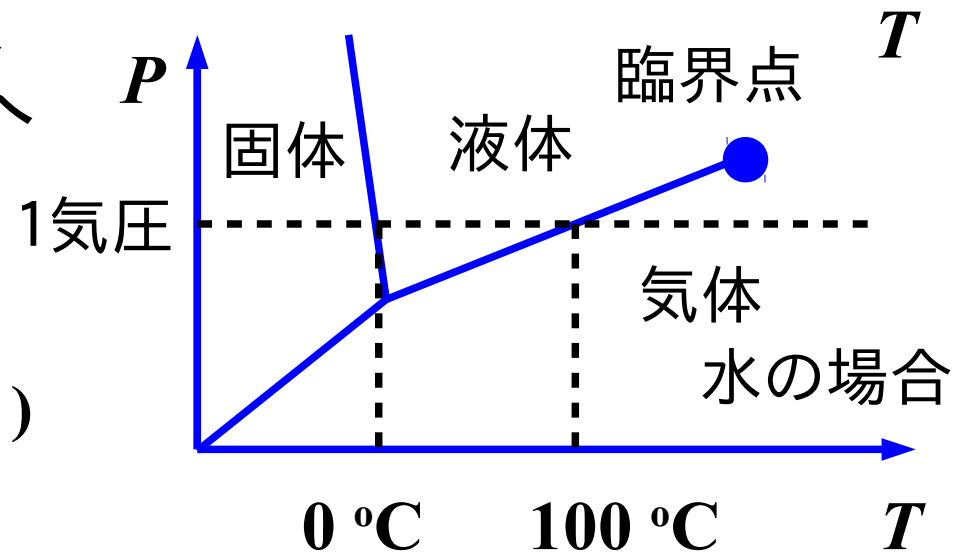
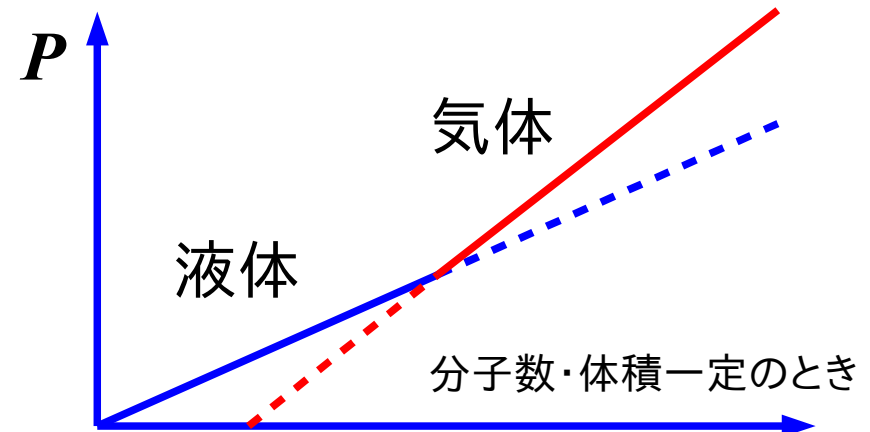
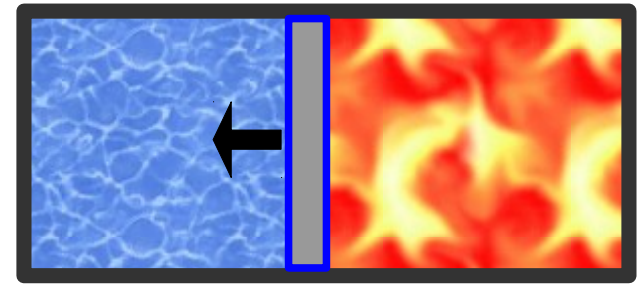
- 2つの状態で温度と圧力が等しいとき

→ 2つの状態 (相) が共存

- 例: 水の場合

- 1気圧のとき、
0°Cで固体 (氷) から液体 (水) へ
100°Cで液体から気体 (水蒸気) へ

- 氷の体積 > 水の体積
温度を上げて水の割合が増えたと
体積がへる → 圧力が減少
(クラウジウス・クラペイロン関係式)



(*正確には化学ポテンシャルも等しい時)

温度を上げると粒子が増える？

■ ステファン・ボルツマンの法則

= 質量 0 の粒子からなる系の圧力・エネルギー密度は
絶対温度の 4 乗に比例 (粒子密度は絶対温度の 3 乗に比例)

$$P = g \times \frac{\pi^2}{90} T^4, \quad \epsilon = E/V = g \times \frac{\pi^2}{30} T^4 \quad (g \text{ は粒子の種類の数})$$

(光速 c , プランク定数 $2\pi\hbar$, ボルツマン定数 k をすべて 1 とする。)

→ 難しいです。本当は大学 3 年生の知識が必要 ...

高校で習う知識でちゃんと理解する方法があれば、ご一報を。

■ あえて説明にトライ

● 質量とエネルギーは等価 (相対性理論) $E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}$

→ エネルギー・質量・運動量は $c=1$ とすると同じ次元

● 粒子は波でもある (量子論。高校 3 年生で学習。)

$$p = 2\pi\hbar/\lambda \quad (p = \text{運動量}, \lambda = \text{波長}, 2\pi\hbar = h = \text{プランク定数})$$

→ 長さ と 運動量・エネルギー・温度は逆数の次元をもつ。

● 質量 0 だと、温度以外に次元をもつ物理量がない。

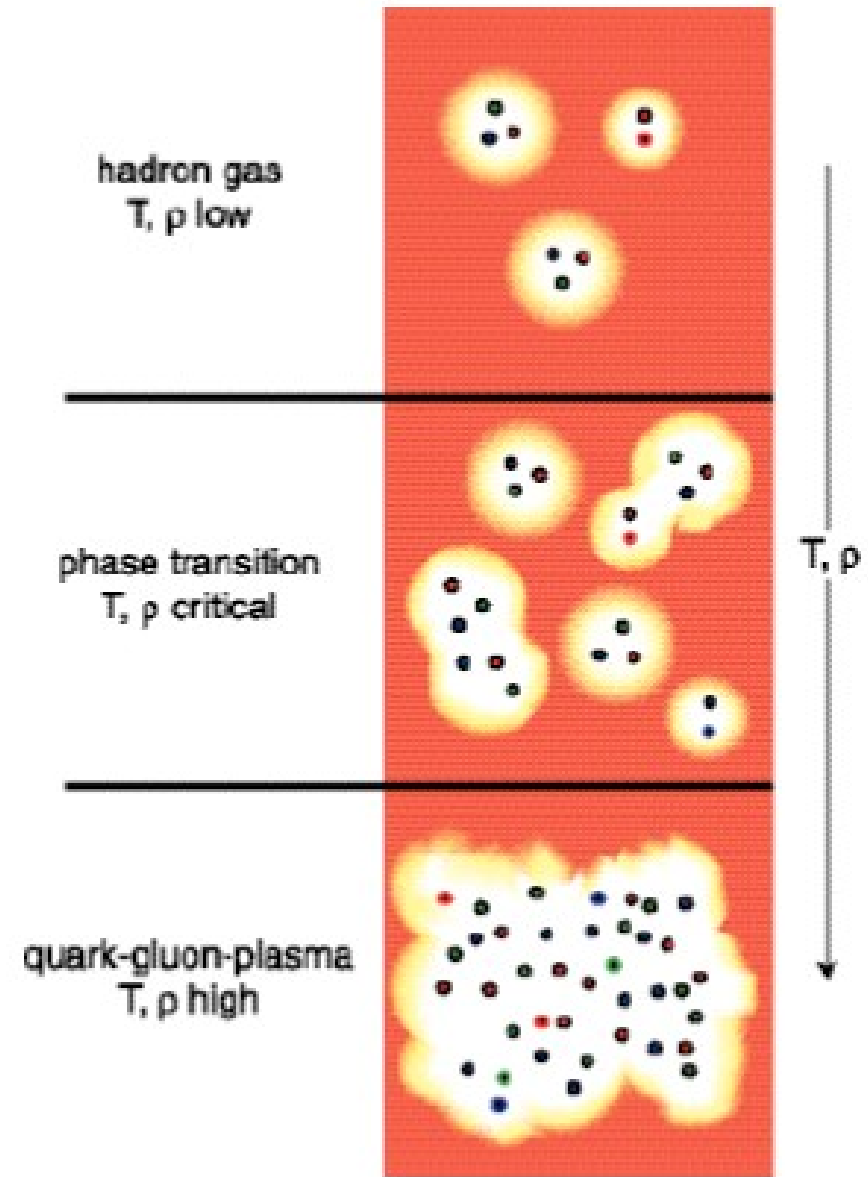
→ 粒子の密度は (距離)⁻³ \propto (エネルギー)³ の次元だから T^3 に比例

クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)

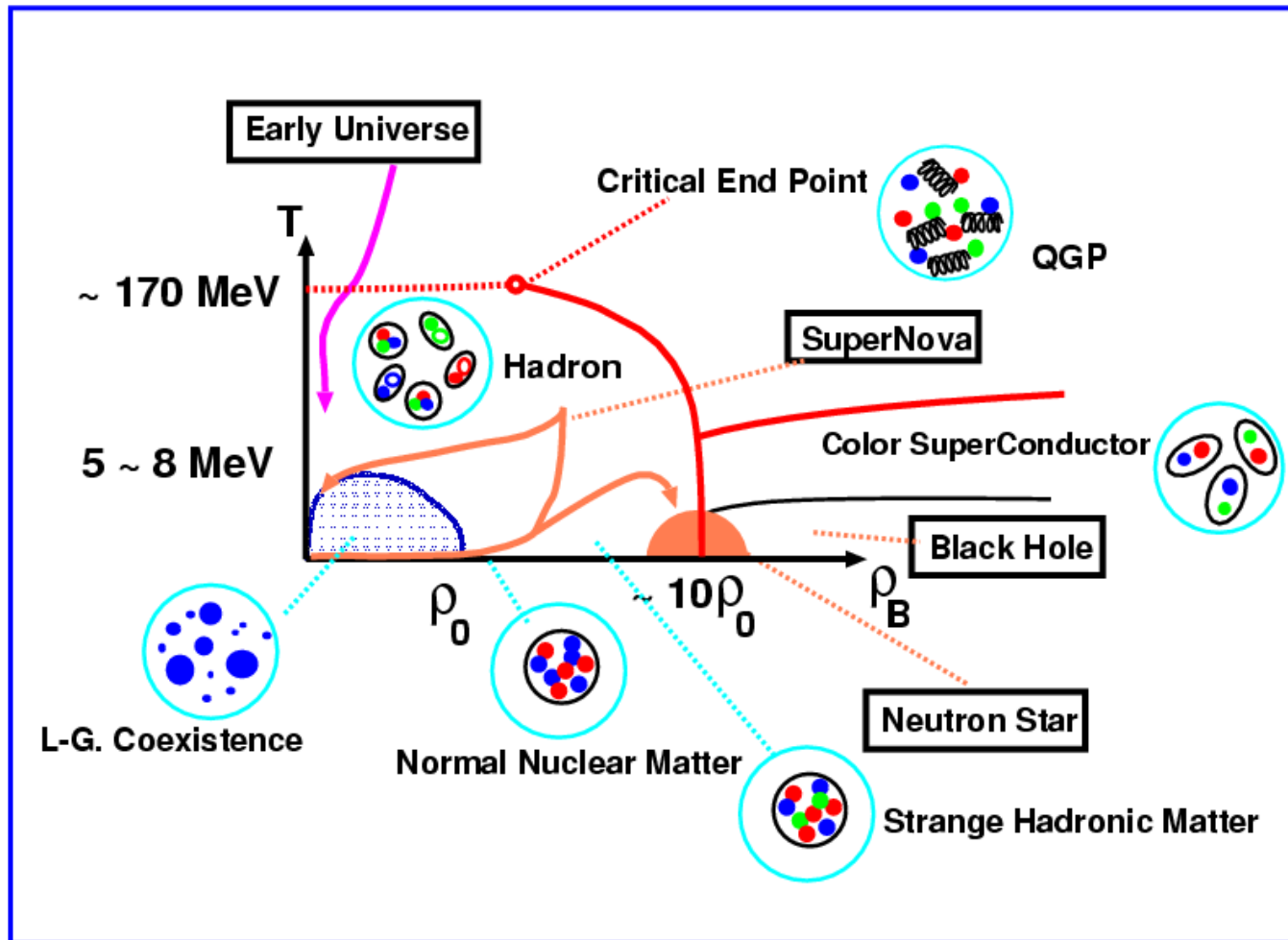
■ ハドロン物質を熱する / 圧縮するとどうなるか？

- 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やクォーク間の力を運ぶグルーオンが自由に動き回るはず



宇宙と地上でのクォーク物質相転移



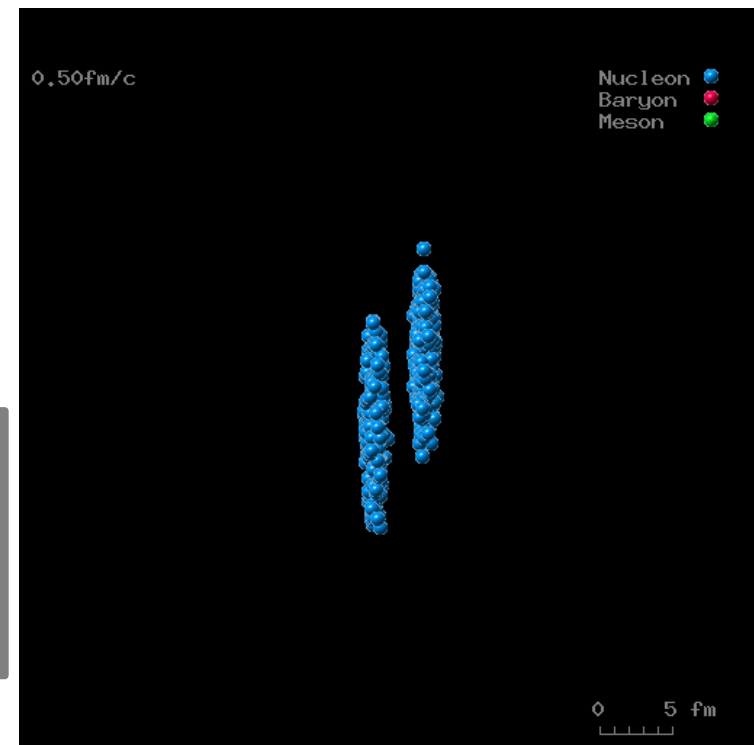
- QGP からハドロン相への相転移 (QCD 相転移) = この宇宙最後の「真空相転移」である!

クォーク・グルーオン・プラズマの作り方

■ 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

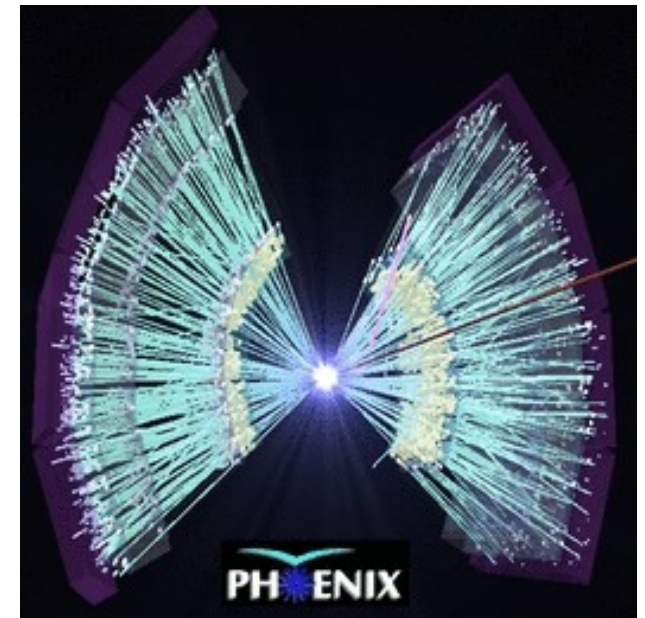
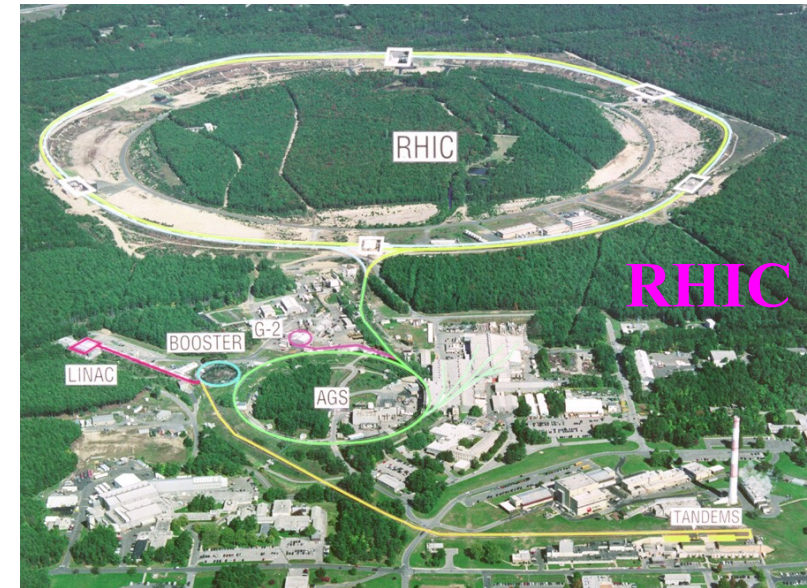
高エネルギー原子核反応での
QGP 生成
= 地上の “Big Bang” 再現実験



高エネルギー重イオン衝突実験 (RHIC)

■ RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider)

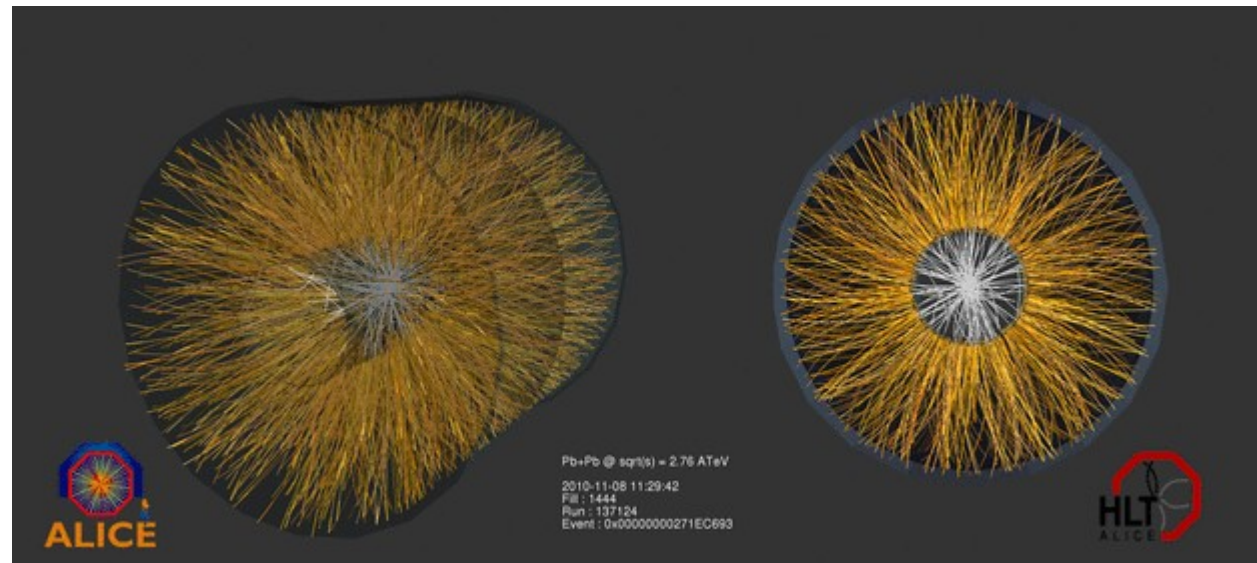
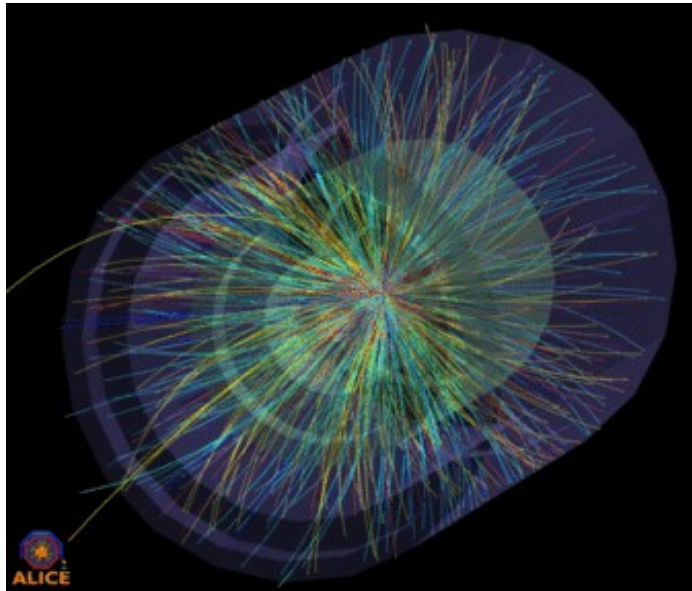
- ブルックヘブン国立研究所 (アメリカ)
- 2000 年から稼働した、世界初の重イオン衝突型加速器
- 核子対あたり 200 GeV のエネルギーで金原子核同士を衝突
(1 GeV=10⁹ eV~核子の質量エネルギー)
- QGP を観測 !
ビッグバン直後の宇宙初期の状態を地上で再現



高エネルギー重イオン衝突実験 (LHC)

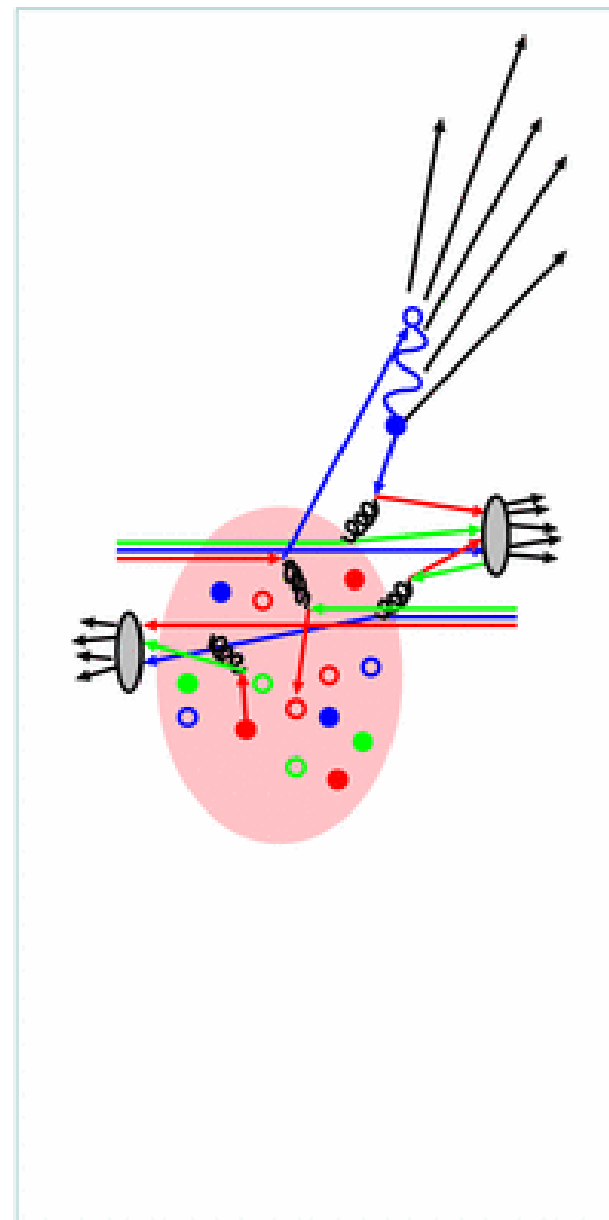
■ LHC (Large Hadron Collider)

- ヨーロッパ中央原子核研究所 (CERN)
- 2009 年から稼働した、
世界最強の衝突型加速器
- 核子対あたり 2.76 TeV のエネルギーで
鉛原子核同士を衝突 ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$)
- 2010 年 11 月 7 日に最初の鉛 - 鉛衝突を観測



QGP 生成のシグナル

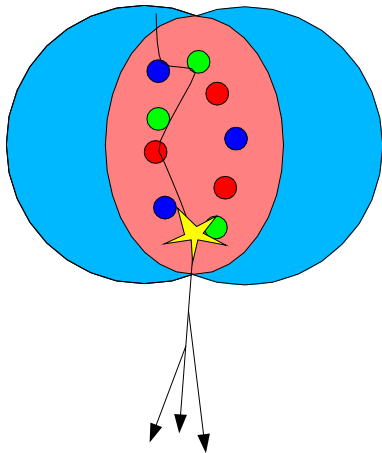
- QGP が作られると何が起こるか？
 - 初期の核子内のパートン (クォーク、グルーオン) の激しい散乱
 - QGP が生成されると、カラー電荷を持った粒子 (クォーク、グルーオン) が熱的に分布
 - **クォークやグルーオンがエネルギーを損失**
(ジェット抑制、Jet Quenching)
c.f. 荷電粒子は電子と散乱してエネルギーを損失)
 - 早い段階で熱平衡化
 - (熱平衡が仮定される)
流体力学的振る舞い



QGP 生成の実験的証拠 : ジェット抑制

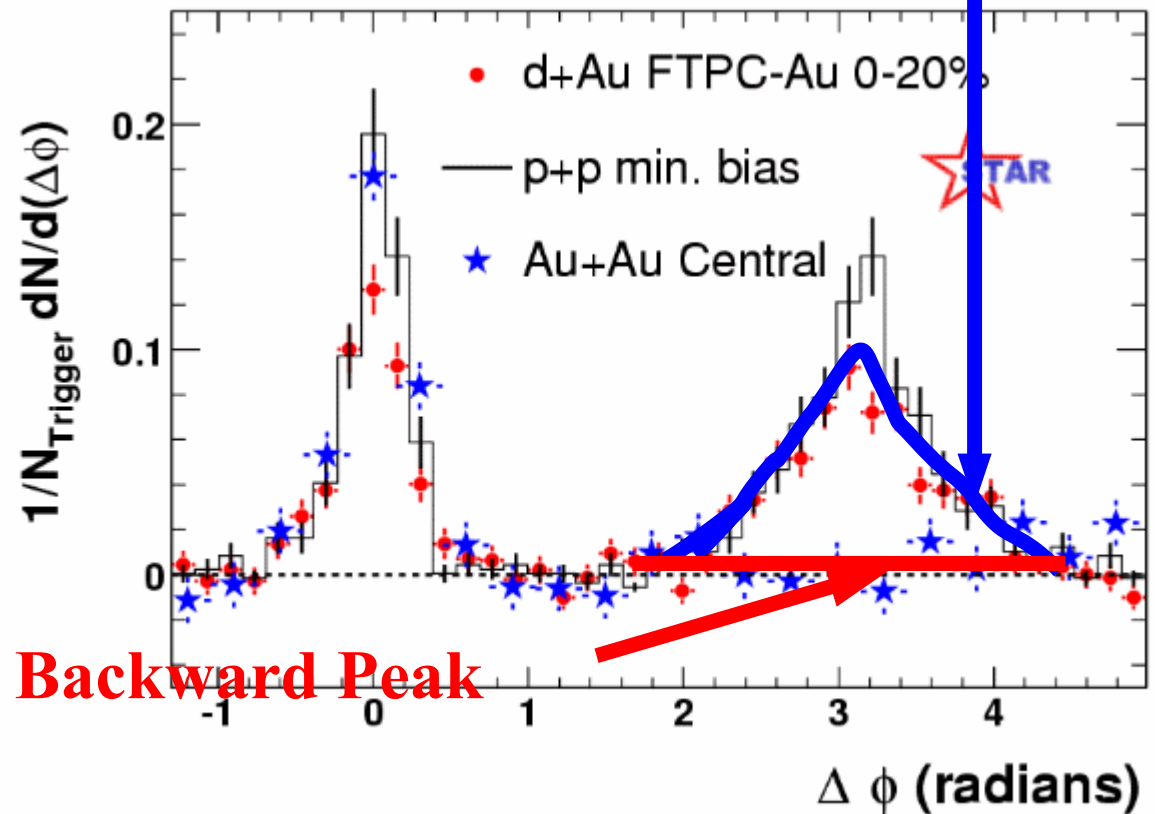
- ジェットが消えているなら、核子衝突で見えている裏側の相関が消えるはず。

- 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

1 時間目のまとめ

- クォークとは？
 - 最小の物質構成粒子：分子 → 原子 → 原子核 → 核子 → クォーク
- 物質を熱していくと何がおこるか？
 - 構成要素が分離して、粒子数が増えていく
 - 軽い粒子の粒子数密度 $\propto T^3$ → 圧力、エネルギー密度 $\propto T^4$ (ステファン・ボルツマン則)
- クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)
 - 初期宇宙、中性子星内部などでの物質の形態
 - 地上での QGP 生成 (リトルバン) = 初期宇宙のシミュレーション
 - 実験でのシグナル = ジェット抑制 → QGP 生成の確認
- 触れられなかったこと・これから研究が進めるべきこと
 - 色の閉じ込め、質量の獲得 (南部機構)、完全流体性、カラーガラス ...
 - 「相転移」自体はみえていない。臨界点が観測できれば ...

元素合成と超新星爆発



原子核のあらわし方と核図表

■ 原子核の表現方法



Z: 陽子数 (= 原子番号), N: 中性子数

A=Z+N: 核子数 (= 原子量), X: 元素記号

■ 原子核の種類

● 安定核

300種以下

● 既知の原子核

2500-3000 種

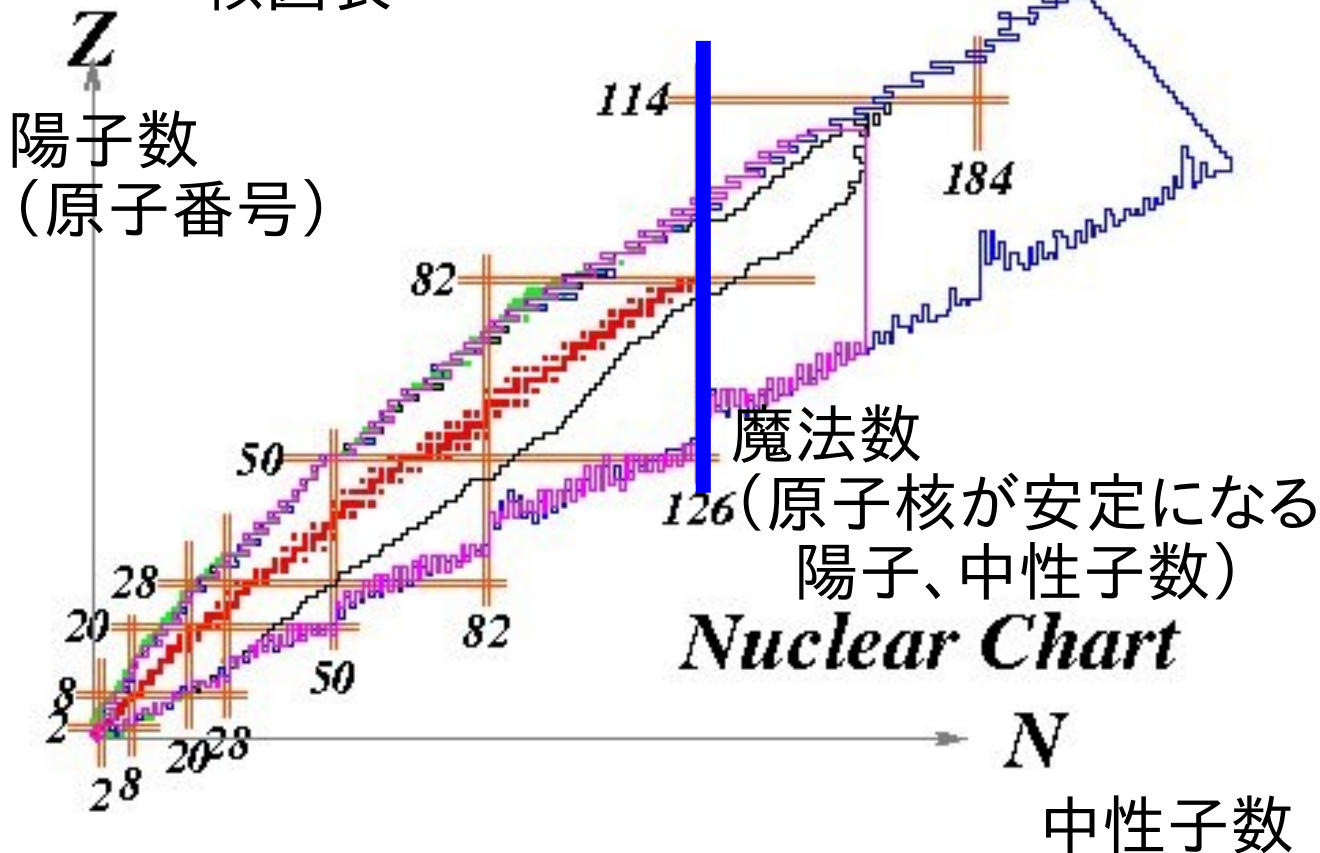
● 存在が预言される原子核

7000-9000 種

■ 原子核の魔法数

2, 8, 20, 28, 50,
82, 126

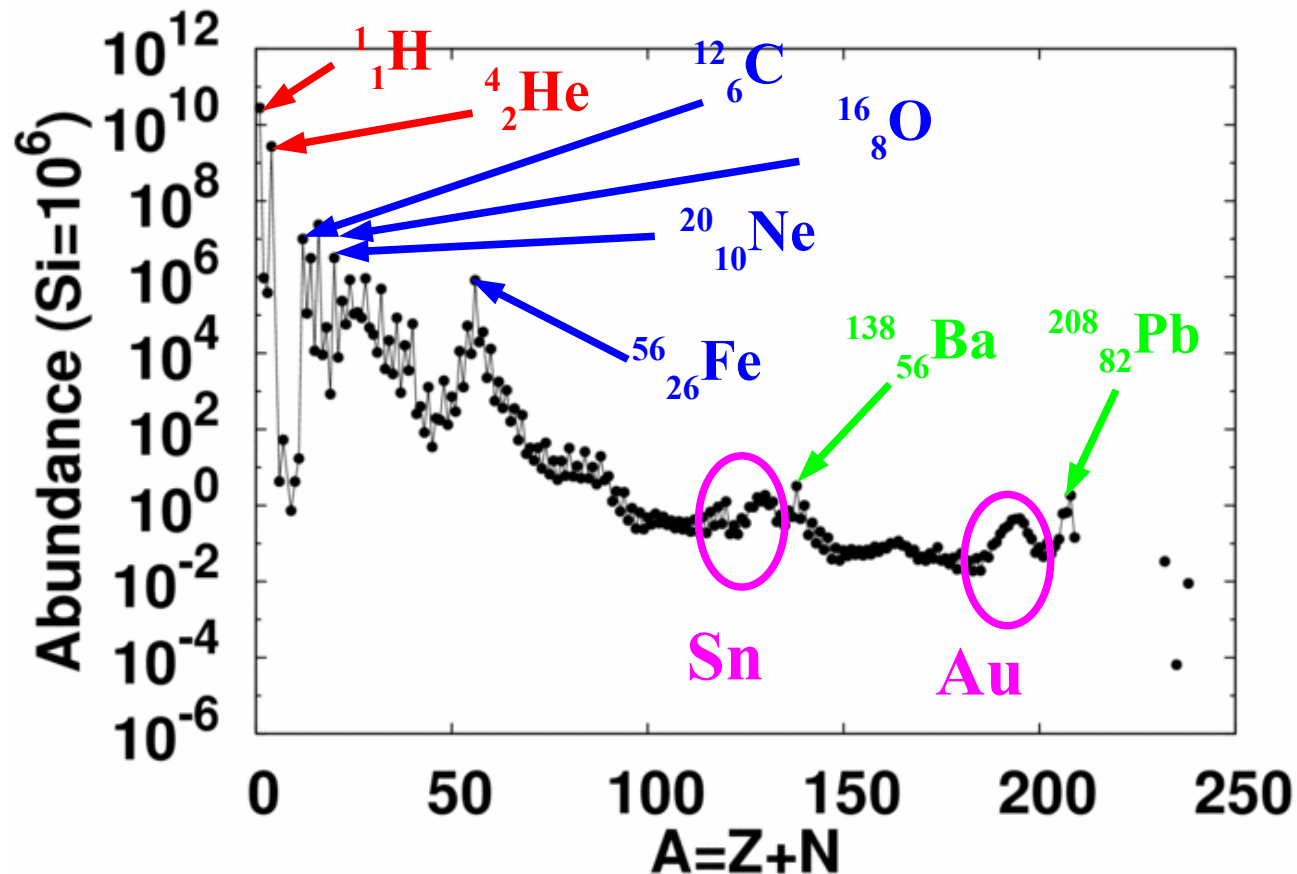
核図表



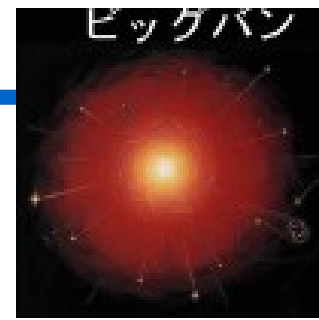
我々の体をつくる物質はどこからきたか？

■ 太陽系での元素組成

- 水素 (陽子) が多く、次が ヘリウム (${}^4\text{He}$, 水素の 10% 程度)
- 酸素 (${}^{16}_8\text{O}$)、炭素 (${}^{12}_6\text{C}$)、ネオン (${}^{20}_{10}\text{Ne}$)、鉄 (${}^{56}_{26}\text{Fe}$)... 等が続く
- 重い原子核では
バリウム (${}^{138}_{56}\text{Ba}_{82}$),
鉛 (${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$) 等が
とびぬけて多い。
- これらより少し小さな
 $A=Z+N$ の領域
(錫 (Sn), 金 (Au)) で
大きく盛り上がる。



ビッグバン時の物質・元素生成



■ 物質 > 反物質

- サハロフの3条件

- クォーク数 = 反クォーク数の世界

- 「クォーク数 - 反クォーク数」の非保存

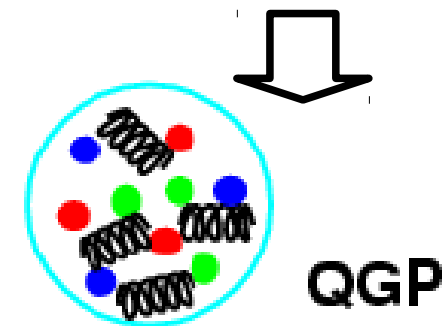
- + C の破れ、**CP の破れ (小林・益川)** + 非平衡

■ クォーク物質から核子へ

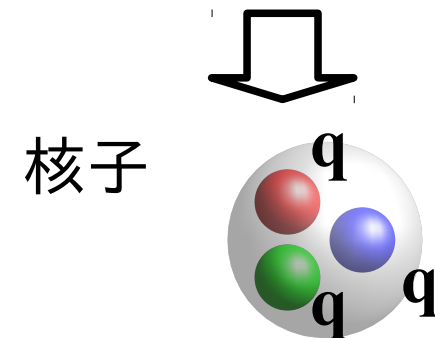
- 約 2 兆度でクォークから核子へ
(クォークの閉じ込めが起こる)

■ 核子から原子核へ

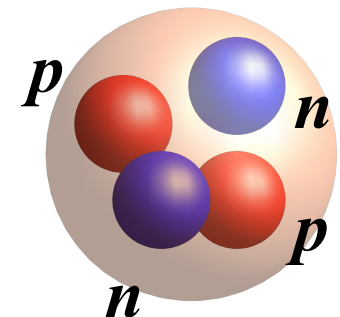
- $2p(\text{陽子}) + 2n(\text{中性子}) \rightarrow {}^4_2\text{He}$ 等の反応で Li まで



QGP



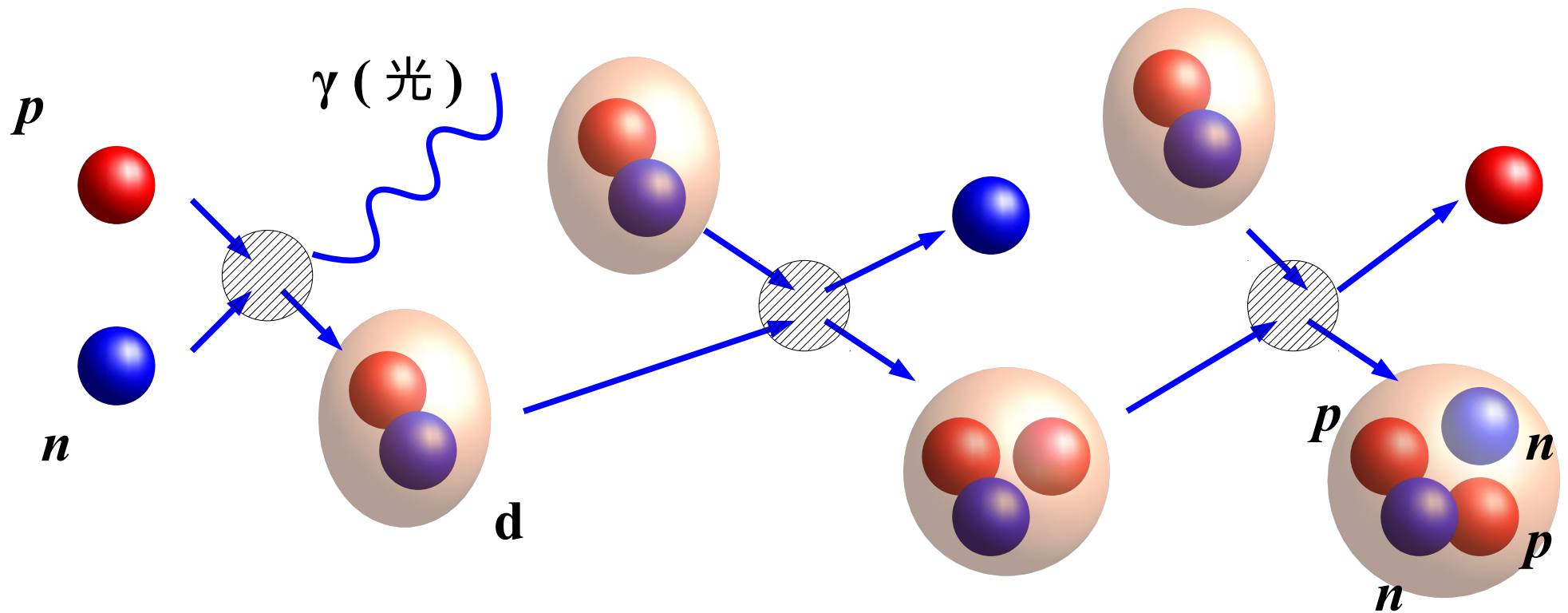
核子



${}^4\text{He}$ 原子核

ビッグバン元素合成

- 高い温度 ($T \sim 10^9 \text{ K} = 0.1 \text{ MeV}$) と豊富な中性子により、宇宙創成後 3-20 分の間に、質量比で全体の 25% のヘリウム 4 原子核と少量の Li 原子核ができる。



Alpher, Bethe, Gamow (1948)

元素合成—様々な過程

■ 核図表の上で元素合成を見ると ...

水素・ヘリウム燃焼
恒星の中で水素や
ヘリウムが燃えて
鉄までの原子核が
生成される
→ ^{12}C , ^{16}O , ^{20}Ne

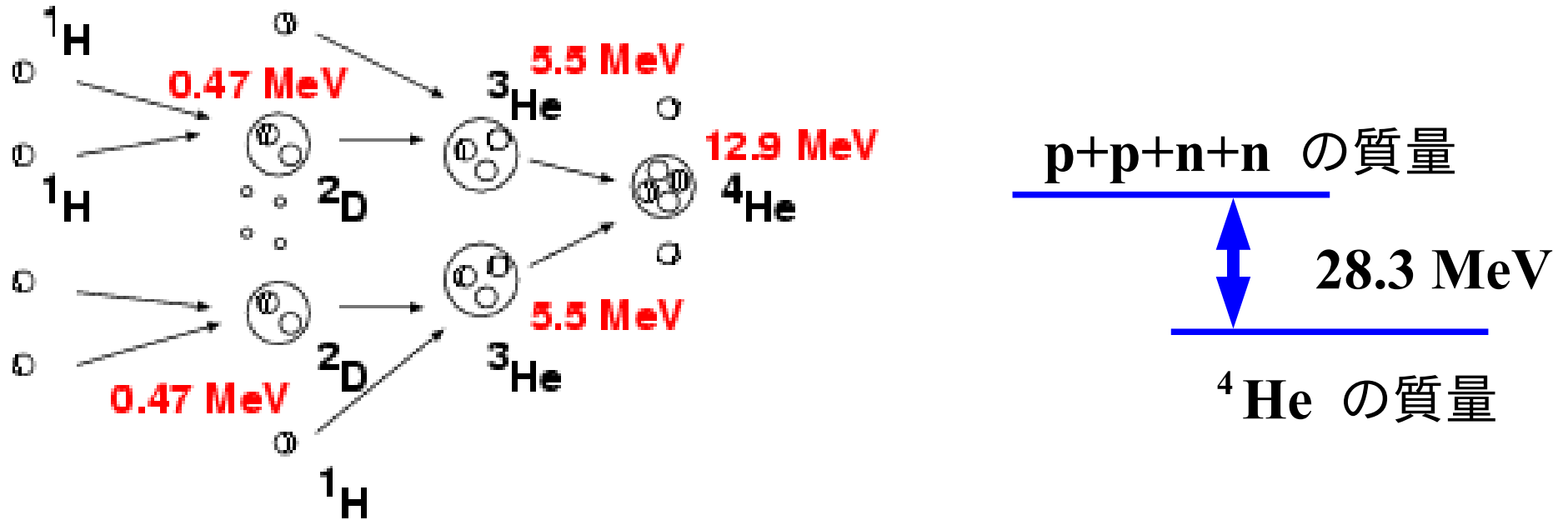
s-process(遅い中性子捕獲)
重い星の中での安定核を通る
遅い中性子吸収と β 崩壊の繰り返し
→ ^{138}Ba , ^{208}Pb (N=82,126)

r-process(速い中性子捕獲)
超新星爆発時に不安定核が
中性子を速く吸収して
大きな原子核が出来る。
その後 β 崩壊して、
安定な原子核へ

ビッグバン元素合成
Liまでの原子核が **Big Bang** 直後の
3-20 分間程度で生成された。

恒星中の元素合成 --- 水素燃焼

- 太陽のエネルギー源 (= 人類のエネルギー源)

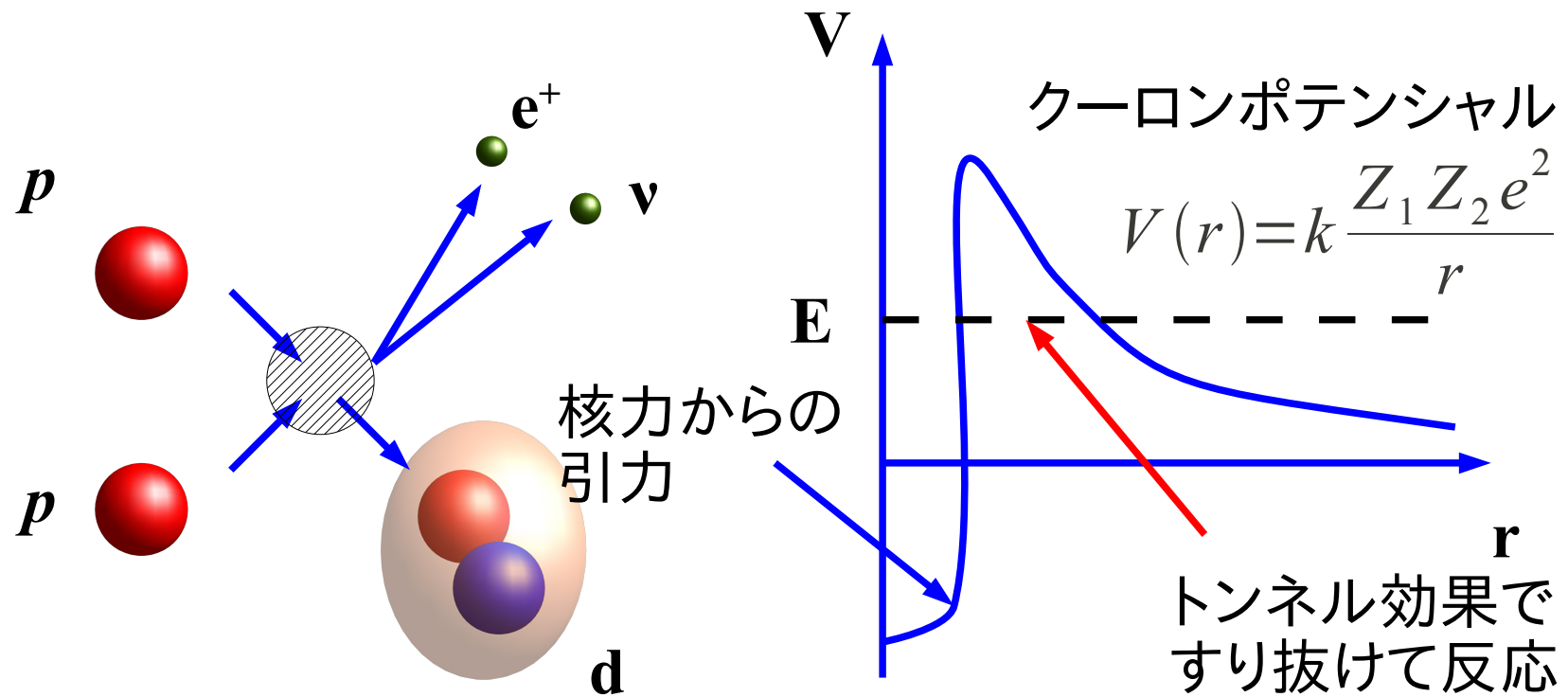


${}^4\text{He}$ 原子核の大きな束縛エネルギー (28.3 MeV) を利用する。

質量エネルギーの 0.7% を放出

恒星中の元素合成はなぜ長くかかるか？

- クーロンポテンシャルのトンネル効果と弱い相互作用
 - 原子核のエネルギースケールに比べて低い温度（エネルギー）であるため、クーロン障壁をなかなか越えられない
 - + 越えた時に同時に弱い相互作用（中性子の β 崩壊等）



力学的エネルギーの保存則

$$\frac{1}{2} m v^2 + V(r) = E = \text{一定}$$

微分とポテンシャル (位置エネルギー)

$$(r^n)' = n r^{n-1}, F = -\frac{dV}{dr}$$

補足

- 距離 r 離れた電荷 q_1 と q_2 の間には、クーロン力 F が働き、 F はクーロンポテンシャル V の微分で表せる。

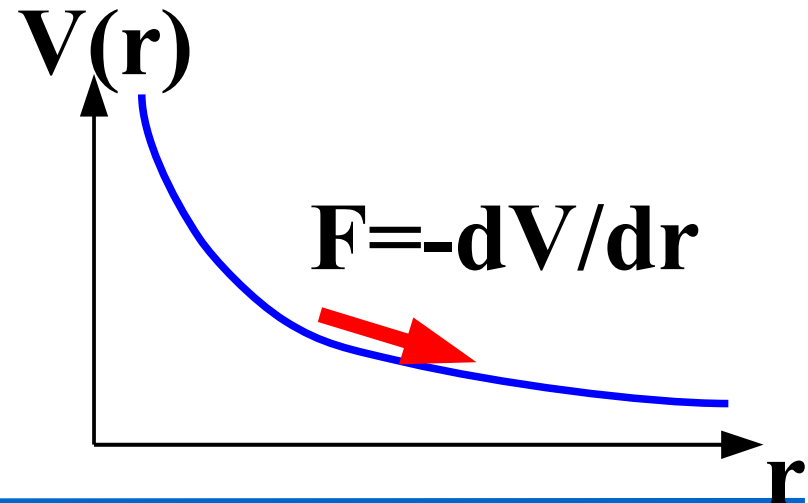
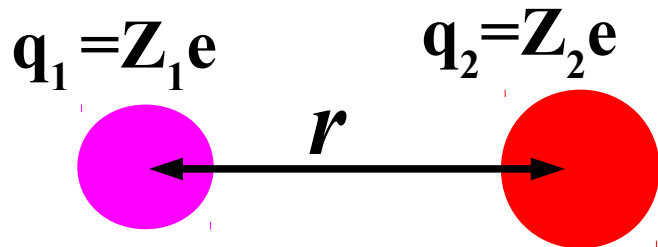
$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = -\frac{dV}{dr} \rightarrow V = k \frac{q_1 q_2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$$

(大学では、クーロン定数を $k=1/4\pi\epsilon_0$ と書くことが多い。)

- 原子番号 Z_1 の原子核と Z_2 の原子核の間のクーロンポテンシャル
→ $Z_1 e$ と $Z_2 e$ の電荷の間のポテンシャル。

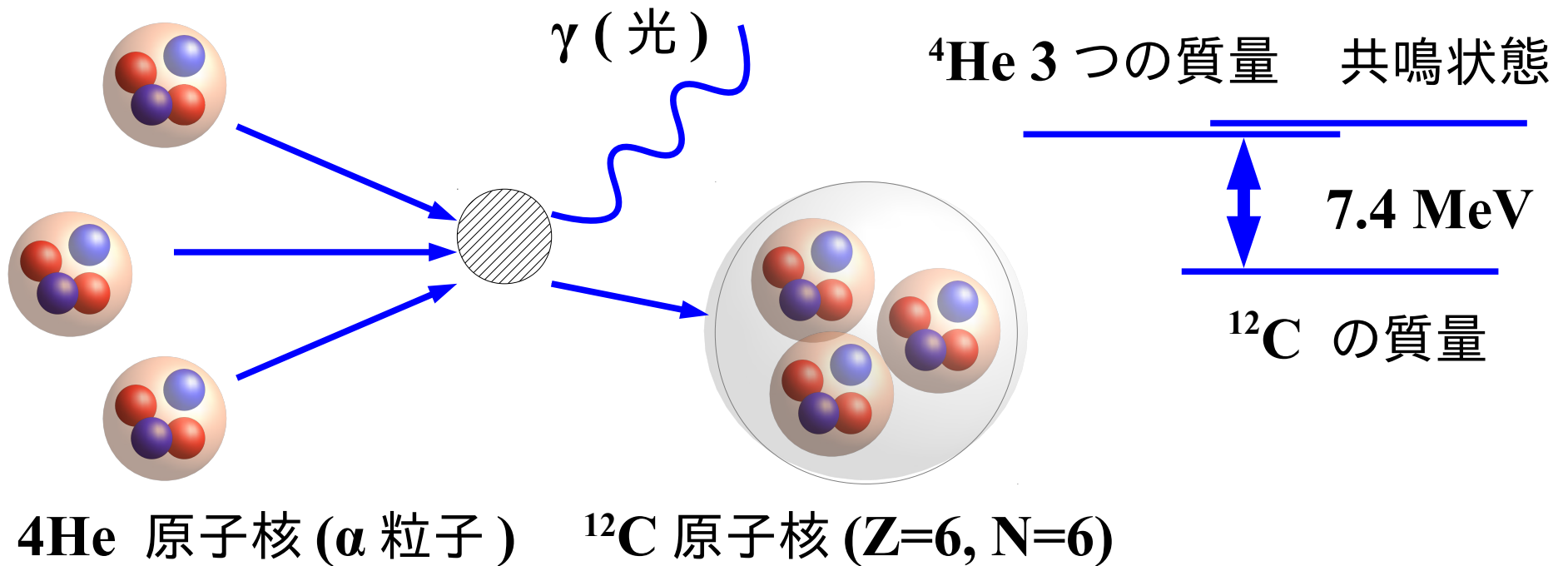
$e^2/4\pi\epsilon_0 = 1.44 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$ を使うと ϵ_0 を使わずに計算可。

$$V = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2}{r} \simeq 1.44 (\text{MeV} \cdot \text{fm}) \frac{Z_1 Z_2}{r}$$



ヘリウム燃焼

- ヘリウム原子核 (${}^4\text{He}$) が「燃える」ためには、他の原子核と核融合する必要がある！しかし、質量数 5、8 の原子核はすぐに崩壊。
→ トリプル α 反応



K. Nomoto (1982), K. Ogata, M. Kan, M. Kamimura (2009)

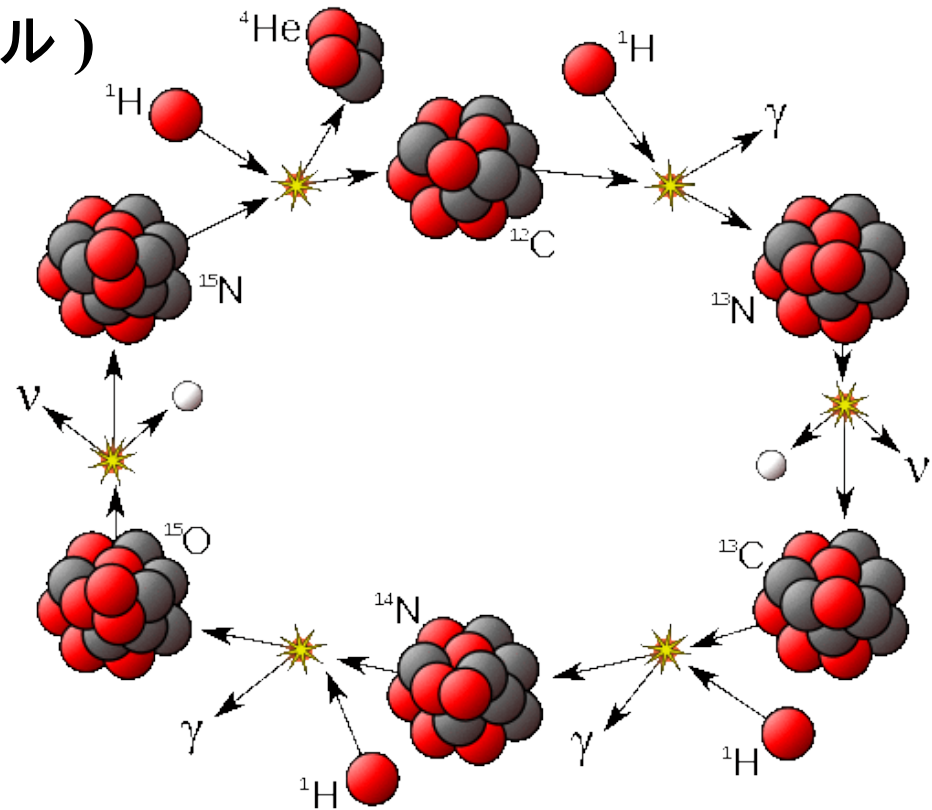
重い元素の合成




■ 鉄までの原子核

- ^{12}C ができると、水素・ヘリウム燃焼により鉄までの元素合成は大きな星では比較的順調に進む (CNO サイクル、Mg-Na サイクル)

反応の進行

- 熱の放出と温度上昇
- より大きな原子核の合成



 Proton	γ Gamma Ray
 Neutron	ν Neutrino
 Positron	

CNO サイクルによる元素合成
(Wiki-pedia)

より重い元素の合成

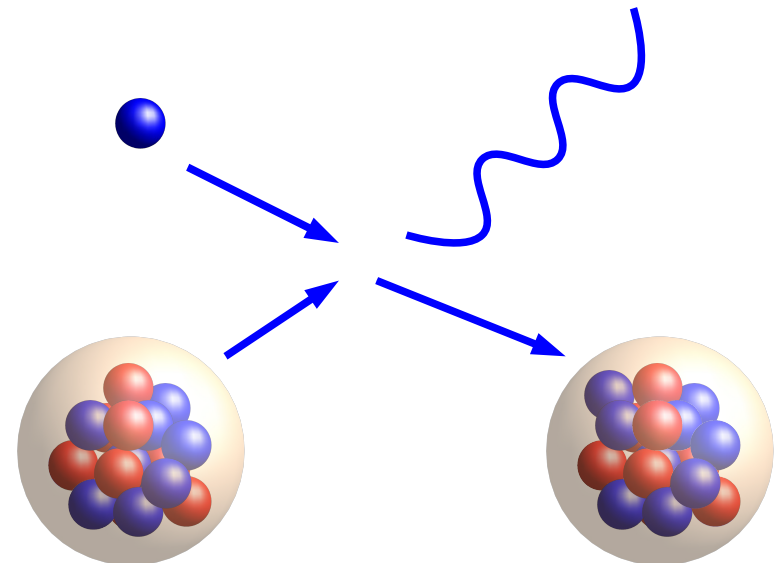
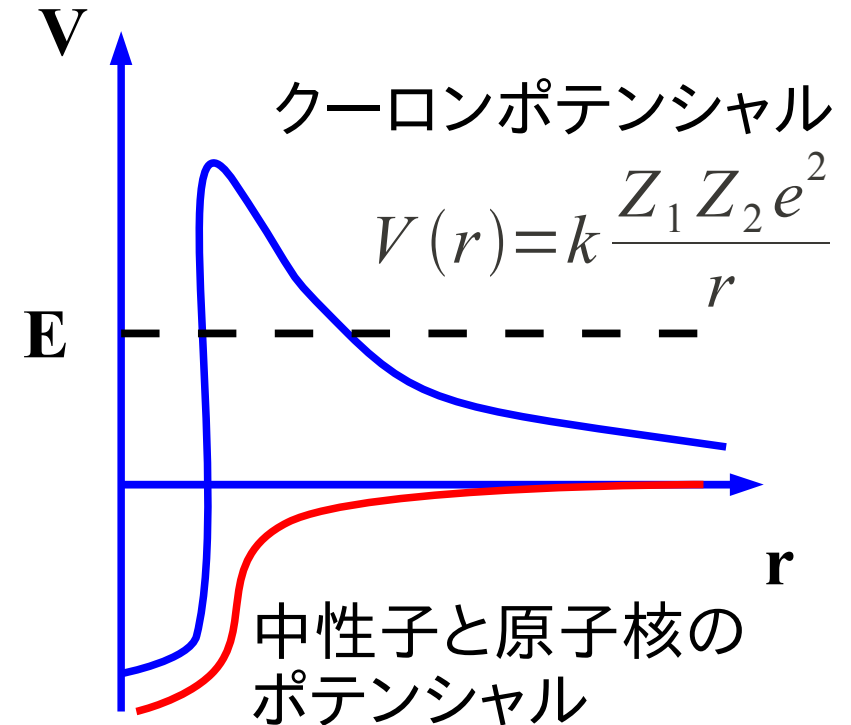
■ 重い原子核

→ 大きなクーロンポテンシャル

鉄よりも重い原子核を水素・ヘリウム
燃焼で作るには、
非常に高いエネルギーが必要。
しかし鉄以上は十分なエネルギーが
得られないので温度が上がらない。

■ 遅い中性子捕獲反応

- クーロンポテンシャルがないので
反応しやすい。
- ただし恒星の中にはほとんど
中性子はないので、進行は遅い。
(slow-過程)



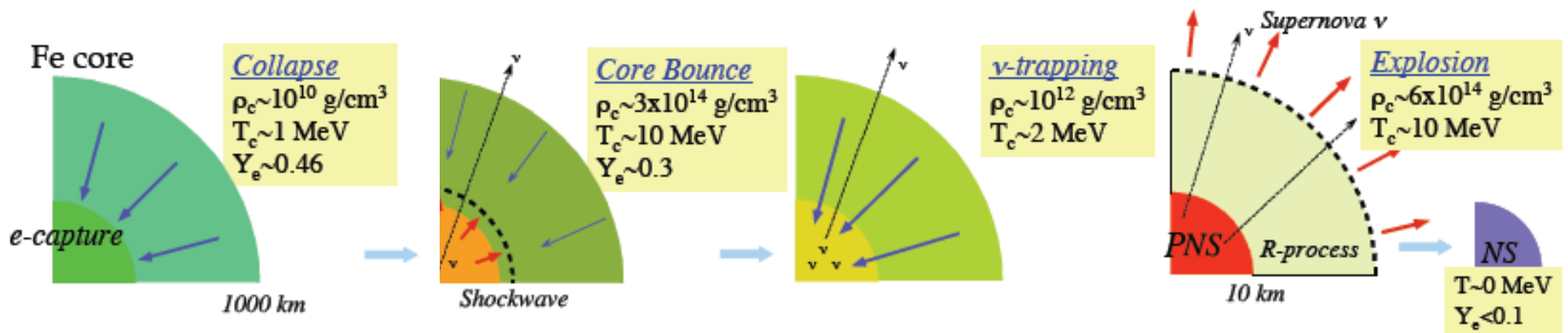
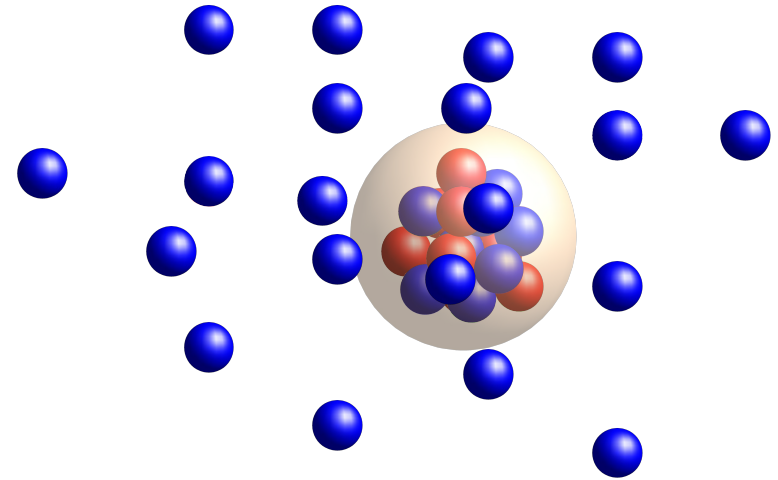
元素合成と超新星爆発

- 大量の中性子が作られる状況は？
→ 超新星爆発 or 中性子星合体

■ 超新星爆発

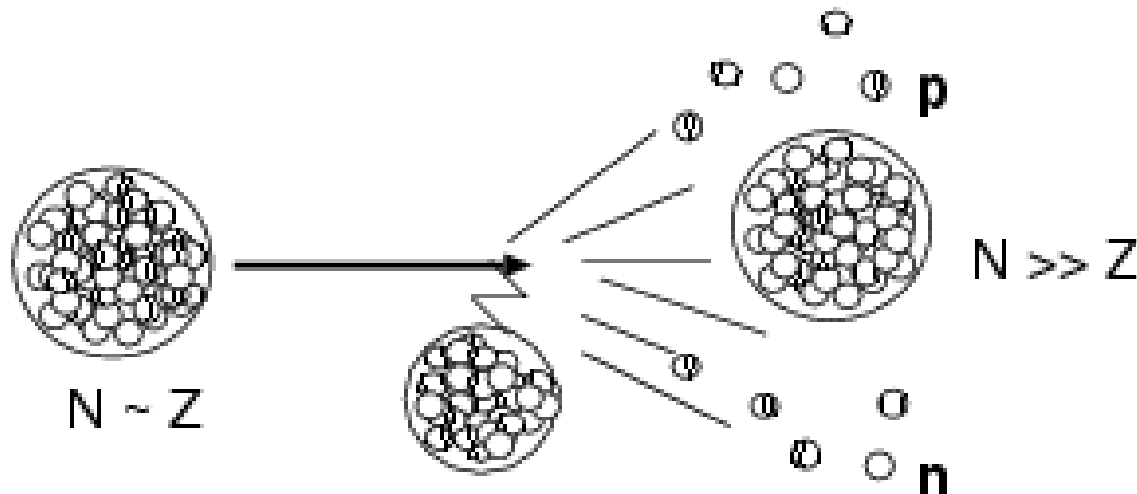
- 大きな星の鉄のコアが光分解
→ 重力崩壊
- 電子捕獲が起こり、陽子が中性子化
- 爆発時にあふれた大量の中性子が原子核に照射

→ 速い中性子捕獲過程



元素合成と不安定核

- 我々に必要な多くの元素は、「星の中」で作られた
→ 我々は「星の子」である。
- 元素合成には、多くの地上に存在しない不安定核が関与
→ 例： 安定な Ni アイソトープ ^{58}Ni
r-process (速い中性子捕獲過程) に関与 ^{78}Ni
- 地上の実験から不安定核の原子核反応率を評価するには？
→ 不安定核を作って核反応を起こさせる！



多くの不安定核を効率よく生成して実験
→ RI ビームファクトリー (RIBF)

RIKEN RI Beam Factory (RIBF)

Old facility

Experiment facility

To be funded

Accelerator

RIPS

GARIS

SHE (eg. Z=113)

~100 MeV/nucleon

~5 MeV/nucleon

RILAC

AVF

SCRIT

fRC

RRC

ZeroDegree

SAMURAI

SRC

SLOWRI

IRC

RI-ring

CRIB (CNS)

BigRIPS

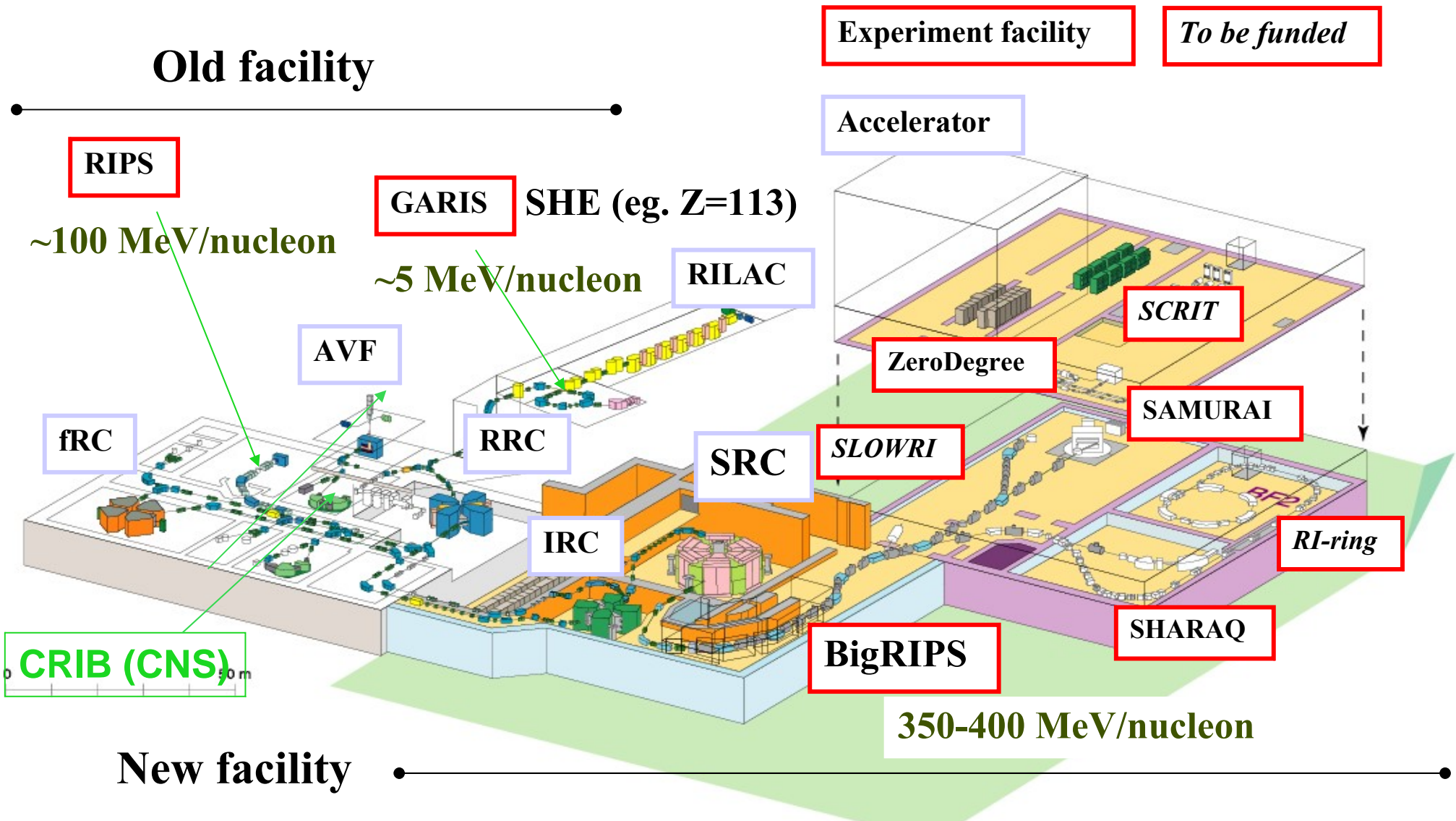
SHARAQ

350-400 MeV/nucleon

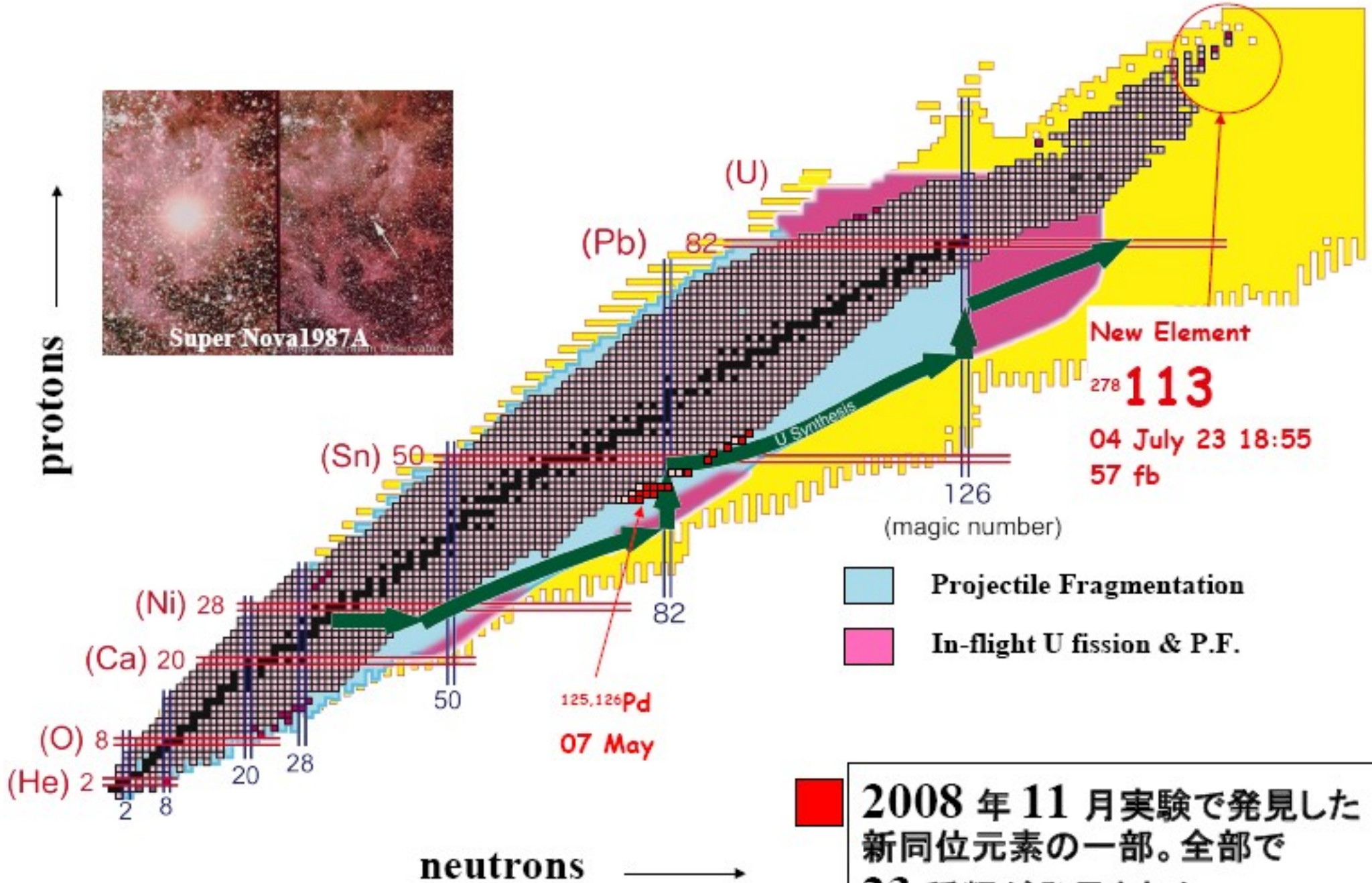
New facility

Intense (80 kW max.) H.I. beams (up to U) of 345 A MeV at SRC
 Fast RI beams by projectile fragmentation and U-fission at BigRIPS
 Operation since 2007

by Sakurai



↑
protons



New Element

²⁷⁸**113**

04 July 23 18:55

57 fb

126
(magic number)

Projectile Fragmentation

In-flight U fission & P.F.

^{125,126}Pd

07 May

neutrons →

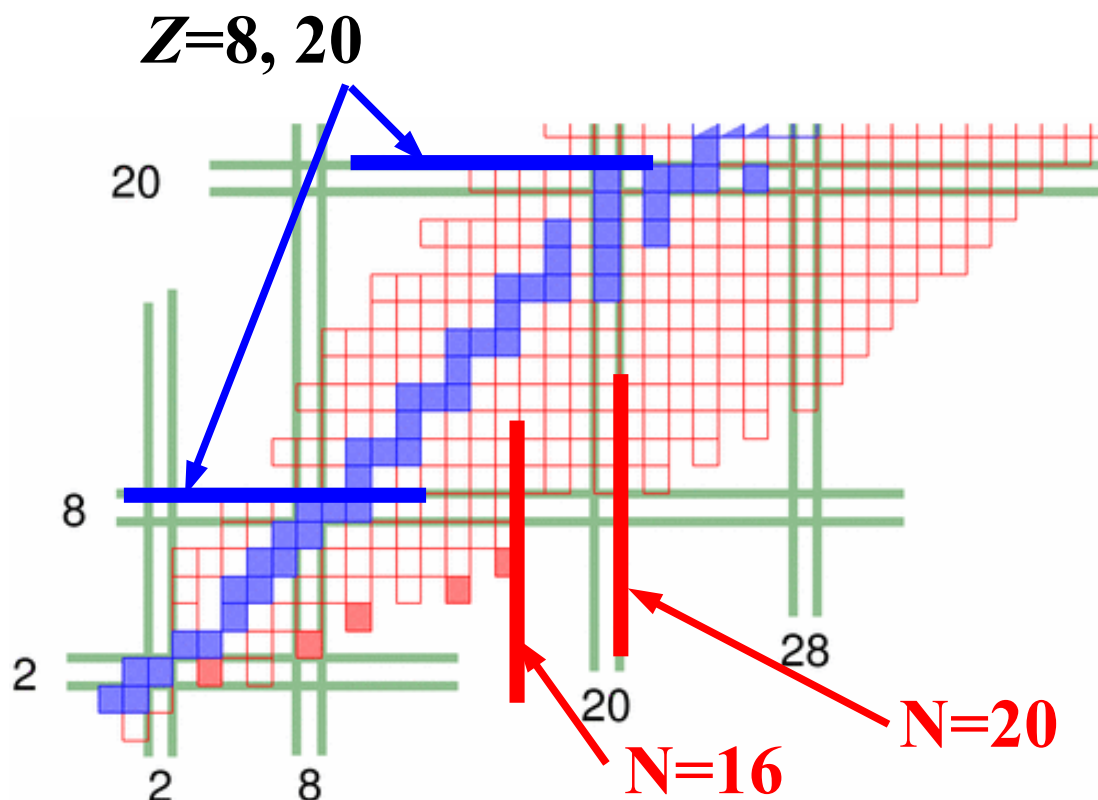
by Yano

■ 2008年11月実験で発見した
新同位元素の一部。全部で
23種類が発見された。

不安定核の特徴－魔法数の変化

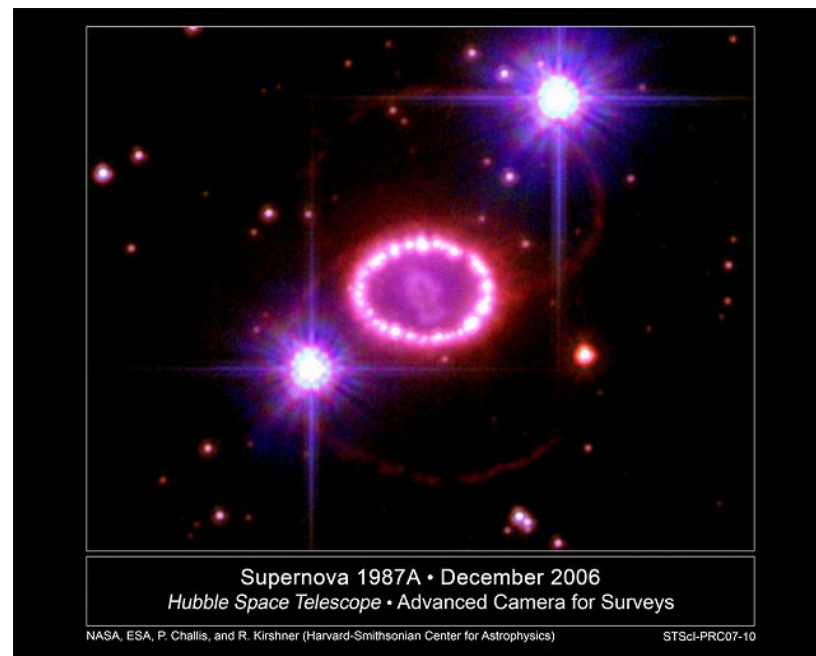
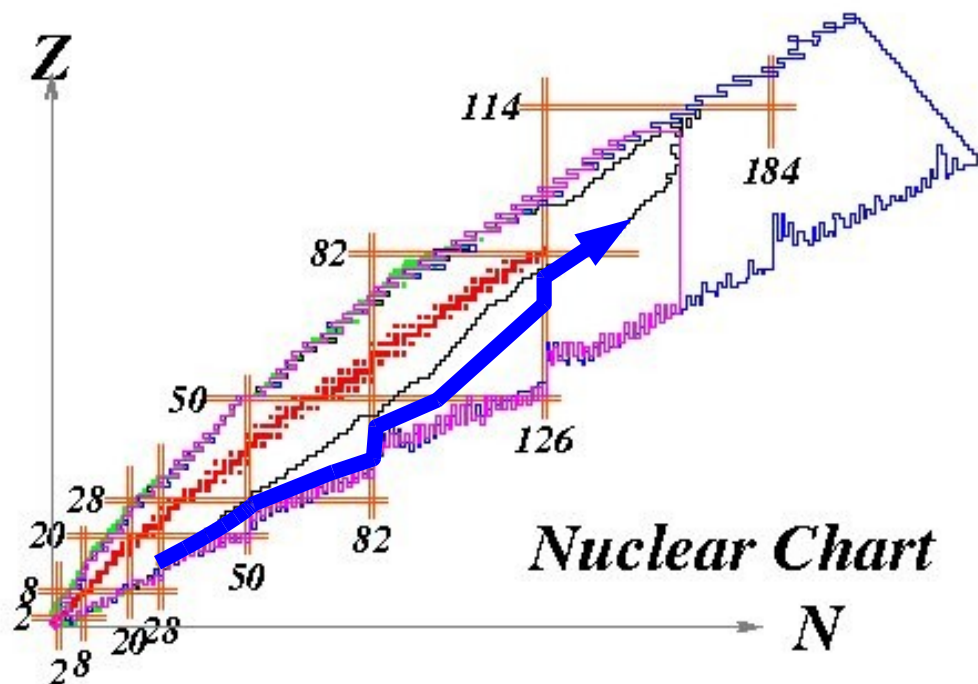
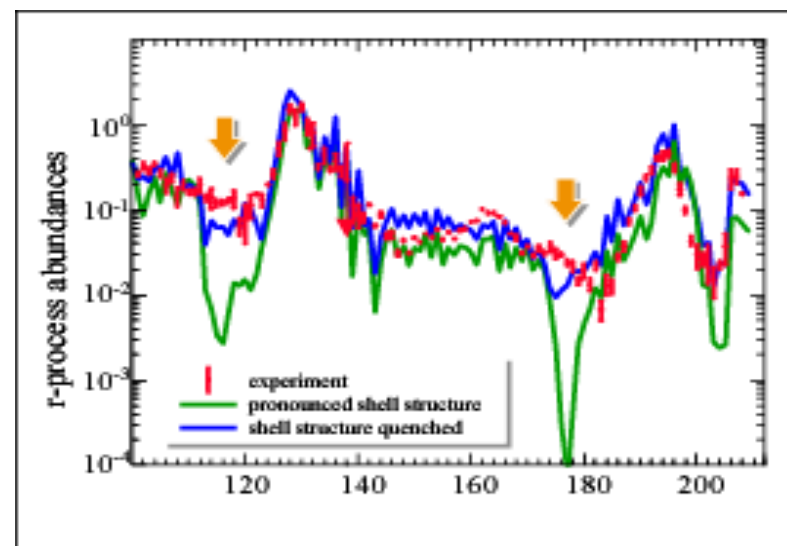
- $N=20$ は中性子過剰核でも魔法数か？
 - 魔法数になると、原子核は安定化する
→ $Z=8, 20$ では、小さな N でも原子核が存在
 - $N=20$ では小さな Z まで原子核が束縛していない！
 - むしろ $N=16$ で束縛する原子核が小さな Z 方向に伸びている

- 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)



不安定核の特徴－魔法数の変化

- 超新星爆発時の r-process (速い中性子捕獲過程) は魔法数によって経路が決まっていた。
 - 不安定核で魔法数が変化すると経路が変化
 - 元素組成に影響



まとめ

- 我々を形作る元素は、
ビッグバン、恒星、超新星爆発
で主に作られる。どのような反応が起こるかは、
クーロンポテンシャルの強さと温度と組成
により決まる。
 - ビッグバン元素合成：高い温度、豊富な中性子
 - 恒星の中の元素合成 → ゆっくりとした進行
水素燃焼、ヘリウム燃焼
遅い中性子捕獲過程
 - 超新星爆発（または中性子星合体）：速い中性子捕獲過程
→ 我々は星の子である。
- 元素合成において不安定核・魔法数などが大きな影響をもつ
- 触れられなかったこと、今後の課題
 - 状態方程式、中性子星、魔法数が現れる原因、ストレンジネス、白色矮星の熱核暴走からの元素合成、...
 - 超新星の爆発メカニズム、測定した不安定原子核を実際に取り入れる

さいごに

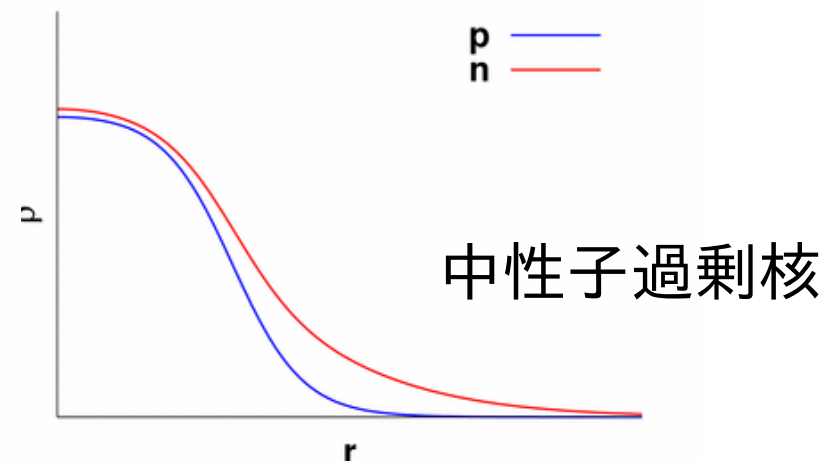
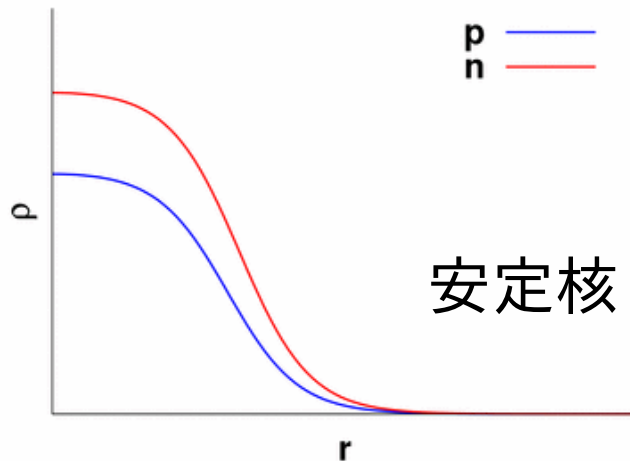
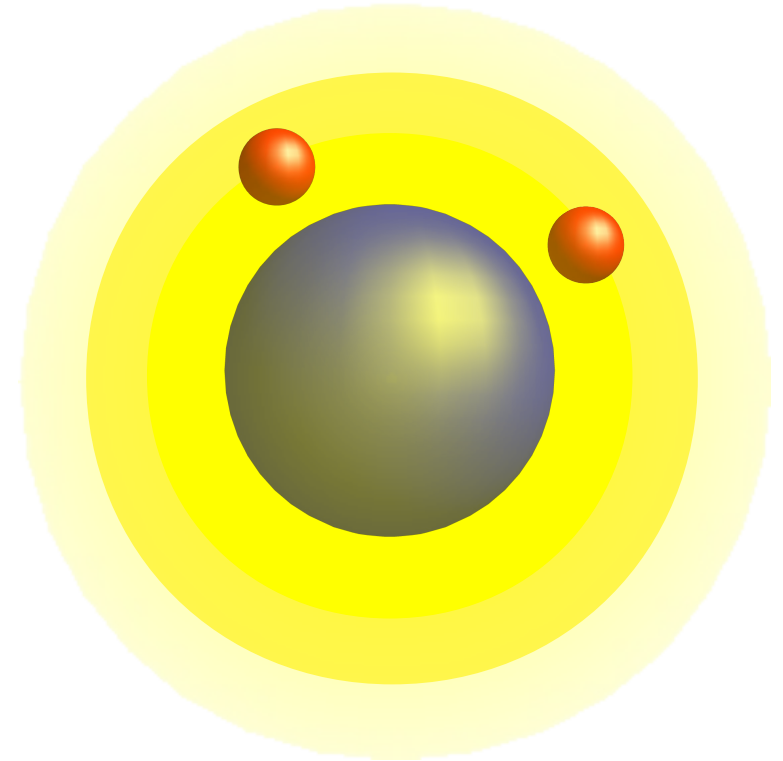
素直な疑問をじっくり考えることがとても大切です。
今回話した内容も、
「物質を究極に細かくしていくと、
どのようなものに行きつくだろうか？」
「物質を究極に熱していくとどうなるだろうか？」
「我々の身の回りにある物質はどこでできたのだろうか？」
など、人類が古来からもっていた疑問から
研究が始まっています。

現在の科学でも分からない事は山ほどあります。
素直に疑問を発し、じっくり考えてください。

Thank you !

不安定核の特徴—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)

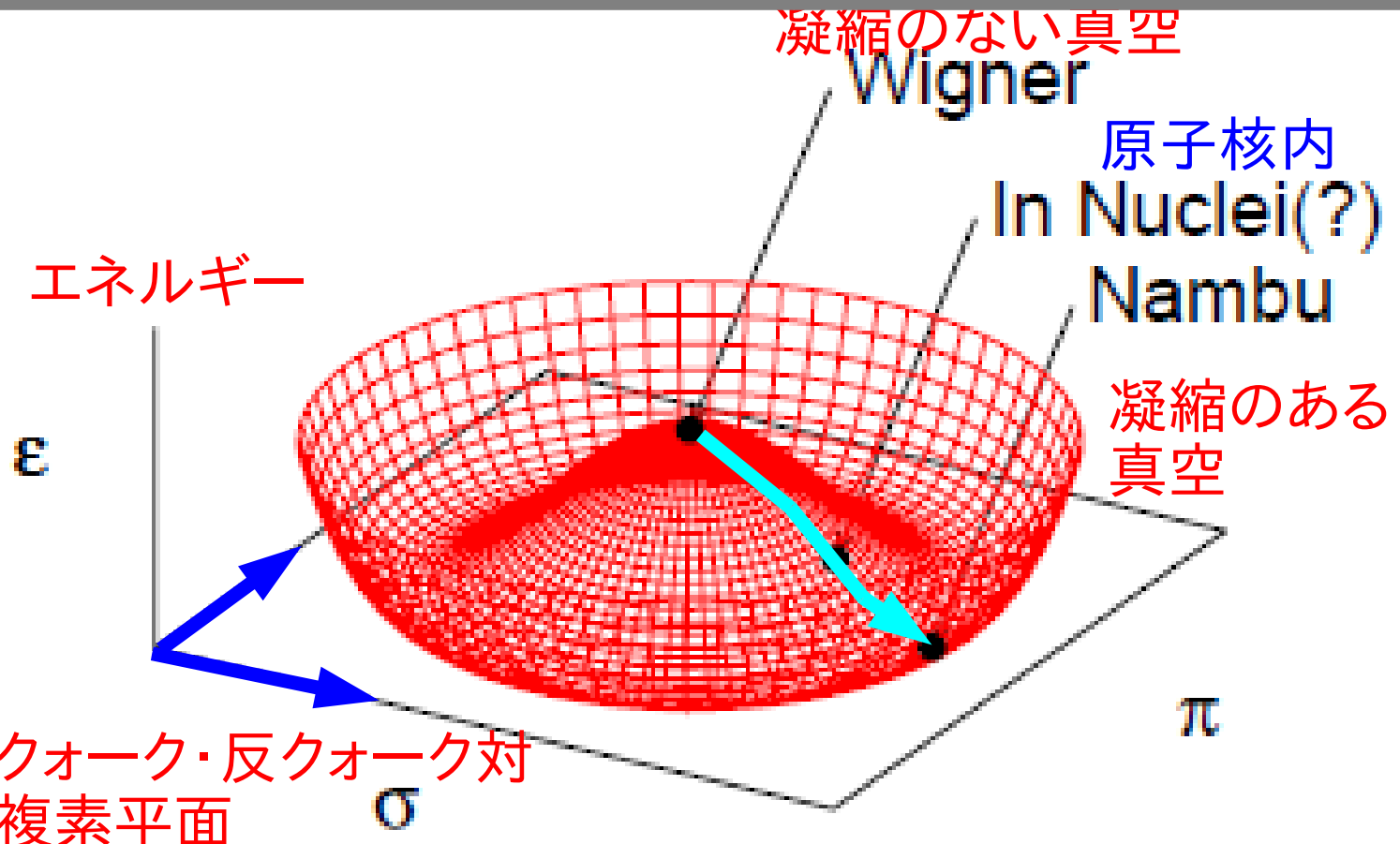


クォークの質量は凝縮で決まる (復習)

- クォークの質量は凝縮の強さにほぼ比例
 - もしも凝縮が小さくなるとどうなるか？
 - クォーク質量の減少
 - 核子・中間子質量の減少

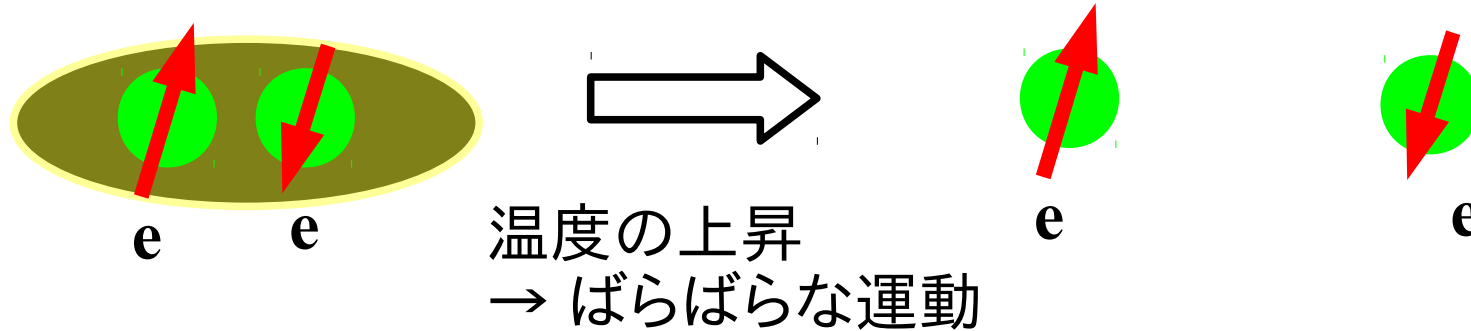
原子核内での中間子の質量変化

→ 対称性の自発的破れの(部分的)回復の証拠(?)

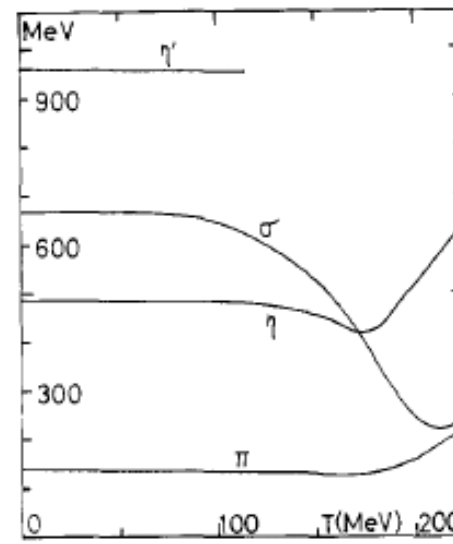
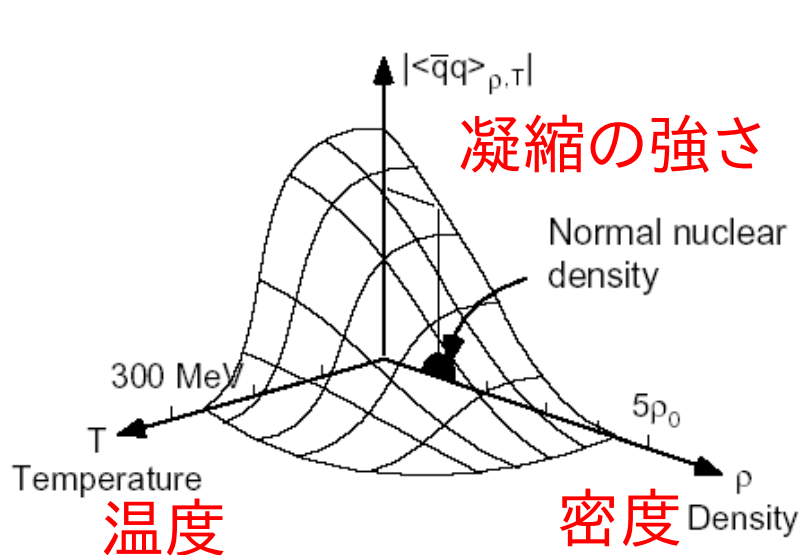


環境による中間子質量の変化

- 凝縮の強さは環境（温度、密度）に依存する
例：超電導状態は電子対の凝縮体。
温度を上げると電子対は壊れる



- クォーク・反クォーク対凝縮も温度・密度によって変化する！

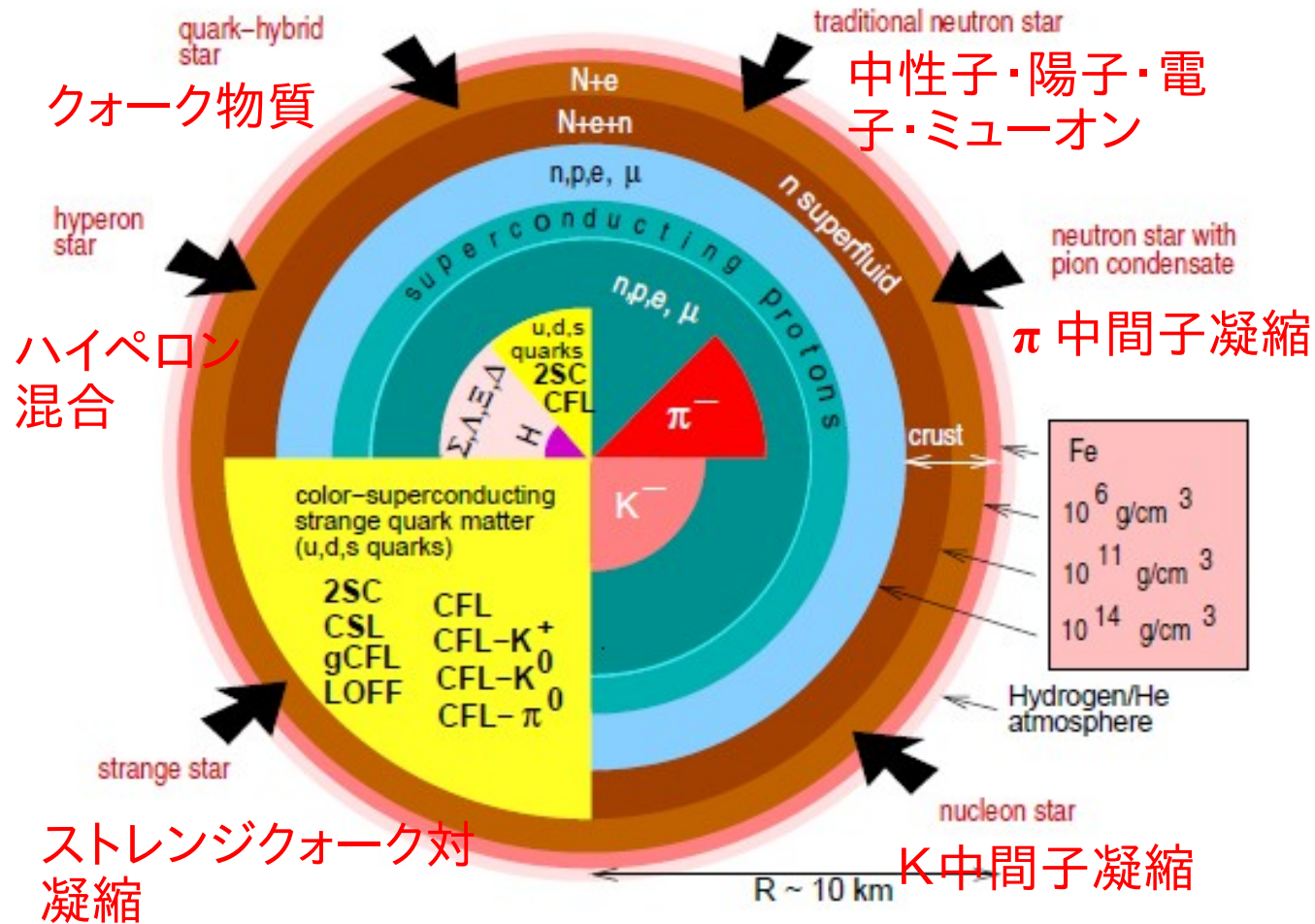


南部
Jona-Lasinio
模型

国広 (1989)

高密度になると何がおこるか？

- 中性子星の中での粒子組成については、10人の研究者が10人とも違うことを予測する
→ 実験で確かめるしかないでしょう ...



F. Weber, Prog. Part. Nucl. Phys. 54 (2005) 193

大強度陽子加速器施設 (J-PARC)



2009年1月稼動予定

<http://j-parc.jp/>

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)

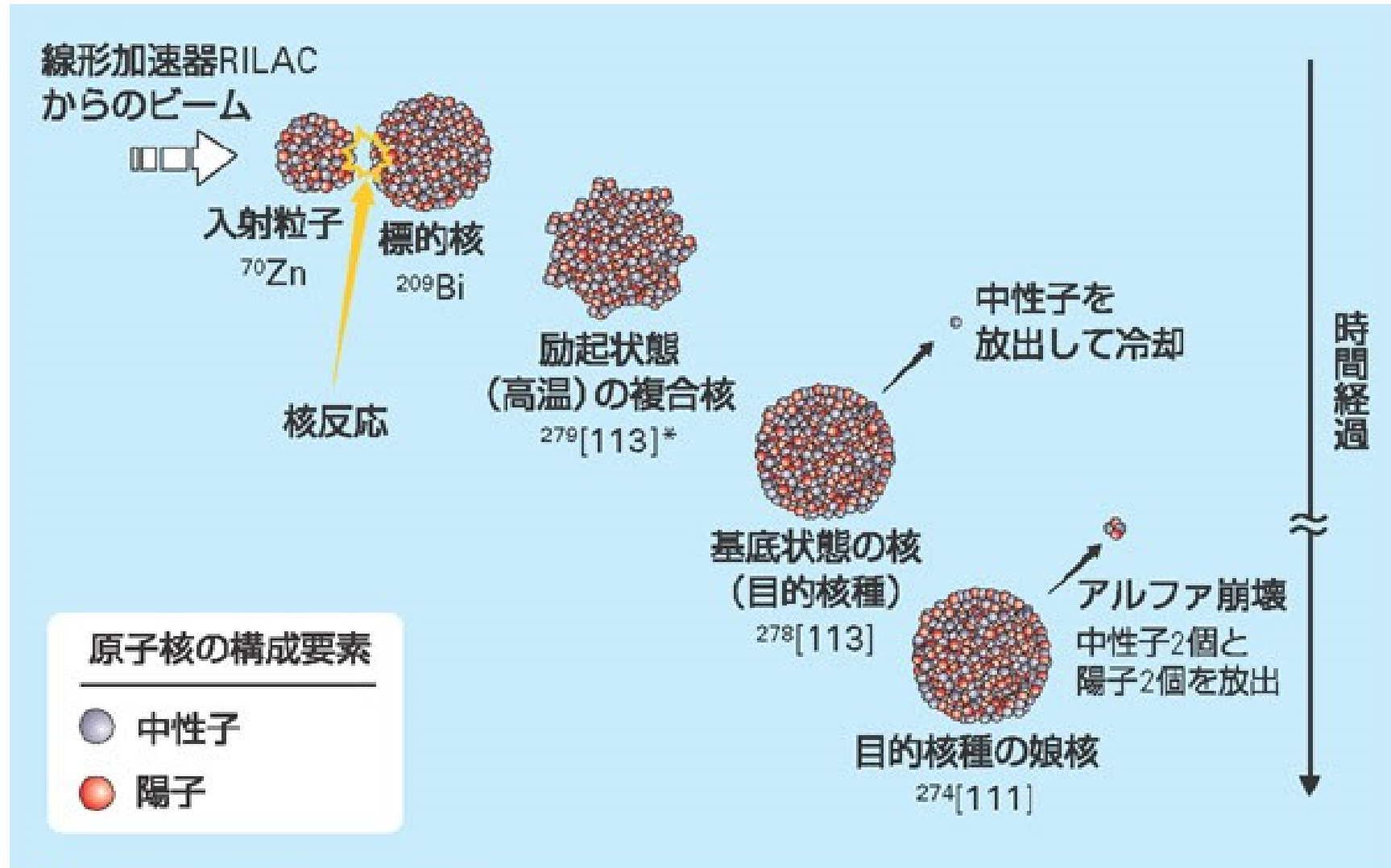


図1 原子番号113元素の合成と崩壊連鎖