

クォークから元素の合成まで --- 地上の実験で探る物質と質量の起源 ---

京都大学・基礎物理学研究所 大西 明

- はじめに
2008年ノーベル物理学賞(南部、小林・益川)
- 物質の起源(元素合成)とRIビームファクトリー (RIBF)
- 質量の起源と大強度陽子加速器施設 (J-PARC)
- おわりに

はじめに
2008年ノーベル物理学賞

2008年ノーベル物理学賞

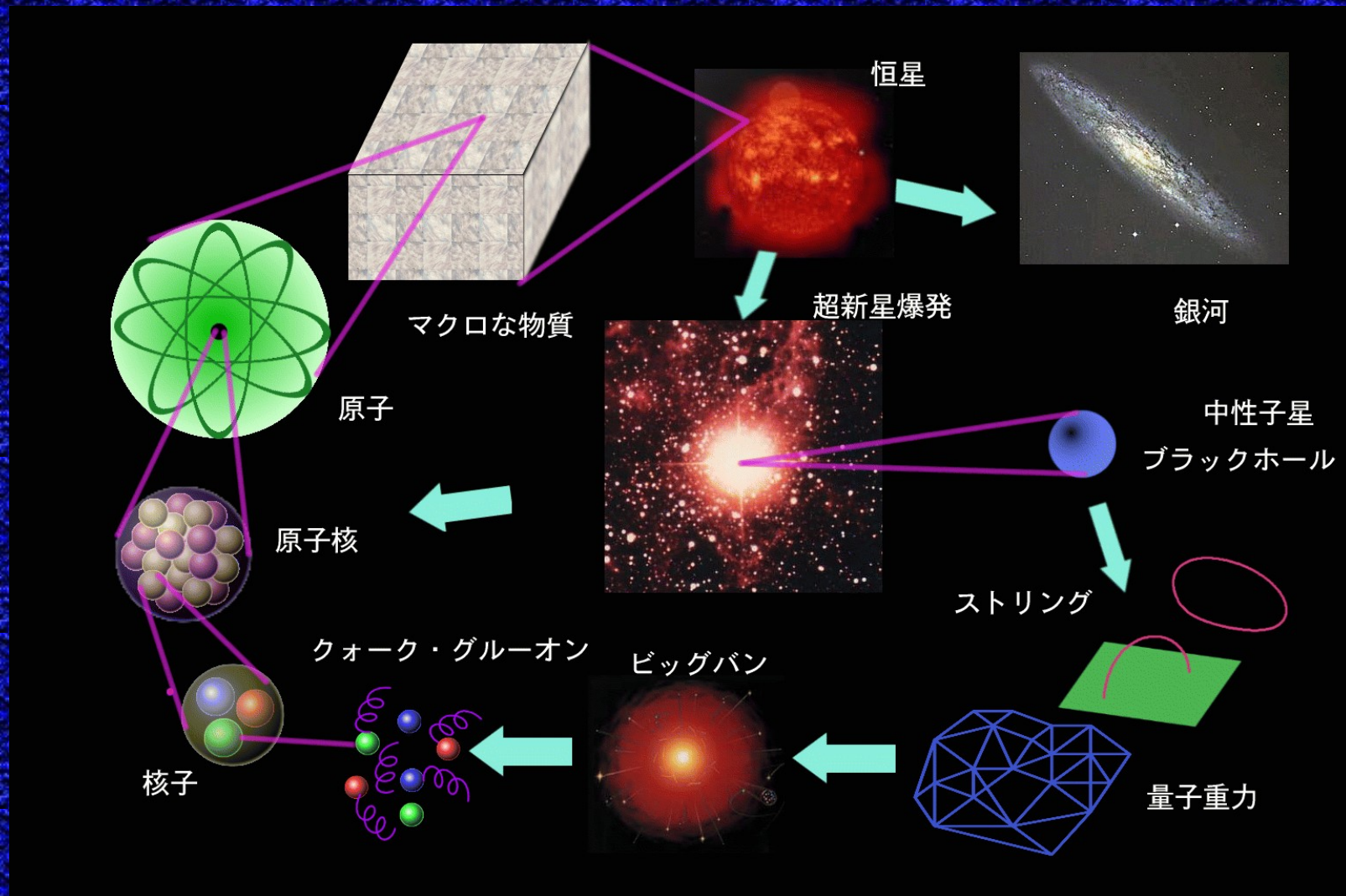
南部さん、小林さん、益川さん、おめでとうございます！



- 南部陽一郎(シカゴ大学教授)
- 小林誠(高エネルギー加速器研究機構教授)
益川敏英(京都産業大学教授・京都大学基礎物理学研究所教授)
- とともに「クォーク」の不思議な性質の解明に寄与
→ クォークとは何か？どのような性質が解明されたのか？

クォークとは？

- 原子 → 原子核 → 核子 → クォーク
クォーク = 現時点で確認されている「最小」の物質の主要構成粒子



素粒子の種類

物質粒子				ゲージ粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代		
クォーク	アップ	チャーム	トップ	強い力 グルーオン 電磁力 光子 弱い力 W ボゾン Z ボゾン	
	ダウン	ストレンジ	ボトム		
レプトン	ニュートリノ	ニュートリノ	ニュートリノ		
	電子	ミューオン	タウ		
ヒッグス場に伴う粒子 (未発見)				ヒッグス粒子	

クォークの不思議

- 3世代 (6種類) 以上存在する
 - 第一世代 (d,u) → 陽子・中性子
 - 第二世代 (s,c)
 - 第三世代 (b,t)
 → **なぜ3世代必要なのか？ (小林・益川)**
- クォーク3つで陽子・中性子等のバリオン、クォーク・反クォーク対で中間子を作る。(まとめてハドロン)
- 質量は5 MeV 程度。
3つ集まった核子は 1000 MeV 程度
→ **なぜ重くなるのか？ (南部)**
- 単独では取り出せない
→ ハドロンの中に閉じ込められている

	物質粒子			ゲージ粒子
	第1世代	第2世代	第3世代	
クォーク	アップ 	チャーム 	トップ 	強い力 グルーオン
	ダウン 	ストレンジ 	ボトム 	
レプトン	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ ミューオンニュートリノ	ν_τ タウニュートリノ	
	e^- 電子	μ^- ミューオン	τ^- タウ	弱い力 W^+ W^- Z W ボゾン Z ボゾン
ヒッグス場に伴う粒子 (未発見)				H ヒッグス粒子

小林・益川理論

■ ノーベル賞受賞理由

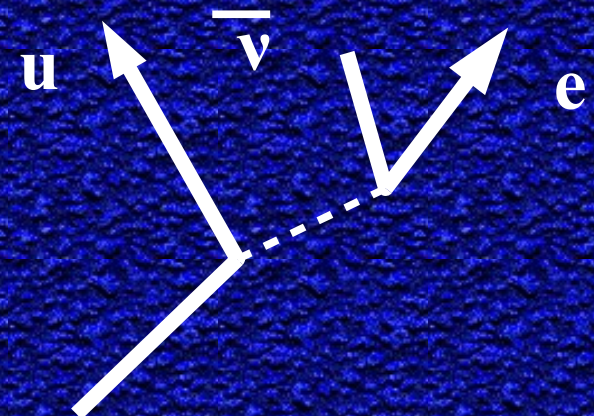
“for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature”

クォークが3世代(以上)であることを
予言する(CP)対称性の破れの
起源の発見に対して



■ 小林・益川行列

クォークが3世代あると
クォークの混合行列に複素数が現れる



$$s \rightarrow s' = s \cos \theta + d \sin \theta$$

小林・益川理論

- 小林・益川行列
クォークが3世代あると
クォークの混合行列に複素数が現れる

2世代だと、

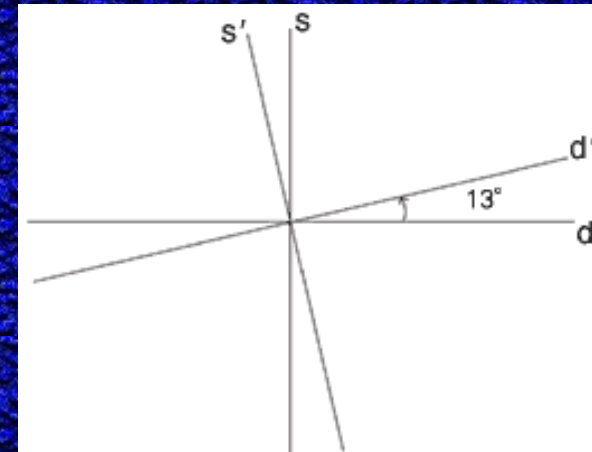
$$\begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$



3世代あると

クォークの回転

$$\begin{pmatrix} c_1 & c_3 s_1 & s_1 s_3 \\ -c_2 s_1 & c_1 c_2 c_3 - s_2 s_3 e^{i\delta} & c_1 c_2 s_3 + c_3 s_2 e^{i\delta} \\ s_1 s_2 & -c_1 c_3 s_2 - c_2 s_3 e^{i\delta} & -c_1 s_2 s_3 + c_s c_3 e^{i\delta} \end{pmatrix}$$



$$e^{i\delta} = \cos \delta + i \sin \delta$$

小林・益川理論(1973)の功績

- 粒子・反粒子の入れ換え対称性 (C)+ 空間反転対称性 (P) の破れを自然に説明
 - CP 変換は複素数共役 ($i \rightarrow -i$)
- クォークが3種類 (u, d, s) しか見付かっていなかった当時に、6種類のクォーク (u, d, s, c, b, t) が存在することを予言
→ 後の実験でことごとく発見
(1974年 charm, 1977年 bottom, 1995年 top)
- 小林・益川行列によるクォークの混合も実験的に確認 (KEK(筑波)、スタンフォード)
- 「宇宙で粒子が反粒子よりも多い」ことを基礎付け
 - クォーク数の非保存(未確認)、Cの破れ、CPの破れ(小林・益川)

30年以上にわたって高エネルギー実験の動機付けを与え、我々が存在する基盤(物質の起源)を与えた!

■ ノーベル賞受賞理由

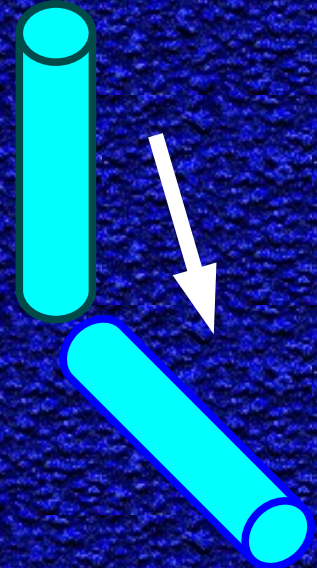
for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics

素粒子・原子核物理において対称性が自発的に破れて粒子が質量を獲得する機構の発見に対して

■ 対称性の自発的破れとは？

「まっすぐ立てた鉛筆は、どの方向に倒れる確率も同じ(等方的)だが、少しの揺らぎである方向に倒れ、元に戻ることはない。」

- 南部理論では、カイラル対称性が自発的に破れる機構を発見し、生の質量が小さい(5 MeV)クォークが大きな質量を得ることを示した。



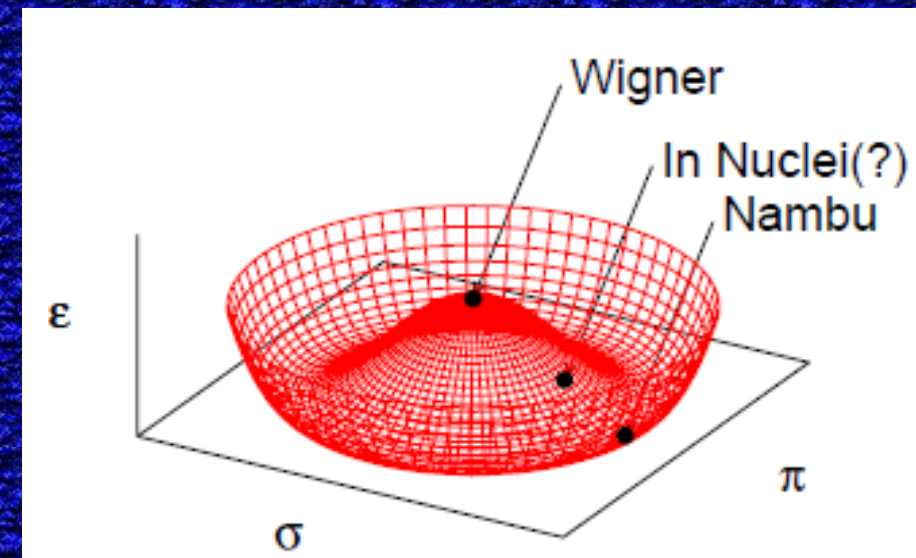
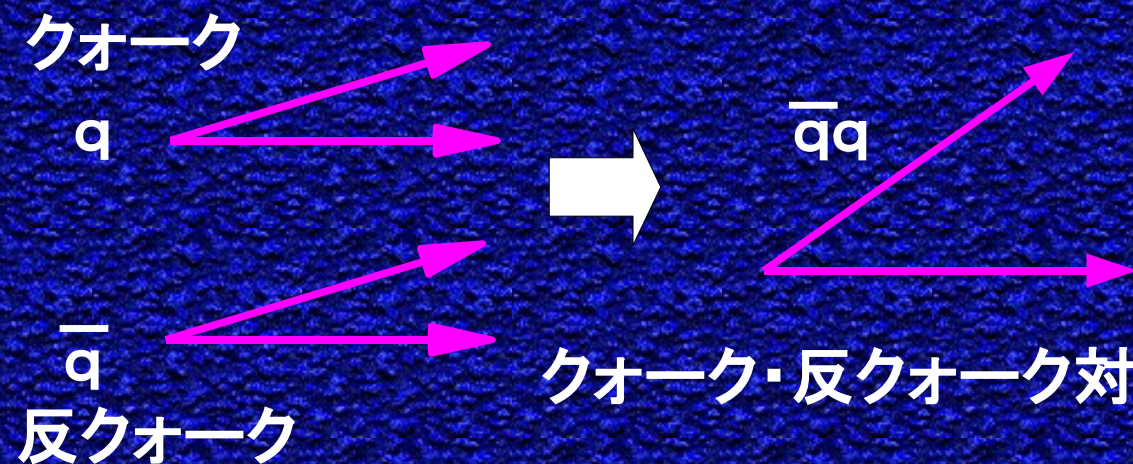
南部理論:カイラル対称性の自発的破れ

■ カイラル対称性

クォークと反クォークを複素平面で同じ方向にまわしても
エネルギーは変わらない

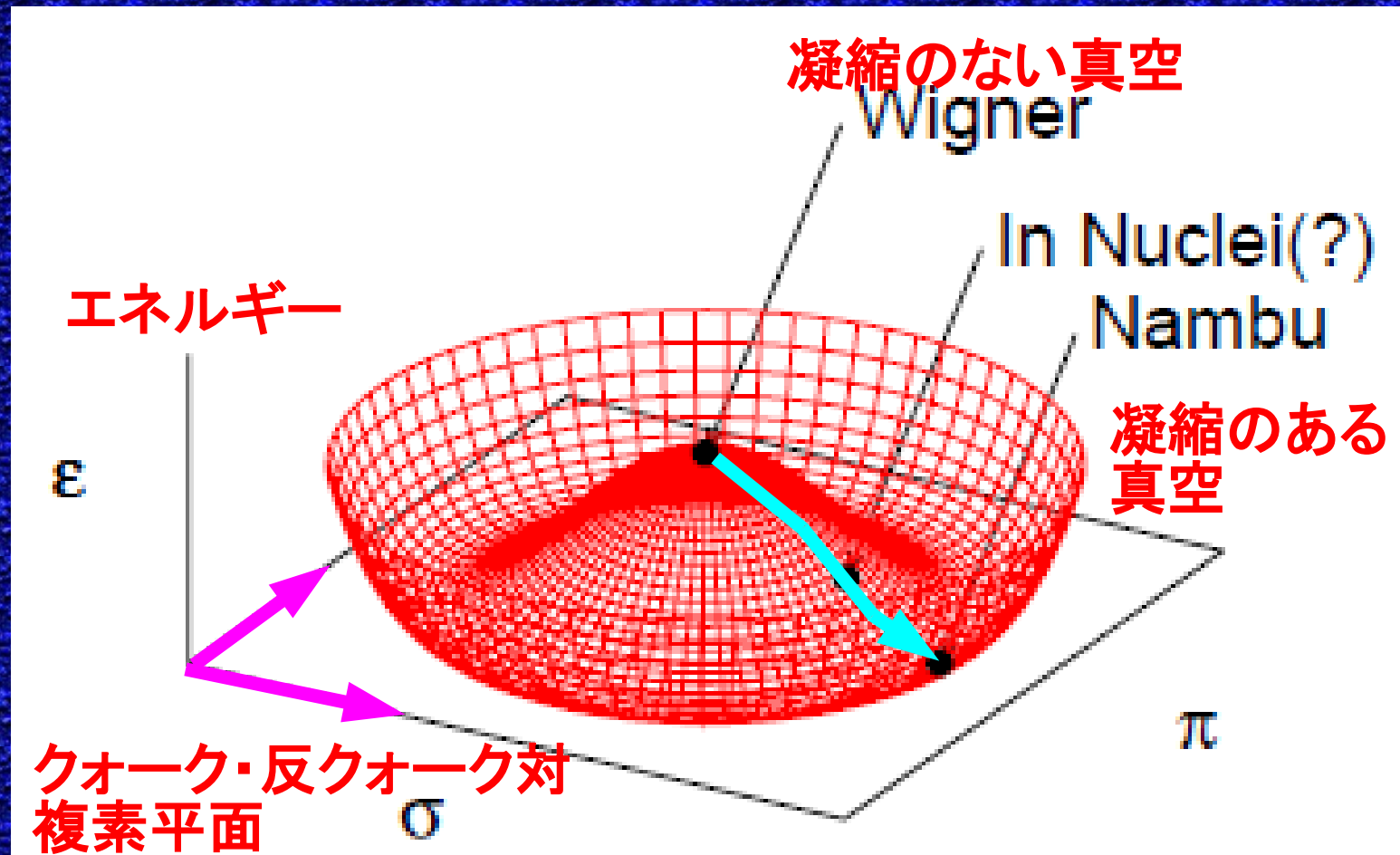
→ クォーク・反クォーク対を複素平面でまわしても
エネルギーは変わらない

■ クォークと反クォークの間には強い引力が働くので、
対を作って同じ方向に凝縮する(空間を埋め尽くす)。



南部理論:カイラル対称性の自発的破れ

- 最も安定な状態 (真空) ではクォーク・反クォーク対が凝縮
→ ある方向が選ばれる(真空での自発的対称性の破れ)
→ クォークは凝縮体にぶつかって動きにくくなる
→ 質量の増加



南部理論の功績

- 真空(エネルギー最小状態)において対称性が自発的に破れ、粒子が質量を獲得する仕組みを最初に発見
→ 現代の物理学全体の基本概念
- 真空での対称性の自発的破れに伴い、「まわる方向」に軽い粒子が現れる(南部・ゴールドストーン粒子)が現れることを予言
→ π 中間子の現れる機構の説明
- 軽いクォーク(約 5 MeV)が大きな質量(約 300 MeV)を獲得し、核子や中間子の大きな質量を生み出すことを示す
→ 我々の体の質量の 98 % はクォーク・反クォーク対の凝縮により生み出されている
- 他にもクォークの基本的性質について多くの提案

クォーク・ハドロン物理の創始者

**物質の起源(元素合成)と
RI ビームファクトリー
(RIBF)**

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

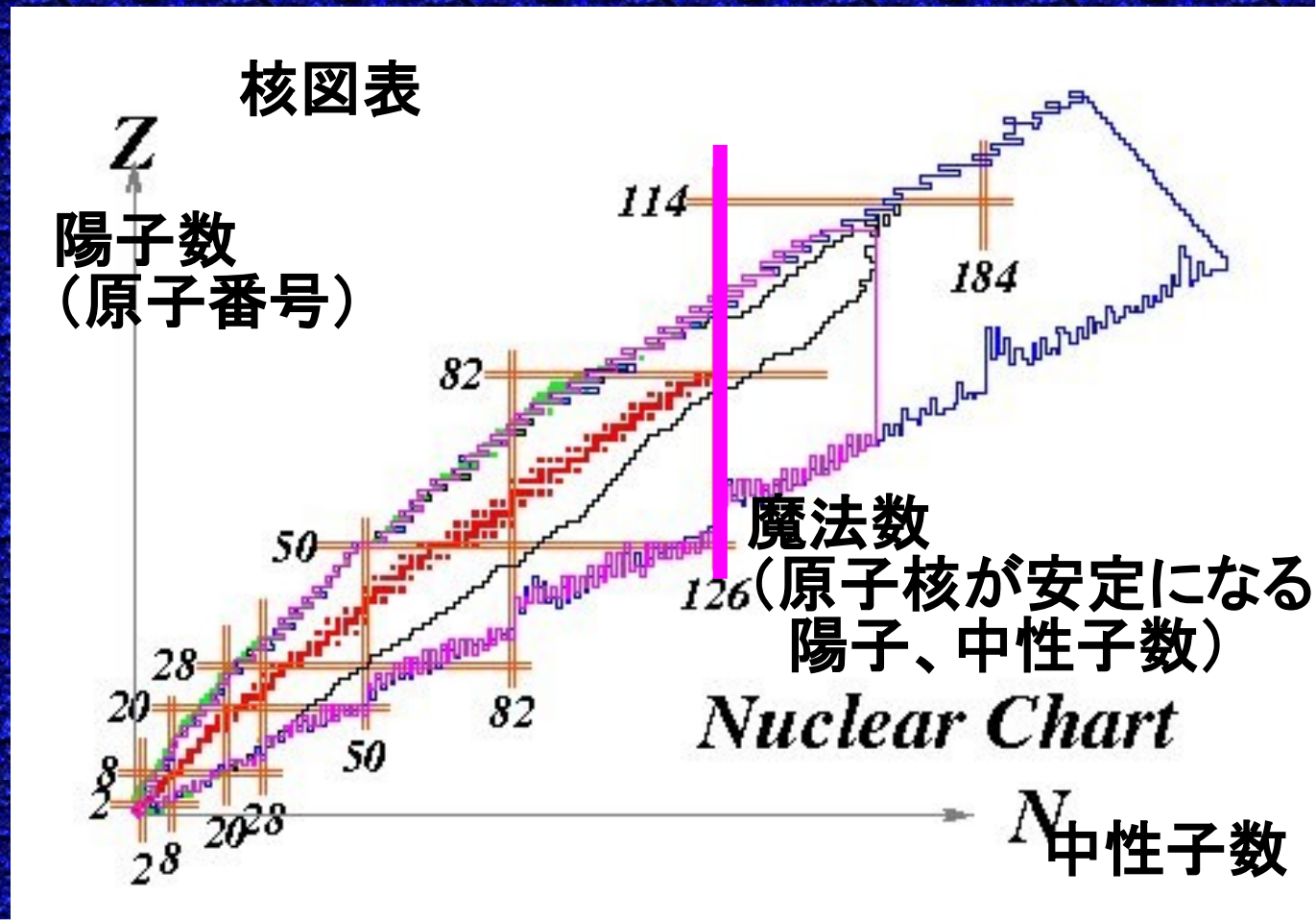
A=Z+N: 核子数 (= 原子量), X: 元素記号

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

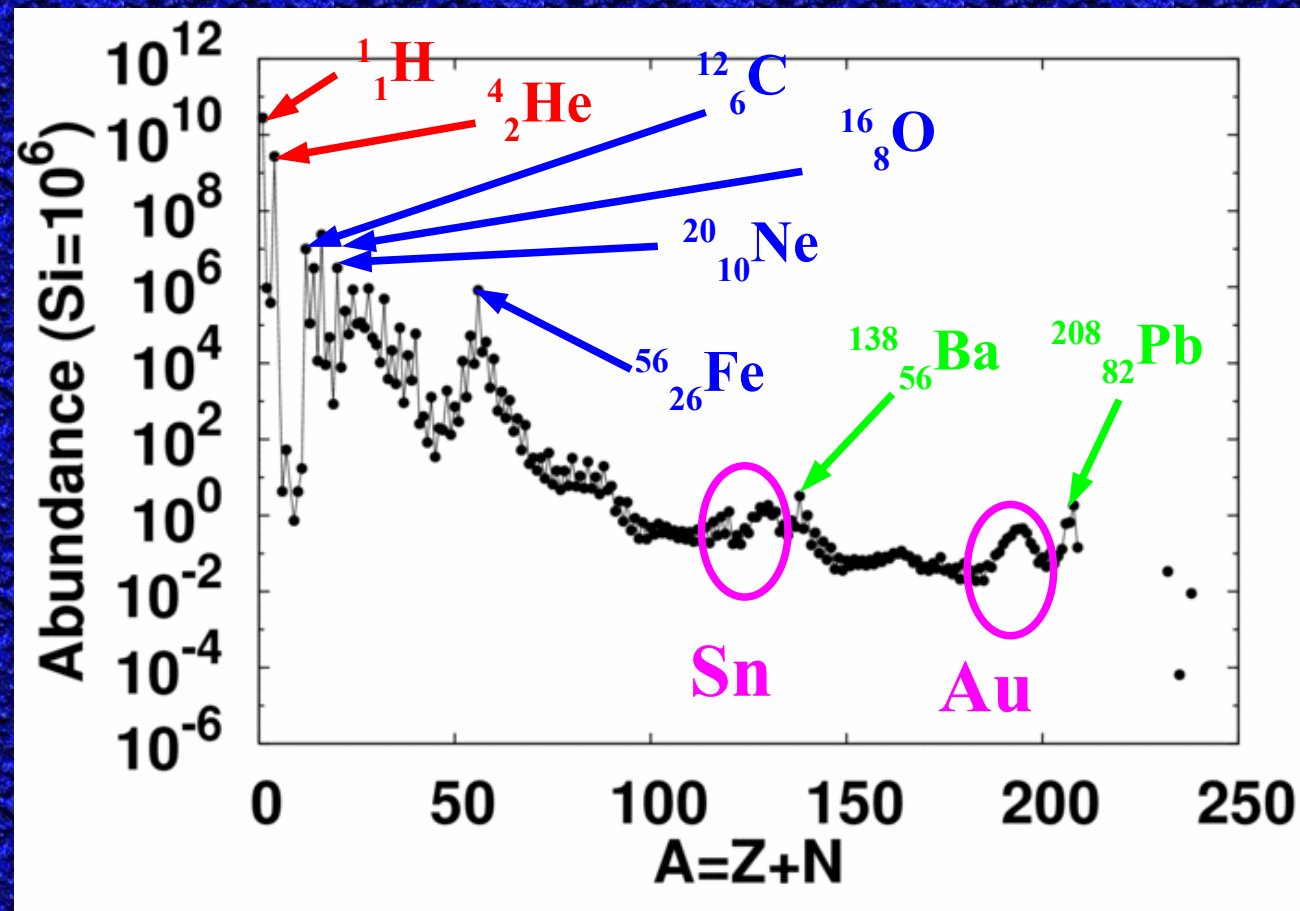
2, 8, 20, 28, 50,
82, 126



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 (${}^{138}_{56}\text{Ba}$), 鉛 (${}^{208}_{82}\text{Pb}$) 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 + 非平衡

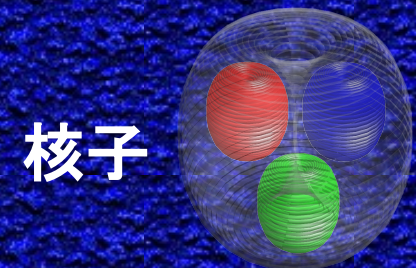
■ クォーク物質から核子へ

● 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

● $2p(\text{陽子}) + 2n(\text{中性子}) \rightarrow {}^4_2\text{He}$ 等で Li まで

他の元素は
いつ、どこで、どのように、
作られたのか？



元素合成—様々な過程

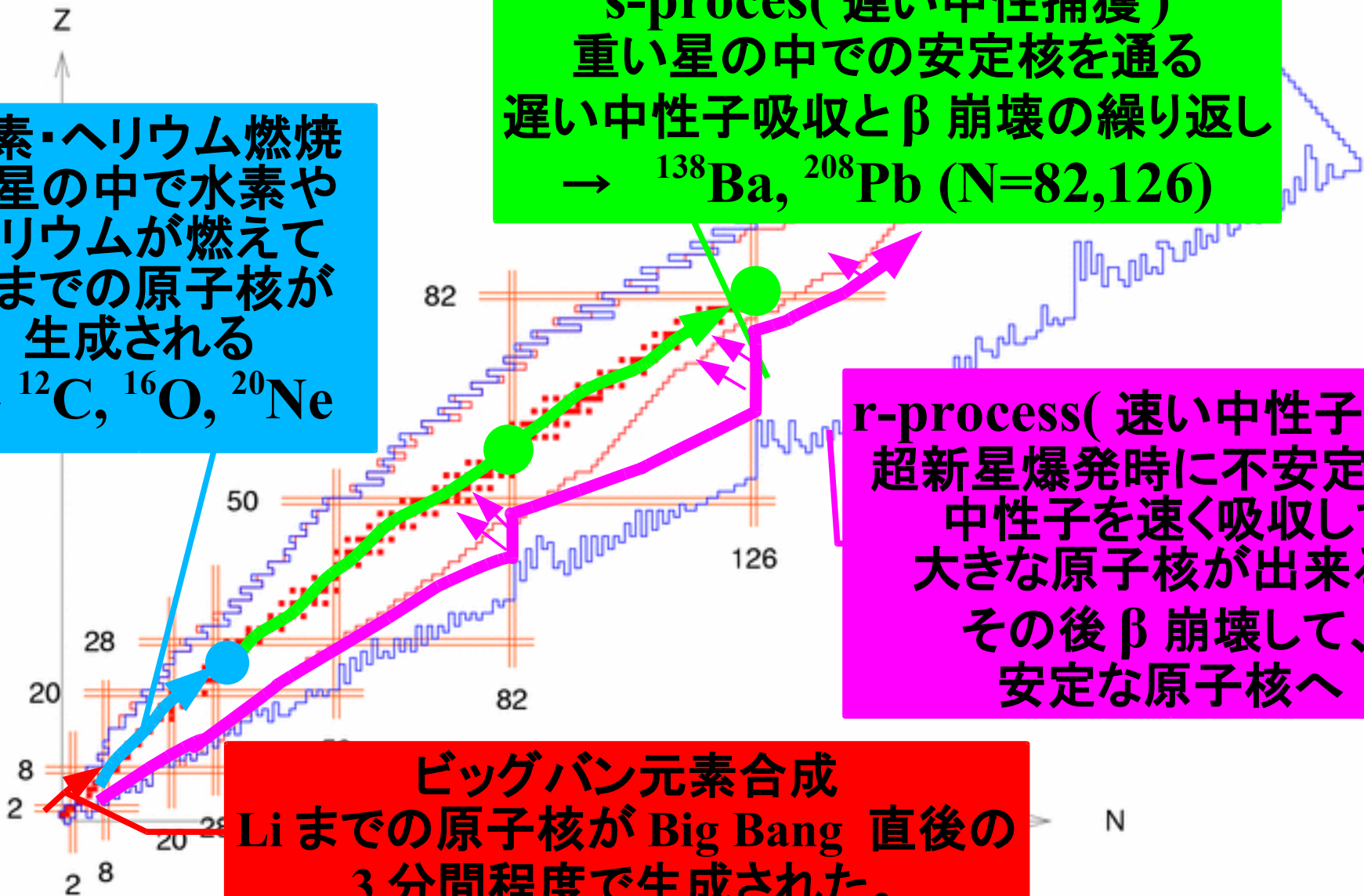
■ 核図表の上で元素合成を見ると

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)

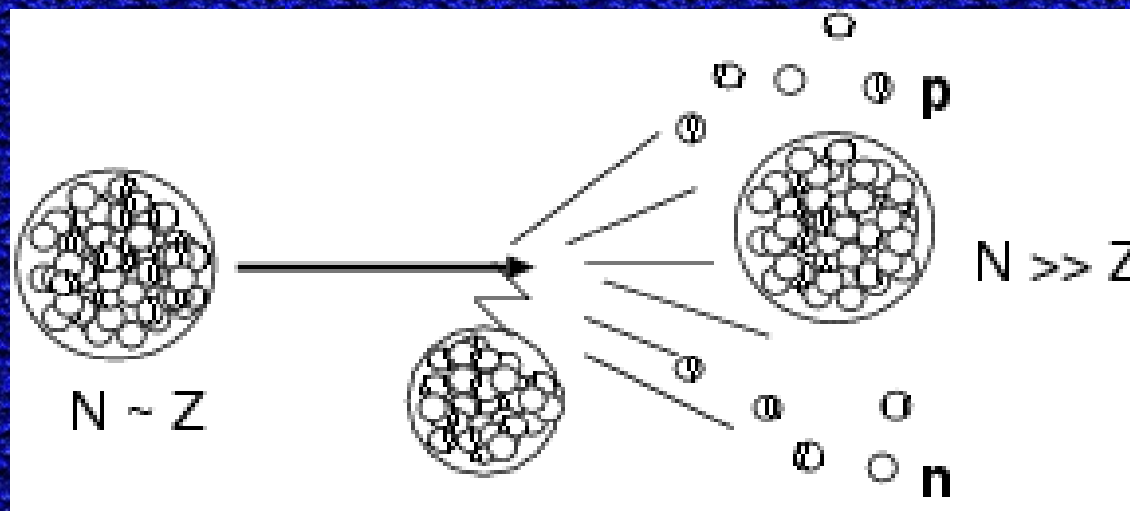
r-process(速い中性子捕獲)
超新星爆発時に不安定核が
中性子を速く吸収して
大きな原子核が出来る。
その後 β 崩壊して、
安定な原子核へ

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



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！



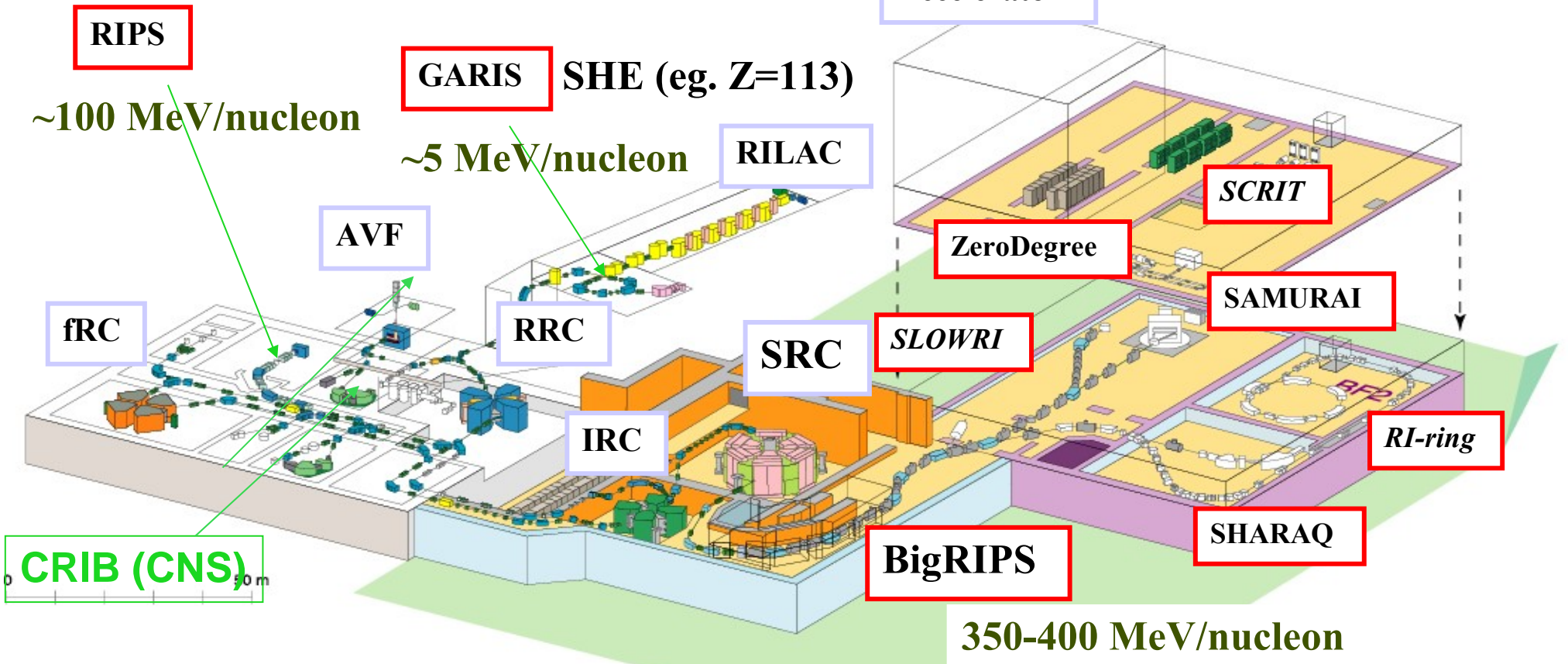
多くの不安定核を効率よく生成して実験
→ RI ビームファクトリー (RIBF)

RIKEN RI Beam Factory (RIBF)

Old facility

Experiment facility *To be funded*

Accelerator



New facility

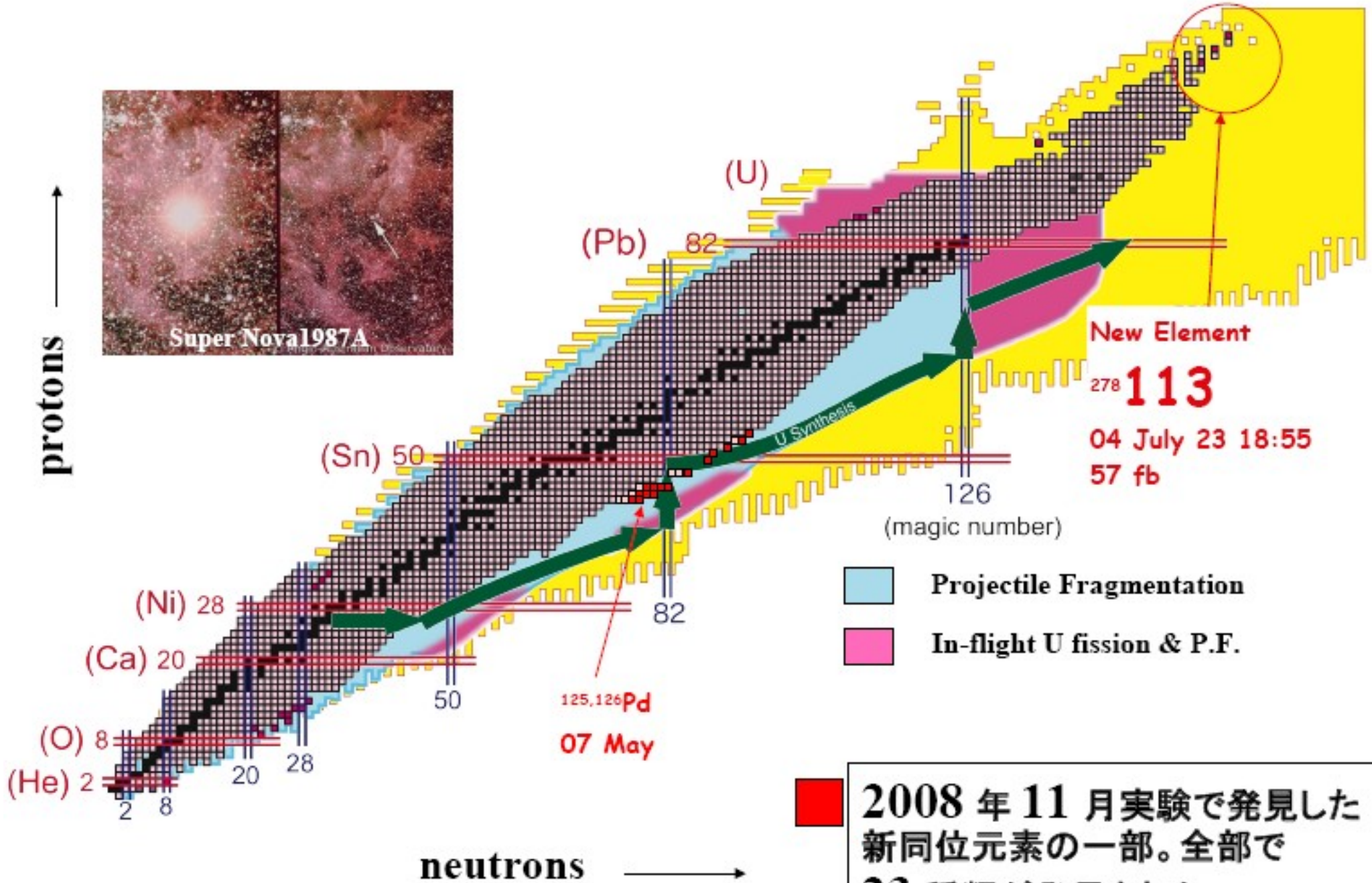
Intense (80 kW max.) H.I. beams (up to U) of 345 MeV at SRC
 Fast RI beams by projectile fragmentation and U-fission at BigRIPS
 Operation since 2007

by Sakurai

↑
protons



Super Nova 1987A

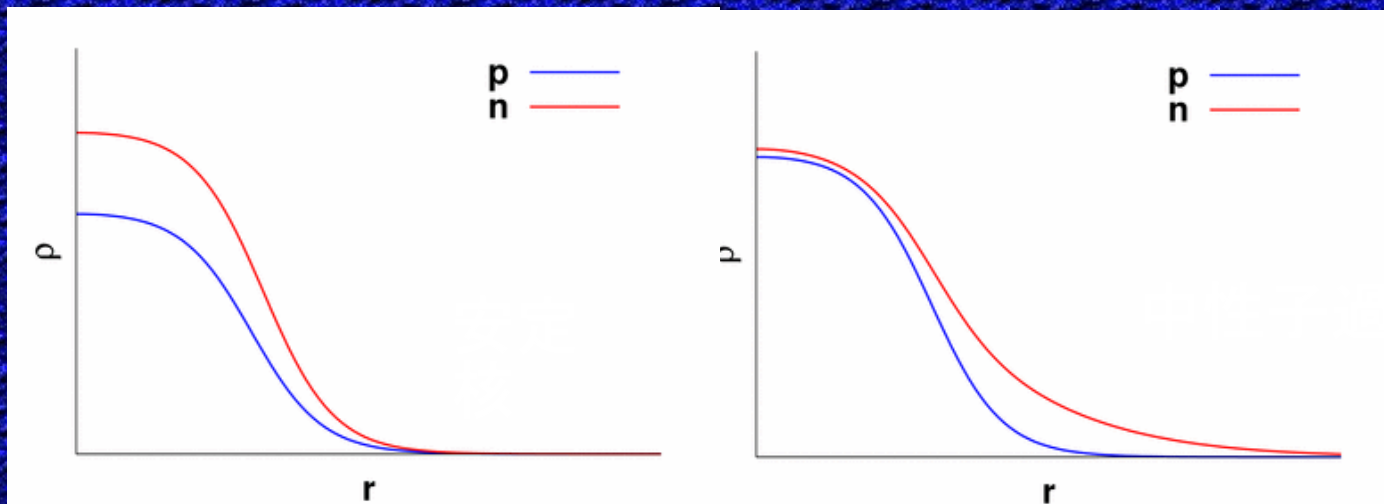
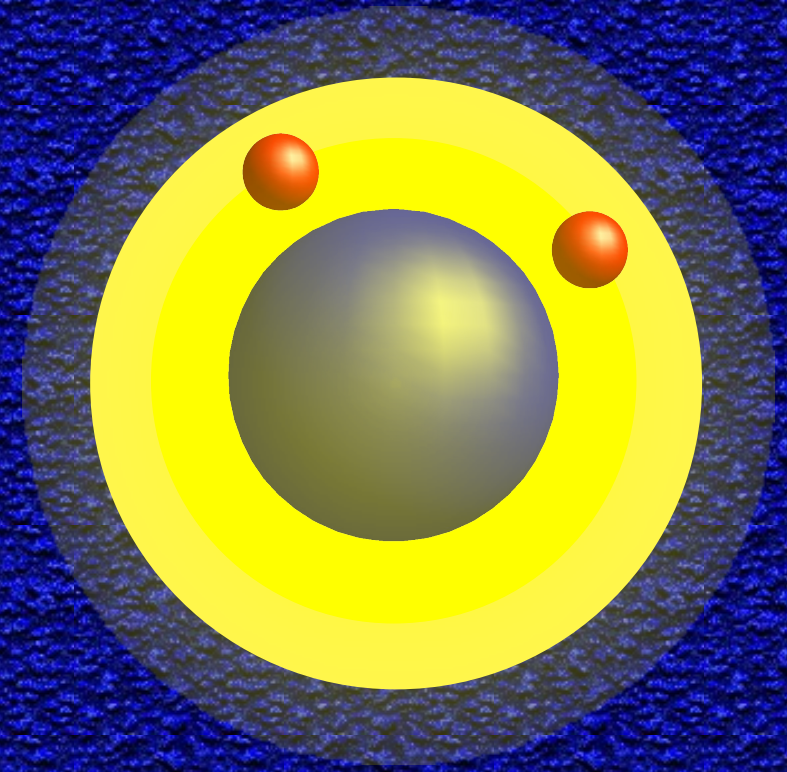


by Yano

■ 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—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)

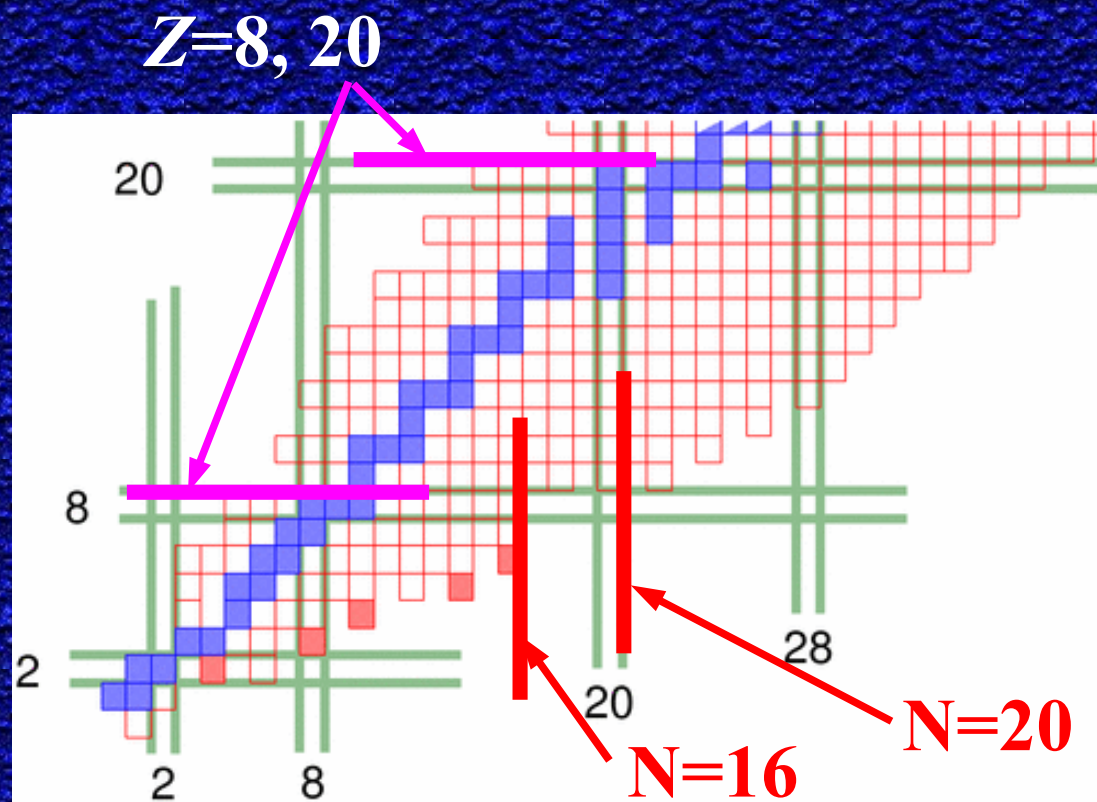


剰核

不安定核の特徴—魔法数の変化

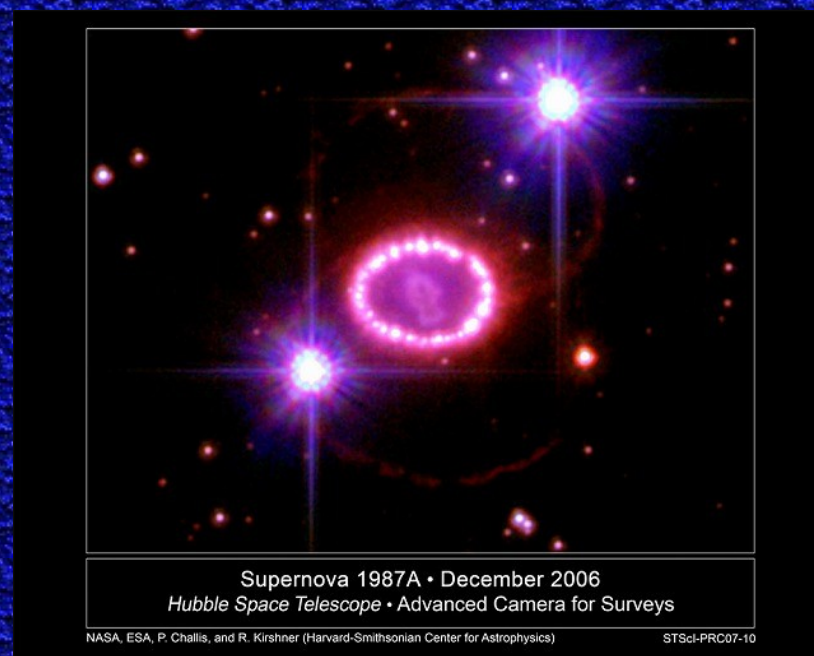
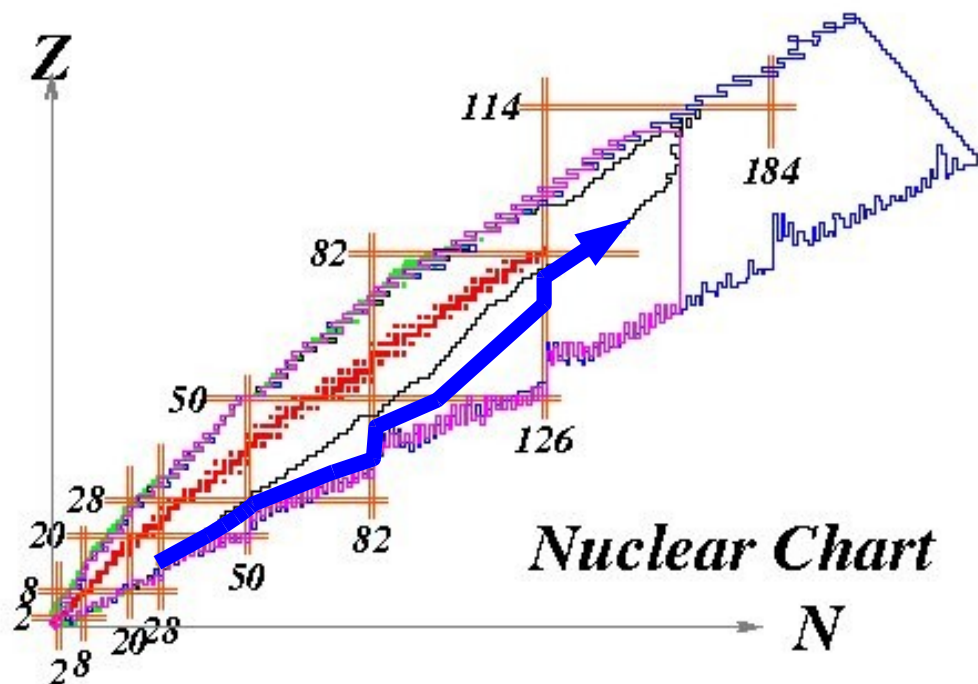
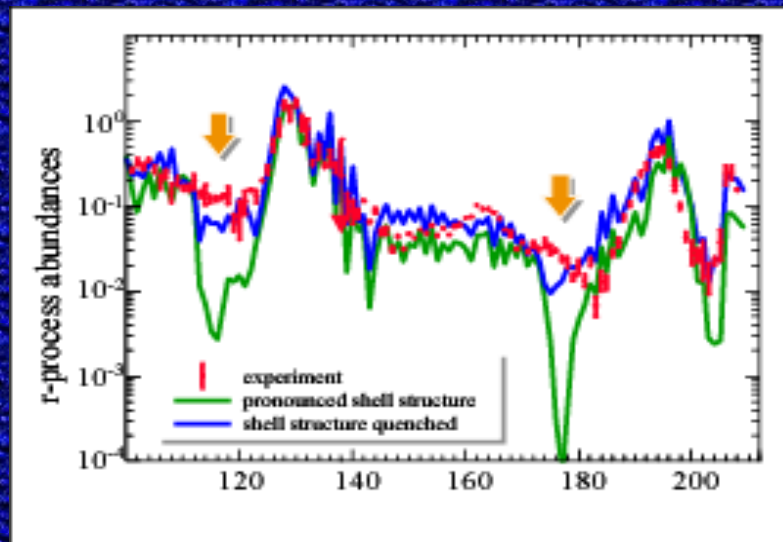
- $N=20$ は中性子過剰核でも魔法数か？
 - 魔法数になると、原子核は安定化する
→ $Z=8, 20$ では、小さな N でも原子核が存在
 - $N=20$ では小さな Z まで原子核が束縛していない！
 - むしろ $N=16$ で束縛する原子核が小さな Z 方向に伸びている

- 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



NASA, ESA, P. Challis, and R. Kirshner (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) STScI-PRC07-10

超重元素(1) 一生成の歴史

- 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

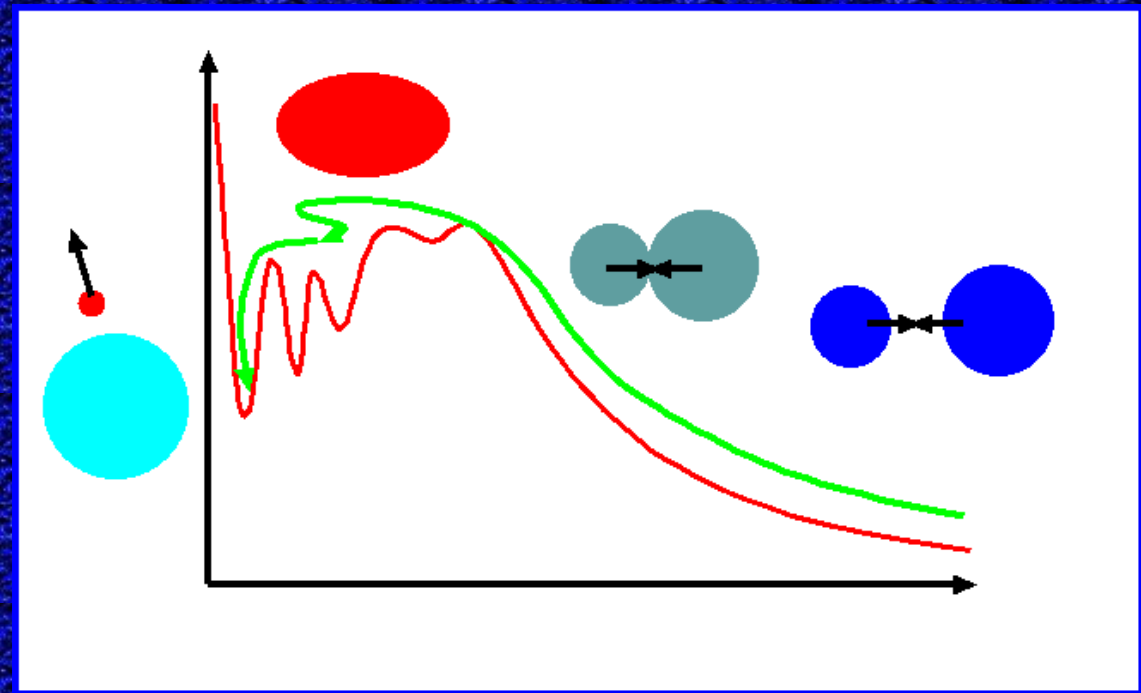
= 「反応機構

+ 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)

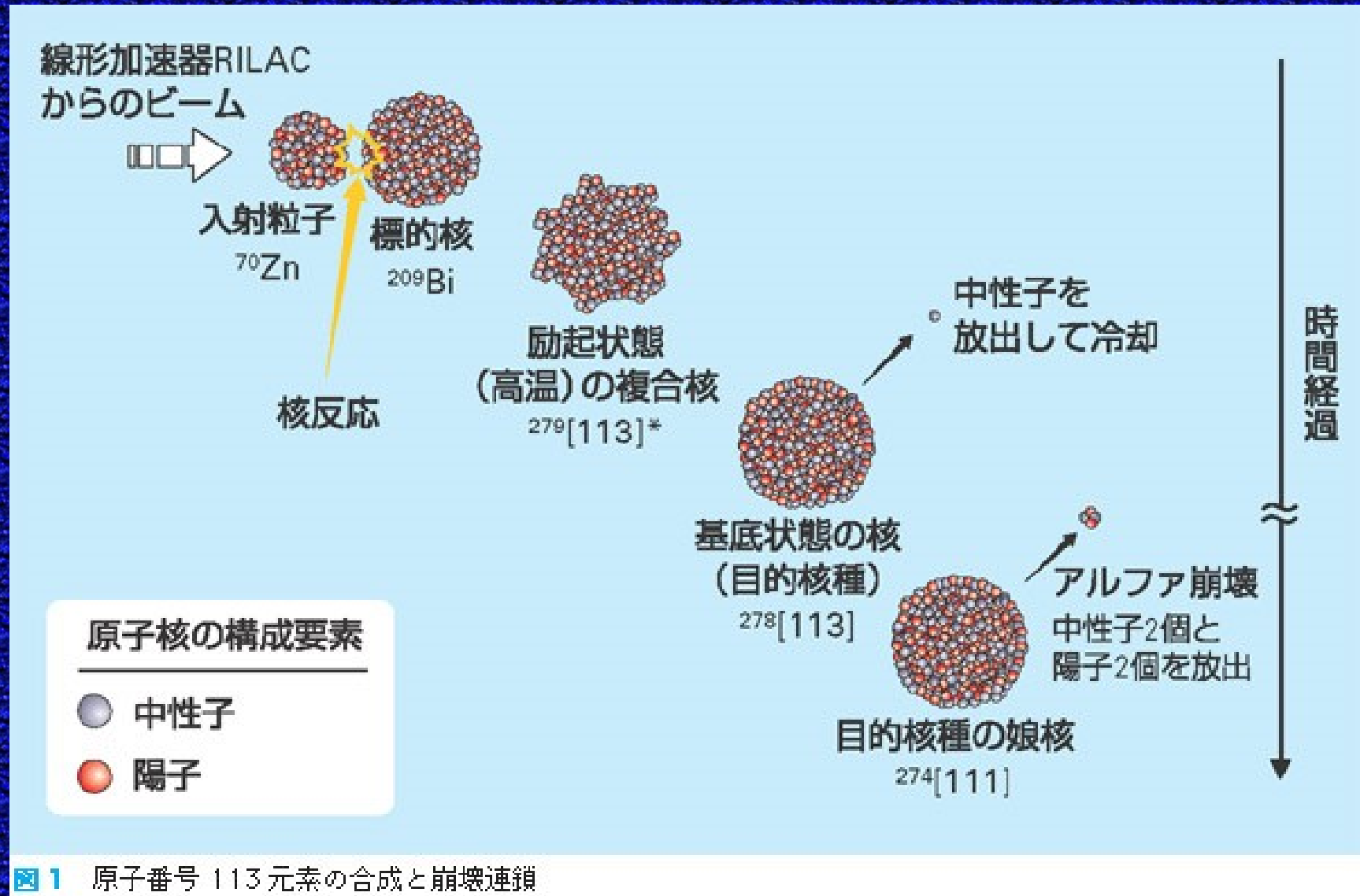


図1 原子番号113元素の合成と崩壊連鎖

超重元素(4)ージャポニウムの作り方

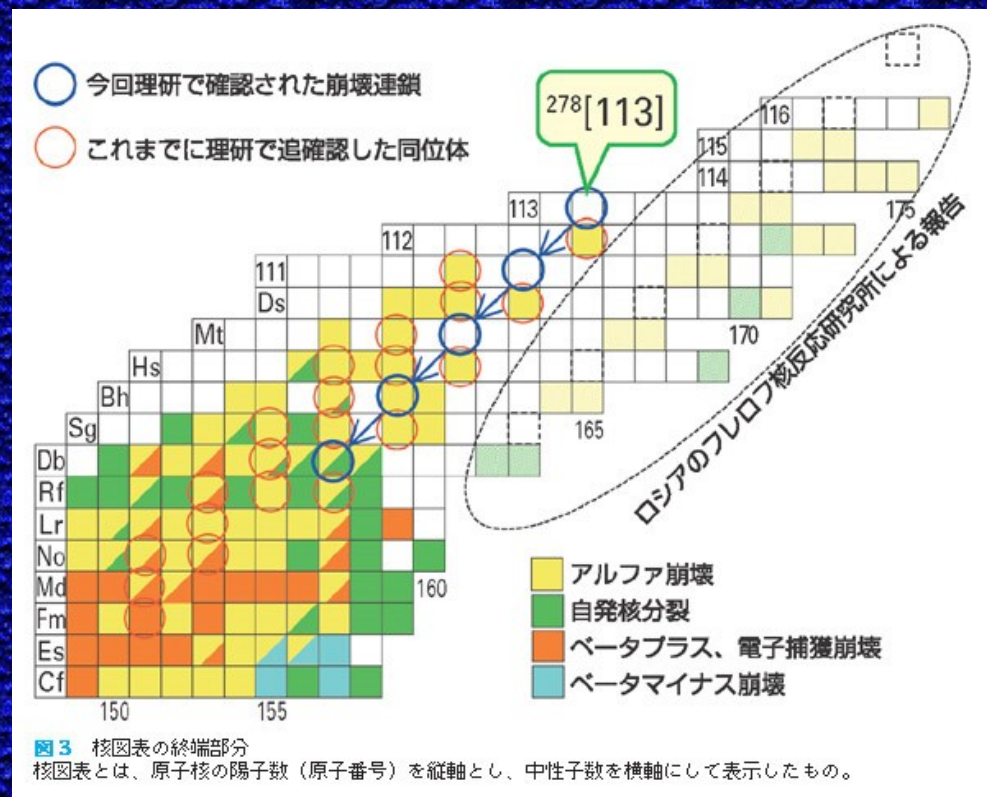
■ 超重元素生成の核反応



- 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」



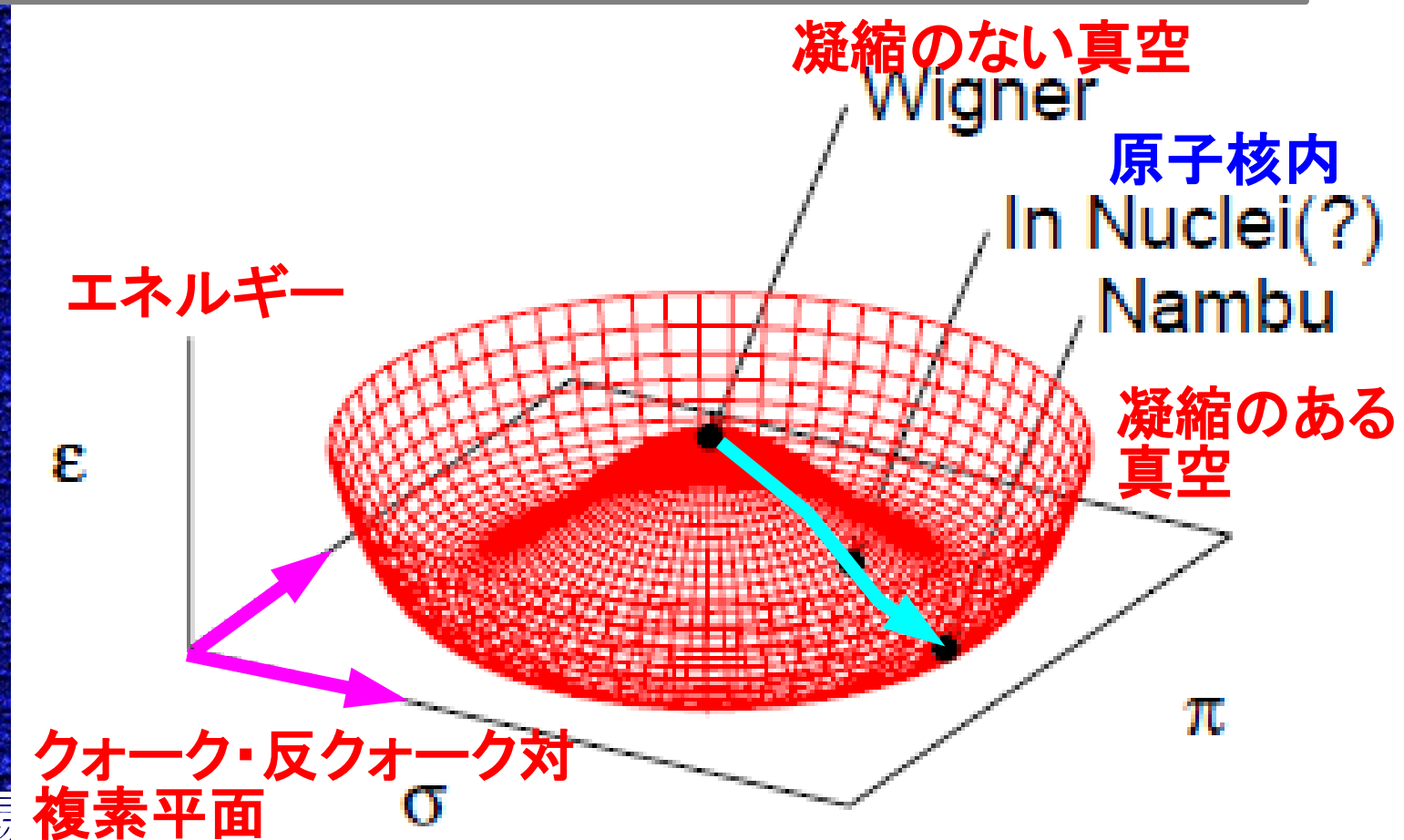
**質量の起源と
大強度陽子加速器施設
(J-PARC)**

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

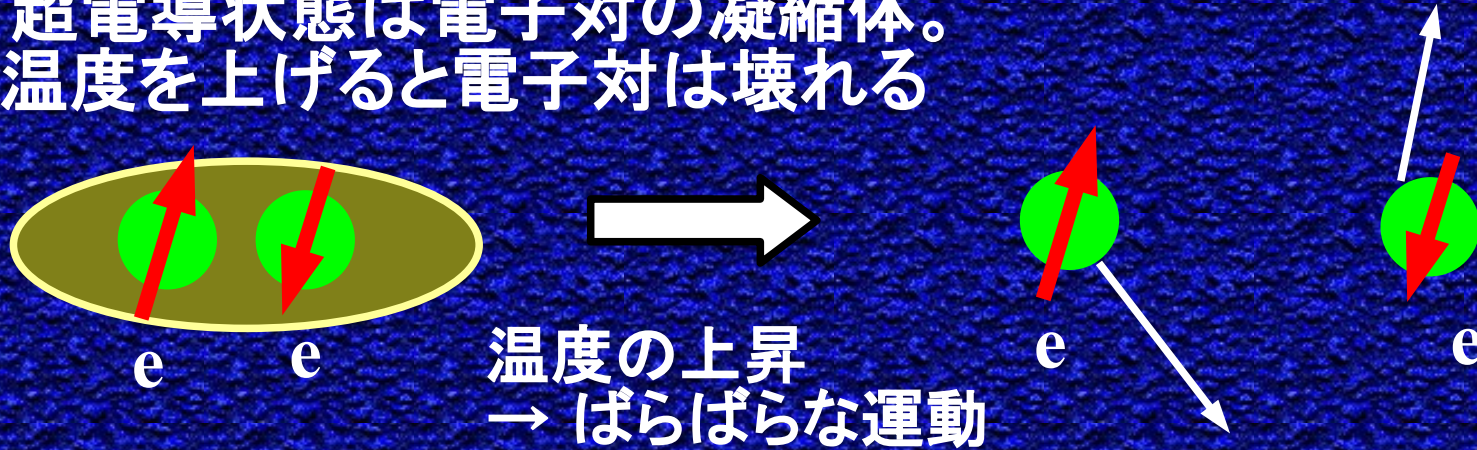
原子核内での中間子の質量変化

→ 対称性の自発的破れの(部分的)回復の証拠(?)

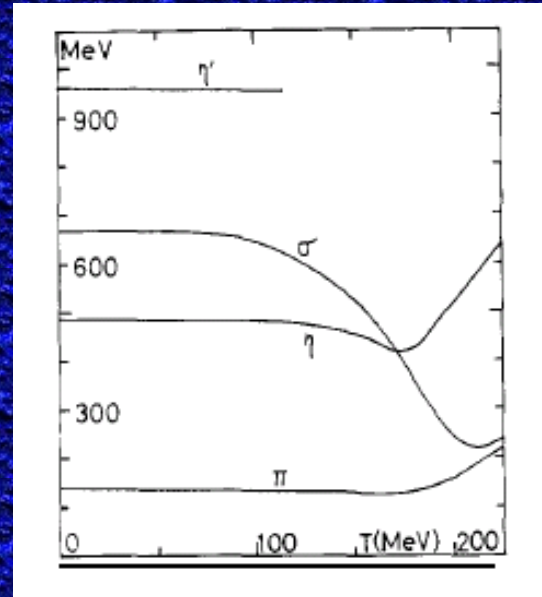
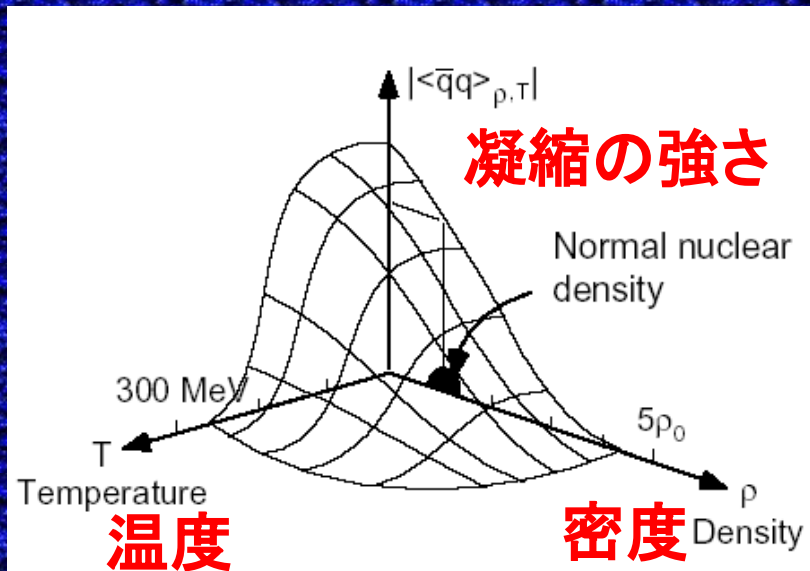


環境による中間子質量の変化

- 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！

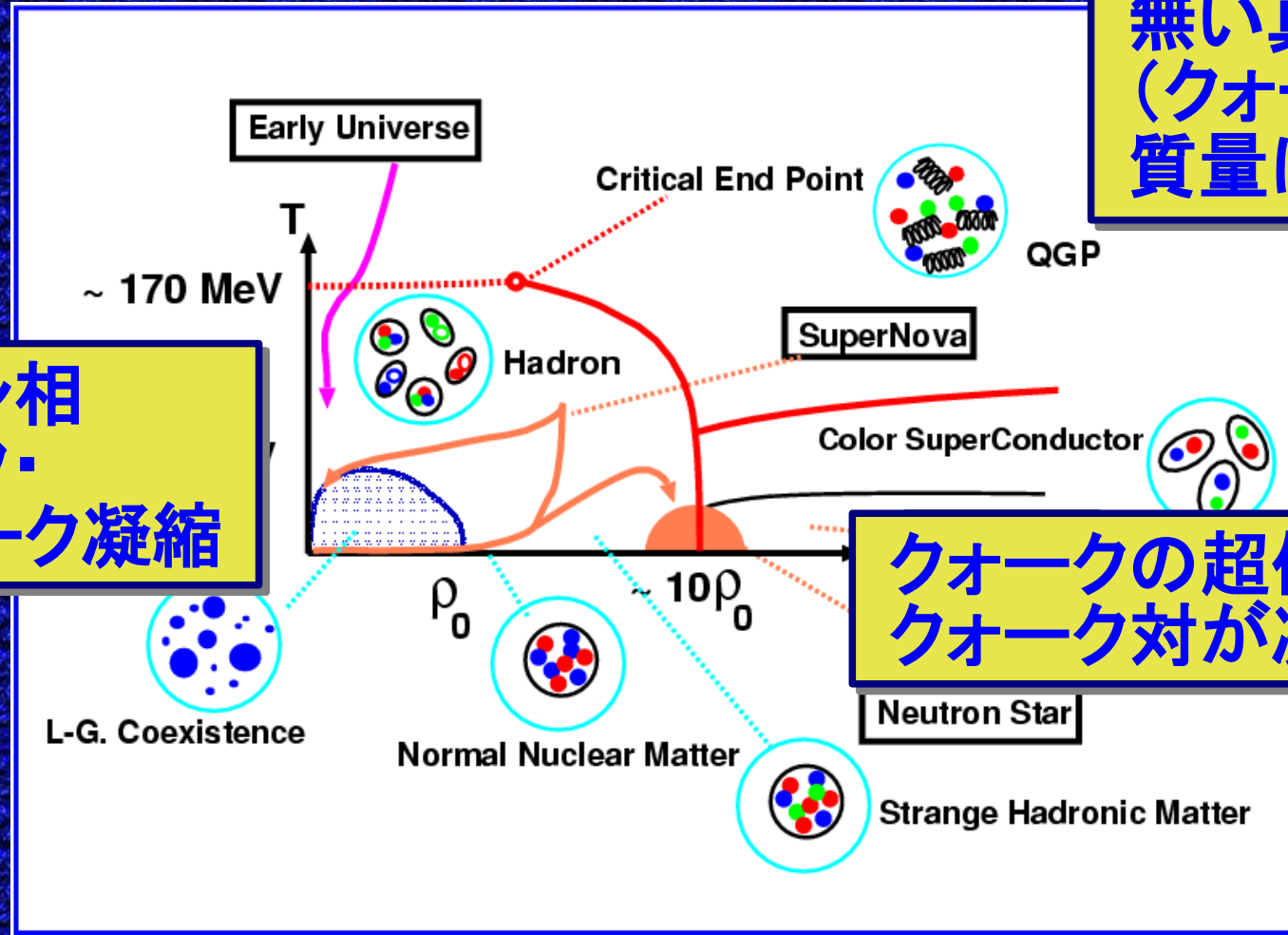


南部
Jona-Lasinio
模型

国広 (1989)

宇宙と地上でのクォーク物質相転移

QGP
凝縮の
無い真空
(クォークの
質量は小さい)



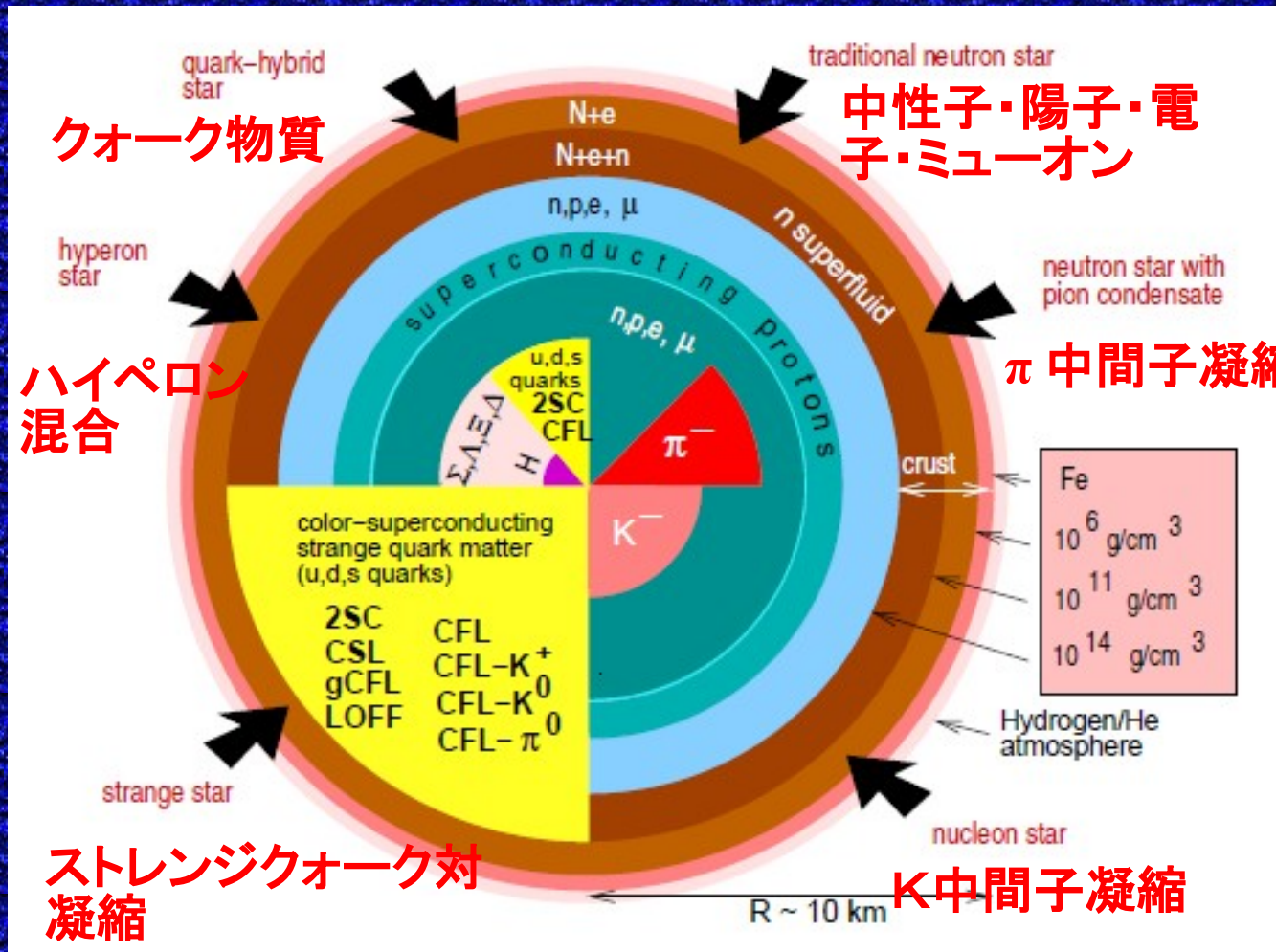
ハドロン相
クォーク・
反クォーク凝縮

クォークの超伝導相
クォーク対が凝縮

環境の変化にともなうクォーク。ハドロンの質量変化の研究
→ 南部理論の検証

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)



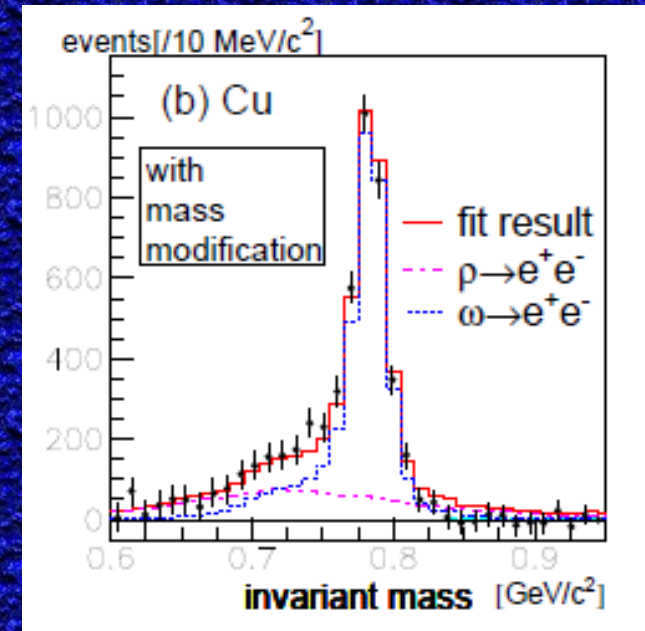
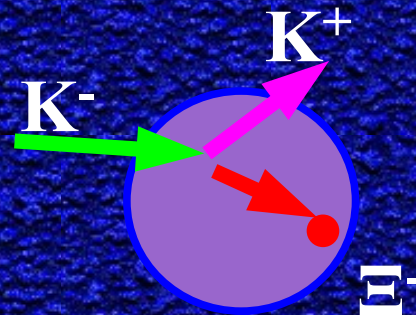
2009年1月稼動予定

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

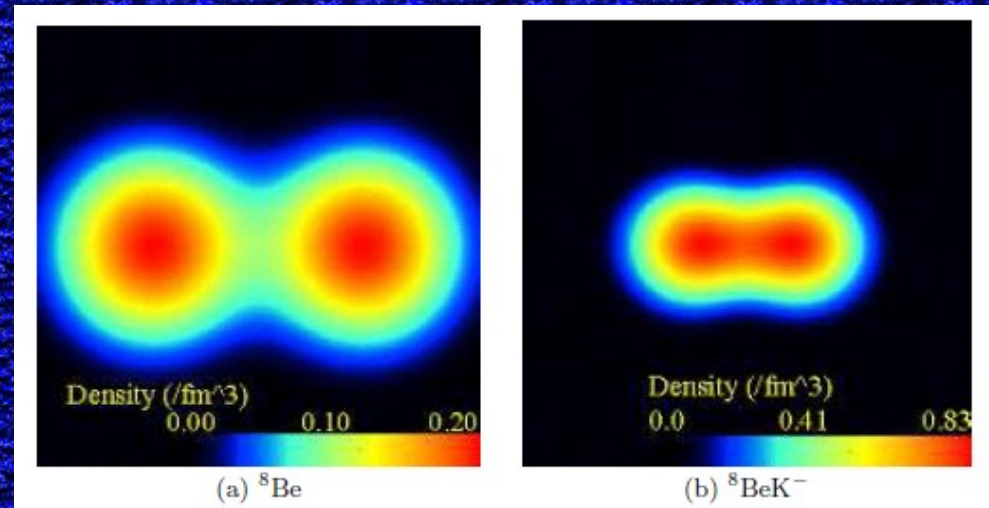
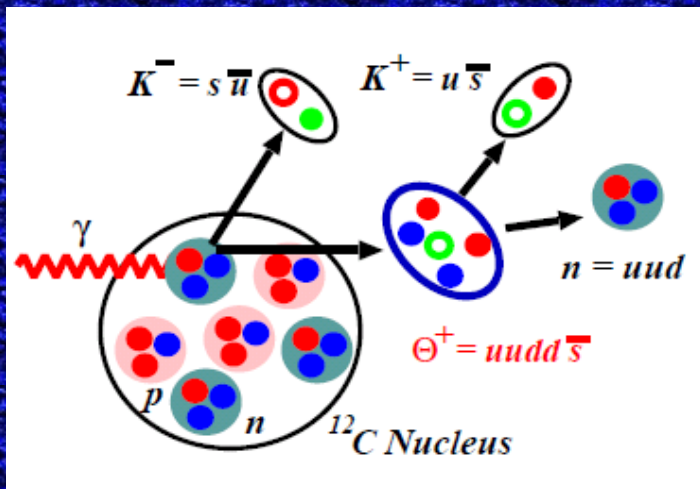
西宮湯川記念セミナー(大西)2008年12月6日(土)

J-PARC で展開される物理

- 大強度・高エネルギー陽子ビームを原子核に照射
 - 大強度の中間子ビーム
 - 様々なバリオン(3クォーク)、中間子を含む原子核の生成
 - 高密度物質の性質の探索



Naruki et al. (KEK-PS-E325), 2006



Dote, Akaishi, Horiuchi, Yamazaki, 2004

ストレンジ・クォークで果てしなく広がる物質の世界

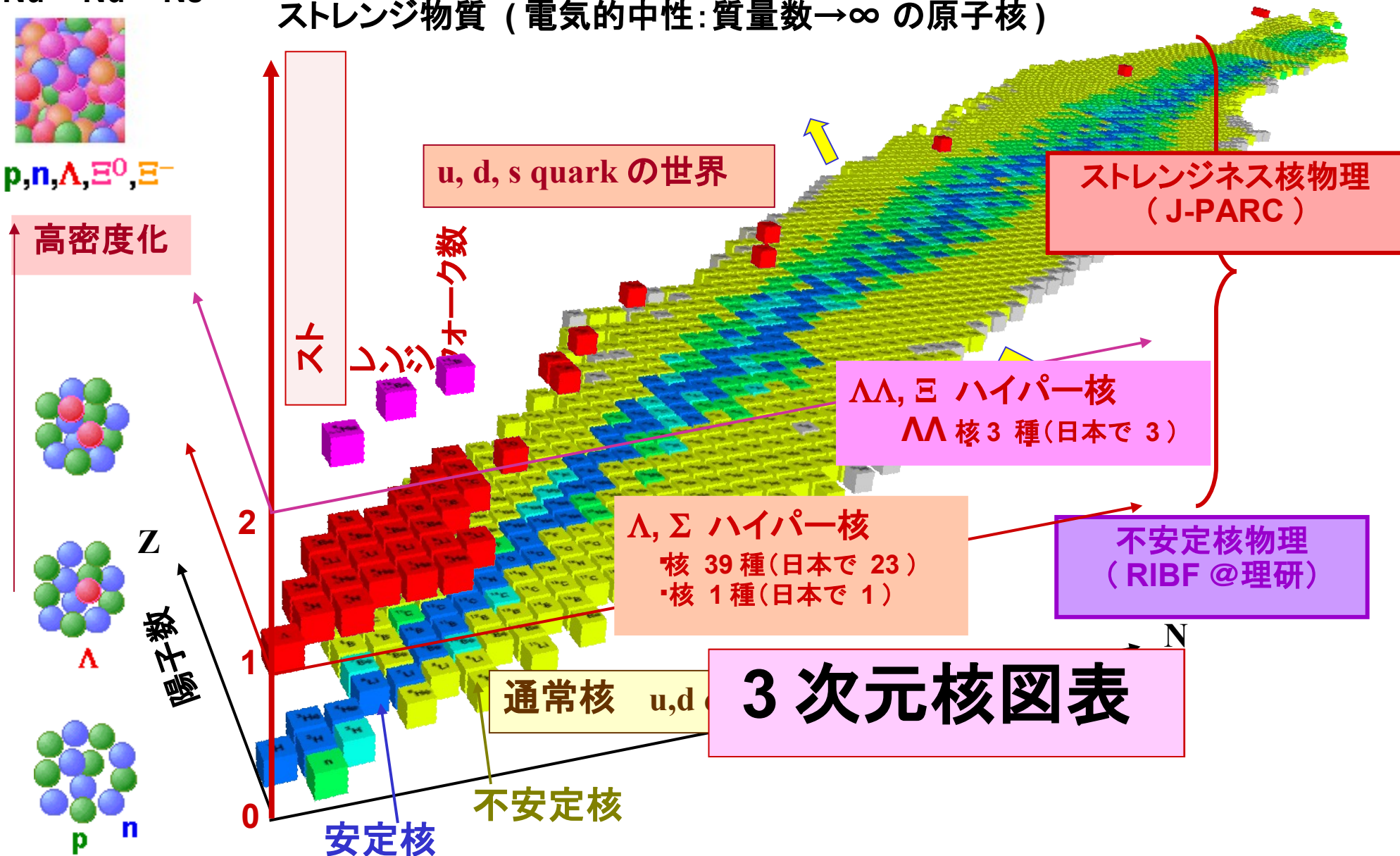
Nu ~ Nd ~ Ns



p, n, Λ , Ξ^0 , Ξ^-

中性子星の中心部に存在 ?

ストレンジ物質 (電気的中性: 質量数 $\rightarrow \infty$ の原子核)



by Tamura

おわりに

- 2008年ノーベル物理学賞(南部、小林・益川)
 - 「対称性」の基本的問題への大きな貢献
 - クォークの物理
→ とともに現在の研究につながっている
- 物質の起源
 - ビッグバンでの物質の優勢(反物質に対して)
 - 様々な元素生成過程と不安定核の役割
 - RI ビームファクトリーでの実験の進展
- 質量の起源と高密度物質
 - クォークの質量が凝縮により作られているなら、環境により変化
 - 高密度では大きな環境の変化 → 様々な粒子の存在が可能
- 物理学＝「自然哲学」
 - 我々はどこから来たのか? 「星の子」