

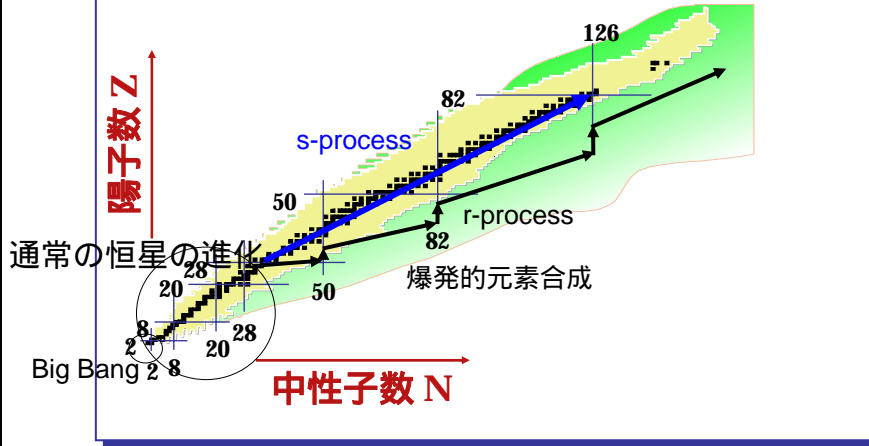
# 元素の起源 ---宇宙の進化と原子核物理

中村隆司  
原子核物理学概論 講義

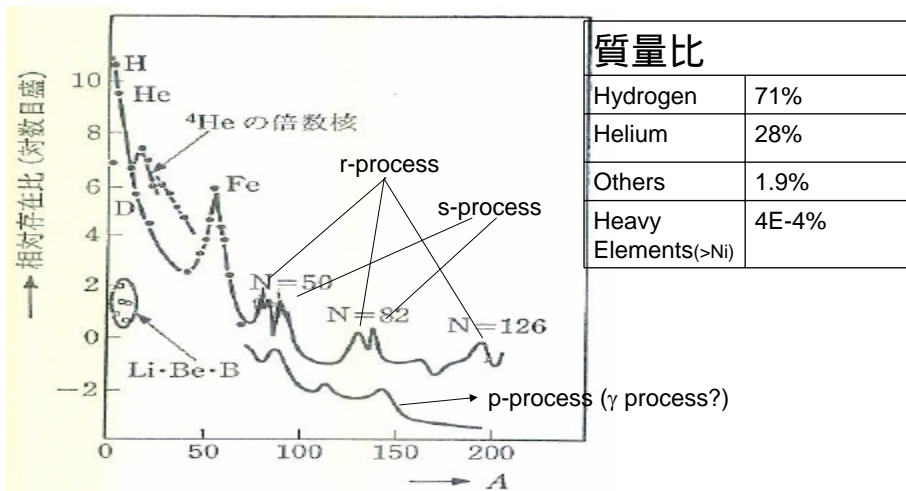
元素の合成過程=原子核反応  
@宇宙で起こる

原子核の物理的性質、構造、反応様式  
と深く関わっている！  
----宇宙核物理学

## 元素合成過程 - 星や宇宙の進化と密接に関連



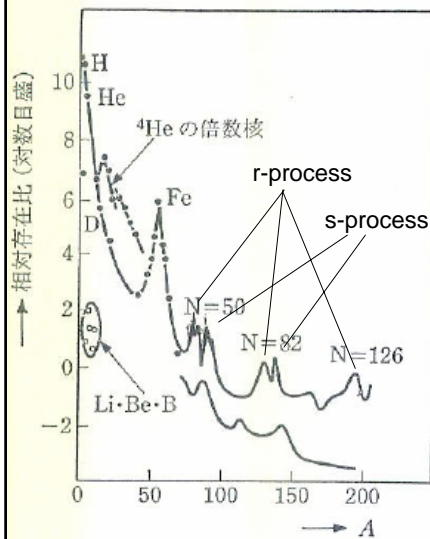
## 宇宙における元素の組成 (太陽系)



質量比	
Hydrogen	71%
Helium	28%
Others	1.9%
Heavy Elements (>Ni)	4E-4%

図 2-16 銀河系での元素存在比  
H と He で 98% を占める。

## 天体核反応(原子核反応@宇宙)



Big BangではH,Heが主として生成され、それ以外ではほんの少量のLiだけ生成された。(A=5,8のGAP)

Cより重い元素---鉄までは通常の恒星の進化の過程(荷電粒子の捕獲反応)

Feより重い元素----- 中性子捕獲反応  
s-process(slow process)  
r-process (rapid process)

天体でおこる原子核反応は実は“超低エネルギー核反応”である→発熱反応が主体

図 2-16 銀河系での元素存在比

HとHeで98%を占める

杉本、村岡 原子核物理学(共立出版)

Quiz:  $kT=10^7K$ (太陽中心温度のオーダー)はエネルギー換算で何eVか?  $kT=10^9K$ (超新星爆発の温度のオーダー)ではどうか?

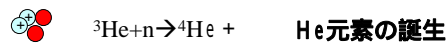
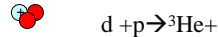
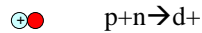
## 宇宙のはじまり: ビッグバン(宇宙の最初におこった大爆発)

宇宙開闢(かいびやく)から約0.01秒後 温度1000億度

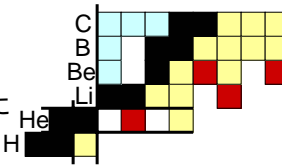
クォークのスープより陽子、中性子が生まれた。

- ⊕ 陽子 (proton :p) ——— H(水素)の誕生
- 中性子(neutron :n)

宇宙開闢(かいびやく)から約3分後  $T \sim 10^9K$  (100keV, 重陽子が安定に)



p,nの割合7:1 →  ${}^4\text{He}$ の質量割合25%に



(陽子数 + 中性子数)が5個の原子核は存在できない!

中性子がなくなってしまう。(中性子は陽子より重く、半減期10分で陽子に崩壊する。(ベータ崩壊:弱い力))

そのうち温度、密度が下がりすぎる。



というわけで、元素合成はストップ。

http://pdg.lbl.gov/2008/reviews/rpp2008-rev-bbang-nucleosynthesis.pdf

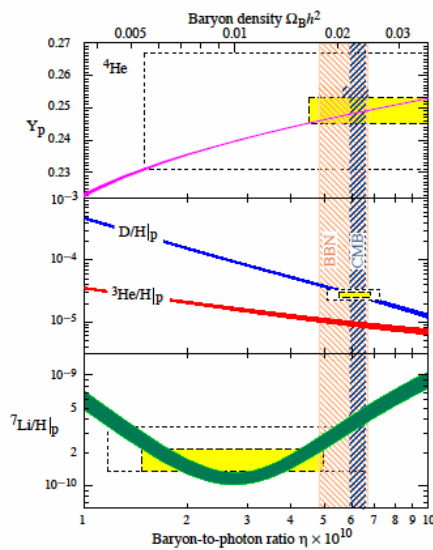


Figure 20.1: The abundances of  ${}^4\text{He}$ ,  $\text{D}$ ,  ${}^3\text{He}$ , and  ${}^7\text{Li}$  as predicted by the standard model of big-bang nucleosynthesis — the bands show the 95% CL range. Boxes indicate the observed light element abundances (smaller boxes:  $\pm 2\sigma$  statistical errors; larger boxes:  $\pm 2\sigma$  statistical and systematic errors). The narrow vertical band indicates the CMB measure of the cosmic baryon density, while the wider band indicates the BBN concordance range (both at 95% CL).

$h = H_0 / 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} = 0.72(8)$   
 $\Omega_B = \rho_B / \rho_C$

BIG BANG  
 標準モデルによる  
 元素の合成割合 (質量割合)

実測値  
 $H = 0.75$   
 ${}^4\text{He} = 0.249(9)$

${}^4\text{He}, \text{D}, {}^3\text{He}$ の量は  
 Big Bangでほとんど  
 決まった!  
 (Big Bangの証拠の  
 一つでもある)

### Big-Bang Nucleosynthesis (BBN) Diagram

From Kajino's lecture

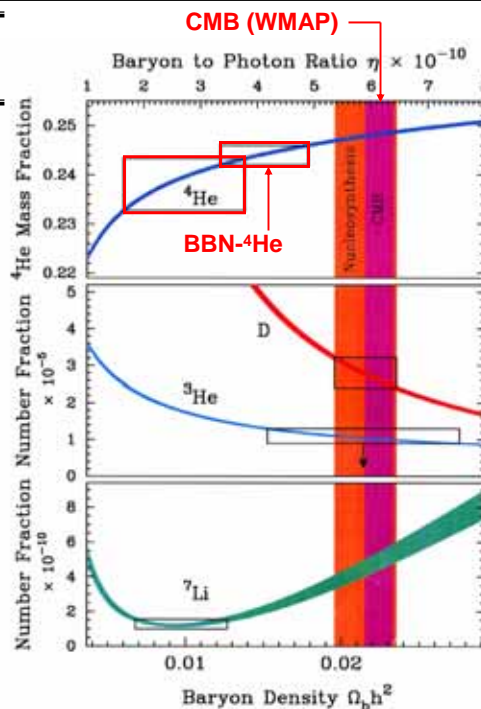
$t = 3 \text{ min}$

Big-Bang Nucleosynthesis Constraints

Cosmic Baryon Density  
 $\Omega_B$

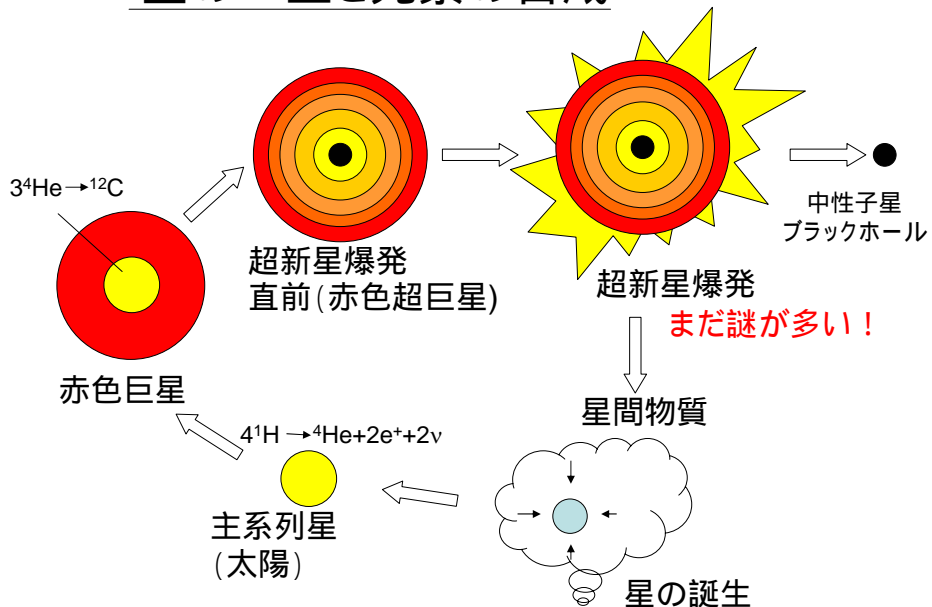
$\Omega_B$ 's from BBN and CMB are inconsistent?

Weak decoupling  $\rightarrow G_F$  or  $\tau_n$   
 Neutrino Species  $\rightarrow N_\nu$



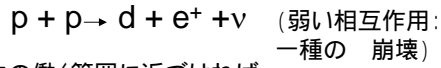
どのようにして  
Li(原子番号3)より重い元素はできたのか？

### 星の一生と元素の合成

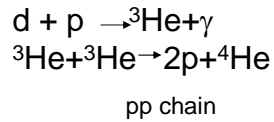
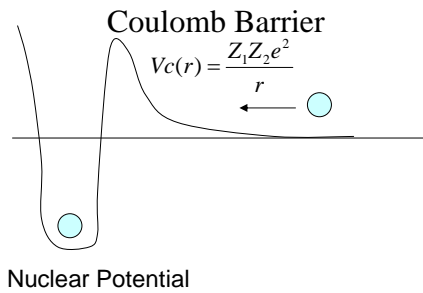


太陽の中で起こる核融合 太陽の中心  $10^7\text{K}$ ( $\sim 1\text{keV}$ )、密度  $100\text{g/cm}^2$

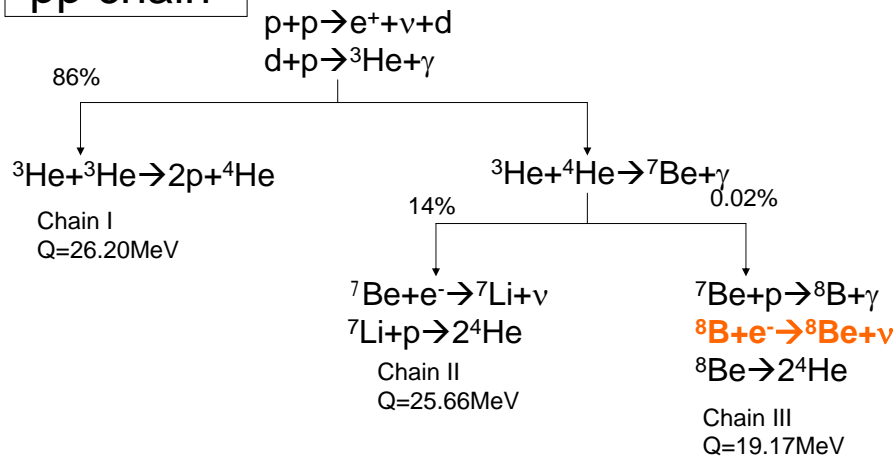
$\oplus \rightarrow \leftarrow \oplus$  陽子(水素) + 陽子(水素)が融合する



陽子と陽子が核力の働く範囲に近づければ  
融合できる。しかし電気的反発力のためなかなか近づけない。



pp chain



NET 正味の反応



核融合エネルギー: 太陽のエネルギー源! (GAMOW)

上のQとの違い: ニュートリノによるエネルギーロス、ニュートリノは太陽から逃げるので

## 天体核反応物理の基本

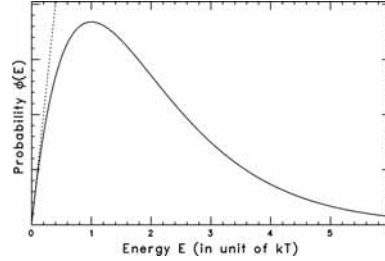
A(a,b)B反応の反応率

$$r = N_a N_A \langle \sigma v \rangle$$

(aの数密度) × (Aの数密度) × <核反応断面積 × 速度>

$$\langle \sigma v \rangle = \int_0^{\infty} \phi(v) v \sigma(v) dv$$

速度分布関数



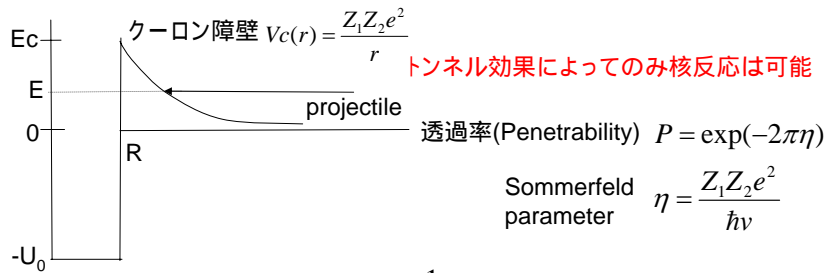
Maxwell Boltzmann分布:

$$\phi(v) = 4\pi v^2 \left( \frac{\mu}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\mu v^2}{2kT}\right)$$

$$\langle \sigma v \rangle = 4\pi v^2 \left( \frac{\mu}{2\pi kT} \right)^{3/2} \int_0^{\infty} v^3 \sigma(v) \exp\left(-\frac{\mu v^2}{2kT}\right) dv$$

$$= \left( \frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{kT} \right)^{3/2} \int_0^{\infty} \sigma(E) E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE$$

## 荷電粒子の反応の場合



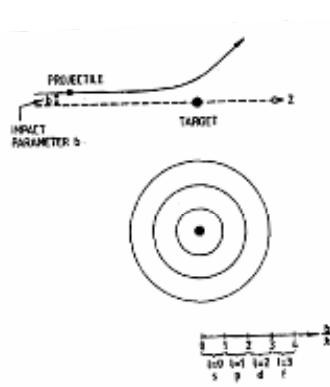
$$\sigma(E) \sim \pi \lambda^2 P \propto \frac{1}{E} \exp(-2\pi\eta)$$

$$\sigma(E) = \frac{1}{E} \exp(-2\pi\eta) S(E)$$

Astrophysical S-Factor  
(滑らかな関数)

## 補足：幾何学的断面積

(統計因子(前頁)を除き、断面積の最大値を与える)



$$\sigma_l = \pi(b_{l+1}^2 - b_l^2) = (2l+1)\pi\hat{\lambda}^2$$

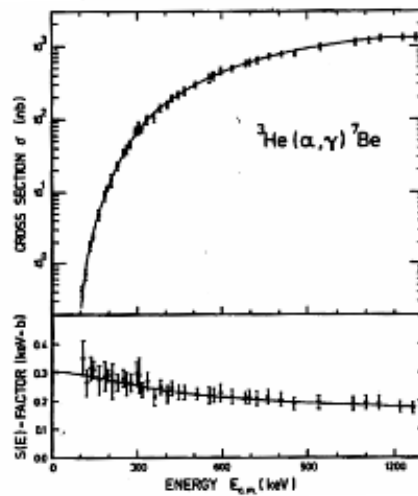
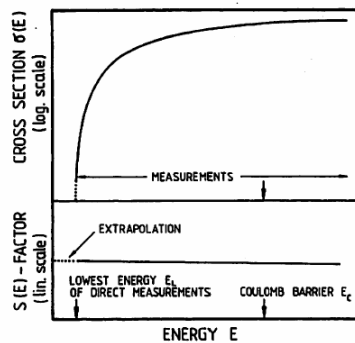
$$(b = l\hbar / p = l\hat{\lambda})$$

なお天体核反応はほとんどs波(l=0)である(Quiz)。

Quiz: 入射エネルギー1MeV以下の陽子入射反応はほぼs波(l=0)としてよい、これを示せ。

## Astrophysical S-factor

滑らかな関数で0keVまで外挿(extrapolate)する！



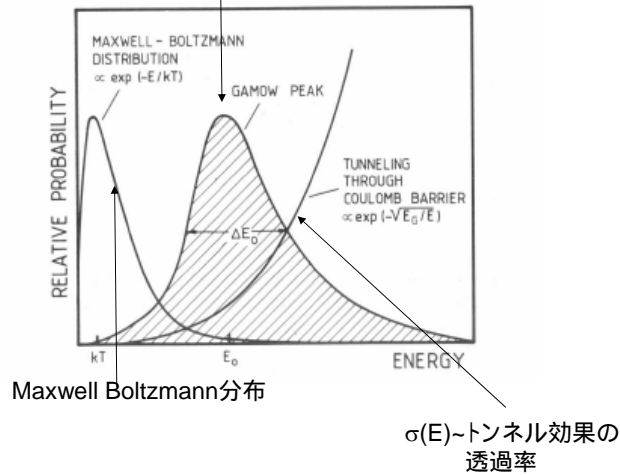


## ガモフのピーク(窓)

$$\langle \sigma v \rangle = \left( \frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} \left( \frac{1}{kT} \right)^{3/2} \int_0^{\infty} \sigma(E) E \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE$$

反応率

### ガモフ(GAMOW)のピーク (Gamow Windowとも言う)



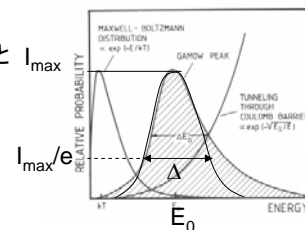
C.E.Roefs and William S.Rodney, *Cauldrons in the Cosmos*, Univ. of Chicago Press

## Gamow Window (ガモフの窓)

Gamow peakの範囲で  
S-factor=const.

とし、Gamow peakをGaussianで近似すると  $I_{\max}$

$$\langle \sigma v \rangle = \left( \frac{2}{\mu} \right)^{1/2} \frac{\Delta}{(kT)^{3/2}} S(E_0) \exp\left(-\frac{3E_0}{kT}\right)$$



$$E_0 = 1.22(Z_1^2 Z_2^2 \mu T_6^2)^{1/3} \text{ [keV]}$$

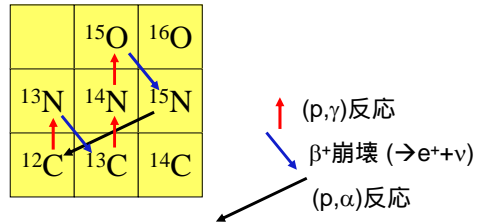
$$\Delta = 0.749(Z_1^2 Z_2^2 \mu T_6^5)^{1/6} \text{ [keV]}$$

$$T_N = T_N \times 10^8 \text{ K}$$

	$E_0$ (keV)	$E_{\text{coul}}$ (MeV)	$\Delta/2$ (keV)	$I_{\max}$	Tdependence
p+p	5.9	0.55	3.2	1.1e-6	$T^{3.9}$
p+ <sup>14</sup> N	26.5	2.27	6.8	1.8e-27	$T^{20}$
$\alpha$ + <sup>12</sup> C	56.0	3.43	9.8	3.0e-57	$T^{42}$
<sup>16</sup> O+ <sup>16</sup> O	237.0	14.07	20.2	6.2e-239	$T^{182}$

For  $T^6=15$  (solar temperature)

## CNO cycle- other Hydrogen burning process



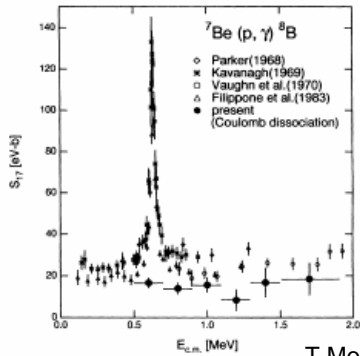
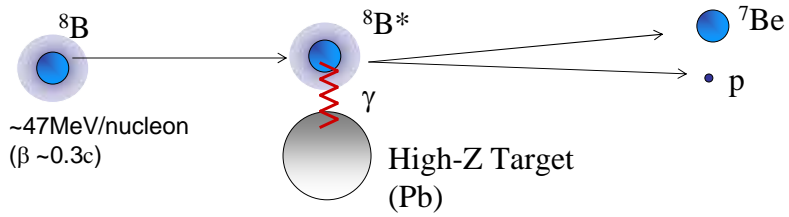
NETの反応:  $4p \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu$  ( $Q=26.73\text{MeV}$ )

$^{12}\text{C}$  Catalyst(触媒)とした水素の融合反応とみなせる。(サイクル、つまり $^{12}\text{C}$ にまた戻ってくるので)  
 $^{12}\text{C}$ は通常の星に存在するが、 $^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$ 反応を起こす条件を満たす必要がある(次ページ)

## PP VS CNO



不安定核のクーロン分解反応(逆反応)を利用した天体核反応率の測定



${}^8\text{B} + \gamma \rightarrow {}^7\text{Be} + \text{p} \rightleftharpoons {}^7\text{Be} + \text{p} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$   
 正反応と逆反応の反応率(時間反転対称性)

Principle of Detailed Balance  
 (詳細つり合いの原理)

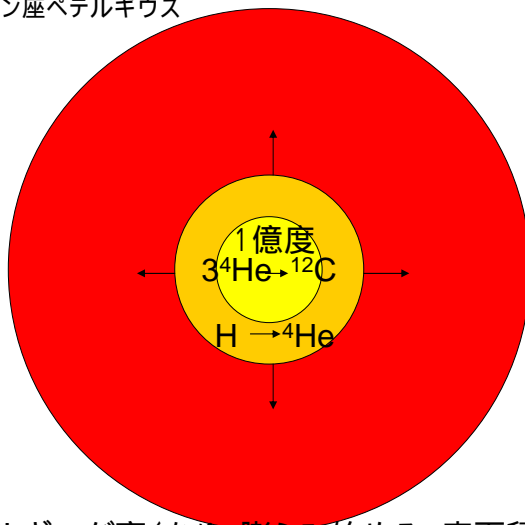
$$\sigma_{n,\gamma}(E_{rel}) = \frac{(2I_A + 1)}{(2I_{A-1} + 1)} \frac{E_\gamma^2}{2\mu c^2 E_{rel}} \sigma_{\gamma,n}(E_\gamma)$$

T. Motobayashi et al., Phys. Rev. Lett. 73, 2680 (1994).

→ 太陽ニュートリノ問題

赤色巨星

例: オリオン座ベテルギウス



内部エネルギーが高くなり、膨らみ始める。表面積が急激に大きくなるので表面温度は下がる(赤色化)

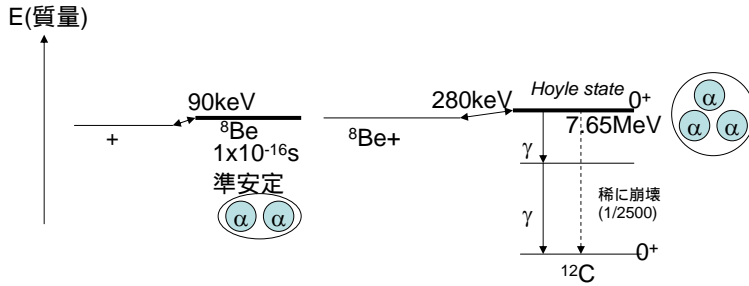
### Triple alpha 反応

炭素より重い元素が作られる重要な反応(この反応がないと我々も存在できない!)

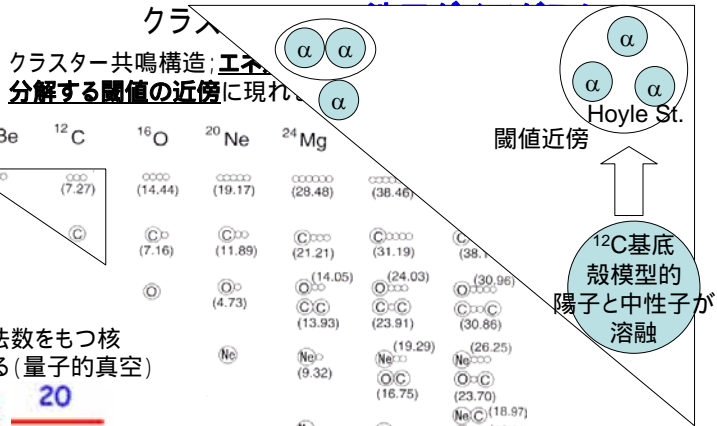
$^1\text{H}, ^2\text{D}, ^3\text{He}, ^4\text{He}, ^5\text{Li}, ^6\text{Li}, ^7\text{Li}, ^8\text{Be}, ^9\text{Be}, ^{10}\text{B}, \dots, ^{209}\text{Bi}$

Heより重い元素は合成困難→Triple alpha 反応が救世主!

Triple-alpha: 元素合成の抜け道(Detour) **炭素原子核の合成** → より重い元素の合成

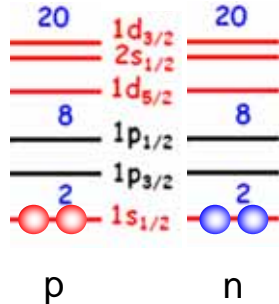


Triple メカニズムは核物理の基本法則



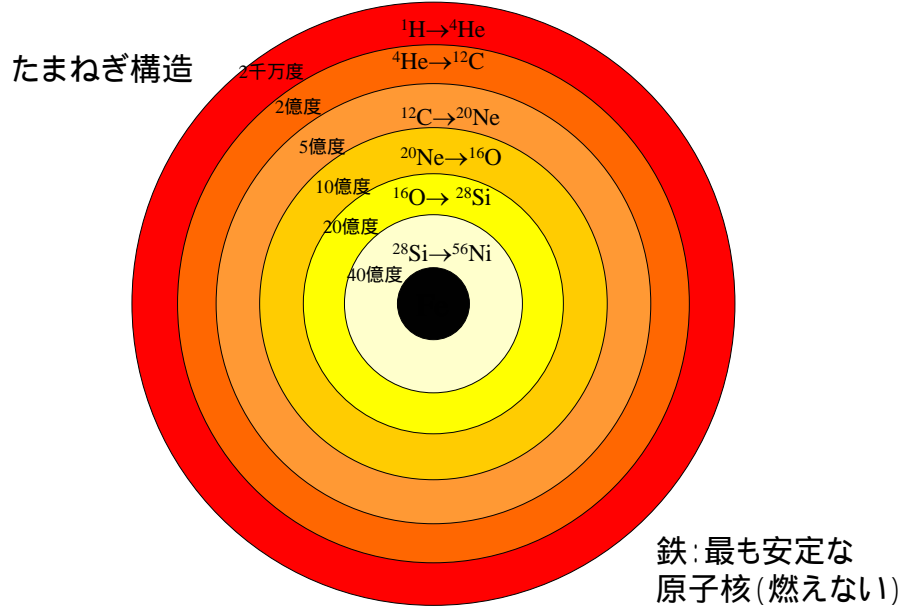
#### 粒子の安定性

殻模型: 2重魔法数をもつ核  
--不活性とみなせる(量子的真空)



殻模型: 中心力場にあるフェルミオン系の基本法則(秩序)  
(核では自明ではない。核力はスピン依存、テンソル力などクーロン力にはない多彩な性質をもつ)

太陽よりずっと重い(8倍以上)星はさらに進化する。



そして超新星爆発(Super Nova)

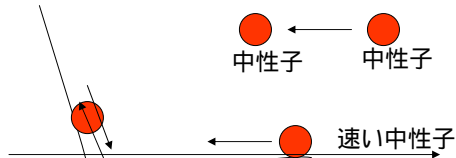
鉄: 安定なので燃えない(核融合できな)

: どうやって重力に対抗するか?

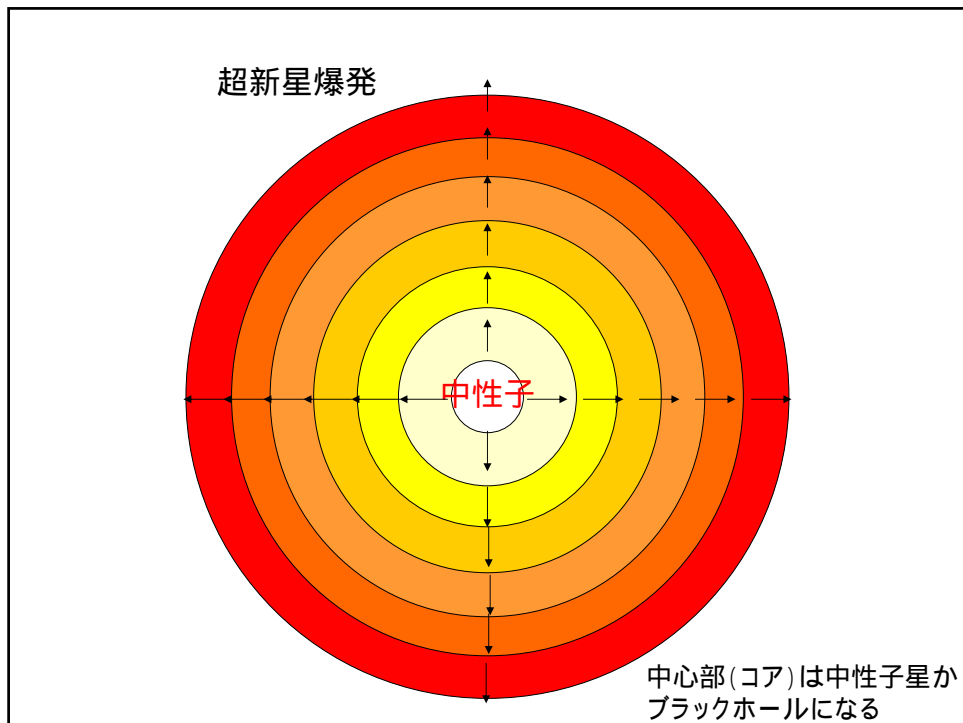
電子の圧力(縮退圧)



鉄原子核中の陽子が電子を捕獲(電子捕獲)



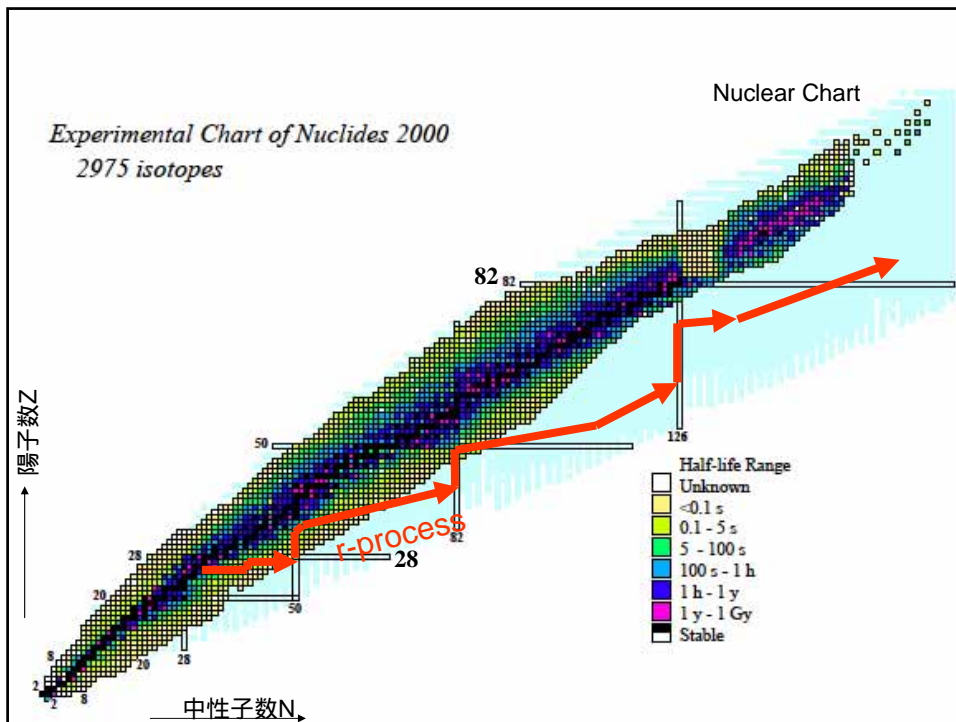
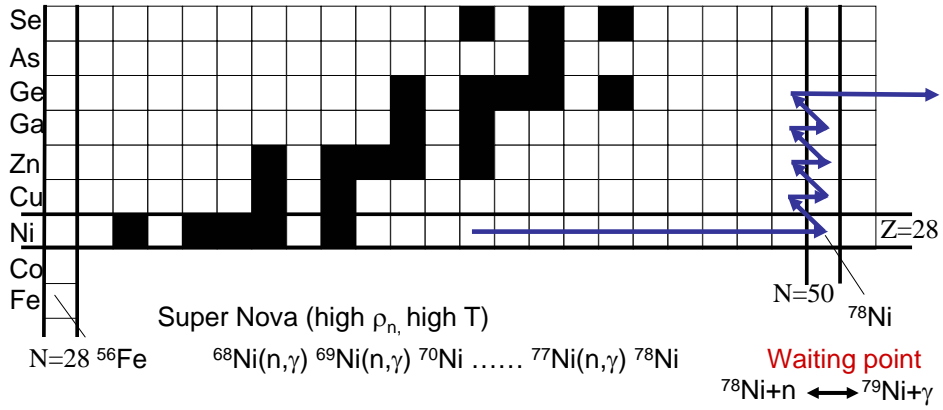
中性子は谷を通り過ぎて崖を上っていく。  
そして跳ね返される。スーパーノバの始まり!



## 鉄より重い 原子核はどうやってできたのか？

陽子はクーロン障壁を感じるが、中性子には関係ない。  
→中性子(半減期10分)が存在する環境下で重い元素が  
合成される

r-process (速過程)による元素合成  
 超新星爆発で起こる速い中性子捕獲反応

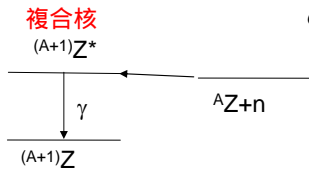


### 中性子捕獲反応の場合

放射性捕獲断面積

$$\sigma(E) \cong \pi \lambda^2 \Gamma_n(E) \Gamma_\gamma(E+Q) \propto \frac{1}{v}$$

低エネルギー中性子捕獲の1/v law

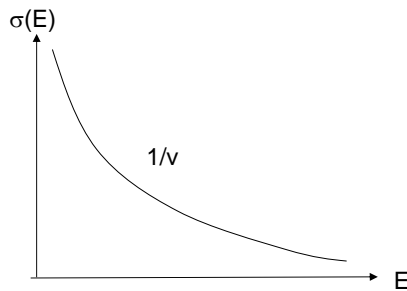


∴ s波中性子の  
Partial Width

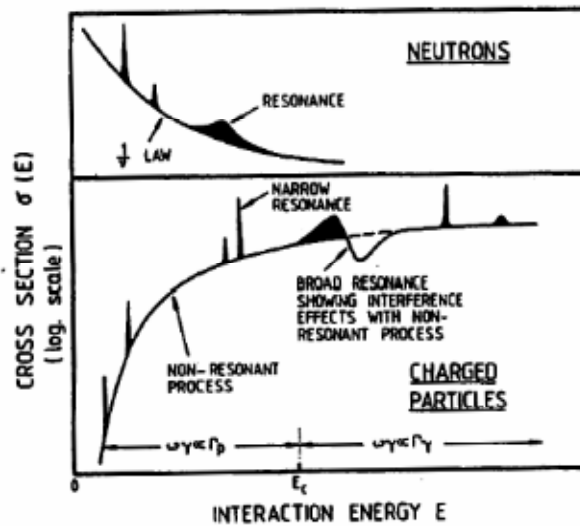
$$\Gamma_n(E) = 2kR\gamma^2 \propto v$$

Reduced width=const.

$$\Gamma_\gamma(E+Q) \cong \Gamma_\gamma(Q) = const.$$



### 天体核反応のまとめ

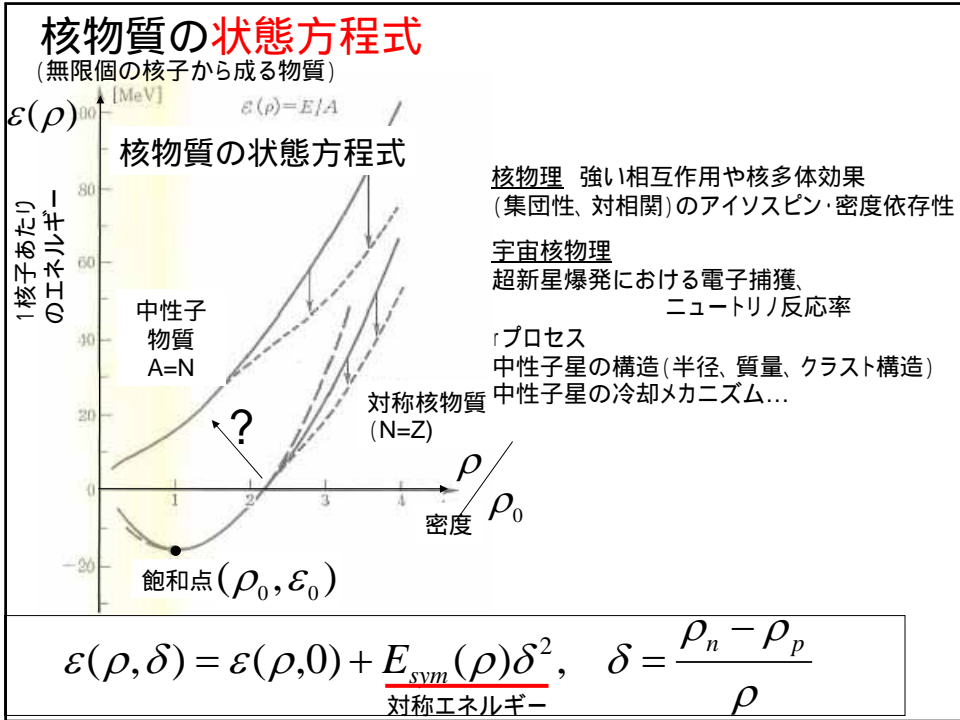
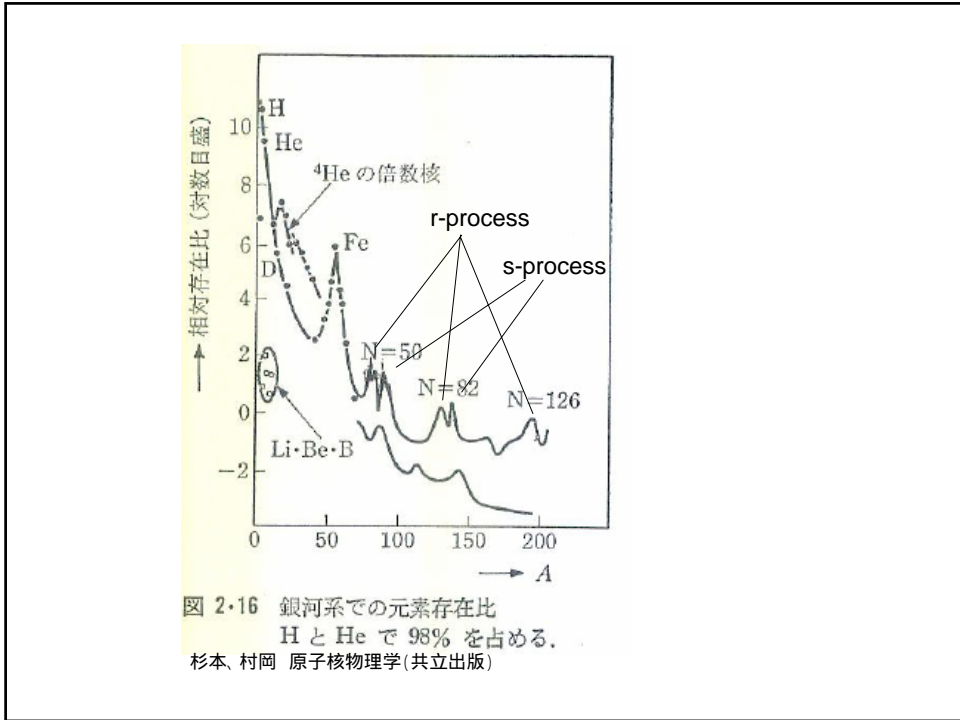


中性子捕獲

荷電粒子捕獲

$$\omega\gamma = (stat.factor) \cdot \frac{\Gamma_x \Gamma_\gamma}{\Gamma}$$





**(中心)密度、質量、半径がEOSに依存!**

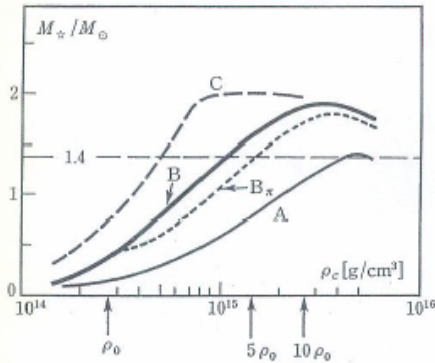


図 3.5 中性子星の中心密度  $\rho_c$  と質量  $M_{\star}$  との関係。A, B, C の順に状態方程式が硬くなる。B<sub>π</sub> は π 中間子短縮が起こった場合の一例

TOV(Tolman-Oppenheimer-Volkov) eq.

$$\frac{dP(r)}{dr} = -G \frac{\{M(r) + 4\pi P(r)r^3/c^2\} \{m(r) + P(r)/c^2\}}{r(r - 2GM(r)/c^2)}$$

$$M(r) = \int 4\pi r'^2 m(r') dr'$$

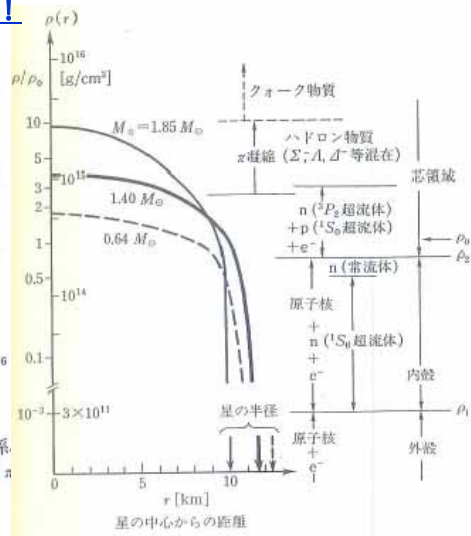
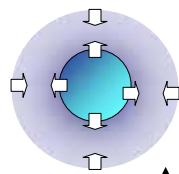


図 1.2 中性子星の密度分布。標準的と考えられる状態方程式<sup>20)</sup>を用いて求めた質量  $M_{\star}/M_{\odot} = 1.85, 1.40, 0.64$  ( $M_{\odot}$  は太陽質量) の場合。右側は縦軸で示す  $\rho$  での物質の組成・状態を示す

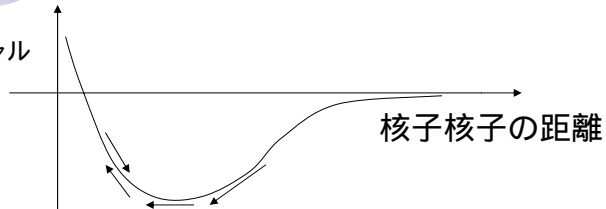
**非対称 (中性子数 >> 陽子数) な核物質の状態方程式を導出 → 中性子星構造の解明、超新星爆発メカニズムの解明**

中性子物質の圧縮性の研究、中性子スキン厚の研究



不安定核 (中性子過剰核) の圧縮性を (圧縮率) を測定する。  
(Breathing Mode E0励起スペクトル)

核子-核子ポテンシャル



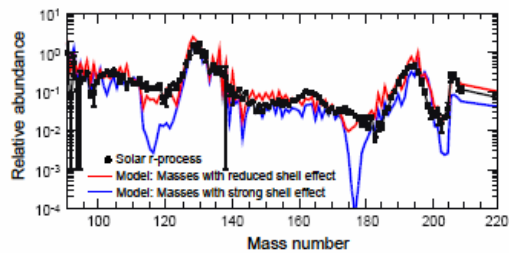
圧縮後バウンス 超新星爆発のきっかけ

## 宇宙核物理学の今後

### 宇宙元素合成モデル

未だに定量的には確立したとは言えない  
(低エネルギー核反応の難しさ)

rプロセス(超中性子過剰核を経由する元素合成プロセス)  
の定量的説明は重要



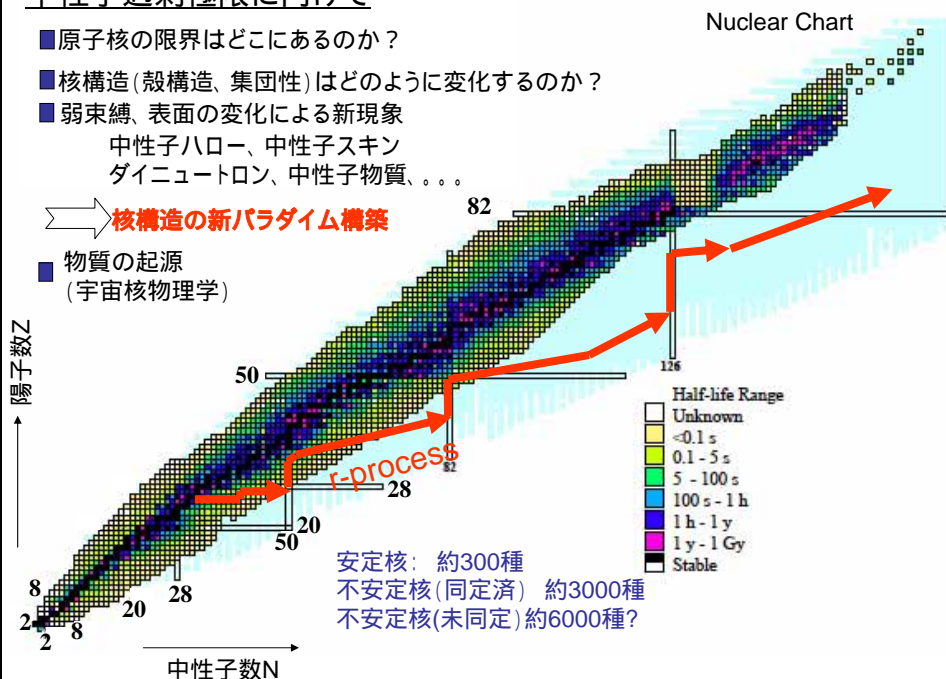
中性子過剰核物質の状態方程式(不安定核ビーム実験で拓かれる)  
- - 中性子星、超新星爆発のメカニズムとも関連

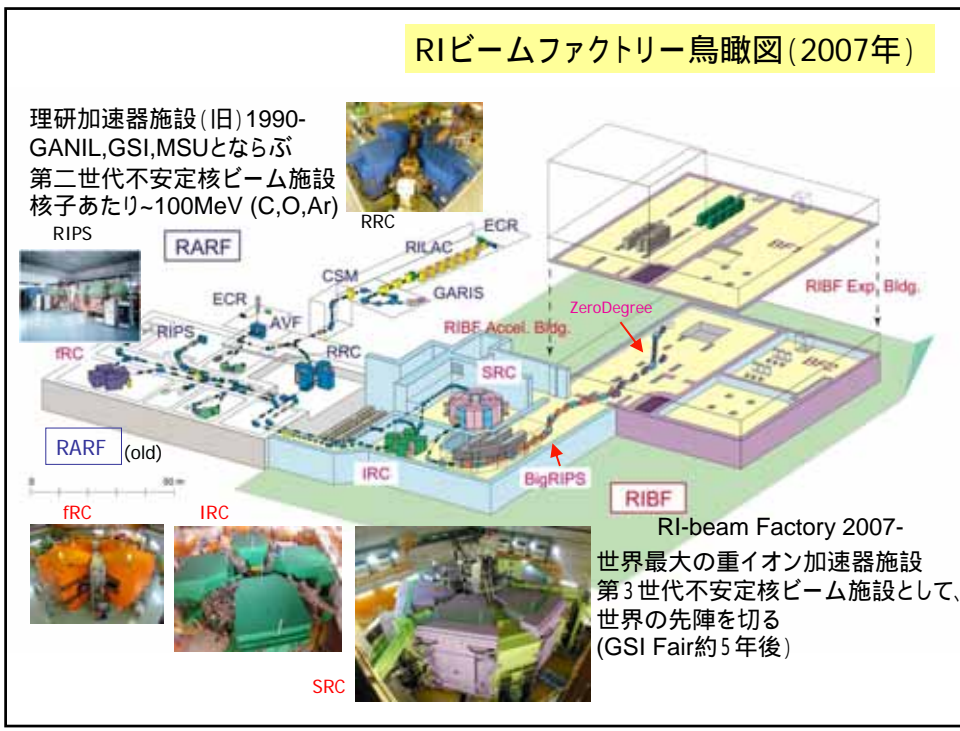
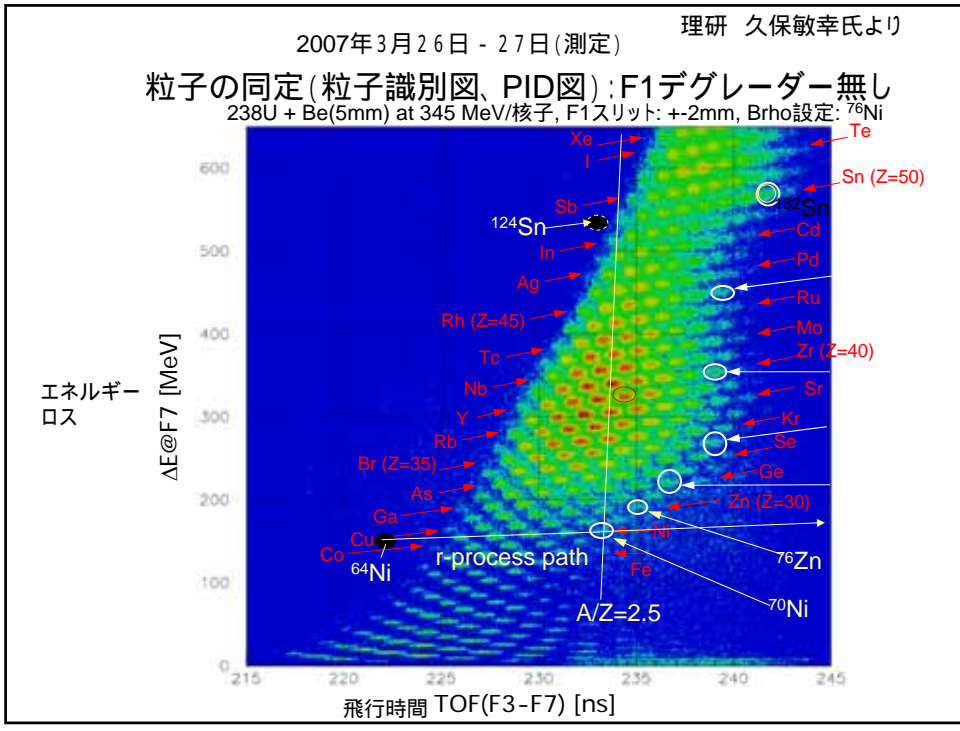
## 中性子過剰極限に向けて

- 原子核の限界はどこにあるのか?
- 核構造(殻構造、集団性)はどのように変化するのか?
- 弱束縛、表面の変化による新現象  
中性子ハロー、中性子スキン  
ダイニュートロン、中性子物質、...

核構造の新パラダイム構築

- 物質の起源  
(宇宙核物理学)





物理学科3年生へ  
理化学研究所見学会を行います  
(旭研、中村研主催)

**日時 3月9日(火) 午後2:00**  
**東武東上線/有楽町線・副都心線**  
**和光市駅(改札前)集合**

*世界最大の不安定核ビーム施設“RIビームファクトリー”(世界最大の超伝導サイクロトロン)を見学します。*

**メモ** 東武東上線 / 地下鉄有楽町線・副都心線 和光市駅  
(大岡山から約1時間10分  
池袋から東武東上線急行 / 準急12分)