

SCW放射光が拓く天体核物理の未来



宇都宮弘章(甲南大学)

SPring-8 研究会 12月24日(水)

<話の概要>

- ⌘ 産総研のレーザー逆コンプトンガンマ線
- ⌘ SCW放射光による ρ プロセス研究
- ⌘ 他のいくつかのトピックス
- ⌘ まとめ

Real Photon Sources in Nuclear Physics



- # Radioactive Isotopes
- # Bremsstrahlung
- # Positron Annihilation in Flight
- # **Laser Inverse Compton scattering**

1963 : Idea by Milburn and Arutyunian & Tumanian

1980s: Practical use at Frascati (Italy)

- # **SCW放射光 SPring-8**

However, its use for nuclear astrophysics had been ignored for a long time.

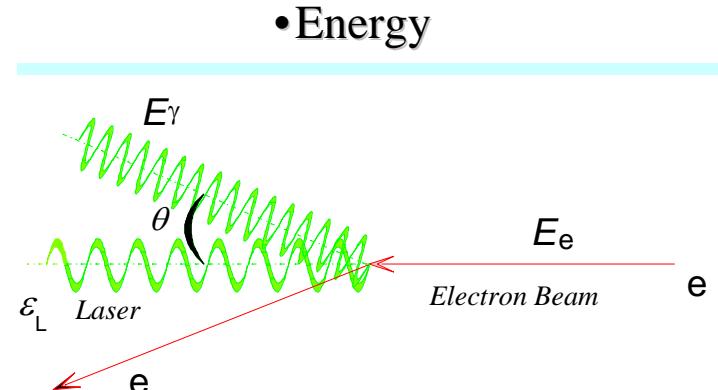
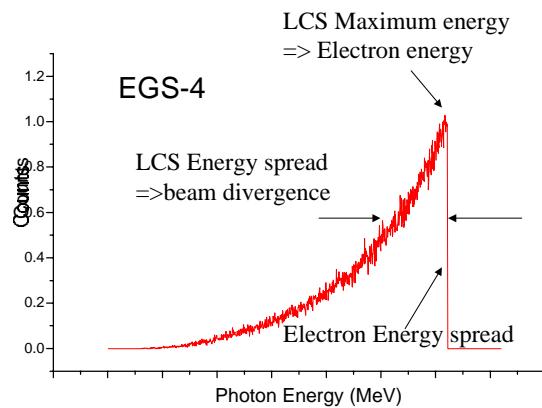
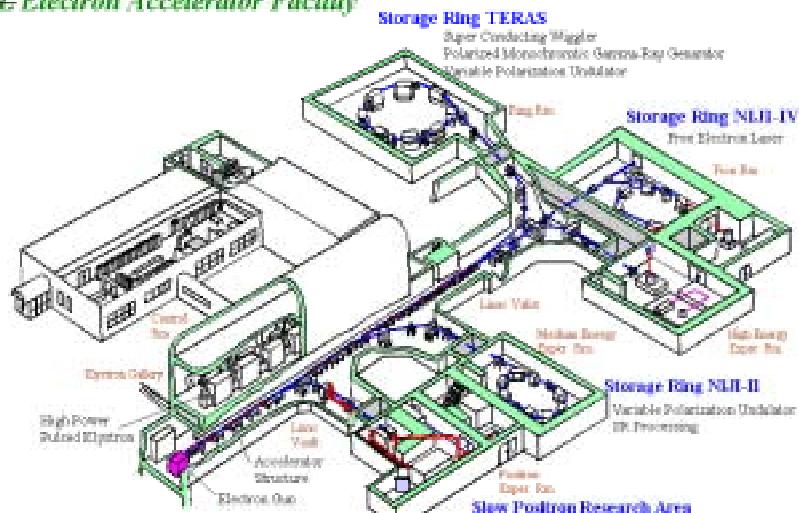
LCS(Laser Compton scattering)

ガンマ線(産総研 AIST)

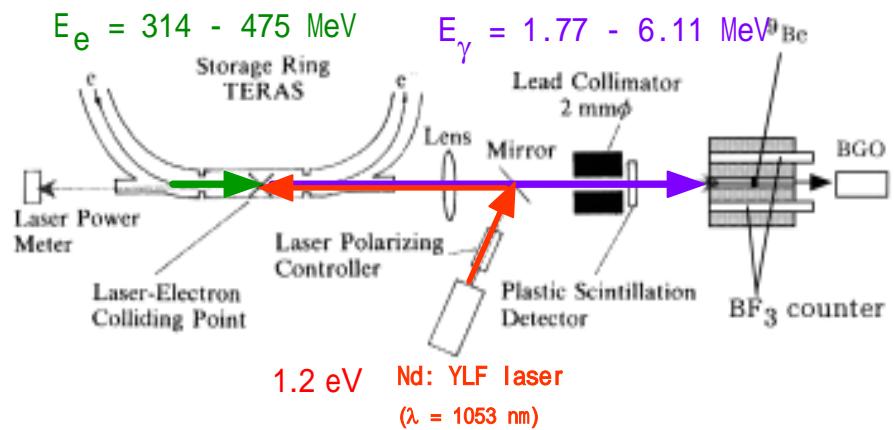
準単色 エネルギー可変 $10^{4\text{-}5}$ photons/sec
100% 直線偏光

AIST

ETL Electron Accelerator Facility



$$E_\gamma = \frac{\epsilon_L}{1 - \beta \cos \theta + \epsilon_L (1 - \cos(\theta_L - \theta)) / E_e}$$



Neutron Detector

Double rings of 16 ${}^3\text{He}$ counters
embedded in polyethylene



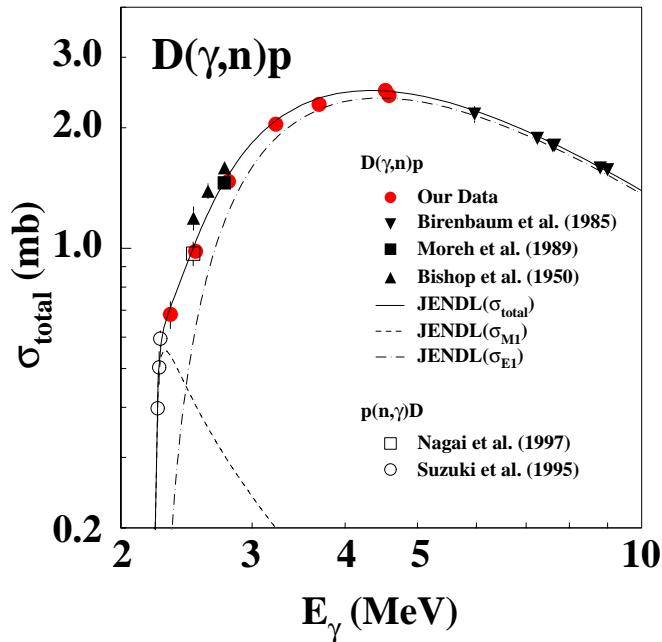
光中性子断面積の励起関数測定

$^9\text{Be}(\gamma, n)\alpha\alpha$ <超新星爆発>

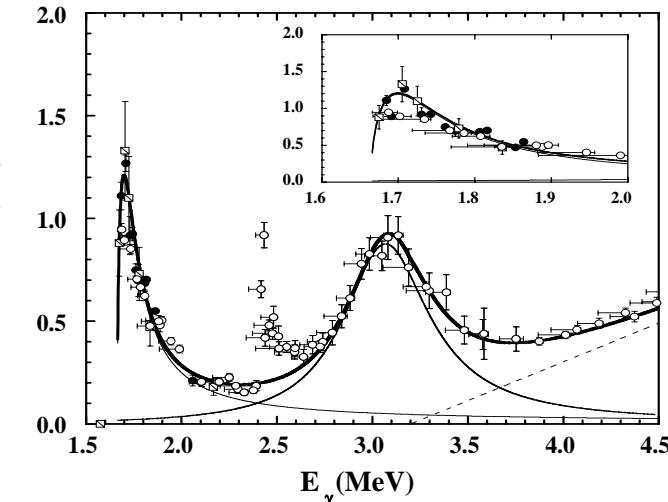
$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ <超新星爆発>

$D(\gamma, n)p$ <ビッグバン>

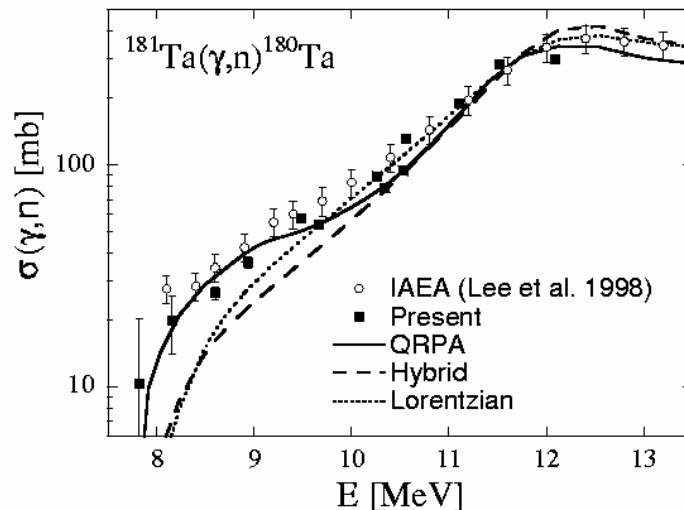
K.Y. Hara et al. 2003



H. Utsunomiya et al. 2001
K. Sumiyoshi et al. 2002



H. Utsunomiya et al. 2003

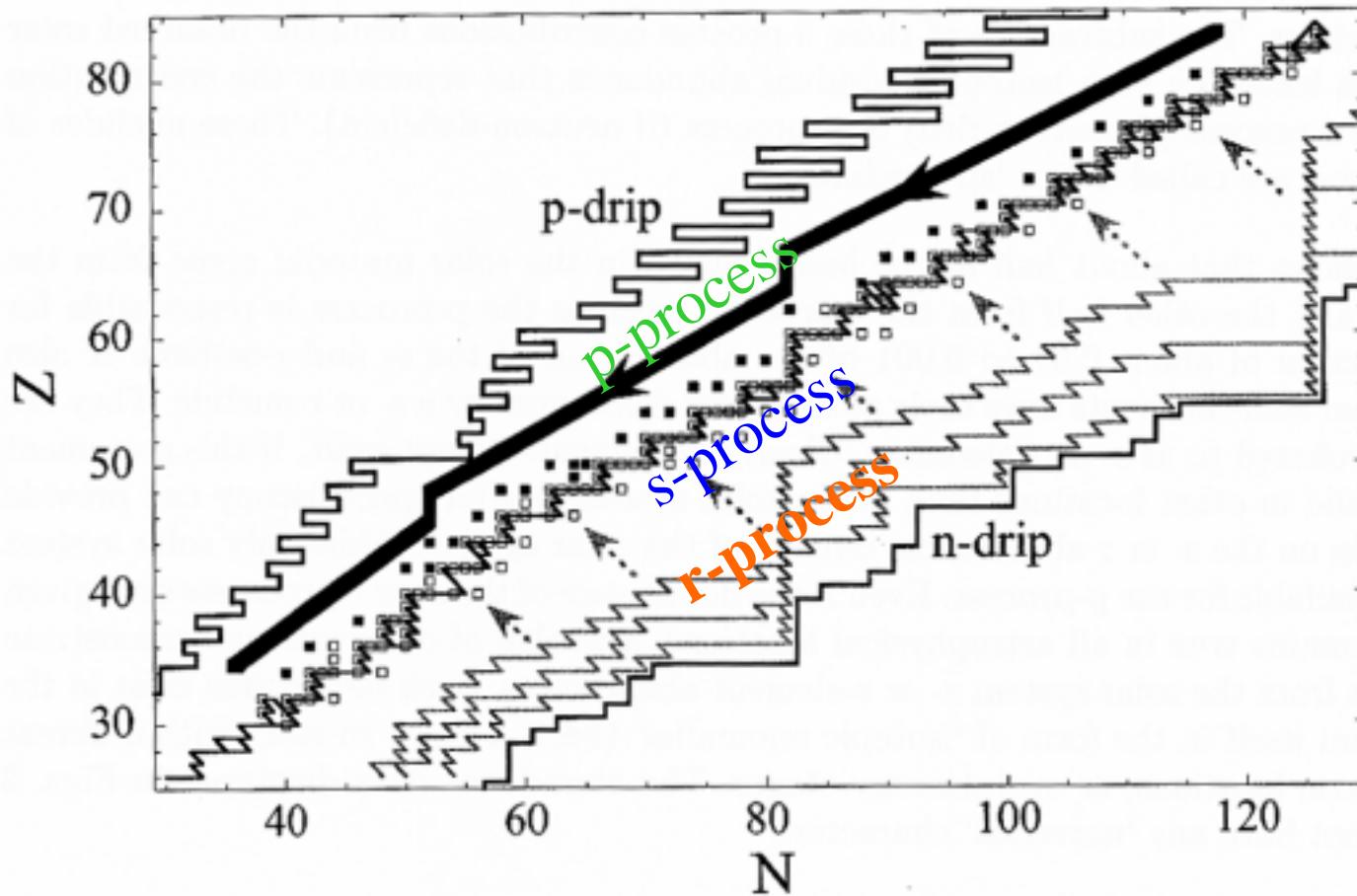


励起関数測定 2003年

- ⌘ $^{186}\text{W}(\gamma,\text{n})^{185}\text{W}$ <sプロセス>
- ⌘ $^{187}\text{Re}(\gamma,\text{n})^{186}\text{Re}$ <sプロセス、宇宙時計>
- ⌘ $^{188}\text{Os}(\gamma,\text{n})^{187}\text{Os}$ <sプロセス、宇宙時計>
- ⌘ $^{139}\text{La}(\gamma,\text{n})^{138}\text{La}$ <pプロセス>
- ⌘ $^{93}\text{Nb}(\gamma,\text{n})^{92}\text{Nb}$ <pプロセス>
- ⌘ $^{141}\text{Pr}(\gamma,\text{n})^{140}\text{Pr}$

s, r, p -processes

Arnould & Goriely 2003

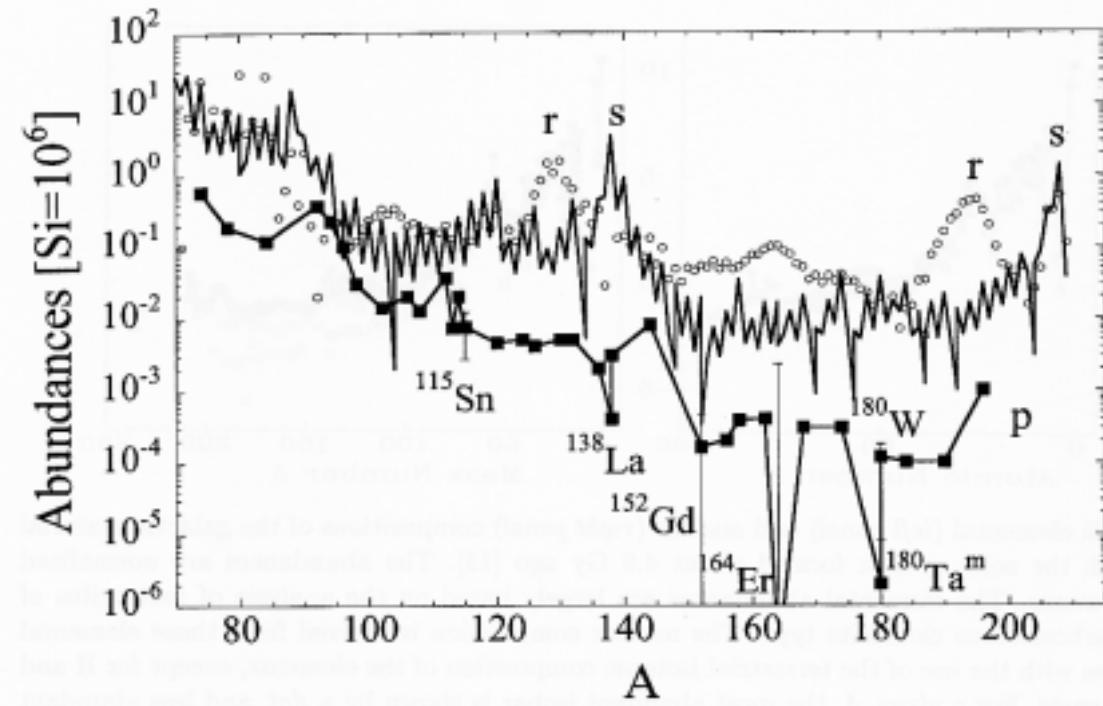


p-process nuclei

Arnould (1976)
Woosley & Haward (1978)
Rayet et al. (1995)
Rauscher et al. (2002)

⌘ 35 stable nuclei
 ^{74}Se - ^{196}Hg

- ⌘ (γ, n) (γ, p) (γ, α) and inverse n-, p-, and α - capture
- ⌘ 2000 nuclei, 20000 reactions inc. weak transformation
- ⌘ $T_9 : 1.7 \sim 3.3$
- ⌘ O/Ne layer of massive stars
- Pre-supernova phase or Type II-supernova explosion



Pプロセス核

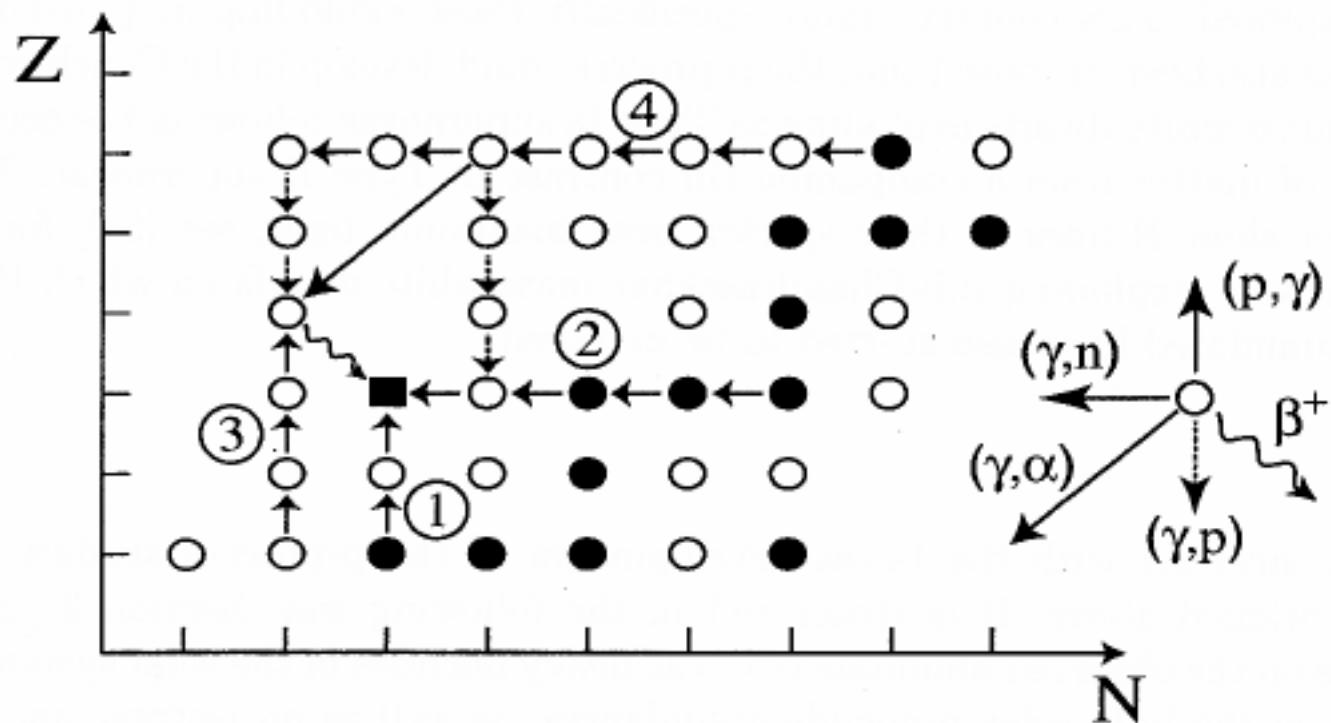
| nucleus | Anders & Grevesse [13] | error (%) | Palme & Beer [15] | error (%) |
|-------------------|------------------------|-----------|-------------------|-----------|
| ⁷⁴ Se | 0.55 | 6.4 | 0.6 | 5 |
| ⁷⁸ Kr | 0.153 | 18 | 0.19 | - |
| ⁸⁴ Sr | 0.132 | 8.1 | 0.12 | 5 |
| ⁹² Mo | 0.378 | 5.5 | 0.38 | 5 |
| ⁹⁴ Mo | 0.236 | 5.5 | 0.23 | 5 |
| ⁹⁶ Ru | 0.103 | 5.4 | 0.1 | 10 |
| ⁹⁸ Ru | 0.035 | 5.4 | 0.03 | 10 |
| ¹⁰² Pd | 0.0142 | 6.6 | 0.014 | 10 |
| ¹⁰⁶ Cd | 0.0201 | 6.5 | 0.02 | 10 |
| ¹⁰⁸ Cd | 0.0143 | 6.5 | 0.014 | 10 |
| ¹¹³ In | 0.0079 | 6.4 | 0.008 | 10 |
| ¹¹² Sn | 0.0372 | 9.4 | 0.036 | 10 |
| ¹¹⁴ Sn | 0.0252 | 9.4 | 0.024 | 10 |
| ¹¹⁵ Sn | 0.0129 | 9.4 | 0.013 | 10 |
| ¹²⁰ Te | 0.0043 | 10 | 0.0045 | 10 |
| ¹²⁴ Xe | 0.00571 | 20 | 0.005 | - |
| ¹²⁶ Xe | 0.00509 | 20 | 0.004 | - |
| ¹³⁰ Ba | 0.00476 | 6.3 | 0.005 | 5 |
| ¹³² Ba | 0.00453 | 6.3 | 0.005 | 5 |
| ¹³⁸ La | 0.000409 | 2 | 0.0004 | 5 |
| ¹³⁶ Ce | 0.00216 | 1.7 | 0.002 | 5 |
| ¹³⁸ Ce | 0.00284 | 1.7 | 0.003 | 5 |
| ¹⁴⁴ Sm | 0.008 | 1.3 | 0.008 | 5 |
| ¹⁵² Gd | 0.00066 | 1.4 | 0.001 | 5 |
| ¹⁵⁶ Dy | 0.000221 | 1.4 | 0.0002 | 5 |
| ¹⁵⁸ Dy | 0.000378 | 1.4 | 0.0004 | 5 |
| ¹⁶² Er | 0.000351 | 1.3 | 0.0004 | 5 |
| ¹⁶⁴ Er | 0.00404 | 1.3 | 0.0042 | 5 |
| ¹⁶⁸ Yb | 0.000322 | 1.6 | 0.0003 | 5 |
| ¹⁷⁴ Hf | 0.000249 | 1.9 | 0.0003 | 5 |
| ¹⁸⁰ Ta | 2.48e-06 | 1.8 | 2.00e-06 | 10 |
| ¹⁸⁰ W | 0.000173 | 5.1 | 0.0002 | 7 |
| ¹⁸⁴ Os | 0.000122 | 6.3 | 0.0001 | 5 |
| ¹⁹⁰ Pt | 0.00017 | 7.4 | 0.0001 | 10 |
| ¹⁹⁶ Hg | 0.00048 | 12 | 0.001 | 20 |

Pプロセス

● 種の安定核

○ 不安定核

■ Pプロセス核



p-process核

s-,r-processes(中性子捕獲反応)

では作られない135個の陽子豊富な安定核

Arnould (1976)

Woosley & Haward (1978)

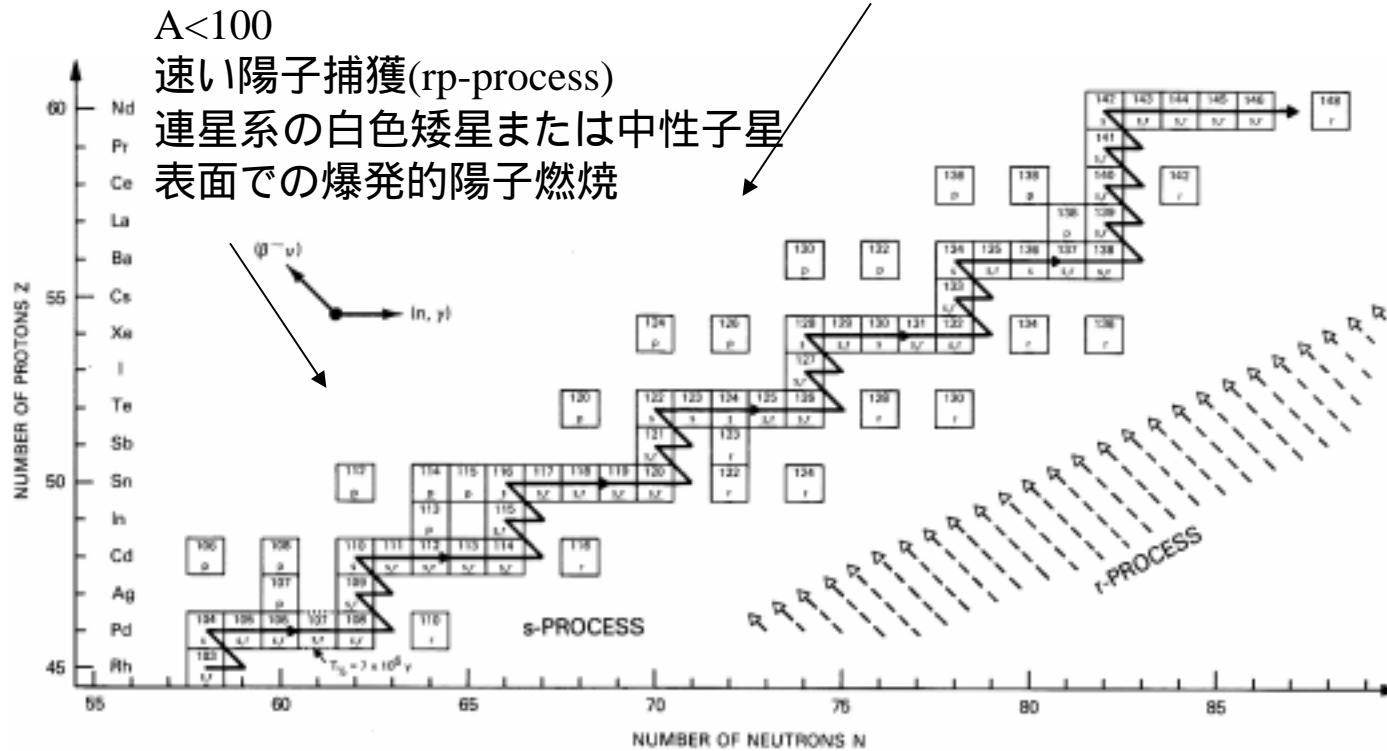
Rayet et al. (1995)

Rauscher et al. (2002)

A>100

O/Ne層 大質量星の超新星爆発直前または
超新星爆発での主として光核反応(γ -process)

Schatz et al. 1998



Astrophysical Energy Window for (γ ,n) reactions

Mohr 2000

一対の光子と原子核が単位時間に
起こす光核反応の回数

$$\lambda(T) = \int_0^\infty c n_\gamma(E, T) \sigma_\gamma(E) dE$$

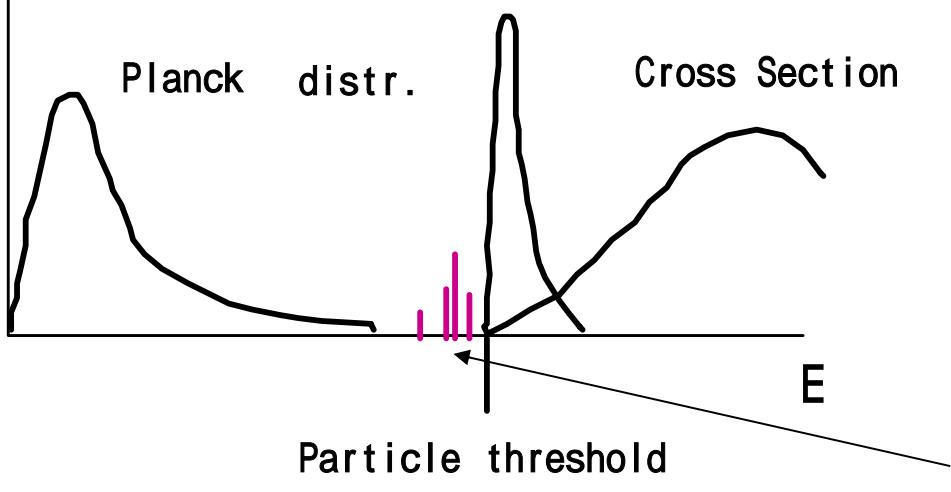
Photonuclear Cross section

$$\sigma_\gamma(E)$$

Planck distribution

$$n_\gamma(E, T) = \left(\frac{1}{\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{\hbar c}\right)^3 \frac{E^2}{\exp(E/kT) - 1}$$

Astrophysical
Energy Window



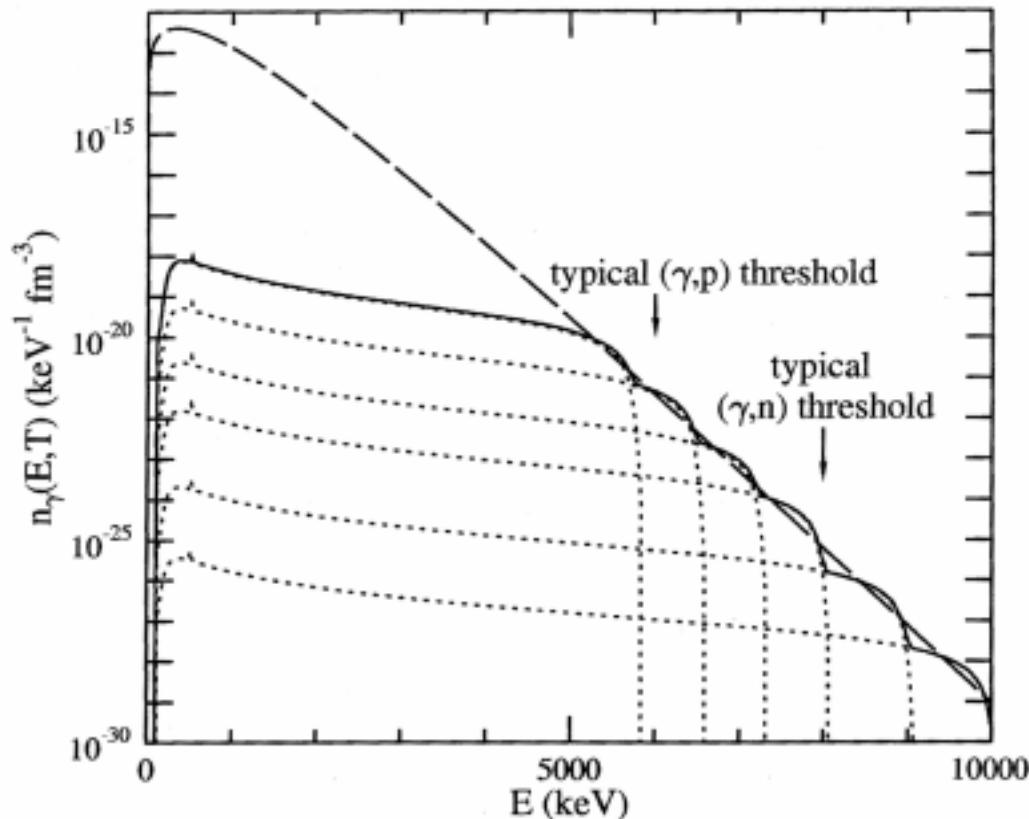
Stellar condition

Photoreactions on nuclei in
excited states are important.

(γ,n) 核反応率の直接決定 従来の方法

$$\lambda(T) = \int_0^{\infty} c n_{\gamma}(E, T) \sigma_{\gamma}(E) dE$$

いくつかのBremsstrahlungスペクトルを重ね合わせて
黒体輻射のプランクスペクトルを再現



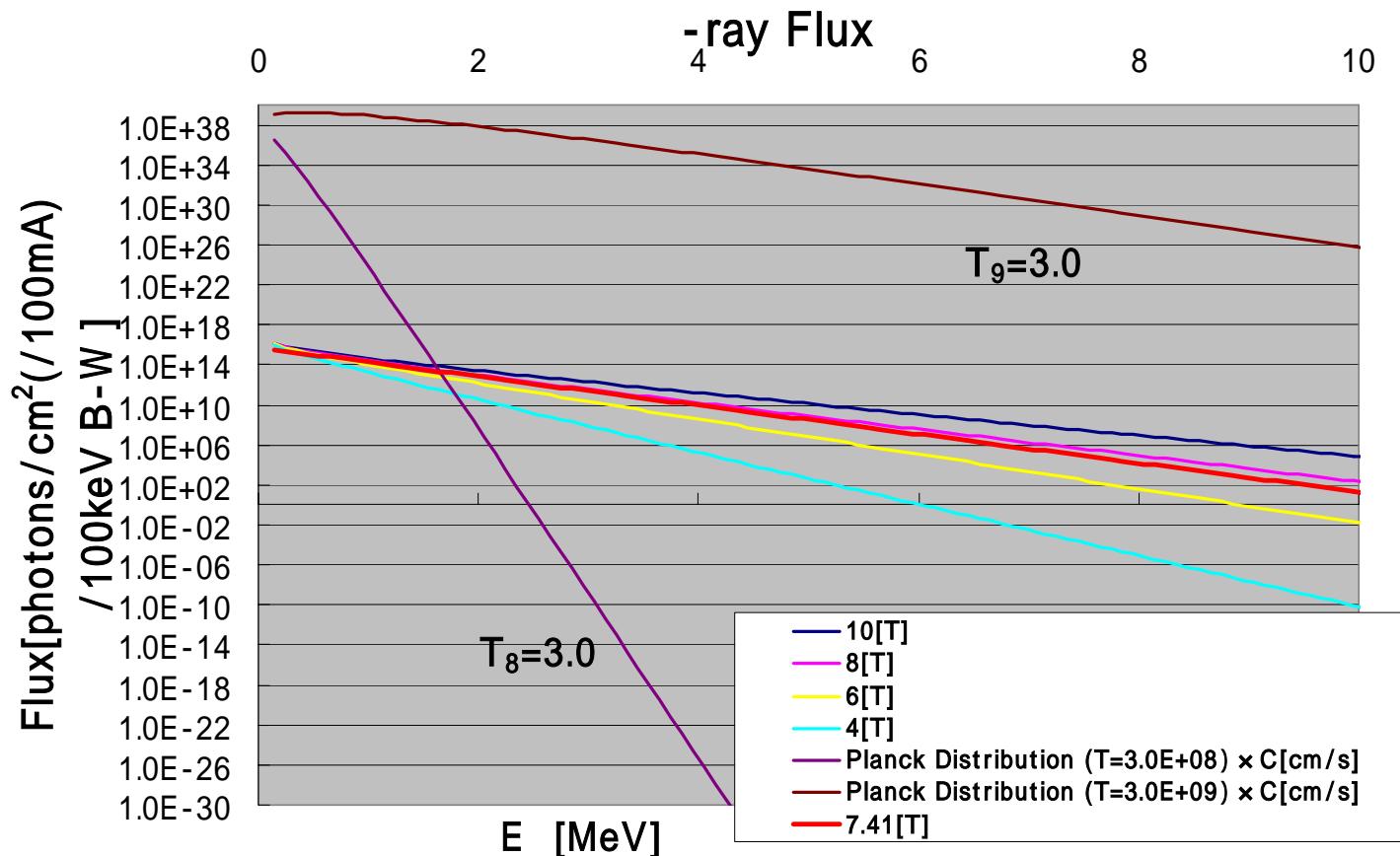
Vogt, Mohr et al. 2001

SCW放射光による直接測定

(γ ,n)反応率

$$\lambda(T) = \int_0^{\infty} c n_{\gamma}(E, T) \sigma_{\gamma}(E) dE$$

- ・超新星爆発時の高温の熱浴($T_9 = 1.7 - 3.3$)で得られるガンマ線のエネルギー分布を良く再現する。 γ -processの研究に最適
- ・中性子しきい値エネルギーでも大強度 $10^8 - 10^9$ photons/sec/MeV



光中性子反応断面積のしきい値振る舞いの決定

⌘ $\sigma(E\gamma) = \sigma_0 [(E\gamma - S_n) / S_n]^{**p}$

$p = l + 1/2$, l : 中性子の軌道角運動量

σ_0 と p は実験パラメタ

⌘ SCW 放射光を用いて反応率を測定し,
 σ_0 と p を決める。

$$\lambda(T) = \int_0^\infty c n_\gamma(E, T) \sigma_\gamma(E) dE$$

List of photonuclear reactions to be studied by activation technique at SPring-8 : 22 natural samples: 47 reactions

| Samples | Photoreactions | p-nuclides |
|---------|--|--------------------------------------|
| Se | $^{76}\text{Se}(9.36\%)(\gamma,\text{n})^{75}\text{Se}(T=120 \text{ d})$ $^{74}\text{Se}(0.89\%)(\gamma,\text{n})^{73}\text{Se}(T=7.15 \text{ h})$ | ^{74}Se |
| Kr | $^{80}\text{Kr}(2.25\%)(\gamma,\text{n})^{79}\text{Kr}(T=1.46 \text{ d})$ $^{78}\text{Kr}(0.35\%)(\gamma,\text{n})^{77}\text{Kr}(T=1.24 \text{ d})$ | ^{78}Kr |
| Sr | $^{86}\text{Sr}(9.86\%)(\gamma,\text{n})^{85}\text{Sr}(T=65 \text{ d})$ $^{84}\text{Sr}(0.56\%)(\gamma,\text{n})^{83}\text{Sr}(T=1.35 \text{ d})$ | ^{84}Sr |
| Ru | $^{98}\text{Ru}(1.88\%)(\gamma,\text{n})^{97}\text{Ru}(T=2.9\text{d})$ $^{96}\text{Ru}(5.52\%)(\gamma,\text{n})^{95}\text{Ru}(T=1.64 \text{ h})$ | ^{94}Ru ^{96}Ru |
| Pd | $^{104}\text{Pd}(11.1\%)(\gamma,\text{n})^{103}\text{Pd}(T=17 \text{ d})$ $^{102}\text{Pd}(1.02\%)(\gamma,\text{n})^{101}\text{Pd}(T=8.47 \text{ h})$ | ^{102}Pd |

List (continued)

| Samples | Photoreactions | p-nuclides |
|---------|---|--|
| Cd | $^{110}\text{Cd}(12.5\%)(\gamma,\text{n})^{109}\text{Cd}(T=1.27 \text{ y})$ $^{108}\text{Cd}(0.89\%)(\gamma,\text{n})^{107}\text{Cd}(T=6.50 \text{ h})$ $^{106}\text{Cd}(1.25\%)(\gamma,\text{n})^{105}\text{Cd}(T=55.5 \text{ m})$ | ^{108}Cd ^{106}Cd |
| In | $^{113}\text{In}(4.29\%)(\gamma,\text{n})^{112}\text{In}(T=20.6 \text{ m})$ | ^{113}In |
| Sn | $^{114}\text{Sn}(0.65\%)(\gamma,\text{n})^{113}\text{Sn}(T=115 \text{ d})$ $^{112}\text{Sn}(0.97\%)(\gamma,\text{n})^{111}\text{Sn}(T=35.3 \text{ m})$ | ^{114}Sn ^{112}Sn |
| Te | $^{122}\text{Te}(2.60\%)(\gamma,\text{n})^{121}\text{Te}(T=154 \text{ d})$ $^{120}\text{Te}(0.096\%)(\gamma,\text{n})^{119}\text{Te}(T=4.70 \text{ d})$ | ^{120}Te |
| Ba | $^{132}\text{Ba}(0.101\%)(\gamma,\text{n})^{131}\text{Ba}(T=11.5 \text{ d})$ $^{130}\text{Ba}(0.106\%)(\gamma,\text{n})^{129}\text{Ba}(T=2.23 \text{ h})$ | ^{130}Ba |
| Ce | $^{140}\text{Ce}(88.5\%)(\gamma,\text{n})^{139}\text{Ce}(T=138 \text{ d})$ $^{138}\text{Ce}(0.25\%)(\gamma,\text{n})^{137}\text{Ce}(T=1.43 \text{ d})$ $^{136}\text{Ce}(0.19\%)(\gamma,\text{n})^{135}\text{Ce}(T=17.7 \text{ h})$ | ^{138}Ce ^{136}Ce |
| Sm | $^{144}\text{Sm}(3.1\%)(\gamma,\text{n})^{143}\text{Sm}(T=8.83 \text{ m})$ | ^{144}Sm |

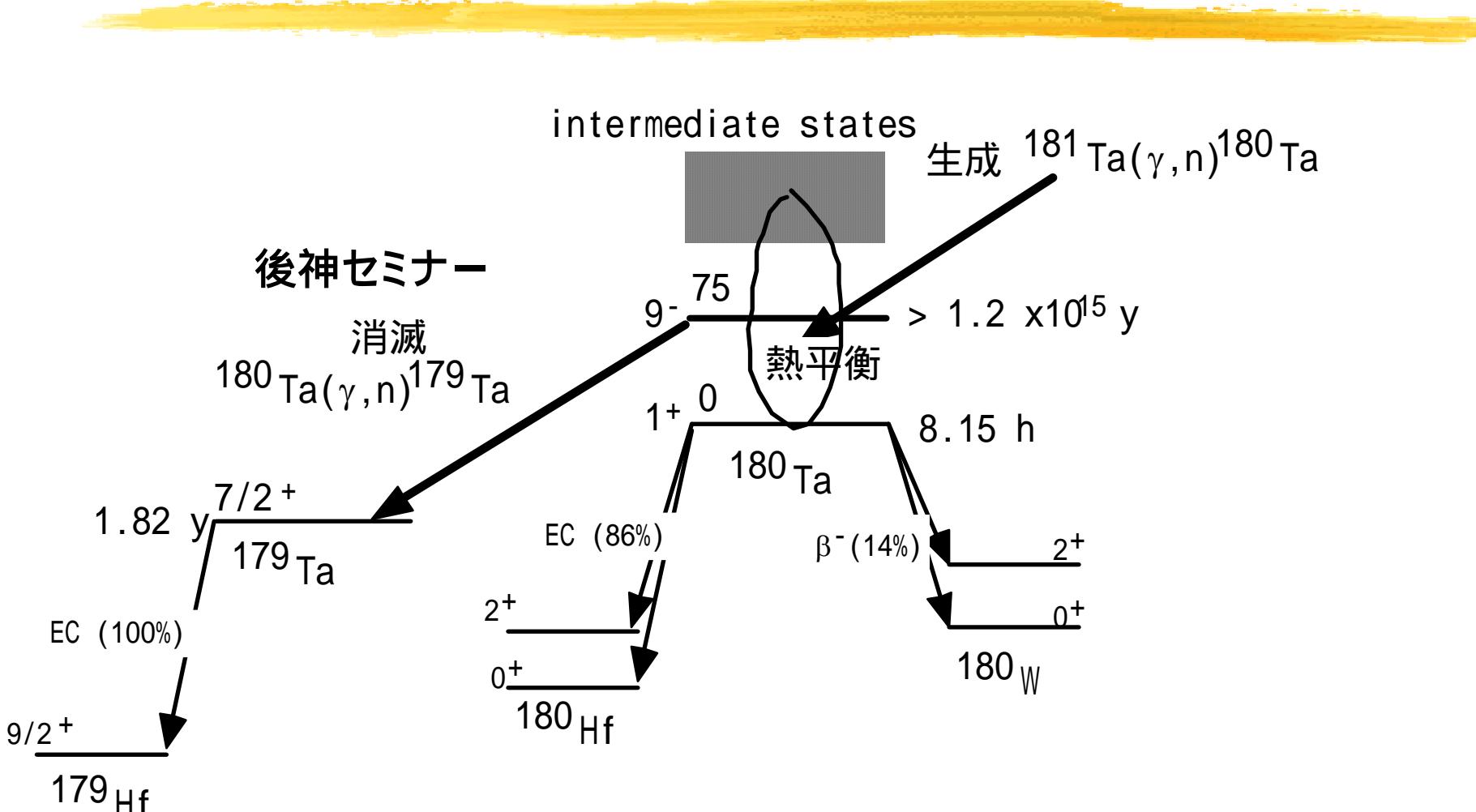
List (continued)

| Samples | Photoreactions | p-nuclides |
|---------|--|--|
| Gd | $^{154}\text{Gd}(2.18\%)(\gamma,\text{n})^{153}\text{Gd}(\text{T}=242 \text{ d})$ $^{152}\text{Gd}(0.10\%)(\gamma,\text{n})^{151}\text{Gd}(\text{T}=124 \text{ d})$ | ^{152}Gd |
| Dy | $^{160}\text{Dy}(2.34\%)(\gamma,\text{n})^{159}\text{Dy}(\text{T}=144 \text{ d})$ $^{158}\text{Dy}(0.10\%)(\gamma,\text{n})^{157}\text{Dy}(\text{T}=8.14 \text{ h})$ $^{156}\text{Dy}(0.06\%)(\gamma,\text{n})^{155}\text{Dy}(\text{T}=9.9 \text{ h})$ | ^{158}Dy ^{156}Dy |
| Er | $^{166}\text{Er}(33.6\%)(\gamma,\text{n})^{165}\text{Er}(\text{T}=10.4 \text{ h})$ $^{164}\text{Er}(1.61\%)(\gamma,\text{n})^{163}\text{Er}(\text{T}=1.25 \text{ h})$ $^{162}\text{Er}(0.14\%)(\gamma,\text{n})^{161}\text{Er}(\text{T}=3.21 \text{ h})$ | ^{164}Er ^{162}Er |
| Yb | $^{170}\text{Yb}(3.05\%)(\gamma,\text{n})^{169}\text{Yb}(\text{T}=32.0 \text{ d})$ $^{168}\text{Yb}(0.13\%)(\gamma,\text{n})^{167}\text{Yb}(\text{T}=17.5 \text{ m})$ | ^{168}Yb |
| Hf | $^{176}\text{Hf}(5.21\%)(\gamma,\text{n})^{175}\text{Hf}(\text{T}=70 \text{ d})$ $^{174}\text{Hf}(0.162\%)(\gamma,\text{n})^{173}\text{Hf}(\text{T}=23. 6 \text{ h})$ | ^{174}Hf |
| Ta | $^{181}\text{Ta}(99.988\%)(\gamma,\text{n})^{180}\text{Ta}^{\text{gs}}(\text{T}=8.15 \text{ h})$ $^{180}\text{Ta}(0.012\%)(\gamma,\text{n})^{179}\text{Ta}(\text{T}=1.82 \text{ y})$ | ^{180}Ta |

List (continued)

| Samples | Photoreactions | p-nuclides |
|---------|--|-------------------|
| W | $^{182}\text{W}(26.5\%)(\gamma,\text{n})^{181}\text{W}(\text{T}=121 \text{ d})$ $^{180}\text{W}(0.12\%)(\gamma,\text{n})^{179}\text{W}(\text{T}=37.1 \text{ m})$ | ^{180}W |
| Os | $^{186}\text{Os}(1.58\%)(\gamma,\text{n})^{185}\text{Os}(\text{T}=93.6 \text{ d})$ $^{184}\text{Os}(0.020\%)(\gamma,\text{n})^{183}\text{Os}(\text{T}=13.0 \text{ h})$ | ^{184}Os |
| Pt | $^{194}\text{Pt}(32.9\%)(\gamma,\text{n})^{193}\text{Pt}(\text{T}=4.33 \text{ d})$ $^{192}\text{Pt}(0.79\%)(\gamma,\text{n})^{191}\text{Pt}(\text{T}=2.96 \text{ d})$ $^{190}\text{Pt}(0.01\%)(\gamma,\text{n})^{189}\text{Pt}(\text{T}=10.9 \text{ h})$ | ^{190}Pt |
| Hg | $^{198}\text{Hg}(9.97\%)(\gamma,\text{n})^{197}\text{Hg}(\text{T}=2.67 \text{ d})$ $^{196}\text{Hg}(0.15\%)(\gamma,\text{n})^{195}\text{Hg}(\text{T}=1.73 \text{ d})$ | ^{196}Hg |

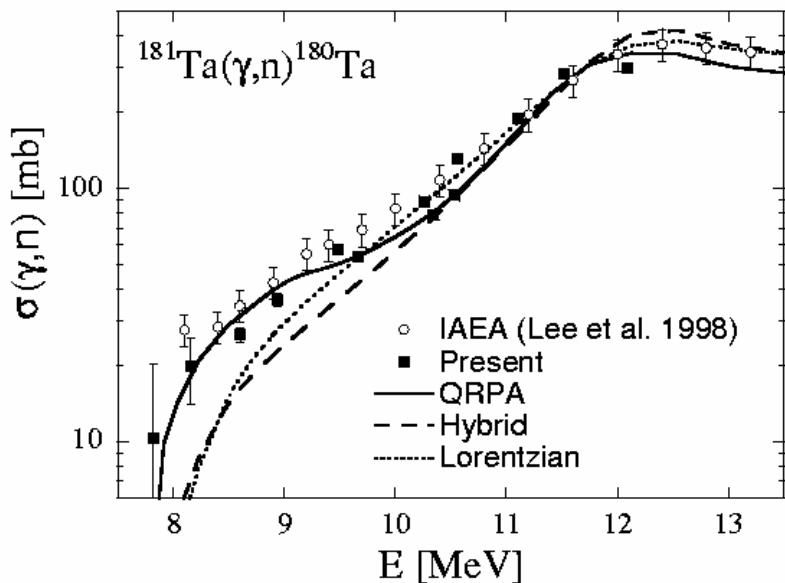
^{180}Ta (最稀少元素で天然に存在する唯一の核異性体) の γ -process 起源



^{180}Ta 生成 (γ -process)

⌘ ^{180}Ta の基底状態と核異性体との熱的均衡の成立

$T_9 = 1.7 - 3.3$ O/Ne layers of Massive Stars during Presupernovae or Supernovae



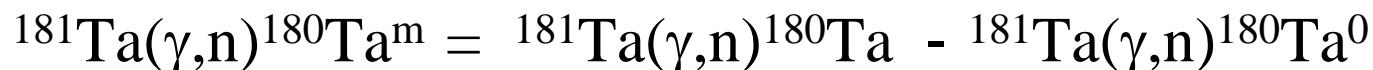
$$\frac{N_m}{N_0} = \frac{g_m \exp(-E_m/kT)}{G}$$

$$G = \sum_i g_i \exp(-E_i/kT), \quad g_i = 2J_i + 1$$

H. Utsunomiya et al., 2003

産総研LCS 線を使った実験

⌘ 热的均衡からの逸脱 $T_8 < 4$



^{180}Ta 消滅 (γ -process) 断面積の測定

⌘ ^{180}Ta [0.012%] (γ, n) ^{179}Ta ($T_{1/2} = 1.82 \text{ y}$)

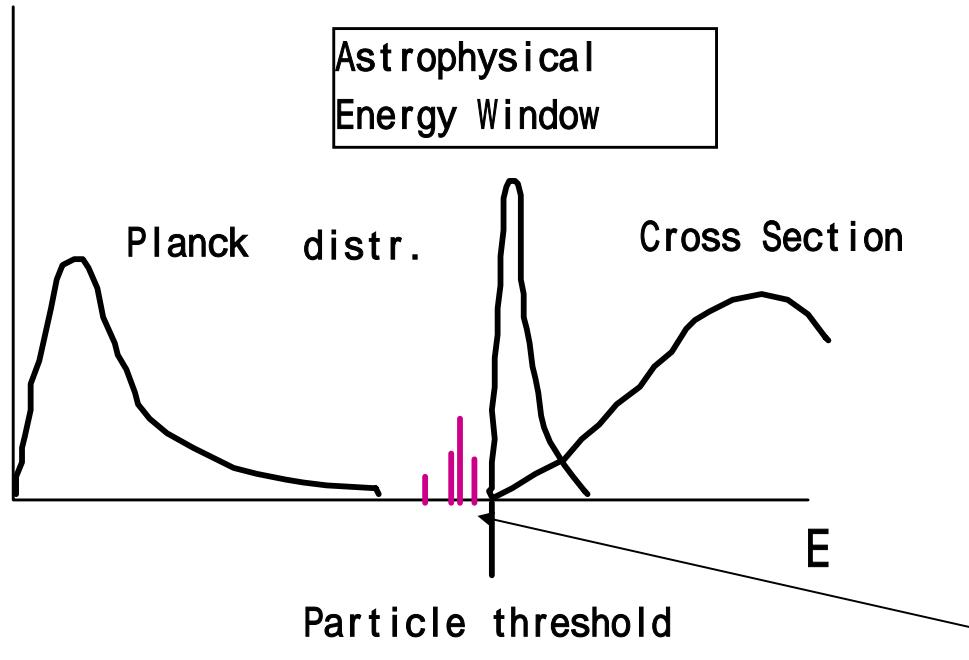
ターゲット物質が天然に存在する最稀少元素なので
enriched targetを用意することは論外。

SCW大強度放射光を利用した放射化実験が可能

<後神 講演>

励起状態にある原子核からの光核反応 天体核反応固有の問題

❖ (γ, γ') 実験により、中性子しきい値以下の E1, M1 ガンマ線強度を決定する。



<大垣 講演>

産総研NRF実験

関連する研究課題

<静間 講演>

1) ^{180}Ta のs-process生成と脱励起消滅

AGB星での特殊なs-process



2) s-process温度計

^{176}Lu 核異性体(123keV 1-準位 3.7 h)励起

核異性体の探索 核異性体型宇宙温度計 ^{138}La の研究



- ⌘ $^{180}\text{Ta}, \, ^{176}\text{Lu}$ 温度計
- ⌘ ^{138}La ガンマプロセス温度計？
<早川 講演>

まとめ

- ⌘ SCW放射光のスペクトルは、天体核物理研究(p プロセス研究)に天性の適合性を持つ。
- ⌘ 放射化法の実験が可能 <フェーズ'1実験>
- ⌘ (γ, γ') 実験 熱平衡状態(励起状態)にある原子核の光核反応 <フェーズ'2実験>
- ⌘ 系統的な研究 p プロセス研究のメック
- ⌘ 宇宙物理のための核データベース整備計画
甲南大学 - ブリュッセル自由大学間学術協定に基づき、2004年4月から5年計画がスタート