s過程における核反応断面積の現状と課題

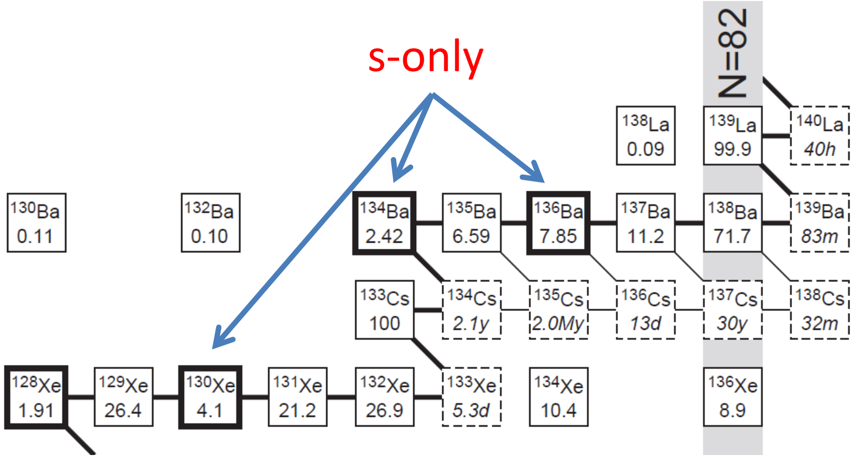
岩本信之（JAEA）

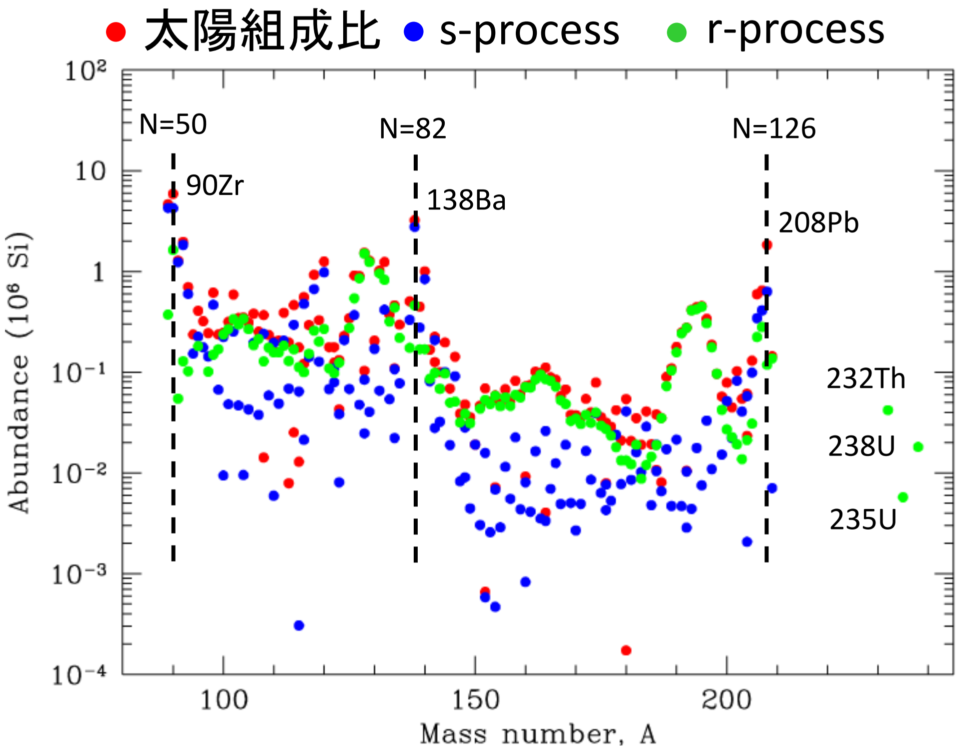
slow neutron capture process

<u>s-process</u>

- 中性子数密度: 10^7-10^{10}cm^{-3}
  - $\tau_\beta \ll \tau_n$ (~100 yr)
  - 元素合成は安定核上を進む

➡ 直接的に断面積測定が可能





太陽における重元素組成から重元素の約半分の合成に寄与していると考えられている

s-プロセスサイト

漸近巨星分枝(AGB)星→白色矮星

・ヘリウム殻燃焼 ← 不安定
→間欠的にHe燃焼が暴走

- s-process環境
  - Interpulse (~$10^{4\text{-}5}$ yr)
    - 温度 8 keV
    - 中性子数密度 ~10^7 cm^{-3}
    - $^{12}C(p,\gamma)^{13}N(\beta^+)^{13}C(\alpha,n)^{16}O$
  - Thermal pulse (~1-100 yr)
    - 温度 >25 keV
    - 中性子数密度 ~10^{10} cm^{-3}
    - CNO → $^{14}N(\alpha,\gamma)^{18}F(\beta^+)$ $^{18}O(\alpha,\gamma)^{22}Ne(\alpha,n)^{25}Mg$
  - ➡ A≥90核種の合成に寄与

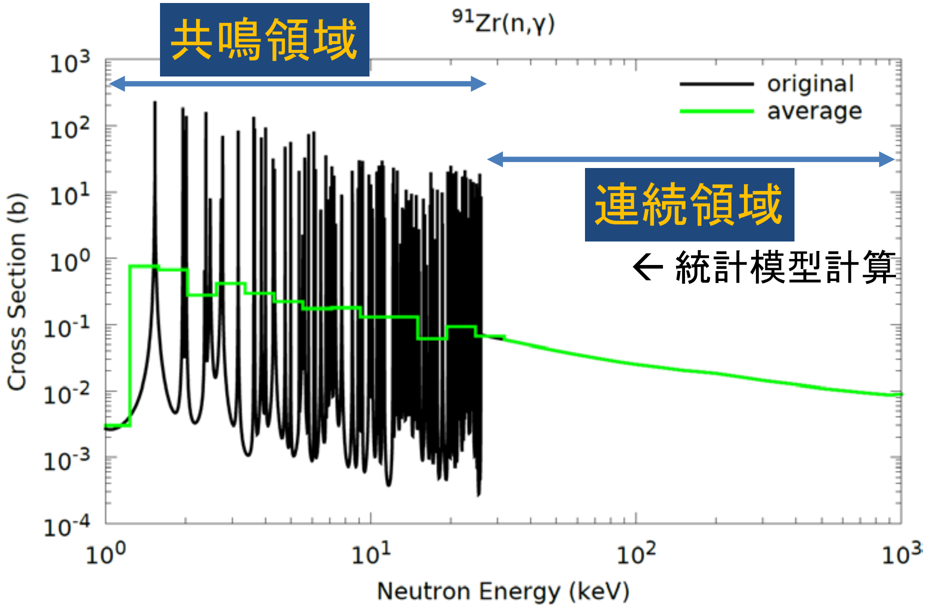
大質量星→超新星

・中心ヘリウム燃焼
・炭素(殻)燃焼

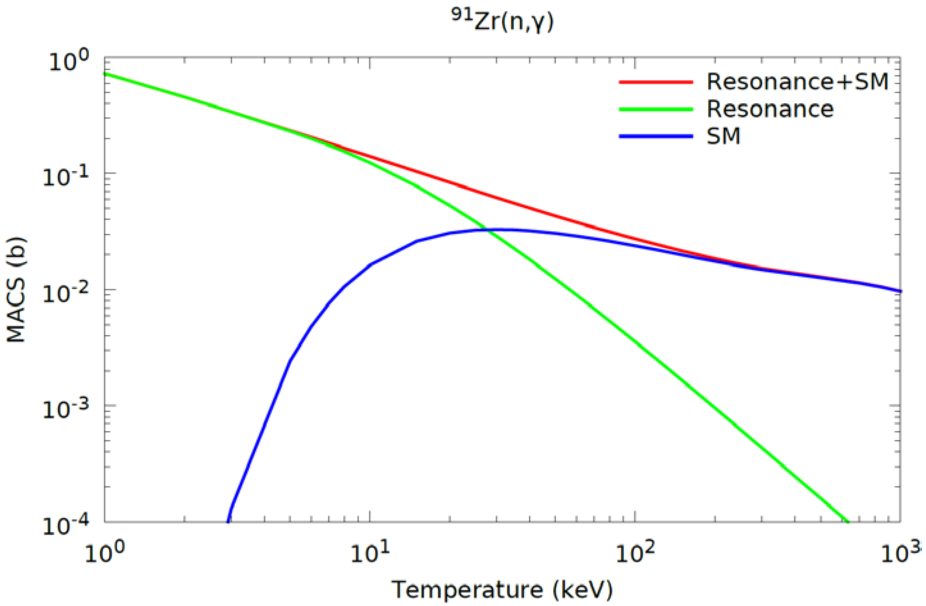
- s-process環境
  - 中心ヘリウム燃焼
    - 温度 >20 keV
    - 中性子数密度 ~10^7 cm^{-3}
    - CNO → $^{14}N(\alpha,\gamma)^{18}F(\beta^+)$ $^{18}O(\alpha,\gamma)^{22}Ne(\alpha,n)^{25}Mg$
  - ➡ A<90核種の合成に寄与
  - 炭素殻燃焼
    - 温度 90 keV
    - 中性子数密度 ~10^{12} cm^{-3}
    - $^{22}Ne(\alpha,n)^{25}Mg$
  - ➡ 中性子過剰核種の合成

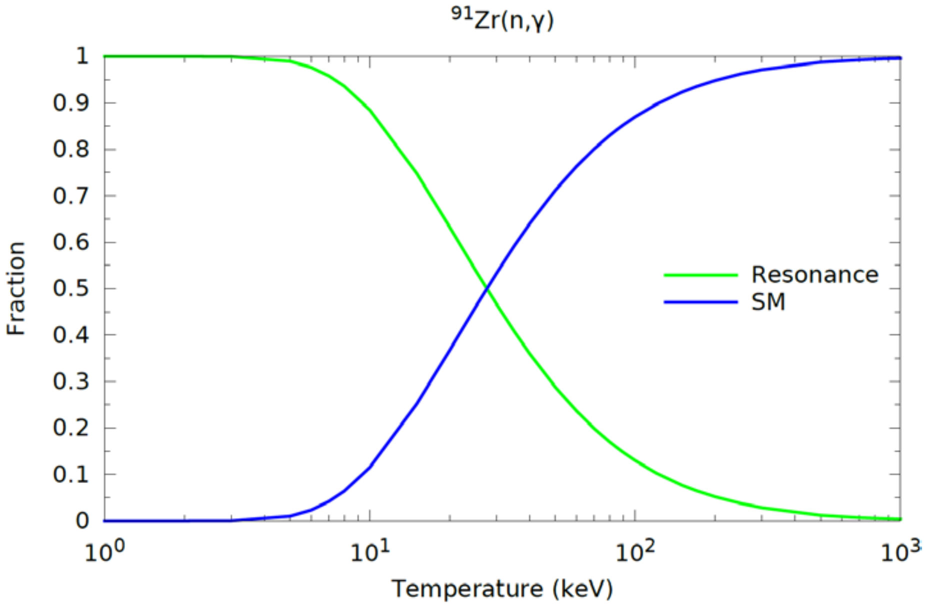
マックスウェル平均断面積

JENDL-4.0 (2010)
- Neutron induced reaction cross section
- $E_n = 10^{-5}$ eV to 20MeV



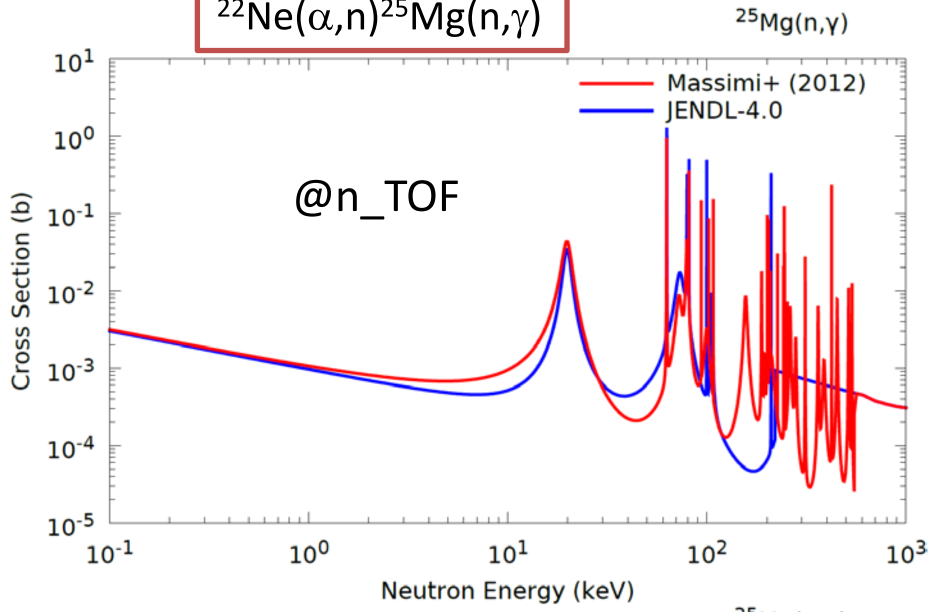
分離共鳴の上限
→ 上限以下では共鳴の欠損は
少ないと仮定

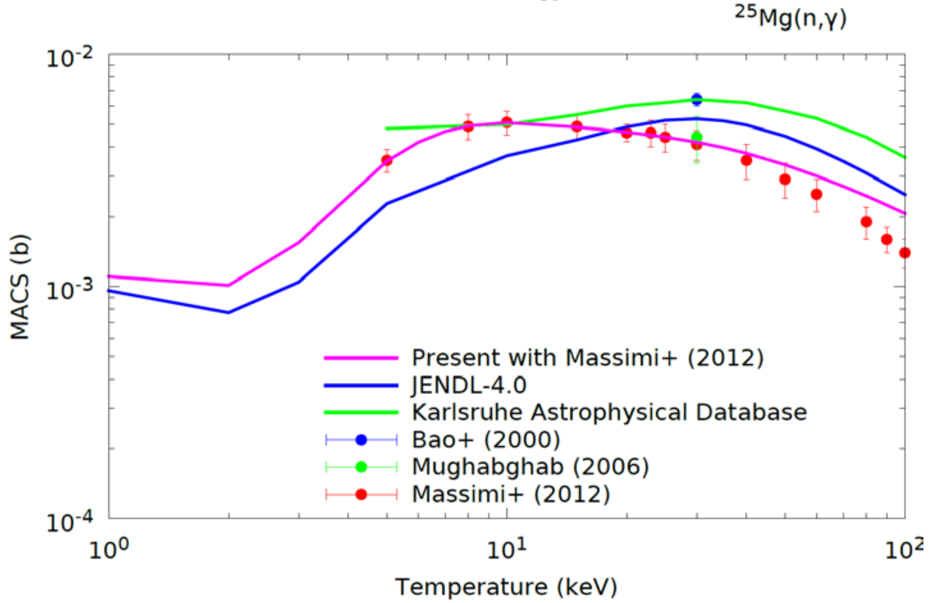


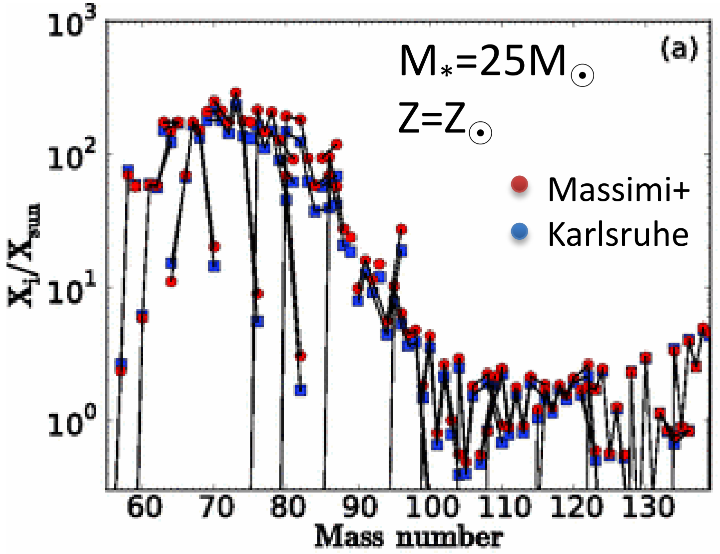


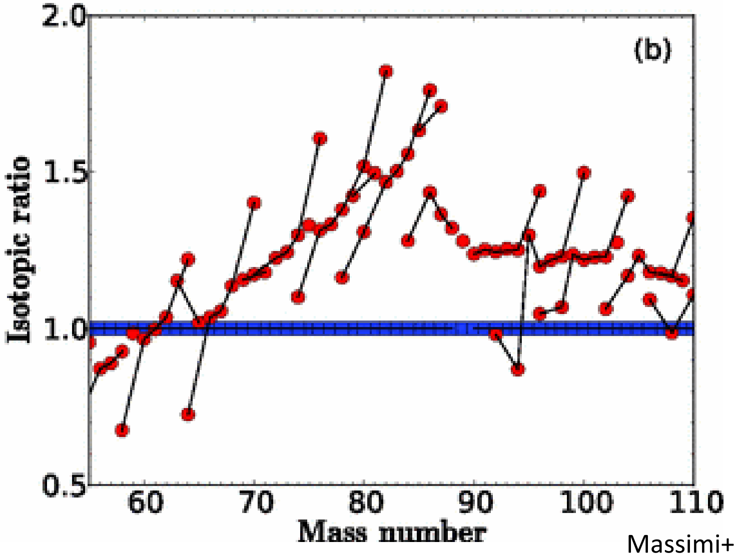
Neutron poison

$^{22}Ne(\alpha,n)^{25}Mg(n,\gamma)$



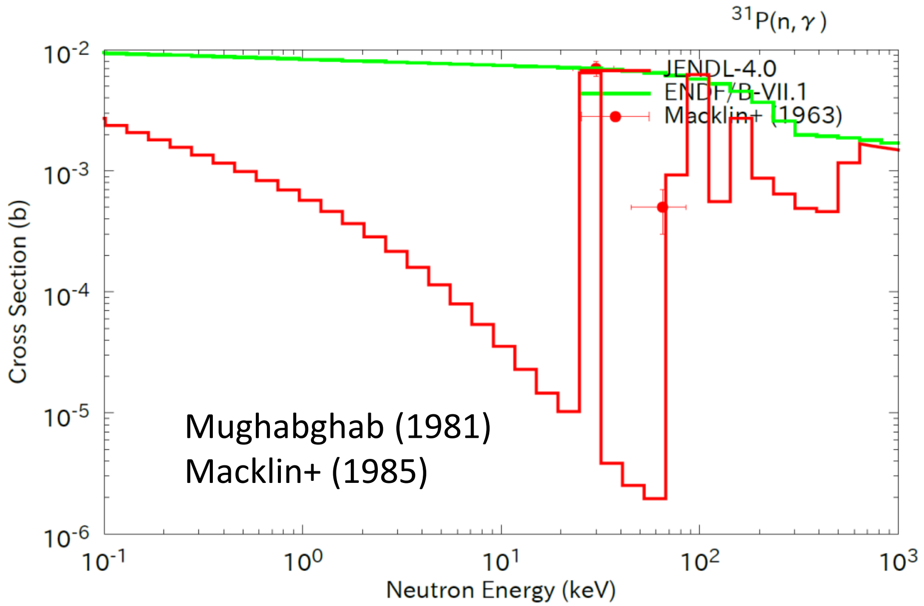


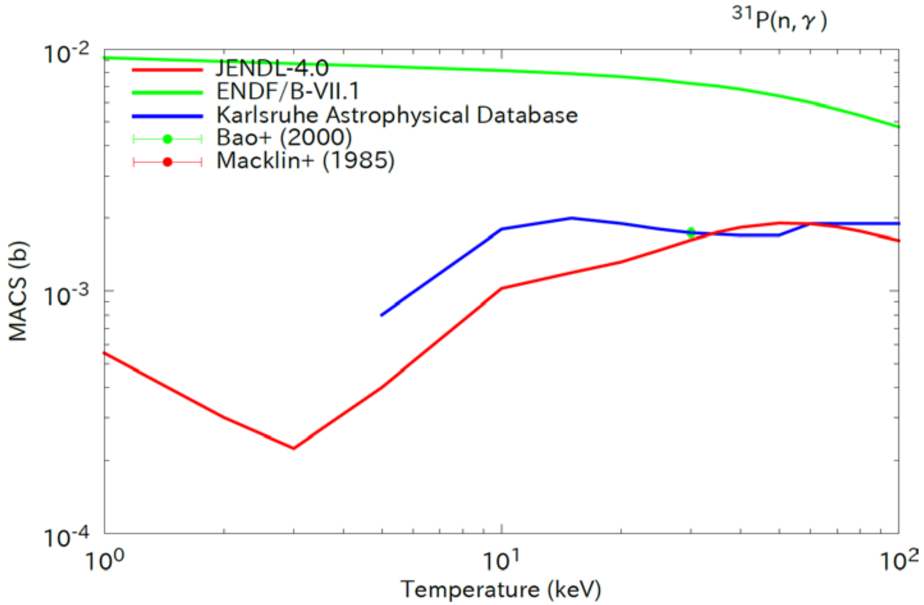


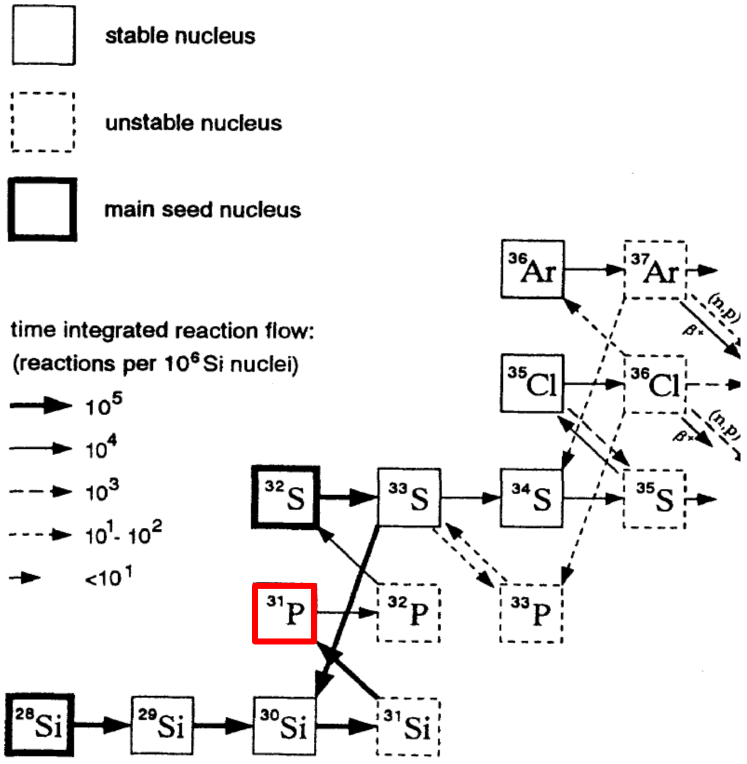


Massimi+ (2012)

^{31}Pの中性子捕獲断面積







s-process経路上のブランチとなる
不安定核の断面積が重要

- ^{63}Ni (半減期 101年) @n_TOF (n,γ)
- ^{85}Kr (半減期10.8年) @TUNL (γ,n)

.....

s-process 環境の理解を促進

(n,α)&(n,p) 反応断面積

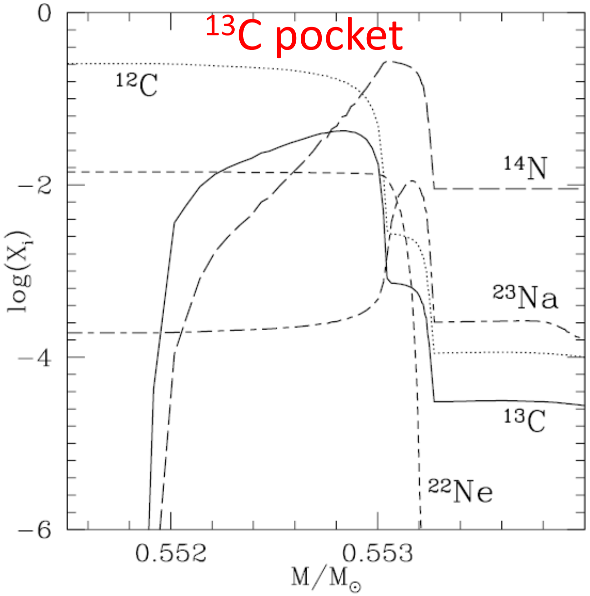
Heavy nuclides

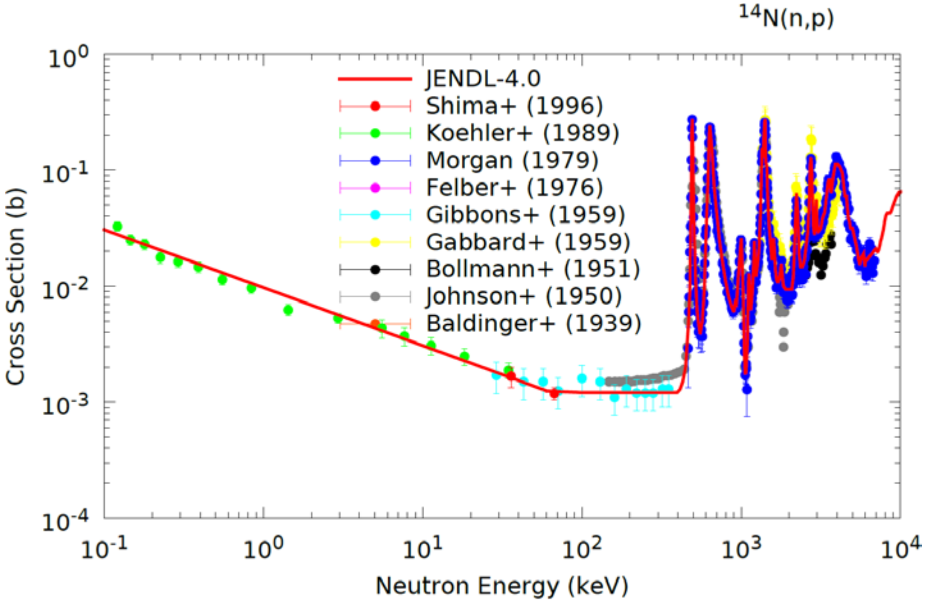
$^{13}C(\alpha,n)^{16}O$

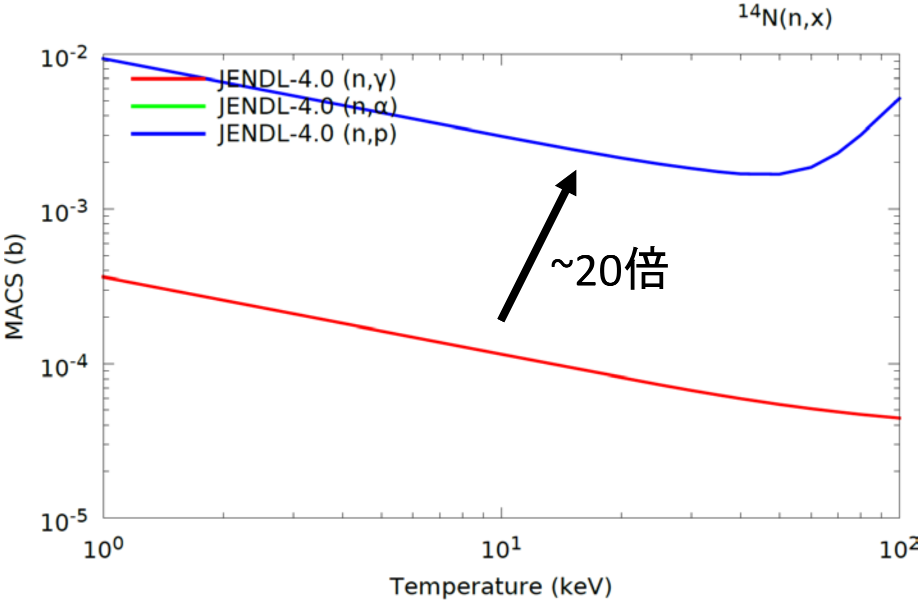
$^{14}N(n,p)^{14}C$

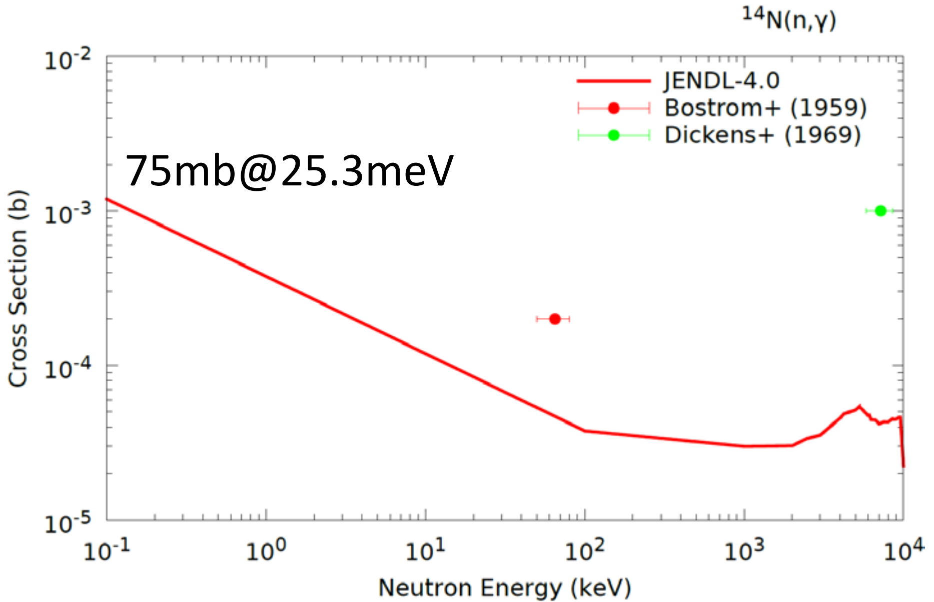
$^{14}N(n,\gamma)^{15}N$?

$^{22}Ne(n,\gamma)^{23}Ne$?





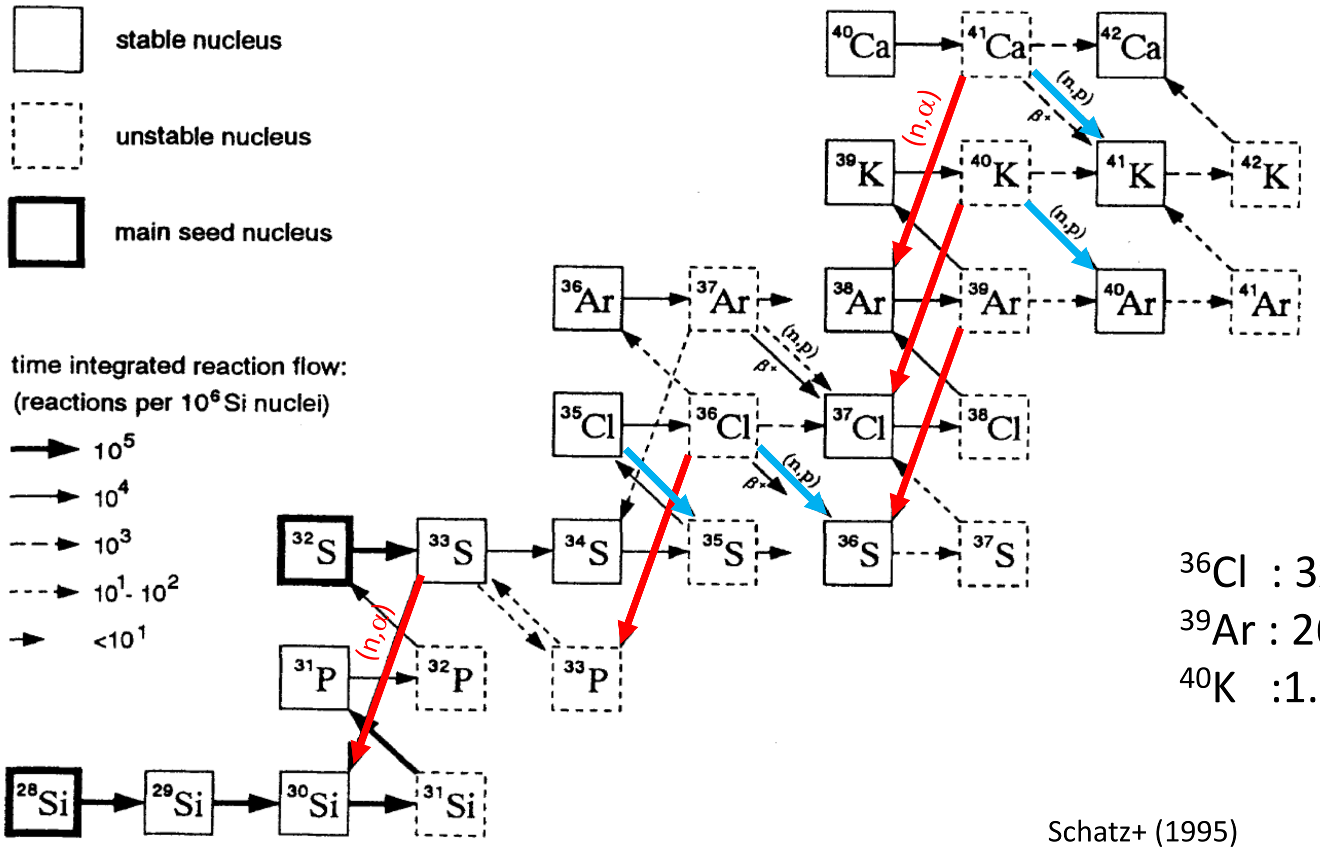




(n,α)&(n,p) 反応断面積

金属欠乏星でのs-processに影響
→ 鉄族元素が少ない(ない)
CNO-Ne種核→ 重元素合成

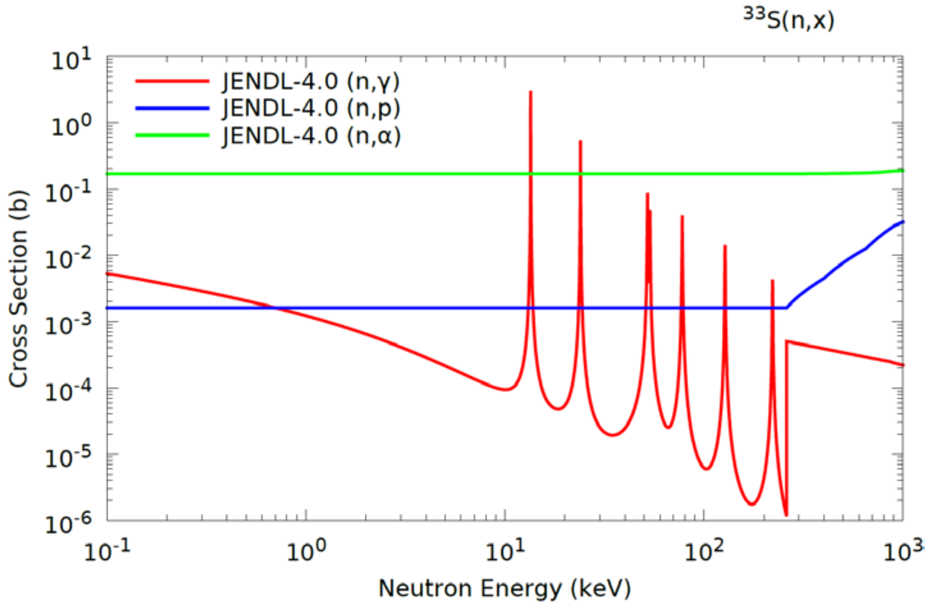
中性子捕獲による重元素合成を遅延させる
→(n,α)反応の場合にはbottleneckとして作用
→中性子消費 (poison)

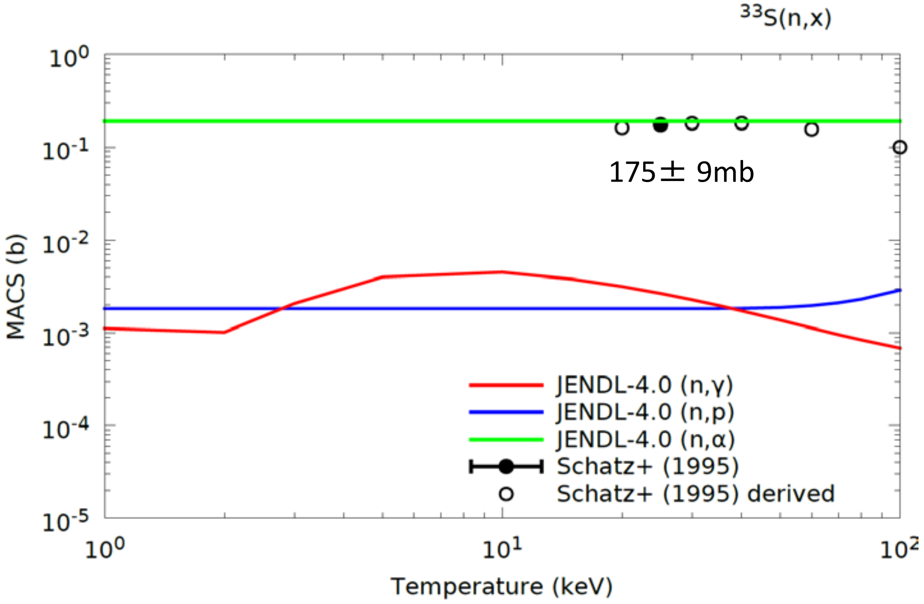


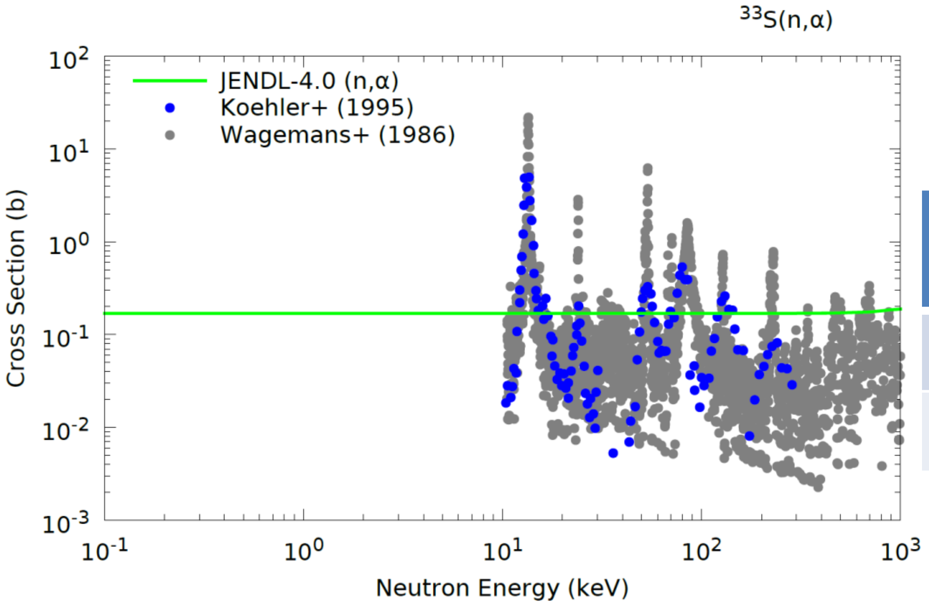
^{36}Cl : 3x10^5 yr
^{39}Ar : 269 yr
^{40}K :1.3x10^9 yr

Schatz+ (1995)

^{33}Sの中性子誘起反応断面積





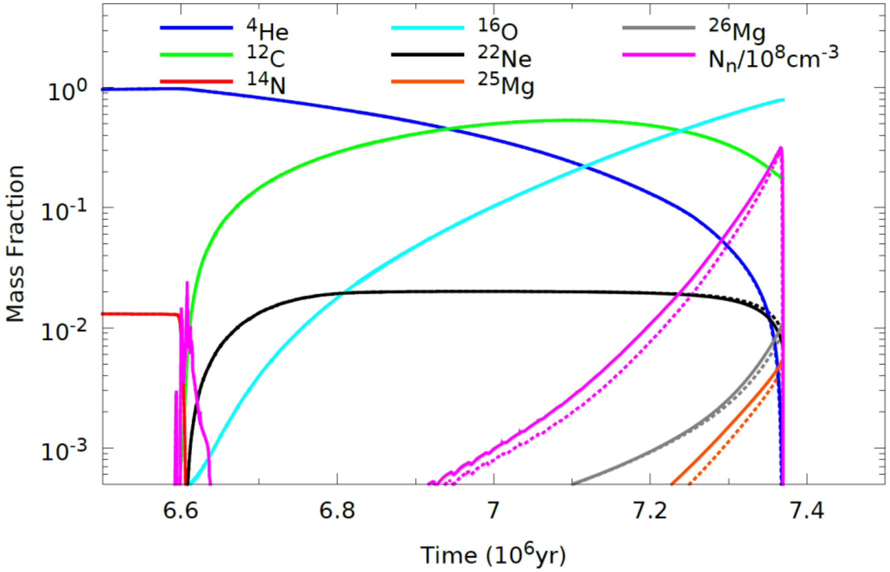


CS@25.3meV	(n,γ) [mb]	(n,p) [mb]	(n,α) [mb]
JENDL-4.0	350	1.6	171
Mughabghab ('06)	454±25	2±1	115±10

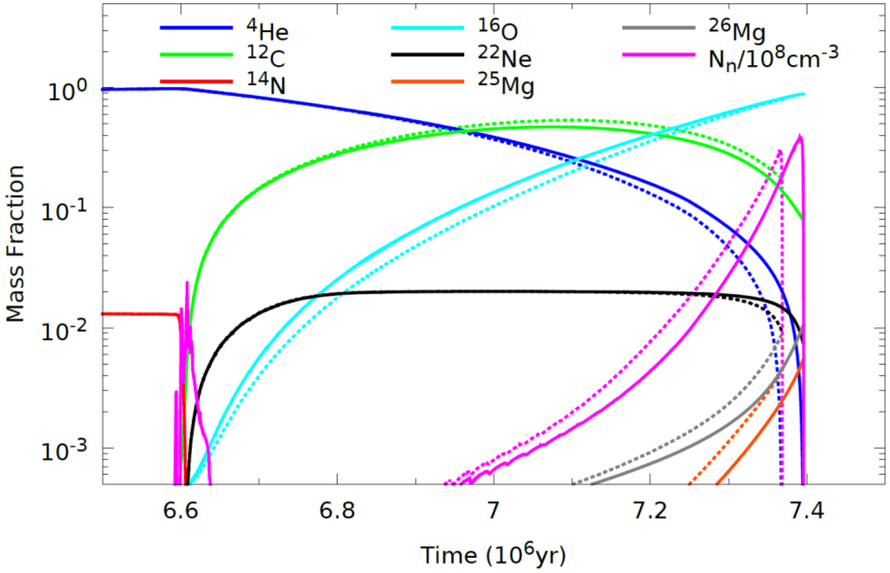
$^{12}\mathrm{C}(\alpha,\gamma)^{16}\mathrm{O}$ & $^{22}\mathrm{Ne}(\alpha,n)^{25}\mathrm{Mg}$反応断面積

大質量星の中心ヘリウム燃焼の
最終段階で寄与
→ $^{12}\mathrm{C}$と$^{22}\mathrm{Ne}$の間でα捕獲が競合

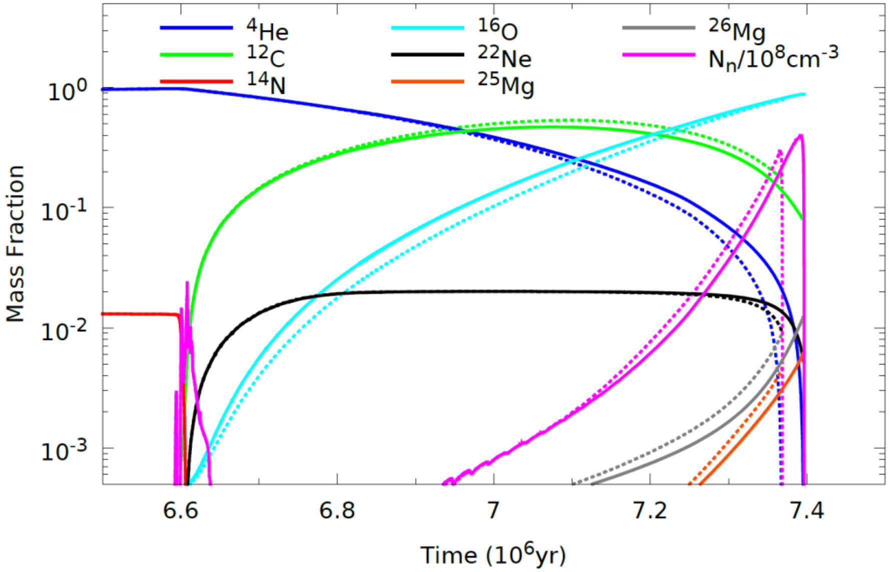
Solid lines : $^{22}\mathrm{Ne}(\alpha,n)^{25}\mathrm{Mg}$ ×1.5



Solid lines : $^{12}\mathrm{C}(\alpha,\gamma)^{16}\mathrm{O}$ ×1.5



Solid lines : $^{12}\mathrm{C}(\alpha,\gamma)^{16}\mathrm{O}$ ×1.5, $^{22}\mathrm{Ne}(\alpha,n)^{25}\mathrm{Mg}$ ×1.5



$^{12}\mathrm{C}(\alpha,\gamma)^{16}\mathrm{O}$反応断面積
➔中心ヘリウム燃焼以降の進化に強く影響

さいごに

s-processの経路を理解するために…

- 捕獲断面積の精度として 1-2 % が望まれる
  - 現状としては ~10 % 以上の誤差
    （＋測定データ間の不一致）
  - 共鳴領域の拡充、keV領域の精度向上
- Bottleneck
  - 中性子魔法 (N=50,82,126)核の断面積データ
  - (n,α) 反応断面積 (特にZ < 30)
- Neutron poison
  - ^{25}Mg(n,γ) : 重元素による中性子捕獲を阻害する核種
  - (n,p) 反応断面積 (特にZ < 30)