



中国科学院国家天文台
NATIONAL ASTRONOMICAL OBSERVATORIES, CAS

恒星演化过程中的毒药及圣杯

---基于CEPC装置的一点考虑

何建军

核天体物理研究团组/光学天文部

中国科学院国家天文台

中国科学院近代物理研究所



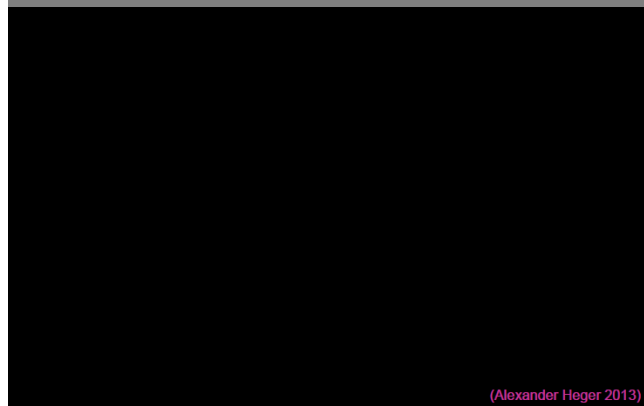
报告提纲

- 研究背景
- 中子毒药
- 圣杯反应

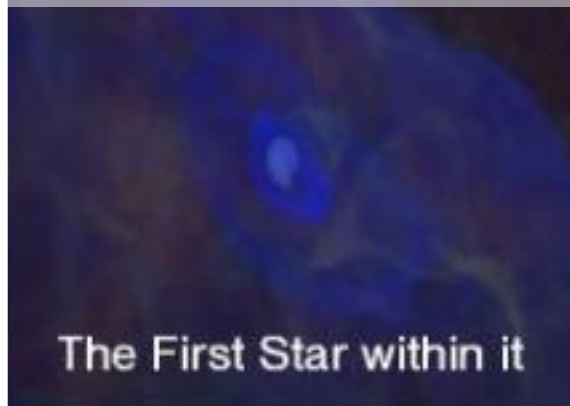
宇宙中的元素起源

The Cosmic Dark Age

宇宙大爆炸3分钟之后



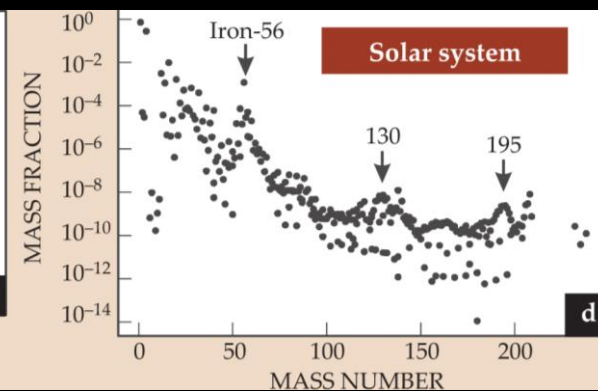
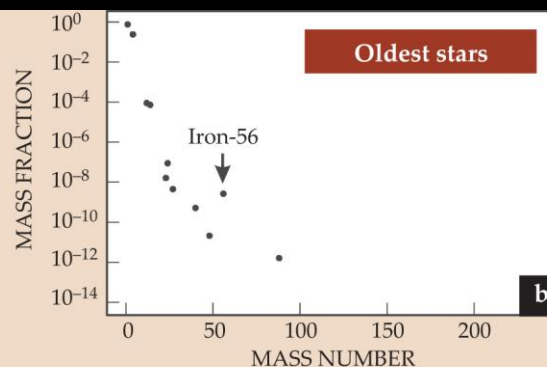
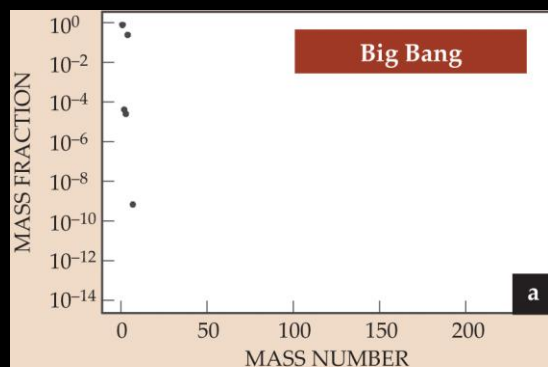
4亿年之后



138亿年之后 (现在)



时间

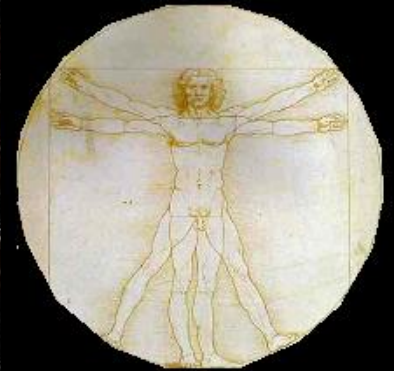


我们都来自于星际尘埃（萨根）

We are made of star stuff.

世界上有两件事情使我深深地震撼：
一是我们头顶灿烂的星空；一是我
们内心崇高的道德法则。

——康德

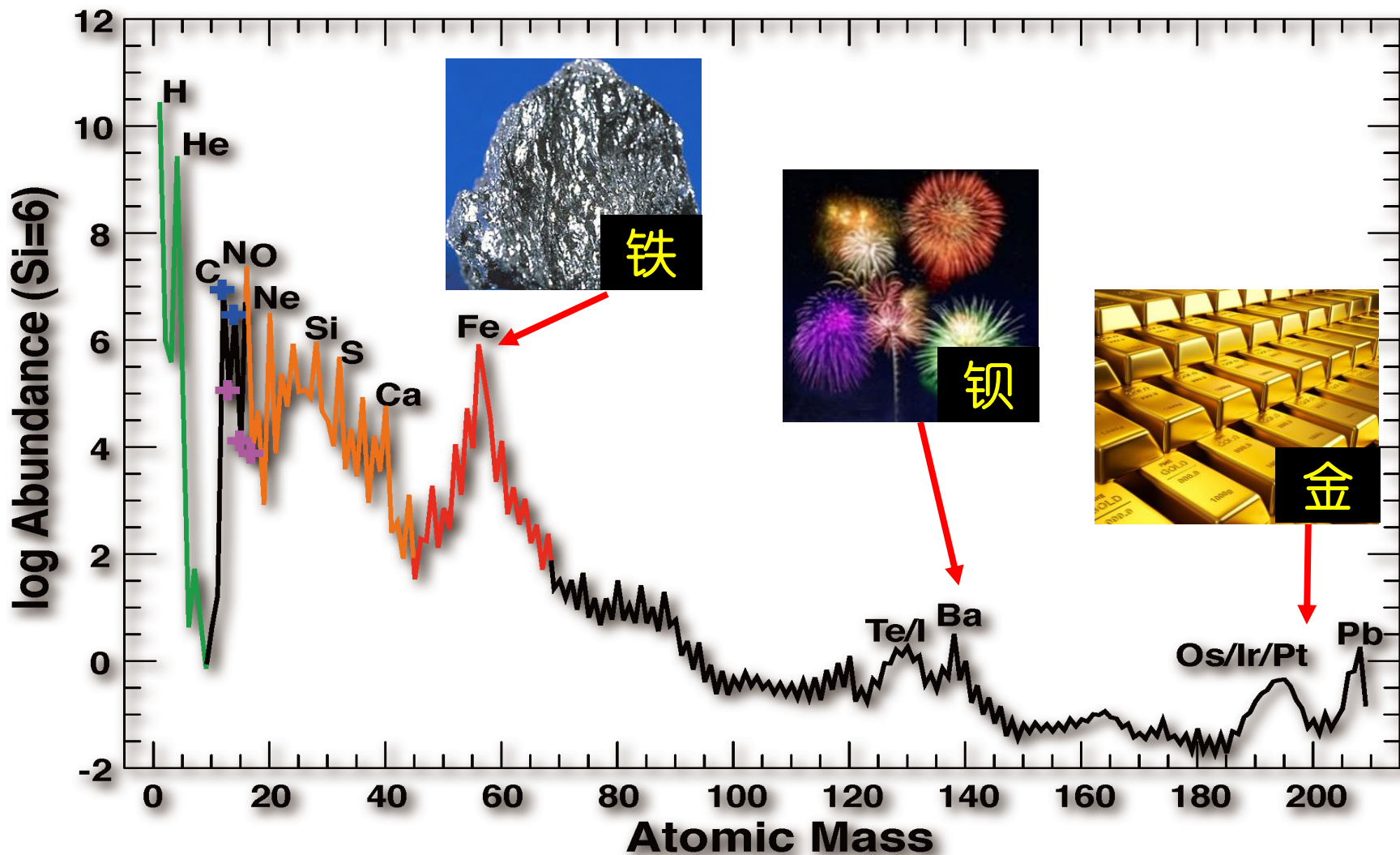


Each heavy atom in our body was
build and processed through
~100-1000 star generations since
the initial Big Bang event!



太阳系元素丰度

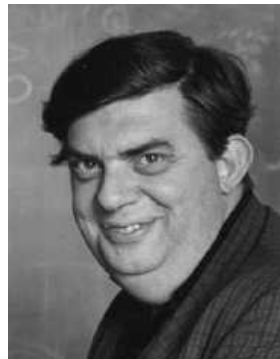
宇宙中重元素是如何产生的？



恒星中元素的合成



Margaret Burbidge



Geoff Burbidge



William Fowler



Fred Hoyle

REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

Synthesis of the Elements in Stars*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,
California Institute of Technology, Pasadena, California*

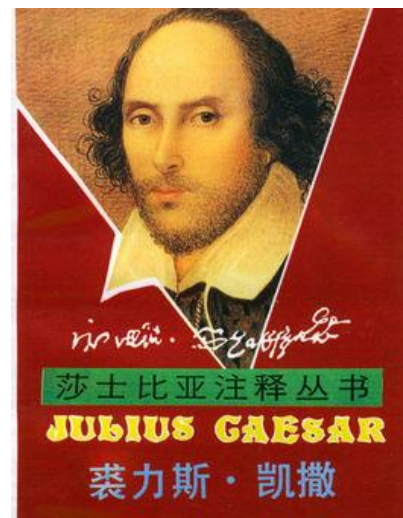
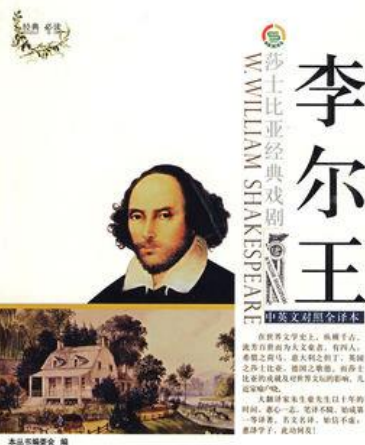
“It is the stars, The stars above us, govern our conditions”;

《李尔王》(King Lear, Act IV, Scene 3)

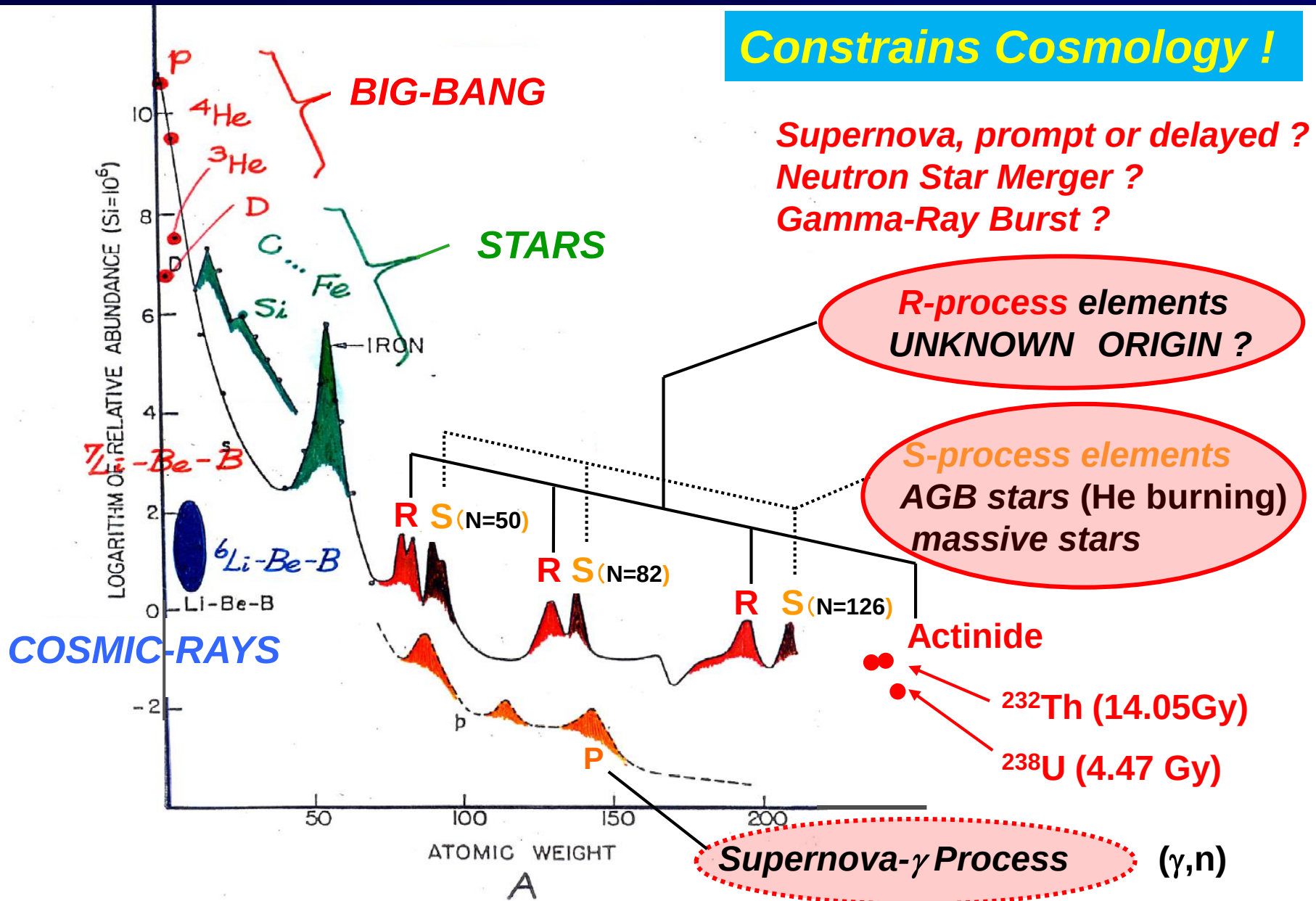
but perhaps

“The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,”

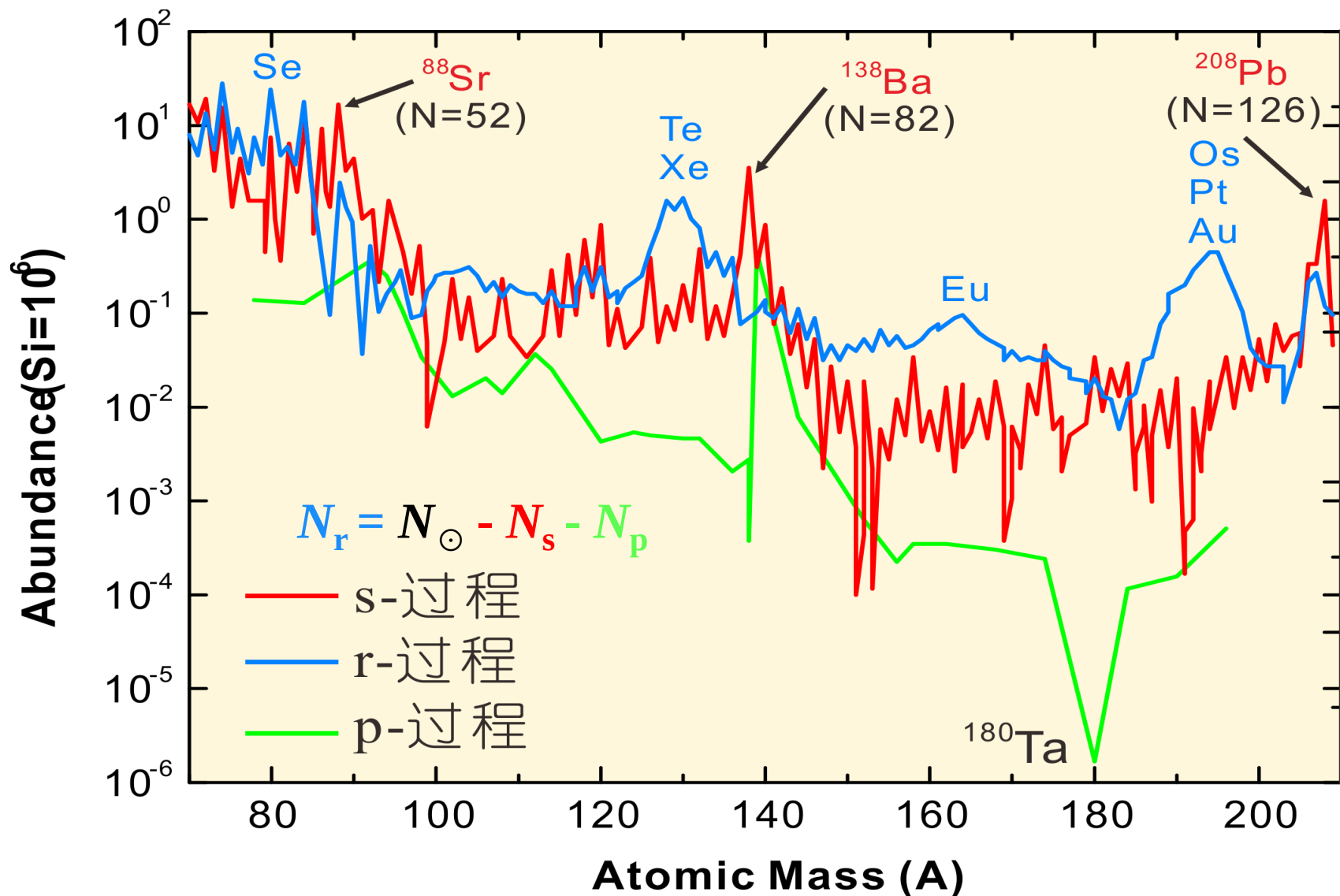
《裘力斯·凯撒》(Julius Caesar, Act I, Scene 2)



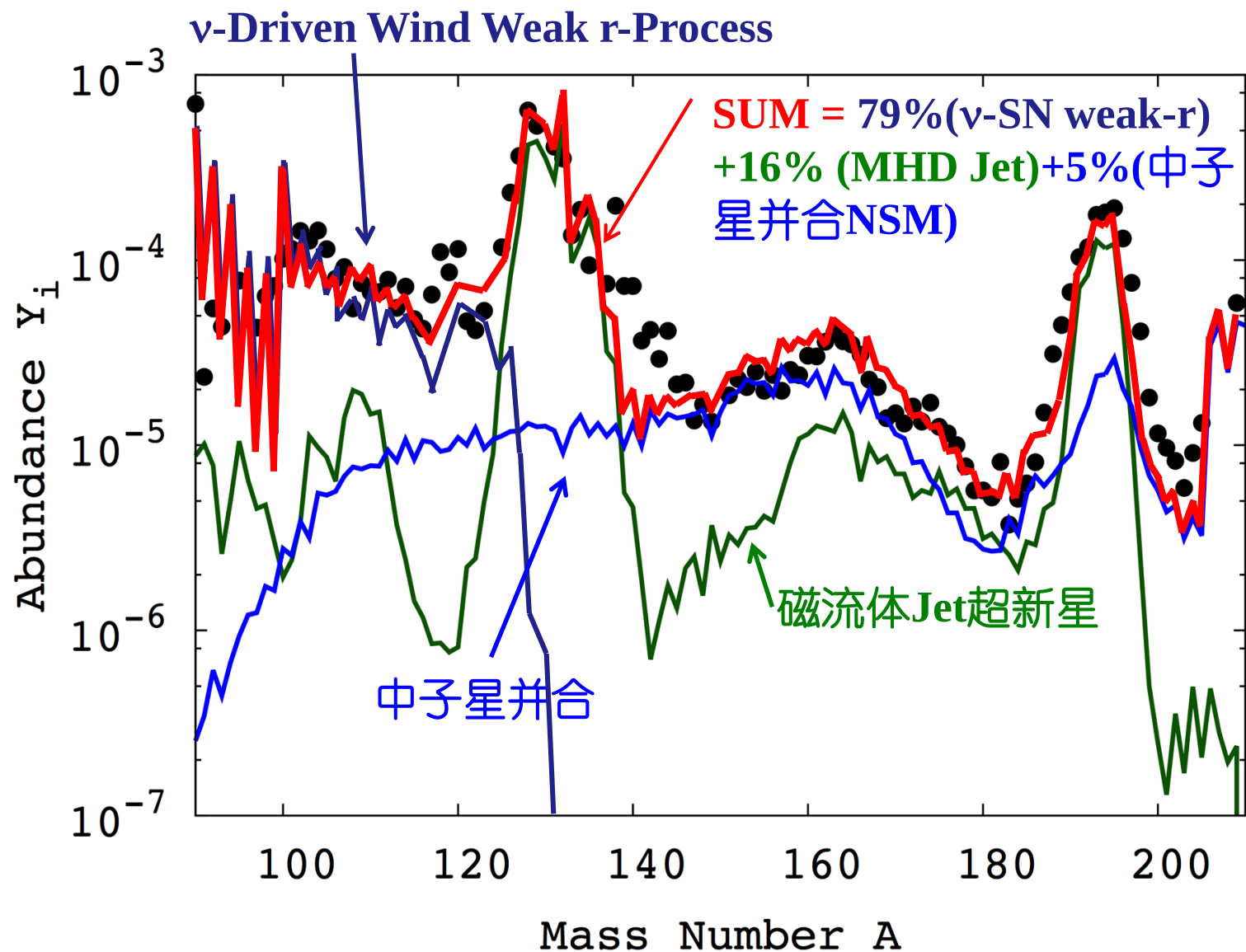
太阳系元素丰度及起源



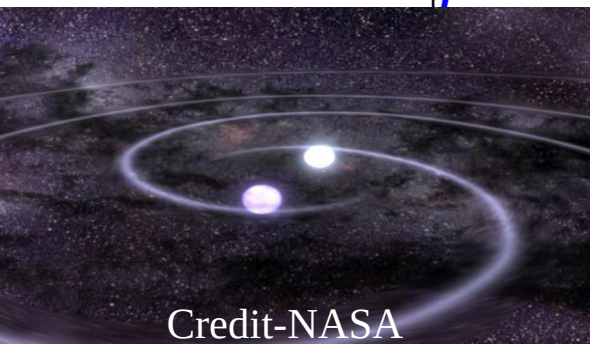
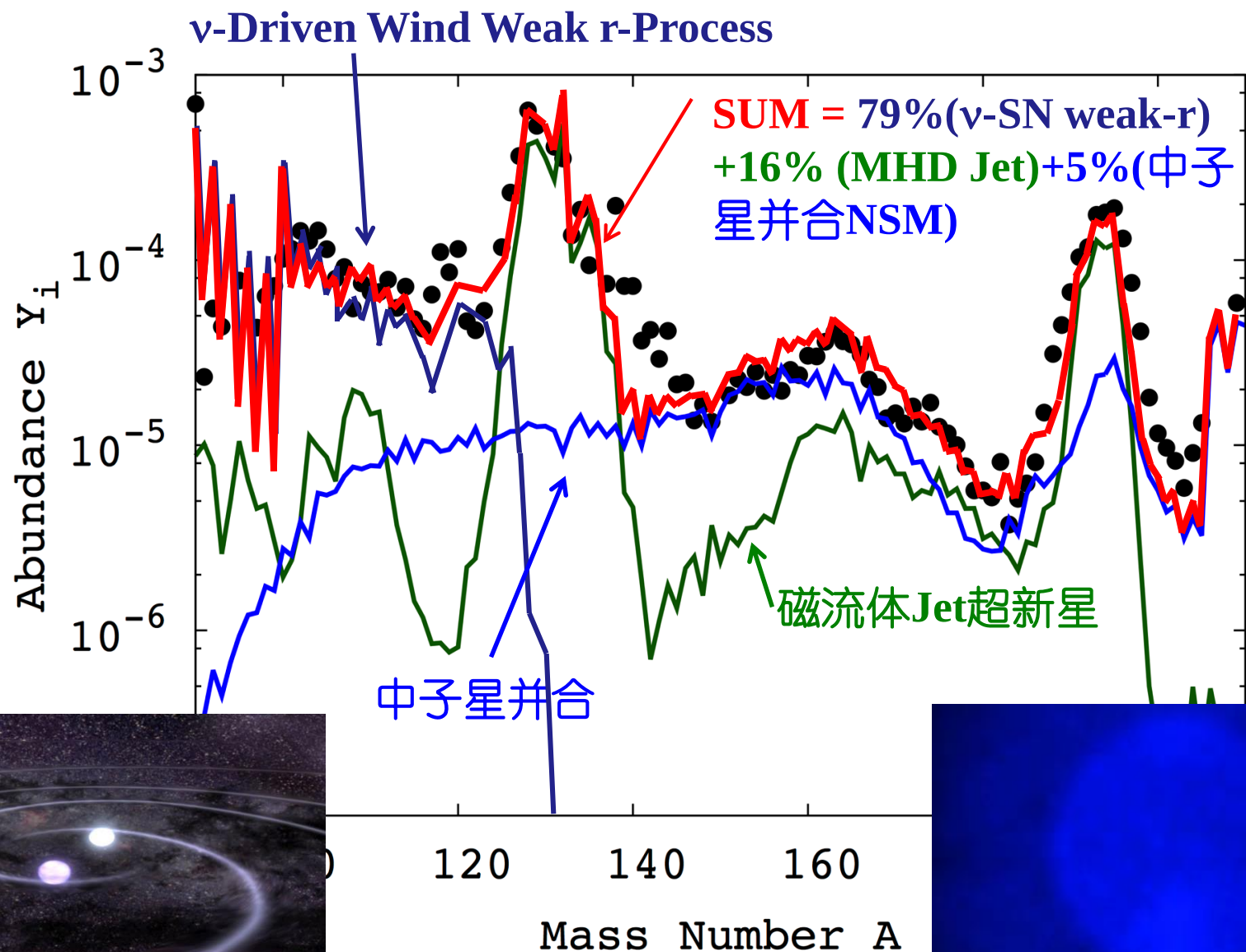
超铁重元素丰度及起源



重现太阳r元素丰度的处方



重现太阳r元素丰度的处方

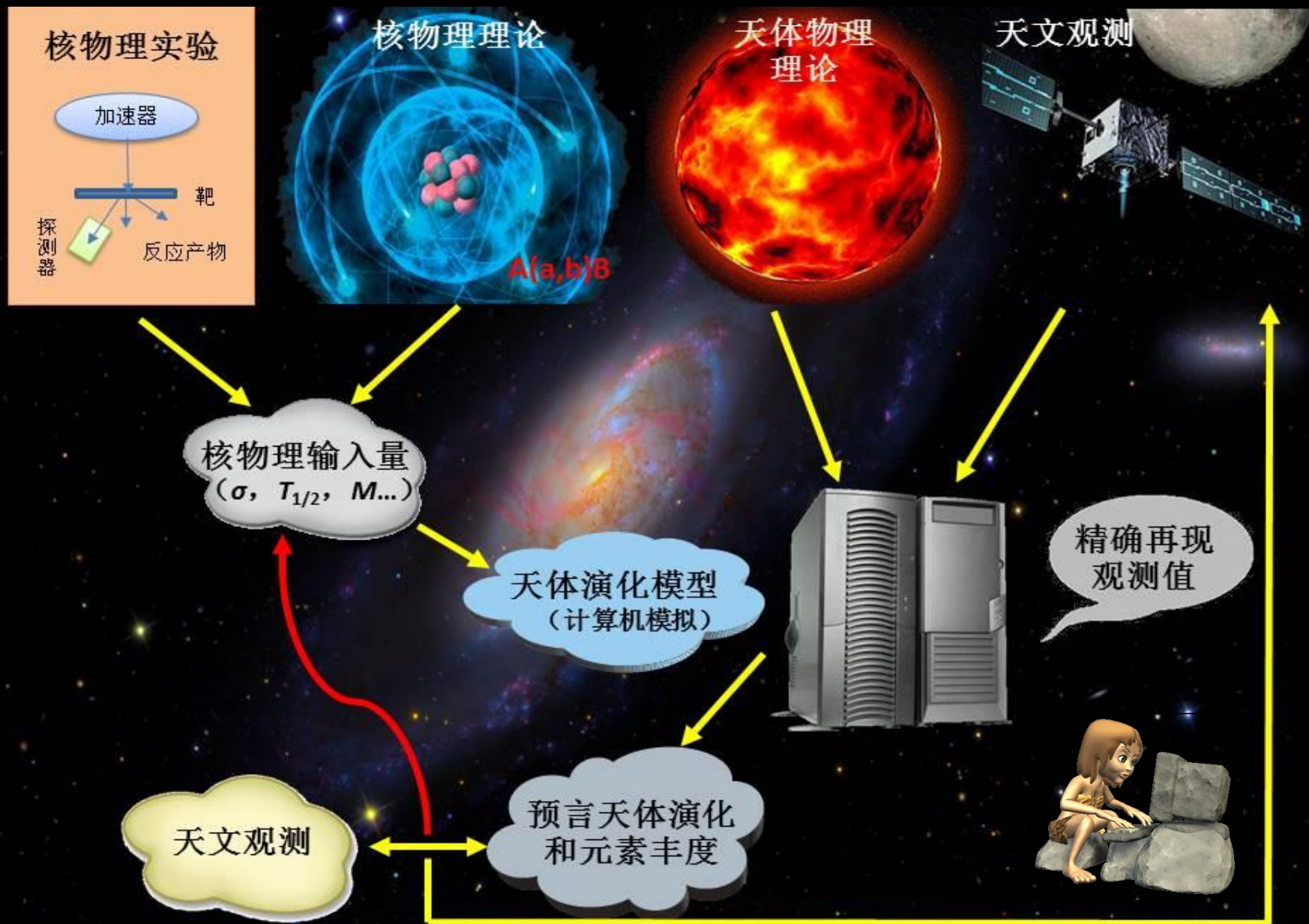


Credit-NASA

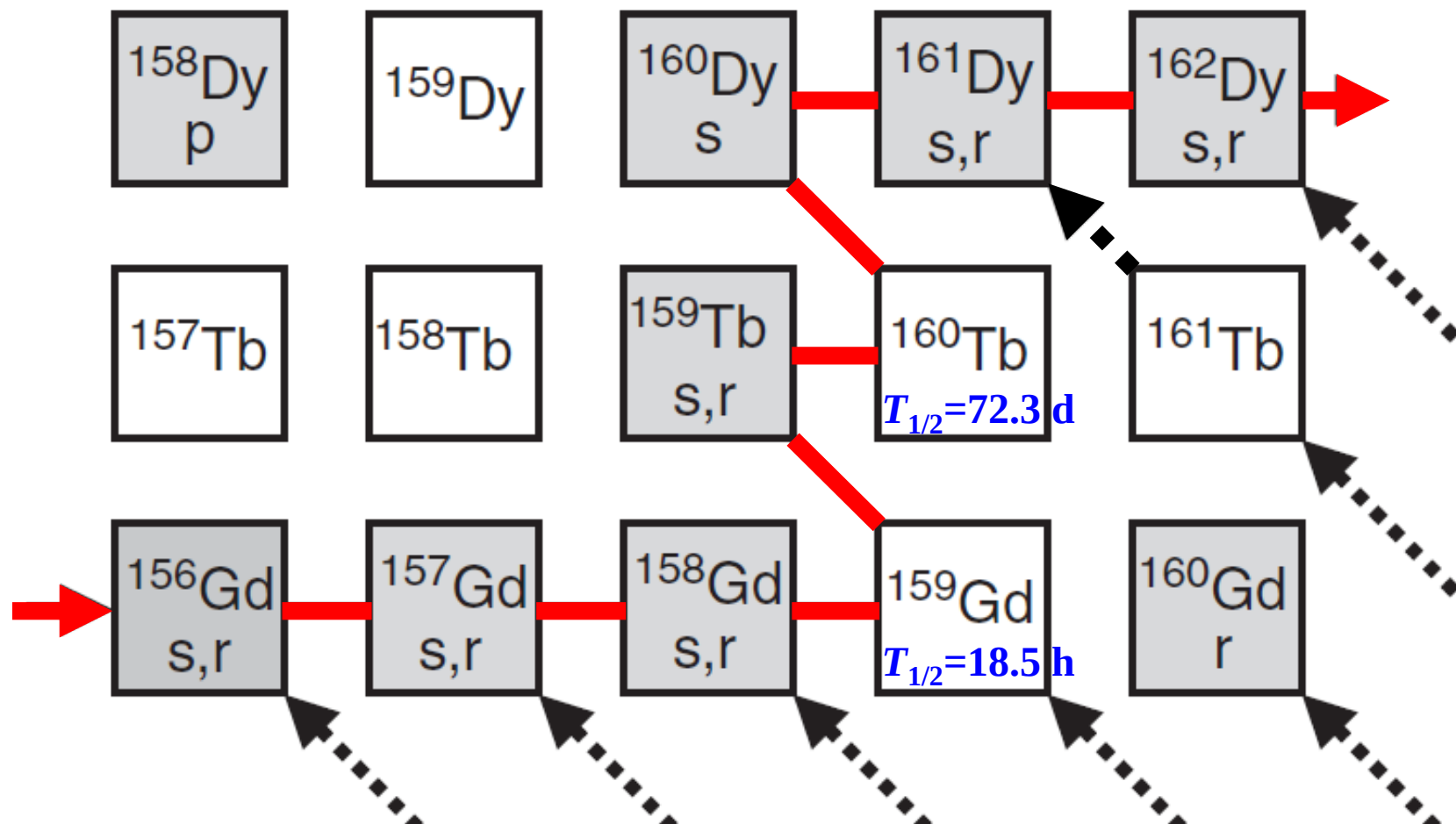


Takiwaki+, ApJ 786 (2014) 83

核天体物理



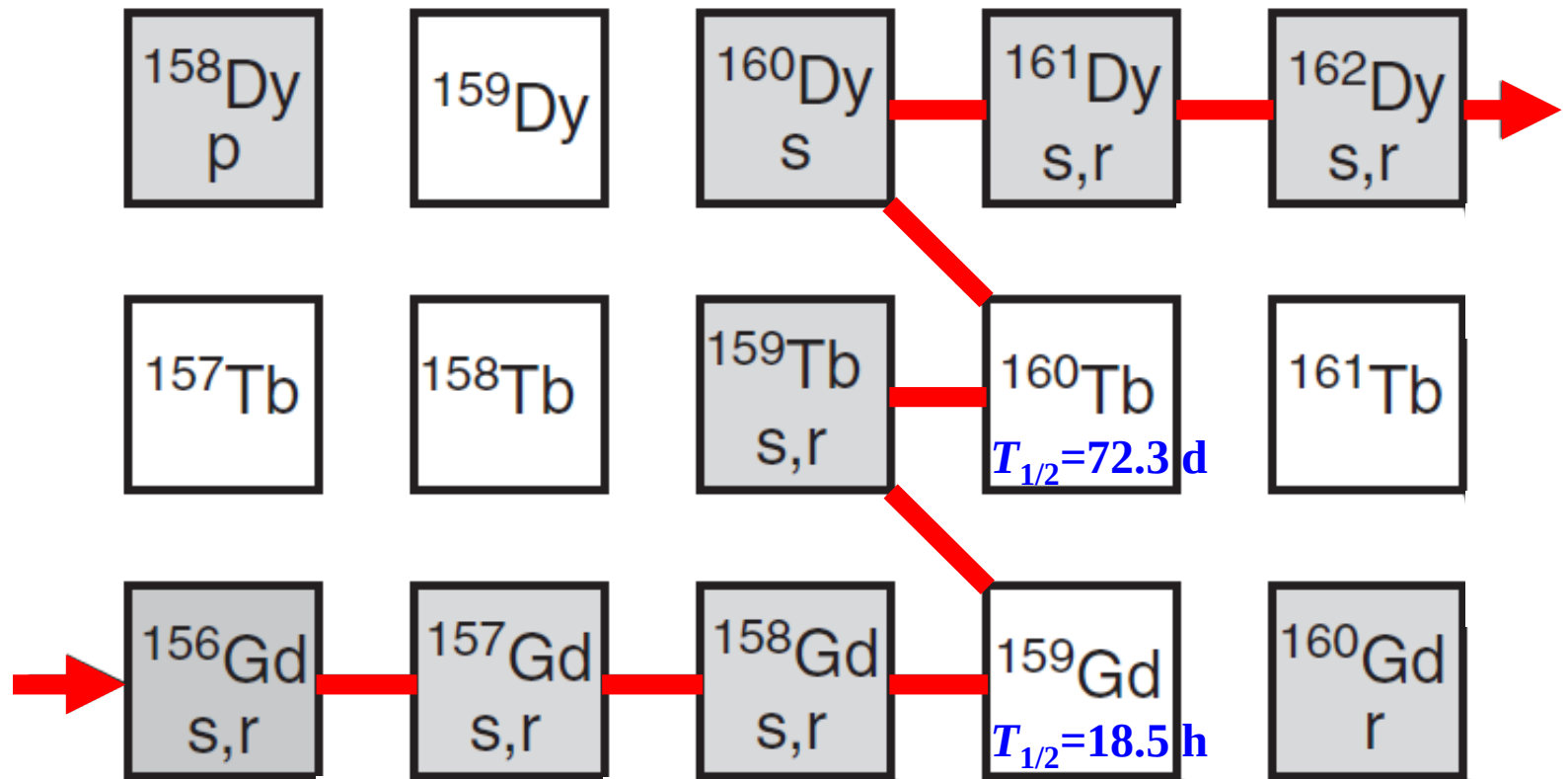
中子俘获过程



→ **s-process path** ($\lambda_\beta \gg \lambda_{n\gamma}$) → **r-process induced** ($\lambda_\beta \ll \lambda_{n\gamma}$)

慢中子俘获s过程

s(low neutron capture)-process, s-process

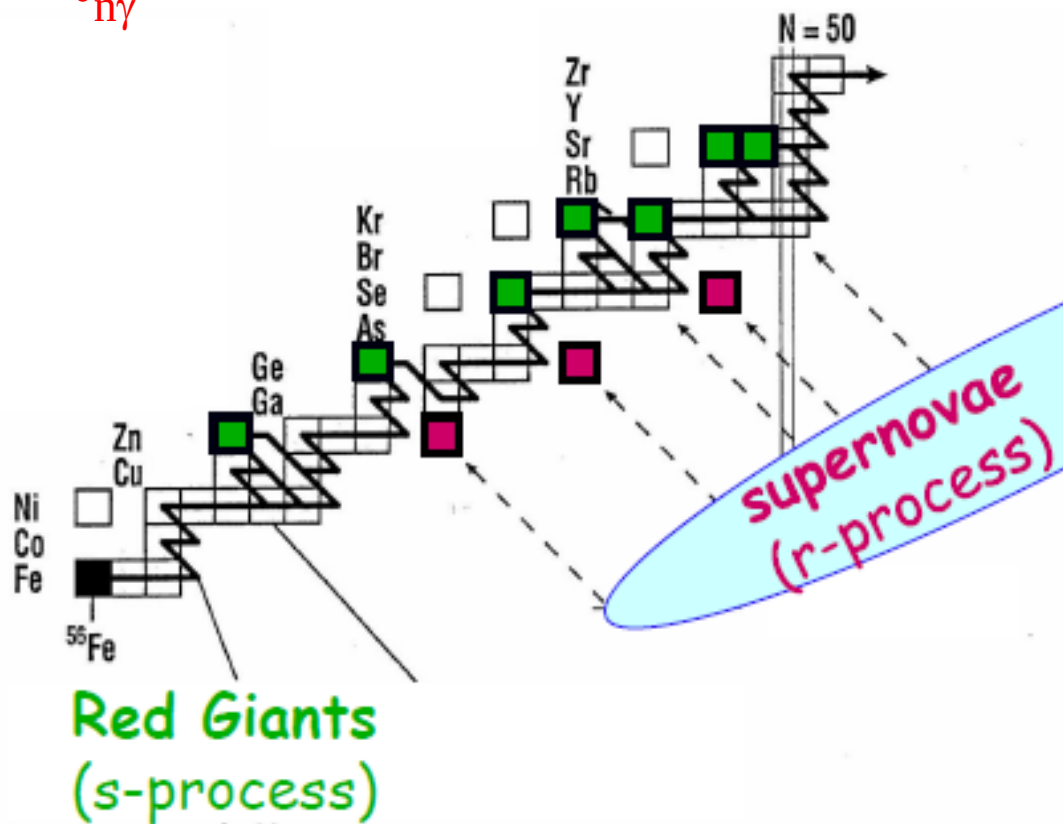


稳定同位素链连续俘获中子，一直到达一个放射性同位素，随后发生 β -衰变 ($\lambda_\beta \gg \lambda_{n\gamma}$)，然后启动另一个连续的中子俘获链。这种机制被称之为慢中子俘获过程，简称s过程。

慢中子俘获s过程

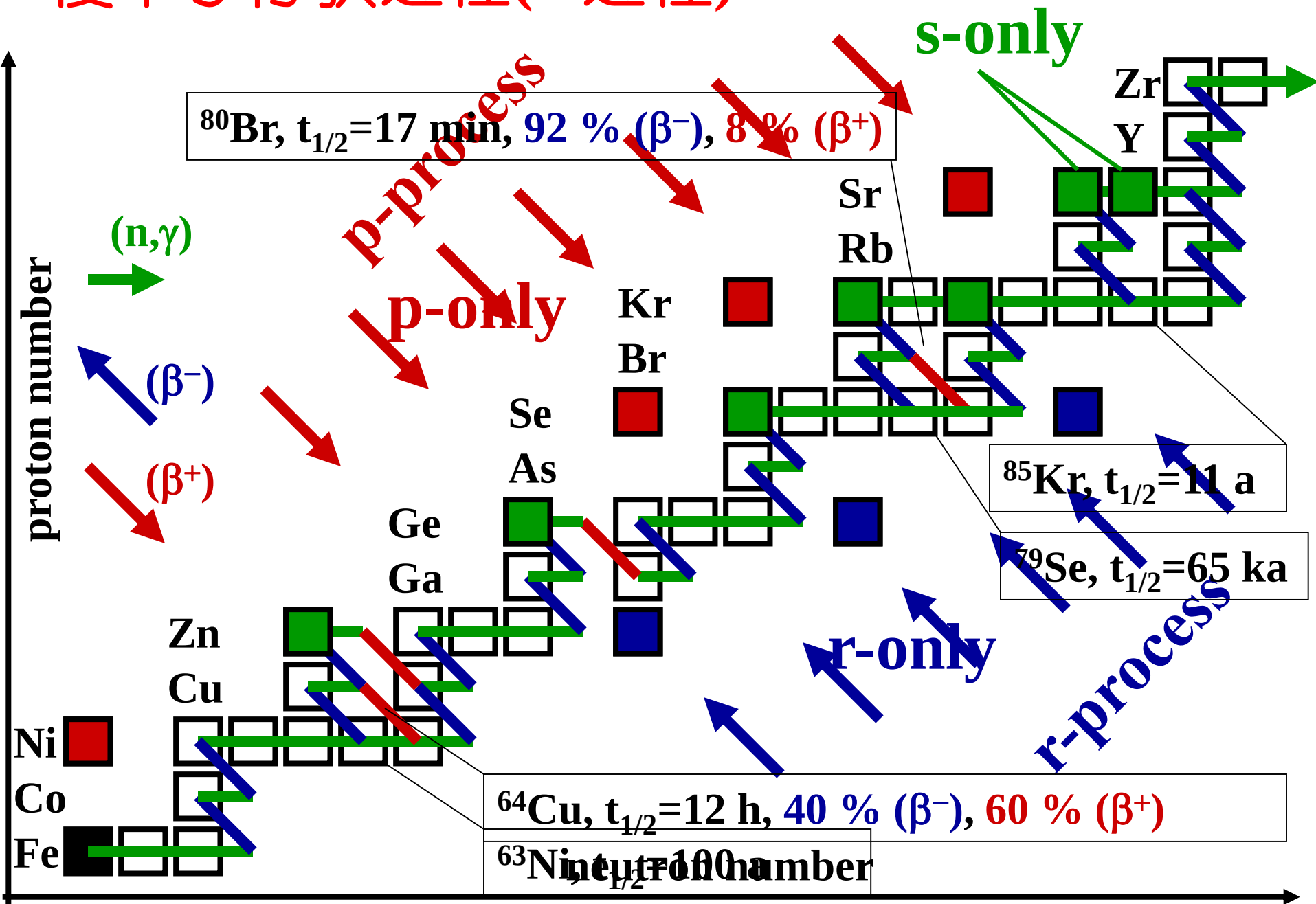
在AGB星的He燃烧壳层内或红巨星核心，自由中子的浓度较低： $N_n \sim (10^6 - 10^8) \text{ cm}^{-3}$ ，原子核俘获中子的速率很慢，即相应的时标相当长， $\tau_{n\gamma} \sim (10 \sim 10^3)$ 年，因此有： $\tau_\beta \ll \tau_{n\gamma}$

一般从种子核 ^{56}Fe 开始，不断地俘获中子，转变为它的较重同位素，称为(n, γ)过程。一旦某个原子核吸收中子太多而变为不稳定核时，它就很快地发生 β -衰变。

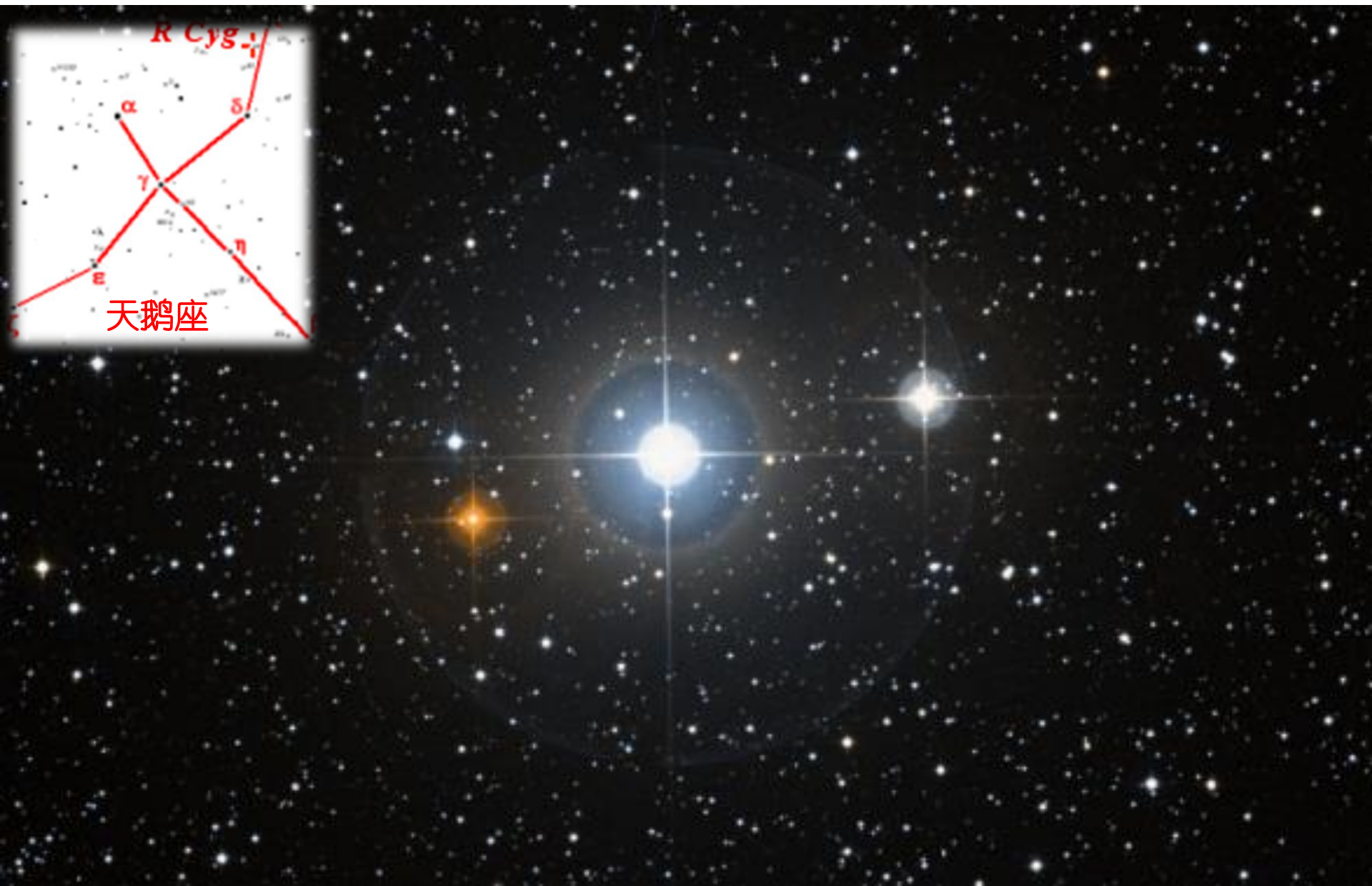
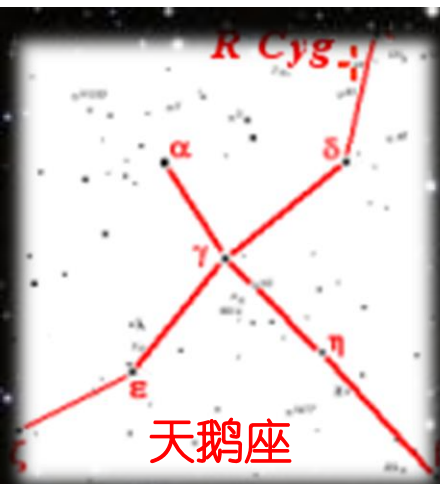


慢中子俘获过程(s-过程)

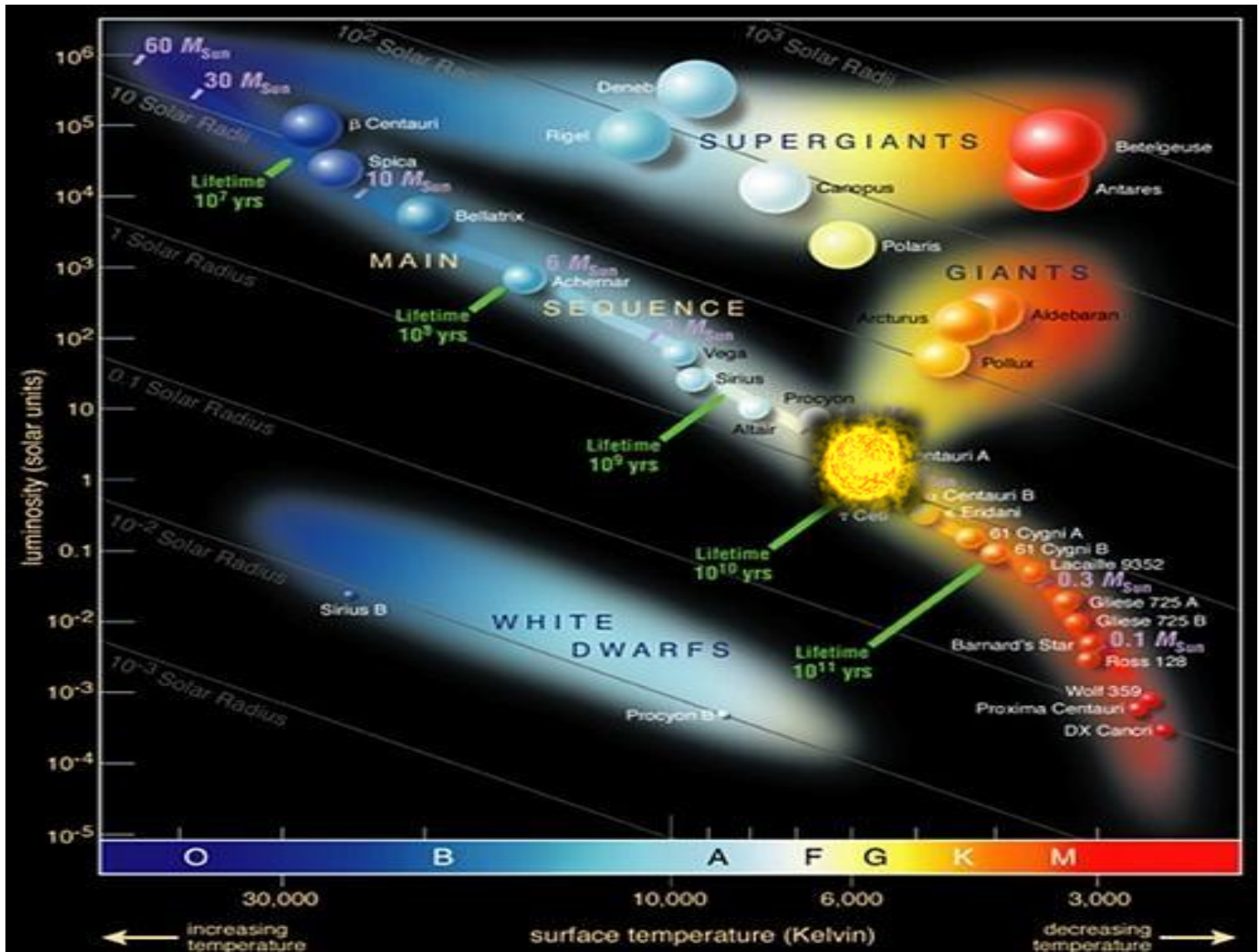
Credit to Reifarth



AGB星：s过程的主要场所

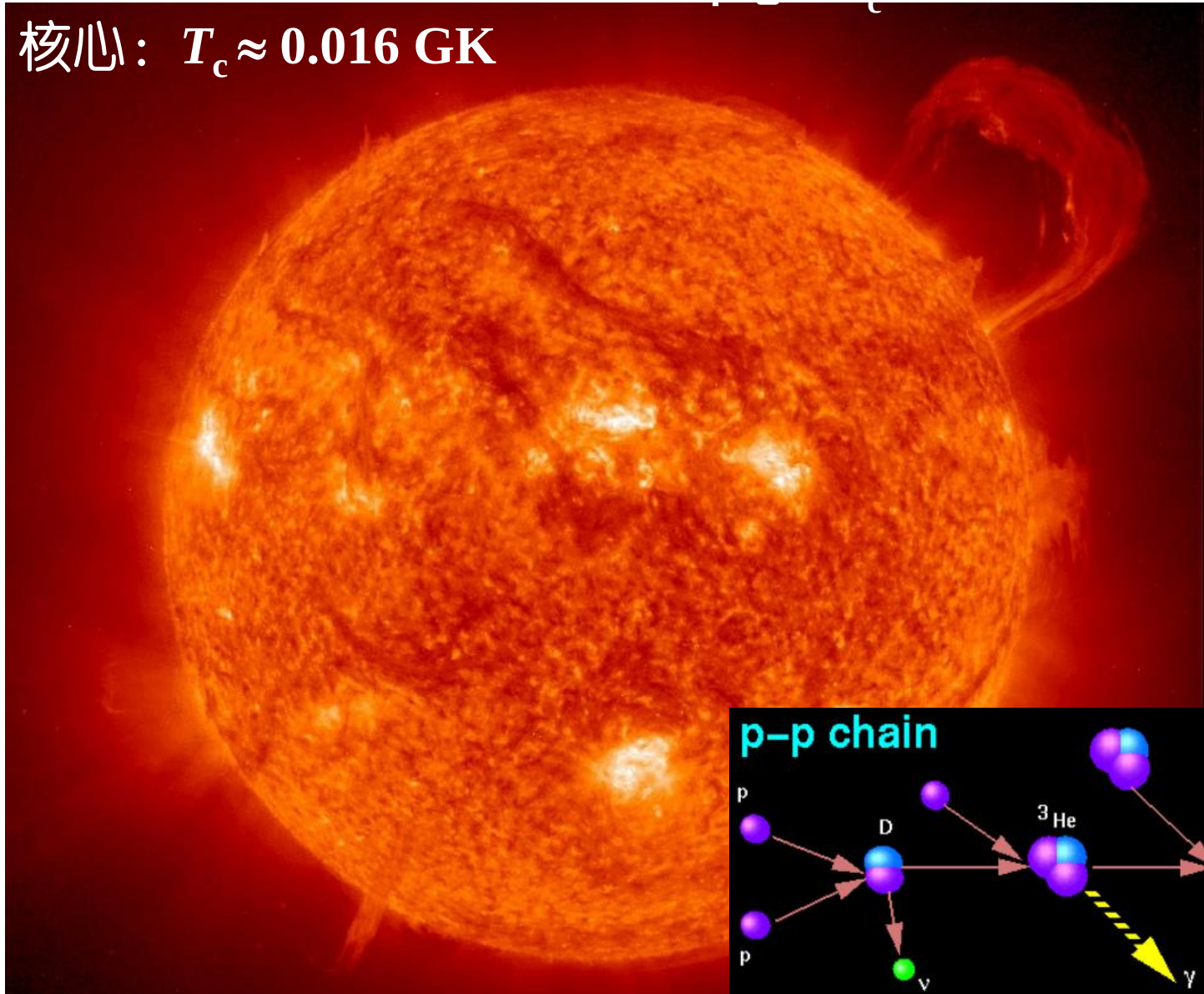


赫罗图(H-R diagram)

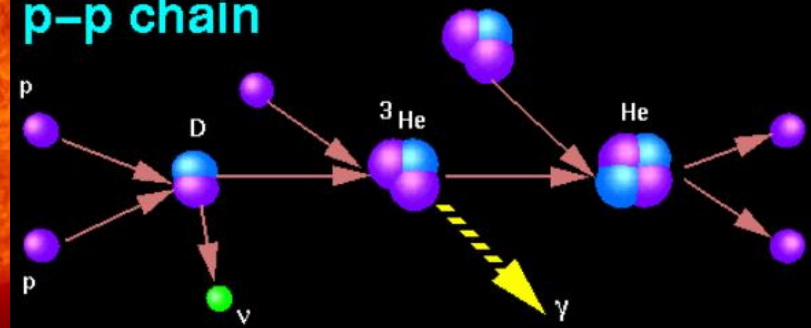


今天的太阳

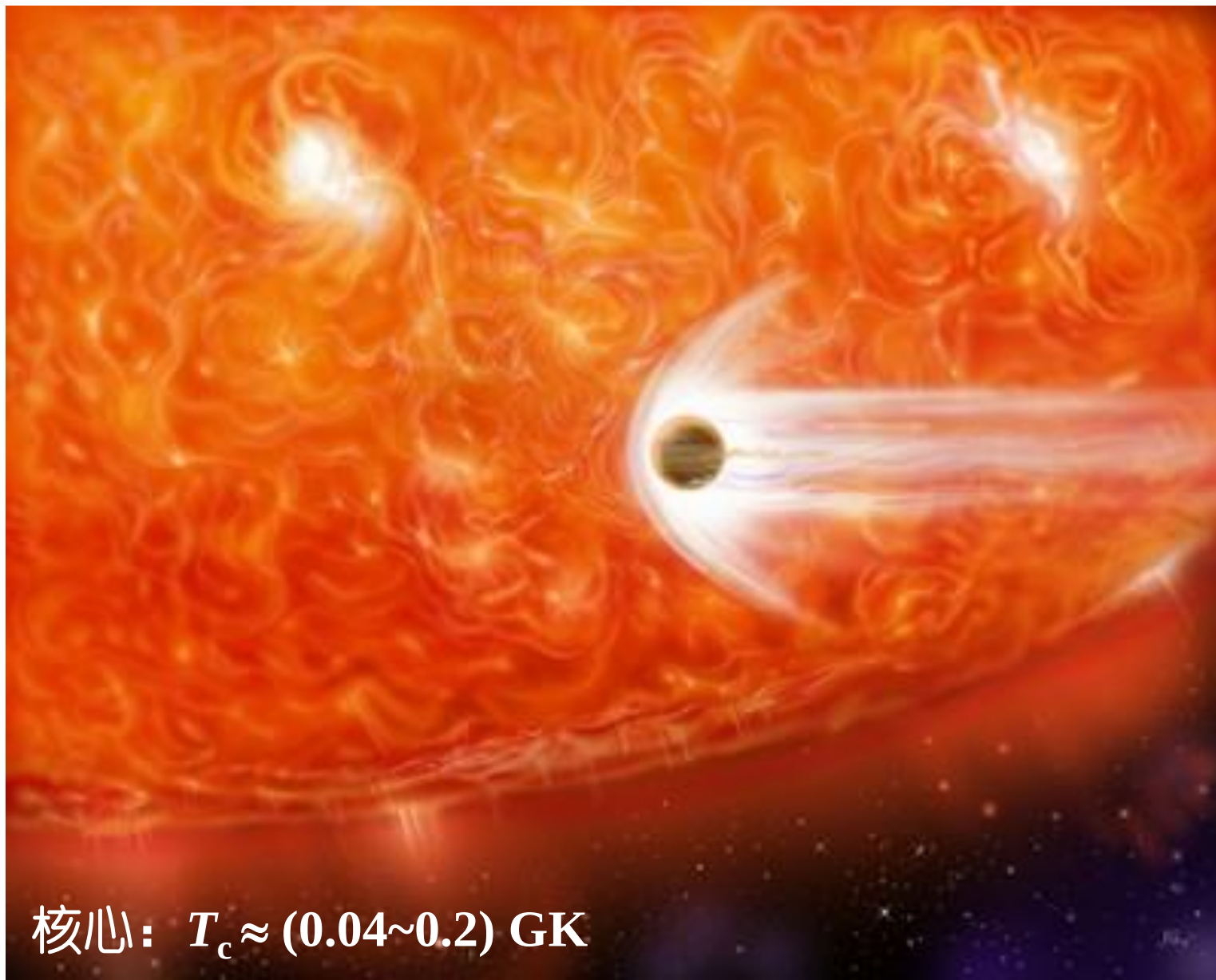
核心: $T_c \approx 0.016 \text{ GK}$



p-p chain



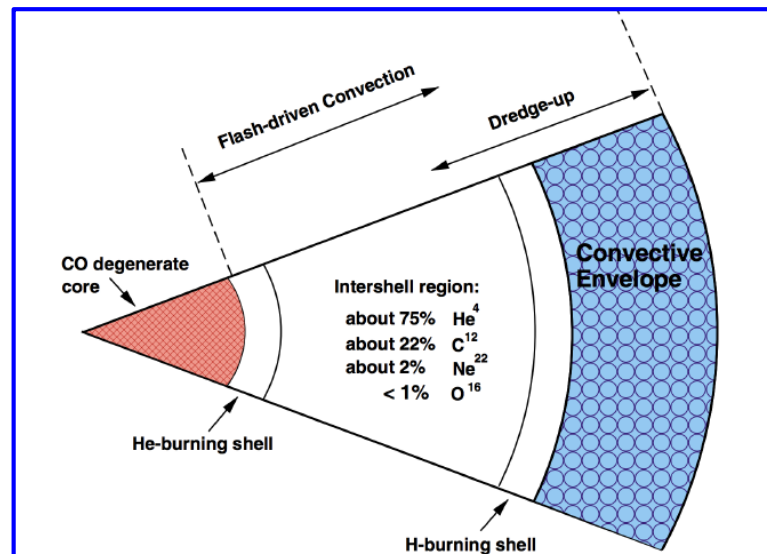
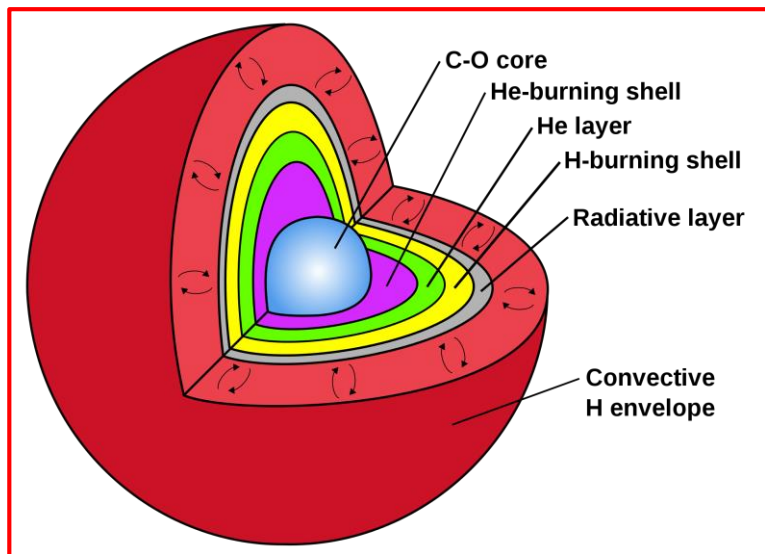
50亿年后的太阳（红巨星）



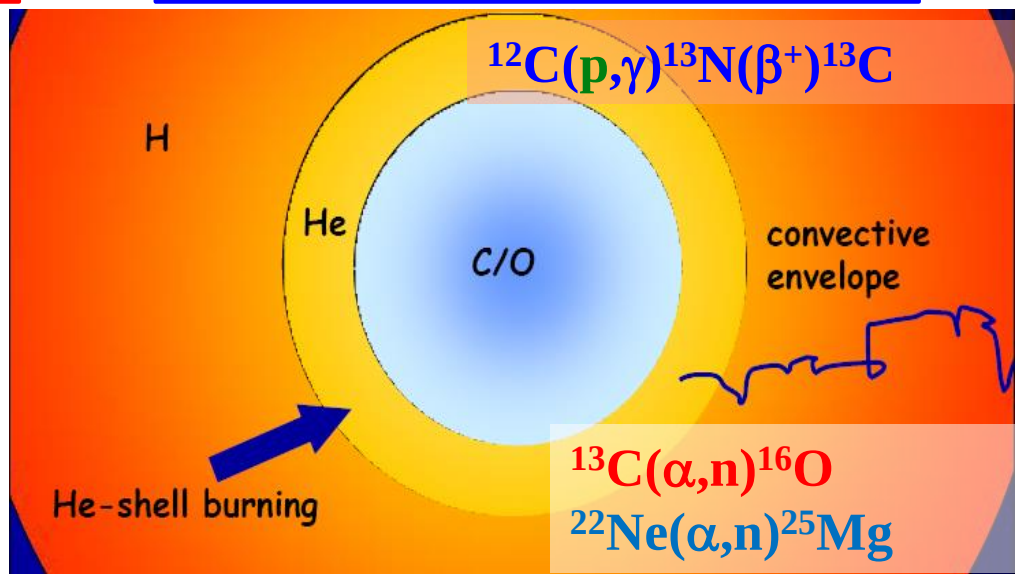
核心： $T_c \approx (0.04 \sim 0.2) \text{ GK}$

发生s过程的主要场所

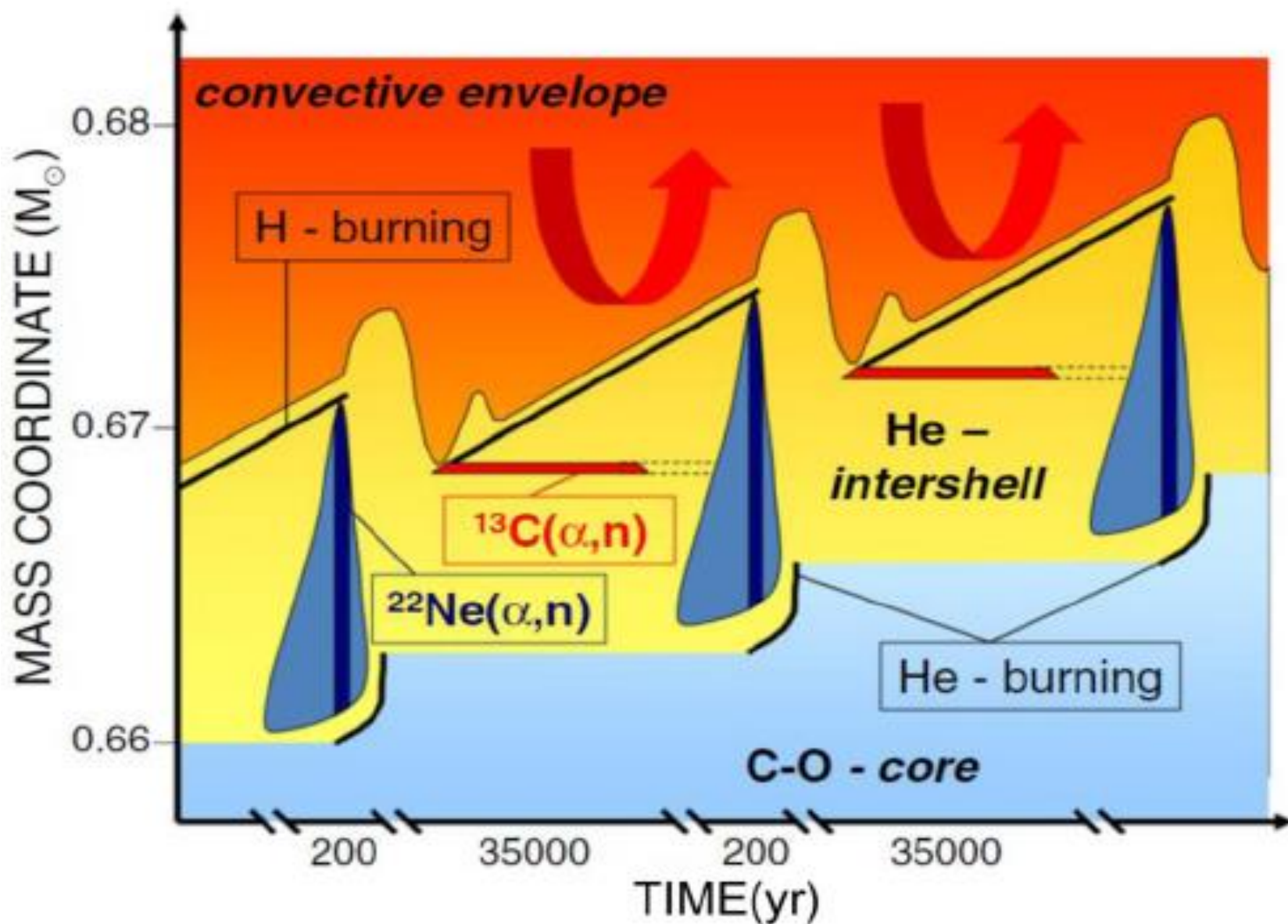
低质量($1.5-3M_{\odot}$)AGB星的热脉冲(TP)



s过程中两个主要的中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 和 $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 的反应率不确定性是AGB星模型中的重要问题之一。



慢中子俘获s过程图像

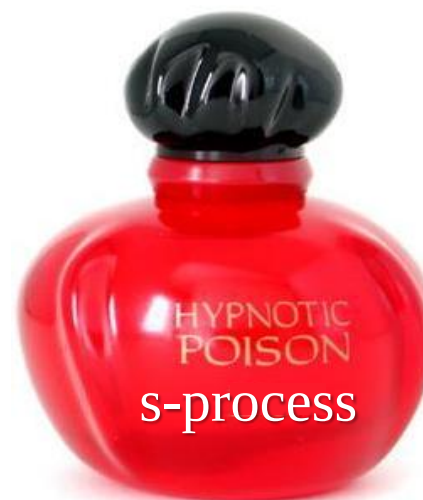


慢中子俘获s过程中的毒药

第1瓶



第2瓶





慢中子俘获s过程中的毒药

第1瓶: $^{17}\text{O}(\text{n}, \gamma)^{18}\text{O}$

尚无实验数据

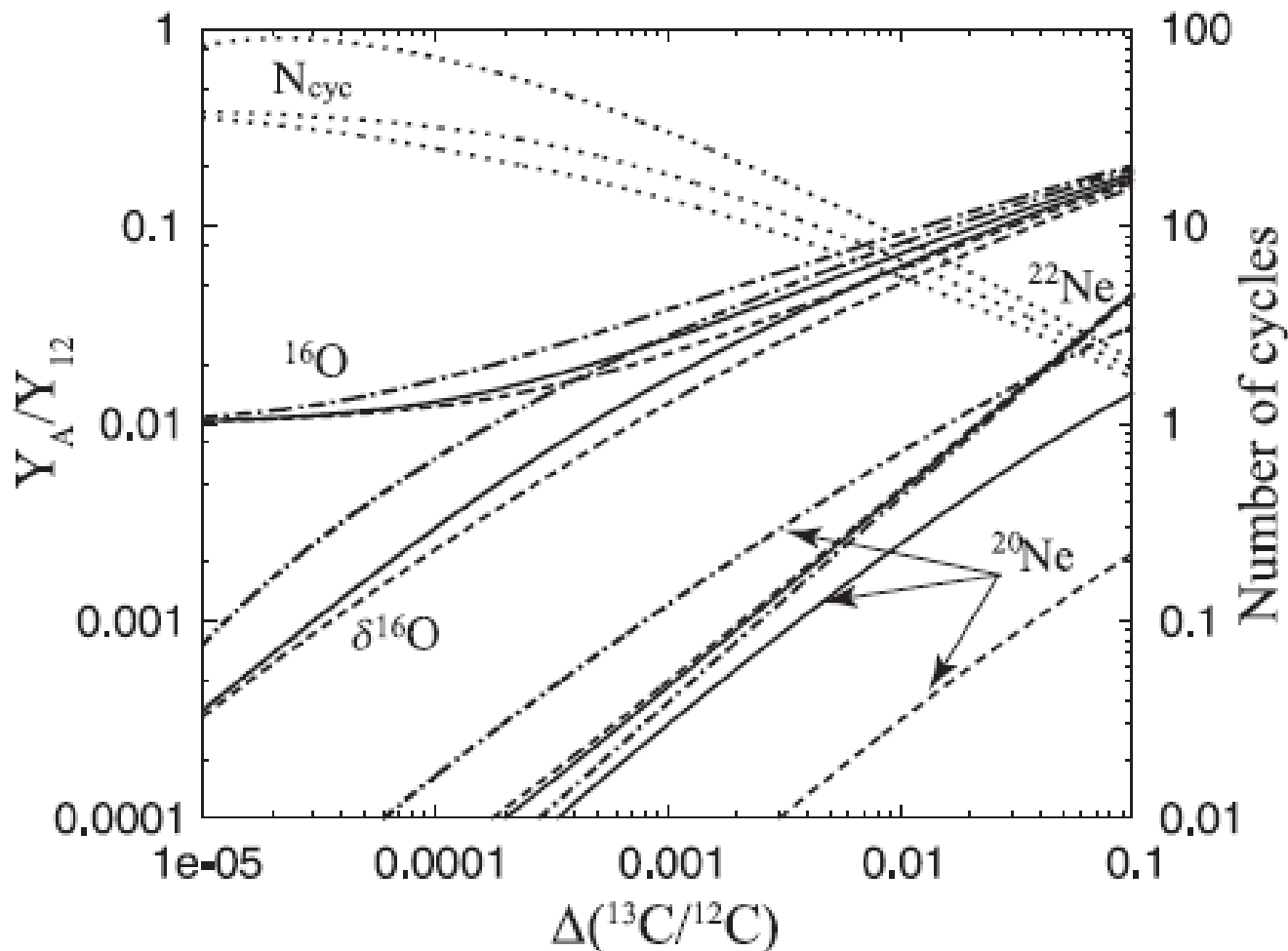
参数	^{16}O	^{17}O	^{18}O
丰度(%)	99.762	0.038	0.2
$\sigma_{(\text{n}, \gamma)}$ (mb)	0.038 (10.5%)	0.038 (估计值)	0.00886 (9%)
S_{n} (MeV)	15.663	4.143	8.044

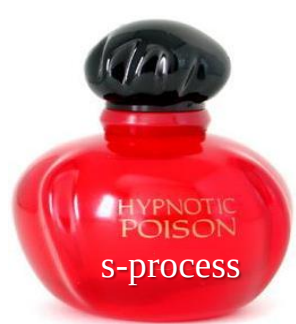


慢中子俘获s过程中的毒药

第1瓶: $^{17}\text{O}(n, \gamma)^{18}\text{O}$ 尚无实验数据

天体物理意义

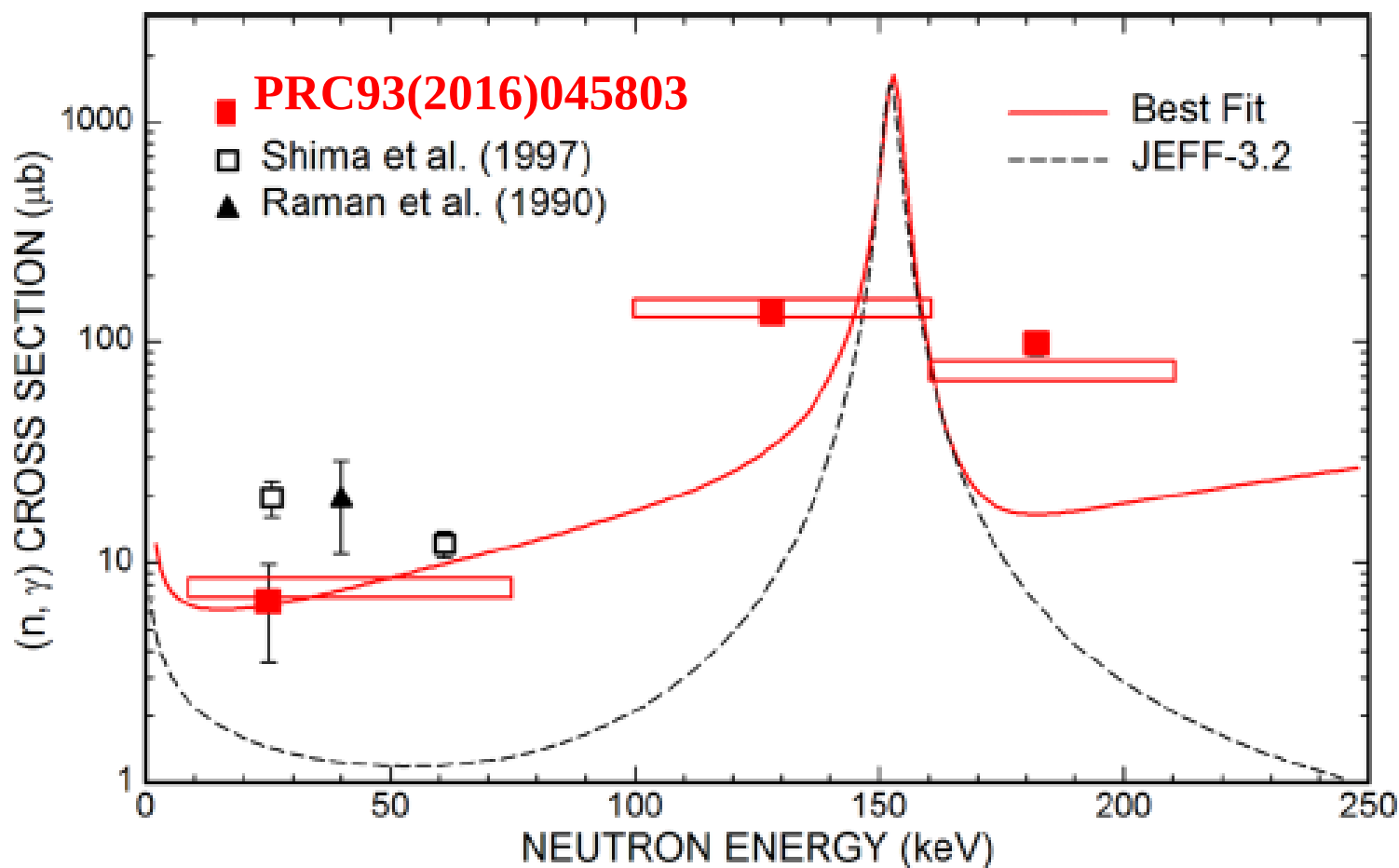




慢中子俘获s过程中的毒药

第2瓶: $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$

$^{14}\text{C}(T_{1/2}=5730\text{年})$



$$S_n(^{14}\text{C}, ^{13}\text{C}, ^{12}\text{C}) = 8.176, 4.946, 18.721 \text{ MeV}$$

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 圣杯反应



圣杯(Hoyle grail)

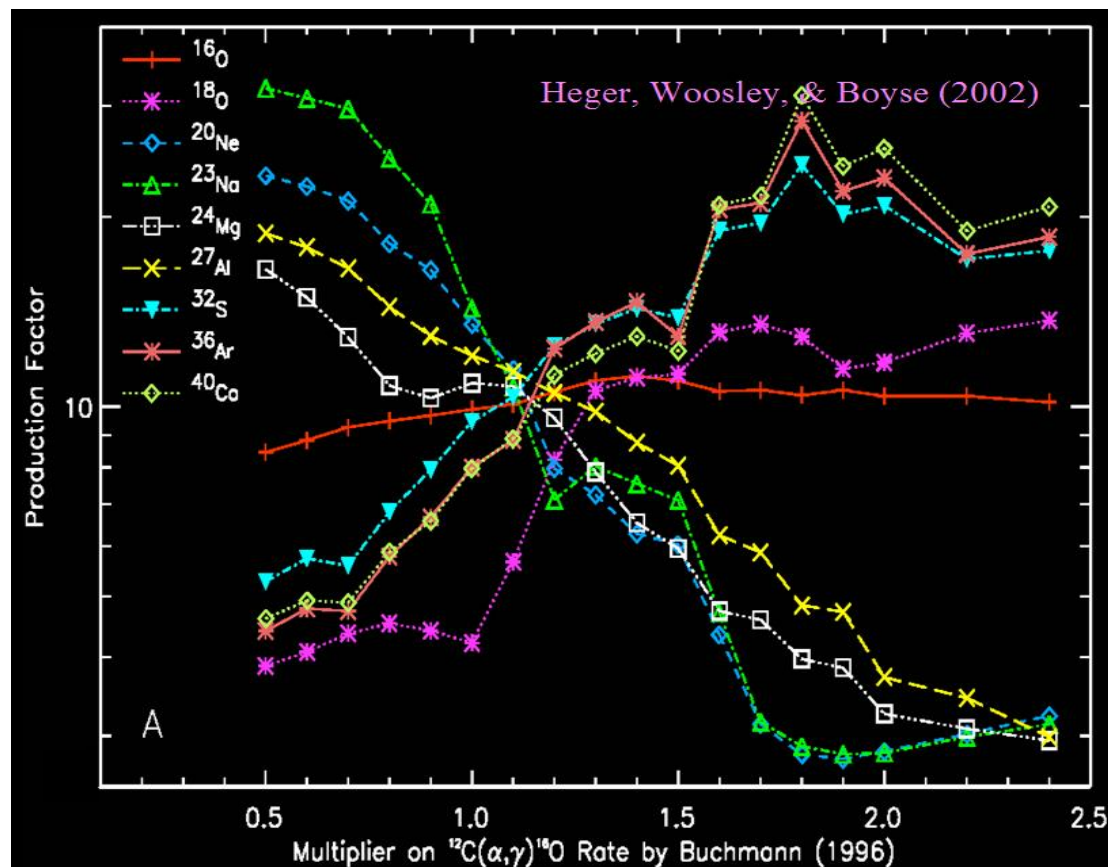
$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反应在所有 $M > 0.55 M_{\odot}$ 恒星的演化中都起着关键作用，其反应截面对上至铁的中等质量核素的合成和大质量恒星后期的演化进程有决定性的影响，被誉为核天体物理的“圣杯”。

$^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 圣杯反应

核天体物理中最重要的科学问题是确定氦燃烧过程所决定的碳氧C/O丰度比。

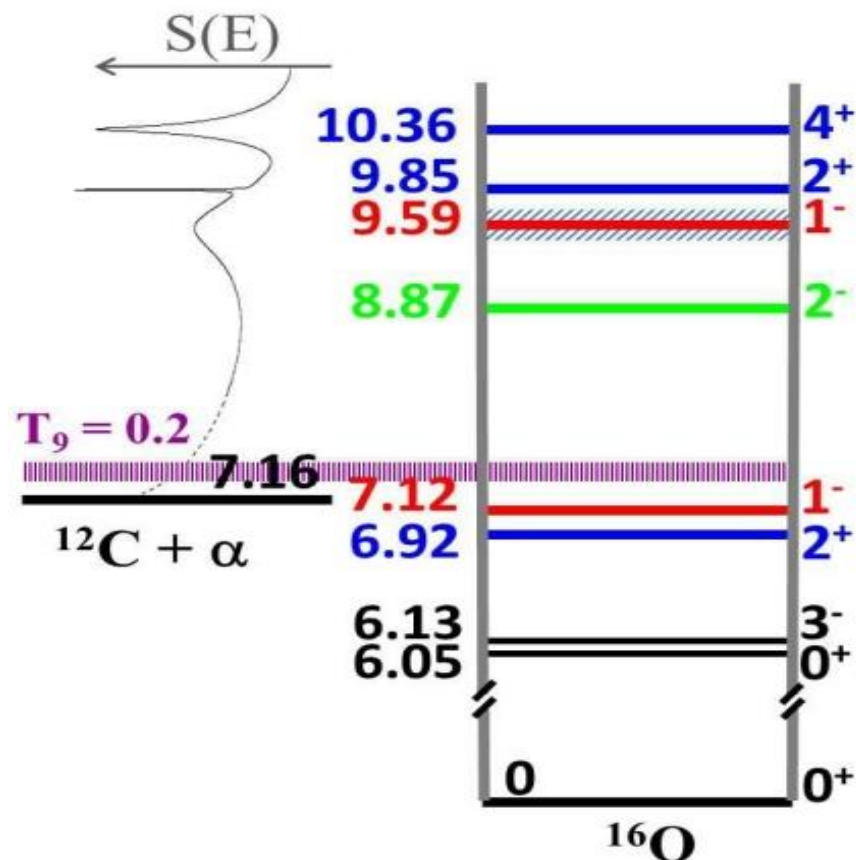
——摘自1983年威廉·福勒诺贝尔颁奖典礼上的演讲词

天体物理核合成演化模型要求该反应
 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 的反应率
误差要小于10%。



$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 圣杯反应

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 在天体物理感兴趣能区 $E_{\text{c.m.}} = 300 \pm 80 \text{ keV}$ 反应截面极低 ($\sigma \approx 10^{-17} \text{ barn}$)，反应机制非常复杂，这给实验测量和理论计算带来很大困难。



$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 研究方法

间接测量：

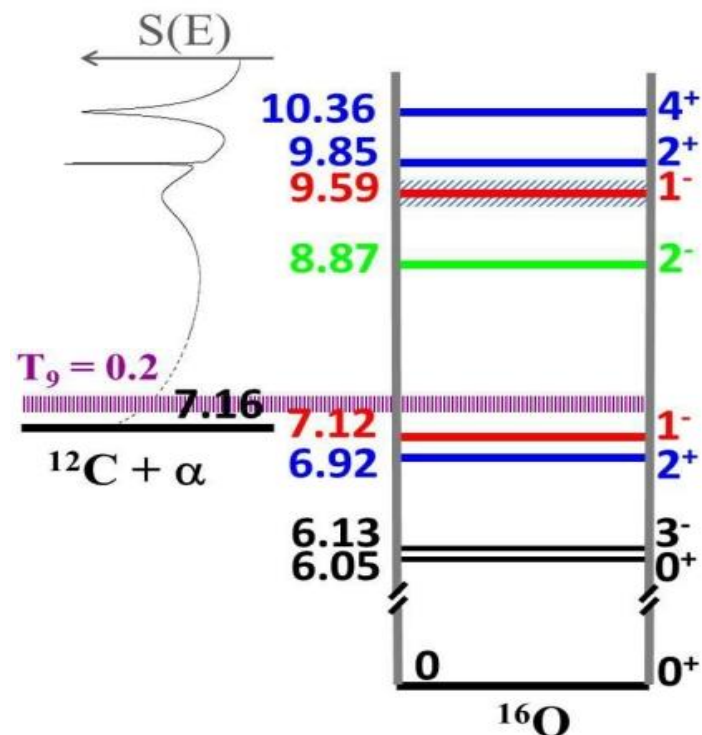
- (1) $^{12}\text{C}(\alpha, \alpha)^{12}\text{C}$ 弹性散射
- (2) ^{16}N β 衰变到 ^{16}O 的激发能级研究 ^{16}O 到 ^{12}C 的 α 衰变
- (3) ^{16}O 库仑离解方法
- (4) α 转移反应，例如： $^{12}\text{C}(^6\text{Li}, d)^{16}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}(^7\text{Li}, t)^{16}\text{O}$ 反应

逆反应 $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$ 测量

- 美国杜克大学HIGS
- 上海光源SLEGS

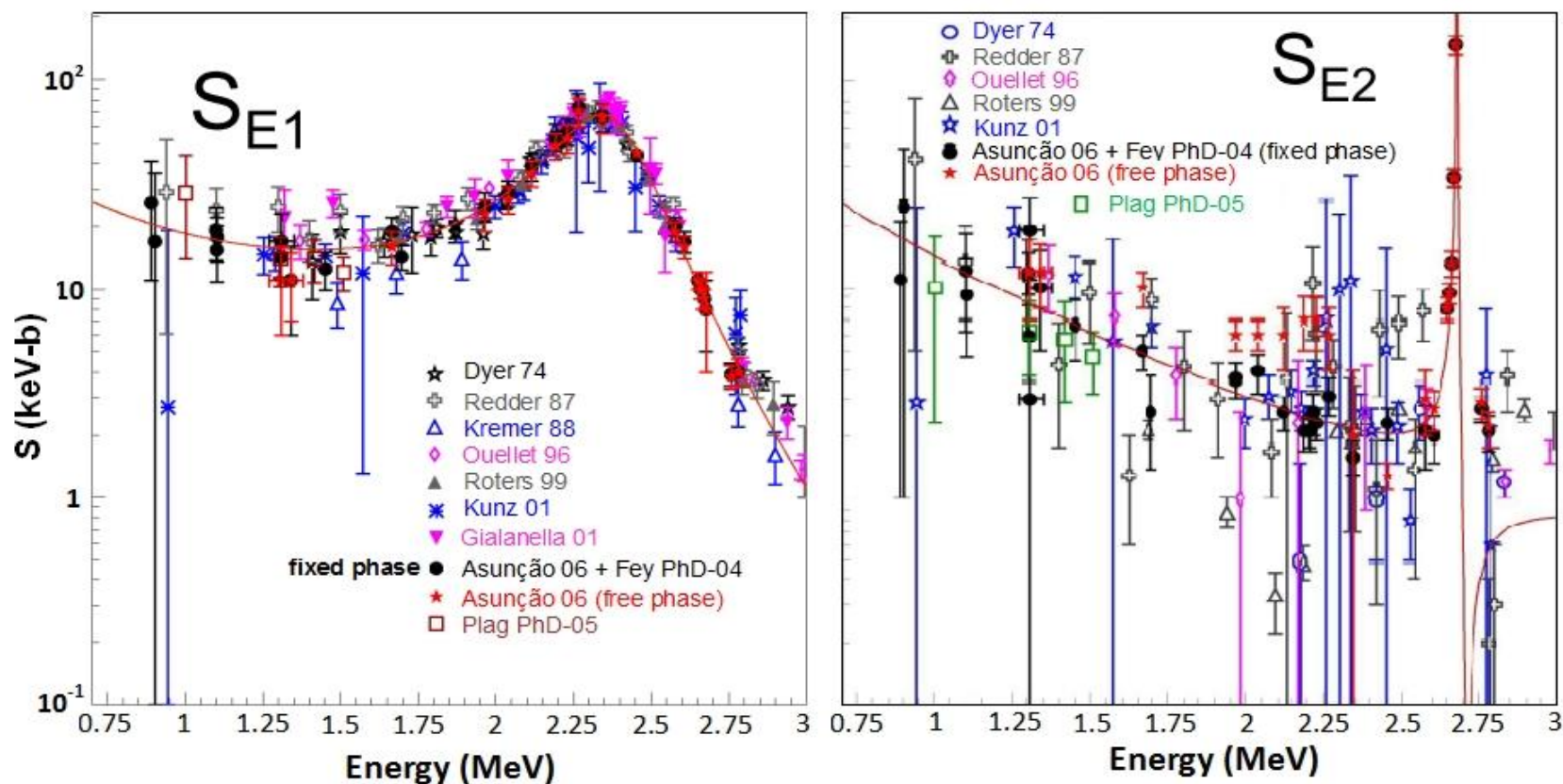
直接测量：最可靠方法

- 正运动学： $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$
- 逆运动学： $^4\text{He}(^{12}\text{C}, ^{16}\text{O})\gamma$



$^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 研究现状

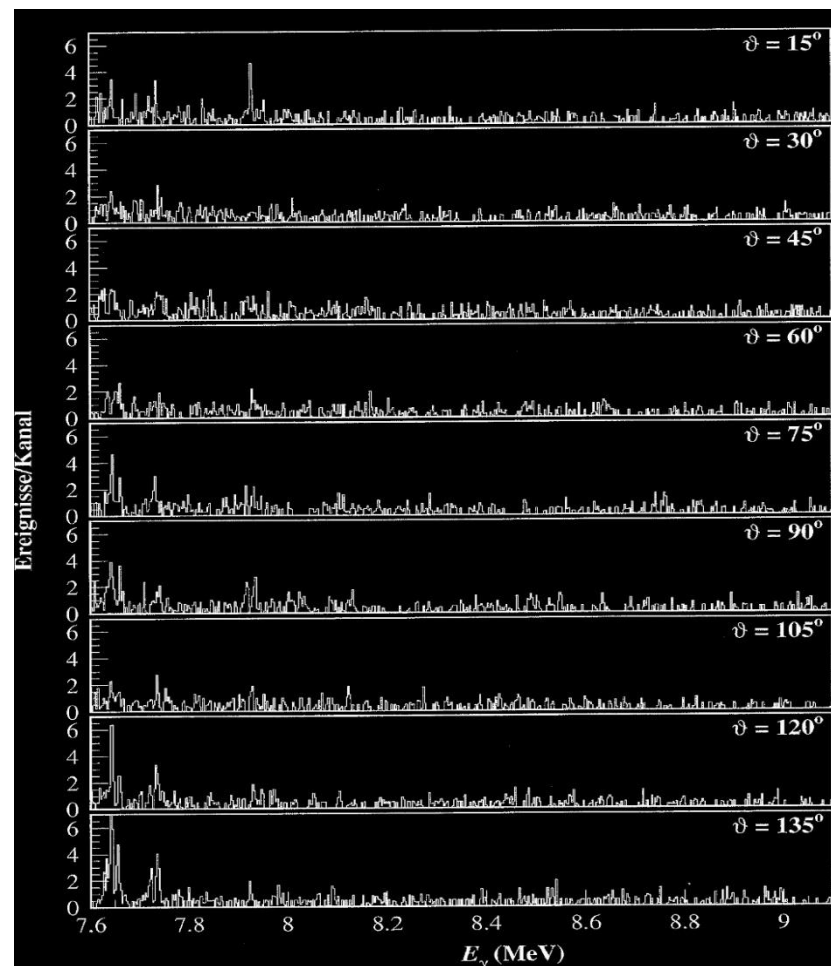
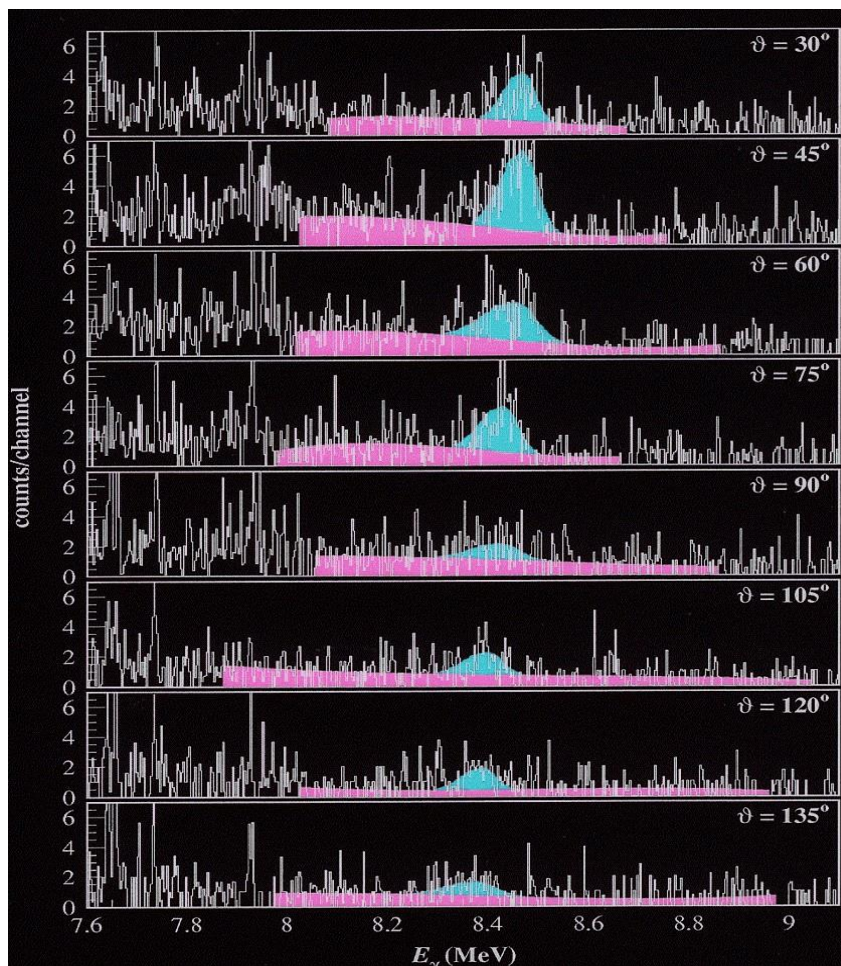
实验直接测量结果



直接测量最低能量 $E_{c.m.} = 891 \text{ keV}$

$^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 直接测量困难

德国斯图加特大学

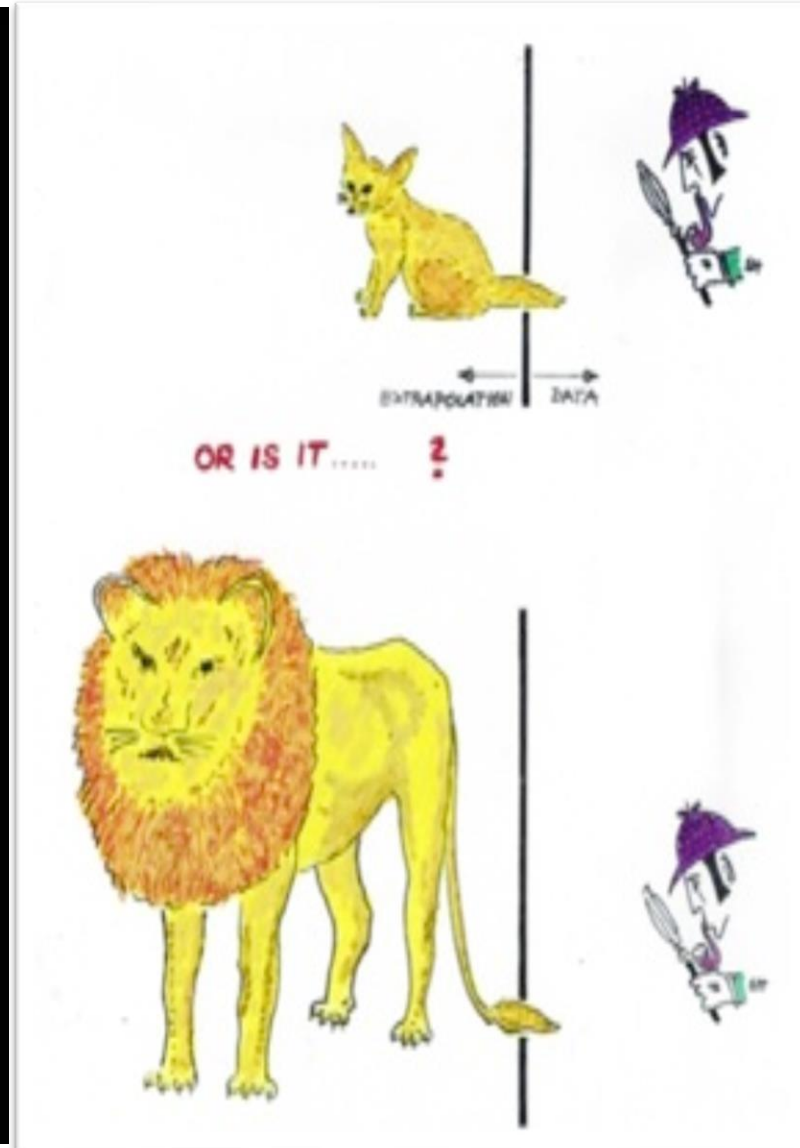
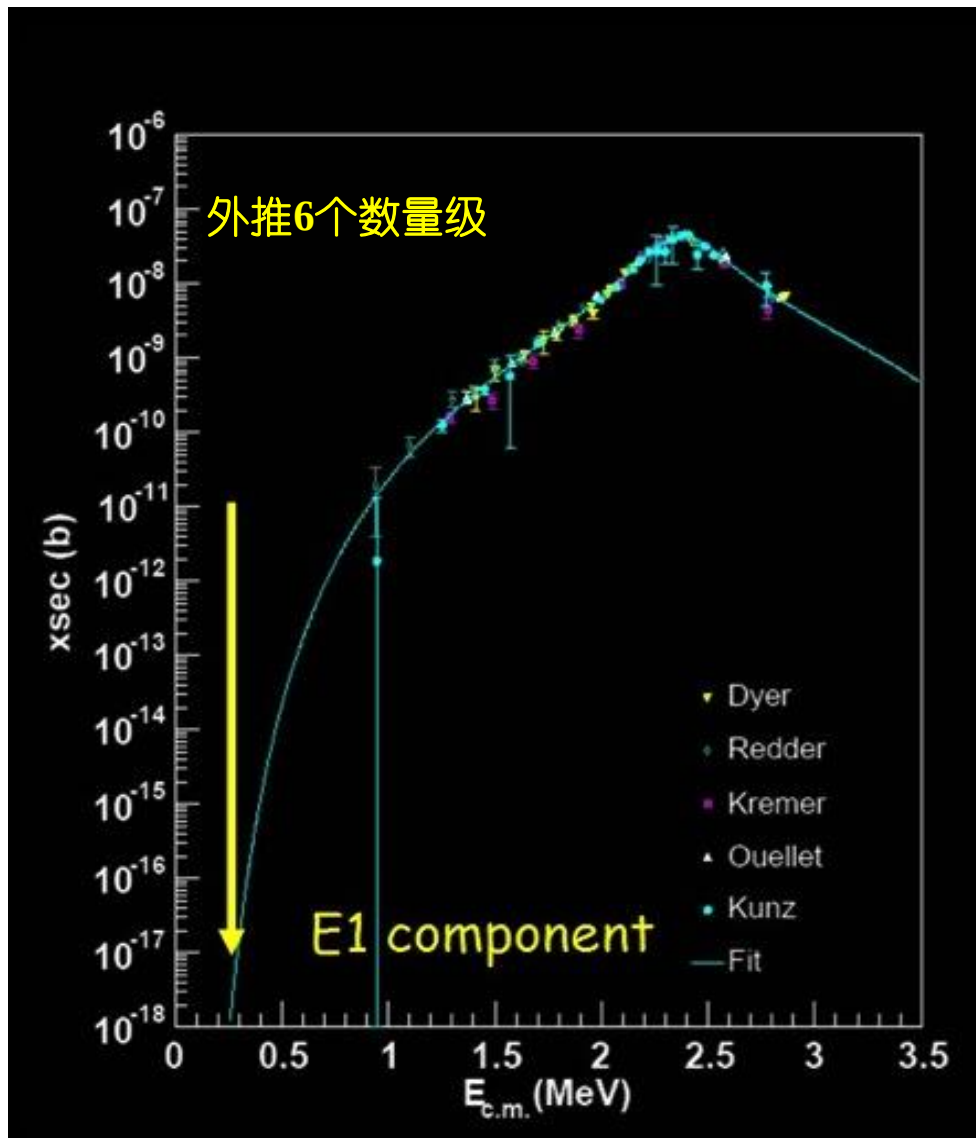


$E_{\text{c.m.}} = 1.254$ MeV

PRL 86(2001)3244

$E_{\text{c.m.}} = 0.945$ MeV

$^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 直接测量必要性



光核反应 $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$ 测量

德国斯图加特大学： $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$

束流： $400\ \mu\text{A}$ (2.5×10^{15} pps),

靶厚： 2×10^{18} atom/cm³

时间：150h

光核反应： $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$

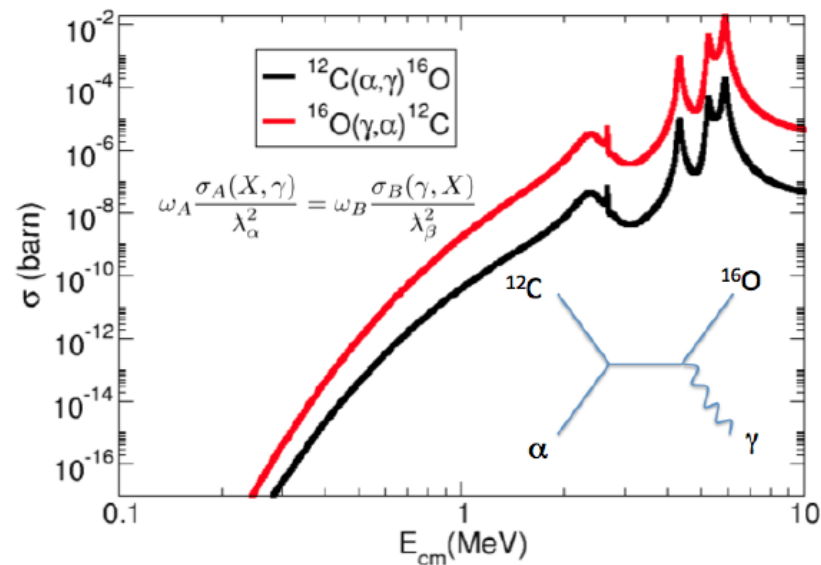
靶厚： $\times 1000$ 倍

反应截面： $\times 100$ 倍

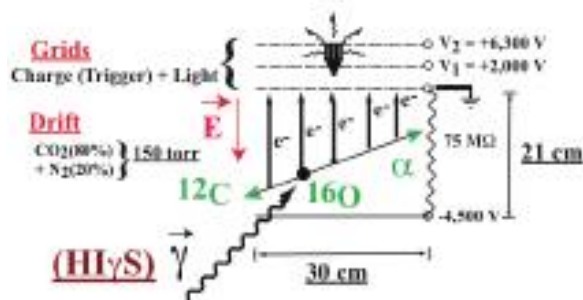
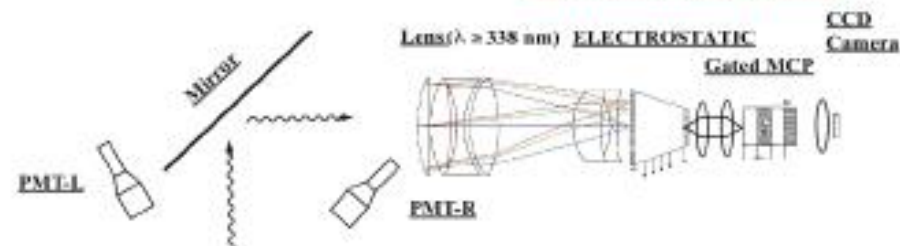
α/γ 探测效率比： $\times 20$ 倍

时间：150h

束流： $\geq 10^9$ 个光子/秒



Opto-Electronic Chain



Multiplication

Drift

时间投影室TPC技术

谢谢大家，敬请批评指正！