

恒星演化进程中的主要核过程

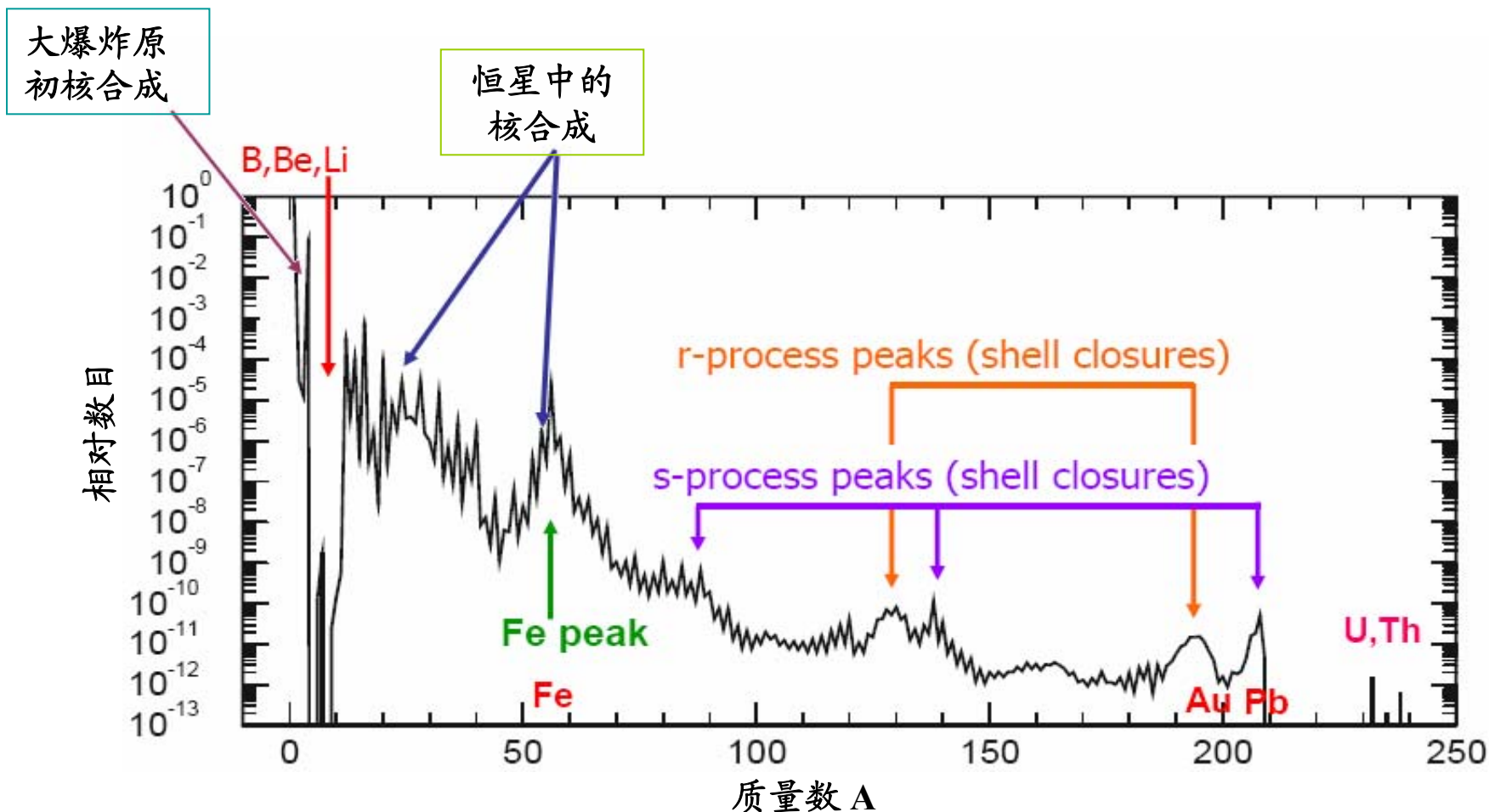
白希祥

一、核天体物理的基本研究目标

核天体物理是研究微观世界的核物理与研究宏观世界的天体物理相融合形成的交叉学科，它应用核物理的知识和规律阐释

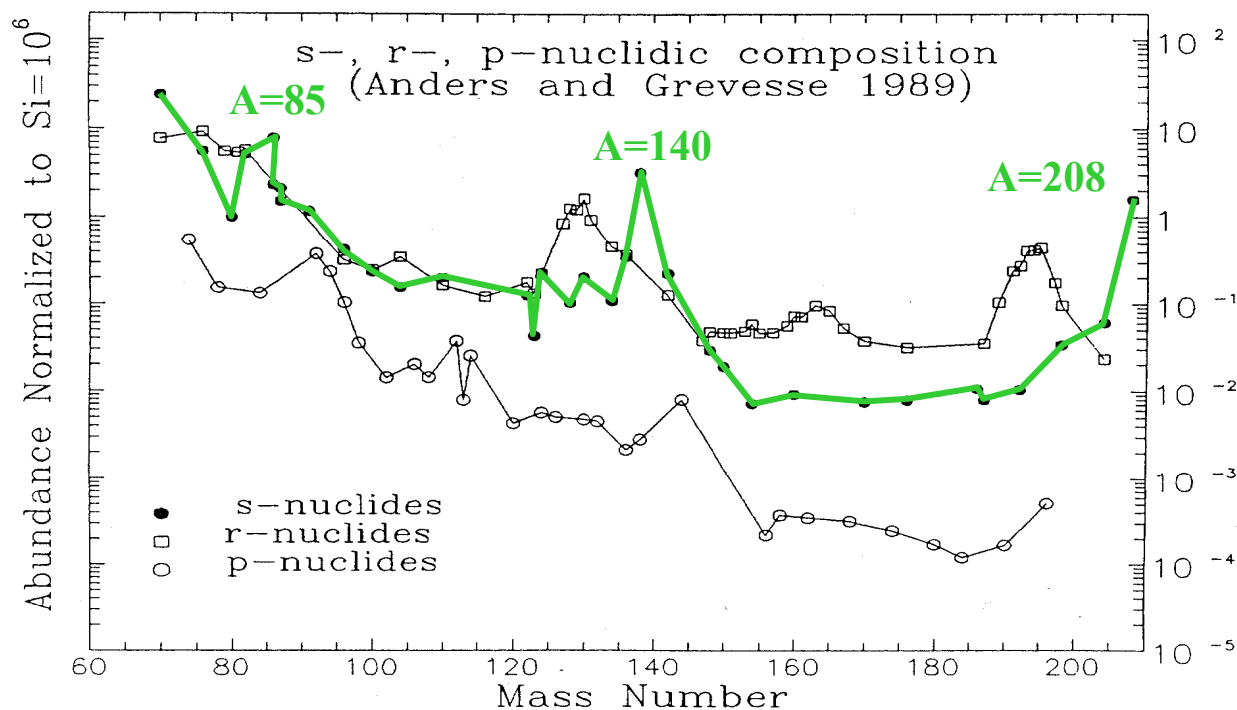
- ♥ 天体核过程产生的能量及其对恒星结构和演化的影响；
- ♥ 宇宙中各种元素和同位素合成的过程、时间、物理环境、天体场所及丰度分布。

在陨石和太阳光球中观测到的核素丰度分布:宇宙演化进程中核过程的遗迹。取自N. Grevesse and A. J. Sauval, Space Science Review, 85(1998)161-174



$A > 60$ 核素合成过程的分解

s-(慢速中子俘获)合成 ^{209}Bi 以下的核素；**r**-(快速中子俘获)合成上至 $A \approx 270$ 的核素；**p**-过程合成30多种丰度很低的缺中子稳定核素。

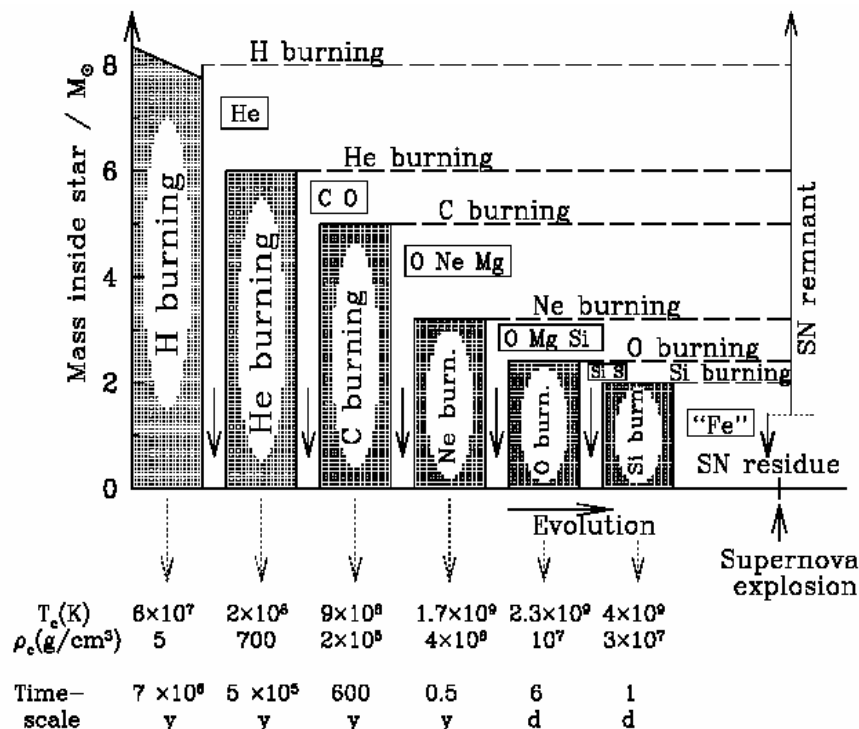


对 $\text{Si}=10^6$ 归一化的 s-, r- 和 p-过程核素丰度分布。
p-核曲线的3个峰值分别对应 ^{92}Mo , ^{112}Sn 和 ^{144}Sm 。

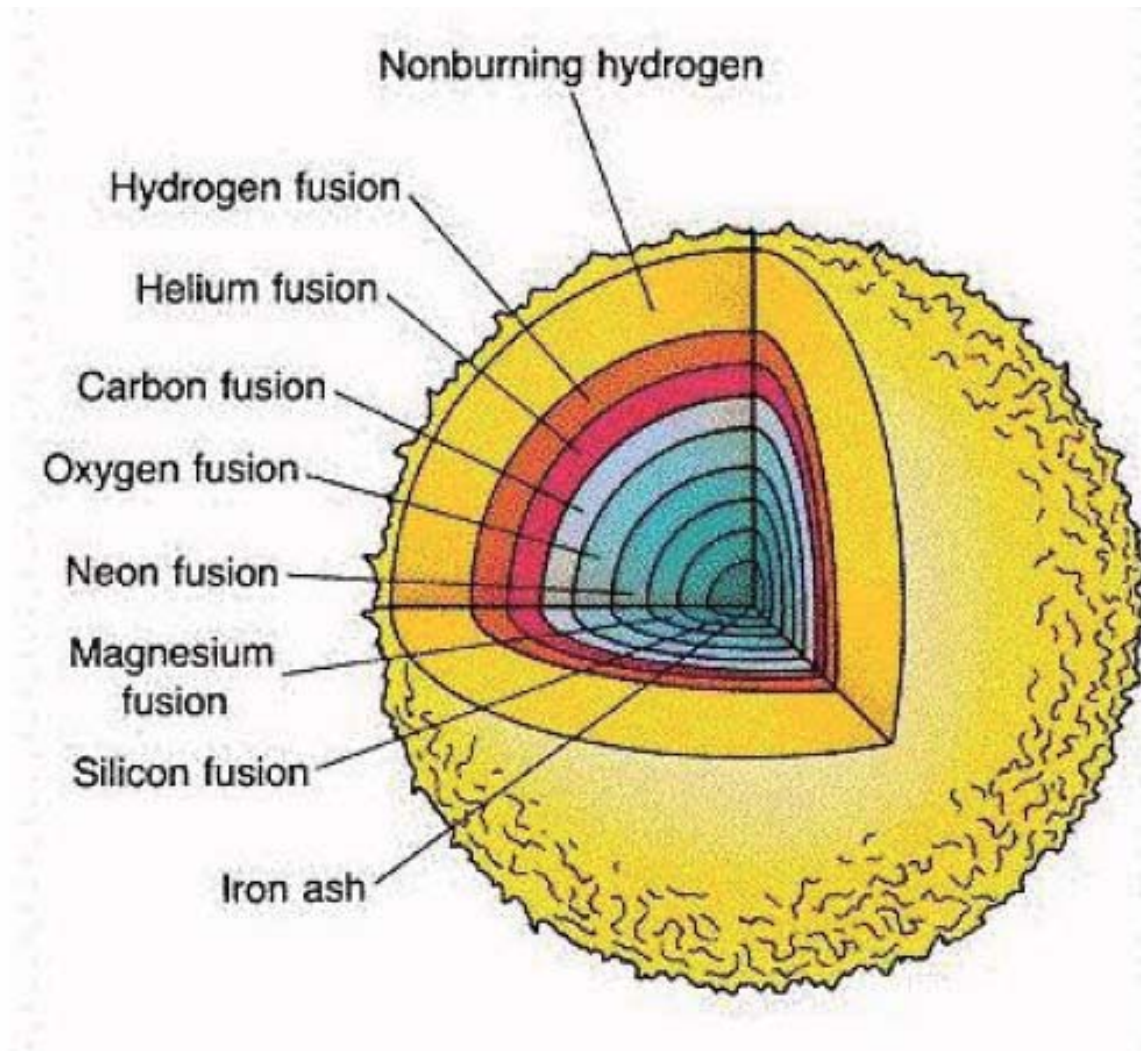
二、 $8 M_{\odot} \leq M \leq 100 M_{\odot}$ 孤立恒星和密近双星 体系演化的简要描述

由于氢燃烧是由
 $p+p \rightarrow {}^2\text{H}+e^++\nu_e$ 和
 $p+e^-+p \rightarrow {}^2\text{H}+\nu_e$ 弱相互作用过程点火, 其截面比强相互作用低大约20多个量级, 它从源头上决定了恒星演化的时标

Arnould M, Takahashi K..
 Rep Prog Phys, 1999, 62: 395

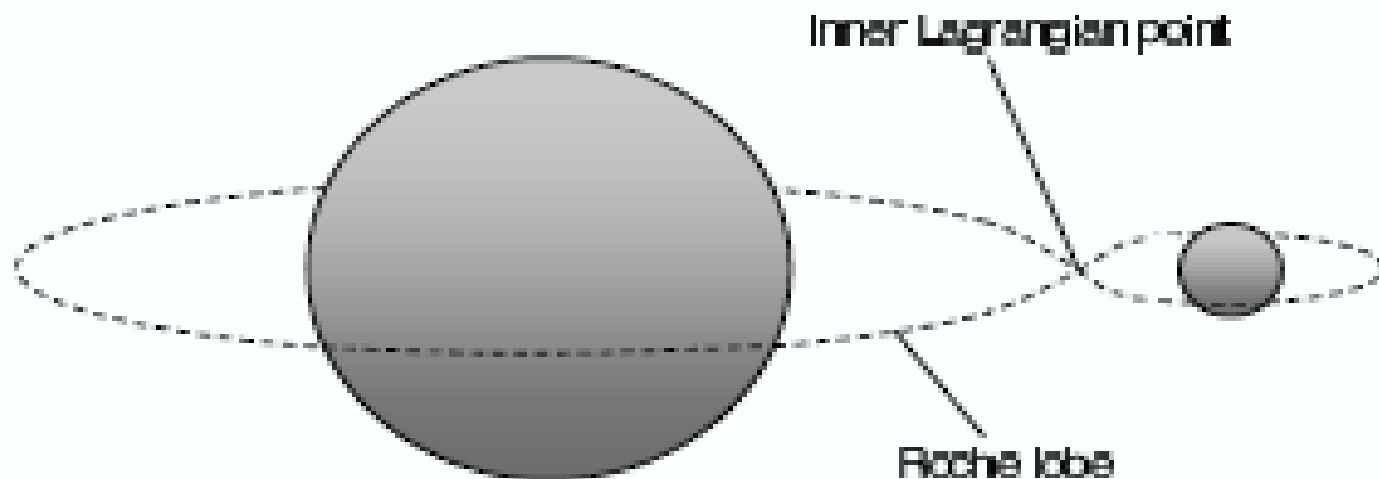


初始质量 $M=25M_{\odot}$ 的孤立恒星内部结构演化的示意图。每一燃烧阶段都从核芯区开始, 然后向周边的各燃烧壳层迁移。各阶段之间是核芯区引力收缩过程, 其间引力势能转化为动能, 温度/密度上升→下一级燃烧点火。方框中标出了各燃烧过程最主要的产物。Si燃烧阶段结束时, 恒星呈现‘洋葱头结构’。由于Fe+Fe的库伦势垒很高, 熔合截面极低, 特别是原子核比结合能在 ${}^{56}\text{Fe}$ 达到极大(熔合反应开始吸能), 无法阻止铁核芯的引力塌缩→最终导致II型超新星爆发, 最核芯的部分留下一个星体(中子星或黑洞), 其余的物质作为残屑被抛入星际介质中。



大质量恒星核芯**Si燃烧**阶段结束后内部**洋葱头**结构的示意图。左上角标出了每一壳层中最丰富的核素成分。左下角表示发生在成分不同的各壳层之间界面处的核燃烧过程。

密近双星体系演化与新星, X-射线暴和Ia型超新星

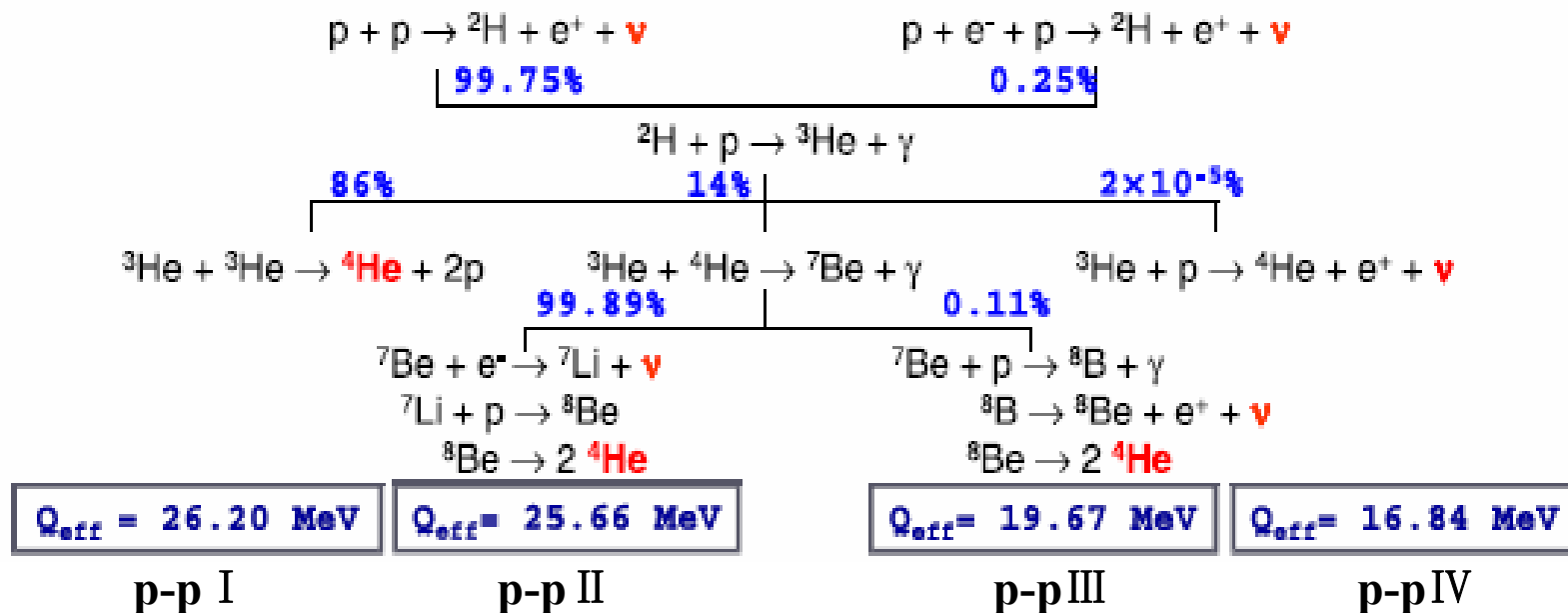


银河系中可能有一半以上的恒星是双星体系的成员，但密近双星体系只占较小的百分比。密近双星体系的演化与**新星**(白矮星从其伴星吸积物质)，**X-射线暴**(中子星从其伴星吸积物质)和**SN Ia型超新星**(当**C+O**白矮星从其伴星吸积物质使本身质量**超过电子简并压力得以抑制住引力塌缩的钱德拉塞卡极限($M < 1.4 M_{\odot}$)**时引起的彻底毁灭性爆发)密切相关。

三、恒星平稳演化阶段的核燃烧模式及主要反应

(1) 通过**p-p反应链**、**CNO循环** 和 **NeNa-MgAl循环**进行的**氢燃烧**。这些过程的净结果都是 $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ 并释放能量。

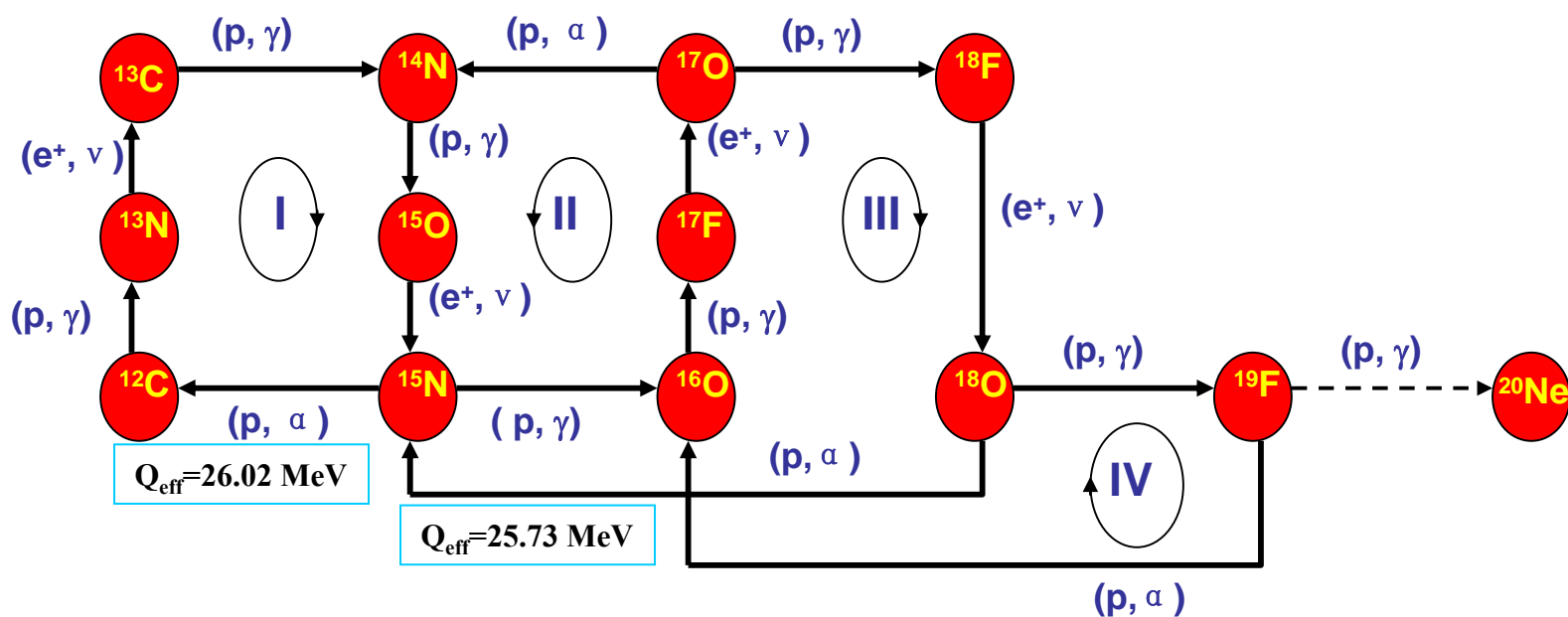
♥ **p-p反应链**。由 $p+p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$ 和 $p+e^-+p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$ 弱相互作用过程点火，继而发生 ${}^2\text{H}(p,\gamma){}^3\text{He}$ (${}^3\text{He},2p){}^4\text{He}$ 、 ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ 等反应，共形成4个支链。



取自 H. Costantini et al., Rep. Prog. Phys., 72(2009)086301

我们在串列加速器次级束流线上利用 ${}^7\text{Be}(\text{d},\text{n}){}^8\text{B}$ 反应和渐近归一化系数方法，在国际上率先间接确定了 ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 反应的天体物理 $S_{17}(0)$ 因子(PRL, 1996)。

♥ 正常或低温CNO循环过程($T \leq 8 \times 10^7 \text{K}$), 其中 $^{14}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{15}\text{O}$ 反应是最慢的瓶颈。红色圆圈中的核素扮演催化剂的角色。CNO循环不是封闭的, 可以通过 $^{19}\text{F}(\text{p}, \gamma)^{20}\text{Ne}$ 反应向NeNa-MgAl循环过渡取自 Rolfs C E, Rodney W S, Cauldrons in the Cosmos (University of Chicago Press, 1988).



我们在串列加速器磁谱仪上通过测量 $^{12}\text{C}(^7\text{Li}, ^6\text{He})^{13}\text{N}$ 反应间接确定了 $^{12}\text{C}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{N}$ 的天体物理反应率(SCIENCE CHINA, 2010)

取自 J. Jose, A. Coc and M. Hernanz, *Astrophys.J.*, 520 (1999) 347-360

取自 J. Jose, A. Coc and M. Hernanz, *Astrophys.J.*, 520 (1999) 347-360



我们利用 $^{26}\text{Mg}(\text{d},\text{p})^{27}\text{Mg}$ 反应的实验数据，通过电荷对称性和渐近归一化系数相结合的方法间接确定了 $^{26}\text{Si}(\text{p},\gamma)^{27}\text{P}$ 的天体物理反应率 (PRC, 2006)

- (2) 氦燃烧: 关键反应是 $\alpha + \alpha \leftrightarrow {}^8\text{Be}(\alpha, \gamma){}^{12}\text{C}$ 和 ${}^{12}\text{C}(\alpha, \gamma){}^{16}\text{O}$, ${}^{16}\text{O}(\alpha, \gamma){}^{20}\text{Ne}$ 以及 ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{22}\text{Ne}(\alpha, n){}^{25}\text{Mg}$ 两个 s-过程中子源反应和一系列慢速中子俘获及 β 衰变。
- (3) 碳燃烧: 两个关键反应是 ${}^{12}\text{C}({}^{12}\text{C}, \alpha){}^{20}\text{Ne}$ 和 ${}^{12}\text{C}({}^{12}\text{C}, p){}^{23}\text{Na}$ 。
- (4) 氖和氧燃烧: 主要反应分别为 ${}^{20}\text{Ne}(\gamma, \alpha){}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}(\alpha, \gamma){}^{24}\text{Mg}$ 、 ${}^{24}\text{Mg}(\alpha, \gamma){}^{28}\text{Si}$ 、 ${}^{16}\text{O}({}^{16}\text{O}, \alpha){}^{28}\text{Si}$ 、 ${}^{16}\text{O}({}^{16}\text{O}, p){}^{31}\text{P}$ 和 ${}^{16}\text{O}({}^{16}\text{O}, n){}^{31}\text{S}$ 。
- (5) 硅燃烧: 由于两个Si核之间的库仑势垒已经较高, 难以在该阶段的恒星环境中发生熔合反应, 反应流只能通过质子、中子和 α 粒子在Mg, Si等核上的俘获和光致裂解过程曲折地向上发展, 最终在Fe附近形成同时满足质量数守恒和电荷守恒的原子核统计平衡(NSE)丰度分布。

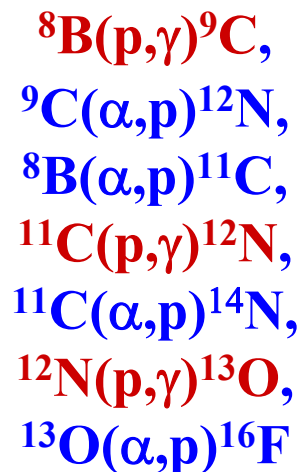
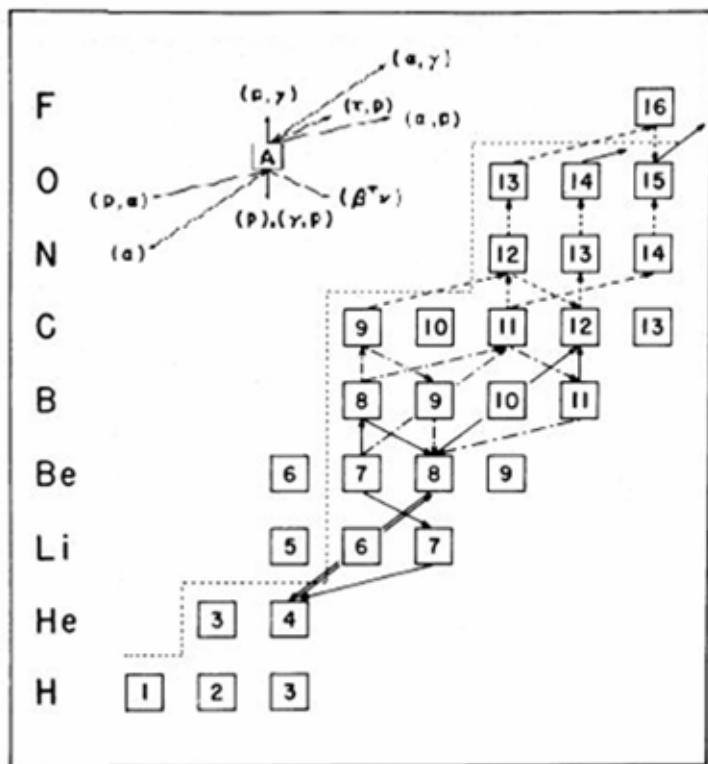
平稳核燃烧的特点: 反应率低、持续时间长, 反应流沿稳定线附近演进。

四、恒星爆发性事件中的核过程

在新星, X射线暴, 超新星事件中和超大质量恒星内部发生的爆发性核过程的特点是**反应率高**, **持续时间短** (秒-亚小时级), 反应流沿偏离或远离稳定线的路径发展, 有**大量不稳定核素**卷入**核合成**进程。爆发性核燃烧的主要模式有:

- (1) **高温氢燃烧**, 包括**高温pp-反应链**, 高温**CNO循环**和接下的**rp-(包括 α p-及 β^+ 衰变)**过程。反应流可达到 $A \sim 100$ 的丰质子核区, 合成丰质子一侧的稳定核。
- (2) **高温氮、碳、氦、氧和硅的燃烧**。
- (3) 以 **α -过程**为种子核来源的**快速中子俘获(r-)**过程, 合成 $A \geq 60$ 的大约半数丰中子稳定核(^{209}Bi 以上全部由**r-过程产生**)。
- (4) **p-过程**。通过预先存在的s-或r-核上的 (γ, n) , (γ, p) , (γ, α) 等光致分裂反应和与之一一起发生的rp-过程合成某些 $A \approx 60-200$ 的低丰度丰质子稳定核。

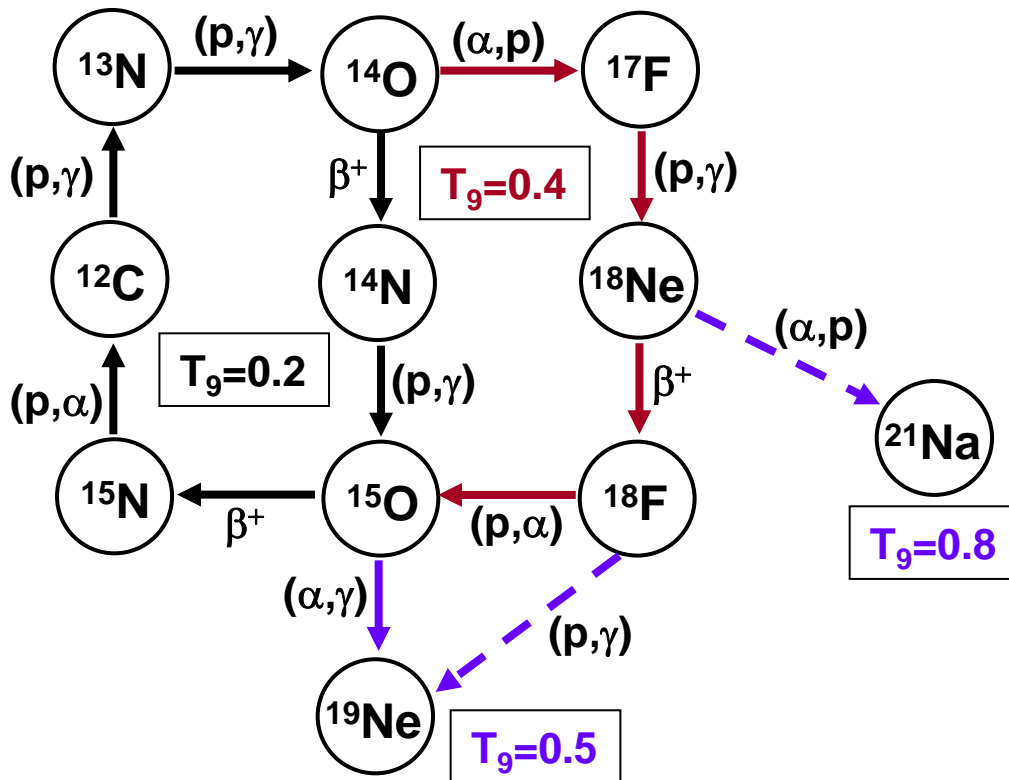
高温p-p反应链 (M.Wiescher et al.,Astrophys.J.,343:352(1989))



连接到高温CNO循环。高温p-p反应链可能是 $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$ 过程以外一种合成CNO核的机制

我们在串列加速器次级束流线上间接研究了 $^{11}\text{C}(\text{p},\gamma)^{12}\text{N}$ (NPA, 2003) 和 $^8\text{B}(\text{p},\gamma)^9\text{C}$ (NPA, 2005) 反应; 在日本CRIB束流线上研究了 $^{12}\text{N}(\text{p},\gamma)^{13}\text{O}$ 反应。还利用 $^{11}\text{B}(\text{d},\text{p})^{12}\text{B}$ 反应的实验数据, 通过电荷对称性与渐近归一化系数相结合的方法得出了 $^{11}\text{C}(\text{p},\gamma)^{12}\text{N}$ 的天体物理反应率(JPG, 2007); 利用谱因子和渐进归一化系数方法得出了 $^{12}\text{N}(\text{p},\gamma)^{13}\text{O}$ 的天体物理反应率(CPL, 2006)。

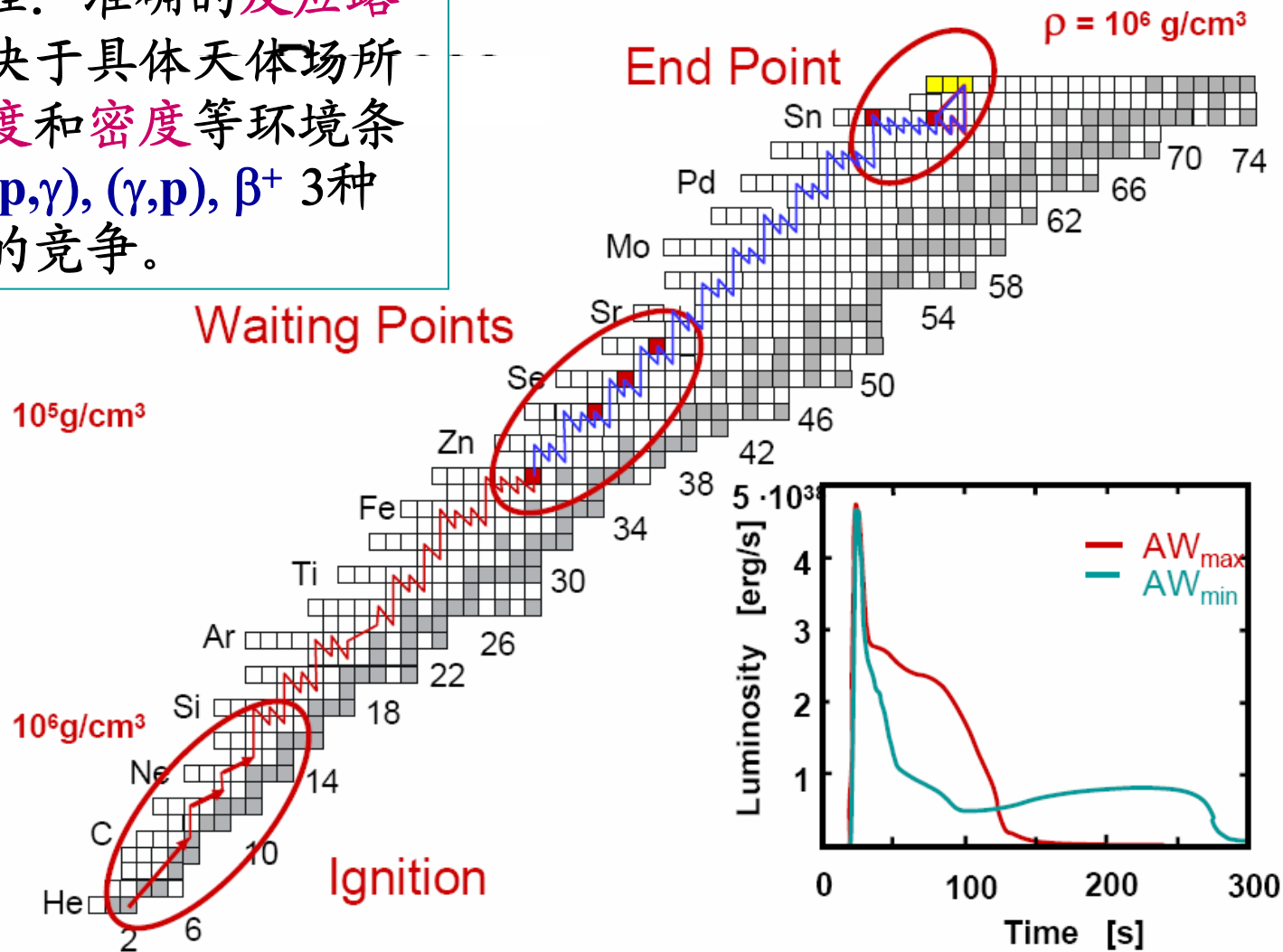
高温CNO循环



黑线表示 $T_9=0.2$ 温度下起主导作用的反应路径。当温度升至 $T_9=0.4$ 时，由 $^{14}\text{O}(\alpha,p)^{17}\text{F}$ 开始的反应链变成重要路径。温度更高时，将突破高温CNO循环，进入rp-过程。取自
Champagne A E, Wiescher M.
Explosive hydrogen burning.
Annu Rev Nucl Part Sci, 1992, 42:
39-76

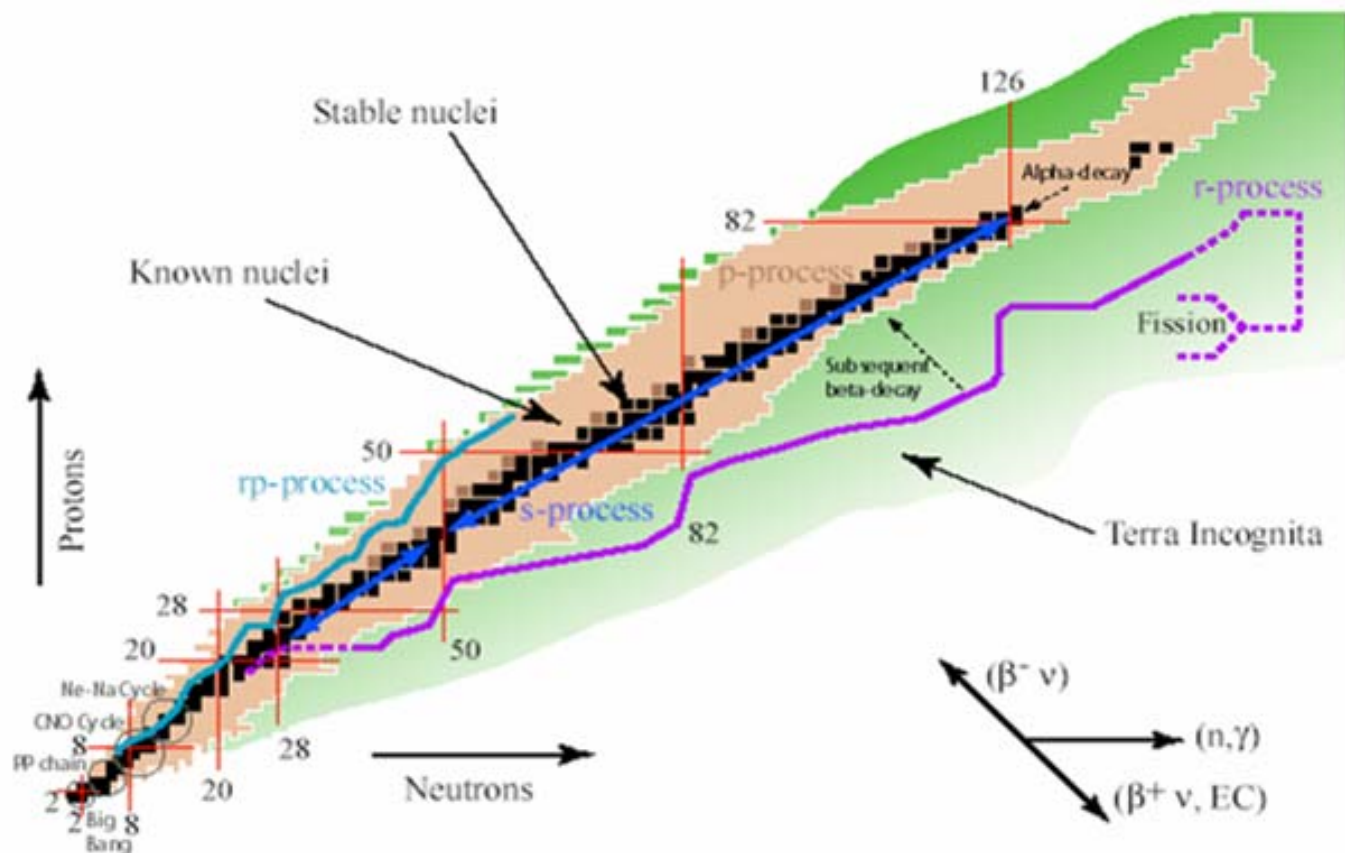
我们在串列加速器次级束流线上间接测量了 $^{13}\text{N}(p,\gamma)^{14}\text{O}$ 的天体物理反应率(PRC, 2006), 并利用 $^{13}\text{C}(d,p)^{14}\text{C}$ 反应的实验数据和 Johnson Soper方法间接确定了 $^{13}\text{N}(p,\gamma)^{14}\text{O}$ 的天体物理反应率(CPL, 2007); 通过厚靶实验分别测量了 $^{13}\text{N}+p$ 和 $^{17}\text{F}+p$ 弹性共振散射, 得出了 ^{14}O 和 ^{18}Ne 低激发能级的特性(PRC, 2008), (CPL, 2010)。

rp过程：准确的反应路径取决于具体天体场所的温度和密度等环境条件和 (p,γ) , (γ,p) , β^+ 3种过程的竞争。



对核数据的需求：质量； (p,γ) , (α,γ) , (α,p) (p,α) 和 **2p俘获**反应率； β^+ 衰变半衰期及 β^+ 缓发质子衰变的半衰期和B(GT)强度分布。

r-过程



我们在串列加速器次级束流线上测量了 $^2\text{H}(^8\text{Li}, ^9\text{Li})^1\text{H}$ 反应，在国际上首次通过实验间接确定了对原初核合成和r-过程种子核形成都有重要意义的 $^8\text{Li}(n, \gamma)^9\text{Li}$ 天体物理反应率的上、下限(PRC(R), 2005)。

♥ r-过程核合成模型的核物理输入量和它们的作用

- ▲ 远离稳定线 ($A > 70$) 丰中子核的中子分离能(质量), 基本上决定了给定中子密度下r-过程的反应路径;
- ▲ 中子辐射俘获截面, 在r-过程冻结时起重要作用, 影响 $A > 130$ 核素的最后丰度分布;
- ▲ β -衰变半衰期, 某些核激发态热布居对衰变率的影响
N=50,82的中子满壳核(^{78}Ni , ^{79}Cu , ^{80}Zn , ^{81}Ga ; ^{125}Tc , ^{126}Ru , ^{127}Rh , ^{128}Pd , ^{129}Ag , ^{130}Cd , ^{131}In) 和 N=126的中子满壳核 ^{196}Tm 是反应路径上的等待点, 它们的 β -衰变半衰期对过程的时标和先驱核的丰度分布 $N_{r,\text{prog}}$ 有决定性的影响
- ▲ β -缓发中子发射分支比. 在r-过程冻结后, 通过 β -衰变和 β -缓发中子发射形成最后的丰度分布 ($N_{r,\text{prog}} \Rightarrow N_{r,\text{final}} \approx N_{r,\odot}$)
- ▲ 裂变核区中子诱发及自发裂变率, β -缓发裂变分支比, 裂变势垒和碎片质量分布. β 缓发和中子诱发裂变决定r过程的终点($A \sim 270$)
- ▲ 中微子与质子、中子、氦核的相互作用和在r-过程丰度峰值处中重核上的 (ν, n) 、 (ν, e) 反应, 都可能对先驱核和最后的丰度分布产生影响

五、实验核天体物理面临的挑战

主要是：

- (1) 将稳定线上带电粒子热核反应 (H, He, C... 燃烧) 的直接测量推进到G-峰能区, 阐释恒星平稳演化期间的核合成过程和核能放;
- (2) 进一步研究s-过程中子源及稳定线附近核素的中子俘获反应和相关衰变过程, 以理解慢速中子俘获过程及s-核的丰度分布;
- (3) 研究大量远离稳定线核素的质量, 结构, 反应和衰变过程, 以揭示新星, 超新星, γ -射线暴等爆发性事件和伴随的核合成图象。涉及的大量远离稳定线核素大部分尚未在加速器上产生或束流强度太低, 需要发展新一代的RIB装置和更先进的探测手段。
- (4) 大爆炸原初核合成相关稳定及不稳定核反应的深入研究;
- (5) γ -过程-稳定及不稳定核 (γ, p) , (γ, n) 和 (γ, α) 等光致裂解反应的研究;
- (6) 研究天体物理环境对核过程的影响。

六、天体物理环境对核过程的影响

(1) 实验室和恒星等离子体中的电子屏蔽效应及高密度条件下的反应(略);

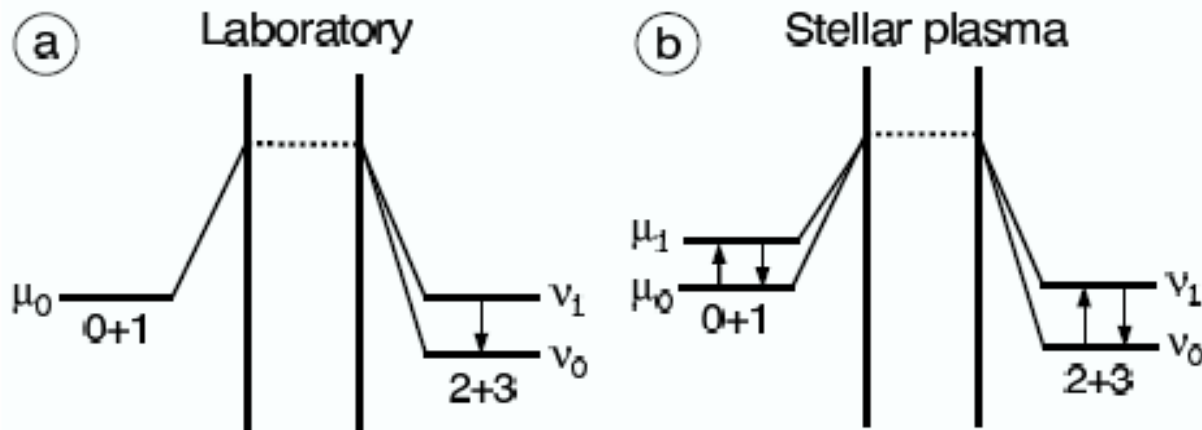
(2) 高度电离条件下的 β 衰变。天体环境中的原子通常处于高度电离的状态。理论和实验研究表明,高度电离导致某些核素的衰变模式、有效半衰期乃至稳定性发生显著的变化。例如, ^{163}Dy 中性原子是稳定的,但其裸核 $^{163}\text{Dy}^{66+}$ 的半衰期变成 47 ± 5 年; ^{187}Re 中性原子的半衰期为 43.5×10^9 年,其裸核 $^{187}\text{Re}^{75+}$ 的缩短为 32.9 ± 2.0 年。这对恒星中的s-过程核合成有不可忽视的影响(略);

(3) 激发态热布居对反应率和衰变率的影响(理论课题)

恒星中的原子核处于高温光子与自由电子的包围之中。由于与光子和电子的相互作用,原子核不仅处于其基态,还布居其激发态。在达到热平衡的情况下,激发态的相对布居概率可用 Boltzmann 公式描述,即

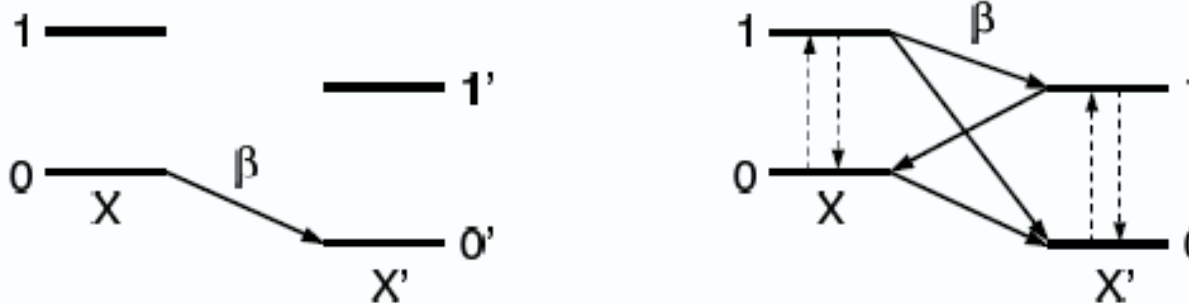
$$N_x / N_g = \{(2J_x + 1) / (2J_g + 1)\} \exp(-E_x / kT),$$

式中脚标 x 与 g 分别表示激发态和基态, J_x 与 E_x 分别表示激发态的自旋和激发能。当环境温度超过 10^8 K时,某些核素低激发态的热布居概率达到不可忽略的程度。例如,当 $T_9=1.5$ 时, ^{19}Ne 处于其第一激发态的概率达到47%。



实验室和恒星
等离子体中两
体反应示意图

在实验室条件下，入射道0 和1通常处于其基态，出射道2 和3 的激发态可能被布居；在恒星等离子体中，0，1，2，3 的激发态都可能参与反应。

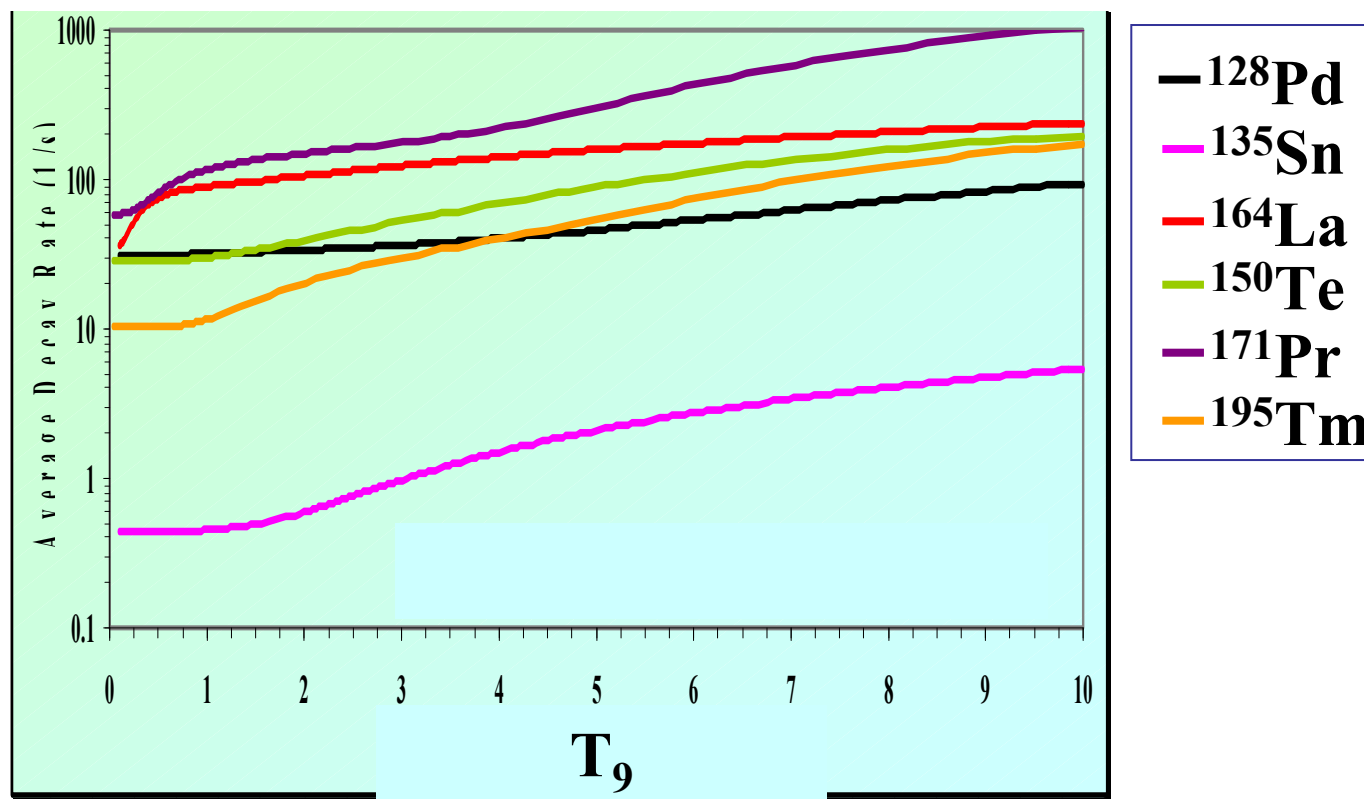


实验室和恒星
等离子体中 β -
衰变示意图

X 和 X' 分别表示母核和子核；0 和1 分别表示基态和第一激发态。在实验室中， β -衰变从母核基态跃迁到子核的基态及激发态；在恒星等离子体中，由于激发态的热布居，可能发生更复杂的跃迁过程。

激发态热布居对r过程核 β -衰变率的影响(理论计算)

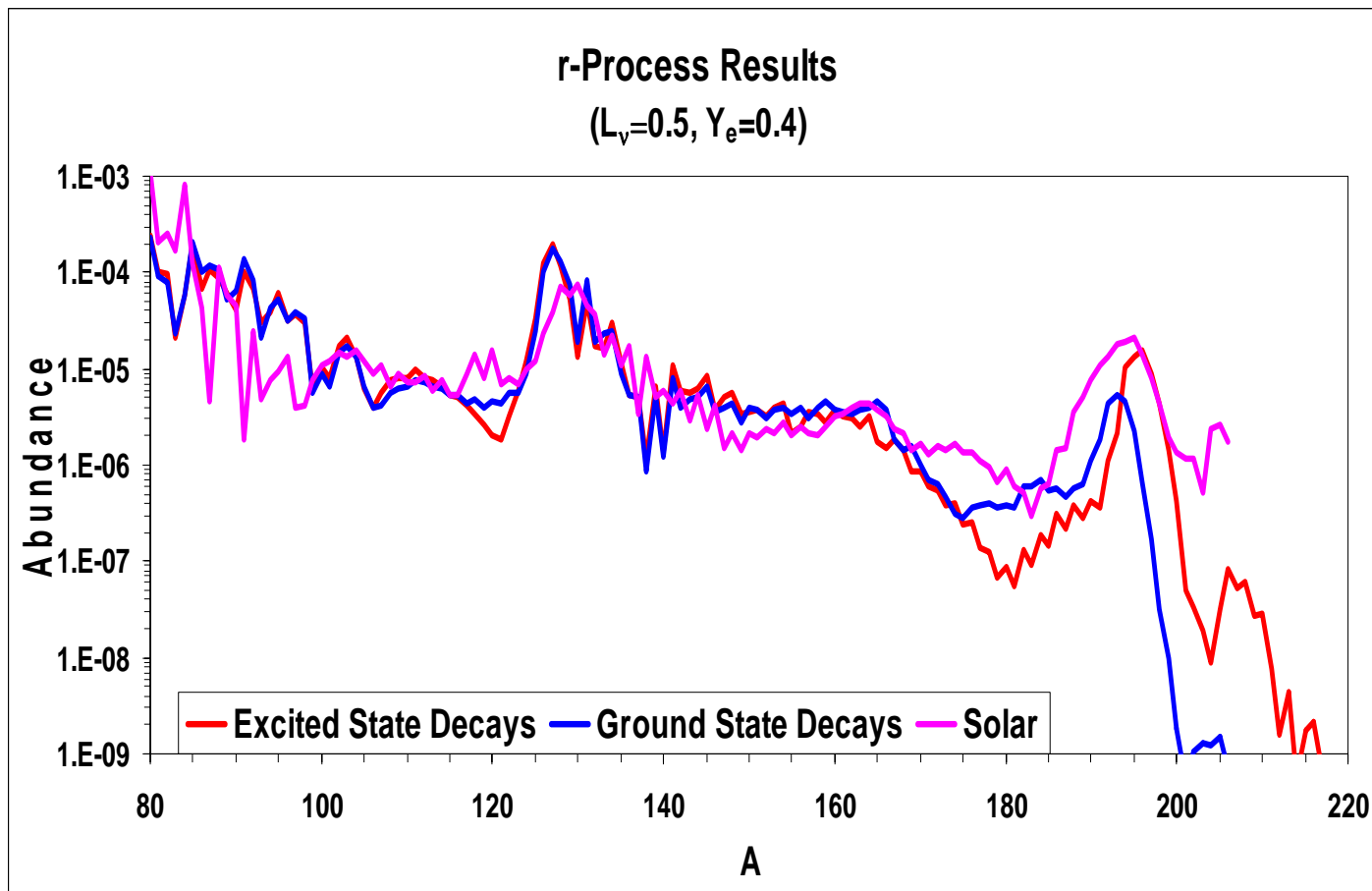
M. A. Famiano et al., Effects of β -decays of excited-state nuclei on the astrophysical r-process. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 35, 025203 (2008)



平均衰变率随温度的变化

激发态热布居不仅改变了有效衰变率，还改变了许多反应的有效Q值

激发态 β -衰变对r-过程核合成的影响



通过 β -缓发中子发射和冻结相互作用
改进了r-过程丰度分布的模型计算

结束语

1. 核天体物理的研究现状距真正实现其目标还相去甚远。在某种意义上可以说，核天体物理实验比传统核物理实验更为艰难。伴随地下实验室、新一代放射性离子束装置、更先进的探测技术、理论研究和网络方程的发展，核天体物理研究正进入一个新阶段。
2. 1991年以来，原子能院小组在基金委的连续资助下，利用串列加速器次级束流线和Q3D磁谱仪，开展了若干重要核天体物理反应的间接测量和理论研究，取得了一批得到国际同行肯定的研究成果；形成了中青老人员结构合理，实验与理论结合紧密的研究团队，实验经验、理论水平和知识积累都上了一个台阶。近年来加强了与天体物理和天文学界专家的交流，受益匪浅。我们有信心站在新的起点上，与本群体院外的何建军，施建荣和唐晓东三位专家一道，充分利用国内实验条件，结合国际合作，如期实现预定的各项研究目标。

谢 谢！