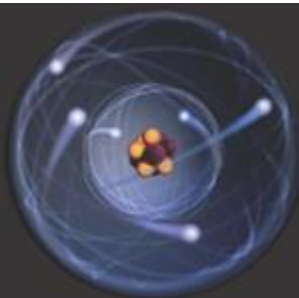




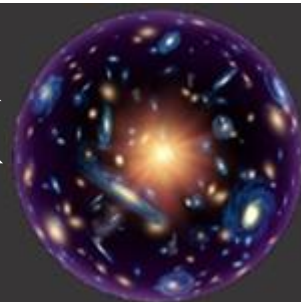
中国原子能科学研究院

China Institute of Atomic Energy



天体演化过程涉及的光核反应

Photonuclear reactions in astrophysical process



CEPC同步辐射光源应用研讨会

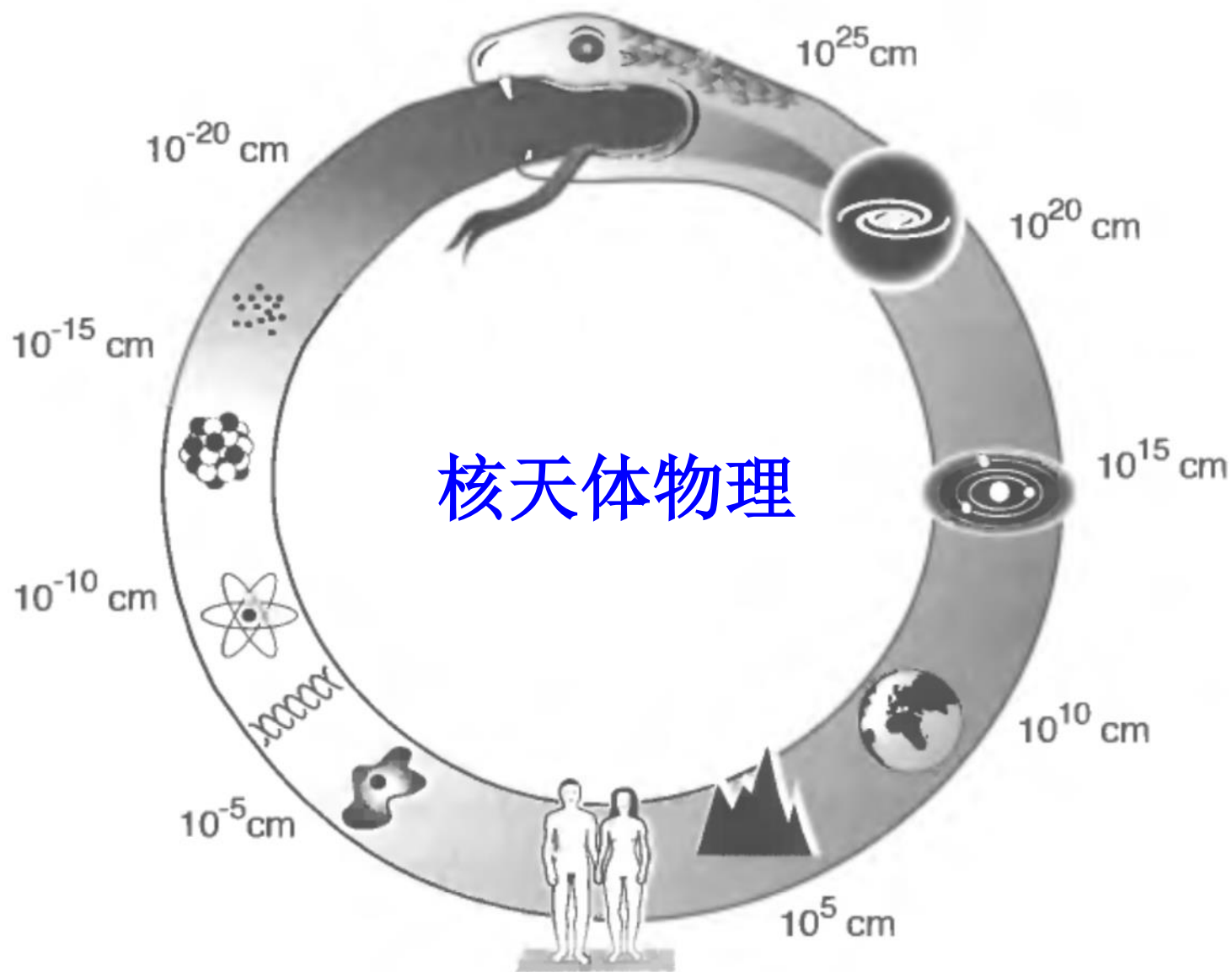
李志宏

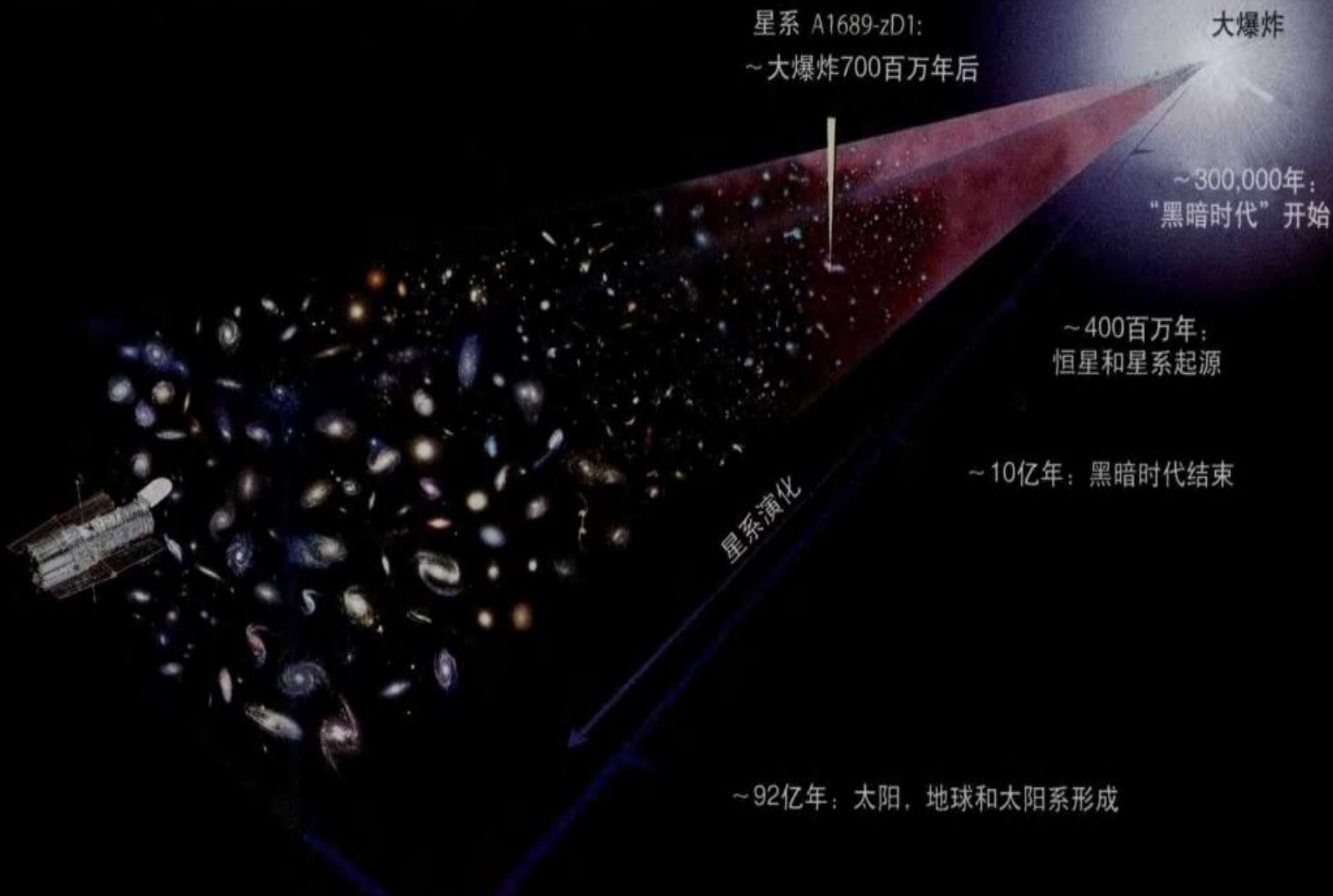
2021年4月23日

报告内容

- 天体核过程简介
- 光核反应的特点
- 光核反应在天体演化中的作用
 - 刻度宇宙演化的时间
 - 控制着核燃烧的次序
 - 决定着核过程的等待点
 - 参与重要的核过程(e-过程, r-过程, p-过程)
- 一些光核反应研究实例
- 报告总结

宇宙衔尾蛇





核过程：探索宇宙起源的钥匙

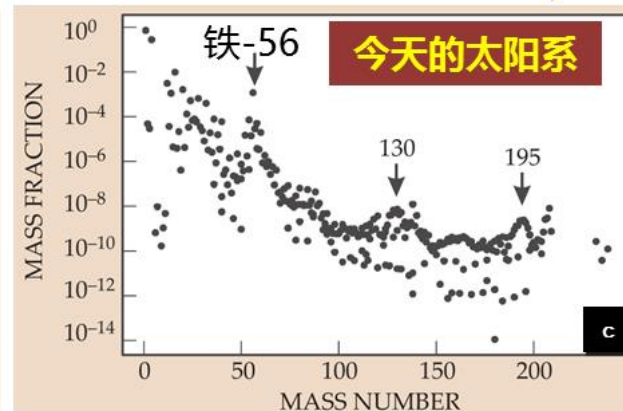
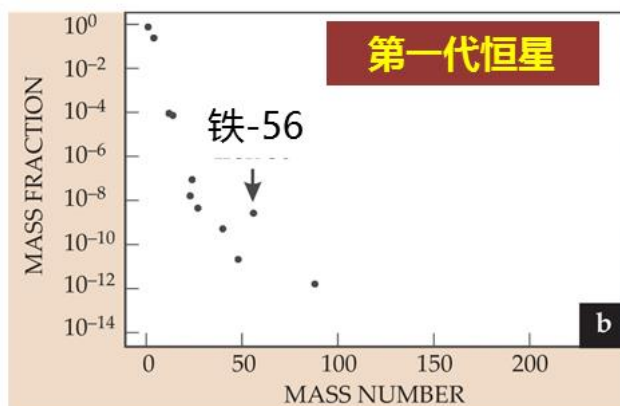
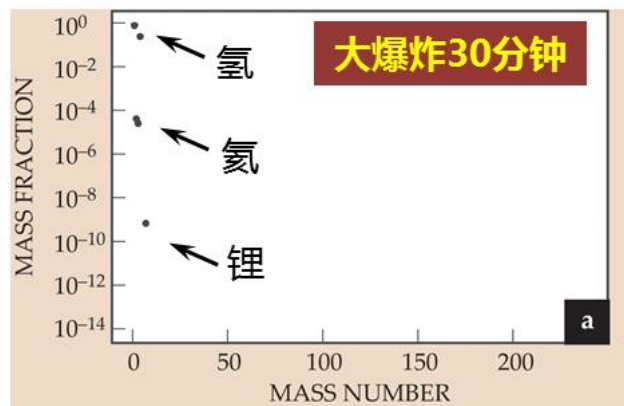
核过程：宇宙中的“炼金术士”

大爆炸30分钟后

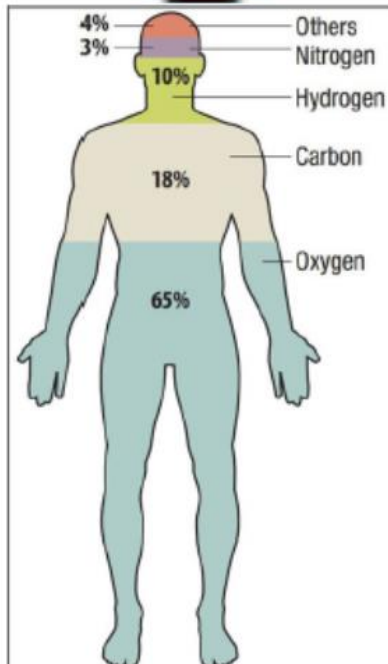
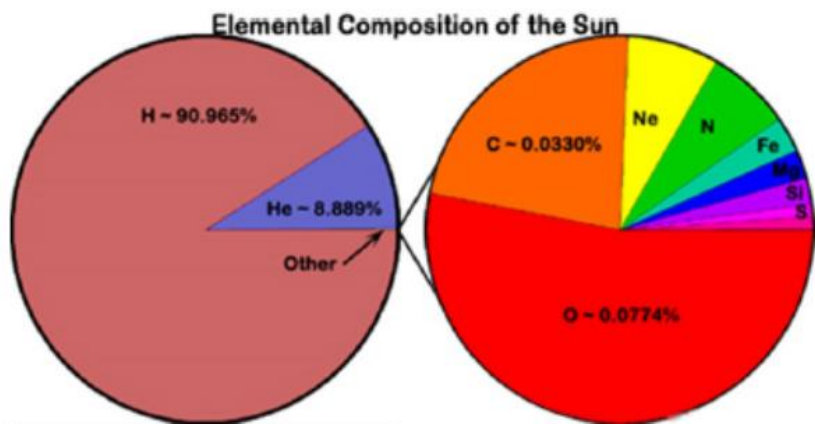
4亿年后第一代恒星形成

138亿年后的今天

时间



星系演化与人体元素



	人体	太阳
C	18	0.033
O	65	0.077
C/O	0.28	0.32

人体中的碳氧比与
太阳系中一致

The cosmos is within us. We are made of star-stuff (Carl Sagan)

Human Body Ingredients

The four ingredients below are essential parts of the body's protein, carbohydrate and fat architecture.



OXYGEN

65.0%

Critical to the conversion of food into energy.



CARBON

18.5%

The so-called backbone of the building blocks of the body and a key part of other important compounds, such as testosterone and estrogen.



HYDROGEN

9.5%

Helps transport nutrients, remove wastes and regulate body temperature. Also plays an important role in energy production.



NITROGEN

3.3%

Found in amino acids, the building blocks of proteins; an essential part of the nucleic acids that constitute DNA.

(Percentage of body weight. Source: *Biology*, Campbell and Reece, eighth edition.)

Other Key Elements

Calcium 1.5%

Lends rigidity and strength to bones and teeth; also important for the functioning of nerves and muscles, and for blood clotting.

Phosphorus 1.0%
Needed for building and maintaining bones and teeth; also found in the molecule ATP (adenosine triphosphate), which provides energy that drives chemical reactions in cells.

Potassium 0.4%
Important for electrical signaling in nerves and maintaining the balance of water in the body.

Sulfur 0.3%
Found in cartilage, insulin (the hormone that enables the body to use sugar), breast milk, proteins that play a role in the immune system, and keratin, a substance in skin, hair and nails.

Chlorine 0.2%
Needed by nerves to function properly; also helps produce gastric juices.

Sodium 0.2%
Plays a critical role in nerves' electrical signaling; also helps regulate the amount of water in the body.

Magnesium 0.1%
Plays an important role in the structure of the skeleton and muscles; also found in molecules that help enzymes use ATP to supply energy for chemical reactions in cells.

Iodine (trace amount)
Part of an essential hormone produced by the thyroid gland; regulates metabolism.

Iron (trace amount)
Part of hemoglobin, which carries oxygen in red blood cells.

Zinc (trace amount)
Forms part of some enzymes involved in digestion.

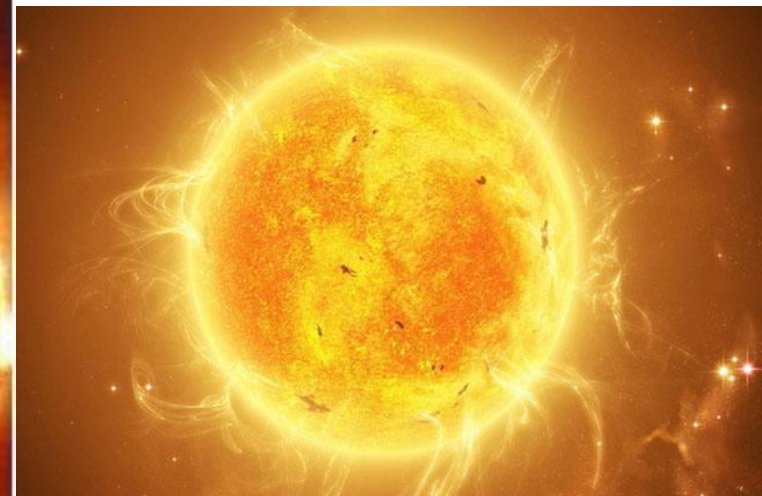


自然界中的能量来源



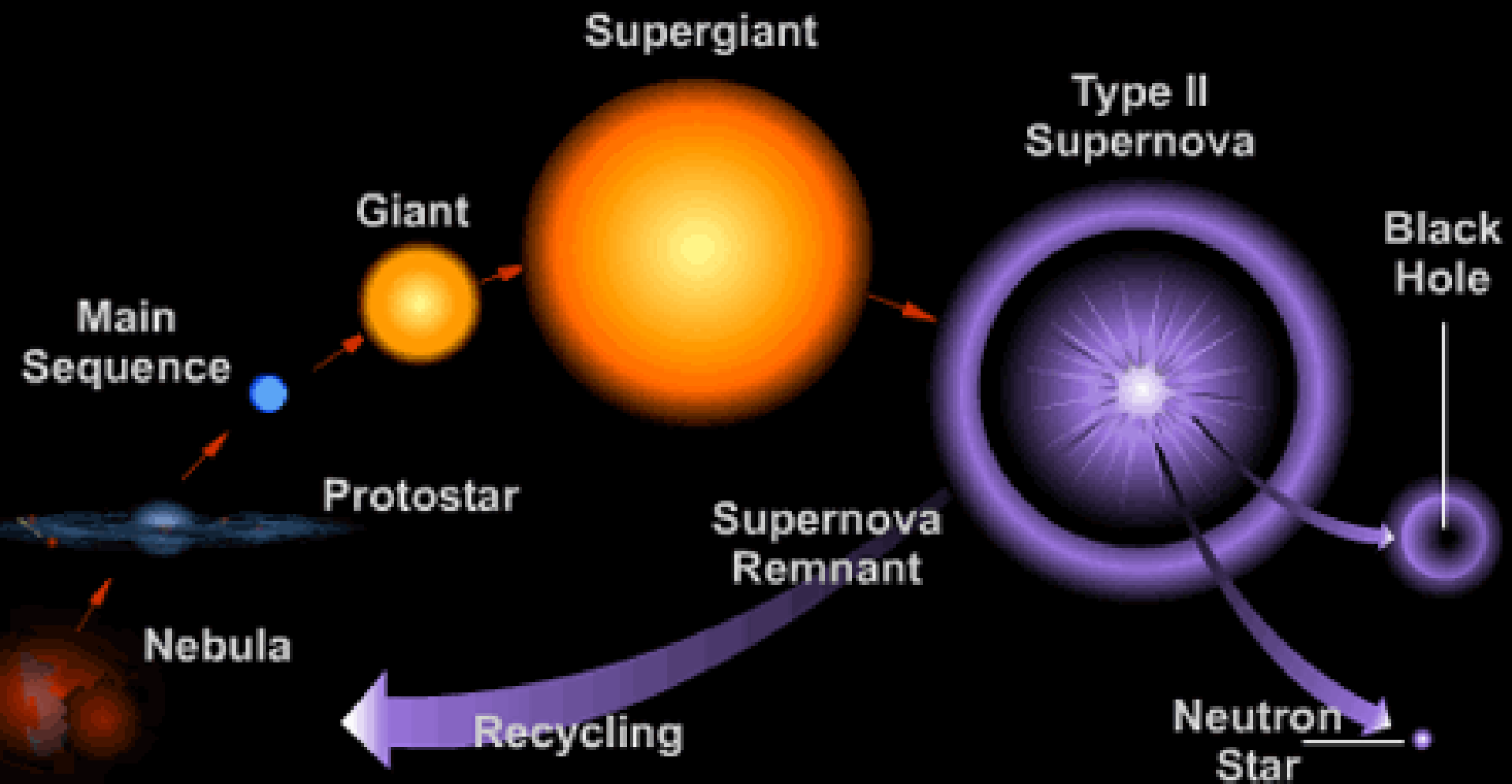
点亮宇宙的第一颗恒星

恒星的寿命

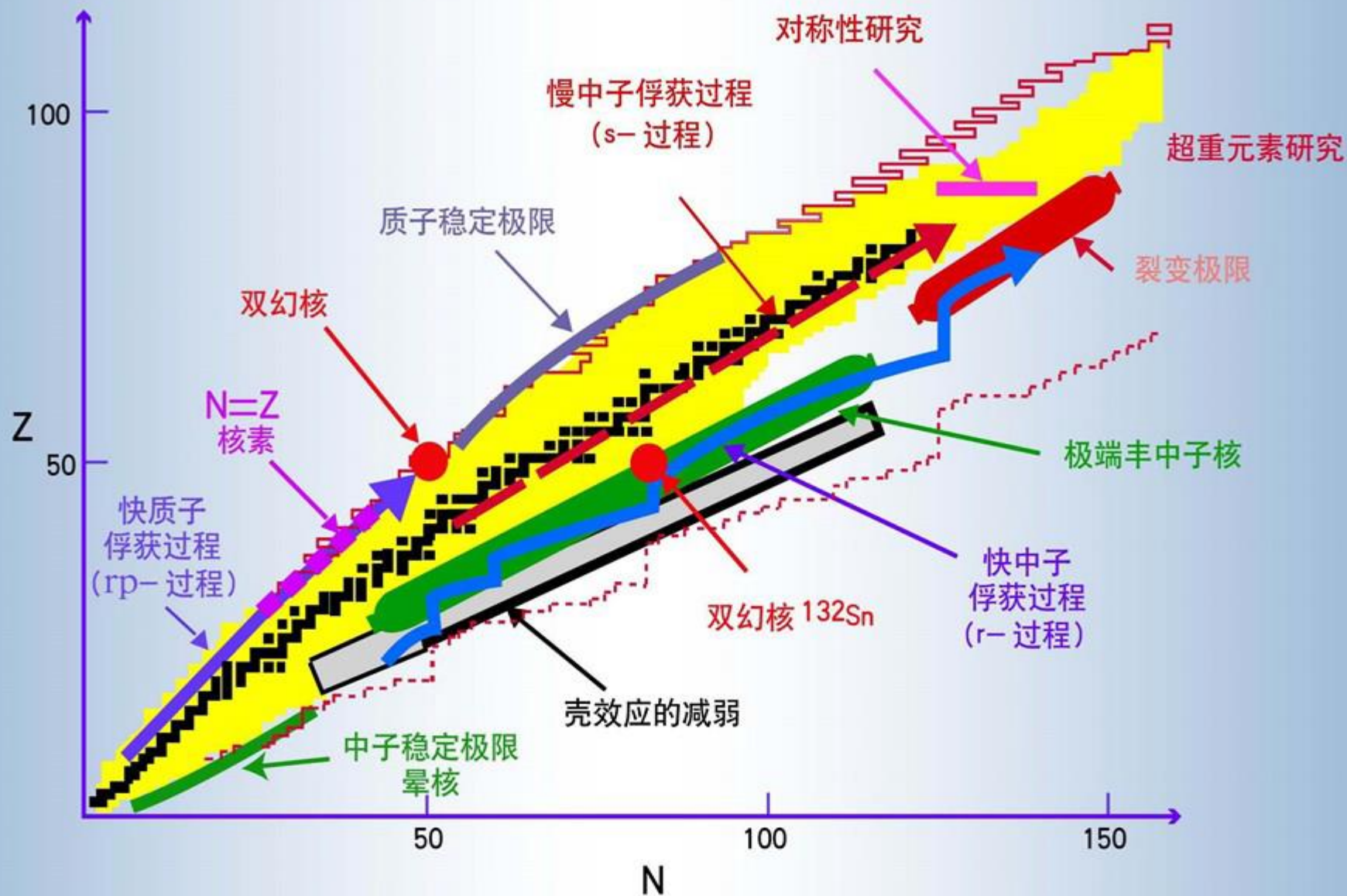


太阳持续提供光和
热能量来源

大质量恒星的演化路径



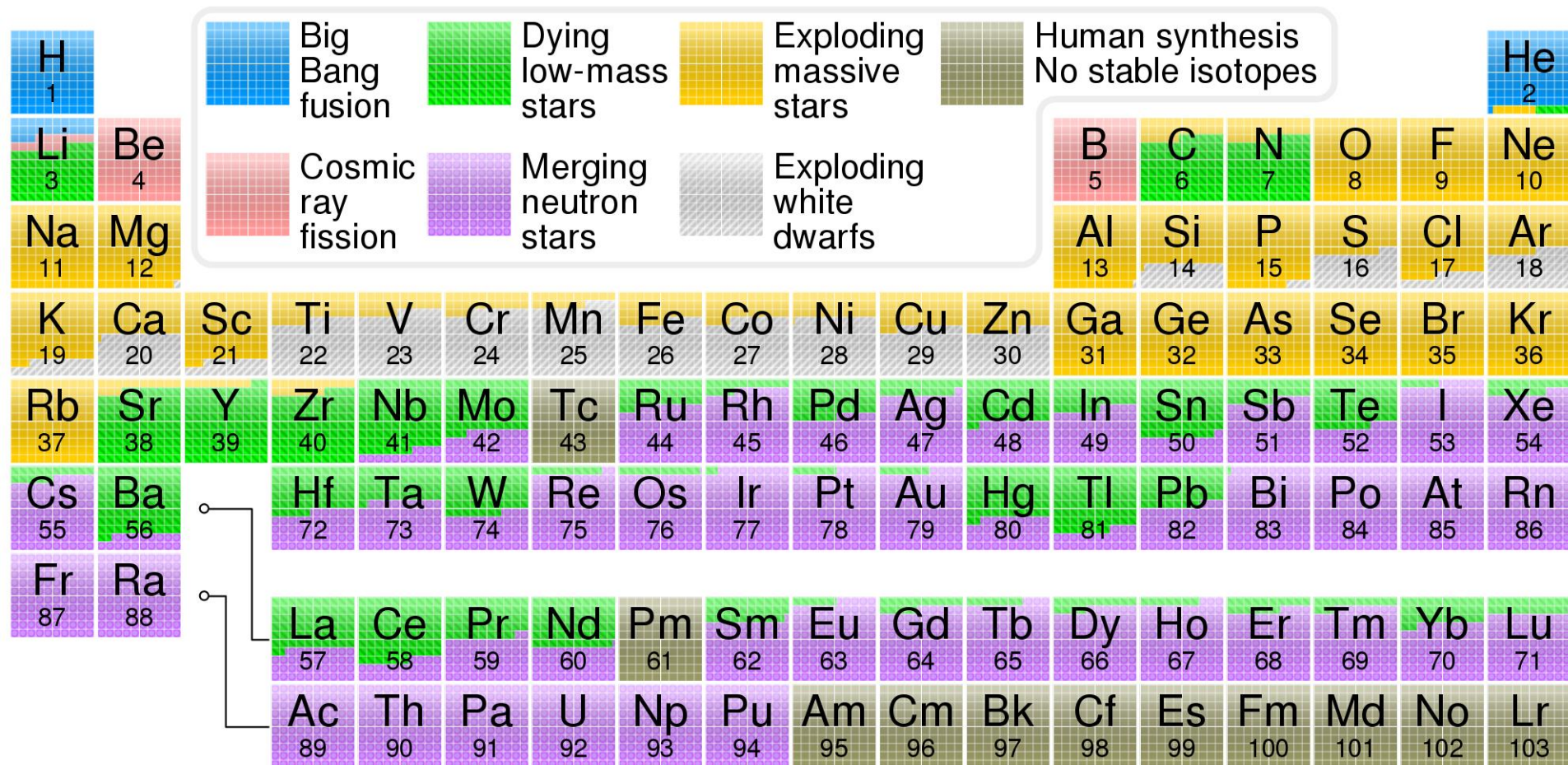
元素合成的路线图



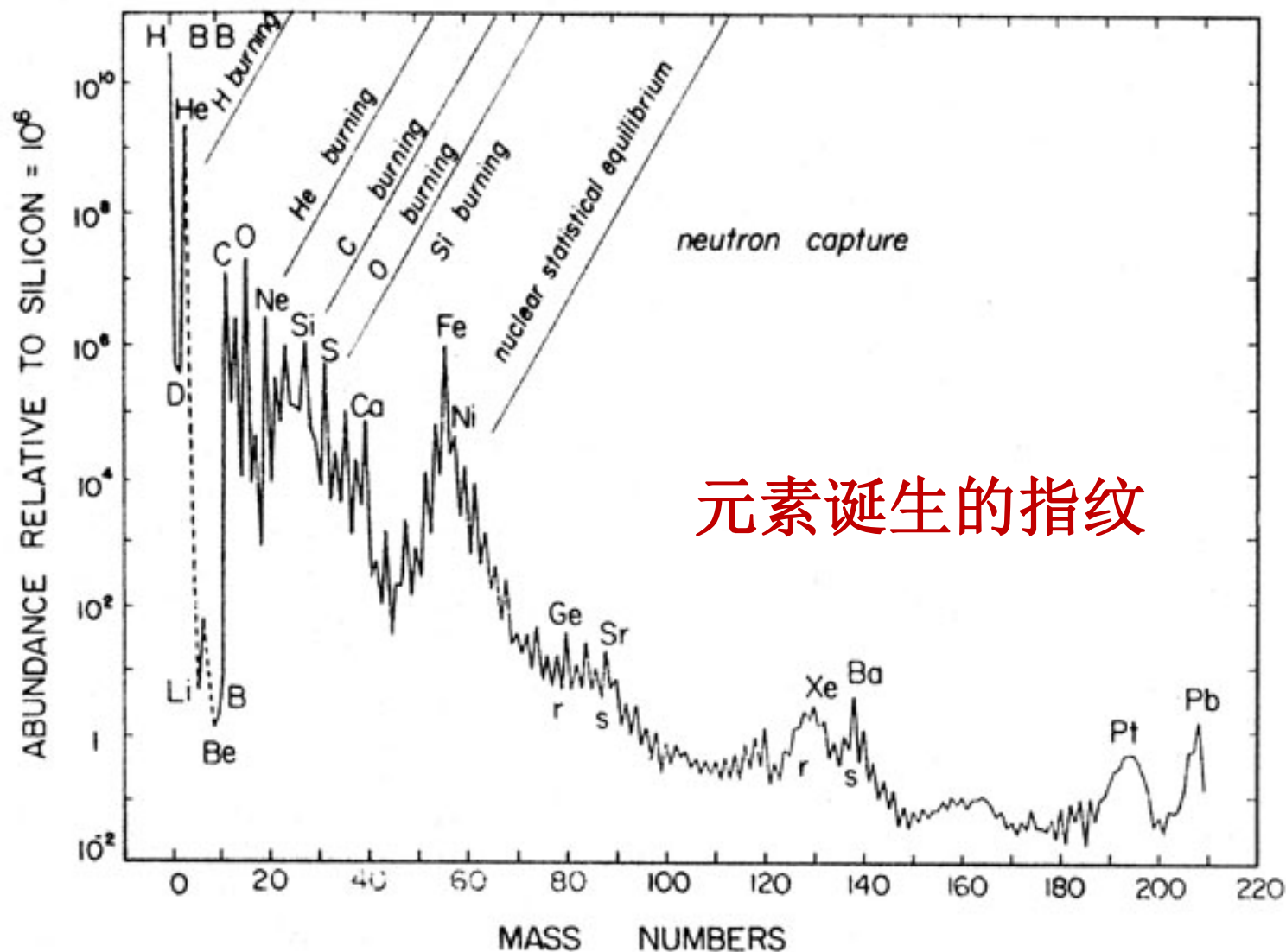
天体核合成过程

- 大爆炸核合成（生成氢、氦和少量的锂元素）
- 恒星核燃烧过程（从氢到铁元素的产生）
 - 氢、氦、碳、氮、氧、硅的核燃烧
- 比铁重的元素合成
 - 红巨星阶段的s-过程
 - 超新星或千新星阶段的r-过程
 - 产生丰质子核的p-过程
- 宇宙线核合成（产生Li、Be、B等元素）

宇宙中元素的起源



太阳系中的核素丰度



元素诞生的指纹

从元素的丰度可以追踪其核合成的细节！

报告内容

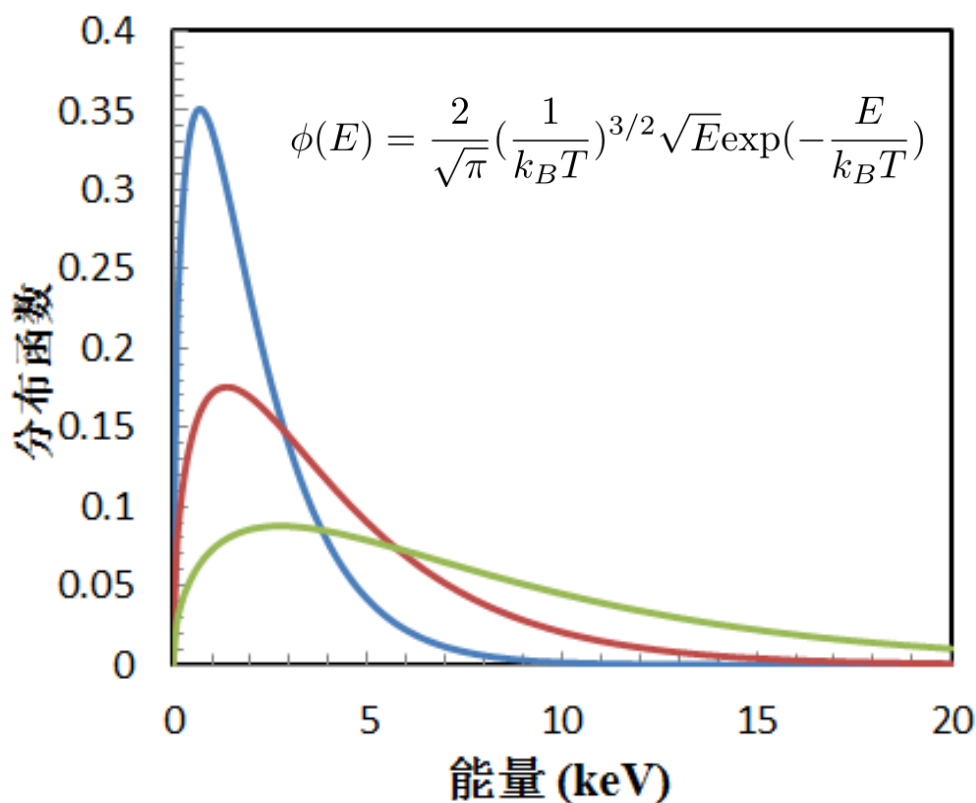
- 天体核过程简介
- **光核反应的特点**
- 光核反应在天体演化中的作用
 - 刻度宇宙演化的时间
 - 控制着核燃烧的次序
 - 决定着核过程的等待点
 - 参与重要的核过程(e-过程, r-过程, p-过程)
- 一些光核反应研究实例
- 报告总结

宇宙中可见物质的主要成份

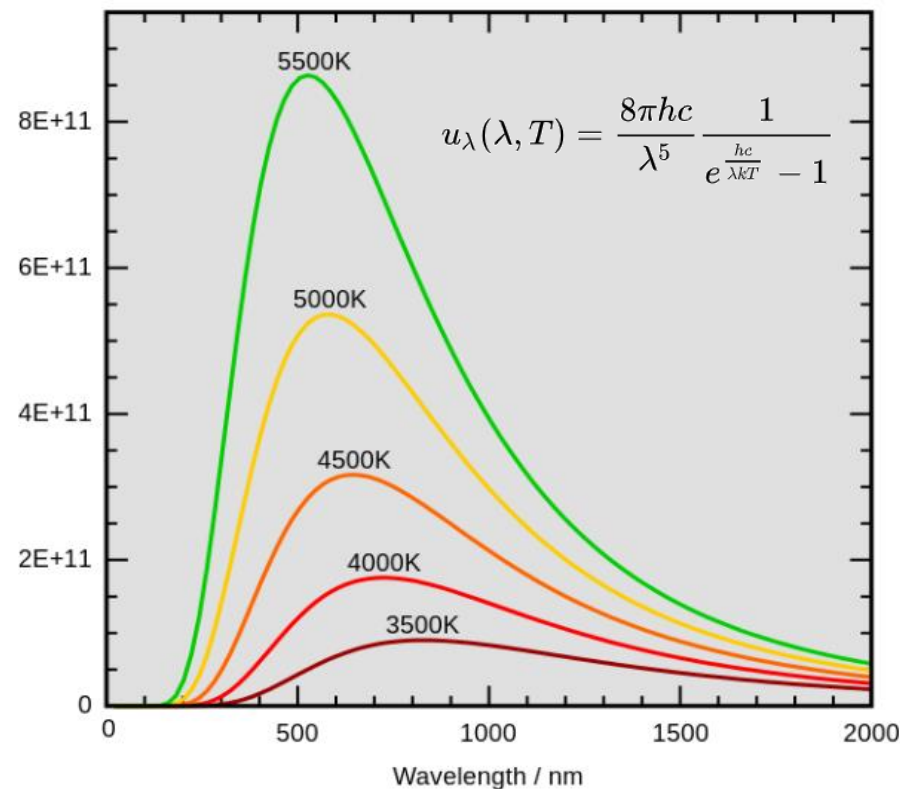
重子

$$\eta = \frac{n_N}{n_\gamma}$$

光子



麦克斯韦-玻尔兹曼分布

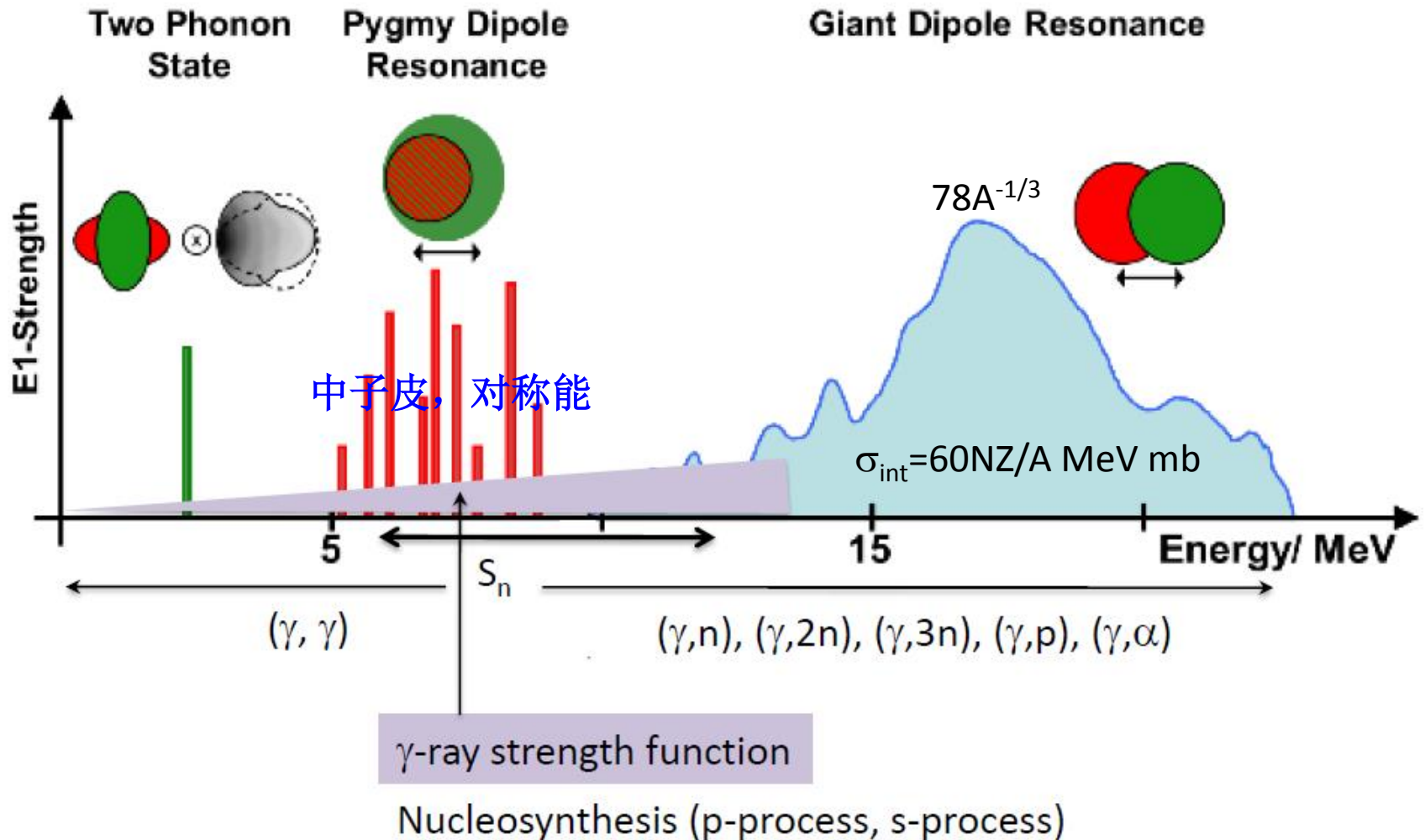


普朗克分布

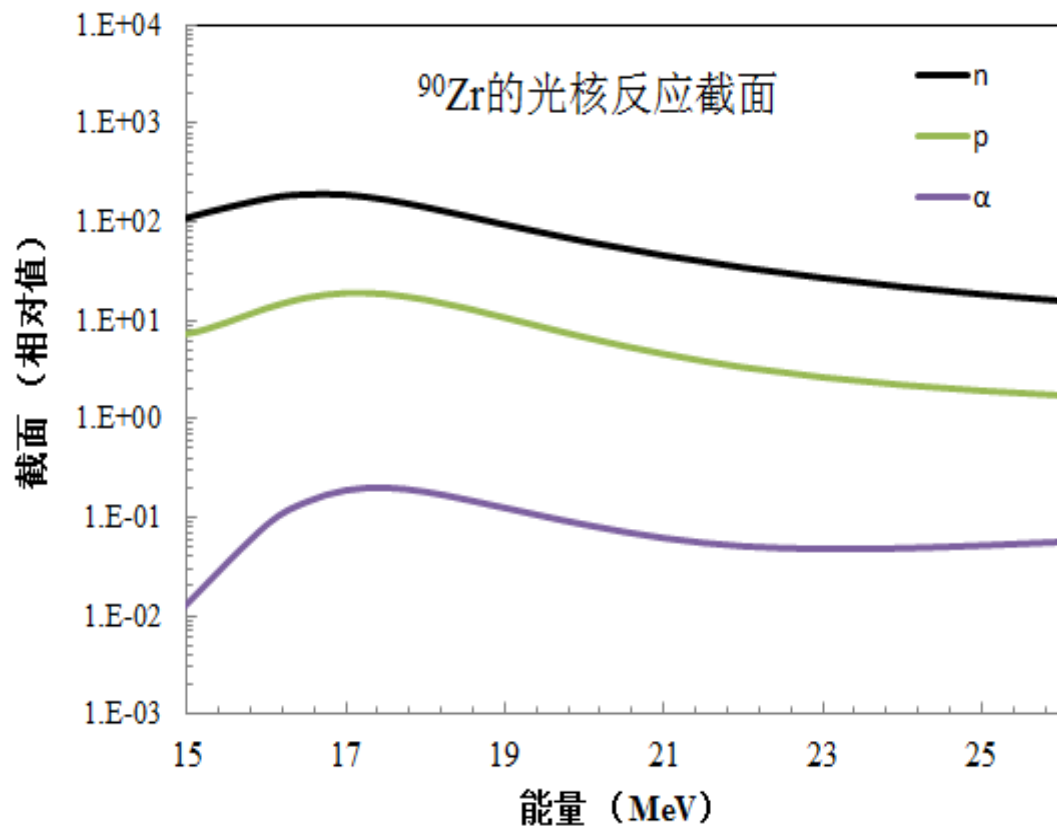
天体环境中光子的来源

- 正负电子对的湮灭
- 电子的韧致辐射
- 高能电子的逆康普顿散射
- 一些 π 介子的衰变
- 核激发态的 γ 跃迁
- 恒星等离子体中的电子加速
- 超新星或活动星系核的 γ 辐射

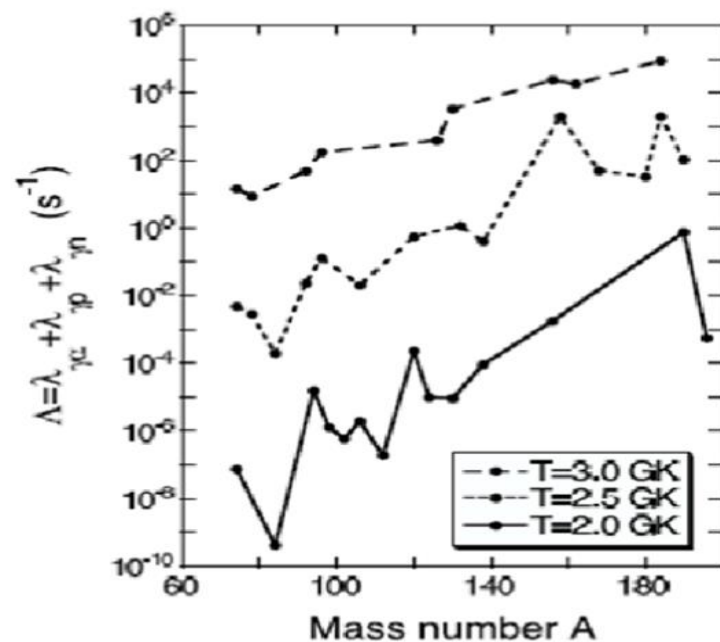
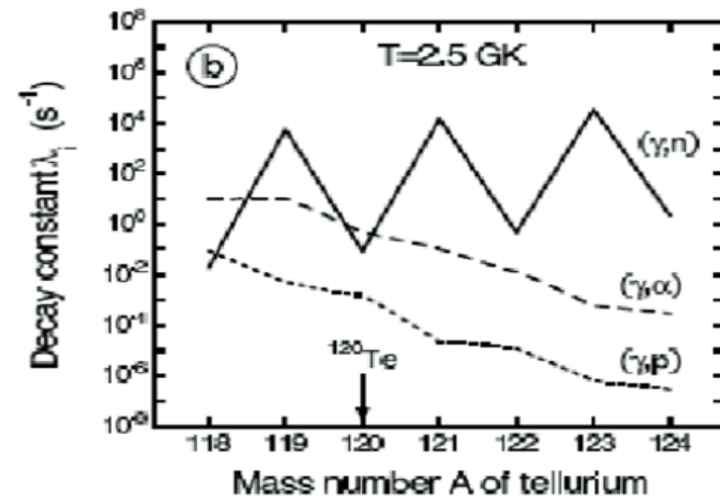
光核反应的特点



光核反应的主要出射道及温度相关性



$(\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, \alpha)$ 为主要的核反应出射道



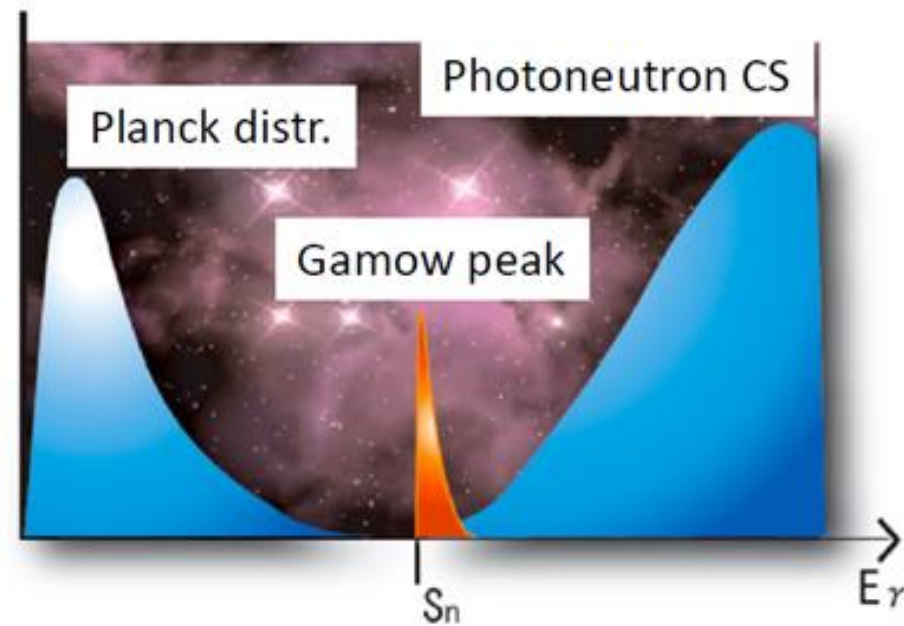
光核反应的伽莫夫窗口

Photoreaction rates for gs

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

Planck distribution

$$n_{\gamma}(E, T) dE = \frac{1}{\pi^2} \frac{1}{(hc)^3} \frac{E^2}{\exp(E / kT) - 1} dE$$



P. Mohr et al. Phys. Lett. B 488 (2000) 127

H. Utsunomiya et al. Nucl. Phys. A 777 (2006) 459

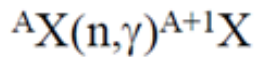
$$E_0 = 1.22(Z_1^2 Z_2^2 \mu T_6^2)^{1/3}$$

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

伽莫夫窗口: $(E_0 - \Delta/2, E_0 + \Delta/2)$

光核反应的典型模式

Radiative neutron capture

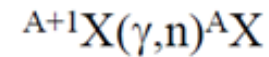


$n+{}^A\text{X}$

$$f_{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) \downarrow = \varepsilon_\gamma^{-(2\lambda+1)} \frac{\langle \Gamma_{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) \rangle}{D_\ell}$$

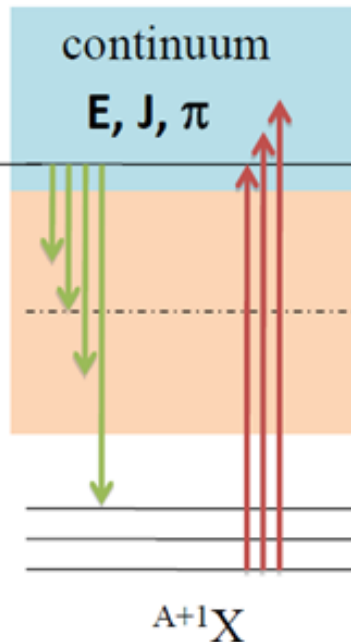
$$\varepsilon_\gamma < S_n$$

Photoneutron emission



$$f_{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) \uparrow = \frac{\varepsilon_\gamma^{-2\lambda+1}}{(\pi\hbar c)^2} \frac{\langle \sigma_{X\lambda}^{abs}(\varepsilon_\gamma) \rangle}{2\lambda+1}$$

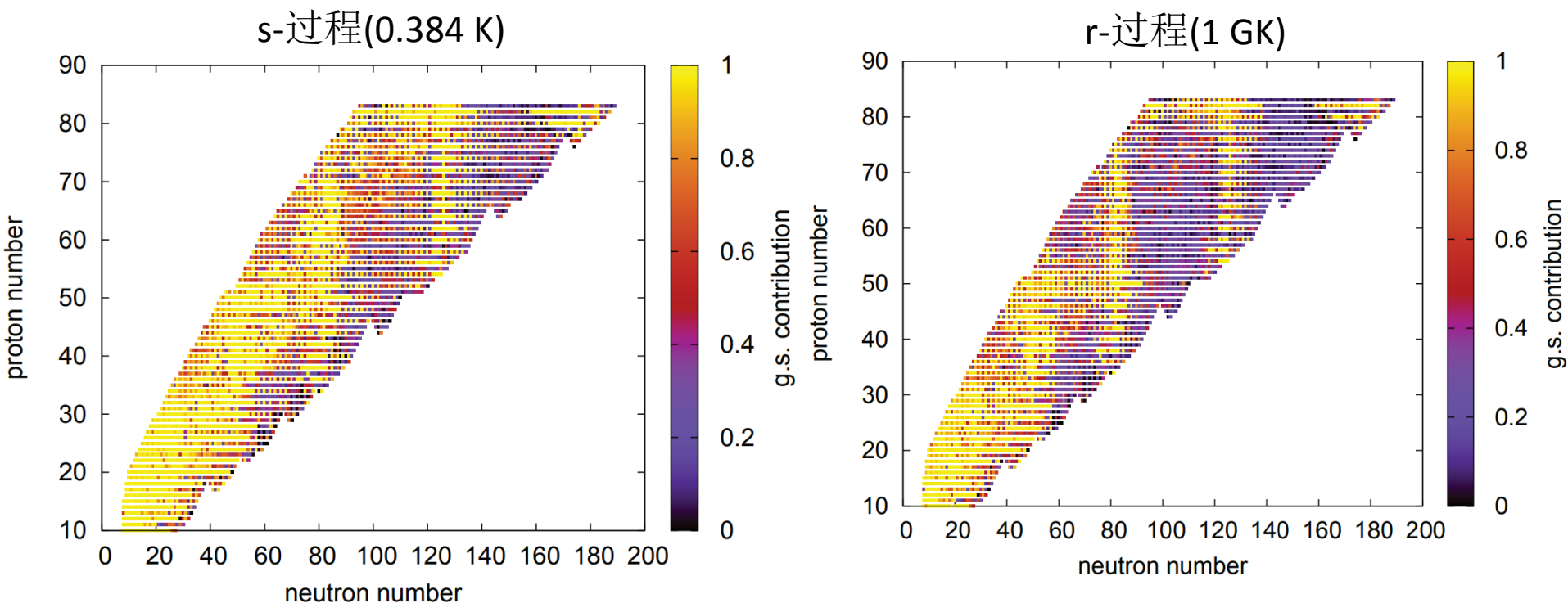
$$\varepsilon_\gamma > S_n$$



Brink Hypothesis

$$f_{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) \uparrow \cong f_{X\lambda}(\varepsilon_\gamma) \downarrow$$

原子核激发态对核过程的贡献



$$X_0(T) = \frac{2J_0 + 1}{G(T)} \frac{\int \sigma_0(E) E e^{-E/(kT)} dE}{\int \sigma^*(E, T) E e^{-E/(kT)} dE} = \frac{2J_0 + 1}{G(T)} \frac{R_0}{R^*}$$

在温度较高时，原子核激发态的影响不可忽略，需要研究激发态的能级性质

报告内容

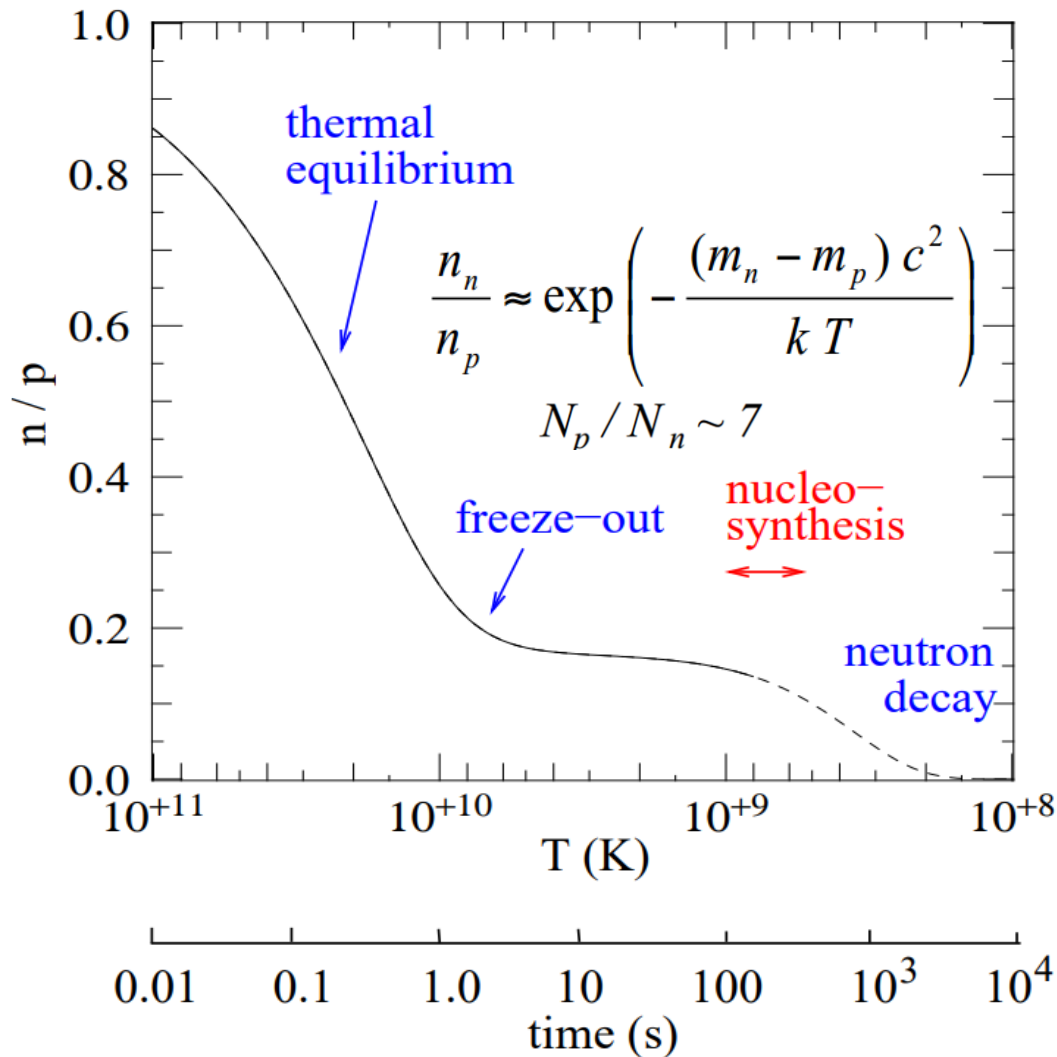
- 天体核过程简介
- 光核反应的特点
- 光核反应在天体演化中的作用
 - 刻度宇宙演化的时间
 - 控制着核燃烧的次序
 - 决定着核过程的等待点
 - 参与重要的核过程(e-过程, r-过程, p-过程)
- 一些光核反应研究实例
- 报告总结

刻度宇宙演化的时间



$$\rho = \frac{\rho_0}{\sqrt{t}^3}$$

$$T = \frac{1.5 \times 10^{10}}{\sqrt{t}}$$



氢比例:

$$X_p = \frac{N_p - N_n}{N_p + N_n}$$

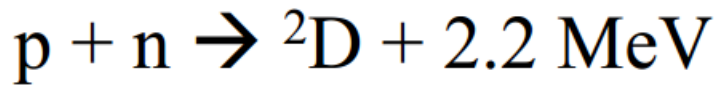
$$= \frac{6}{8} = 0.75$$

氦比例:

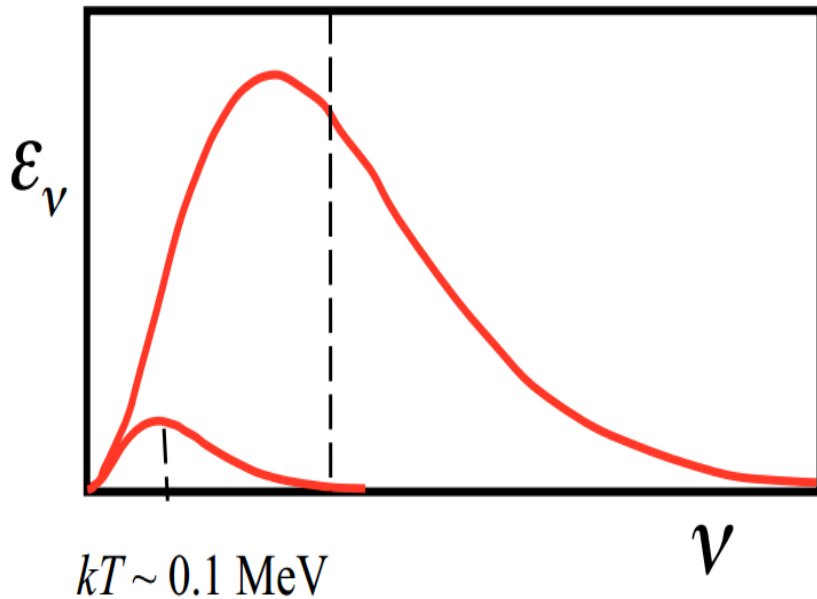
$$Y_p = \frac{2N_n}{N_p + N_n}$$

$$= \frac{2}{8} = 0.25$$

大爆炸核合成的窗口

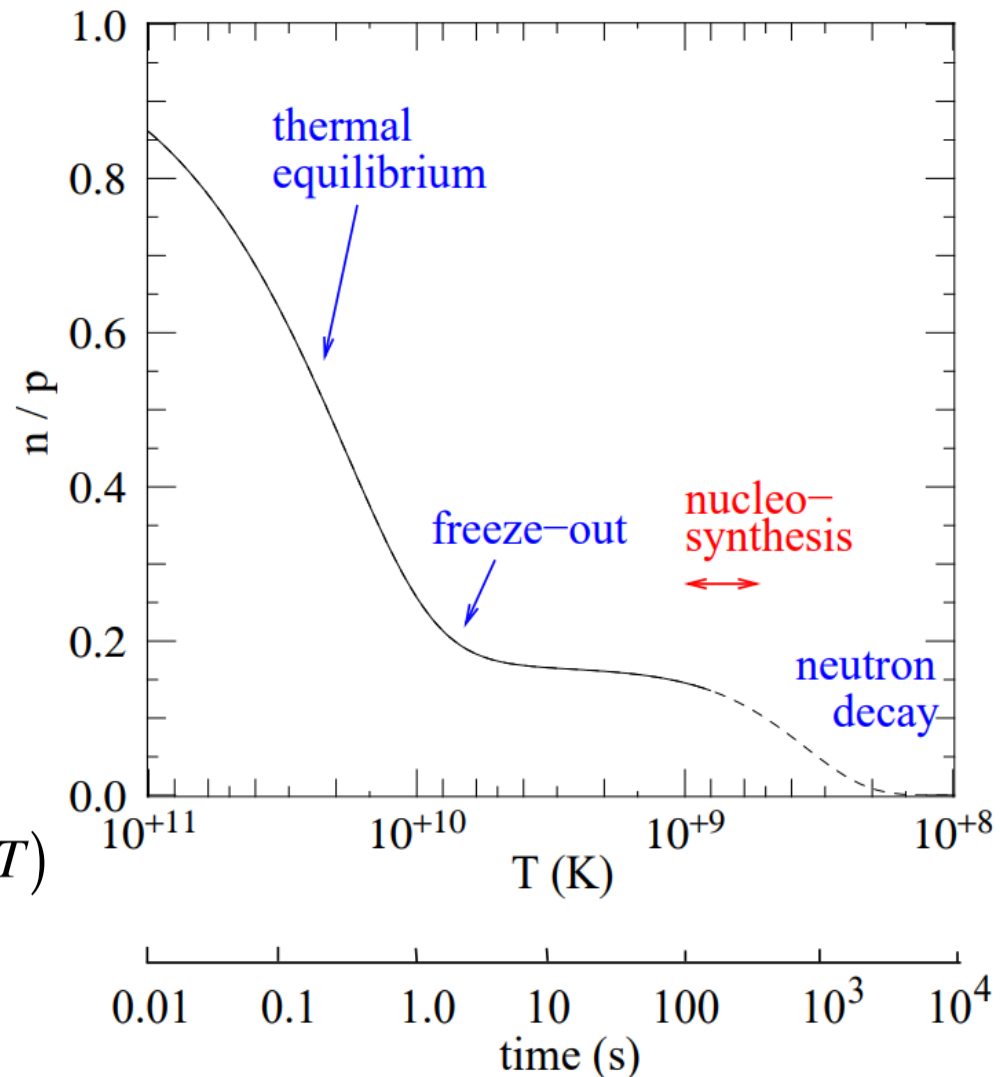


$$E \sim 2.2 \text{ MeV}$$



$$N_\gamma(h\nu > E) = \int_{E/h}^{\infty} \frac{\epsilon_\nu d\nu}{h\nu} \approx N_\gamma \exp(-E/kT)$$

$$\eta = \frac{n_N}{n_\gamma} \approx 5 \times 10^{-10}$$

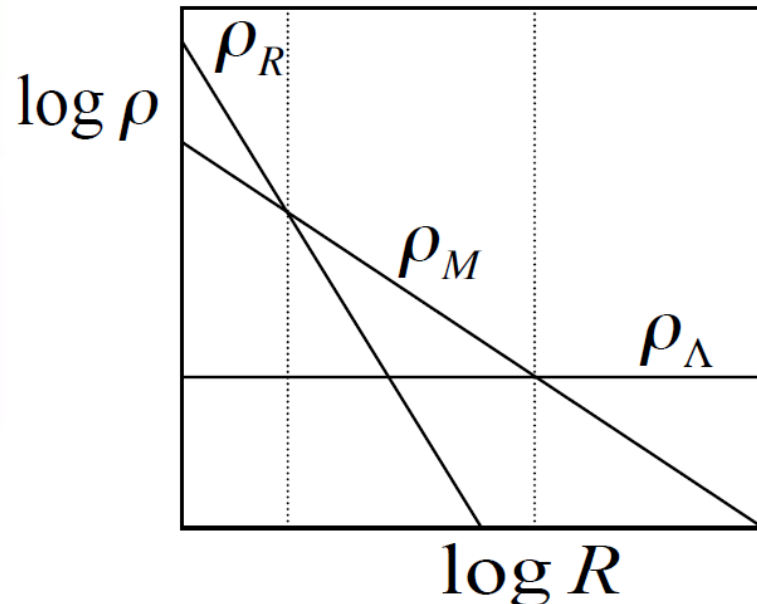


光核反应 ${}^2\text{H}(\gamma, n){}^1\text{H}$ 决定着大爆炸核合成的时间窗口

宇宙的年龄和大小



James Peebles



$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_m + \rho_\gamma + \rho_\lambda) - \frac{k}{R^2}$$

$$t = \int_0^1 \frac{da}{aH(a)} = \frac{1}{H_0} \int_0^\infty \frac{dz}{(1+z)\sqrt{\Omega_\gamma(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda}}$$

13.8 Gyr

$$r = c \int_0^1 \frac{da}{aH(a)} = \frac{c}{H_0} \int_0^\infty \frac{dz}{(1+z)\sqrt{\Omega_\gamma(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda}}$$

46.5 Gly

报告内容

- 天体核过程简介
- 光核反应的特点
- 光核反应在天体演化中的作用
 - 刻度宇宙演化的时间
 - **控制着核燃烧的次序**
 - 决定着核过程的等待点
 - 参与重要的核过程(e-过程, r-过程, p-过程)
- 一些光核反应研究实例
- 报告总结

核燃烧次序

氢燃烧：氢，1千万度

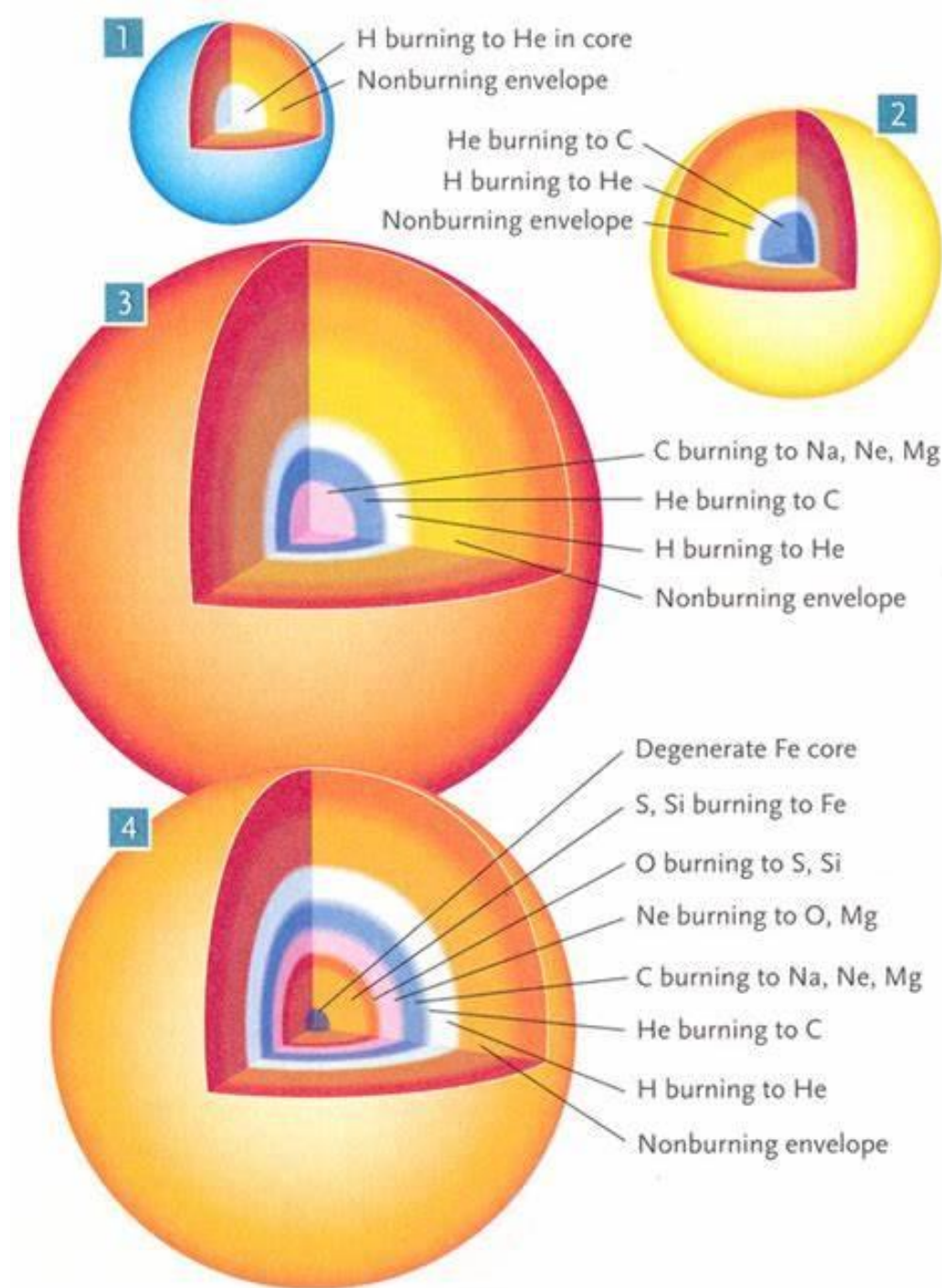
氦燃烧：碳氧，1亿度

碳燃烧：钠氖镁，10亿度

氖燃烧：氧镁，20亿度

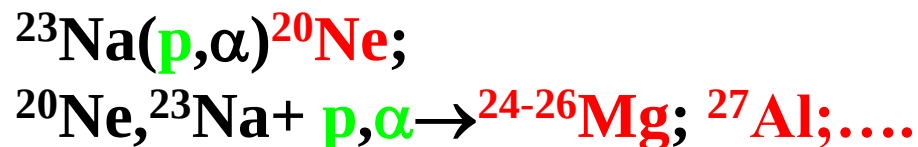
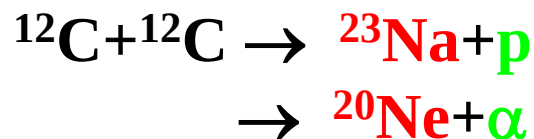
氧燃烧：硅硫磷，30亿度

硅燃烧：铁镍，40亿度

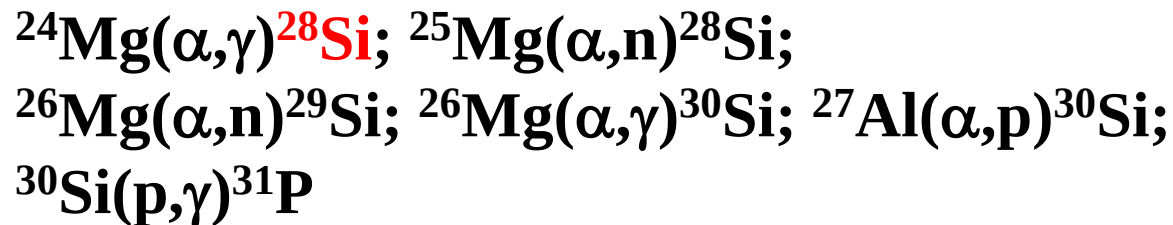
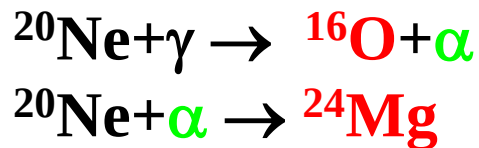


为什么氦燃烧先于氧燃烧？

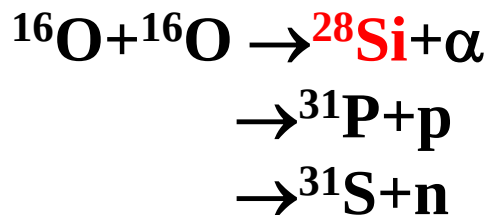
1. Carbon $\sim 5 \times 10^8$ K



2. Neon $\sim 10^9$ K

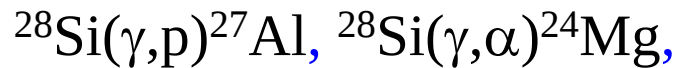


3. Oxygen $\sim 2 \times 10^9$ K



e过程

温度到达 4×10^9 K, ^{28}Si 的光致分裂导致硅分解:



一些弱束缚的核也开始分解:



自由的中子、质子、 α 粒子被原子核俘获、释放, 导致核统计平衡

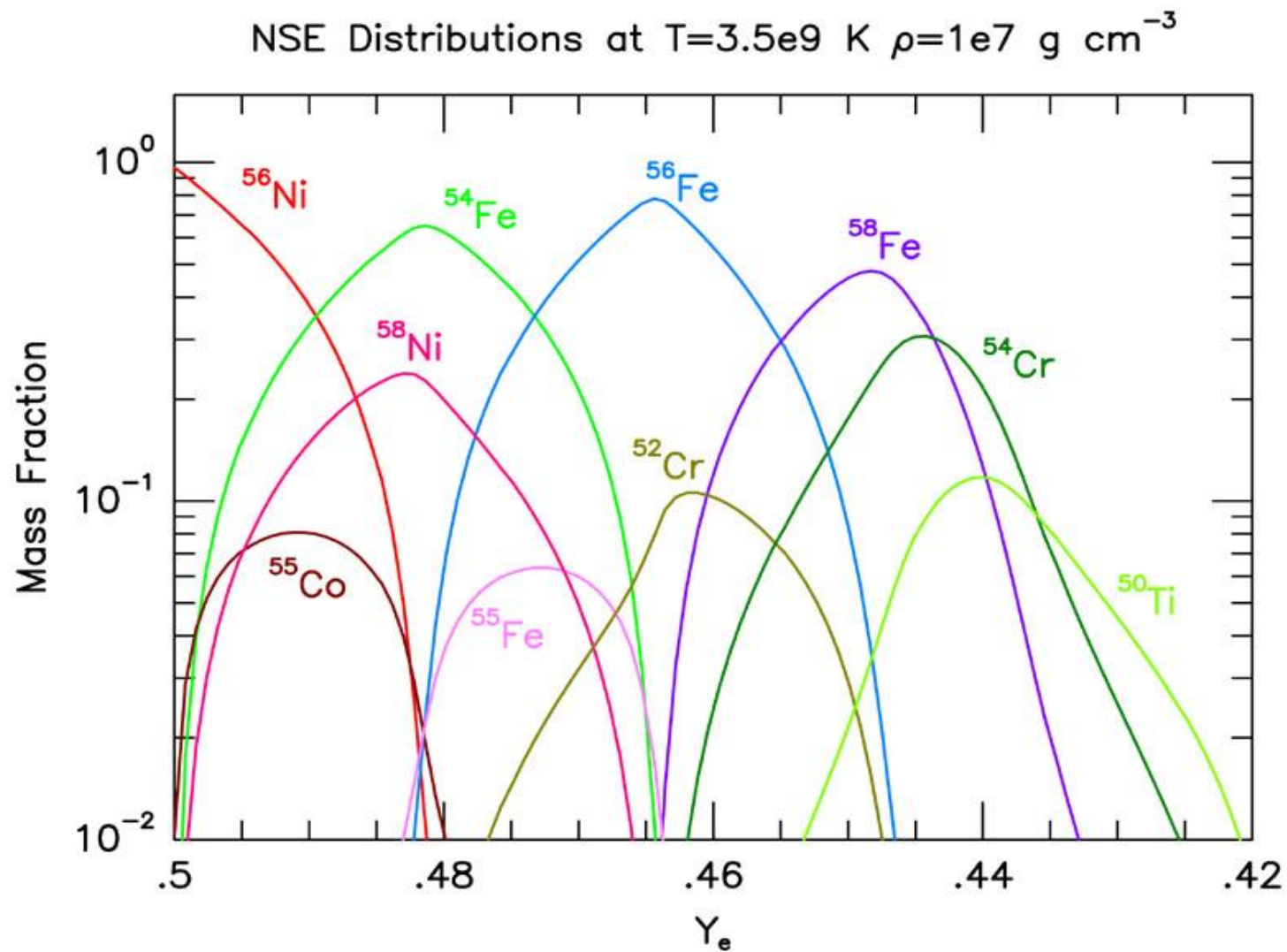
$$(\gamma, p) \approx (p, \gamma), (\gamma, \alpha) \approx (\alpha, \gamma), (\gamma, n) \approx (n, \gamma), (p, n) \approx (n, p), \dots$$

最终形成结合紧密的Fe、Ni峰

峰的分布由温度、环境的中子/质子比例、结合能决定

$$Z \cdot \mu_p + N \cdot \mu_n = \mu_{(Z,N)} \quad \mu = mc^2 + kT \ln \left[\frac{n}{g} \left(\frac{h^2}{2\pi mkT} \right)^{3/2} \right]$$
$$Y(Z, N) = Y_p^Z Y_n^N G(Z, N) (\rho N_A)^{A-1} \frac{A^{3/2}}{2^A} \left(\frac{2\pi\hbar^2}{m_u kT} \right)^{\frac{3}{2}(A-1)} e^{B(Z,N)/kT}$$

核统计平衡时的元素分布



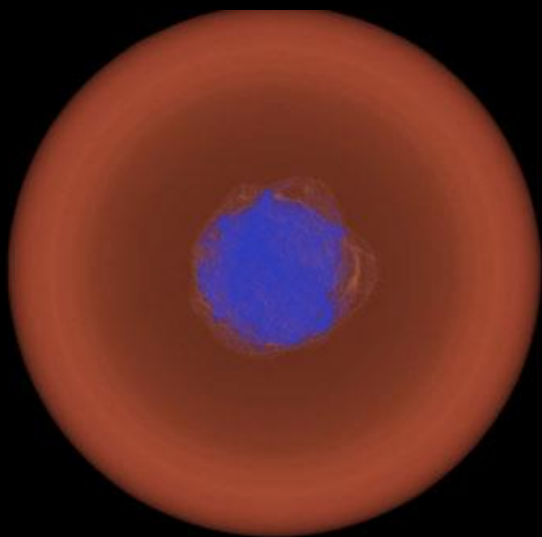
报告内容

- 天体核过程简介
- 光核反应的特点
- 光核反应在天体演化中的作用
 - 刻度宇宙演化的时间
 - 控制着核燃烧的次序
 - **决定着核过程的等待点**
 - 参与重要的核过程(e-过程, r-过程, p-过程)
- 一些光核反应研究实例
- 报告总结

重元素产生的r-过程

$$n_e = N_p / (n_n + n_p) < 0.5$$

core-collapse supernovae



中微子风驱动，质量小 10^{-6} - $10^{-5} M_{\odot}$
亮度大，r-过程的纯低

neutron star merger

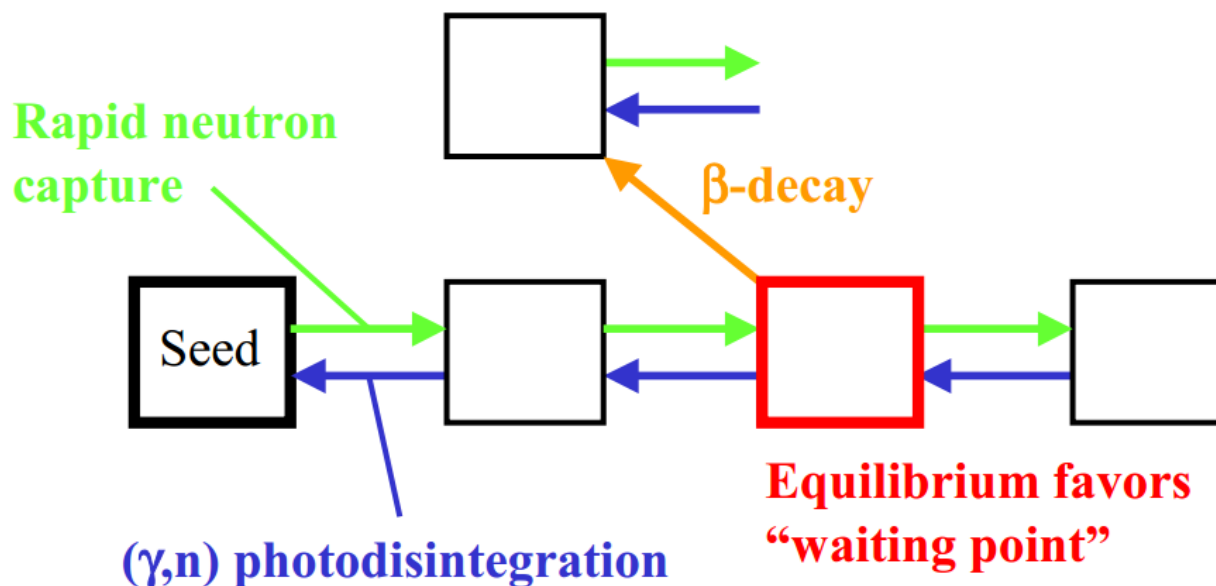


动力学抛射，盘风， 10^{-4} - $10^{-2} M_{\odot}$
亮度暗，r-过程的纯度高

$T = 1-2 \text{ GK}$, $n_n \sim 10^{24} / \text{cm}^3$ 时间尺度: $< 1 \text{ s}$

r-过程模式

10-100 g/cm³ neutrons → neutron capture timescale: $\sim 0.2 \mu\text{s}$



Location of path: $S_n = T_9/5.04 \times (34.08 + 1.5 \log T_9 - 1.5 \log n_n) = 2-4 \text{ MeV}$

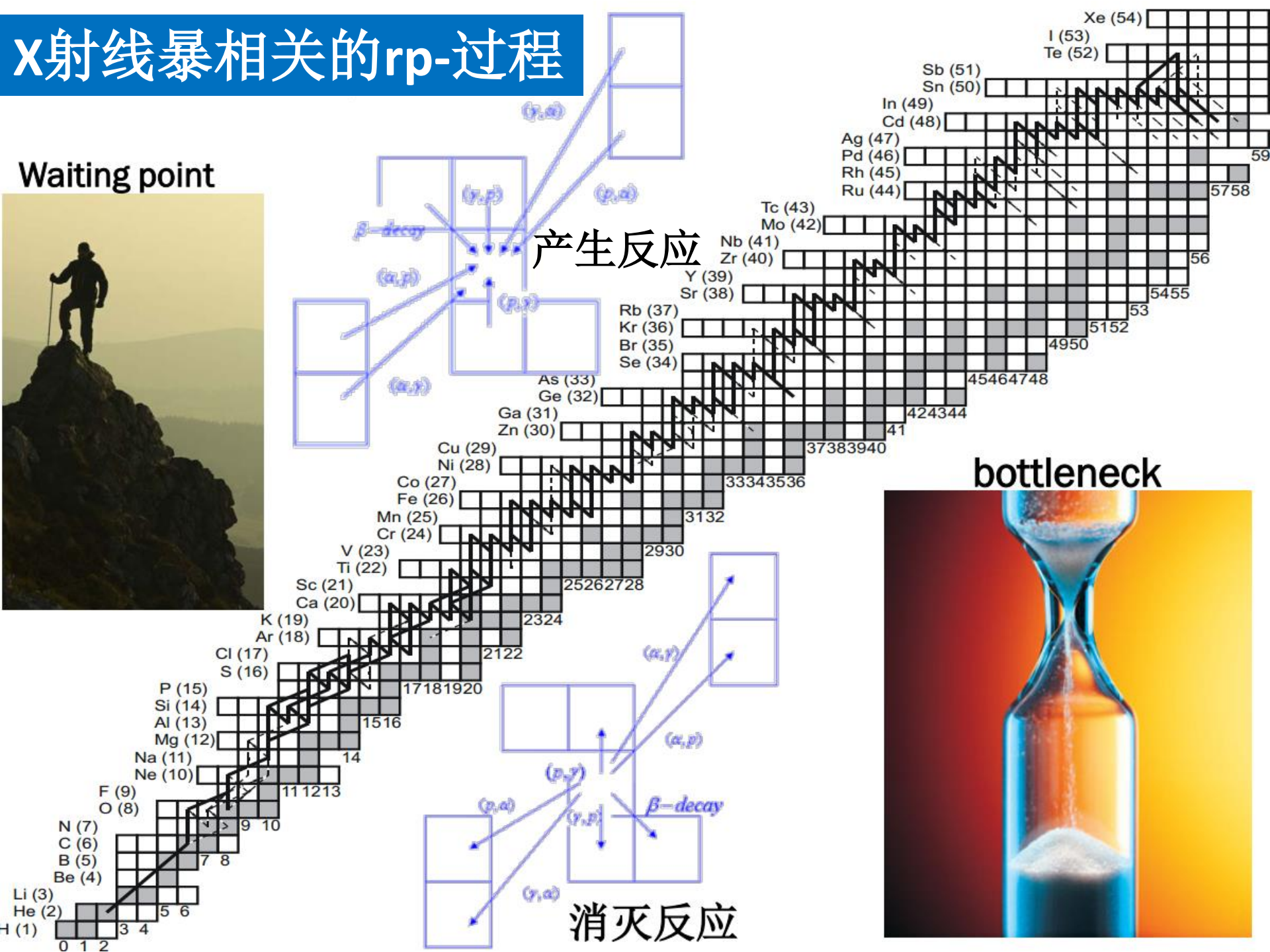
偶A核、幻数核、短半衰期的核是候选的等待点核

报告内容

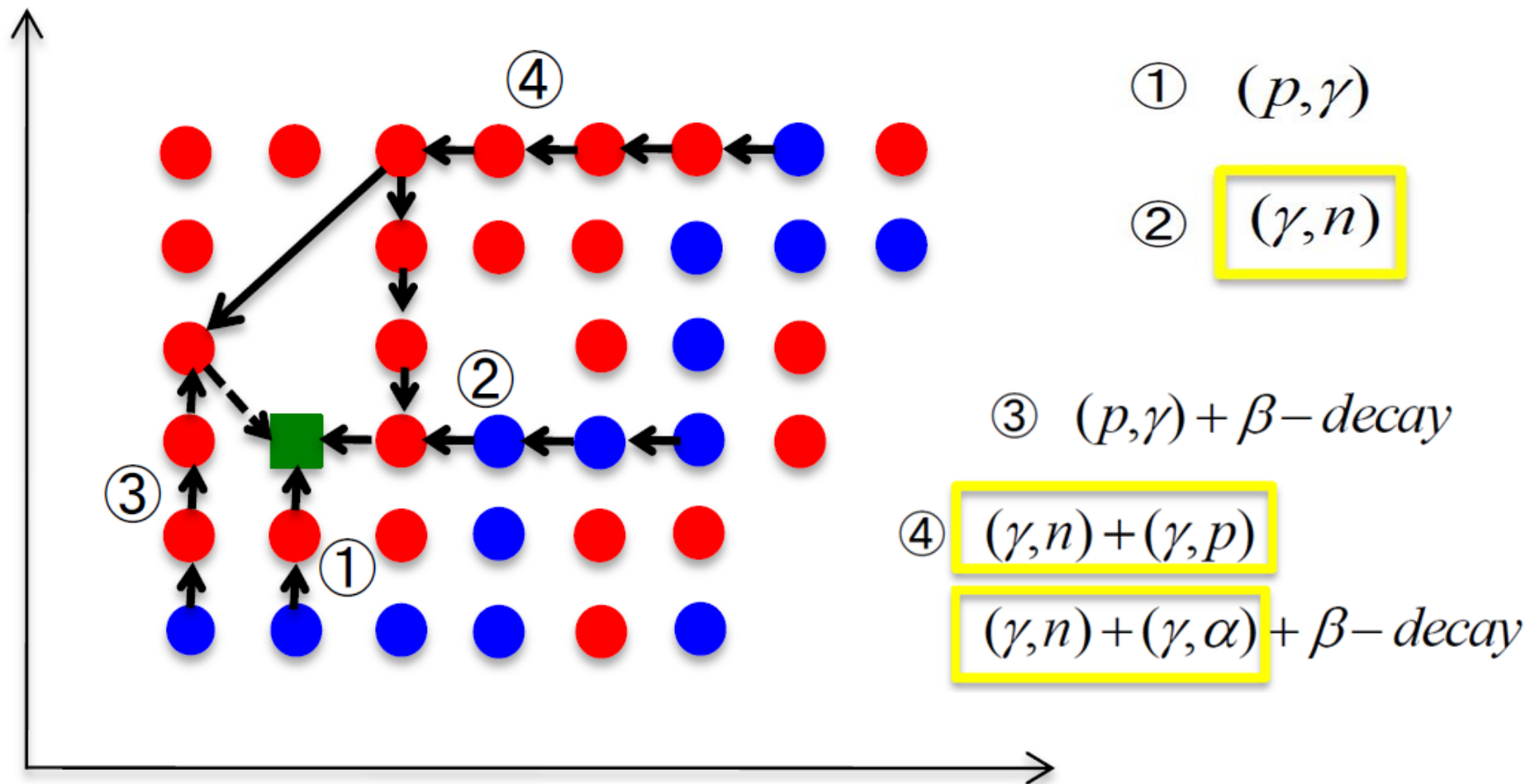
- 天体核过程简介
- 光核反应的特点
- 光核反应在天体演化中的作用
 - 刻度宇宙演化的时间
 - 控制着核燃烧的次序
 - 决定着核过程的等待点
 - 参与重要的核过程(e-过程, r-过程, p-过程)
- 一些光核反应研究实例
- 报告总结

x射线暴相关的rp-过程

Waiting point



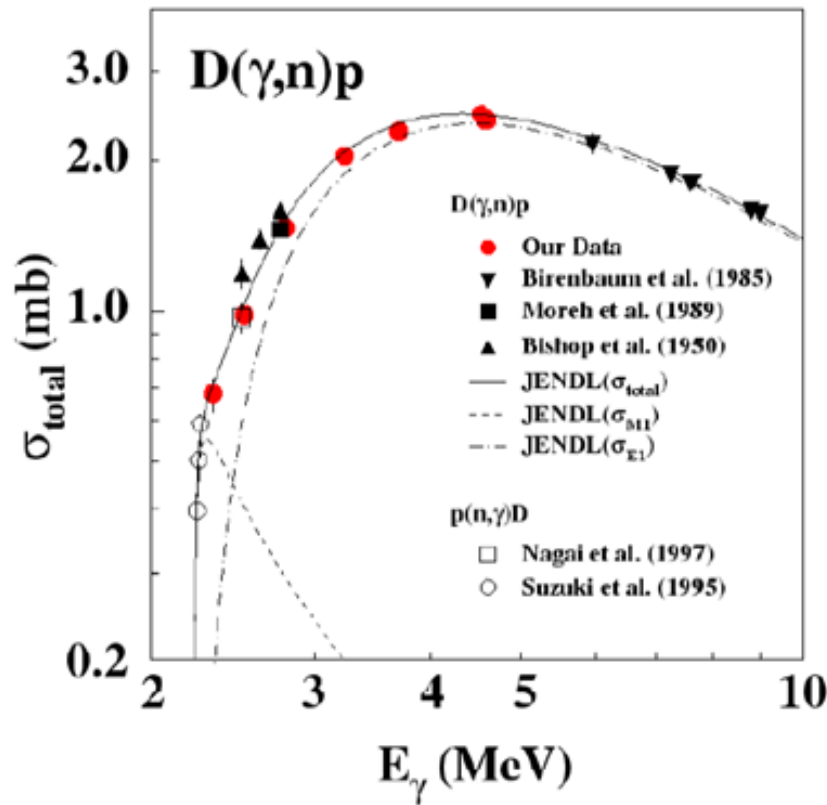
与光核反应相关的p-过程



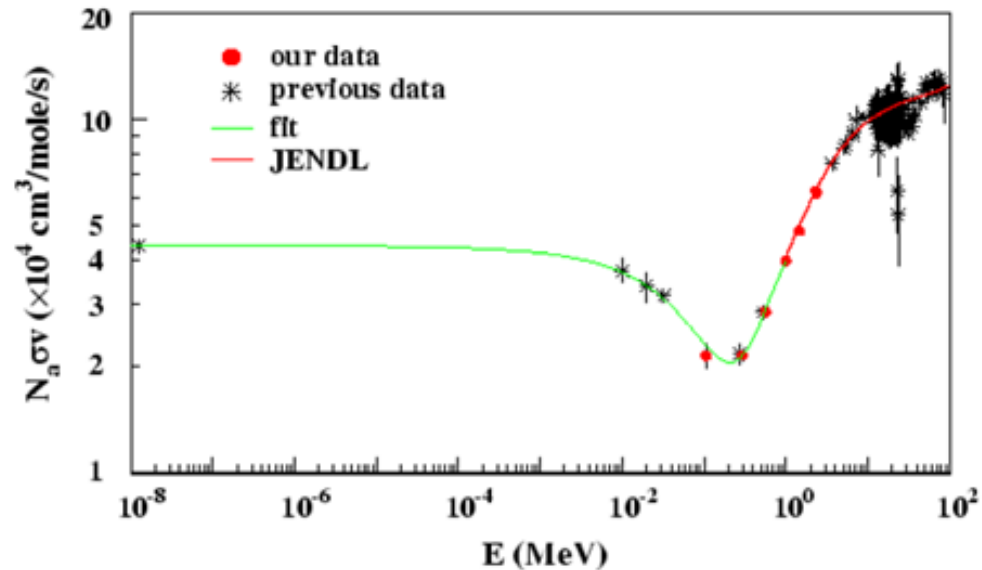
报告内容

- 天体核过程简介
- 光核反应的特点
- 光核反应在天体演化中的作用
 - 刻度宇宙演化的时间
 - 控制着核燃烧的次序
 - 决定着核过程的等待点
 - 参与重要的核过程(e-过程, r-过程, p-过程)
- 一些光核反应研究实例
- 报告总结

大爆炸相关的 $D(\gamma,n)p$ 反应



(n,γ) 天体物理反应率

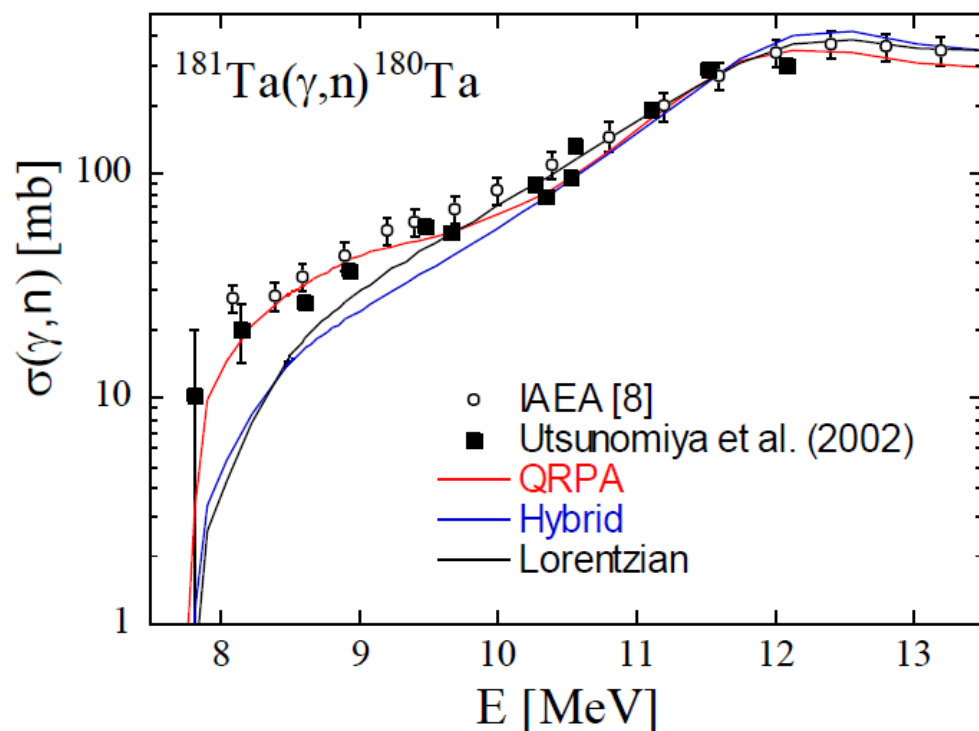


K. Y. Hara et al. PRD 68 (2003) 072001

$^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$

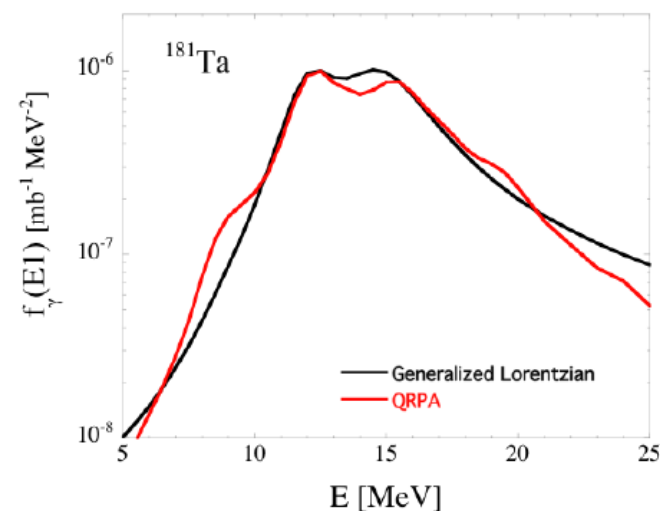
H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 67, 015807 (2003)

Extra E1 γ -ray strength near Sn



Pygmy Dipole Resonance

N. Paar, D. Vretenar, E. Khan, G. Colò
Rep. Prog. Phys. **70** 691 (2007)



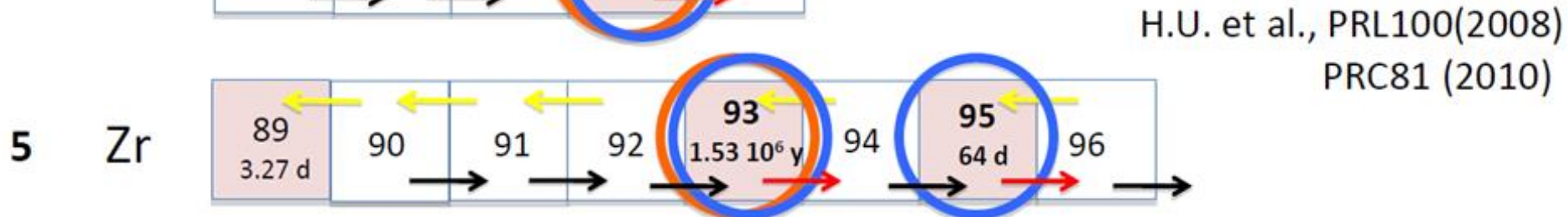
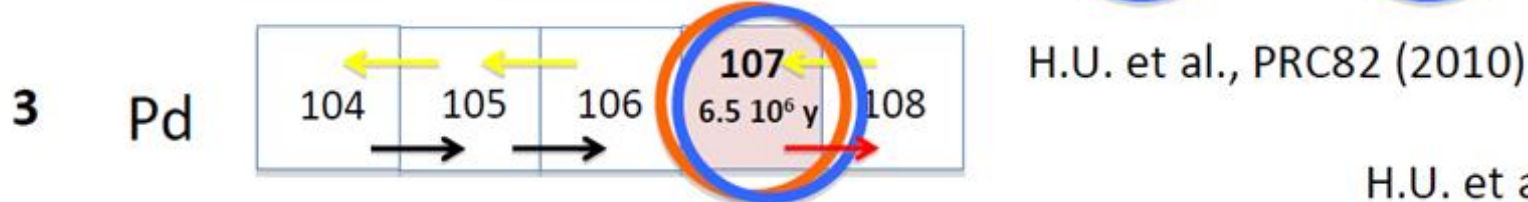
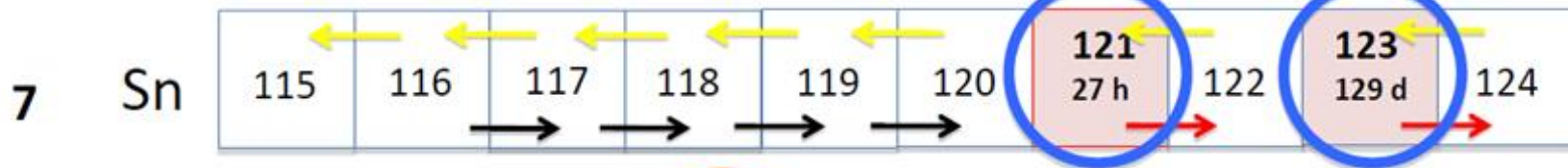
Applications

- ← Present (γ, n) measurements
- Existing (n, γ) data
- (n, γ) c.s. to be deduced

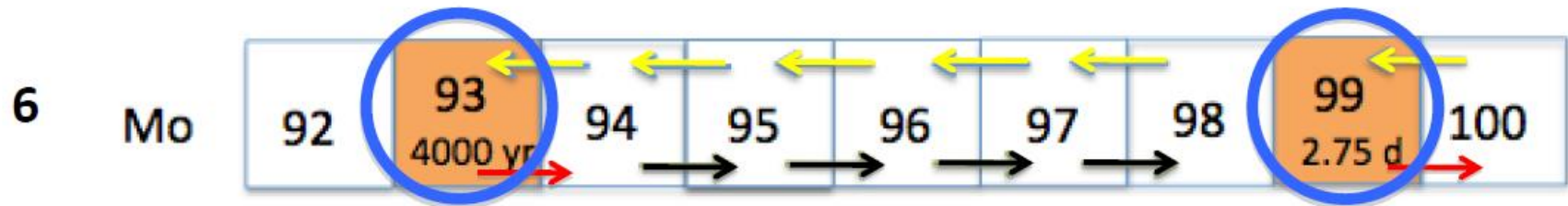
○ LLFP (long lived fission products)
nuclear waste

○ Astrophysical significance

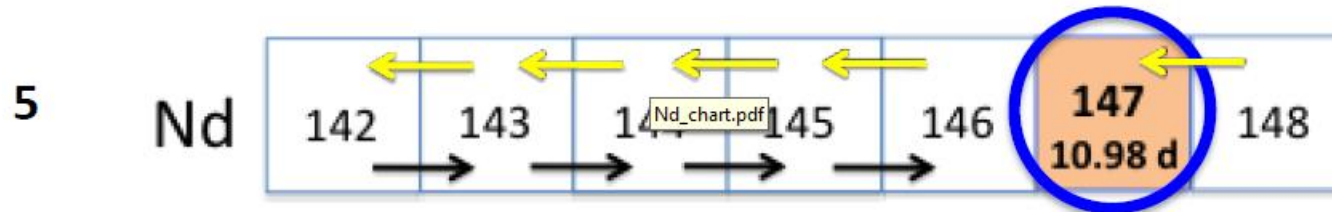
H. Utsunomiya et al., PRC80 (2009)



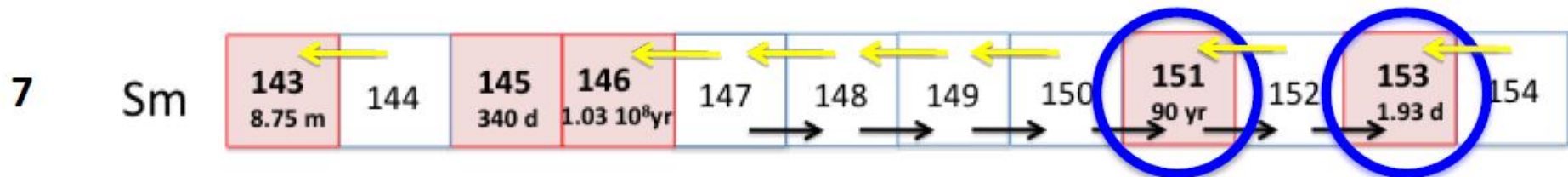
H.U. et al., PRC88 (2013)



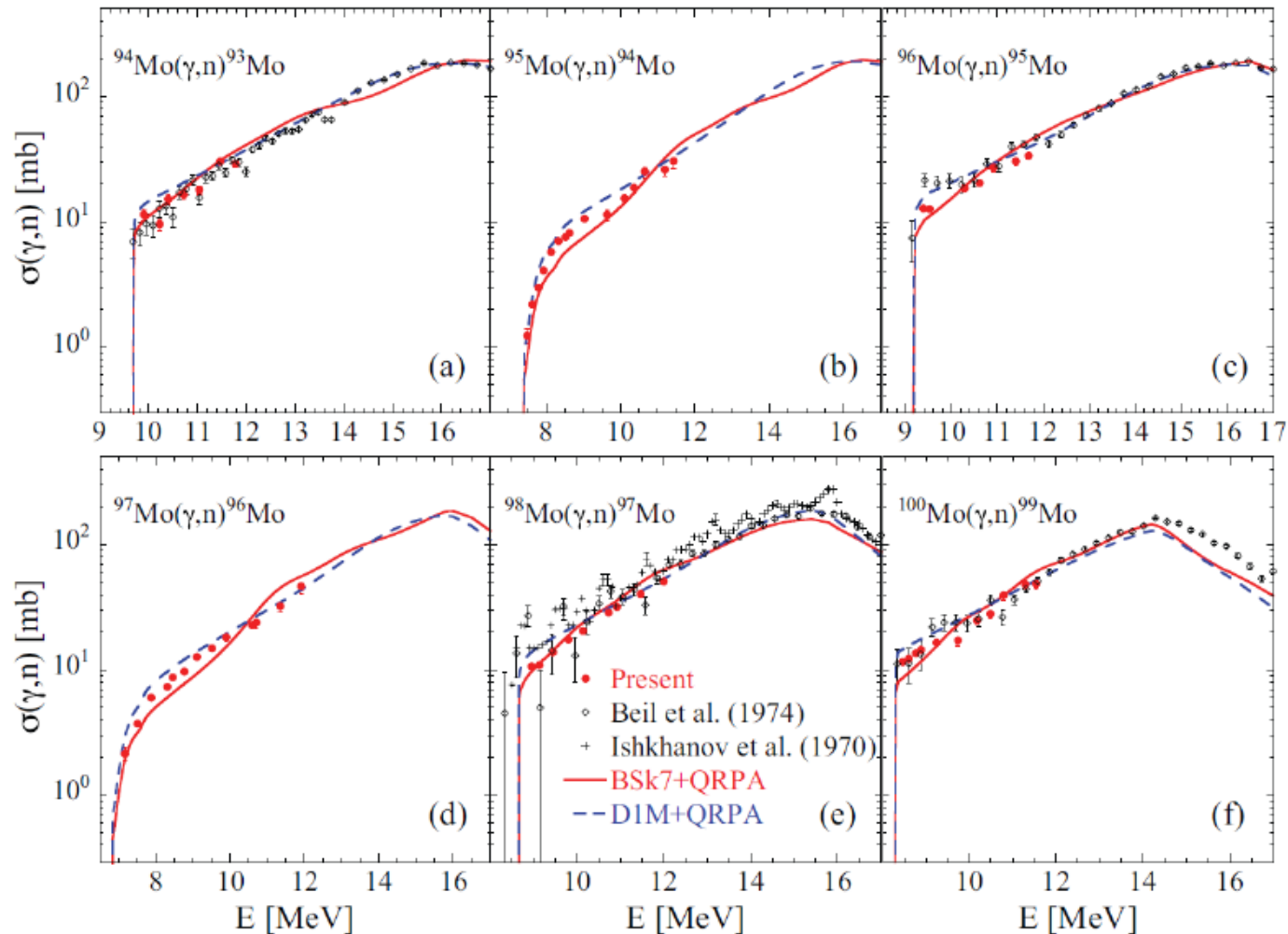
In collaboration with Univ. Oslo etc.



In collaboration with ELI-NP etc.



Mo同位素的光核反应研究



H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 88, 015805 (2013).

报告小结

- 天体的高温等离子体环境中存在大量光子
- 光核反应在天体核合成过程中扮演着十分重要的角色
- 急需开展核天体物理感兴趣的光核反应研究
- 建设光核反应研究平台，能为我国核物理及核天体物理研究做出贡献。

Thank You !



李志宏
中国原子能科学研究院
zhli@ciae.ac.cn
zhli@foxmail.com