

光核反应

——核天体物理中的关键核反应

郭 冰

中国原子能科学研究院

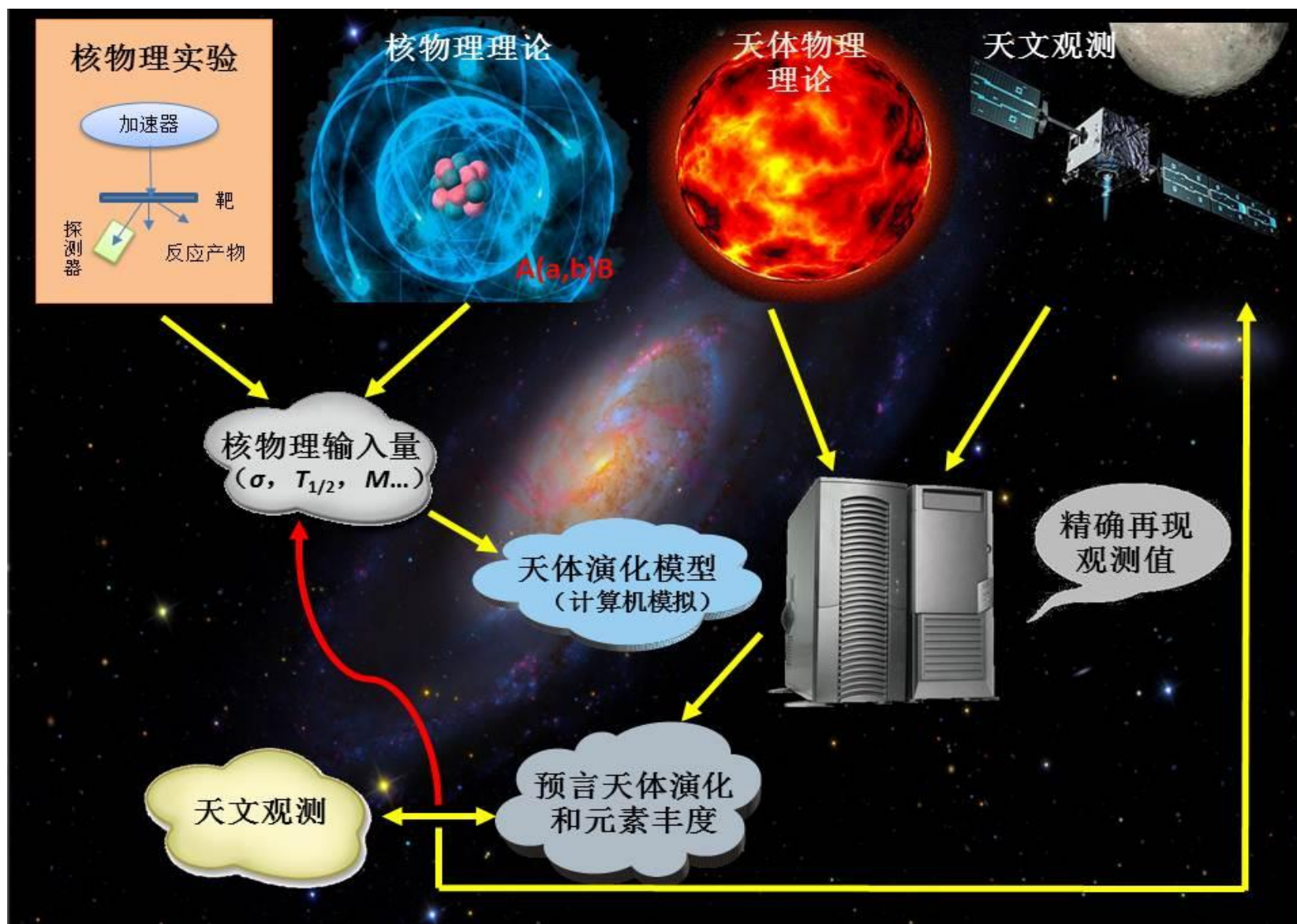
2016年6月23-25日



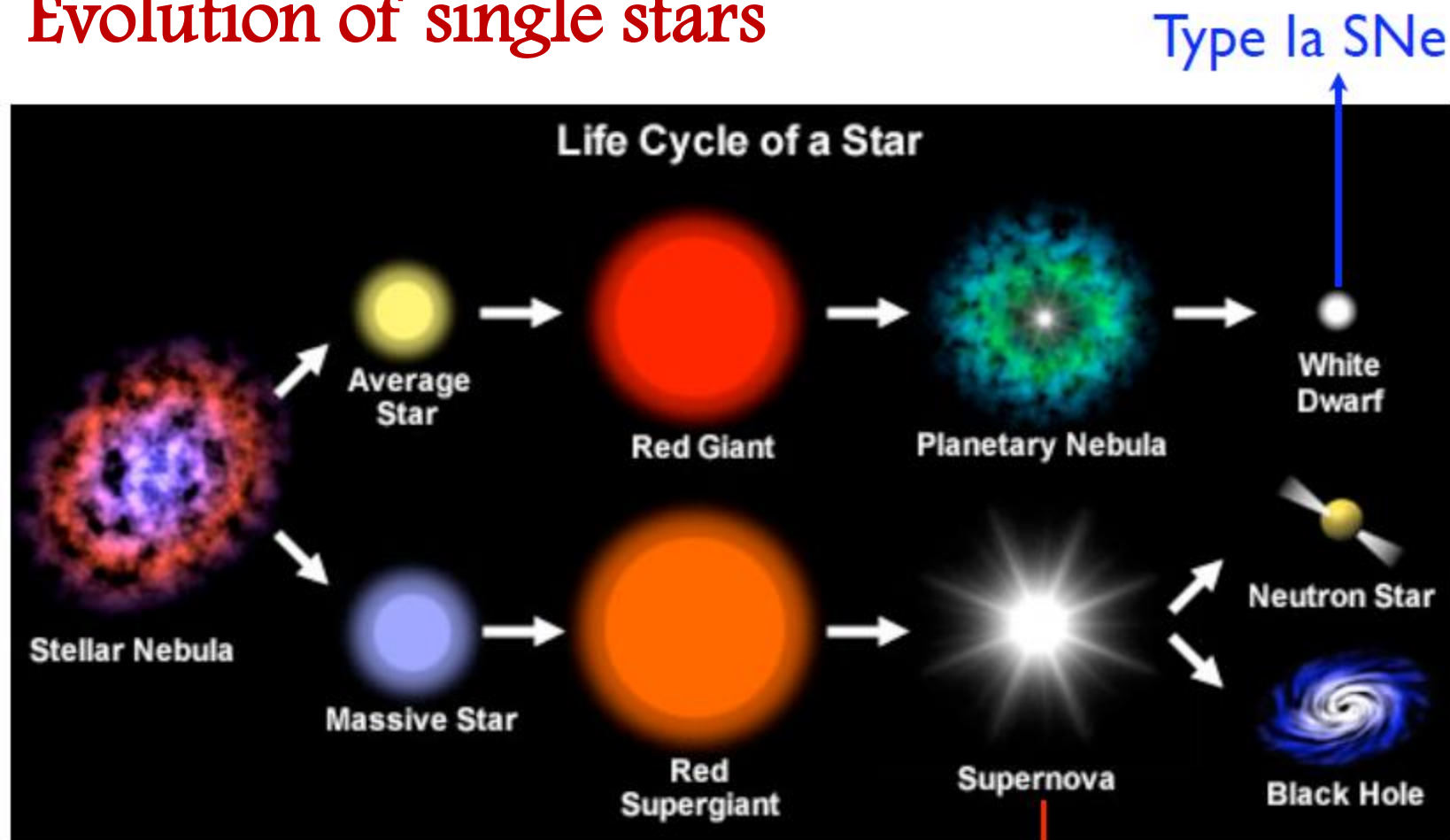
核天体物理是核物理与天体物理、天文学相融合形成的交叉学科。对微观尺度(10^{-15}m)的核过程的了解，可以解释对宇观尺度($>10^9\text{m}$)的天文观测，构成了学科发展的动力和挑战，使核天体物理始终处于物理学科的前沿。

核过程不仅是恒星发光发热的主要能源，亦是宇宙中除氢以外所有核素赖以合成的唯一机制。





Evolution of single stars



core-collapse SNe (mostly Type II)

explosive hydrogen burning

nova explosion mechanism

White Dwarf Star

Binary Companion Star

novae occur in binary star systems

two stars orbiting a common center
of gravity

Binary stars

one of the stars is in a WHITE
DWARF phase



explosive hydrogen burning

nova explosion mechanism

Binary Companion Star

White Dwarf Star

collection onto surface of white dwarf

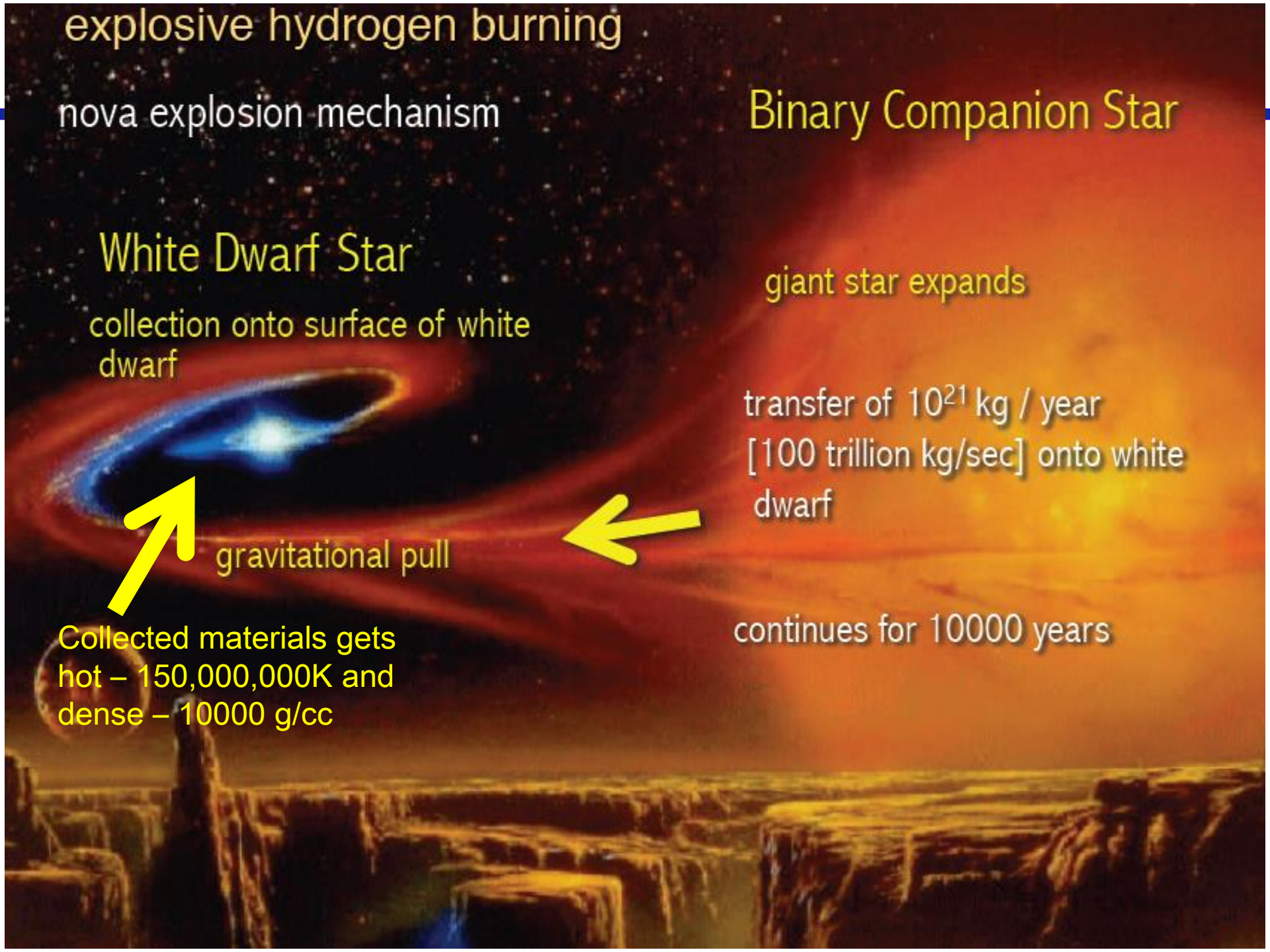
giant star expands

transfer of 10^{21} kg / year
[100 trillion kg/sec] onto white dwarf

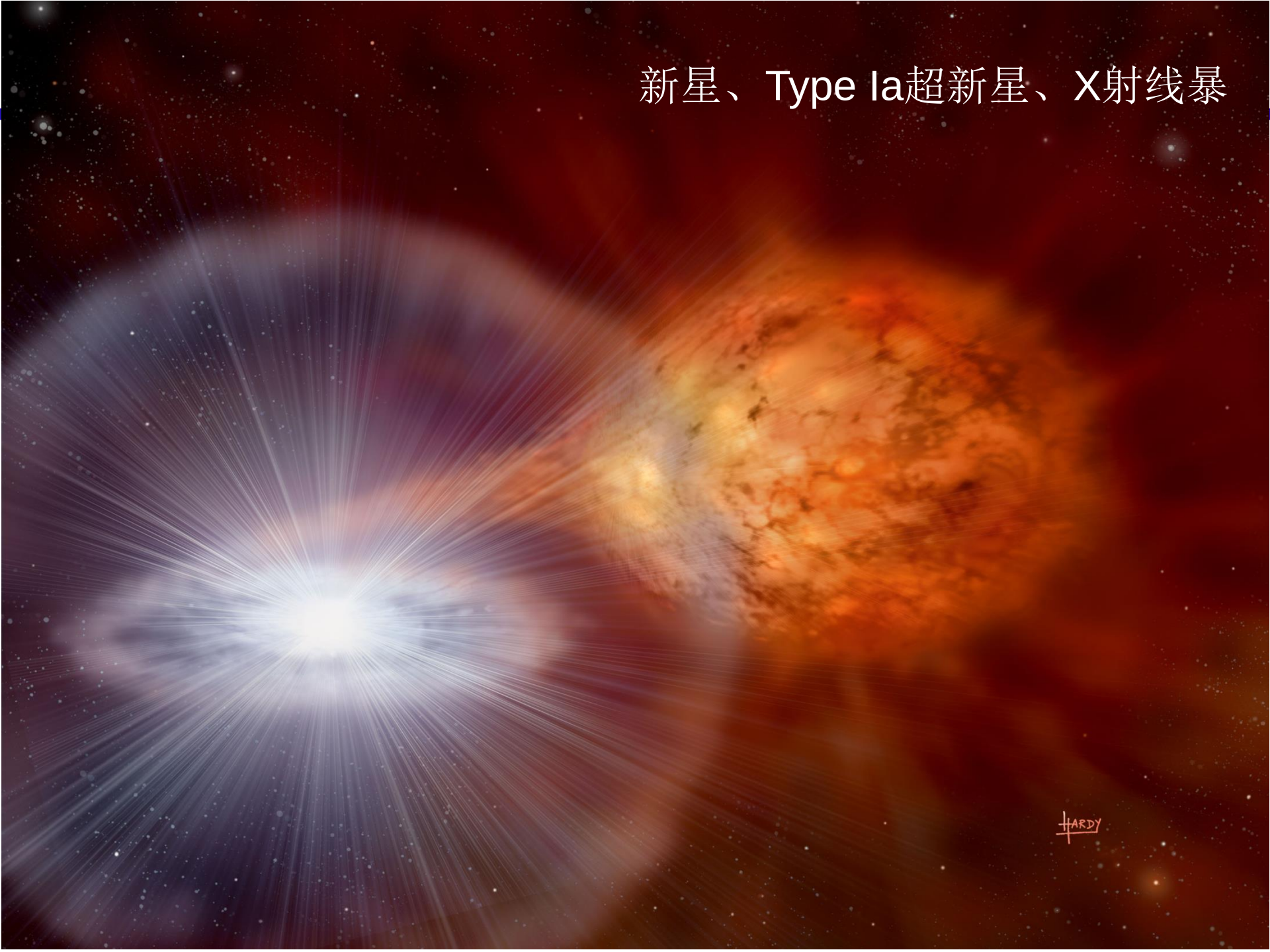
gravitational pull

Collected materials gets
hot – 150,000,000K and
dense – 10000 g/cc

continues for 10000 years



新星、Type Ia超新星、X射线暴



- 恒星能源

- 1967年诺贝尔物理奖，Bethe发展了核反应理论，提出恒星的能量来源，开辟新领域

- 化学元素起源

- 1983年诺贝尔物理奖，Fowler对恒星中的核反应进行了系统的实验和理论研究，发表了著名的“B²FH”文章，被誉为“核天体物理的圣经”

- 太阳中微子丢失之谜

- 2002年诺贝尔物理奖，Davis和Koshiba发展了中微子探测方法，提出了“太阳中微子丢失之谜”
- 2015年诺贝尔物理奖，Kajita和McDonald发现中微子振荡，解释了“太阳中微子丢失之谜”

- 重元素的产生

- 物理学11个未解之谜之一，将孕育重大发现

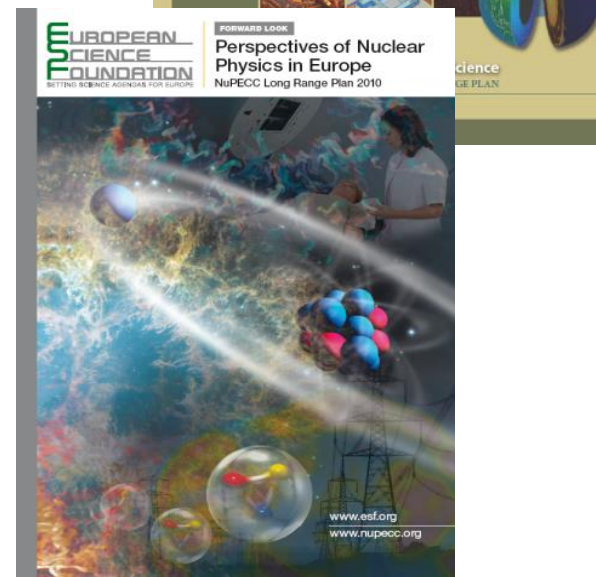
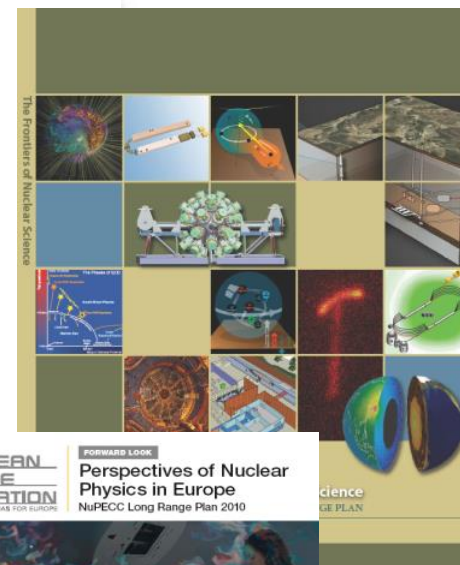
核科学长程发展规划

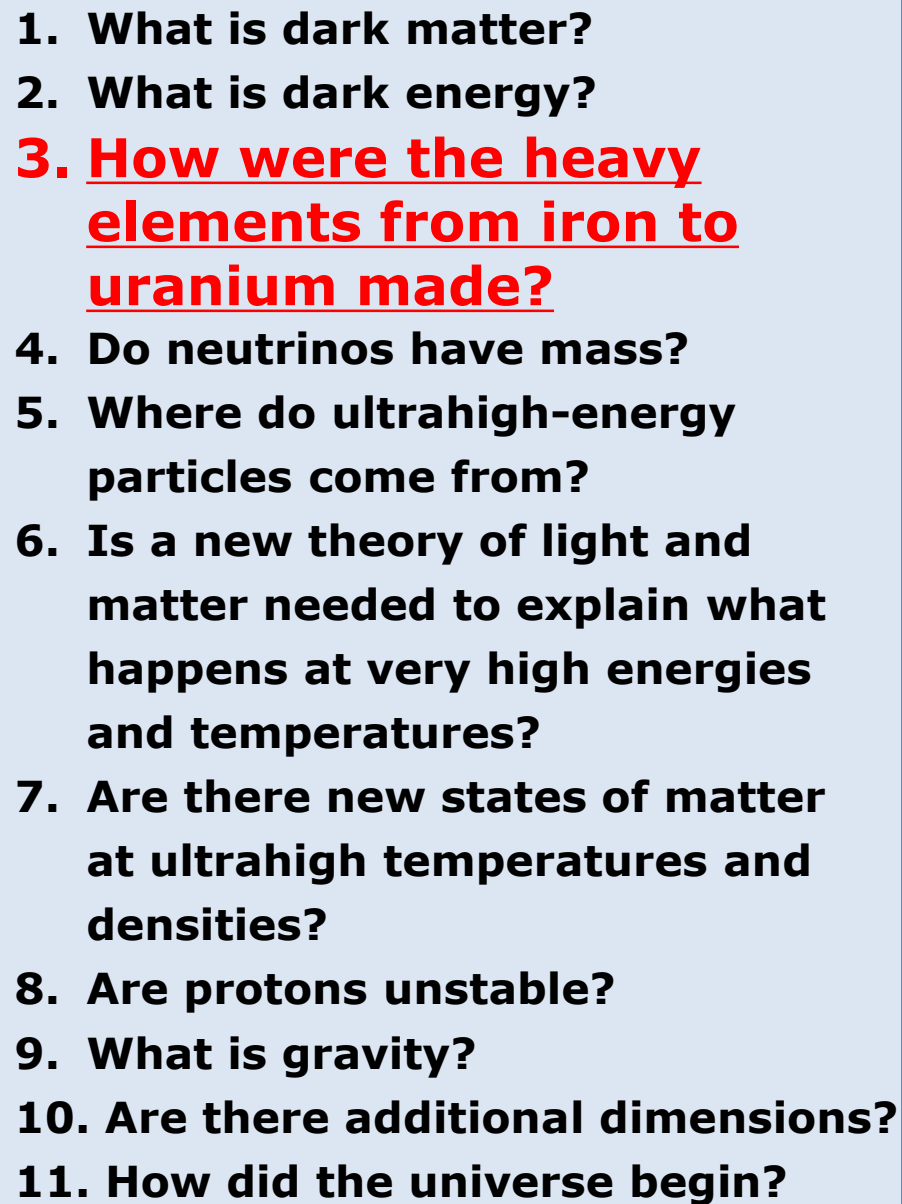
未来10年
中国学科发展战略
国家科学思想库

物理学

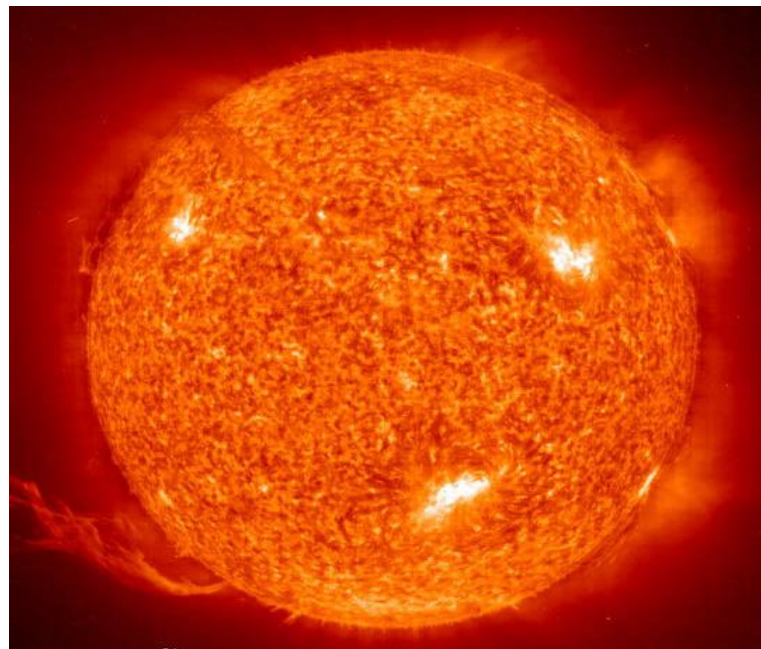
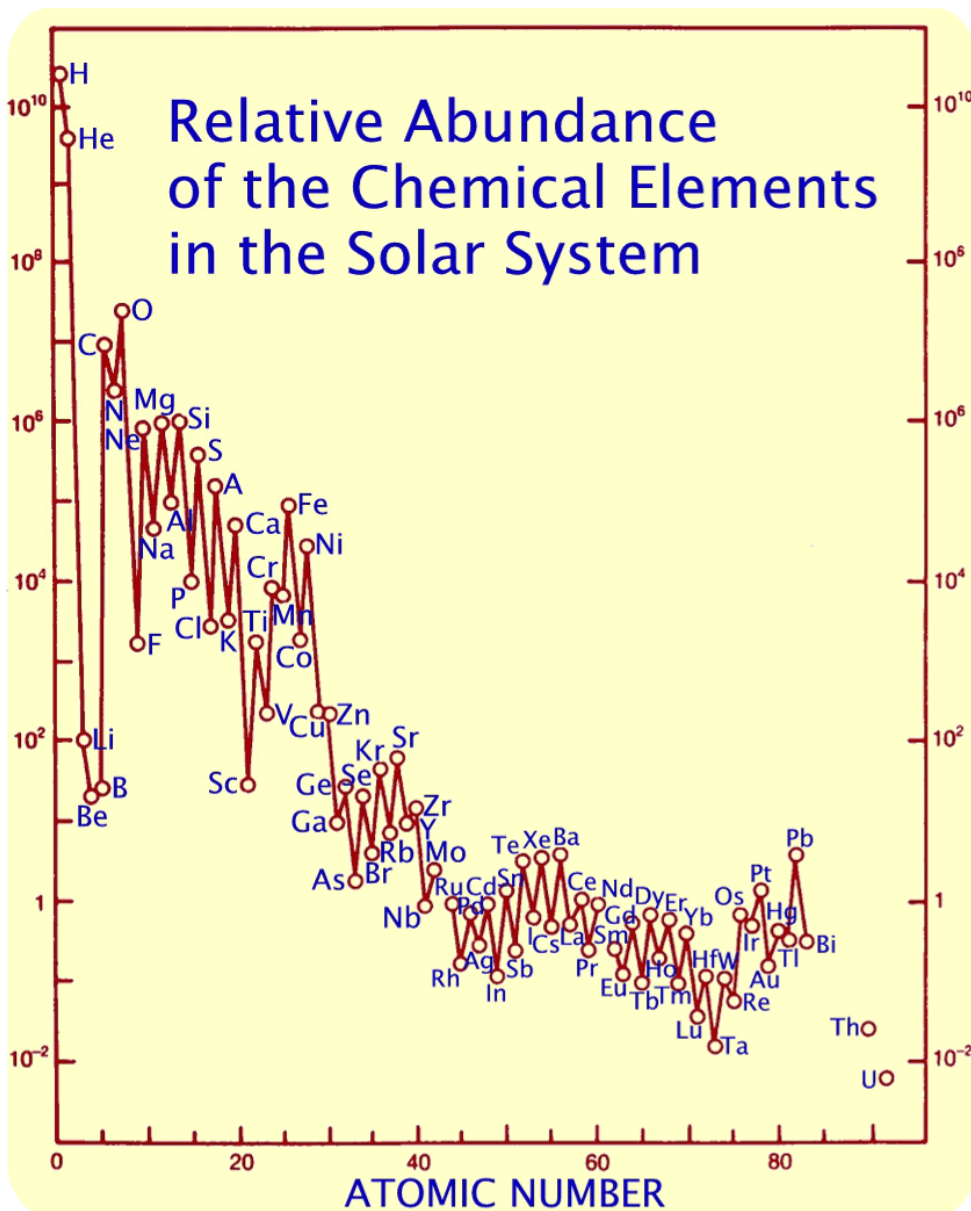
国家自然科学基金委员会
中国科学院

- 我国基金委数理科学13个优先领域
 - 极端条件下的核物理和核天体物理
- 《未来10年中国学科发展战略》，《中国核物理与等离子体物理发展战略》
 - 核天体物理是重点发展的领域之一
- 2007、2015美国核科学长程发展规划
 - 宇宙元素的起源是什么？
 - 驱动恒星演化和爆发的核反应是什么？
- 2010欧洲核科学长程发展规划
 - 元素来自何方并如何产生？
 - 在地球上如何重现并研究驱动恒星演化和恒星合成新元素的核反应？
 - 核反应如何影响恒星的命运？



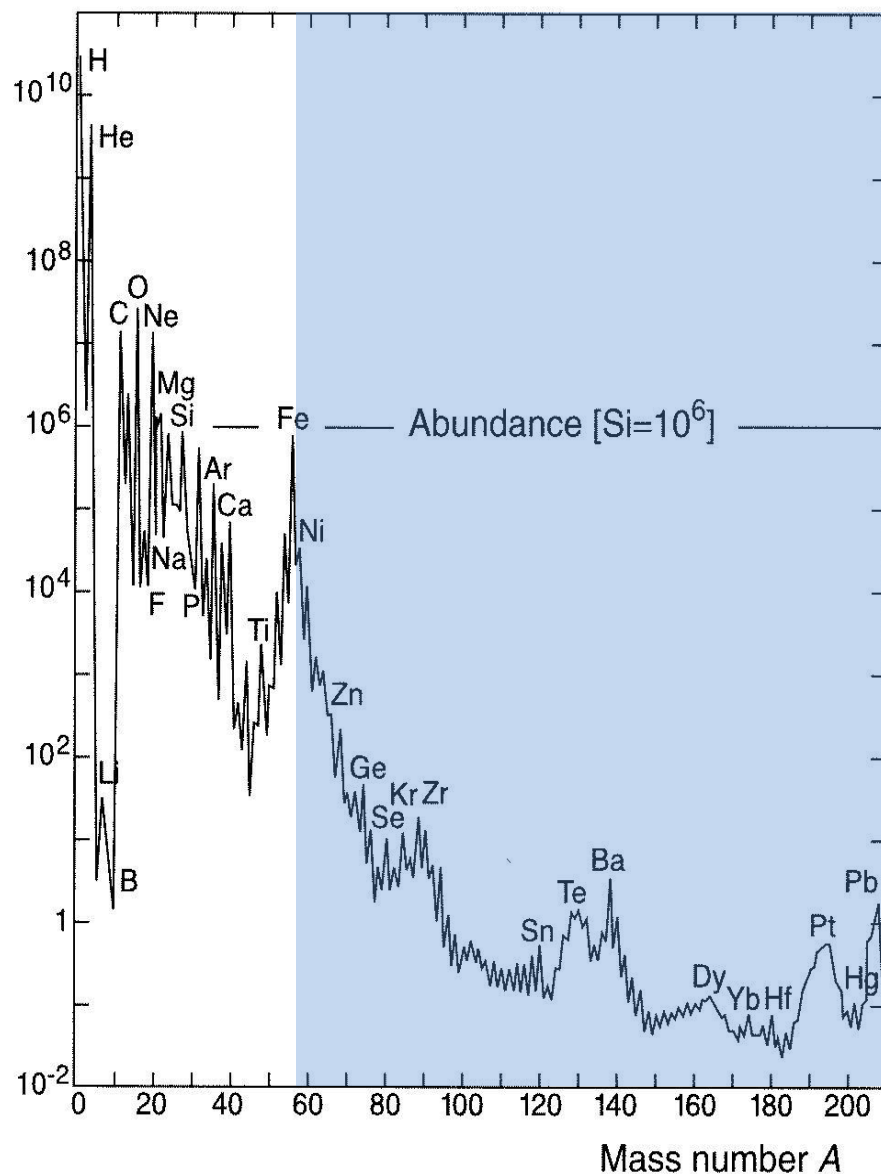
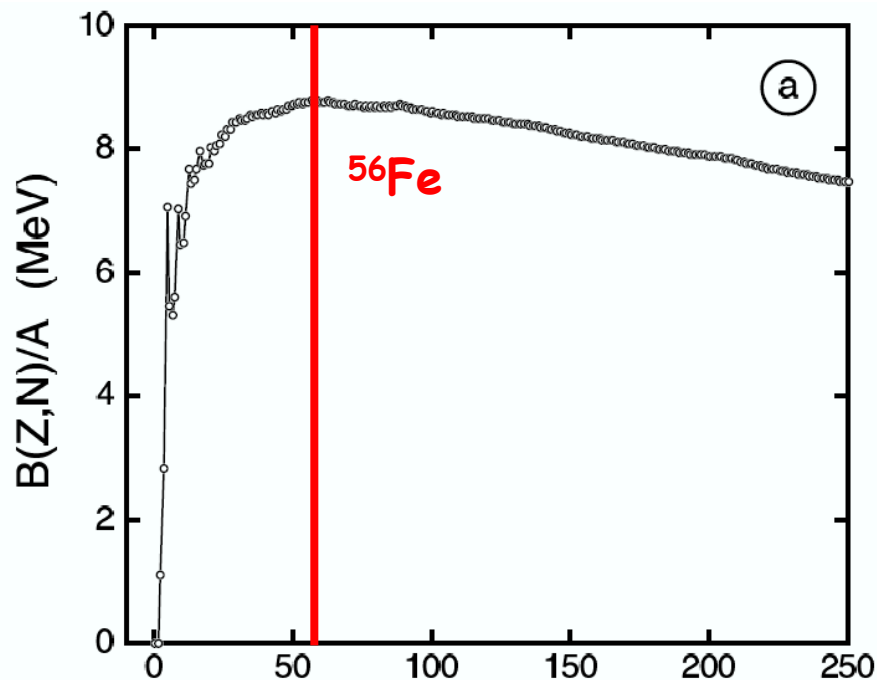


3. 质量数大于铁的元素如何产生？

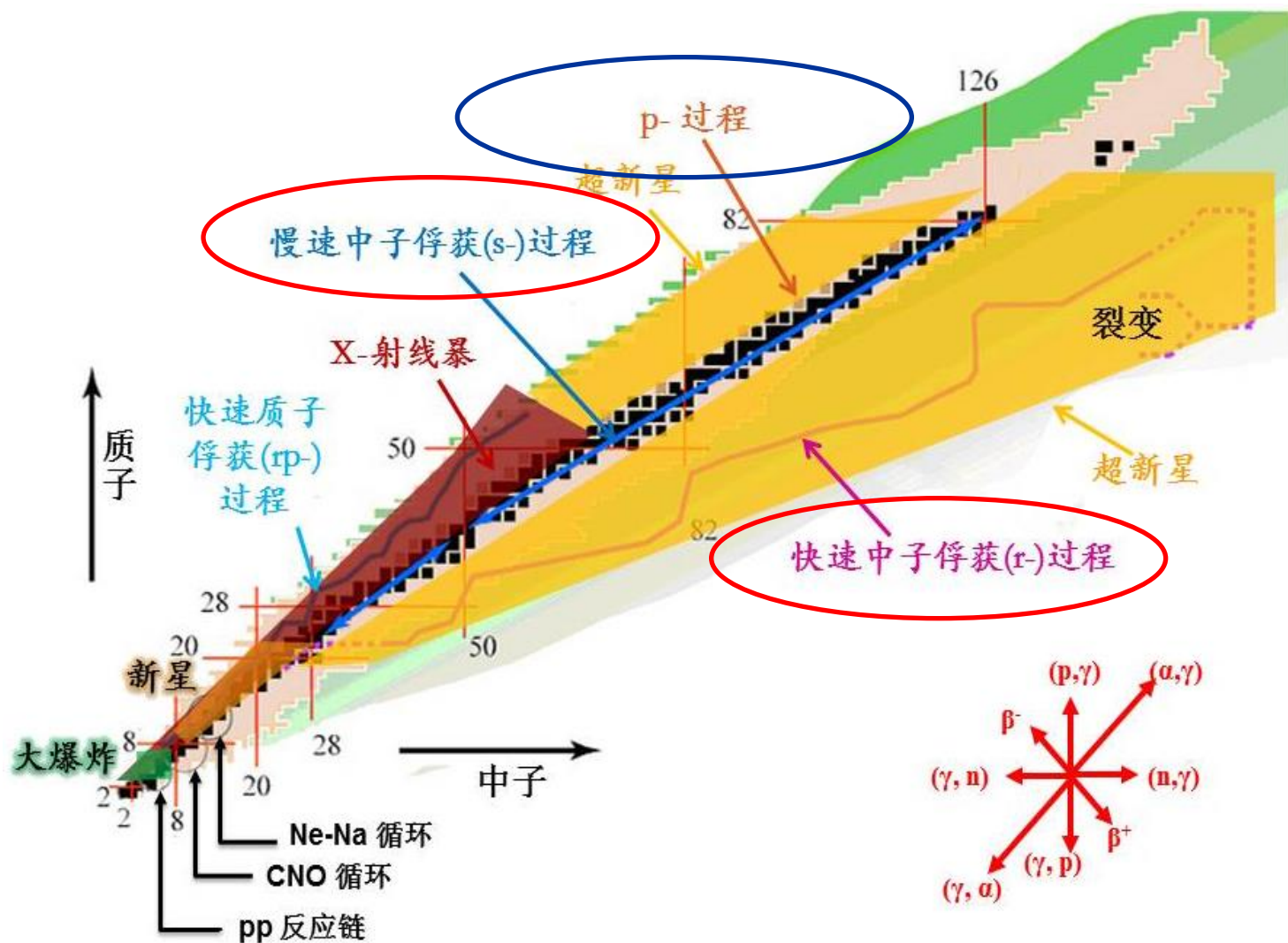


- ✓ 大爆炸核合成：氢、氦、锂
- ✓ 宇宙射线的散裂过程：铍、硼、部分的锂元素
- ✓ 恒星内部带电粒子的聚变或质子、 α 粒子俘获反应：碳到铁的各种元素

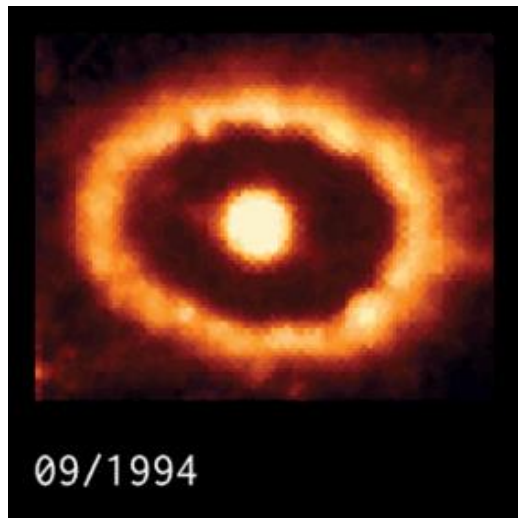
- 比铁重的原子核的比结合能随质量数增加而减小
- 不断增强的库仑斥力
- 难以由带电粒子的聚变或质子、 α 粒子俘获反应产生



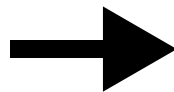
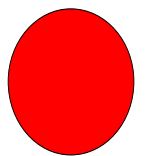
产生重元素的三种过程



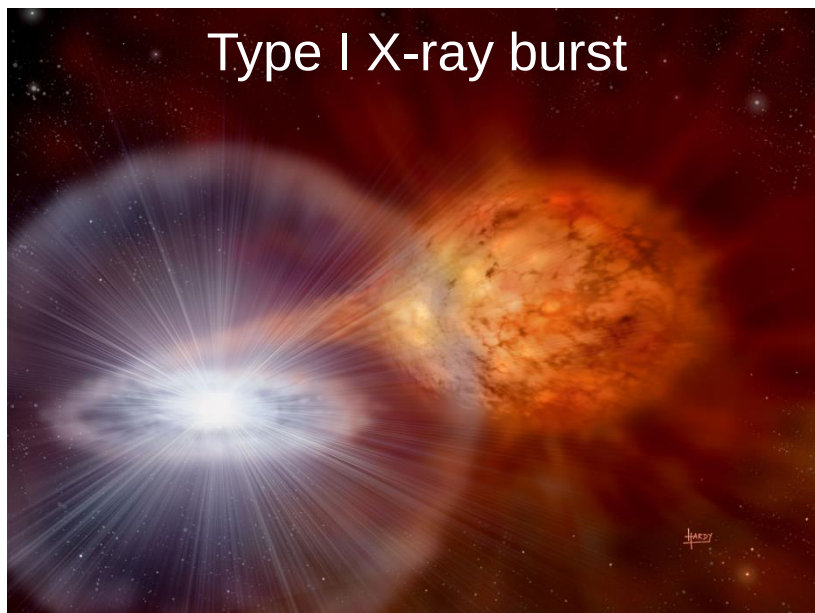
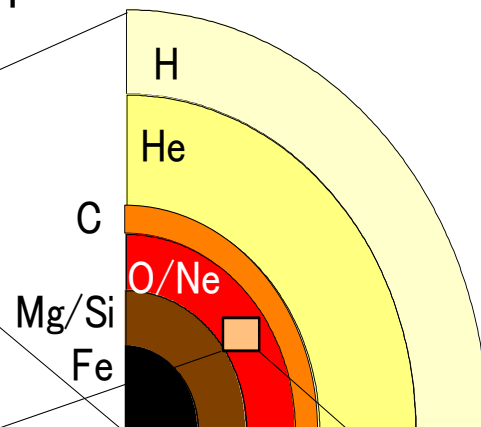
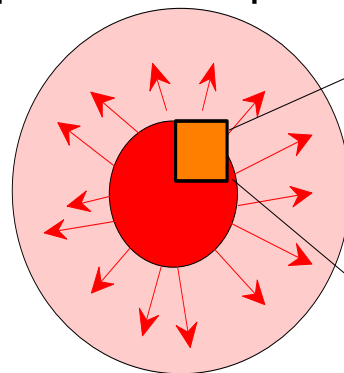
SN1987A, type II



Massive Star

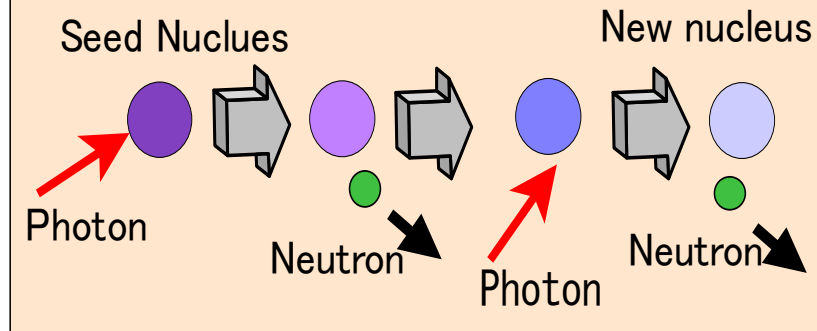


Supernova Explosion



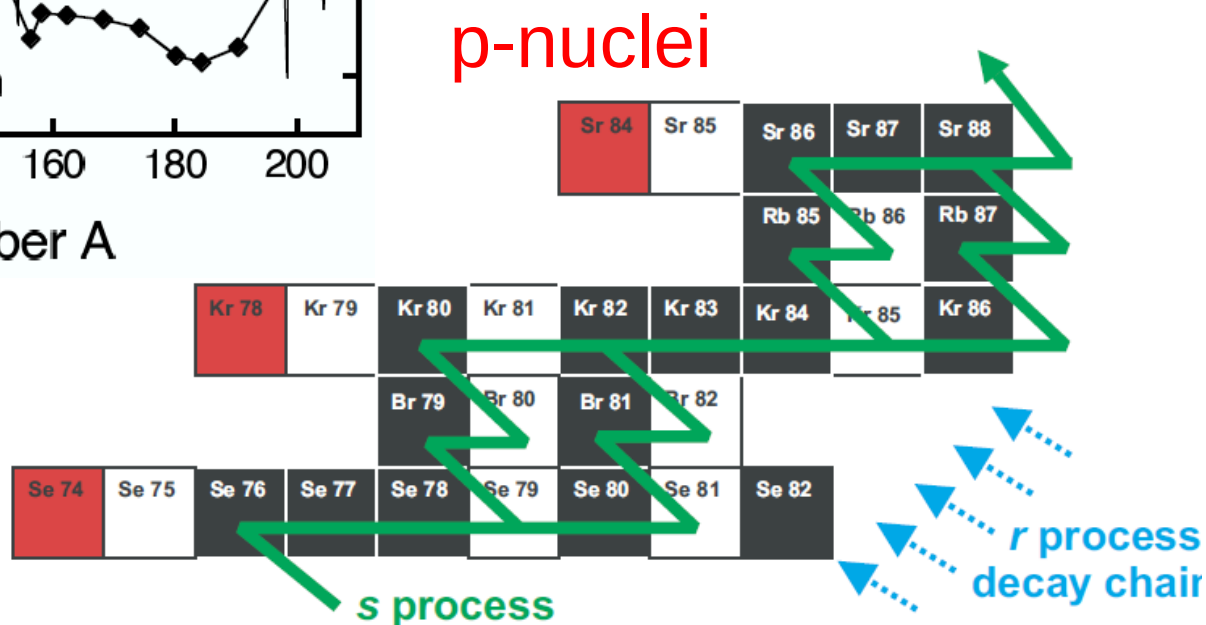
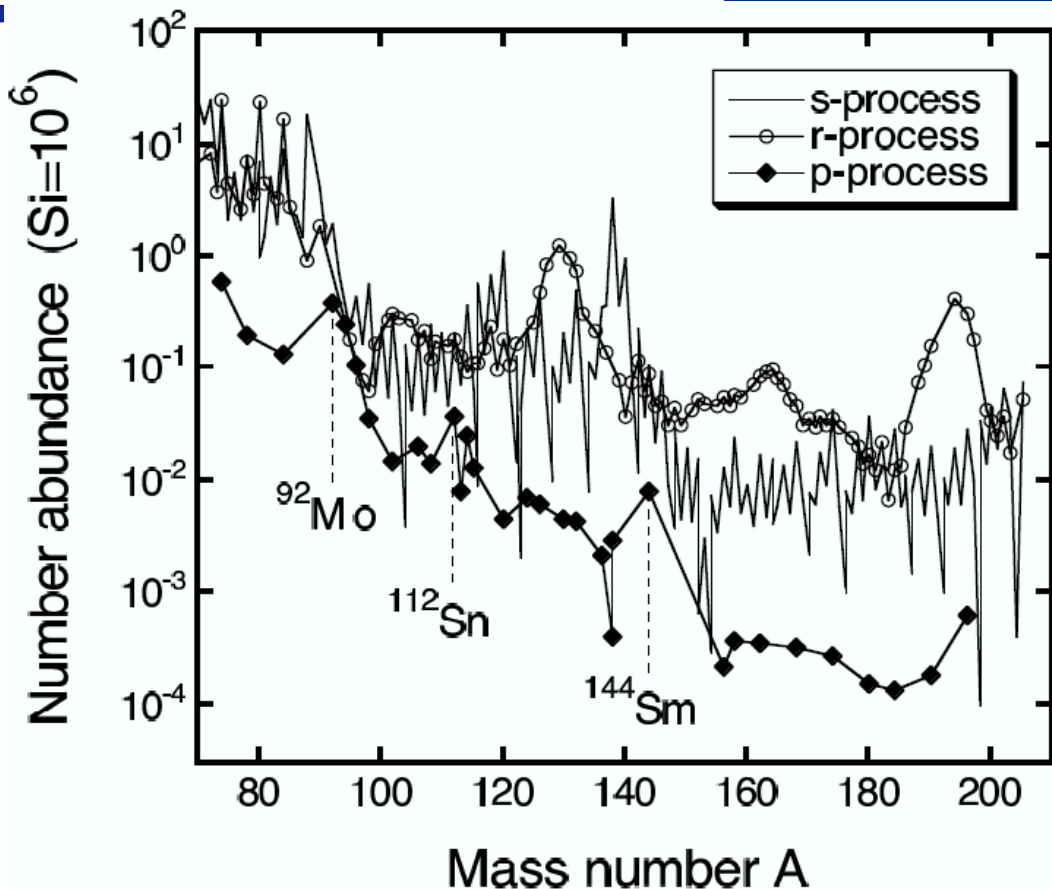
Type I X-ray burst

Nucleosynthesis



M. Arnould, Astron. Astrophys. 46 (1976) 117.
H. Schatz, et al., Phys. Rep. 294 (1998) 167.

太阳系中重元素的丰度



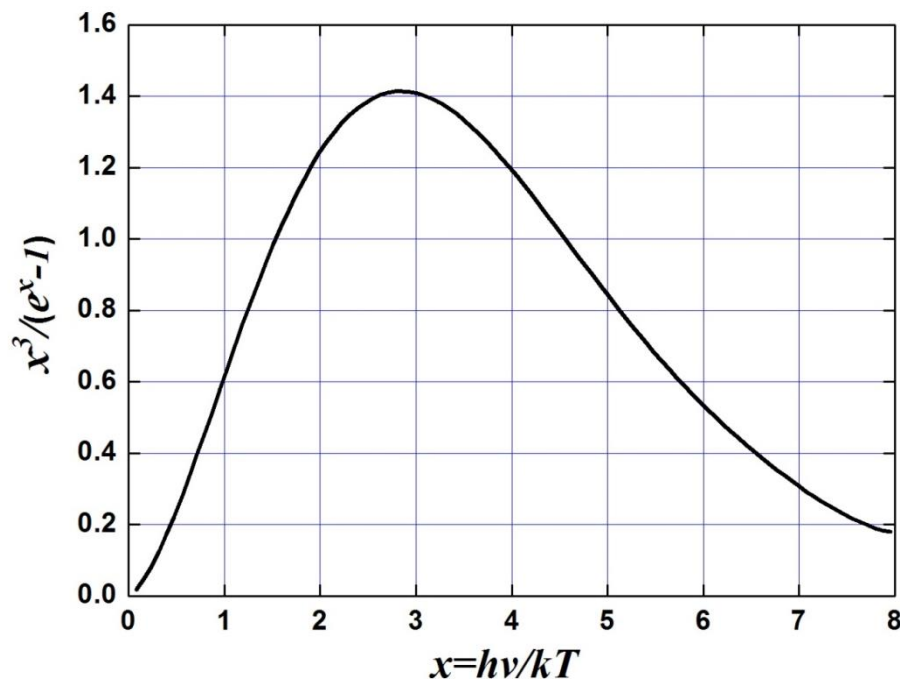
35种p-核及其丰度

虽然这些p-核为数不多且丰度较低，但它们的合成过程却牵涉甚广，十分复杂。有的网路计算包含约从 ^1H 到 ^{209}Bi 的1100种核素，涉及 ≈ 11000 个核反应。

揭示p-过程机制对于完整理解核合成有重要意义。从这30余个p-核的结构可以找到p-过程机制的重要线索。其质子数和中子数几乎都是偶数；p-核丰度分布在 ^{92}Mo , ^{112}Sn 和 ^{144}Sm 处出现峰值，它们分别是中子和质子满壳核。

Isotope	p-isotope contribution (%) [14]	Solar abund. (2003) [10]	Solar abund. (1989) [9]	Change (%)
^{74}Se	0.89 (4)	5.80×10^{-1}	5.50×10^{-1}	5.45
^{78}Kr	0.355 (3)	2.00×10^{-1}	1.53×10^{-1}	30.72
^{84}Sr	0.56 (1)	1.31×10^{-1}	1.32×10^{-1}	-0.61
^{92}Mo	14.53 (30)	3.86×10^{-1}	3.78×10^{-1}	2.12
^{94}Mo	9.15 (9)	2.41×10^{-1}	2.36×10^{-1}	2.12
^{96}Ru	5.54 (14)	1.05×10^{-1}	1.03×10^{-1}	2.23
^{98}Ru	1.87 (3)	3.55×10^{-2}	3.50×10^{-2}	1.43
^{102}Pd	1.02 (1)	1.46×10^{-2}	1.42×10^{-2}	2.82
^{106}Cd	1.25 (6)	1.98×10^{-2}	2.01×10^{-2}	-1.49
^{108}Cd	0.89 (3)	1.41×10^{-2}	1.43×10^{-2}	-1.40
^{113}In	4.29 (5)	7.80×10^{-3}	7.90×10^{-3}	-1.27
^{112}Sn	0.97 (1)	3.63×10^{-2}	3.72×10^{-2}	-2.55
^{114}Sn	0.66 (1)	2.46×10^{-2}	2.52×10^{-2}	-2.38
^{115}Sn	0.34 (1)	1.27×10^{-2}	1.29×10^{-2}	-1.94
^{120}Te	0.09 (1)	4.60×10^{-3}	4.30×10^{-3}	6.98
^{124}Xe	0.0952 (3)	$6.94 \times 10^{-3\text{a}}$	5.71×10^{-3}	21.54 ^a
^{126}Xe	0.0890 (2)	$6.02 \times 10^{-3\text{a}}$	5.09×10^{-3}	18.27 ^a
^{130}Ba	0.106 (1)	4.60×10^{-3}	4.76×10^{-3}	-3.36
^{132}Ba	0.101 (1)	4.40×10^{-3}	4.53×10^{-3}	-2.87
^{138}La	0.08881 (71)	3.97×10^{-4}	4.09×10^{-4}	-2.93
^{136}Ce	0.185 (2)	2.17×10^{-3}	2.16×10^{-3}	0.46
^{138}Ce	0.251 (2)	2.93×10^{-3}	2.84×10^{-3}	3.17
^{144}Sm	3.07 (7)	7.81×10^{-3}	8.00×10^{-3}	-2.38
^{152}Gd	0.20 (1)	6.70×10^{-4}	6.60×10^{-4}	1.52
^{156}Dy	0.056 (3)	2.16×10^{-4}	2.21×10^{-4}	-2.26
^{158}Dy	0.095 (3)	3.71×10^{-4}	3.78×10^{-4}	-1.85
^{162}Er	0.139 (5)	3.50×10^{-4}	3.51×10^{-4}	-0.28
^{164}Er	1.601 (3)	4.11×10^{-3}	4.04×10^{-3}	1.73
^{168}Yb	0.123 (3)	3.23×10^{-4}	3.22×10^{-4}	0.31
^{174}Hf	0.16 (1)	2.75×10^{-4}	2.49×10^{-4}	10.44
$^{180}\text{Ta}^{\text{m}}$	0.01201 (32)	2.58×10^{-6}	2.48×10^{-6}	4.03
^{180}W	0.12 (1)	1.53×10^{-4}	1.73×10^{-4}	-11.56
^{184}Os	0.02 (1)	1.33×10^{-4}	1.22×10^{-4}	9.02
^{190}Pt	0.012 (2)	1.85×10^{-4}	1.70×10^{-4}	8.82
^{196}Hg	0.15 (1)	6.30×10^{-4}	4.80×10^{-4}	31.25

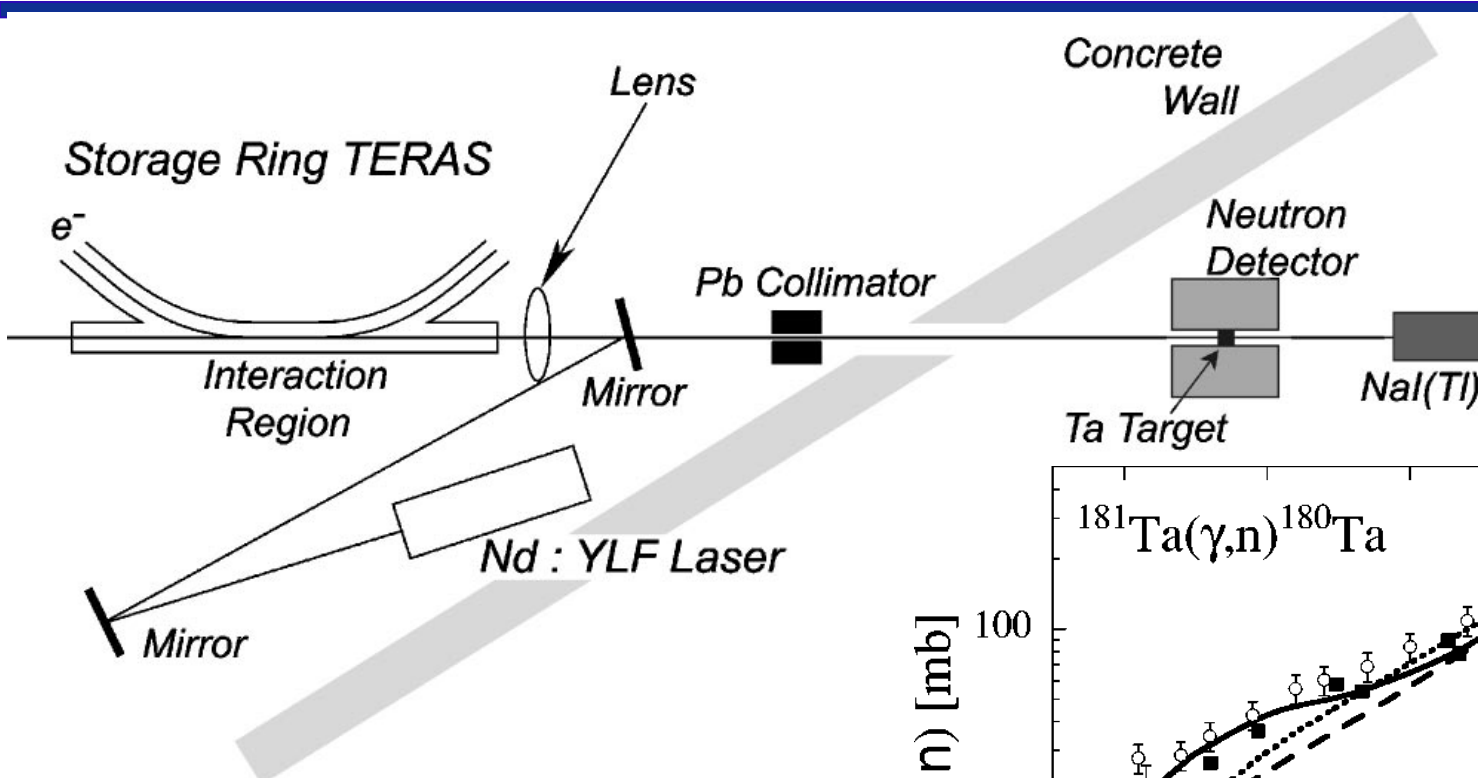
天体环境中黑体辐射 γ -能谱密度的普朗克分布



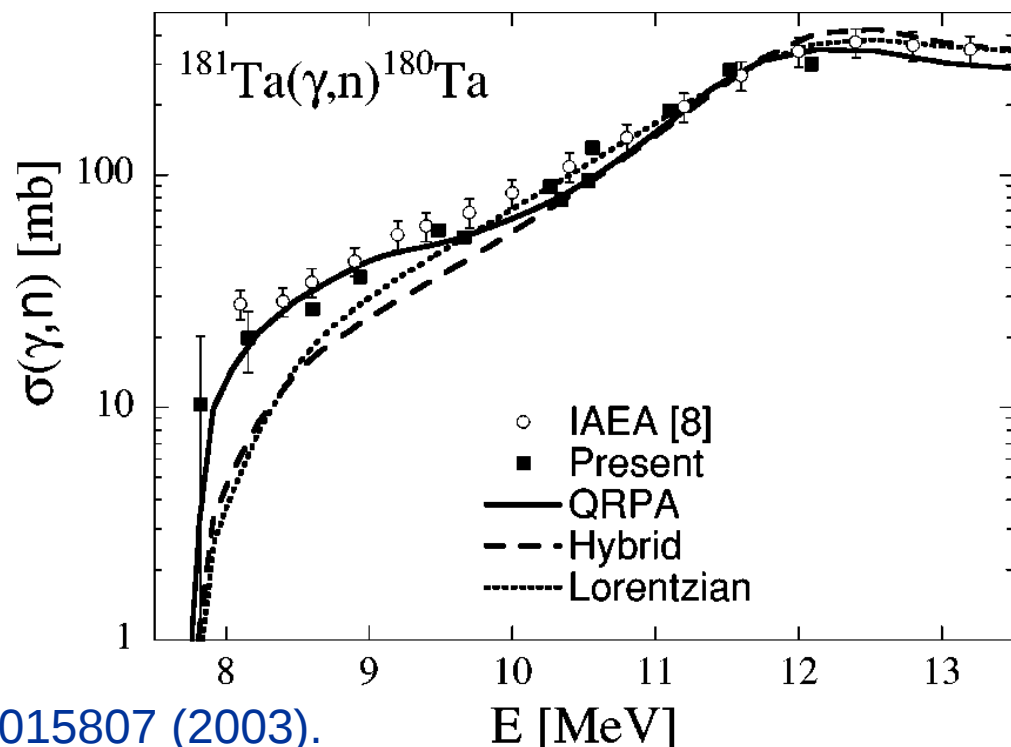
凡是发生 (x, γ) 反应的天体环境中都存在与之相竞争的逆过程 (γ, x) , 竞争结果取决于天体温度和核物理因素。在原初核合成, 恒星平稳氢燃烧到硅燃烧各个阶段乃至爆发性天体事件中有许多需要测量的重要 (γ, x) 反应。重点：铁以上重元素如何产生（p-过程）

- 研究辐射俘获反应的重要手段
 - (p, γ) 、 (α, γ) 、 (n, γ) 反应，产生能量，合成元素
- 研究方法的原理
 - 在伽玛光源上测量 (γ, x) 反应
 - 基于细致平衡原理，辐射俘获反应 (x, γ) 布居产物基态的截面 σ_A 可通过测量光致裂解反应 (γ, x) 的截面 σ_B 导出
 - 研究产物核能级密度（NLD），统计模型中的基本参数
- 研究方法的优势
 - 天体物理能区某些反应的 $\sigma(\gamma, x)$ 与 $\sigma(x, \gamma)$ 之比可高达两个量级
 - γ -射线在介质中的平均吸收长度容许采用厚靶
 - $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$ 比 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 的反应产额高~6个数量级

- 激光电子 γ 源出现之前的几十年间, 在电子加速器(如德国的BLBE和S-DALINAC...) 的韧致辐射装置上已经测过一些与核合成相关的(γ, n)反应率, 但迄今(γ, α)和(γ, p) 反应的测量极少, 数据很不可靠。
- 虽然这些装置正在进行的标定光子能量的改进可提升实验的品质和数据的可靠性, 但利用提供准单能且能量连续可调 γ 束的激光康普顿背散射光源开展光致裂解反应的研究无疑是最佳的选择。



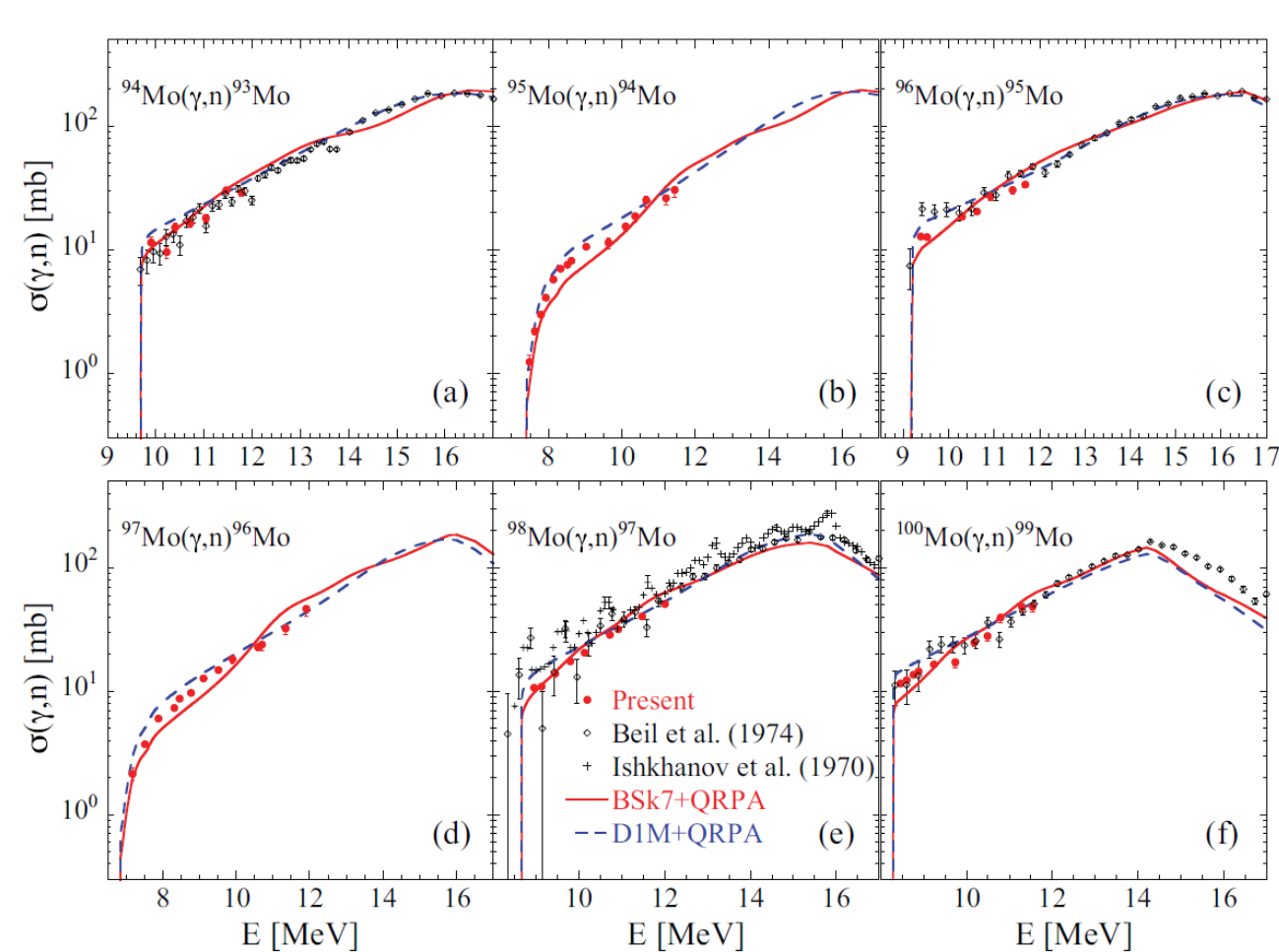
- 日本AIST
- 电子能量：475-607MeV
- γ -能量：7.8-12MeV
- γ -强度： $10^4/\text{s}$



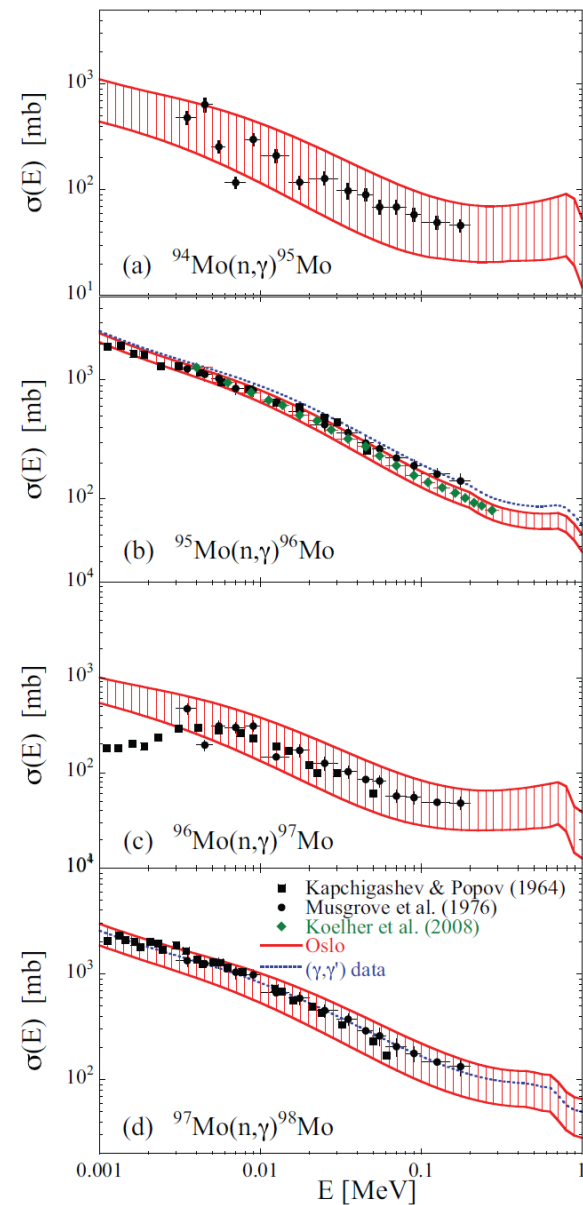
H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 67, 015807 (2003).

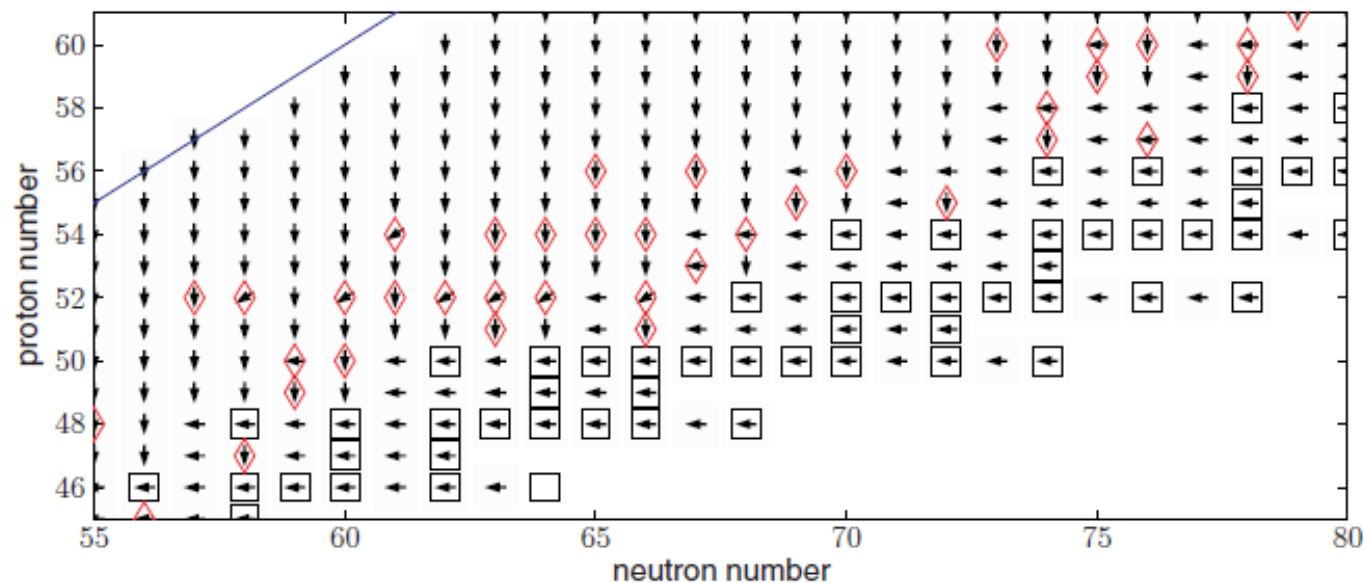
S. Goko et al., Phys. Rev. Lett. 96, 192501 (2006).

实例2 : $\text{Mo}(\gamma, n) \rightarrow (n, \gamma)$

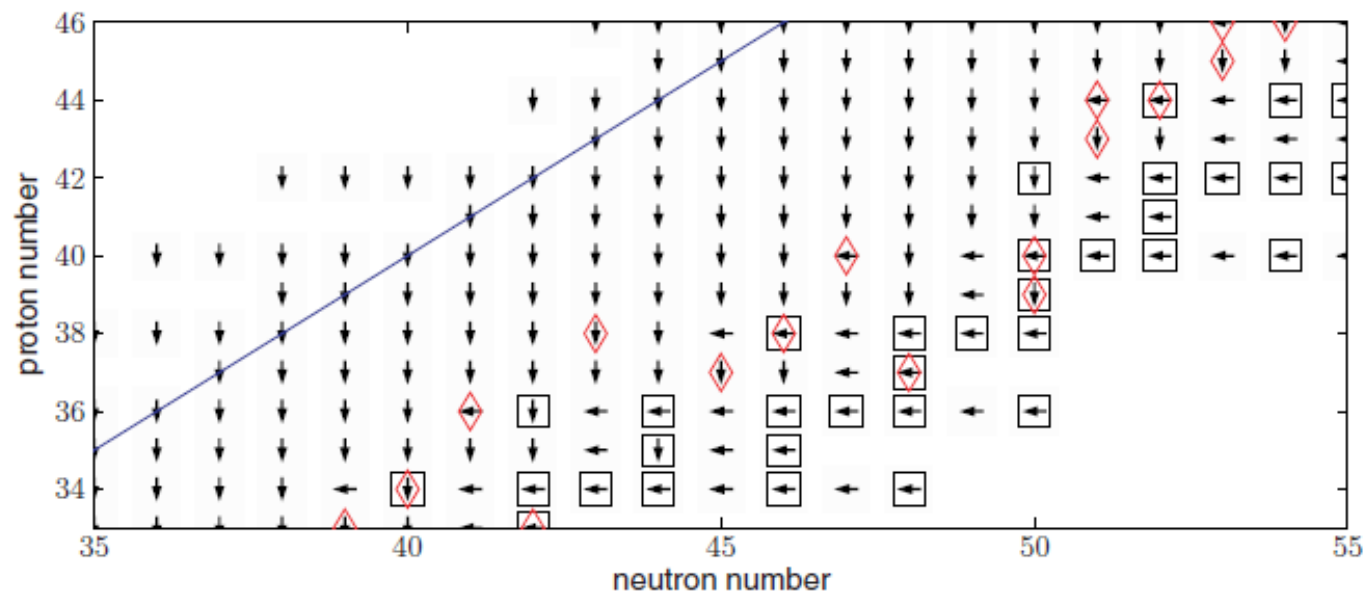


H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 88, 015805 (2013).





p-过程竞争点 (γ, n)
 和 (γ, p) 反应截面



T. Rauscher et al.,
 Rep. Prog. Phys.
 76, 066201 (2013).



ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

PHYSICS REPORTS

Physics Reports 384 (2003) 1–84

www.elsevier.com/locate/physrep

The p-process of stellar nucleosynthesis: astrophysics and nuclear physics status

M. Arnould*, S. Goriely

6.2. The puzzle of the origin of the rare nuclide ^{138}La : a nuclear physics solution?

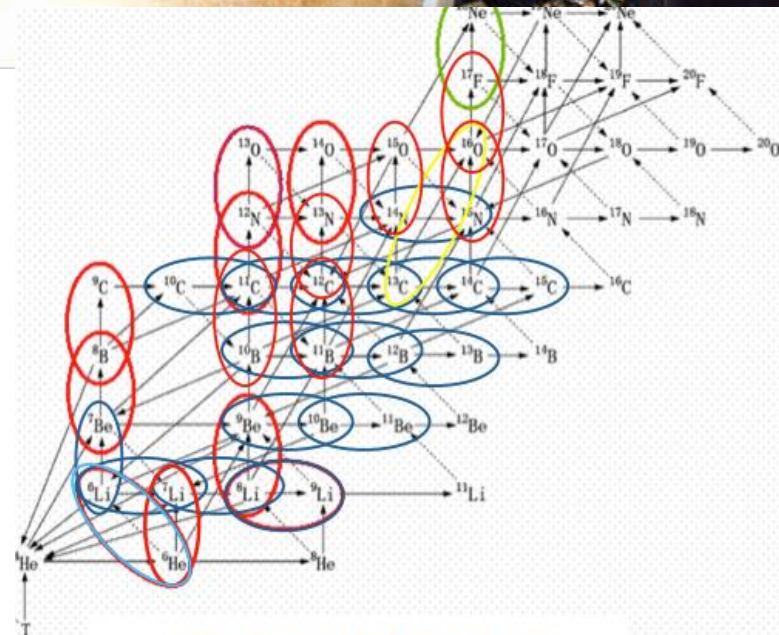
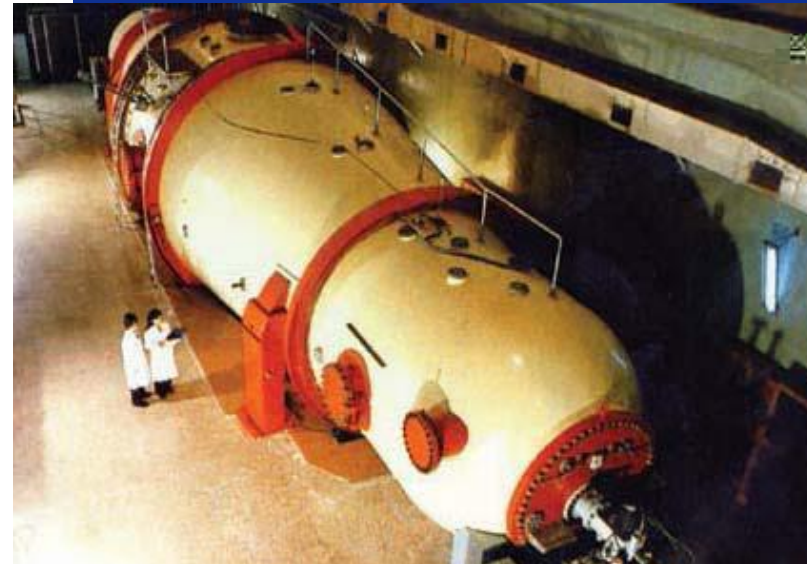
The odd–odd neutron-deficient heavy nuclides ^{138}La and isomeric $^{180}\text{Ta}^m$ are among the rarest solar system species (Fig. 3). In spite of its very small abundance ($^{138}\text{La}/^{139}\text{La} \approx 10^{-3}$), ^{138}La is underproduced in all p-process calculations performed so far (Figs. 31–35). This results from an unfavorable balance between its main production by $^{139}\text{La}(\gamma, n)^{138}\text{La}$ and its main destruction by $^{138}\text{La}(\gamma, n)^{137}\text{La}$, even in the PPLs that are most favorable to the ^{138}La production (in the $Z=Z_{\odot}$, $M=$

- $^{139}\text{La}(\gamma, n)$ 反应截面，有两家实验结果
- $^{138}\text{La}(\gamma, n)$ 反应截面，目前仅有理论结果
- ^{139}La , 99.9% ; ^{138}La , 0.1%, $\sim 1 \times 10^{11} \text{y}$

- LCS , 准单能 γ -束
- 能量 : 6-15 MeV
- 强度 : $>10^{4-5}/s$ (靶上)

CIAE部分工作

${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$, PRL 77, 611 (1996).
 ${}^6\text{He}(p, n){}^6\text{Li}$, PLB 527, 50 (2002).
 ${}^{11}\text{C}(p, \gamma){}^{12}\text{N}$, NPA 728, 275 (2003).
 ${}^8\text{Li}(n, \gamma){}^9\text{Li}$, PRC 71, 052801(R) (2005).
 ${}^8\text{B}(p, \gamma){}^9\text{C}$, NPA 761, 162 (2005).
 ${}^{13}\text{N}(p, \gamma){}^{14}\text{O}$, PRC 74, 035801 (2006).
 ${}^{26}\text{Si}(p, \gamma){}^{27}\text{P}$, PRC 73, 048801 (2006).
 ${}^{11}\text{C}(p, \gamma){}^{12}\text{N}$, JPG 34, 103 (2007).
 ${}^{13}\text{N}(p, p){}^{13}\text{N}$, PRC 77, 044304 (2008).
 ${}^2\text{H}({}^6\text{He}, {}^7\text{Li})n$, EPJA 44, 1 (2010).
 ${}^{147}\text{Sm}$ decay, EPJA 46, 69 (2010).
 ${}^{13}\text{C}(p, \gamma){}^{14}\text{N}$, EPJA 48, 1 (2012).
 ${}^{13}\text{C}(\alpha, n){}^{16}\text{O}$, ApJ 756, 193 (2012).
 ${}^8\text{Li}(p, \gamma){}^9\text{Be}$, PRC 87, 017601 (2013).
 ${}^{12}\text{N}(p, \gamma){}^{13}\text{O}$, PRC 87, 015803 (2013).
 ${}^{22}\text{Na}(p, \gamma){}^{23}\text{Mg}$, PRC 88, 035801 (2013).
 ${}^{53,54}\text{Ni}$ decay, PRC 87, 024312 (2013).
 ${}^{15}\text{N}(n, \gamma){}^{16}\text{N}$, PRC 89, 012801(R) (2014).
 ${}^{16}\text{F}$ proton width, PRC 89, 054315 (2014).
 Revalidation of IMME, PLB 756, 323 (2016).



已经完成的实验研究

结论: 激光电子伽码源有重要科学价值。盼望早日建成, 为我国核物理及核天体物理研究提供一个新平台。

谢谢大家!

Parameters of the existing and future LCS γ -ray facilities around the world after 2000.

Facility name (Location)	Electron energy (GeV)	Laser energy (eV)	Photon energy (MeV)	Beam intensity (photons/s)
ELFE (DESY, Germany)	15~30	2.41~3.52	$3\sim 20\times 10^3$	10^7
LEPS (Hyogo, Japan)	8	3.5	1500~2400	2.5×10^6
At NewSUBARU (Hyogo, Japan)	1 (1.5)	1.17	17.6 (39.1)	2.5×10^5
At Pohang light source (Pusan,Korea)	2.5	0.117	≤ 15	2×10^8
at Spring-8(Hyogo,Japan)	8	0.01	2~10.2	1.3×10^3
At NewSUBARU (Hyogo,Japan)	1-1.5	0.117	1.72,2.72,3.91	5.8×10^6
UVSOR-II (Okazaki, Japan)	0.75	1.556	6.6	2.4×10^6
at TERAS (Ibaraki, Japan)	0.3-0.8	1.17	1-30	2.4×10^5
IGS (California, USA)	0.547 (Linac)	2.34	<10.8	$\sim 10^{14}$
at JAEA-ERL (Japan)	0.35 (ERL)	1.17	<2.2	10^{13}
at ALBA (Barcelona, Spanish)	3.0	0.117,0.1-0.83, 1.17,2.34,3,51, 4.68	0.5-16,16-110,120-530	3×10^8 10^4 - 10^6
SLEGS (Shanghai, China)	3.5	0.117/other	20MeV/0.1-700MeV	$10^8/10^{5-6}$

- H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 67, 015807 (2003).
- H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 74, 025806 (2006).
- S. Goko et al., Phys. Rev. Lett. 96, 192501 (2006).
- H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. Lett. 100, 162502 (2008).
- A. Makinaga et al., Phys. Rev. C 79, 025801 (2009).
- H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 80, 055806 (2009).
- A. Makinaga et al., Phys. Rev. C 81, 035801 (2010).
- H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 82, 064610 (2010).
- H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 84, 055805 (2011).
- T. Kondo et al., Phys. Rev. C 86, 014316 (2012).
- H. Utsunomiya et al., Phys. Rev. C 88, 015805 (2013).
- C. Ugalde et al., Phys. Lett. B 719, 74 (2013).
-