

恒星中的氟丰度问题

郭 冰

中国原子能科学研究院

六个关键科学问题

- 恒星平稳演化阶段最重要的热核反应在天体物理能区的直接测量
- 高能区带电粒子反应截面向天体物理能区的合理外推
- 若干关键的平稳核燃烧阶段和爆发性 rp 及 r 过程核反应截面的间接测量
- rp 和 r 过程涉及核素衰变性质、质量、反应和共振态性质的测量
- 核天体物理反应和衰变性质的理论研究、数据库和网络方程的建立
- 通过元素丰度的观测研究天体核合成的场所

报告内容

- 合成 ^{19}F 的天体场所及其丰度难题
- 影响 ^{19}F 丰度的反应
- 已经完成的实验
- 下一步的研究计划

合成 ^{19}F 的天体场所

- 长期以来，仅仅在太阳系中发现了极少量的氟（ ^{19}F ），宇宙中 ^{19}F 的来源之谜一直是天文学家和核物理学家关注的热点课题。

A&A 355, 176 (2000); Space Sci. Rev. 85, 161 (1998).

- 可能的场所1：Wolf-Rayet stars, by wind mass-loss, **A&A 355, 176 (2000).**

- 可能的场所2：Type II supernovae, $^{20}\text{Ne}(\nu, \nu')^{20}\text{Ne}^* \rightarrow ^{19}\text{F} + \text{p}$

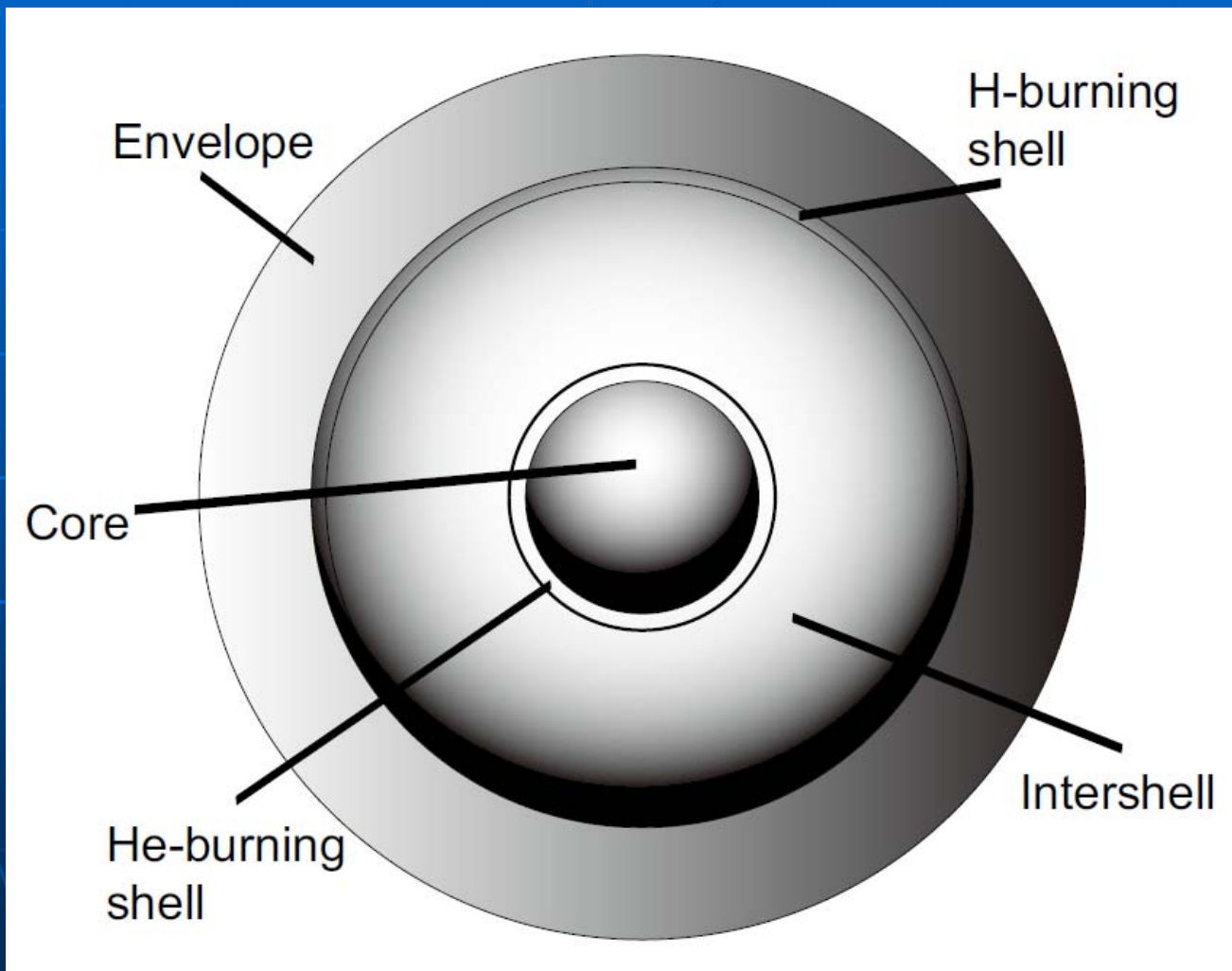
Nature 334, 45 (1988); APJ 356, 272 (1990).

- 可能的场所3：AGB stars
- 前两个场所仍未被实验证实。

AGB星中氟的超丰现象

- 1992年，美国德克萨斯大学天文系在渐进巨支（AGB）星中观测到了 ^{19}F 的超丰现象，其丰度达到了太阳中 ^{19}F 丰度的30倍，他们推测 ^{19}F 可能主要来自AGB星中的核合成过程。A&A 261, 164 (1992).
- 2005年，德国图宾根大学的最新天文观测发现，极端高温post-AGB星中的 ^{19}F 丰度是太阳中丰度的250倍，进一步确认了 ^{19}F 主要来自AGB星中的核合成过程。
A&A 433, 641 (2005).
- 利用现有核物理输入量的AGB模型计算不能解释如此高的 ^{19}F 丰度，最可能的原因是核反应率不正确。
M. Lugaro et al., APJ 615, 934 (2004).

AGB星结构



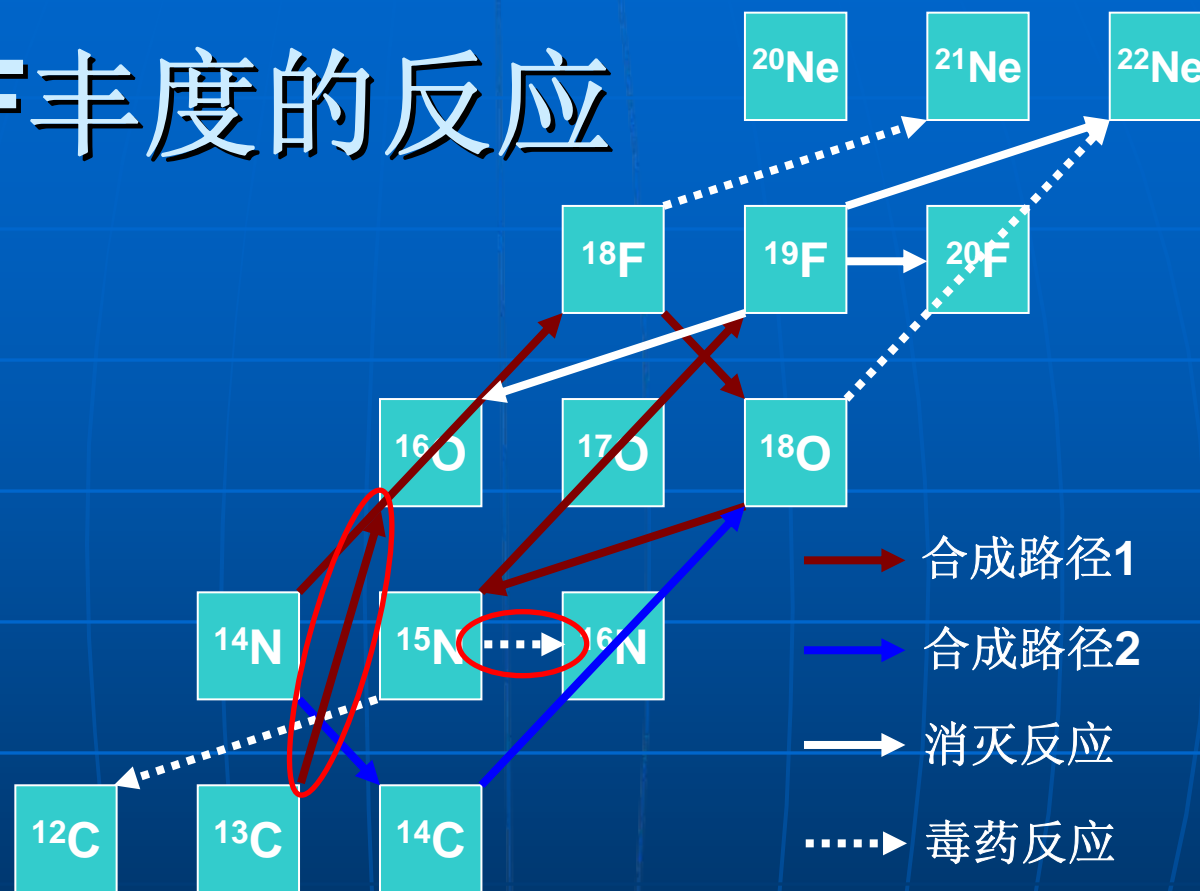
合成 ^{19}F 丰度的反应

- 由于 $^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$ 反应截面大, 在丰氢环境中合成的 ^{19}F 很快被摧毁
- ^{19}F 的合成发生在AGB星的内壳 (intershell)
 - $^{14}\text{N}(\alpha,\gamma)^{18}\text{F}(\beta^+)^{18}\text{O}(\text{p},\alpha)^{15}\text{N}(\alpha,\gamma)^{19}\text{F}$
 - $^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})^{14}\text{C}(\alpha,\gamma)^{18}\text{O}(\text{p},\alpha)^{15}\text{N}(\alpha,\gamma)^{19}\text{F}$
- 几个基本成分 (n , p , ^{14}N , ^{13}C) 的来源
 - n 来源于中子源反应 $^{13}\text{C}(\alpha,\text{n})^{16}\text{O}$
 - p 有两个来源: $^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})^{14}\text{C}$ 和proton (from envelope) mixing into He-rich intershell
 - ^{14}N 和 ^{13}C 也有两个来源: ashes of hydrogen burning by CNO cycling, $^{12}\text{C}(\text{p},\gamma)^{13}\text{N}(\beta^+)^{13}\text{C}(\text{p},\gamma)^{14}\text{N}$

毒药反应与消灭 ^{19}F 的反应

- 毒药反应
- $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}$, $^{15}\text{N}(\text{p}, \alpha)^{12}\text{C}$, $^{15}\text{N}(\text{n}, \gamma)^{16}\text{N}$ 等
- 消灭 ^{19}F 的反应
- $^{19}\text{F}(\alpha, \text{p})^{22}\text{Ne}$, $^{19}\text{F}(\text{n}, \gamma)^{20}\text{F}$, $^{19}\text{F}(\text{p}, \alpha)^{16}\text{O}$

影响 ^{19}F 丰度的反应



- ^{19}F 丰度问题涉及十余种核素, 十几个核反应, 研究这个问题需要长期系统的工作
- 我们已完成两个反应的测量:
 - $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$, B. Guo et al., will be submitted to APJ.
 - $^{15}\text{N}(n, \gamma)^{16}\text{N}$, B. Guo et al., data analysis in progress.

完成的实验

- $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 研究意义
- $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 研究现状
- 实验与结果
- 对s过程核素丰度的影响

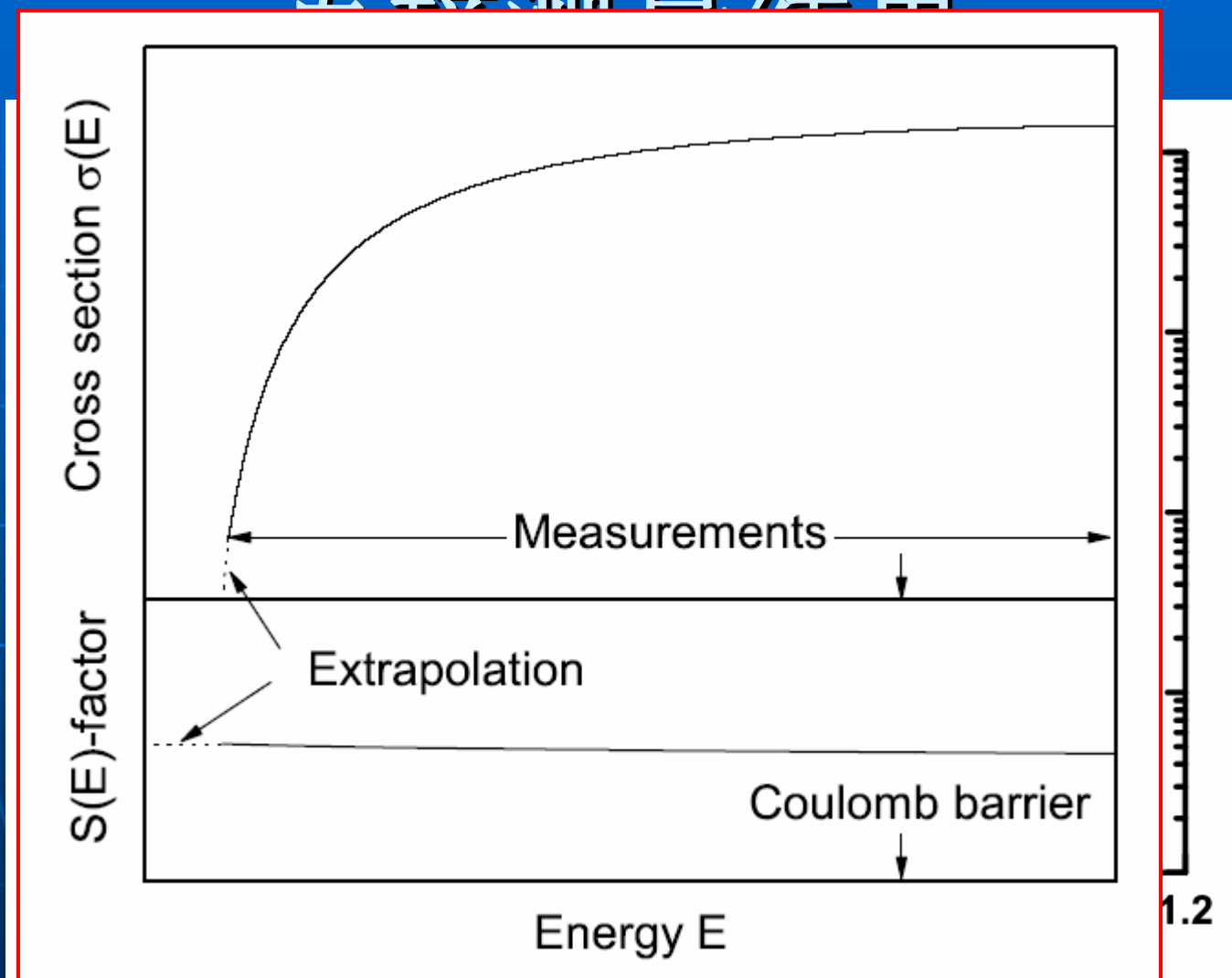
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 研究意义

- **s过程**是恒星演化进程中最重要核合成过程之一，铁以上的核素中**有大约一半**是通过该过程产生的；
- **AGB星**是发生s过程最可能发生的天体物理环境之一；
- **$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应**是AGB星中s过程核合成最主要的中子来源。

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 研究现状

- 直接测量工作：用 α 粒子轰击 ^{13}C 靶，探测 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应中出射的中子
- 美国加州理工学院，NPA110(1968)619
- 印度原子能研究所，PR156(1967)1187
- 美国橡树岭国家实验室，PRC7(1973)1356
- 美国圣母大学，PRC48(1993)3119
- 加拿大多伦多大学，BAPS34(1989)1192
- 德国斯图加特大学，APJ414(1993)735
- 德国鲁尔大学，PRC72(2005)062801R
- 德国核物理研究所，PRC78(2008)025803

直接测量结果



20 现有直接测量数据不能给出伽莫夫窗口内的反应截面!

间接测量

- 间接测量：测量影响 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应截面的关键共振参数，而不去测量反应中出射的中子
- 四个阈 ($S_{\alpha}=6.359\text{MeV}$) 上共振已经很好测定， $E_x(^{17}\text{O})=7.166, 7.202, 7.379, 7.382\text{MeV}$
- 关键：一个阈下共振，仅比 α 发射阈低 0.003 MeV ， $E_x(^{17}\text{O})=6.356\text{ MeV}$

间接测量方法

测量 $^{13}\text{C}(\text{A}, \text{x})^{17}\text{O}^*(6.356\text{MeV})$ 角分布



DWBA分析

^{17}O 阈下态(6.356MeV)的核谱因子或ANC

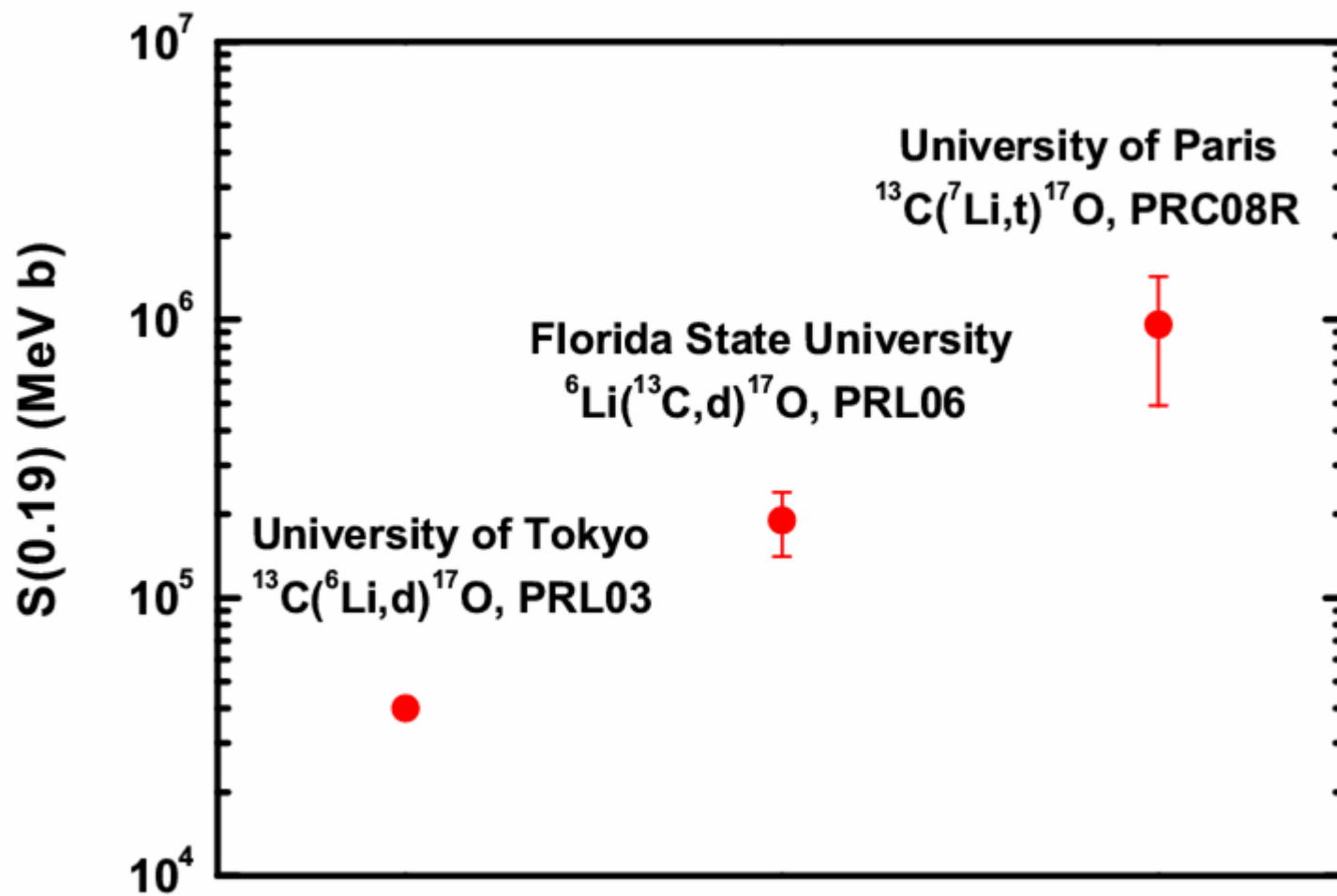


$$\Gamma_{\alpha}(E) = \frac{\hbar^2 R_c}{\mu} |\phi(r)|^2 P_l(E) S_{\alpha}$$



Breit-Wigner公式

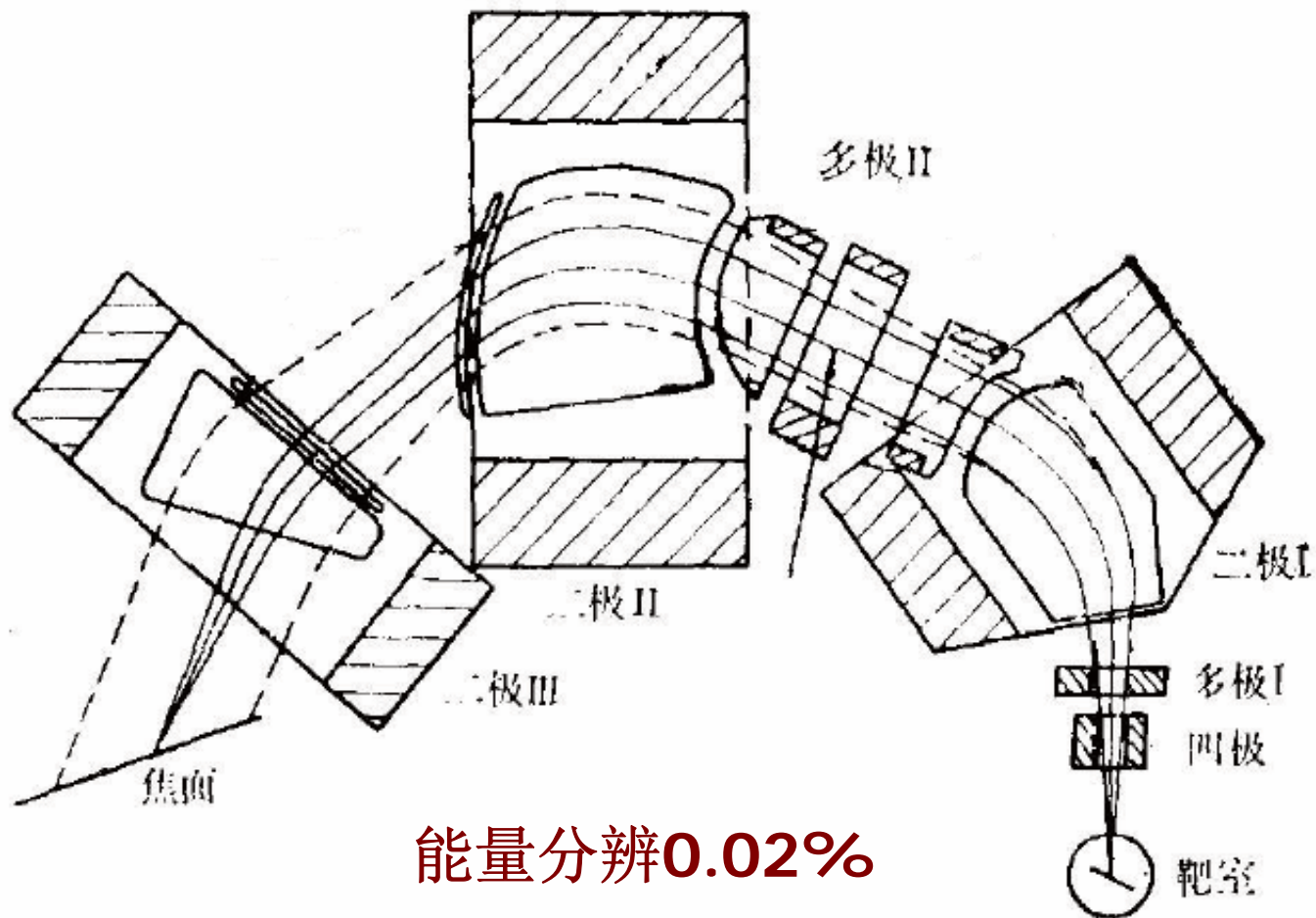
$$\sigma_{BW}(E) = \pi \frac{\hbar^2}{2\mu E} \frac{2J_R + 1}{(2J_1 + 1)(2J_2 + 1)} \frac{\Gamma_{in}(E)\Gamma_{out}(E)}{(E - E_R)^2 + (\Gamma_{tot}/2)^2}$$



现有三个实验结果相差5-25倍！

201 我们的方案：测量 $^{13}\text{C}(^{11}\text{B},^7\text{Li})^{17}\text{O}$ 反应

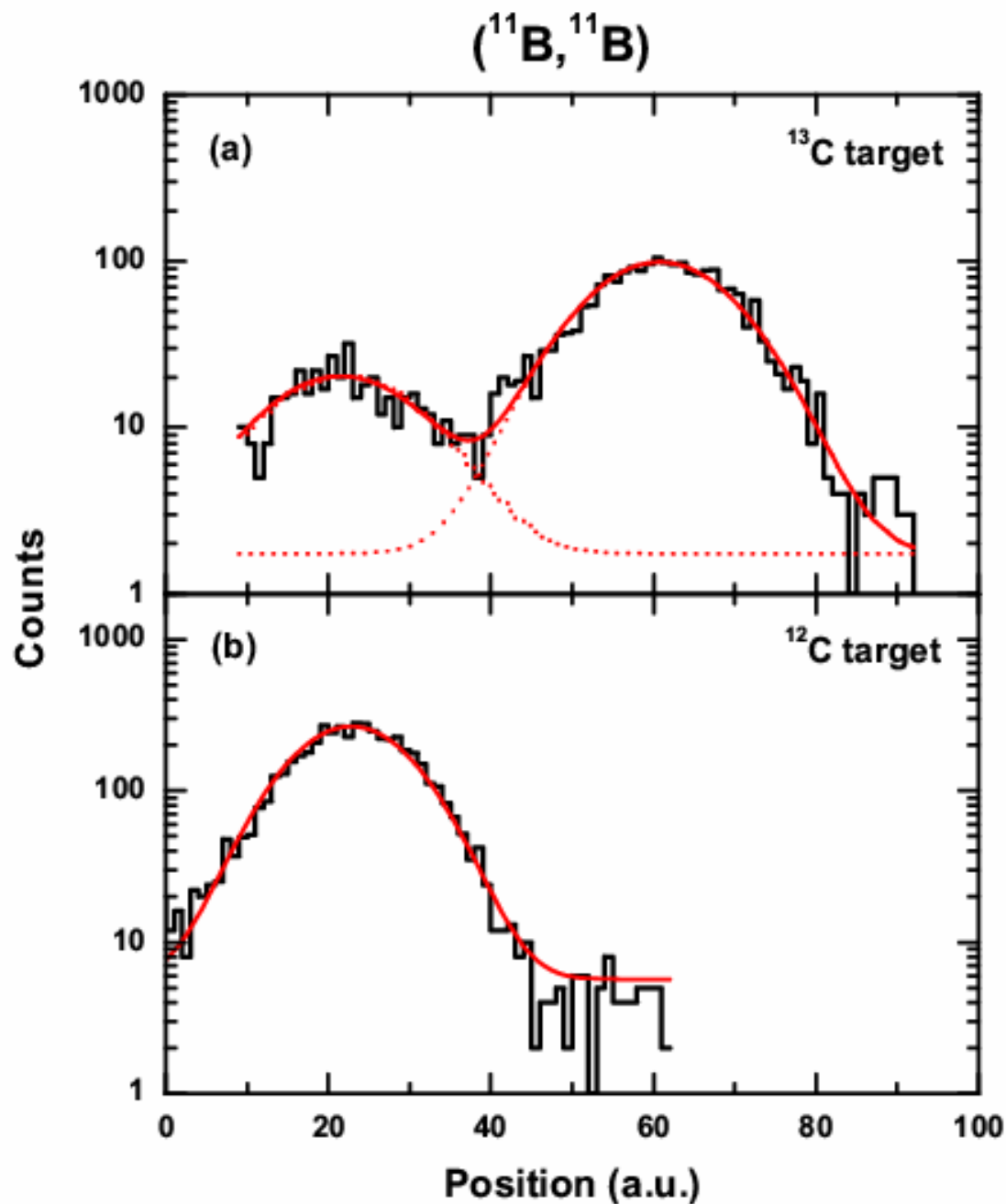
实验设备—Q3D磁谱仪



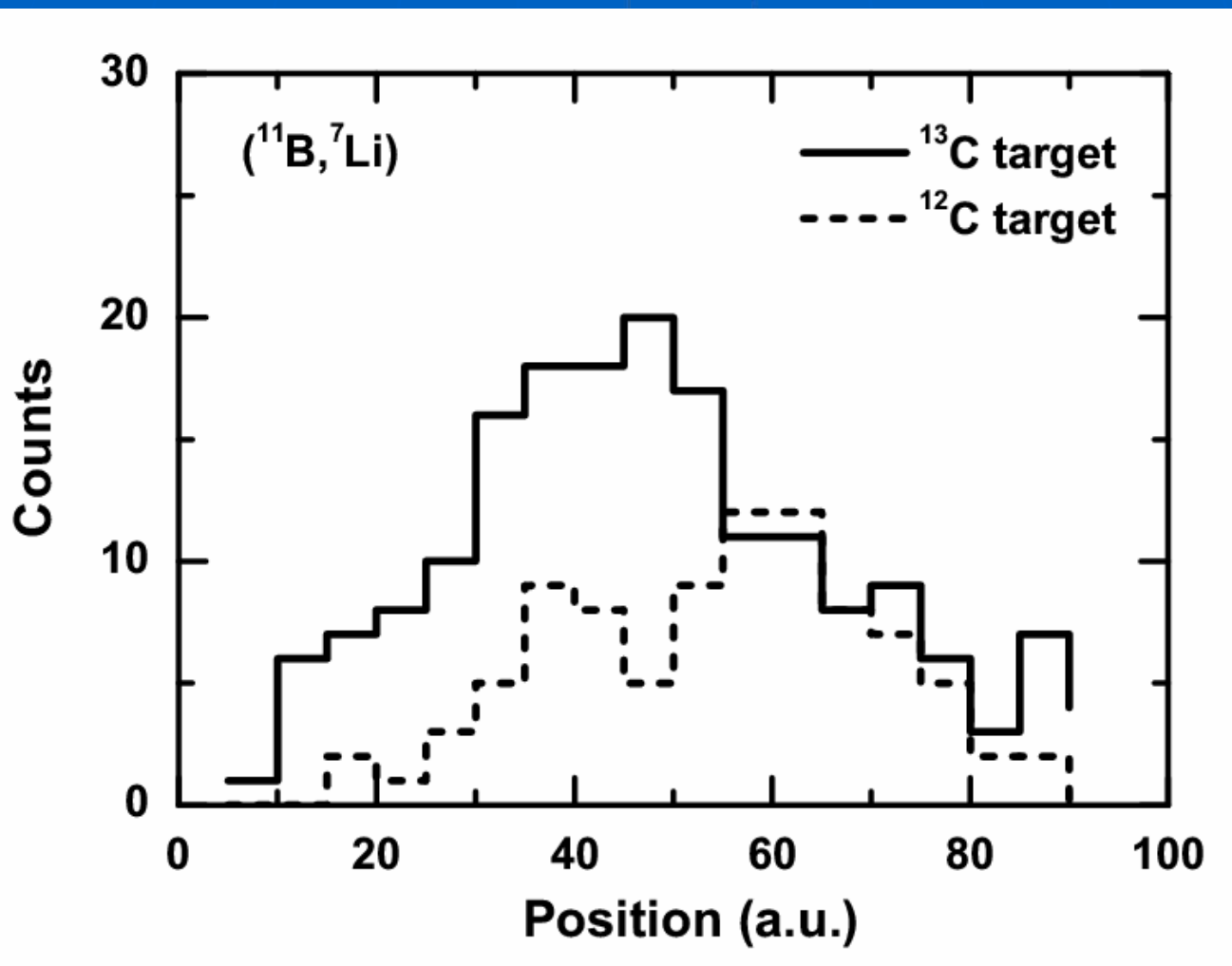
实验过程

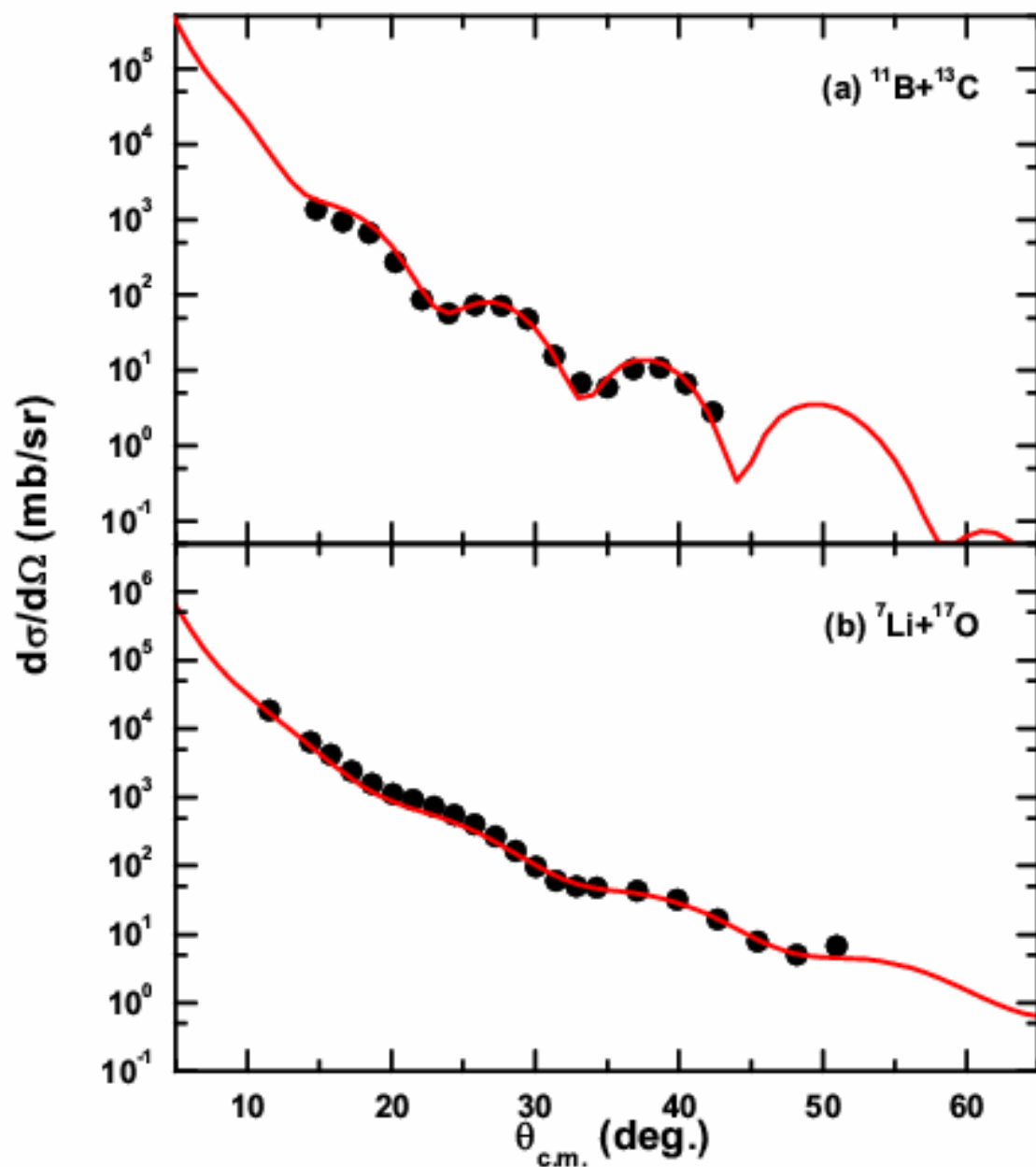
- 利用串列加速器提供的 ^{11}B 束流（50MeV）轰击高富集的 ^{13}C 同位素靶；
- 使用Q3D磁谱仪结合焦平面的双维位置灵敏硅探测器；
- 测量 $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}^*$ （6.356MeV）的角分布；
- 测量 $^{11}\text{B}+^{13}\text{C}$ 和 $^7\text{Li}+^{17}\text{O}$ 弹性散射的角分布。

弹性散射 的效应与 本底对比



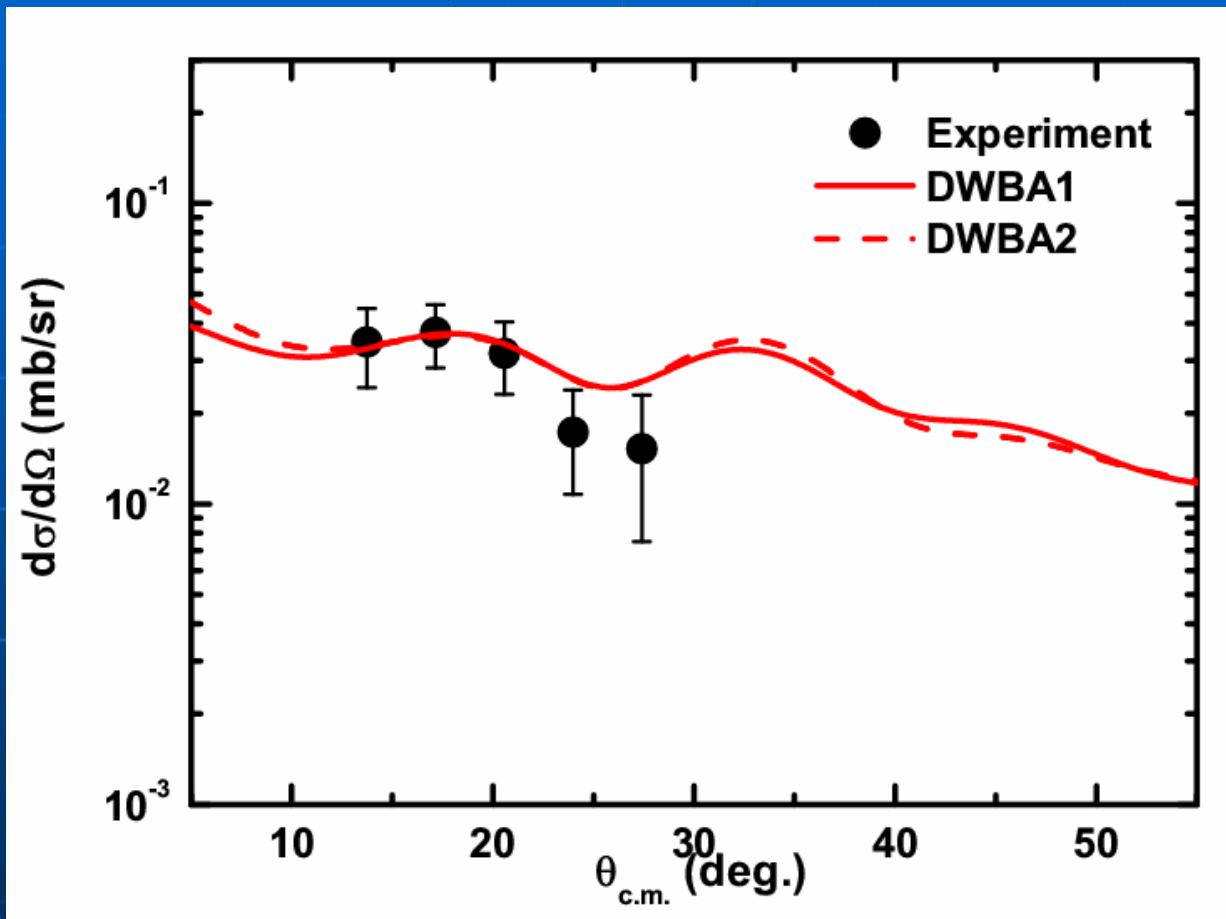
转移反应的效应与本底对比





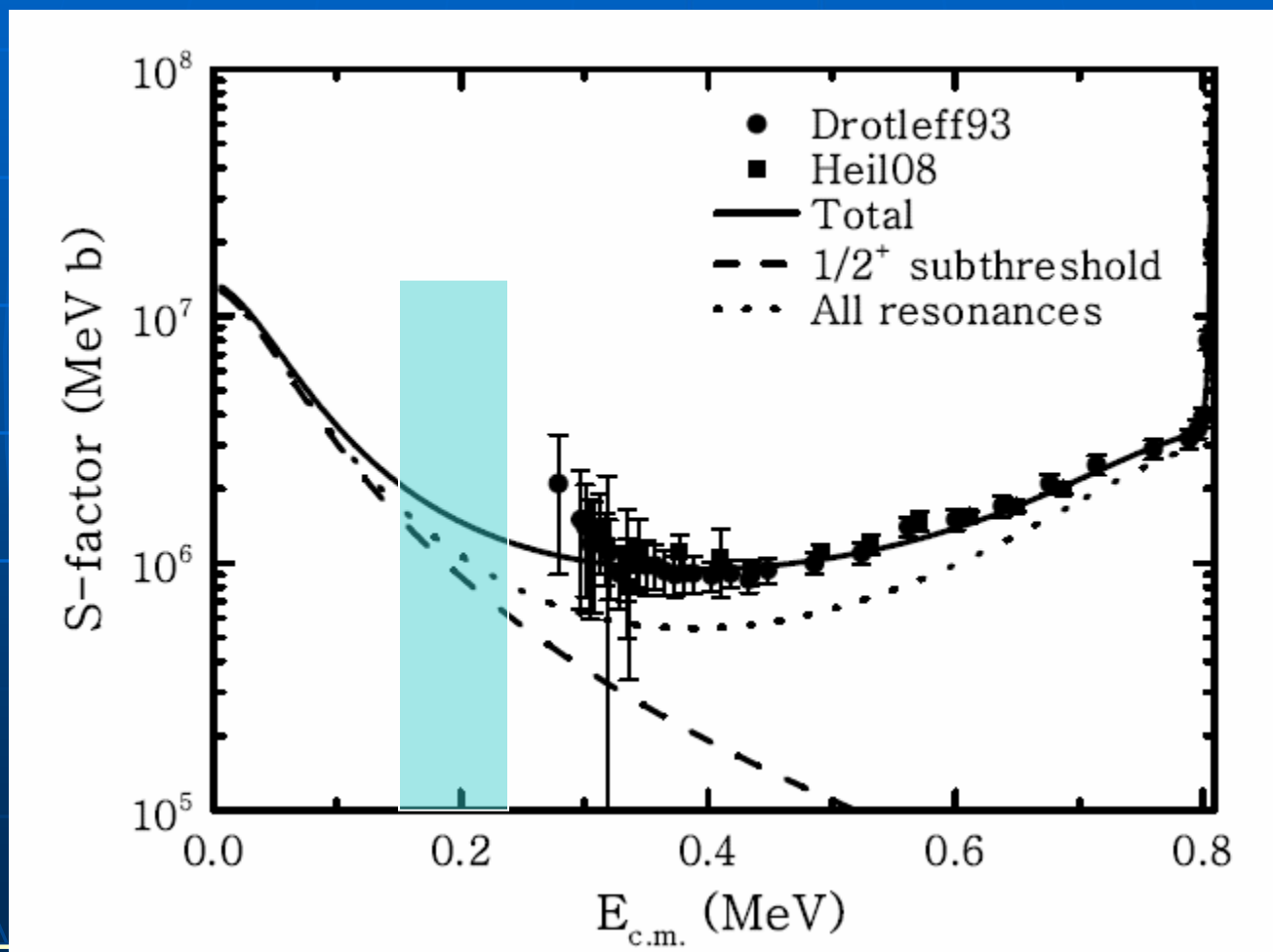
${}^{11}\text{B}+{}^{13}\text{C}$
 ${}^7\text{Li}+{}^{17}\text{O}$ 弹性散射的
角分布,
用于抽取
入射道和
出射道的
光参

$^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^7\text{Li})^{17}\text{O}^*$ 的角分布

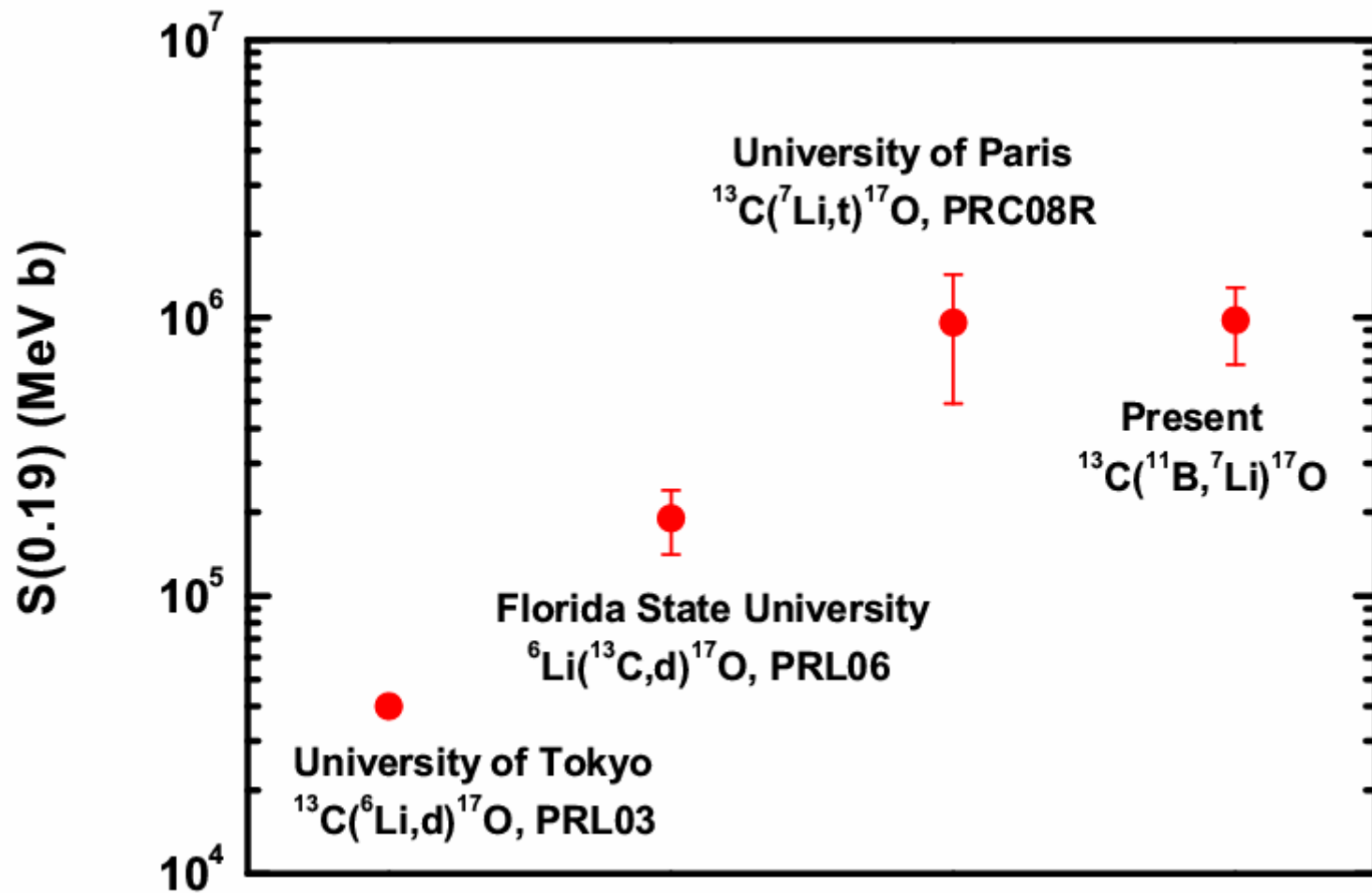


$$S_{\alpha} = 0.40 \pm 0.12, \text{ANC}^2 = 4.9 \pm 1.5 \text{ fm}^{-1}$$

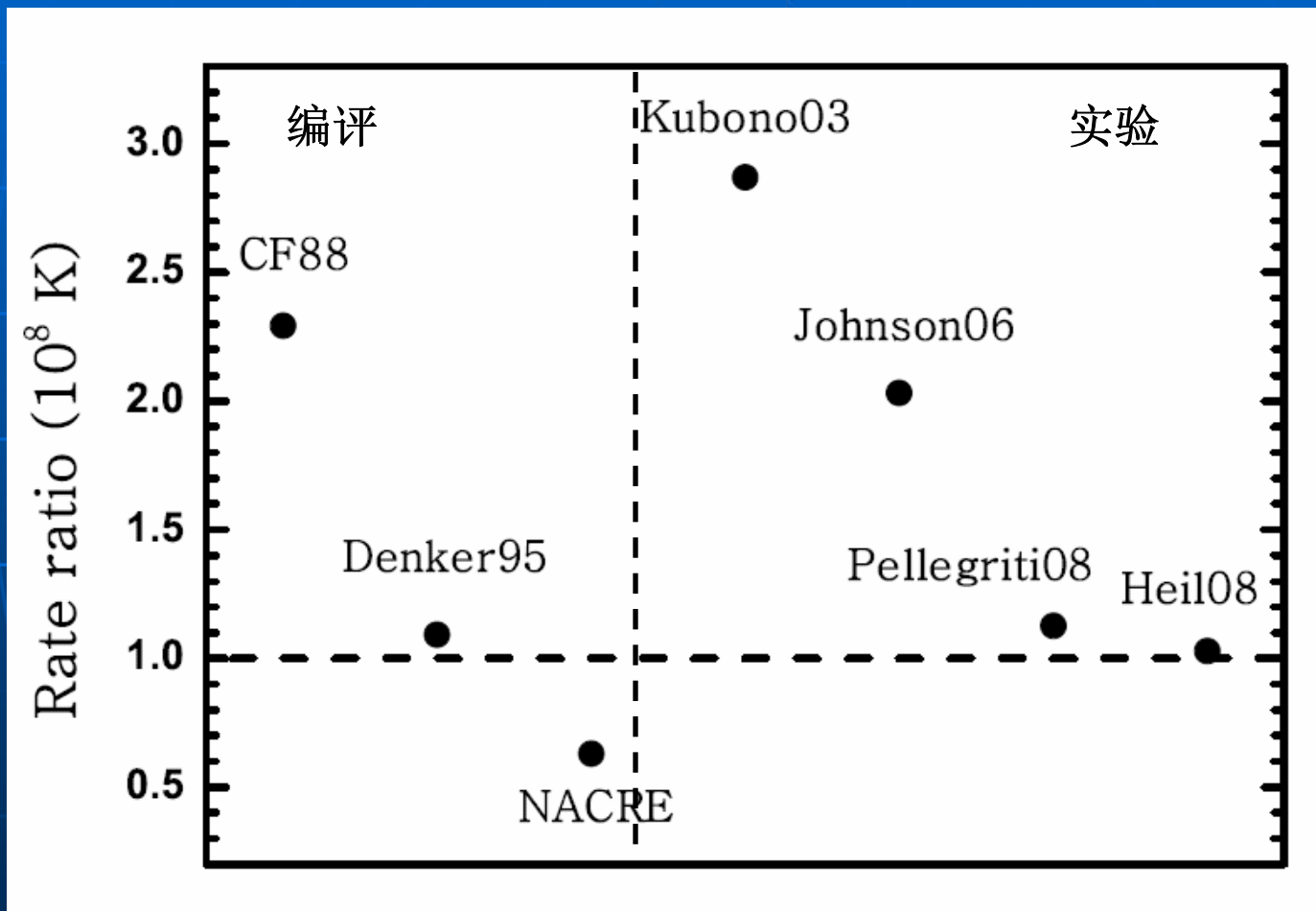
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应的天体物理S因子



S(0.19)因子的比较



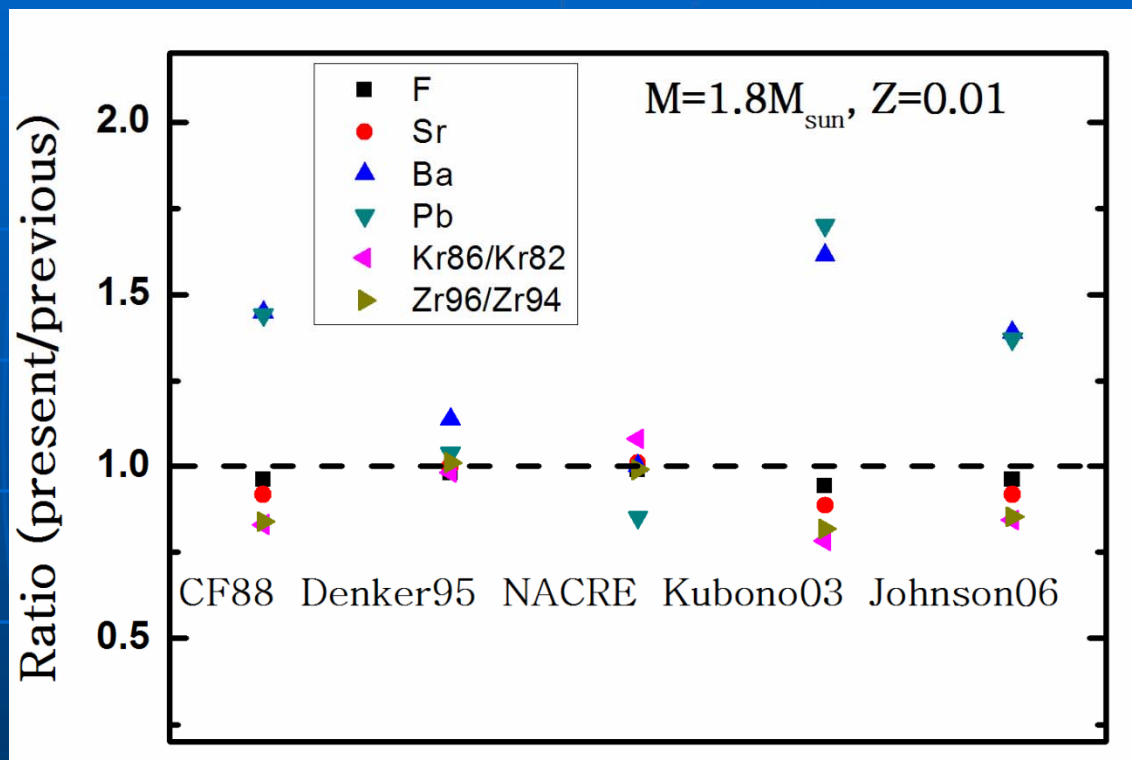
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应率的比较



AGB星网络计算

- 网络计算考虑了320种核素（从H到Bi）
- 考虑了2336个核反应
- 使用了四个模型： $M=1M_{\text{sun}}$ ， $Z=0.0001$ ； $M=1.5M_{\text{sun}}$ ， $Z=0.0001$ ； $M=1.8M_{\text{sun}}$ ， $Z=0.01$ ； $M=3M_{\text{sun}}$ ， $Z=0.02$
- 模拟了当前反应率结果对F和s过程代表性核素（Sr, Ba, Pb）的影响
- 模拟了对同位素比例（isotopic ratio）的影响： $\text{Kr}86/\text{Kr}82$ ， $\text{Zr}96/\text{Zr}94$

结果与讨论



模型结果表明: 对F的丰度影响可以忽略, 氟超丰现象需要考虑氟合成网络中的其它反应; $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应率对Ba, Pb, $^{86}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$ 影响大 (60%)。

$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 工作总结

- 通过间接测量确定了伽莫夫窗口内的天体物理S因子，为澄清现有结果的巨大分歧（**5-25倍**）提供了重要数据
- 首次通过AGB星模型研究了 $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$ 反应率数据对**s过程核素丰度和同位素比例**的影响
- 比较了模型结果与天文观测数据
- 丰度的天文观测数据不确定度达80%，大于反应率对核素丰度的影响（60%），因此未来需要更高分辨率和信噪比的观测谱
- 对于Kr同位素比例，模型结果小于太阳中的观测值，需要重新检验3个方面：**核物理输入**（ n, γ ）、**网络模型**（新机制）、**天文数据**（更多观测）



下一步的研究计划

- 继续完成 $^{15}\text{N}(\text{n},\gamma)^{16}\text{N}$ 实验的数据分析工作，结合网络计算研究其对氟丰度的影响
- 计划在串列加速器上间接测量 $^{14}\text{C}(\alpha,\gamma)^{18}\text{O}$ 反应
- 网络计算表明：反应率的不确定度对 ^{19}F 丰度影响极大，**0.5-7.0 (3-5M_{sun})** APJ615, 934 (2004).
- AGB星中该反应伽莫夫峰在**250keV**，氦白矮星 (< 0.4M_{sun}) 中的伽莫夫峰在**50keV**
- 直接测量及其困难，已有直接测量数据只低到质心系**880keV**，NPA548, 414 (1992)，需要间接测量
- 群体内部的一个合作点，核物理实验 + s过程网络 + 天文数据
- 基于镜像核电荷对称性研究不稳定核 (α,γ) 反应

谢谢!

New evaluation of the $^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ reaction rate and its influence on *s*-process nucleosynthesis in AGB stars

B. Guo, Z. H. Li, Y. J. Li, J. Su, S. Q. Yan, X. X. Bai, Y. S. Chen, Q. W. Fan, S. J. Jin, E. T. Li, Z. C. Li, G. Lian, J. C. Liu, X. Liu, N. C. Shu, B. X. Wang, Y. B. Wang, S. Zeng and W. P. Liu

China Institute of Atomic Energy, P.O. Box 275(10), Beijing 102413, China;
wpliu@ciae.ac.cn

D. Y. Pang

School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China

M. Lugaro and J. Buntain

Centre for Stellar and Planetary Astrophysics, Monash University, Clayton 3800, Victoria, Australia

A. I. Karakas

Research School of Astronomy & Astrophysics, Mount Stromlo Observatory, Weston Creek ACT 2611, Australia

and

J. R. Shi

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing 100012, China

Work	F	Sr	Ba	Pb	$^{86}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$	$^{96}\text{Zr}/^{94}\text{Zr}$
Present	5.07×10^{-9}	5.30×10^{-11}	9.01×10^{-11}	1.29×10^{-10}	23.5	0.838
CF88 (%)	4	-8	1	40	46	7
Denker95 (%)	1	0	-1	4	4	0
NACRE (%)	1	8	4	-5	-9	-4
Kubono03 (%)	4	-11	1	51	59	6
Johnson06 (%)	4	-5	0	31	36	6
Pellegriti08 (%)	0	-1	0	1	2	0

Work	F	Sr	Ba	Pb	$^{86}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$	$^{96}\text{Zr}/^{94}\text{Zr}$
Present	1.27×10^{-7}	1.66×10^{-10}	1.97×10^{-10}	6.95×10^{-10}	19.9	0.377
CF88 (%)	10	-5	-4	25	-20	2
Denker95 (%)	1	-1	0	3	-1	-6
NACRE (%)	-4	8	-7	-7	-14	-2
Kubono03 (%)	13	-1	-5	31	-23	0
Johnson06 (%)	8	-5	-1	20	-16	-1
Pellegriti08 (%)	2	-2	0	3	-2	-5

Work	F	Sr	Ba	Pb	$^{86}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$	$^{96}\text{Zr}/^{94}\text{Zr}$
Present	5.09×10^{-8}	4.39×10^{-9}	1.96×10^{-9}	4.28×10^{-10}	1.30	0.0505
CF88 (%)	4	9	-31	-31	20	19
Denker95 (%)	2	0	-12	-4	2	-1
NACRE (%)	1	-1	0	18	-7	1
Kubono03 (%)	6	13	-38	-41	28	22
Johnson06 (%)	4	9	-28	-27	19	17
Pellegriti08 (%)	0	-1	-6	6	0	3

Work	F	Sr	Ba	Pb	$^{86}\text{Kr}/^{82}\text{Kr}$	$^{96}\text{Zr}/^{94}\text{Zr}$
Present	1.12×10^{-7}	1.39×10^{-8}	1.76×10^{-9}	4.93×10^{-10}	0.409	0.0165
CF88 (%)	0	0	-1	-3	1	5
Denker95 (%)	0	0	0	0	-1	1
NACRE (%)	-3	0	1	2	2	0
Kubono03 (%)	7	-1	-2	-5	2	9
Johnson06 (%)	4	-1	-1	-2	-1	2
Pellegriti08 (%)	0	-1	-1	-1	-1	2