

中加、中日核天体物理 国际合作实验 (CIAE)

郭 冰

中国原子能科学研究院

中加合作 (TRIUMF)

- 合作研究基础
- 未来三年目标
- 直接测量，对应群体方向第二项

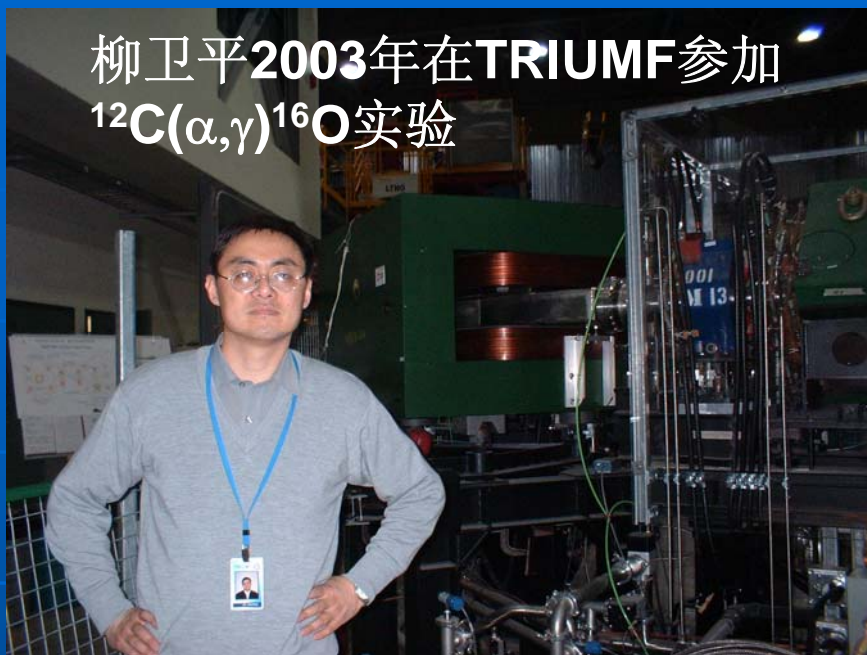
中日合作 (RIKEN/CNS)

- 合作研究基础
- 未来三年目标
- 间接测量，对应群体方向第一项

中加合作—合作研究基础

- CIAE与TRIUMF有多年的良好合作记录，合作领域涉及核天体物理实验、回旋加速器研发和放射性同位素生产；
- 2000年，TRIUMF召开电磁分离器国际会议，柳卫平研究员在大会上作了核天体物理方面的邀请报告，启动了与加方在核天体物理实验方面的国际合作；
- 2002年，CIAE与TRIUMF正式签订了谅解合作备忘录，并于2006年续签第二期谅解合作备忘录；
- 核天体物理合作：多次访问、 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ -PRL、 ^{11}C 束流产生新方法-CJP。

柳卫平2003年在TRIUMF参加
 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 实验

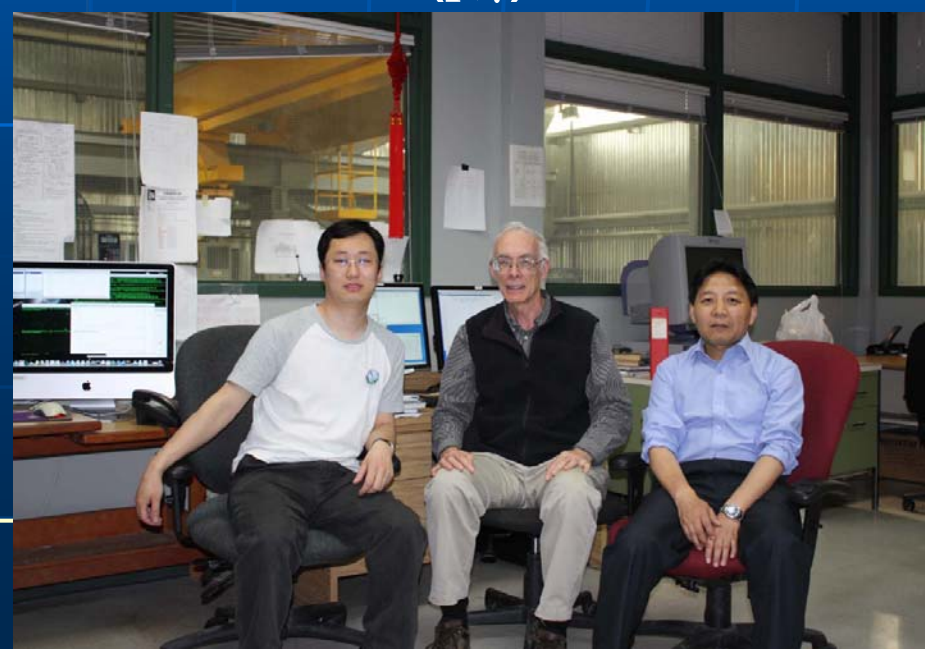
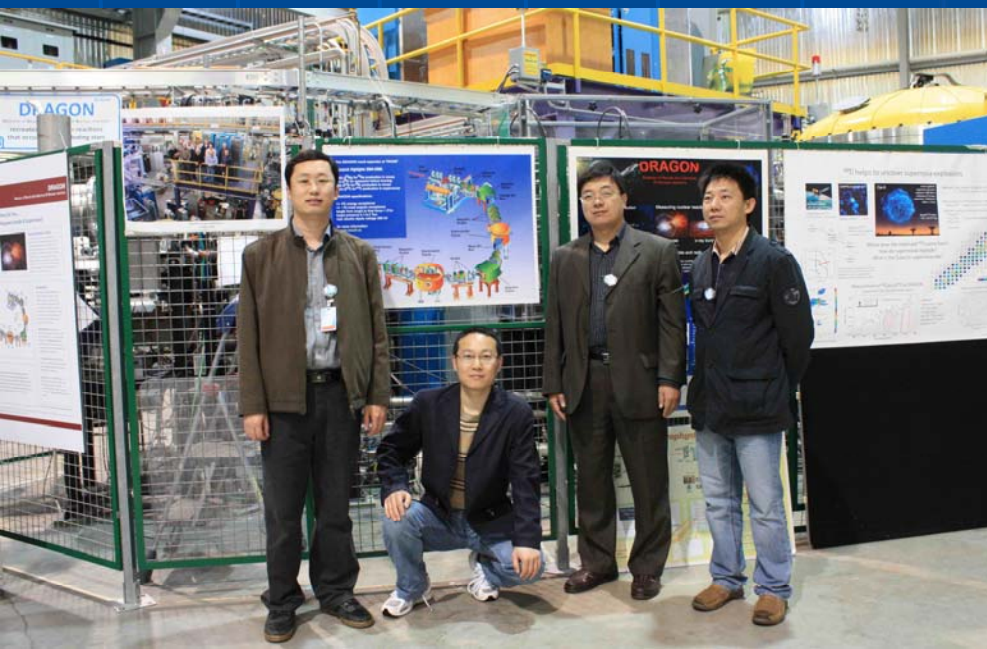


平

李志宏2003年在TRIUMF参加
 $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ 实验



李志宏、王友宝、郭冰等2010年在TRIUMF参加 $^{33}\text{S}(\text{p},\gamma)^{34}\text{Cl}$ 实验



中加合作—未来三年目标

两个直接测量目标

- $^{11}\text{C}(\text{p},\gamma)^{12}\text{N}$, 高温pp链、快速 αp 过程, 我方任发言人
- $^{33}\text{S}(\text{p},\gamma)^{34}\text{Cl}$, 新星爆发、 ^{33}S 过丰现象, 我方共享数据, 已完成实验测量

研究意义

恒星演化中的氢燃烧（恒星能源，元素合成）

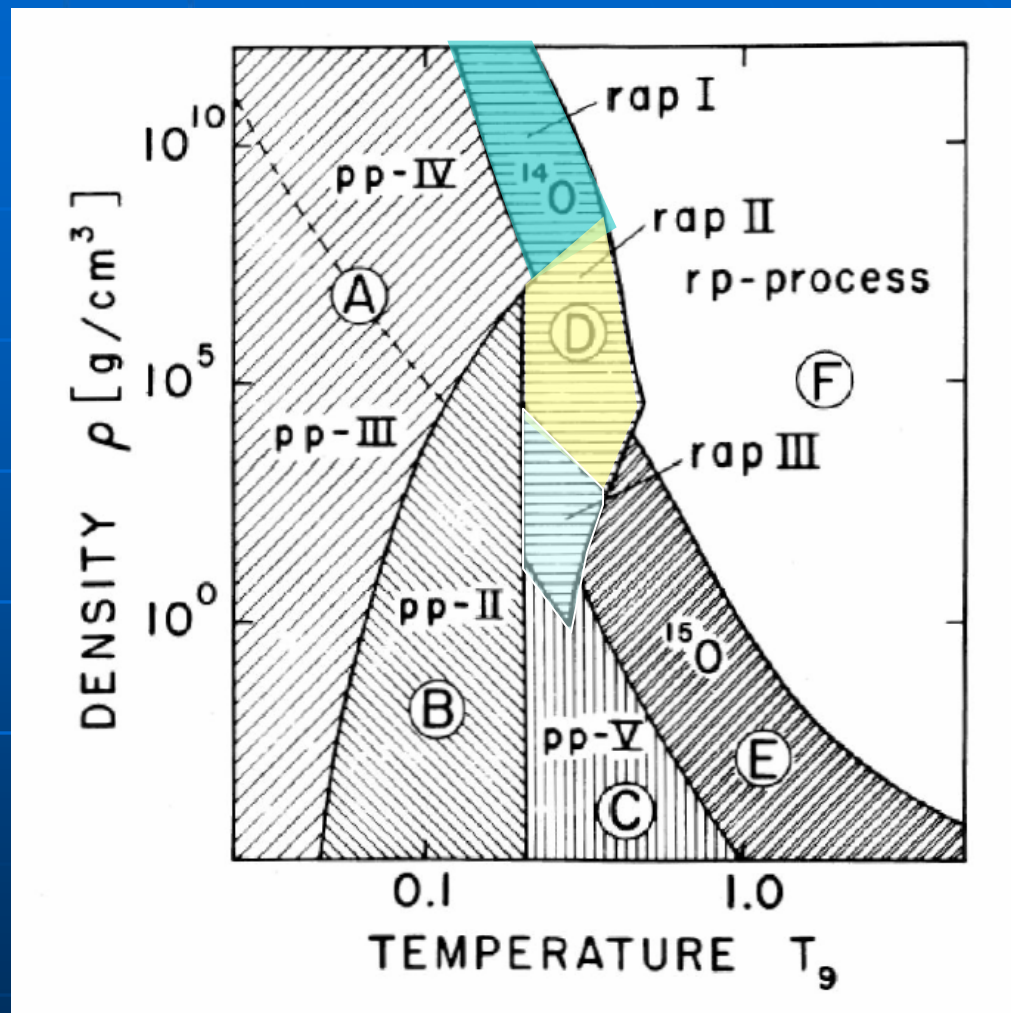
- pp反应链，中小质量恒星能源，如太阳，1967年诺贝尔物理奖
- CNO循环，大质量、超大质量恒星
- 快速 α p过程，从pp反应链核合成CNO核，高温高密环境中 3α 过程的替代反应链
- rp过程，继续合成更重核素
- 质子辐射俘获（ p,γ ）反应是氢燃烧的一个重要途径

研究意义（续）

${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}(\text{p},\gamma){}^8\text{B}(\text{p},\gamma){}^9\text{C}(\alpha,\text{p})$
 ${}^{12}\text{N}(\text{p},\gamma){}^{13}\text{O}(\beta^+\nu){}^{13}\text{N}(\text{p},\gamma){}^{14}\text{O}$, rap I

${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}(\alpha,\gamma){}^{11}\text{C}(\text{p},\gamma){}^{12}\text{N}(\text{p},\gamma){}^{13}\text{O}$
 $(\beta^+\nu){}^{13}\text{N}(\text{p},\gamma){}^{14}\text{O}$, rap II

${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}(\alpha,\gamma){}^{11}\text{C}(\text{p},\gamma){}^{12}\text{N}(\beta^+\nu){}^{12}\text{C}(\text{p},\gamma){}^{13}\text{N}(\text{p},\gamma){}^{14}\text{O}$, rap III



M. Wiescher, APJ 343, 352 (1989).

辐射俘获反应实验研究方法

- 直接测量 (TRIUMF, Louvain)
- 间接测量
 - ① ANC方法 (Texas, MSU, CIAE)
 - ② 库仑离解 (RIKEN, GANIL)
 - ③ 弹性/非弹共振散射 (RIKEN/CNS, Oak Ridge, TRIUMF, Notre Dame, IMP, CIAE)

研究现状—理论和间接测量

天体物理感兴趣的低能区， $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$ 反应截面取决于直接俘获和第一激发态及第二激发态的两个共振俘获。

直接俘获

$S(0)$	Method	Reference
$157 \pm 50 \text{ eV b}$	ANC	CIAE [10]
$93 \pm 13 \text{ eV b}$	ANC	TAMU [9]
47 eV b	Coulomb dissociation	GANIL [5]
149 eV b	Microscopic calculation	Timofeyuk [4]
$88 \pm 19 \text{ eV b}$	Charge symmetry	CIAE [11]

[4] N.K. Timofeyuk et al., Nucl. Phys. A 713, 217 (2003).

[5] A. Lefebvre et al., Nucl. Phys. A 592, 69 (1995).

[9] X. Tang et al., Phys. Rev. C 67, 015804 (2003).

[10] W. Liu et al., Nucl. Phys. A 728, 275 (2003).

[11] B. Guo et al., J. Phys. G 34, 103 (2007).

研究现状—共振俘获

E_r	J^π	Γ_p (keV)			Γ_γ (The.) (meV)			Γ_γ (Exp.) (meV)	
0.36	2^+	$< 20^a$	5.5^b	$0.86(15)^c$	2.59 (M1) d			?	
0.59	2^-	$118(14)^a$	109^e	$102(13)^c$	2^d	140^f	68^g	$6^{+7}_{-3.5}{}^b$	$13.0(5)^h$

^a Ajzenberg-Selove et al., NPA 506, 1 (1990)

^b Lefebvre et al., NPA 592, 69 (1995)

^c Guo et al., JPG 34, 103 (2007)

^d Wiescher et al, APJ 343, 352 (1989)

^e Perajarvi et al., PRC 74, 024306 (2006)

^f Descouvemont et al, NPA 514, 66 (1990)

^g Descouvemont, NPA 646, 261 (1999)

^h Minemura et al., RIKEN Accel. Prog. Rep., A35 (2002)

第一步实验测量目标

研究方案—直接测量

$$N_A \langle \sigma v \rangle = N_A \left(\frac{2\pi}{\mu kT} \right)^{3/2} \hbar^2 \omega \gamma \exp(-E_r/kT)$$

$$\omega \gamma = \frac{2J+1}{(2J_1+1)(2J_2+1)} \frac{\Gamma_p \Gamma_\gamma}{\Gamma_{tot}}$$

$$Y_{max} = \frac{\lambda^2}{2} \frac{M_H + M_C}{M_H} \frac{1}{\varepsilon} \omega \gamma$$

通过直接测量窄共振厚靶产额可以测得共振强度 $\omega\gamma$ ，进而得出 (p,γ) 反应率。

1. Windowless gas target

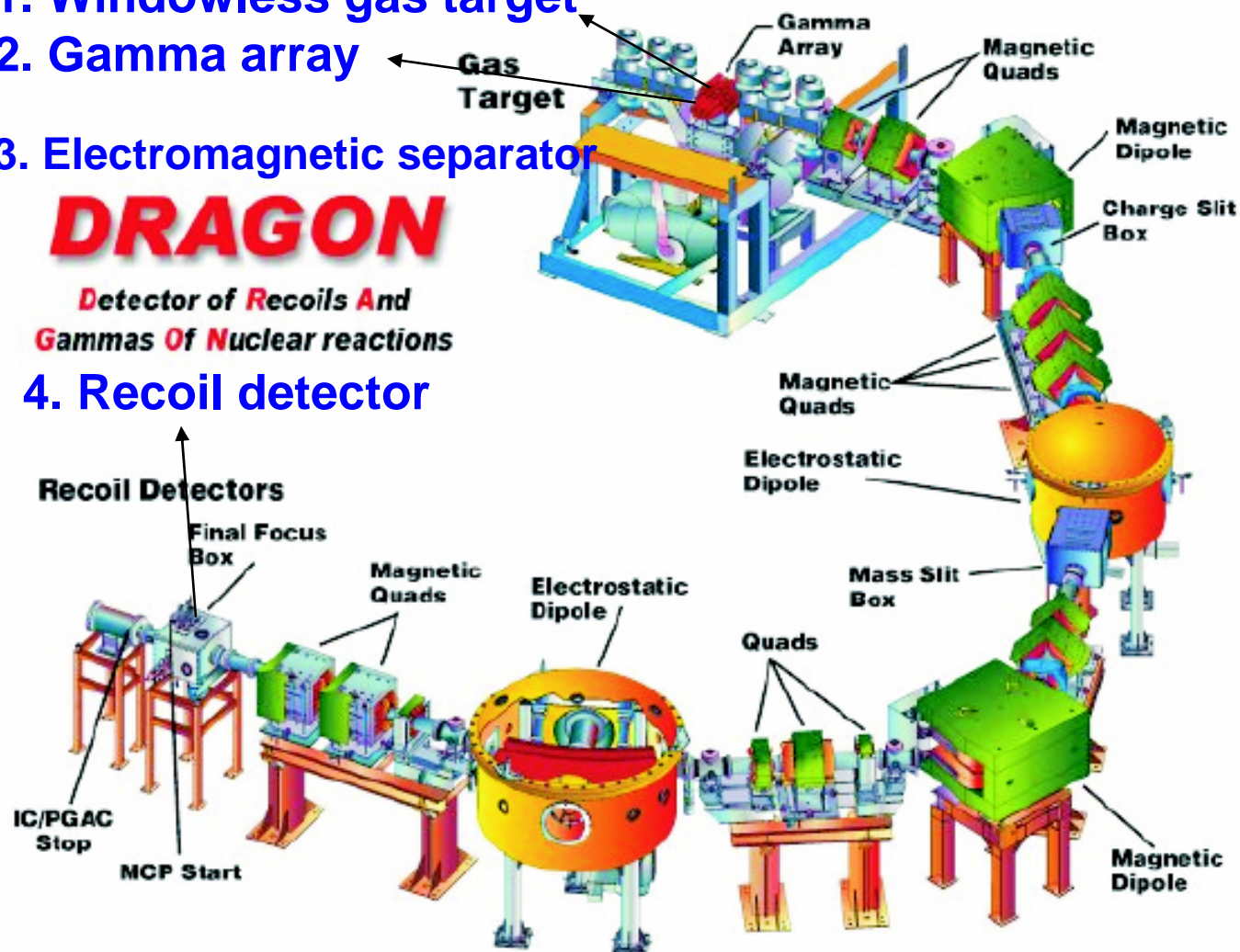
2. Gamma array

3. Electromagnetic separator

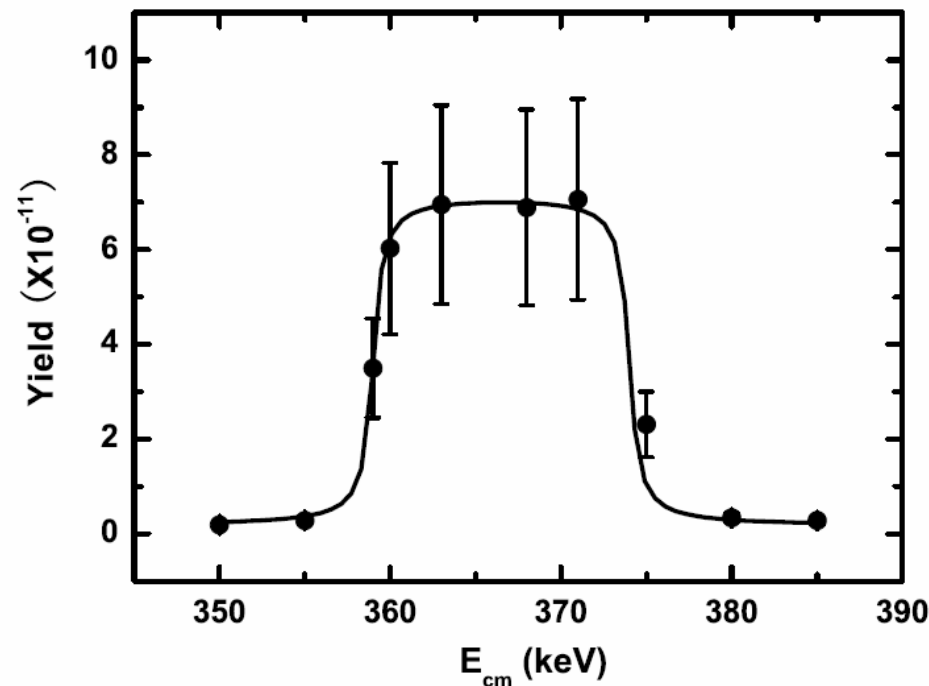
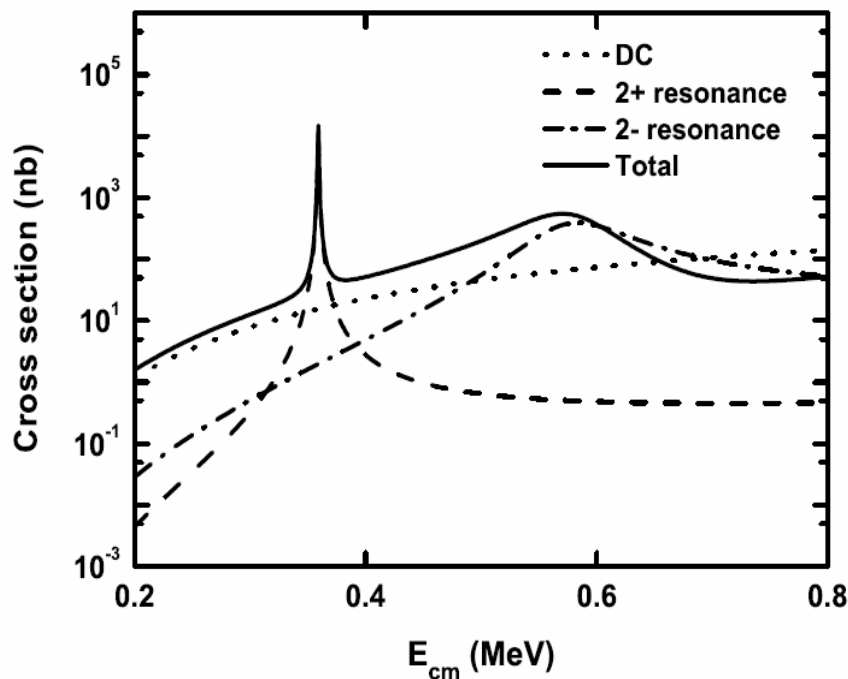
DRAGON

Detector of Recoils And
Gammas Of Nuclear reactions

4. Recoil detector



2⁺共振产额估算



B. Guo et al., JPG 34, 103 (2007).

- 1×10^8 ions/s ^{11}C beam intensity.
- 6 Torr Hydrogen gas target.
- 20% overall efficiency.

计数率及束流时间估算

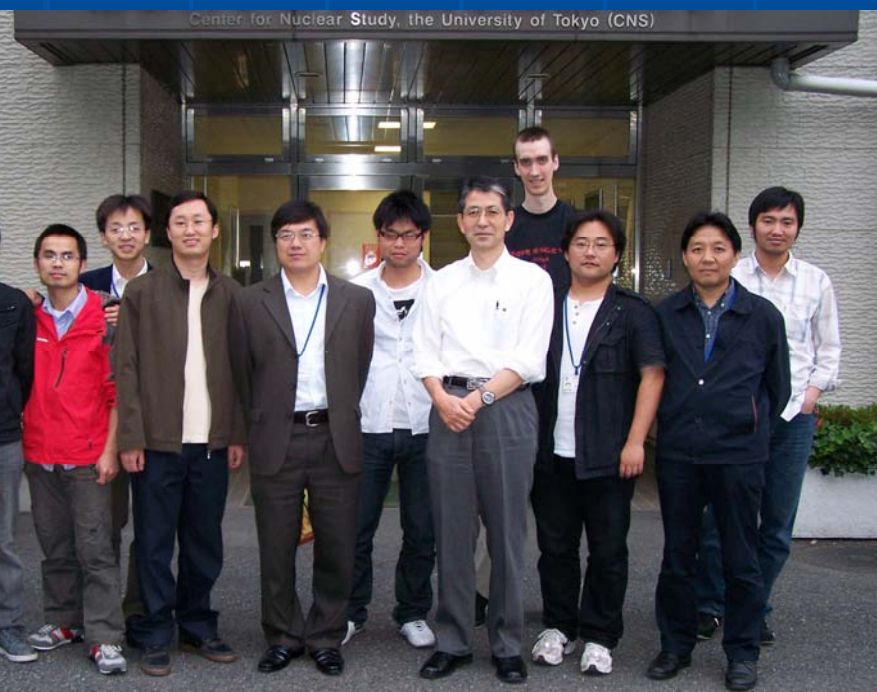
E_p (keV)	E_{cm} (keV)	Yield	Rate (hr^{-1})
381.8	350	1.94×10^{-12}	0.1
387.3	355	2.87×10^{-12}	0.2
391.6	359	3.50×10^{-11}	2.5
392.7	360	6.03×10^{-11}	4.3
396.0	363	6.95×10^{-11}	5.0
401.5	368	6.89×10^{-11}	5.0
404.7	371	7.06×10^{-11}	5.1
409.1	375	2.31×10^{-11}	1.7
414.5	380	3.38×10^{-12}	0.2
420.0	385	2.81×10^{-12}	0.2

如每个能量测量10小时，需100小时束流时间，产额最大处将测得大约50个事件，由此导出的共振强度统计误差约为14%。

中日合作—合作研究基础

- CIAE与东大CNS、RIKEN有多年的合作基础
- 柳卫平研究员多次任RIKEN核物理实验评审委员会委员，任中日核物理合作协调委员会成员
- 研究人员多次访问，包括学生多次参加CNS暑期学校
- 多次合作核天体物理实验： $^{13}\text{N} + \text{p}$ (PLB)， $^{14}\text{O} + \alpha$

创新群体研讨会，北京昌平



2010/08/13

中日合作—未来三年目标

两个间接测量目标

- $^{12}\text{N}(p,\gamma)^{13}\text{O}$ ，高温pp链、快速 αp 过程，我方任发言人，已完成实验测量
- $^{22}\text{Mg}(p,\gamma)^{23}\text{Al}$ ， ^{22}Na 丰度问题，我方任发言人，准备申请中

$^{12}\text{N}(p,\gamma)^{13}\text{O}$ 研究现状

- $^{12}\text{N}(p,\gamma)^{13}\text{O}$ 反应Q值低（1.5MeV），远小于第一激发态激发能（2.7MeV），其反应截面取决于末态为基态的直接俘获；
- 圣母大学Wiescher等基于壳模型研究了 $^{12}\text{N}(p,\gamma)^{13}\text{O}$ 反应， $S(0)=40\text{keV b}$ ；

Wiescher et al., APJ 343, 352 (1989).

- 原子能院李志宏研究员利用破裂反应给出的谱因子和辐射俘获模型研究了 $^{12}\text{N}(p,\gamma)^{13}\text{O}$ 反应， $S(0)=0.31\text{keV b}$ ；

Z.H. Li, CPL 23, 3219 (2006).

- 目前结果相差两个量级；
- 德克萨斯大学Tribble组测量了 $^{14}\text{N}(^{12}\text{N},^{13}\text{O})^{13}\text{C}$ ，该工作在我们的实验完成后正式发表，证实了李老师的结论。

研究现状（续）

- 直接测量非常困难（截面小 \sim nb，流强低 $<10^6$ pps），因此，需使用间接实验方法；
- 渐进归一化系数（ANC）方法是一种间接的实验方法 [PRL 73, 2027 (1994)]，适合于周边辐射俘获反应的研究，近年来，该方法已经成功应用于许多(p, γ)反应的研究，例如 $^7\text{Be}(p,\gamma)^8\text{B}$ [W.P. Liu, PRL 77(96)611],
 $^{11}\text{C}(p,\gamma)^{12}\text{N}$ [W.P. Liu, NPA 728(03)275],
 $^8\text{B}(p,\gamma)^9\text{C}$ [B. Guo, NPA 761(05)162].
 $^{13}\text{N}(p,\gamma)^{14}\text{O}$ [Z.H. Li, PRC 74(06)035801],

研究方案-采用逆运动学

$^2\text{H}(^{12}\text{N}, ^{13}\text{O})\text{n}$ 反应角分布

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exp}} = \sum_{j_i j_f} (C_{l_j i}^d)^2 (C_{l_f j_f}^B)^2 R_{l_j i l_f j_f}$$



DWBA分析

虚衰变 $^{13}\text{O} \rightarrow ^{12}\text{N} + \text{p}$ 的谱因子和ANC

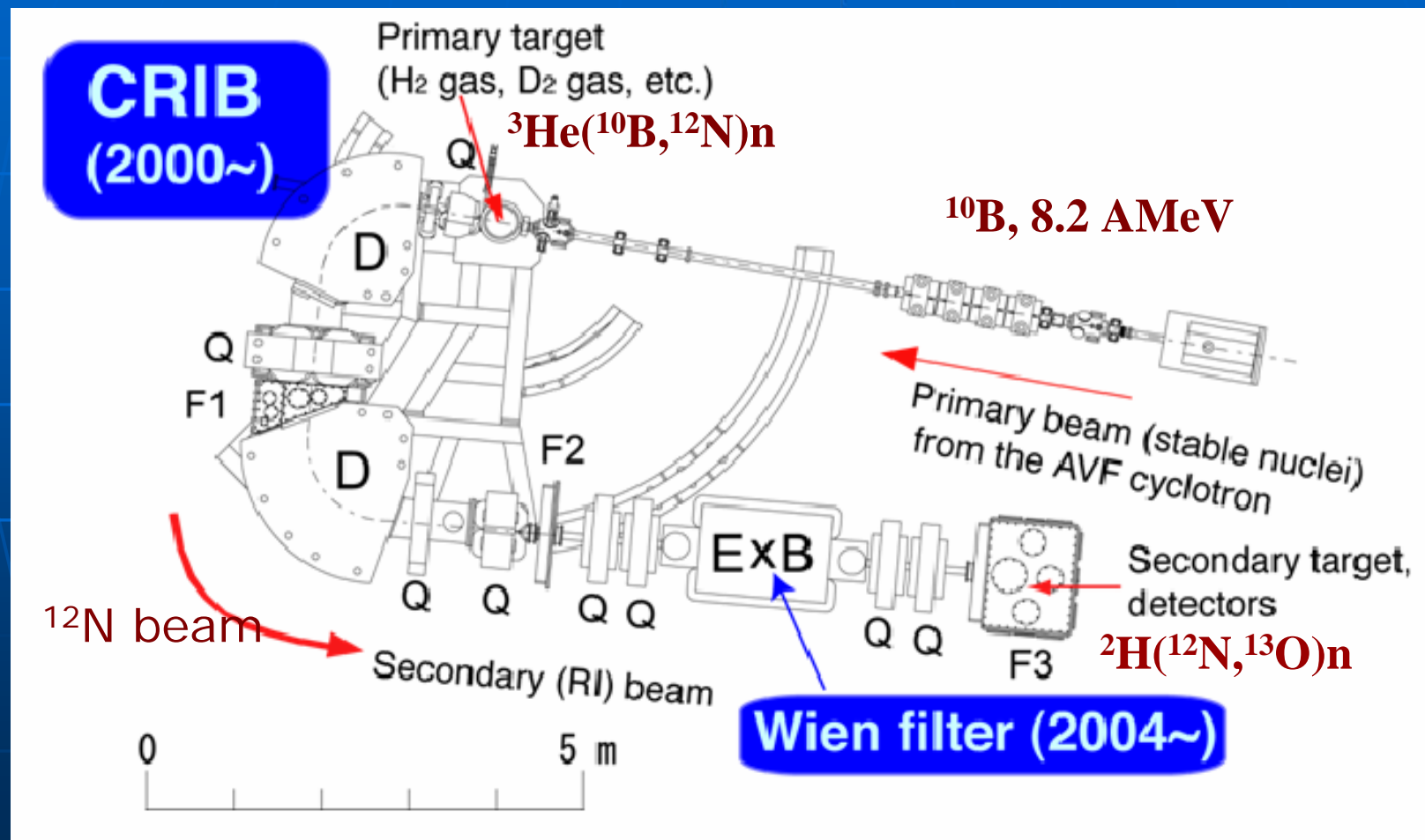
$$\sigma = \frac{16\pi}{3} \left(\frac{E_\gamma}{\hbar c}\right)^3 \frac{1}{\hbar v} \frac{e^2}{k^2} \frac{(2J_f + 1)}{(2J_1 + 1)(2J_2 + 1)} \left(\frac{Z_1 M_2 - Z_2 M_1}{M_1 + M_2}\right)^2 \frac{\max(l_1, l_2)}{2l_2 + 1} \times (C_{l_f j_f}^B)^2 \left| \int_{R_N}^{\infty} r dr F_{l_j}(kr) W_{-\eta, l+1/2}(2k_B r) \right|^2, \quad (3.19)$$

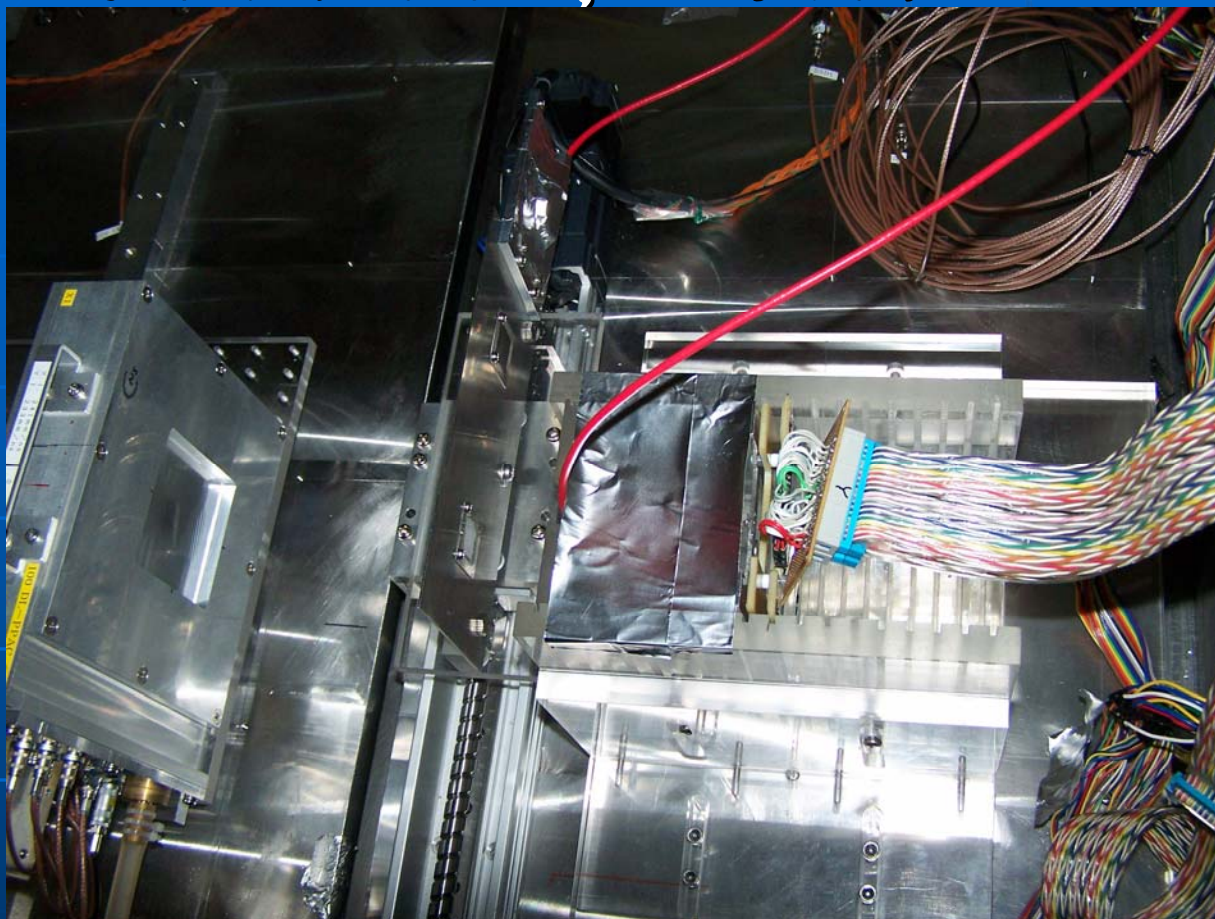


辐射俘获理论

$^{12}\text{N}(\text{p}, \gamma)^{13}\text{O}$ 天体物理S因子和反应率

CRIB次级束流线



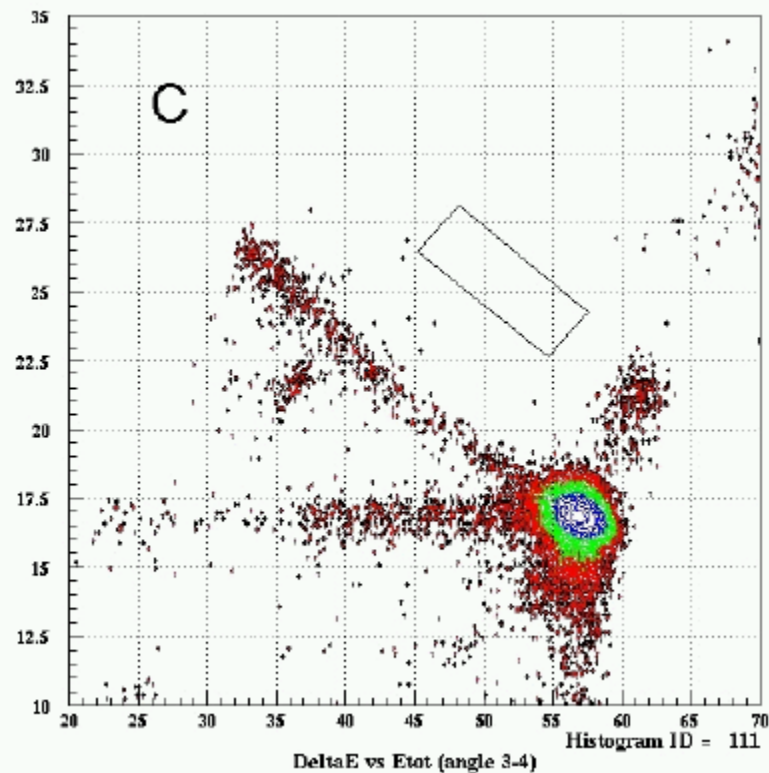
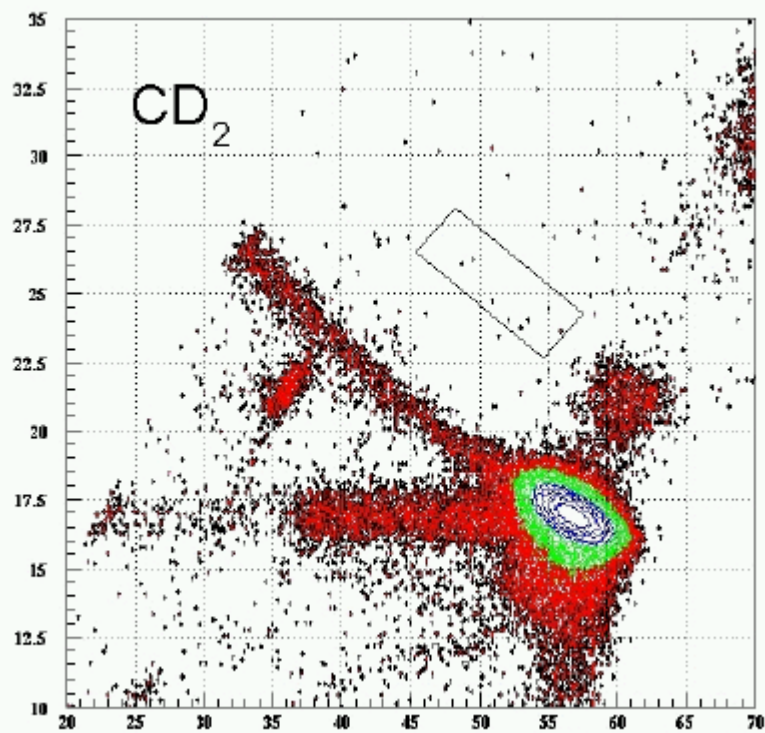


523 mm

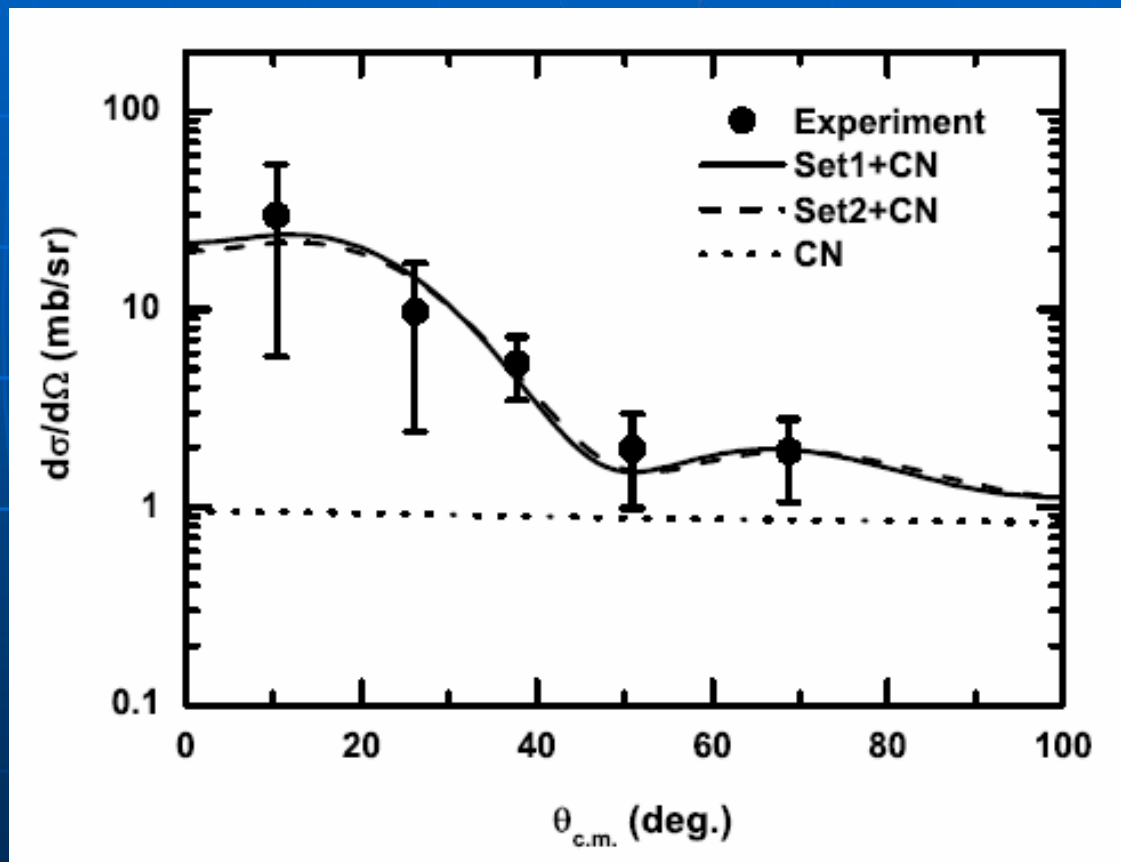
174 mm

143 mm

ΔE - E_{total} 粒子鉴别



$^2\text{H}(^{12}\text{N}, ^{13}\text{O})\text{n}$ 反应角分布



总结

- CIAE的核天体物理国际合作实验4项，其中直接测量2项，间接测量2项
- 直接测量： $^{11}\text{C}(\text{p},\gamma)^{12}\text{N}$ 和 $^{33}\text{S}(\text{p},\gamma)^{34}\text{Cl}$
- 间接测量： $^{12}\text{N}(\text{p},\gamma)^{13}\text{O}$ 和 $^{22}\text{Mg}(\text{p},\gamma)^{23}\text{Al}$
- 2项完成数据获取，1项已经立项，1项准备申请