

核天体物理共振能级性质的实验研究

王 友 宝

中国原子能科学研究院核物理所

核天体物理创新研究群体科学基金项目启动汇报会

2010年9月

内 容

- 简单介绍
- 现有的研究基础
- 下一步研究计划

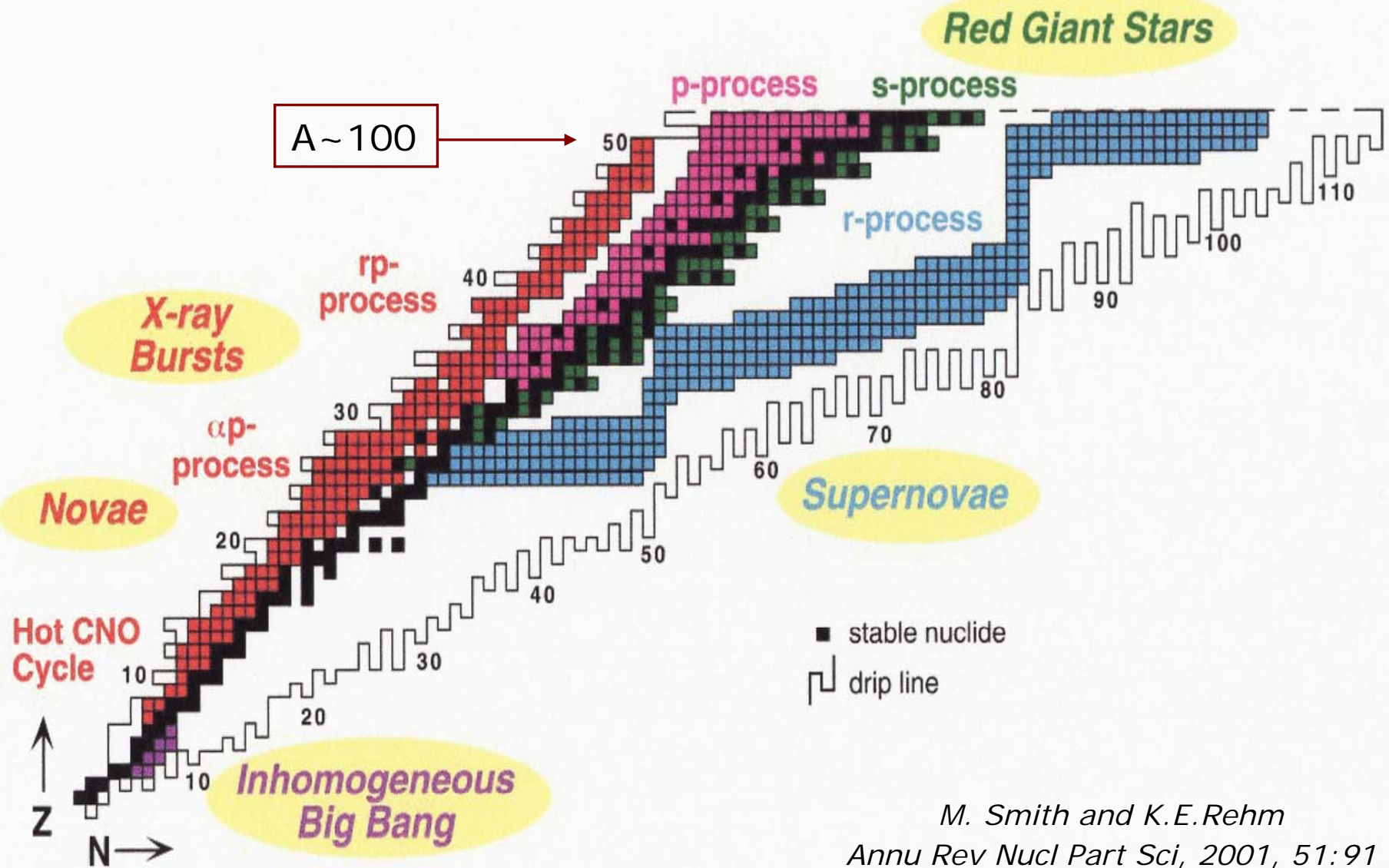
国际公认的核天体物理关键科学问题

1. 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
2. 高能区带电粒子反应截面向天体物理能区的合理外推
3. 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
4. **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**
5. 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
6. 通过关键数据输入网络计算，结合元素丰度的观测研究天体核合成的场所

核天体物理关键科学问题之四

- 质子(rp)和中子(r)快速俘获过程涉及核素衰变性质、质量、反应和共振态性质的测量
- 本报告的实验方向主要是爆发性氢燃烧至rp过程关键核素共振态性质的实验研究

主要的核天体过程及天体环境



M. Smith and K.E.Rehm
Annu Rev Nucl Part Sci, 2001, 51: 91

简单总结

- 爆发性氢燃烧乃至rp过程存在大量短寿命核的 (p,γ) 和 (a,γ) 等反应，只能采用放射性束逆运动学实验方法。
- 核天体物理需要的反应率由直接辐射俘获和共振俘获确定，因此确定粒子分离阈附近共振态的性质非常重要。
- 放射性束的流强普遍较弱，而且一般能量无法精确可调，厚靶实验技术可以在一定程度上弥补这些不足。

窄共振的反应率

$$\langle \sigma v \rangle_{12} = \left(\frac{2\pi}{\mu_{12} kT} \right)^{3/2} \hbar^2 (\omega \gamma)_R \exp\left(-\frac{E_R}{kT}\right)$$

决定于“共振强度” $\omega\gamma$ 和 共振能 E_R

共振强度

=共振区的积分截面

$$\omega\gamma = \frac{2J+1}{(2J_1+1)(2J_T+1)} \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma}$$

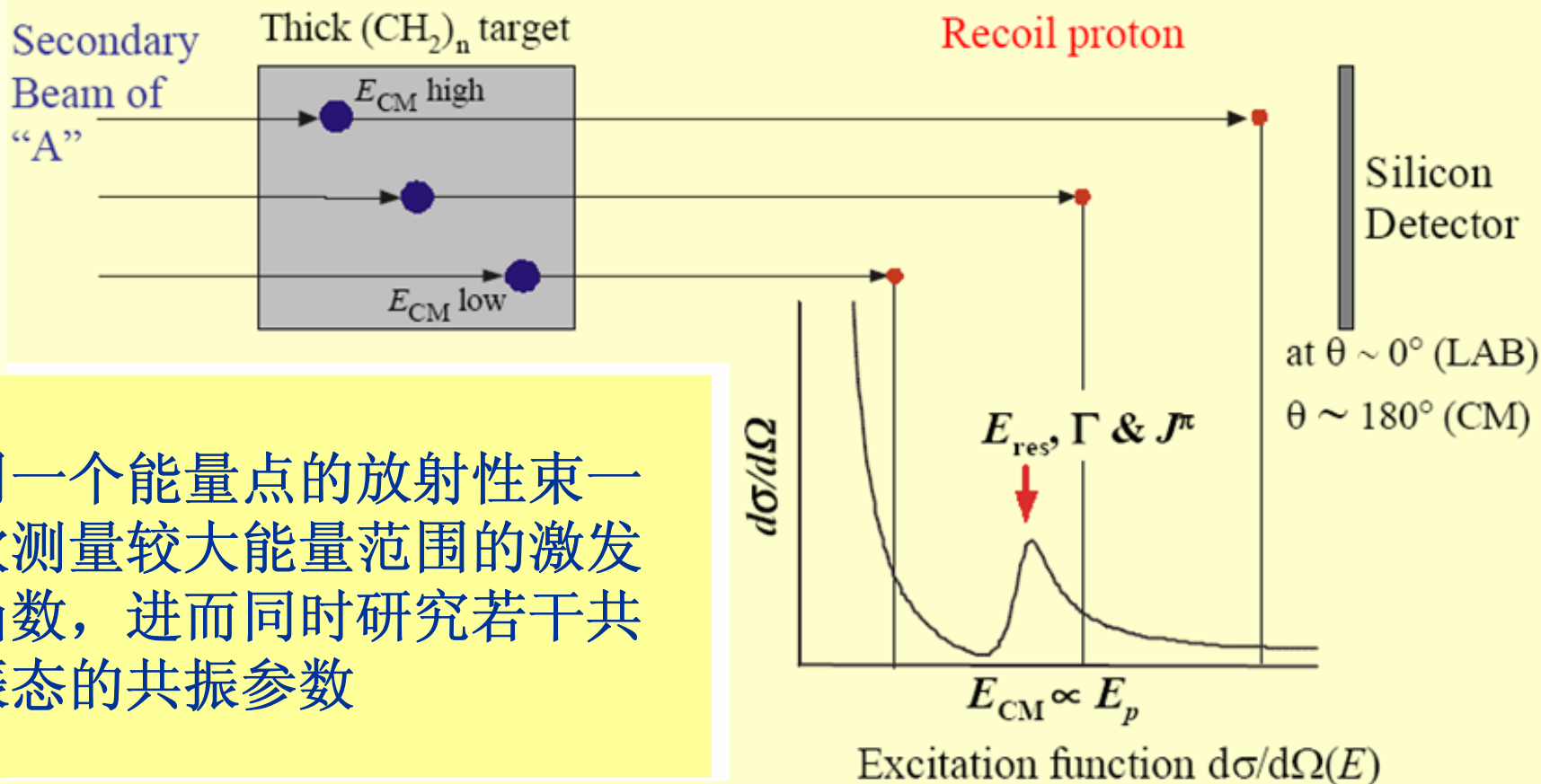
所需要的共振态实验信息:

- 分宽度 Γ_i
- 自旋 J
- 共振能 E_R

—————> 激发函数测量

厚靶方法测量激发函数的原理

Thick-target method for A+p in inverse kinematics

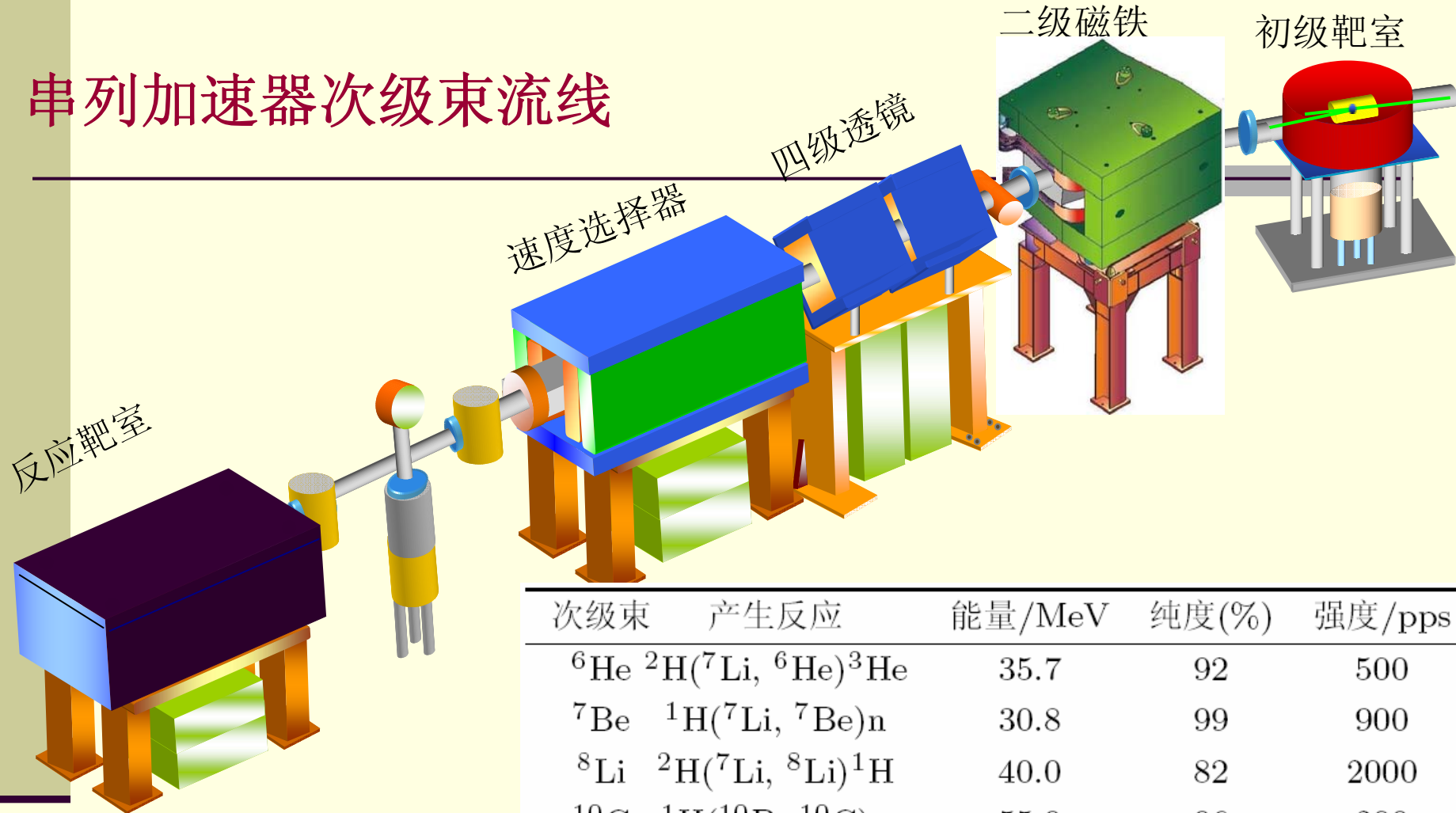


用一个能量点的放射性束一次测量较大能量范围的激发函数，进而同时研究若干共振态的共振参数

现有的实验基础

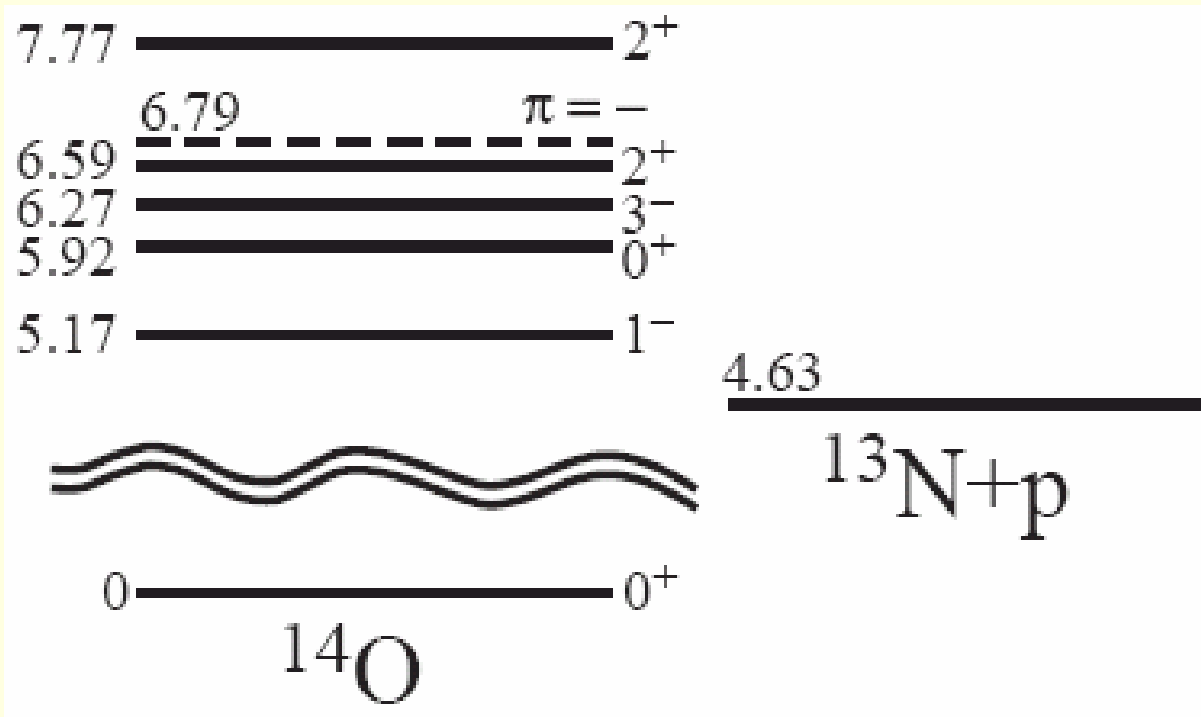
- $^{13}\text{N}+\text{p}$ 弹性共振散射实验研究
- $^{17}\text{F}+\text{p}$ 弹性共振散射实验研究

串列加速器次级束流线



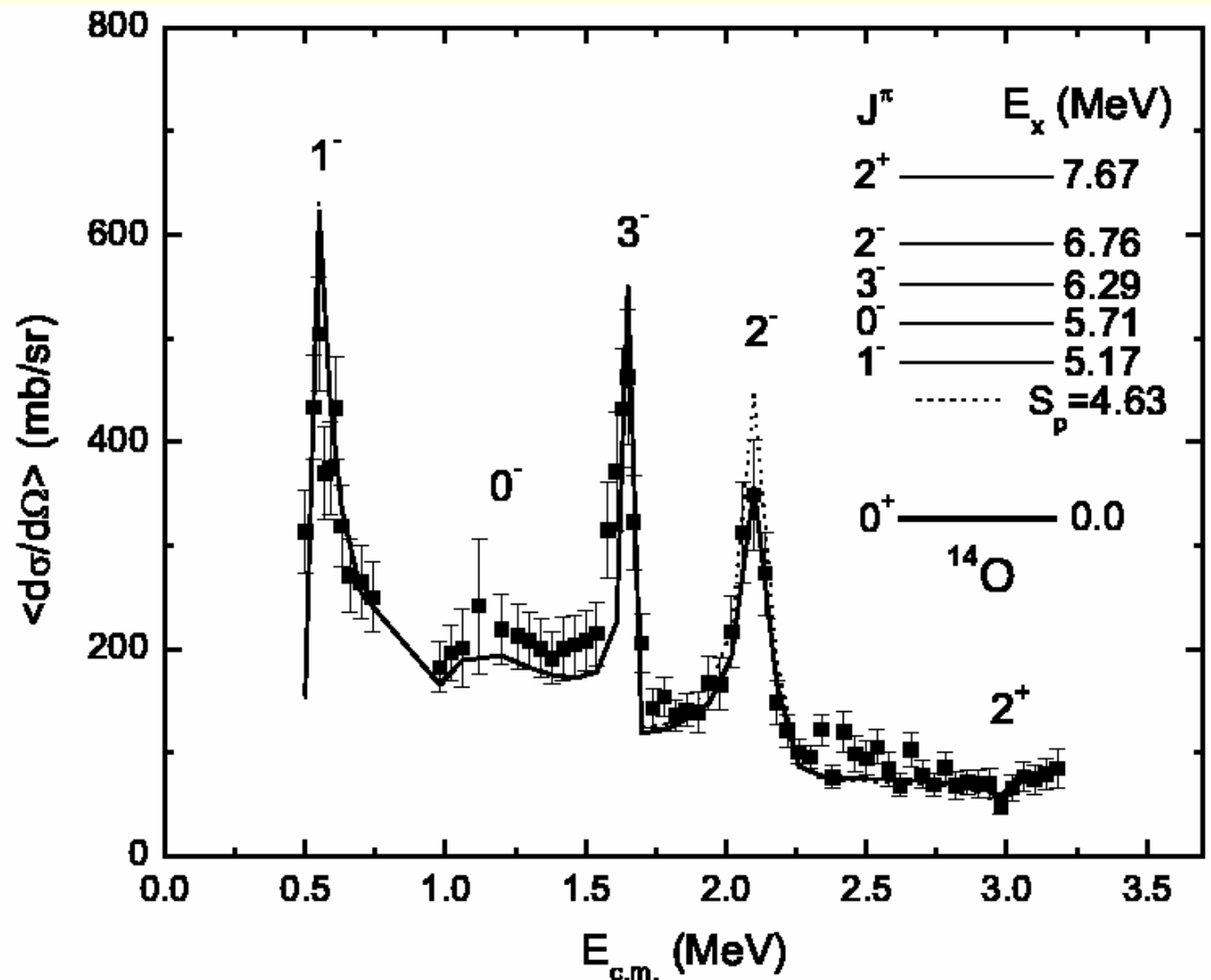
次级束	产生反应	能量/MeV	纯度(%)	强度/pps
${}^6\text{He}$	${}^2\text{H}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He}){}^3\text{He}$	35.7	92	500
${}^7\text{Be}$	${}^1\text{H}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})\text{n}$	30.8	99	900
${}^8\text{Li}$	${}^2\text{H}({}^7\text{Li}, {}^8\text{Li}){}^1\text{H}$	40.0	82	2000
${}^{10}\text{C}$	${}^1\text{H}({}^{10}\text{B}, {}^{10}\text{C})\text{n}$	55.9	96	200
${}^{11}\text{C}$	${}^1\text{H}({}^{11}\text{B}, {}^{11}\text{C})\text{n}$	63.4	80	1000
${}^{13}\text{N}$	${}^2\text{H}({}^{12}\text{C}, {}^{13}\text{N})\text{n}$	57.8	92	1200
${}^{15}\text{O}$	${}^2\text{H}({}^{14}\text{N}, {}^{15}\text{O})\text{n}$	66.0	91	1500
${}^{17}\text{F}$	${}^2\text{H}({}^{16}\text{O}, {}^{17}\text{F})\text{n}$	76.1	90	3000
${}^{18}\text{F}$	${}^3\text{He}({}^{16}\text{O}, {}^{18}\text{F}){}^1\text{H}$	75.7	85	600

$^{13}\text{N}+\text{p}$ 实验测量的物理意义



- 5.17 MeV 1^- 态对 $^{13}\text{N}(\text{p},\gamma)^{14}\text{O}$ 反应的反应率有意义
- 寻找s波共振态 0^-
- 6.79 MeV能级准确的自旋值
- 其它能级的质子宽度等

$^{13}\text{N}+\text{p}$ 弹性共振散射的激发函数



导出的共振参数

PHYSICAL REVIEW C **77**, 044304 (2008)

$^{13}\text{N} + p$ elastic resonance scattering via a thick-target method

Y. B. Wang, B. X. Wang, X. Qin, X. X. Bai, B. Guo, C. Jiang, Y. J. Li, Z. H. Li, G. Lian, J. Su,
S. Zeng, and W. P. Liu

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(46), Beijing 102413, People's Republic of China

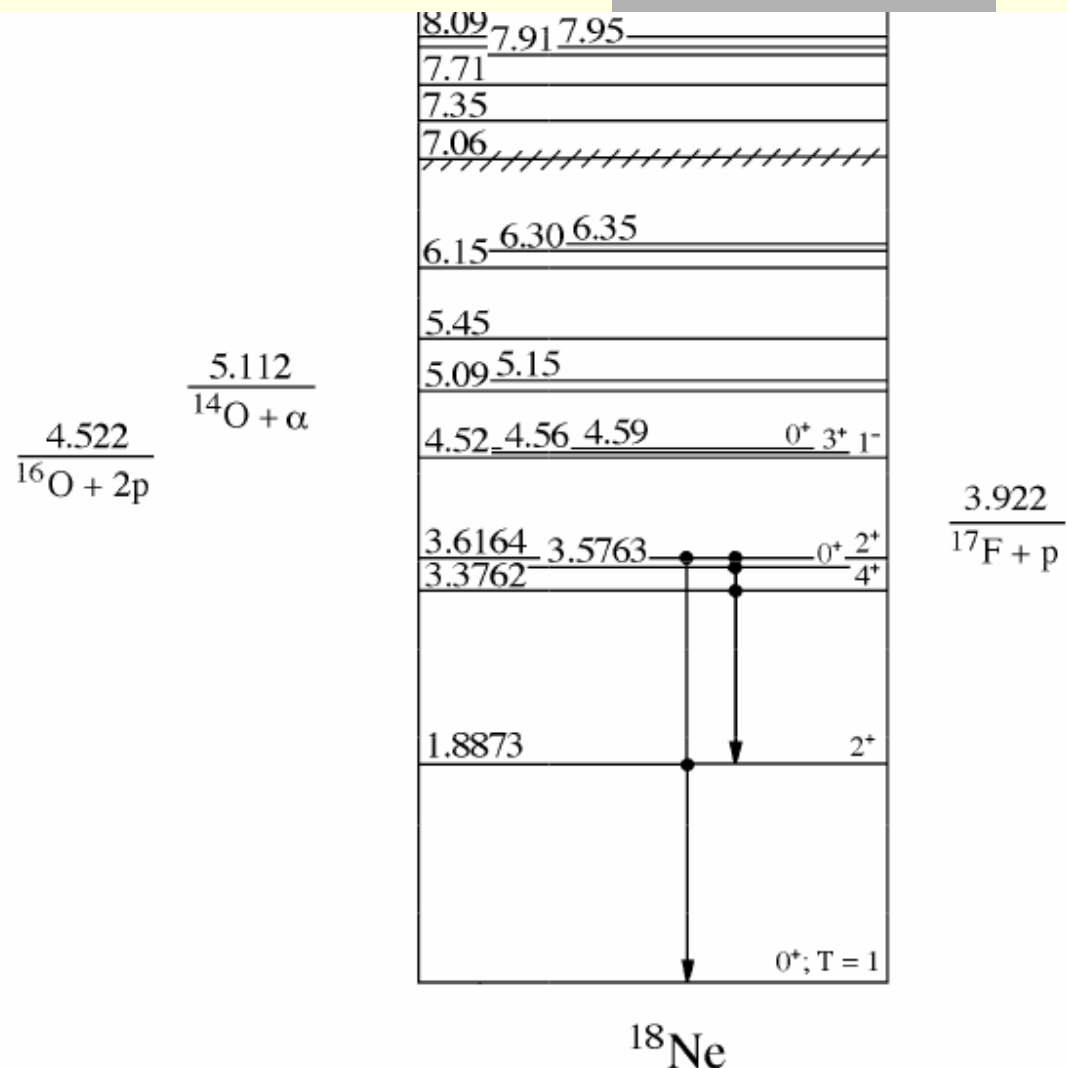
(Received 26 September 2007; revised manuscript received 15 January 2008; published 10 April 2008)

TABLE I. Resonance parameters deduced from the fitting calculation of the $^{13}\text{N} + p$ scattering.

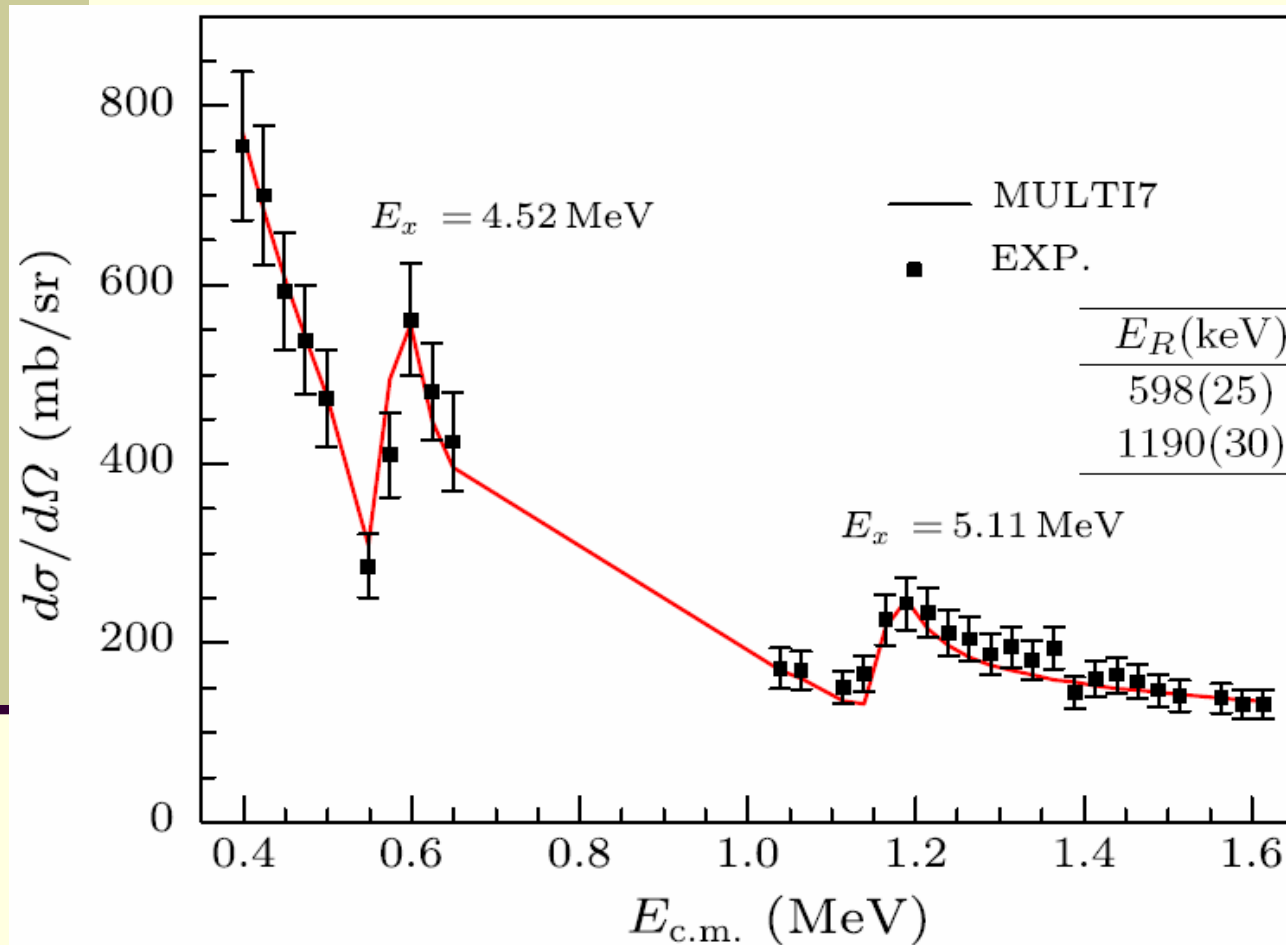
This work				Ref. [8]		Ref. [17]	
J^π	l	E_x (MeV)	Γ_R (keV)	E_x (MeV)	Γ_R (keV)	E_x (MeV)	Γ_R (keV)
1^-	0	5.169(19)	40(4)	5.159(10)	42(4)	5.178(10)	37(14)
0^-	0	5.710(20)	400(45)	5.710(20)	400(100)		
0^+						5.931(10)	<12
3^-	2	6.290(20)	25(3)	6.285(12)	42(2)	6.284(9)	50(6)
2_1^+						6.609(10)	<5
2^-	2	6.759(19)	105(10)	6.767(11)	90(5)	6.762(30)	107(40)
2_2^+	1	7.670(50)	62(10)	7.745(19)	63(16)	7.777(10)	77(9)

$^{17}\text{F} + \text{p}$ 散射实验

E_x (MeV \pm keV)	$J^\pi; T$	τ or $\Gamma_{\text{c.m.}}$
0	$0^+; 1$	$\tau_{1/2} = 1672 \pm 8$ ms
1.8873 ± 0.2	2^+	$\tau_m = 0.67 \pm 0.06$ ps
3.3762 ± 0.4	4^+	$\tau_m = 4.4 \pm 0.6$ ps
3.5763 ± 2.0	0^+	$\tau_m = 4 \pm 2$ ps
3.6164 ± 0.6	2^+	$\tau_m = 63^{+30}_{-20}$ fs
4.519 ± 8	1^-	$\Gamma \leq 20$ keV
4.561 ± 9	3^+	
4.590 ± 8	0^+	$\Gamma \leq 20$ keV
5.090 ± 8	$(2^+, 3^-)$	$\Gamma = 40 \pm 20$ keV
5.146 ± 7	$(2^+, 3^-)$	$\Gamma = 25 \pm 15$ keV
5.453 ± 10		$\Gamma \leq 50$ keV
$6.15^{b,c}$	(1^-)	
6.297 ± 10	(4^+)	$\Gamma \leq 60$ keV
6.353 ± 10		$\Gamma \leq 60$ keV
7.059 ± 10	$(1^-, 2^+)$	$\Gamma = 180 \pm 50$ keV



$^{17}\text{F}+\text{p}$ 散射的激发函数



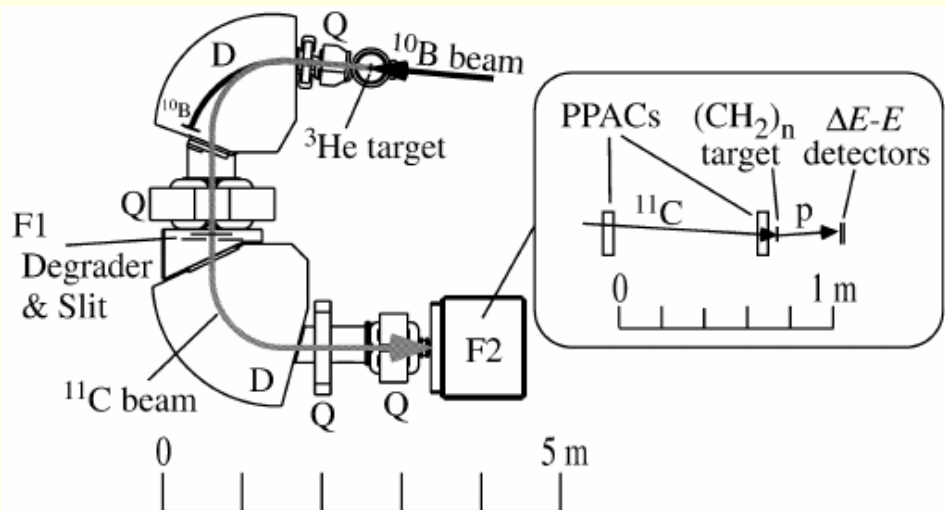
导出的共振参数

$E_R(\text{keV})$	J^π	s_c	ℓ	$\Gamma_p(\text{keV})$
598(25)	3^+	3	0	18(2)
1190(30)	2^+	2	0	42(4)

发表的相关论文

- 1. Excited states in ^{18}Ne studied via $^{17}\text{F}+\text{p}$**
JIN Sun-Jun, WANG You-Bao et al.,
Chin. Phys. Lett. Vol. 27, 032102(2010)1-4
- 2. Elastic resonance scattering of $^{13}\text{N}+\text{p}$ and $^{17}\text{F}+\text{p}$**
Y.B. Wang, B.X. Wang et al., Nucl. Phys. A834, 100c-102c(2010)
- 3. Simulation and analysis of $^{13}\text{N}+\text{p}$ elastic resonance scattering**
WANG You-Bao, QIN Xing et al., Chin. Phys. C33, 181-186(2009)
- 4. $^{13}\text{N}+\text{p}$ elastic resonance scattering via a thick-target method**
Y.B. Wang, B.X. Wang et al., Phys. Rev. C77, 044304(2008)
- 5. Levels in ^{13}N examined by $^{12}\text{C}+\text{p}$ elastic resonance scattering with thick target**
QIN Xing, WANG You-Bao et al., Chin. Phys. C32, 957-961(2008)
- 6. 弹性共振散射反应的厚靶实验设计**
王友宝, 王宝祥等, 高能物理与核物理, Vol.30(增刊 II), 202 (2006).

日本东京大学CNS的CRIB装置



已合作的厚靶实验:

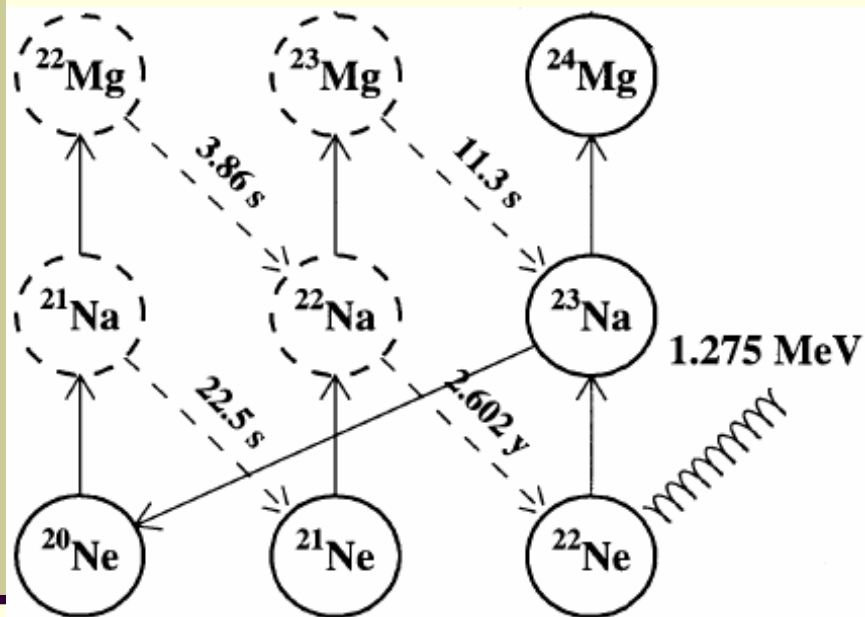
- $^{13}\text{N}(p,p)$ 2005年, PLB
- $^{14}\text{O}(a,p)$ 2008年

Secondary Beam	Primary Beam	Reaction	Target (mg/cm ²)	Intensity (1/sec)	Purity
$^7\text{Be}^{4+}$ 8.1 A MeV	$^7\text{Li}^{3+}$ 150 pA	(p,n)	H ₂ gas (0.67)	3×10^5	100%
$^{10}\text{C}^{6+}$ 6.1 A MeV	$^{10}\text{B}^{4+}$ 200 pA	(p,n)	CH ₄ gas (1.33)	1.6×10^5	90 %
$^{13}\text{N}^{7+}$ 6.5 A MeV	$^{13}\text{C}^{5+}$ 500 pA	(p,n)	H ₂ gas (0.33)	2×10^5	95 %
$^{14}\text{O}^{8+}$ 6.7 A MeV	$^{14}\text{N}^{6+}$ 500 pA	(p,n)	CH ₄ gas (1.33)	1.7×10^6	80 %
$^{18}\text{F}^{9+}$ 2.7 A MeV	$^{18}\text{O}^{4+}$ 500 pA	(p,n)	H ₂ gas (0.67)	1.5×10^5	98%

下一步的工作

- $^{22}\text{Na}+\text{p}$ 共振散射的实验研究
- $^8\text{B}(\alpha,\text{p})^{11}\text{C}$ 等反应的厚靶测量

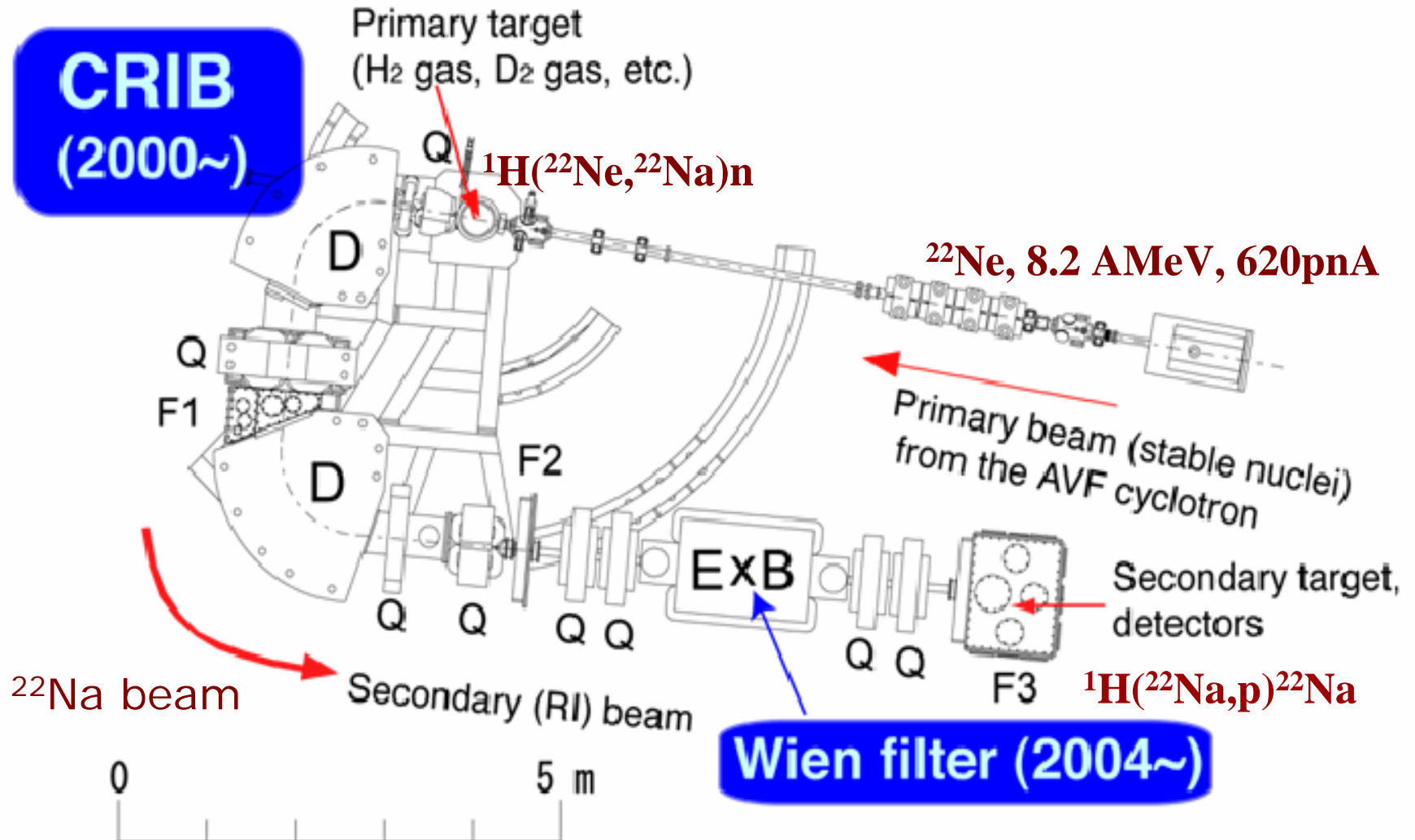
$^{22}\text{Na} + \text{p}$ 弹性共振散射的物理意义



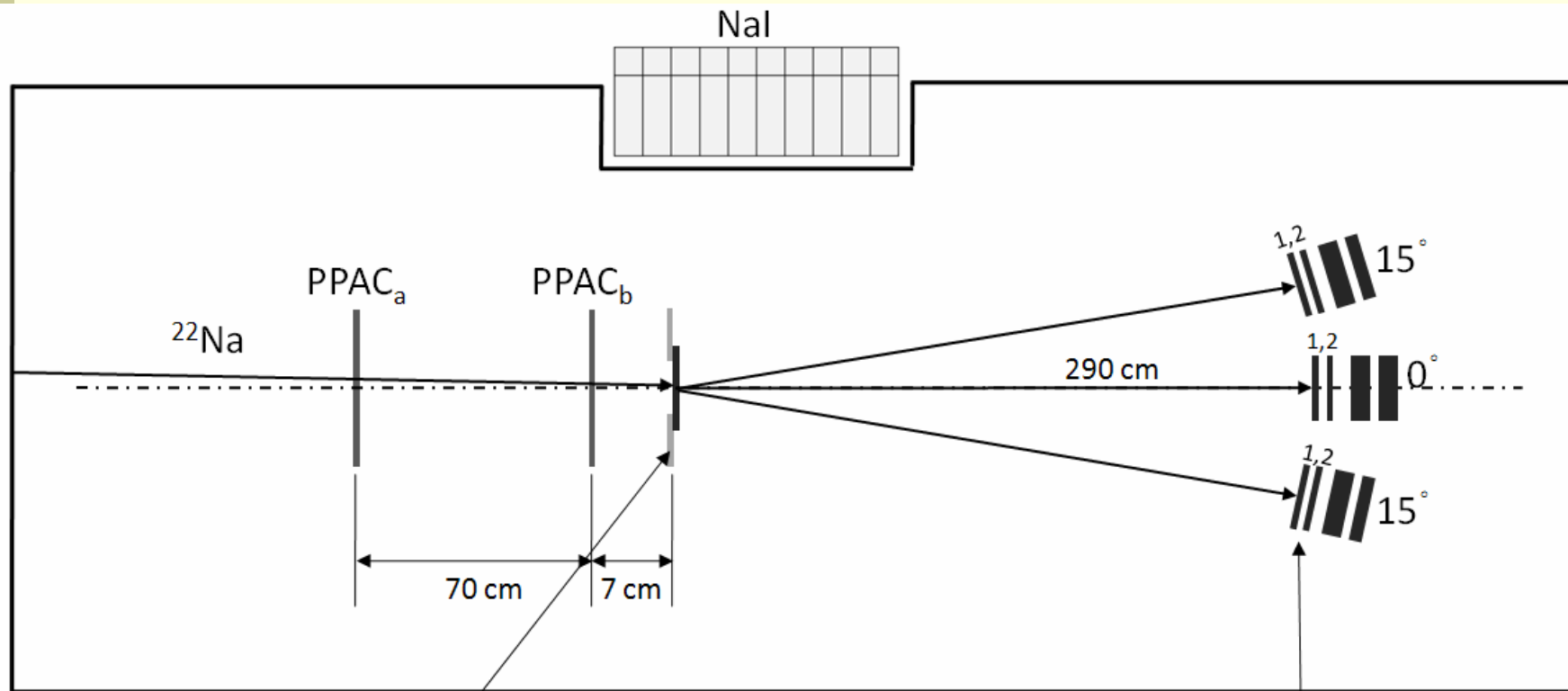
新星演化过程中涉及 ^{22}Na 的反应网络

- 1972年发现Orgueuil陨石中 ^{22}Ne 丰度异常高, 表明新星等爆发事件可产生 ^{22}Na
- 因为半衰期适中, 并伴随可测量的伽马射线, ^{22}Na 是重要的宇宙伽马射线发射体
- 但是星载探测器测量的 ^{22}Na 非常少
- $T \geq 5 \times 10^7 \text{K}$, $^{21}\text{Ne}(p, \gamma)^{22}\text{Na}$ 是循环中最主要的反应
- $T \geq 7 \times 10^7 \text{K}$, $^{22}\text{Na}(p, \gamma)^{23}\text{Mg}$ 开始起作用, 目前这个反应还有许多的未知因素。

CRIB次级束流线



$^{22}\text{Na}+p$ 实验设计



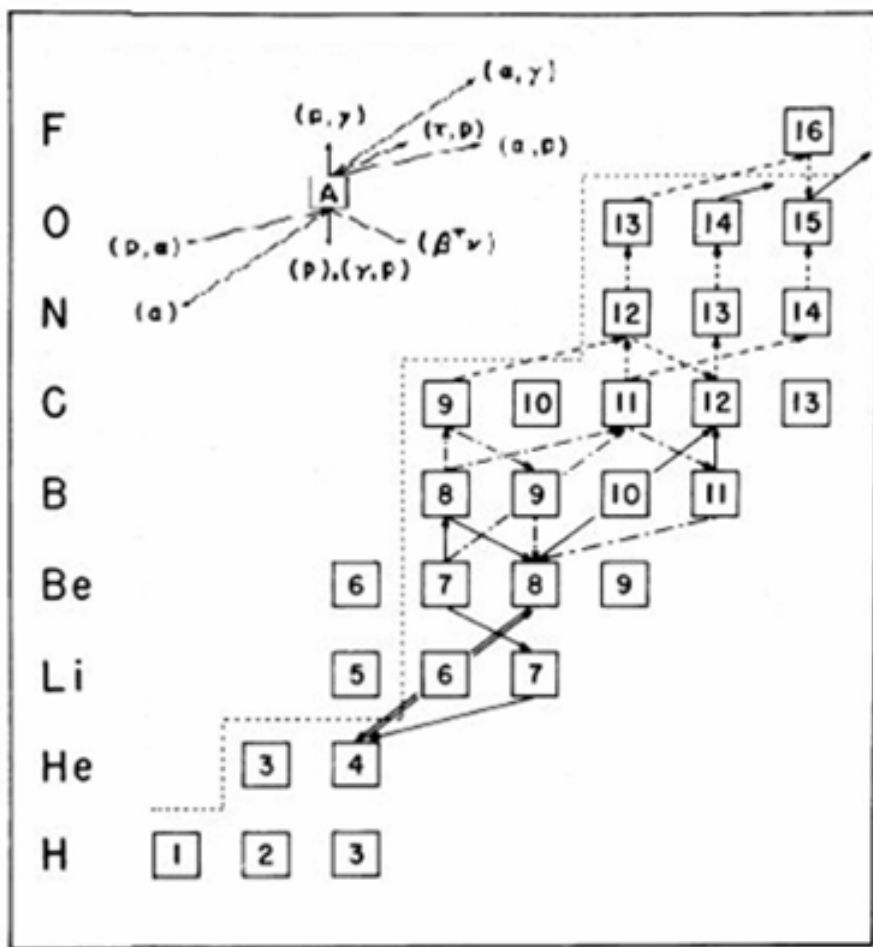
$^{22}\text{Na}^{11+}$ on target
Energy: 6.1 MeV/A
Intensity: $\sim 8.0 \times 10^5$ pps

Target Station
1. $\phi 30$, 207 μm $(\text{CH}_2)_n$
2. $\phi 30$, 92 μm Carbon

Silicon detectors' Area: $50 \times 50 \text{ mm}^2$
 ΔE : 1(75 μm PSD), 2(300 μm HSD);
 E : 1.5 & 1.0 mm (SSD)

束流申请书准备中

$^8\text{B}(\alpha, p)^{11}\text{C}$ 等反应的厚靶测量



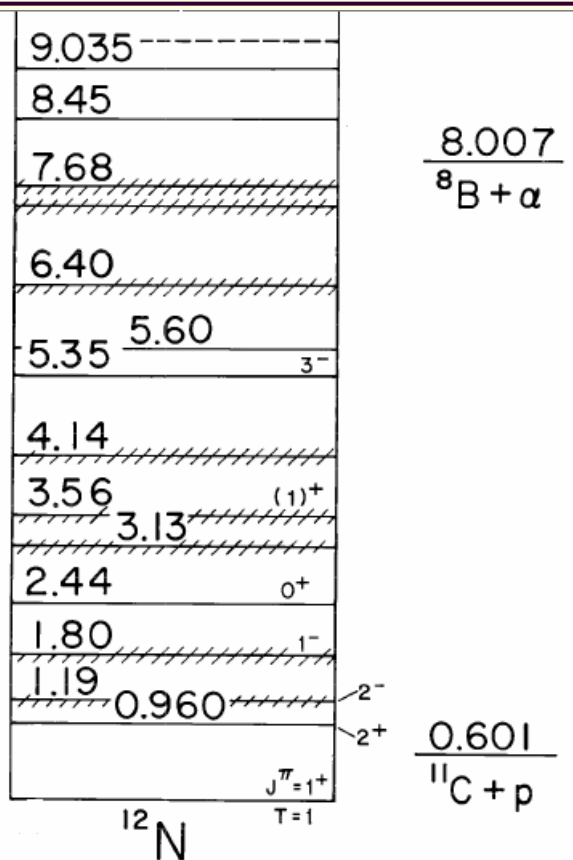
$^8\text{B}(p, \gamma)^9\text{C},$
 $^9\text{C}(\alpha, p)^{12}\text{N},$
 $^8\text{B}(\alpha, p)^{11}\text{C},$
 $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N},$
 $^{11}\text{C}(\alpha, p)^{14}\text{N},$
 $^{12}\text{N}(p, \gamma)^{13}\text{O},$
 $^{13}\text{O}(\alpha, p)^{16}\text{F}$



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
 以外合成CNO核的
 另一种途径

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

$^8\text{B}(\alpha, p)^{11}\text{C}$ 反应研究现状



- 迄今尚没有编评数据
- 没有直接测量
- α 阈上能级位置、性质以及贡献均不清楚
- 只有一家实验数据，非常粗糙

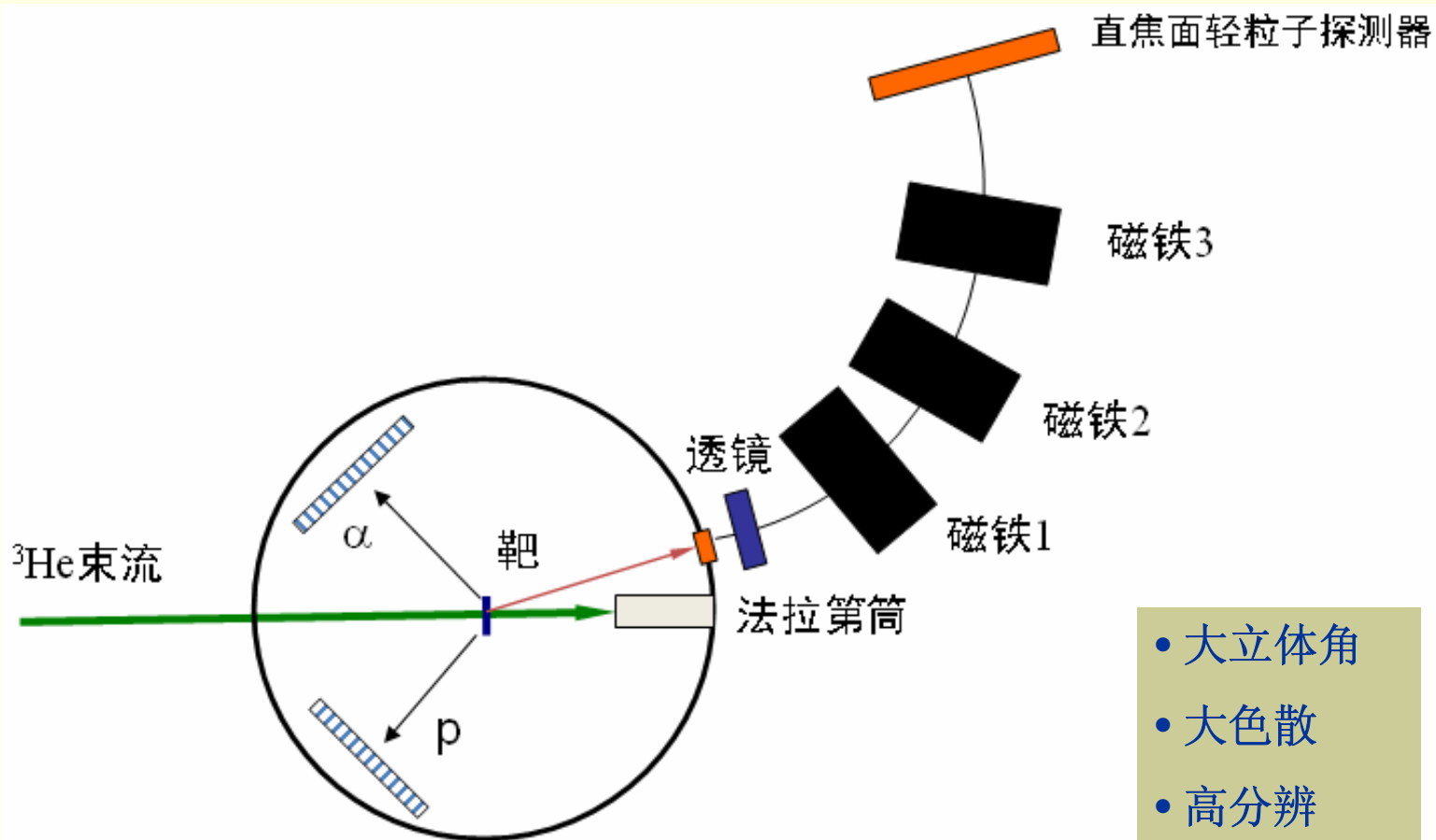
K.E. Rehm, NPA746, 354c(2004)

我们的计划:

在兰州RIBLL上产生较高能量的 ^{11}C 次级束
用较厚的反应靶测量 α 阈上0-2MeV能级性质

非常感谢！

用Q3D磁谱仪测量共振能级



$$\Delta E/E = 2 \frac{M_h x_r}{DR} \approx 2 \times 10^{-4}$$

爆发性氢燃烧至rp过程反应网络

