



The Study of Elastic Resonance Scattering at CIAE

王 友 宝

中国原子能科学研究院核物理所

创新群体研讨会

2010年8月 北京



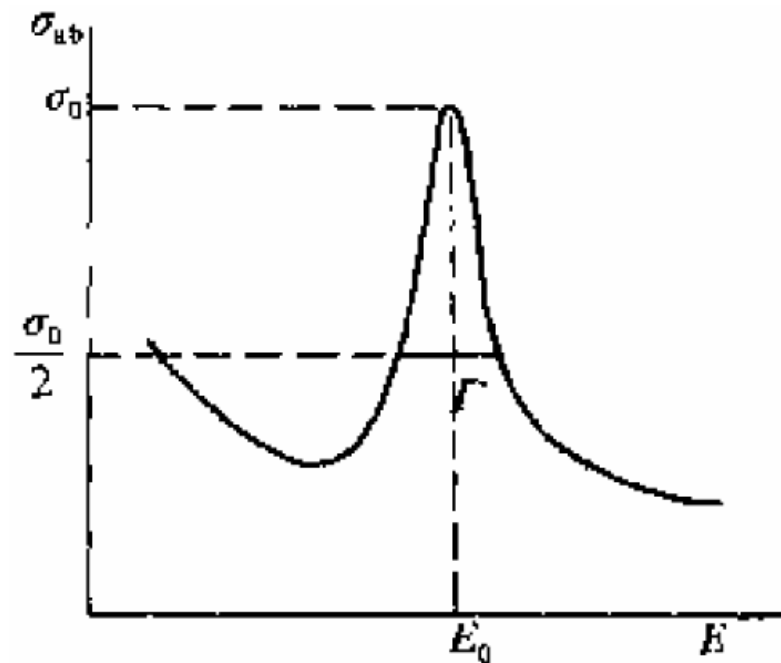
内 容

- 简介
- 改进实验条件
- $^{13}\text{N} + \text{p}$ 实验
- $^{17}\text{F} + \text{p}$ 实验
- $^6\text{He} + \text{p}$ 实验
- 下一步研究计划

背景材料

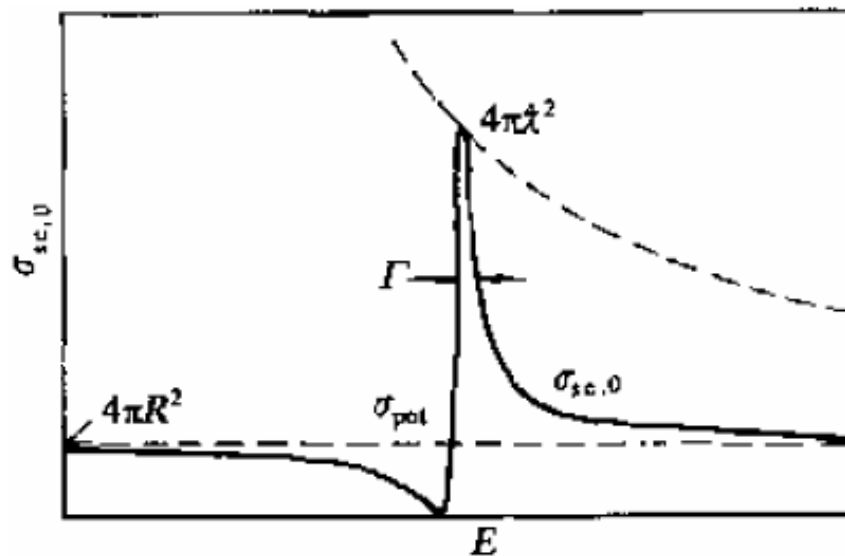
- 共振是自然界常见的一种现象，与物质的波动性相关。
- 原子核作为量子少体系统，有独特的性质。
- 描述共振的量子数包括共振能量、自旋、宇称和共振宽度等。
- 共振宽度反映了量子体系的不确定性，或几率分布。

$$\tau \bullet \Gamma = \hbar$$



简介

- 共振是两步过程。即复合核的形成与衰变。
- 共振散射与势散射共存，并有相干效应。
- 共振宽度是重要的结构参量。
- 有无共振对截面影响巨大。



慢中子在共振峰附近的截面

简介

测量激发函数需要:

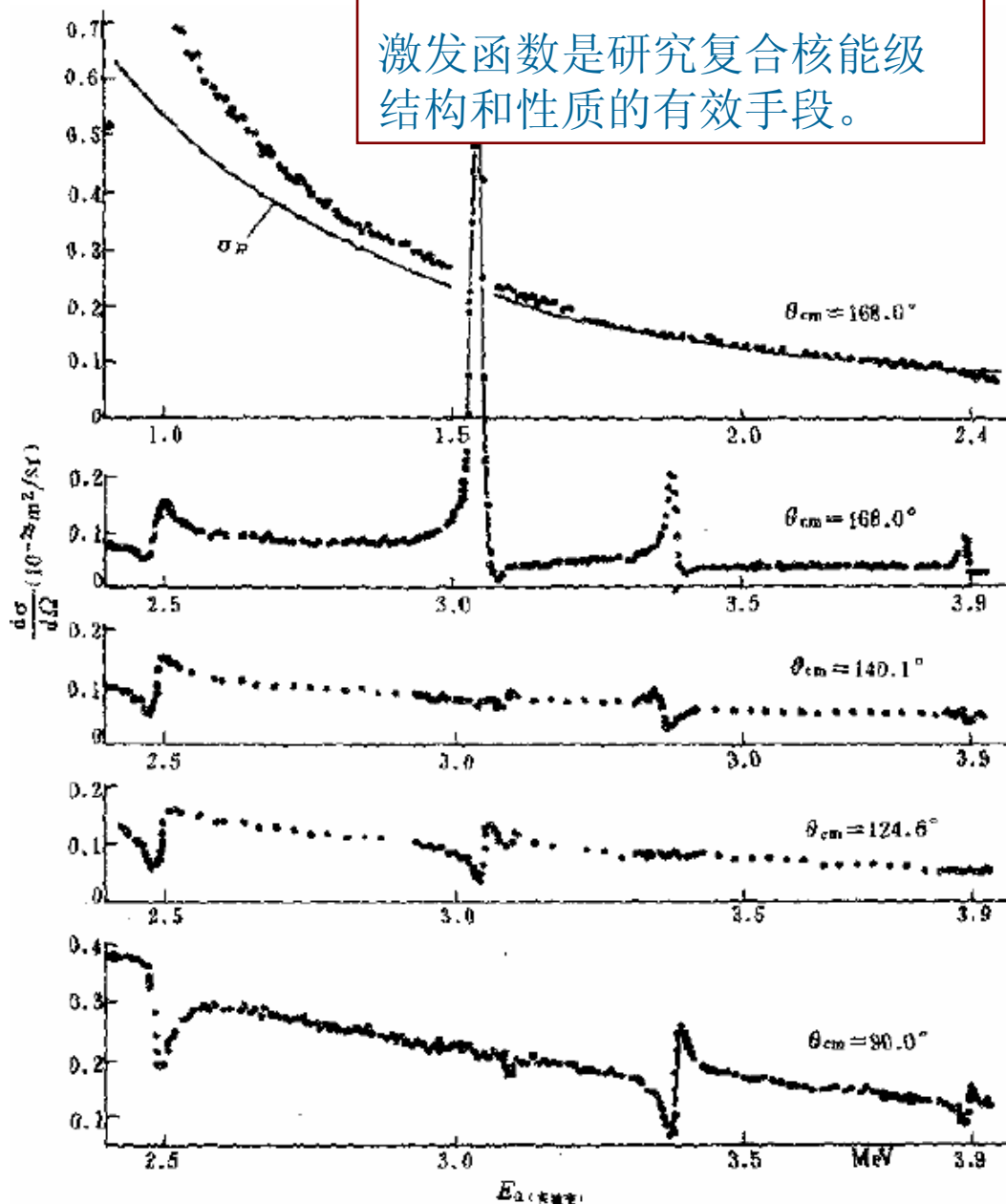
- 能量精确的束流
- 几十 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的反应靶
- keV量级的步长



精确度要求很高、很耗时的实验!

$^{16}\text{O}(\alpha, \alpha)$ 微分截面的激发函数

激发函数是研究复合核能级结构和性质的有效手段。

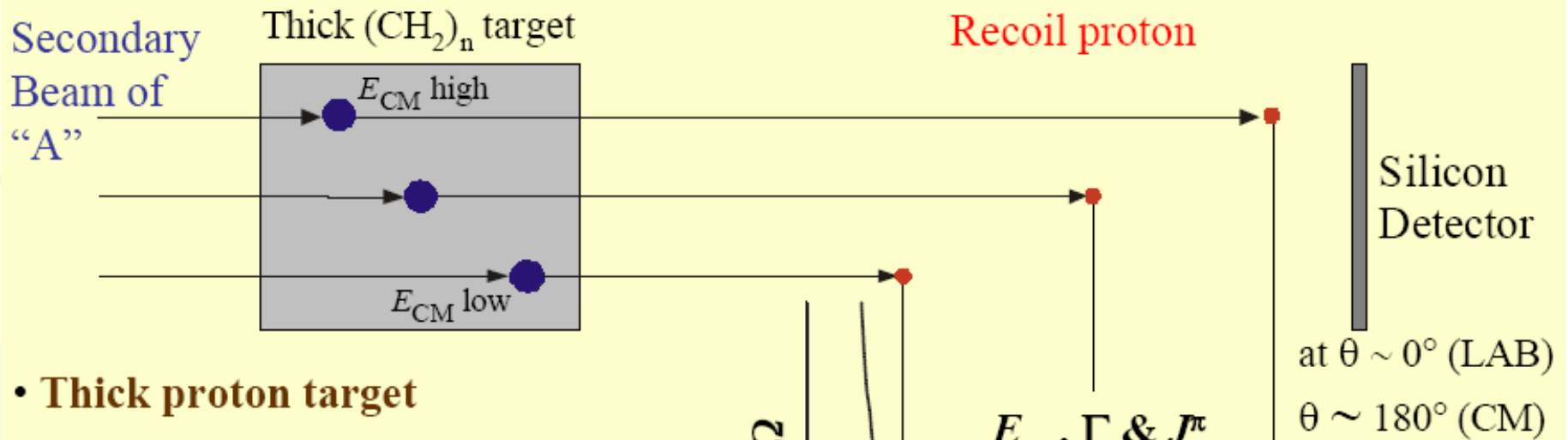




核天体物理需求

- 存在大量短寿命核的 (p,γ) 和 (α,γ) 反应，只能采用逆运动学实验方法。
- 反应率由基态的直接辐射俘获和激发态的共振俘获确定。粒子分离阈附近共振态的性质非常重要。
- 不稳定核束的流强普遍较弱，而且一般能量无法精确可调，厚靶技术可以弥补这些不足。

Thick-target method for A+p in inverse kinematics



• Thick proton target

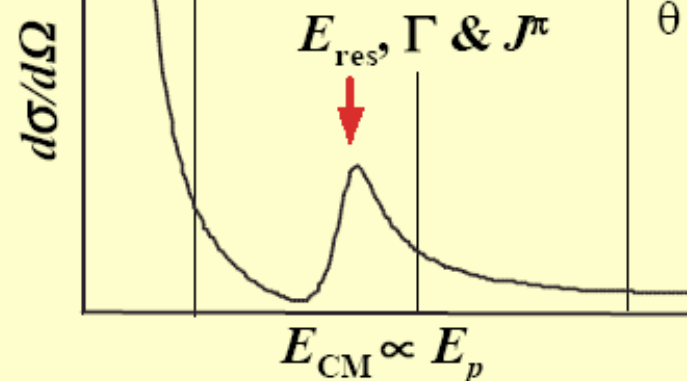
Energy loss of the beam

Scanning $d\sigma/d\Omega(E)$ automatically

Without changing the beam energy
before the target

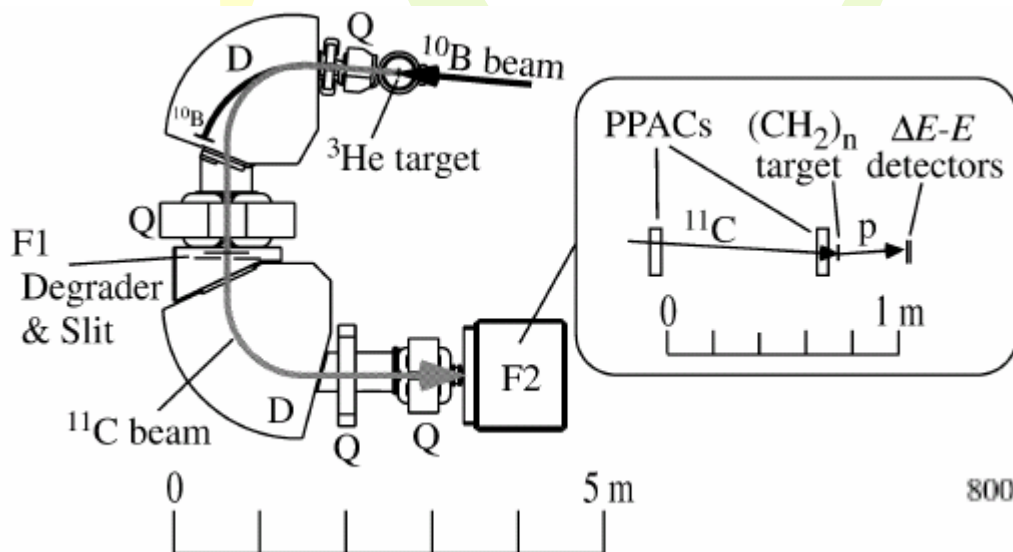
Proton yield $\rightarrow d\sigma/d\Omega$

$$\underbrace{\frac{dN}{dE}}_{\text{Counts per energy-bin}} \propto \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot \underbrace{\frac{dx}{dE}}_{\text{Target-thickness per energy-bin}} \cdot d\Omega$$

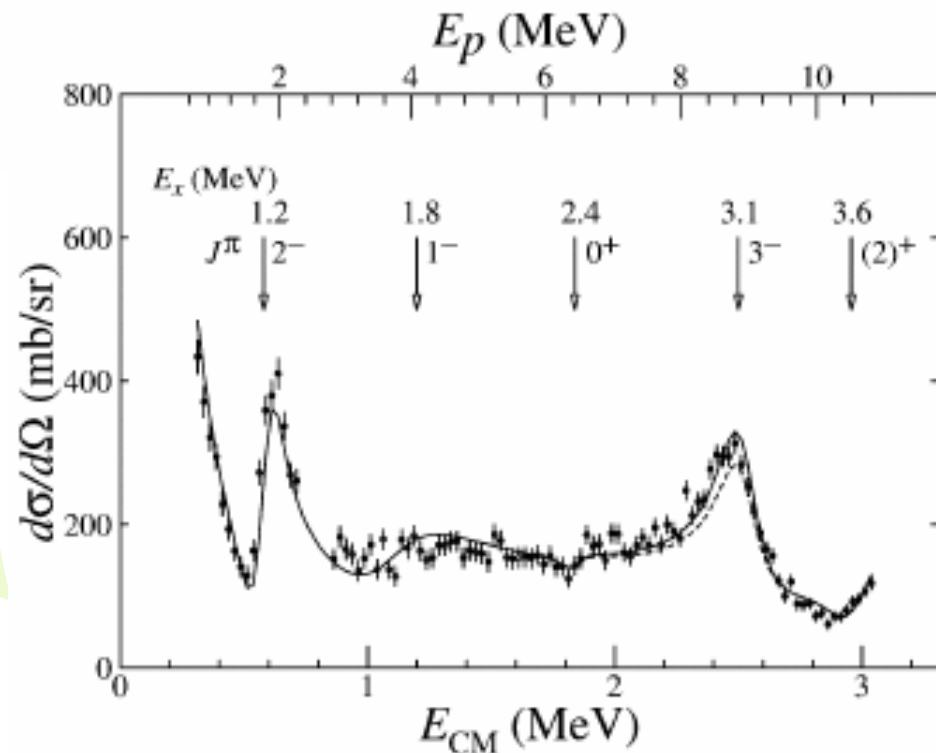


Excitation function $d\sigma/d\Omega(E)$

Interference pattern of
potential & resonance scattering

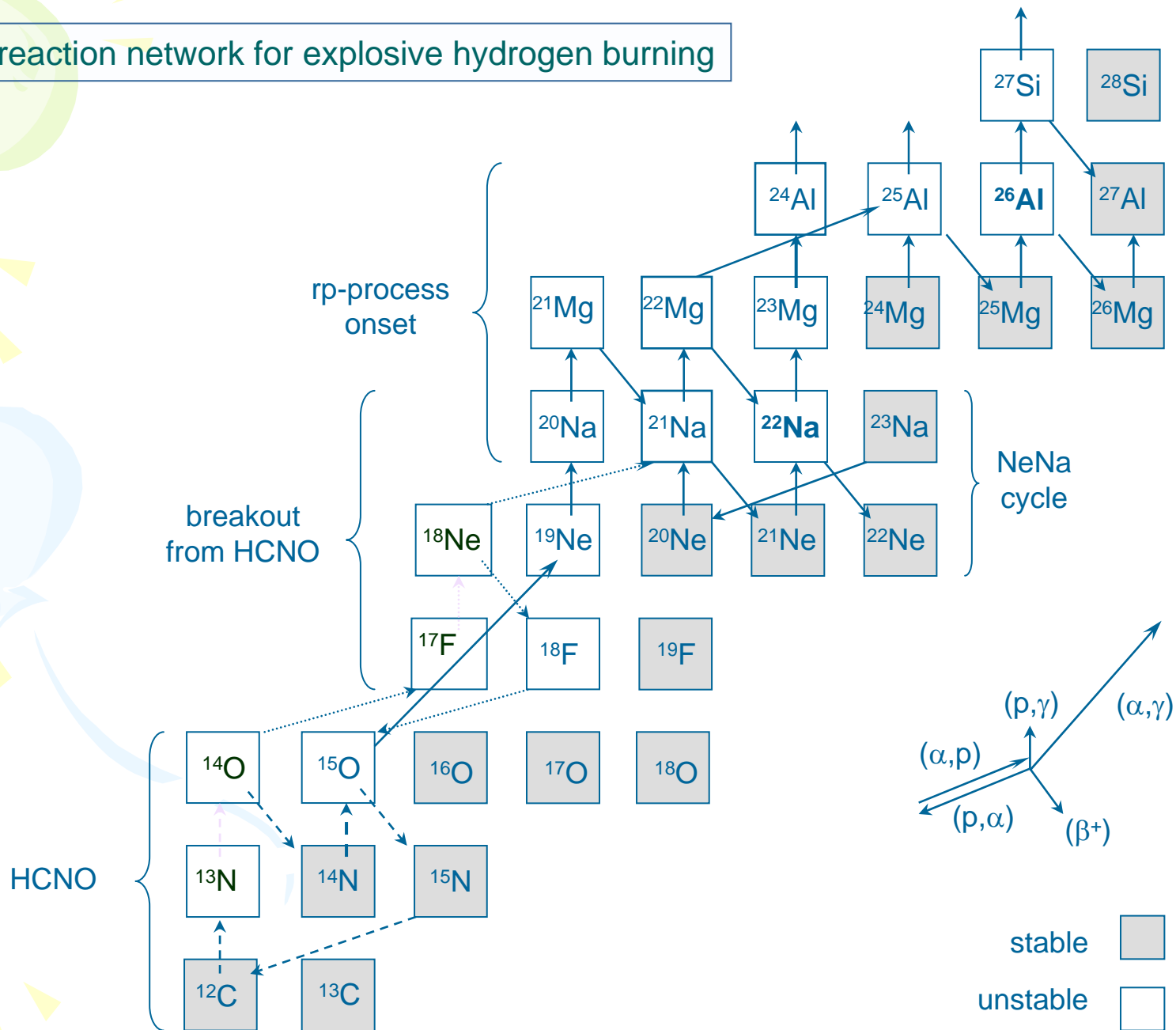


用一个能量点的束流一次测量较大能量范围的激发函数，进而同时研究若干共振态的共振参数。



proton spectrum from $^{11}\text{C}+p$ elastic scattering

reaction network for explosive hydrogen burning



Narrow resonances

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

rate entirely determined by “**resonance strength**” $\omega \gamma$ and **energy of the resonance** E_R

resonance strength

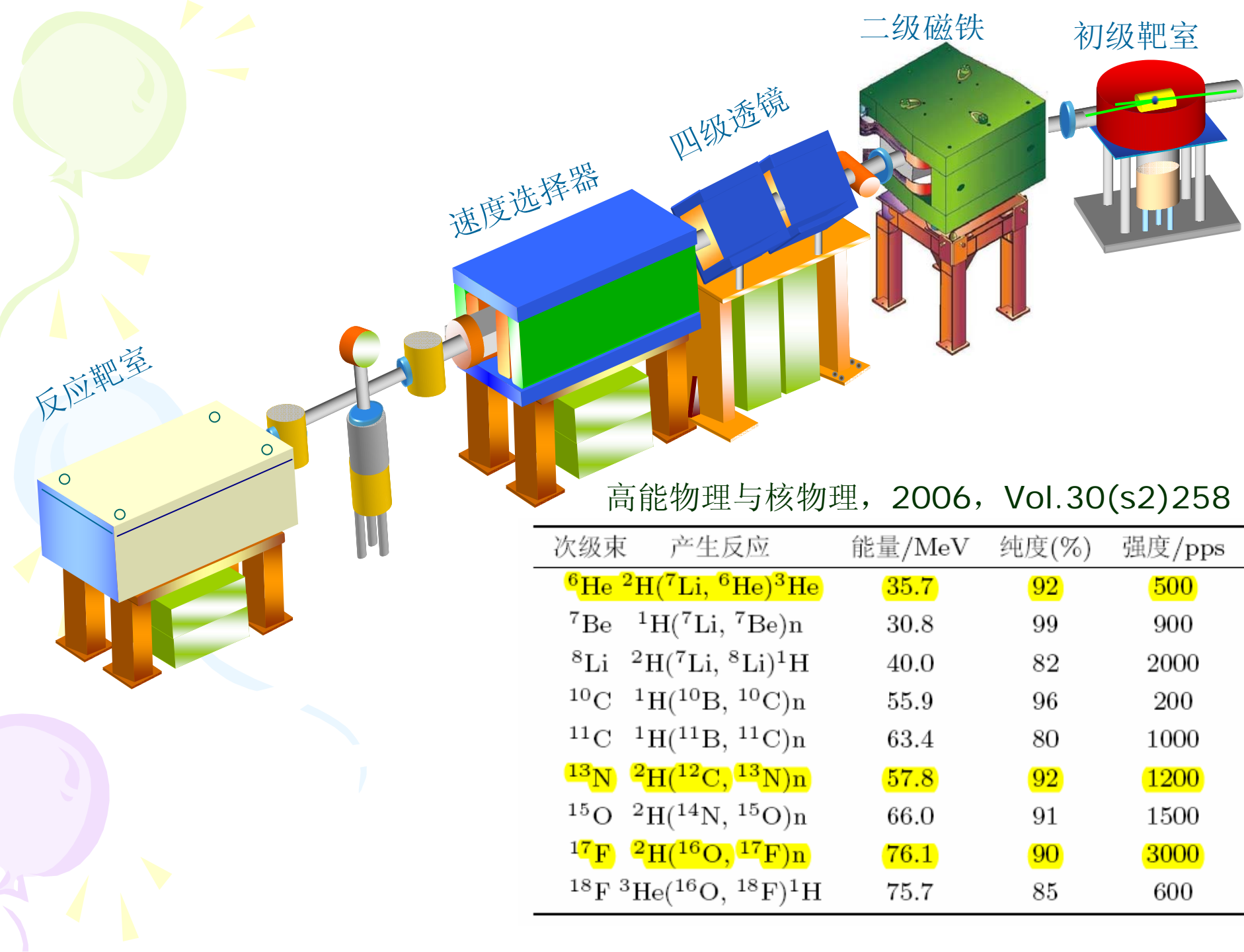
(= integrated cross section over resonant region)

$$\omega \gamma = \frac{2J+1}{(2J_1+1)(2J_2+1)} \frac{\Gamma_1 \Gamma_2}{\Gamma}$$

(Γ_i values at resonant energies)

experimental info needed

- partial widths Γ_i
- spin J
- energy E_R



高能物理与核物理, 2006, Vol.30(s2)258

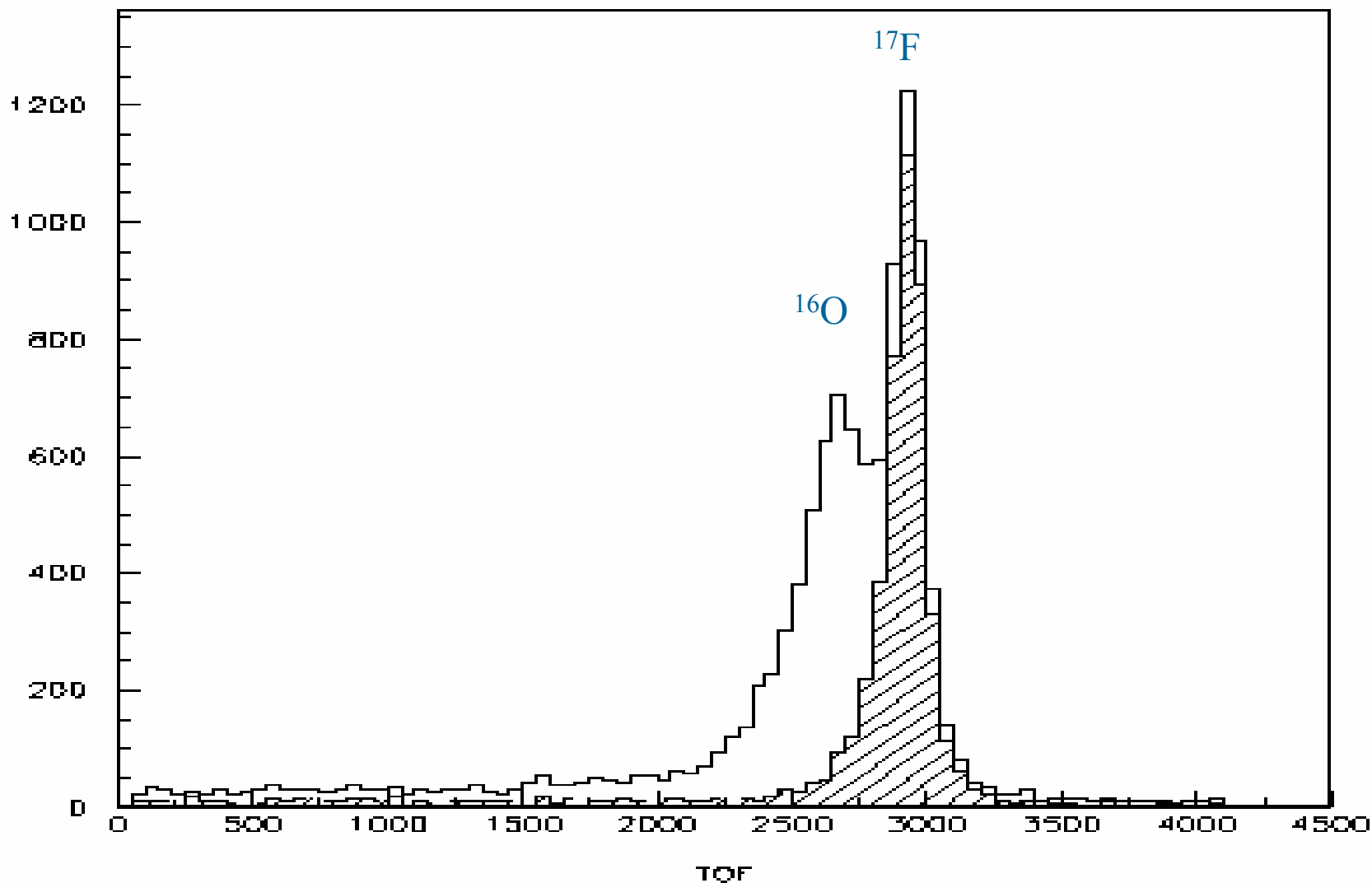
次级束	产生反应	能量/MeV	纯度(%)	强度/pps
${}^6\text{He}$	${}^2\text{H}({}^7\text{Li}, {}^6\text{He}){}^3\text{He}$	35.7	92	500
${}^7\text{Be}$	${}^1\text{H}({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})\text{n}$	30.8	99	900
${}^8\text{Li}$	${}^2\text{H}({}^7\text{Li}, {}^8\text{Li}){}^1\text{H}$	40.0	82	2000
${}^{10}\text{C}$	${}^1\text{H}({}^{10}\text{B}, {}^{10}\text{C})\text{n}$	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

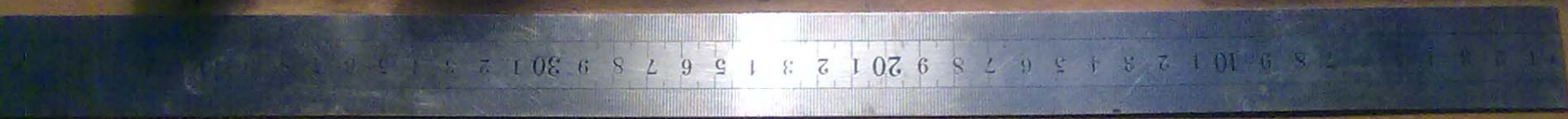
实验装置改进

- 为满足弹性共振散射实验要求，大幅度提高了次级束的强度。如 ^{13}N 次级束，此前流强仅1200粒子/秒，提高到流强6000-10000粒子/秒。
- 建立了包含飞行时间，双面硅条等多种探测系统及集成电子学。
- 开发了基于VME的多参数数据获取系统，解决了使用硅条探测器后实验参数增加很多的问题。

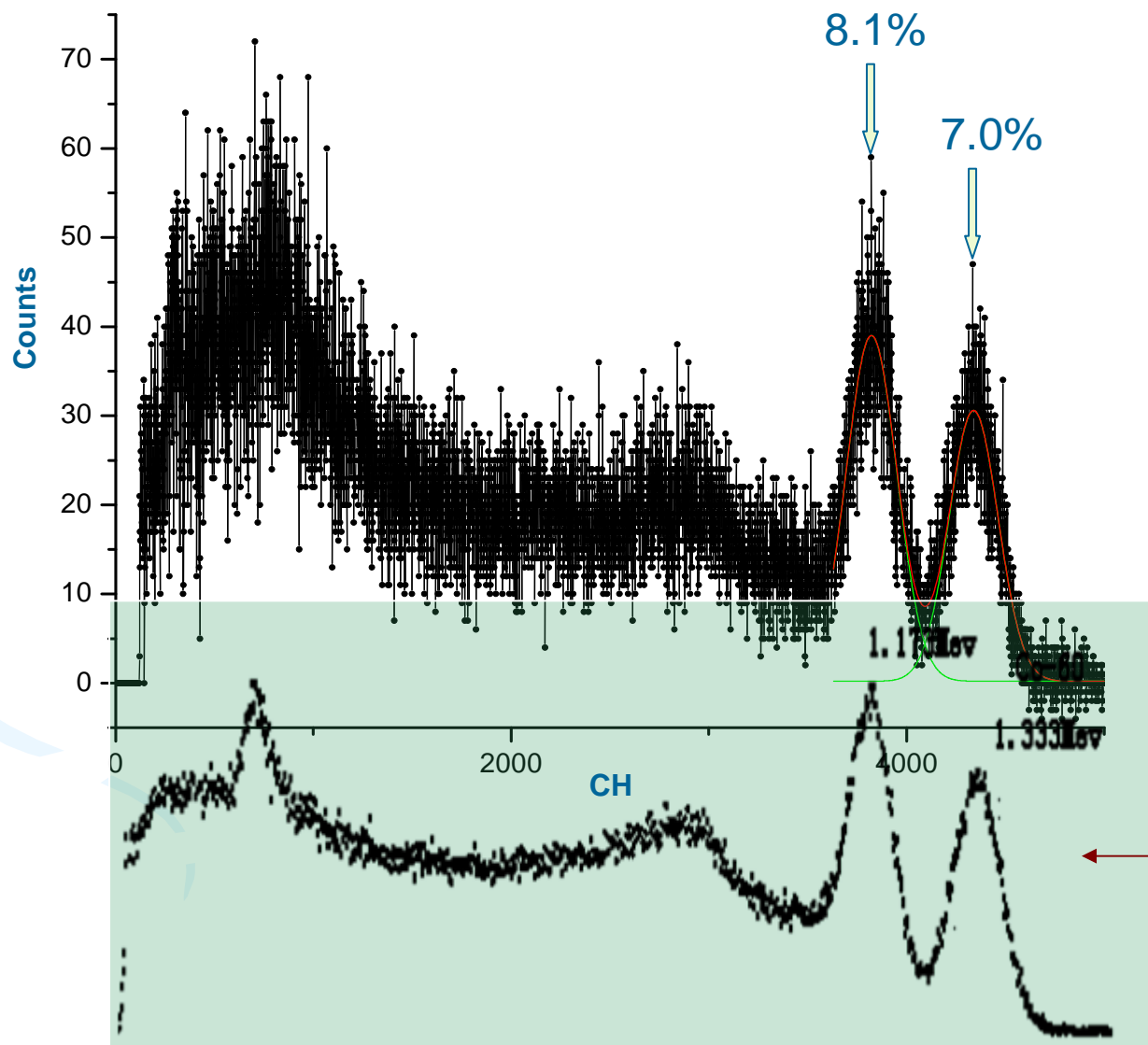
一套基于塑料闪烁探测器的飞行时间系统

秦星, 王友宝等, 原子能科学技术, Vol. 42(5), 452(2008)





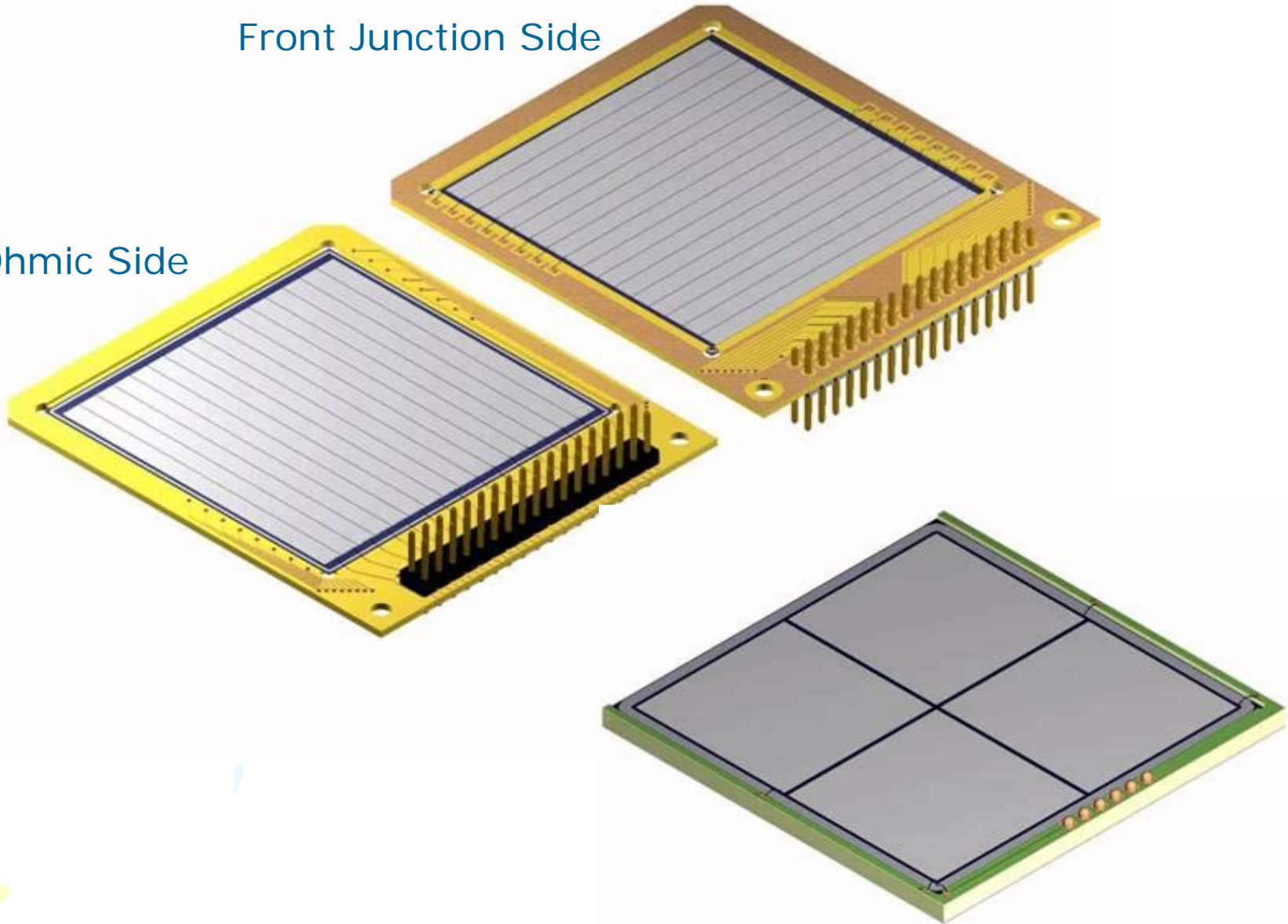
$\phi 50 \times 100 \text{mm}$ NaI(Tl)探测器 ^{60}Co 能谱



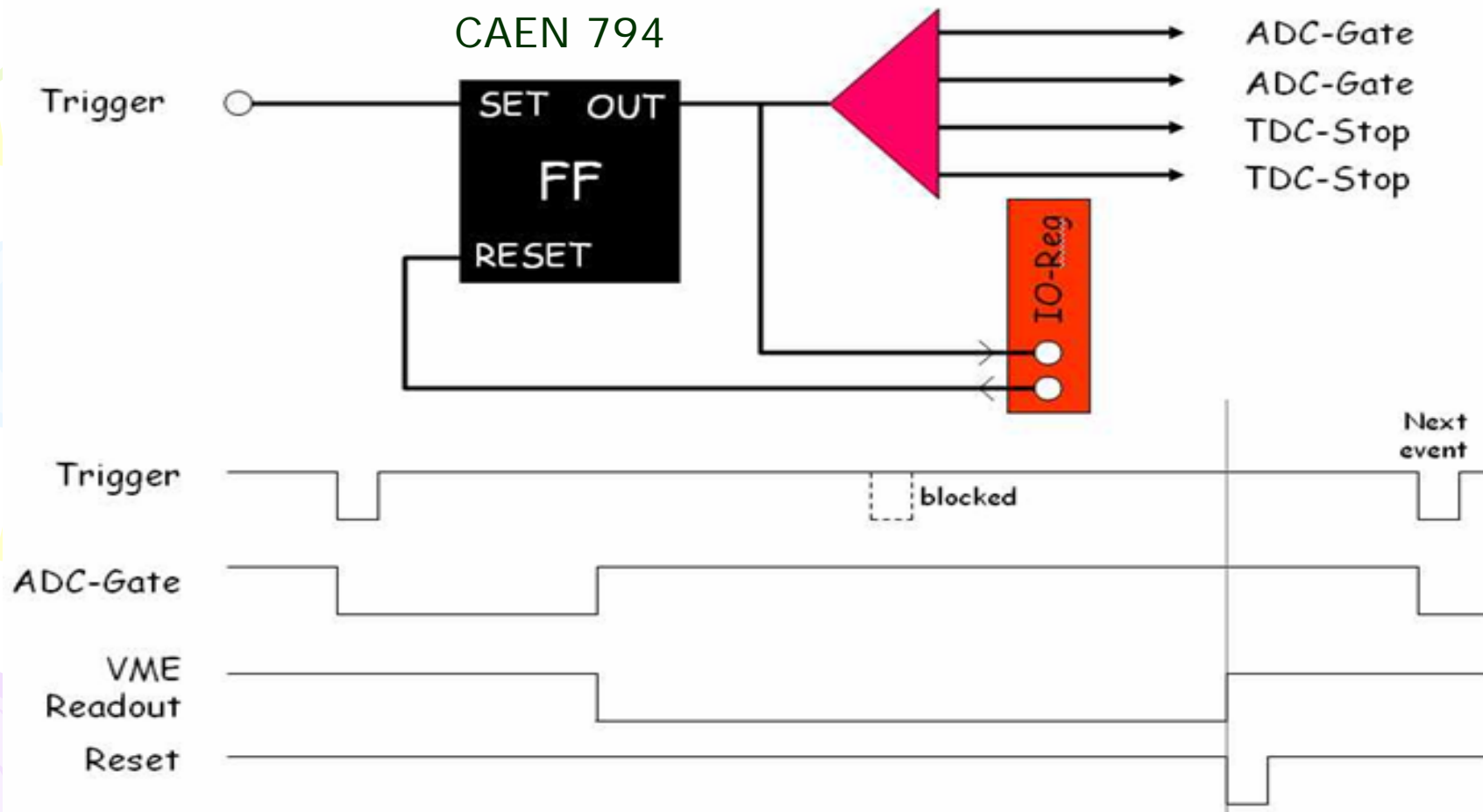
Micron Semiconductor DSSSD

Front Junction Side

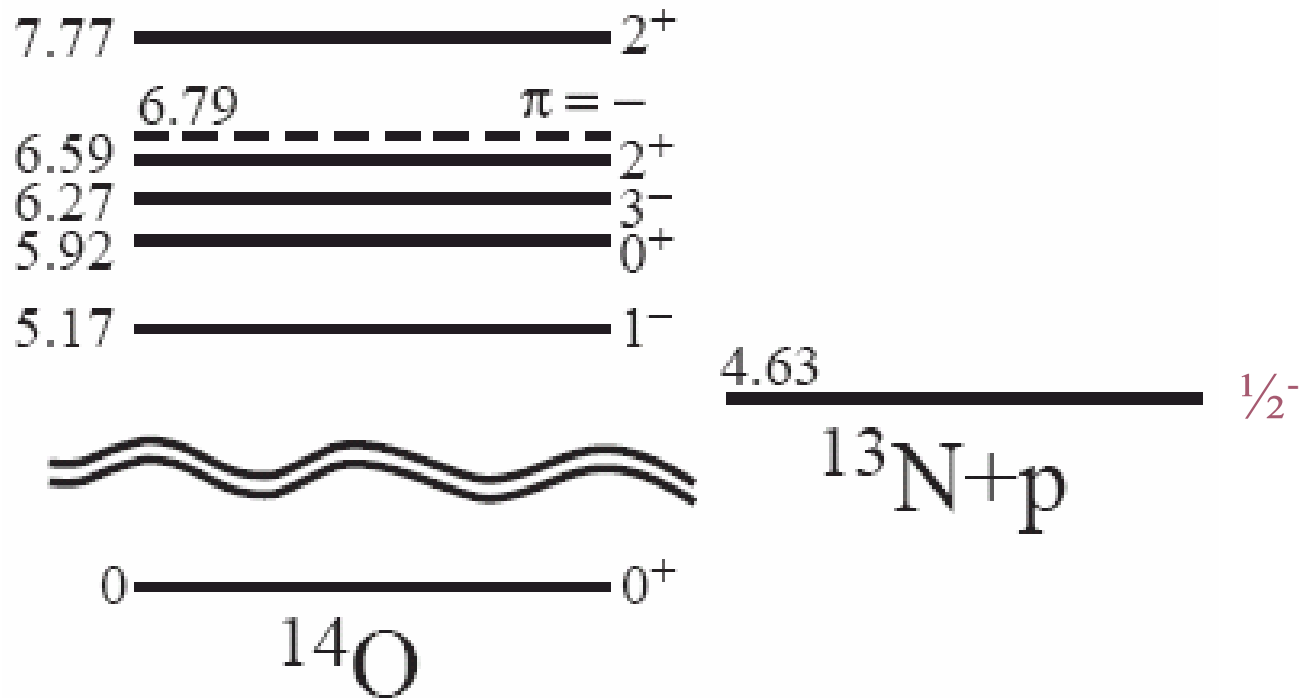
Rear Ohmic Side



基于VME的数据获取系统

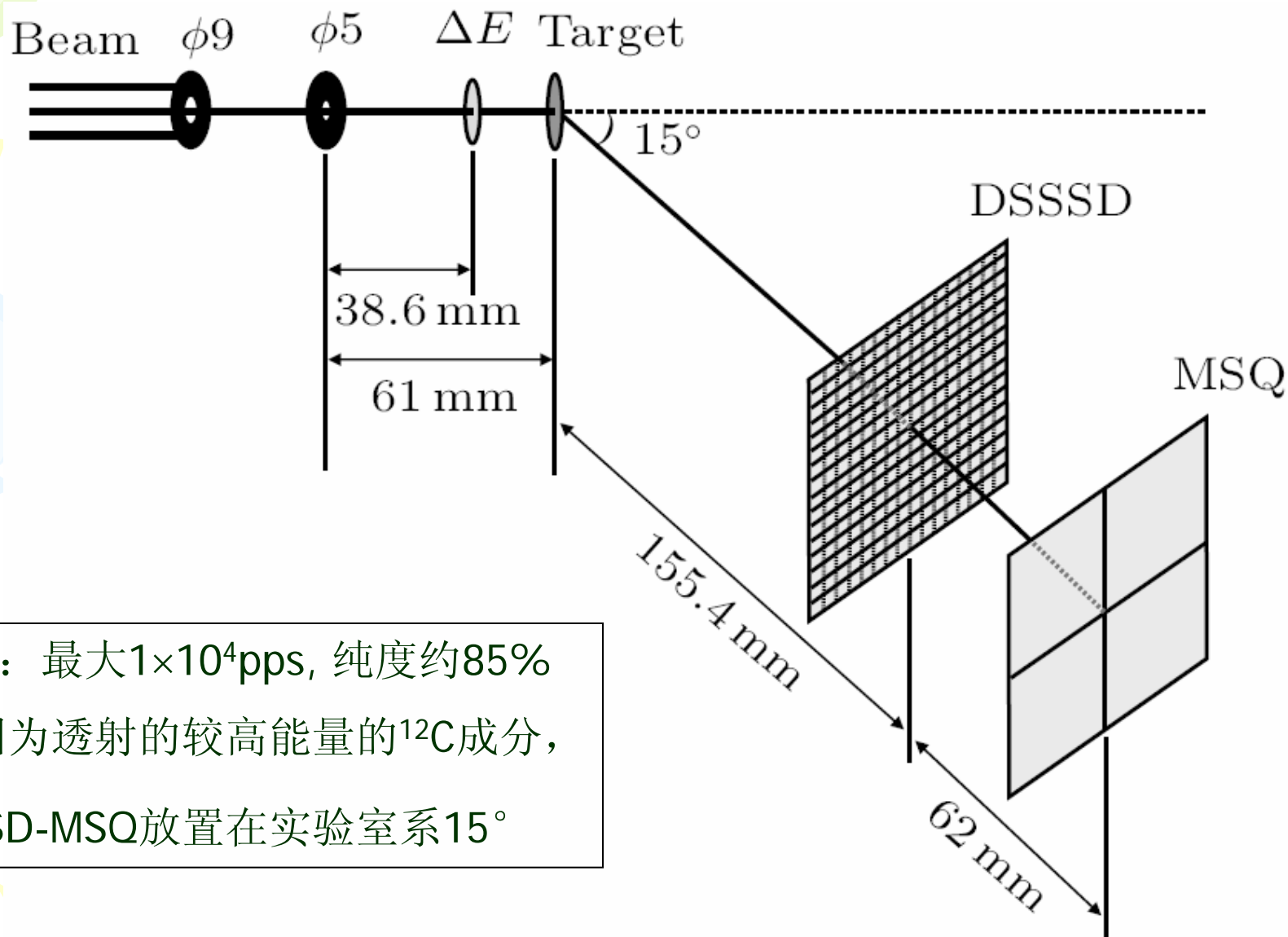


$^{13}\text{N} + \text{p}$ 实验测量



- 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

实验设置



- ^{13}N : 最大 1×10^4 pps, 纯度约 85%
- 因为透射的较高能量的 ^{12}C 成分, DSSSD-MSQ 放置在实验室系 15°

数据分析

- DSSSD每单元对应的角度

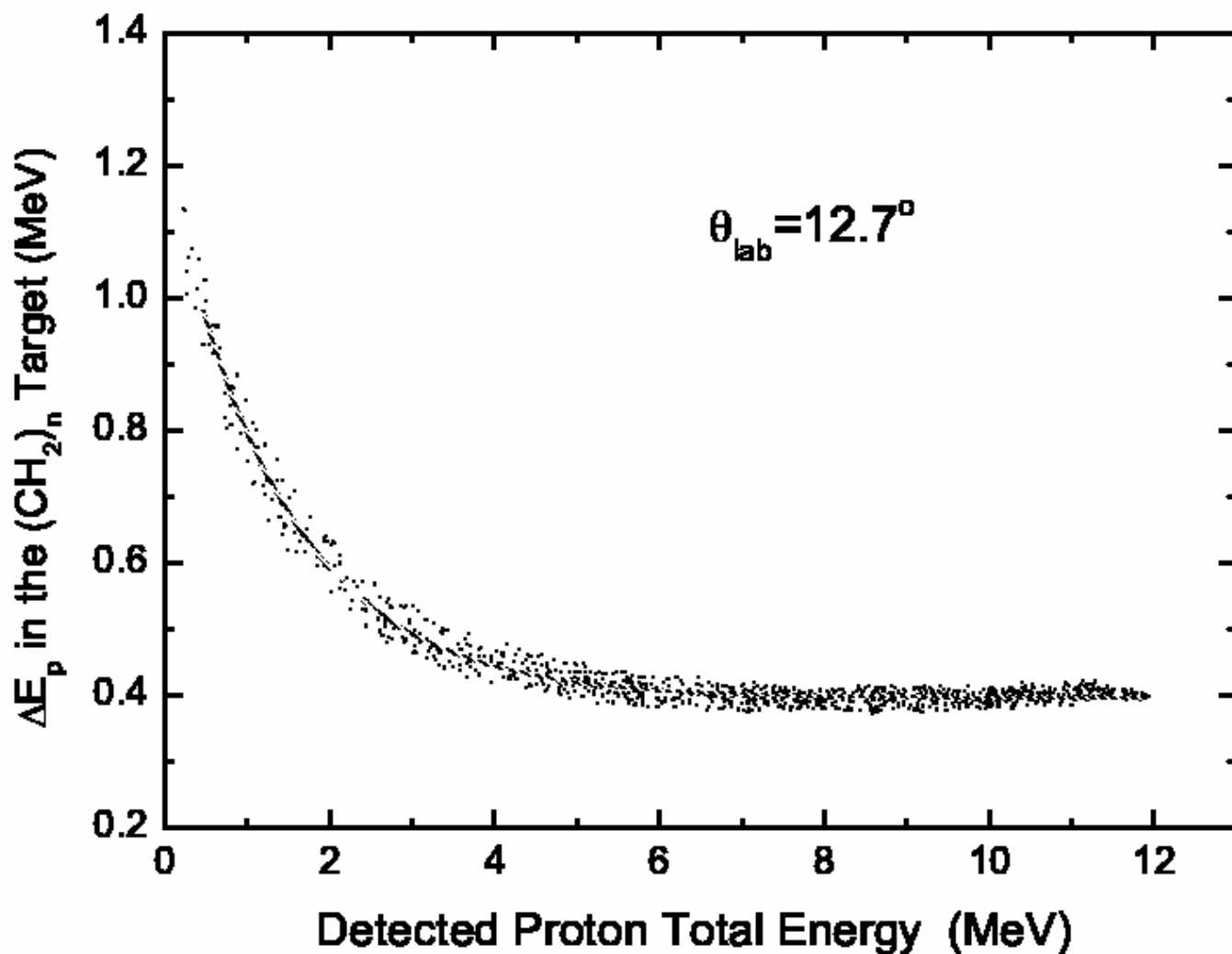
$$\theta_{lab} = \arccos\left(\frac{d_0 \cos 15^\circ \pm x \sin 15^\circ}{\sqrt{d_0^2 + x^2 + y^2}}\right), d_0 = 150mm$$

- 逐单元刻度， α 标准源+在线质子束
- 逐角度 $E_p \rightarrow E_{cm}$ 转换

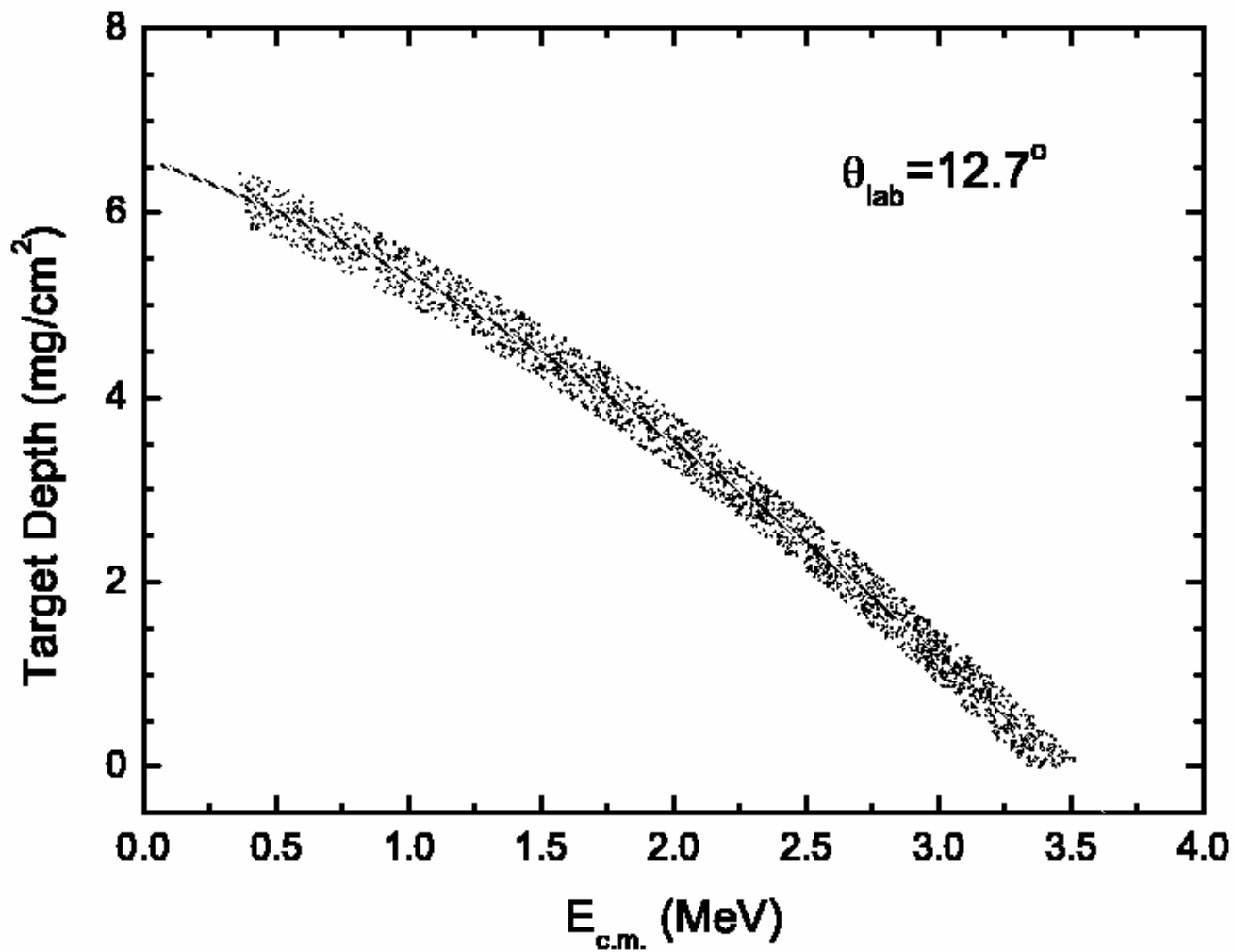
$$E_{c.m.} = E_p \times \frac{m_1 + m_{13}}{4m_{13} \cos^2 \theta_{lab}}$$

- $E_p(\theta) = \Delta E_p(\theta) + E_t(\theta)$, $E_p(\theta)$: 反应点的质子能量, $E_t(\theta)$: 测量的质子能量, $\Delta E_p(\theta)$: 质子在靶中的能量损失。

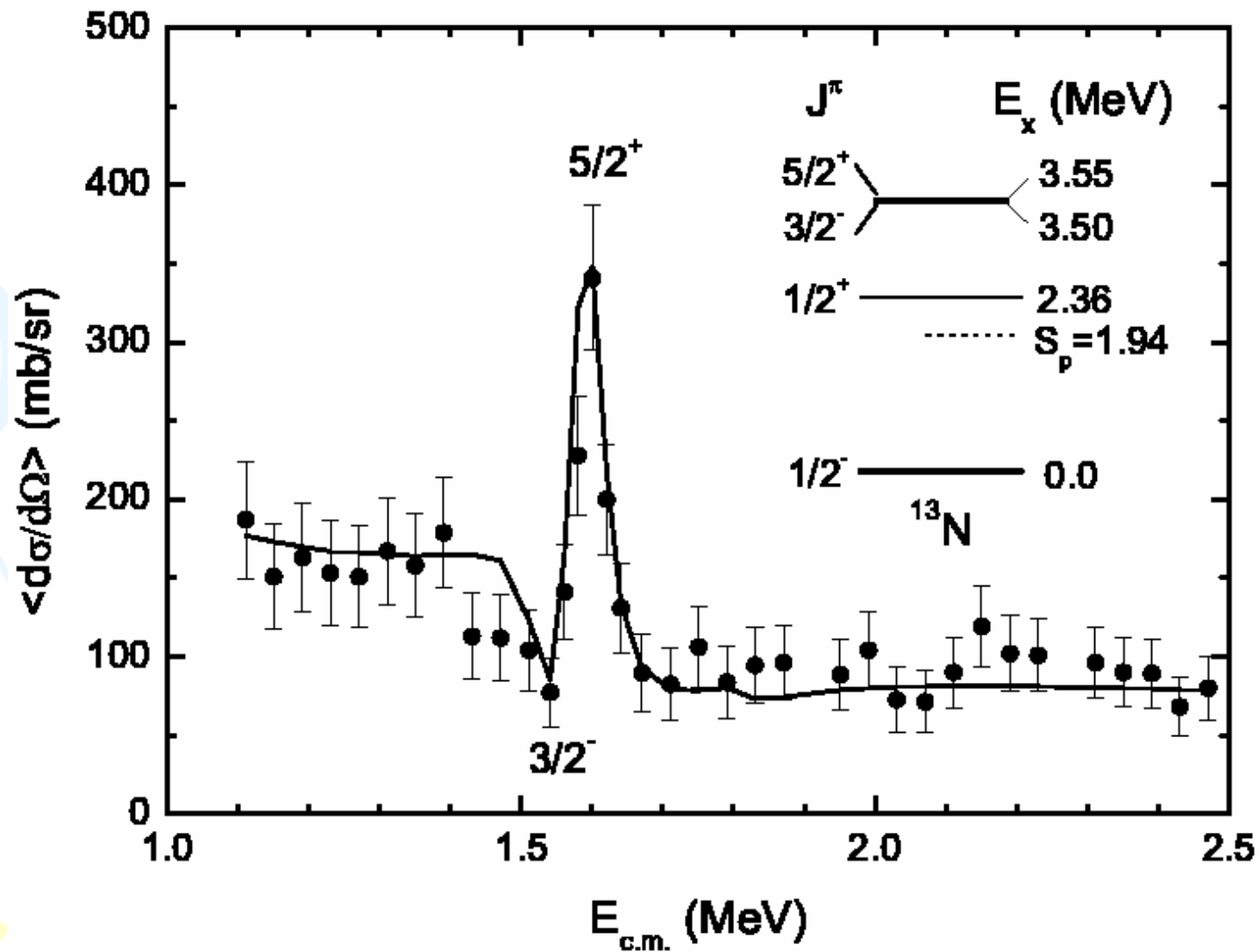
质子在靶中能量损失的M-C模拟



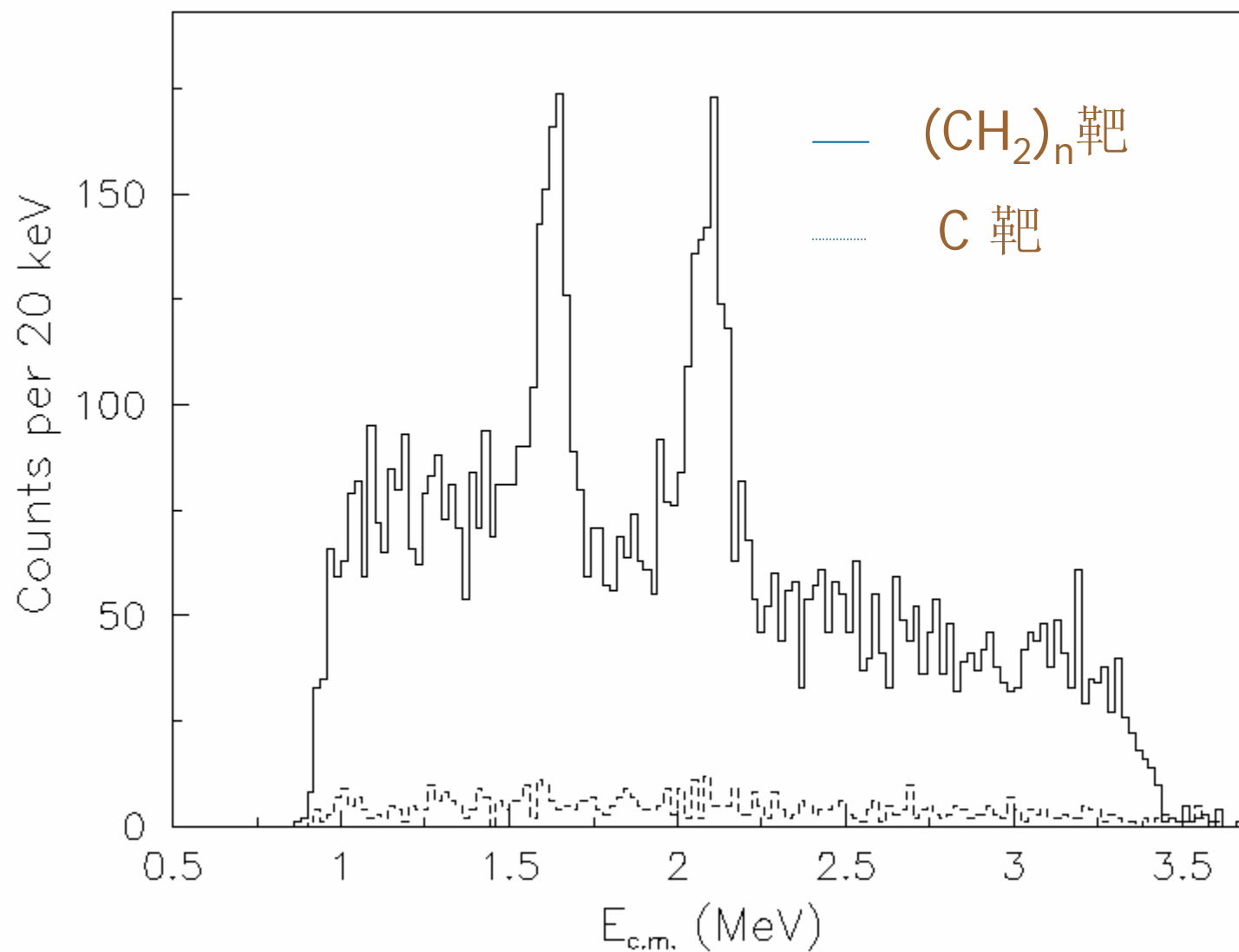
能量相关的靶核数



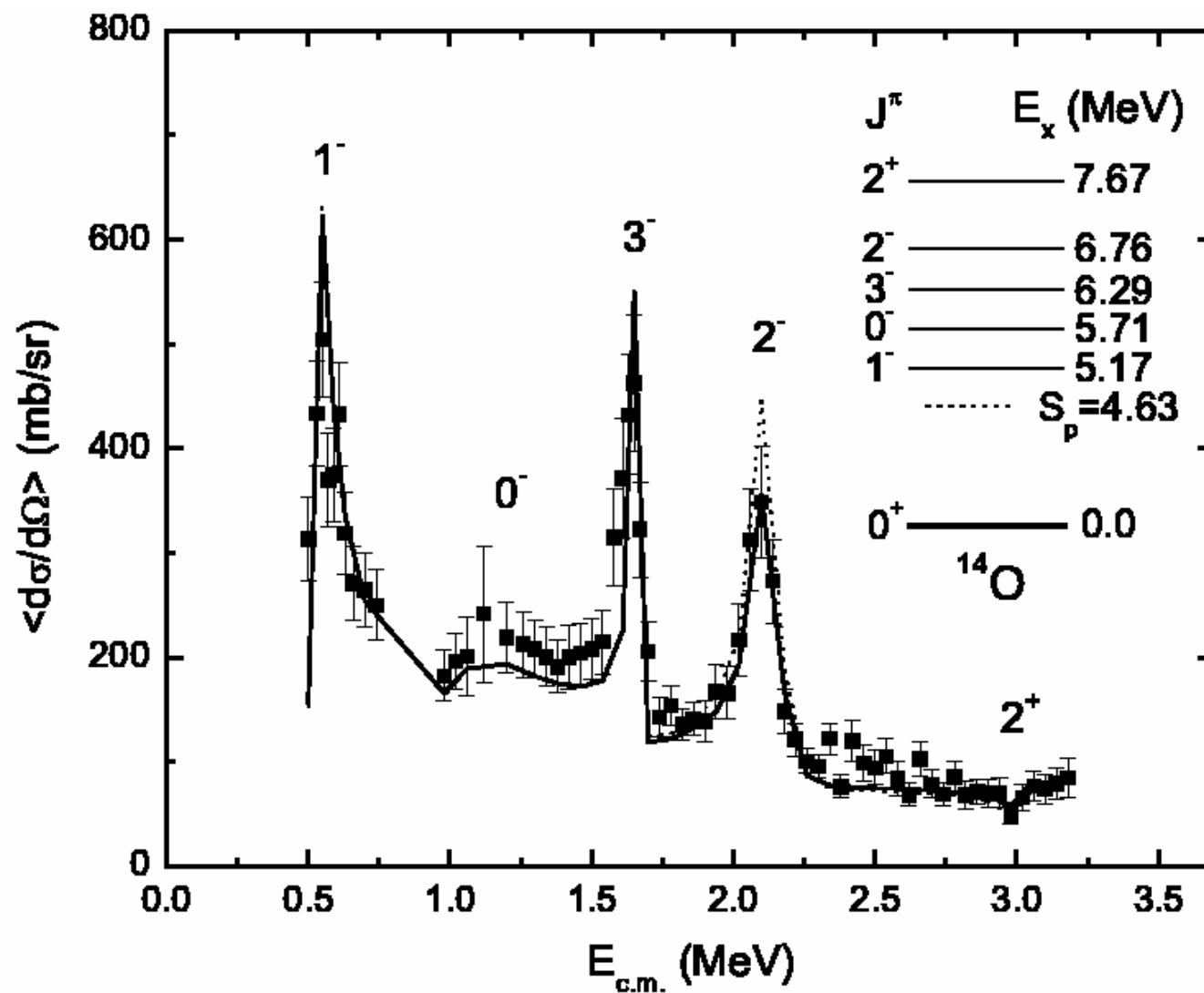
$^{12}\text{C} + \text{p}$ 散射测量, 厚靶实验方法检验



$^{13}\text{N} + \text{p}$ 质子产额



$^{13}\text{N} + \text{p}$ 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

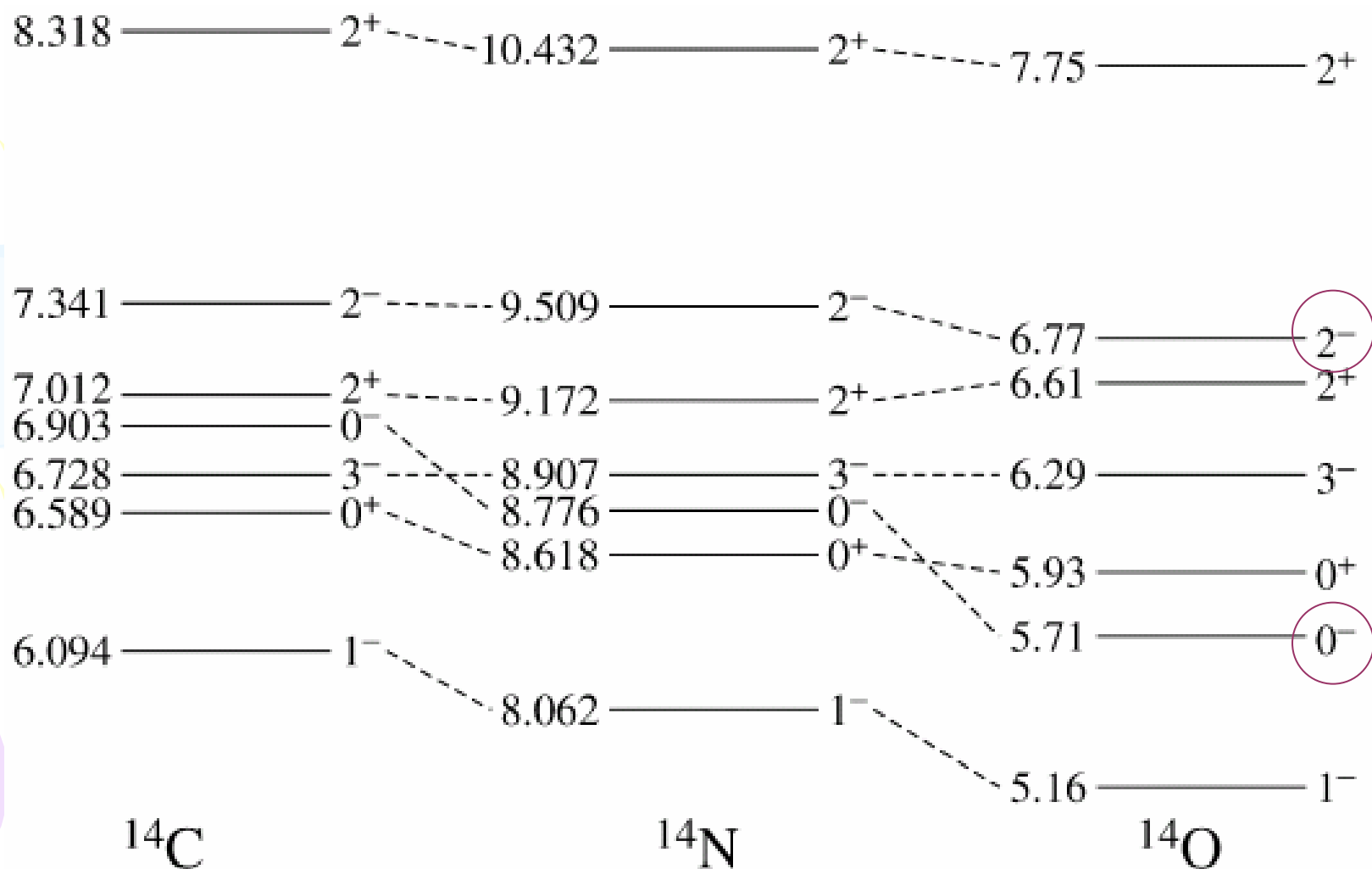
China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(46), Beijing 102413, People's Republic of China

(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.

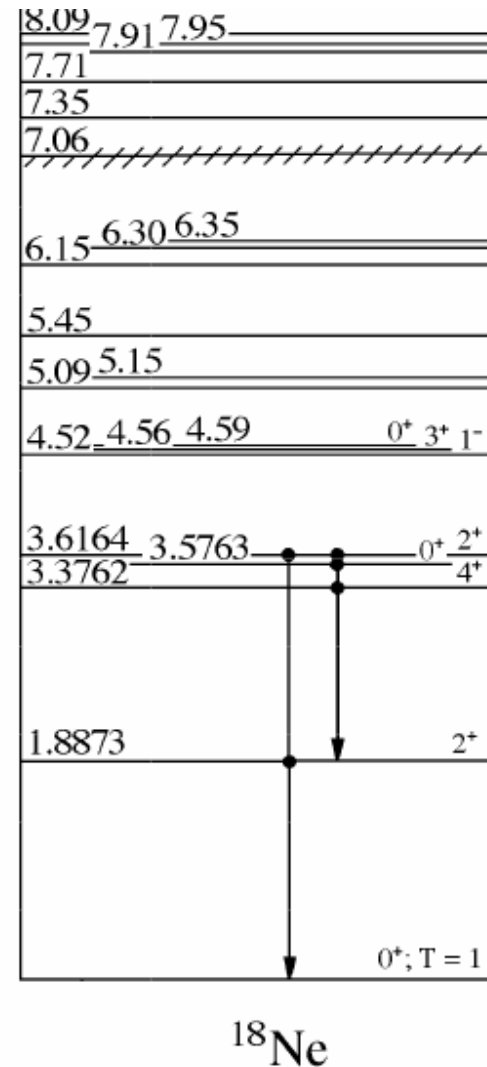
This work				Ref. [8]		Ref. [17]	
J^π	l	E_x (MeV)	Γ_R (keV)	E_x (MeV)	Γ_R (keV)	E_x (MeV)	Γ_R (keV)
1^-	0	5.169(19)	40(4)	5.159(10)	42(4)	5.178(10)	37(14)
0^-	0	5.710(20)	400(45)	5.710(20)	400(100)		
0^+						5.931(10)	<12
3^-	2	6.290(20)	25(3)	6.285(12)	42(2)	6.284(9)	50(6)
2_1^+						6.609(10)	<5
2^-	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)

A=14核素的系统学



$^{17}\text{F}+\text{p}$ 散射实验

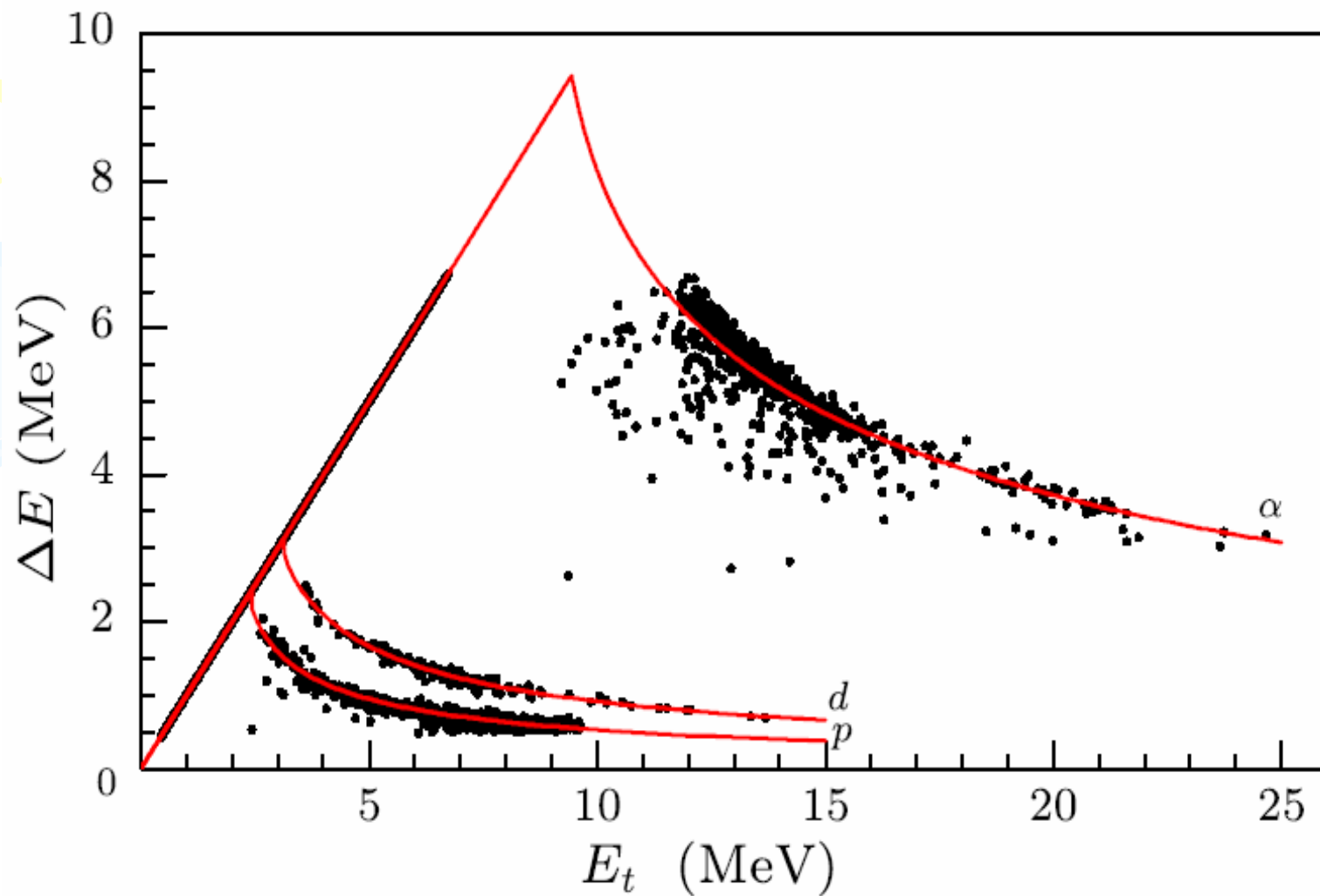
E_x (MeV \pm keV)	$J^\pi; T$	τ or $\Gamma_{\text{c.m.}}$
0	$0^+; 1$	$\tau_{1/2} = 1672 \pm 8$ ms
1.8873 ± 0.2	2^+	$\tau_m = 0.67 \pm 0.06$ ps
3.3762 ± 0.4	4^+	$\tau_m = 4.4 \pm 0.6$ ps
3.5763 ± 2.0	0^+	$\tau_m = 4 \pm 2$ ps
3.6164 ± 0.6	2^+	$\tau_m = 63^{+30}_{-20}$ fs
4.519 ± 8	1^-	$\Gamma \leq 20$ 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
$6.15^{\text{b,c}}$	(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

$$\frac{4.522}{^{16}\text{O} + 2\text{p}} \quad \frac{5.112}{^{14}\text{O} + \alpha}$$


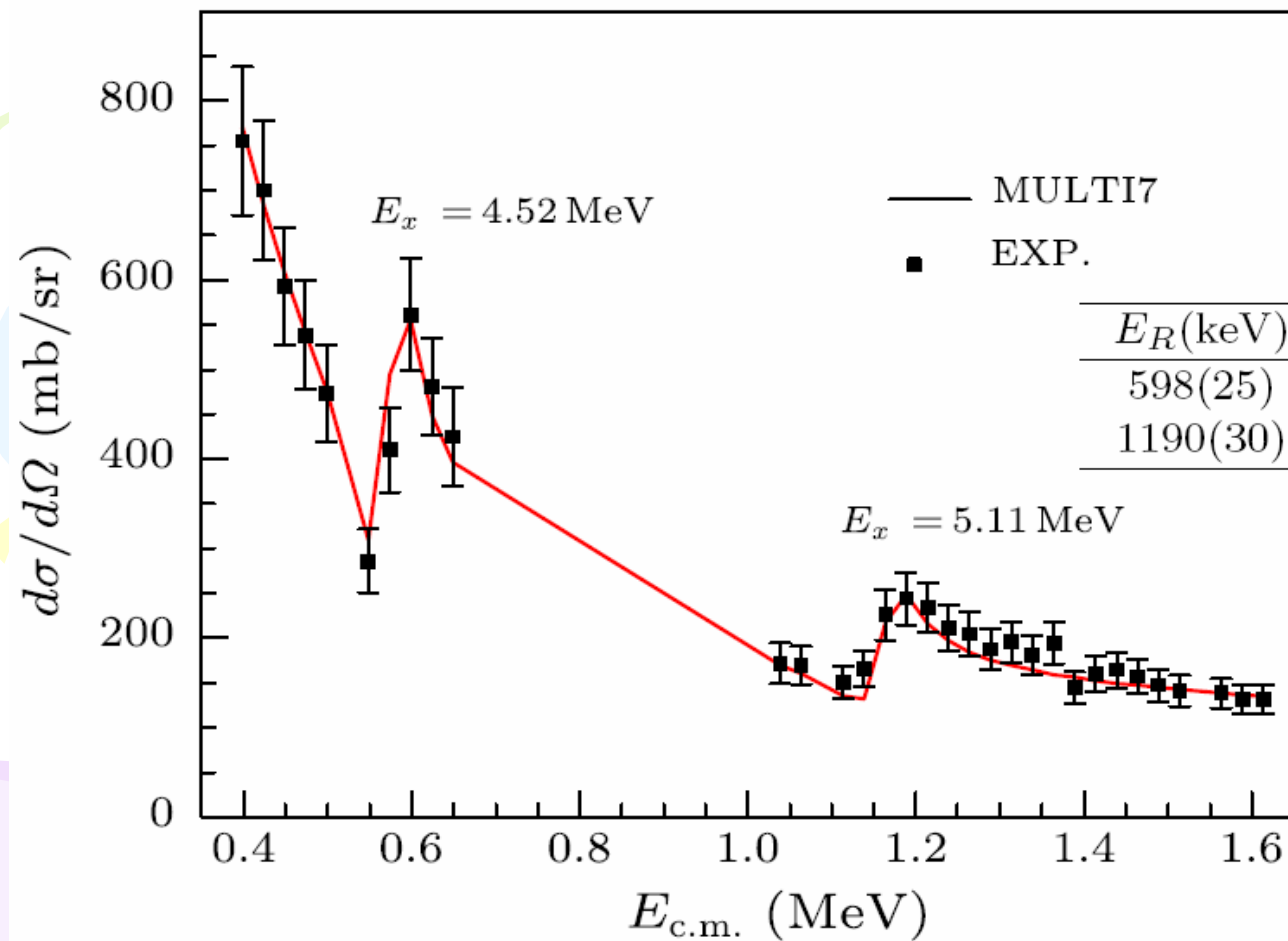
实验: $^2\text{H}(^{16}\text{O}, ^{17}\text{F})\text{n}$ @96MeV

^{17}F : 70%纯度, 流强>5000pps

$^{17}\text{F}+\text{p}$ 散射实验粒子鉴别图



$^{17}\text{F} + \text{p}$ 散射的激发函数

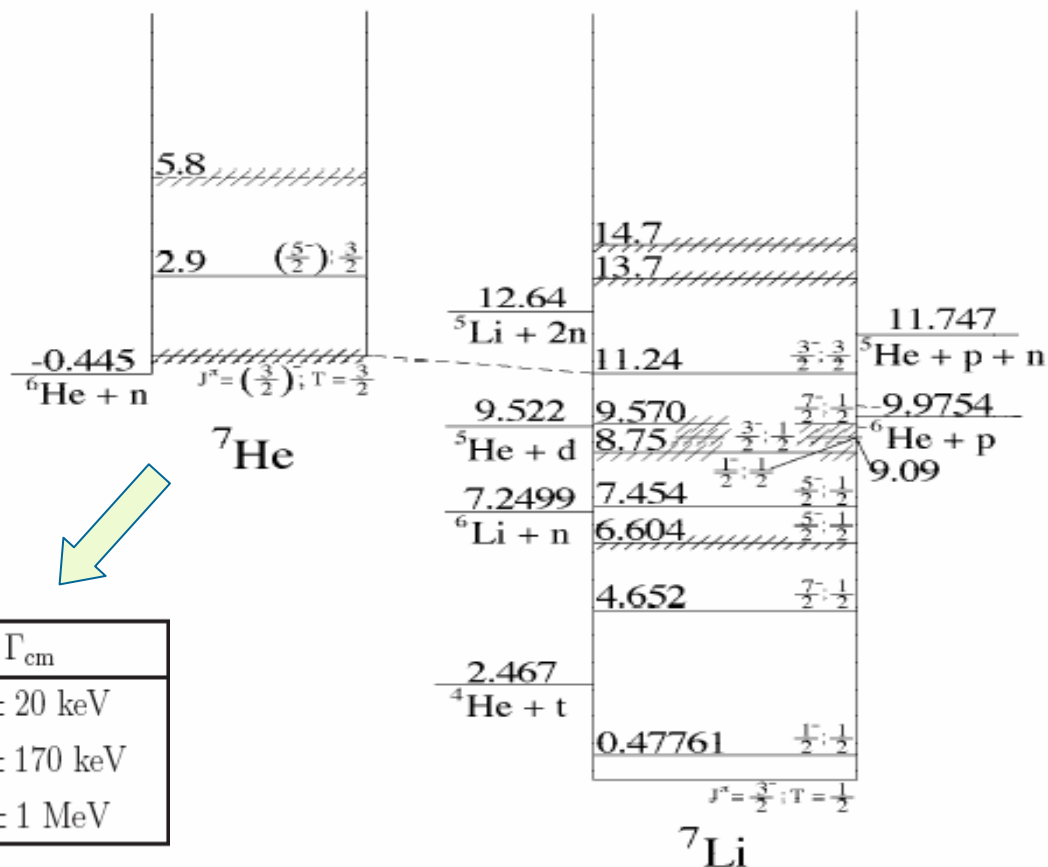


导出的共振参数

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

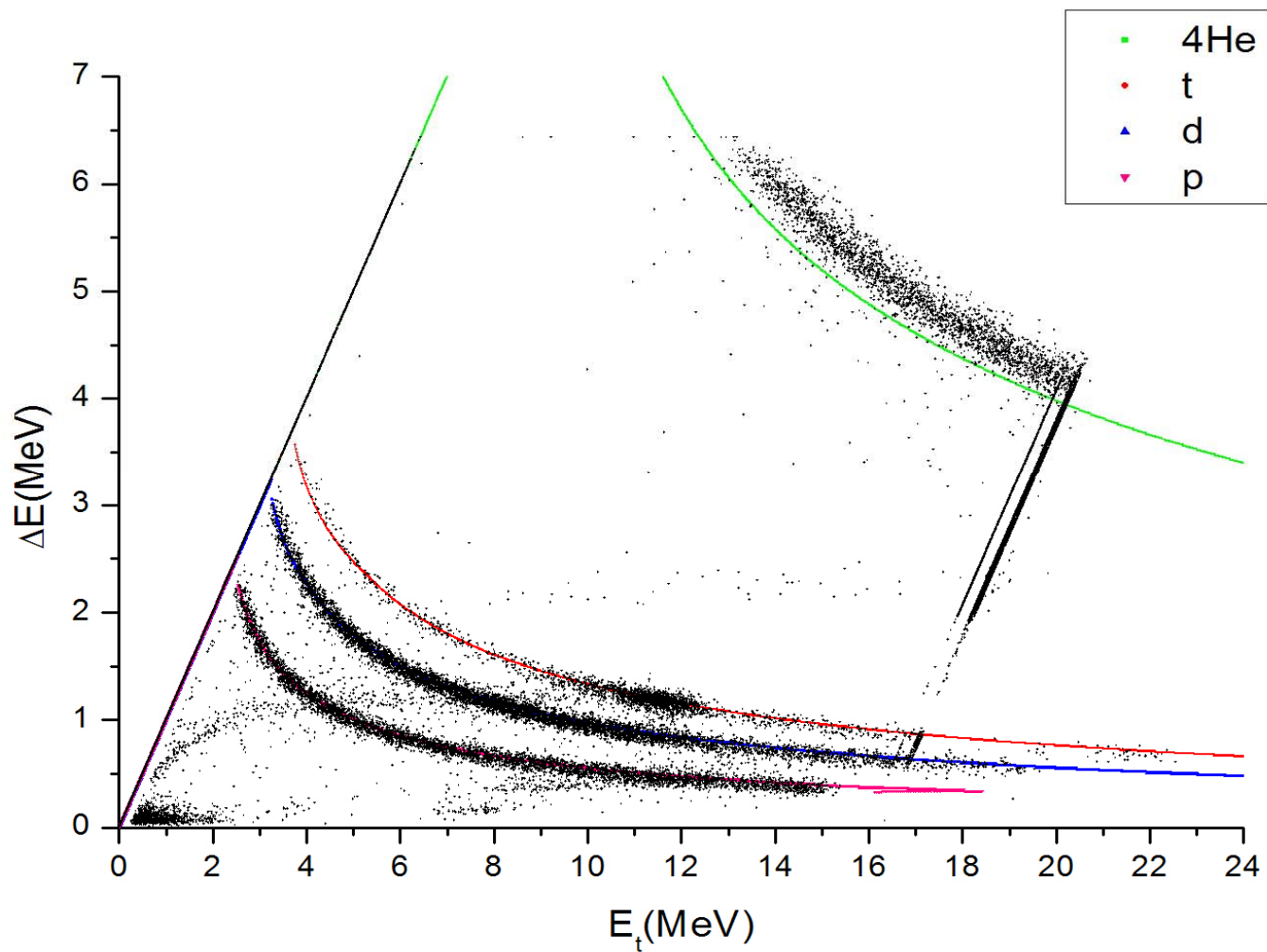
${}^6\text{He} + p$ 散射实验

- 借助 ${}^7\text{Li}$ 同位旋相似态可以研究 ${}^7\text{He}$ 低激发态的性质
- 检验单粒子模型是否适用



${}^7\text{Li}$ 与 ${}^7\text{He}$ 的能级纲图

${}^6\text{He} + \text{p}$ 散射的粒子鉴别图



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)

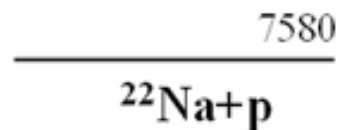
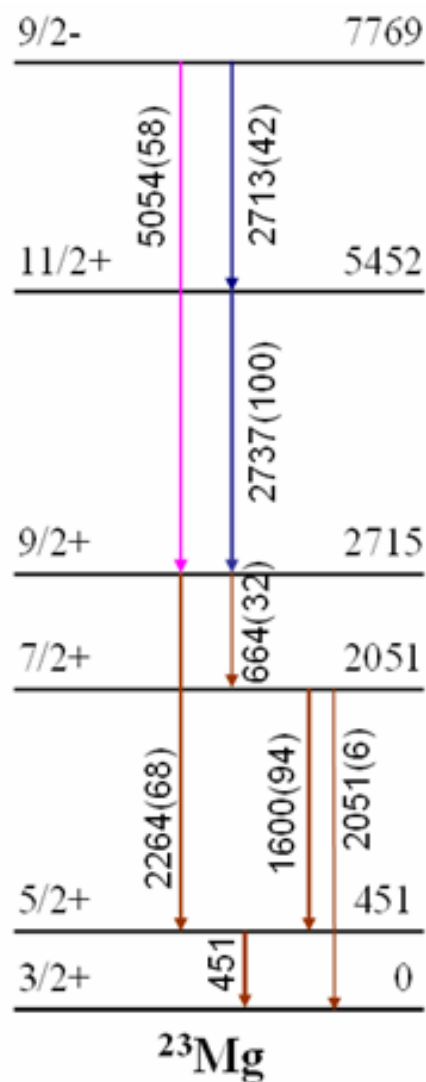
5. Levels in ^{13}N examined by $^{12}\text{C}+\text{p}$ elastic resonance scattering with thick target

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).

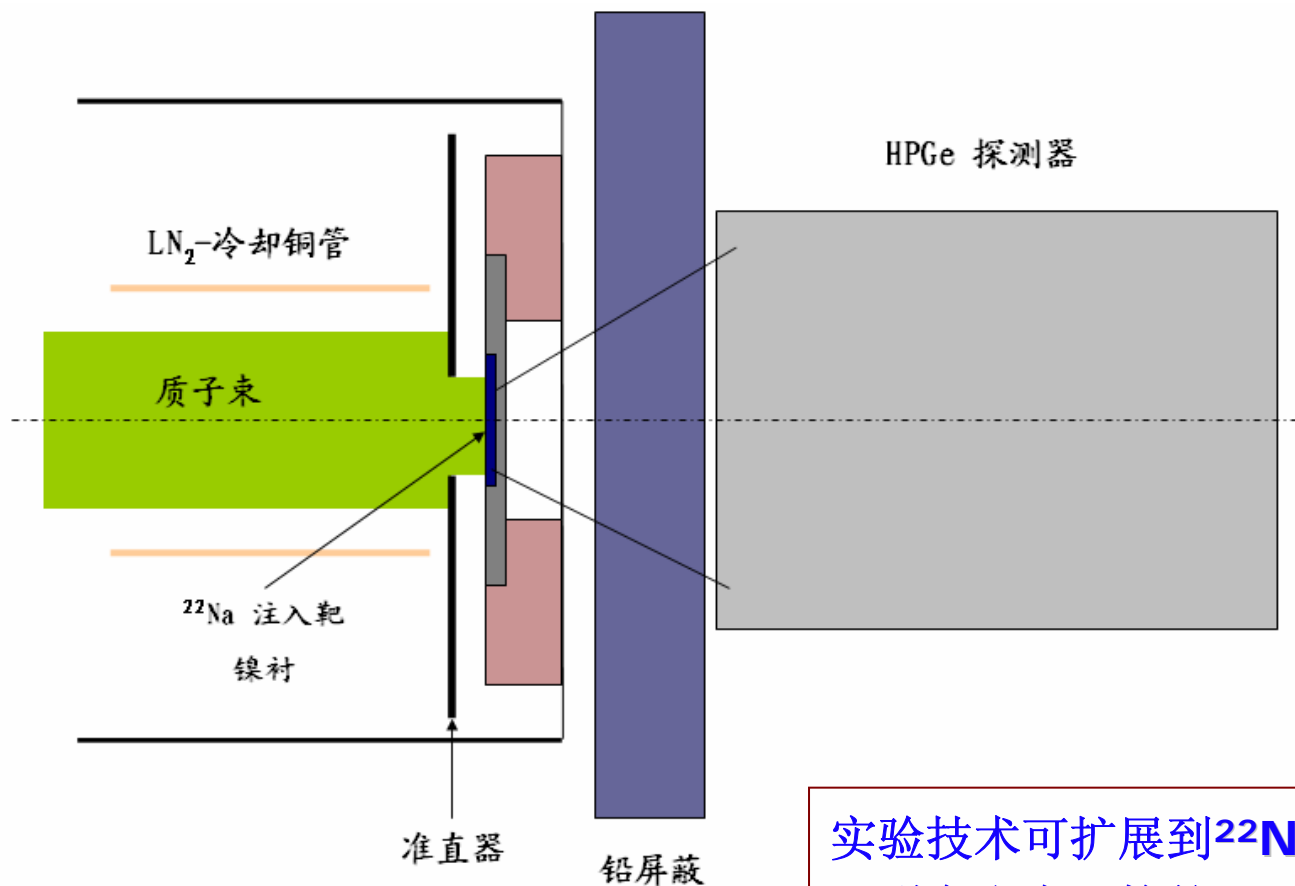
下一步的工作计划（一）



$E_p = 198 \text{ keV}$
 ^{23}Mg 新共振能级的退激伽马纲图

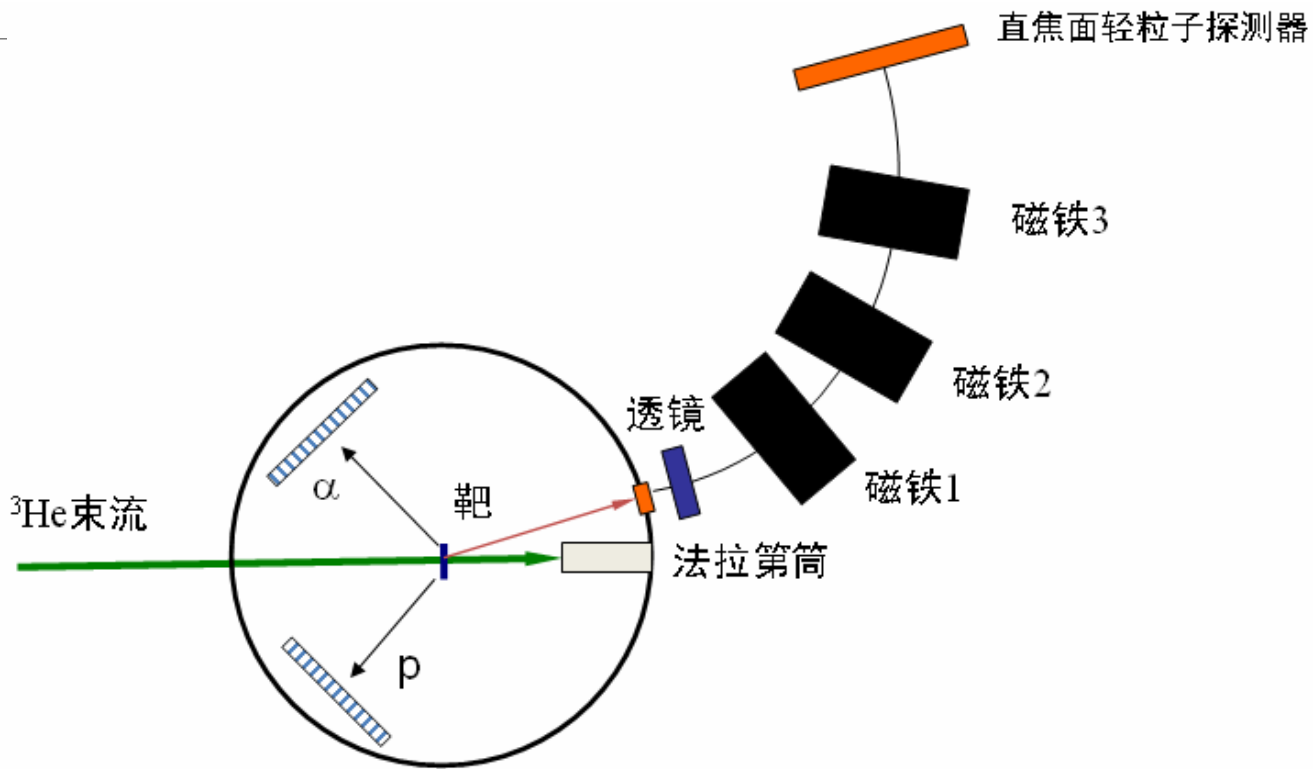
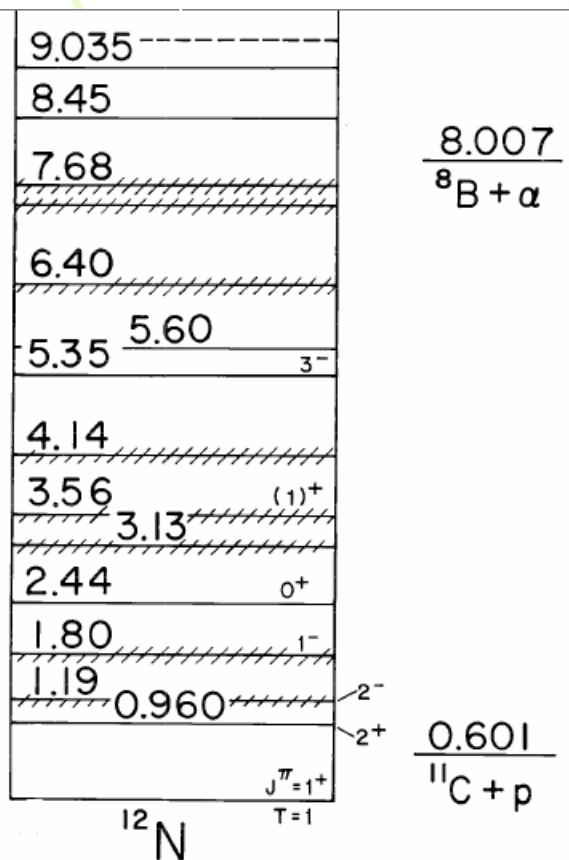
现有的实验测量低至 $E_p = 214 \text{ keV}$,
 $E_p = 198 \text{ keV}$ 的贡献有可能超越前者, 对反应率影响巨大。

$^{22}\text{Na}(p,\gamma)$ 反应率的直接测量



实验技术可扩展到 $^{22}\text{Na}(\alpha,\gamma)^{26}\text{Al}$,以及裂变丰中子核的 (n,γ) 反应测量

用Q3D磁谱仪测量共振能级





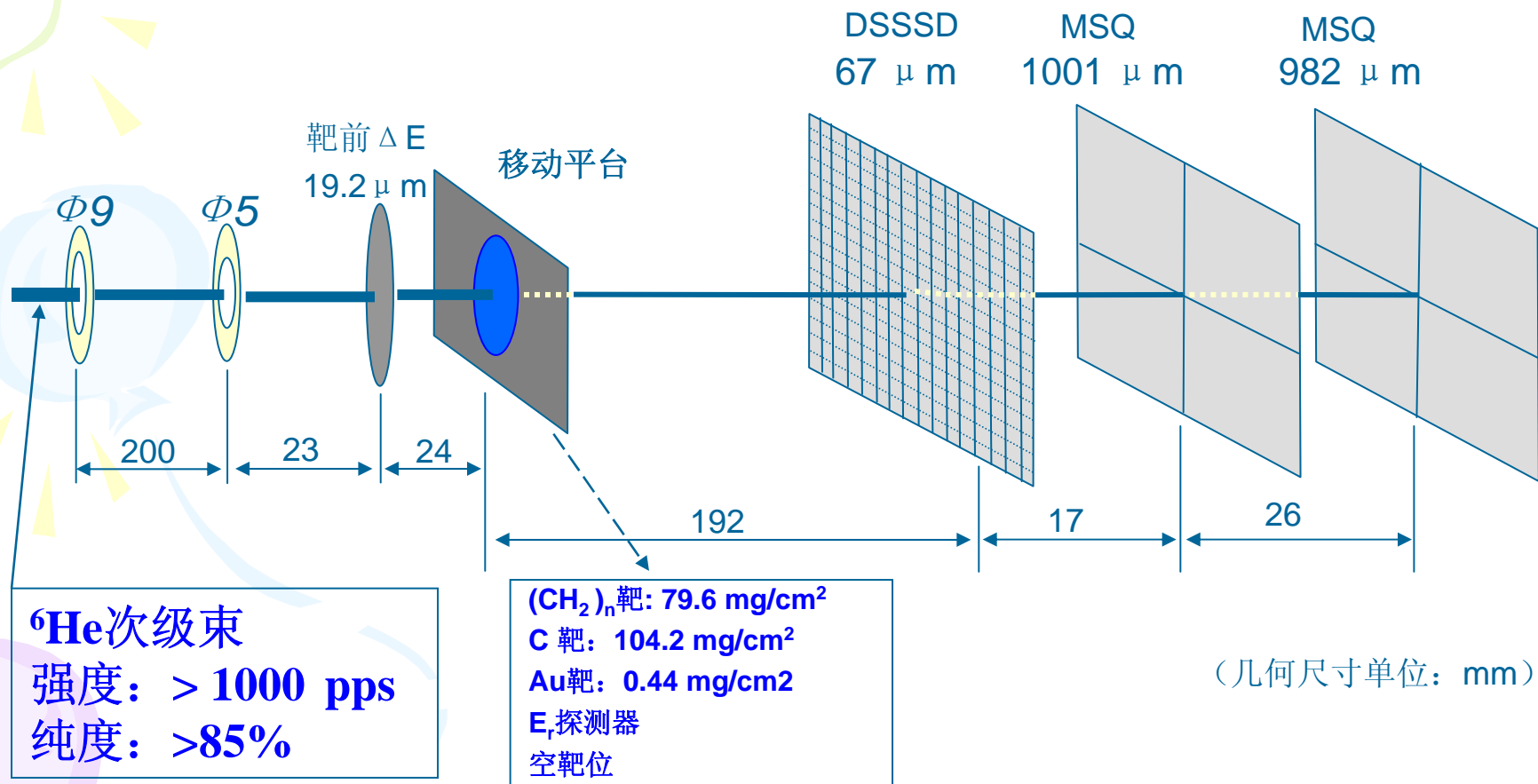
厚靶实验的继续

- 分析 ${}^6\text{He} + \text{p}$ 的实验数据
- 日本CNS 实验计划

Three balloons (green, blue, and purple) with yellow streamers are positioned on the left side of the slide.

谢谢！

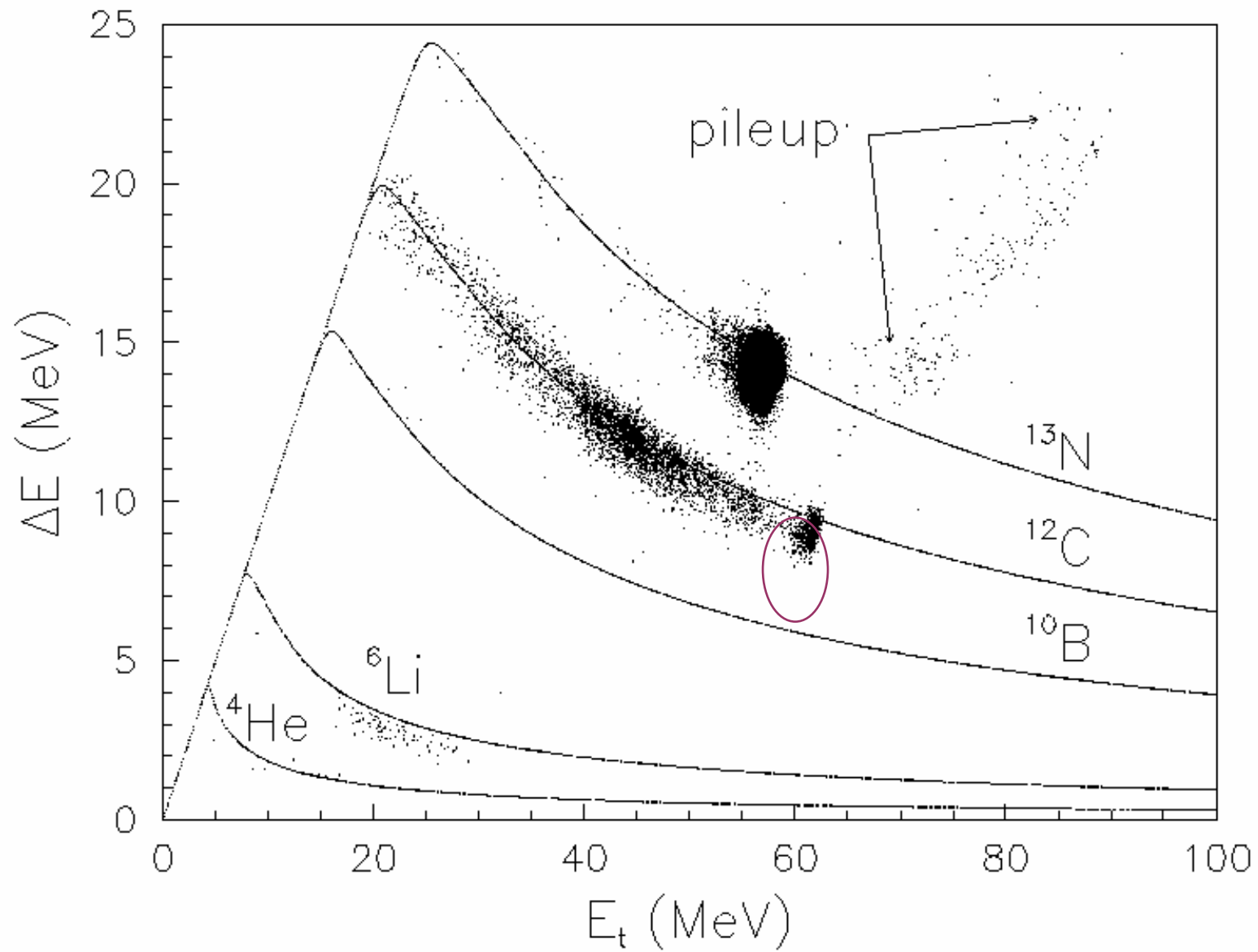
${}^6\text{He} + \text{p}$ 散射实验设置



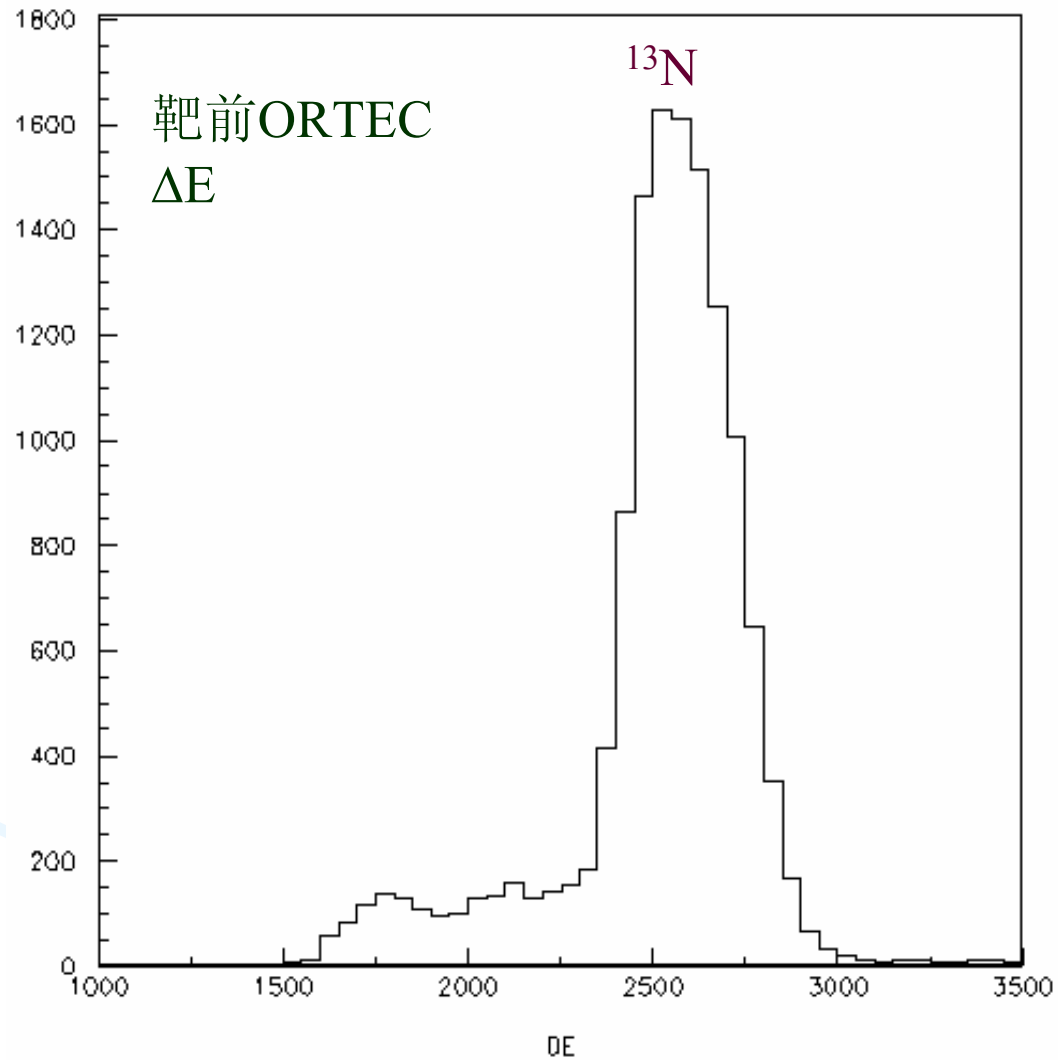
结 论

- 利用次级束引起的弹性共振散射的厚靶实验方法，可以用一个能量点的次级束一次测量较大能量范围的激发函数。
- 通过精确的刻度和逐角度的Monte-Carlo模拟完全可以对质子事例进行运动学重构。
- 使用多能级R-矩阵分析程序对实验的激发函数进行拟合计算，获得了复合核各能级的共振参数。

^{13}N 次级束



反应靶前的粒子鉴别与记录

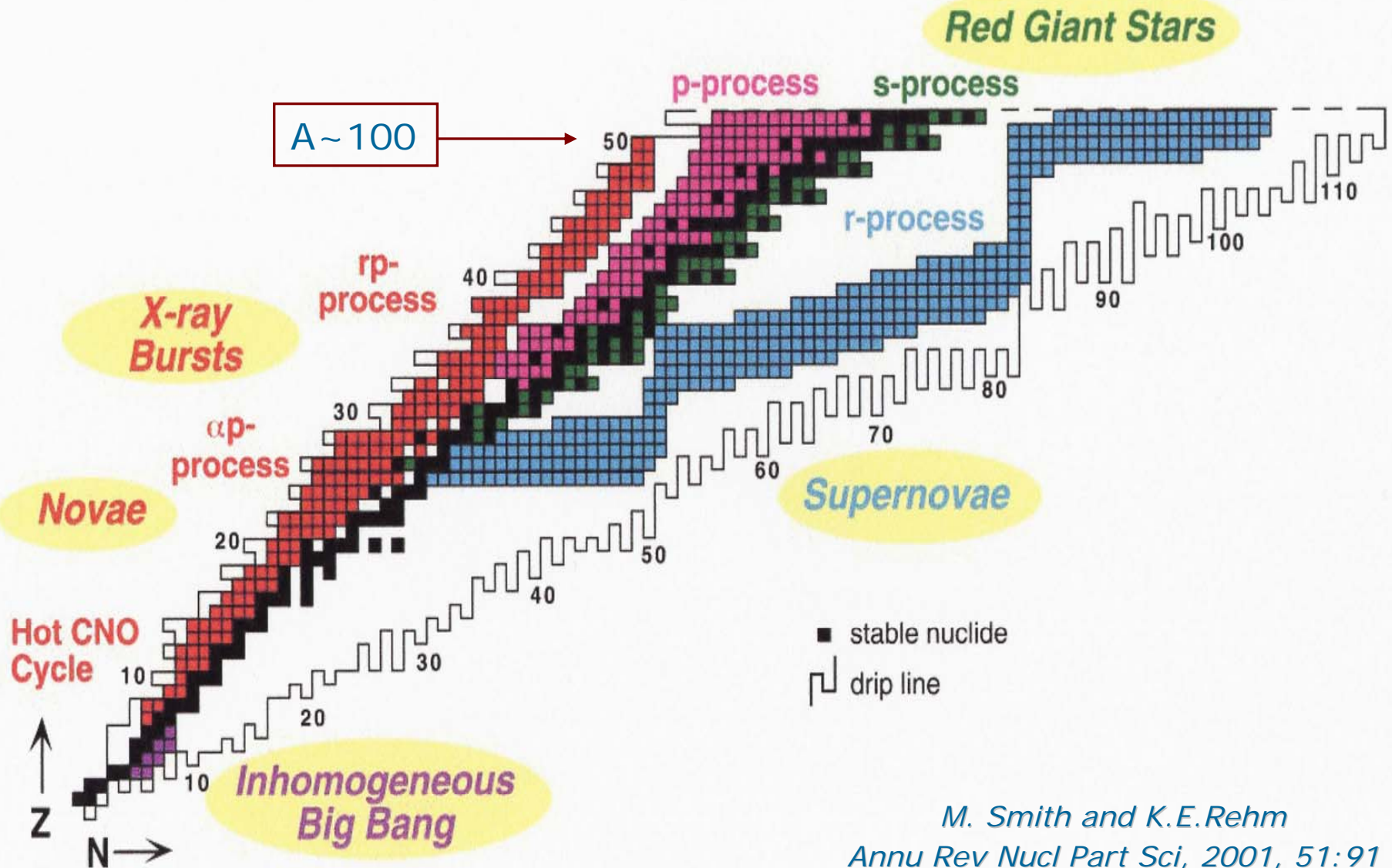


微分截面的 R -矩阵描述

包含库仑散射、核反应(共振)及相干项

$$\begin{aligned} (2s+1) \frac{k_\alpha^2}{\pi} d\sigma_{\alpha s, \alpha' s'} d\Omega_{\alpha'} &= (2s+1) |C_{\alpha'}(\theta_{\alpha'})|^2 \delta_{\alpha' s', \alpha s} \\ &+ \frac{1}{\pi} \sum_L B_L(\alpha' s', \alpha s) P_L(\cos \theta_{\alpha'}) - \delta_{\alpha' s', \alpha s} (4\pi)^{-1/2} \\ &\times \sum_{Jl} (2J+1) 2 \operatorname{Re}[i(T_{\alpha' s' l', \alpha s l}^J)^* C_{\alpha'}(\theta_{\alpha'}) P_l(\cos \theta_{\alpha'})] \end{aligned}$$

主要的核天体过程



Thick-target method for resonance parameters

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

experimental info needed

- partial widths Γ_i
- spin J
- energy E_R

Using $A(p,p)A$ with $E_p = E_2 - E_1$ to map the resonances of $B = A + p$

$$\frac{dN_p}{dE} = \int N_{beam} \frac{dN_{target}}{dE} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad \longrightarrow \quad \frac{d\sigma}{d\Omega}$$

基金资助

- 面上项目： ^{17}F 次级束引起的质子弹性共振散射实验研究，2009.1-2011.12，47万。
- 面上项目：利用次级束共振散射反应研究 ^{23}Mg 和 ^{26}Si 的共振态，2006.1-2008.12，38万。
- 科学部主任基金：利用厚靶方法测量核天体物理 $^7\text{Be}(\alpha, \gamma)^{11}\text{C}$ 反应的激发函数，2005.1-2005.12, 10万。

质子的能量分辨

