

$^{23}\text{Na}+p$ 逆运动学厚靶实验方法研究 碳碳熔合反应

第三届“粤港澳”核物理会议

报告人：南威克

合作导师：柳卫平

报告日期：2024年11月17日

核天体物理

核天体物理:

核天体物理学是核物理学与天体物理学的交叉学科，旨在理解宇宙中元素是如何产生，以及恒星在其生命周期中的演化过程。

其中，对元素核合成进程起主导作用，在关键的天体物理场所起重要作用，目前仍未进行准确测量、机制尚未清楚的若干核反应已成为核天体物理研究的热点问题，比如 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)$ ， $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ ， $^{59}\text{Fe}(\text{n}, \gamma)$ 等

恒星内部带电粒子聚变或者粒子俘获反应：产生从碳到铁的各种元素

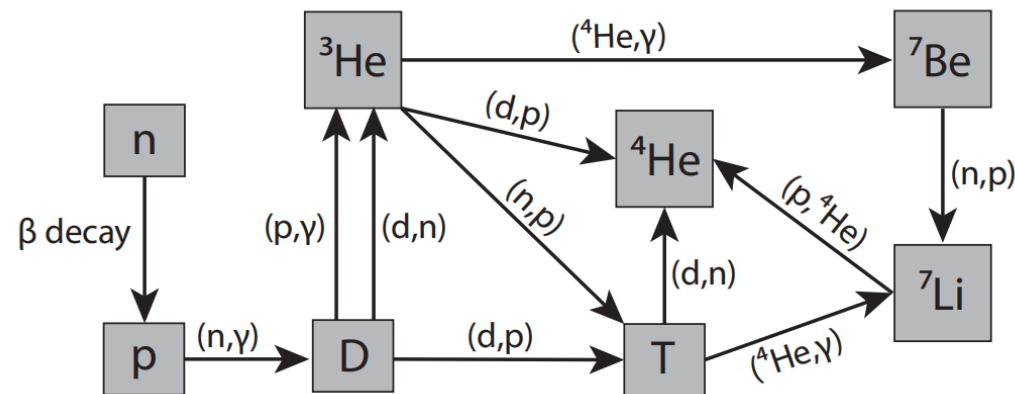
氢燃烧：pp链、碳氮氧循环

氦燃烧： 3α 过程、 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$

碳燃烧： $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \text{p})^{23}\text{Na}$ 、 $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, \alpha)^{20}\text{Ne}$

氖、氧、硅燃烧

大爆炸核合成：产生 $A < 8$ 的核素



比铁重的元素核合成

s - 过程 (AGB星氦壳间层)

r - 过程 (核心塌缩型超新星、中子星并合)

p - 过程：在重核上发生光核反应、质子俘获反应 (超新星等)

rp - 过程 (吸积型中子星)：俘获反应>光致裂解



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应的研究意义

碳碳熔合反应相关的天体场所：

1、大质量恒星晚期

平稳燃烧和爆发性燃烧过程中， $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应是恒星演化和最终核合成的主要反应之一。

关键量：反应速率、出射道分支比

相关能区：1.7 - 4.5 MeV

2、Ia 型超新星的点火反应

Ia 型超新星被用作标准烛光来确定宇宙膨胀，在现代宇宙学中起重要作用。普遍认为生成于白矮星爆炸。

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应速率的提升会导致点火温度下降，影响着WD超新星爆发的最终产物(中子星或者Ia型超新星)。

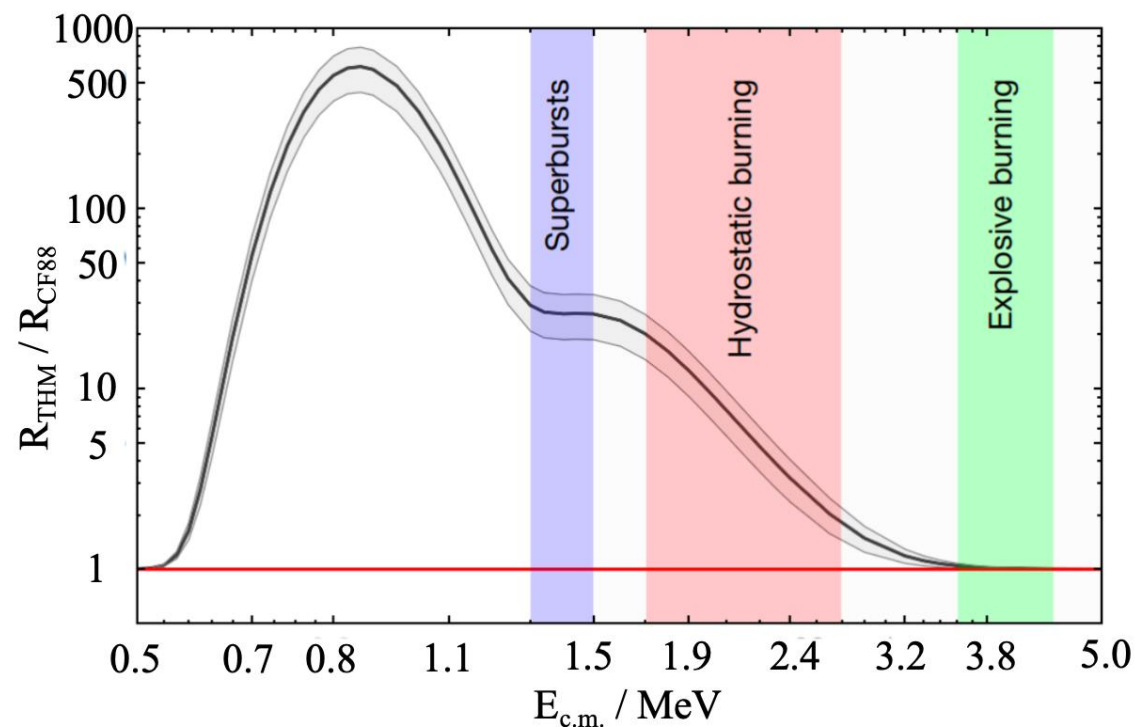
Tumino A. et al. Nature(2018)557, 687-690

3、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应是超级暴的点火反应

超级暴的定义：伽莫夫能区：1.2-1.8 MeV

在中子星表面，持续几小时到一天的X射线暴被称为“超级暴”(Superbursts)。

4U 1608-522的超爆发生深度理论上不会导致超爆点燃！



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech

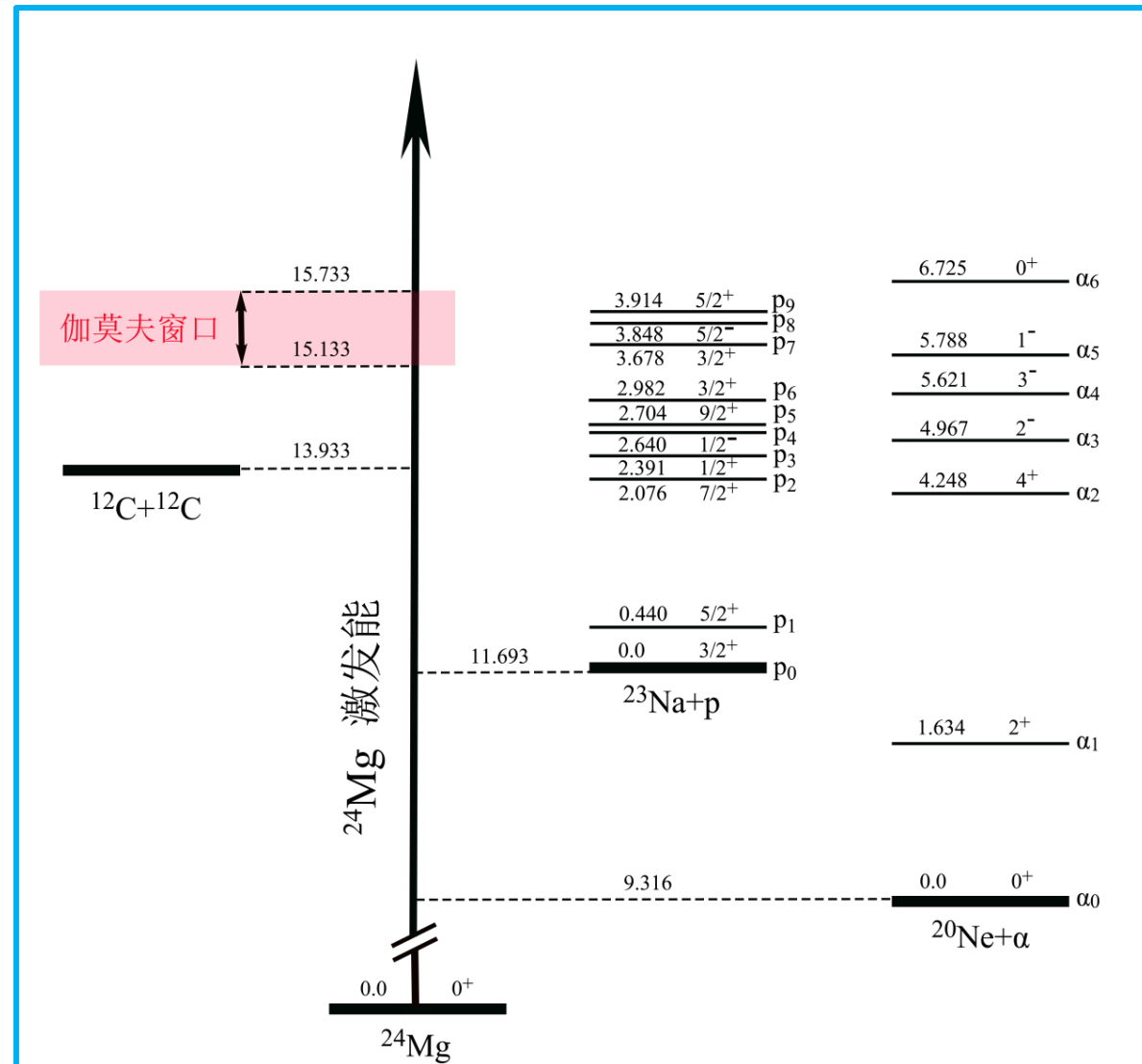


南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应天体物理S*因子研究现状

近六十年来的碳碳熔合反应直接测量工作

测量方法	参考文献	能量范围 (MeV)
带电粒子	Parterson (1969) ^[10]	3.23 - 8.75
带电粒子	Mazarakis (1973) ^[7]	2.45 - 5
带电粒子	Becker (1981) ^[11]	2.8 - 6.3
带电粒子	Zickfoose (2018) ^[12]	2.00 - 4.00
γ 谱学	High (1977) ^[6]	2.46 - 5.88
γ 谱学	Kettner (1977) ^[17]	2.5 - 6.2
γ 谱学	Rrb (1980) ^[18]	5.6 - 10
γ 谱学	Dasmahapatra (1982) ^[19]	4.5 - 6.0
γ 谱学	Aguilera (2006) ^[13]	4.42 - 6.48
γ 谱学	Palos (2006) ^[14]	2.25 - 6.01
γ 谱学	Spillane (2007) ^[8]	2.10 - 4.75
带电粒子- γ 谱学符合	Jiang (2018) ^[15]	3.5 - 4.0
带电粒子- γ 谱学符合	Fruet (2020) ^[9]	2.1 - 5.5
带电粒子- γ 谱学符合	Tan (2020) ^[16]	2.2 - 5.5



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech



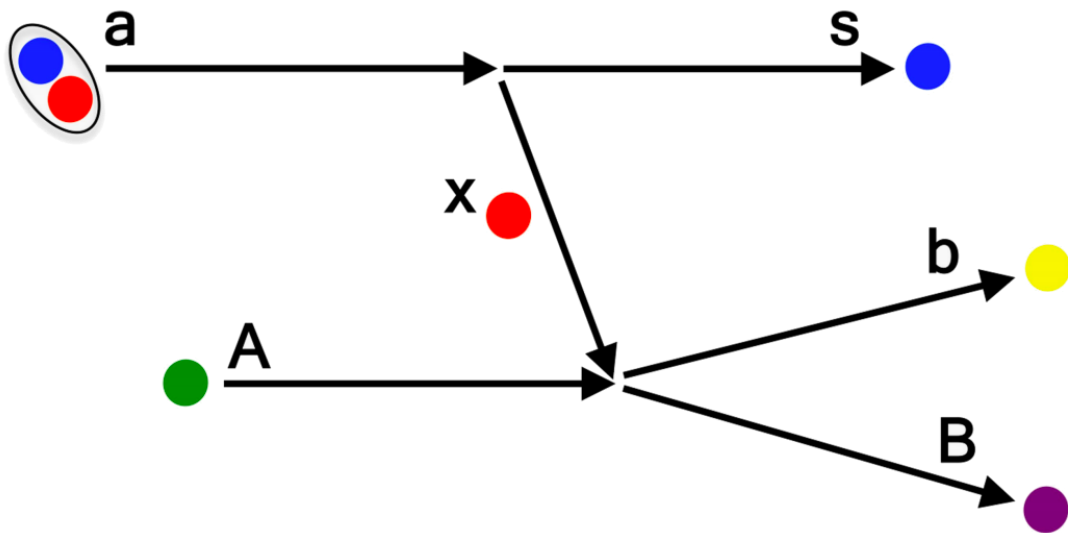
南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应的研究现状: THM 方法

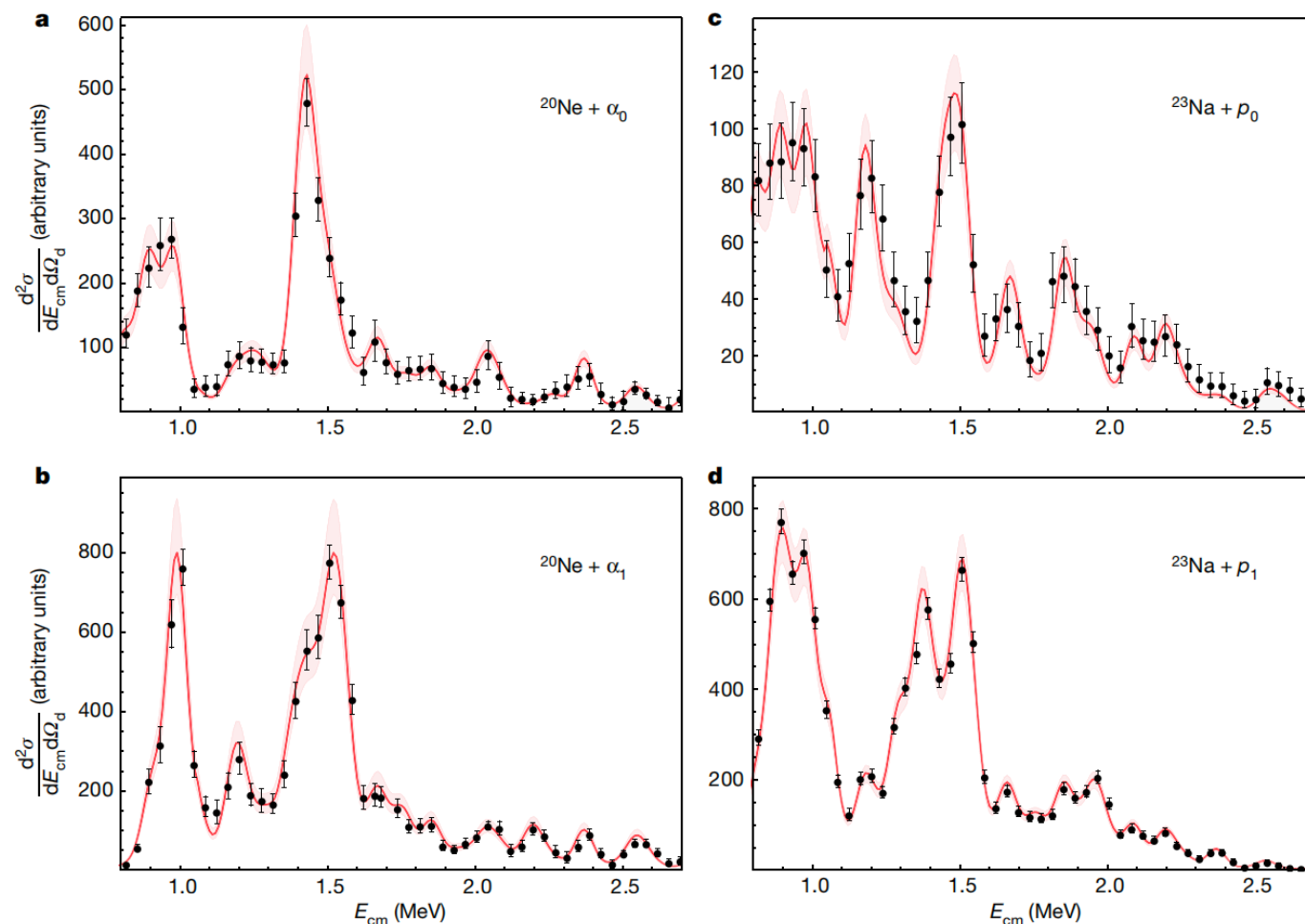
Tumino2018:

采用 $^{12}\text{C}(^{14}\text{N}, \alpha^{20}\text{Ne})^2\text{H}$ 与 $^{12}\text{C}(^{14}\text{N}, \text{p}^{23}\text{Na})^2\text{H}$, 对0.8到2.7 MeV范围内的 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应四个出射道 $p_0, p_1, \alpha_0, \alpha_1$ 进行测量。动能量守恒给出对应碳碳熔合反应的质心系能量。

A(a, bB)s反应中的准自由机制示意图



出射道激发函数



Tumino A. et al. Nature(2018)557, 687-690



南方科技大学

物理系

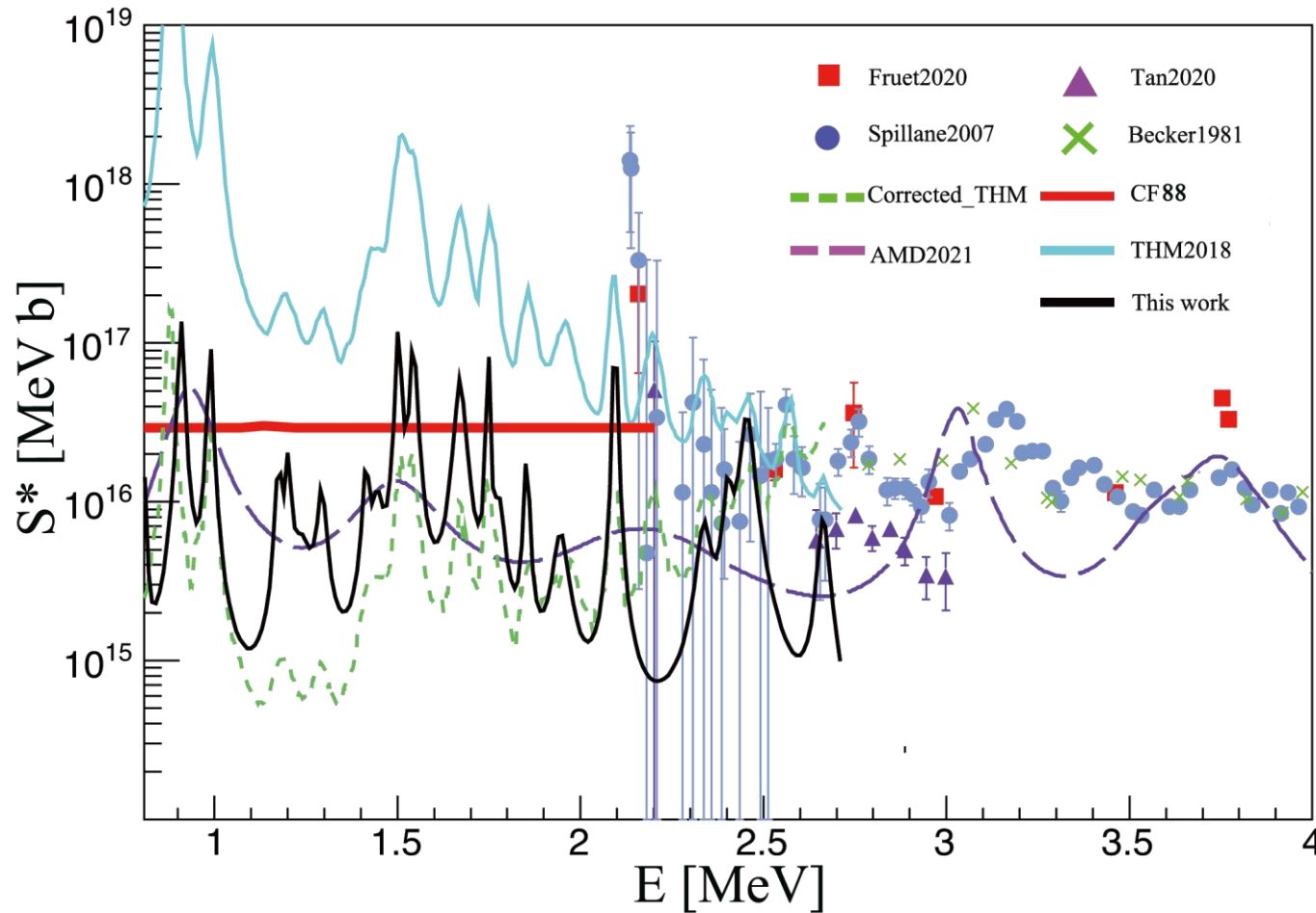
Department of Physics
SUSTech



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应天体物理S*因子研究现状

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应的天体物理S*因子



单个共振反应截面的Breit-Wigner公式:

$$\sigma(E) = \frac{\pi \hbar^2 (2J + 1)}{\mu E} \frac{\Gamma_{in} \Gamma_{out}}{(E - E_R)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$

$$S^*(E) = E \sigma(E) \exp(2\pi\eta + 0.46 \text{ MeV}^{-1} E)$$

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应天体物理S*因子计算

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 全同玻色子体系只能布居到 $0^+, 2^+, 4^+$ 等 ^{24}Mg 复合核共振能级。在 2.45 MeV 直接测量数据点归一，结合 THM2018 给出的出射道参数计算 S* 因子。



南方科技大学

物理系

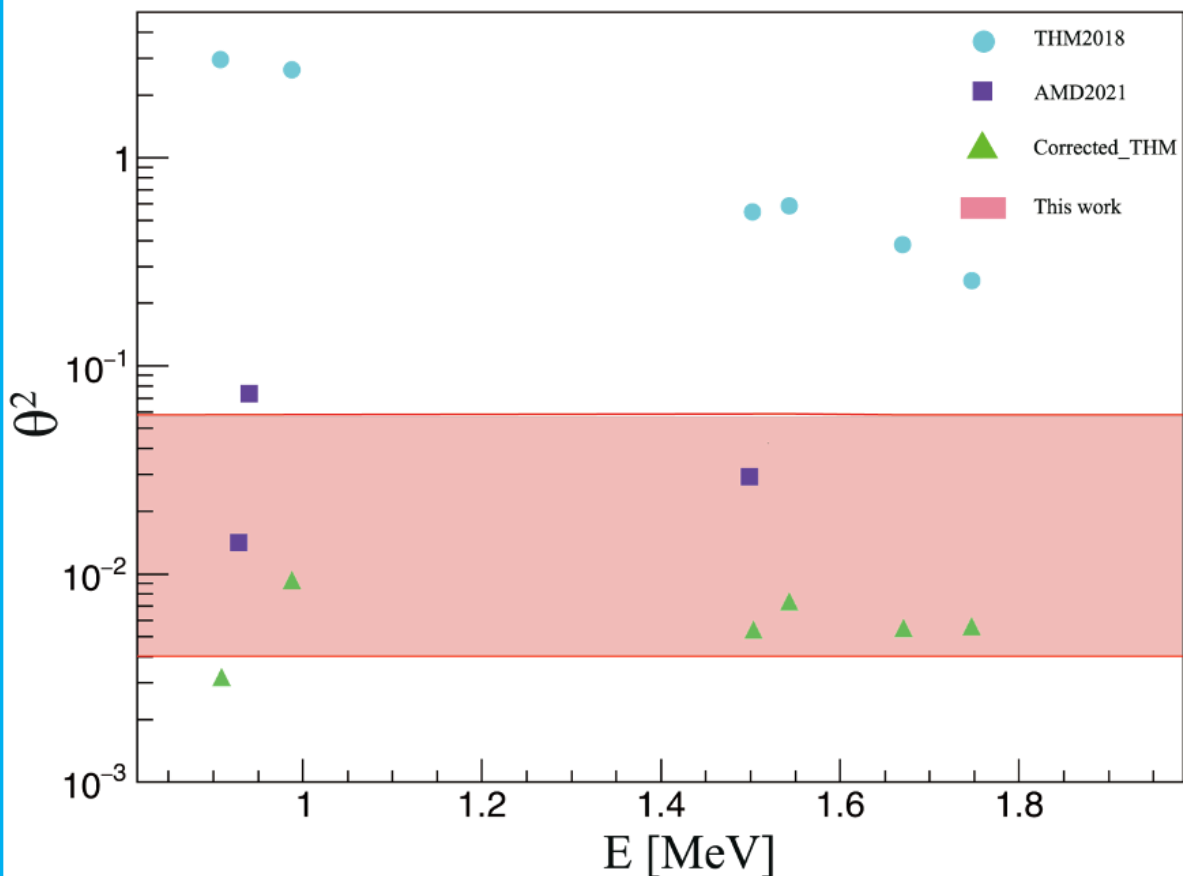
Department of Physics
SUSTech



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应天体物理 S^* 因子研究现状

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应入射道无量纲约化宽度



入射道无量纲约化宽度计算结果

在2.45 MeV处归一得到的入射道无量纲约化宽度，与反对称分子动力学模型(AMD)给出的理论计算结果十分接近。

Y. Taniguchi, M. Kimura. $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ fusion S-factor from a full-microscopic nuclear model. Phys. Lett. B, 2021, 823, 136790.

W. K. Nan, et al., Nucl. Phys. Rev., accepted, 2024.

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应天体物理 S^* 因子的研究现状

南威克¹, 王友宝^{1,†}, 谌阳平¹, 李云居¹, 郭冰¹, 柳卫平^{1,2,†}

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;
南方科技大学物理系, 深圳 518055)



南方科技大学

物理系

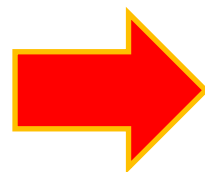
Department of Physics
SUSTech



$^{23}\text{Na}+p$ 厚靶研究方法

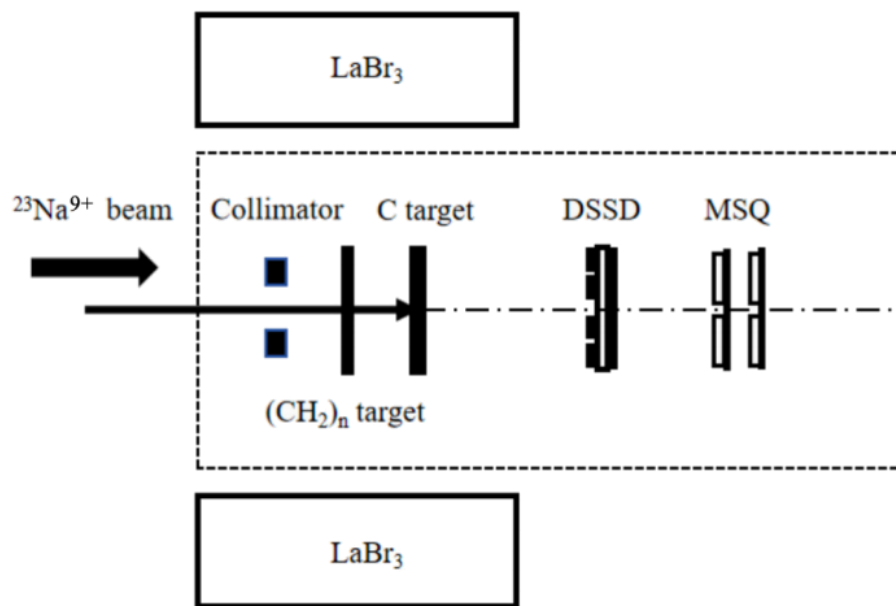
入射道约化宽度的推荐值

通过 $^{23}\text{Na}+p$ 厚靶实验布居 $^{24}\text{Mg}^*$ ，并得到出射道激发函数，继而给出共振参数的出射道信息

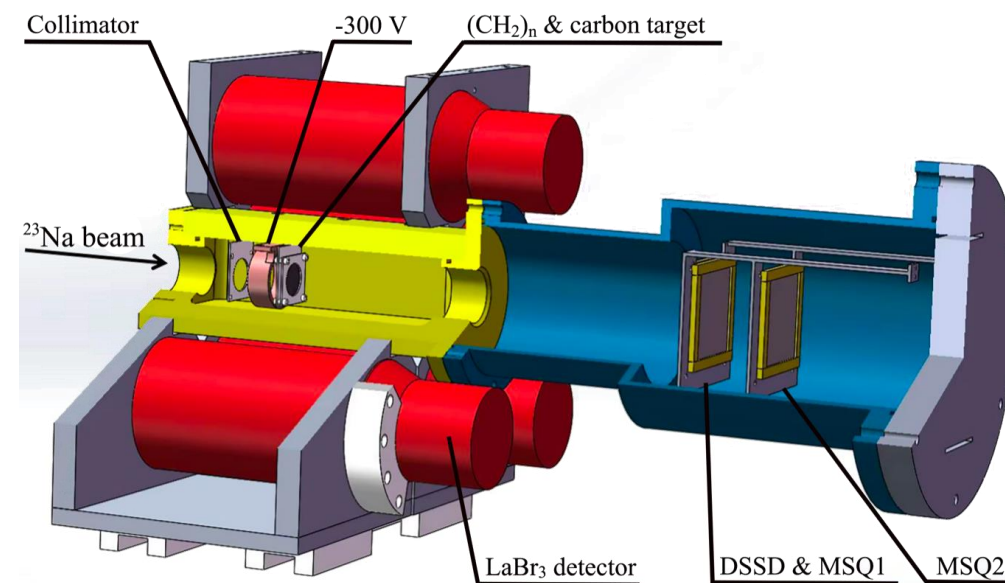


碳碳熔合反应 S 因子：入射道 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 约化宽度 + 对应能区出射道分支比和共振参数

实验设置示意图



实验设置效果图



南方科技大学

物理系

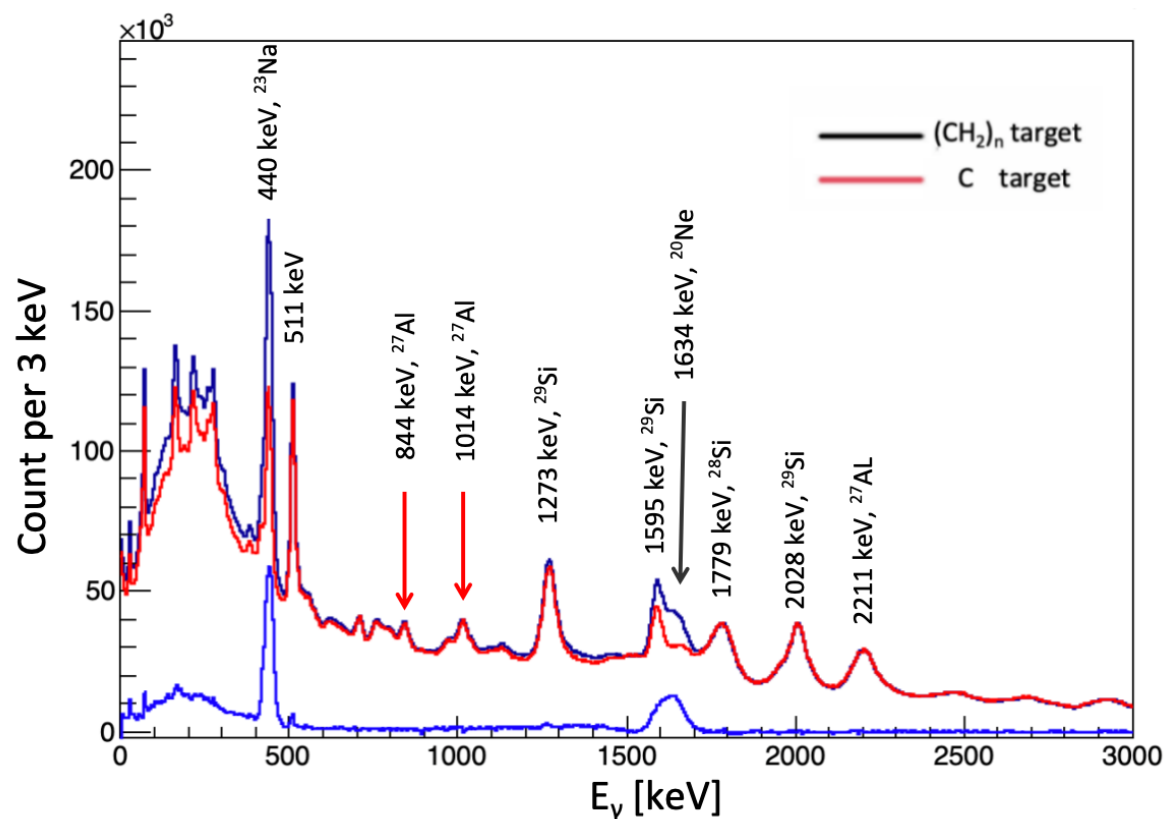
Department of Physics
SUSTech



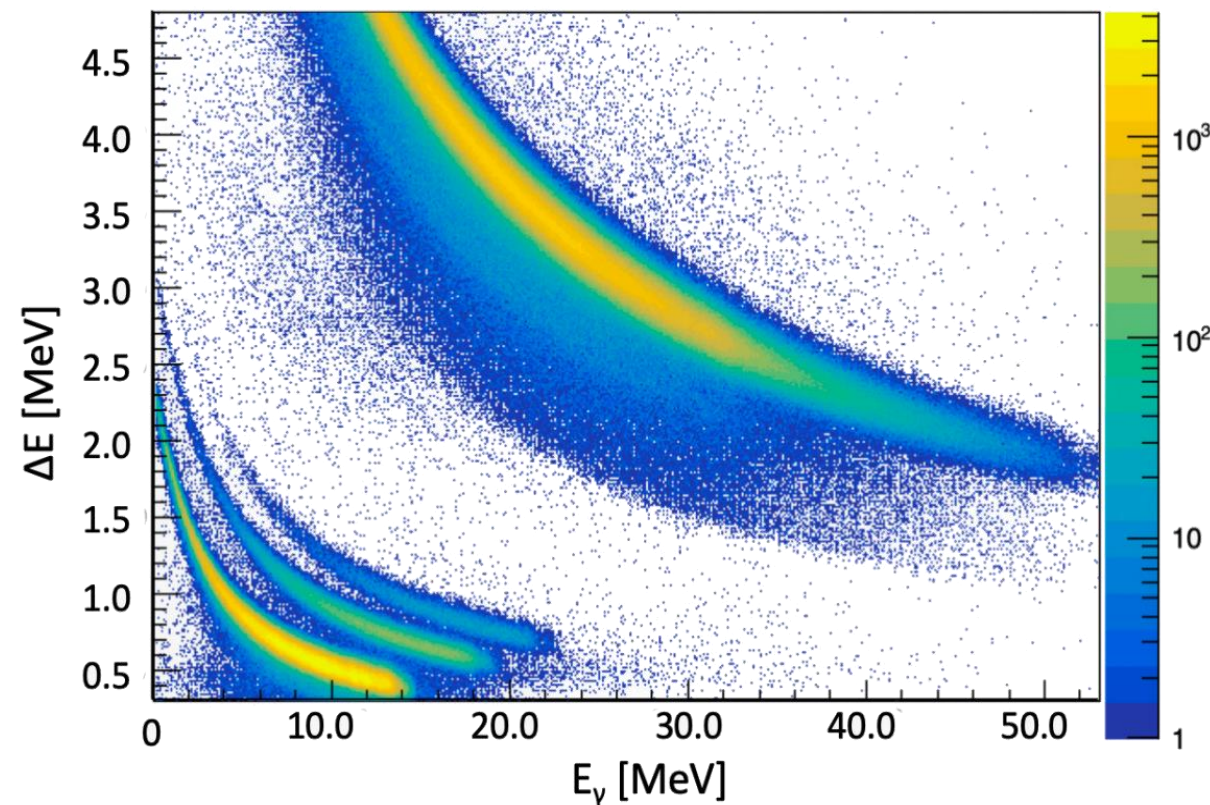
南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

$^{23}\text{Na}+p$ 厚靶实验测量结果

γ 射线单谱



ΔE - E 二维粒子鉴别谱



γ 射线单谱可知特征 γ 线只有 440 keV (^{23}Na 第一激发态)和 1634 keV (^{20}Ne 第一激发态)。即该能区内 $^{24}\text{Mg}^*$ 出射道主要为 $p_0, p_1, \alpha_0, \alpha_1$ 。



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech



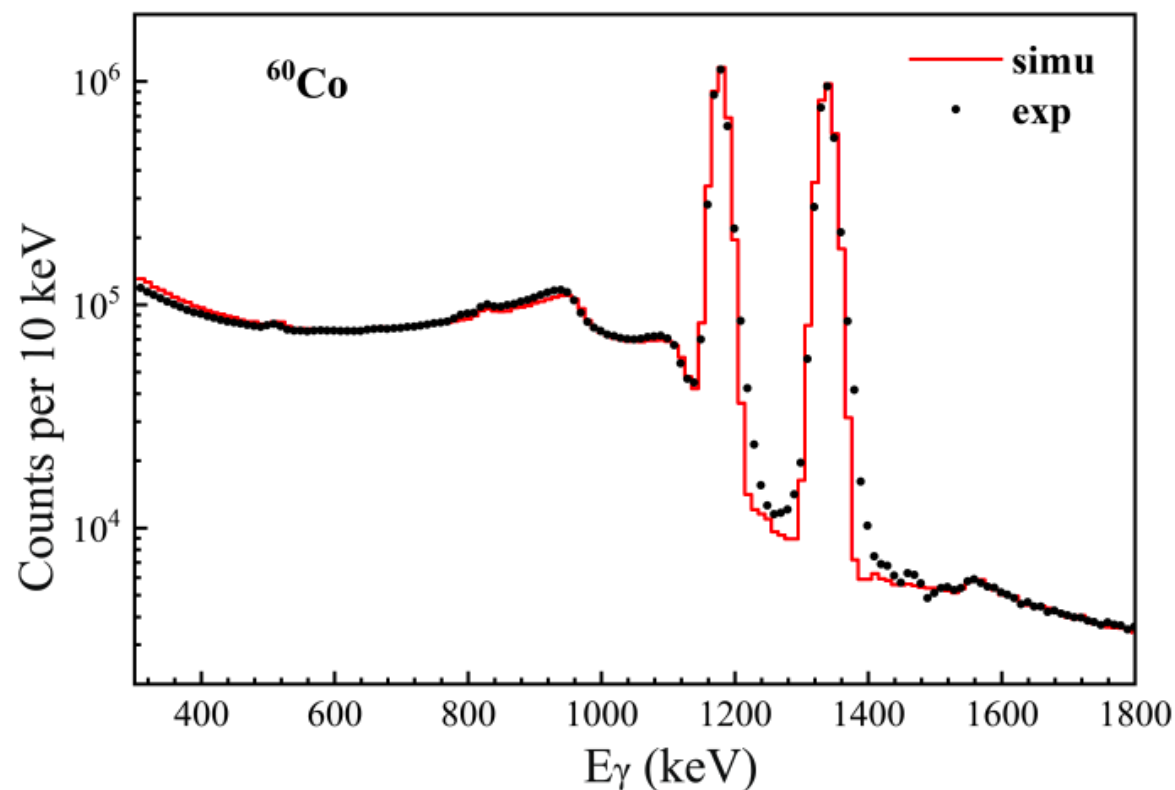
南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

LaBr₃ 探测器全能峰效率模拟

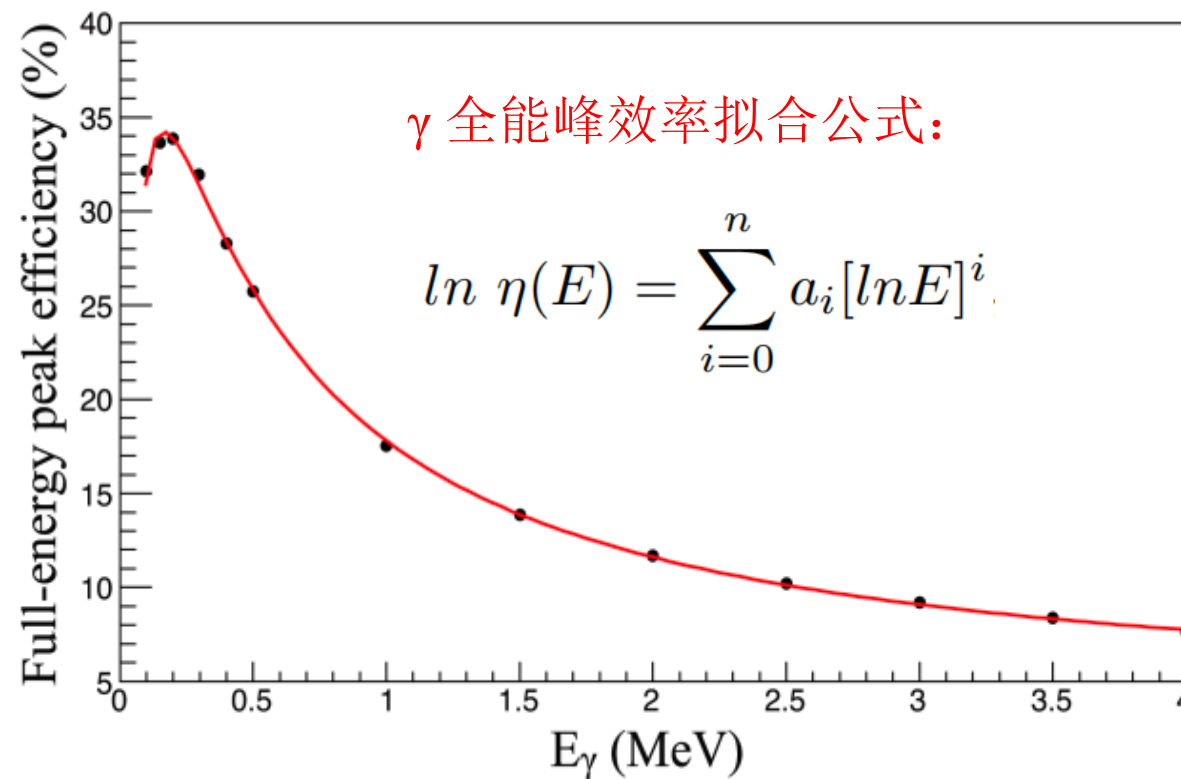
出射道特征 γ 峰探测效率

440 keV γ 峰效率: 28.2 %; 1634 keV γ 峰效率: 12.6 %

^{60}Co γ 源能谱及 Geant4 模拟结果



LaBr₃阵列效率曲线



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

$^{23}\text{Na}+p$ 厚靶实验：实验技术概要

γ -带电粒子符合测量技术

1、能量符合

特 γ 征线440 keV, 1634 keV。得到剩余核激发态的反应出射带电粒子。

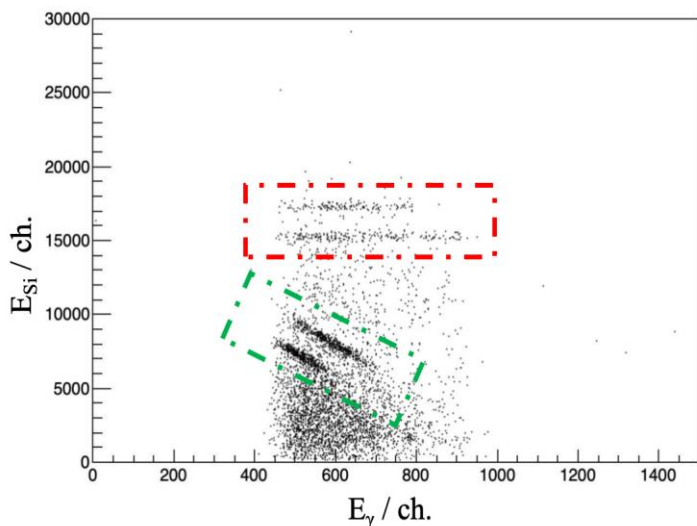
2、时间符合

减少偶然符合计数。

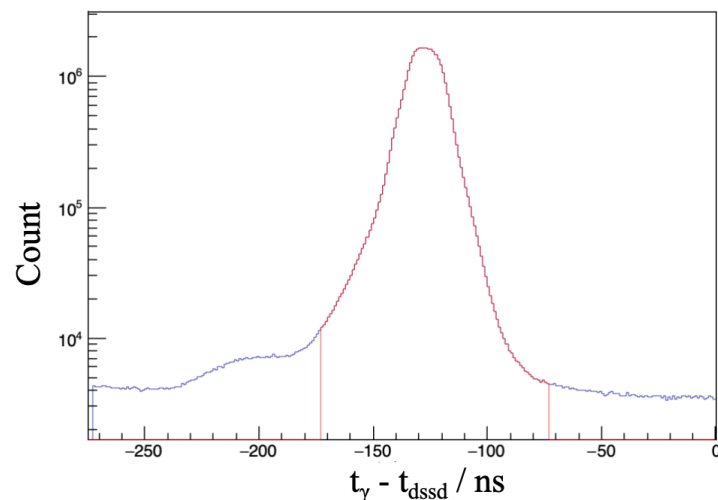
DSSD能量正反面符合

去除弥漫整个二维谱的源于偶然符合的事件，对于反应出射带电粒子，DSSD上能量响应在正反面应当相同。

LaBr₃与硅时间符合测试



效应轮LaBr₃与硅时间符合



MSQ能量反符合

对于实验采用的DSSD + MSQ1 + MSQ2的测量系统。感兴趣区的复合核 ^{24}Mg 出射的带电粒子完全沉积在MSQ1中。MSQ2能量反符合去除 $^{23}\text{Na}+^{12}\text{C}$ 融合蒸发发射的高能带电粒子。



南方科技大学

物理系

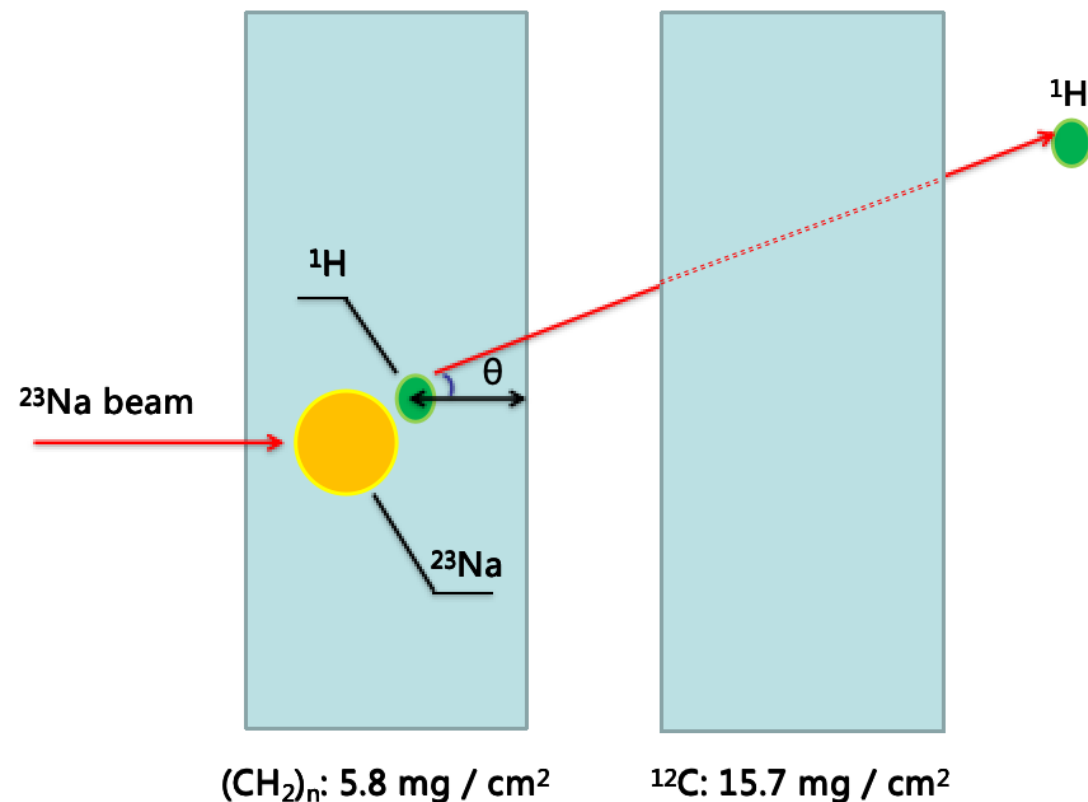
Department of Physics
SUSTech



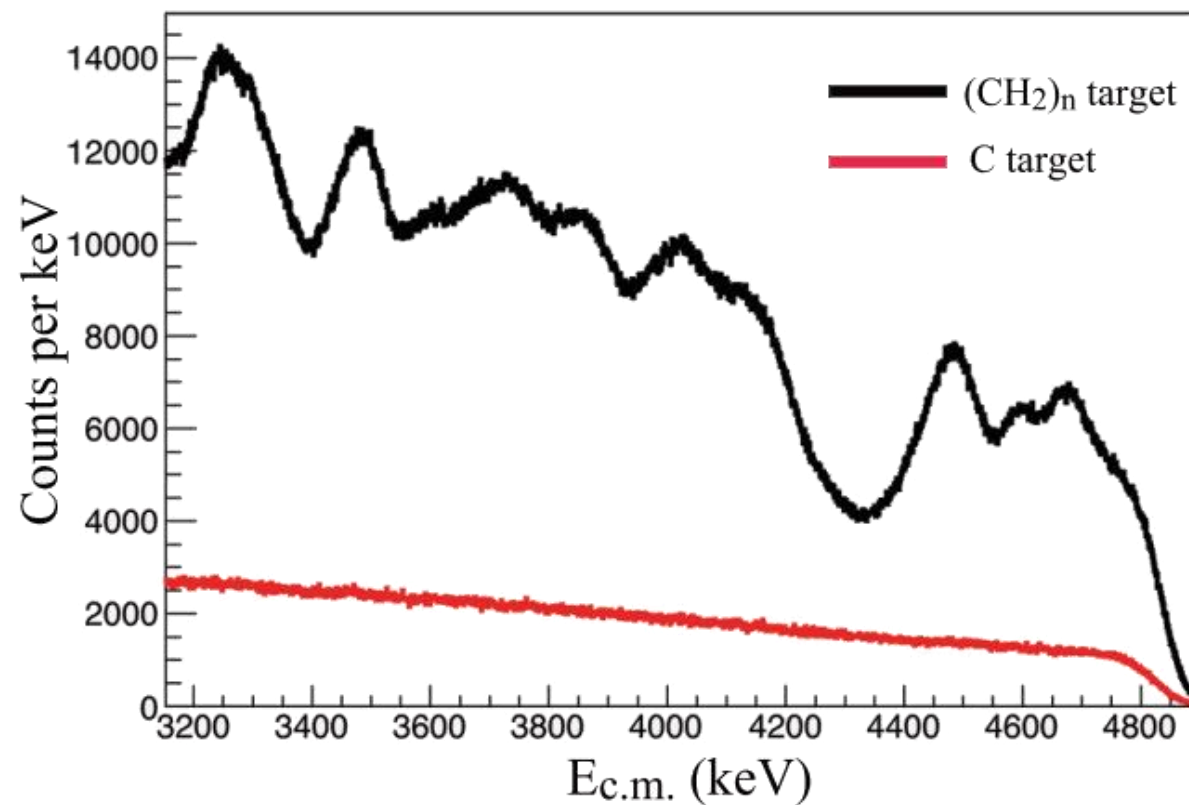
南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

$^{23}\text{Na}+p$ 厚靶实验方法

厚靶反应示意图



碳靶与 $(\text{CH}_2)_n$ 靶的 p_0 道能谱



$E_{si} - E_{c.m.}$ 运动学重构 + ^{12}C 粒子数修正



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech

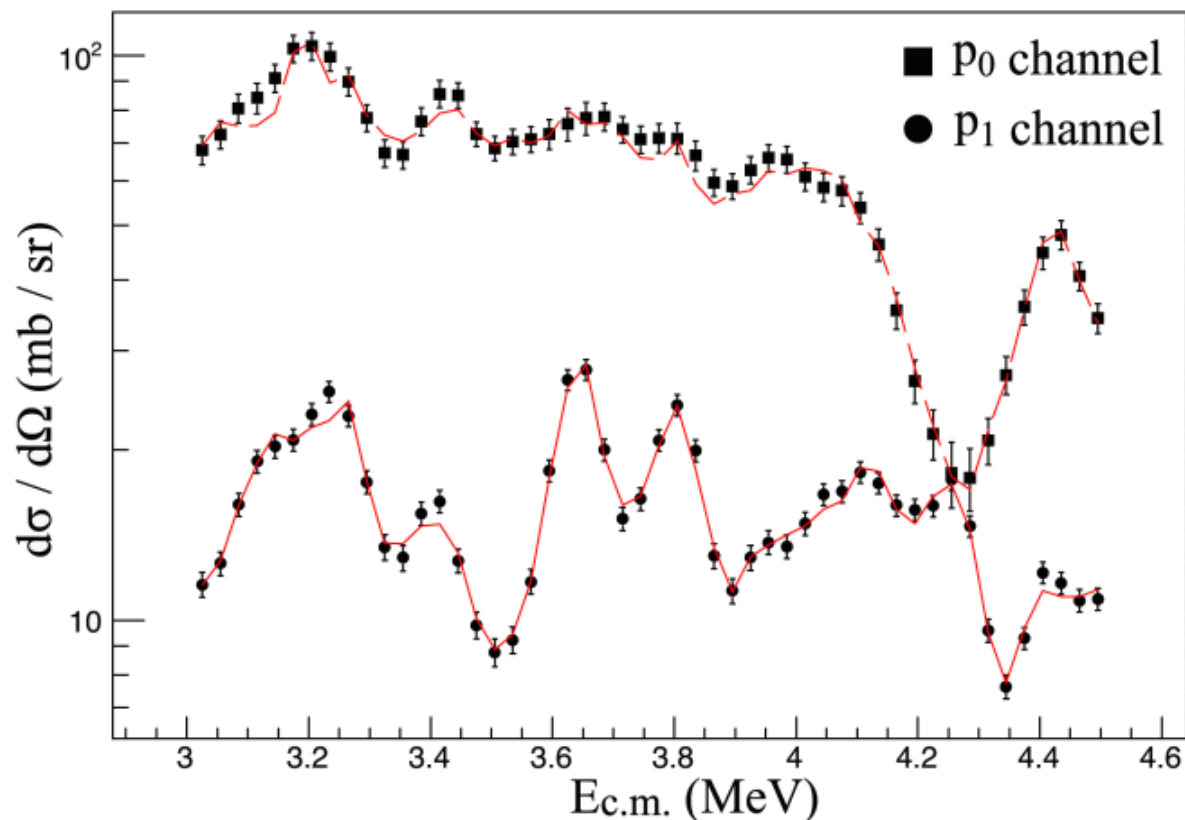
12



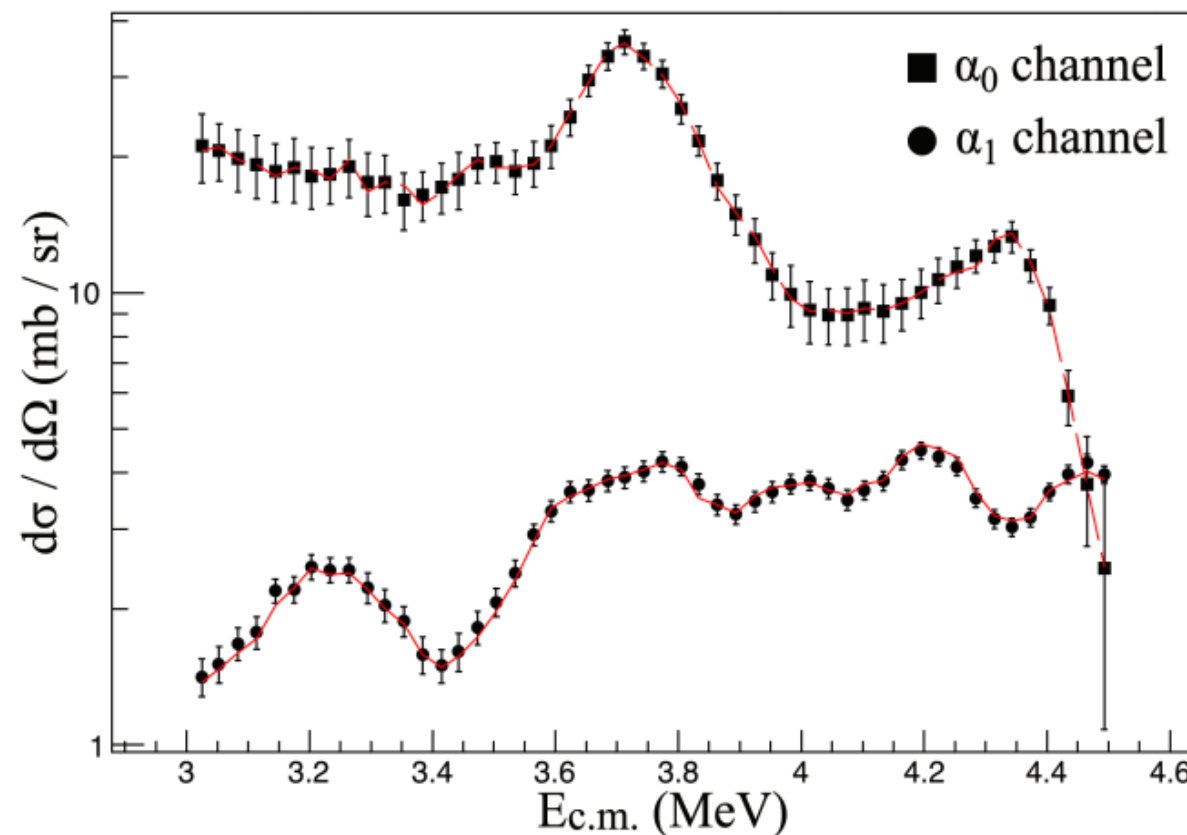
南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

$^{23}\text{Na}+p$ 各出射道激发函数

$^{23}\text{Na}+p$ 反应质子出射道激发函数



$^{23}\text{Na}+p$ 反应 α 出射道激发函数



W. K. Nan, et al., Nucl. Sci. Tech., 35, 208 (2024).



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech

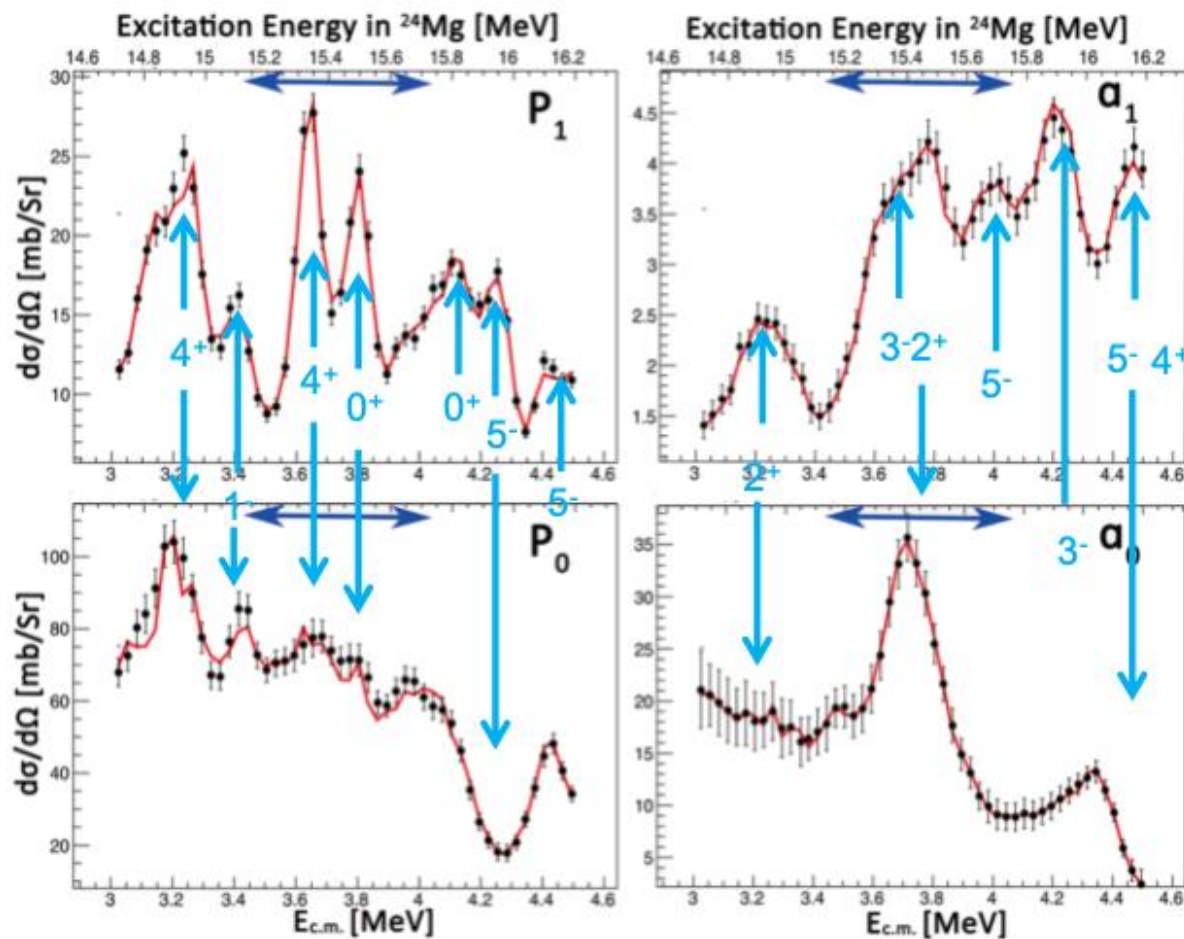
13



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

基于 $^{23}\text{Na}+p$ 出射道激发函数的R矩阵分析

$^{23}\text{Na}+p$ 厚靶实验出射道R矩阵拟合



激发函数各峰值主要共振结合
R-矩阵拟合结果在左图标出

$^{23}\text{Na}+p$ 作为入射道会引入共振的 ^{24}Mg 共振态，需要提取其中的 0^+ , 2^+ 共振态



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech

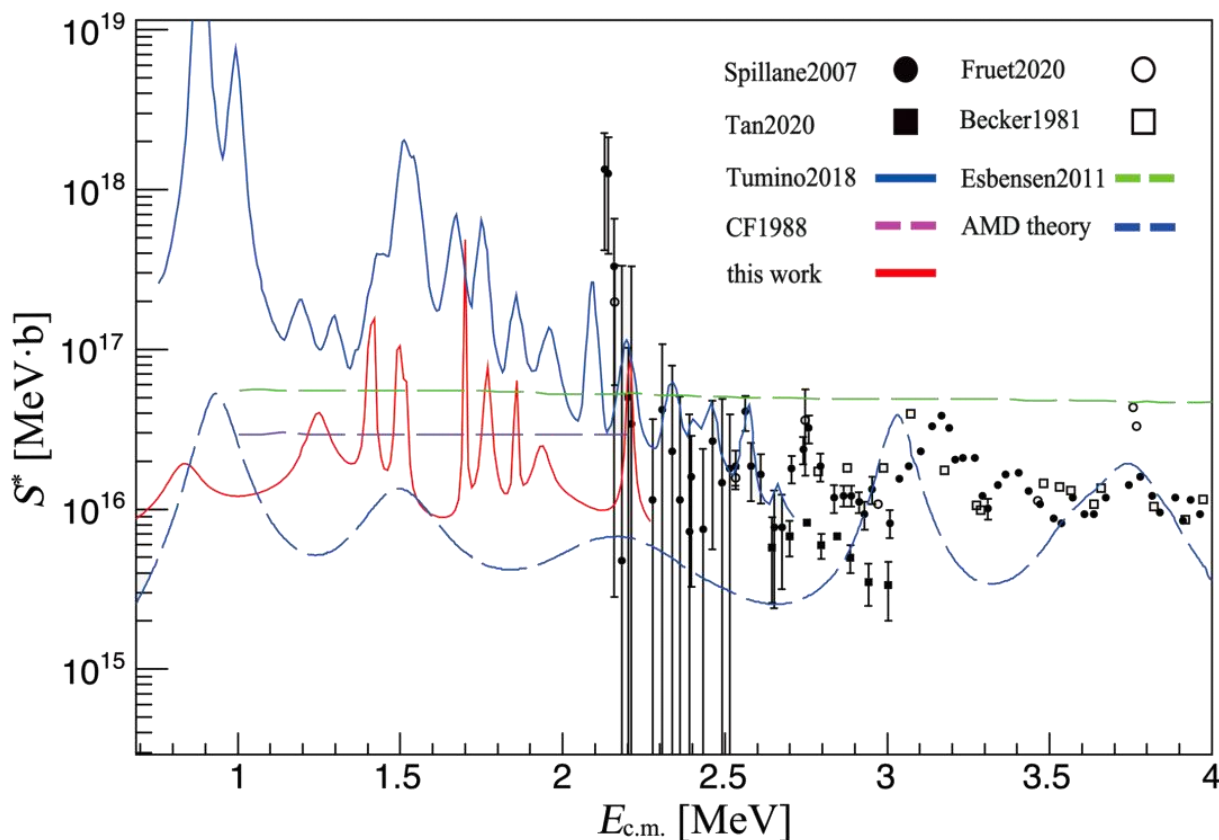
14



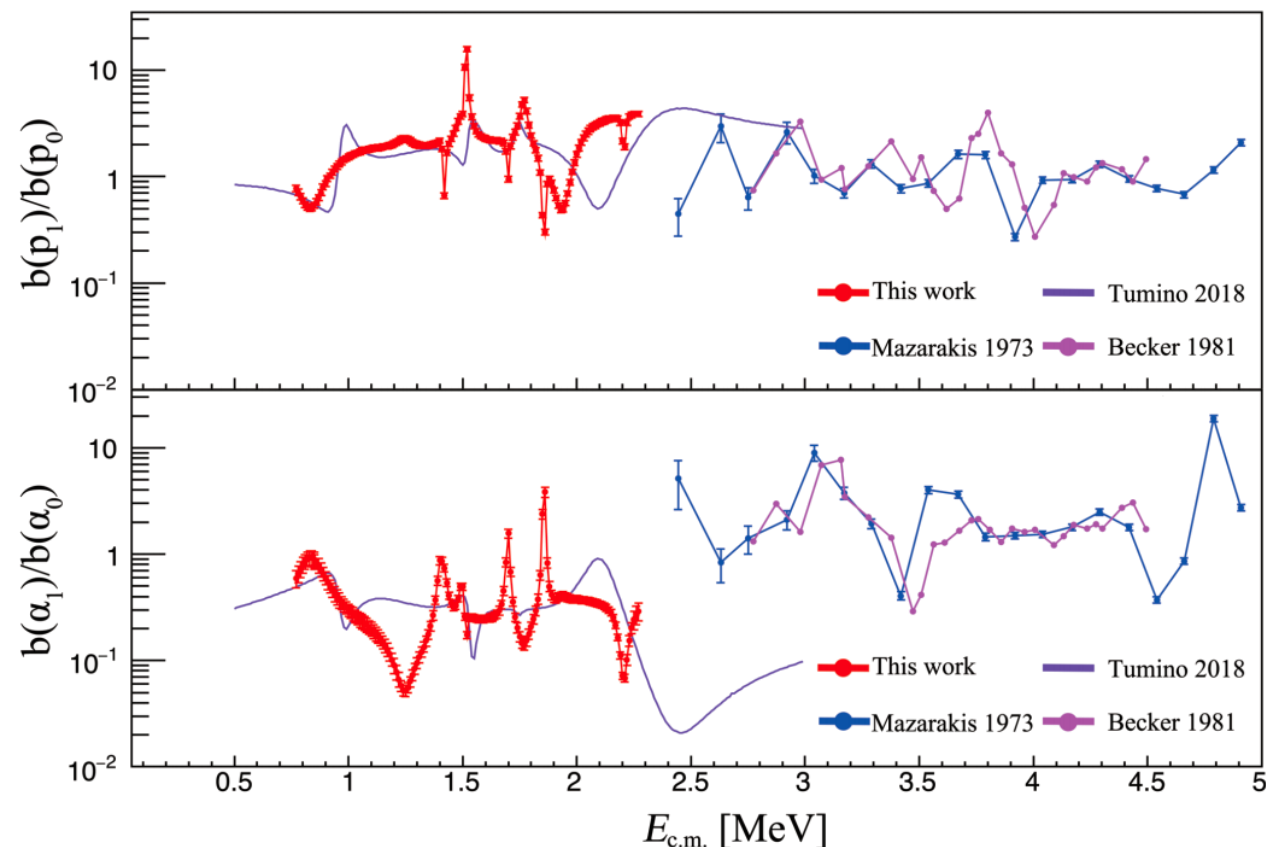
南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

碳碳融合反应的s因子与分支比计算

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 融合反应 S^* 因子



$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 融合反应出射道分支比



W. K. Nan, et al., Phys. Lett. B, submitted (2024).



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech

15



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

总结与展望

总结：

极低亚库仑势垒能区， $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反应熔合截面随反应能下降而急剧减小，这使得直接测量难以向低能测量点推进。从THM数据出发，使用直接测量数据进行归一，给出超级爆相关能区内 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 的无量纲约化宽度为0.031。

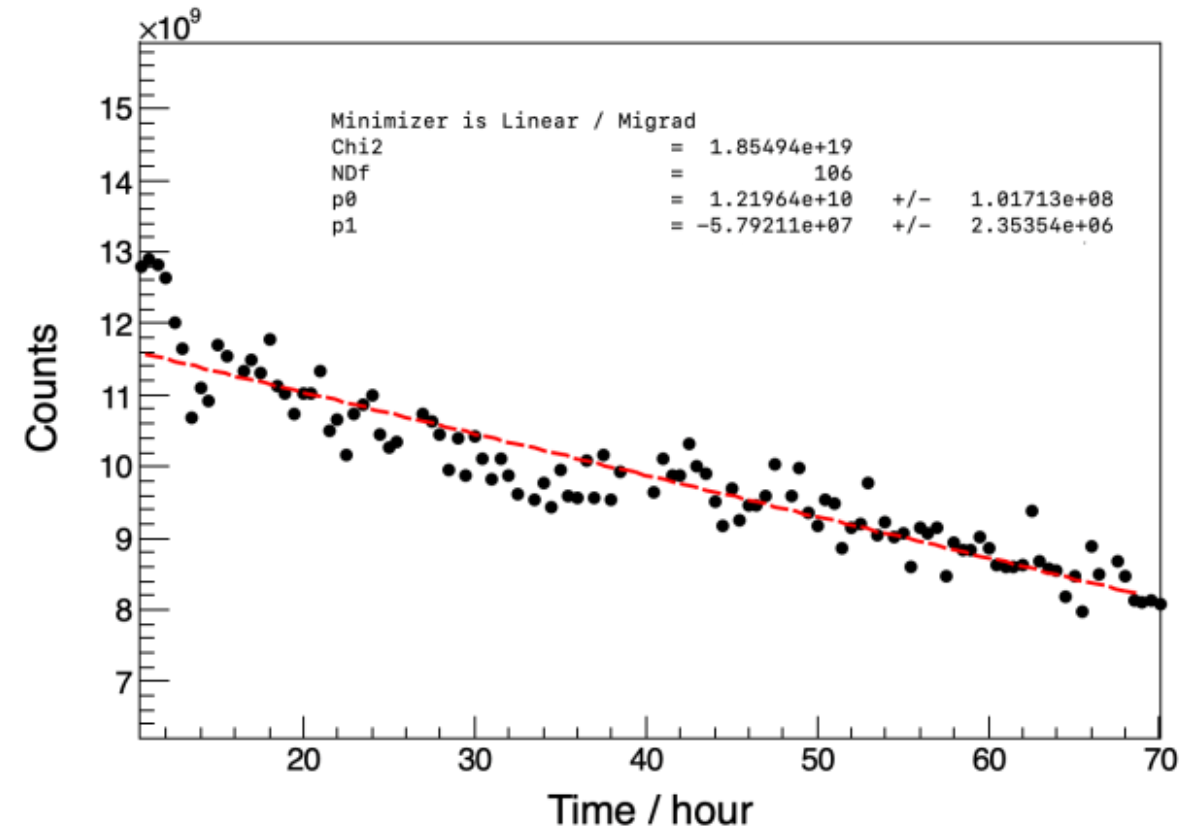
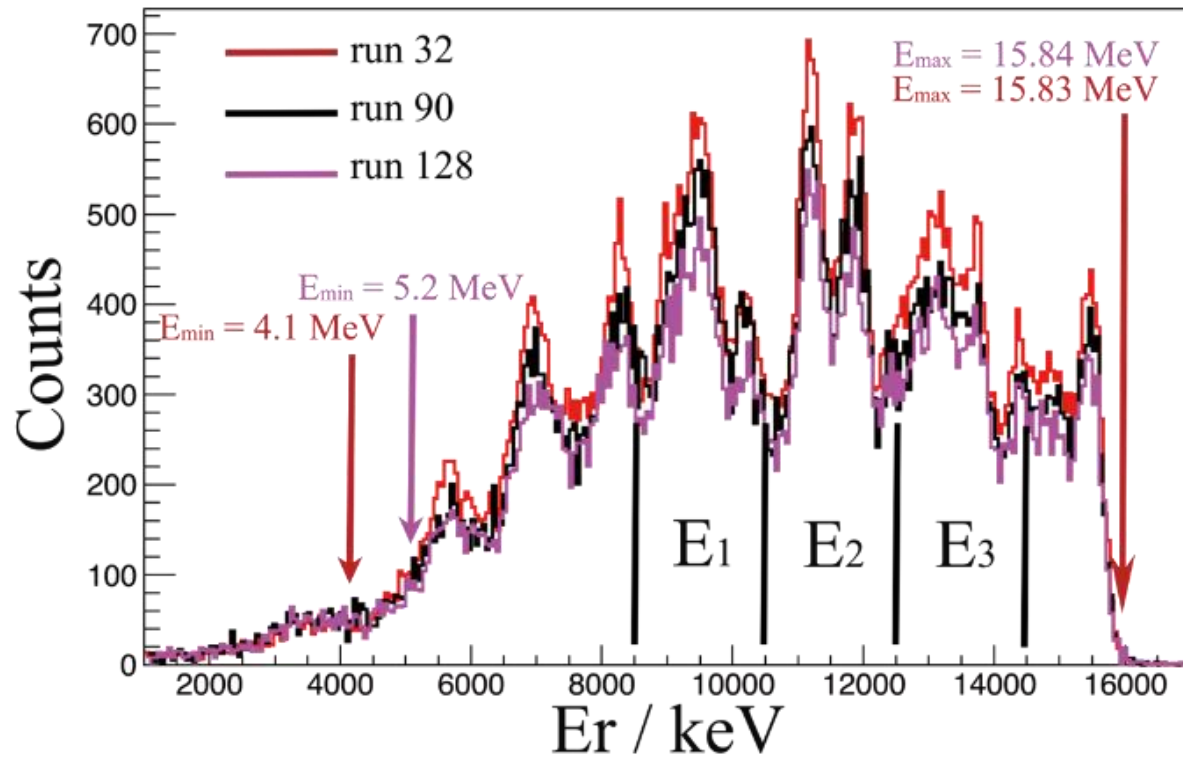
$^{23}\text{Na}+p$ 厚靶散射实验研究首次以 $^{23}\text{Na}+p$ 作为入射道，同时给出质子和 α 道的激发函数，为对应天体感性趣能区 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应研究提供独立的实验数据，为未来实验/理论上评估 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应在相关能区的性质提供重要参考。

展望：

$^{20}\text{Ne} + \alpha$ 作为入射道的 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 熔合反应研究



back up: 靶材料损失修正



南方科技大学

物理系

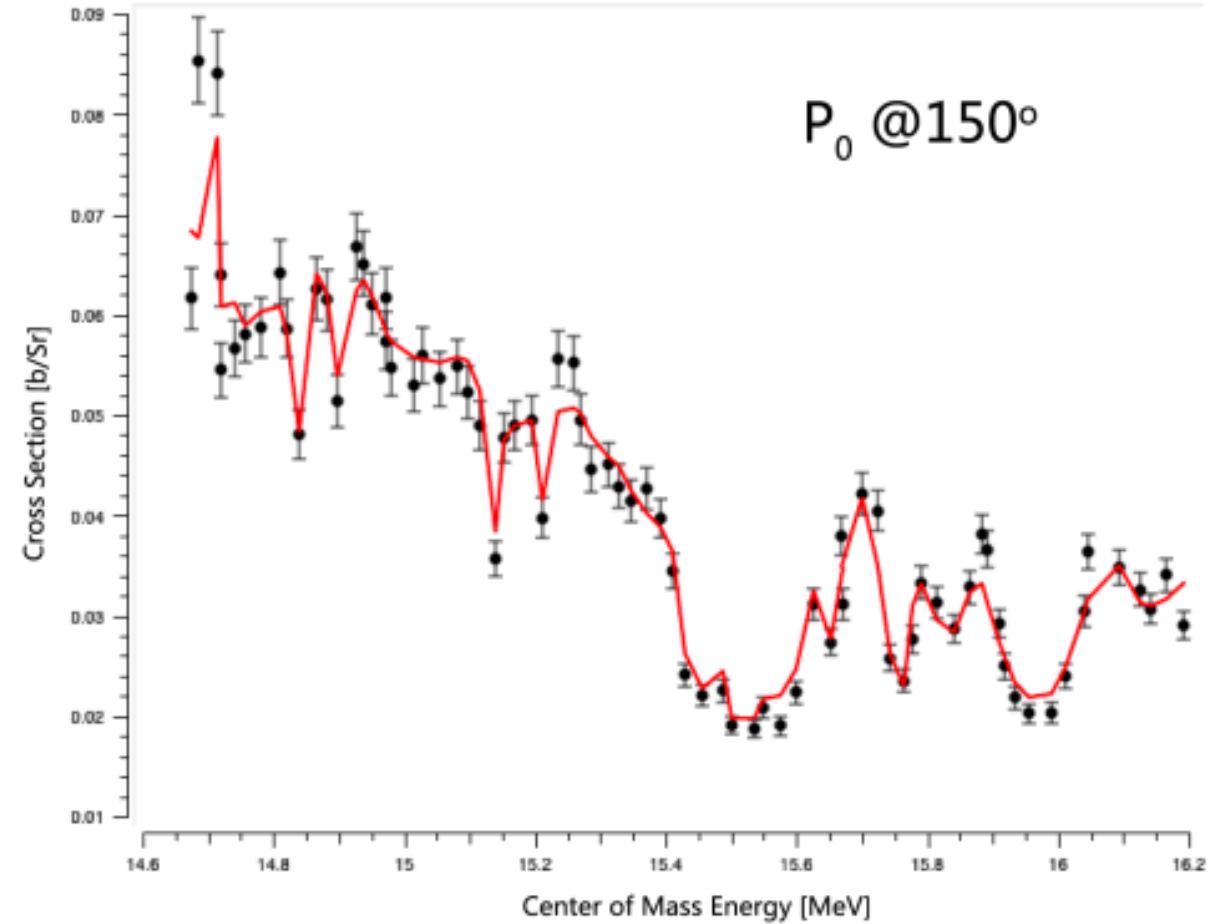
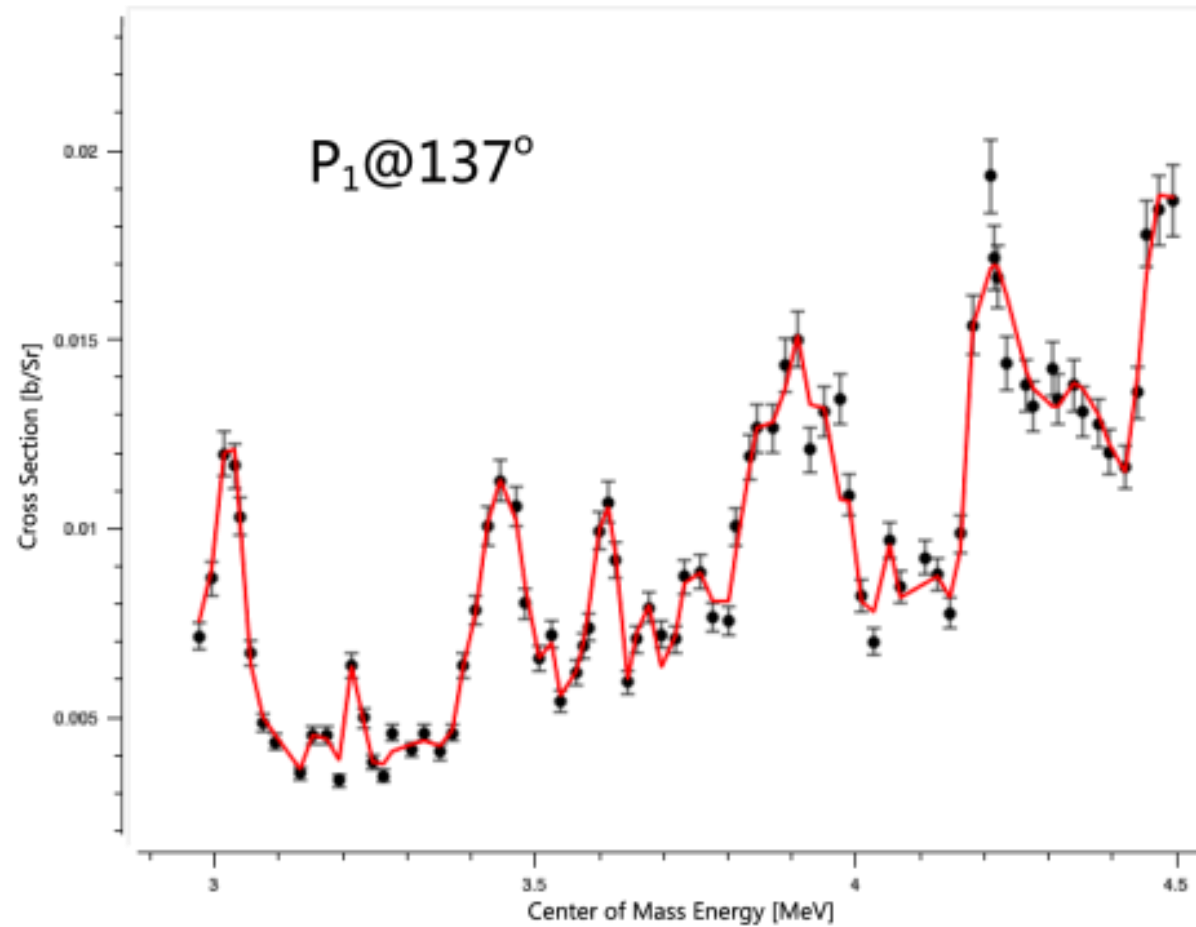
Department of Physics
SUSTech

17



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

back up: R-矩阵分析



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech

18



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

全同粒子体系的自旋

对于两个全同粒子构成的系统，可以证明，波函数 $|i, j\rangle$ 满足

$$\hat{P}_{ij} |i, j\rangle = (-1)^{L+S-2s} |i, j\rangle,$$

其中 s 为粒子的自旋， L 为系统的轨道角动量， S 为系统的总自旋。玻色子的自旋 s 为整数，有 $(-1)^{2s} = +1$ ；费米子的自旋 s 为半整数，有 $(-1)^{2s} = -1$ 。因此 $L + S$ 必定为偶数。

P为空间反射变换

碳碳熔合反应宇称守恒， L 为偶数



$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 体系的 ^{24}Mg 自旋宇称为 0^+ , 2^+ , 4^+ ...



back up: ^{24}Mg 共振

R矩阵拟合中碳碳融合相关共振参数

E_x (MeV)	J^π	Γ_{tot} (keV)	$\Gamma_{\alpha 0}$ (keV)	$\Gamma_{\alpha 1}$ (keV)	Γ_{p0} (keV)	Γ_{p1} (keV)
14.7160	2+	952	444.6	1.38	57.8	448
14.7638	0+	64.7	1.02	2.05	60.8	0.78
14.8766	2+	4207	4100	104	1.42	1.34
15.1221	2+	623	454	155	5.86	8.62
15.1799	2+	6.39	5.67	0.106	0.001	0.617
15.2375	2+	20.5	6.17	3.75	7.79	2.78
15.2544	2+	1197	400.7	340	151	305
15.3291	2+	1567	384	150	432	601
15.3561	2+	158	65.4	84.7	1.15	7.05
15.4280	2+	4.64	1.06	0.96	0.45	2.17
15.4759	0+	1673	20.1	296	124	1233
15.5196	0+	1474	5.98	1461	2.11	4.68
15.6318	2+	2.63	0.297	1.44	0.231	0.66
15.7016	2+	24.7	14.1	3.98	0.58	6.01
15.7956	2+	54.5	6.24	15.9	3.98	28.4
15.8691	0+	118	1.39	18.9	68.5	29.2
15.9438	2+	260	45.5	45	22.9	147
16.0637	2+	907	426	48.4	149	284
16.1384	2+	0.607	0.001	0.005	0.06	0.541
16.1780	0+	142	7.04	129	0.038	6.006
24.8950	2+	92821	2872	4530	60528	24891

THM实验相关共振参数

14.842 MeV, 2⁺

15.436 MeV, 2⁺

15.477 MeV, 2⁺

15.602 MeV, 2⁺

15.68 MeV, 0⁺

16.030 MeV, 2⁺



南方科技大学

物理系

Department of Physics
SUSTech

20



南方科技大学
SOUTHERN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY