

北京 HI-13 串列加速器束流能量的重新刻度

骆天鹏¹, 林承键^{1,2,*}, 马南茹¹, 李康宁¹, 阚朝新¹, 王晓飞¹, 包轶文¹, 杨磊¹,
贾会明¹, 杨峰¹, 温培威¹, 庞廷涛¹, 陈思¹, 黄志杰¹, 常昶¹, 尹诚¹, 杨旻和^{1,2},
段海锐¹, 祝颂娴¹, 范泽睿¹, 王浩睿¹, 傅凌逸¹, 李慧艳¹, 石广俊¹, 张子豪¹, 李智¹

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;

2. 广西师范大学物理科学与技术学院, 广西核物理与核技术重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 北京 HI-13 串列加速器是我国低能核物理领域的大科学装置, 其能量分辨率可达 0.02%, 是开展高精度核物理实验的利器, 2007 年进行束流能量重新刻度后经历了多次升级改造。为保证束流能量的精确度, 需重新刻度分析磁铁常数 K 。本文利用反应道 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p})^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p}')^{12}\text{C}^*$ 和 $^{12}\text{C}(\text{p}, \alpha_0)^9\text{B}$ 的共振核反应, 在束流能量 4.793、9.127、14.231 和 18.460 MeV 处对 K 进行刻度。在误差最小的 14.231 MeV 处, 测得 K 为 $(803.52 \pm 0.09) \text{ keV} \cdot \text{u} / \text{kGs}^2$, 相比 2007 年的刻度值增大了 1.835%, 相应束流能量展宽为 $(1.1 \pm 0.8) \text{ keV}$ 以及能量分辨率为 $(7.6 \pm 5.4) \times 10^{-5}$ 。综合 4 个能点的结果, 给出 $K(\text{keV} \cdot \text{u} / \text{kGs}^2) = 800.612 + 2.054 \times 10^{-4} E(\text{keV})$, 与能量呈弱线性正相关, 同 1994 年首次刻度情况相似。

关键词: 串列加速器; 能量刻度; 分析磁铁; 共振核反应

中图分类号: TL52

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)04-0966-07

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0637

Beam Energy Re-calibration of Beijing HI-13 Tandem Accelerator

LUO Tianpeng¹, LIN Chengjian^{1,2,*}, MA Nanru¹, LI Kangning¹, KAN Chaixin¹, WANG Xiaofei¹,
BAO Yiwen¹, YANG Lei¹, JIA Huiming¹, YANG Feng¹, WEN Peiwei¹, PANG Tingtao¹, CHEN Si¹,
HUANG Zhijie¹, CHANG Chang¹, YIN Cheng¹, YANG Jionghu^{1,2}, DUAN Hairui¹, ZHU Songxian¹,
FAN Zerui¹, WANG Haorui¹, FU Lingyi¹, LI Huiyan¹, SHI Guangjun¹, ZHANG Zihao¹, LI Zhi¹

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. College of Physics and Technology, Guangxi Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology,
Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: The Beijing HI-13 Tandem Accelerator is a national scientific facility for nuclear physics research in China, characterized by an extremely small beam-energy spread with a resolution reaching 0.02%. The analyzing magnet with a high momentum resolution is a key component of the tandem accelerator for achieving a high energy resolution. Due to the uniformity of the magnetic field and installation errors of the magnet, as well as variations in measurement positions, there may be a significant deviation between the actual deflection radius and the theoretical value, which therefore

收稿日期: 2024-08-29; 修回日期: 2024-10-03

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFA1602302); 国家自然科学基金(U2167204, 12175314, 12235020); 稳定支持基础科研计划

* 通信作者: 林承键

requires a calibration experiment to determine the magnet constant K with high precision and accuracy. After the accelerator was installed, it underwent the first calibration in 1994 and the second calibration in 2007. Since 2007, the accelerator has undergone several upgrades and modifications, especially the installation of the superconducting linear post-accelerator in 2019, wherein the analyzing magnet was disassembled and reassembled, and the magnetic field measurement instrument was changed from the previous nuclear magnetic resonance frequency meter to a Gauss meter. These changes may alter the K of the analyzing magnet, thereby affect the accuracy of the beam energy. Therefore, it is necessary to re-calibrate the analyzing magnet. The resonance nuclear reactions of the $p+^{12}\text{C}$ system were selected for this purpose. The main advantage of this system is that the compound nucleus ^{13}N has an extremely-narrow resonant state at 15.064 6 MeV with a width of 0.93 keV, allowing for a precise calibration of the K . Additionally, the corresponding beam energy 14.231 MeV is almost in the middle energy range provided by the tandem accelerator. Two wider energy levels of 6.364 and 10.360 MeV were selected as well for preliminary calibration, allowing for a quick determination of a rough K and thus saving beam time. To test the stability of the K over a wider energy range, measurements were also conducted at a higher energy level of 18.961 MeV. The experiment was carried out at the R60° nuclear reaction terminal of the Beijing HI-13 Tandem Accelerator at the China Institute of Atomic Energy. Proton beam bombarded a ^{12}C target with a thickness of 25 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, scanning near four energies of 4.793, 9.127, 14.231, and 18.460 MeV, respectively. The product counts from each reaction channel were normalized by the beam-current integrator to obtain the excitation functions. By fitting the excitation functions, the magnetic field corresponding to the resonance peak position can be determined, which in turn allows us to calculate the K of the analyzing magnet. At the most accurate energy point of 14.231 MeV, the K is determined to be $(803.95 \pm 0.09) \text{ keV} \cdot \text{u}/\text{kGs}^2$, 1.835% higher than the calibration result in 2007, with an energy resolution rate of $(7.6 \pm 5.4) \times 10^{-5}$. This provides a basis for the precise determination of energy in subsequent experiments on the accelerator. Considering the four energy points, the K shows a weak linear positive correlation with beam energy: $K(\text{keV} \cdot \text{u}/\text{kGs}^2) = 800.612 + 2.054 \times 10^{-4} E(\text{keV})$, which is similar to the result in 1994.

Key words: tandem accelerator; energy calibration; analyzing magnet; resonance nuclear reaction

北京 HI-13 串列加速器是支撑我国核物理研究的重要大科学装置^[1], 具有极小的束流能散度, 其能量分辨率可达 0.02%, 是其他类型加速器所不具备的特点, 也是开展高精度核物理实验必备的装置。高动量分辨本领的分析磁铁是串列加速器实现高精度分析的关键设备。北京 HI-13 串列加速器上配备了一台 90° 偏转的双聚焦分析磁铁, 偏转半径 $\rho = 127 \text{ cm}$, 可高分辨选择束流能量。静止质量为 M 、能量为 E 、电荷态为 q 的带电粒子, 其磁刚度 $B\rho = e^2 \sqrt{\frac{ME}{q^2} \left(1 + \frac{E}{2Mc^2}\right)}$, 其中 M 以 u 为单位, 核子质量 $\text{u} = 931\,494.102 \text{ keV}/c^2$, $e^2 = 1.439\,976 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$ 。测量磁场 B , 结合已知的偏转半径 ρ , 可确定带电粒子的能量。由于磁铁几何和安装误差、磁场均匀度和测磁点位置等因素影

响, 实际偏转半径与理论值存在一定偏差, 必须通过精确的刻度实验来确定分析磁铁的偏转半径常数 K , $K = \rho^2/e^4$, 即 $K = \frac{ME}{(qB)^2} \left(1 + \frac{E}{2Mc^2}\right)$ 。

北京 HI-13 串列加速器建成后在 1994 年进行了首次能量刻度^[2], 随后在 2007 年进行了第 2 次能量刻度^[3]。自 2007 年以后, 加速器经历了多次升级改造, 特别是在 2019 年安装超导直线加速器时对分析磁铁进行了拆装, 并将磁场测量方式由核磁共振频率计改为高斯计, 这可能会改变分析磁铁的原有 K , 进而影响束流能量的准确性。在 2023 年的一次实验中, 通过对 $^7\text{Li}+^{207}\text{Pb}$ 的弹性散射系统学研究^[4], 发现实际束流能量相对预设值有明显偏离, 因此有必要对分析磁铁重新进行刻度。

分析磁铁 K 刻度的关键是给出与磁感应强度对应的束流能量精确值。常用的刻度方法包括基态中子阈反应法^[5-6]、共振核反应法^[7]和动量匹配法等^[8-9]。本文采用 $p+^{12}\text{C}$ 体系的共振核反应进行刻度。该方法的主要优点在于 ^{13}N 在 15.064 6 MeV 有一宽度 0.93 keV 的能级^[10-13], 通过此处共振可精确给出束流能量, 从而定出准确的分析磁铁 K 。该共振点对应的束流能量 14.231 MeV 处于串列加速器所能提供能量范围的中间位置, 是一最佳的能量刻度点。此外, 还选择 ^{13}N 的 6.364 和 10.360 MeV 两个能级用于初步刻度。这两处 $p+^{12}\text{C}$ 的背角弹性散射共振峰相对较宽、共振处截面增强约 5~10 倍^[14-15], 可快速确定 K , 以节约束流时间用于在能级 15.064 6 MeV 附近进行仔细扫描。为在更宽的能量范围内检验 K 的稳定性, 选择在更高能级 18.961 MeV 处也进行测量, 并进一步研究 K 与能量的相关性。

1 实验设置

实验在中国原子能科学研究所的北京 HI-13 串列加速器 R60 核反应终端上开展。用质子束流轰击厚度 $25\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的 ^{12}C 靶, 在 4.793、9.127、14.231 以及 18.460 MeV 共 4 个束流能量附近进行扫描, 相应的能级信息列于表 1。本次实验中使用的探测器均为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的硅探测器, α 源测试时能量分辨率约 0.8%, 前置放大器使用自主研发的 SPA 前放^[16]。为准确鉴别出各种能量的质子和 α 粒子, 在 $\pm 40^\circ$ 分别放置 ΔE - E 硅望远镜, 第 1、2 层厚度分别为 20、300 μm 和 300、1 000 μm ; 在 $\pm 160^\circ$ 分别放置了第 1、2 层厚度为 300、1 000 μm 的 ΔE - E 硅望远镜和 1 000 μm 的硅探测器。实验

时将靶室下游用于监测束流的法拉第筒接进束流积分仪中并记录电流, 用于束流归一, 实验布局如图 1 所示。

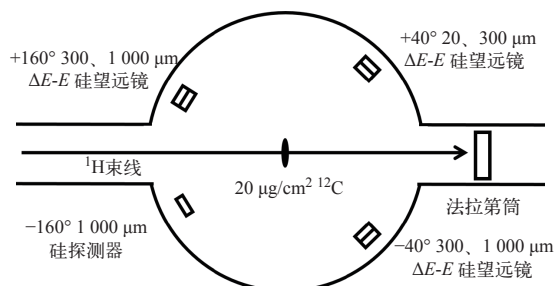


图 1 实验布局示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental layout

分析磁铁物缝宽度 S_1 和像缝 S_2 均设置为 $\pm 0.04\text{ in}$, 分析磁铁的动量色散为:

$$\delta_m = \frac{S_2 - MS_1}{2D\rho} \quad (1)$$

其中, 放大系数 $M=-1$, 色散 $D=4$, 故动量色散为 2×10^{-4} , 对应能量分辨率为 4×10^{-4} 。

分析磁铁电流的最小变化步长为 0.01 A, 对应磁场变化约 0.6 Gs, 束流能量变化约 2~4 keV。为在扫描能量时突破能量变化最小步长的限制, 采用与靶室绝缘的金属靶框, 通过加 0~6 000 V 高压对束流能量进行更精细调整, 这同时也减少了改变磁场电流并重新调束的次数。由于实验时需频繁改变能量, 为减少用于聚焦束流的时间, 在靶室前的管道内通过 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的方形狭缝进行限束以避免束流打到靶框上, 在靶室入口处则通过一直径 8 mm 的限束光阑避免束流在狭缝上的散射事件打到探测器上, 通过这样的设置, 即使在束流未充分聚焦的情况下也能正常进行实验, 极大节约束流时间。

2 实验结果

各反应道的产物计数经束流积分仪归一后给出相对截面, 截面误差则均为统计误差。在共振处对称的激发函数, 采用 Breit-Wigner (BW) 共振^[17]形式进行拟合, 即:

$$\sigma = a \frac{(\Gamma/2)^2}{(E - E_{\text{re}})^2 + (\Gamma/2)^2} + b \quad (2)$$

其中: σ 、 E_{re} 、 Γ 分别为反应截面、共振能量和共振宽度; a 、 b 分别为归一系数和本底; 非对称的激发

表 1 ^{13}N 激发态、束流能量以及关注的反应道

Table 1 Excited states of ^{13}N , beam energy, and reaction channels of interest

^{13}N 激发态/keV	能级宽度/keV	束流能量/MeV	关注的反应道
6 364(9)	11	4.793	$^{12}\text{C}(\text{p,p})^{12}\text{C}$
10 360	76	9.127	$^{12}\text{C}(\text{p,p})^{12}\text{C}$
15 064.6(4)	0.93(3)	14.231	$^{12}\text{C}(\text{p},\alpha)^9\text{B}$ $^{12}\text{C}(\text{p,p})^{12}\text{C}$ $^{12}\text{C}(\text{p,p})^{12}\text{C}$ ($Q=-4.43\text{ MeV}$)
18 961(10)	23(5)	18.460	$^{12}\text{C}(\text{p},\alpha)^9\text{B}$

函数则采用法诺共振^[18]形式进行拟合, 即:

$$\sigma = a \frac{(F\Gamma/2 + E - E_{re})^2}{(E - E_{re})^2 + (\Gamma/2)^2} + b \quad (3)$$

其中, F 为法诺因子, 其余参数与 BW 共振中的参数意义相同。通过拟合即可给出共振峰位对应的磁场。实验时多次观察并记录高斯计示数的波动情况, 给出磁场误差为 ± 0.2 Gs, 并分析质子束流能量为 4.793、9.127、14.231、18.460 MeV 时的结果。

2.1 4.793 MeV 质子束流能量

该能量下束流在靶上能损约 1.9 keV, 能量扫描步长约 2~8 keV。实验室系 160° 的 1 000 μm 硅探测器一维能谱如图 2 所示, 成峰的成分为束流在 ^{12}C 靶上和靶中杂质 ^{16}O 上的弹性散射, 其中在 ^{12}C 靶上的弹性散射激发函数如图 3 所示。共振峰中心磁场为 (2454.07 ± 0.06) Gs。

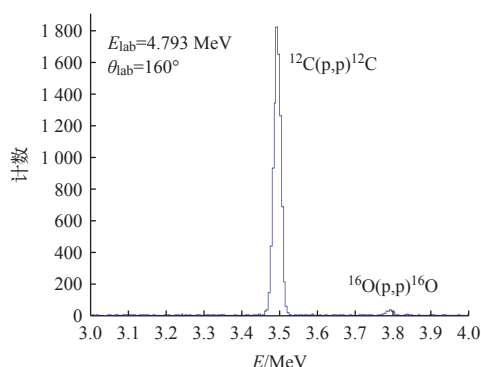
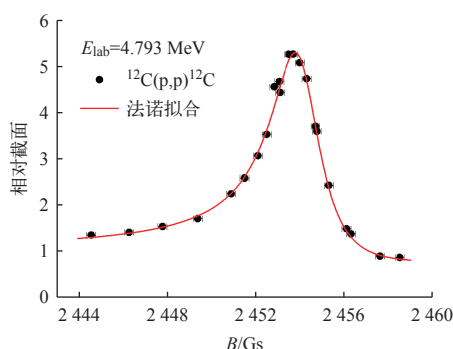


图 2 4.793 MeV $p+^{12}\text{C}$ 的 160° 1 000 μm 硅探测器一维能谱

Fig. 2 One-dimensional energy spectrum of 4.793 MeV $p+^{12}\text{C}$ at 160° with 1 000 μm silicon detector



红线为带误差权重的法诺共振拟合结果

图 3 4.793 MeV $p+^{12}\text{C}$ 的 160° 弹性散射相对截面
Fig. 3 Relative cross section of 4.793 MeV $p+^{12}\text{C}$ elastic scattering at 160°

2.2 9.127 MeV 质子束流能量

该能量下束流在靶上能损约 1.0 keV, 能量扫

描步长约 3~15 keV。实验室系 160° 的 1 000 μm 硅探测器一维能谱如图 4 所示, 成峰的成分为束流在 ^{12}C 靶上的弹性散射和非弹激发以及在靶中杂质 ^{16}O 上的弹性散射, 其中在 ^{12}C 靶上的弹性散射激发函数如图 5 所示, 共振峰中心磁场为 (3393.52 ± 0.05) Gs。

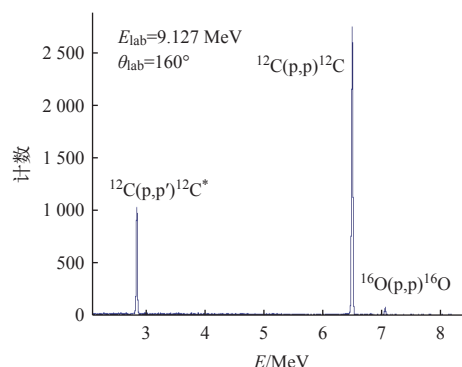
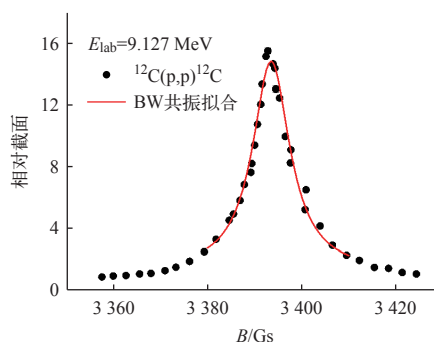


图 4 9.127 MeV $p+^{12}\text{C}$ 的 160° 1 000 μm 硅探测器一维能谱

Fig. 4 One-dimensional energy spectrum of 9.127 MeV $p+^{12}\text{C}$ at 160° with 1 000 μm silicon detector



红线为带误差权重的 BW 共振拟合结果

图 5 9.127 MeV $p+^{12}\text{C}$ 的 160° 弹性散射相对截面
Fig. 5 Relative cross section for 9.127 MeV $p+^{12}\text{C}$ elastic scattering at 160°

2.3 14.231 MeV 质子束流能量

该能量下束流在靶上能损约 0.8 keV, 能量扫描步长约 0.1~3 keV。随着能量升高, 开放的反应道增多, 共振引起的激发函数增强相对较弱, 因此在该能点同时通过 160° 的 $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$ 、 $^{12}\text{C}(p,p')^{12}\text{C}^*$ ($Q=-4.43$ MeV) 以及 40° 的 $^{12}\text{C}(p,\alpha_0)^9\text{B}$ 共 3 个反应道确定共振位置。为保持磁场稳定, 在共振能点附近仅通过改变靶上高压调整能量, 分析磁铁电流保持不变。实验室系 160° 的 1 000 μm 硅探测器一维能谱和 40° 的 20、300 μm 硅望远镜二维能谱如图 6 所示, 各反应道

对应的激发函数如图7所示。3个反应道的共振峰中心磁场分别为 $(4\,239.70 \pm 0.04)$ 、 $(4\,239.73 \pm 0.04)$ 、 $(4\,239.72 \pm 0.03)$ Gs。定义 $\chi^2 = \sum (B - B_i)^2 / \sigma_i^2$ ，由 χ^2 取最小值 $\chi^2_{\min}$ 定出中心磁场，由 χ^2 取 $\chi^2_{\min} + 1$ 定出误差，最后给出共振峰中心磁场 $(4\,239.72 \pm 0.02)$ Gs。

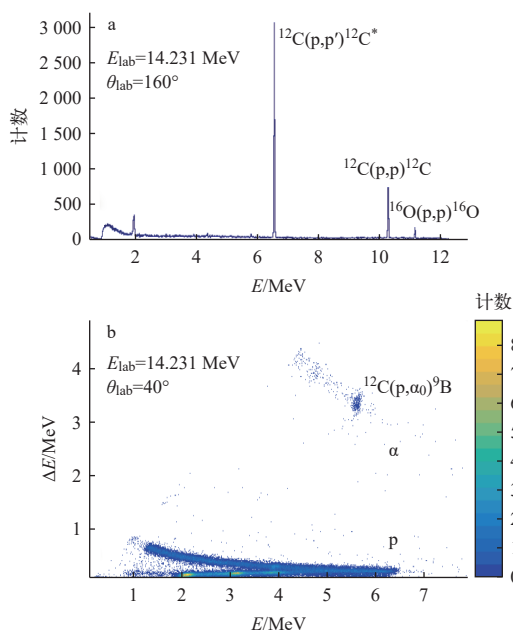


图6 14.231 MeV $p+^{12}\text{C}$ 160° 1 000 μm 硅探测器一维能谱(a)和40°的20、300 μm 硅望远镜二维能谱(b)
Fig. 6 One-dimensional energy spectrum at 160° with 1 000 μm silicon detector (a) and two-dimensional energy spectrum of at 40° with 20 and 300 μm silicon telescope (b) for 14.231 MeV $p+^{12}\text{C}$

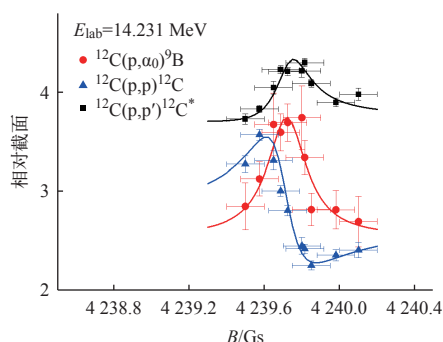


图7 14.231 MeV $p+^{12}\text{C}$ 160° $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$ 和 $^{12}\text{C}(p,p')^{12}\text{C}^*$ 以及40° $^{12}\text{C}(p,\alpha)^9\text{B}$ 相对截面
Fig. 7 Relative cross sections at 160° for $^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$ and $^{12}\text{C}(p,p')^{12}\text{C}^*$, and at 40° for $^{12}\text{C}(p,\alpha)^9\text{B}$ for 14.231 MeV $p+^{12}\text{C}$

2.4 18.460 MeV 质子束流能量

该能量下束流在靶上能损约0.6 keV，能量扫描步长约4~8 keV。该能点主要关注反应道 $^{12}\text{C}(p,\alpha)^9\text{B}$ 。

实验室系40°的20、300 μm 硅望远镜二维能谱如图8所示，相应的激发函数如图9所示，共振峰中心磁场为 $(4\,826.4 \pm 1.5)$ Gs。

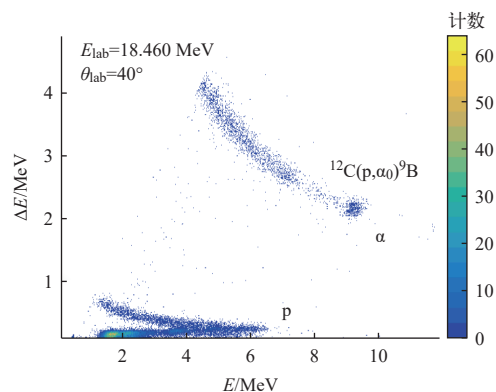
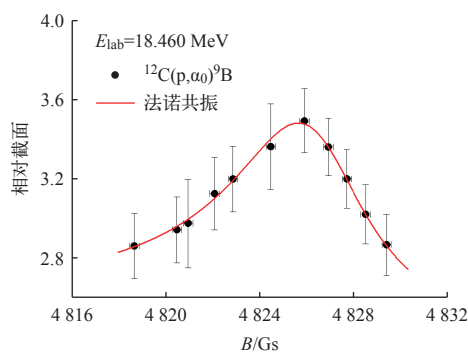


图8 18.460 MeV $p+^{12}\text{C}$ 的40° 20、300 μm 硅望远镜的二维能谱

Fig. 8 Two-dimensional energy spectrum of 18.460 MeV $p+^{12}\text{C}$ at 40° with 20 and 300 μm silicon telescope



红线为带误差权重的法诺共振拟合结果

图9 18.460 MeV 的40° $^{12}\text{C}(p,\alpha)^9\text{B}$ 相对截面

Fig. 9 Relative cross section for 18.460 MeV $p+^{12}\text{C}$ at 40° for reaction $^{12}\text{C}(p,\alpha)^9\text{B}$

拟合的具体结果列于表2。

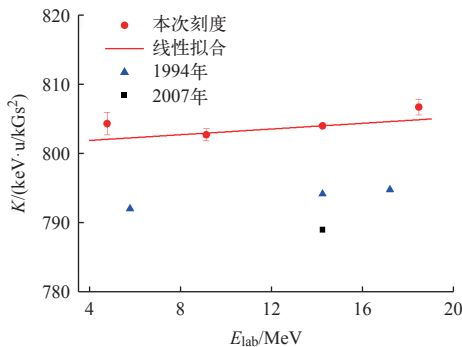
3 数据分析

根据测量的质子束流能量及分析磁铁磁感应强度，并考虑反应时的半靶能损，可计算出不同能量下的 K ，误差的主要来源包括磁场晃动误差、峰位拟合误差、能级误差，最终结果如图10所示。

在束流能量为14.231 MeV时， K 为 (803.52 ± 0.09) keV·u/kGs²，相对2007年刻度结果 (789.04 ± 0.09) keV·u/kGs²增大了1.835%。通过带误差权重的线性拟合，给出 K 的能量依赖性： $K(\text{keV} \cdot \text{u}/\text{kGs}^2) = 800.612 + 2.056 \times 10^{-4} E(\text{keV})$ ，而1994年的结果为 $790.725 + 2.344 \times 10^{-4} E$ ，均与束流

表 2 各共振核反应的拟合结果
Table 2 Fitting results for various resonance nuclear reactions

束流能量/ MeV	反应道	B_{re}/Gs	I/Gs	F	a	b
4.793	$^{12}\text{C}(\text{p},\text{p})^{12}\text{C}$	2454.07(6)	2.7(1)	-4.9(2)	0.18(2)	0.80(4)
9.127	$^{12}\text{C}(\text{p},\text{p})^{12}\text{C}$	3393.52(5)	9.7(2)		317(12)	1.24(7)
14.231	$^{12}\text{C}(\text{p},\alpha)^9\text{B}$	4239.72(3)	0.25(11)	-1.4(5)	0.18(26)	2.6(3)
	$^{12}\text{C}(\text{p},\text{p})^{12}\text{C}$	4239.70(4)	0.25(6)	4.4(29)	0.42(22)	2.38(8)
	$^{12}\text{C}(\text{p},\text{p}')^{12}\text{C}^*$	4239.73(4)	0.22(17)		0.03(4)	3.7(1)
18.460	$^{12}\text{C}(\text{p},\alpha)^9\text{B}$	4826.4(15)	6.9(44)	-4.6(53)	0.044(11)	2.5(5)



红线为带误差线性拟合结果

图 10 1994、2007 年以及本次刻度实验给出的分析磁铁 K

Fig. 10 Analyzing magnet constant K from calibration experiments in 1994, 2007, and this work

能量呈弱线性正相关。

由于 ^{13}N 能级 15.064 6 MeV 的宽度为 (0.93 ± 0.03) keV, 对应束流宽度 (1.01 ± 0.03) keV, 与束流的能量展宽、靶上能损相当, 因此从实际测到的共振宽度中扣除其他部分的贡献便可得到束流的能量宽度。靶上能损为 (0.77 ± 0.23) keV, 这里考虑靶厚存在 30% 的误差。实验测量的共振峰宽度为 (1.67 ± 0.73) keV, 误差为拟合误差。最后计算出束流能量宽度为 (1.1 ± 0.8) keV, 能量分辨率为 $(7.6\pm 5.4)\times 10^{-5}$ 。3 次刻度实验的结果列于表 3。

4 小结

在实验室系能量为 4.793、9.127、14.231、18.460 MeV 共 4 个能点处, 利用 $\text{p}+^{12}\text{C}$ 体系的共振核反应对北京 HI-13 串列加速器进行能量刻度。在结果最精确的 14.231 MeV 处, 分析磁铁 K 为 $(803.52\pm 0.09)\text{keV}\cdot\text{u}/\text{kGs}^2$, 相比 2007 年刻度结果增大了 1.835%, 能量分辨率为 $(7.6\pm 5.4)\times 10^{-5}$, 为此后在加速器上开展实验时的能量精确确定提供了依据。综合 4 个能点的结果来看, K 和束流

表 3 3 次刻度实验的质子束流能量、分析磁铁 K 以及能量分辨

Table 3 Proton beam energies, analyzing magnet K , and energy resolutions from three calibration experiments

年份	束流能量/ keV	K / ($\text{keV}\cdot\text{u}/\text{kGs}^2$)	能量分辨率
1994	5 796.9	792.08 ± 0.53	$(1.80\pm 0.20)\times 10^{-4}$
	14 231	794.19 ± 0.09	
	17 176.4	794.80 ± 0.38	
2007	14 231	789.04 ± 0.09	$(1.56\pm 0.25)\times 10^{-4}$
2024	4 793	803.86 ± 1.64	$(7.6\pm 5.4)\times 10^{-5}$
	9 127	802.25 ± 0.87	
	14 231	803.52 ± 0.09	
	18 460	806.23 ± 1.11	

能量呈弱线性正相关: $K(\text{keV}\cdot\text{u}/\text{kGs}^2) = 800.612 + 2.054 \times 10^{-4}E(\text{keV})$, 线性系数和 1994 年结果接近。

参考文献:

[1] YU J X. The CIAE Peking HI-13 Tandem Accelerator[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1981, 184(1): 157-159.

[2] 李志常, 章庆华, 赵葵, 等. 北京 HI-13 串列加速器的能量刻度[J]. *原子能科学技术*, 1994, 28(1): 43-49.

LI Zhichang, ZHANG Qinghua, ZHAO Kui, et al. Energy calibration of Beijing HI-13 Tandem Accelerator[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1994, 28(1): 43-49(in Chinese).

[3] 李志常, 赵葵, 路秀琴, 等. HI-13 串列加速器能量重新刻度[J]. *原子能科学技术*, 2007, 41(6): 668-670.

LI Zhichang, ZHAO Kui, LU Xiuqin, et al. Energy recalibration of HI-13 Tandem Accelerator[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2007, 41(6): 668-670(in Chinese).

[4] 黄志杰, 林承建, 杨磊, 等. 近库仑势垒能区 $^7\text{Li}+^{207}\text{Pb}$ 体系光学势的阈异常现象[J]. *原子能科学技术*, 2024, 58(11): 2255-2261.

- HUANG Zhijie, LIN Chengjian, YANG Lei, et al. Threshold anomaly phenomenon of optical model potentials for ${}^7\text{Li}+{}^{207}\text{Pb}$ system at energies near Coulomb barrier[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, 58(11): 2255-2261(in Chinese).
- [5] OVERLEY J C, PARKER P D, BROMLEY D A. The energy calibration of tandem accelerators[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1969, 68(1): 61-69.
- [6] SHAMU R E, BERNSTEIN E M, PARROTT M J. Accelerator energy calibration using the ${}^{12}\text{C}(\alpha, n_0){}^{15}\text{O}$ threshold[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1974, 114(3): 605-608.
- [7] SPEAR R H, KEAN D C, ESAT M T, et al. Energy calibration of the A. N. U. 14UD Pelletron accelerator[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1977, 147(3): 455-459.
- [8] TRENTelman G F, KASHY E. An energy calibration method for beam analyzer-magnetic spectrograph combinations[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1970, 82: 304-306.
- [9] NOLEN J A Jr, HAMILTON G, KASHY E, et al. Measuring nuclear excitation energies and Q -values with a cyclotron-magnetic spectrograph system[J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1974, 115(1): 189-196.
- [10] LEVINE M J, PARKER P D. A study of $T=3/2$ states in ${}^{13}\text{N}$ [J]. *Physical Review*, 1969, 186(4): 1021-1037.
- [11] HINTERBERGER F, ROSSEN P V, EHRLICH H G, et al. Resonance at 14.23 MeV[J]. *Nuclear Physics A*, 1975, 253(1): 125-144.
- [12] BACHER A D, McCLATCHIE E A, ZISMAN M S, et al. Observation of the 14 MeV resonance in ${}^{12}\text{C}(\text{p}, \text{p}){}^{12}\text{C}$ with molecular ion beams[J]. *Nuclear Physics A*, 1972, 181(2): 453-464.
- [13] GOSS J D, BROWNE C P, ROLLEFSON A A, et al. Determination of the ${}^{12}\text{C}+\text{p}$ resonance energy at 14.2 MeV [J]. *Physical Review C*, 1975, 11(3): 710-714.
- [14] ABRIOLA D, GURBICH A F, KOKKORIS M, et al. Proton elastic scattering differential cross-sections for ${}^{12}\text{C}$ [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2011, 269(18): 2011-2016.
- [15] BARNARD A C L, SWINT J B, CLEGG T B. Cross sections as a function of angle and complex phase shifts for the scattering of protons from ${}^{12}\text{C}$ [J]. *Nuclear Physics*, 1966, 86(1): 130-144.
- [16] WANG D X, LIN C J, YANG L, et al. Compact 16-channel integrated charge-sensitive preamplifier module for silicon strip detectors[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2020, 31(5): 48-53.
- [17] BREIT G, WIGNER E. Capture of slow neutrons[J]. *Physical Review*, 1936, 49(7): 519-531.
- [18] FANO U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts[J]. *Physical Review*, 1961, 124(6): 1866-1878.