

反冲质子磁分析技术用于氘氚中子能谱测量研究*

周林[†] 蒋世伦 祁建敏 王立宗

(核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2011年4月26日收到; 2011年7月14日收到修改稿)

介绍了一种基于反冲质子法和磁分析技术的氘氚聚变诊断方法, 适用于稳态及脉冲条件下的等离子体温度、燃料密度和中子产额的精确诊断. 设计了小型的原理性装置, 磁分析器使用高性能钕铁硼二极永磁铁, 焦平面上使用 CR-39 固体径迹探测器或 PIN 探测器测量质子位置分布. 使用 ^{239}Pu α 源对磁分析器进行了实验标定, 建立了配套的模拟程序. 利用蒙特卡罗方法模拟分析了装置整体性能, 并在 K-400 加速器上进行了中子实验研究.

关键词: 氘氚 (DT) 聚变, 中子能谱, 反冲质子, 磁分析

PACS: 29.30.H, 25.40.D

1 引言

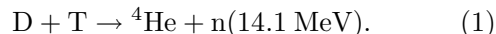
近年来, 受控核聚变的研究不断取得突破, 国际热核实验堆 (international thermal-nuclear experimental reactor, ITER)、美国国家点火装置 (national ignition facility, NIF) 等大型聚变研究项目相继启动. 以前国内外出现的一系列具有较高性能的中子能谱测量仪器, 例如, 金刚石探测器、反冲质子谱仪、液体闪烁体探测器和飞行时间谱仪等, 对 14MeV 的 DT 中子可以实现很高的能量分辨率 (约 2%—4%^[1,2]). 然而, 在脉冲辐射条件下, 需要在极短的时间内测量高入射量的中子, 且受实验空间和中子产额等的限制, 往往需要进行近距离测量, 上述的中子谱仪无法满足使用要求, 而传统的核乳胶探测器等诊断手段难以取得实时的实验结果.

为此, 我们开展了基于反冲质子法和磁分析技术的中子能谱测量技术的研究, 利用磁分析器对中子-质子 (n-p) 转换靶产生的反冲质子进行动量分析, 可实现稳态和脉冲条件下中子能谱的精确测量. 类似原理的谱仪已在欧洲联合环 (joint European torus, JET) 和美国罗切斯特大学的 OMEGA 等装置上得到了有效应用^[3-7]. 由于在分辨率、信噪比和动态范围等方面具有突出优点, 反冲质子磁分析技术的应用被认为是近十几年来中子诊断领域最大的进步^[8].

在现阶段的研究中, 我们设计了小型的原理性装置^[9,10], 使用钕铁硼二极永磁铁作为分析磁铁, 焦平面探测器使用具有高位置分辨和本底免疫能力的 CR39 固体径迹探测器或 PIN 探测器. 建立了配套的粒子输运模拟程序, 使用 Pu-239 α 源实验标定了磁分析器性能. 利用蒙特卡罗方法对装置整体性能进行了分析, 并在加速器中子源上进行了前期的实验研究.

2 聚变中子能谱

DT 等离子体聚变产生初级中子^[5]:

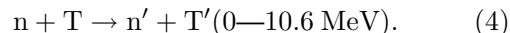
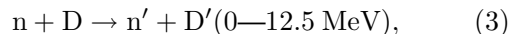


由于离子的热运动, 中子发射能谱出现多普勒展宽. 令离子温度为 T_i , 中子峰半高宽与 T_i 存在函数关系^[1]

$$\Delta E_{1/2}(\text{keV}) = 177 \times \sqrt{k_B T_i(\text{keV})}, \quad (2)$$

式中 k_B 为波尔兹曼常数.

初级中子与燃料发生弹性散射, 产生散射中子和离子



散射离子进一步发生聚变反应, 从而产生能量更高的三级中子

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2008B0103003) 资助的课题.

[†] E-mail: zhoulin2003@gmail.com

$$D'(0-12.5) + T \rightarrow {}^4\text{He} + n''(12.0-30.1 \text{ MeV}), \quad (5)$$

$$T'(0-10.6 \text{ MeV}) + D \rightarrow {}^4\text{He} + n''(9.2-28.2 \text{ MeV}). \quad (6)$$

等离子体温度 T_i 和燃料密度是衡量聚变状态的两项基础参数. 由 (2) 式, 通过测量初级 DT 中子的多普勒展宽可以诊断 T_i . 由于散射反应概率与密度相关, 初级中子和散射中子的产额比可用于诊断燃料密度. 理论上, 三级中子 (尤其是 20MeV 以上, 仅由三级反应产生) 产额也可用于燃料密度的诊断. 上述方法不依赖于聚变模型, 可实现高精度的诊断.

3 反冲质子磁分析技术原理

中子与聚乙烯靶反应产生反冲质子, 限定某一角度范围的质子束进入分析磁铁, 经偏转、色散和聚焦, 质子束将按能量的不同在焦平面上形成位置谱. 磁分析器的设计可以实现焦平面上位置与能量成线性关系.

入射中子能量 E_n 、反冲质子能量 E_p 和反冲角 ϕ 存在如下关系:

$$E_p = E_n \cos^2 \phi. \quad (7)$$

考虑到反冲角偏差 (靶、光阑几何尺寸引起) 和转换靶引起的能量损失, 质子能量修正为

$$E_p = E_n \cos^2(\phi \pm \Delta\phi) - \int_0^s \frac{dE(E_p)}{dx} dx, \quad (8)$$

其中 $\Delta\phi$ 为反冲角偏差, s 为质子在靶中的径迹长度, $dE(E_p)/dx$ 为转换靶对质子的阻止本领.

令入射到转换靶上的中子数为 N_n , Ω 方向 $\Delta\Omega$ 立体角内产生的反冲质子数为 N_p , 定义探测效率为

$$\varepsilon = N_p/N_n * \eta = \frac{2N_A \rho d \eta}{N_n A} \int_{\Delta\Omega} \frac{d\sigma_s(\Omega)}{d\Omega_{\text{lab}}} d\Omega_{\text{lab}}, \quad (9)$$

其中 N_A 为阿伏伽德罗常数, A 为 CH_2 的分子量, ρ 为靶密度, d 为转换靶厚度, $d\sigma_s(\Omega)/d\Omega_{\text{lab}}$ 为实验室坐标系内 n-p 反应的微分截面, η 为穿过限束光阑的质子被测量到的概率.

4 磁分析器

磁分析器使用的高性能钕铁硼二极永磁铁及其场强分布如图 1 所示. 磁铁重约 200 kg, 磁铁间隙 30 mm, 均匀场区磁场强度为 0.792 T, 不均

匀度小于 5%. 系统针对 7 MeV 质子 (14 MeV 中子在 45° 反冲角方向产生) 设计, 入射角 +9°, 参考质子出射角为 -44° (偏转角为 45.3°). 较大的负出射角和均匀二极磁场产生径向聚焦, 参考设置下束流的径向放大倍数约为 0.8. 利用配套的粒子输运模拟程序计算得到: 系统能够接收 3.5—8.5MeV 的质子, 焦平面上位置与能量存在良好的线性关系, 能量间隔 1 MeV 的参考质子, 焦点位置间隔 7.65 cm.

利用 Pu-239 α 源对磁分析器进行了实验标定 (相同能量的质子和 α 粒子的偏转半径相同). 出射 α 粒子能量为 5.15MeV 和 5.47MeV (由杂质核素产生), 份额为 80.0% 和 20.0%, CR39 探测器近似垂直于 α 粒子出射方向放置. 图 2(a) 显示了实验得到的 α 粒子位置谱, 横轴为位置坐标, 纵轴为 0.5mm 宽度内的计数. 限定源尺寸 6.6mm \times 5.6mm, 左峰宽 (FWHM)4.12mm, 右峰宽 4.14mm, 平均偏转角分别为 50.1° 和 49.3°. 图 2(b) 显示了谱宽度随像距 L_i 的变化, 位置谱宽度随 L_i 的增加先减小后增大, 呈现像腰.

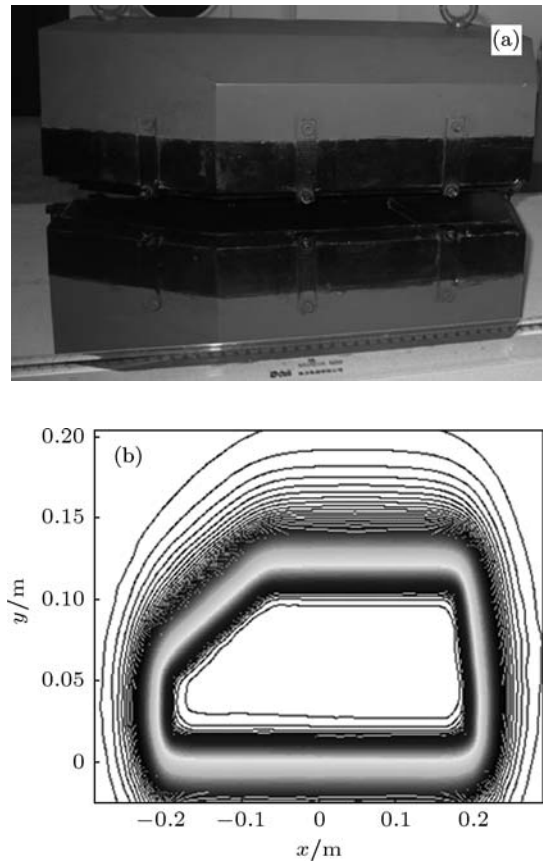


图 1 (a) 钕铁硼二极永磁铁; (b) 中心平面场强分布

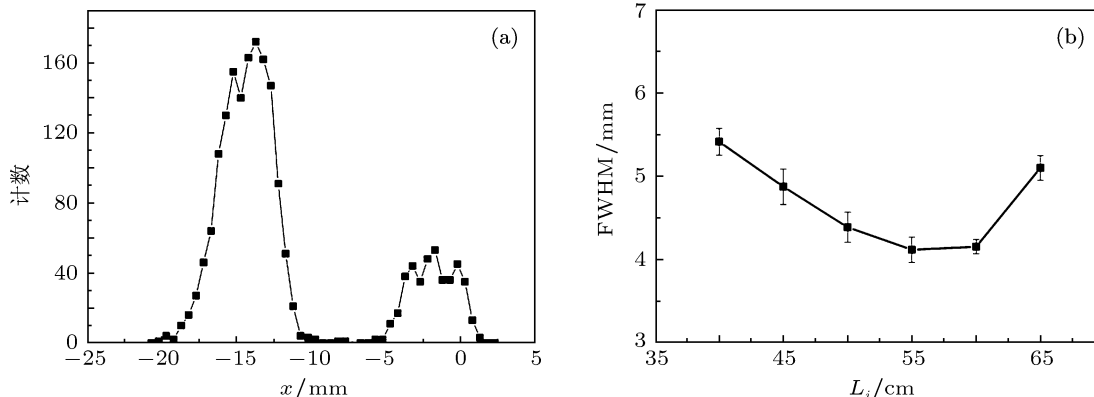


图2 (a) 粒子位置谱; (b) 束流径向宽度随像距的变化

5 能量分辨率和探测效率

进入磁场的反冲质子束能量展宽 ΔE_P 包含独立的两项: 靶厚度造成的展宽 ΔE_f 和反冲角偏差 $\Delta\phi$ 造成的展宽 ΔE_k . 考虑到磁分析器的等效展宽 ΔE_s , 装置的能量分辨率为 [7]

$$\Delta E_I/\overline{E}_p \approx \sqrt{\Delta E_f^2 + \Delta E_k^2 + \Delta E_s^2}/\overline{E}_p. \quad (10)$$

使用 Monte Carlo 程序对不同的几何参数设置进行计算, 结合磁分析器的实际性能, 得到三组设置下装置对 14MeV 中子的测量性能如表 1 所示. 其中各参数的合理设置保证了穿过限束光阑的质子可以全部到达焦平面.

表 1 不同几何设置对应的反冲质子磁分析装置性能

编号	#1	#2	#3
靶厚度/(mg/cm ²)	2	4	6
靶直径/mm	4.0	5.0	6.4
光阑直径/mm	5.0	6.8	8.0
$\sqrt{\Delta E_f^2 + \Delta E_k^2}/keV$	273	393	518
$\Delta E_s/keV$	93	128	176
能量分辨率/%	4.1	5.9	7.8
探测效率/ 10^{-8}	0.94	3.49	7.20

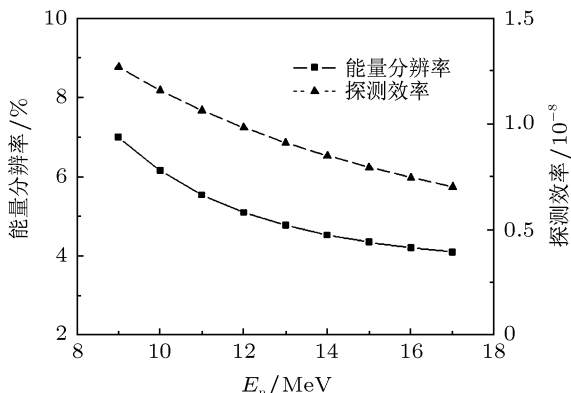


图3 谱仪能量分辨率和探测效率与中子能量的函数关系

由于能量展宽和 n-p 反应截面与中子能量相关, 装置对不同能量中子的探测效率不同. 计算得到表 1 中的#1 设置下, 装置对 9—17MeV 能量范围内的中子的分辨率和探测效率如图 3 所示.

6 中子实验

中子实验研究在 K-400 加速器上进行. 由于中子产生率较低 (约 $10^{11}s^{-1}$), 实验中仅针对部分能段的反冲质子进行测量, 调整装置各参数以尽可能增加探测器计数率. 实验布局如图 4 所示. 14.1MeV 中子由 T(d,n)⁴He 反应产生 (90° 方向). n-p 转换靶采用 100 μ m 厚的聚乙烯膜, 靶面积为 4cm², 距氘靶 (直径 2.5cm)35cm, 距磁铁入口 48cm. 磁铁的有效入口面积为 10cm², 相应的反冲质子入射立体角为 4.34msr. 上述条件下, 入射到转换靶上的 14.1MeV 中子产生的进入磁分析器的反冲质子数为 $7.51 \times 10^{-7}n^{-1}$, 能量展宽为 FWHM=1.53MeV.

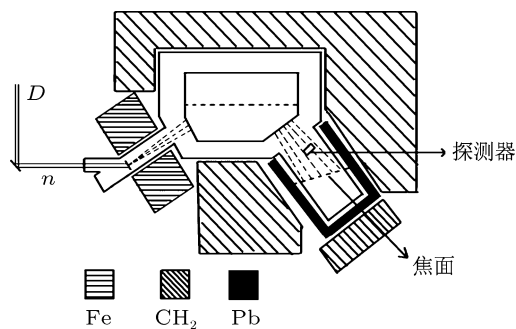


图4 MPR 谱仪中子实验布局

PIN 探测器 [11,12] 靠近磁铁出口处, 直径 30 mm, 灵敏层厚度为 $300 \pm 15 \mu m$. 单个探测器测量得到的质子数为磁分析器出射质子总数的 1/4—1/5.6 MeV 以上的质子在探测器中仅沉积部分能量, 质子

能量越高, 平均沉积能越小. 测量信号由多道脉冲幅度分析器处理并记录. 屏蔽体由铁、聚乙烯和铅构建, 入射通道两侧的铁板厚 40 cm, 探测器箱两侧和尾部的聚乙烯厚度分别为 60 cm 和 20 cm, 其余位置 (包括装置顶部和底部) 的聚乙烯厚 30 cm, 探测器箱由 5 cm 厚的铅层包裹. 整个屏蔽体的设计综合考虑了磁铁散射以及地面、屋顶和墙壁反射的影响^[13].

实验结果如图 5 所示, 各测量结果均按 7×10^{14} 的中子总产额统一处理. 图 5(a) 中矩形点为未加载转换靶时的本底计数 (主要由散射中子和伽马射线贡献), 倒三角形点为加载后的计数. 峰位能量 (3.7 ± 0.1 MeV), 半高宽 (1.19 ± 0.04 MeV),

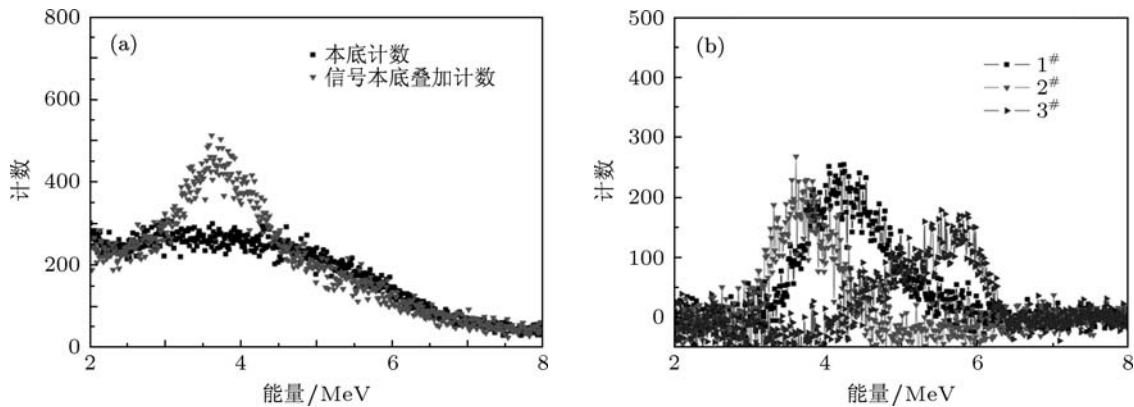


图 5 中子实验结果 (a) 本底计数和信号本底叠加计数; (b) 扣除本底后的净计数

表 2 实验结果与数值模拟结果对比

测量坐标 x/cm	1.5	4.0	6.0
平均沉积能/MeV	5.5 ± 0.2	4.3 ± 0.1	3.7 ± 0.1
峰能量/MeV	实验结果推算	6.2	6.9
	模拟计算	6.0	6.7
计数	实验结果	2.01×10^4	2.61×10^4
	模拟计算	1.78×10^4	2.70×10^4

7 讨 论

反冲质子磁分析装置的核心是磁分析器, 尤其当装置采用永磁铁设计时, 磁铁的场强、均匀性和场区几何参数能否满足较高能量 ($\sim 1\text{MeV}$ 至 $\sim 10\text{MeV}$) 质子的要求, 对于装置整体性能起着至关重要的作用. 文中的研究结果清晰地显示, 钕铁硼二极永磁铁能够产生场强在 0.79T 以上的高均匀性磁场, 可很好地用于质子和 α 粒子的动量分析. α 源实验结果表明, 粒子束在焦平面上具有非常好的位置分布, 且位置与能量存在良好的线性关系, 这为 DT 中子能谱测量奠定了基础. 在 K-400 加速

由此计算得到探测器上的入射质子平均能量为 7.5 MeV, 半高宽为 0.95 MeV, 与程序模拟结果 (质子平均能量 7.6 MeV, 探测器尺寸对应的能量宽度为 0.92 MeV) 一致. 从实验结果也可以看出, 装置的屏蔽还需进一步加强.

图 5(b) 为扣除本底后的净计数. 三个峰分别为不同的探测器位置, 相应的质子平均能量均在 6MeV 以上. 峰能量越低, 入射到探测器上的质子能量越高. 各峰的实验结果统计和模拟计算结果对比如表 2 所示, 其中入射到探测器的质子能量由质子沉积能计算. 可以看出, 装置的探测效率与模拟计算结果相符. 实验结果清晰地显示了磁分析器对反冲质子束的能量色散作用.

器上进行的中子实验获得了预期的实验结果, 有效地验证了理论计算和程序模拟结果.

作为原理性装置, 在分析磁铁设计时考虑了成本、工艺难度和使用方便性等因素, 选择反冲角方向为 45° 以减小质子对分析磁铁的要求. 事实上, 反冲角越小, 质子能量展宽对转换靶和质子光阑几何尺寸越不敏感, 有利于增加探测效率并改善能量分辨率. 因此, 针对 0° 方向设计较大的磁分析器, 将使谱仪的性能得到显著提升. 此外, 实验中使用的屏蔽体由现有材料搭建, 难以充分发挥屏蔽作用, 根据谱仪几何尺寸设计配套的大型屏蔽体将有助于获取高信噪比的中子能谱数据.

8 结 论

反冲质子磁分析技术适用于稳态及脉冲条件下的等离子体温度 (T_i)、燃料密度和中子产额的精确诊断, 尤其在高中子产额的脉冲辐射条件下, 该技术具有无可替代的重要意义. 现阶段设

计的小型原理性装置能够测量 9—17MeV 的中子能谱, 对 14MeV 中子可实现约 4% 的能量分辨率和约 10^{-8} 的探测效率. 由于该技术在结构的紧凑

性、分辨率、动态范围和信噪比等方面具有突出的优势, 可望在未来的聚变研究中得到有效应用.

-
- [1] Jarvis O N 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **476** 474
- [2] Pillon M, Angelone M, Lattanzi D, Marinelli M, Milani E, Tucciarone A, Verona-Rinati G, Popovichev S, Montekali R M, Cincenti M A, Murari A 2007 *Fusion Engineering & Design* **82** 1174
- [3] Ericsson G, Ballabio L 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 759
- [4] Källne J, Ballabio L, Conroy S, Ericsson G, Frenje J, Gorini G, Prandoni P, Tardocchi M, Traneus E 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 1181
- [5] Glebov V Yu, Meyerhofer D D, Sangster T C, Stoeckl C, Roberts S, Barrera C A, Celeste J R, Barrera C A, Caldwell S E, Grim G P, Casey D, Frenje J A, Bourgade J L, Disdier L, Chandler G A, Cooper G W, Padalino S P, Horsfield C, Davis B A 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E715
- [6] Sjöstrand H, Giacomelli L, Andersson Sundén E, Conroy S, Ericsson G, Gatu Johnson M, Hellesen C, Hjalmarsson A, Källne J, Ronchi E, Weiszflog M, Wikström G, Gorini G, Tardocchi M, Murari A, Kaveney G, Popovichev S, Sousa J, Pereira C, Combo A, Cruz N 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 10E717
- [7] Hawkes N P, Belle P V, Bond D S, Croft S, Jarvis O N 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 1134
- [8] Källne J, Ballabio L, Frenje J, Conroy S, Ericsson G, Tardocchi M, Traneus E 2000 *Phys. Rev. Lett.* **2000** **85** 1246
- [9] Zhou L, Jiang S L, Qi J M 2010 *Nucl. Phys. Rev.* **27** 455 (in Chinese) [周林, 蒋世伦, 祁建敏 2010 原子核物理评论 **27** 455]
- [10] Zhou L, Jiang S L, Qi J M 2010 *Nucl. tech.* **33** 683 (in Chinese) [周林, 蒋世伦, 祁建敏 2010 核技术 **33** 683]
- [11] Yang H Q, Zhu X B, Yang G Z, Li L B, Song X C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3231 (in Chinese) [杨洪琼, 朱学彬, 杨高照, 李林波, 宋献才 2004 物理学报 **53** 3231]
- [12] Yang H Q, Zhu X B, Peng T P, Tang Z Y, Yang G Z, Li L B, Song X C, Hu M C 2004 *High Energy Phys. Nucl. Phys.* **28** 744 (in Chinese) [杨洪琼, 朱学彬, 彭太平, 唐正元, 杨高照, 李林波, 宋献才, 胡孟春 2004 高能物理与核物理 **28** 744]
- [13] Zhu C X, Zheng P 2010 *Nuclear Electronica & Detection Technology* **30** 898 (in Chinese) [朱传新, 郑普 2010 核电子学与探测技术 **30** 898]

Study of magnetic proton recoil technology for measurement of deuterium-tritium neutron spectrum*

Zhou Lin[†] Jiang Shi-Lun Qi Jian-Min Wang Li-Zong

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang 621900, China*)

(Received 26 April 2011; revised manuscript received 14 July 2011)

Abstract

A kind of fusion diagnostics based on proton recoil method and magnetic analyzing technology is introduced. It can be used for the accurate diagnoses of plasma temperature, fuel density and neutron yield. A prototype is designed, using a high-powered Nd-Fe-B permanent dipole for magnetic analyzer, and proton position distribution in the focal plane is measured by CR-39 trajectory detector or PIN detector. The system is calibrated with a ^{239}Pu source, and a corresponding particle transport simulation program is worked out. The performance of the spectrometer is investigated with the Monte Carlo simulation, and neutron experiments are taken on the K-400 accelerator.

Keywords: deuterium-tritium (DT) fusion, neutron spectrum, proton recoil, magnetic analyzing

PACS: 29.30.H, 25.40.D

* Project supported by the Science & Technology Development Fund of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2008B0103003).

[†] E-mail: zhoulin2003@gmail.com