

文章编号: 1007-4627(2014)04-0468-07

## 大俘获立体角的内靶超导螺线管表面 $\mu$ 源的设计研究

肖冉<sup>1, 2</sup>, 刘艳芬<sup>1, 2</sup>, 许文贞<sup>1, 3</sup>, 谭宗泉<sup>1, 2</sup>, 成斌<sup>1, 2</sup>, 孔伟<sup>1, 2</sup>, 叶邦角<sup>1, 2</sup>

(1. 核探测与核电子学国家重点实验室, 中国科学技术大学, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230026;

3. 中国科学院上海应用物理研究所上海同步辐射光源, 上海 201204)

**摘要:** 高通量  $\mu$  子源是国际上  $\mu$  子科学研究的重要条件。在中国散裂中子源的高能质子应用区中, 运用蒙特卡罗工具 Geant4 和 G4beamline 软件设计了使用内靶超导螺线管俘获高通量表面  $\mu$  子的束线。与传统的分离靶和基于四极磁铁的收集系统相比, 大孔径超导螺线管可以将收集效率提高两个量级。通过对不同靶材的粒子产率进行分析得出石墨是最佳靶材, 然后比较俘获螺线管与束流的不同偏转角度下收集的表面  $\mu$  的产率, 提出了合理的较高产率的俘获和运输螺线管的设计方案, 并与常规磁铁方案比较, 最终在衰变螺线管端口的表面  $\mu$  通量高达  $10^8/s$ 。

**关键词:** 高通量表面  $\mu$  源; 超导螺线管; 中国散裂中子源; Geant4; 束流光学

**中图分类号:** TL32; O571.53      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.04.468

### 1 引言

表面  $\mu$  由停留在靶表面附近 ( $100 \text{ mg/cm}^2$ ) 的  $\pi^+$  产生, 它具有固定的能量 (动量  $29.8 \text{ MeV}/c$ , 动能  $4.12 \text{ MeV}$ ), 极化率接近 100%, 在测量材料的磁结构方面有重要的作用<sup>[1]</sup>。提高表面  $\mu$  的束流强度是推动  $\mu$  SR ( $\mu$  子自旋转动/共振/弛豫) 技术的重要手段, 超高通量  $\mu$  子的获取对于寻找  $\mu \rightarrow e\gamma$  的轻子味对称性破缺、中微子工厂的建设、 $\mu^+\mu^-$  对撞以及超慢  $\mu^+$  ( $\sim \text{eV}$ ) 的实现都有着非常重要的意义。而当前国际上在运行的  $\mu$  子源装置的性能参数已经达到较高水平, 连续型的表面  $\mu$  通量达到  $10^7 \sim 10^8 \mu^+/s$ , 脉冲型装置的表面  $\mu$  通量最高达到  $10^7 \mu^+/s$ 。这些通量对构建一条超慢  $\mu^+$  束线来说仍不理想, 因此研究如何获取高通量的表面  $\mu$  仍是一个非常重要的热点。目前大多数的收集和传输系统都使用将靶区与收集磁铁分开并且采用基于四极磁铁的收集系统, 而将靶放在超导螺线管内部的收集系统可以很容易提供大的接收立体角 ( $> 1\text{sr}$ ) 和达到几个 T 的强磁场, 从而对束流

的横向相空间进行合理约束。国际上螺线管收集传输  $\mu$  束技术已在瑞士的 PSI<sup>[2]</sup> (分离靶+常规螺线管)、日本的 KEK、J-PARC 和 RCNP<sup>[3~5]</sup> (内靶+超导螺线管组合系统) 等多个实验室的实现, 本文则根据中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 的统一规划, 利用 CSNS 的质子束流打靶, 设计一条利用内靶与超导螺线管的俘获系统的高通量表面  $\mu$  装置。

中国正在建设并预计 2018 年一期完工的 CSNS, 用动能为  $1.6 \text{ GeV}$  的高能质子束流轰击重金属靶来产生强流中子, 装置主要由质子加速器、中子靶站和中子散射谱仪等组成, 其中一期的质子束流功率达  $100 \text{ kW}$ , 脉冲频率为  $25 \text{ Hz}$ , 每脉冲的强度为  $1.88 \times 10^{13}$  质子<sup>[6]</sup>。CSNS 的建设为我国提供一个物理学、纳米科学、生命科学、新型能源等多学科应用的平台。除用于散裂中子源外, 依托 CSNS 加速器还将开展更多的其它粒子应用, 如质子束、 $\mu$  子束、快中子束等其它应用。基于 CSNS 的试验型  $\mu$  源的常规设计已经展开<sup>[7-9]</sup>, 本文利用内靶超导螺线管的大立体角收集系

收稿日期: 2013-12-25; 修改日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(11075154), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(WK2030040035)

作者简介: 肖冉(1988-), 女, 河南信阳人, 博士研究生, 从事粒子与原子核物理研究; E-mail: xran@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 叶邦角, E-mail: bjye@ustc.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>

统和超导螺线管传输系统, 设计一条大接收度的高通量表面  $\mu$  子束线。

### 2 超导俘获螺线管和传输螺线管布局

$\mu$  子束线将建于 CSNS 预留的高能质子应用区, 布局如图 1 所示, 该区是从快循环同步加速器上引出

约 4% 的质子束流, 再利用切束或分时供束技术将质子束流引导到质子实验区和  $\mu$  试验区,  $\mu$  SR 试验区最终分得 1 Hz 的质子束流。质子轰击靶产生的次级粒子偏转  $44.8^\circ$  到图 1 虚框中的  $\mu$ SR 应用区, 本文设计的超导俘获螺线管与传输螺线管布局符合 CSNS 关于高能质子应用区的规划。

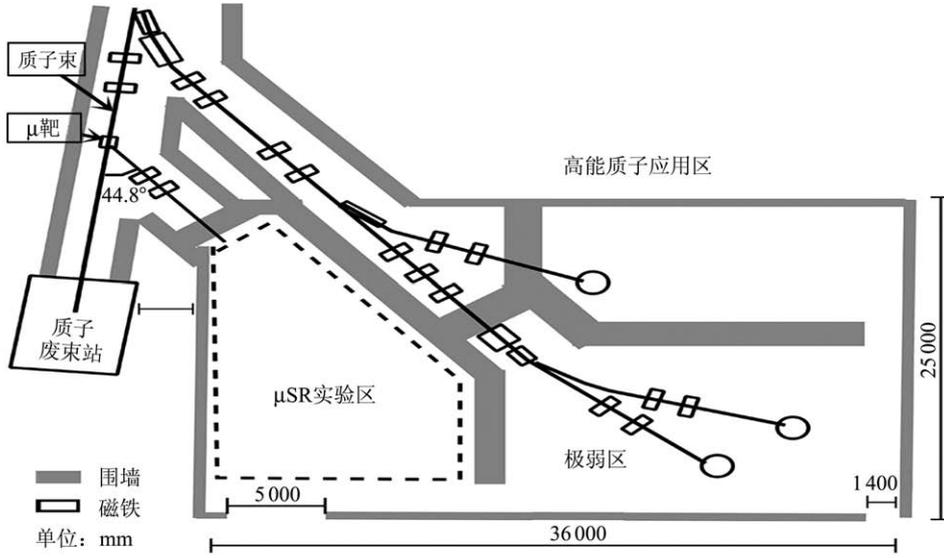


图 1 CSNS 高能质子应用区实验大厅布局图

#### 2.1 靶的选材

刘艳芬等<sup>[10]</sup>已对使用常规磁铁的试验型  $\mu$  源产生靶的最优形状和最佳靶材进行了模拟计算, 最终决定采用  $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$  的石墨靶作为常规表面  $\mu$  源的靶。本文则参考日本 RCNP 上 MuSIC 的大孔径螺线管的布局<sup>[5]</sup>, 我们选择了半径为 20 mm, 长为 400 mm 的柱形靶, 并对可选的 4 种材料-

低  $Z$  的铍 (Be)、石墨 (Graphite) 和偏高  $Z$  的镍 (Ni)、铜 (Cu) 进行了简单 Geant4 模拟分析, 计算中使用动能为 1.6 GeV、空间为高斯分布  $\sigma_x = \sigma_y = 5.732\text{ mm}$ , 束流沿  $Z$  轴方向、角散为高斯分布  $\sigma_{x_p} = \sigma_{y_p} = 14.13\text{ mrad}$  的质子轰击 4 种材料的圆柱形靶, 探测器全部覆盖在圆柱靶的周围, 收集到的全动量表面  $\mu$  分布如图 2(a)。图中看出, 在 29.8 MeV/c 的动量附近四种材料都有一个峰值, 为表面  $\mu$  的动量, 其中 Ni 和石墨

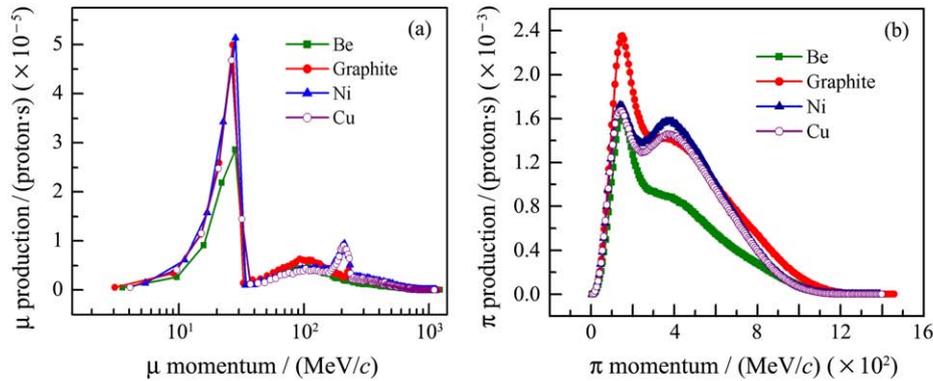


图 2 (在线彩图) 四种材料得到  $\mu$  子 (a) 和  $\pi$  介子 (b) 的全动量分布

的居多,同时对4种材料产生的 $\pi$ 介子全动量分布进行了分析如图2(b),模拟结果表明石墨靶在产生100~300 MeV/c的中能 $\pi$ 介子方面更有优势,产生表面 $\mu$ (25~30 MeV/c)和中能 $\pi$ (95~100 MeV/c)的具体数据如表1所列,石墨靶材虽然表面 $\mu$ 的产率上不如偏高Z材料,但产生的中能 $\pi$ 介子4种材料之

首。由于石墨是低Z材料,因而减少了入射质子束流的多次Coulomb散射<sup>[2]</sup>;其次 $\pi$ 产生截面正比于Z的2/3次方<sup>[11]</sup>,而辐射剂量却正比于Z,文献[9]中已经验证了石墨靶的能量沉积和材料应力对石墨靶不会构成较大的损伤,经分析得出石墨是靶材选择的理想材料。

表 1 表面 $\mu$ 和 $\pi$ 介子在4种材料中的产率

材料	Z/A	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	表面 $\mu$ 产率/proton <sup>-1</sup>	中能 $\pi$ 产率/proton <sup>-1</sup>
Be	4/9.0122	1.850	2.97×10 <sup>-5</sup>	0.143%
Graphite	6/12.011	2.210	4.32×10 <sup>-5</sup>	0.214%
Ni	28/58.69	8.902	5.43×10 <sup>-5</sup>	0.194%
Cu	29/63.54	8.960	5.05×10 <sup>-5</sup>	0.187%

### 2.2 超导收集螺线管与质子束流的偏转角度

本文采用中心磁场为3 T的超导螺线管收集系统,用G4beamline模拟计算了长度为1 m半径从200 mm到450 mm变化的超导螺线管收集到的表面 $\mu$ 的产率,计算结果如图3所示,收集的表面 $\mu$ 产率是随着收集螺线管半径增大而增多的,考虑到实际的布局及产率的提高,我们选用半径为450 mm、孔径较大的超导螺线管来收集表面 $\mu$ ,这样可以将辐射屏蔽、靶冷却系统等设备放入超导螺线管内部,既能提高收集表面 $\mu$ 的通量又节省了空间。

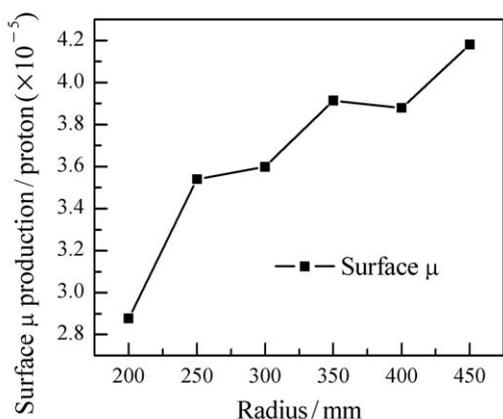


图 3 不同半径的超导螺线收集到的表面 $\mu$ 的产率

在质子束打靶产生次级粒子后仍有大量的质子未参与反应而穿过螺线管,由磁刚度公式 $(B\rho)_0 = P_0/|qe|$ ,1.6 GeV的质子对磁场的抗拒能力很强<sup>[12]</sup>,即曲率半径很大,因此没有产生次级粒子的质子会沿近似的直线路径,而收集螺线管的后端布局是传输螺线管,为了减少质子束流对螺线管的辐射,

以及考虑到图1中高能质子应用区的布局,超导螺线管与束流方向则需要偏转一定角度。靶与束流方向一致,用G4beamline模拟了收集螺线管的半径为450 mm、长1000 mm的俘获螺线管与束流方向夹角从0度到90度变化收集到的表面 $\mu$ 的产率如图4所示,模拟计算表明,随着角度变表面 $\mu$ 的强度也变大,基本到50度之后趋于水平,综合考虑收集螺线管的大小和高能质子应用区(整体束线与质子束流偏转角度为44.8)以及偏转螺线管的布局,我们选取俘获螺线管的偏转角度为22.8度,此时从超导螺线管出来的质子束、 $\pi$ 介子和表面 $\mu$ 的位置分布如图5所示,质子束流的中心沿x轴负方向偏转,这是由于偏转螺线管的布局引起的,偏转过后的质子束流可以穿过收集螺线管和偏转螺线管之间的狭缝进入废束站。而 $\pi$ 介子和表面 $\mu$ 的束斑受螺线管偏转的影响较小可以顺利地传输。

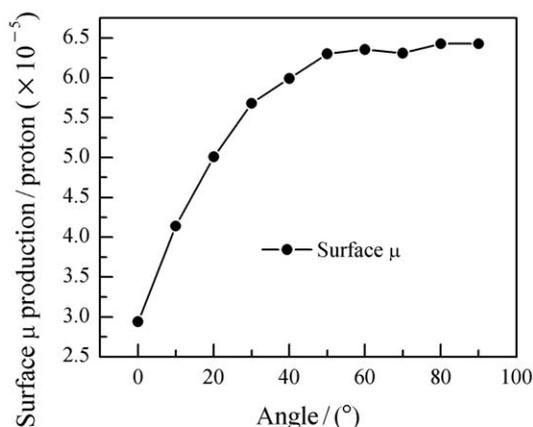


图 4 不同偏转角度的超导螺线收集到的表面 $\mu$ 的产率

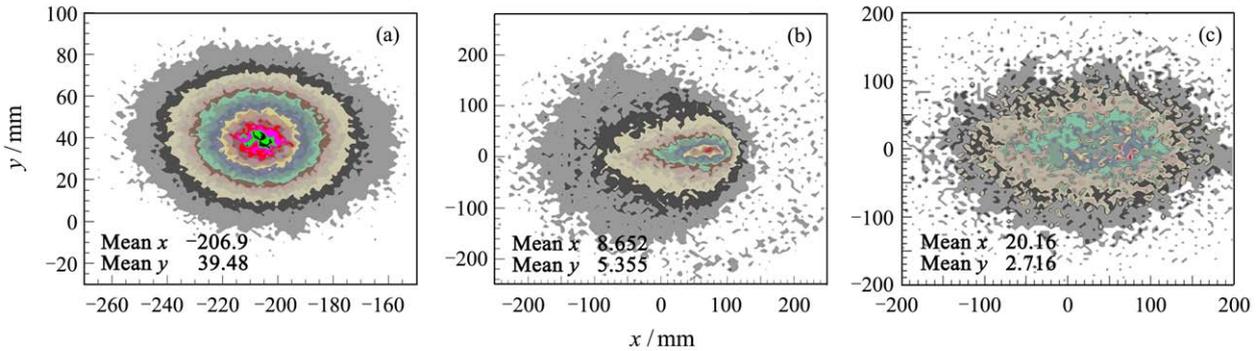


图 5 (在线彩图) 超导螺线管偏转22.8度时质子(a)、 $\pi$ 介子(b)和表面 $\mu$ (c)的位置分布

### 2.3 超导螺线管与常规磁铁布局的比较

初步的设计如图 6 所示, 质子束轰击放置在俘获螺线管内部的石墨靶, 从超导螺线管出来的质子束流经过俘获螺线管与偏转螺线管之间缝隙进入废束站, 收集到次级粒子经过一组长为 210 mm 内半径为 200 mm 的 10 个短超导螺线管, 每个螺线管中心的磁场为 2 T, 均使束线中心偏转 2 度, 则 10 个短超导螺线管 (SC2-10) 使束线中心偏转 20 度, 与收集螺线管一起使束流中心偏转到与高能质子应用区一致的 44.8 度, 进入到  $\mu$ SR 的实验区。经超导螺线管收集后的次级粒子, 表面  $\mu$  需要传输到实验区, 而  $\pi$  介子寿命的固有寿命为 26 ns,  $\pi$  介子飞行衰变长度可由  $L_{\pi} = c\beta\gamma\tau_{\pi}$  计算, 其中  $\tau_{\pi}$  是  $\pi$  静止时的平均寿

命, 因此在收集螺线管和实验端之间必须经过一段衰变通道。后接长为 2 m 的衰变螺线管, 模拟结果是从衰变螺线管出来的表面  $\mu$  (27 ~ 30 MeV/c) 的通量达到  $10^8/s$  量级。这部分的表面  $\mu$  经过偏转磁铁的偏转和四极磁铁的聚焦最终到达表面  $\mu$  的实验端, 衰变  $\mu$  可以通过对应参数的偏转磁铁和四极磁铁输运到衰变  $\mu$  源的实验端。其中从衰变螺线管出来的表面  $\mu$  源还可以通过一系列的低温慢化器方法或激光共振方法<sup>[13-14]</sup>得到动能为 eV~keV 量级的低能  $\mu$  (Low Energy  $\mu$ , LE- $\mu^+$ ), 使用常规的低效率的低温慢化方法也可得与 PSI 上的 LE- $\mu^+$  可比拟的  $10^4/s$ <sup>[2, 15]</sup>。

许文贞<sup>[16]</sup>设计了常规四极磁铁收集和传输表面  $\mu$  源装置, 利用常规四极磁铁收集质子打靶后产生的表面  $\mu$ , 最终实验端的表面  $\mu$  通量达  $10^5 \sim 10^6/s$ , 相对

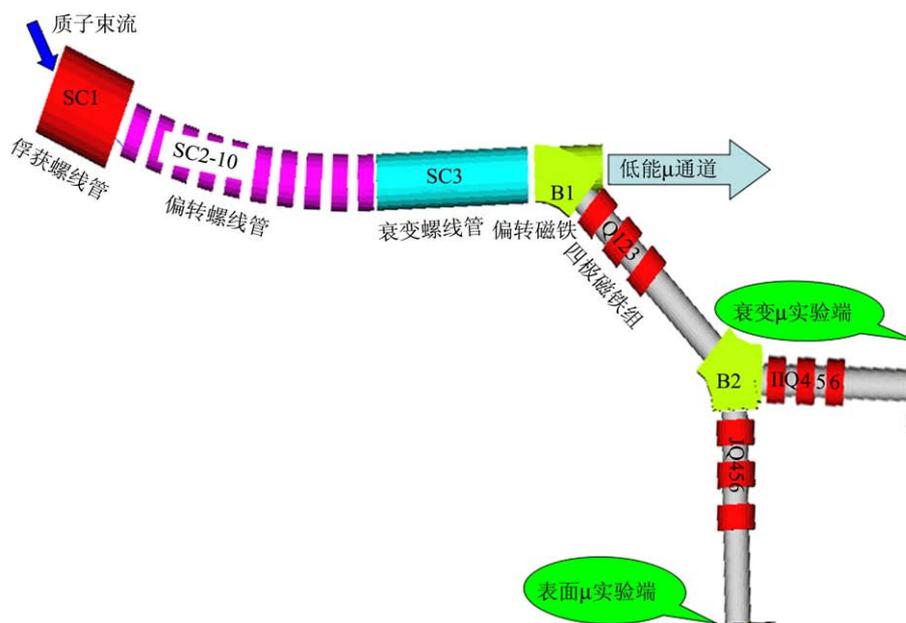


图 6 (在线彩图) 超导螺线管收集传输  $\mu$  装置的初步布局

于国际上的  $\mu$  子通量是比较低的, 比较了常规四极磁铁收集和超导螺线管收集的表面  $\mu$  的 4D 相空间体积和束流强度见表 2, 比较两种束线收集到的表面  $\mu$ , 相同束流比例的情况下, 超导螺线管收集到的表面  $\mu$

的通量要高两个量级, 表明用超导螺线管收集次级粒子有明显的优势, 利用超导螺线管收集的表面  $\mu$  源的角散比较大, 所以用超导螺线管收集的粒子需要更好的聚焦, 才能达到实验端面的小束斑小角散需求。

表 2 常规输运线和超导螺线管输运线收集的表面  $\mu$  的 4D 相空间体积和束流强度比较

束流比例 (%×%)	超导螺线管输运		常规磁铁输运	
	4D vol/ $(\pi^2\text{mm}^2\cdot\text{mrad}^2)$	束流强度/ $(\mu^+/s)$	4D vol/ $(\pi^2\text{mm}^2\cdot\text{mrad}^2)$	束流强度/ $(\mu^+/s)$
10×10	$1.49 \times 10^8$	$1.97 \times 10^7$	$7.74 \times 10^5$	$1.76 \times 10^5$
30×30	$4.14 \times 10^8$	$2.00 \times 10^8$	$8.45 \times 10^6$	$1.65 \times 10^6$
50×50	$7.04 \times 10^8$	$4.03 \times 10^8$	$3.27 \times 10^7$	$5.07 \times 10^6$
85×85	$1.18 \times 10^9$	$1.06 \times 10^9$	$5.40 \times 10^8$	$1.44 \times 10^7$

### 3 经过衰变螺线管后的粒子相空间分布

由超导螺线管收集的表面  $\mu$ , 经过传输螺线管和衰变螺线管的聚焦和输运后, 得到表面  $\mu$  的相空间分布如图 7 所示。其中用相椭圆拟合方法计算得束流的束核和 80% 束流比例的 Courant-Snyder 参数<sup>[12]</sup>、发

射度  $\epsilon_{\text{RMS}}$  和束流强度见表 3, 对比表 2 可见, 偏转螺线管和衰变螺线管对束流的损失极小, 经过衰变螺线管的束流的束核通量仍能达  $10^8/s$ 。对束流的相空间也有一定的约束, 但束流的发射度仍然较大, 将表 3 中计算的束流的参数当成初始源可以进一步进行寻优模拟得到我们所需的束斑。

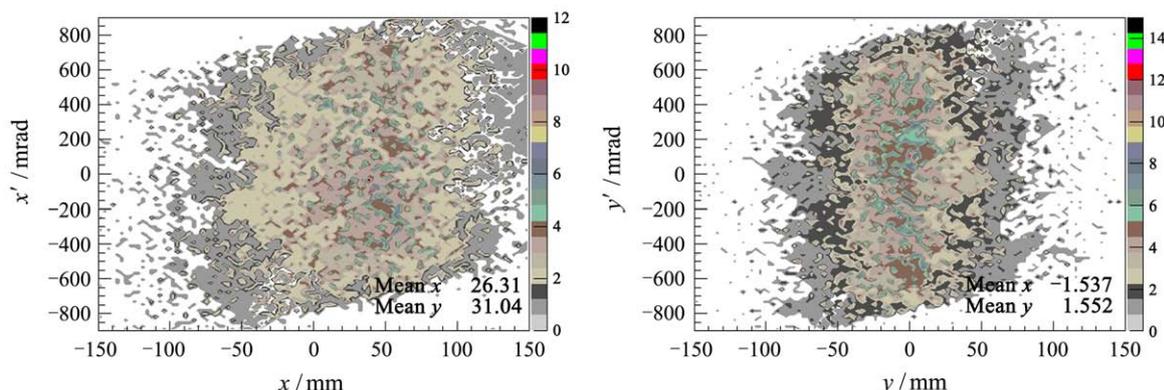


图 7 (在线彩图) 衰变螺线管终端  $x-x'$  和  $y-y'$  平面内的相椭圆示意图

表 3 衰变螺线管出来的表面  $\mu$  的 C-S 参数、束流发射度和束流强度

相平面	类型	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\epsilon_{\text{RMS}}/(\pi\text{mm}\cdot\text{mrad})$	束流强度/ $(\mu^+/s)$
$x-x'$	束核	7.58	-0.29	0.14	12 358	$1.67 \times 10^8$
	80%	7.75	-0.27	0.14	79 701	$7.93 \times 10^8$
$y-y'$	束核	12.0	0	0.08	7 500	$1.95 \times 10^8$
	80%	14.2	0	0.07	51 000	$7.60 \times 10^8$

### 4 结论与展望

用中国散裂中子源上 4% 的质子束流作为初始的源, 通过 Geant4 和 G4beamline 的蒙特卡罗模拟计算, 确定了最优的石墨靶材、超导螺线管的内径大小和超导螺线管与入射质子束流的夹角, 比较了超导螺

线管与常规收集情况下表面  $\mu$  的束流特征, 发现超导螺线管的组合比常规磁铁组合收集的表面  $\mu$  强度大两个量级。初步给出了超导螺线管收集输运系统的布局图, 计算了通过衰变螺线管之后的表面  $\mu$  的相图, 以及束核的通量, 发现经过衰变螺线管之后表面  $\mu$  束核

通量仍能达  $10^8/s$ , 再经过聚焦可达到我们所需的表面  $\mu$  源的束斑大小。

另外, 收集螺线管的磁场场强和孔径需要作优化设计, 靶的辐射屏蔽的设计等细节性的工作也将会进一步考虑, 用 TRANSPORT 和 TURTLE 等束流光学输运软件优化表面  $\mu$  的聚焦装置布局, 尝试更好的方法在实验端达到最佳的表面  $\mu$  产率。同时所计算的结果也将与 Fluka 等软件计算的结果进行比较, 得到最佳可行的概念布局。

#### 参考文献:

- [1] NAGAMINE K. Introductory Muon Science[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 9.
- [2] PROKSCHA T, MORENZONI E, DEITERS K, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2008, **595**: 317.
- [3] MIYADERA H, NAGAMINE K, SHIMOMURA K, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2006, **569**: 713.
- [4] MIYAKE Y, NISHIYAMA K, KAWAMURA N, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2009, **600**: 22.
- [5] COOK S, D'ARCY R, FUKUDA M, *et al.* Journal of Physics: Conference Series, 2013, **408**(1): 012.
- [6] WEI J, CHEN H S, CHEN Y W, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2009, **600**: 10.
- [7] TANG J Y, FU S N, JING H T, *et al.* Chinese Physics C, 2010, **34**(1): 121.
- [8] JINF H T, MENG C, TANG J Y, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 2012, **684**: 109.
- [9] XU W Z, LIU Y F, YE B J. Plasma Science and Technology, 2012, **14**: 469.
- [10] LIU Yanfen, XU Wenzhen, TAN Zongquan, *et al.* SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica, 2012, **42**(11): 1204. (in Chinese).  
(刘艳芬, 许文贞, 谭宗泉, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2012, **42**(11): 1204.)
- [11] STACHEL J. Proceedings of the International Nuclear Physics Conference, 1987, **2**: 555.
- [12] LIU Zuping. Beam Optics[M]. Hefei, Press of University of Science and Technology of China, 2005, 241. (in Chinese)  
(刘祖平. 束流光学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005: 241.)
- [13] BAKULE P, MORENZONI E. Contemporary Physics, 2004, **45**(3): 203.
- [14] MIYAKE Y, IKEDO Y, SHIMOMURA K, *et al.* Hyperfine Interactions, 2013, **216**: 79.
- [15] PROKSCHA T, MORENZONI E, DEITERS K, *et al.* Physica B, 2006, **374-375**: 460.
- [16] XU Wenzhen. Design of Surface Muon Source Based on Spallation Neutron Source and Study of the Related Simulated Techniques[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013(5): 61. (in Chinese)  
(许文贞. 基于散裂中子源的表面muon源设计及相关模拟技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013(5): 61.)

## Study on a New Large Solid Angle Capture System for Surface Muon Using Superconducting Solenoids

XIAO Ran<sup>1, 2</sup>, LIU Yanfen<sup>1, 2</sup>, XU Wenzhen<sup>1, 3</sup>, TAN Zongquan<sup>1, 2</sup>,  
CHENG Bin<sup>1, 2</sup>, KONG Wei<sup>1, 2</sup>, YE Bangjiao<sup>1, 2</sup>

(1. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics,  
University of Science and Technology of China, Hefei, 230026;

2. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China;

3. Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Institute of Applied Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

**Abstract:** High intense muons are required by many applications in muon science. A large acceptance channel for surface muons was designed at China Spallation Neutron Source (CSNS) using a superconducting solenoid and an internal target, which can provide a large solid angle to collect intense surface muons. Compared to conventional separate target and collection system based on quadrupole magnets, a superconducting solenoid with large aperture can collect two orders larger of surface muons. This device was simulated by Geant4 and G4beamline. By analyzing the surface muon production ratio produced by the process that protons bombard four different materials, we chose the graphite as the target material. Then comparing the intensity of surface muon by different angles between the axis of the capture solenoids and the proton beam line, we proposed the capture and transport solenoid system with higher muon production ratio. Finally, the yield of surface muon at the exit of decay solenoid can be up to  $10^8$ /s.

**Key words:** high intense surface muon; superconducting solenoid; CSNS; GEANT4; beam optics

---

**Received date:** 25 Dec. 2013; **Revised date:** 21 Mar. 2014

**Foundation item:** National Science Foundation of China (11075154); Fundamental Research Funds for the Central Universities (WK2030040035)

**Corresponding author:** YE Bangjiao, E-mail: bjiye@ustc.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>