

LGAD探测器在中国散裂中子源上的应用研究

报告人:<u>郭宇航</u>、李强、李梦朝、梁志均、赵梅、敬罕涛、樊瑞睿、鲍煜等 单 位:中国科学院高能物理研究所

日期:2025/04/18

灵

CONTENT



- 2. 质子能量测量系统研究
- 3. 核数据测量零度角探测器
- 4. 高流强µSR谱仪探测器研究
- 5. 总结

1.1 CSNS束流扩展研究束线

- ▲ 伴生质子束 10~80 MeV
 - **☆**国内强度第二、机时第一
 - ℜ 质子辐照效应、芯片抗辐照加固、医用同位素生产
- ▲ 白光中子束 0~300 MeV
 - **γ** 国内唯一白光中子源
- ▲ 高能质子束 0.8~1.6 GeV
 - γ 国内唯一高能质子源
- ▲ 表面缪子束 4 MeV
 - **γ** 国内唯一可控μ子源
 - **γ** 前沿物理研究、μ子辐照效应、材料分析









PAGE 3

1.2 LGAD探测器



- 基于Low Gain Avalanche Dynode (LGAD)的探测器。
- 为LHC-ATLAS/CMS研发,用于谱仪的端盖粒子探测,高能所已掌握生产技术。
- 物质的量低, 耐辐照, 对γ不敏感, 适合高能带电粒子的时间测量。



参数	耗尽层厚度	信号上升时间	信号宽度	最佳时间分辨率	单像素尺寸	位置分辨率
性能	50µm	~700ps	2~3ns	30 ps	$\sim 1.3 \times 1.3 \ mm^2$	~0.3 mm

1.3 LGAD探测器在CSNS的应用



- 质子能量测量系统研究
 - ▶ 飞行时间法测GeV质子能量

▶1%能量分辨率

- 核数据测量零度角探测器
 - ▶ 测量零度角上的中子-核反应产物
 - ▶ 填补零度角核数据的空白
- 高流强µSR谱仪探测器研究
 - ▶ 测量µ子在磁场中的进动
 - ▶ 显著提升µSR谱仪性能

LGAD

CSNS测试束线

日

CONTENT

1. 研究背景

2. 质子能量测量系统研究

- 3. 核数据测量零度角探测器
- 4. 高流强µSR谱仪探测器研究
- 5. 总结

2.1 高能质子能量测量系统





中国散裂中子源 CSNS

PAGE 7

加速器束流扩展应用组 郭宇航

中国散裂中子源 CSNS



LGAD-2

需求

100 ps @ 40 m

70 ps

参数

飞行时间精度

探测器

时间分辨率

- 测量每一个高能质子能量,能量分辨率好于 1% @ 1.6 GeV。
- 采用LGAD探测器进行高精度飞行时间测量 → 质子能量。



LGAD-1



 $V = \frac{L}{(T_1 - T_2)}$



加速器束流扩展应用组	郭宇航

L = 40 m









 $(7 \times 8) \times 4$

- · 没有合适的ASIC。纯时间测量,不需要位置信息,波形采集&离线数据分析。
- 波形采集的成本∝通道数量,为降低成本,将LGAD多通道并联使用。
- 多像素并联时探测器电容变大,信号变宽、时间分辨率会变差。
- 综合考虑电子学成本和时间分辨能力,将探测器分割成四块。







采样率 带宽		死时间	
6.4 Gsps 2 GHz		最大支持6400 ns无死时间采集	

- 采用**中科采象科技有限公司的PXIe-X1012数据采集板**卡搭建 了快读出电子学系统 (FROS)
- 使用LGAD探测²⁴¹Am产生的信号,信号特征与预期一致。
- FROS系统具备实现LGAD数据采集的能力。



日

CONTENT



3.1 核数据测量与零度角探测器



- 核数据测量中,中子与靶的裂变产物的角分布是重要的测量内容之一。
- •然而由于零度角探测器的缺位, 束流零度方向的核数据不能直接测量。
- 零度角核数据对ADS、中子治疗等研究意义重大!



中国散裂中子源 CSNS



束流实验验证: LGAD探测器具备白光中子源上开展核数据零度角探测的能力



- 采用CSNS back-n的白光中子束打⁶Li靶,产生次级α和T。
- •利用LGAD探测器测量产生的次级粒子,通过飞行时间测量中子能量。
- 根据白光中子能谱数据,测量⁶Li(n,T)α反应截面谱。

3.3 实验仪器与设备









- 实验使用的LGAD探测器附在UCSC 探测器板上。
- 只用了其中一个探测器单元。
- 探测器尺寸1.3mm×1.3mm。
- 数据采用FROS系统进行读取。



3.4 实验结果分析





中国散裂中子源 CSNS

PAGE 15

加速器束流扩展应用组 郭宇航





- · 通过实验,验证了LGAD探测器可用于核数据测量的零度角探测器。
 - ▶ 能承受等效中子通量1.1×10¹⁰的辐照,抗辐照性能满足需求。
 - ▶ 能充分响应MeV能量级的轻裂变碎片,并通过飞行时间法测量中子能量。
 - ✓ 经⁶Li(n,T)α 截面测量实验验证,可用于零度角的截面数据测量。
- LGAD探测器,以其造价便宜,耐辐照,性能稳定,时间分辨性能好的特点,在核数据测量的零度角探测方面,尤其是在中子飞行距离短的中子源上具有优势。
- <u>Y. Guo</u>, M. Li, M. Niu, Z. Liang and R. Fan, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 71, no. 9, pp. 2109-2115, 2024, doi: 10.1109/TNS.2024.3432762.

3.6 CSNS白光中子源上其他半导体探测器应用研究



- SiC、金刚石、氮化硼的(n,lcp)反应零度角探测器研究测试。
- SiC、金刚石、氮化硼探测器在中子束流中的极化效应等研究。
- 探索利用SiC、金刚石探测器开展中子核反应实验研究,在解释星际物质和AGB星¹⁷O丰度异常问题的¹⁷O(n, α)¹⁴O反应截面测量中发挥了重要作用。

[1] Niu M, et al. NIM-A, 1057 (2023):168703.

- [2] Niu M, et al. Diamond and Related Materials, 2024, 145:111112.
- [3] Long Ze, et al. NIM-A, 1056 (2023): 168585.

[4] Long Ze, et al. NIM-A, 1064 (2024): 169326.

[5] Long Ze, et al. NIM-A, 1050 (2023): 168170.



CONTENT

研究背景
 质子能量测量系统研究
 核数据测量零度角探测器
 高流强µSR谱仪探测器研究

5. 总结

4.1 µSR技术背景

- µSR技术是无损检测的重要手段之一。
 - µ子在横向磁场中会发生Larmor进动,µ子自旋方向以固定 频率发生旋转。
 - µ子衰变电子倾向于沿着µ子自旋方向发射。横向探测器上能 够观察到µ子衰变时间的振荡现象。
 - 通过测量µ子衰变振荡频率,可以测量磁场大小,进而推测
 样品的磁学特征。
- CSNS在建的表面缪子源(MELODY) 接近100%极化, 能开展µSR测量。
- MELODY 束流特点:
 - 总流强不高
 - 单发流强很高

探测器要快、小 否则容易事例堆积



参数	值	
μ子频率	1 Hz	
μ子流强	10 ⁵ ~10 ⁶ μ/s	
脉冲宽度	80~100 ns	



4.2 LGAD与µSR技术



- 传统的µSR谱仪采用闪烁体作为 主要探测手段
- 我们认为LGAD探测器具备开展 μSR测量的能力。
- 相比闪烁体的优势:
 - 1. 时间分辨高
 - 2. 空间分辨高
 - 3. 耐辐照、工作稳定
- 是新一代µSR谱仪探测器的选择 之一。
- 本团队于2024年7月在ISIS开展 了束流测试实验。

性能	信号宽度	时间分辨率	最小尺寸
LGAD	2~3 ns	30 ps	$1.3 \times 1.3 \ mm^2$
闪烁体	>30 ns	>1ns	$8 \times 8 mm^2$









- 800 MeV质子打靶产生表面µ+。
- 使用CHRONUS终端的µ子。
 - 3.8 MeV (28 MeV/c)
 - 40 Hz
 - 单/双束团可选
 - 脉宽70 ns
 - 流强实测约2k/pulse
 - 能够提供µSR谱仪运行所需要的实验环境(磁场、极化)

中国散裂中子源 CSNS

4.4 实验目标



• 测量米歇尔电子的侧向分布



 将LGAD放在µSR靶的侧边,如果能测到米歇尔电子,则应能看到µ子 衰变时间的振荡现象。

4.5 探测器









中国散裂中子源 CSNS

4.6 数据结果





- 采用µ子弛豫函数拟合,µ子寿命约2.2 µs,磁场与预期(50 G&100 G)接近。
- 事例率约1~2 Hz or 0.025~0.05 e/pulse @ µ子流强2k/pulse





- •利用ISIS-CHRONUS,开展了实验:
 - · 根据实验数据,尝试分析了µ子寿命和磁场强度,均与预期一致。
 - 根据分析,发现LGAD如工作在MELODY上,谱仪的探测能力有望提升1~2个数量级。
- 综上所述, LGAD探测器具备成为MELODY下一代µSR谱仪探测器的 潜力。
- 相关内容已整理文章,评审中。



加速器束流扩展应用组

- CSNS高能质子束上可实现1%能量分辨的质子能量测量
- CSNS白光中子源上可开展轻核产物的零度角核数据测量
- CSNS表面缪子源上可提高µSR测量能力
- 欢迎各界同侪对我们的工作提出指导、建议、意见。

- 本报告介绍了CSNS束流扩展应用束流上的LGAD 探测器应用研究工作。
- •LGAD探测器在:





郭宇航







承蒙厚爱 感谢倾听 Thanks!