

专题: 关联电子材料与散射谱学

# $\mu$ SR 实验进展与缪子源发展趋势\*

王颖<sup>1)</sup> 艾蕾<sup>1)2)†</sup>

1) (复旦大学物理学系, 应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433)

2) (上海量子科学研究中心, 上海 201315)

(2024 年 7 月 8 日收到; 2024 年 8 月 30 日收到修改稿)

缪子自旋弛豫/旋转技术 (muon spin relaxation/rotation,  $\mu$ SR) 是一种高度灵敏的原子尺度磁性探测手段. 随着  $\mu$ SR 技术的不断发展, 其在凝聚态物理研究中愈加重要. 本文简要介绍  $\mu$ SR 技术的优越性和独特性, 概述近期  $\mu$ SR 技术在凝聚态领域的几项重要进展和挑战, 包括镍基超导体  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  和  $(R, \text{Sr})\text{NiO}_2$  的磁性基态研究、笼目晶格超导体  $\text{AV}_3\text{Sb}_5$  ( $A = \text{K}, \text{Rb}$ ) 的电荷密度波研究、 $\text{NaYbSe}_2$  量子自旋液体“海洋”中沉浸的自旋“磁滴”和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  电磁表面附近磁单极子的研究, 并简单阐述了国际上缪子源的建设情况和升级进展.

**关键词:** 缪子自旋弛豫/旋转, 磁性, 超导, 量子自旋液体**PACS:** 76.75.+i, 74.25.-q, 75.30.Fv, 75.10.Kt**DOI:** 10.7498/aps.73.20240940**CSTR:** 32037.14.aps.73.20240940

## 1 引言

缪子作为一个基本粒子, 因为其产生相对容易且易衰变为正电子 (或负电子, 依据其所带电荷) 和中微子, 在粒子物理研究中有非常重要的作用. 自 20 世纪 90 年代以来, 利用缪子的特殊性质, 缪子自旋弛豫/旋转技术 (muon spin relaxation/rotation,  $\mu$ SR) 被广泛地用来研究材料特性, 尤其是微观磁性质, 开展了在凝聚态物理、材料科学、化学、生物大分子等领域的研究<sup>[1]</sup>.

$\mu$ SR 实验中, 自旋极化后的缪子被植入样品中, 在局域磁场的作用下发生自旋的拉莫尔进动, 衰变产生的正电子倾向于沿着缪子自旋的方向出射 (如图 1(a) 所示). 因此, 通过记录百万量级的出射的正电子信号, 可以得到缪子自旋方向随时间的演化, 从而分析得到样品内部的磁场信息. 与其他几种测量材料磁性的技术相比,  $\mu$ SR 具有一定的优

越性、独特性和不可替代性. 首先, 缪子能被注入到各种复杂环境下 (高压、强的电磁场、高温或者极低温、光辐照、RF 脉冲等) 的几乎所有材料 (气体、液体、固体 (包含单晶、多晶和薄膜样品)) 中. 当研究的材料包含能强烈吸收中子的元素时,  $\mu$ SR 技术相比于中子散射技术具有独特的优势. 其次, 作为局域磁性探针, 缪子具有极高的灵敏度, 可探测极低的磁场 ( $\sim 10^{-5}$  T). 由于缪子能够探测材料内部的磁场分布,  $\mu$ SR 技术不仅可以研究长程磁有序, 对无规则磁性或短程序也十分灵敏, 并且是唯一可以获得样品磁性体积占比的技术手段. 最后,  $\mu$ SR 技术在探测动态磁场方面, 对频率有很宽的灵敏范围 ( $10^4$ — $10^{12}$  Hz), 与其他技术手段互补 (见图 1(b)).

在凝聚态物理研究领域,  $\mu$ SR 技术已被广泛应用于磁性、超导、自旋阻挫、巨磁阻、重费米子等体系; 在近年来重新成为热点的高温超导材料方面,  $\mu$ SR 的研究成果格外令人瞩目<sup>[2]</sup>. 本文将

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12174065) 和上海市市级科技重大专项 (批准号: 2019SHZDZX01) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: leishu@fudan.edu.cn

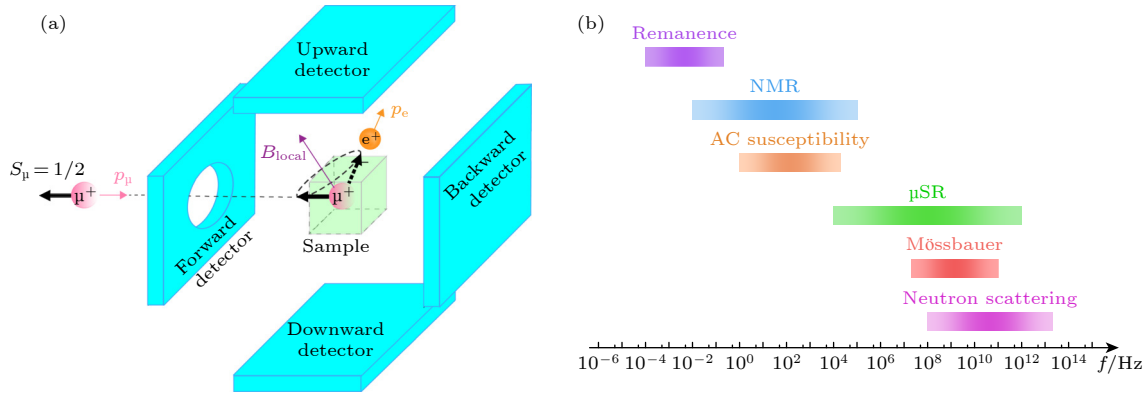


图 1 (a)  $\mu$ SR 技术的原理示意图; (b)  $\mu$ SR 技术填补了其他手段测量动态磁场的频率空白

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the principle of  $\mu$ SR technique; (b)  $\mu$ SR technique fills in the gap of magnetic fluctuation rate between multiple techniques.

举例概述近期凝聚态领域几项重要的  $\mu$ SR 实验进展, 随后结合国际上缪子源的建设与升级情况, 对我国建设高水平缪子源的重要性和紧迫性进行了讨论。

## 2 镍基超导体的磁性基态研究

自从 1986 年铜氧化物高温超导体问世以来<sup>[3]</sup>, 理解非常规超导机理, 进而发现更高超导转变温度的材料一直是凝聚态物理学中最具挑战性的问题之一。近期, 在与铜氧化物具有相似的晶体和电子结构的镍氧化物  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  中, 我国科研工作者在超过 14 GPa 压力下观察到了超导电性<sup>[4,5]</sup>, 其超导转变温度约为 80 K ( $-193\text{ }^\circ\text{C}$ ), 是目前已知的第二个达到液氮温区的非常规超导体系。

高温超导电性往往发生在长程反铁磁有序附近, 如铜氧化物与铁基 122 高温超导体中<sup>[6]</sup>, 均具有反铁磁磁性基态。因此, 对于  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  这一新发现的高温超导体, 研究奇异超导电性的关键是探索其是否也具有磁性基态。

常压零场  $\mu$ SR 实验对  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  多晶的实验结果显示缪子不对称性参数谱在 154 K 以下出现了明显的振荡衰减(图 2(a))<sup>[7]</sup>, 该缪子自旋去极化方程表明样品内存在公度自旋密度波的静态磁性有序。不同温度时的振荡频率给出序参量相图。进一步地, 横场实验说明样品中磁性部分的体积百分比接近 100%, 样品具有本征磁性。课题组结合第一性原理计算, 对材料内部自旋分布进行研究, 发现实验数据支持电荷与自旋密度波共存形式。同时, 也发现了样品中普遍存在的氧缺位会影响样品内部的磁性, 从而为  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  高压下超导体积百

分比较小提供了可能的解释。

此项研究揭示了镍氧化物高温超导体  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  自旋密度波态的磁性基态, 为阐明镍氧化物高温超导机理提供了重要线索。

此前, 对于首个被发现的镍基超导体系——无限层镍氧超导体  $(R, \text{Sr})\text{NiO}_2$ , 由于其块材不超导, 故需要使用低能  $\mu$ SR 技术研究薄膜单晶样品 ( $R = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}$ ), 其结果支持磁性与超导态的共存, 且表明该磁性主要源于镍的亚晶格<sup>[8]</sup>。由于其薄膜样品的厚度较薄(不超过 10 nm), 且难以完全消除杂质, 低能  $\mu$ SR 实验暂时不能对其超导能隙对称性进行探测; 在  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  方面,  $\mu$ SR 技术受到较低加压压力上限的掣肘, 不能在  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  的超导态下进行实验, 因此无法探测其超导能隙对称性。未来, 随着  $\mu$ SR 技术的不断发展, 希望通过创新加压方案、寻找其他加压材料, 进一步提高其加压上限。

## 3 笼目晶格超导体中的电荷密度波

笼目晶格因其特殊的电子结构而天然地具有狄拉克节点、平带和范霍夫奇点, 因而能够引入拓扑、磁性、失稳长程序等诸多奇异的性质<sup>[9]</sup>。2019 年, 新型准二维笼目结构拓扑超导体  $\text{AV}_3\text{Sb}_5$  ( $A = \text{K}, \text{Rb}, \text{Cs}$ ) 被发现<sup>[10]</sup>, 为研究笼目超导材料中因几何组控、拓扑性、强关联和超导之间的相互作用而涌现出的丰富量子现象提供了极佳的平台。

常压  $\mu$ SR 实验首次在  $\text{KV}_3\text{Sb}_5$  和  $\text{RbV}_3\text{Sb}_5$  单晶中发现时间反演对称破缺的电荷序态(见图 2(b))<sup>[11]</sup>, 符合扫描隧道显微镜实验观察到的手性电荷序现象<sup>[12]</sup>。作为极少数可以在加压条件下测量超流密

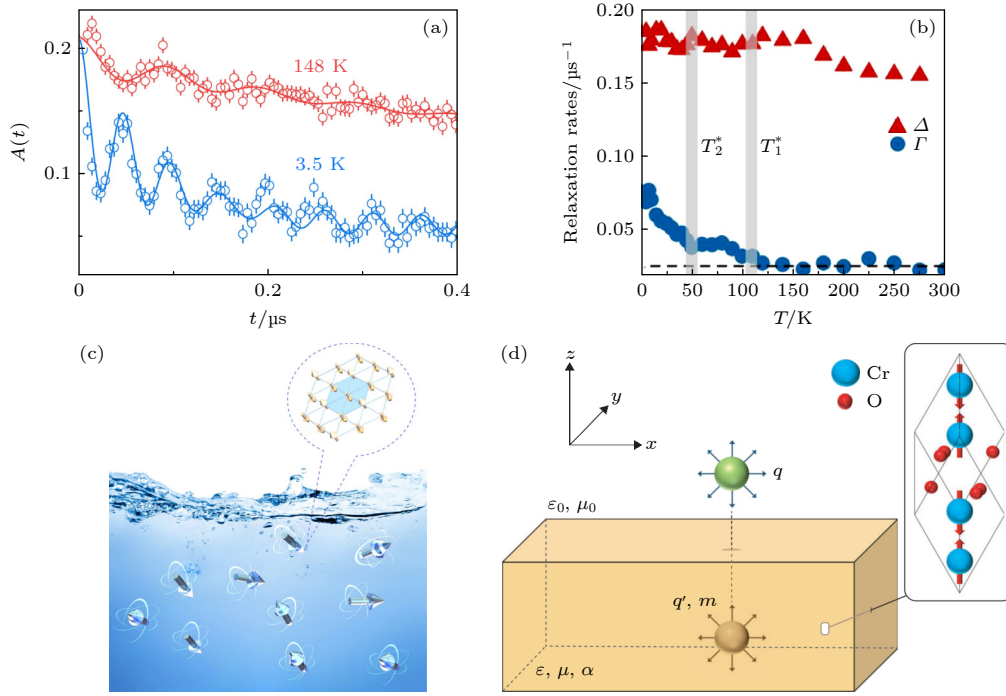


图 2 (a)  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  中的缪子不对称性参数谱在 154 K 以下出现了明显的振荡衰减<sup>[7]</sup>; (b)  $\text{RbV}_3\text{Sb}_5$  中缪子自旋弛豫率  $\Gamma$  在 CDW 转变温度  $T_1^*$  和  $T_2^*$  处明显增强, 表明出现该转变打破时间反演对称<sup>[11]</sup>; (c) 量子自旋液体“海洋”中沉浸的自旋磁滴<sup>[15]</sup>; (d) 磁电材料  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  表面上的单个电荷将诱导出表面下的镜像磁单极子, 这一镜像磁单极子又能在表面之上产生理想的单极磁场<sup>[20]</sup>

Fig. 2. (a) Muon asymmetry spectrum in  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  shows clear oscillations and damping below  $T = 154$  K<sup>[7]</sup>; (b) muon spin relaxation rate  $\Gamma$ , is strongly enhanced below  $T = T_1^*, T_2^*$ , suggesting the time reversal symmetry broken CDW in  $\text{RbV}_3\text{Sb}_5$ <sup>[11]</sup>; (c) magnetic droplets immersed in a sea of quantum spin liquid<sup>[15]</sup>; (d) a single charge above the surface of magnetoelectric materials,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , induces an image monopole beneath the surface, the image monopole then generates an ideal monopolar magnetic field above the surface<sup>[20]</sup>.

度并研究超导能隙对称性的技术手段之一,  $\mu\text{SR}$  实验发现, 随着压力的增大,  $\text{KV}_3\text{Sb}_5$  和  $\text{RbV}_3\text{Sb}_5$  电荷序被抑制, 超流密度则增大, 超导态从节点型逐渐演变为无节点型, 超导态能隙逐渐增大; 达到最佳超导时, 其超导配对态不仅具有完全的能隙, 还自发地破坏了时间反演对称性。

这一研究在笼目晶格超导体  $\text{KV}_3\text{Sb}_5$  和  $\text{RbV}_3\text{Sb}_5$  中首次观察到了压力可调控的节点型超导态与自发时间反演对称破缺电荷序之间的竞争. 该研究在拓扑体系中探索电荷序与超导态的相互作用, 将超导态与拓扑量子物理链接, 推进了拓扑量子物质的前沿研究, 也为探索非常规超导体机制提供了新的视角。

#### 4 量子自旋液体“海洋”中的悬浮磁滴

量子自旋液体 (quantum spin liquid, QSL) 是一种直至零温自旋仍然具有涨落强烈、高度纠缠的无序状态<sup>[13]</sup>. 在实验上, 人们已经发现了多种量

子自旋液体的候选材料, 涵盖了三角晶格、笼目晶格、烧绿石结构等几何阻挫构型, 以及具有竞争性相互作用的磁性系统等. 但非常理想、干净的材料系统尚未被寻获, 也缺少一锤定音的判定性实验或方案. 2017 年, 由稀土离子  $\text{Yb}^{3+}$  构成三角格子的磁性材料  $\text{NaYbSe}_2$  被重新合成和研究<sup>[14]</sup>, 该材料结构相对简单, 能规避诸多候选材料中存在的结构无序, 是一个较好的量子自旋液体候选者。

初步物性测量结果表明其在低温下没有形成磁有序或者磁冻结. 而能够探测极为微弱局域磁场的  $\mu\text{SR}$  实验, 发现低温下系统呈现“二分性”<sup>[15]</sup>: 大量动态自旋和少量静态自旋共存, 其中动态成分即使在最低温时也不存在冻结的趋势. 该实验结果与核磁共振实验一致. 此外, 零场磁比热在低温下呈现线性的温度依赖关系. 这是典型的费米子形成费米面的信号, 而低温热导率的测量却表明该系统中缺乏巡游的、费米子型的磁激发。

综合所有实验结果,  $\text{NaYbSe}_2$  的基态可被比喻为“散布着涨落的磁性颗粒的量子自旋液体海

洋”。样品中的大多数自旋保持着动态无序, 形成量子自旋液体“海洋”; 而少量自旋形成短程亚铁磁有序结构, 如海洋中的冰滴一样缓慢地涨落, 散布在整个体系中 (图 2(c)). 下一步研究计划也许是在“量子海洋”中捞起或者过滤掉这些“冰块”, 从而实现纯粹的量子自旋液体物态. 理论上, 在这些实验的基础上建立量子自旋液体的“状态方程”变成具有实际物理意义的问题. 这为寻找和确定量子自旋液体提供了一条新的科学探索路线.

## 5 低能 $\mu$ SR 技术探测磁单极子

与电荷量子化相对应地, 磁单极子是电磁理论中极为重要的概念. 磁单极子存在的证实, 将为电与磁之间的对称性提供关键依据<sup>[16]</sup>. 然而, 对磁单极子的探索极具挑战性. 迄今为止, 研究者们做出了许多努力, 包括使用宇宙射线探测器搜索以及用对撞机实验尝试产生磁单极子等, 但仍未确证磁单极子的存在<sup>[17]</sup>. 此前, 理论计算在线性磁电材料中预言了类磁单极子的现象: 磁电表面上的单个电荷将诱导出表面下的镜像磁单极子——该镜像磁单极子又能在表面之上产理想单极磁场 (图 2(d))<sup>[18]</sup>. 典型的线性磁电材料  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  具有高度温度依赖的磁电响应<sup>[19]</sup>, 使得通过改变温度来研究单极磁场成为可能, 因而成为研究此种类磁单极子现象的理想材料.

研究人员在厚度为 500 nm 的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  薄膜上覆盖厚度为 150 nm 的固态氮气. 通过调控低能缪子的能量, 使缪子停留在固态氮的不同深度, 从而探测磁电材料表面附近的局域磁场分布<sup>[20]</sup>. 实验结果表明,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  磁电表面附近探测到的磁场分布与理论预测的单极子场一致. 这一工作还探讨了使用其他材料作为缪子停留层, 从而进行变温实验的可能性. 观察该单极场是否存在和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  材料磁电响应一致的温度依赖特性, 能够确认这一单极子场是否为磁电响应诱导产生.

低能  $\mu$ SR 技术使得在实空间探测和研究磁单极子成为可能. 此项研究不仅在线性磁电材料  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  表面附近探测到类磁单极子的单极磁场, 为磁单极子的存在提供了重要证据, 也为模拟和研究磁单极子行为寻找到新的系统和平台. 同时, 这一研究也体现了  $\mu$ SR 技术在基础物理研究中仍然存在着丰富多样的应用可能.

## 6 国际缪子源的建设与升级

国际上,  $\mu$ SR 领域在 2004 年建立了合作机构 ISMS (International Society for MuSR Spectroscopy) 来促进  $\mu$ SR 技术的应用, 至今已经召开了 15 届 MuSR 技术应用大会. 世界上已建成并稳定对用户开放的缪子源有 4 个, 分别是英国卢瑟福·阿普尔顿实验室的 ISIS 中子和缪子源、瑞士保罗谢尔研究所 PSI 的  $\text{S}\mu\text{S}$  源、加拿大国家粒子与核物理实验室 TRIUMF 和日本大型质子加速器设施 J-PARC.

瑞士 PSI 的连续型缪子源  $\text{S}\mu\text{S}$  能够提供多种极端环境, 包括 10 mK 的极低温、高至 9.5 T 的强磁场、最高 2.8 GPa 的压力. 其低能缪子束线 LEM 使用低温慢化技术, 提供能量可调 (0.5—30 keV) 的低能缪子束, 能够调控缪子的植入深度, 以研究 300 nm 以内厚度的薄膜样品<sup>[21]</sup>. 作为连续源, PSI 的缪子束具有较高的信号时间分辨率. PSI 还在尚未完工的灵活高级缪子自旋环境 (flexible advanced MuSR environment, FLAME) 项目中新设计了更加紧凑的探测器系统, 能够将时间分辨率至少提高 5 倍<sup>[22]</sup>.

英国 ISIS 同样能够提供多样的测试环境, 包括 30 mK 的极低温和高达 5 T 的强磁场. 作为脉冲型缪子源, ISIS 的实验效率较高, 但其时间分辨率受到脉冲展宽的影响. ISIS 正在建设的下一代设施 Super MuSR, 计划使用脉冲切束器将每个脉冲的时间展宽减小为原来的 1/10, 将时间分辨率提高 10 倍; Super MuSR 还会将探测器数量提升至 600 个, 将计数率提高 15—20 倍, 大幅提升数据收集速率和统计质量<sup>[23]</sup>.

加拿大 TRIUMF 属于连续型缪子源. 其表面缪子束线 M20 由于可以使用特殊构造的样品托, 能够将实验背景降至几乎为零. TRIUMF 还能够提供 20 mK 的极低温. 目前, TRIUMF 正在建设的衰变缪子束线 M9H, 未来将能够对最高 2.5 GPa 压力下的样品进行  $\mu$ SR 实验. M9H 还将能够在高压 (< 0.6 GPa) 和高温 (< 1000 K) 下研究液体和气体样品, 扩大了  $\mu$ SR 技术的应用范围<sup>[24]</sup>.

日本 J-PARC 提供目前世界上最高流强的脉冲缪子束流. J-PARC 能够提供 50 mK 的极低温, 但目前暂不能提供强磁场或高压的测试条件<sup>[25]</sup>.

表 1  $\mu$ SR 设施的主要参数  
Table 1. Main parameters of  $\mu$ SR facilities.

主要参数	PSI	TRIUMF	ISIS	J-PARC	CSNS
质子功率/MW	1.4	0.07	0.14	1	0.02
表面缪子流强/ $s^{-1}$	$10^7-10^9$	$2 \times 10^6$	$10^7-10^8$	$1.5 \times 10^7$	$10^5$
自旋极化率/%	> 95	> 90	> 90	> 95	95
重复频率/Hz	连续型	连续型	40	25	1-5
不对称性参数 $A_0$	0.3	0.28	0.28	0.25	0.32
计数率/( $M \cdot h^{-1} \cdot cm^{-2}$ )	$\sim 25$	$\sim 15$	$\sim 100^*$	$\sim 55$	$\sim 20$

注: \* 100  $M/(h \cdot cm^2)$  是 ISIS 现有谱仪 EMU 的计数率, 正在改建的 Super-MuSR 将会使计数率提高到约 1400  $M/(h \cdot cm^2)$ .

目前, J-PARC 正在建设超慢缪子  $\mu$ SR 设施, 使用激光共振电离慢化表面缪子. 这一设施由于束流强度较低, 目前仍在调试中, 未来有望向用户开放 [26].

虽然以上 4 个缪子源在不断发展进步, 但国际上  $\mu$ SR 机时一直存在严重稀缺的问题. 随着国际与国内科研人员对  $\mu$ SR 机时的需求逐年增加, 2024 年 3 月, 中国散裂中子源 (China spallation neutron source, CSNS) 的二期建设工程于中国广东东莞启动 [27]. 该工程将包括建设我国首个缪子源 MELODY, 首期将建设一条表面缪子束线和一台  $\mu$ SR 谱仪, 并预留未来建设衰变缪子束线及负缪子束线的能力. 这将弥补中国  $\mu$ SR 探测手段的空白, 推动我国凝聚态物理研究的进一步发展.

此外, 中国科学院近代物理研究所也在讨论依托强流重离子加速器装置 HIAF、加速器驱动嬗变研究装置 CiADS 等大科学装置提供高品质缪子束的可行性; 基于上海光源装置加速器电子的缪子源研究也获准立项; 美国橡树岭国家实验室的散裂中子源 (spallation neutron source, SNS) 和韩国基础和应用物理研究加速器 (research accelerator for basic and applied sciences, RAON) 也正在计划建设缪子束线和  $\mu$ SR 实验终端 [28,29]; 瑞典的欧洲散裂源 (European spallation source, ESS) 是一个类似于美国 SNS 的中子源, 未来也有扩展建设缪子源的可能.

## 7 总结与展望

迄今为止, 缪子自旋弛豫/旋转技术这一高度磁敏感的微观技术手段已经在凝聚态物理中开展了诸多重要的实验. 未来, 随着世界各地  $\mu$ SR 设施的建设和升级,  $\mu$ SR 技术将不断进步, 继续在凝聚态物理、材料科学、化学、生物大分子等领域的研

究中发挥独特的优势.

表 1 列举了目前国际上 4 个缪子源的主要参数以及 CSNS 的目标参数. CSNS 的缪子设施将具有较高的脉冲通量强度和当前世界上最大的探测器阵列粒度——3024 个探测器单元, 能够提供更大的正电子信号计数率, 预计能够达到 76  $M/h$  的计数率. CSNS 未来还有望将束流脉冲频率提升至 5 Hz, 使计数率提高至约 380  $M/h$ , 从而达到更高的实验效率.

目前, 中国散裂中子源规划建设的中国第一个  $\mu$ SR 设施 MELODY, 将填补我国在  $\mu$ SR 设施方面的空白. 希望未来该  $\mu$ SR 设施能够在样品环境、低能缪子测量薄膜样品等方面也对标世界领先的缪子源. 同时, 希望中国科学院近代物理研究所和上海光源也早日建成高品质的缪子束流.

除了本文概述的凝聚态物理领域, 我国的缪子设施建成后,  $\mu$ SR 技术还将在其他方面发挥重要作用, 例如在半导体材料方面,  $\mu$ SR 技术能够研究稀磁半导体材料的磁有序态和磁动力学, 得到磁有序相的体积分数和微观磁结构 [30], 有望推动半导体技术的发展; 在储能材料中,  $\mu$ SR 技术可以探测电荷载流子的扩散行为, 研究电池的界面电性及缺陷与杂质对能量存储的影响 [31], 帮助理解材料的储能机制. 此外, 缪子 X 射线元素探测技术是一种非破坏性的化学分析手段, 能够定量地得到样品不同深度的元素组成, 希望国内建设的缪子源未来也能够推动该技术的发展.

## 参考文献

- [1] Karlsson E B 2022 *Eur. Phys. J. H* **47** 4
- [2] Shu L, Ni X J, Pan Z W 2021 *Physics* **50** 257 [姜蕾, 倪晓杰, 潘子文 2021 物理 **50** 257]
- [3] Bednorz J G, Muller K A 1986 *Z. Phys. B Condens. Mat.* **64** 189

- [4] Sun H L, Huo M W, Hu X W, Li J Y, Liu Z J, Han Y F, Tang L Y, Mao Z Q, Yang P T, Wang B S, Cheng J G, Yao D X, Zhang G M, Wang M 2023 *Nature* **621** 493
- [5] Zhang Y N, Su D J, Huang Y E, Shan Z Y, Sun H L, Huo M W, Ye K X, Zhang J W, Yang Z H, Xu Y K, Su Y, Li R, Smidman M, Wang M, Jiao L, Yuan H Q 2024 *Nat. Phys.* **20** 1269
- [6] Tohyama T 2012 *Jpn. J. Appl. Phys.* **51** 10004
- [7] Chen K W, Liu X Q, Jiao J C, Zou M Y, Jiang C Y, Li X, Luo Y X, Wu Q, Zhang N Y, Guo Y F, Shu L 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 256503
- [8] Fowlie J, Hadjimichael M, Martins M M, Li D, Osada M, Wang B Y, Lee K, Lee Y, Salman Z, Prokscha T, Triscone J, Hwang H Y, Suter A 2022 *Nat. Phys.* **18** 1043
- [9] Yin J X, Lian B, Hasan M Z 2022 *Nature* **612** 647
- [10] Ortiz B R, Gomes L C, Morey J R, Winiarski M, Bordelon M, Mangum J S, Oswald L, Rodriguez-Rivera J A, Neilson J R, Wilson S D, Ertekin E, McQueen T M, Toberer E S 2019 *Phys. Rev. Mater.* **3** 94407
- [11] Guguchia Z, Mielke C, Das D, Gupta R, Yin J X, Liu H, Yin Q, Christensen M H, Tu Z, Gong C, Shumiya N, Hossain M S, Gamsakhurdashvili T, Elender M, Dai P, Amato A, Shi Y, Lei H C, Fernandes R M, Hasan M Z, Luetkens H, Khasanov R 2023 *Nat. Commun.* **14** 153
- [12] Shumiya N, Hossain M S, Yin J, Jiang Y, Ortiz B R, Liu H, Shi Y, Yin Q, Le H, Zhan S S, Chang G, Zhang Q, Cochran T A, Multer D, Litskevich M, Cheng Z, Yang X P, Guguchia Z, Wilson S D, Hasan M Z 2021 *Phys. Rev. B* **104** 35131
- [13] Anderson P W 1973 *Mater. Res. Bull.* **8** 153
- [14] Liu W W, Zhang Z, Ji J T, Liu Y X, Li J Q, Wang X Q, Lei H C, Chen G, Zhang Q M 2018 *Chin. Phys. Lett.* **35** 117501
- [15] Zhu Z H, Pan B L, Nie L P, Ni J M, Yang Y X, Chen C S, Jiang C Y, Huang Y Y, Cheng E J, Yu Y J, Miao J J, Hillier A D, Chen X H, Wu T, Zhou Y, Li S Y, Shu L 2023 *Innovation* **4** 100459
- [16] Dirac P 1931 *Proc. R. Soc. London Ser. A-Math. Phys.* **133** 60
- [17] Rajantie A 2016 *Phys. Today* **69** 40
- [18] Fechner M, Spaldin N A, Dzyaloshinskii I E 2014 *Phys. Rev. B* **89** 184415
- [19] Wiegelmann H, Jansen A G M, Wyder P, Rivera J P, Schmid H 1994 *Ferroelectrics* **162** 141
- [20] Meier Q N, Fechner M, Nozaki T, Sahashi M, Salman Z, Prokscha T, Suter A, Schoenherr P, Lilienblum M, Borisov P, Dzyaloshinskii I E, Fiebig M, Luetkens H, Spaldin N A 2019 *Phys. Rev. X* **9** 11011
- [21] SpμS Instruments. <https://www.psi.ch/en/smus/instruments> [2024-09-18]
- [22] FLexible Advanced MuSR Environment (FLAME) Project. <https://www.psi.ch/en/smus/flame-project> [2024-09-18]
- [23] Super-MuSR. <https://www.isis.stfc.ac.uk/Pages/Super-MuSR.aspx> [2024-09-18]
- [24] μSR Beamlines at TRIUMF. <https://cmms.triumf.ca/equip/muSRbeamlines.html> [2024-09-18]
- [25] Muon Instruments at Materials and Life Science Experimental Facility. <https://j-parc.jp/researcher/MatLife/en/instrumentation/ms.html> [2024-09-18]
- [26] Kanda S, Teshima N, Adachi T, Ikedo Y, Miyake Y, Nagatani Y, Nakamura S, Oishi Y, Shimomura K, Strasser P, Umezawa T 2023 *The Ultra-Slow Muon Beamline at J-PARC: Present Status and Future Prospects*2462) (Parma) p12030
- [27] Li Q, Pan Z W, Bao Y, Yang T, Cheng H, Li Y, Hu H, Liang H, Ye B 2023 *Design of the First μSR Spectrometer at China Spallation Neutron Source*2462) (Parma) p12022
- [28] Williams T J, MacDougall G J 2017 *Future Muon Source Possibilities at the SNS* (Oak Ridge, TN (United States): Office of Scientific and Technical Information (OSTI))
- [29] Choi S, Park J, Roh Y J 2015 *J. Korean Phys. Soc.* **66** 762
- [30] Peng Y, Zhao G Q, Deng Z, Jin C Q 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 017503 (in Chinese) [彭毅, 赵国强, 邓正, 靳常青 2024 物理学报 **73** 017503]
- [31] McClelland I, Johnston B, Baker P J, Amores M, Cussen E J, Corr S A (Clarke D R ed) 2020 *Muon Spectroscopy for Investigating Diffusion in Energy Storage Materials*) p371

SPECIAL TOPIC—Correlated electron materials and scattering spectroscopy

## $\mu$ SR experimental progress and trends of developing muon facilities\*

Wang Ying<sup>1)</sup> Shu Lei<sup>1)2)†</sup>

1) (*State Key Laboratory of Surface Physics, Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China*)

2) (*Shanghai Research Center for Quantum Sciences, Shanghai 201315, China*)

( Received 8 July 2024; revised manuscript received 30 August 2024 )

### Abstract

Muon spin relaxation/rotation ( $\mu$ SR) is a highly sensitive technique for investigating magnetic properties on an atomic scale. With the continuous development of this technique, the researches in condensed matter physics have been significantly promoted. Firstly, this article introduces the advantages and uniqueness of  $\mu$ SR technique, followed by several recent progress contributed by  $\mu$ SR in the field of condensed matter physics, including revealing the magnetic ground state of superconducting nickelates  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  and  $(R, \text{Sr})\text{NiO}_2$ , the investigation into the charge density wave in kagome lattice superconductor  $A\text{V}_3\text{Sb}_5$  ( $A = \text{K}, \text{Rb}$ ), identifying the magnetic droplets immersed in a sea of quantum spin liquid ground state in  $\text{NaYbSe}_2$ , and the exploration of magnetic monopole near a magnetoelectric surface of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Finally, this article summarizes the current construction status and upgrade plans of muon facilities in the world.

**Keywords:** muon spin relaxation /rotation, magnetism, superconductivity, quantum spin liquid

**PACS:** 76.75.+i, 74.25.-q, 75.30.Fv, 75.10.Kt

**DOI:** [10.7498/aps.73.20240940](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240940)

**CSTR:** [32037.14.aps.73.20240940](https://cstr.cn/32037.14.aps.73.20240940)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12174065) and the Shanghai Municipal Science and Technology Major Project, China (Grant No. 2019SHZDZX01).

† Corresponding author. E-mail: [leishu@fudan.edu.cn](mailto:leishu@fudan.edu.cn)



## $\mu$ SR实验进展与缪子源发展趋势

王颖 艾蕾

## $\mu$ SR experimental progress and trends of developing muon facilities

Wang Ying Shu Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 197601 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240940

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240940>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

从“魔角”石墨烯到摩尔超晶格量子模拟器

From magic angle twisted bilayer graphene to moiré superlattice quantum simulator

物理学报. 2021, 70(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210476>

三角晶格自旋液体候选材料NaYbSe<sub>2</sub>在高压下的超导转变

Pressure-induced superconductivity in triangular lattice spin liquid candidate NaYbSe<sub>2</sub>

物理学报. 2023, 72(15): 157401 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230730>

钒基笼目超导体

Kagome superconductors

物理学报. 2022, 71(11): 118103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220891>

低维材料中的电荷密度波

Charge density waves in low-dimensional material

物理学报. 2022, 71(12): 127103 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220052>

二维范德瓦耳斯材料的超导物性研究及性能调控

Two-dimensional van der Waals: Characterization and manipulation of superconductivity

物理学报. 2022, 71(18): 187401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220638>

基于缪子离散能量的材料鉴别实验研究

Experimental study on material discrimination based on muon discrete energy

物理学报. 2023, 72(2): 029501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221645>