

缪子源及多学科研究和应用*

唐靖宇[†] 周路平 洪 杨

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2020-02-12 收到

[†] email: tangjy@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20201001

Multidisciplinary research and applications of muon sources

TANG Jing-Yu[†] ZHOU Lu-Ping HONG Yang

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

摘 要 缪子作为粒子物理标准模型中基本粒子中的一种, 因其易产生且性质独特, 常被用来作为探针开展从粒子物理研究到基于一种所谓 μ SR (缪子自旋共振、旋转和弛豫的缩写) 技术的多学科研究平台、再到缪束技术的应用等不同领域的科学研究, 因此, 高性能的缪子源是国际上综合性科学研究的重要实验平台。文章介绍缪子的基本性质、缪子束流的产生、主要应用领域、国际缪子源发展现状和趋势、特别是我国缪子源及缪子科学的发展潜力。随着中国散裂中子源实验缪子源的即将建设, 我国缪子科学必将迎来一个极大的发展机遇。

关键词 粒子物理, 凝聚态物理, 缪子源, μ SR 技术, 物质结构, 多学科研究平台

Abstract The muon is one of the fundamental particles in the Standard Model of particle physics. As they are easy to obtain and have very special properties, they are often used as a probe to serve research from particle physics to a multidisciplinary platform based on the so-called μ SR (Muon Spin Resonance, Rotation and Relaxation) techniques, to applications based on muon beam techniques. High-performance muon sources are thus important experimental platforms for comprehensive scientific research. This article presents an overview of the basic properties of the muon, the production of muon beams, their main application fields, the history and status of the international muon sources, and in particular the development potential of the muon facilities and muon science in China. The construction of the Experimental Muon Source at China Spallation Neutron Source which will be completed in the next few years will certainly usher in a great opportunity for the development of muon science in China.

Keywords particle physics, condensed matter physics, muon source, μ SR technique, structure of matter, multidisciplinary research platform

1 什么是缪子?

缪子(英文为 Muon), 又称 μ 子, 是由两位美国加州理工学院的物理学家 Carl D. Anderson 和 Seth Neddermeyer 于 1936 年发现的^[1]。他们在做宇

宙射线实验时发现了一种前所未有的现象, 带负电荷的粒子在磁场中的偏转与已知的粒子完全不同。假设它带的电荷与电子相同, 在相同速度下其弯转曲率半径要大于电子, 但是比质子要小, 这就意味着这种粒子的质量要比电子大, 却比质子小。因为质量介于质子和电子二者之间, 一开始缪子被叫做 μ 介子, 并且被认为是日本物理学家汤川秀树(H. Yukawa)所预言的强相互作用的介

* 国家自然科学基金(批准号: 11527811, 11235012, 10975150)、科技部国家重点研发计划(批准号: 2017YFE0106100)、中国散裂中子源大科学工程、中美高能物理联合研究基金(KJZD-EW-TZ-M02)资助项目

子，但在随后的实验中发现它不具有强相互作用。随着1947年Pion (π 介子)的发现，以及加速器上的其他实验发现的其他介子，物理学家发现这个所谓的“ μ 介子”与其他介子的性质很不相同，主要表现为以下几点：

(1) π 介子和其他新发现的介子能够参与强相互作用，而 μ 子不能；

(2)新发现的介子在核反应中的行为与 π 介子相似，而与 μ 子不同；

(3) μ 子衰变后同时产生一个中微子和一个反中微子，而介子则只产生一个中微子或一个反中微子。

随着粒子物理标准模型的建立， μ 子最终被归类为轻子中的一种。如图1所示，在粒子物理标准模型(Standard Model, SM)中， μ 子属于第二代轻子，自旋为1/2。 μ 子和其他带电轻子(电子和 τ 子)一样带有一个单位电荷，参与电磁和弱相互作用。与它们相对应的不带电的中微子(ν_e, ν_μ 和 ν_τ ，或它们的反粒子)则只参与弱相互

作用。

μ 子和其反粒子分别带有负电荷(μ^-)或正电荷(μ^+)， μ 子的静止质量约为 $106 \text{ MeV}/c^2$ ，介于电子和质子之间(电子质量约为 $0.511 \text{ MeV}/c^2$ ，质子质量约为 $938 \text{ MeV}/c^2$)，即比电子重约207倍，因此经常被称为重电子。 μ 子与电子和质子的基本性质的比较见表1。 μ 子是不稳定的粒子，会自己衰变成其他粒子，静止时平均衰变寿命为 $2.2 \mu\text{s}$ ，这个时间尺度非常特别，在不稳定粒子的寿命中仅比中子短^[2]，是它在应用中的重要优势。

$\mu^+(\mu^-)$ 通常自发衰变成一个正电子(电子)和一对中微子—反中微子，如图2(a)所示。下面以 μ^+ 为例子，其衰变方程及其分支比见(1)式，可看出其衰变成正电子、电子中微子和反 μ 中微子的概率最高，接近100%，其他的三种衰变分支比很小。第4个方程描述的 μ 子稀有衰变是不遵守轻子味对称性的，即标准模型预言其不存在，现代粒子物理实验正试图找到这样的事例来探寻带电轻子味破坏过程^[3]，从而发现超出标准模型的新物理。即使存在这样的过程，它的几率也极小^[4]，因此该类实验需要束流强度非常高的 μ 子源和精细的实验安排。

$$\begin{cases} \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu, \sim 100\%, \\ \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + \gamma, (1.4 \pm 0.4) \times 10^{-2}, \\ \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu + e^+ + e^-, (3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}, \\ \mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma, < 5.7 \times 10^{-13}. \end{cases} \quad (1)$$

自然界中的 μ 子主要由 π 介子在高层大气中衰变产生，如图3所示，当宇宙射线中的质子或离子撞击高层大气中的原子核时，就会产生 π 介子，后者在相对短的距离里衰变成 μ 子和 μ 中微子。从地球上看来，尽管 μ 子的静止寿命对应的平均衰变距离仅约660 m，但由于相对论效应延长了高能 μ 子的寿命，它们仍然可以到达地面，到达地表的 μ 子能量高，有极高的穿透性。人工产生的 μ 子通常称为 μ 子源，由加速器提供的高能量质子束或离子束打靶产生，这部分内容将在第3节具体介绍。

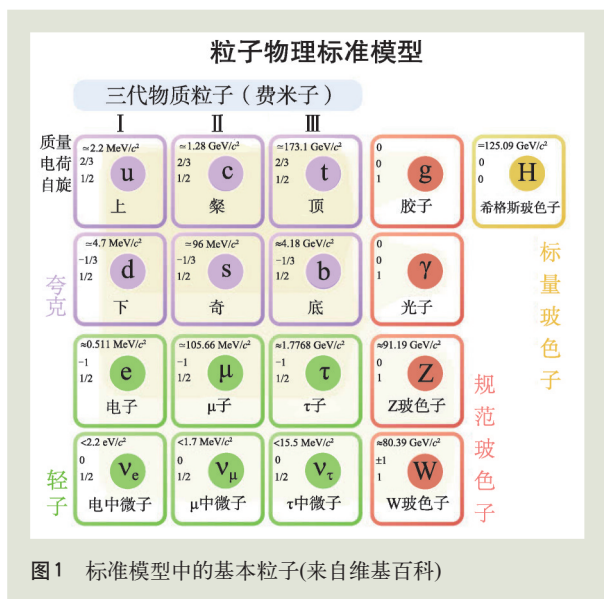


图1 标准模型中的基本粒子(来自维基百科)

表1 μ 子、电子和质子基本性质的比较

粒子	电荷	自旋	质量/(MeV/c^2)	磁矩	旋磁比/(kHz/G)	寿命/ μs
e	$\pm e$	1/2	0.51	657	2800	∞
μ	$\pm e$	1/2	105.7	3.18	13.5	2.2
p	$\pm e$	1/2	938	1	4.26	∞

2 利用缪子和缪束流开展的研究和应用

2.1 缪子的特性

μ^+ 衰变是一个三体衰变过程，出射正电子的能量是与在三体衰变中的各粒子动量分布相关的。弱相互作用中的宇称不守恒导致了正电子发射方向倾向于朝着 μ^+ 衰变时的自旋方向，其实验是当年作为李政道—杨振宁提出的弱相互作用宇称不守恒理论^[5-6]的重要验证^[7]，也是本文后面要介绍的 μ SR应用重要出发点。发射正电子的角分布如图3(b)所示，正电子的空间角分布概率为

$$\begin{aligned} \frac{d^2W}{dx d\cos\theta} &= \frac{1}{\tau_\mu} x^2 (3-2x) \left(1 + \frac{2x-1}{3-2x} \cos\theta \right) \\ &= \frac{1}{\tau_\mu} \frac{E(x)}{2} [1 + a(x)\cos\theta] \quad , \quad (2) \end{aligned}$$

其中 $x = E/E_{\max}$, $E_{\max} = 52.83 \text{ MeV}$, θ 是 μ^+ 自旋与正电子发射方向的夹角, $a(x)$ 是由弱衰变机制确定的本征非对称因子。方程(2)也可以简化为: $W(\theta) = 1 + a \cos\theta$ 。当正电子能量为最高值(52.83 MeV)时, 非对称因子 $a(x) = 1$, 即正电子全部沿 μ^+ 自旋方向发射; 当能量为 $E_{\max}/2$, 非对称因子为0, 即正电子发射为各向同性分布。理论上, a 的平均值是 $1/3$, 由实验测量为 $|a| \geq 0.325 \pm 0.015$ ^[8]。通常在实验中, 能量非常低的正电子穿不过样品与探测器之间的材料, 不能到达探测器; 还有一些正电子会被样品测量环境中的磁场偏离, 因此较高能的正电子更容易被探测到。总的来说, 通过测量正电子的空间分布, 可以确定初始 μ^+ 的自旋方向。正是正电子各向异性的发射特性构成了 μ SR(Muon Spin Rotation, Resonance and Relaxation)应用中探测技术的基础^[9]。

因为缪子的相对寿命较长, 在介质中, μ^+ 容易与电子结合形成缪子偶素(Muonium, 简称Mu), Mu与氢原子拥有几乎相同的原子半径和电离能, 但质量却只有氢原子的1/9。而 μ^- 常与介质中的原子发生作用, 通过取代一个电子形成缪子原子(Muonic atom)^[10]。缪子偶素和缪子原子的独特性质都有很重要的应用, 将在第2.2节和第2.3

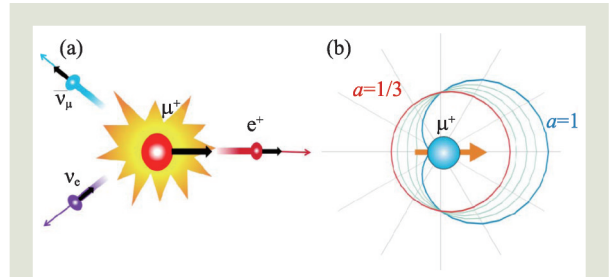


图2 μ^+ 的衰变示意图(a)和出射正电子的角分布(b)

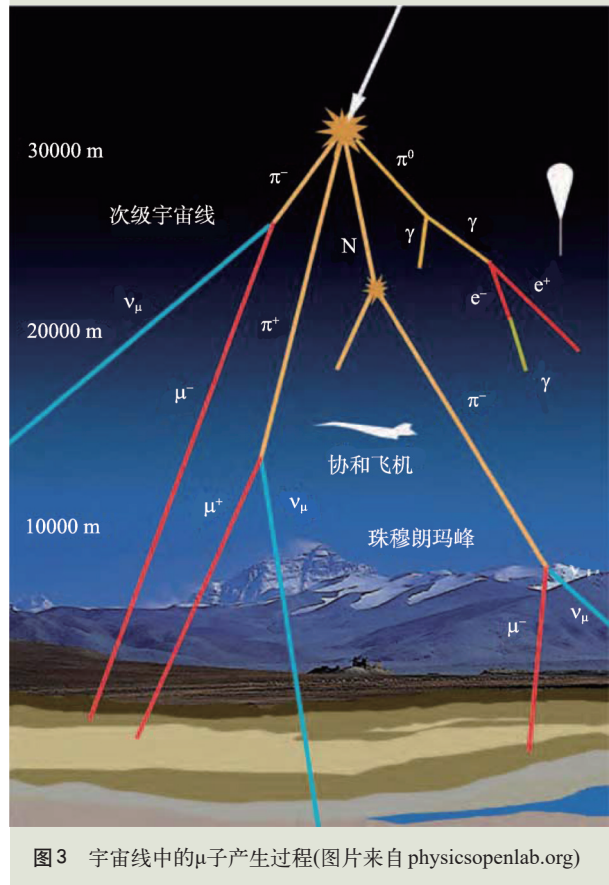


图3 宇宙线中的 μ 子产生过程(图片来自 physicsopenlab.org)

节中介绍。

国际上将所有利用缪子开展的科学研究统称为缪子科学^[10]。到目前为止, 只有两种来源的 μ 子可供利用, 即加速器产生的 μ 子和宇宙射线 μ 子。加速器产生的 μ 子是高强度(单位时间内的粒子数多)和低能量的, 而且可以通过束流输运线进行灵活地传输, 通常称为缪子源或缪束。宇宙线 μ 子强度低但能量高, 且无产生成本。

从应用上看, 加速器产生的 μ 子能量较低, 停在从 μm 到 mm 厚的靶材料内后衰变, 可通过 μ SR方法进行凝聚态物质的结构和动力学研究; 得益

于超慢 μ 子技术的发展,亚微米厚的材料表面或介面现在成为 μ SR研究的对象。另一方面,宇宙线 μ 子尽管较稀少,现也有将宇宙射线 μ 子用于测量大型的地质物体(例如火山)或人工物体(如核反应堆、陵墓)的密度和长度,以进行其内部结构的研究。下面对基于 μ 子的主要研究和应用方向做简单的介绍。

2.2 在粒子物理与核物理中的应用

当前, μ 子在粒子物理中的热点应用主要集中在轻子领域寻找超出标准模型的证据,一种途径是通过稀有衰变事例的寻找,另一种则是测量缪子的反常磁矩。此外,利用强流 μ 束衰变产生的中微子束开展中微子实验非常有吸引力,国际上自1980年代开始,就在进行中微子工厂的设计研究^[11],但其涉及的加速器技术极为复杂和造价昂贵,近期内没有实施计划;我国也提出了一个基于缪子衰变的中基线中微子振荡实验方案(MOMENT)^[12]。与中微子工厂有相似技术要求的、并长期作为孪生项目一起研究的是缪子对撞机^[13],一直是未来粒子物理能量前沿研究的候选装置之一。 μ 子在核物理中的应用主要有利用缪子原子测量原子精细结构,或者利用 μ 子—质子散射测量质子半径^[14, 15]。限于篇幅,本文将只介绍缪子稀有衰变的实验。

μ 子的最主要衰变模式(几乎是100%)是电子加一对中微子(或它们的反粒子),见公式(1)中的第1式。除此以外,第2式和第3式的衰变道也被观测到,但分支比相当低。缪子的其他衰变模式都是超稀有衰变,几率更是非常小,但正是这些极低几率的衰变可能蕴藏着巨大的物理研究前景。

自SM建立以来,它已被绝大多数实验所验

表2 国际上正在开展的 μ 子稀有衰变测量实验

实验室	实验名	反应类型
PSI	Mu3e	$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$
PSI	MEG II	$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$
J-PARC	COMET	$\mu^- N \rightarrow e^- N$
FNAL	Mu2e	$\mu^- N \rightarrow e^- N$

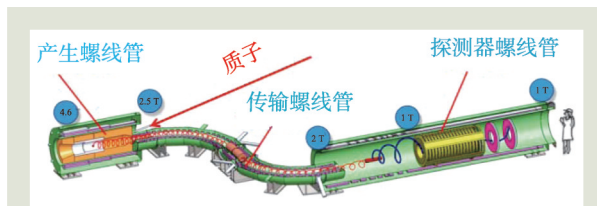


图4 费米实验室 Mu2e 实验示意图

证,但是它不能解释中微子存在微小的质量,也不能解释暗物质的起源以及电磁—弱作用能标和普朗克能标之间的巨大差距。以国际上目前的技术能力建造大大超过LHC的对撞机去实现对超SM新物理的直接探测需要的经费代价极高,但是通过寻找稀有衰变通道的实验代价要低得多。比如,人们已经寻找了超过半个世纪的无中微子缪子衰变,即缪子直接衰变为正电子和 γ ($\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$),在预测中微子质量为零的SM中,因为轻子味守恒,这个反应是严格禁戒的。然而,随着中微子振荡的发现,即使考虑对SM做中微子微小质量的修正,这个反应的分支比仍远小于 10^{-50} ^[16],而在超对称理论等SM之后的候选理论中,大都预言了现实可探测的分支比。因此,类似 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$ 的带电轻子味破坏过程,一旦找到,将毫无疑问是新物理的明确证据。目前,国际上有多项基于 μ 子的稀有衰变测量实验,见表2。

这些实验的具体探测原理各有不同,这里以美国费米实验室(FNAL)的Mu2e实验^[17]为例做简单介绍。Mu2e实验装置总长度为28 m,由三个部分组成: μ 子靶和产生螺线管、 μ 束传输螺线管和探测器,如图4所示。从费米实验室质子加速器链中的Recycler Ring引出的8 GeV质子束被传输到 μ 子实验专用的Delivery Ring,然后经过多圈慢引出并传输到 μ 子靶。质子与 μ 子靶(钨材料)相撞产生大量 π 介子和 μ 子,其中的 μ^- 被螺线管磁场俘获后传输到探测器内的由多个薄铝片组成的阻止靶中,被靶核俘获的 μ^- 如果发生特殊衰变道的衰变,则可以由出射的电子能谱测量加以确定。Mu2e预计在2023年运行,在4—5年的取数时间内,其预期灵敏度能达到 8×10^{-17} ,将比以往实验提高4个数量级。

2.3 μ SR 方法在凝聚态和材料科学中的应用

μ SR 技术是物质微观结构和动力学研究的一种重要手段, 通过向待测样品物质中注入自旋极化的 μ 子来研究样品在介观尺度的磁性质和电子性质。因为 μ^- 容易被原子核俘获, μ SR 实验一般采用 μ^+ 。 μ 子通过与介质的电离作用很快停止在样品中, 因拥有自旋磁矩, 它在局域磁场和外磁场的作用下作 Larmor 进动。 μ 子寿命较短, μ^+ 衰变时发射一个正电子和一对中微子(见公式(1)的第 1 式)。除了电离作用被阻止在样品中的某个位置外, μ^+ 还可以通过俘获一个电子形成类似于氢原子的缪子素。缪子素的形成几率同样品中电子密度有关, 而且还会在样品中有迁移, 这个特点也是 μ 子用来研究凝聚态微观特性的重要手段。

如在第 2.1 节介绍的, μ 子衰变是三体衰变, 发射的正电子更倾向于沿 μ 子自旋分布, 见(2)式和图 2(b)。其中本征非对称因子 a 是个重要参数, 是 μ SR 测量的基础, 即可以通过探测衰变产生的正电子分布来确定缪子所在位置磁场的空间分布和随时间变化, 如磁场的涨落和弛豫特性, 以及这些特性随样品环境如温度、外磁场等变化的规律。因为 μ 子的磁矩较大(或旋磁比大), μ SR 技术相对其他磁共振技术(如核磁共振技术), 其非常重要的特点一个是可以探测微小的磁场变化, 如 0.1 G, 另一个是在最高 10 T 的外磁场下进行测量。

目前的 μ SR 实验一般可以分成二类: 横场 μ SR (TF- μ SR) 和纵场 μ SR (LF- μ SR), 它们分别对应于在样品上施加与 μ 子入射方向(μ 子自旋初始方向)垂直的磁场条件(横向磁场)和平行的磁场条件(纵向磁场)。也可以不施加外磁场(零场 μ SR 或 ZF- μ SR), 它可以视为 LF- μ SR

的特殊情况。两种情况下的实验测量布置是不一样的, 如图 5 所示。在 TF- μ SR 实验中, 只需要在侧向放置一个正电子探测器阵列就可以了; 在 LF- μ SR 实验中, 需要在前向和后向各放置一个正电子探测器阵列, 通过比较前后向正电子发射的差别确定非对称性因子。在 μ 子束流为连续束流情况下, 图中的 μ 子探测器(Muon detector)是提供 μ 子衰变的起始时刻, 结束时间由正电子探测器提供, 此时, μ 子衰变的测量是一个个进行的。在 μ 子束流是脉冲的情况下, 通常可以不需要 μ 子探测器, 由打靶质子束流脉冲提供 μ 子衰变起始信号, 此时, 很多 μ 子的衰变测量是同步进行的。对正电子角分布数据进行处理即可以获得非对称因子, 通过 TF- μ SR 和 LF- μ SR 实验获得的非对称性因子分别具有图 6 显示的特征, 前者具有振荡特征, 后者具有随时间弛豫的特征。

此外, 跟 LF- μ SR 相关的实验设置还有 μ ALCR (Muon Avoided Level-Crossing Resonance) 和 μ SE (Muon Spin Echo, 也称为 RF- μ SR)。前者代表在

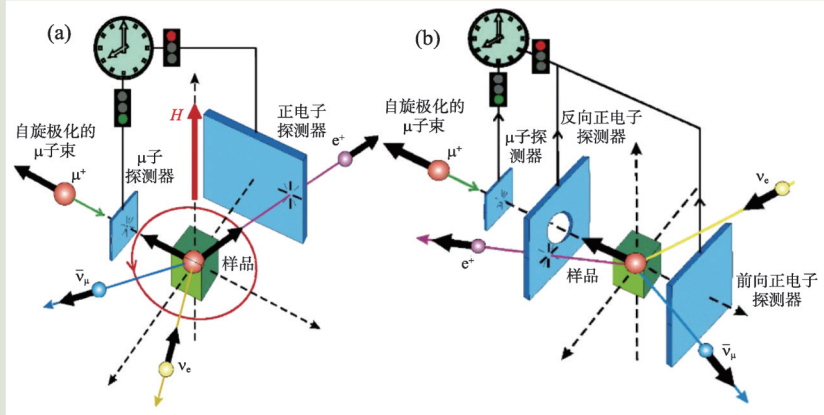


图5 TF- μ SR 测量(a)和 LF- μ SR 测量(b)实验设置^[18]

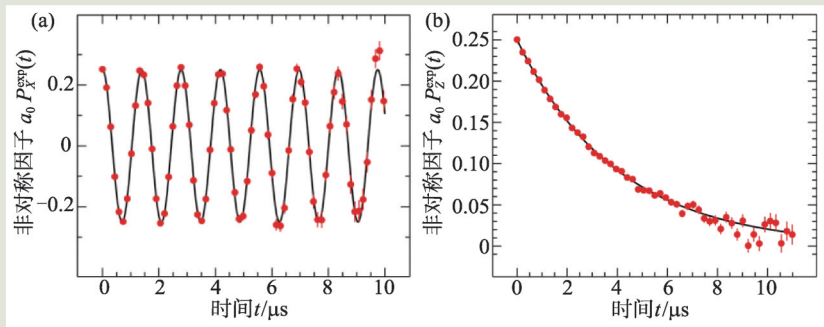


图6 非对称因子随时间的变化: (a) TF- μ SR 和(b) LF- μ SR

施加纵向场的情况下, 缪子自旋的塞曼劈裂正好匹配相邻自旋系统的能级劈裂时, 可以与该系统交换缪子的极化。后者与传统的NMR的自旋回波方法相似, 指在零场或纵场实验条件下, 缪子在时间 τ 内先进动一定相位后使用RF脉冲激励使得缪子自旋快速翻转 180° , 并在又一个 τ 时间后回到最初极化位置, 在需要区分局部磁场的静态和动态部分的贡献时很有效。

μ 子能够被植入各种复杂环境下(高温、高压、强磁场、光辐照、RF激励等)的几乎所有材料(气体、液体、固体)中, 选择相对高能量的 μ 子可以穿过较厚的容器壁和高压环境。在能强烈吸收中子的元素组成的材料研究方面, μ 子相对中子散射方法有特殊的优势。而在样品尺寸的选择上, 一般的表面 μ 束(能量为4.1 MeV)具有几百微米的射程, 经特殊慢化后的keV量级的慢 μ 束则可用在研究几纳米到几百纳米的薄膜上。

总的来说, 由于缪子较大的旋磁比, μ SR被广泛用于磁性材料局部静态以及动态微小磁场的探测, 比如在对于外场敏感的自旋玻璃系统、巨磁电阻、低维系统、重费米子系统、准晶体等系统的研究中, ZF- μ SR相对于其他探针具有明显的优势; 而在超导体的磁相、弱磁性、涡旋相、穿透深度、配对特性等众多现象的研究方面, μ SR技术同样是最有效的研究手段之一; 借助于 μ^+ (通过形成缪子素)的扩散性, 人们可以研究非金属材料中的电子输运现象、导电聚合物局部电荷的输运和影响半导体性质的氢杂质, 也可以利用缪子素代替氢进行化学反应的运动学或者用缪子素形成的自由基进行复杂的气相自由基研究。

尽管 μ SR技术的应用相当丰富, 但是也常常需要与X-ray、ESR、NMR以及中子散射等分析技术进行互补性的研究, 以提供材料内部微观结构和动力学行为更全面的信息。

2.4 基于缪束的其他应用

利用缪子原子X射线(Muonic X-ray)进行样品元素成分的无损检测具有其他分析手段难以提供的优势。 μ^- 子可以注入到较大样品内部的特定位

置(通过选择 μ 子的能量), 与当地的原子结合形成缪子原子, 因为 μ 子的质量是电子的约207倍, 缪子原子的能级要远低于正常原子, 发生能级跃迁时发射的光子能量也远大于普通原子的情况。这个现象最早是我国科学家张文裕发现的^[19]。即使是较轻的元素, 其外层跃迁也是keV量级(即为X射线而不是通常的可见光—真空紫外), 比较容易穿透样品而被外面的X/γ射线探测器探测到。与不同元素的正常原子有自己的特征光谱一样, 缪子原子的能级跃迁也会有自己的特征光谱, 因而更容易进行元素的识别。缪子原子X射线分析有两个典型优势^[20]: 一是可以识别重元素材料包裹的轻元素成分; 二是可以进行内部位置或成像分析。

缪子透射成像作为一种带电粒子成像方法, 特别是利用宇宙射线中穿透能力强的高能量缪子, 现在已被用来进行地面上大尺度物体的内部空间结构探测, 如大型金字塔内部暗室^[21, 22]、火山结构^[23]、核反应堆核燃料物质分布^[24]、集装箱检测^[25]等。今后, 随着缪子源提供的缪束能量增加, 也可以开展缪束成像研究和应用。

μ 子催化聚变(Muon Catalyzed Fusion, μ CF)^[26]是一种特殊的聚变反应, 它利用缪子能与氘或氚形成尺寸非常小的原子的特点, 进一步形成DT μ , 从而增加D-T发生聚变熔合的机会。 μ 子则在其寿命周期内可以被重复利用, 起到了聚变反应的催化作用。这是少数已知催化核聚变反应的方法之一, 它不仅有着常规聚变反应污染产物少的优点, 更重要的是允许核聚变在比热核聚变低得多的温度下进行, 而且因为缪子的产生依赖于加速器, 反应的开始与停止便是完全受控的, 不会有临界的现象。这项研究已经开展了几十年, 人们试图获得正的能量增益, 即聚变释放的能量大于产生 μ 子所需要的能量, 但进展不是很快。

3 国际缪子源发展状况和前景

3.1 缪子源的历史发展

宇宙射线中的缪子密度很低, 在海平面上大约为200个/($m^2 \cdot s$), 而利用缪子的物理实验通常

需要强流缪子束。因此,从缪子被发现的约30年后开始,国际上开始相继建设一些缪子束线装置(缪子源),期望在较小的束斑上获得高强度的束流。较早期的缪子源装置分别建在欧洲的CERN、瑞士的SIN(现属于PSI研究所)、美国LANL实验室和加拿大的TRIUMF,稍晚一些的有日本KEK、英国ISIS和美国BNL,近20年以来有日本J-PARC和大阪大学、美国FNAL,拟建造缪子源的实验室有中国IHEP和韩国RAON,美国ORNL也有可能SNS上建设一台缪子源。

CERN是最早开展缪子束流实验的,曾经于1959—1977年在不同的质子加速器上进行了反常磁矩(通常称为 $g-2$)的测量实验,取得了非常重要的成果^[27, 28]; $g-2$ 实验后来在BNL实验室得以继续(1997—2001年),利用AGS加速器提供的质子束和新的缪子储存实验环,获得了更高的测量精度(约14倍)^[29]。几年前,BNL的实验装置被转移到FNAL,利用FNAL提供更强的缪子束流条件以进一步提高测量精度^[30]。

PSI^[31]、TRIUMF^[32]和LANL^[33]拥有的3台于1970年代建造的强流质子加速器早期都是以粒子物理研究为主的(当时称为介子工厂),后来扩展到基于 μ SR的多学科应用和其他缪束应用。其中,PSI加速器束流功率在几十年中不断得到提升,缪束和谱仪技术不断发展,现在缪子科学中发挥着非常重要的作用;TRIUMF则逐渐以缪子多学科应用为主;而LANL的LAMPF缪子源装置则在1990年代被关停了。

1980年代日本KEK在其PS加速器上建造了一台缪子源——MSL^[34],利用其PS Booster加速器提供的强流质子束来驱动缪子靶,以开展 μ SR应用和其他缪束应用。但在J-PARC建成后,MSL的设备都转移到J-PARC/MUSE上了^[35]。大阪大学RCNP在其400 MeV回旋加

速器上建造的MuSIC原来只是个技术验证装置,以验证利用超导螺线管大幅度提高 μ 子的俘获效率^[36],为J-PARC上的COMET实验作技术准备的,但现在也开始进行 μ SR的应用研究。

英国ISIS不仅是国际第一台高功率散裂中子源,也是第一台高强度脉冲型缪子源^[37],它与后来建造的J-PARC/MUSE是国际上开展 μ SR应用的主要脉冲型缪子源,而PSI和TRIUMF则是主要的连续型缪子源。

当今世界上仍在进行缪子科学研究的缪子源装置有PSI/S μ S、TRIUMF/CMMS、ISIS、FNAL/Muon Campus、J-PARC/MUSE&COMET、RCNP/MuSIC。下面将扼要介绍其中几个多学科研究缪子源装置的基本情况。

3.2 主要缪子源装置介绍

3.2.1 PSI/S μ S

PSI/S μ S拥有世界上最大的连续型缪子束线群,目前同时开展粒子物理实验和多学科研究。该缪子源利用从2台串级的强流质子回旋加速器(HIPA)提供的能量为590 MeV、束流功率为1.4 MW(目前世界上并列最高的质子束功率)的质子束,先后穿过缪子产生靶——M靶(薄石墨靶)和E靶(旋转式厚石墨靶),剩下的质子束用于驱动散裂

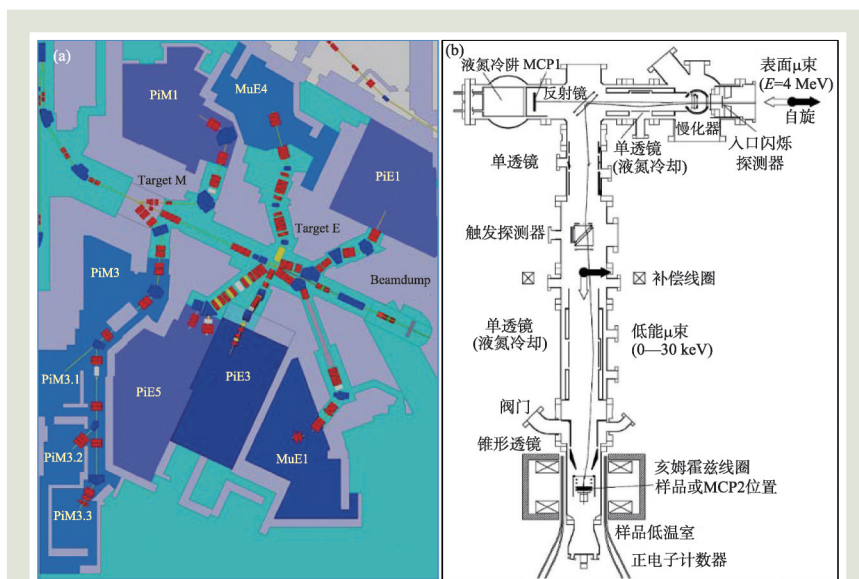


图7 (a) PSI-S μ S缪束线布局图; (b) LEM慢缪束线装置

中子靶(SINQ)。以M靶和E靶为中心向外收集 π 介子和缪子,总计拥有7条 π/μ 束线,如图7(a)所示^[38]。目前,在PiM3、PiE3、PiE1、MuE1和MuE4这5条束线上有5台谱仪运行。这5条 π/μ 束线的能量、流强、极化率等主要参数是不同的,以适应不同研究的需要。其中,基于MuE4的慢缪束装置LEM(Low Energy Muon)是世界上唯一可以正常开展实验研究的低能量缪束装置,如图7(b)所示^[39]。PiE1、PiE5和PiM1等束线收集和传输 π 束流,主要用来进行粒子物理实验。PiM1收集高能量的 π 介子(100—500 MeV/c²)并将其聚焦在很小的束斑(15 mm×10 mm)内,在PiM1上已开展了Mu3E、MUSE等粒子物理实验;PiE1可以收集和传输高强度($\sim 10^7$)的高能 π 介子或者缪子,大部分时间用来进行 μ SR实验,但也穿插进行如

MuCOOL、MuSUN、HyperMu等粒子物理实验;PiE5束线根据收集的 π 介子和缪子能量不同,归一化流强最大可达 $\sim 10^8/\text{mAs}$,PiE5主要进行MEG、Mu3E等实验。

3.2.2 TRIUMF/CMMS

TRIUMF(加拿大粒子加速器中心)的缪子源(属于分子和材料科学研究中心,CMMS)如图8所示^[40],它利用一台能量为520 MeV的强流回旋加速器提供的约70 kW质子束来轰击两个串联的缪子靶T1和T2。在其4条缪子束线中,M13束线已经移除,为开展超冷中子实验腾空间;M9A束线近来进行了升级;M20束线调整为双实验终端,以增加可用的 μ SR实验谱仪。目前,M9A、M15和M20的双终端都可以开展以主要基于表面缪束的 μ SR实验;M9B进行基于衰变缪束厚样品的 μ SR实验;M11束线主要用来进行探测器测试。

3.2.3 ISIS 缪子源

英国RAL实验室的ISIS缪子源^[41]和散裂中子源位于同一个实验大厅内(靶站—谱仪大厅TS1),缪子靶是一个插入式薄石墨靶,以保证约95%的束流功率可以到达下游的散裂中子靶上。两组缪子束线分布在缪子靶的两侧,如图9所示^[42, 43]。其中,位于图上侧的缪束线和3台谱仪,以基于表面缪束的 μ SR应用为主,通过时间分束和空间劈束,3台谱仪可以同时工作;位于图下侧的称为RIKEN-RAL装置,以基于衰变缪束的应用为主,包括 μ^+ 和 μ^- 的应用,4个谱仪位置(端口1—4)可以有2台谱仪通过时间分束同时工作,这一部分由日本理化学研究所(RIKEN)在1990年代投资建设,2019年RIKEN与RAL签订协议,将产权移交给ISIS。

3.2.4 J-PARC/MUSE

J-PARC是由日本高能物理研究所(KEK)和日本原子能研究院(JAEA)共同投资建设的大型质子加速器装置。它拥有2台脉冲型缪子源,分别是以开展多学科研究为主的MUSE和开展粒子物理研究的COMET,前者基于能量为3 GeV、设计打靶束流功率为1 MW的质子束流(采用与ISIS类似的薄靶,与下游的散裂中子源共享从RCS加速器引出的束流),后者利用从MR加速器引出的

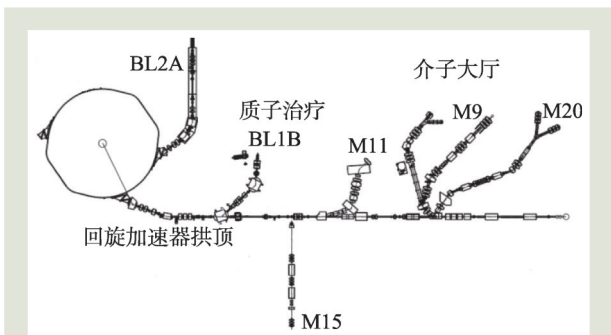


图8 TRIUMF 缪子源布局图

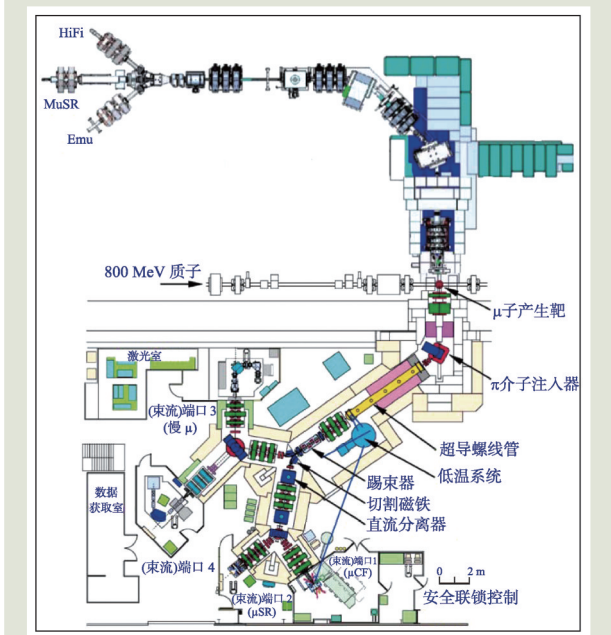


图9 英国RAL的ISIS 缪子源布局图

能量为 8 GeV、设计打靶束流功率为 3.2 kW 的质子束。MUSE 是个总体设计非常复杂的缪子源装置^[44]，与散裂中子源(JSNS)在同一个实验大厅内，同属于材料生命研究装置(MLF)。MUSE 从缪子靶引出 4 条缪束线，每条缪束线又分束为多个分支束线，如图 10 所示，将分阶段建设。其中，D 线收集和传输衰变缪束和表面缪束，有 2 个谱仪终端，以开展 μ SR 实验为主；S 线收集和传输表面缪束，计划为 4 个实验终端(S1 至 S4)提供束流；U 线主要用于发展慢缪或低能缪束和微尺寸缪束，采用激光电离慢化的方法，但技术还不成熟；H 线主要传输高动量的缪束，用于进行粒子物理/核物理实验(可能是用来进行 g-2 实验或缪子催化聚变或带电轻子味破坏实验)^[45]。目前，D1、D2 和 S1 已正常运行并开展实验，U1A 仍在调试中，其他分支束线及其谱仪仍在建设或在未来建设。

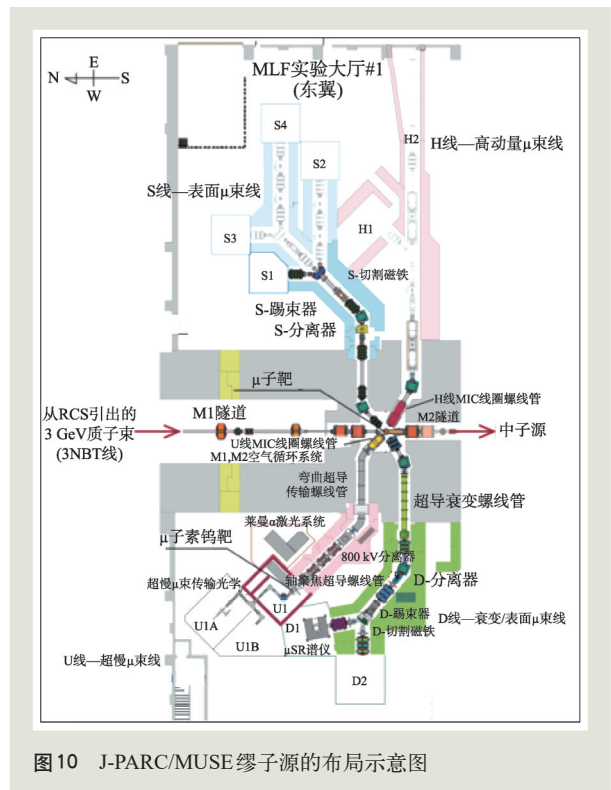


图 10 J-PARC/MUSE 缪子源的布局示意图

3.3 缪子源发展前景

国际上正在运行的几台缪子源在未来几年内都有升级计划。在物质结构的多学科研究方面，主要措施有：增加缪子靶的厚度和增加缪束传输线的接收度，以提高缪束的强度；在 μ SR 谱仪方面采用新的技术以突破连续型 μ SR 谱仪只能对每个 μ 子的衰变进行单独测量的限制，从而大大提高测量计数率；发展缪子慢化技术，并进一步发展微尺寸缪束的技术。在粒子物理研究方面，COMET 和 Mu2e 都有在下一个阶段将质子束流打靶功率从第一阶段的几 kW 提高到几十 kW 的计划，MEG 则通过增加靶厚和将超导螺线管靠近缪子靶以提高缪子产生率和收集效率。这些措施应该可以将缪子稀有衰变测量的精度提高到新的水平。在缪子对撞机方面，除了过去几十年内国际合作研究的基于高功率质子束打靶产生缪束的方案在继续进行研究之外，欧洲科学家近几年还提出了基于高能正电子打靶产生 μ^+/μ^- 对的 LEMMA 方案^[46]。

在新的缪子源装置建设方面，韩国已启动 RAON 加速器装置的建设，其中包括一条缪子束

线，并开展基于 μ SR 技术的研究^[47, 48]；中国将在 CSNS 二期升级工程中建设 EMuS 缪子源^[49]，这将是一台多科学目标的缪子源；美国 ORNL 也一直在考虑未来在 SNS 上建设一台缪子源的可能性^[50]。

4 CSNS 实验缪子源和我国缪子科学的未来发展

4.1 CSNS 缪子源简介

我国过去因为缺少缪子源所依赖的高功率质子加速器，没有条件建设 μ 子源，利用 μ 子束作为实验平台或探针的很多研究工作无法在国内开展。部分国内 μ SR 用户只能通过国际合作在国际上使用目前已有的几台缪子源装置进行实验研究，也有多个单位参加国际上的缪子稀有衰变合作实验(COMET 和 Mu2e)，但仍极大地限制了我国科学家在相关研究领域的发展。随着国内高功率质子加速器的建设，尤其是中国散裂中子源(CSNS)质子束流装置于 2018 年的建成，使得我国在缪子束流装置建设方面迎来了最佳的机遇。自

2007年起, CSNS 就开始考虑今后的发展中包括缪子科学, 并在2008年的CSNS项目建议书中有明确体现, 但受CSNS一期工程经费的限制, 没有建设缪子源平台。但是, CSNS 仍组织力量进行实验型缪子源(EMuS)的设计和关键技术研究^[51-54], 并开展未来用户群的建设。随着CSNS-II升级工程进入了筹建阶段, EMuS 已被明确地纳入了建设内容, 如图11所示。除EMuS外, 中国科学院近代物理研究所也有意在其即将建设的CiADS项目上建设开展粒子物理实验的缪子源。

4.2 EMuS 科学目标

EMuS 总体规划上瞄准国际一流的缪子源装置, 作为覆盖学科领域较广的多学科研究和应用平台。作为CSNS中子散射平台的重要互补, EMuS 将重点开展基于 μ SR技术的物质结构和动

力学研究, 覆盖学科领域非常宽, 如第2节所介绍的。其次, 基于缪束技术的应用, 如缪子原子X射线元素分析和成像、缪束成像、缪束辐照效应等, 也能很快地开展。在粒子物理方向的研究方面, 包括缪子稀有衰变、中微子反应截面测量、缪子特性的精确测量、质子半径测量等, 亟待物理学家提出有吸引力和有国际竞争力的实验方案。从长远看, 缪束慢化并开展低能或超低能缪束的 μ SR实验是非常重要的, 在超低能缪束基础上发展的微束条件也是非常有吸引力的, 但发展这些技术可能需要较长的时间。作为分阶段建设计划, EMuS 需要在实验大厅和布局设计中为今后的发展预留相应的空间。

4.3 EMuS 设计方案

EMuS 拟利用CSNS加速器升级后提供的能量为1.6 GeV、总束流功率500 kW、重复频率为25 Hz的质子束分束1/20或5%来打独立的缪子靶。具体实施方案是对每10个质子脉冲分其两个束团中的一个, 因此, 打缪子靶的质子束流功率为25 kW, 脉冲重复频率为2.5 Hz, 脉冲长度约为50 ns (FWHM), 相应的单脉冲粒子数为 3.9×10^{13} 。因为是独立靶, 打靶后的束流直接被送到废束站, 缪子靶采用厚靶设计, 以获得较高的缪子产额。目前, EMuS 有两个设计方案, 一个是基准方案, 另一个是在初始建设经费不足情况下初期建设的简化方案, 如图12所示。两个方案在布局上是兼容的, 可以在先建成简化方案后, 再升级到基准方案。下面分别介绍这两个方案。

4.3.1 基准方案

4.3.1 基准方案

缪子靶放在超导螺线管中, 同 MuSIC、COMET 和 Mu2e 类似, 但采用前角方向收集, 以获得更高动量的缪束。同时, 缪子靶为石墨材料和长锥形, 4个俘获螺线管提供灵活的靶区磁场分布, 以兼

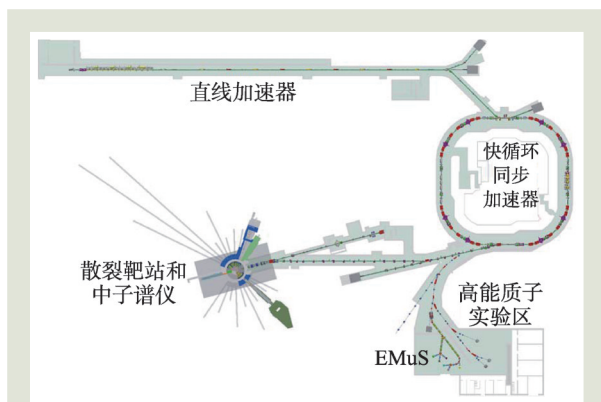


图11 CSNS 布局示意图

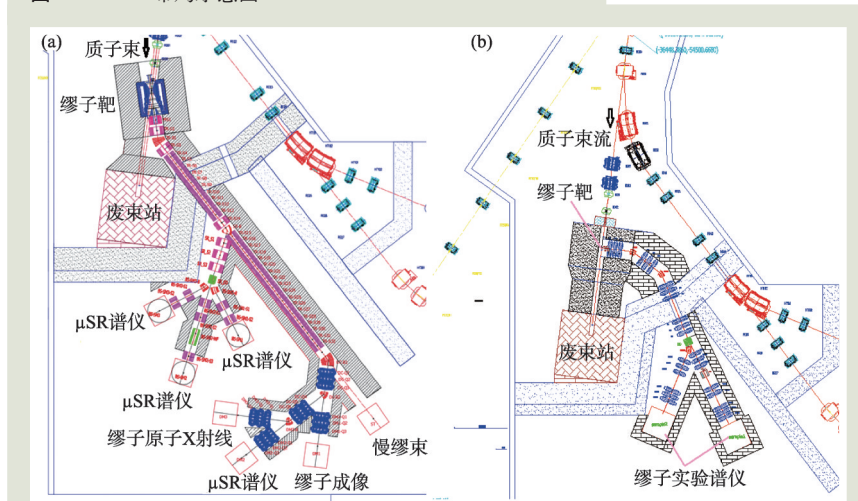


图12 EMuS 基准方案布局(a)和简化方案布局(b)

顾收集高极化的表面缪束和高强度的 π 束, π 束在下游的长直螺线管输运线上衰变从而转换为衰变缪束,甚至提供高强度的中微子束。缪束输运线分为主干线和分支线,主干线全部采用超导螺线管聚焦和超导偏转磁铁,分支线以采用常温的磁四极磁铁聚焦为主,根据情况兼采用常温的螺线管,偏转磁铁采用普通的常温二极磁铁。从主干线分离出3个实验区,一是基于表面缪束的,采用空间劈束同时提供3个 μ SR实验终端开展研究;二是基于衰变缪束的,采用分时供束的方式,以3个实验终端供束分别开展 μ SR实验、Muon X-ray实验和缪束成像的应用;三是用来发展缪束慢化技术和未来开展的相关应用。

另外,在主缪子靶上游约2 m的位置还放置一个薄靶,从垂直方向收集表面缪束,并将束流传输到缪子实验区的上层平台上(图中未显示),那里放置一台 μ SR谱仪。该束线与主干线完全独立,除了提供更多的缪束资源外,该束流提供的表面缪束具有比经过超导螺线管俘获的表面缪束更高的极化率,极化率接近100%。

4.3.2 简化方案

缪子靶采用厚的长方形靶,无收集螺线管,从侧向收集表面缪束,输运线全部采用常温磁铁,采用空间劈束的方法同时提供缪束给两个 μ SR实验终端。

参考文献

- [1] Neddermeyer S H, Anderson C D. *Phys. Rev.*, 1937, 51 (10): 884
- [2] Bardin G, Duclos J, Magnon A *et al.* *Physics Letters B*, 1984, 137(1): 135
- [3] Wilczek F, Zee A. *Physical Review Letters*, 1977, 38(10): 531
- [4] Adam J, Bai X, Baldini A *et al.* *Physical Review Letters*, 2013, 110 (20): 201801
- [5] Lee T D, Yang C N. *Phys. Rev.*, 1956, 104: 254
- [6] Lee T D, Yang C N. *Phys. Rev.*, 1957, 105: 1671
- [7] Garwin R L, Lederman L M, Weinrich M. *Phys. Rev.*, 1957, 105: 1415
- [8] Bardon M, Berley D, Lederman L M. *Physical Review*

4.4 EMuS建设计划

CSNS-II升级工程计划将在2022—2027年间建设,EMuS的简化方案是CSNS-II工程建设内容的一部分,并尽快开展基于缪束的研究和应用,之后,再将其升级到基准方案。如果能通过其他渠道筹集更多的经费,则可以一步到位,直接按照基准方案建设,但不会同时建设所有规划中的谱仪。也可以参照CSNS中子谱仪建设模式,通过与其他单位共建的方式建设部分 μ SR谱仪或其他类型的实验谱仪。

5 总结

基于加速器缪子束流开展的学科覆盖范围宽广的缪子科学在国际上有很大的影响,缪子源及相关实验技术也在不断发展中。基于中国散裂中子源的高功率质子加速器,建设我国自己的缪子源也计划在近期内启动。EMuS缪子源有很独特的设计理念和方案,设计指标先进,建成后将成为国际上非常有竞争力的装置,为我国科学家和工程技术人员提供一个非常优秀的平台。

致谢 感谢EMuS研究合作组所有人员的长期努力。

Letters, 1959, 2(2): 56

- [9] International Society for μ SR Spectroscopy: <http://musr.org/isms/>
- [10] Nagamine K. *Introductory Muon Science*. Cambridge University Press, 2003
- [11] Abrams R J *et al.* (IDS-NF Collaboration). *Interim Design Report No. CERN-ATS-2011-216*, 2011, arXiv: 1112.2853
- [12] Cao J, He M, Hou Z L *et al.* *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2014, 17: 090101
- [13] Delahaye J Pe, Diemoz M, Long K *et al.* *Muon Colliders*. arXiv: 1901.06150
- [14] Pohl R, Antognini A, Nez F *et al.* *Nature*, 2010, 466: 213

- [15] Antognini A, Nez F, Schuhmann K *et al.* *Science*, 2013, 339(6118):417
- [16] Kuno Y, Okada Y. *Reviews of Modern Physics*, 2001, 73(1):151
- [17] Bartoszek L, Barnes E, Miller J P *et al.* *Mu2e Technical Design Report*, 2015, arXiv:1501.05241
- [18] musr.ca/intro/musr/muSRBrochure.pdf
- [19] Chang W Y. *Phys. Rev.*, 1949, 75:1315
- [20] Kubo M K, Moriyama H, Tsuruoka Y *et al.* *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2008, 278(3):777
- [21] Alvarez L W, Anderson J A, Bedwei F E *et al.* *Science*, 1970, 167(3919):832
- [22] Morishima K, Kuno M, Nishio A *et al.* *Nature*, 2017, 552(7685):386
- [23] Nagamine K, Iwasaki M, Shimomura K *et al.* *Nucl. Instru. and Meth. A*, 1995, 356(2):585
- [24] Borozdin K, Greene S, Lukić Z *et al.* *Physical Review Letters*, 2012, 109(15):152501
- [25] Borozdin K N, Hogan G E, Morris C L *et al.* *Nature*, 2003, 422(6929):277
- [26] Jones S E, Anderson A N, Caffrey A J *et al.* *Physical Review Letters*, 1986, 56(6):588
- [27] Charpak G, Farley F J M, Garwin R L *et al.* *Physical Review Letters*, 1961, 6(3):128
- [28] Bailey J, Borer K, Combley F *et al.* *Nuclear Physics B*, 1979, 150(1):1
- [29] Bennett G W *et al.* *Phys. Rev. D*, 2006, 73:072003
- [30] Mott J. *Nuclear & Particle Physics Proceedings*, 2017, 287—288:65
- [31] Daum M. *Nucl. Instr. Meth.*, 1982, 192:137
- [32] Marshall G M. *Z. Phys. C-Particles and Fields*, 1992, 56:S226
- [33] Paciotti M A, Bradbury J N, Rivera O M. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1983, 30(4):2359
- [34] Nagamine K. *Z. Phys. C-Particles & Fields*, 1992, 56,S215
- [35] Miyake Y, Nishiyama K, Kawamura N *et al.* *Nucl. Instru. and Meth.*, 2009, A600:22
- [36] Cook S, D'Arcy R, Edmonds A *et al.* *Phys. Rev. Accel. and Beams*, 2017, 20:030101
- [37] Eaton G H. *Z. Phys.-Particles and Fields*, 1992, 56:S232
- [38] PSI LMU website: <https://www.psi.ch/en/lmu>
- [39] Morenzoni E, Glückler H, Prokscha T *et al.* *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 2000, 289(00):653
- [40] TRIUMF/CMMS website: <http://cmms.triumf.ca/>
- [41] ISIS muon source website: <https://www.isis.stfc.ac.uk/Pages/Muons.aspx>
- [42] Hillier A D, Adam D J, Baker P J *et al.* *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2014, 551:012067
- [43] Matsuzaki T, Ishida K, Nagamine K *et al.* *Nucl. Instru. and Meth. A*, 2001, 465:365
- [44] J-PARC/MUSE website: <http://www.j-parc.jp/MatLife/en/index.html>
- [45] Kawamura N, Toyoda A, Aoki M *et al.* *Journal of Physics: Conf. Series. IOP Publishing*, 2013, 408(1):012072
- [46] Boscolo M, Delahaye J P, Palmer M. *The Future Prospects of Muon Colliders and Neutrino Factories. In: Reviews of Accelerator Science and Technology* (Ed. Chao A.W, Chou W), 2019, 10(01):189
- [47] Kim Y J. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2020, 463:408
- [48] Won E. *A proposal muon facility in RAON/Korea. Proc. Int. Symp. Science Explored by Ultra Slow Muon (USM2013) 010110*
- [49] Tang J Y, Ni X J, Ma X Y *et al.* *Quantum Beam Sci.*, 2018, 2(4):23
- [50] MacDougall G J, Williams T J. *Future Muon Source Possibilities at the SNS, Report: ORNL/TM-2017/165. 2016*
- [51] Tang J Y, Fu S N, Wei J. *Journal of Korean Phys. Soc.*, 2008, 52(3):710
- [52] Tang J Y, Fu S N, Jing H T *et al.* *Chinese Physics C*, 2010, 34(01):121
- [53] Jing H T, Meng C, Tang J Y *et al.* *Nucl. Instru. Meth. A*, 2012, 684:109
- [54] Xiao R, Liu Y F, Xu W Z *et al.* *Chinese Physics C*, 2016, 40(5):057004

安捷伦科技 全新单通道离子泵控制器



- 体积小巧，触屏操作
- 优良的低压启动性能
- 自动数据记录 USB 存储
- 可以控制安捷伦 0.2-500l/s 的离子泵并兼容其它各主流品牌



安捷伦科技（中国）有限公司 真空产品热线：
800 820 6778（固定电话拨打） 400 820 6778（手机拨打）

下载样本或了解更多，请扫描左侧二维码，或登陆安捷伦官方网站：www.agilent.com
(点击“产品”选择“真空产品”)。