

# $\mu$ 子对撞机及中微子工厂国际 研究现状

高杰 肖铭

## 一、引言

对未知世界的好奇，对真理的孜孜追求，是推动人类文明发展的重要动力。伽利略研磨了透镜，把人类的视野延伸到太阳系外，观测远距离大尺度的宇宙天体。进而，科学家又把注意力转向小尺度物质时空。自普朗克撞开量子大门，人类对微观世界的研究思维发生了革命性的变化。从量子力学，到量子电动力学，到量子色动力学，再到电弱统一理论，建立标准模型，物理学研究不断丰富。

标准模型是粒子物理研究领域的重大成就，理论的预言结果经受住了精度达到千分之一的实验检验。欧洲核子中心（CERN）的超级质子同步加速器（SPS），发现了 W 和 Z 玻色子，有力地支撑了标准模型的可信性。同时，近期在大型强子对撞机（LHC）上，发现的新粒子很可能就是标准模型中的希格斯（Higgs）玻色子。粒子物理的研究似乎向终点靠得更近了。然而，还存在着一系列悬而未决的问题：暗物质暗能量的本质还有待于解释，宇宙演化过程中出现正反物质不对称性的原因是什么，中微子是马约拉纳（Majorana）粒子还是狄拉克（Dirac）粒子，时空维

数在高能区域是否会增加或者减少，等等。这些问题表明，标准模型还远远不是一个终极的理论，存在超出标准模型的新物理已是不争的事实，建造高能量的加速器用来探索和甄别新物理，以及发现新粒子，变得格外重要与紧迫。

继 LHC 之后，高能量前沿在轻子对撞机方面有几个发展方向：质心能量上限为 1 TeV 的国际直线对撞机（ILC），3 TeV 的紧凑型直线加速器（CLIC），以及几个 TeV 的  $\mu$  子对撞机。其中， $\mu$  子对撞机在能量前沿方面的潜力巨大，可以一直延伸至 20 TeV，为研究几十 TeV 量级的物理提供了可能。

## 二、 $\mu$ 子对撞机及中微子工厂

基础物理学的研究有三个相互关联的前沿领域，即高能量前沿、高流强前沿和宇宙学前沿。 $\mu$  子对撞机是高能量前沿的发展方向，而与  $\mu$  子对撞机密切相关的中微子工厂同时涉及高流强前沿与宇宙学前沿。因此， $\mu$  子加速器的发展对这三个前沿领域的发展都非常重要。

高能粒子加速器是研究粒子物理的重要实验工具。欧洲核子中心（CERN）的大型强子对撞机（Large Hadron Collider, LHC）

是目前世界上对撞能量最高的加速器，设计质心对撞能量最高达到 14 TeV。由于强子对撞机有很强的 QCD 背景，给实验物理学家带来了许多的不便。而且，由于辐射损失的限制，环形正负电子对撞机很难达到很高的对撞能量。直线对撞机似乎是目前向高能量前沿发展的较好选择。然而，环型  $\mu^+\mu^-$  对撞机提供了另一种选择。 $\mu$  子是第二代轻子，质量是电子的 206 倍，固有寿命是  $2.2 \times 10^{-6}$  s，其他性质与电子基本类似。这使得  $\mu^+\mu^-$  对撞机有许多突出的优点。从物理上讲， $\mu^+\mu^-$  对撞机直接产生 Higgs 的能力是电子对撞机的 40000 多倍。同时，高能  $\mu^+\mu^-$  对撞机的能散可以达到 0.01%（ILC 的能散为 0.1%），拥有更好的能量分辨率，这是电子对撞机目前难以做到的。并且， $\mu^+\mu^+$  对撞与  $\mu^-\mu^-$  对撞的实验也较容易实现。从加速器技术上讲，由于同步辐射损失的限制，高能正负电子对撞机不得不向直线发展。但是， $\mu^+\mu^-$  对撞机采用环型，不仅可以达到高能量，而且尺寸比正负电子对撞机小得多，这也使得  $\mu^+\mu^-$  对撞机在造价上可能会更低。从图 1 中可以看出，在同样的能量下， $\mu^+\mu^-$  对撞机的尺寸要比其他对撞

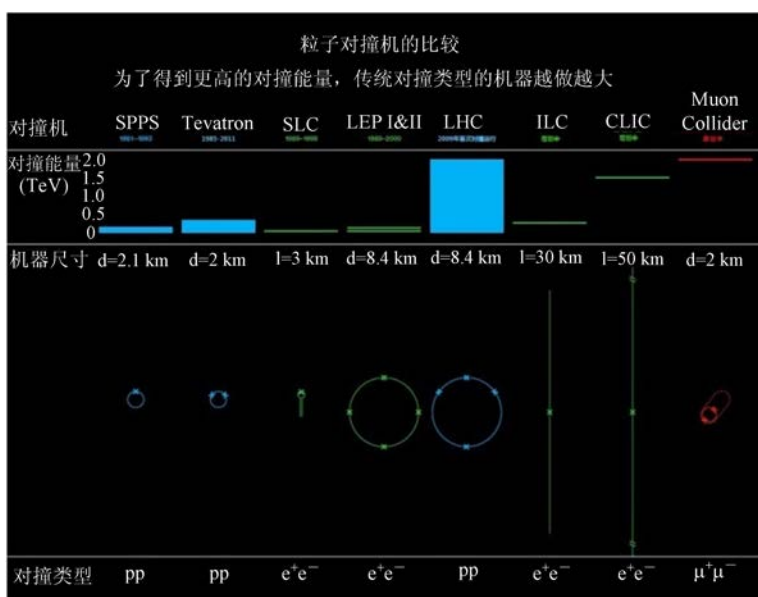


图1 不同实验方案的比较

机方案小得多。然而， $\mu^+\mu^-$ 对撞机也有它的局限性，一是难以兼顾高极化束对撞与高亮度的要求，二是由于 $\mu$ 子会衰变产生本底，三是目前尚不可升级用来做 $\gamma\text{-}\gamma$ 或 $\mu\text{-}\gamma$ 对撞的实验。 $\mu^+\mu^-$ 对撞机并不与诸如国际直线对撞机(ILC)这些项目相矛盾，而是作为它们的补充，填补高能物理实验在 $\mu^+\mu^-$ 对撞这

一领域的空白。

$\mu^+\mu^-$ 对撞机是一个非常复杂的实验装置(图2)，主要包括以下几个主要的部分：

1. 质子驱动系统(Proton Driver)，提供大量的 $\mu$ 子。目前采用的方法是，利用短脉冲强流质子束，轰击靶材产生 $\pi^\pm$ 粒子，由于 $\pi^\pm$ 粒子寿命很短( $\sim 10^{-8}\text{s}$ )，

它们很快衰变为 $\mu$ 子(图3)。

2. 粒子靶与收集系统(Proton Target, Pion Collection and Decay Channel)。在打靶的过程中，利用俘获线圈(螺线管磁场)，约束末态粒子，保证绝大部分粒子不会丢失。 $\pi^\pm$ 粒子在这一部分几乎全部衰变成 $\mu$ 子。在打靶实验中，有大量的质子残留，同时质子打靶还会产生一些不期望的粒子(如中子，K粒子等)，需要滤除这些粒子以得到较纯的 $\mu$ 粒子束流。需要说明的是，虽然K粒子也可以衰变产生 $\mu$ 粒子，却只是 $\pi$ 粒子产生 $\mu$ 粒子产量的10%，而且由K粒子产生的 $\mu$ 粒子横动量非常大，不利于收集利用。模拟计算表明，可被下一级系统接收的 $\mu$ 粒子只有1%来自于K粒子的贡献。理论计算给出，平均一个 $\pi$ 粒子最多只能产生0.95个可利用的 $\mu$ 粒子。

3. 聚束和相旋转系统(Buncher and Phase Rotation System)。在一

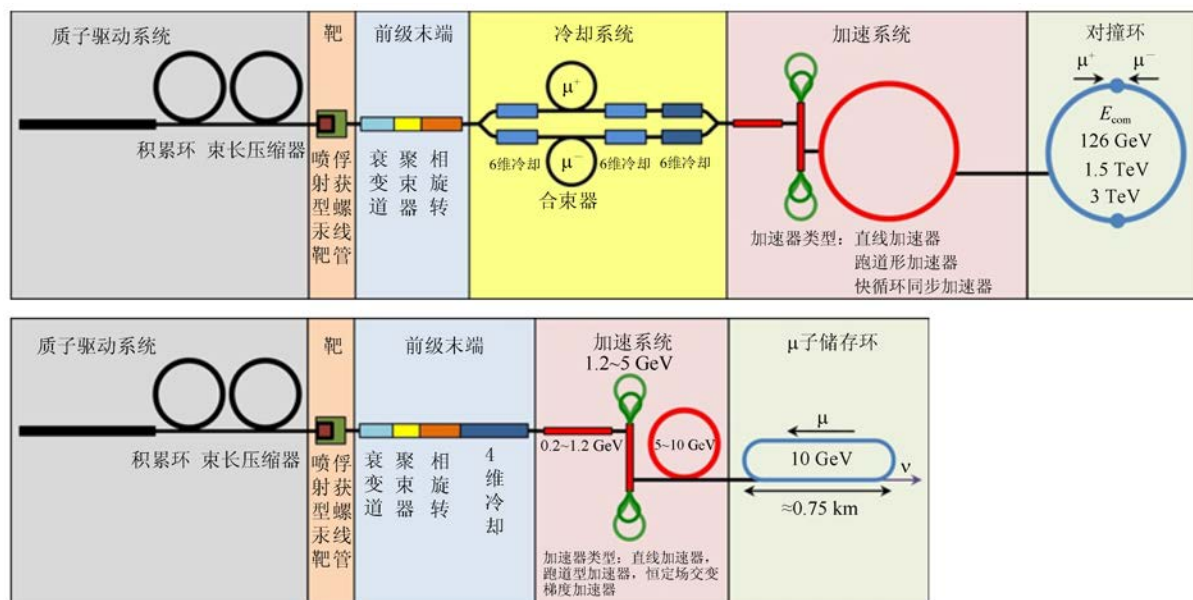


图2  $\mu^+\mu^-$ 对撞机与中微子工厂设想图

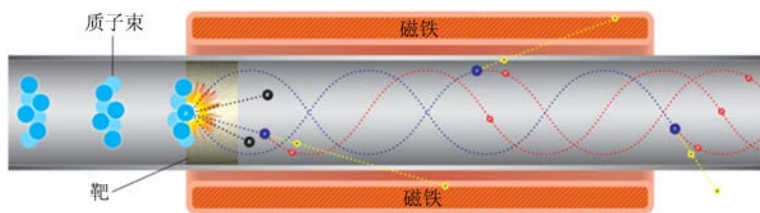


图3 质子打靶产生 $\mu$ 子过程示意图

定的能散区域，用加速单元收集尽可能多的粒子。有两种手段可以实现：（1）采用高频腔方法（RF Approach），要求离靶近（几米左右），频率足够高（减小腔的尺寸）。 $\mu$ 粒子通过后，基本已经匹配，不需要压缩束长。（2）采用自感应加速方法（Induction Approach），要求靶和第一个加速单元之间有漂移节，为于匹配束流脉冲长度与加速系统的波长。 $\mu$ 粒子通过这个结构之后，需要先压缩束长，再进行冷却。这里主要是对俘获的 $\mu$ 粒子进行聚束，并减小束团的能散。

4. 冷却系统（Cooling）。由于 $\mu$ 子的质量比电子大206倍， $\mu$ 子没有显著的辐射阻尼效应，因此不能采用辐射阻尼。同时， $\mu$ 子的寿命很短，传统的随机冷却（Stochastic Cooling）与电子冷却（Electron Cooling）不再适用。为了得到高品质的束流，目前唯一有希望对 $\mu$ 子进行冷却的方法是电离冷却（Ionization Cooling）的方法（具体过程如图4所示）。大发射度的 $\mu$ 粒子与液态的锂或者铍发生相互作用，减小 $\mu$ 粒子的动量，再通过高频腔补充 $\mu$ 粒子的纵向动量，总体的效果是有效的减小了 $\mu$ 粒子的横向动量。经过几个这样的冷却结构后，基本可以达到冷却束流的要求。

5. 加速系统（Acceleration）。根据相对论效应，粒子在实验室系中的寿命会比固有寿命长（在1 TeV的能量下， $\mu$ 子寿命约为0.022s）。为了让 $\mu$ 子在衰变前完成对撞，需要在短时间内将 $\mu$ 子加速到很高的能量。针对不同的实验设计方案，可以采用跑道形加速设计或快循环同步加速方案。跑道形加速结构的主要缺点是造价太高，快循环同步加速结构则要求磁场变化足够快。高频腔是加速系统的重要组成部分，对于不同速度的 $\mu$ 粒子，采用不同的加速频率。Snowmass96上的设计是，选择高频为100 MHz、350 MHz、800 MHz和1300 MHz，分别将 $\mu$ 粒子从1 GeV加速到9.6 GeV，再到70 GeV，直至最终2 TeV的设计能量。

6. 对撞系统（Collider Ring），保证 $\mu^+$ 和 $\mu^-$ 束流在实验选定的能量下完成对撞（目前的设计方案有质心能量126 GeV的希格斯工厂，

以及1.5 TeV、3 TeV和6 TeV三种高能对撞机），同时要求达到指定的亮度（ $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上）。

基于 $\mu$ 子加速器的中微子工厂，采用跑道形的 $\mu$ 子储存环，通过 $\mu$ 子的衰变，在特定方向上产生高通量的中微子，由远距离的接受站探测其各种属性。为解释中微子质量以及参与弱相互作用的机理提供更多的信息。中微子工厂与 $\mu$ 子对撞机的前级是基本相同的，都需要高能强流质子束打靶，获得大量的 $\mu$ 子，再通过超导螺线管进行收集。所不同的是，出了前级末端之后，中微子工厂只需要采用4D冷却（束流横向相空间冷却），加速 $\mu$ 子到10 GeV左右，再控制 $\mu$ 子衰变产生高通量的中微子。英国设想的中微子工厂，计划将产生的高通量中微子传输到日本的超级神冈（Super-Kamiokande, SK）和意大利的格兰·萨索国家实验室（Laboratori Nazionali del Gran Sasso, LNGS）。

### 三、 $\mu$ 子加速器面临的技术挑战

现阶段，建造一台 $\mu$ 子加速器面临了许许多多的挑战。在现有的理论框架下，技术的发展起着决定性的作用。主要体现在以下几个方面。

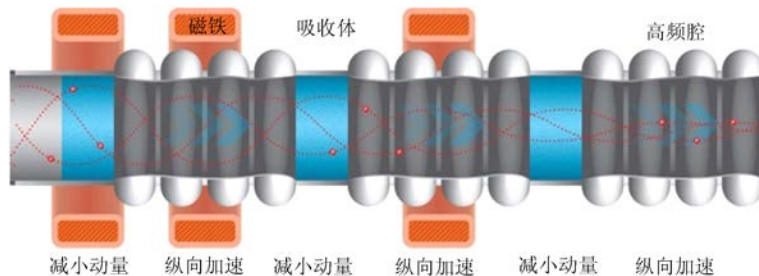


图4 电离冷却示意图

首先， $\mu$  子的获得不容易，需要高能**的强流（MW 级）质子束打靶产生  $\pi^\pm$  粒子，再由  $\pi^\pm$  粒子衰变得到  $\mu$  子，最后由螺线管磁场俘获  $\mu$  子。目前，国内外大力发展的散裂中子源（Spallation Neutron Source, SNS）基本上可以满足前级质子驱动系统在功率上的要求，而且正在大力发展的加速器次临界驱动系统（Accelerator Driven System, ADS）也向着数十兆瓦的束流目标前进。同时，如何提高  $\mu$  子的产额也是非常重要的。理论研究表明，当打靶的质子束能量小于 3 GeV 时， $\pi$  粒子的产额很低，而且得到  $\pi^+$  粒子和  $\pi^-$  粒子的产量严重不对称。而且，靶的厚度也影响了  $\pi$  粒子的产额。由此可见，建造一台满足打靶要求的高能强流质子加速器，是建造  $\mu$  子加速器的第一步。并且，选取和制作合适的靶材也是非常值得探究的。**

其次，打靶产生的  $\mu$  子发射度很大，必须进行冷却。传统的冷却技术太慢，目前电离冷却技术是最有希望的。然而，应用电离冷却在  $\mu$  子加速器上，还面临一系列的挑战。主要有以下两点：1. 电离冷却需要能工作在强磁场下的高梯度高频腔。但实验观测表明，在强场下工作的高频腔会出现打火。虽然目前还没有能够完全胜任的高频腔，但是正在试验几种可行的方案：（1）对高频腔进行表面处理，添加特殊的表面涂层，还可以采用超导腔中的洁净技术；（2）在腔体中填充高压氢气，其中氢气还可以充当吸收体；（3）采用特殊的

腔体形状，沿着磁铁排列，使得磁力线与高频电场尽量平行。2.  $\mu$  子冷却系统中需要的磁场强度超过 30 T，目前唯一可行的方法是采用高温超导技术（High Temperature Superconductors, HTS）。对于这个问题，费米实验室的技术部，已经完成了高温超导技术的研发，相信不久之后会有更大的进展。尽管如此，经过电离冷却系统的  $\mu$  粒子束流，发射度（束团在相空间所占的面积）依然很大，大约在 30000  $\pi$ mm mrad 左右。 $\mu$  子加速器在束流冷却方面的研究，还存在非常广阔的上升空间，迫切地希望新的冷却原理的出现，以及技术上的重大突破。

再次，由于  $\mu$  粒子是打靶产生的粒子衰变得到的， $\mu$  粒子的极化度很低。如果想要得到高极化的  $\mu$  粒子束流，可以人为选择特定能量的  $\pi$  粒子，再选择与之能量相近的  $\mu$  粒子。但是这样一来，用于对撞的  $\mu$  粒子将会变得更少，严重影响  $\mu$  子对撞机的亮度。庆幸的是，作为希格斯工厂（Higgs Factory）的  $\mu$  子对撞机（质心能 126 GeV 对撞），束流不会穿越自旋退极化共振线，减少了设计上的困难。

#### 四、 $\mu$ 子加速器的发展历史与现状

$\mu$  子对撞机的设想，从 20 世纪 60 年代起，就由不同的科学家在不同的年代反复提出（坦洛（Tinlot, 1960），吉洪诺夫（Tikhonin, 1968），布德克雨（Budker, 1969），斯克林斯基（Skrinsky, 1971），诺伊弗（Neuffer (1979)）。直到 1981 年，斯克林斯基（Skrinsky）和帕克霍

姆楚克（Parkhomchuk）成功实现了电离冷却（Ionization Cooling），使得建造一台高亮度的  $\mu$  子对撞机成为可能。此后， $\mu$  子加速器开始受到关注。

$\mu$  子对撞机合作组成立于 1996 年，由 100 多位粒子物理学家和加速器科学家以及工程师共同组成。这一批致力于  $\mu$  子对撞机研究的科学工作者主要来自于美国的国家重要实验室及部分大学。在 1996 年 7 月， $\mu$  子对撞机合作组完成了“ $\mu$  子对撞机研究报告”（Snowmass96），两年后，中微子工厂的设想也浮出水面。此后，这个合作组更名为“中微子工厂与  $\mu$  子对撞机合作组”（Neutrino Factory and Muon Collider Collaboration, NFMCC）。从 1997 年到 2010 年期间，NFMCC 同时推进中微子工厂（Neutrino Factory, NF）与  $\mu$  子对撞机（Muon Collider, MC）的设计工作与模拟研究，进行各个子系统的技术研究，并进行验证实验方案的可行性研究。在 2006 年底，费米实验室的  $\mu$  子对撞机专案组（Muon Collider Task Force, MCTF）的加入，使得  $\mu$  子对撞机的研发向前迈进一大步。更重要的是，这使得  $\mu$  子对撞机和中微子工厂在美国得到了更多的重视与支持。到 2009 年为止，NFMCC 和 MCTF，以及其他的国际合作组织（包括 MICE, EMMA, MERIT, IDS-NF），在许多方面都取得了很大的进展，完成了一系列中微子工厂的设计方案，从原理上完成

了打靶实验 MERIT，同时也开始测试  $\mu$  子的电离冷却实验（Muon Ionization Cooling Experiment, MICE），启动了硬件部分的研制项目，在费米实验室建造了  $\mu$  子冷却的试验区，并在  $\mu$  子冷却的研究方面取得很大的进步。

在这些基础之上，为了满足  $\mu$  子对撞机与中微子工厂的概念设计与技术要求，费米实验室在美国能源部（Department of Energy, DOE）的要求下重新整合 NFMCC 和 MCTF，在 2010 年 8 月启动  $\mu$  子加速器项目（Muon Accelerator Program, MAP），该项目于 2011 年 3 月 18 日正式启动。

按照计划，MAP 预备在 2013 ~ 2015 年完成第一阶段的工作，包括确立概念设计（Baseline Design Concepts），明确主要的技术发展方向（主要体现在高频腔与强磁场磁铁上），确定关键性技术的性能指标（如 6 维冷却单元的标准），同时关注相关测试实验的进展（如 MICE 的四期实验）。二期任务预期在 2016 ~ 2018 年内进

行，计划完成概念设计的可行性验证，同时加大对 MICE 的投入，并开始筹划 6 维电离冷却实验。在以上计划按时顺利完成的前提下，从 2019 年开始，把目标放在  $\mu$  子对撞机和中微子工厂的建造上。

在管理上，MAP 的组织机构（图 5）由美国能源部直接领导。 $\mu$  子项目顾问委员会（Muon Program Advisory Committee, MuPAC）向 FNAL 的主席直接提供技术上的建议。MAP 的运作由项目负责人直接领导，下设项目管理办公室。同时，学术委员会（Institutional Board）和技术委员会（Technical Board）有义务向项目负责人提出政策与技术上的建议。项目负责人以下设立三个“一级”的部门，主要的任务分别是整体的设计与模拟，技术的发展和系统测试。具体工作由 15 个子部门的专家分别研究、实验，并定期交流总结报告。

欧洲国家也对  $\mu$  子加速器十分重视。早在 1999 ~ 2002 年，欧洲核子中心也对  $\mu$  子加速器在理

论上进行了比较全面的研究，并给出了初步的研究报告。但由于当时 LHC 的大力推动，对  $\mu$  子加速器的研究一直没有太大的投入。然而，欧洲核子中心一直都在支持并参与这方面的研究，随着 LHC 的顺利运行， $\mu$  子加速器很有可能重新得到重视。在欧洲核子中心的 PS 进行的 MERIT 测试实验，取得了阶段性的进展，在技术上可以承受重复频率 70 Hz，束流功率达到 8MW 的质子束流。同时，在英国的达斯伯里（Daresbury）实验室，基于恒定场交变梯度（Fixed Field Alternating Gradient）的 EMMA 加速器（EMMA 是非等比的 FFAG，适用于快循环加速），也朝着将其应用在  $\mu$  子加速上不断推进。关于中微子工厂，英国的加速器科学与技术中心（Accelerator Science and Technology Centre, ASTeC）与英国的大学合作，共同研究  $\mu$  子的俘获、冷却及加速等主要技术，在 2011 年已经给出了中微子工厂的中期设计报告，并且预期在 2013 年给出技术设计报告（Technical Design Report, TDR）。

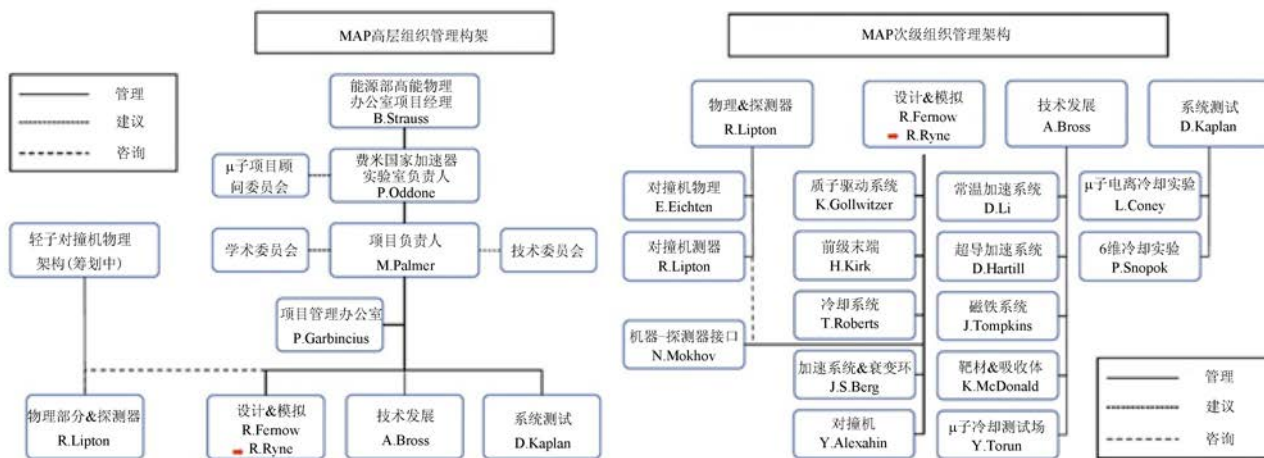


图 5 MAP 组织管理构架

# 她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

## 欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全

部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

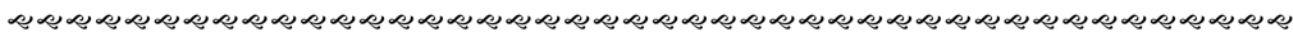
《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目，并于 2009 年增加了彩色中心插页。

2013 年《现代物理知识》每期定价 9 元，全年 6 期 54 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 ~ 2011 年单行本每期 8 元；合订本每本 50 元；2012 ~ 2013 年单行本每期 9 元，合订本每本 60 元。



### 五、 $\mu$ 子加速器应是我国高能物理学发展的研究方向之一

$\mu$  子加速器是继大型强子对撞机 (LHC) 之后，人类在高能量前沿和高流强前沿的重要科学工程，涉及大量最先进的加速器技术和先进的高科技通用技术。目前国内外大力发展的加速器次临界驱动系统 (Accelerator Driven System, ADS)，正好可以作为产生  $\mu$  子的前级技术。

如今， $\mu$  子加速器在欧美都有或多或少的研究投入，并且已经制

定了详细的战略发展规划，然而，在中国却还没有得到足够的重视。启动和参与  $\mu$  子加速器的研究与国际合作，不仅能为我国高能物理学的大发展积蓄力量，提升我国相关高科技工业的技术水平和应用水平，而且还有望培养出一支国际一流的科研队伍。中国应该紧跟世界科学发展的脚步，把握世界科学发展的新特点与新方向，做出前瞻性的战略部署，增强我国的核心竞争力，赢得在国际竞争中的主动权，并在关键领域抓住机遇迎头赶上。

### 致谢

感谢清华大学何红建教授对本文提出的宝贵意见。本文得到国家自然科学基金 11175192 资助。

(中国科学院高能物理研究所 100049)

