

加速器的粒子物理实验还有前途吗

童 国 梁

(中国科学院高能物理研究所 100039)

莫里·蒂格纳(Maury Tigner)是美国康乃尔大学核研究实验室主任和物理学荣誉退休教授,他曾领导了美国超导超级对撞机(SSC)中心设计组的工作。大家知道,1993年10月,美国众参两院联席会议表决停建SSC。SSC是美国的一个预算达82亿美元、当时已在研发和工程建设中耗资20亿美元并计划于1993年建成的超大型加速器高能物理实验计划,SSC设计的质子-质子对撞的质心能量为20TeV(1TeV=10¹²eV,即1万亿电子伏特)。这一决定曾给当时国际高能物理界造成了巨大冲击,也肯定给蒂格纳教授上了难忘的一课。去年年初,蒂格纳在

美国的“今日物理”上撰文[Physics Today 54, 36(2001)]检讨了用于粒子物理实验研究的加速器研发中存在的问题,表达了他对加速器粒子物理实验前途的看法,指出了加速器研发的正确方向。这里把这篇文章介绍给读者。

现在我们可以用加速器上的实验来探询有关宇宙的问题(见图1),并在此领域取得了巨大进步。众所周知,粒子物理的进步很大程度上可以由加速器的进步来估量。直到10年前,建造用于粒子实验的更高能量的对撞机的前进速度仍是很壮观的。对撞机质心对撞能量每25年差不多提高100

倍。但这样的发展速度现在已明显变缓,这一点可以从图2中看出。

能量增加率的下降也许会使大家发问:我们是不是已达到了加速器潜力的一些固有的物理限制,或者是什么其他限制。这个问题的回答是复杂的,但是有一件事是清楚的:我们还没有达到实验室中可获得的技术限制。

诚然,技术限制是存在的,但这些限制相对较软,尚且遥远。例如它们需要巨大的电输入功率;并且这些限制随着加速器类型的不同而不同。对轻子对撞机,当粒子能量低

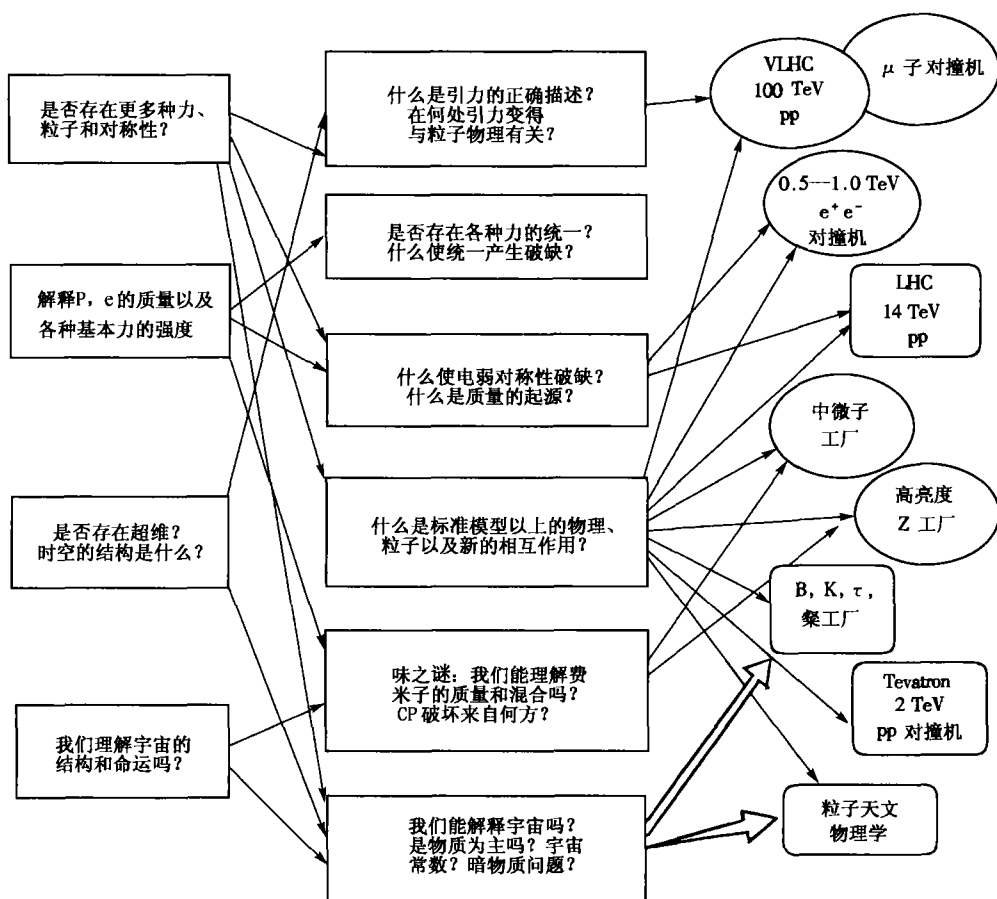


图1 基本问题和相应的研究设施。黑椭圆表示尚未建设的设施。“工厂”是指优化于大量产生某种特定粒子的加速器

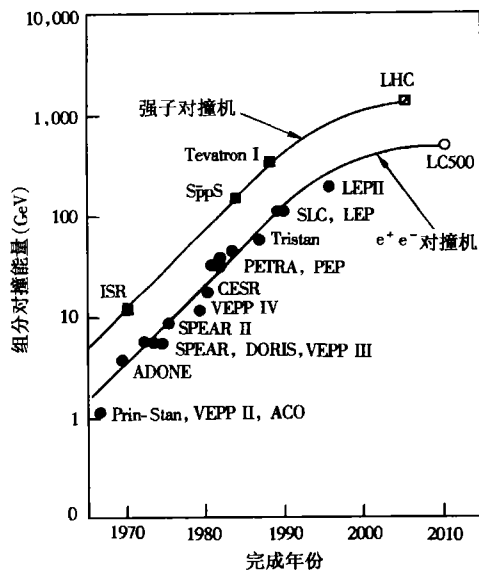


图2 强子对撞机(图中上曲线)和正负电子对撞机(图中下曲线)的有效组分对撞能量与完成年份图。因为电子和正电子都是点粒子, e^+e^- 对撞机的有效对撞能量就是他们对撞的束流能量之和。质子是结构的粒子, 平均而言, 每个组分夸克仅带着 $1/6$ 质子的动量, pp 对撞就如一对夸克对撞。于是, 强子对撞机的组分对撞能量为束流能量之和的 $1/6$ 。LHC 已在 CERN 建造, 而 LC500 则是建议建造的 500 GeV 直线 e^+e^- 对撞机, 仍在计划阶段

于几十 TeV 时, 电输入功率限制尚不起作用。对质子加速器, 几百 TeV 以下, 电输入功率方面仍没有问题。1 TeV 是质子和反质子在费米实验室的 Tevatron 对撞机上被加速到的能量, 该对撞机是迄今已建成的最高能量的加速器。

由于我们正处在历史发展中, 也许不能深刻认识影响我们的因素和事件。但是我们有把握说: 经济和社会因素都起作用。下面我们从经济因素谈起, 因为这些因素概念上易被处理。

经济因素

坦率简明地说: 如果倒霉的超级超导对撞机的造价是 10 亿美元左右而不是这个数的许多倍, 它就有可能不被撤销了; 如果 CERN 计划于 2005 年完成的大型强子对撞机 LHC (建成时间已推迟至 2007 年) 的造价仅为 10 亿美元, 它现在也许就已建成了; 如果世界上几个地方已设想了多年的任一个 TeV 的电子-正电子直线对撞机的造价为 10 亿美元左右的话, 那么至少其中的一个现在就可能正在建设了。

当然, 速度变缓这一结果也并不令人惊讶。这里引证一份 1980 年美国能源部高能物理顾问小组

关于加速器研发报告中的一段话:

你们可以看到, 50 多年来美国与粒子物理相关的加速器科学跟过去的做法一样一直在增加粒子束流能量以及减少单位能量成本上大步前进。我们的主要结论是这领域上尽管有辉煌过去和现在的成就, 但我们仍需要以成倍的努力致力于改进我们加速器的成本(只要美国粒子物理会遇到资源限制的话)。需要连续和有力地改进现有的技术和发明, 减少新的加速方法和技术的练习时间。如果我们遇到这方面挑战, 我们需要把更多的智力和财力资源贡献于高能加速器的研发。

这些 20 年前的话在今天看来还是那么正确。以半定量方式研究这种挑战, 我们注意到 1980 年美国用于高能物理资源的 1% 左右用在先进加速器研发(AARD), 为未来的前沿装置奠定概念和技术的基础。我们应该把此种研发与应用于项目的研发(RDAP, 也就是说, 把研发定向于已高度发展了的装置概念上面)区分开来。

现在 AARD 进展得更好, 已取得高于可利用资源 3% 的成绩。其中 3% 的一半用来支持大学中的加速器工作。过去, RDAP 分配额高到 10%, 当有大项目出现时, 这比例更高。今天 RDAP 约占 4%。设想引入一种中间的研发方式对未来也许是有用的, 这种研发方式接受一种装置的总体概念, 但对一些子系统概念进行探索。把研究的焦点放在发现一种最经济的方式来达到最终目标。在世界范围上, 这种方式已取得显著进展。

便宜只能更贵

如果把每 GeV 所花费的美元数作为加速器学科经济上挑战的度量, 当然太过于简单化了, 但仍不失作为考虑问题的第一步。40 多年来质子加速器每 GeV 质心能量的花费(未作通胀修正)已减小了 10 倍。如果把通胀的因素考虑进去, 这方面的成绩确实是显著的。然后在这 40 年中, 能量前沿几乎上升了 2000 倍。因此, 尽管在每美元“制造”的 GeV 数上取得了很大成绩, 但每个新装置的名义上的价值(以美元计)上升了 200 倍。这就使加速器装置的造价以及随之而来的所有挑战都上升到政治的高度。

我们可以了解价格变化的原因。有几个因素可以减少每 GeV 价格。最重要的因素在于对加速器物理的了解上取得了巨大而连续的进展, 这些进展是随着强聚焦以及应用于复杂束流体系分析的高级语言的发明达到的。这也产生了“加速器物理学

现代物理知识

家”的劳动力部门。这部分人大多数早年是粒子物理学家,后来把他们的才能转到苦心经营新的加速器理论和技术。

另一个主要因素是用于加速器部件和子系统的材料和加工过程的不断改进。例如,常规(非超导的)磁体的材料和加工技术的巨大进步使得高质量磁铁的价格多年来仍维持在1美元/千克,尽管发生了明显的通胀。同样,尽管有通胀,购买这种材料的高精度铁心片的名义价格也维持不变。举一个更高技术的例子,超导 NbTi 细丝 1982 年是每千安培·米的价格约为 3 美元。现在价格降到 1 美元(kA·m)。通胀修正后的价格下降了 5 倍。(作为比较,要知道铜丝现在的价格却高达 10 美元/[kA·m]。物理解解的进步与材料和工艺的改进双重得益。这使我们得以用较少的材料投入达到既定的功能。

现代加速器许多必不可少的部件,例如电子学仪器、计算机技术和控制系统,可以从其他部门得到。技术生产力和材料、器件以及工艺上的不断进步在全球范围上是很显著的。我们可以充分利用它们,并期望当不可避免的压力逼近我们时会做得更好。

另一方面的问题是困难也在不断上升。仅提供一般的高能量束流并不够。当能量提高时,为了补偿由于事例产生截面随能量的增加陡然下降,为维持合适的事例率必须使束流强度(或亮度)随着对撞能量的平方增加。在能量前沿处,常引用的截面为 10^{-36} cm^2 ,甚至说 10^{-39} cm^2 。对撞机的亮度是用每单位反应截面的事例率度量的。

早年,在全能量处得到的束流可以产生足够的数据率。今天,储存环设备带了 GW(10^9 瓦)的循环束流能量,而正在讨论中的 TeV 直线加速器将连续消耗几十兆瓦的束流功率。而且,从实际应用上考虑,束流必须具有很高质量。它们必须被束缚在一个非常小的相空间内并精确地聚集在束流的对撞点上。所有这些,不仅要求我们非常深入地了解加速器物理,同时加速器系统,特别是真空、高频以及控制系统一定要复杂得多,也一定贵得多。

技术的选择

那么,我们如何朝着减少每单位能量价格同时又保持科学上有用的事例率方面大步前进呢?一种途径是实行本质上全新的加速方法,例如利用等离子体模式转换的激光束使横向电磁场形成一个纵向加速分量。另一种想法是把现有方法中的一些参数

推入到一个新的范围,例如让直线加速器运行在毫米波长,或者采用尚在发展中的高温超导体材料的高达几十特斯拉的磁体。

第三种途径则是非常努力和出色地做好我们已经做得很好的事情,例如建造储存环、直线加速器、同步加速器,或者是一些在近几十年中已被证明是非常成功的其他的经典加速器类型。最终,围绕一些价格约束,我们可以考虑加速一些粒子,它们不同于常用的质子、电子及其反粒子。

实际上所有上述领域的工作都正在进行。那么,为什么这些途径至今仍不够呢?简而言之,需要更多的新思想。为此,我们需要更多的智力资源和支持。但现在这些支持是不足的,也可以肯定地说争取这种支持的努力也是不够的。

社会与文化因素

施加资源来应对这种挑战甚至需要多个团体的文化改变。在较早时期,加速器或多或少被看做是原子核物理和粒子物理的通用设备的一部分,是一种重要的技术发明。回旋加速器、同步加速器和质子直线加速器就是这样的 3 个例子。但是当加速器变得越来越大、越来越复杂,而理论上也变得更为曲折复杂时,一种自然产生的劳动部门造就了一群加速器专家。

专门化使得更新更深入地了解经典加速方法有了可能。但是,我们需要静心地考虑这些新专家是否会永远传送加速器这个球。我们完全忽视了我们已经面临的迅速增长的挑战。这种加速器专家的观念已充满了我们国家的实验室和大学物理系的文化,仅仅只有很少的物理系继续工作在加速器上,并把它视为受尊重的物理学科。政府的基金组织支持前沿设备发展。但是,基于本身的性质,他们也不能远离粒子物理学的文化标准。

另一显著因素是复杂的幻想:如何让一个普通的物理学家投身于已经有许多对加速器彻底了解的国家实验室专家所从事的事情。但应认识到,许多挑战涉及到特别的物理、仪器以及一些聪明的想法。而这些才干恰恰是研究实验物理学所需要的。

所有挑战中最困难的挑战来自资助人如何看待此领域的本质。科学研究是永远为未来准备的,这需要公共资源的持久支持。物理学研究的主要问题不会明天停止。这是一个永恒的关于自然世界的物质的话题,一个永远新的尺度的话题,并将对全面的文化和经济作出贡献。

我们的要求听起来似乎是末端开口的。并且，正如我们知道的，没有什么资金管理人喜欢得到的结果比末端开口的承诺要少。为了克服这个障碍，最少我们需要向公众展示我们有一个从事前沿研究的重要和令人兴奋的学科计划，这个计划是负责的而不是狂妄自大的。

特色的选择

这里更具体一点讨论目前前沿的挑战。在图 1 黑椭圆内所列的设备没有一个已经达到“建议”的状态。它们都需要巨大的关注使其变成现实。在所谓的“灵敏前沿”，关注点是它的事例率，而不是最大能量，建议中的 τ -粲工厂用来产生大量的 τ 轻子和粲介子；用于 b 夸克物理的非常高亮度的 b 物理的机器早已超过了目前在美国和日本的 B 介子工厂的设计能力；一个亮度比 LEP(曾是 CERN 的大型正负电子对撞机，目前正被拆除，准备建造 LHC) 大许多倍的 Z 玻色子工厂。在能量前沿，已被建议建造的加速器有：TeV 能量级的正负电子直线对撞机、 μ 子对撞机以及超大型强子对撞机(VLHC)-LHC 的继承者。其中，粲工厂和 b 工厂尚可以举一国之力而为之。但是其余的更大的装置就必须由国际共建。

所有这些前沿加速器的“自然的”的时间尺度(研发加建造)是很长的，中等大小的至少也得 5 年，而最困难的则需 20 年。为使这些最前沿的设备在需要的时候到位，准备工作必须平行进行。我们需要一种成熟的步骤，让国际团体通过这种步骤选择现实的子设备。

对热心的实验家来说，这里既有需要也存在机遇让他们对这些潜在的工程作出关键性贡献。最明显的例子是中微子工厂或图 3 所示的 μ 子对撞机。对一台微子工厂，在储存环中 μ 子衰变提供了有一定特性以及很好控制的中微子束流。对 μ 子对撞机而言， μ 子是电子的同族，但质量要大 200 倍，并且当它的轨道发生弯曲时由于同步辐射的能量要小得多。这就使得 μ 子机器比电子机器更能容忍更强的弯曲以及更强的聚焦磁体，这就是 μ 子对撞机的基本原理。

基于衰变 μ 子的中微子工厂看起来很像 μ 子对撞机的一半，虽然两者定量上是不同的。开始时，两者都以很强的密集的(毫微秒级)质子束流轰击一个 π 介子产生靶，产生了一个很散的束流，此束流衰变为 μ 子，所有的 μ 子必须被捕获在一个高磁场中并尽可能多地保存。必须巧妙地操作和冷却 μ 子

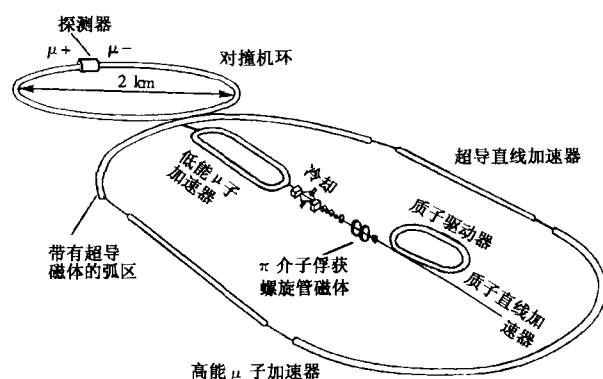


图3 建议的3TeV μ 子对撞机系统。初始的质子驱动器后面跟着俘获 π 介子的装置，接着是一个冷却装置把来自 π 介子衰变的 μ 子冷却。再接着是带有直线段弧区的 μ 子低能和高能加速器环。最后 μ^+ 和 μ^- 束团在环形对撞机中反方向回旋，在他们衰变之前一次又一次地在探测器中对撞

束使其相空间强烈收缩，并在像一条普通的传输线中被加速和贮存。

在这里技术上的挑战很多，并且是多方面的。其中一部分是标准加速器也具有，另一部分则是新问题。束流能散度大了两倍，而不是大多数加速器应用时通常的 1% 甚至更小。现在尚没有可以用于所需要的时间尺度上的相空间浓缩的冷却方法，因为 μ 子寿命的范围是 μ s(微秒)量级。

电离冷却的总体想法需要以某种形式进一步发展，或者我们必须发明某种完全不同的方法冷却束流。基础牢固的实验物理学家与任何加速器专家一样能够解决许多这样的挑战。

展望未来

有迹象说明，我们从事的事业正趋向于多方位、多种形式的合作。请考虑下面 4 个例子：

中微子工厂和 μ 子对撞机合作组(MC)的形成是非常有趣的。150 名物理学家代表了许多研究院校，其中大多数来自大学。一些个别成员是加速器专家，但是多数是那些期望在某一天用上 μ 子束前沿设备的实验粒子物理学家。最近，MC 在美国费米实验室支持下参加了对中微子工厂的可行性研究，研究者包括美国以及国外的 43 个研究院校。MC 有自己的发言人和项目经理，预算来自能源部。合作组成员参加广范围的概念研究和研发活动。这里国家实验室以外的投资人也参与了一台潜在的重要前沿加速器设施的基础工作。当然，必须有一些研发工作所需要的基础设施，这就要求合作组必须现代物理知识

混沌——自然界中的一种普遍运动形式

崔英敏

(河北工业大学 天津 300130)

科学家的天职就是探索大自然的规律。几个世纪以来,物理学家坚持不懈地研究大自然中物质运动的规律,取得了一系列辉煌成就,构筑了接近完美的物理学大厦。很长一段时间物理学界认为“只要给我初始条件,我就可以决定未来的一切”。因为经典力学中的基本规律都是确定的,即使初始条件有

紧密地工作在国家实验室。现在,这样的情况已经发生,但是我们远没有看到足够的成果。

对大学物理学家另一个可能性是斯坦福直线加速器中心(SLAC)的猎户星座(Orion)计划。一台带有强大的基础设施的设备已经设立在SLAC,这些设备让那些需要电子束和激光的先进加速器想法的大学都用来做实验,虽然他们自己拥有的资源都有限。

Orion 和 MC 带有宽松的区域性色彩。下面两个例子在地理范围说更全球化了:全世界的电子-正电子“直线对撞机”现在已经彻底竞争化了。参与竞争的分别基于欧洲、日本和美国3家。每家都是以一个国家或区域性国际实验室为基础,但也都包括了来自其他国家或区域的合作者。由于全球化合作竞争本性,参加者都自愿作出了显著的成绩,这样,彼此可以进行详细比较。正因为这样,所有的概念都已比早期有了巨大进步。

每家直线对撞机合作组如今为显示其特色都设计了检验设备。世界粒子物理团体也已逐步形成了共识,即提出 e^+e^- 直线对撞机计划的3家中只有一台直线对撞机将最终实现,并认为区域内合作对研发、设计、筹集资金甚至运行的最终发展过程将是实质性的。出于这一理解,如果世界投资人要做那种计划的话,他们自己应在选取最好概念、把尚未决定的留给某些国际行政的最后选点方面采取主动。这问题依赖于国际物理团体的未来打算以及我们对现在提出物理学问题从事研究的最好方式的认知。

我们的最后一个例子是全球加速器网络的概念。到了只有极少数几个足够大的前沿设备来研究物理世界的最终性质时代,这种冒险的文化利益如

一定误差,只要误差足够小,未来的所有发展情况也可以基本确定地给出。但后来研究发现实际的情况并不完全是这样,在确定论系统中,相空间轨道有可能呈现高度不稳定性,随着时间的发展,相邻的相空间轨道之间的距离可能按指数规律增大,初始条件的任何微小的扰动都会在未来的发展中引发出迥然

何能广泛分享呢?包含在全球加速器网络中的这种先见之明将为当前横跨全球的有关的研究院、所创造一种手段,让他们就在本地概念、研发、建造甚至运行这些极少数的几个设备进行积极分享,而不论实际的设备究竟安置于何处。

实现那样的先见之明无论在技术上还是在社会上都将将是复杂的。无疑,后者因素超过前者。未来加速器国际委员会(ICFA),一个为时甚久的世界团体组织,已开始从事这一挑战并组成了国际工作组处理此事。当某一个很强的国家中心提出一个新的较大的前沿设备建议时,这一先见之明的生命力不久便会获得足够的检验。

如果我们要让基于加速器的粒子物理学继续前进,我们就必须在加速器技术发展方面投入多得多的努力,并特别要强调经济方面的要求。面对更高对撞能量以及更高亮度的双重要求,这些努力可能不足以使新设备保持不变的价格。为了取得必要的智力和财政资源以保持发展,似乎需要在资源管理和合作方面空前范围上的社会合作。

现在在这方向上已迈出了重要的步子。例如,对中微子工厂和 μ 子对撞的可能性有兴趣的国际物理学家已开始有效地组织起来,而各种各样的电子-正电子直线对撞机建议者也已建立了实在的国际合作和协作。虽然至关重要的步子尚未迈出,但这一步却是现在所需要的,即在世界范围内给各个合作项目设置优先级。但这需要相当的勇气和洞察力。

蒂格纳在这里讨论的加速器是指像LHC那一类超大型加速器的研发,对于中小型粒子加速器,问题当然要简单得多。