

AdA——一个影响深远的小加速器

张源译

(中国科学院高能物理研究所 100049)

50多年前,人类在储存环加速器上第一次观测到了正负电子对撞。

世界上第一个正负电子储存环,名字叫“安妮罗的累积器”(Anello di Accumulazione)——简称AdA,这一切开始于意大利核物理研究院(INFN)的弗拉斯卡蒂(Frascati)国家实验室(INFN-LNF)。布鲁诺·托歇克(Bruno Touschek)负责这一机器的建造,并于1961年2月实现束流积累。一年后,它被运到法国奥尔赛(Orsay)的直线加速器实验室(LAL: Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire)——这个实验室现在是法国巴黎第十一大学、核与粒子物理国家科学研究中心的一部分——在那里可以利用最先进的直线加速器作为注入器。第一次正负电子的对撞在1963年末到1964年初进行束流调试和实验观测,这些工作对基本粒子及其相互作用的研究方法产生了革命性的影响。



图1 托歇克

作为50周年庆典,2013年LAL和LNF共同组织了一次特别会议,这也是布鲁诺·托歇克纪念讲座(BTML 2013)的一部分,会议在LAL举办,时间选在9月13日(星期五)——这是法国的欧洲文化遗产日。相关的公众活动举办了3天,其中包括9月13日晚上的一个公开演讲“LAL和CERN”,9月14~15日是公众开放日活动。

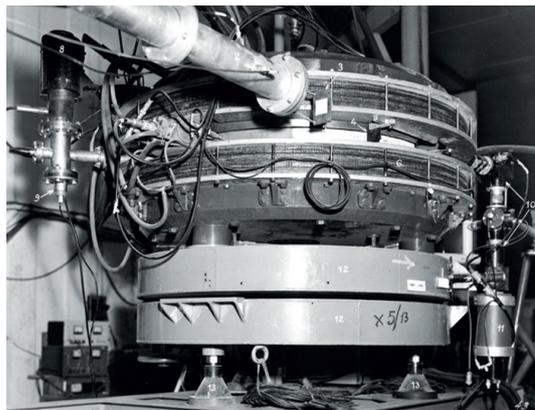


图2 安装在LAL的AdA

会议日程首先是关于托歇克的一个纪念报告。接下来是雅克·海森斯肯(Jacques Haissinski)的回顾——他在AdA上完成了他的博士论文,AdA在LAL期间的一些影像是首次展示。第二个环节的报告是关于加速器及其社会应用,以及LAL和LNF的未来项目。下午更多的庆典活动在皮埃尔·马林(Pierre Marin)大厅举办,马林主持了AdA在LAL的继任者ACO(奥尔赛对撞环的简称,1965~1988)的建造和研制,现在这里是ACO科学博物馆的核心部分。活动还包括恢复原貌的直线加速器控制室的落成典礼。



图3 现在的AdA



图4 海森斯肯

LAL的直线加速器第一次出束是在1958年，输出的电子能量达到3 MeV。到1964年，束流能量提升到1.3 GeV——这是当时电子直线加速器的世界纪录(CERN快报2004年6月，第27页)。从1963年开始，这个加速器装备了正电子源，使之成为LAL储存环对撞机的一个重要工具，而这一切都开始于在AdA上的开创性研究。

AdA 的故事

在20世纪60年代初，世界上有几个研究小组正在关注电子-电子和质子-质子的对撞机方

案。相反，托歇克的观点是让电子和正电子对撞，在实验室参考系下，正负电子的质心系是静止的，对撞湮灭产生的光子有足够的能量可以激发真空中的共振模式，这与矢量介子的质量对应。在当时的LNF主任Giorgio Salvini的鼓励下，一群能力卓越的物理学家开始设计和建造一个正负电子储存环的原型机器，这就是后来被命名的AdA。

AdA有一个环形的真空盒，直径160 cm，嵌入到一个8.5吨重的磁铁中，磁场可以确保200 MeV的束流保持旋转。技术上的挑战包括如何维持一个超高真空以保证束流的寿命足够长，以及如何注入正负电子两种束流。注入的正电子是通过 γ 束线撞击安装在真空盒内的钽靶转换而来，而 γ 束线是利用LNF电子同步加速器的电子束流轫致辐射而产生。第一次储存的电子和正电子在1961年2月27日实现循环，但接下来的研究受限于AdA旁边的同步加速器，因为能够储存的束流流强很低，要寻找对撞的证据只能等到这个储存环被运送到奥尔赛。

这次到LAL的搬运，源于1961年夏天马林的一次访问，他敏锐的意识到AdA是一颗真正的“宝石”。这一年末，LAL关于1.3 GeV正负电子储存环的初步研究已经开始，但是没过多久，他们就意识到这个项目与弗拉斯卡蒂的ADONE对撞机提案太过相似了。1962年初，一组科学家和工程师从奥尔赛出发前往弗拉斯卡蒂，讨论的内容就包括，使用奥尔赛的直线加速器实现AdA的高流强以及更容易的正电子注入。7月初，AdA被打包装到一辆卡



图5 LAL的直线加速器控制室

车上,启程穿过阿尔卑斯山脉。同时装上车的还有已经抽真空的束流管道,包括电池,其电量可以维持真空泵工作3天,防止已经花费数月取得的高真空遭到破坏。一个月后,对撞机安装到了奥尔赛。中间也有一些波折,在使用起重机就位的时候,AdA撞到墙上,几乎粉碎。更晚些时候,一个很重的探测器在搬运的时候,歪倒伤了马林脚。

在奥尔赛,从1963年12月起至1964年4月AdA进行了多次运行调束,实验人员最终成功观测到对撞,期间还进行了一系列重要的束流动力学研究。其中一个重要的物理现象被发现后,很快被托歇克成功解释,这也因此被称为托歇克效应。它描述的是,电子(或正电子)束团中的大角度库伦对撞会把动量传输到纵向相空间,导致粒子丢失。由于这一效应的存在,当存储的束团粒子数量增加时,束流寿命会显著下降——即使在今天的加速器中,它仍然是束流寿命的一个重要限制因素。

AdA上的实验有一系列后续的产出。建造ADONE的提议被LNF批准,并于1967年启动,这是一个更大的1.5 GeV的对撞机,由托歇克和他的合作者在1960年年底提出。尽管AdA的科学寿命非常短暂,它在科学史上仍然具有里程碑的意义,它为未来诸多的正负电子对撞机开启了崭新的舞台。这类装置成为现代高能物理学中最强大的工具之一,帮助在1974年发现了 J/ψ ——这是第一个发现的含有粲夸克的粒子,由正反粲夸克组成。20世纪80年代在CERN建成了迄今为止最大的正负电子对撞机(LEP-Large Electron-positron Collider)。

AdA和LAL入选欧洲物理学会历史遗迹

2013年12月5日,在LNF举办的一次庆典上,欧洲物理学会(EPS)宣布AdA入选EPS历史遗迹。这次庆祝活动,由LNF的实验室主任Umberto Dosselli主持,Giorgio Salvini作为1961年的实验室主任,做了专题报告,正是在其任上AdA被批准建造。Carlo Bernardini回忆了建造AdA过程中的一些故事以及当时LNF激动人心的氛围。INFN的主席,Fernando Ferroni,也借此机会对实验室的现状和未来展望给出了简短的介绍。EPS副主席,Lui-

sa Cifarelli,谈论了EPS历史遗址的初衷,发展情况以及与INFN的联系。之后,Ferroni和Cifarelli一起揭开了历史遗址的牌匾。作为BTML 2013的弗拉斯卡蒂部分,日程在下午继续,麻省理工大学的Samuel Ting介绍了 α 磁谱仪的最新结果,这一项目正在利用宇宙射线进行反物质研究(*CERN Courier* October 2013 p22)。CERN的Luigi Rolandi做了当时新发现的希格斯玻色子的公开演讲。

两个月之前,在BTML2013会议期间,LAL和LURE装置成为第8个EPS历史遗址。AdA关机后,1965年ACO环开始调束运行,用于加速器和粒子物理的实验测量。再往后,ACO以及之后的SuperACO成为同步辐射光源在其他领域(如材料科学和化学)应用的引领者。电磁辐射应用实验室(LURE)在1973年建立,专门进行同步辐射应用方面的研究,后来于1985年从LAL独立出去。今天,LURE位于萨克莱高原的SOLEIL,是一个先进的第三代同步辐射光源。



图6 Cifarelli, Ferroni

今天的LAL

LAL的名字来自位于法国奥尔赛的直线加速器研究所,这台机器已经于2003年关闭。实验室仍然继续粒子加速器领域的研究,如PHIL的研发——这是实验室内建造的10MeV的电子加速器——可以用于未来粒子注入器的研究(*CERN Courier* September 2008 p9)。这个设施还对外开放,利用其独特的束流品质进行专门的实验研究。实验室还负责为DESY的自由电子激光XFEL建造和老炼

关于物质-反物质对称性 破缺的发现

陈缮真

(意大利核物理研究院)

2019年3月,欧洲核子研究中心(CERN)的物理学家宣布,他们在粲夸克系统中也找到物质和反物质不完全对称的证据。“物质和反物质”、“对称与不对称”,这究竟是怎么一回事呢?让我们从头说起。

1900年,物理学家开尔文男爵在英国皇家学会上发表演讲,他在展望20世纪物理学前景时,敏锐的指出了当时物理学的两个最重要的问题,并形象的把这两个问题比喻为物理学天空上的两朵乌云。后来,对于这两朵“乌云”的研究,终于酿成了一场颠覆传统物理学大风暴,并由此分别建立了20世纪物理学领域最伟大的两个分支:相对论和量子理论。相对论描述了一种全新的时空观,而描述那些如原子一般非常小的尺度的世界的规律的理论则是量子理论。

1928年,年轻的英国物理学家保罗·狄拉克(Paul Dirac)写下了电子量子理论的方程式,这个方程成功的描述了电子在微观世界的行为,并不带矛盾地同时遵守了狭义相对论与量子力学两者的原

640个耦合器。

另外,LAL已经开始建造全新的X射线光源,ThomX。这一领先的装置隶属于法国国家科研中心2011年布署的先进设备计划,它有很多应用,如艺术品的非破坏性诊断。因为尺寸小,造价低,会有很多实验室和私立公司对它感兴趣。很多基础性的研究活动也在继续,比如参与日本KEK的ATF2的束流运行,实验打破了束流最小发射度的记录。LAL还参与CERN的UA9实验,研究在SPS

理。然而这个方程有一个奇怪的属性:它有两个解,其中的一个解对应了电子的运动。而另一个解,则明显在描述一种带有负能量的粒子。当时的人们认为,狄拉克方程的第二个解实际上是在描述一种普通的带有正能量的电子的反粒子,也就是所谓的正电子。

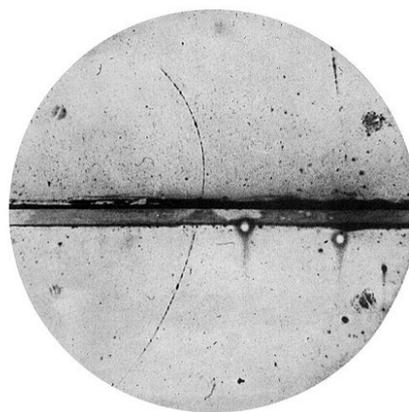


图1 安德森观测到的正电子在云室中留下的轨迹的照片。正电子从下往上运动,在磁场中穿过一层薄薄的铅板之后,改变了轨迹弯曲的曲率。轨迹弯曲的方向表明,正电子与正常电子所带的电荷相反

和LHC上的束晕的准直方法。

关于作者雅克·海森斯肯

这篇文章是基于BTML 2013特别活动的宣传册写成的,可以在网络上阅读(英语、法语和意大利语)。访问 <http://events.lal.in2p3.fr/BTML2013/index-en.html>。

(本文译自雅克·海森斯肯, CERN Courier Volume 54, Number 1)