

# $\tau$ 轻子质量测量实验

## ——北京谱仪上的第一项成果

郑志鹏

(中国科学院高能物理研究所 100049)

在介绍 $\tau$ 轻子质量测量实验之前,先介绍一下北京谱仪。

### 一、北京谱仪

1984年北京正负电子对撞机工程开始启动。与这台正负电子对撞机(BEPC)配套的是一台称为北京谱仪(BES)的探测器。正负电子对撞后产生的海量粒子要在这里进行分析、研究。物理学家希望获得一流的研究成果,能否出好的物理成果,谱仪的性能至关重要。

北京谱仪的设计和初期建造由叶铭汉负责,他和同事们经过大量的调查研究决定参考当时在同能区中最先进的Mark III探测器,力争在分探测器的结构、性能、数据获取和物理分析方面以及总体性能要保持先进性。由于经费的限制以及当时工业加工水平的限制,为此我们要付出更多的努力。

BES是由亮度监测器、中心漂移室、主漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器、 $\mu$ 子计数器及大型磁铁、线圈构成的大型磁谱仪。体积约为 $5\text{ m}\times 5\text{ m}\times 5\text{ m}$ ,重500 t。谱仪还包括电子学、数据获取系统和在线、离线分析系统。

建造时要做到每个分部件的指标先进、精准才能保证整个谱仪的优良性能。

我们遇到的第一个难题是加工问题,即谱仪分部件指标的先进性与当年(20世纪80年代)加工水平的差距,使得我们当时在全国很难找到合适的厂家。后来花了很大力气,才找到贵州某军工厂愿意为我们生产精度要求很高的主漂移室的端盖板。还落实了在上海飞机制造厂生产簇射计数器,天津

造船厂生产大型磁铁,原子能研究院生产大线圈……为了保证质量和进度,许多同事只得长期驻厂,及时与工厂的工人、技术员在一起攻克技术难题。他们长时间生活在艰苦的条件下,远离亲人,为工程做出了奉献。

为了保证北京谱仪保质、按时完成,大家都很辛苦,每天工作十多小时,几乎没有节假日,连春节都在加班。那时工资水平很低(一二百元),奖金很少(最早一月5元,后来加到10元),可是人心很齐,都想尽力完成好交给自己的那份任务,实现自己的高能基地梦。

1982年,我负责北京谱仪飞行时间计数器的研制,1986年负责北京谱仪的建造、安装和调试,经历了谱仪建造的全过程。

1988年10月对撞机、谱仪建造成功,大家异常兴奋,但同时也感到压力大。因为能否快出成果,出好成果,这个任务落在了我们谱仪身上。下面就讲一讲谱仪的同事们如何将压力变为动力,如何完成第一个实验,收获第一项物理成果。

$\tau$ 轻子质量测量实验是1991~1992年在北京谱仪上开展的第一项实验工作,做得非常成功。二十多年过去了,但事情发生的前前后后至今不能忘怀。在纪念BEPC/BES建成三十周年之际,将此事记录下来作为历史的留存。

### 二、实验方案酝酿

20世纪80年代末到90年代初,国际高能物理界在相继对 $\tau$ 粒子的质量及其寿命,衰变分支比测定分析后,发现现有的数据与理论预言不符。按当

时 $\tau$ 质量值1784.1 MeV计算, $\tau$ 的弱衰变耦合常数与 $\mu$ 的耦合常数之比偏离1( $=0.941\pm 0.025$ ),这就违反了当时公认的轻子普适性的理论。

因此只有两种可能,或轻子普适性理论不对了,产生了新的理论;或是实验测量有误。有人对当时实验给出的 $\tau$ 轻子质量值持怀疑态度,一是其实验误差大,二是怀疑真值的可靠性,建议重新测量。

通过频繁的国际交流,BES的几位中国同事了解到这一信息后,便聚在一起交流讨论。在讨论中逐渐取得了共识,认为这对BES是一个好机会。我们所处能区正在 $\tau$ 产生阈范围内,可产生大量 $\tau$ 粒子,且本底小,具有高能区所没有的优势。大家感到应该抓紧此机会,尽快在BES上开展 $\tau$ 轻子质量测量实验。如何测,众说纷纭。但一致意见是不采用以往实验采用的传统方法即 $\tau$ 产生截面拟合法。该方法在拟合到接近 $\tau$ 产生阈时受统计误差大的影响,不可能得到精确结果。因此我们必须采用新方法。但用什么样的新方法,在多次讨论中大家比较倾向用扫描逼近 $\tau$ 粒子产生阈值的方法,精确测量到 $\tau$ 产生阈就相当于测到了 $\tau$ 质量。 $\tau$ 是一个不稳定的粒子,产生后即刻衰变。但我们可以记录下 $\tau$ 衰变出来的电子, $\mu$ 和强子,通过重建将 $\tau$ 粒子识别出来。显然需要探测器具有较好的粒子分辨和长期运行的稳定性等性能,也要求加速器能提供高亮度,稳定的束流。这些条件BES/BEPC都基本具备。

我们一面做进一步调研和计算,同时分头在日本的KEK和法国的Orsay举行的国际会议上与国际同行进行交流。国际上知名专家如李政道、M. Davier都积极支持我们拟在BES上开展 $\tau$ 质量测量的想法。我曾经与BEPC/BES的创建者之一叶铭汉先生谈到我们这一想法,得到了他大力的支持。在与国际、国内交流中也汲取到很多好的思路。

中国同事意见统一后,我们也征求过刚参加BES合作组的美国学者的意见,他们也表示同意,并为方案的细化提出许多宝贵的意见。

### 三、开题评审

想要做,不等于能做,我们还差关键的一步,即获得国家实验室学术委员会的批准。我们正式提

交了在BES上进行 $\tau$ 轻子质量测量实验的申请报告。为此,国家实验室学术委员会于1991年8月15日召开了评审会议。我先做申请综述报告,讲了开展此项工作的目的、意义、方法和初步方案,强调目前国际上关注的轻子普适性问题需要对 $\tau$ 质量数据重新检验,对我们来说是一个机遇也是一个挑战。然后李金和漆纳丁分别就实验的目标及关键技术和详细计划,拟采取的措施以及目前谱仪的运行情况做了全面的论述。我们三个报告提出测量方案的要点是用扫描方法逼近 $\tau$ 产生阈;用数据驱动方法即每测一个能量点后从获取数据的分析结果,预测下一个能量点的位置;用最大似然法拟合数据;用 $J/\psi$ 和 $\psi(2S)$ 峰刻度质量。

委员们提出了许多质疑,如为什么从原计划在 $J/\psi$ 上取数的稳妥方案,改变成现在的方案,做一个前人没做过的实验,风险会较大。所提出测量精度为0.5 MeV,而加速器能散度为5 MeV,如何做到?这个方法别人没做过,第一次实验就做这么难的题目,困难考虑过吗?等等,可以看出刚开始大多数委员是持否定态度的。我们耐心地回答这些问题,解释说我们这种方法对束流能散度要求不高,对能量稳定性要求高,我们拿出事先准备好的计算结果和谱仪长期运行的稳定度好于0.5 MeV的实验数据,说明最后测量精度做到0.5 MeV是可以做到的。我们还回答说,这个实验会面临许多困难,但我们有应对困难的措施,并一一向委员陈述这些措施。在和委员们进行多次交流后形势有了转机。最后委员们一致批准了我们提出在BES上进行 $\tau$ 质量测量实验的申请。大家异常兴奋,同时也感到压力很大。我们只好把压力变成动力。

### 四、精心准备

实验准备工作第一项是谱仪检修,全面地检查各子探测器和电子学系统,增加了电磁屏蔽,重新布置了地线,使电子学噪声大大降低了。增加了局部实验区的防护墙,减少了粒子辐射本底。谱仪的各分探测器也做了检修,使其处在良好运行状态。这样一来,谱仪整体呈现出一个最佳状态。

为了对实验有深入的了解,我们事先做了蒙特

卡洛模拟。

我们邀请四室的理论家参加粒子的初态、末态辐射修正,库仑相互作用和真空极化等计算。

对于最大似然法,数据驱动等一些关键问题我们和美国合作者进行了深入的讨论,使实验方案更具体,更完善。

## 五、紧张有序的运行

方案获得批准后不久,经过充分的准备工作后,实验开始了。美国合作者也参加值班和分析并与中方同事保持密切的交流和沟通。全体谱仪人员都明确实验的意义,因此都精神饱满地参加运行,认真值班,严格把握数据质量。为了保证实施数据驱动方法,软件组的同事创新地完成了简化的程序,大大提高了数据处理效率,保证能在短时间内分析出结果,给出下一个实验点的能量值。实验过程中得到了电子学室、计算中心、加速器中心的密切配合。他们为电子学的稳定运行,数据分析的高效率和束流的高质量 and 稳定性做出贡献,保证了谱仪的顺利运行。每周一次的对撞机运行例会上,谱仪提出需要其他单位配合的问题,都可在会上得到解决。

实验开始时,第一个能量点放在当时的 $\tau$ 质量世界平均值 1784 MeV 上,运行一段时间后没有看到 $\tau$ 事例,往下走第二个点还没看到。到了第三个点运行一段时间后就观察到了 $\tau$ 事例,大家很高兴,知道产生阈值必在第二、第三点间,为了精确找到它,又测了7个点,上下寻觅,终于通过最大似然法拟合得到了 $\tau$ 产生阈值。前后运行了几个月,在12个能量点上获取数据,(其中两个点用来测量探测效率)。由于使用数据驱动法,大大减少了取数点和运行时间。

长时间的不间断运行中,谱仪和加速器十分给力,运行状态良好,束流稳定,保证了数据质量。

拟合时我们采用对质量、效率同时拟合的方法,最终求到 $\tau$ 质量的精确值为  $1776.96 + 0.3 - 0.27$  MeV,其中心值比原来的小 7 MeV,精确度提高了 10 倍。实验误差比预计的 0.5 MeV 还好。按

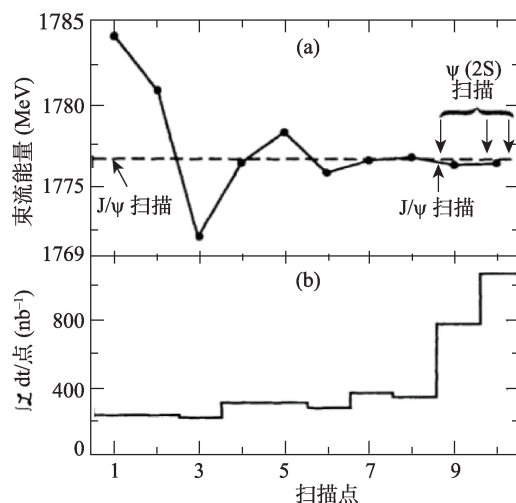


图1 (a) 能量扫描过程及相应的能量点;  
(b) 每个能量点所采集数据的积分亮度

照我们给出的新 $\tau$ 质量值,计算出弱耦合常数比  $G\tau/G\mu = 1.0005 \pm 0.0069$ ,非常接近一,因而说明轻子普适性理论是无庸置疑的。

## 六、丰硕成果

几年来关于轻子普适性是否正确的争议解决了,谜团来自于过去测到的质量值偏高了 7 MeV。BES 合作组一举解决了这个问题。实验方法简洁、清新,数据无可挑剔,一下子高能物理界认识了 BES。

1992 年、1993 年 BES 合作组被邀请分别在海外华人物理大会,美国物理学会大会和国际轻子光子大会上宣布了 in BES 上测量到的 $\tau$ 轻子质量结果,引起了极大的反响。

李政道先生、M.Pertl(因 $\tau$ 粒子的发现获诺贝尔物理学奖)、M.Davier 对该成果高度赞赏,认为是近期得到的非常重要的实验结果。粒子数据组(PDG)认为该结果是 50 年来高能物理的最重要实验数据之一。这是 BES 合作组的第一项成果,有了一个好的开局,在国际上造成了良好信誉。自此以后 BES 创新成果不断出现, $R$ 值测量, $X(1835)$ 粒子和 $Z_c(3900)$ 系列新粒子的发现以及 $\Lambda_c$ 粒子衰变分支比的绝对测量等创新成果接踵而来,彰显出 BES 在国际粒子物理 $\tau$ -粲领域已牢牢地占有一席之地。



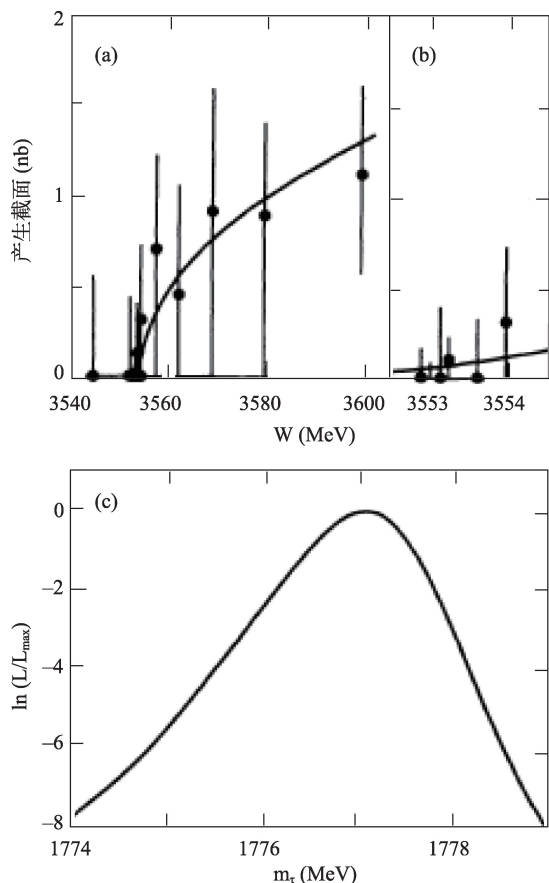


图2 (a) $\tau\tau$ 产生截面随质心系能量的变化及拟合结果。带误差棒的点为数据,曲线是拟合结果;(b) $\tau\tau$ 产生阈值附近的截面;(c) $\tau$ 质量随最大似然值的变化

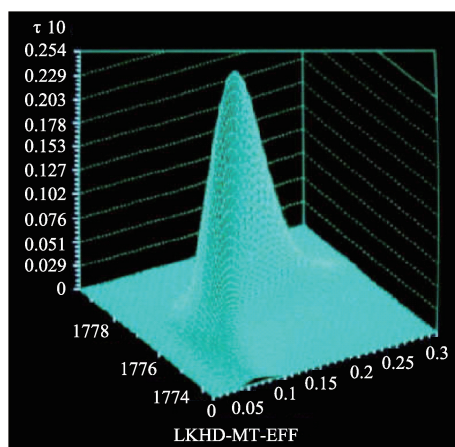


图3 质量,探测效率同时拟合得到 $\tau$ 质量值

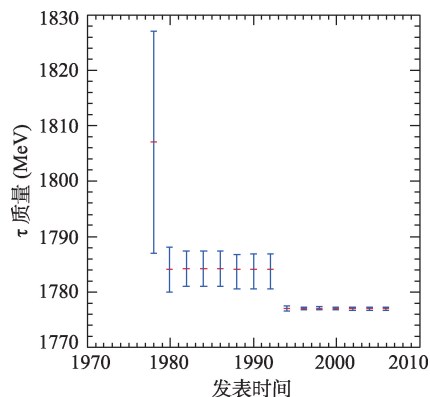


图4 PDG手册给出的 $\tau$ 质量测量的历史过程,认为BES的结果是五十年来的最重要实验数据之一

## 科苑快讯

### 简单机器人可以群体化执行复杂任务

一大群蜜蜂或蚂蚁可以一起工作,完成个体不可能完成的任务。比利时的研究者现在发现一群机器人能够完成同样的壮举——包括明确所完成任务的正确顺序。

研究者在一个六角形竞技场内部署了20个双轮机器人,每个有50毫米高。他们的工作是以正确的顺序进入3个点位。机器人成功的关键是形成链条,研究者在《科学·机器人》(*Science Robotics*)上做了报告。这个链条延伸了机器人对周围环境的有限认知,使它们不仅能够知道去哪里,而且知道正确的步骤。

在整个实验过程中,机器人担任了一个或多达4个角色——任务参加者、秩序维护者、跟随者和联络者。进入一个点位后,任务参加者会变身为秩序维护者,组织其他任务参加者进入。秩序维护者会开始建立新的链条,让跟随者和联络者使链条顺应当前环境。根据点位红外信号的正面或负面反馈,秩序维护者将指挥任务参加者有序地进入下一个点位。

(高凌云编译自2018年7月31日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org))