

# 陶质量测量的前世今生

莫晓虎

(中国科学院高能物理研究所 100049)

按照现在的说法,陶( $\tau$ )轻子是在1974~1977之间由美国科学家马丁·佩尔领导的实验组发现的。佩尔当时在斯坦福直线加速器中心(SLAC)工作,他一直坚信会有比缪( $\mu$ )轻子更重的轻子存在,并不遗余力地不断寻找,只是那时没人有信他。1974年发现了第一个 $e$ - $\mu$ 事例,当时佩尔自己也将信将疑。

经过一年,找到了24个确定无疑的 $e$ - $\mu$ 事例,发表文章的题目比较谨慎,只说是“反常轻子的迹象”。又过了一年,105个 $e$ - $\mu$ 事例得到了分析,新轻子被命名为U,表示unknown(不知道)的意思,这时佩尔的胆子才大了起来。等到1977年的时候,佩尔亲自将新发现的轻子命名为 $\tau$ ( $\tau$ 是希腊词第三的首字母)。之后, $\tau$ 轻子的研究蓬勃发展,高潮是1995年,佩尔先生因其发现第三代轻子荣获诺贝尔物理学奖。

目前物理界认定自然界只存在三种带电轻子。所谓轻子,顾名思义就是质量比其他粒子小。最轻的是电子( $e$ ),是自然界中屈指可数的稳定粒子之一。比电子重的是 $\mu$ 轻子,也是名副其实的轻,比其他介子和重子都轻,所以只能衰变到电子。 $\tau$ 轻子与前两者迥然不同,不但重,而且很重,比有的重子还重,除了衰变到轻子末态之外,既能衰变到介子末态,又能衰变到重子末态,有众多的衰变道可供测量;而且,其衰变产额可以根据标准模型得出相当精准的计算。于是,粒子物理的几乎所有领域都可以利用 $\tau$ 轻子进行研究,致使 $\tau$ 轻子物理具有了得天独厚的研究价值。

世界上各个实验组根据自己加速器与探测器的特点,开展了 $\tau$ 轻子物理相关的各式各样的研究,以期获得最佳的实验成果。 $\tau$ 轻子的实验测量,主要有三个方面,即分支比测量、寿命测量与质量测

量。对于前两类实验,北京谱仪或处于劣势,或缺乏优势,从而没有竞争实力。但是在 $\tau$ 质量测量方面,情况却完全不同。

测量 $\tau$ 质量通常有两种方法。一种称为阈质量方法,主要利用 $\tau$ 轻子强衰变过程末态粒子的运动学特点,拟合 $\tau$ 轻子阈质量谱得到其质量。方法的优点是利用采集到的海量样本,得到较小的统计误差;缺点是粒子动量绝对刻度的不确定性会导致较大的系统误差。另一种测量方法称为阈值扫描方法,通过拟合阈值附近 $\tau$ 轻子对的产生截面随能量的变化曲线得到 $\tau$ 质量。该方法每个能量点上所需的事例数不多,利用产生截面在阈值上下从无到有的突变特点,可以很好地确定 $\tau$ 轻子质量的位置。北京谱仪设计的能量范围恰好涵盖 $\tau$ 轻子对的产生阈值,利用不大的数据样本即可获得相当高的精度,这正是中国高能加速器的优势所在。

北京正负电子对撞机在邓小平主席的亲自关怀下立项筹建。新诞生的加速器特别需要做出有意义的工作向世界展示我国高能物理的能力,向全国人民报告科研成果。恰逢此时,一个难得的机遇悄然而至。

根据标准模型,有所谓的轻子普适性原则,即所有三代轻子与W介子带电流的耦合应该相同,即 $g_e = g_\mu = g_\tau = g$ (普适耦合常数)。考虑 $\tau$ 轻子和 $\mu$ 轻子的纯轻子衰变过程 $\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau$ 和 $\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu$ ,这两个过程都通过与W介子带电流的耦合实现。理论计算得到衰变的耦合常数与衰变分支比的关系如下:

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)^2 = \frac{\tau_\mu}{\tau_\tau} \left(\frac{m_\mu}{m_\tau}\right)^5 \frac{B(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau)}{B(\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu)} (1 + \Delta_c),$$

其中 $g_e$ 和 $g_\mu$ 分别表示带电流作用定点的耦合常数,

$\tau$ 和 $\tau_\mu$ 分别 $\tau$ 轻子和 $\mu$ 轻子的寿命,  $B(\tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau)$ 和  $B(\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu)$ 表示相应过程的衰变分支比,  $\Delta_c$ 表示各项修正因子。这里的关键在于上述公式涉及 $\tau$ 质量的五次方项, 意味着轻子普适性检验对于 $\tau$ 质量非常敏感。换言之,  $\tau$ 质量的精确测量对于普适性检验意义重大。

根据当时粒子表(PDG)的数据, 算得的上述比值为  $0.941 \pm 0.025$ , 与普适性要求的比值 1 偏离了 2.4 个标准偏差。出现此种情况, 或者源于理论出现问题, 或者因为实验测量有误。当时有人提出了对 $\tau$ 质量实验测量值的怀疑, 其一是实验误差大, 其二中心值不可靠, 建议重新测量。BES 合作组的中国同事在国际交流中了解到这一信息后, 感到这是难得的机会, 合作组应该及时抓住, 进行 $\tau$ 质量测量。

说来容易, 做起来就没那么容易了。当时 $\tau$ 质量测量的世界平均值为  $1784.1^{+2.7}_{-3.6}$  MeV, 误差较大, 因此所谓的测量实际上还具有“寻找”的含义。这就增加了实验的难度, 对于实验设计提出了更高的要求。实验人员进行了大量细致的模拟、比较、分析和研究, 在充分准备的基础上, 向国家实验室学术委员会正式提出申请, 指出 $\tau$ 质量测量的重要意义, 按照当时的说法: “这项测量将推动对于 $\tau$ - $\mu$ - $e$ 轻子普适性的检验, 使人类对粒子物理的实验研究迈上一个新台阶。”申请报告提出测量方案的要点是采用扫描方法逼进 $\tau$ 阈值; 利用“边取数边由分析指明下一个能量点”的所谓“数据驱动”的方式采集样本; 应用最大似然法拟合数据; 根据  $J/\psi$  与  $\psi'$  两个共振态的峰值位置刻度能量。经过耐心细致的交流, 实验申请最终获得委员们的一致首肯。

1991 年 11 月 1 日,  $\tau$ 质量测量实验正式开始, 历时 80 天, 至 1992 年 1 月 19 日结束, 先后完成  $J/\psi$  与  $\psi'$  共振峰的扫描, 以及 $\tau$ 阈值附近 12 个能量点的数据

采集。合作组成员努力奋斗, 在分析  $e$ - $\mu$  衰变末态的基础上获得了 $\tau$ 质量的测量结果(参见表 1), 比粒子表提供的数值小了 7.1 MeV, 由此算到的耦合常数的比值为  $0.960 \pm 0.024$ , 普适性要求得到很好的满足。几年来普适性是否正确的谜团由于 BES 实验结果得以澄清。在随后的岁月中, 随着 $\tau$ 轻子的衰变寿命、衰变分支比等相关信息日益精确, 耦合常数的比值日益趋近于 1, 普适性原则得到越来越精确的检验。

在 BES 合作组完成 $\tau$ 质量测量之后, 德国、美国的实验也先后获得了 $\tau$ 质量的测量结果(参见表 1), 三家的结果彼此一致, 其中尤以 BES 的测量精度为高。这项测量被认为是当时高能物理界的重要工作。

之后, BES 合作组的综合分析了  $ee, e\mu, eh, \mu\mu, \mu h, hh$  ( $h$  表示带电的 $\pi$ 或 $K$ 介子)六类末态, 进一步提高了 $\tau$ 质量的测量精度, 最终的测量值为:

$$m_\tau = 1776.9^{+0.18}_{-0.21} \text{ } ^{+0.25}_{-0.17} \text{ MeV.}$$

有关的实验细节可以参看图 1 与图 2 的内容。

实际上, 自从 $\tau$ 轻子发现以来, 在许多实验中都开展了关于 $\tau$ 轻子质量的测量, 图 3 总结了 20 世纪 90 年代末的实验结果, 其中 BES 合作组的测量精度最高, 并且保持领先优势十余年; 粒子数据组更是将这一结果认作 50 年来高能物理的最重要实验数据之一。作为合作组的第一项成果, 在 1992 年、1993 年曾经受邀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报告, 引起了极大反响, 为合作组奉献了一个闪亮的开局, 赢得了良好的荣誉。如果回顾 $\tau$ 质量测量的历史, 从 PDG 提供的信息(参看图 4) 我们可以明显注意到 20 世纪 90 年代 BES 结果发表以来,  $\tau$ 质量测量呈现出与以往完全不同的面貌, 从此开启了 $\tau$ 质量精确测的新时代, 这一意义是无论如何强调都不过分的。

表 1 1992 年前后 $\tau$ 质量测量的实验结果

国家/地区	样本量	研究末态	$\tau$ 轻子质量/MeV	文章发表
中国/北京	$5.1 \text{ pb}^{-1}$	$\tau^+\tau^- \rightarrow e^+\mu^+\nu\nu$	$1776.9^{+0.4}_{-0.5} \pm 0.2$	Phys.Rev.Lett.69(1992)3021
德国/汉堡	$341 \text{ pb}^{-1}$	$\tau^- \rightarrow \pi^-\pi^+\pi^-\nu$	$1776.3 \pm 2.4 \pm 1.4$	Phys.Lett.B292(1992)221
美国/依萨卡	$1430 \text{ pb}^{-1}$	$\tau \rightarrow h\nu$ ( $\tau$ :hadron)	$1778.3 \pm 0.7 \pm 1.7$	Phys.Rev.D47(1993)R367

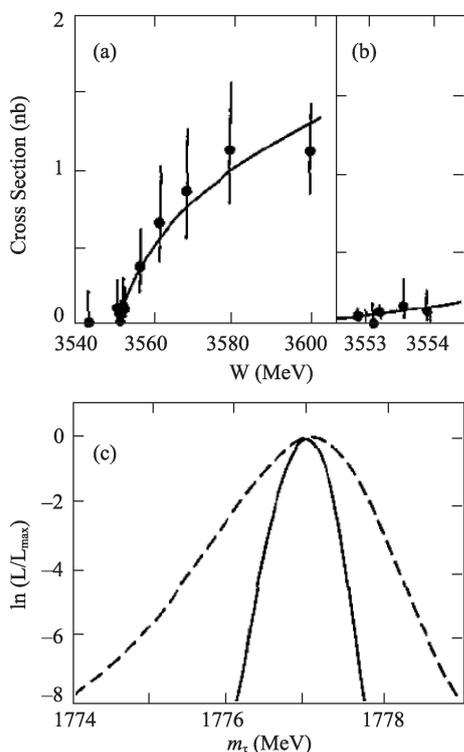


图1 (a)  $\tau$ 轻子对产生截面的最大似然拟合结果与实测数据点的比较;(b) 为 $\tau$ 轻子对产生截面附近的放大显示;(c) 似然函数的对数值对于 $\tau$ 质量的依赖,这里效率与本底拟合参数固定于其优化拟合值;图中虚线是只利用 $e\mu$ 是的相应结果

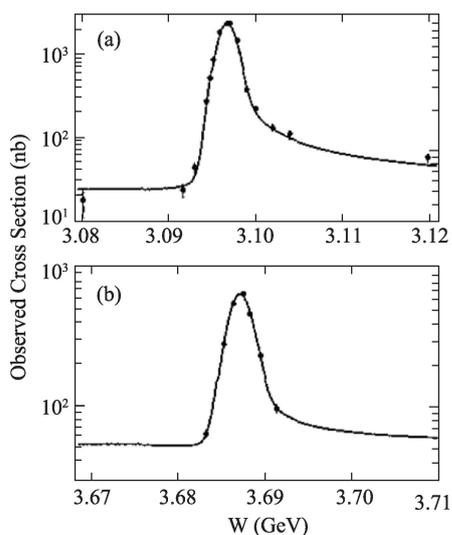


图2 实验过程中一组典型的扫描拟合结果,横坐标为质心能量;  
(a)  $J/\psi$ 共振峰截面的拟合;(b)  $\psi$ 共振峰截面的拟合

物换星移,时过境迁,人类迈进新世纪,高能物理研究展呈现出一番崭新的景象。北京正负电子对撞机始建于1984年,运行20年后,于2004年加速器与探测器联合升级改造。升级之后,加速器由单

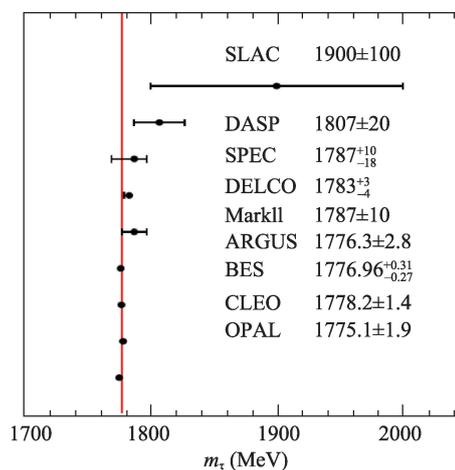


图3 20世纪 $\tau$ 轻子质量的测量结果,图中红线为PDG2000年的世界平均值,即 $m_\tau = 1777.03^{+0.30}_{-0.26}$  MeV(需要说明的是,从PDG1996之后,1990年之前的测量结果,除了DELCO的之外,其他的不再引用)

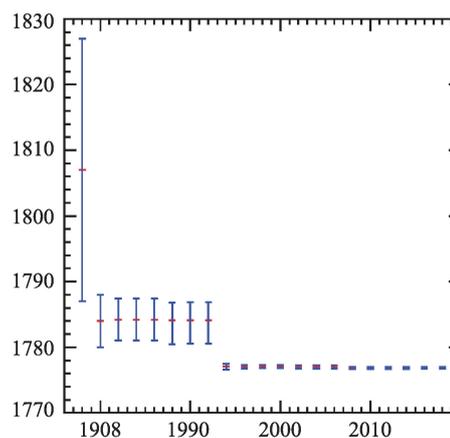


图4  $\tau$ 质量测量的历史记录(PDG网站“历史信息图”一栏中提供)。图中纵坐标是以MeV为单位的 $\tau$ 轻子质量,横坐标是相关测量结果正式发表的年份。可以明显看到20世纪90年代BES发表结果的精度与前此测量相比具有质的改善

环变为双环,设计亮度为 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,较之前提高了100倍。历经四年的奋战,2008年加速器与探测器联合调试对撞成功,8年后亮度达标,成为世界上运行在陶-粲能区亮度最高的加速器。

目前BES合作组已经获取了陶-粲能区世界最大的粲偶素与粲介子数据样本,吸引了来自世界各地14个国家67所科研院校的近500名科技人员,开展和从事研究。高能物理的事业在中国迎来了蓬勃发展的春天。作为曾经国际领先的 $\tau$ 轻子质量测量这一课题也再次提到了实验日程上来。

新世纪伊始,国际上有几家实验开展了 $\tau$ 质量测量,参见表2。他们的测量精度,大体与BES合作组十年前的精度相当。这表明进一步提高 $\tau$ 质量的测量精度,难度很大。熟悉高能物理数据分析的科研工作者深知,随着精度的提高,进一步的改进将涉及诸多因素,困难与工作量不是成比例的线性增长,而是井喷式的指数增长。有一个定量的简单模型,对于不同精度的改进实验的工作量做过定量的估算。一个实验将误差从2 MeV降低到1 MeV,另一个实验将误差从0.2 MeV降低到0.1 MeV;虽然两者降低的相对幅度都是一倍,但是后者的工作量竟然是前者的90多倍!而BES合作组预计的目标,即是将世界平均的 $\tau$ 质量测量精度0.2 MeV降低一倍,达到0.1 MeV的水平。这实在是一项艰巨的任务。

从已有的测量结果分析,进一步提高 $\tau$ 质量测量精度,需要从系统误差和统计误差两方面着手研究。所谓系统误差,简单地讲就是指测量的物质手段(仪器、设备、工具、方法等)本身的局限带来的误差。对于 $\tau$ 质量测量来说,加速器束流能量导致的误差是进一步提高测量精度的主要瓶颈所在。为尽可能降低此项误差,BESIII合作组于2007年成立了由中国科学院高能研究所、俄罗斯布德克尔研究所以及美国夏威夷大学三方参与的课题组,负责高精度束流能量测量系统的建造。

整个系统按照应用技术的不同,大体上可以分为四个子系统:激光与光学系统、激光束与电子束对撞系统,高纯锗半导体探测系统,以及数据采集与运行控制系统(参见图5)。实际的测量过程简述如下:首先,由激光器提供的光束经由两个透镜进行聚焦,聚焦后的光束由一组反射镜系统输送进储

表2 21世纪 $\tau$ 质量测量的实验结果  
(作为比较,BESI的实验结果一并罗列其中)

$\tau$ 轻子质量测量数据 [中心值+统计误差+系统误差]	年份	实验组	数据量	测量方法
$1776.68 \pm 0.12 \pm 0.41$	2009	BaBar	$423 \text{ fb}^{-1}$	阈质量
$1776.81^{+0.25}_{-0.23} \pm 0.15$	2007	KEDR	$6.7 \text{ pb}^{-1}$	阈扫描
$1776.61 \pm 0.13 \pm 0.35$	2007	Belle	$414 \text{ fb}^{-1}$	阈质量
$1776.96^{+0.18+0.25}_{-0.21}$	1996	BES	$5.1 \text{ pb}^{-1}$	阈扫描

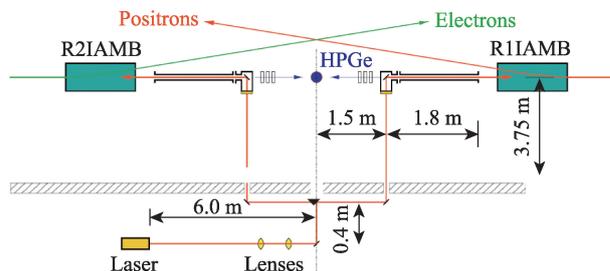


图5 储存环电子能量测量系统示意图  
图中由红绿线条分别表示正负电子束流的运行轨迹;R1IAMB和R2IAMB表示加速器的磁铁;正负电子束流交叉点下方的黑色圆点表示高纯锗半导体探测器。半米厚的水泥防护墙由斑带条框表示。激光器与光学系统位于水泥防护墙之外

存环,实现储存环中的正、负电子束流与激光束流的对撞,对撞之后反射的高能光子束穿透连接部分,打击到高纯锗半导体上,产生的信号由探测器收集处理,从而实现光子能量的测量。这里关键是高纯锗探测器事先需要利用已知能量的放射源进行刻度,精准地标定光子能谱。实际上,在测量过程中,高纯锗探测器旁边即放置有放射源,随时进行标度。

一旦反射光子的能量得以确定,根据下述公式可以最终确定电子束流的能量。

$$E_e = \frac{\omega_\gamma}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{m_e^2}{\omega_0 \omega_\gamma}} \right),$$

公式中, $E_e$ 是电子能量, $m_e$ 是电子质量, $\omega_0$ 是激光的能量, $\omega_\gamma$ 是能量测量系统确定的反射光子的能量。这些量中,电子质量与激光能量的精度都达到 $10^{-8}$ 的量级,所以电子能量的精度主要由反射光子的精度确定。

经过四年的奋战,造价三百多万的“储存环中电子能量高精度测量系统”建成并投入运行,束流能量实测值的相对精度好于十万分之五的预期值,比之前BEPC二极磁铁标定方法获得的精度提高了两个量级。该系统提供了正负电子束流能量与能散等重要信息,进一步完善了加速器和探测器的实验功能,为包括 $\tau$ 质量在内的各类高精度测量奠定了坚实的硬件基础。

与二十年前相比, $\tau$ 质量测量有新的问题需要

考虑。当时,由于误差大,中心值不准,测量还带有一定寻找的意味。现在,测量精度已经很高,而且加速器的亮度也比以前提高了一百倍,于是,如何优化方案以便在特定的取数时间内获得最佳结果,成为统计误差研究方面的根本问题。

为了确立优化的取数方案,研究人员采用蒙特卡罗模拟的方式仿真取数过程,系统地尝试和比较各种取数设计,从中筛选出最优的方案。开始的时候,研究从单参数拟合分析入手(即在数据拟合过程中只考虑以 $\tau$ 质量作为唯一拟合参数的情况),结果表明,对单参数拟合来说,在一个能量点取数即可获得最佳效果。这一结论乍一听有点出乎意料。人们知道两点决定一条直线,要确定一条曲线,若干个点似乎是必不可少的。不过,深入思考就会意识到,扫描曲线的形状实际上完全由理论公式中的参数确定,唯一的参数只需要唯一的输入信

息。当然,这个唯一的能量点的位置选取,依然需要细致的研究,最终的结果表明,截面对于能量的导数取极大值的地方是最佳取数点。这一优化成果首次在国际会议报告时,引起了与会者极大兴趣与热烈讨论。之后,研究人员一鼓作气,完成了两参数、三参数的拟合优化的研究,从而确定了 $\tau$ 质量测量优化取数方案的设计。

在模拟优化的基础上,研究人员更进一步,综合利用泛函分析,矩阵分析,与凸优化分析等多个领域的相关知识,建立了适用于一般扫描实验方案设计的所谓的二次优化解析理论,同时也为之前的模拟研究提供了优美而坚实的理论依据。

在新时期,以 $\tau$ 质量测量为契机,科研人员在实验方面建成了国内首例利用康普顿逆散射原理实现电子束与激光束对撞的系统;在理论方面确立了一般性扫描实验优化设计的流程;进而从实验与理

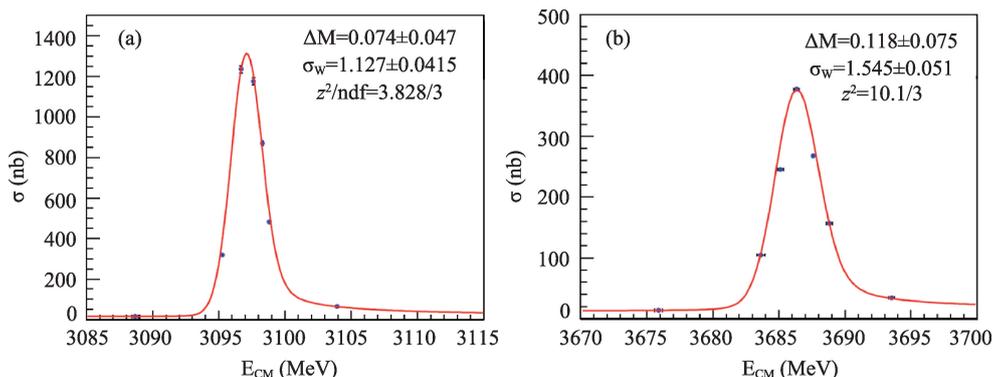


图6  $J/\psi$  (a)与 $\psi'$ (b)共振峰截面的拟合

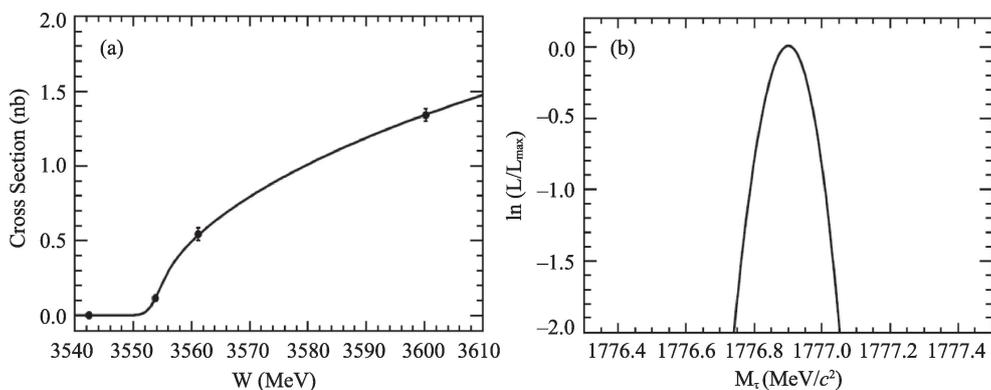


图7 (a)  $\tau$ 轻子对产生截面的最大似然拟合结果与实测数据点的比较;(b) 似然函数的对数值对于 $\tau$ 质量的依赖,这里效率与本底拟合参数固定于其优化拟合值

论两方面实质性地提升了高能物理实验的技术性能,同时也为 $\tau$ 质量测量实验做出了近乎完美的准备。2011年底,依照优化方案,进行了一次尝试性扫描,经由分析确定出 $\tau$ 质量为

$$m_{\tau} = 1776.9 \pm 0.12_{-0.13}^{+0.10} \text{ MeV}。$$

根据这个测量结果,结合已有的信息,确定出普适性相关的比值为  $1.0016 \pm 0.0042$ , 在 0.4 个标准偏差的水平上验证了轻子普适性原则。数据有关的一些结果,参见图 4 与图 5(更为详细的结果可以参看发表的文章 *Physical Review D* 90 (2014) 012001)。相比以前的实验,新实验凸显出简洁优良的数据分布,这是优化方案的必然结果。

正式 $\tau$ 质量阈值附近的精细扫描于 2018 年 4 月 14 日至 5 月 3 日进行,历时 20 天,按计划,依次完成了  $J/\psi$  共振峰扫描, $\tau$  阈值扫描,以及  $\psi'$  共振峰扫描,细

致的信息参见表 3。相关的数据分析正由中国高能所与俄罗斯布德克尔研究所的研究人员合作开展。

三十年前,中国改革开放的总设计师邓小平满怀豪情地说,中国要在高科技领域占有一席之地。中国高能物理的发展已经证明,我们不但占有了一席之地,而且正在开拓“多席之地”;不是孤星闪烁,而是群星璀璨;这其中就有 $\tau$ 质量测量的光彩。在这一领域,我们曾经处于国际领先的地位,今天我们依然优势不减。在可以预期的不久将来,BES 实验将再次向世界奉献出精度最高的 $\tau$ 质量测量结果。

表 3  $\tau$  质量阈值扫描相关信息小结

数据类型	数据点数	样本亮度( $\text{pb}^{-1}$ )	取数时间(小时)
$J/\psi$	7	38	41
$\tau$	5	130	119
$\psi'$	9	68	109



**科苑快讯**

**科学家教计算机学会恐惧——为了让它们更好地驾驶汽车**

计算机能够完成一些任务,比如玩一个反复试验的游戏。但是,游戏中用到的有效方法并不适用于现实世界中的高风险任务,这些任务中的“失败”可能涉及高速碰撞。为了安全驾驶,人类具有精巧的反馈系统:我们的战或逃反应。在这种反应中,会出现心律加快和手心出汗的生理反应,发出“害怕”信号,使我们保持警惕,从理论上讲,就是摆脱麻烦。现在,微软的研究人员正在给人工智能(artificial intelligence, AI)程序一个粗糙的焦虑模拟,帮助它们在运气不好时有所感知。

科学家将传感器装在人们的手指上,记录他们在驾驶模拟器时的脉搏振幅,作为觉醒的一种衡量标准。一种算法利用这个记录——4 个人共用 80 分钟——学习预测平均每一个人在球场上每一刻的脉搏振幅。然后利用这些“恐惧”信号作为向导,在虚拟世

界中驾驶。如果一个人感到害怕,他可能会想:“我做错了什么。”自动识别系统(AIs)利用这种方法仍然必须用撞车的方法去学习安全驾驶技巧,但是它们要达到与无所畏惧的人工智能同样水平的表现,还需减少 25% 的撞车事故。研究人员在这周的国际学习表征会议(International Conference on Learning Representations)上做了报告。

研究人员想知道,这种兴奋是否只是粗略地代表与墙壁之间的距离,所以它们训练另一个人工智能利用墙壁的临近而不是恐惧去驾驶。但是,恐惧却被证明更有用。研究人员做出假设,认为可能是因为人工智能编码一系列更多的预期,包括转弯太快的感觉。

(高凌云编译自 2019 年 5 月 10 日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org))