



从正负电子对到 τ 轻子

本刊编辑部整理



编者按：

去年正值赵忠尧先生 90 华诞，他应吴大猷之约赴台访问。中国科学院高能物理所副所长赵维仁，陪同前往并受赵老委托，在台湾中研院物理所作了题为《从正负电子对到 τ 轻子》学术报告，受到热烈欢迎。本刊编辑部征得同意，根据记录整理成文发表，以饷读者。

赵忠尧先生是中国年资最高的物理学家之一，今年他与周培源周老同满 90 岁，比严济慈严老仅“年青”二岁。在海峡两岸和海内外健康长寿的中华物理学家还有吴大猷吴老，王淦昌王老，吴健雄吴老。正是物理天工总是鲜，物理学家寿延绵。更不用说，牛顿寿长 84 岁，狄拉克 82，富兰克林 84，密立根 85，汤姆逊父子 83 和 84，韦伯 87，普朗克 89，威尔逊 90。物理学家多高寿，在座的同行和朋友们对此也必定感到高兴和受到鼓舞吧。

赵老能在如此高龄越过海峡访问，确实非常高兴，也很愿意与科学界的朋友交流学术，但心有余而力不足，故由我代他向各位做一个简短的报告。主要回顾赵先生在 20、30 年代的工作，以及介绍高能物理所的部分工作，题目是“从正负电子对到 τ 轻子”。

报告第一部分是根据赵先生早年工作论文和杨振宁先生的有关文章整理的，这里特别要感谢杨先生及海内外朋友在这方面所做的努力和贡献，这贡献实际是澄清了物理学史上一个短暂的片断。

第二部分报告从赵先生延续到第二、第三代物理学家在高能物理所工作的部分成果。这里特别要感谢李政道先生及海内外朋友，他们为支持建造北京正负电子对撞机(BEPC)和北京谱仪(BES)以及其后开展的物理工作，做出了特殊贡献。

第一部分 “正负电子对”

各位都了解，20 世纪 30 年代是近代物理学发展的鼎盛时期，许多重大的实验和理论相继产生，其中正电子的发现及正负电子对产生和湮灭机制的研究，使狄拉克电子论最终为物理学家所接受，从而奠定了量子电动力学(QED)在现代物理学中的地位。而在此之前几年，从 1929 年到 1930 年间，赵先生以其出色的实验研究，发现了硬 γ 射线在重元素上的“反常吸收”和“特殊辐射”，即从实验上观察到电子对的产生和湮灭辐射现象，这是发现正电子的前奏，是对于上述 30 年代物理学重要进展的历史性贡献。

赵先生的工作主要包括在美国加州理工学院进行的两个实验。

第一个实验的论文“硬 γ 射线在物质中的吸收系数”发表于 1930 年 5 月，它叙述了发现“反常吸收”的实验结果。

该实验是用 Th^{γ} ，即放射源“钍”(thorium)，辐射出能量很窄，而且稳定的 2.6MeV γ 射线，测量其在不同物质中的吸收系数，并与描述康普顿散射截面的克莱因-仁科公式相比较，以验证这一公式的正确性。这是赵先生当时的导师密立根教授给的题目。其实实验装置中置入放射源的锥形器具做成阶梯形，以及测试样品之前的过滤片，都是为了抑制本底和杂散辐射。探测器先后采用了验电器(electroscope)和在当时最先进的高压电离室及真空静电计(Ionization chamber and electrometer)。

实验结果表明，硬 γ 射线在物质中的吸收系数随不同物质原子序数的增加平滑上升，在重元素例如铅中，测得数据大于克莱因-仁科公式给出的值约 40%，这种“反常吸收”，恰恰是硬 γ 射线通过重元素时转换成正负电子对的实验证据。当时进行有关实验的还有欧洲两个实验组的物理学家，他们于 1930 年也分别独立地提交了结果大致相同的论文。但从一张比较实验结果的图形中可以看出赵先生的实验数据点上升平稳，且更为准确。

为了进一步探索“反常吸收”的机制，赵先生又设计了专门测量硬 γ 射线在重元素上散射的第二个实验，并以“硬 γ 射线的散射”为题于 1930 年 10 月发表了研究结果。

第二个实验所用的探测器为高压电离室和真空静电计，本底和涨落较小，实验结果稳定而且干净。探测结果包括散射线的强度和波长，是在前向、横向和后向等各个方向上进行的。所得射线强度经减去各个方向上不同的康普顿散射本底，得到各向均匀的附加散射强度，所得附加射线波长，推算为 22.5 μ 。实验结

果表明, γ 射线被铅散射时,除康普顿散射外,伴随着反常吸收,还有一种特殊的光辐射,其强度是各向同性的,其波长为 $22.5x.u.$,即 $0.5MeV$,与一个电子质量的相当能量非常接近。这正是电子对湮灭后放出一对 γ 光子的辐射现象,它首次在实验上被观察到。

这篇论文发表后一、二年的时间内,其他实验组都不能重复做出相同的结果;到 1932 年,才有欧洲物理学家(格雷和塔兰特)发现了 $0.47MeV$ 的特殊散射,但同时他们又错误地宣称,还发现有 $0.92MeV$ 的成份。这说明赵先生的实验难度大,其严格精确的成果处于当时国际领先的水准。

直到 1933 年,布莱克特和奥哈里尼在安德逊于云室中看到正电子径迹后,提出“特殊散射”可归因于电子对湮灭,才最终完成了确认狄拉克电子论和量子电动力学的历史进程。遗憾的是,在他们的著作中,对赵先生实验的引述非常不严格,把赵先生在 1930 年首先独立作出的实验结果引述为 1931 年;并把它与其他二篇发表时间较晚、水平也不及赵先生的实验结果相提并论,甚至将这两篇文章列在赵先生文章之前。上述种种复杂而混淆的历史状况,使赵先生的成果在当时及后来很长时期内没有得到正确的评价和公认。

从 1983 年开始,杨振宁先生花了不少精力收集整理资料,直至 1989 年 7 月,与李炳安一起正式发表题为“赵忠尧,电子对产生和湮灭”的文章,深入细致的分析了赵先生在 1929 年至 1930 年所做的实验,特别是引述了安德逊和奥哈里尼本人迟至 80 年代才做出的有关赵先生工作的评价。他们的回顾都强调,30 年代早期,是赵的工作激发了他们的重大研究,这些研究有助于转变物理学家对于量子电动力学的看法。可以说,正是赵先生以其早年严谨精确和首创性的实验,为后来安德逊、布莱克特和奥哈里尼历史性的工作进展提供了基础。

第二部分 τ 轻子质量测量

从 30 年代到现在,这 60 多年间,近代物理学的发展速度惊人。人们对于基本粒子的认识,已从当年仅有的质子、电子和光子,增加到三大家族的数百种。正负电子对的产生和湮灭,早已不再是令人迷茫的物理现象,在 e^+e^- 对撞机里,正负电子的束流不断产生、加速并相互碰撞,为物理学家在更高能区进行更深层次的研究提供了有力的武器。以 e^+e^- 作为第一代的轻子家族,已经发展到第二、三代 μ 和 τ 。可以说,研究这一代又一代基本粒子的物理学家们也是代代延续的。与赵先生同时代的,以及其后第二代、第三代的众多学者,在高能物理这块科学前沿的土地上勤劳地持续耕耘,做出了结果。这就是在北京正负电子对撞机和北京谱仪这“一席之地”上开展的 τ 轻子物理研究。

关于 BEPC/BES 的性能指标、运行状况、实验进展和 J/ψ 、 D_s 数据分析成果等方面,将不在此详细

叙述。相信不久之后,BES 实验物理的主持者——高能物理所所长郑志鹏先生,和郁忠强先生,将有机会来这里向各位报告这方面的详细情况。现在只简要介绍一下最近在 BES 上测量 τ 轻子质量的结果。 τ 轻子和 τ 中微子被称为基本粒子中的第三代轻子。当前描述基本粒子相互作用最成功的理论是标准模型。根据这个理论中关于轻子普适性的预言,三代轻子 e 、 μ 、 τ 的弱相互作用耦合常数应该是相同的。但是目前测定的 τ 轻子的参数与这个预言不尽相符。在这些参数中包括 10 年前测量的 τ 轻子质量,为 $1784.1^{+2.7}_{-3.6}MeV$ 。这是一个比较陈旧,精度偏低,而又与标准模型不尽符合的实验数据。显然,重新测量这一基本参数,是当前粒子物理研究中很有意义的一项工作。

北京正负电子对撞机和北京谱仪的工作能区正好覆盖 τ 轻子对的产生阈能。它们并且有着在该能区首屈一指的高亮度,低能散度和优良的探测性能。可以说是目前世界上能够承担这一任务的最适合的加速器和探测器。从 1991 年 11 月至 1992 年 2 月,包括近百名高能所科研人员和数十位美国物理学家参加的 BES 合作组,顺利进行并完成了这项测量 τ 轻子质量的实验。在连续运行的实验过程中,BEPC/BES 始终保持了较高的工作亮度 $5 \times 10^{30}cm^{-2}s^{-1}$ 和稳定性能,获取事例数据的积分亮度共达 $6200nb^{-1}$, 平均每天 $100nb^{-1}$ 左右。这样的实验和运行水平,在这一能区是居世界领先地位的。

在实验方法上,我们直接在 τ 轻子对产生阈附近的能区上扫描,通过最大似然函数对经过精确修正的截面公式进行双参数拟合,从而逐个选择和确定扫描的能量点,直至逼近和达到最后的能量,即相当于 2 倍 τ 轻子质量的产生阈能,这比传统的远阈区实验拟合的方法具有更高的准确性和精度。经过不同修正的截面公式曲线在远阈区差别是很大的,所以,在远阈区取实验点作拟合对理论公式依赖很大,是不精确的。而在近阈区,各曲线一致且近乎竖直。对质量的测量最为灵敏。所以实验的关键是如何尽快地找到和逼近这一区域。另外束流能散度的影响使截面曲线在这一区域拖了一个尾巴,而这是可以通过积分把它包括在拟合公式之中的。

利用有关截面公式,可以计算出事例生成概率的泊松分布,把这个分布求和就可以构成以 τ 质量 M_τ 和效率 ϵ 为参变量的最大似然函数 L 。每次扫描之后,都利用全部实验数据点对此似然函数进行拟合,对于拟合结果找出使 L 极大的最佳参数估计值 M_τ 和 ϵ ,并把 M_τ 就作为下一个扫描点的选择,直到拟合结果算出 M_τ 的修正趋于一定精度为止。

为了确保束流能量的绝对定标,在实验进程的前后和当中,对 J/ψ 和 ψ' 这二个已知能量的共振峰进行了多次扫描,通过这二个峰能量参数的精度,来保证

τ 质量测量中能量刻度的精确和稳定。

我们从粒子数据表 PDG90 给出的 τ 质量值出发, 根据束流能量高于阈值有 τ 对生成, 低于阈值没有 τ 对生成的判据, 通过扫描逐步逼近阈值, 趋势是正确的。可以估算的精度明显好于 1MeV。在数据分析上, 我们采用 $e\mu$ 双标记的事例筛选方法, 尽管 $e\mu$ 事例产额较小, 但由于实验背景的本底排斥率高达 1.4×10^6 , 所以仍可保证实验结果的高精度。这一排斥率是通过检验我们前期获取的几百万 J/ψ 事例而推算出来的。用相同的离线分析程序, 在低于 τ 产生阈能区的几百万 J/ψ 事例中, 只筛选出屈指可数的几个误判的 $e\mu$ 事例。

BES 实验测量的结果给出 τ 轻子质量为 $1776.9 \pm 0.5 \text{ MeV}$, 比前述粒子表的数据向下修正 7.2MeV。超出其标准偏差 2 倍, 提高精度 5 倍。分析计算表明, 这一结果为解决轻子普适性与 τ 轻子参数(包括质量、寿命的分支比)之间的矛盾向前迈进一步, 对于检验基本粒子的标准模型有着积极的意义。当时从 CERN LEP 上的实验组, 也传来 τ 寿命测量结果向下修正的报导, 这与 BES 的结果意义一致, 是好消息, 但对于想要寻找超出标准模型的新物理来说, 不免令人有一些失望。

BES 合作组测量 τ 质量的结果, 在 1992 年 4 月召开的美国物理学会年会, 和海外华人物理学会, 以及 8 月在 Dallas 召开的第 26 届国际高能物理会议上都作了报告, 获得较高评价, 李政道教授称, 这是近年来高能物理实验最重要的结果之一。

总结这篇简短的报告, 我们愿意指出:

(1) 赵先生早年工作, 在我们中华民族(包括海峡两岸及海内外科学家)的科学成就中, 是一个小部分, 我们研究回顾自己民族的科学发展历史, 有着团结携手, 发扬光大的现实意义。

(2) 赵先生多年来重视实验, 坚持自己动手, 自力更生。至今在高能物理所, 我们能够建设起自己的实验基地, 是这一传统的体现和发展。

(3) 协作是现代大科学不可避免的发展趋势。BES 已经吸引一些美国物理学家来和我们合作。而海峡两岸具有共同文化背景和科学传统的优势, 具有地域相邻仅一水之隔的条件, 在研究基地和经济实力上, 在中老学者和青年学者之间, 可以联手帮助, 互相补充。

我们有理由相信海峡两岸, 以至包括海内外, 整个中华科学合作发展的美好前景, 并愿为之做出努力。

· 物理信箱 ·

关于“苏黎世系统”的黑子数

编者按:

江苏吴县读者葛孝煌同志去年曾来信询问: 沃尔夫提出的太阳黑子计算方法 $R = K(N + 10g)$, 瑞士苏黎世天文台改正数 K 为多少, N 、 g 日变数如何获得, 怎样由月平均值求年平均值等。现请中国科学院紫金山天文台刘炎先生答复。希望有更多的读者参与“物理信箱”栏目的建设。葛孝煌同志您好!

您给《现代物理知识》编辑部的来信已转给了我。拙文能引起您的兴趣, 使我感到十分高兴, 现对您所提出的问题答复如下:

1. 苏黎世天文台的改正数 K 值, 与世界各国天文台的一样, 都是通过比较而归算出来的。

世界各国天文台把每年的太阳黑子数观测资料汇总到苏黎世天文台, 经过分析、处理和归算后, 公布该年中各天的黑子数值 $(R_z)_i$ 。各台站再将自己的观测值 R_p 与 R_z 相比较: $K_i = \left(\frac{R_z}{R_p} \right)_i$

求出每天的 K_i 值。这样, 该台站在这一一年中的 K 值就是全年中 K_i 值的平均值: $K = \bar{K} = \frac{\sum K_i}{n}$ 。

这里 R_z 称为“苏黎世系统”的黑子数, $K_z = 1$ 。而苏

黎世天文台的观测值, R_{pz} 则不一定等于 R_z 的值, K_{pz} 的值也需另行求出。

2. N 、 g 的日变数是通过黑子望远镜进行观测、描图后, 再逐个计数得到的。

3. 把 12 月的月平均值再平均, 就得到年平均值:

$$\bar{R}_{\text{年}} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{11} + R_{12}}{12}$$

4. 近五十年来来的峰年和谷年:

	活动周	年·月	年平均值	月平均平滑值
谷峰	18	1944.2	9.6	7.7
		1947.5	151.6	151.8
谷峰	19	1954.4	4.4	3.4
		1957.9	190.2	201.3
谷峰	20	1964.8	10.2	9.6
		1968.9	105.9	110.6
谷峰	21	1976.5	12.2	12.2
		1979.12	155.3	164.5
谷峰	22	1986.6	13.4	12.4
		1989.6	153.5	157.9

此致
敬礼

刘 炎