

回忆我们在电子偶素方面的 研究工作

——纪念赵忠尧先生诞辰120周年

张天保

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1930年,赵忠尧实验观察到正电子湮没释放的辐射,测得一种能量约等于电子质量的特殊辐射。当年,这是精密的核物理实验。赵忠尧是正电子湮没现象的发现者,对正电子发现有重要贡献。两年后,安德逊(Anderson)在云雾室中观察到正电子的行迹,从狄拉克(Dirac)预言正电子至此约4年时间,人们确认第一个反粒子的存在,开启了粒子物理的时代。之后,结合加速器的进步及多个基本粒子的发现,走上高能物理发展的开阔行程。

在赵先生发现正电子湮没辐射之后,国际上相关基础研究一直在进行并走向交叉学科应用。后者主要是通过正电子湮没寿命、湮没辐射 2γ 角关联及其多普勒展宽三种参数来推断被湮没电子的能量状态及材料相关属性等。到高能物理所成立的1973年,正电子湮没国际会议已举行过三次。此时本所化学室王蕴玉等提出正电子湮没研究方向是适时的。出于专业原因,我分工安装正电子湮没寿命谱仪,因谱仪技术难度大及长期闭塞,多年无实质性进展。待改革开放后,引进若干关键NIM插件,方知该技术在国外已商品化。我们组装起完整谱仪之后,高能所的正电子湮没研究工作走入轨道并推向全国。1979年王蕴玉、王淑英带着自己的工作参加在日本举行的第五次国际会议。在国内也开始召开专业会议。

高能物理所开展基础性粒子物理创新研究,关注粒子物理前沿课题的进展。20世纪90年代,弱

电统一理论成功确立,统一弱电与强作用的标准模型探索成为粒子物理领域具有挑战性的国际前沿课题。其中,电子偶素物理机制研究及其可能的湮没产物Axion(轴子)寻找,成为有兴趣物理课题之一。电子偶素(Positronium,缩写Ps)是正电子与电子形成的类似氢原子的束缚态,原子半径 1.058\AA ,比氢原子大一倍,存活于有空洞的介质或介质表面。Ps分正态(o-Ps)和仲态(p-Ps)两类,其能级结构和衰变模式可由QED(量子电动力学)计算,验证这些计算涉及多个高精度实验。当时身处高能物理研究岗位的一些同志有兴趣涉足此领域:唐孝威提出测o-Ps衰变 3γ 能谱来检验QED计算;张长春提出o-Ps未必是一个完整的QED体系,它可能产生一种新的玻色子Axion(轴子,负宇称,自旋为零)。我因相对熟悉谱仪技术且本来是核物理出身而成为他们的合作者。

稍后,我对此领域作了调研,了解到在理论上1983年有人发表o-Ps衰变 3γ 能谱最新的QED计算;实验上o-Ps衰变率长期与理论值不一致,内含Ps体系非QED的意念;有人测正电子湮没 γ 能量值偏离电子静止质量 4.3 eV 等。我从实验技术上分析这些问题。自感有底气参与角力。于是写出题为《电子偶素湮没信息研究》的自然科学基金申请书,提出要建立合用的时间选择能谱仪(TSES,最初称联合谱仪),即把正电子湮没寿命谱仪与高纯锗(HPGe) γ 能谱仪组装在一起成为主要测试仪器;研

究气凝硅胶样品制成合用的 o-Ps 源和 p-Ps 源; 逐次进行各项精密测量等。所述气凝硅胶是贯穿始终的实验样品, 它是一种低密度(0.1 g/cm^3)胶状固体, 由 SiO_2 纳米颗粒串珠式结在一起, 本用于高能物理实验中的契仑柯夫计数器。已知正电子在 SiO_2 颗粒中大量形成 Ps, 表面发射到颗粒外的自由空间中, 最初产生的 p-Ps 寿命短(0.125 ns)且本底大不易利用, 长寿命的 o-Ps ($\sim 142 \text{ ns}$) 允许数千次的碰撞逐渐损失能量直到热化, 是很好的 o-Ps 源, 如果外加磁场或充入顺磁性气体(如氧气)则通过 O-P 转换为可利用的 p-Ps 源。

我的基金申请于 1984 年当年获准, 从建立实验室到各项子课题完成历时近 10 年, 于 1993 年由国家自然科学基金委员会组织了鉴定, 项目名称定为“时间选择能谱仪及对电子偶素体系的研究”, 鉴定意见主要内容如下:

1. 在国内发展 BaF_2 时间探测技术, 把 BaF_2 时间谱仪与高纯锗 γ 谱仪组装在一起成为时间选择能谱仪, 使谱仪工作于强磁场下, 成为专用于正电子湮没研究, 特别是电子偶素体系研究的三参数(时间、能量、磁场)相关测量的实验装置, 谱仪在磁场(2.4 T)下时间分辨达 $\text{FWHM} = 260 \text{ ps}$; 采取技术措施使谱仪对电子偶素质心动能测量精度达到 0.02 eV ; 对湮没 γ 能量测量精度达到 0.7 eV 较国际同类实验提高约 4 倍, 这些谱学技术从构思到达到的技术指标与国际同类工作相比具有独创性和先进性。

2. 运用上述谱学技术研究电子偶素体系, 发展气凝硅胶电子偶素源技术, 并完成一批物理工作, 包括: 在国际上首次精密测量正态电子偶素 3γ 衰变全能谱验证 QED 计算, 提出新的实验方案重新测量正态电子偶素真空衰变率 λ_0 以检验 QED 计算, 测得 $\lambda_0 = 7.034 \pm 0.013 \mu\text{s}^{-1}$; 精密测量仲态电子偶素湮没 γ 能量 $E_\gamma = 510995.40 \pm 0.73 \text{ eV}$, 给出电子康普顿波长 $\lambda_c = 2.4263118 \times 10^{-12} \text{ m}$ (1.5 ppm) 和电子静止质量 $mc^2 = 510998.80 \pm 0.74 \text{ eV}$, 验证正负电子质量在 0.74 eV 内一致性等, 这些工作是有重要意义的基础物理研究工作, 除 λ_0 测量外, 均属国际先进水平。

以下分述各子课题参与国际竞赛情况。在参加工作同志的共同努力下, 总体说我们“胜多负少”, 为国家争了光。

1. 关于 o-Ps 衰变 3γ 能谱: 此前我们有过测量, 看到它是在 $0 \sim 511 \text{ keV}$ 能区连续分布的 γ 谱, 但测量精度不够, 投稿被否, 指出我们的工作于检验 QED 无望(hopeless)。至 1983 年, 理论上三种谱形, 我和唐孝威讨论要予以澄清。利用我新建实验室的有利条件, 曾无间歇 40 天累积数据, 取得原始数据到中国科技大学四系由李耀清计算机解谱出结果, 认定最新的具有辐射修正的 QED 计算与实验符合, 但是论文答辩仍意外艰苦, 经过反复, 最后文章发表于 *Physics Letters* V157 B, N5.6 1985 P357, 并参加了第七次正电子国际会议。文章发表后, 收到 Brookhaven 实验室 K. Lynn 的信, 他希望引用我们的结果在他们一篇 Review 文章中。后来在 *Rev. Mod. Phys* V60. N3. July 1988 看到了他们的文章, 其中把 Anderson 发现正电子的云室照片列为图 1, 我们的 3γ 能谱列为图 2(图 1), 表示他重视我们的工作。该图是我们的实验结果, 图题是 Lynn 他们写的, 从中看出 Lynn 对 QED 计算 3γ 谱和我们有同样认知, 其中有一句插话 ‘The 2γ decay of either... would prouduce a narrow peak at 511 keV ’, 意思是所有来源的 2γ 射线都呈现光峰, 作为本底很容易处理, 隐含他相信我们的解谱结果。这里 Chang et al. 指张天保等人。

2. 关于 o-Ps 衰变率(寿命倒数): 国际上已有理论计算值, 实验上主要由 Michigan 大学物理系作贡献, 他们花 9 年时间用不同方案, 其结果自相一致而与 QED 不一致, 举例而言, o-Ps 真空衰变率的 QED 值为 $\lambda_0 = 7.03893 (7) \mu\text{s}^{-1}$ 他们的实验值 $\lambda_0 = 7.0482(16) \mu\text{s}^{-1}$, 二者相差 6σ , σ 指括弧中的实验误差, 据此他们置疑 o-Ps 不是完整 QED 体系。这和张长春的见解有相仿之处, 即认为 o-Ps 衰变中可能含 Axion 分支。我本人则因存在 ‘已知 o-Ps 衰变能谱实验与 QED 计算一致’ 的思维惯性, 认为 Michigan 大学的实验可能有错误。

B. Positrons

The positron was postulated by Dirac (1930) as the "negative" energy extension of his theory of electron energy levels. Anderson's discovery (1932a, 1932b, 1933) followed soon afterwards, and the historic cloud-chamber photograph of his 1933 paper is reproduced in Fig. 1. The positron, which is the antiparticle of the electron, has the same mass within current experimental limits ($511.0034 \pm 0.0014 \text{ keV}/c^2$; Cohen and Taylor, 1973) and the same spin ($\frac{1}{2}$), but the opposite charge and magnetic moment. It is stable in vacuum ($\tau > 2 \times 10^{21} \text{ yr}$; Bellotti *et al.*, 1983), although in metals it rapidly thermalizes, and annihilates with an electron predominantly via 2γ -ray decay ($\sim 511 \text{ keV}$) with a mean lifetime that is typically only a few hundred picoseconds (psec).

In some circumstances the positron can bind with an electron to form a positronium atom (Ps) with a vacuum binding energy of $\sim 6.8 \text{ eV}$. The singlet 1S_0 state (parapositronium, or p -Ps) has a vacuum lifetime of approximately 125 psec, and it decays predominantly into two γ rays of $\sim 511\text{-keV}$ energy. Its total spin is $S=0$ ($m_s=0$), as opposed to that of the triplet 3S_1 state (orthopositronium, or o -Ps), which has a total spin $S=1$ ($m_s=0, \pm 1$). The lifetime of o -Ps, is about 142 nsec, and in vacuum it decays into three or more γ rays. The continuous energy distribution arising from o -Ps decay was predicted by Ore and Powell (1949) and was measured by Chang and co-workers (1985; Fig. 2). The relative amount of p -Ps: o -Ps formed in the absence of external disturbances is 1:3; this ratio can be derived on kinematical grounds. Reviews of fundamental properties of posi-

Rev. Mod. Phys. Vol.60, No.3, July 1988

图1 Rev. Mod. Phys. 文章

我和徐敏按图2的装置进行实验,结果支持了预见。这是一个可以观察 o -Ps 从产生、发射、慢化到趋向热平衡全过程的 TSES 框图,其中设 8 个时间道同时控制测高纯锆 D_1 搜集的能谱, D_2 是正电子源——真空空气凝胶样品,样品置入磁场中,长寿命 o -Ps 磁猝灭由 3γ 转为 p -Ps 的 2γ 并在 511 keV 处给出能峰, D_3 是 ^{106}Ru 源,它有 512 keV γ 射线以 β - γ 符合方式在线提供高纯锆对单能 γ 的响应函数,以 p -Ps 的 511 keV 峰对响应函数去卷积得 p -Ps 及相关 o -Ps 的质心动能,测量精度到 0.02 eV。实验使我们看到 o -Ps 由最初发射动能 0.8 eV 到趋向室温热动能 $(3/2)kT=0.038 \text{ eV}$ 的演化过程,实验与一个考虑全面的理论计算相符合。由此我判断:在一个片面理论计算的误导下,Michigan 大学实验者严重地把 o -Ps 达到与样品热平衡的时间估计短了,因而把一部分还正处减速的 o -Ps 的 pick-off 效应计入其自衰变效应,使得所测衰变率数值偏大(寿命变短),如果

704

P. J. Schultz and K. G. Lynn:

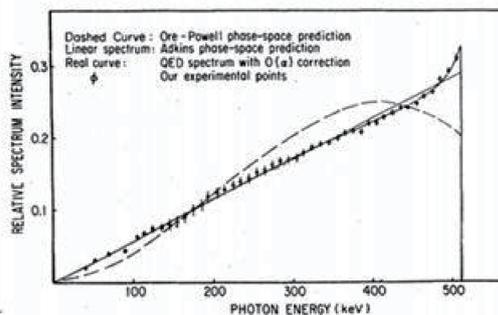


FIG. 2. The energy distribution of the 3γ decay of o -Ps. The points are the experimental results of Chang *et al.* (1985) and the QED models of Ore and Powell (1949) and of Adkins (1983). The 2γ decay of either p -Ps or positrons in delocalized or trapped states would produce a narrow peak (a few keV FWHM) at 511 keV. The experimental points in the figure were obtained by a coincidence measurement with a high-resolution intrinsic Ge spectrometer.

trons and/or Ps are given by Berko and Pendleton (1980) and Rich (1981).

1. Studies of solids

When a positron from some radioactive source enters a solid, it rapidly loses its kinetic energy ($\sim 10 \text{ psec}$) until it is near thermal energy, scattering between Bloch states to diffuse through the solid. We shall discuss this process in

把这一重要误差源进行研究并对实验结果进行必要校正,所谓实验与 QED 计算不符合的物理结论当不存在。

我把我们的观察很快写成英文稿寄 *Phys. Rev. Letters*, 其中对该期刊以前发表的五篇文章(包括一篇理论文章)进行分析批评,认为其在物理上不能成立。编辑部返回审稿意见,有一位审稿人这样说, 'This paper is the most interesting and enlightening work on the vacuum lifetime of o -Ps that I have seen these last nine years, and should be published in *Physical Review Letters*.' 但是编辑部还是启动一项 special criteria, 说明这样的文章不宜在这里发表,建议给所批评的作者一个 comment。我转而以 'Effect of the Energy Loss Process on the Annihilation of Orthopositronium in Silica Aerogel' 为题送 *Phys. letters A* 并发表于 V126, N3, 28 December 1987。

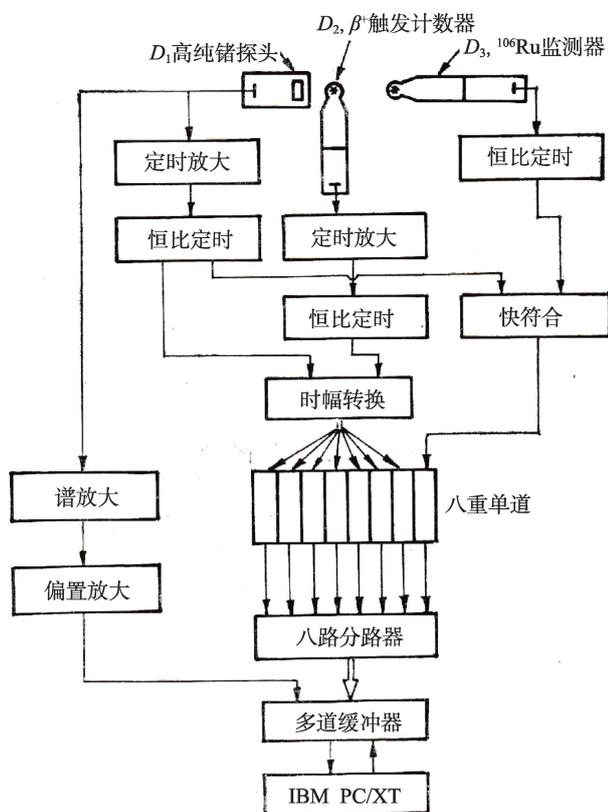


图2 实验装置示意图

我们这件工作受到国际同行的关注,1988年在比利时召开的第8次正电子湮没国际会议邀请我以 Invited Speaker 名义到会作报告,规定题目 Positronium in silica Aerogel, 限定讲高能所本实验室工作,我参会有20分钟演讲,以图2所示的TSES装置为中心说开去,讲明自己的发展。从会后所发文集的 Summary 中知道我们的工作颇受欢迎。

3. 下一步是在自己的实验室实现 o-Ps 衰变率精密测量,我和杨广明来作,深感不易。要避免前人曲折之路,条件太苛,可选的事例少,得出结果 $\lambda_o = 7.034 \pm 0.013 \mu\text{s}^{-1}$, 倒是在误差内与 QED 符合。这是一次有益尝试。深感前人曲折之路也是科学发展的一部分。

综上所述,我们的工作表明 o-Ps 衰变率在 10^{-3} 误差水平与 QED 一致,Michigan 大学的实验经校正(他们后来已宣布作了校正)在 10^{-4} 误差水平与 QED 一致,然而在 10^{-5} 水平会是什么样,仍是进一步实验的事,不能说会永远一致下去。

4. 关于 p-Ps 衰变 γ 能量测量:自赵忠尧首次测量正电子湮没 γ 能量之后的几十年间,国际上有数次改进测量,精度由 200 eV 到 10 eV 之内。电子质量作为基本物理常数也数次更新数据。至 1983 年,日本学者发表正电子在 Al 中湮没的 γ 能量,称经各项物理修正后与电子静止质量相差 4.3 eV,这受到我的注意,认为实验应重作。我们参照他们的做法,用 ^{192}Ir 放射源作 γ 能量标准刻度 Ge 谱仪,先测准 450~550 keV 能区若干放射性核的 γ 能量,再研究正电子湮没辐射。不同的是刻度谱仪的方法和能量比较方法。 ^{192}Ir 有 8 条可利用的 γ 射线,其能量值由平面晶体衍射谱仪总体测准到 0.3 eV。我们提出蠕动比较 (slithering Comparison) 方法,即把 ^{192}Ir 标准源与待测源混在一起测谱,用偏置放大器小步距改变谱在多道分析器上的道址。数十次位移得数百个 γ 峰数据,用一个融合步骤使这些数据点逼近到谱仪的刻度曲线上并定出待测 γ 能量值。这样做立刻把 Ge 谱仪测量 γ 能量的准确度由以前的 2~3 eV 改进到 0.5 eV。图 3 给出我们实验室 HPGe 谱仪所得微分非线性曲线,它呈带状振荡结构。从图上可以直观地判断,常规的仪器刻度方法看不清振荡结构数据点随机落在某处,测量精度被振荡的振幅所控,应该是在 ± 3 eV 左右,而我们的蠕动比较法突破此限,它的误差范围应该表现在带状曲线的带宽,例如 ± 0.5 eV。

关键问题是曲线的真实性。我与多道分析器生产厂家合作,以多种方法(包括滑移产生器和 ^{60}Co 康普顿平台测谱)以高统计精度测量多个插件,确认这是当时仪器的普遍情况,它来源于多道分析器内置逐次比较电平欠准确,这对通常测谱不带来影响。在此认识基础上我把蠕动比较方法及对有关核 γ 射线能量的测量结果投稿到 *Nucl. Instr. Methods in Phys. Research*, 发表于 A325(1993)196。

为了测 p-Ps 衰变 γ 能量,只需将充氧气的气凝硅胶 p-Ps 源替换核 γ 源参与蠕动比较即可。附加的工作是用 TSES 分解出气凝硅胶 γ 源中 p-Ps 的 γ 峰的相对道址,由此定出 p-Ps 热化条件下的 γ 能量,总误

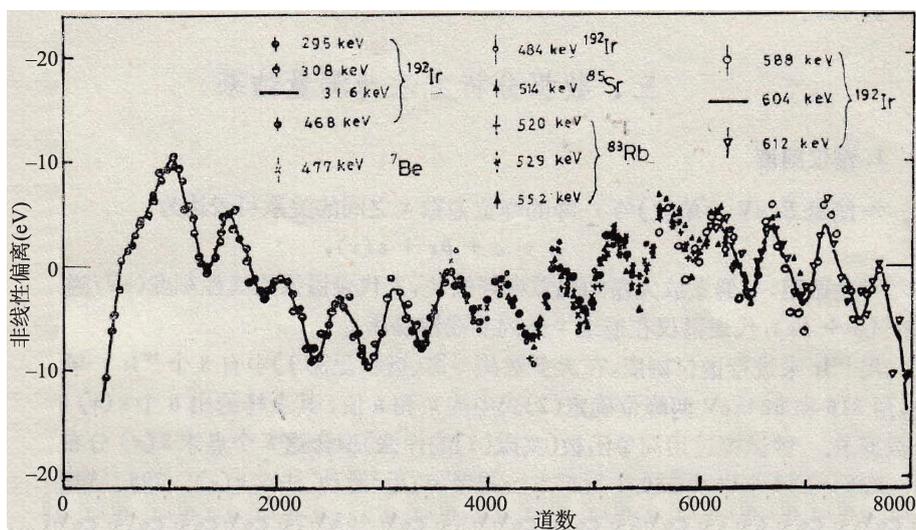


图3 蠕动法定出谱仪非线性偏离曲线 $a(x)$,比较定出未知 γ -射线能量

差在0.7 eV,经Ps原子结合能修正等得到电子静止质量值。因我们的实验值与电子质量物理常数无矛盾,所以我们实验结果的另一种表述是:正负电子质量在实验误差内一致。

以上工作在1993年通过鉴定,1997年得到国家科学技术委员会颁发的国家科技成果完成者证书。

1993~1997年及此后一段时间,我们的改进工作还在作:①彭良强提出一个电子学新安排,使TSES选出的热化p-Ps信号直接参与蠕动比较。②魏龙、刘志刚计算机化使图3微分非线性曲线的带宽达到最小,误差从0.5 eV改进到0.4 eV。③调整 ^{192}Ir 中588 keV标准线的能量值。④用 ^{68}Ge 正电子源替换以往所用 ^{22}Na 源,用这些新发展的技术把p-Ps的 γ 射线能量重测一遍,得能量值 510995.44 ± 0.57 eV,电子静止质量 $mc^2 = 510998.84 \pm 0.57$ eV,与当时标称物理常数的值 510999.06 ± 0.15 eV误差内一致,或者说正负电子质量在此误差内一致。

以上成果是在高能物理所取得的。始终得到国家科学基金的支持。在漫长的岁月里,有不少同志作贡献,他们是王淑英、王海东、唐孝威、李耀清、张长春、邓景康、孟伯年、徐敏、杨广明、彭良强、

魏龙和刘志刚等。其中王淑英和王海东主要贡献在TSES建造和实验室运行。

从认识论角度来看,我们的工作属“量变”范畴,赵忠尧的工作属“质变”范畴,是不相同的。赵先生是前期高能所副所长,得到广泛的爱戴和长久的纪念,值此赵先生120诞辰和高能所建所50周年之际,我们谨以曾有过的勤奋的工作致敬礼!

