

束团化低能正电子源

张 天 保

自 1932 年正电子-电子的反粒子在宇宙射线中被发现之后,人们相继在一些人工放射性同位素的衰变中找到了它。利用体积极小而强度颇高的同位素(^{22}Na 、 ^{64}Cu 、 ^{58}Co 和 ^{68}Ge 等)作正电子源使得人们对低能正负电子湮没的一系列的物理问题的精密研究做到了小型化。例如对湮没机制、湮没寿命、湮没辐射的能谱及角关联、电子偶素的形成和它的 QED 检验等研究工作都是在几个人的实验室中进行的。由于被湮没的负电子是物质中的电子,正电子湮没实验总是以一定物质体系为环境,也就与许多学科领域有关系。当发现缺陷能够俘获正电子并造成湮没参数的改变时,才引起许多学科的科学工作者的注意。从 60 年代开始正电子湮没走出低能核物理实验室,作为应用性学科进入其它科学领域。

与此同时人们感到,单靠放射性同位素的正电子源及寿命测量、角关联测量和多普勒位移测量这些常规手段所取得的信息满足不了、定量研究,除了加强理论思考之外,继续发展实验技术势在必行。70 年代末,相继出现二维角关联、寿命-动量联合等测量装置以及把新型核探测器 BaF₂ 用于改进寿命测量,这些都使正电子湮没应用研究向定量方向前进一步。正电子源装置的改进也一直受到人们的重视,利用正电子在超净金属表面发射的现象制成了能量单一、可调束斑很小的慢正电子束流装置,开拓了包括正电子衍射及电子表面态研究在内的正电子表面物理、界面物理等工作面,而且最近在考虑产生慢的电子偶素束流装置,为开展电子偶素自衰变研究以及电子偶素与物质相互作用研究提供新的前提。

但是,最好能在正电子源装置中置入时间信息。寿命这个参数是湮没过程的重要的有特征意义的参数之一,测量的时间间隔(寿命)由正电子遇到负电子时算起,待它们湮没时作为事件的终结。探测湮没放出的 γ 射线总能给出终止时刻,常规测量中借放射性同位素 ^{22}Na 的 1.28MeV γ 射线作为时间起始信号,可惜在新的装置中不出现这样的信号,如果用阻挡高速正电子的办法获得触发信号势必不能保证品质优良的慢正电子束的能量分布。解决这个问题的办法之一是利用加速器的脉冲化正电子源,最近,美国、德国和日本都有把直线电子加速器作为低能正电子源的报道。他

们用能量为 35—100MeV 的电子束打钽靶产生硬韧致辐射并通过 $\gamma \rightarrow e^+e^-$ 效应得到正电子,在单晶钨的慢化器上使这些高速正电子转化到低能状态并通过表面发射得到能量单一的正电子,再经一个电磁系统聚焦调制成单色的、能量可变的脉冲化正电子束流。例如美国 Lawrence 实验室利用 100MeV 电子直线加速器产生 500eV—20keV 可变能量正电子束,脉冲宽度 10ns—3 μ s 可调,脉冲重复频率 1.44×10^3 /秒,每个脉冲内含 10^6 个正电子。这样高强度而能量可调的正电子源是使用放射性同位素源所难以达到的。可以设想利用这样的源装置配合二维角关联进行表面电子态的研究是很有利的。但是这样的正电子源所具有的毫微秒(ns)级的时间结构仍是不理想的,因为正电子在致密物质中的湮没寿命在亚 ns 量级。德国慕尼黑大学给了一个很有意思的报道,他们仿用高能加速器中粒子束团化的概念,设计了一个不甚复杂的装置使正电子流束团化,装置分三节,第一节是一个重复频率为 200MHz 宽度为 2ns 的斩波器把正电子流粗略地分段,第二节是个预束团级把脉冲宽度压缩到 0.8 ns,最后一节是一个束团化级把脉冲宽度压缩到 0.1 ns,装置提供单色可变能量 1—100keV 的束团化正电子源,触发时间由调制器给出。可以想像这样的束团化装置配合直线电子加速器能够得到性能全优的正电子源,即使不与加速器相连接,这种束团化装置与一个放射源式的慢正电子束装置连接也是一个功能相当优良的正电子源装置,虽然它的强度较低,但可以方便地安装在小型实验室内,因而是很有意义的。

以上技术不断改进大多起因于正电子湮没应用研究的需求,但一定会反过来刺激正电子物理作为基础研究方面的兴趣。以正电子与负电子形成的束缚态——电子偶素的研究为例,它是一个由基本粒子组成的纯 QED 体系,利用这样一个可以方便得到的体系检验它的 QED 界限、CPT 守恒的极限以及从它的衰变中寻找轴子事例等都是具有意义的物理工作,研究它和物质相互作用会给新的应用提供前景。所有这些研究工作本身也需求各种技术进步,有关正电子源方面的进步无疑是关键性条件之一,而利用束团化正电子源技术结合强流电子枪技术在真空中合成电子偶素束团也许是可能的。