

# GSI 效应与开罗事例

何景棠

最近几年来,在联邦德国的 Darmstadt 市的高能重离子研究所(GSI)内,利用重离子加速器将铀、钍等重核进行加速,然后去轰击铀、钍、铜等重核靶子,进行了一系列重核-重核碰撞反应实验,发现了一个新现象。后来,人们把这种新现象称为 GSI 效应。

他们于 1984 年发表的铀-铀碰撞反应实验结果如图 1 所示。这些实验结果的特点是:在较宽的正电子连续谱上叠加有一个正电子窄峰,其峰值能量为  $E_{\beta^+} = (336 \pm 10) \text{keV}$ , 峰的宽度为  $\Gamma \sim 75 \text{keV}$ 。这个单能正电子窄峰是在入射重核的能量接近库仑位垒时才产生的,即两个重核刚好接触组成超重核时才产生的,它是在出射的反应产物在一定角度范围内,即角关联刚好偏离弹性散射时才产生的,这说明正电子窄峰不是探测系统的误差产生的假现象。

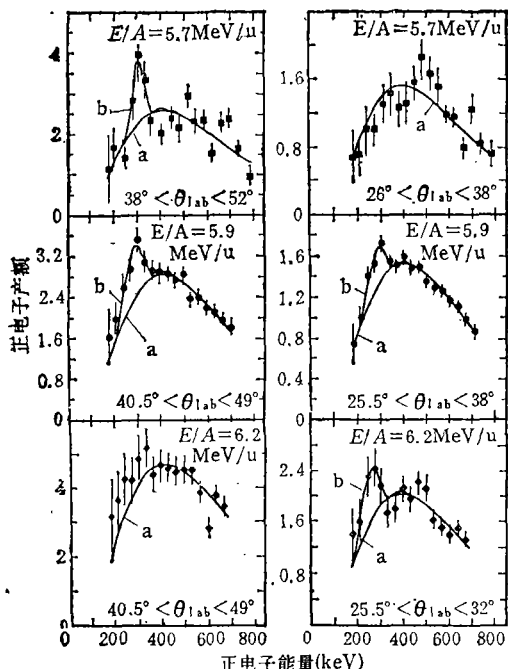


图 1 在铀-铀碰撞反应中,在不同能量的入射重核及不同角度的出射反应产物的情况下,入射重核的能量接近库仑位垒、出射的反应产物在一定的角度范围内时所观察到的正电子窄峰

为了研究正电子窄峰的能量与重核-重核碰撞中形成的超重核的电荷  $Z_u = Z_1 + Z_2$  的关系,工作在

GSI 的科学家利用 U+Cm (铀+镅,  $Z_u = 188$ ), Th+Cm (钍+镅,  $Z_u = 186$ ), U+U (铀+铀,  $Z_u = 184$ ), Th+U (钍+铀,  $Z_u = 182$ ) 和 Th+Th (钍+钍,  $Z_u = 180$ ) 进行碰撞实验,结果如图 2 所示。从这些图中,人们可以看到,正电子峰值能量与重核-重核碰撞中形成的超重核的电荷  $Z_u$  无关,且峰的形状及宽度在五种情况下都相似。

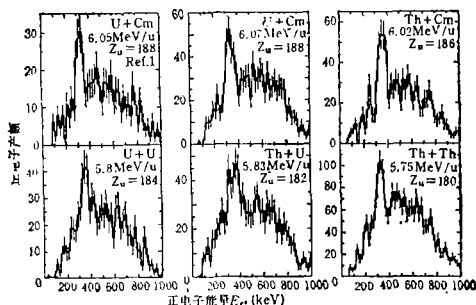


图 2 五种不同的超重核情况下,看到的正电子窄峰

后来实验物理学家将探测器进行了一点改进,可同时测量正电子和负电子,实验发现与正电子事例相符合,有一个负电子峰,其峰值能量也约为  $375 \text{keV}$ , 宽度为  $75 \text{keV}$ 。实验结果如图 3 所示。对多普勒移动作了修正的细致分析表明,电子正电子是背对背地出自缓慢运动的在碰撞中产生的超重系统的公共的源。如果认为峰的宽度来源于衰变体运动所产生的多普勒展宽,那么可以从多普勒展宽反推得到衰变体的运动速度:  $\beta = v/c \approx 0.06$ 。而实验中探测器的接收度为  $L \sim 5$  毫米,所以估计衰变体的寿命  $\tau < 10^{-10}$  秒。我们应该注意 GSI 的实验。并没有直接测量粒子的寿命。而衰变体的质量  $M_x$  为两倍电子静质量加上正负电子的质心系动能,即

$$M_x \approx 1.8 \text{ MeV}/c^2$$

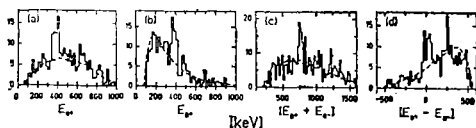


图 3 (a) 正电子窄峰 (b) 负电子窄峰 (c)  $e^+e^-$  符合事例的动能之和约为  $750 \text{keV}$  (d)  $e^+e^-$  符合事例的动能之差为 0。

这样的分析表明, 似乎在重核-重核碰撞中, 产生了一种未知的新的低质量中性粒子: 它的质量约为  $1.8\text{MeV}$ , 而寿命小于  $10^{-10}$  秒, 人们把上述的实验结果称为 GSI 效应。

1987—1988 年, 在联邦德国的进一步实验发现, 在重核-重核碰撞中, 除了  $1.8\text{MeV}$  的态外, 还存在其他态, 即存在多个正电子窄峰, 如图 4 所示。GSI 的实验一共发现四个态, 它们的质量分别为:  $1.52$ ,  $1.63$ ,  $1.78$  和  $1.83\text{MeV}$ 。此外, 美国的斯坦福-贝克莱合作研究组在重核碰撞中, 还发现了衰变为  $\gamma\gamma$  的低质量中性粒子, 其质量为  $1.062\text{MeV}$ 。

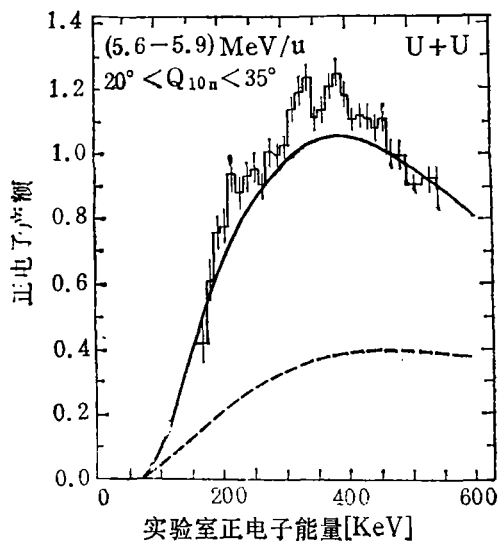


图 4 在重核-重核碰撞中发现的多个正电子窄峰, 说明存在质量不同的低质量中性粒子。

如果 GSI 效应是由于新的低质量中性粒子的产生和衰变, 那么在其他实验中, 也应该看到这些新的低质量中性粒子。

GSI 发现的新态可以衰变成正负电子对, 即  $X^0 \rightarrow e^+e^-$ , 如果将时间反演一下, 利用正负电子碰撞, 也应

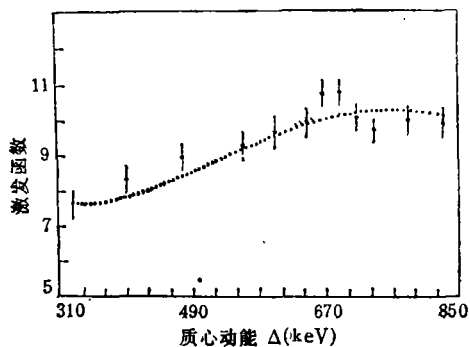


图 5 低能  $e^+e^-$  散射, 在质心动能约为  $700\text{keV}$  处有一共振峰, 表明存在质量约为  $1.8\text{MeV}$  的共振态。

该产生  $X^0$ , 即:

$$e^+ + e^- \rightarrow X^0 \rightarrow e^+e^-$$

有人利用  $\beta^+$  放射源进行低能正负电子散射, 果然发现在质量约为  $1.8\text{MeV}$  处, 找到一个共振峰, 结果如图 5 所示。图中横轴代表散射的正负电子的质心动能, 而纵轴代表激发函数, 图中的小鼓包是质量约为  $1.8\text{MeV}$  的共振峰。

这些实验结果进一步说明, 确实存在低质量中性粒子的新态。

在 1988 年 9 月的物理评论通讯上, 埃及开罗的物理学家 M. El-Nadi 和 O. E. Badawy 发表了利用核乳胶片寻找低质量中性粒子的结果。他们是从苏联杜布纳联合核子研究所取回用每个核子的动量为  $4.5\text{GeV}/c$  和  $4.2\text{GeV}/c$  的  $^{12}\text{C}$  和  $^{24}\text{Ne}$  轰击的核乳胶片, 寻找低质量中性粒子衰变为正负电子对的径迹。他们找到 13 个事例, 然后又用高能  $\alpha$  粒子轰击核乳胶片, 找到 7 个事例。他们发表了所有这些事例的详细测量数据。人们称他们找到的事例为开罗事例。图 6 给出其中一个事例径迹示意图。高能  $^{12}\text{C}$  从左边入射到核乳胶片内, 产生第一个核作用, 飞出  $\alpha$  粒子, 其中一

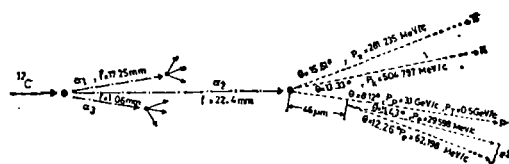


图 6 高能  $^{12}\text{C}$  与核乳胶相互作用产生低质量中性粒子的径迹图示: 低质量中性粒子衰变为  $e^+e^-$  对。

个  $\alpha$  粒子在核乳胶中飞行 2.24 厘米, 与核乳胶产生第二次核作用, 飞出的次级粒子有  $\pi$ ,  $K$ ,  $P$ , 此外, 有一个中性粒子衰变为正负电子对, 它从产生至衰变飞行了 46 微米, 两个电子的动量分别为  $29.6$  和  $62.2\text{MeV}/c$ , 两个电子的夹角为  $11.8^\circ$ , 给出低质量中性粒子的质量为  $(1.26 \pm 0.23)\text{MeV}/c^2$ , 寿命为  $(2.2 \pm 0.1) \times 10^{-13}$  秒。将所有事例进行平均, 给出低质量中性粒

表 1

| 组 | 质量 $M(\text{MeV})$     | 寿命 $\tau(10^{-16}\text{秒})$ |
|---|------------------------|-----------------------------|
| A | $1.14^{+0.18}_{-0.07}$ | $13 \pm 3$                  |
| B | $2.1 \pm 0.4$          | $3.0 \pm 0.5$               |
| C | $9.2 \pm 1.4$          | $6.0 \pm 1.0$               |

子的质量为  $(1.60 \pm 0.59)\text{MeV}/c^2$ , 寿命为  $(0.15 \pm 0.01) \times 10^{-14}$  秒, 即  $1.5 \times 10^{-13}$  秒。

荷兰物理学家 F. W. N. de Boer 和 R. Van Da-

# 光 电 子 能 谱

对于材料的电子结构的研究,不仅在理论上很吸引人,而且在技术上也具有极大的应用价值.近年来同步辐射中的真空紫外光源主要用来研究材料的电子结构.光电电子能谱技术能直接测量描述材料电子状态的所有量子数,特别是它的能带结构——即电子能量与动量的色散关系.所以它是一种与原子、分子和凝聚态物理的核心问题相关的一种实验技术.

本文主要介绍光电电子能谱技术在凝聚态物质(固体和表面)中的应用,特别强调在利用同步辐射后取得的进展和发展远景.

## 一、一项有威力的技术

光电电子能谱技术已经历了二、三十年的发展历史.早在五十年代,由于高强度单色X射线源和高分辨电子能量分析器两方面取得的进展,人们开始利用X射线光电电子能谱技术研究材料原子芯能级的电子结构.六十年代,由于真空紫外光谱和超高真空技术的日趋完善,使人们有可能获得稳定不变的清洁表面,以利于研究材料的价带结构.到了七十年代,由于角分辨光电电子能谱技术的发展,使人们能测量材料中描述电子状态的所有信息,如电子的能量、电子动量的三个分量、电子波函数的对称性.利用莫特(Mott)散射技术还可测量电子自旋的取向.特别是同步辐射光源出现以后,由于它具有波长可调、高度偏振和高强度,更使传统的光电电子能谱技术增添了威力.例如我们可以

利用单色器调节入射的同步辐射光子的波长,使逸出的光电子能量达到 50eV 左右.这时电子具有最小的逸出深度(3~5 Å),从而增强了测量的表面灵敏度.随着光子能量的变化,使不同深度的光电子逸出,从而可以扫描电子动量中表面法线方向的分量.这样我们就可获得整个能带的信息.利用光电子的发射与入射光偏振的依赖关系又可用来决定吸附在表面的分子取向及化学键的方向.下面我们从几个方面来说明同步辐射光电电子能谱技术的应用.

## 二、能带结构的测量

晶态固体中的电子能带结构即能量、动量色散关

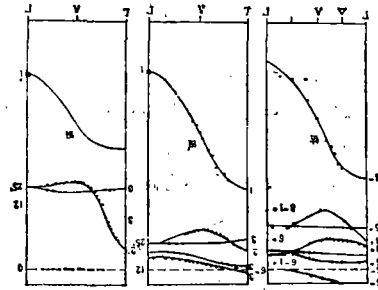


图1 由光电发射谱得到的第一过渡族某些金属元素的能带关系  $E(k)$  是固体物理的基本概念.给出了  $E(k)$  关系,原则上就能导出固体或表面的其他性质,如光学、磁学及

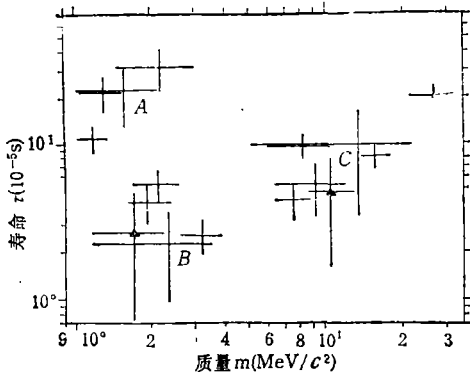


图7 开罗事例的质量与寿命的关系图,表明开罗事例分成 A、B、C 三组.

ntzing 将开罗物理学家发表的数据作出质量与寿命关联的图,如图7所示.奇怪的事情出现了.开罗找到的20个事例分成三组,它们的质量和寿命如表1所示.

人们回忆起,35年前,英国 Bristol 大学的物理学家利用宇宙线和核乳胶相互作用研究  $\pi^0$  的性质时,发现一种可以衰变为  $e^+e^-$  对的中性粒子,其寿命约为  $10^{-17}$  秒,当时人们只知道  $\pi^0$  可以通过达利兹对衰变成  $e^+e^-$  对,即  $\pi^0 \rightarrow \gamma + e^+e^-$ ,其实,  $\pi^0$  的寿命应该约为  $10^{-17}$  秒,由于30多年前,人们只知道有  $\pi^0$  介子,也就把找到的寿命约为  $10^{-17}$  秒的中性粒子误认为是  $\pi^0$  介子.30多年过去了.当知道开罗事例后,人们重新分析了35年前英国 Bristol 大学在核乳胶中“发现  $\pi^0$  介子”的数据.图7中黑三角形▲的点代表将35年前英国 Bristol 大学的数据经重新分析后所得的结果.奇怪的是,一个点与开罗事例的B组相符,另一个点与开罗事例的C组相符.这说明,35年前的数据与开罗的数据一致,即存在质量约为 2MeV,寿命约为  $10^{-17}$  秒的低质量中性粒子.

GSI 的态与开罗的态是不是一回事呢?它们的根源是什么呢?对于这些问题,目前没有令人信服的答案,需要理论家和实验家作进一步的深入研究.