

多击响应的三层阳极丝位置灵敏探测器 及其信号重整*

曹士娉^{1,2} 马新文^{1,1)} A. Dorn³ M. Dürr³

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (Max-Planck-Institut für Kernphysik Saupfercheckweg, 1-69117 Heidelberg, Germany)

摘要 最新发展起来的三层延迟线阳极,即Hexanode与标准的螺旋状延迟线(HDL)阳极相比,对多击事件有较好的响应能力.它与一对微通道板组合在一起构成的位置灵敏探测器能够响应同时或短时间间隔内到达探测器的多个粒子,并给出粒子的全部动量信息.针对Hexanode在响应多个同时或短时间间隔内到达的粒子时出现的信号丢失问题,自行编写了一个信号重整程序.经过此程序的处理后,多击响应位置灵敏探测器的死时间只存在于两个粒子同时到达探测器的同一位置时(在一定时间及位置范围内).在最近完成的使用Hexanode探测器的近阈值 $e+\text{He}\rightarrow 3e+\text{He}^{++}$ 中,获得了很好的结果.

关键词 Hexanode 延迟线位置灵敏探测器 信号丢失 多击响应 信号重整

1 引言

在碰撞碎裂实验中,如果能探测到反应后全部碎裂产物 n 个粒子中的 $n-1$ 个粒子,那么就能够得到完全的反应微分截面.最新发展起来的反应显微成像谱仪^[1, 2]能够在 4π 立体角的范围内探测全部 $n-1$ 个碎裂产物,并确定 $n-1$ 个末态碎裂产物的三维动量.反应显微成像谱仪由两个位置灵敏探测器、飞行时间谱仪及均匀磁场构成,如图1所示为纵向谱仪.由电子枪产生的电子束在靶区与气体靶(如He)发生碰撞反应,反应后出射的正负粒子在均匀电场及磁场的作用下做螺旋线迹运动,分别打到相对的两个位置灵敏探测器

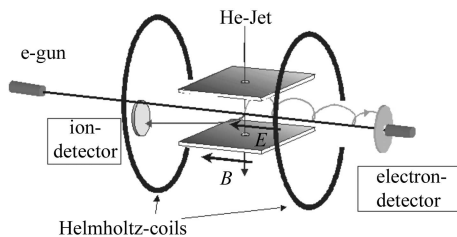


图1 纵向谱仪结构图

上.通过记录粒子的飞行时间及落在探测器上的二维位置,可计算出碎裂粒子在反应后的出射动量.在碎裂碰撞当中,反应末态的多个粒子可能在极短时间间隔内或同时到达探测器,这就要求探测器具有多击响应能力.

螺旋状延迟线(HDL)阳极位置灵敏探测器由两层相互垂直的HDL^[3]及两片微通道板(MCP)构成,在总计数率不超过MCP计数率上限的情况下,MCP能够响应大量几乎同时到达探测器的粒子.粒子经过MCP放大后形成的电子团投影到延迟线上产生一对位置信号,这对信号以接近光的速度向延迟线两端传播.由这对信号到达延迟线终端的时间差可计算出粒子投影到这层延迟线上的一维位置.通过读取两层垂直的延迟线信号,即可获得粒子在探测器上的二维位置信息.在需要对多击事件作出响应时,HDL存在自身的缺陷.当两个粒子同时到达HDL位置灵敏探测器时,探测器就会产生一个十字形死区域,在此区域内后继到达的粒子的位置信息无法获得,这是由延迟线自身特性决定的.针对以上弊端,本文将具体讨论产生信号丢失的原因和解决方案.最后给出经过信号重

2006-05-11 收稿

* 国家自然科学基金委重点项目(10434100)资助

1) E-mail: x.ma@impcas.ac.cn

整后近阈值氦的双电子电离^[4]的部分实验结果.

2 HDL在多击探测中存在的问题

在多击事件的探测中, 使用位置灵敏探测器与多击响应时间数字转换仪(TDC)记录碰撞中产生的多个粒子. 多击响应TDC内部具有高频时钟脉冲, 通过记录输入信号之间的脉冲个数决定信号间的时间差. 因此多击响应TDC能够记录极短时间间隔内到达的多个粒子, 目前使用的TDC双击信号的时间分辨约为10ns.

在实验中通常会使用一个公共的外部触发作为探测器所测量到的时间信息与位置信息的零点, 通过记录粒子的飞行时间与延迟线输出信号的时间谱反推粒子的时间与位置信息. 因此标准的HDL位置灵敏探测器的二维位置计算方法如下:

$$x = v_{\perp}(t_{x1} - t_{x2}), \quad y = v_{\perp}(t_{y1} - t_{y2}), \quad (1)$$

其中 t_{x1} , t_{x2} 是一层延迟线输出的一对时间信号, t_{y1} , t_{y2} 是与 t_{x1} , t_{x2} 垂直的另一层延迟线上的输出信号. v_{\perp} 指垂直于绕丝方向信号的有效传输速度, 在固定的阳极上是常数. 为简单起见, 我们假设 v_{\perp} 在两层丝上为相同常数.

由于延迟线长度固定, 每对位置信号在延迟线上的传输时间之和(T_{sum})为常数:

$$T_{\text{sum}} = t_{x1} + t_{x2} - 2t = t_{y1} + t_{y2} - 2t = \text{常数}, \quad (2)$$

t 指MCP的信号相对于这个公共外部触发历越的时间, 即粒子的飞行时间.

在多击事件当中, T_{sum} 不仅可用来检验信号的正确性, 当其中一个位置信号丢失时, 还可通过 T_{sum} 计算粒子的位置:

$$x = (2t_{x1} - T_{\text{sum}})v_{\perp}, \quad y = (2t_{y1} - T_{\text{sum}})v_{\perp}, \quad (3)$$

其中假设 t_{x2} , t_{y2} 信号丢失.

当飞行时间信息丢失时, 可通过以下方法重组:

$$t = 0.5(t_{x1} + t_{x2} - T_{\text{sum}}) = 0.5(t_{y1} + t_{y2} - T_{\text{sum}}). \quad (4)$$

MCP信号的时间分辨好于1ns, 位置信号的时间分辨好于MCP的分辨, 即前端电子学的死时间小于10ns, 因此系统对双击信号的时间分辨取决于TDC的 T_e .

在多击事件的探测中使用HDL位置灵敏探测器与多击响应TDC, 当两个相继到达的粒子的时间间隔 Δt 大于 T_{sum} 时, 这两个粒子的位置信号能够顺序无

地输出.

当 $T_{\text{sum}} > \Delta t > T_e$ 时, 需要通过(2)式判断是否对多击事件进行信号重组. 然而在此范围内, 只要在一层延迟线上两个粒子的位置信号及时间信号完整, 事件便可以通过(3)式和(4)式重组出来.

但当 $T_e > \Delta t$ 时, 只有当两个粒子在 x , y 两层延迟线上的相对位置都大于 $(T_e - \Delta t)v_{\perp}$ 时, 这两个粒子的位置信息才能被重组出来. 因此产生了一个十字形的死区域. 此外, 当两个粒子间的时间间隔小于 T_{sum} 的宽度时, 两个粒子的位置相互混淆. 这种情况在任何延迟线阳极中都普遍存在. 为克服HDL存在的问题, Ottmar Jagutzki和他的同事们研制了更适用于多击探测的Hexanode^[5].

3 Hexanode及其计算方法

如图2所示, Hexanode由3层名为 U , V , W 的延迟线构成, 每层延迟线由一对铜丝绕成, 每对丝绕在六边形不锈钢平板支架外缘的一对陶瓷棒上. 每一层延迟线都构成一条差分信号的低分散传输线路. 在延迟线的两端通过引出电压收集MCP产生的电子团, 给出电子束团传输到延迟线两端的时间信息. 由TDC记录每对信号相对于某个外部公共触发所历越的时间, 计算得到位置信息. 因此多击事件中, 每对位置信号在延迟线上的传输时间之和是计算的核心部分. 在减去外部电缆延迟及电子学延迟的时间后, 每对信号在延迟线上的 T_{sum} 是常数:

$$\begin{aligned} T_{\text{sum}} &= U_{11} + U_{12} - 2t = V_{11} + V_{12} - 2t = \\ &W_{11} + W_{12} - 2t = \text{常数}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 U_{11} , U_{12} , V_{11} , V_{12} , W_{11} , W_{12} 指在某个公共触发下, 在 U , V , W 3层延迟线上产生并由TDC所记录的3对位置信号, 在Hexanode中, T_{sum} 会与位置信息有一定的关联, 这是由于信号在传输过程中的分散引起的. 在MPI-K的He的近阈值双电子电离实验中, T_{sum} 峰的半高全宽经过矫正后可达4ns.

每层延迟线上的一维位置信息为:

$$\begin{aligned} U &= v_{\perp}(U_{11} - U_{12}), \\ V &= v_{\perp}(V_{11} - V_{12}), \\ W &= v_{\perp}(W_{11} - W_{12}) + o, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 o 是使3层丝同心的参数. 在此文中, 中心被定义为 U 和 V 的交叠点, 即探测器中心.

如定义 U 为 x 方向, 则二维位置可通过以下3种

组合来计算:

$$\begin{cases} x = -U; \\ y = -0.57735U + 1.1547V, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x = -V - W; \\ y = 0.57735V - 0.57735W, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x = -U; \\ y = 0.57735U - 1.1547W. \end{cases} \quad (9)$$

与标准的HDL相比,在Hexanode中,当两个相继到达粒子的时间间隔 $\Delta t < T_e$ 或信号重叠发生时,多余的一层延迟线可以用来计算粒子的二维位置,从而使得探测器的死时间减小到很小的范围.因此Hexanode有更好的探测多击事件能力.

与HDL相比,Hexanode具有更多的优越性.在纵向谱仪当中,入射粒子束与磁场平行且穿过探测器中心,为消除入射粒子束的影响,使用中心带孔的MCP.在此情况下,为减少入射粒子束对阳极的影响,则需使用中心有孔的阳极.使用两层延迟线阳极,会造成十字形死区域,在此区域内,二维位置信息无法读取,而对于Hexanode,则不存在死区域,如图2所示.

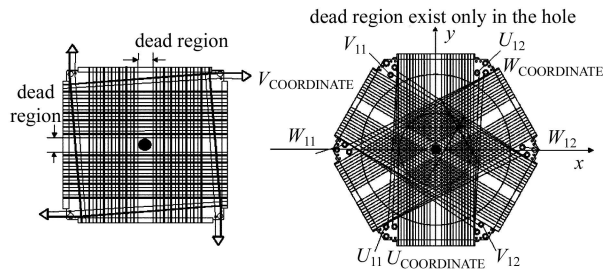


图 2 标准HDL结构(左)和Hexanode结构(右)

4 基于Hexanode的信号重整技术

在多击事件当中,如果两个相继到达探测器的粒子在一层延迟线上的位置差 Δ 及到达的时间间隔 Δt 满足以下关系:

$$\Delta = 2v_{\perp}\Delta t, \quad (10)$$

在这层延迟线的一输出端上,两个相继到达的粒子所产生的位置信号重叠输出.考虑到系统的 T_e ,则将(10)式扩展到下式:

$$2v_{\perp}(\Delta t + T_e) > \Delta > 2v_{\perp}(\Delta t - T_e), \quad (11)$$

此式说明位置信号重叠区域的宽度等于2倍系统死时间,如图3所示.当 $\Delta < 2v_{\perp}(\Delta t - T_e)$ 时,两个粒子产生的位置信号顺序输出,但当 $\Delta > 2v_{\perp}(\Delta t + T_e)$ 时,在

这层延迟线的一输出端上,两个粒子的位置信号倒序输出.

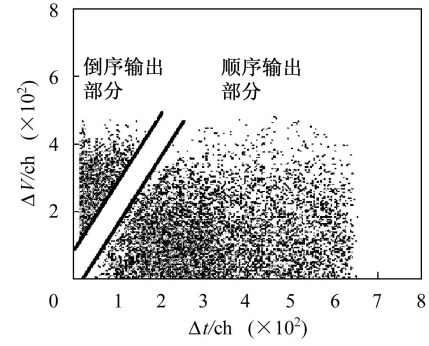


图 3 两个相继到达的粒子的一维位置差与时间间隔关系图

图中空条形区域为位置信号重叠区域;纵坐标每道 0.2mm,横坐标每道 0.5ns.

在实验中,对于两个相继到达的粒子来说,在延迟线上传输的位置信号不仅会有重叠或倒序输出的现象,还会由于甄别阈而丢失,或受到噪声的干扰.为解决这些问题,我们自行编写了一个信号重整程序用来修复多击事件中的时间及位置信息.

首先通过(5)式检查粒子在每层延迟线上的时间之和 T_{sum} 是否正确,可将倒序、顺序输出的位置信号区分开.对于倒序输出的信号,调换信号的输出顺序即可获得两个粒子的正确位置信息.

如果后继到达粒子的位置信号由于重叠而丢失,可通过下式重组丢失的信号:

$$\begin{cases} U_{21} = T_{\text{sum}} - U_{22} + 2t_2, \\ V_{21} = T_{\text{sum}} - V_{22} + 2t_2, \\ W_{21} = T_{\text{sum}} - W_{22} + 2t_2, \end{cases} \quad (12)$$

式中 t_2 为后继到达粒子的飞行时间, U_{22} , V_{22} , W_{22} 为在每层延迟线上未丢失的位置信号, U_{21} , V_{21} , W_{21} 为每层阳极丝上丢失的位置信号.

同时还可通过另一种方法修复由于重叠输出所丢失的位置信号: $U_{21} = U_{11}$, $V_{21} = V_{11}$, $W_{21} = W_{11}$, 即利用先到粒子的位置信号代替重叠丢失的信号.然而,考虑到系统双击分辨的影响及位置信号的丢失不仅来源于重叠输出,还可能由于甄别阈而丢失,在程序中使用第一种方法进行信号重整.

在 T_e 内,两个粒子中后到达粒子的时间信息会丢失,在 T_e 以外,此信息还会由于甄别阈而丢失.时间信息的重建可通过以下方法得到:

$$\begin{cases} t_2 = 0.5(U_{21} + U_{22} - C), \\ t_2 = 0.5(V_{21} + V_{22} - C), \\ t_2 = 0.5(W_{21} + W_{22} - C), \end{cases} \quad (13)$$

其中 $C = T_{\text{sum}}$. 此种方法要求至少有一层延迟线上能输出后到达粒子的一对正确位置信号.

由于在每层延迟线上所传输的位置信号有一定的区域, 可通过限定区域剔除一部分噪声. 须注意的是, 由重组事件所计算出的位置分辨取决于 T_{sum} 的半高全宽 (FWHM) 及未丢失的信号的时间分辨. 通常 T_{sum} 的 FWHM 宽于位置信号的时间分辨, 于是 T_{sum} 的 FWHM 决定了重组事件的位置分辨. 同样, 当时间信号丢失时, 被重组出的时间信号的时间分辨会变坏至 T_{sum} 的半高全宽. 从图4中可以看出, 在重叠输出区域的边缘存在一对浅槽, 这一对浅槽是由于时间和的 FWHM 引起的. 时间和的 FWHM 越窄, 这对浅槽越浅.

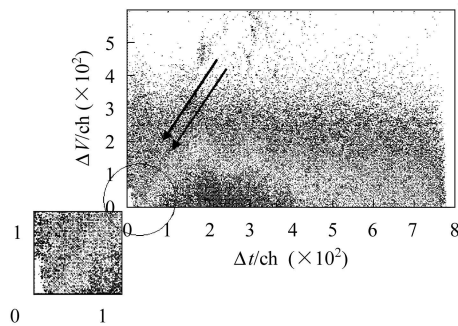


图4 重整后两个粒子的一维位置差与时间差的关系图

在箭头所示方向由 T_{sum} 的 FWHM 造成的两道浅槽清晰可见, 死区域如左下角小图所示. 坐标单位同图3.

在以事件记录模式存储的 $e + \text{He} \rightarrow 3e + \text{He}^{++}$ 近阈值反应中, 3个电子几乎同时到达 Hexanode 位置灵敏探测器, 彼此间关系复杂. 针对这3个电子的关系设计了信号重整程序. 此程序中, 在假设第3个到达探测器的电子对第一个到达的电子没有影响的情况下, 处理了倒序输出的位置信号, 丢失的位置及时间信号, 信号的反射和噪声. 此程序可扩展到处理4, 5, ..., L 个粒子在短时间间隔内或同时到达的事件, 其前提是第 L 个到达位置灵敏探测器的粒子对第 $L-2$ 个到达的粒子无影响. 通过程序修正后, 在多击探测中, 只有两个粒子同时到达探测器的同一位置 (一定范围内) 时, Hexanode 才出现的死时间.

5 信号重整后的实验结果

在此实验中, 使用的是中心有7mm孔的外径80mm的MCP与金属板支架上有孔的Hexanode. 实验装置如图1所示, 在此纵向反应谱仪中, 能量为

106eV, 脉宽约为1ns的脉冲电子束与超冷He气体靶碰撞电离, 反应后的电子在引出电场和磁场的作用下, 打到中心有孔的位置灵敏探测器上, 而反冲粒子打到反方向位于电子枪下方的40mm的位置灵敏探测器上. 电子束穿过探测器上MCP的中心孔及Hexanode支架的中心孔后被法拉第筒收集. 从碎裂粒子的飞行时间及探测器上的位置信息可计算粒子的3维动量.

双电子电离实验中, 两个被电离的电子与散射电子共同分担27eV的能量, 但它们之间无法区分. 它们同时或在极短的时间间隔内到达Hexanode位置灵敏探测器. 在图5中以第1个及第2个到达的电子为例, 展示了经过信号重整后在不同的时间间隔内, 两个电子的二维位置差. (0, 0)点出现一个死区域 (即两个粒子到达同一位置), 此死区域随着时间间隔的扩大而消失. 理论上, 死区域的直径 $D = 2v_{\perp}(T_e - \Delta t)$, 但由于双电子电离的自身机制, 此区域大于理论值. 在时间间隔 Δt 为15—20ns时, 图中的平行结构是由于 T_{sum} 的 FWHM 对重整事件的影响造成的.

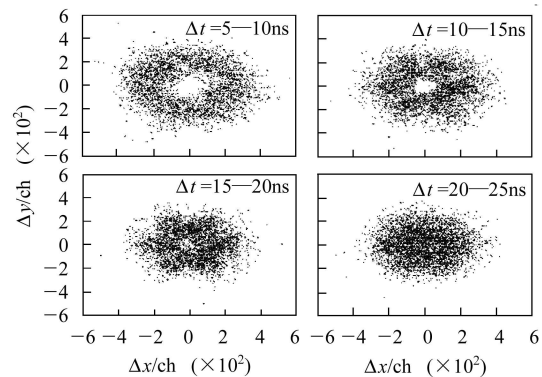


图5 两个在不同时间间隔内到达位置灵敏探测器的电子的二维位置差
0.3mm/ch.

图6中给出的是在散射平面内, 固定两个出射电子的动量时, 第3个电子的角分布情况. 入射电子束方向定为轴向. 在图(a)中, 两个能量均为6eV的电子与束流垂直且相互反向, 第3个电子能量为15eV. 图(b)中, 1个电子与轴向成45°角, 另一个电子与轴向成225°角, 3个电子的能量都束缚在 (9 ± 3) eV. 图(c)中, 第1个电子与束流成45°角, 第2个成135°角, 且3个电子能量均为 (9 ± 3) eV. 图(d)中, 第1个电子出射角45°, 第2个电子出射角165°, 3个电子能量均为 (9 ± 3) eV.

实验结果与 Jens Robin, J. Berakdar 等人^[6, 7] 的理论计算基本相符.

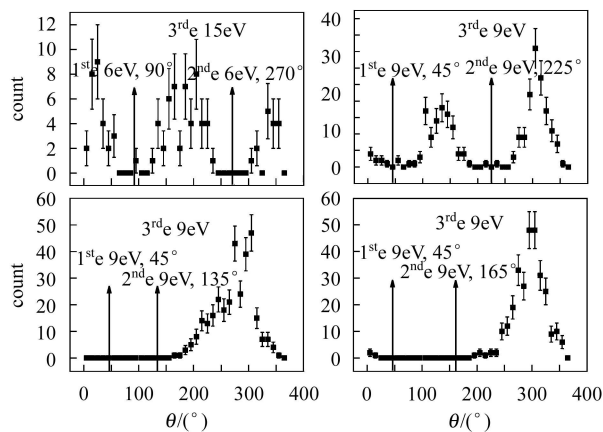


图6 反应后在散射平面内3个出射电子中两个的动量固定后第3个电子的角分布

6 结论与展望

针对实验中多击响应的要求, 我们使用Hexanode位置灵敏探测器收集反应后的短时间间隔内或同时到达的多个碎裂产物. 针对Hexanode的信号特点, 自行编写了一个信号重整程序, 使得探测器能够分辨在极短时间间隔内或同时到达探测器的不同位置(一定范围以外)的两个粒子. 并在He的近阈值双电子电离实验中获得了很好的结果. 为减少入射束流对延迟线的影响, 今后我们会使用中心有孔的Hexanode. Hexanode还将用于分子碎裂的研究.

参考文献(References)

- Moshhammer R, Ullrich J, Unverzagt M et al. Nucl. Instrum. Methods, 1996, **B108**: 425—445
- MA Xin-Wen, ZHU Xiao-Long, LIU Hui-Ping et al. Chin. J. At. Mol. Phys. Supp., 2004, **21**: 197
- Ottmar Jagutzki et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2002, **49**: 2477—2483
- Dorn A, Kheifets A et al. Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 3755
- Sobottka Stanley E, Williams Mark B. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1988, **35**: 348—351
- Berakdar J et al. Phys. Rev., 1996, **A54**: 1480—1486
- Berakdar J, Lahmam-Bennani A, Cappello C D. Phys. Rep., 2003, **91**: 374

Restoration of the Signals from Multi-hit Three-Layer Delay-Line Anode Position-Sensitive Detector*

CAO Shi-Ping^{1,2} MA Xin-Wen^{1;1)} A. Dorn³ M. Dürr³

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2 (Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3 (Max-Planck-Institut für Kernphysik Saupfercheckweg, 1-69117 Heidelberg, Germany)

Abstract Multi-hit 3-layer delay-line anode (Hexanode) has an increased ability to detect multi-hit events in a collision experiment. Coupled with a pair of micro-channel plates, it can provide position information of the particles even if the particles arrive at the same time or within small time dwell. But it suffers from some ambiguous outputs and signal losses due to timing order and triggering thresholds etc. We have developed a signal reconstruction program to correct those events. After the program correction, the dead time only exists when 2 particles arrive at the same time and the same position within a much smaller range. With the combination of Hexanode and the program, the experimental efficiencies will be greatly improved in near threshold double ionization on He collisions.

Key words Hexanode, delay-line position sensitive detector, signal loss, multi-hit, signal restoration

Received 11 May 2006

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10434100)

1) E-mail: x.ma@impcas.ac.cn