

北 京 谱 仪

丁慧良	于传松	马东红	马思成	马基茂	方澄	王广英
王少敏	王中和	王平	王运永	王灵淑	王佩良	王临洲
王建光	王泰杰	王俊英	王淑琴	王曼	王锋	牛卫平
毛泽普	毛慧顺	邓亦卫	邓树森	倪蕙苓	付正善	冯忠
叶铭汉	白景芝	史焕章	田卫华	边强	汤福坤	朱永生
朱启明	朱国胜	<u>朱善根</u>	后小江	过雅南	迟延昆	李卫国
李大仕	李正信	李芳	李启明	李如柏	李环	李金
李佳	李建唐	李佩琴	李黎力	李蔚	李淑琼	刘炜
刘荣光	刘振安	刘振宇	刘琦	刘璇	庄保安	孙汉生
吕军光	许榕生	严武光	张戈	张长春	张少强	张达华
张玉美	张羽	张良生	张会领	张英平	张春燕	张炳云
张家文	张彩娣	张浩云	陆伟达	陆昌国	陆祖荫	杨长友
杨成章	杨春敏	杨熙荣	杨晓峰	沈本蔚	沈定力	沈经
何可人	何炬	何孟嘉	<u>肖健</u>	陈乐珺	陈沈南	陈朝清
陈雅清	汪中吉	汪贤文	杜志珍	杜侠	吴为民	吴水清
吴坚武	吴熙东	吴书华	宋晓非	孟祥承	邵毓莺	郁忠强
周月华	周化十	周永参	周光谱	<u>周杰</u>	周林	周莉
周鸣	郑文生	郑志鹏	郑林生	郑建平	郑敏	居强
林薇	林树子	武振东	郎鹏飞	赵平平	赵平德	赵宗琴
赵京伟	赵振国	赵萌	赵维仁	赵棟新	胡加生	胡贵云
胡家伟	钱建京	俞晨虹	宣百群	荣刚	钟戈平	郝伟
姜春华	祝玉灿	唐素秋	席德明	屈云河	聂振东	聂晶
梁国宁	顾树棟	顾维新	高元宁	高文绣	高树琦	高美丽
高翠山	徐芷菁	徐建国	夏小米	贾秋平	郭红菲	郭恩益
黄因智	黄德强	崔化传	崔象宗	盛华义	盛俊鹏	韩世温
韩缨	董宝中	董雪生	谢小希	谢佩佩	赖元芬	阙友昆

管应重 漆纳丁 颜 洁 潘玲君 薛生田 魏庄子 魏诚林

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 北京谱仪是北京正负电子对撞机上一台大型通用性磁谱仪。它由多种探测器组成, 用于测量正负电子湮没后的遍举末态反应, 进行粲粒子物理和 τ 轻子物理研究。它有大的覆盖立体角; 优良的荷电粒子分辨; 动量分辨和好的低能光子探测效率。本文对谱仪的结构和性能作了详细的描述。

一、引言

北京谱仪 (BES) 是一台大型的通用性磁谱仪, 工作在北京正负电子对撞机 (BEPC) 上。BEPC 的正负电子束流能量为 1.5—2.8 GeV, 设计亮度在质心系能量为 5.6 GeV 时为 $1.7 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。BES 的物理目标主要是研究粲粒子物理和 τ 粒子物理。为了能对正负电子湮没后的遍举强子末态进行完整的重建, 要求 BES 有尽可能大的覆盖立体角; 对荷电粒子有较好的动量分辨和鉴别能力; 对光子 (特别是低能光子) 有高的探测效率。

北京谱仪由中心漂移室、主漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器、 μ 子鉴别器、亮度监测器以及磁铁、电子学系统、触发判选系统及数据采集系统等部分组成。它们的主要性能如下:

主漂移室单丝位置分辨为 200—250 μm , dE/dx 取样可达 40 次, 对径迹的动量分辨为 $\Delta p/p = 2.1\% \sqrt{1 + p^2}$ (P 的单位为 GeV/c)。

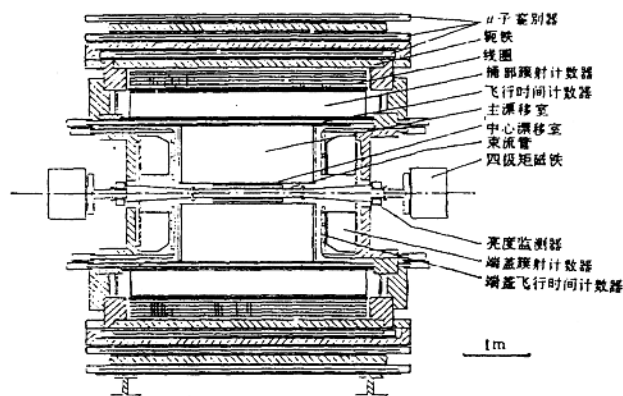


图1 北京谱仪侧视图

本文 1992 年 4 月 4 日收到。

飞行时间计数器覆盖立体角为 $96\% \times 4\pi$, 桶部飞行时间计数器的时间分辨为 330 ps.

桶部簇射计数器的能量分辨为 $\Delta E/E = 22\%/\sqrt{E}$, 端盖簇射计数器的能量分辨为 $\Delta E/E = 21\%/\sqrt{E}$ (E 的单位为 GeV).

μ 子鉴别器的覆盖立体角为 $67\% \times 4\pi$.

磁铁线圈可提供的最大轴向磁场强度为 0.45 T.

北京谱仪的设计和部件试验从 1983 年底开始进行, 1985 年开始谱仪各部件的加工, 1988 年完成北京谱仪的组装和宇宙线调试. 1989 年 4 月整个谱仪移到 BEPC 的对撞点进行初步调试和刻度. 1990 年 1 月开始 J/ψ 衰变事例的数据获取, 至 1991 年 6 月共收集了大约 9×10^6 个 J/ψ 事例.

图 1 给出了北京谱仪的示意图. 下面各节将分别描述北京谱仪各部分的结构和性能指标.

二、磁 铁^[1]

磁铁的设置是为了在谱仪中心产生 0.4 T 的均匀轴向磁场, 它由轭铁和线圈两部分组成. 轭铁又分为桶部和端部两部分, 它是磁场的回路又是谱仪的骨架, 因此要求具有较好的软磁性能和强度. BES 用的是轧制和锻制的 10[#] 钢, 矫顽磁力为 147 A/m. 轭铁桶部为八边形结构, 分为三层, 每层外侧安装两层 μ 子探测器. 轭铁的内层和中层是作为磁回路和 μ 子吸收体用的, 外层只作吸收体用. 整个谱仪轭铁长为 5100 mm, 宽 6650 mm, 高 5860 mm, 重约 330 吨.

磁铁的螺旋管线圈用方形铝管绕成, 外截面为 $52 \times 52 \text{ mm}^2$, 冷却水管内孔直径为 27 mm. 线圈采用双线并绕, 共六层, 12 个线圈, 381 匝. 整个线圈内径为 3478 mm, 外径为 4135 mm, 长 3617 mm. 电路采用串联方式, 水路采用并联方式. 为了保证线圈绝缘性能和绕制时的机械强度, 用绝缘胶带作匝间绝缘, 用环氧胶作层间绝缘, 在线圈间隙中填充纤维树脂胶做整体固定. 整个线圈用固定在内层轭铁两内侧面上的两根 12 mm 厚的金属带吊住, 以减少由于温度变化而引起的线圈中心的浮动. 当磁场为 0.4 T 时, 磁铁电源的电流为 3075 A, 总功率约 600 kW, 稳定度为 3.7×10^{-5} (24 小时). 最大磁场可达 0.45 T, 这时电源电流为 3700 A, 总功率约 700 kW. 为减少磁铁线圈温度对各子探测器的影响, 在线圈内侧有一 14 mm 厚的冷却水套.

利用装在一个可绕磁轴转动的臂上的三个霍尔探头, 可分别测出轴向、径向和方位角方向的磁场分量及其分布, 磁场的轴对称性(磁场梯度)是用固定在臂上的线圈测量的. 用特斯拉计(核磁共振仪)可对磁铁中心的磁场进行测量, 其准确度为 5×10^{-5} . 利用上述装置对磁场分布、磁轴及沿机械轴的磁重心进行了测量. 根据磁场分布的测量结果作了磁场拟合, 拟合后各点轴向磁场的精确度好于 0.2%. 在径迹区内, 磁场不均匀度好于 3%.

三、束流管和多次散射

从减少带电粒子多次散射考虑, 束流管应选用原子序数低的薄壁材料. 我们采用了

外径为 150mm、厚度为 2mm 的铝管。管壁厚度相当于 2.25×10^{-2} r.l.

束流管管壁再加上中心漂移室内外壁、主漂移室内壁以及主漂移室内气体和丝的贡献,进入主漂移室的粒子通过物质层的总厚度为 6.46×10^{-2} r.l.

四、中心漂移室 (CDC)^[1]

中心漂移室紧贴束流管,是北京谱仪最内层的探测器。它与主漂移室配合可测量带电粒子的径迹和动量,另外,还可与飞行时间计数器等配合作触发判选之用,以降低宇宙线等本底。

中心漂移室是一个同心圆筒形漂移室,为减少带电粒子的多次库仑散射给动量测量带来的误差,室的内外壁都用碳纤维构成。其有效长度为 1100mm,内筒外半径为 94mm,壁厚为 2mm,外筒内半径为 148mm,壁厚为 1mm。内筒外壁和外筒内壁都贴有 50 μ m 厚的铝箔作电极和屏蔽之用。室两端为 12mm 厚的硬质合金铝板。中心漂移室的漂移单元近似一个六边形,全室共有四层信号丝,每层有信号丝 48 根,每两根信号丝之间有一对电场丝。相邻的两层互相错开半个单元以解决径迹的左右分辨问题。每层信号丝之间的距离为 12mm,信号丝采用直径为 38 μ m 的不锈钢丝,场丝采用 178 μ m 的镀金钨钨丝。信号丝的信号由两端读出,用电荷分配法给出沿轴向 z 的位置。中心漂移室采用的气体是 $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CH}_4 = 89/10/1$,流量为 1 体积/2 天。 $r-\phi$ 平面的单丝位置分辨 $\sigma_r \approx 220\mu\text{m}$,沿轴向的位置分辨为 $\frac{\Delta z}{L} \approx 0.8\%$ ($L = 110\text{cm}$)。

五、主漂移室 (MDC)^[2]

主漂移室是位于谱仪中心的一个大型精密漂移室,它用来测量带电粒子径迹的动量和能量损失 dE/dx 。

1. 结构

主漂移室为圆筒形,它的内径为 310mm,外径 2300mm,全长 3380mm。轴向丝长 2120mm。内筒采用 2mm 厚的碳纤维以减少多次库仑散射,筒壁质量厚度为 9×10^{-3} r.l.。外筒为 10mm 厚的铝筒,两端是 4cm 厚的铝端板。

主漂移室共有 10 层,各层间的距离为 30—40mm,其中第 II、IV、VI、VIII、X 层的丝与轴向平行, I、III、V、VII、IX 层为斜丝,斜丝的倾角范围为 2.3° — 5.0° 。用斜丝法测量轴向 z 坐标。各层单元数从 48—108 个不等,总计 702 个单元。图 2 给出主漂移室结构示意图。

主漂移室选用多灵敏丝单元结构。每个单元包括四根引出信号的灵敏丝,全室共有灵敏丝 2808 根,加上各种辅助丝,共计 19380 根。四根灵敏丝在单元内的径向间距为 1cm,它们的信号用来测量漂移时间即径迹发火的位置和电荷量 (dE/dx)。为解决径迹的左右分辨,灵敏丝相对中心丝平面依次向两边错开 350 μ m。灵敏丝间加有电位丝以减

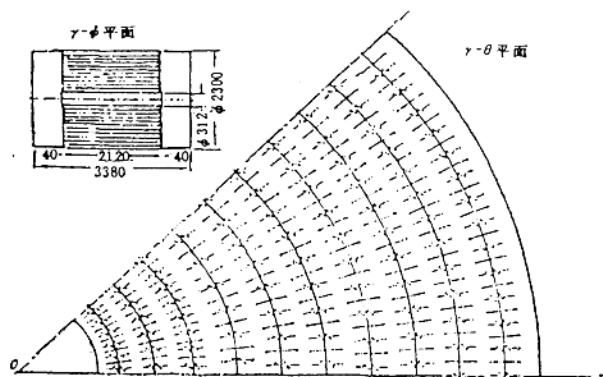


图 2 主漂移室结构示意图

少信号间的串扰和灵敏丝的静电偏离,并有效地控制增益。为改善单元边缘区域电场的均匀性,在中心丝平面的两端分别加上保护丝。电场丝平面构成单元的边界,丝距 5mm。实际单元为楔形,其标称半宽是指径向中心处的半宽,第 I 层为 1.4cm,第 II、III 层为 1.9cm,第 IV—X 层均为 3.1cm。内层单元较小是为了减少多次击中的几率,外层单元的最大半宽由所要求的空间分辨率限制,主要决定于电子的扩散效应。

这样的单元结构具有的特点是电场分布均匀,可以相当准确地使用漂移距离 S 与漂移时间 T 的线性关系,提供良好的空间分辨和均匀的 dE/dx 取样,并可加快图像识别。多灵敏丝单元的优点是利用灵敏丝信号具有的时间相关性可有效地排除某些本底和干扰,其缺点是雪崩过程在邻丝上会感应出较大的反向脉冲。采取在灵敏丝间加电阻耦合网络的办法,把一部分原信号引到邻丝上补偿掉感应信号,使其减小到 1% 以下而不致影响测量结果。

2. 工作气体

主漂移室的工作气体采用 $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CH}_4 = 89/10/1$ 的三元混合气体,气体放大系数约 5×10^4 ,饱和漂移速度约 $5\text{cm}/\mu\text{s}$,达到饱和漂移速度的电场值约 $700\text{V}/\text{cm}$,有效扩散系数约 $100\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$,最小电离粒子最可几能量损失 $dE/dx \approx 1.37\text{keV}/\text{cm}$,气体流量为 1 体积/2 天。

3. 性能

粒子穿过第二层所对应的覆盖立体角为 $95\% \times 4\pi$,穿过第四层所对应的立体角为 $90\% \times 4\pi$,穿过全部十层的立体角约为 $70\% \times 4\pi$ 。单丝的探测效率达 95%。径向分辨由丝的定位精度所决定,约为 $80\mu\text{m}$,在 $r-\phi$ 平面上单丝的位置分辨为 $200-250\mu\text{m}$, z 向分辨在 $2.3-2.5\text{mm}$ 之间。

对于 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 中的 μ ,其动量分辨为 $60\text{MeV}/c$,相应于 $\Delta p/p = 2.1\% \sqrt{1+p^2}$

(p 的单位为: GeV/c), 每条径迹的方位角分辨为 $\sigma_\phi = 3.7\text{mrad}$, 极角分辨为 $\sigma_\theta = 8.3\text{mrad}$. 图3给出了由 J/ψ 衰变的 π 、 K 、 p 末态粒子的 dE/dx 分布, 从图上可以看出, 利用 dE/dx 信息, π/K 的分辨范围可达 $500\text{MeV}/c$.

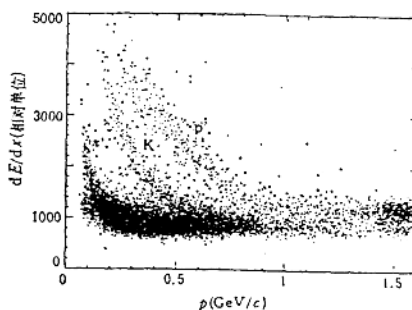


图3 π 、 K 、 p 的 dE/dx 分布

六、飞行时间计数器 (TOF)^[1]

飞行时间计数器由桶部和东西两个端盖组成。

桶部 TOF 包括 48 个闪烁计数器, 每个闪烁计数器的闪烁体 (NE110) 长 2840mm, 宽 156mm, 厚 50mm. 每块闪烁体两端经 640mm 长的鱼尾形光导和 490mm 长, 直径 40mm 的圆柱形光导与 XP2020 光电倍增管相连. 光导材料采用国产航空二号有机玻璃, 为保证对光子有好的透明度, 光电倍增管与光导的耦合采用 3mm 厚的硅橡胶, 并在硅橡胶面上涂一层硅油. 闪烁体外先包一层黑纸以去掉慢反射光的成份, 光导外包一层镀铝薄膜, 然后在闪烁体及光导外再包两层黑色胶带. 为了消除谱仪漏磁对光电倍增管输出信号的影响, 在光电倍增管外包一层厚度为 0.5mm 的 1J50 μ 合金, 一层厚度为 1mm 的 1J79 μ 合金和厚度为 4mm 的软铁管. 安装时, 48 个桶部闪烁计数器沿与轴线平行的方向固定在漂移室外筒上. 整个桶部 TOF 的覆盖立体角为 $76^\circ \times 4\pi$.

东西两个端盖部分的 TOF 均由 24 个梯形闪烁计数器组成. 每块闪烁体 (NE102) 的高度为 700mm, 上底宽 90mm, 下底宽 274.5mm, 厚度 25mm, 24 块闪烁体组成一个内径为 69cm, 外径为 220cm 的环形端盖. 在每块闪烁体下底末端处以垂直耦合形式与长为 630mm 的鱼尾形光导相连接, 再通过长 610mm, 直径 40mm 的圆柱形光导与光电倍增管相连接. 光电倍增管的型号、联接方法、磁屏蔽措施等与桶部 TOF 相同.

端盖 TOF 的覆盖立体角约为 $20^\circ \times 4\pi$, 因此整个 TOF 的覆盖立体角约为 $96^\circ \times 4\pi$.

为监测和保证 TOF 的运行质量, 用 LN-100 型氮激光器等部件建立了一套激光监测装置, 激光器的光束通过光纤和固定在闪烁体上的一个小棱镜反射到闪烁体上, 对 TOF 进行定期的监测和校正.

利用 Bhabha 散射事例测得桶部 TOF 的时间分辨为 330ps, 图 4 给出了 π 、K、p 粒子的 β 值相对于它们动量值的分布。从图中可看出对 π 、K、p 粒子的分辨能力。

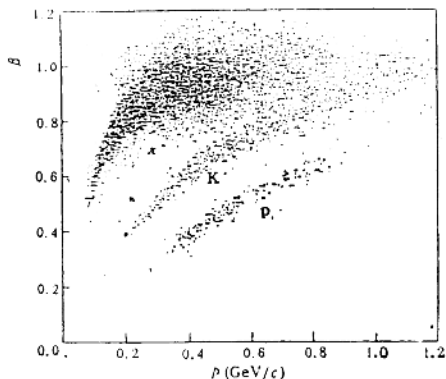


图 4 π 、K、p 粒子的 β 值对于动量的分布

七、簇射计数器^[3,4]

簇射计数器由桶部 (BSC) 及端盖 (ESC) 两部分组成。BSC 位于桶部 TOF 与磁铁线圈之间, 东西两个环形 ESC 位于端盖 TOF 与磁铁端部的轭铁之间。BSC 所覆盖的立体角为 $80^\circ \times 4\pi$, 两个 ESC 的覆盖立体角为 $13^\circ \times 4\pi$ 。

BSC 是由 24 层自淬灭流光 (SQS) 计数管和 24 层吸收层相间叠加组成的圆筒形探测器, 图 5 给出 BSC 的结构示意图。其结构可以充分利用空间并可避免部件之间形成死区。BSC 放在磁铁线圈里面是为了提高对低能 γ 的探测效率。整个 BSC 安装在一个承重的铝筒上, 铝筒内径 2470mm, 外径 2532mm, 长 4230mm, 厚 30mm。为加强铝筒强度, 在两端各加一个径向厚度为 80mm, 轴向高度为 90mm 的法兰。30mm 厚的铝筒加上簇射探测器以内各探测器及加速管的物质, 构成相当于 0.5r.l. 的第一层吸收层, 其余的吸收层均为特制的 Al-Pb-Al 夹层板, 夹层板是由两层 0.6mm 厚的铝板, 两层 0.25mm 厚的胶膜和 2.8mm 厚的铅板 (0.5r.l.) 在 180°C 高温下加压粘接而成。10 块长 3850mm 相同半径的夹层板组成一个圆周而形成一层完整的吸收层, 在它上面等距离地装有五根高 13mm, 宽 28mm 的铝加强筋, 每圈加强筋上等分地钻了 560 个 $\phi 6$ 的孔, 分别插上内外绝缘子, 用作固定工字梁和穿阳极丝。用 13mm 高, 0.8mm 厚的工字梁将圆周分成 560 个灵敏单元, 阳极丝为直径 50 μ m 的不锈钢丝, 外绝缘子孔内插有内径为 $\phi 0.4$ 的铜管, 阳极丝在铜管中夹紧固定。BSC 共有 13440 个单元, 单元的宽度从第一层的 14mm 逐渐增大到第 24 层的 18mm。每一圈夹层板及加强筋装好后, 用两层厚 0.8mm, 宽 13mm 的无磁不锈钢带沿加强筋的凹形槽捆紧焊牢。在 24 层计数器组

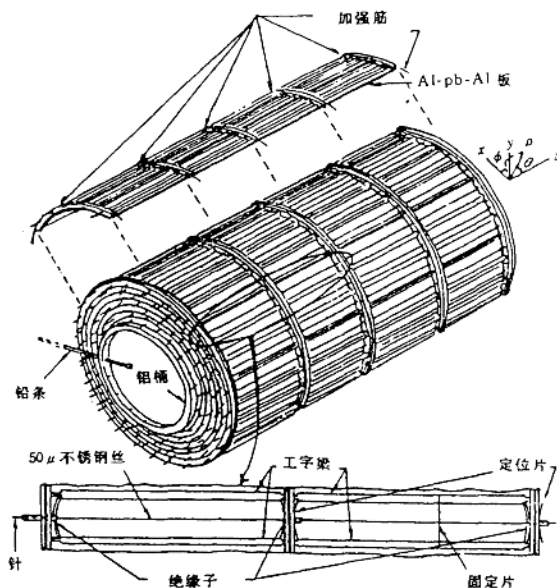


图5 桶部簇射计数器结构示意图

装完毕后,用1mm厚的铝板将BSC覆盖,再用涂以环氧树脂的五层0.2mm厚的玻璃纤维布缠紧,用硅橡胶将两端的缝隙密封起来。在BSC一端的第一层有10个进气口,在另一端的第24层有10个出气口。工作气体采用 $\text{Ar}/\text{CO}_2 = 80/20$ 混合气,通过4℃正戊烷后,气体中正戊烷的含量约占25%。气体流量为1体积/3天。

端盖簇射计数器为一环形计数器,每个端盖由两个半圆环组成。它们也是由24层SQS计数管和23层平面的Al-Pb-Al吸收层(厚度与BSC的相同)相间叠加并加上前后铝面板胶结而成。SQS计数管由模压的铝方管构成,铝方管的内截面为 $12.8 \times 12.8 \text{ mm}^2$,壁厚为0.6mm,前铝板的厚度为10mm,后铝板的厚度为30mm,为便于读出电子学线路的安装,ESC的第一层(靠近谱仪中心方向)计数管为174根,以后每层各加2根,从第9层起每层都是190根,所以每个ESC有4488根计数管,其有效的内圆直径约为746mm,外圆直径约为1920mm,总厚度为410mm。计数管的阳极丝为 $37\mu\text{m}$ 的不锈钢丝,铝方管两端装有聚甲醛绝缘子,绝缘子中央固定一个镀锡铈合金的铜管,用夹钳把阳极丝固定在铜管中心。绝缘子上角有直径3mm的孔,各孔间用U型聚乙烯管连接,以流通工作气体。工作气体是 $\text{Ar}/\text{CO}_2 = 34/66$ 混合气,流量为1体积/1天。

为减少电子学的读出道数,对计数管的输出信号做了组合。BSC前6层沿径向双丝组合,第7—12层是3丝组合,后面12层组合在一起。所有计数管的信号都是从两端读出,以使用电荷分配法确定入射粒子沿丝方向(z)的位置,因此BSC总共使用了6720

道读出电路。ESC 前6层为单管两端读出,后18层为4、4、10层管并联单端读出,每个端盖环形计数器共有2760道读出电路。

图6给出 Bhabha 散射事例的正负电子在 BSC 中沿 z 向能量沉积的分布,图上五个凹陷的部分显示出五根加强筋所产生的影响。用 Bhabha 散射事例测得的能量分辨为 $\Delta E/E = 22\%/\sqrt{E}$ 。从 $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 衰变中被约束的 π^0 的 γ 能量分布测量值与预期值的比较,看出 BSC 的能量线性是好的。由 Bhabha 散射事例所测得的 ϕ 向分辨 $\sigma_\phi = 7.9\text{ mrad}$, z 向分辨 $\sigma_z = 3.6\text{ cm}$ 。对低能 γ 的探测效率是用 $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 的 γ 测量的,对 50 MeV 的光子,探测效率为 65%。对于能量 $> 100\text{ MeV}$ 的光子,探测效率为 100%。

端盖簇射计数器的能量分辨也是由 Bhabha 散射测得的, $\Delta E/E = 21\%/\sqrt{E}$ 。

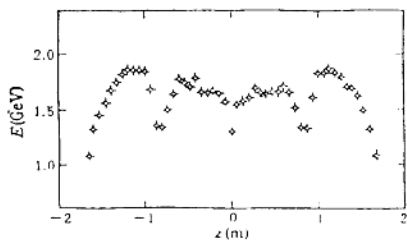


图6 Bhabha 散射的 e^+ , e^- 在 BSC 中沿 z 向能量沉积的分布

八、 μ 子鉴别器^[5]

μ 子鉴别器安装在 BES 最外层,由三层吸收体和三层 μ 子计数器组成。三层吸收体利用八边形的铀铁构成,其厚度分别为 12cm、14cm、14cm。 μ 子计数器放在各层铀铁后面。整个 μ 子计数器系统共有 1512 个正比计数管,每 8 个计数管组合在一起形成 1 个组件,共有 189 个组件。每个组件中的 8 个正比计数管分成两排并互相交错半个管孔以解决 μ 子径迹的左右分辨问题。正比计数器是由铝材冲压而成的方形铝管,每个组件由两个冲压件组成,组件两端用厚 25mm 的铝端板固定,并用真空橡皮垫圈将室体密封,端板上有管与管之间的通气槽沟和组件之间的通气孔。正比管的内孔为 $60 \times 50\text{ mm}^2$,壁厚为 2.5mm,第一层的管长为 4212mm,第二层和第三层的管长为 4638mm。正比管的阳极丝为 $\phi 48\text{ }\mu\text{m}$ 的不锈钢丝 ($\sim 727\text{ }\Omega/\text{m}$),被夹紧在端板上绝缘子中心的铜管中。

μ 子管的工作气体为 $\text{Ar}/\text{CH}_4 = 90/10$ 混合气。气体流量为 1 体积/4 天,工作气体中的氧含量低于 100ppm。

三层 μ 子探测器的覆盖立体角分别为:第一层 $67\% \times 4\pi$,第二层 $67\% \times 4\pi$,第三层 $63\% \times 4\pi$ 。

μ 子计数管的工作电压分别为 2.360kV (第一层), 2.365kV (第二层), 2.375kV (第三层)。探测效率约为 95%。 r - ϕ 方向的粒子

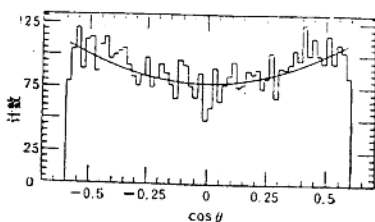


图7 双 μ 事例的 $\cos \theta$ 分布

子空间分辨是正比管的半宽度 (3cm), 轴向 z 的空间分辨是用电荷分配法从每对相联的正比管的 A 端输出信号幅度测得, $\sigma_z \approx 4.5\text{ cm}$ 。

图7给出双 μ 相对于 $\cos \theta$ 的分布,图中实线为 $1 + \cos^2 \theta$ 。

九、亮度监测器^[6]

亮度监测器通过对小角度 Bhabha 散射的测量来确定 BEPC 的亮度。图 8 为监测器结构示意图,在碰撞点的两侧紧贴束流管处装有四组探测器,每组均由一个定义计数器 P,一个辅助计数器 C 和一个量能器 S 组成。P、C 都是塑料闪烁计数器, S 是由 11 层 5.6mm 厚的铅片和 6mm 厚的塑料闪烁体迭层所组成,总厚度相当于 11r.l., 为便于光的收集,闪烁光由 8mm 厚的波长移位片收集后送到光电倍增管。

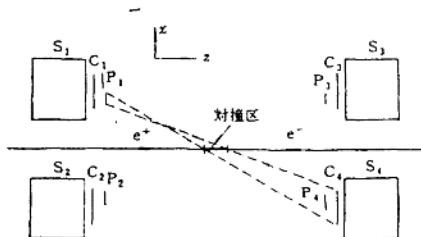


图 8 亮度监测器结构示意图

4 组四重符合,即 $P_1 \cdot S_1 \cdot C_3 \cdot S_3$ 余类推。另外,对量能器输出信号作能量选择可排除非 Bhabha 散射的本底。为了排除束流经过亮度监测器附近时产生的偶然符合本底,采用延迟符合方法即 $(C_3 \cdot S_3)$ 延迟一个对撞周期 800ns 后再与 $(P_1 \cdot S_1)$ 符合。从上述的四重符合中将这部分偶然符合本底扣除。

由亮度监测器测出的亮度不准确度 $< 3\%$ 。

Bhabha 事例的接收立体角是由 P 计数器的大小确定的, P 计数器接收 Bhabha 事例的计数率为:

$$R_B = L \cdot \sigma_B$$

式中 σ_B 为 P 计数器接收 Bhabha 散射的积分截面, L 为对撞机的亮度。原则上说每个 P 计数器都可测量亮度。采用 4 组探测器的平均计数率测量亮度,可以使测量结果对于束流对撞区的形状及位置变化不太灵敏。为减少本底,采用

十、电子学系统^[7]

北京谱仪电子学系统的基本任务是:

- * 接收从各种探测器来的信号,加以高速度、高精度的处理,将处理结果暂存,并将其中部分信息送入触发判选电路;
- * 等待触发判选电路作出判决。接受判选的结论。或复原以等待下一个事件;或将已接收的暂存信息进行数字化和数据预处理,请求在线计算机读出;
- * 接受在线计算机的控制,反复地对电子学系统本身进行校准,力求在任何时候都能获取满足精度要求的数据;
- * 接收由对撞机控制的时间参考信号,以便有序地、精确地进行工作。

北京谱仪电子学系统的基本框图如图 9 所示。由图可见,各个不同的探测器的输出信号,无论是电荷量、时间量,或是空间坐标量的信号,经过处理后都以电压量的形态暂时地存储起来,等待触发判选的结果。考虑到信道量总数很多但真正具有有用信息的信道量相当少这一特点,系统采用了模拟总线以及利用了带有数据预处理功能的智能模数变换器,以求设计合理,降低成本。智能模数变换器的数据预处理功能有:

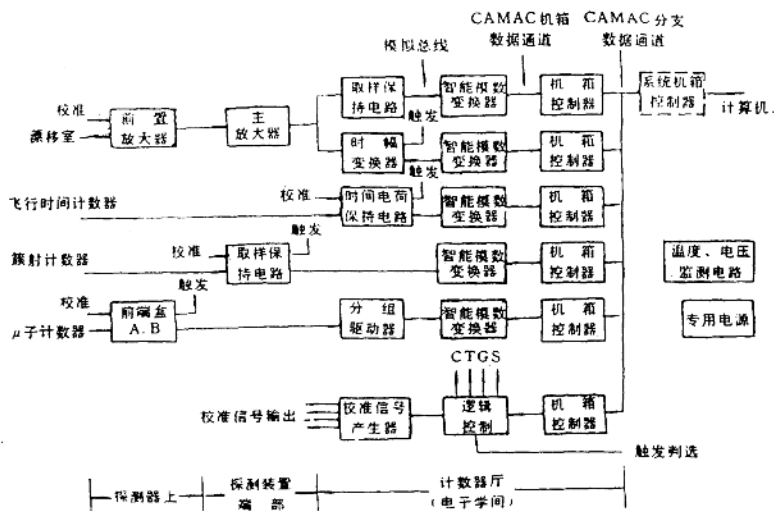


图9 北京谱仪电子学系统基本框图

- (1) 对于没有有效数据的信道不予读出,以压缩每个事件的数据量。
- (2) 进行增益、台基和二次项积分非线性的校准,以保证同类信道性能的一致性。
- (3) 为事件的数据装配物理地址,便于数据的离线分析。

漂移室读出电路的前置放大器直接装在漂移室上。用双绞线屏蔽电缆(~5m长)接到装在探测装置端部的主放大器。这种安排可提高共模抑制比,减小干扰。主放大器除将信号幅度进一步放大外,用极零补偿将信号的衰落时间常数减小,同时将信号分成两路,一路作电荷测量,另一路经低阈甄别后给出时间测量的定时信号。漂移时间的测量由时间幅度变换器完成。其起始信号由主放大器输出的定时信号经28m长的双绞线屏蔽电缆传输后获得。公共停止信号则由校准电路提供(“校准”模式),或由触发判选电路提供(“获取”模式)。变换后的时间量以电压形式暂存起来。电荷量的测量则由积分式取样保持电路完成。变换后的电荷量也以电压形式暂存起来。

飞行时间计数器光电倍增器的输出信号经约30m长的高频性能较好的同轴电缆送到时间电荷测量插件作为起始信号。时间参考信号则由安放在对撞点左右两边各9.3m处的束流管道上的钮扣状感应电极取出。经约30m长的同轴电缆后,用前沿甄别获得定时信号,作为公共停止信号。由于对撞机的正负电子束团有一定长度,强度也有一定变化,公共停止信号的时间游动对飞行时间的分辨要作出相当贡献。时间电荷测量插件所测得的电荷量是供离线修正幅度效应用的。

由于簇射计数器工作在自猝灭流光模式,输出信号相当大。它不需要作任何放大,而直接送到积分式取样保持电路。为了提高装配密度和保证顶降性能,取样保持电路是由自行设计的混合集成电路构成的。取样保持电路插件安装在探测装置端面,避免了大量

的长电缆联接。为了提供中性粒子的触发判选信号,还将每12路输入信号作模拟量相加后输出。

μ 子计数器读出电路采用电荷灵敏放大器,然后将信号送入跟踪式取样保持电路,将信息用模拟量方式暂存起来。跟踪式取样保持电路是自行设计的混合集成电路。电荷灵敏放大器和跟踪式取样保持电路装在前端盒中,固定在 μ 子计数器端部。前端盒的输出信号经25m长的扁带电缆送到分组驱动器,然后由智能模数变换器读出。

为了保证同类电子学信道性能的一致性,为了尽量降低对元件精度的要求以节省开支,为了在不具备获得探测器信号的情况下调试电子学系统,设计了相当完善的在线校准电路和相应的校准方法。

整个电子学系统是在对撞机这种宽频带的强干扰源条件下运行的。为了提高电磁兼容性能,在信号的联接、接地、屏蔽以及供电系统的隔离、滤波等方面作了审慎的考虑,采取了有效的措施。

为了保证整个系统能够长期可靠地运行,在建造过程中,采取了严格的质量控制和各个层次的多种检测和监测手段。

北京谱仪电子学系统的规模见表1。

表 1

名 称	用 量	备 注
电子学信道	20672 个	41 个品种
插件和电路盒(板)	2262 个	
专用电源	66 台	
机箱	72 台	
各种机柜	45 台	总长 > 40 km
各种电缆	~5000 根	
用电量	~120 kW	
风冷系统风量	60000 m ³ /h	
水冷系统水量	60 l/min	

北京谱仪电子学系统的主要性能见表2。

表 2

名 称	指 标	时 间		电 荷	
		分 辨	积分非线性	分 辨	积分非线性
漂移室电子学系统	典型值	0.25ns	0.15%	4fC	1.2%
	各道方差	0.06 μ s	0.04%	1fC	0.22%
飞行时间计数器电子学系统	典型值	20ps	1%	0.4pC	2%
	各道方差	10ps	0.5%	0.2pC	0.5%
簇射计数器电子学系统	典型值	—	—	0.24pC	0.3%
	各道方差	—	—	0.12pC	0.2%
μ 子计数器电子学系统	典型值	—	—	2fC	0.04%
	各道方差	—	—	0.3fC	0.01%

触发判选系统可以分成特征抽取和判定两大部分。北京谱仪中的各子探测器都有相应的判选电路,它们把该探测器的信号处理成代表一定特征的信号后,送到主触发电路按照触发条件进行判选。

本系统还包括定时电路,它给出控制读出电子学和触发判选系统工作的各种时标和门信号,另外还有一组监测谱仪工作状况的定标器。

TOF 判选电路在每次对撞后用一个宽 40ns 的门对来自 TOF 的信号进行时间选择,以排除 95% 的宇宙线以及和束流无关的其它本底。此外还用 15ns 的门选取背对背的 Bhabha 和双 μ 事例。TOF 的信息用于一级判选。

主漂移室寻迹电路用主漂移室的信号选择出通过束流轴且横向动量大于 100MeV/c 的带电粒子,从而在空间上排除 95% 的宇宙线本底,以及大量与束流有关的本底。寻迹的方法是把前四层的击中信号送到 RAM 插件,在 RAM 插件中存放着好径迹的击中单元号的各种可能组合,因此以击中信号做为地址可检查该组合是否构成一个好径迹,最后由符合寄存器和相加甄别器得到该事例的好径迹数 $N_{trk} \geq 1, 2, 3, 5$ 等的信号送到主触发电路。好径迹组合表可根据实验要求而改变,在每次运行前,通过 CAMAC 加载到 RAM 插件中。由于主漂移室的最大漂移时间可达 600ns,寻迹电路只能放在二级判选中。

桶部簇射计数器沿径向的 24 个单元连接成 6 个信号输出,而相邻的两排单元又组成一个楔形,把一个楔形内的 12 个信号相加,如果超过一定的甄别阈就认为是沿径向发展的簇射,以此来排除斜穿的宇宙线。该径向能量沉积的信号被送入一级判选,各楔形已相加的信号进一步相加后给出能量平衡和总能量条件的信号送入二级判选,以排除同步辐射和束-气体等本底。

中心漂移室判选电路把中心漂移室第 3、4 层经过甄别的 96 个信号相“或”并锁存起来,选取击中它的带电粒子,从空间上 (r 和 z 方向)排除各种本底。中心漂移室的信号参加二级判选。

μ 计数器判选电路把来自内层 μ 计数器各组件的 53 个模拟相加信号甄别并相“或”锁存,用以标记能够穿过簇射计数器和磁铁的 μ 子。由于 μ 计数器的漂移时间、取样保持电路信号的延迟都较大, μ 的判选只能在三级判选中进行。

主触发电路是触发判选系统的判定分类部分。所有上述的各种特征信号都汇集到主触发电路逐级进行判选。对 16 个输入信号进行 8 种不同的逻辑组合后给出 8 种输出,即可同时选择 8 种不同类型的事例。某一级的 8 种输出信号相“或”后送到主触发控制插件 MTC,主触发控制插件接到这个信号就进入下一级判选或给出好事例的信号,否则便发出还原信号。

在 J/ψ 能量处亮度 $L \approx 1 \times 10^{30} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,宇宙线本底被压缩到 0.5s^{-1} ,束流相关本底为 4.5s^{-1} ,而 J/ψ 事例率为 2.5s^{-1} 左右。

十二、数据的在线获取、分析和刻度^[9]

在线数据获取系统由 VAX11/785 机、VCC(VAX-CAMAC-Channel) 接口设备和

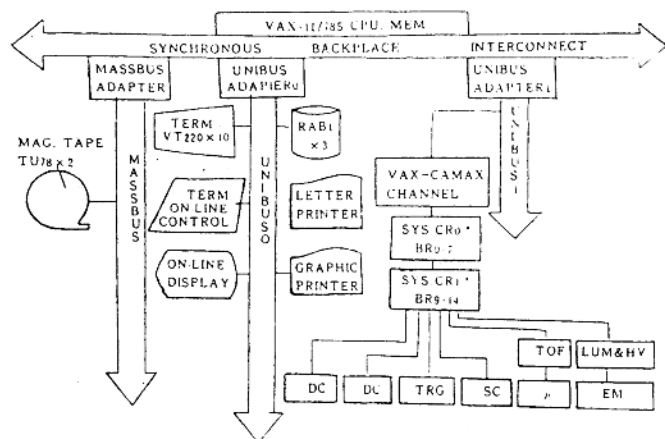


图 11 北京谱仪在线系统的构成

CAMAC 分支系统组成。VAX785 机配有 6 兆字节内存、容量为 456×3 兆字节的 RA81 磁盘和两台 TU78 磁带机, HP2686 型激光打印机和 LXY12 型行打机用于图形的绘制和输出, 各种图形可显示在两台彩色屏幕上。具体连接方式见图 11, 两个 CAMAC 系统机箱借助分支接受器和 VCC 相连, 装在系统机箱内的分支驱动器可带动 7 个 CAMAC 分支从而构成一个可扩充的 CAMAC 多分支系统。为了缩短数据的传送时间, CAMAC 的取数与控制指令在 VAX 程序中成组包装, VCC 设备按指令组的起地址逐条取出发送, 在 VCC 与 VAX 机之间的数据传送是以直接内存访问方式进行的。

在 VAX-VCC-CAMAC 硬件结构的基础上建立了一套数据获取与分析程序, 它是由多个数据获取任务和分析任务组成, 每个任务都是一个可装卸的程序模块。主触发事例、亮度监测器和刻度数据分别由三个数据获取任务读取, 并被存入数据缓冲区。从数据缓冲区可取出数据完成直方图分析工作。北京谱仪的数据库是按数据节—键卡—参数的树形结构写成的字符形文件, 它用于描述数据获取系统 CAMAC 硬件的配置与布局, 定义 CAMAC 操作指令格式和各子探测器的运行状态, VCC 通道程序指令也放在数据库中。在数据库调用程序中将读入数据节名、键卡名和参数名, 并把它们的值放入公用区中以供任务程序引用。这种树形结构使数据库能容纳一个庞大的多分支 CAMAC 系统的参数集合, 并且层次清楚、描述完整。

借助软件手段在有图形显示功能的终端设备上实现了触摸屏幕的功能。在另一终端上可显示事例获取与分析的状态信息及各进程的错误信息, 也可输入新选择的参数。

在北京谱仪运行过程中, 对各探测器及其约两万路读出电子学的工作状态做出快速、准确和综合的监测是在线系统的重要任务之一。监测的任务可分为两类, 在第一类监测中不对事例进行分类、筛选, 仅要求探测单元击中数据高于阈值, 并给出单元击中次数、时间、脉冲高度以及由它们的简单函数算出的间接测定值分布, 如 MDC 位置分辨的双

峰分布,单丝触发效率分布, μ 探测器和 BSC 的 z 向分布,TOF 的击中时间分布等,从这些分布图形直观迅速地监视探测器的运行状态。第二类监测是在事例数据在线分析的基础上,按照 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ 、 $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 、 $e^+e^- \rightarrow$ 强子、宇宙线等几种不同类型事例的特征,完成所获事例的分类,达到对探测器性能参数的监测。

十三、离线数据分析系统^[10]

离线数据分析系统的任务是将北京谱仪产生的,由在线数据获取系统记录下来的数据信号在离线计算机上还原为粒子种类、能量、动量等物理量,为物理分析工作提供条件。图 12 为离线分析系统的数据流程图,图中圆圈代表产生或改变数据的过程,箭头代表一种数据。过程 1 代表谱仪及在线数据获取系统所取得的原始数据,过程 2 为快速事例过滤(去除本底),过程 3 是离线刻度,即通过某一类型的物理事例计算出谱仪工作状态时的刻度常数,过程 4 为事例重建,它把原始数据还原为粒子的种类、能量、动量,并给出事例类型判断,过程 5 是事例分类,根据过程 4 对事例的判断把不同类型的事例写入不同

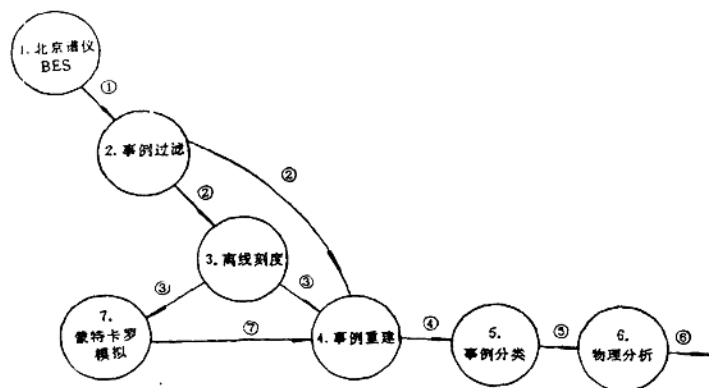


图 12 离线分析数据流程图

① 原始数据, ② 过滤数据, ③ 刻度常数, ④ 二次过滤数据,
⑤ 分类数据, ⑥ 物理结果, ⑦ 模拟原始数

的磁盘文件或磁带,过程 6 是物理分析,即对某一类数据进行物理分析并得出物理结果,过程 7 为 Monte Carlo 模拟,用 Monte Carlo 模拟产生出格式与真实的原始数据相同的模拟原始数据,并与真实的原始数据一样地经过过程 4—6 的处理。

离线分析系统包括 Monte Carlo 模拟程序 SOBER 和事例重建及显示程序 DRUNK 两大部分。SOBER 包含四个子程序,即四个子过程:(1)模拟事例产生过程,计算出 e^+e^- 对撞终态产物的物理量;(2)径迹计算过程,模拟终态粒子在谱仪空间的运动及与谱仪物质的相互作用;(3)击中信号计算过程,模拟出各探测器灵敏区接受终态粒子后产生的信号;(4)数字化过程,模拟电子学线路和在线获取系统将信号转换为数字。

SOBER 框架允许在一个作业中计算多个运行, 每个运行可以由特定的控制卡决定其运行条件。为了增加对探测器状态变化的适应性, SOBER 从磁盘文件读入反映探测器状态的各种几何常数和刻度常数。

DRUNK 相应于图 12 中的过程 2、3、4 和 5, 它包含有六个子程序: (1) 从谱仪各子探测器信号中识别出物理客体的模式识别; (2) 对描述物理客体的参数作参数拟合; (3) 把不同的物理客体匹配成一个粒子; (4) 粒子鉴别; (5) 全局拟合; (6) 单事例显示。DRUNK 的输入数据可以是原始数据, 也可以是 SOBER 产生的模拟数据, 或者是 DRUNK 产生的重建数据。输出的重建数据可以是过滤数据、重建数据或分类数据。输出数据也可以包括相应的原始数据。DRUNK 在进行数据重建时需要使用谱仪一系列的几何常数和刻度常数, 这些常数是常数文件中读入, 用户可以根据需要通过运行控制卡变更刻度常数文件。DRUNK 还提供若干用户子程序, 由用户决定一个 DRUNK 作业的工作内容, 其中最重要的是 BESEVN, 它决定作业是进行事例过滤、事例分类还是物理分析。

北京谱仪于 1989 年夏开始在 J/ψ 能量处作了系统检验, 并于 1990 年开始对 J/ψ 进行正式数据获取。下面给出一些表示 BES 性能的结果, 这些结果是在已处理的 $2.56 \times 10^6 J/\psi$ 事例中得到的, 它们都符合 J/ψ 某一衰变方式和运动学上能量、动量的守恒要求。

图 13 给出 Bhabha 散射的 e^+e^- 对, 在簇射探测器中可以清楚地看到 e^+ 、 e^- 的电磁簇射。图 14 给出 $\mu^+\mu^-$ 对的径迹图, 可以看到在 μ^+ 、 μ^- 所通过的路途中各探测器都给出了它们通过的信号。图 15 给出 $J/\psi \rightarrow \phi K^+K^-$ ($\phi \rightarrow K^+K^-$) 的一个事例, 所有 K 介子的鉴定都要依靠飞行时间的信息。图 16 给出一个 $J/\psi \rightarrow \omega \pi^+\pi^-$ ($\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$) 的事例, 图上显示出四个 π 介子和两个光子, 在 $\pi^+\pi^-\pi^0$ 的组合质量谱中看到一个明显的 ω 峰, 如图 17 所示。图 18 给出由 $J/\psi \rightarrow \gamma \pi^0 \pi^0$ 反应道产生的 5γ 的一个中性强事例。图 19 给出由 $J/\psi \rightarrow 5\gamma$ 事例中终态 4γ 的不变质量谱, 从中可以看到 $J/\psi \rightarrow \gamma f_2(1270)$ 衰变中 $f_2(1270)$ 的信号。图 20 给出 $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 中 $\pi^+\pi^0$ 质量平方对 $\pi^-\pi^0$ 质量平方的 Dalitz 图, 从图中可以看到主要都是含 ρ 终态的事例, 而且在低能 π^0 所形成的低质量平方的拐角处可以看到事例分布基本上是均匀的, 说明北京谱仪对低能 γ 光子具有较好的探测效率。

感谢 在北京谱仪的研制和运行过程中, 得到了航天部 3531 厂, 航天部 200 厂, 航天部 639 厂, 上海飞机制造厂, 上海钢研所, 哈尔滨玻璃钢研究所, 西北铜厂, 中国科学院长

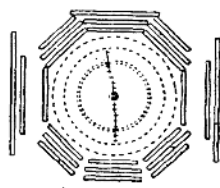


图 13 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 的事例图

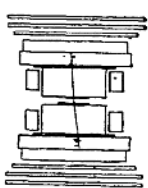


图 14 $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ 的事例图

