

# 用于重离子核反应研究中的三维多用途靶室

李 光 伟

(中国科学院近代物理研究所)

本文主要报导在重离子核反应研究中，对核反应出射道的 $\gamma$ 、 $\theta$ 、 $\varphi$ 三个空间自由度的测量和在转动密封钢带上的飞行时间测量，以及其它多用途测量用的三维多用途散射室。

这台靶室主要用于研究重离子引起核反应出射道的能谱测量、角分布、两粒子发射的平面符合测量、三粒子发射的三维符合测量、粒子多重性测量、飞行时间测量和激发函数测量。靶室使用的材料是不锈钢、黄铜和其它材料。靶室外径 $\phi = 660\text{mm}$ ，内径 $\phi = 600\text{mm}$ ，高度 $514\text{mm}$ ，靶心距底盘高度为 $140\text{mm}$ 。

这台靶室主要由：(1)隔油和降能系统；(2)束流准直系统；(3)转动密封钢带系统；(4)三维测量系统；(5)二维测量系统；(6)靶室主体及其附件；(7)双受力高真空

隔断阀门；(8)可调方光栏；(9)外探测器系统以及真空系统和靶室支架等十个部分组成。见图所示。

## 一、隔油和降能系统

由于加速器提供的束流在引入靶室时，同时又带入真空系统中一定量的油蒸气，常常会使产生核反应的靶子上吸附了一层有机油类。当束流打在靶子上时，这些油分子被束流轰击而分裂，使得在靶表面附着了一层碳，而碳产生的能谱淹没了部分核反应能谱，形成严重的碳污染，从而直接影响实验数据的可靠性。为此，我们在该靶室中设计了隔油装置（见图中的1）。该装置是通过在靶室的束流输入端设计了一个外径 $\phi = 80\text{mm}$ ，内径 $\phi = 40\text{mm}$ 长为 $220\text{mm}$ 的液氮冷阱来实现。冷阱的一端与隔油金属箔接触，具有冷却隔油的作用，可以防止隔油金属箔因束流轰击发热而被损坏的现象。为了防止靶室本身真空系统油蒸气的返流而产生碳污染，我们在靶室和抽气系统之间设计了一个内径 $\phi = 100\text{mm}$ ，外径 $\phi = 210\text{mm}$ ，高为 $120\text{mm}$ 的带障板隔油液氮冷阱，这不但有隔油作用，同时还可将靶室的真空度提高约一个量级。

为了实现在不同能量下产生重离子核反应研究的需要，在隔油装置后面，设计了一套降能系统。这个降能系统是通过在真空密封的不锈钢外壳内装了两个与束流方向垂直，而本身相互平行，轴偏高于束流中心的同轴黄铜齿轮降能盘来完成。在盘上沿束流入射中心开了12个直径 $\phi = 32\text{mm}$ 的带有螺纹的同心窗，由此便可把不同厚度的降能片旋

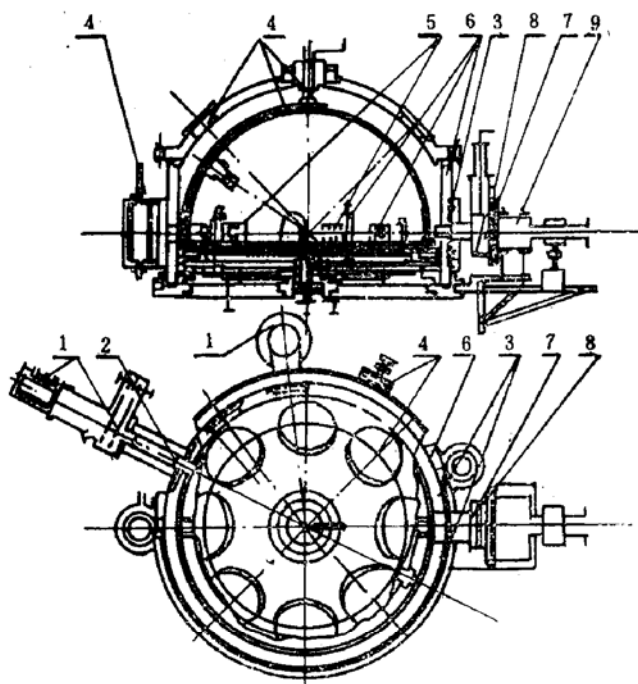


图. 三维多用途散射室总体示意图。

在其中的十个窗上。当在靶室外密封旋转降能盘的主动齿轮时，两个被动黄铜齿轮降能盘上的任何两个降能窗将组成一个吸能窗。由于降能系统是由两组十二个降能窗组成，除其中一组不降能和另一组作为观察窗外，共可组成100个不同形状的吸能窗，从而可测量激发函数和各种能谱。

## 二、束流准直系统

束流准直系统装在靶室入口处和降能系统间。该系统是通过在束流管道内装了一个与降能窗中心及靶心同心、同轴的长度为300mm、外径 $\phi = 45\text{mm}$ 的黄铜准直管，管内又装有20mm至50mm的各种光栏定位筒组成。由此，便可组合成不同的长度来满足限束光栏、防散射光栏和准直光栏之间的距离要求。这三种光栏可根据实验对立体角的要求，在 $\phi = 0.5\text{mm}$ 至12mm之间选择不同孔径的光栏。

## 三、转动密封钢带系统

为了使靶室和飞行时间谱仪与外探测系统相连接，在靶室主体壁侧面设计了一套转动密封钢带系统（见图的3所示）。该系统的特点是在距离靶室主体壁下端160mm处，开了一个高44mm、长1094.32mm的半圆长方形的窗，在距离这个半圆长方形的窗的四周分别为2mm、11mm和25mm处，开了三个宽度分别为8mm、14mm和8mm，深度分别为3mm、3mm和5mm的半圆形真空密封槽。其目的主要用来安装真空复合密封圈、转动密封钢带和形成真空抽气通道。

为了固定和密封钢带，设计了一个内径 $\phi = 660.3\text{mm}$ 、外径 $\phi = 712\text{mm}$ 、高186mm、长为1422.9mm的不锈钢半圆压环。在半圆压环的高度中心线上，开了一个与靶室主体壁侧面的长方形窗相对应的长方形窗。在距离

这个窗四周分别为2mm、11mm处，开了两个宽度分别为8mm和14mm，深度分别为3.5mm和3mm的真空密封槽。另外，为了减少钢带转动时的摩擦力，使其在绕轴时不打折，在距离半圆形压环两端为 $12.5^\circ$ 的中心线上，开了两个宽度为27mm、长为80mm的方形通窗，在通窗内侧铣了两个长为21mm、高为80mm、深为5mm的缺口，分别装了两个转动密封钢带的导向块。

转动密封钢带是用长2500mm、宽71mm、厚为0.6mm的合金钢制成。转动密封钢带的两表面要求 $\nabla = 8$ 的光洁度，以保证有效的真空密封和减少转动时的摩擦力。在转动密封钢带的中心处，开了一个长44mm、宽28mm的长方形口来作为连接飞行时间谱仪和外探测器的接口。当驱动马达带动轴转动时，安装在转动钢带上的飞行时间谱仪或外探测器随同钢带一起在真空状态下同步转动。转动范围是以束流的出射方向为零度，在 $+143.5^\circ$ 至 $-46.5^\circ$ 间密封转动。

在靶室主体壁和半圆压环相对应的长方形半圆窗四周的第一道真空密封槽内装了一个厚度为3.5mm的聚四氟乙烯—橡胶复合密封圈。为了防止实验中转动密封钢带的漏气现象，在靶室主体壁和半圆形压环的长方形窗的聚四氟乙烯—橡胶复合密封圈的最外面的第三道密封槽内，装了一个 $\phi = 7\text{mm}$ 的橡胶密封圈，这样在聚四氟乙烯—橡胶密封圈和 $\phi = 7\text{mm}$ 橡胶密封圈之间形成一个真空密封区。在这一区域内，靶室主体壁和半圆压环上有二个宽14mm、深3mm的对应槽，从而形成一个抽气通道。如果在转动钢带因密封不好有微小的漏气现象时，这些漏气必将通过聚四氟乙烯—橡胶密封圈的四周漏进这一密封区，然后再通过抽气通道，由钢带密封壳上的抽气口把漏气全部抽掉，以保证实验的顺利进行。实验证明，钢带在密封转动时，工作正常。

## 四、三维测量系统

三维测量系统是一种出平面测量装置,它为三体发射测量提供实验手段。该装置包括靶室球盖的三维测量和靶室内的三维测量装置。靶室球形盖的三维测量是把靶室顶盖做成一个 $R = 337\text{mm}$ 的球形盖。该系统的特点是,在球形盖和靶心呈 $45^\circ$ 的球形盖锥线上,开了8个均匀分布的 $\phi = 110\text{mm}$ 的探测窗,每个窗之间相隔 $45^\circ$ ,在这些窗内可安装8个测量探头,既可做出平面角分布测量,也可做三体测量、 $\gamma$ 和中子多重性测量。靶室球形盖和靶室主体壁之间用 $\phi = 10\text{mm}$ 的真空密封圈密封。在密封圈外面,即靶室主体壁和球形盖相对应的位置上开了两道V形槽,槽内装有 $\phi = 5\text{mm}$ 的滚珠,用来支撑球形盖和靶室处于真空状态时大气对球形盖产生的压力,这样便可减小密封圈和球形盖之间因转动而产生的摩擦力,同时又能使球形盖转动定位。在球形盖外缘有涡轮,靶室主体壁侧面装有相应的涡轮配合,当转动涡轮时,就带动球形盖在 $0^\circ - 360^\circ$ 间密封转动。

靶室内的三维探测装置是把一个内径 $\phi = 520\text{mm}$ ,  $194^\circ$ 的半圆形有滑动轨道的黄铜环和一个半径 $R = 260\text{mm}$ ,  $97^\circ$ 的扇形空心涡轮装在黄铜环的滑动轨道内,使其 $97^\circ$ 的扇形空心涡轮环沿 $194^\circ$ 半圆黄铜环走动时定向和确定方位。把装有 $97^\circ$ 扇形空心涡轮环的 $194^\circ$ 黄铜环装在一个外径 $\phi = 580\text{mm}$ 、内径 $\phi = 520\text{mm}$ 、厚为 $12\text{mm}$ 的黄铜锥齿环上。在 $194^\circ$ 半圆黄铜环的中心位置上,装了一个涡轮套锥齿轮的复合齿轮。这个复合齿轮的涡轮杆部分与 $97^\circ$ 扇形空心涡轮相啮合,而锥齿部分则与一个具有密封转动的锥齿轮相配合。

这个密封转动锥齿轮装在球形盖顶部的一个 $\phi = 72\text{mm}$ , 厚 $64\text{mm}$ 的黄铜转块上,其下面装有轴承机构与球形盖间形成转动密封,黄铜转块上还有两根黄铜杆。这两根黄铜杆与 $194^\circ$ 半圆黄铜环密封连接,起着它们

之间能同步转动,而与球形盖独立转动的作用。当密封转动的锥齿轮转动时,就带动涡轮杆套锥齿轮的复合齿轮转动,同时涡轮杆又带动 $97^\circ$ 扇形空心涡轮沿半圆黄铜环的轨道作以束流线为标准面的 $-7^\circ$ 至 $90^\circ$ 间的运动。当安装扇形空心涡轮环内侧与束流线同心位置上的探测器达到 $90^\circ$ 时,就需将安装在靶室主体壁的主动锥齿轮上的黄铜锥齿环转动 $180^\circ$ ,然后又让黄铜圆块上的锥齿轮回转,探头就可从 $90^\circ$ 转到 $187^\circ$ ,这样就完成了三维测量中的 $\theta$ 角转动。由于黄铜锥齿环放在一个水平支撑环上,在它们的接触面上开有相对应的V形槽,槽内装有 $\phi = 5\text{mm}$ 的滚珠,它既可以使锥齿环灵活转动,又可精确定位,使锥齿环的中心与靶心同轴,锥齿环的转动范围是 $0^\circ - 360^\circ$ ,这样就完成了三维测量中的 $\phi$ 角转动。三维测量的探头与靶心的距离为 $180\text{mm}$ ,沿靶心有 $120\text{mm}$ 的伸缩范围,以满足测量时探测器对靶心所张的立体角。这样,三维探头就可在球面上半球空间区域内的任何位置上运动。因此,与平面二维探头联合起来就可做三体发射的符合测量。

## 五、两维探测系统

所谓两维探测系统就是 $x$ 、 $y$ 平面内的测量。在两维探测系统中,除前面谈到的转动密封钢带上的外探测系统外,在靶室内还装有两个独立改变角度的测量装置,见图第5部分。其中的一个装置是在靶室底盘的中心轴上装了一个 $\phi = 500\text{mm}$ 、厚 $8\text{mm}$ 的不锈钢圆盘,圆盘和中心轴间有V形槽,槽内装有滚珠支撑圆盘,因此保证了转动时的同轴度,同时也减少了摩擦。圆盘上装有三个对准靶心支架的探头,其夹角为 $120^\circ$ 。圆盘的下面装有直齿轮环,与一个密封转动的直齿轮相啮合。当在靶室外侧旋转这个密封转动的直齿轮时,直齿轮环就带动圆盘作 $0^\circ$ 至 $360^\circ$ 的转动,以满足角分布测量。

另一个两维测量装置是在第一个二维测

量装置的上面装了一个结构相同的转动臂，在转动臂的末端有直齿轮与支撑在靶室主体壁内的一个内径 $\phi = 520\text{mm}$ 的内直齿上的黄铜复合齿轮环的直齿相结合。在转动臂上装了一个探头支架和探头。在靶室主体壁侧面又装了一个密封转动的锥齿轮。它与复合齿轮环的锥齿相啮合，当转动这个锥齿轮时，就带动复合齿轮环和转动臂一起做 $0^\circ$ 至 $360^\circ$ 的转动。装在二维测量装置上的探头都可以通过探头支架上的调节螺杆来调节探头的径向距离和垂直移动距离。这样既可改变探头对靶心所张的立体角，又可调节探头对准靶心。探头内可装半导体E探测器、 $\Delta E$ 薄片探测器和相应的光栏系统，进行E— $\Delta E$ 符合测量。因为转动圆盘和转动臂是独立转动的，所以可以进行xy平面内重离子反应出射道的两体符合测量、角分布测量和其它有关的测量。

## 六、靶室主体及其附件

这部分包括靶室底盘、靶室主体壁、靶架、刻度环和法拉弟筒，见图第6部分。

靶室底盘是由一个外径 $\phi = 720\text{mm}$ 、内径 $\phi = 440\text{mm}$ 、厚为 $50\text{mm}$ 的不锈钢靶室底盘支撑环及其它部件组成。支撑环的外沿上有一内径 $\phi = 682\text{mm}$ 、深为 $16\text{mm}$ 的台阶。在该台阶上装有一内径 $\phi = 682\text{mm}$ 、外径 $\phi = 720\text{mm}$ 、高 $16\text{mm}$ 的钢圈，钢圈上面又装了一相同尺寸的固定钢环。中间的钢圈上下有轴承机构，使其加负荷后能灵活转动。同时，在钢圈上又装了一块 $250 \times 240\text{mm}^2$ 的钢板，其用途是安装和支撑转动密封钢带上的外探测器和飞行时间谱仪。这样，当转动密封钢带转动时，外探测装置就随其转动。在靶室底盘支撑环的内侧有一安装相应尺寸的不锈钢靶室底盘的台阶，此外在这个不锈钢靶室底盘的中心位置上有一个用于安装靶支架和二维探测系统的台阶。为了在靶室内安装其实验设备，在距离靶室底盘中心 $R = 180\text{mm}$ 的圆上，开了

八个均匀分布的窗。

靶室主体壁是一个内径 $\phi = 600\text{mm}$ ，外径 $\phi = 660\text{mm}$ 、高为 $300\text{mm}$ 的不锈钢圆筒。除了前面所谈的用途之外，还在靶室主体壁侧面与半圆长方形窗相对应的位置上开了三个相隔 $37^\circ$ 的 $\phi = 110\text{mm}$ 圆窗。其中第一个窗是束流的入口窗，用来安装束流准直系统和降能系统，而第三个窗是用来安装真空系统。为了满足束流和外探测系统角度范围的要求，它们可以互换。

靶架由两个装在有轴承支撑的支座上的同心真空密封轴组成。外同心轴管可以和靶支座密封转动，转动范围 $0^\circ - 360^\circ$ 。内同心轴管上端装有一个与靶架上的直齿条相啮合的小直齿轮。当这个直齿轮密封转动时，直齿条将带动靶架平移，靶架与靶框之间用绝缘材料连接。这样，可在靶框上加负高压，从而抑制束流打在靶子上产生的次级电子发射到靶室内，影响测量精度。靶框上可装五块靶子，当靶架平移时，五块靶子中的任何一块将对准束流。通过密封转动外同心轴，靶子和束流之间可呈任意角度。这样就可减少换靶时破坏真空度、缩短供束时间，提高实验效率。

刻度环是为统一标定靶室内各个探头与束流靶心之间所处的角度位置而设计的。环上面刻有角度标定线，最小标定角度为 $0.2^\circ$ ，刻度环上的槽是为安装角度自动显示而装置的。在刻度环上不影响角分布测量的位置上，装了两个相对应的束流监测探头，主要用来监测束流能量和强度。

法拉弟筒装在靶室内与束流入射窗相对应的靶室主体壁的另一侧。它由一个支撑杆与靶室主体壁侧面的密封转动杆绝缘垂直连接，其轴心对准束流线。法拉弟筒由束流接收器、绝缘环和次级电子抑制环组成。当探头转到零度位置时，转动密封轴把可使法拉弟筒偏离零度角，这样探头就可测量到零度角附近的核反应产物。

## 七、双受力高真空隔断阀门

隔断阀门是为把靶室和转动密封钢带上的外探测系统隔开而设计的。它是一种插板式双受力高真空阀门。阀体是由两块楔形阀板中间有定向滑动滚珠组成。当阀板进到与密封窗口相对应的位置上时，密封窗口上的阀板将不再向里移动，而对应的另一块阀板继续向前移动。这样，两块阀门将向两侧膨胀，使阀板与密封窗口上的密封圈接触并被压缩，达到高真空密封和隔断系统的作用。其特点是结构非常简单，易加工，无论大气从哪一个方向压阀板，阀板都不会漏气，所以阀门密封性能可靠。

## 八、可调方光栏

可调方光栏是为限制束流截面和外探测器对靶子所张的立体角而设计的。它是由一个厚为15mm、宽为140mm、长为150mm的方形光栏外壳和装在光栏调节螺杆和导向杆上的光栏调节滑块及两对光栏组成。对两对光栏的共同调节可形成所需要的正方形或长方形光栏面积。光栏的x或y方向的距离调节是通过一根具有正反方向的螺纹来完成。当旋转真空密封的调节螺杆时，光栏之间的距离通过螺杆上的正反两种螺纹转动，使其扩大或缩小，直至完全闭合。由螺旋测位器给出光栏距离的读数。可调方光栏的最大调节距离，在xy两个方向均为50mm。

## 九、真空系统和靶室支架

这台靶室的真空系统是由一台450升/秒的涡轮分子泵、一台4升/秒的机械真空泵和一个液氮冷阱组成。冷阱内不加液氮时，真

空度可达 $1.8 \times 10^{-5}$ 托，而加液氮后，靶室的真空度可达 $3 \times 10^{-6}$ 托。液氮冷阱的主要用途是为了隔油，防止涡轮分子泵和机械泵中的油类扩散到靶中。

为了节省实验时调束时间，减少调束人员调束时的剂量辐照，我们设计了一个多自由度的可调靶室支架。它有四个轮子可以将靶室推走，当被推到预定位置附近时，通过四根支撑柱将靶室升到所需要的高度。这时四个轮被悬空，通过四个定位座将靶室固定在地面上，然后由靶室支架上的调节机构，使靶室在x、y方向沿轨道移动，最大移动距离为200mm。此外，靶室还可通过靶室支架的轴承装置灵活转动。当它转到一定位置后，由定位旋把将靶室位置锁死。因此，在调束时就能很快使束流和降能系统、束流准直系统、靶心、法拉第筒调节在一条线上，达到调束的目的。

## 讨论

这台用于重离子核反应研究的三维多用途靶室经安装和调试，结果达到了原设计要求，现已作为近代物理研究所重离子分离扇回旋加速器的飞行时间谱仪终端，提供使用。如果在靶室的各个调节部件上安装自动驱动装置，将无疑会提高靶室的精度和自动化水平。这台靶室目前还有待于进一步的提高，如能制做更好，更均匀的聚四氟乙烯—橡胶复合密封圈。

这台用于重离子核反应的三维多用途靶室目前在国内还是第一台，它将为国内同行在兰州重离子分离扇回旋加速器上进行重离子核反应研究，提供必需的实验手段。

这台靶室与国外近似于同类装置作了如下比较。

类 型	用 途	内径 (mm)	外径 (mm)	钢带转动角度	钢带窗口高度 (mm)	造 价
美国 ORTEC 公司 飞行时间谱仪靶室	单用途	φ250	φ300	185°	30	10万美元
法国 ORSAY 核物 理研究所飞行时间 谱仪靶室	单用途	φ307	φ405	188°	41	/
三 维 多用途靶室	多用途	φ600	φ660	190°	44	7.476万元