

冷靶反冲离子（电子）谱仪

冷靶反冲离子（电子）谱仪一般称为 COLTRIMS，其全称是“Cold Target Recoil Ion Momentum Spectrum”，即一种以冷气体射流作为目标靶的动量探测技术。其原理是：通过记录离子和电子到达探测器的时间和位置，得到它们的初始三维动量分布，从而反推反应发生时的瞬态过程。反冲离子探测器给出反冲离子在探测器上的位置。由于我们测量了反冲离子从碰撞点到达探测器的飞行时间，再根据已知的加速电场和飞行时间谱仪的几何结构，就能够计算出反冲离子沿 X 和 Z 轴方向的动量分量。沿 Y 轴的动量分量可由反冲离子的带电量、加速电场的分布和测量到的飞行时间计算出来。这样就得到了反冲离子的三维动量矢量，从而重建反应瞬间粒子的状态。

从尺度上看，科学研究的重心在不断微观化并寻求操纵更小的物质尺度，人们总是倾向于探寻最本源的物质作用，越来越多深入到原子内部，其过程往往发生在皮秒(ps)、飞秒(fs)乃至阿秒(as)的时间量级，此时，量子效应接管了核子和电子的运动，量子波包被引入以描述微观粒子的演化。而研究这些量子态演化规律是深入认识和控制原子、分子和电子运动的基础。而冷靶反冲离子（电子）动量谱仪是探究原子及分子动力学的有力武器。其结构如图 1 所示。

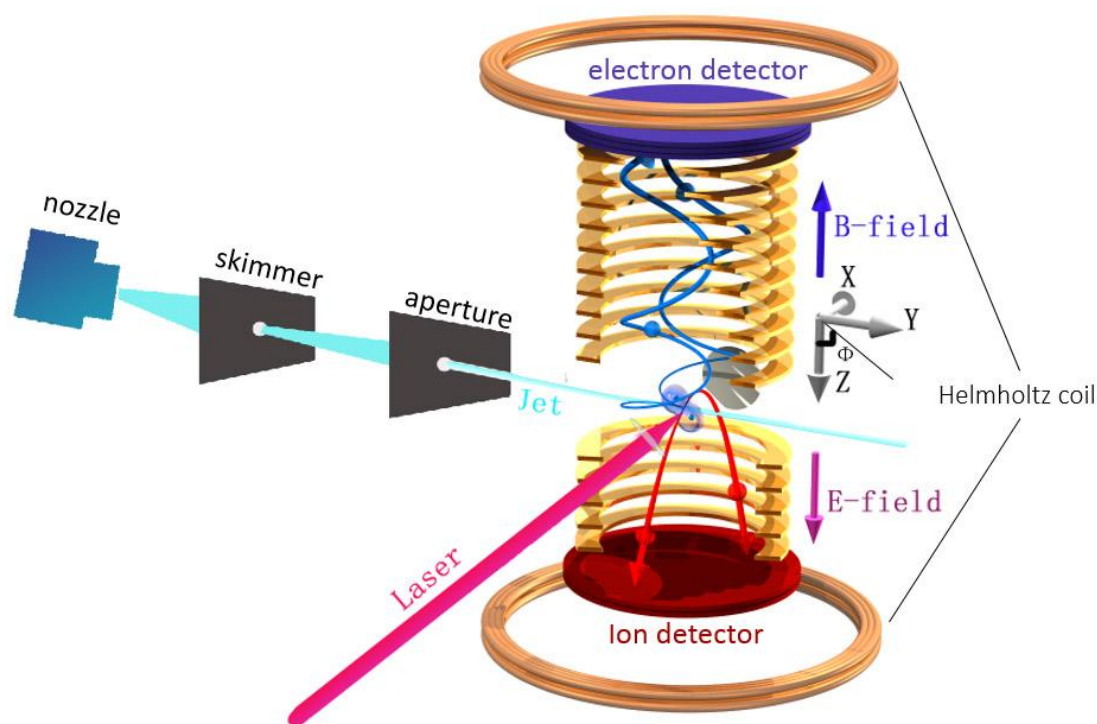


图 1 COLTRIMS 系统概览图

具体原理是：从喷嘴(nozzle)喷出的分子经 skimmer 和 aperture 准直后，将激光聚焦在射流靶上，使原子或分子在强场中产生离子和电子碎片，然后离子在电场作用下飞向一端的离子探测器，电子在电场和磁场的共同作用下飞向另一端的电子探测器。实验仪器需要记录带电粒子在探测器上的响应位置(X,Y)以及飞行时间(TOF)这三个量，这样的一组数据称为一个“事件”，在测量过程中这些事件将被逐一地记录下来。在三维坐标系中，通过记录 X、Y 坐标和 TOF 这三个可观测量即可确定在激光与物质作用瞬间产生的离子和电子的三维动量，通过电机延迟线(Delay-Line)即可得到分子波包在时域上的完整演化。

从图 1 中可以看出，分子束、激光脉冲和均匀加速电场两两相互垂直。其中，激光脉冲方向为 X 轴，分子射流方向为 Y 轴，电场方向为 Z 轴。分子束和激光脉冲之间的相互作用产生离子和电子，由于电子的质量远小于离子的质量，根据动量守恒定律，在反应瞬间，电子获得的速度远大于离子的速度。在这种情况下，对于一个相对较小的检测器，只有速度矢量在很小角度内的的电子可以被收集到检测器，其他大部分电子将飞到探测器范围之外。所以，通过在电子飞行区设置一个平行于电场的匀强磁场（来自亥姆霍兹线圈）。在电子飞行过程中将受到洛伦兹力的作用，粒子将在腔内做螺旋运动，落点约束在探测器之内。这样，在不改变探测器尺寸的情况下，将使电子采集率大大提高。此外，由于离子的质量远大于电子，故忽略磁场对离子的作用，这样离子可以视为只受静电场的作用。

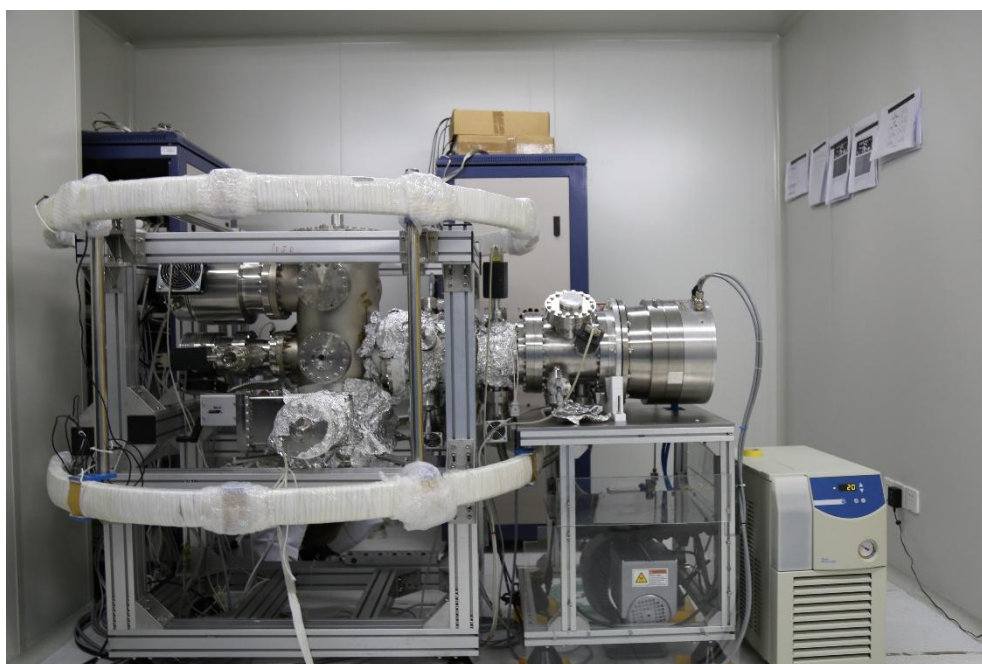


图 1 COLTRIMS 系统实物图。可在上图中观察到多级真空泵，包括一台干泵和若干台分子泵。此外，系统还包含若干台水冷机用以冷却泵体。

此外，为了避免分子热运动引起的动量涨落，需要对分子射流进行冷却，以获得更好的精度。利用超声分子束技术产生高密度的分子束靶。目标光束中的粒子具有很小的动量发散，是保证高分辨测量的关键因素之一。此外，为了维持分子在无光场下的取向强度，同时也为了减小其他分子带来的噪声和动量扰动，腔内需维持很高的真空度。根据气体的不同，主腔压强大概为 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ mbar，这对真空系统提出了很高的要求。一般情况下，我们采用“多级多泵”来维持真空度：即用一台干泵和多个分子泵串联组成真空系统，能极大地维持真空度。

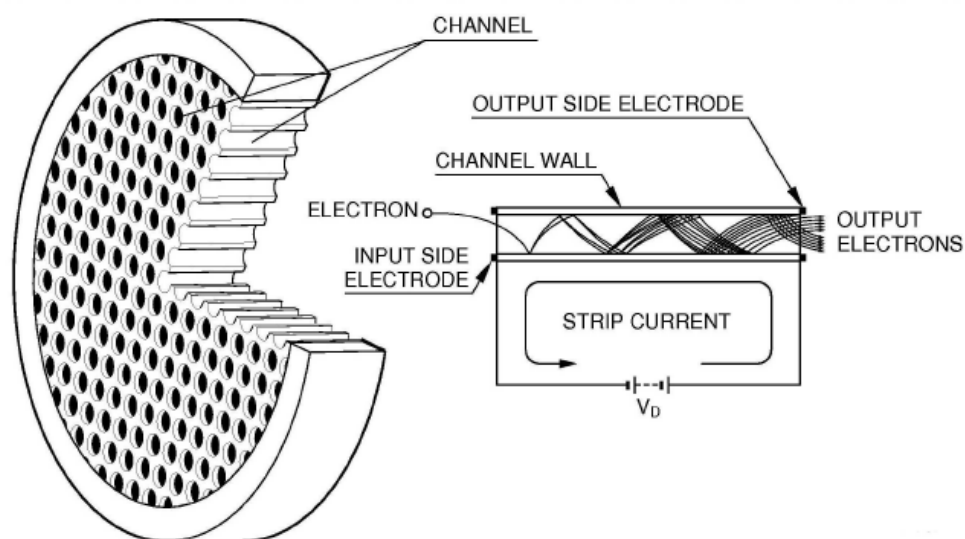


图 3 微通道板(MCP)原理图^[1]。从上表面入射的带电粒子经多次“雪崩”反应后，可在下表面形成宏观电流。

当带电粒子被探测器响应之前，要先经过微通道板(Microchannel Plate, MCP)以极大程度的放大信号强度，便于探测，其原理和实物如图 3 和图 4。微通道板相当于上百万个光电倍增管的阵列，每一通道的尺寸仅为 10 微米左右，且每个通道之间相互独立，具有很高的空间分辨率。其基本原理是：当有电子轰击到通道壁上时，会激发出很多的次级电子，之后电子又会在一个沿轴线的电场引导下继续运动，直到再一次碰到管壁激发出更多的次级电子。这种使电子数呈指数增长的现象称为“雪崩反应”，最终可使电子的增益达到 10^8 量级，由此产生宏观电流。

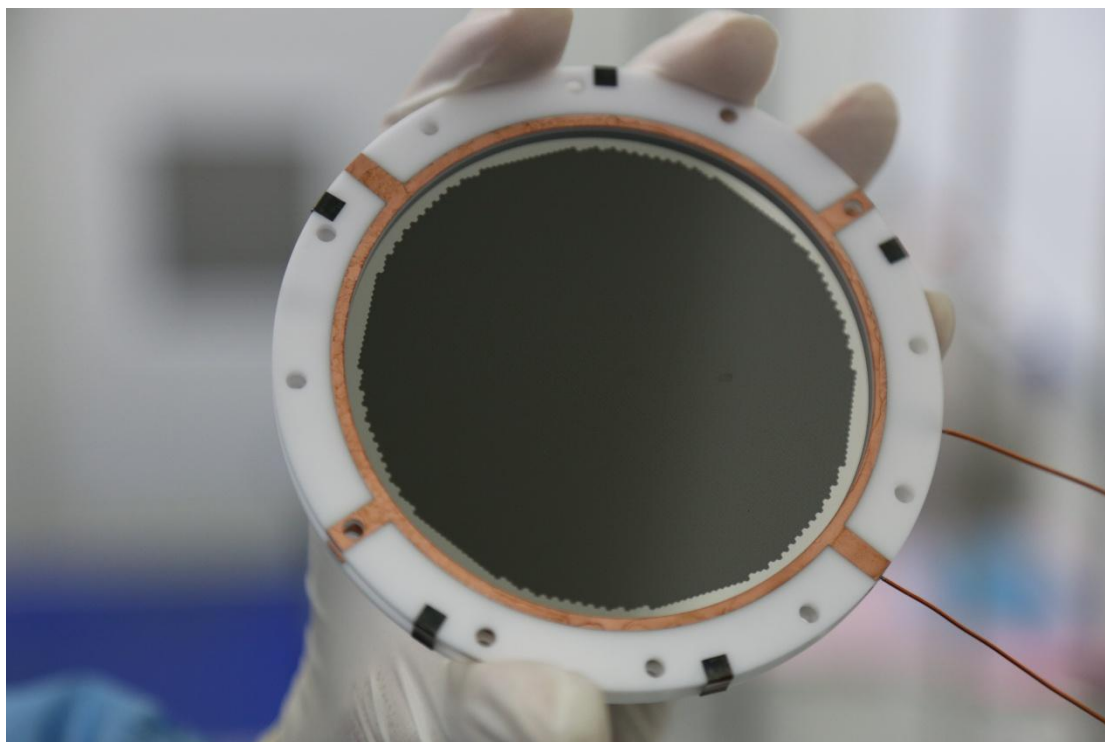


图 4 微通道板(MCP)实物图

接着宏观电流再被置于 MCP 之后的延迟线探测器感应到，记录相应的 X 和 Y 坐标和飞行时间 TOF，形成一个完整的事件。通过符合测量得到大量原始数据，处理分析后即可还原出原子内部动力学特性。

COLTRIMS 系统揭示了原子和分子反应过程中在原子尺度上的最详细动态过程，原子、分子和簇的反应都能被很详细的测量，使人们更深入地了解光与物质相互作用的规律，极大地推动了原子、分子动力学的发展。

参考文献：

[1] “MCP Assembly Selection Guide,” Tech. rep., Hamamatsu Photonics K.K., Electron Tube Center (2002).