

1 ATLAS 的子探测器

ATLAS 有几个主要的子探测器，在 Higgs 发现的过程中分别起到怎样的作用？

1.1 ATLAS 的三大子探测器系统

ATLAS，译为超环面仪器，是欧洲核子研究组织 CERN 的大型强子对撞机 LHC 上的四个主要大型国际合作实验之一。此实验专门为观测涉及高质量粒子的现象而精心设计建造；使用先前较低能量的粒子加速器无法观测到这些现象。物理学者希望此实验能为在标准模型之后关于粒子物理学的新理论找到一些线索。超环面仪器的长度为 44 米，直径为 25 米，总重量为 7000 吨，内部连接的电线长达 3000 千米。

ATLAS 探测器是由以相互作用点为中心的一系列同中心轴圆柱壳型设备及其两端的圆盘型设备所组成，主要分为四个部分：内部探测器、量能器、 μ 子探测器和磁铁系统。其中内部探测器、量能器、 μ 子探测器为主要的三大子探测器系统。各个探测器的功能相辅相成：内部探测器精确地确定粒子的轨迹，量能器测量那些被截止粒子的能量， μ 子系统则提供高度穿透性 μ 子的额外测量数据。磁铁系统所产生的磁场促使带电粒子在移动于内部探测器时发生偏转， μ 子谱仪可以从偏转的曲率测得这些粒子的动量。

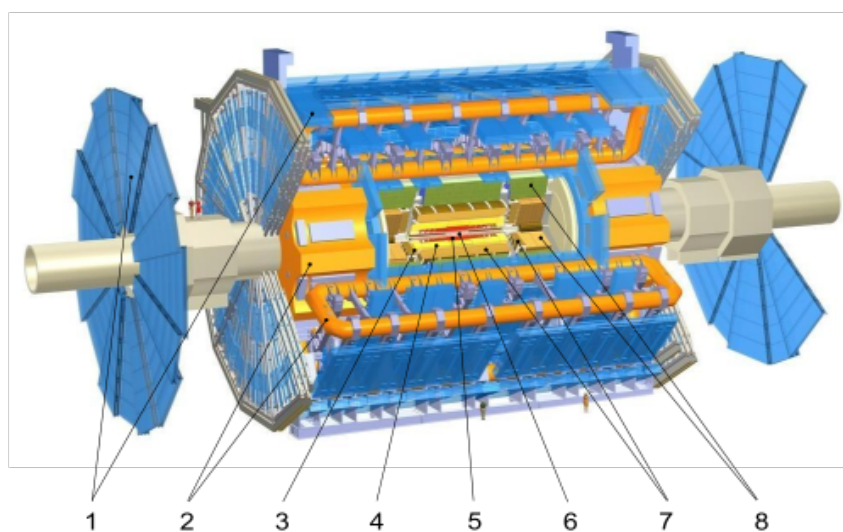


图 1: 电脑绘制的 ATLAS 探测器剖视图展示出内部各种设备：1. μ 子探测器；磁铁系统：2. 环状磁铁，3. 螺线管磁铁；内部探测器：4. 跃迁辐射跟踪器，5. 半导体跟踪器；6. 像素探测器；量能器：7. 液态氩量能器，8. 砖片量能器

1.2 内部探测器

内部探测器通过探测散射出的带电粒子与在各个不同位置的材料的相互作用，可以跟踪这些粒子的运动，所获得的数据能够揭示粒子的种类及其动量方面的细节信息。由

于内部探测器沉浸于 2T 磁场，移动于其空间的带电粒子会发生偏转，其方向显示了带电粒子的电性，其角度则显示了粒子的动量大小。根据轨迹的起点可以给粒子身份确认提供有用的信息。在希格斯粒子发现中，内部探测器首先捕捉到四个带电轻子从对撞点飞出的轨迹，精确测量它们的飞行方向和动量。该器件有三个部分：

- **像素探测器：**像素探测器是该探测器最里面的部分，对于每个粒子轨迹可以给出三个精确位置。每个模块包含 16 个用于读出数据的芯片和其他相关电子元件，含有 47268 像素，专门设计用来在相互作用点附近精确跟踪粒子。该探测器的每一个元件都必须进行强化，从而能够抵抗核辐射，在接受大量辐射之后还能保持正常工作。
- **半导体跟踪器：**半导体跟踪器是内部探测器的中间部分，对于每个粒子轨迹它可以给出至少四个精确位置。半导体跟踪器的最小单位的形状是窄长微条，其测量粒子的范围比像素探测器更大，具有更多的采样点，大致相等的精确度，对于基本跟踪散射粒子在垂直于粒子束的平面的运动，它是内部探测器的最关键仪器。
- **跃迁辐射跟踪器：**跃迁辐射跟踪器是内部探测器的最外面部分，是由麦管跟踪器和跃迁辐射探测器共同结合而成的仪器。跃迁辐射跟踪器主要有两个功能：第一是准确地跟踪带电粒子，第二是正确地辨识电子。

1.3 量能器

设置量能器的目的是通过吸收粒子来测量它们的能量。这里有两种基本的量能系统：靠里的是“电磁量能器”，靠外的是“强子量能器”，二者都属于“采样式量能器”。在采样式量能器里，吸收粒子能量产生粒子簇射的材料与测量簇射能量的材料不同，并且隔开在不同的区域，可以选择最具指定功能的材料，吸收不同类型的粒子。电磁量能器从涉及电磁作用的粒子中吸收能量，这包括了带电粒子和光子。那些能够穿透电磁量能器，但会受到强作用力的粒子，强子量能器会吸收它们的能量。在希格斯粒子发现中，量能器测量电子沉积的全部能量，帮助确认这些粒子是不是电子。

1.4 μ 子谱仪

μ 子谱仪是一个体积极大的轨迹跟踪系统，专门探测和测量 μ 子，具有单纯识别 μ 子的功能。 μ 子谱仪也是个触发器，能够按照简单判据快速地决定，哪些事件比较有价值，应该被记录下来，哪些事件与实验目标无关，应该被忽略。在希格斯粒子发现中， μ 子谱仪专门捕捉穿透出来的 μ 子，确认这些粒子是不是 μ 子。

2 ATLAS 径迹探测器的工作

ATLAS 径迹探测器是如何工作的？空间分辨精度能达到多少？

2.1 工作原理

ATLAS 径迹探测器的核心物理任务是精确测定带电粒子的三维径迹，并基于径迹在磁场中的偏转特性测量粒子动量。其工作流程可分为信号产生、空间坐标读出与径迹重建三个阶段。

(1) 信号产生

径迹探测器采用高阻硅半导体作为灵敏介质。带电粒子穿越硅灵敏层时，通过库仑相互作用使硅原子发生电离，沉积能量并激发产生电子-空穴对。在 $300\text{ }\mu\text{m}$ 厚的硅传感器中，最小电离粒子平均沉积约 3.9 fC 的电荷量。传感器两侧施加反向偏置电压，形成强耗尽区。电离产生的电子和空穴在电场作用下分别向 N^+ 电极和 P^+ 电极漂移，在电极上感应出瞬态电流脉冲，该脉冲经前端读出芯片放大、整形后，与预先设定的甄别阈值进行比较，若超过阈值则标记为一个“击中”。

(2) 空间坐标读出

对于像素探测器，电极呈二维矩阵排列。粒子击中某个像素单元，直接输出该单元的地址，即同时提供二维坐标。对于硅微条探测器，电极呈一维长条形阵列。单面微条仅能提供垂直于条方向的一维坐标。为了获取第二维坐标，半导体径迹探测器采用双面立体结构，在硅片的正反面分别制作微条，且正反面的微条之间存在一个固定的立体夹角。粒子穿过硅片时，正反面各产生一个一维击中坐标。将这两个坐标值代入已知的立体角几何关系中，通过三角几何解算，即可反推粒子在该硅片平面上的精确二维位置。

(3) 径迹重建

整个径迹探测器置于一个沿束流方向的 2 T 超导螺线管磁场中。带电粒子在磁场中受到洛伦兹力，其运动轨迹在垂直于磁场的横向平面内投影为一段圆弧，在纵向保持匀速直线运动，整体呈螺旋线形态。

探测器各层级记录的离散击中点通过卡尔曼滤波等模式识别算法连接成连续的径迹线段。对于重建出的径迹圆弧，通过拟合圆弧曲率 ρ ，依据横向动量公式 $p_T = 0.3 \cdot B \cdot \rho$ ，其中 p_T 单位 GeV/c ， B 单位特斯拉， ρ 单位米，即可反推粒子的横向动量。径迹在磁场中的偏转幅度与 $1/p_T$ 成正比，因此探测器对击中点的测量误差直接决定了动量分辨率的优劣。

2.2 空间分辨精度

空间分辨率定义为探测器能够区分两个最邻近击中点的最小距离，通常用单点位置测量误差表示。ATLAS 内部探测器通过内插法与二进制编码共同提升精度，具体数值与几何构型密切相关。

（1）像素探测器精度

像素探测器是紧贴束流交汇点的最内层探测器，面临极高的粒子通量。为实现极限精度，其采用硅半导体像素阵列，拥有超 9200 万个读出通道。其标准像素尺寸仅为 50×400 微米，最内层插入层更小至 50×250 微米。得益于极高的几何粒度，像素探测器在横向，即 $R-\varphi$ 方向的空间分辨精度达到了惊人的 10 至 12 微米，在纵向，即 z 方向的分辨精度约为 110 至 115 微米。它在最靠近对撞点的位置为粒子轨迹提供了最精确的三维坐标“锚点”。

（2）半导体微条探测器精度

半导体微条探测器包裹在像素探测器外围，在扩大探测面积的同时保持了高精度的坐标测量。考虑到读出通道的限制，其采用硅微条替代像素阵列。其传感器微条间距为 80 微米，整体分布有超 600 万个读出通道。在空间分辨精度上，利用双面微条交错排列的设计，在横向，即 $R-\varphi$ 方向能够实现约 16 至 17 微米的高分辨精度，纵向，即 z 方向分辨精度则约为 580 微米。每个粒子通常会穿过至少四层半导体微条探测器层，极大提升了径迹拟合的准确度。

（3）跃迁辐射径迹探测器精度

跃迁辐射径迹探测器构成径迹系统的最外层，由约 30 万根直径为 4 毫米的充气漂移管组成。相较于内层硅探测器，其虽然在单点空间分辨精度上稍逊，约为 170 微米，但其优势在于能为每条粒子轨迹提供多达约 30 个连续的空间测量点。这极大地延长了动量测量的杠杆臂。此外，通过捕获超相对论粒子产生的跃迁辐射光子，它在提供轨迹空间坐标的同时，还实现了对电子与强子的高效鉴别。

3 硅微条径迹探测器的二维平面分辨

硅微条径迹探测器如何实现二维平面的分辨？

硅微条探测器本质上属于一维位置灵敏器件。要实现二维平面分辨，不能仅靠单面电极结构，必须借助几何构型上的特殊设计。ATLAS 硅微条探测器采用双面立体角读出方案实现二维分辨。

3.1 单面微条探测器的限制

单面硅微条探测器通常由一块半导体硅衬底和其表面单侧注入的平行高掺杂微条阵列组成。当高能带电粒子穿过硅体时，会发生电离并激发出电子-空穴对。在偏置电压产生的电场作用下，电荷载流子向微条漂移并被前端电子学系统读取。然而，由于微条仅沿单一方向平行排列，这种几何结构只能确定垂直于微条方向的一个坐标，从而只能提供一维的空间位置测量。

为了获得二维信息，早期或传统的做法是将两块单面探测器背靠背放置并呈一定角度交叠。但这种方法存在显著的局限性：首先，它使探测器的物理厚度翻倍，增加了“物质预算”，从而导致粒子发生多次库仑散射和光子转换的概率上升，显著降低了精密测量的精度；其次，在粒子径迹密度较高的实验环境中，将两个独立的单面层信号组合极易产生由于坐标匹配错误而导致的“鬼点”或重建歧义；最后，双倍的硅片和电子学通道也意味着系统需要面对更复杂的机械支撑与冷却负担。

3.2 双面传感器技术

为了在不增加物质预算的前提下突破一维限制，现代精密谱仪，如国际空间站上的阿尔法磁谱仪，AMS-02 的核心径迹探测器采用了双面硅微条探测器技术。在双面结构中，约 300 微米厚的硅晶片正面和背面均注入了高掺杂的微条阵列。

实现二维分辨的核心机制在于，背面的微条与正面的微条呈正交物理排列。当带电粒子穿透这块单一的硅晶片时，沿其运动轨迹产生的电子-空穴对在全耗尽区的高压电场下发生分离：空穴向 p 面漂移，电子向 n 面漂移。由于正反两面的电荷信号均源自同一个粒子的同一次穿透电离事件，正交的两组微条能够同时收集并读出信号。通过将 p 面微条记录的命中位置与 n 面微条记录的命中位置在时间与电荷量上进行关联与匹配，探测器即可精确定位粒子穿透硅片的二维平面坐标。

在 AMS-02 的硅微条径迹探测器中，这种双面正交微条设计使其在磁偏转面实现了约 10 微米的极高空间分辨率，在非偏转面也达到了约 30 微米的分辨率。

3.3 总结

综上所述，传统的单面硅微条探测器受限于单向微条排布，仅能提供一维的单一坐标位置，且通过物理堆叠实现二维测量的替代方案会引入严重的散射误差和多粒子径迹重建歧义。而以 AMS 为代表的硅微条径迹探测器，通过巧妙的“双面正交微条 (DSSSD)” 半导体加工工艺，在一块硅片上同时获取由同一次电离事件激发的电子与空穴电荷信号，从而独立且同时提取两个相互垂直方向的坐标。这一机制不仅从物理底层完美实现了高精度的二维空间分辨，从根本上消除了单面拼接的歧义，还最大限度地降低了探测器的物质厚度。