

Q1: 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？

一、ATLAS 五大核心子探测器

内径迹探测器 Inner Detector (ID, 升级后为 ITk 全硅径迹探测器)

由像素探测器 Pixel、硅微条 SCT、跃迁辐射探测器 TRT 三层组成，浸泡在 2T 轴向螺线管磁场中。

电磁量能器 Electromagnetic Calorimeter (LAr ECAL)

强子量能器 Hadronic Calorimeter (Tile HCAL)

μ 子谱仪 Muon Spectrometer (端盖 / 桶部 μ 子探测器 + 环形磁铁系统)

磁铁系统 Magnet System (螺线管 + 桶 / 端盖环形磁铁，为径迹、 μ 子测量提供磁场)

二、各子探测器在希格斯 (125GeV) 发现三大衰变道的核心作用

希格斯发现最关键三条衰变道： $H \rightarrow \gamma\gamma$ (双光子)、 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ (四轻子黄金道)、 $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ ，各子探测器分工如下：

内径迹探测器 (ID/ITk)

带电粒子轨迹重建：精确追踪电子、 μ 子、 τ 轻子、夸克喷注的径迹，通过磁场偏转曲率计算粒子动量；

顶点重建：区分**对撞初级顶点**与粒子次级衰变顶点，压制堆积事例 (PU) 本底；

粒子鉴别：TRT 通过跃迁辐射区分电子 / 强子；像素超高精度标记 b 夸克、 τ 轻子；

四轻子道核心：精准重建 4 个轻子 (e/μ) 完整轨迹，拟合不变质量，是确认希格斯信号的关键内层探测设备。

电磁量能器 ECAL

探测 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 双光子衰变：光子不带电，无内层径迹，全部能量沉积在 ECAL，高精度测量光子能量、位置，计算双光子不变质量 (125GeV 信号峰的唯一能量来源)；

测量电子能量：电子会在 ECAL 完全簇射，配合内径迹实现电子能量 - 动量匹配，筛选 ZZ/WW 衰变的电子。

强子量能器 HCAL

捕获夸克 / 胶子形成的强子喷注能量，用于矢量玻色子融合 (VBF) 希格斯产生道的双喷注筛选；

计算丢失横能量 E_T^{miss} ：中微子不产生信号，通过总横向能量缺失反推，用于 $H \rightarrow WW^*$ 含中微子的衰变事例筛选。

μ 子谱仪 Muon Spectrometer

μ 子穿透量能器，仅在最外层 μ 子室留下信号；结合内层径迹的动量，双重精确测量 μ 子动量；

四轻子道关键：识别并测量 $Z \rightarrow \mu\mu$ 的缪子，是四轻子不变质量重建必不可少的外层探测；

磁铁系统

内层螺线管：让内径迹中带电粒子偏转，由轨迹曲率求动量；

外层环形磁铁：为 μ 子谱仪提供大积分磁场，大幅提升 μ 子动量分辨，压低本底误判。

Q2: ATLAS 径迹探测器是如何工作的？空间分辨精度能达到多少？

1. 工作原理

ATLAS 径迹探测器分为传统 ID (Pixel+SCT+TRT) 和高亮度升级 ITk 全硅径迹探测器 (仅 Pixel + 硅微条，移除 TRT)，核心探测原理均为硅半导体电离信号收集：

(1) 硅传感器本征机制：带电粒子穿过耗尽层硅片，电离产生大量电子 - 空穴对；外加反向偏压后，载流子快速漂移到读出电极 (像素 / 硅微条)，前端 ASIC 芯片收集、放大电荷信号。

(2) 磁场偏转测动量：整个径迹区处于 2T 螺线管轴向磁场，带电粒子轨迹发生圆弧偏转；通过多层硅探测器的击中坐标拟合径迹圆弧半径，计算粒子动量。

(3) 多层交叉重建：粒子会穿过多层硅传感器，每层记录一个空间击中 (hit)；将多层 hit 连接成完整粒子径迹，实现：

- 1.初级 / 次级衰变顶点定位;
- 2.区分堆积事例、过滤假径迹;
- 3.电子、 μ 子、 τ 、 b 夸克粒子鉴别。

(4) ITk 升级改进: 移除 TRT, 全部替换为硅像素 + 硅微条, 9 层以上硅探测层覆盖 $|\eta| < 4$, 材料更少、抗辐照更强、读出通道从 1 亿提升至 50 亿, 适配 HL-LHC 每束团 200 次堆积对撞环境。

2. 空间分辨精度

像素探测器 Pixel (内层)

单像素位置分辨: $\sim 10\ \mu\text{m}$, 最靠近束流, 顶点测量精度最高; 升级 ITk 像素进一步缩小像素尺寸, 分辨小幅提升。

硅微条探测器 SCT/ITk Strip (外层)

ITk 桶部硅微条模块空间分辨率: $25\ \mu\text{m}$ (PPT17 明确给出指标); 传统 SCT 单条分辨约 $25\sim 30\ \mu\text{m}$ 。

补充对比: 已淘汰的 TRT 仅提供毫米级粗分辨, 因此 HL-LHC 升级 ITk 全部改用高精度硅探测器。

Q3: 硅微条径迹探测器如何实现二维平面的分辨?

单独一层硅微条仅能获得一维坐标 (沿微条垂直方向), ATLAS ITk 采用斜置双模块 (Inclined Duals) 双面 / 双层斜交布局实现二维位置分辨

1. 核心结构: 双层微条小角度斜交

单个完整硅微条探测单元由上下两片硅传感器组成, 两层读出微条不垂直、而是呈微小夹角 (传统 SCT $40\ \text{mrad}$, ITk 升级为 $52\ \text{mrad}$) 斜向交叉排布:

第一层微条读出: 测量 ϕ 方位角方向 (径向垂直一维坐标);

第二层斜置微条读出: 测量 z 束流方向 (纵向一维坐标);

两个维度信号联立, 唯一确定粒子在硅平面内的 (z, ϕ) 二维入射坐标。

2. 解决“幽灵击中 (ghost hit)”问题

若两层微条完全垂直, 多粒子同时击中会产生 4 个信号, 存在 2 组交叉坐标无法区分真实入射点 (幽灵事例);

采用小角度斜置交叉后, 两组一维条的交叉位置唯一, 彻底消除位置歧义, 精

准还原二维撞击点。

3. 桶部 + 端盖全局二维覆盖

(1) 桶部 Barrel: 圆柱形同心四层斜置双微条模块, 沿 z 轴长条形排布, 完整覆盖中心区 $|\eta| < 2.7$;

(2) 端盖 End-cap: 梯形斜置微条圆盘, 多层堆叠覆盖高赓快速向前区域, 和桶部拼接实现 $|\eta| < 4$ 全覆盖;

(3) 模块组装: 每块硅微条模块集成传感器、读出 ASIC、混合板 Hybrid, 中国高能所等单位承担全球 50% 桶部微条模块制造, 模块组装后拼接成完整桶板 Stave, 最终安装到 ITk 碳筒支撑结构上, 构成完整二维径迹探测系统。

4. 读出匹配二维坐标

每层微条独立输出通道电荷信号, 后端电子学同步采集两层击中通道编号, 通过几何几何映射算法, 把两组一维条编号换算为粒子在硅平面的精确二维坐标, 结合多层 hit 完成三维径迹重建。