

Introduction of High Energy Physics Detector

Xingchen Li

Jilin University

Institute of High Energy Physics, CAS



- LHC的目标
- 如何寻找希格斯玻色子
- 为什么是半导体
- 下一步是什么
- 我们能做什么



LHC的目标

- 外尔 (Weyl) , 泡利 (Pauli) → 局域规范对称性
- 杨振宁, 米尔斯 (Mills) → 非阿贝尔规范理论
- 格拉肖 (Glashow) (谢耳朵原型) 等人 → W/Z是新的规范玻色子
- 规范对称性要求规范玻色子是无质量的
- 自发对称性破缺被引入粒子物理学中
- 希格斯 (Higgs) 等人 → Higgs机制

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}D\psi + h.c. \\ & + \boxed{\bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi} + h.c. \\ & + \boxed{|D_\mu \phi|^2} - \boxed{V(\phi)}\end{aligned}$$

Mass for Fermions

Mass for Bosons

Higgs self-interactions

Introduction to Elementary Particles (David Jeffrey Griffiths)

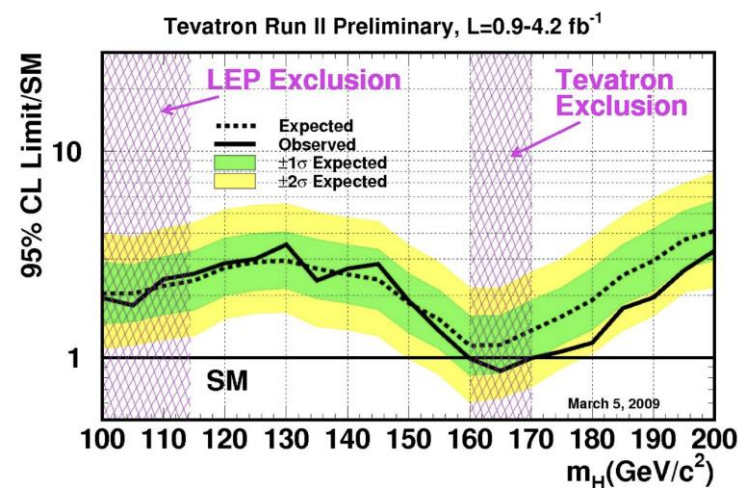


- 电弱精确测量给出标准模型希格斯玻色子质量预测为 95_{-23}^{+30} GeV
- LEP实验及Tevatron实验均未发现希格斯玻色子

**Search for
Higgs Boson!**



LHC概述图



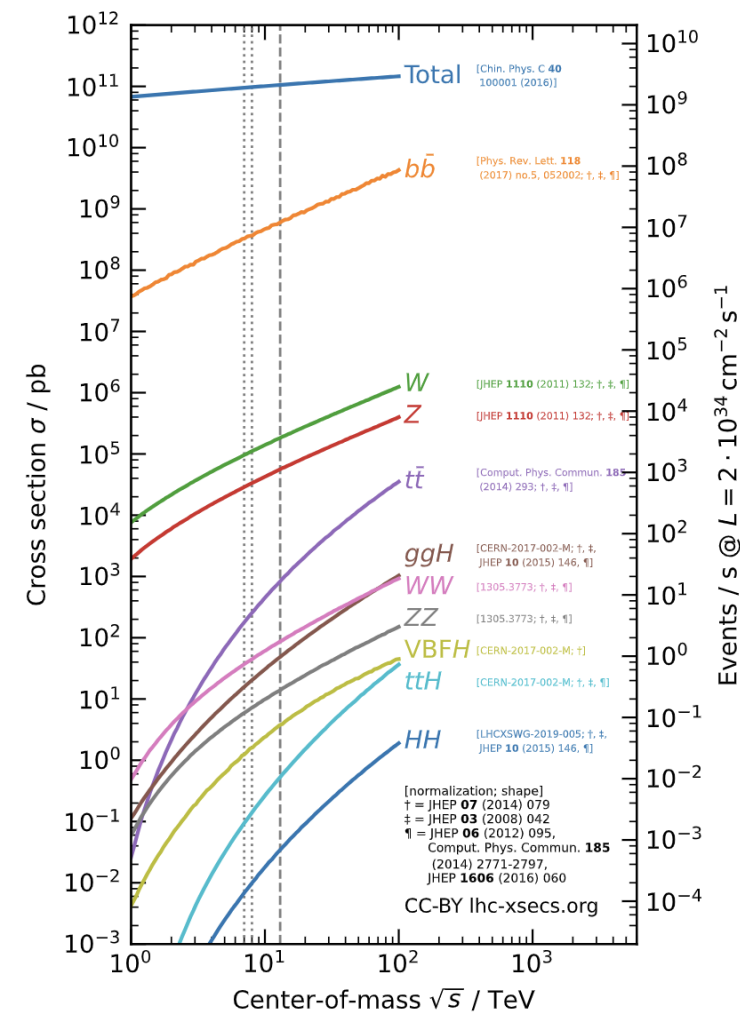
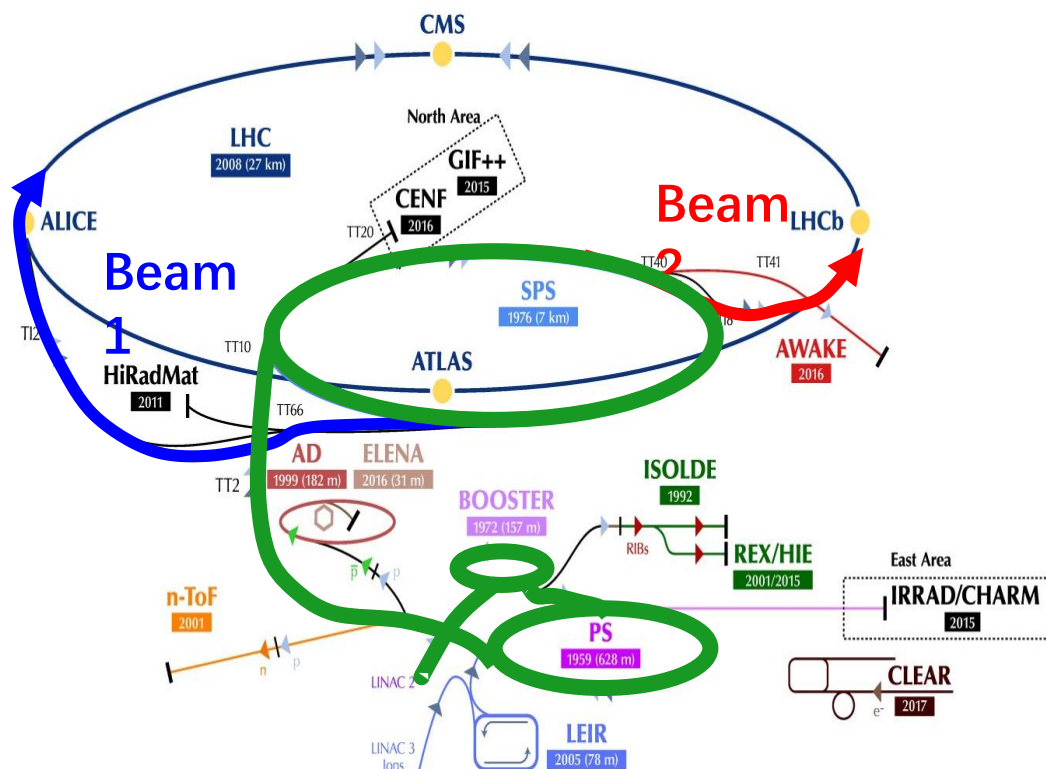
LHC之前对撞机实验排除的Higgs质量范围

如何寻找希格斯玻色子

如何“制造”希格斯玻色子



- $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E})$
- $E = mc^2$



PP对撞产生不同粒子的截面



希格斯玻色子平均寿命约在 $1\text{e-}22$ 秒的量级，低于人类当前的时间测量精度（ $\sim 1\text{e-}19$ 秒）

问：如何通过一个实验判断一个很久没用过的混合放射源中是否含有Sr90源？（运用高中知识）

其衰变反应： ${}^{90}_{38}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39}\text{Y} + \text{e}(0.546\text{MeV}) + \bar{\nu}_{\text{e}}$



问：如何通过一个实验判断一个很久没用过的混合放射源中是否含有Sr90源？（运用高中知识）

其衰变反应： ${}^{90}_{38}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39}\text{Y} + e(0.546\text{MeV}) + \bar{\nu}_e$

- 在混合放射源中放置一个威尔逊云室
- 加入磁场
- 重建每条径迹对应的粒子及其动量
- 查看是否含有 ${}^{90}_{39}\text{Y}$ 的特征谱线



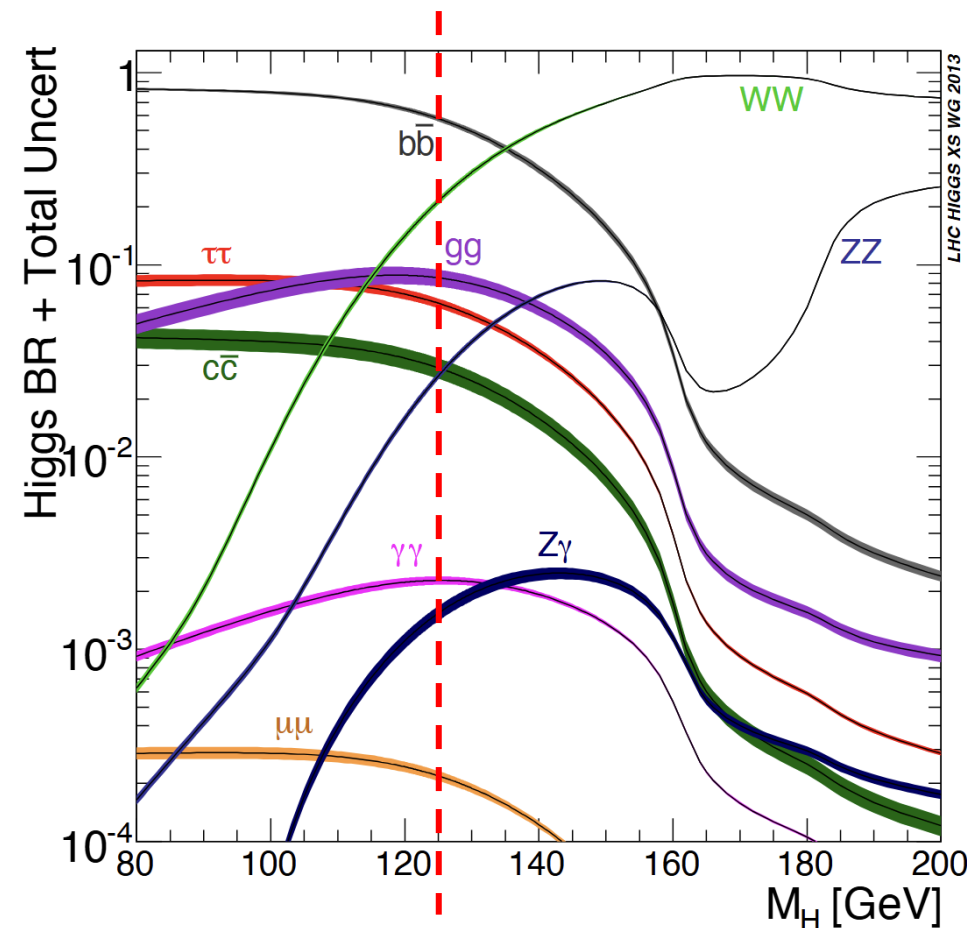
- 目标：尽可能多的获取末态粒子的信息（动量，电荷…）
- 方法：通过云室测量末态粒子的径迹

同样的思路能否应用于发现希格斯玻色子上？



问题:

- 你认为最有可能从哪个衰变道发现Higgs
- 如果只用威尔逊云室去观测Higgs的末态粒子会有什么问题



标准模型预测不同质量下希格斯的衰变分支比



问题:

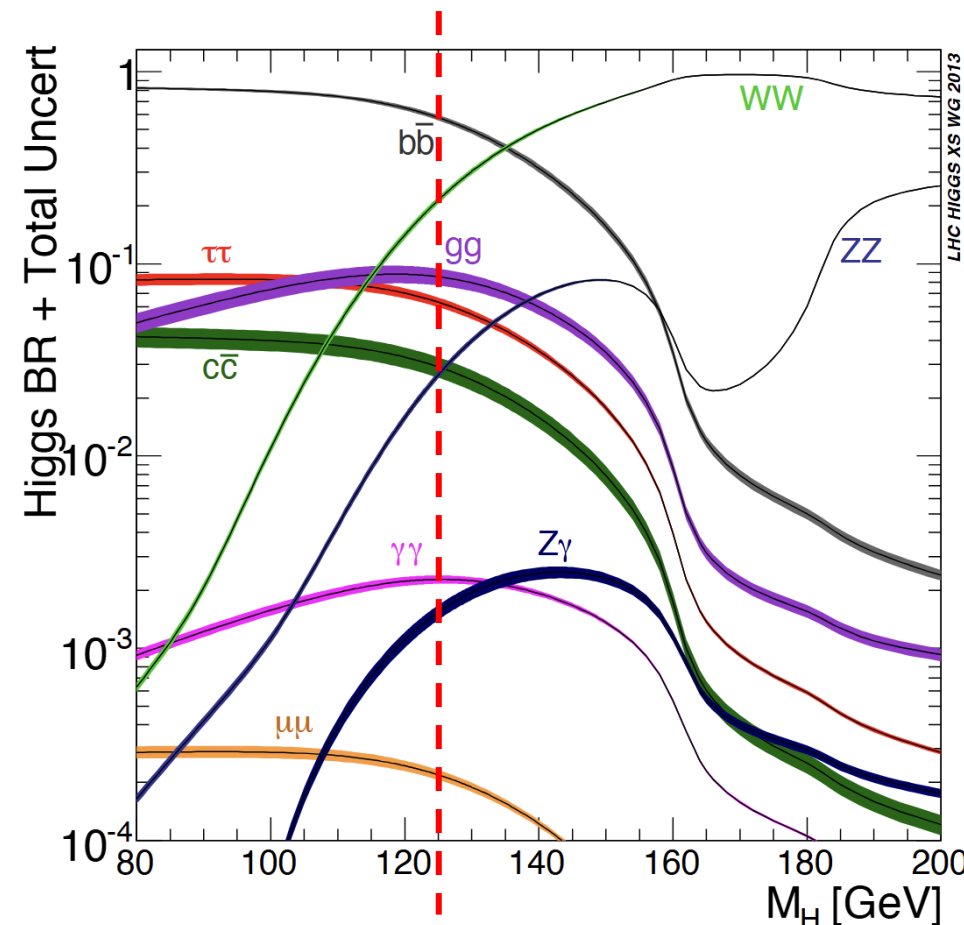
- 你认为最有可能从哪个衰变道发现Higgs
- 如果只用威尔逊云室去探测Higgs的末态粒子会有什么问题

- H to $b\bar{b}$ 背景太大
- 威尔逊云室无法探测光子



- 可用事例变少
- 探测器无法看见某些末态粒子

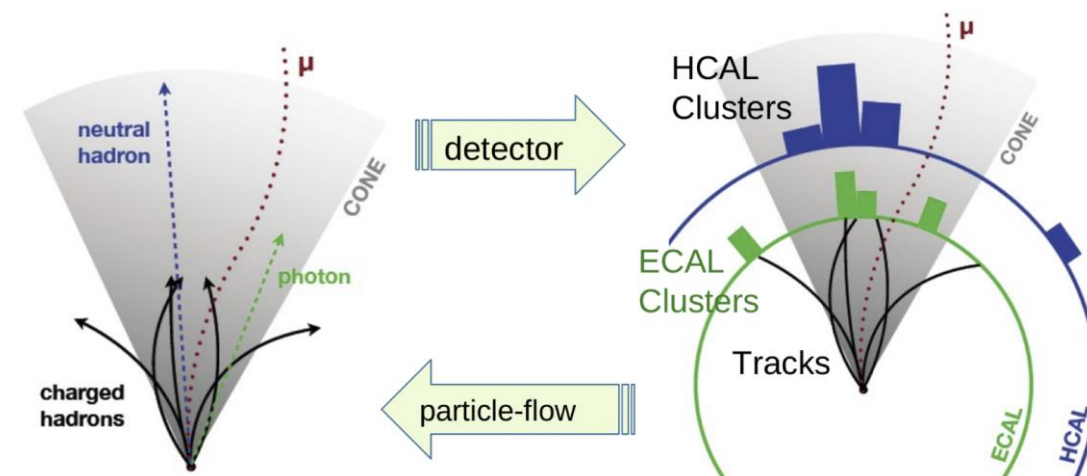
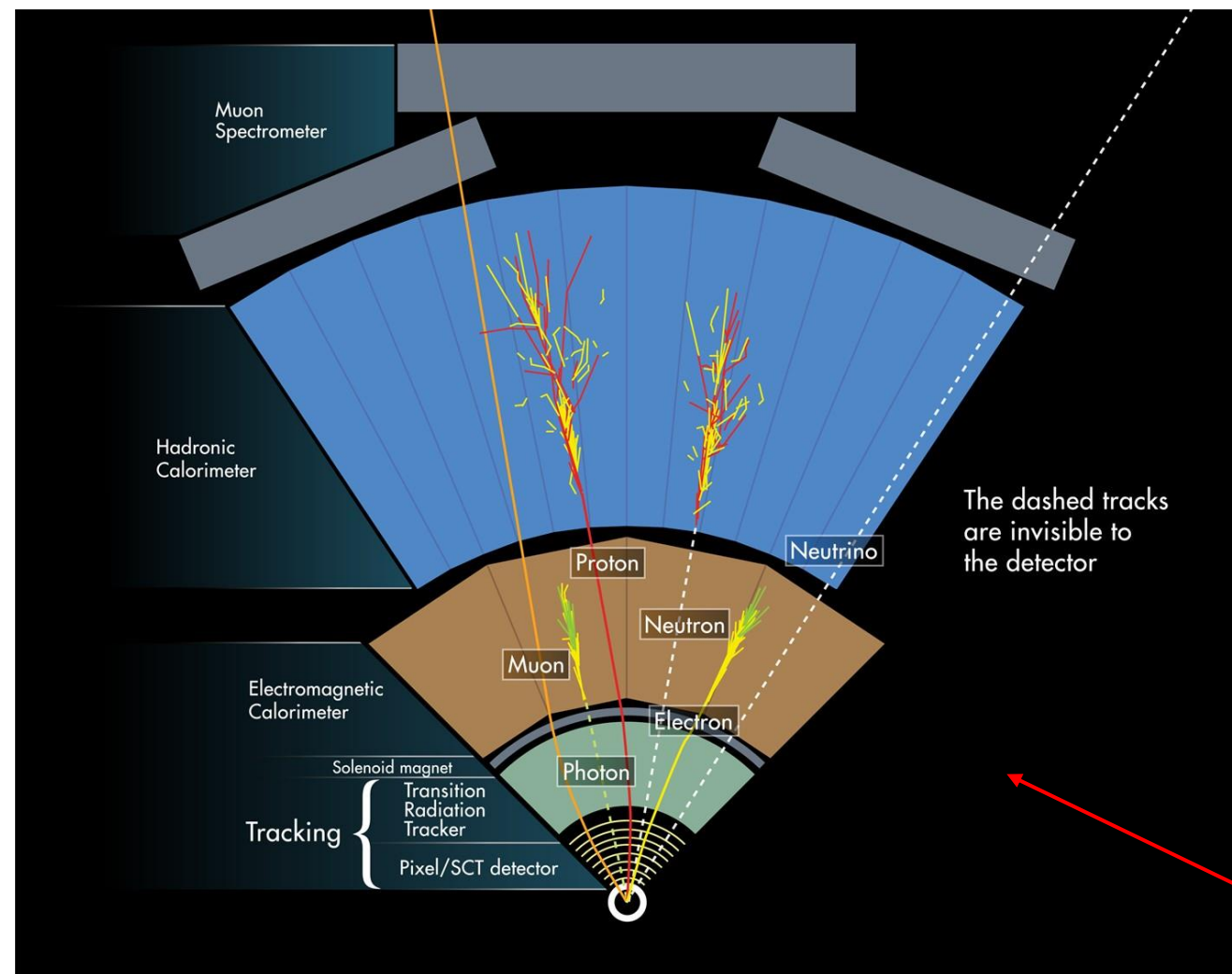
如何解决?



标准模型预测不同质量下希格斯的衰变分支比



How ATLAS detects particles

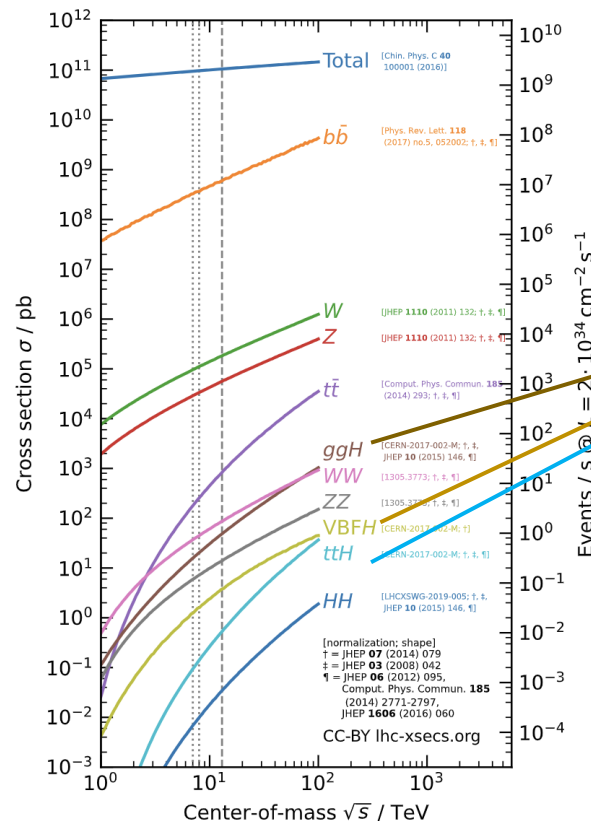


图中哪一部分对应威尔逊云室？

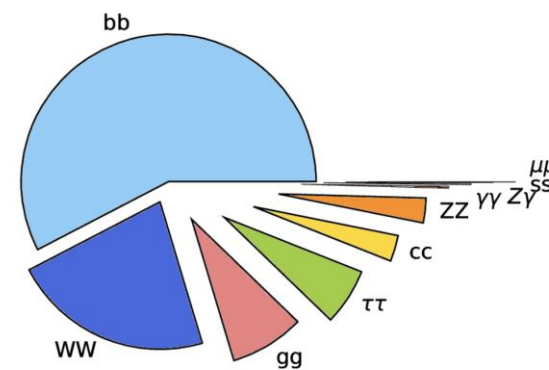
- 高能物理实验通常需要大于 5σ (99.99994%) 的置信度才能宣称发现了一个粒子
- 这需要极高的样本数
- PP对撞产生Higgs占总比较少
- Higgs to $b\bar{b}$ 衰变道不可用

解决办法：提高对撞事例数
(亮度 luminosity)

- 增加束团个数
- 增加每个束团中的质子数



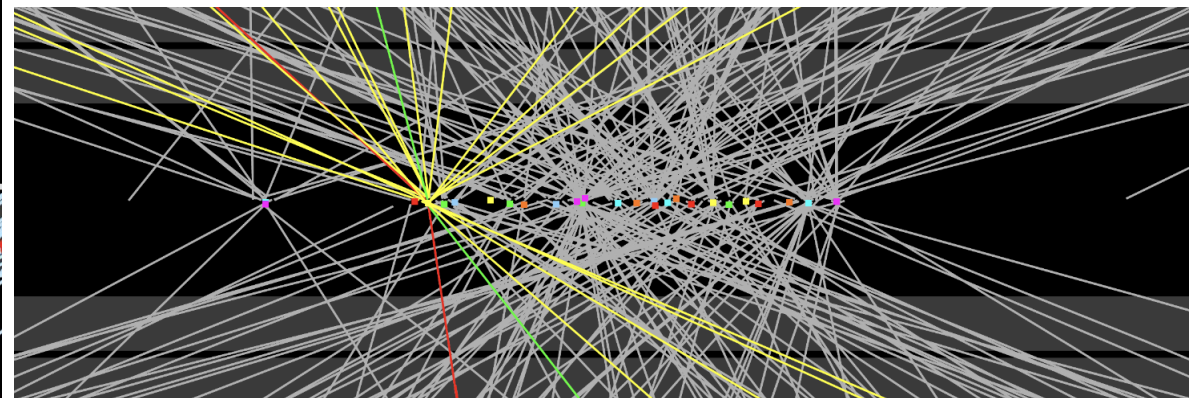
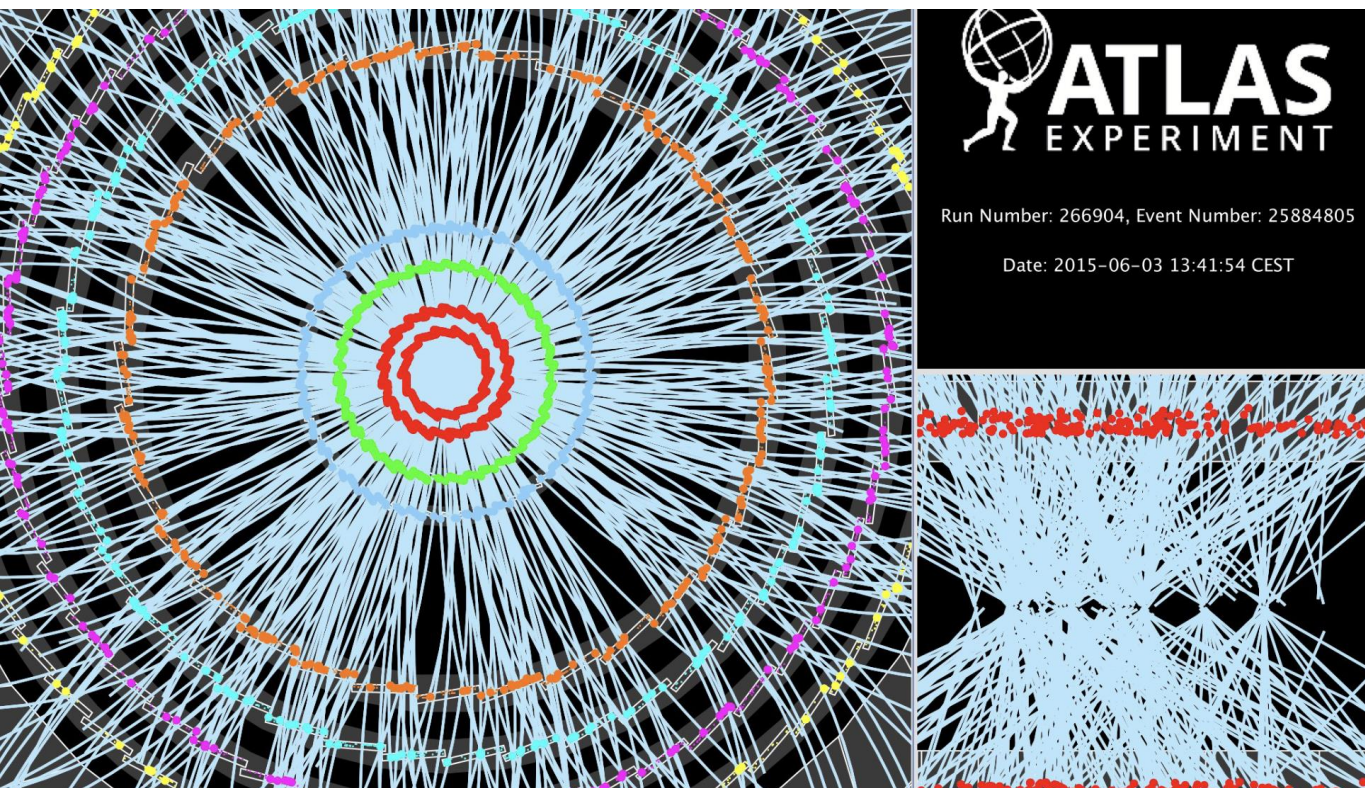
PP对撞产生不同粒子的截面



希格斯的衰变分支比



那么代价是什么



思考：这会给探测器带来什么问题？

探测器的位置分辨与时间分辨



吉林大学
JILIN UNIVERSITY

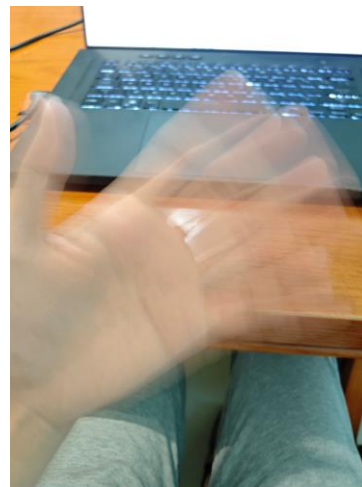


前置1600万像素

放大



后置5000万像素



快门时间：1/4秒

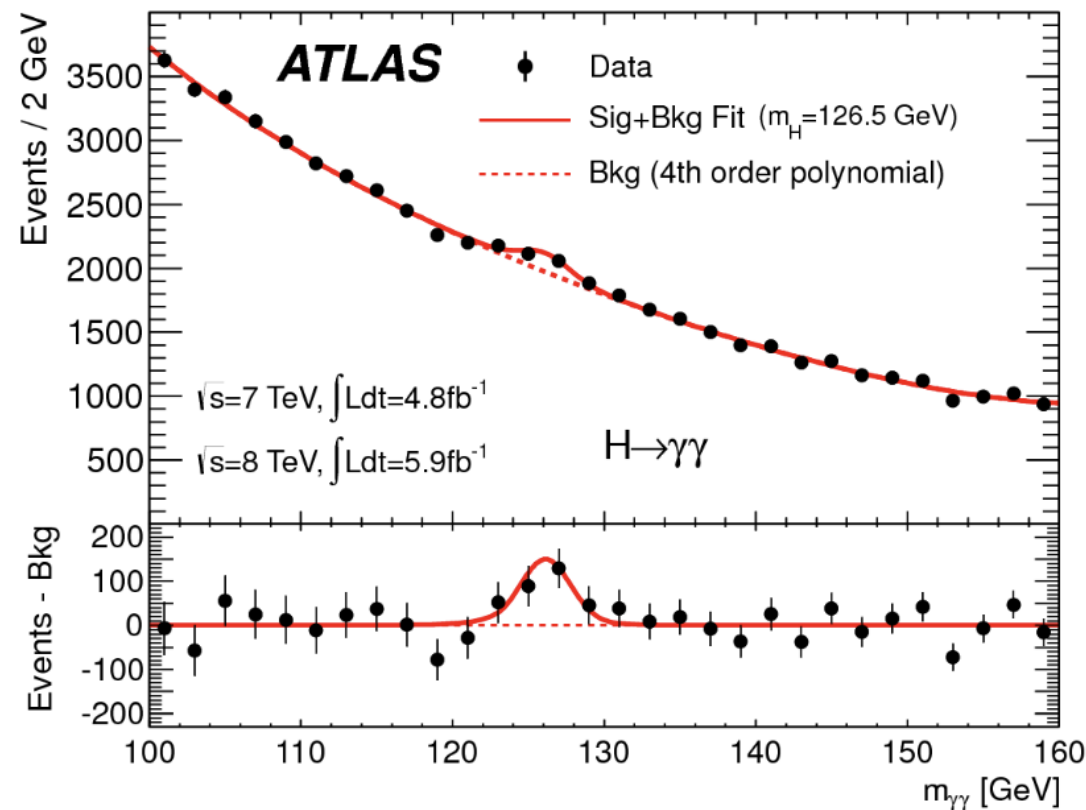


快门时间：1/60秒

更好的位置分辨和时间分辨可以
提高探测器的探测能力！



- 2012年，CERN宣布LHC上的ATLAS实验与CMS实验分别独立发现希格斯玻色子
- 标准模型的最后一块拼图被发现
- 离不开两个探测器历经十余年的研发



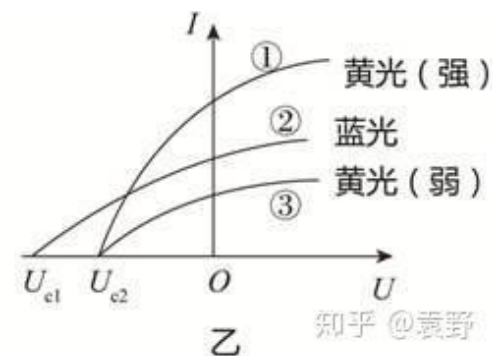
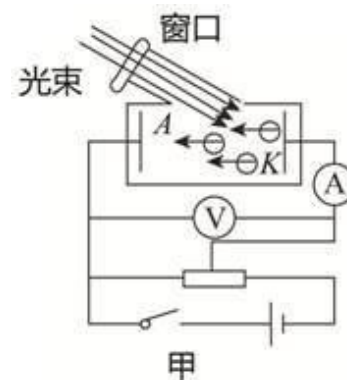
为什么是半导体



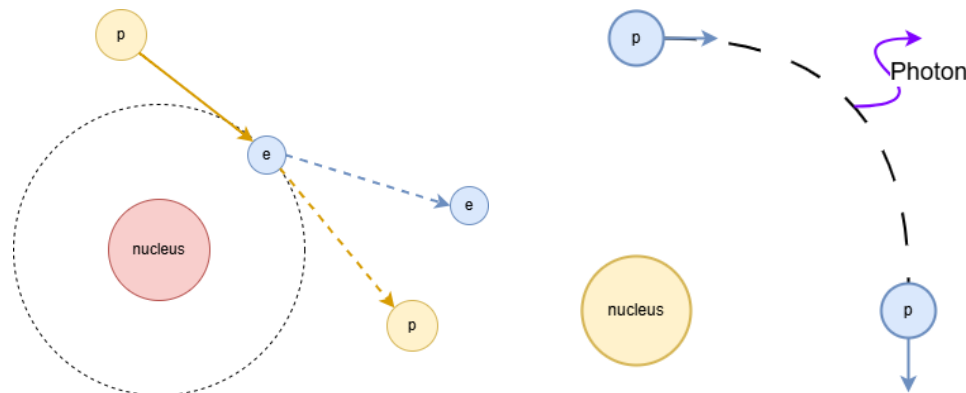
历史上的威尔逊云室与现代探测器最大的区别是什么？
(包括生活中的相机，测温枪，烟雾报警器)



- 1887年赫兹发现光电效应
- 其本质是光子将能带中的电子激发至自由态
- 入射粒子可通过核外电子散射&韧致辐射放出能量电离核外电子



光电效应实验示意图



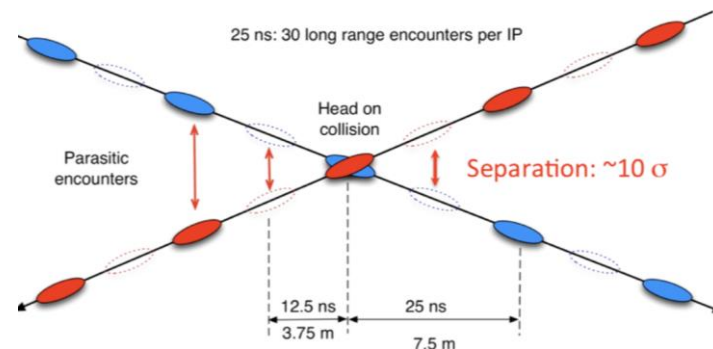
入射粒子与核外电子发生散射&发生韧致辐射



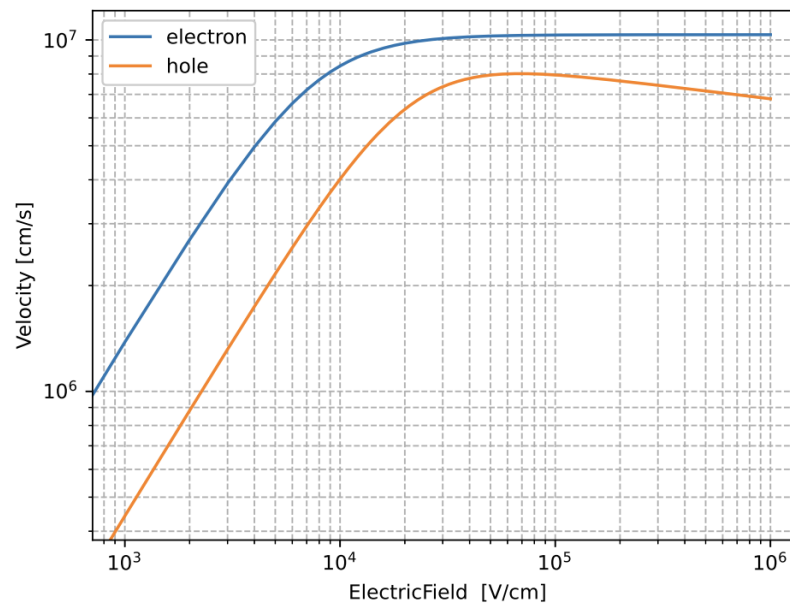
- LHC峰值亮度时束团间隔时间仅为25ns
- 信号展宽需小于束团间隔
- 信号展宽大小依赖于电离激发的载流子的速度和总距离
- 载流子的漂移速度与电场强度有关

高电场
平行于载流子运动方向更薄

越薄越好吗？



LHC run2峰值亮度时束团间隔

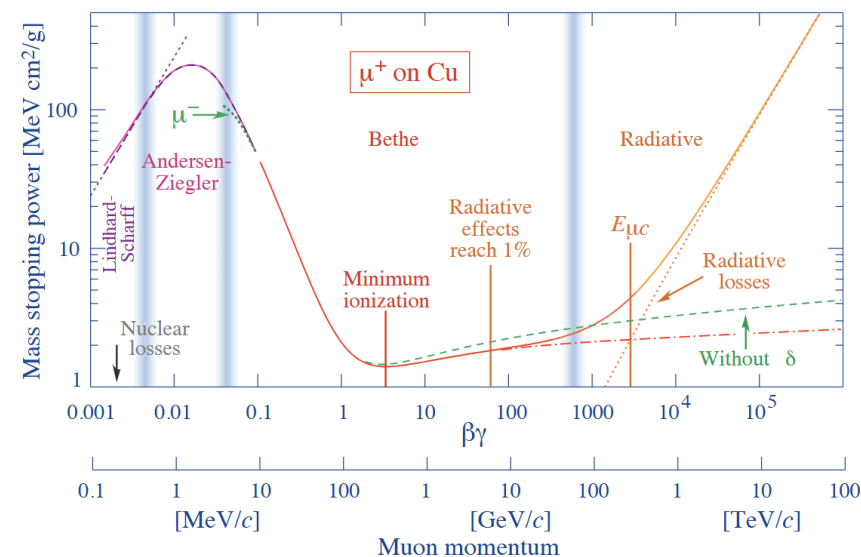


300K时硅中载流子漂移速度与电场的关系



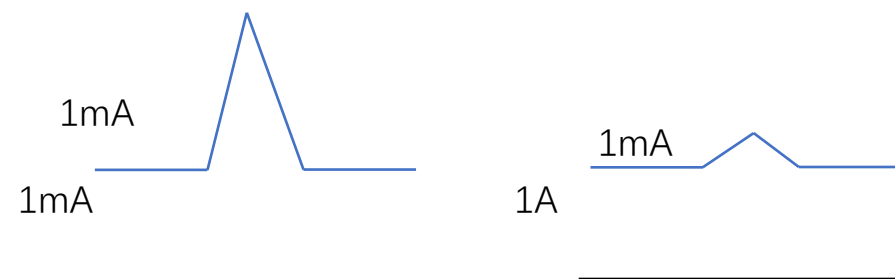
来自信号的要求：大小

- 对撞机实验中产生的带电粒子可近似认为是最小电离粒子(Minimum Ionizing Particle)，其单位步长下在材料中沉积的能量很少
- 探测器需要拥有很低的噪声以防止信号被淹没

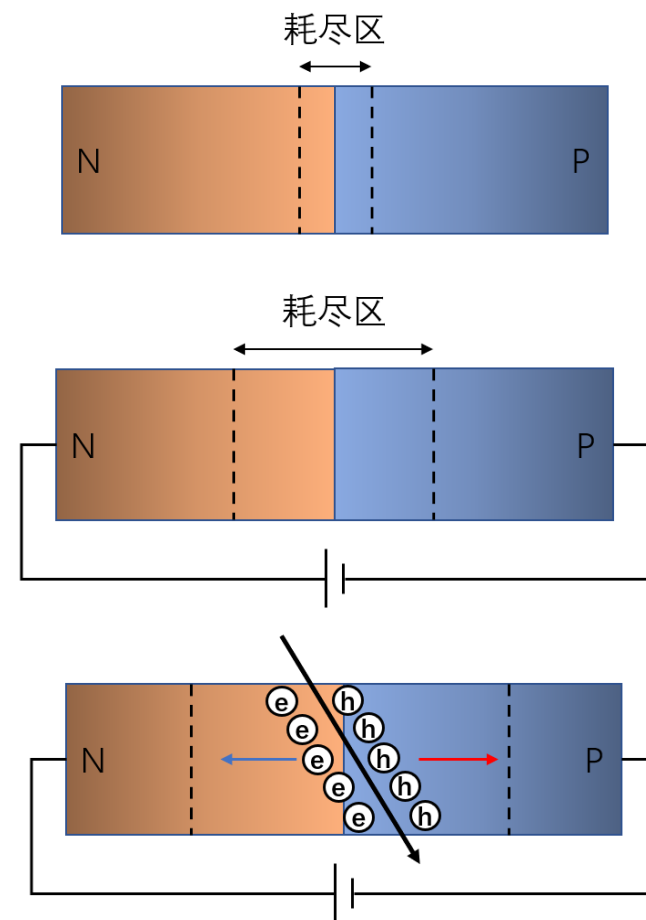


μ^+ 在铜内的能量沉积与粒子动量之间的关系

薄器件&足够的能量沉积
高电压&低噪声
矛盾？



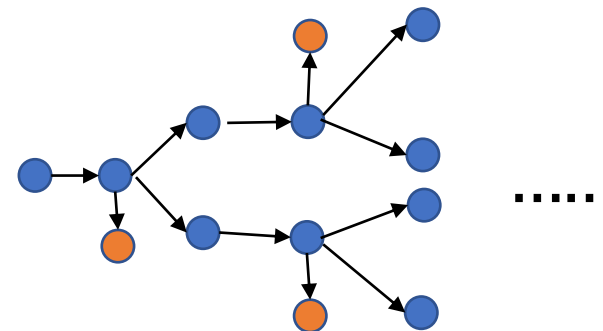
- 相较于绝缘体，半导体禁带宽度较窄，平均电离能更低
- 反偏PN结能够在耗尽区形成高电场的同时维持极低的漏电流水平
- 半导体工业发展迅猛，工艺成本逐渐降低



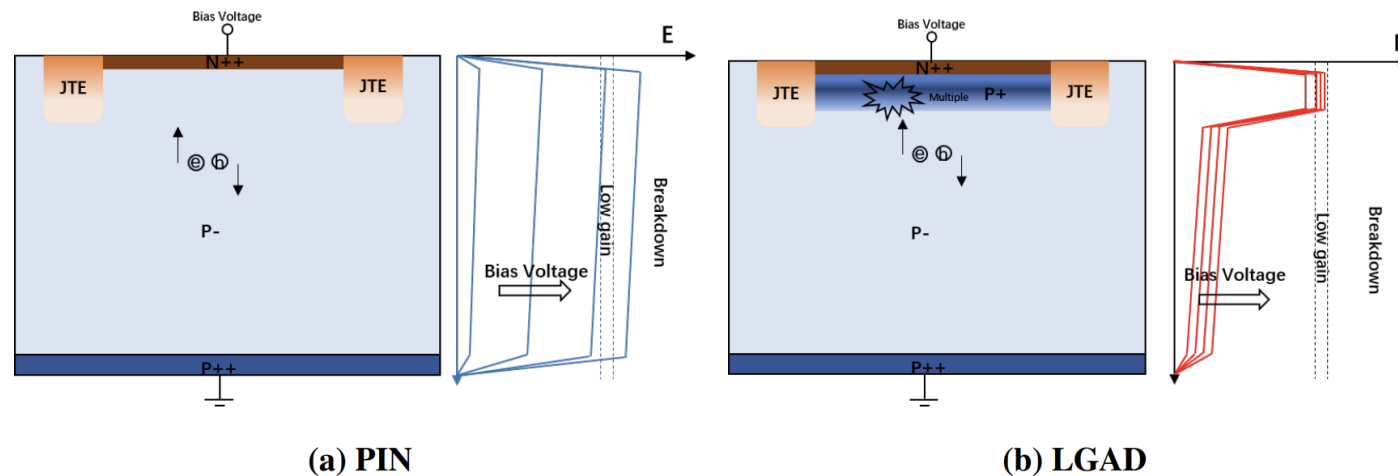
反偏PN结探测器工作原理



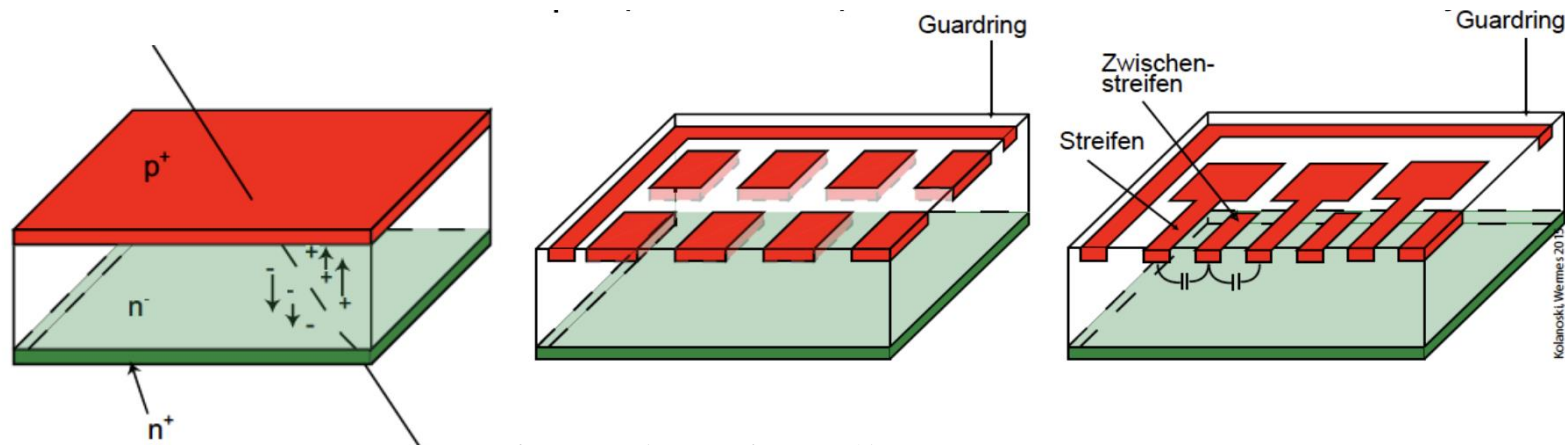
- 当载流子动能大到其本身就可以将价带中的载流子电离时就会引发碰撞电离，其为链式反应
- 低增益雪崩探测器（LGAD）：通过改变掺杂结构调整电场强度，仅一种载流子发生单向雪崩，同时控制增益区厚度和场强来得到想要的增益倍数，通常在10-100倍之间
- 增益信号为主导，器件整体可以做到更薄，与高场强结合能获得更好的时间分辨



电子碰撞电离引发链式雪崩

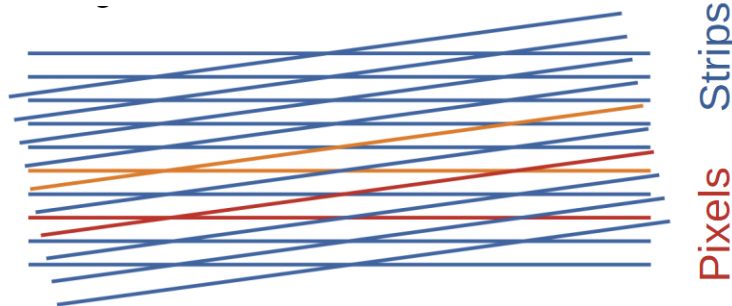


- 将电极分割成不同的结构可以令其获得非常好的位置分辨

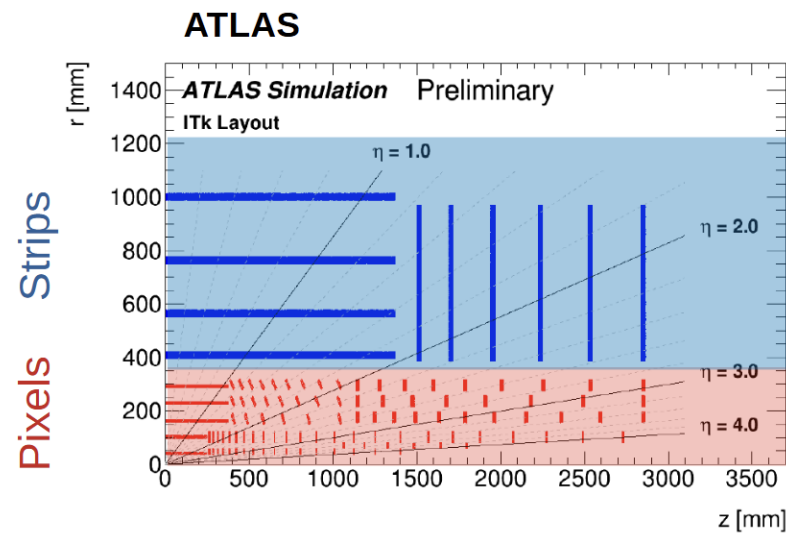


探测器的不同电极结构

- Pixel: 拥有两个方向的空间分辨
- Strip: 相较于pixel成本更低; 同时拥有更小的读出压力



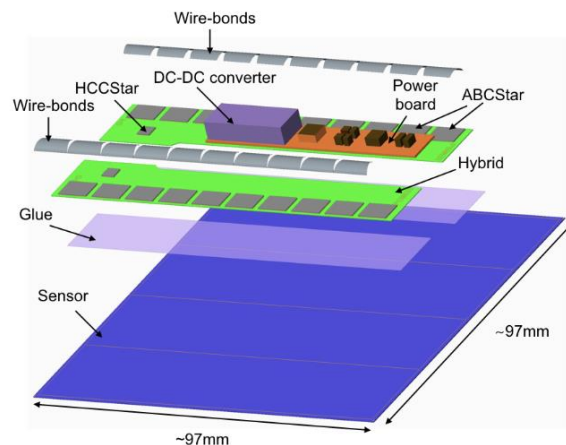
Strip探测器的分层摆放



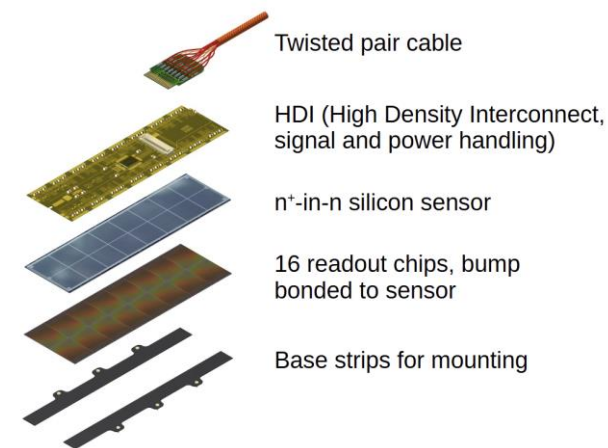
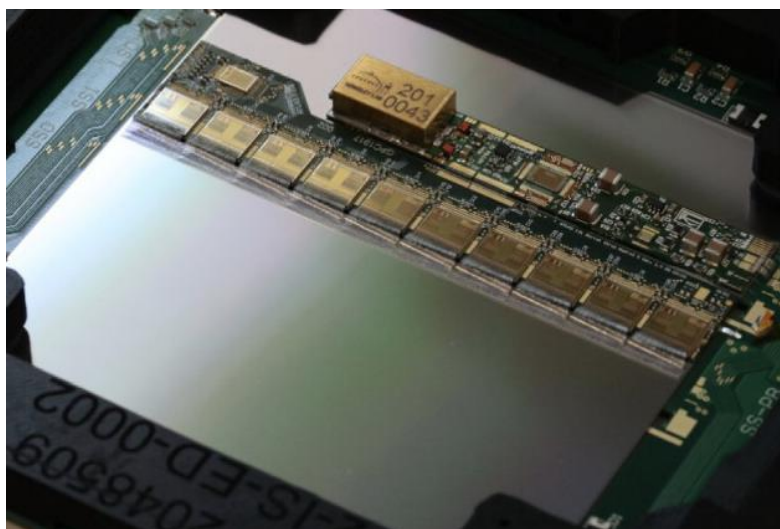
ATLAS中两种探测器的结合使用



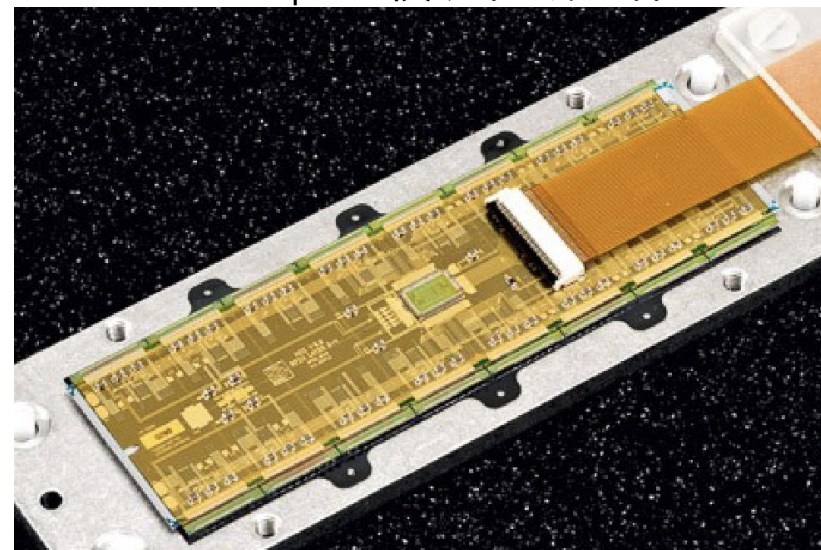
下一步是什么



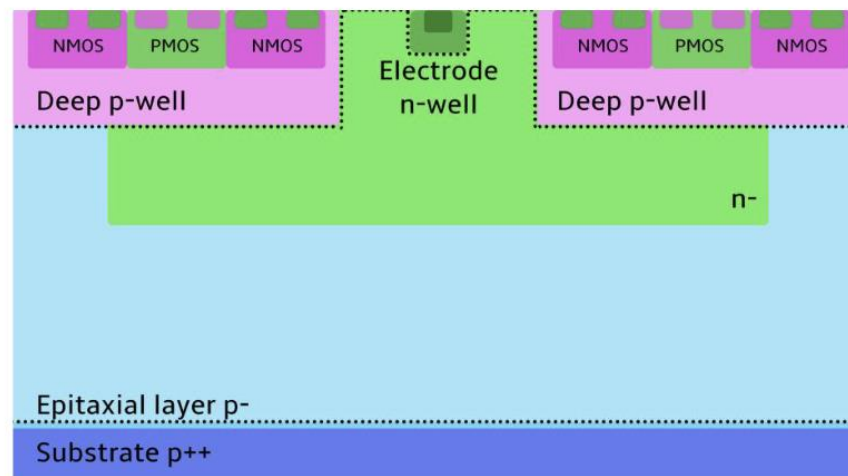
ATLAS ITk短微条模块构成组件



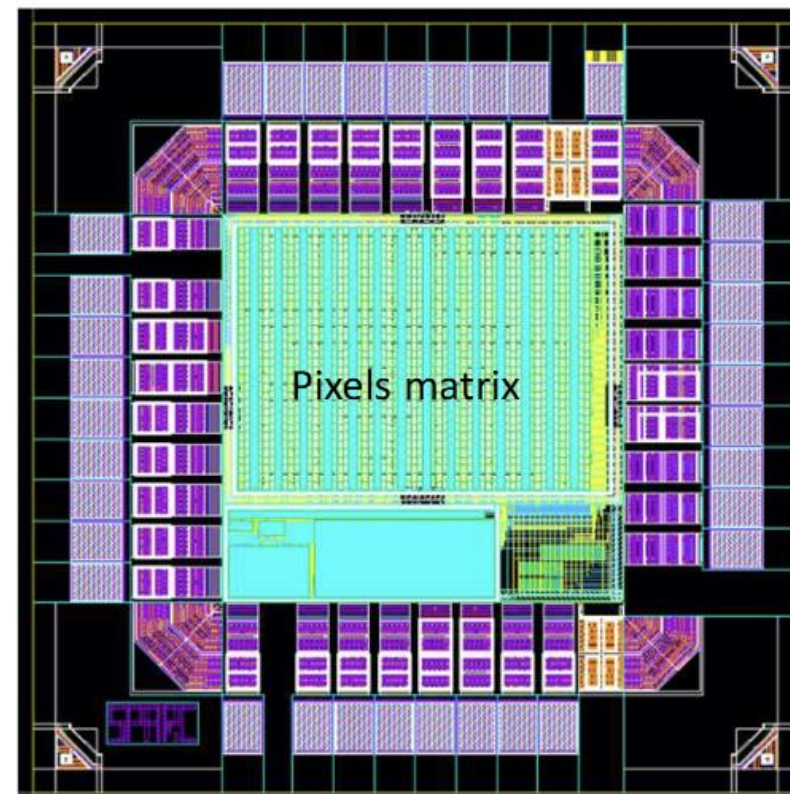
CMS pixel模块构成组件



- 将读出电路与探测器集成在同一晶圆上
- 降低了物质的量与组装难度
- 器件设计，工艺生产上仍面临技术挑战



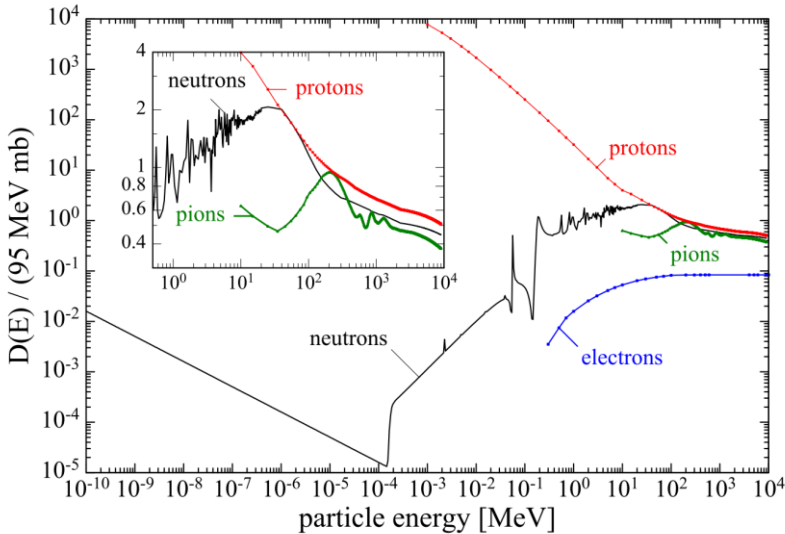
MAPS设计的仿真结构



SPARC layout



- 粒子在物质中除了会发生电离能损激发载流子，还有可能发生非电离能损造成晶格空位，产生深能级缺陷
- 过多的缺陷会降低探测器的性能
- 随着对撞机亮度和能量的提高，非电离能损对探测器造成的影响会越来越严重



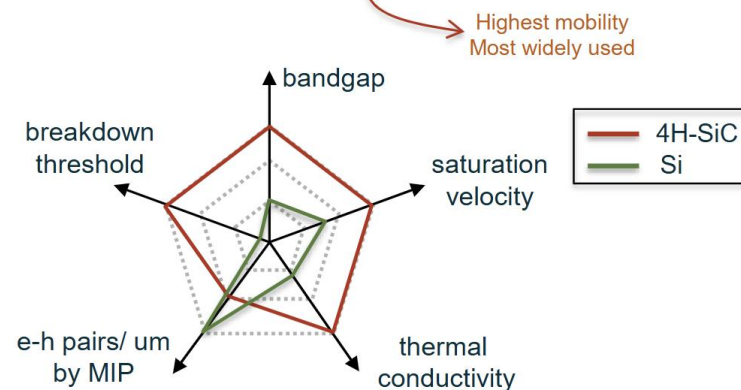
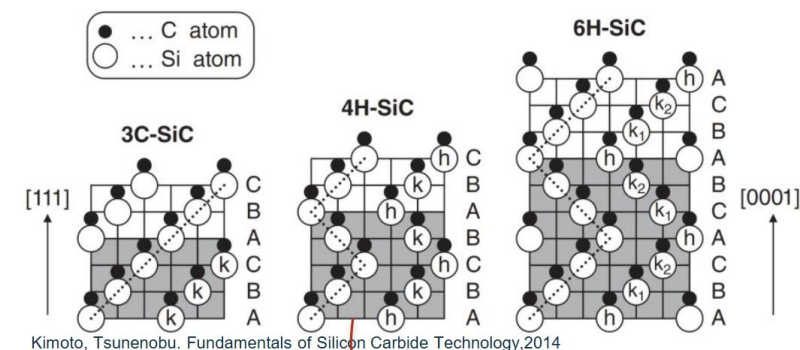
不同粒子在物质中的非电离能损

Accelerator	Type	σ_{tot} [barn]	$\mathcal{L}$ [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]	$\sim \int \phi dt$ [$\text{n}_{eq} \text{cm}^{-2}$]	Dose in Si [Gy]
Super KEK-B	e^+e^- (8,3.5 GeV)	4n	$5.0 \cdot 10^{35}$	$< 2 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$	$< 10 \text{k}$
ILC	e^+e^- (250,250 GeV)	3p 3p	few 10^{34}	$\sim 10^{10}$	few k
HERA	e^+e^-p (27.5, 920 GeV)	10^{-3} ($Q^2 < 100 \text{GeV}$)	$7 \cdot 10^{31}$	$< 10^{13}$	$< 2 \text{k}$
Tevatron	$p\bar{p}$ (0.98, 0.98 TeV)	70 m	$1.7 \cdot 10^{32}$	$< 10^{13}$	$< 30 \text{k}$
LHC	$p\bar{p}$ (7,7 TeV)	100 m	$10^{33} - 10^{34}$	up to $5 \cdot 10^{15}$	$\sim 2.5 \text{M}$
HL-LHC (>2026)	$p\bar{p}$ (7,7 TeV)	100 m	$5 - 7.5 \cdot 10^{34}$	up to $2 \cdot 10^{16}$	$\sim 10 \text{M}$
FCC	$p\bar{p}$ (50, 50 TeV) foreseen >2040	100 m	$5 - 30 \cdot 10^{34}$	up to $6 \cdot 10^{17}$	$\sim 400 \text{M}$

一些已建成和计划建造的加速器的辐照剂量参数



- 硅探测器的抗辐照能力以不足以满足下一代对撞机的要求
- 碳化硅相较于硅具有更高禁带宽度（更强的抗辐照能力），耐高温，高击穿电压和高迁移率等优点，是下一代半导体粒子探测器的优秀候选者
- 当前仍面临信号小，仿真设计物理模型不完备，生产工艺不成熟等挑战

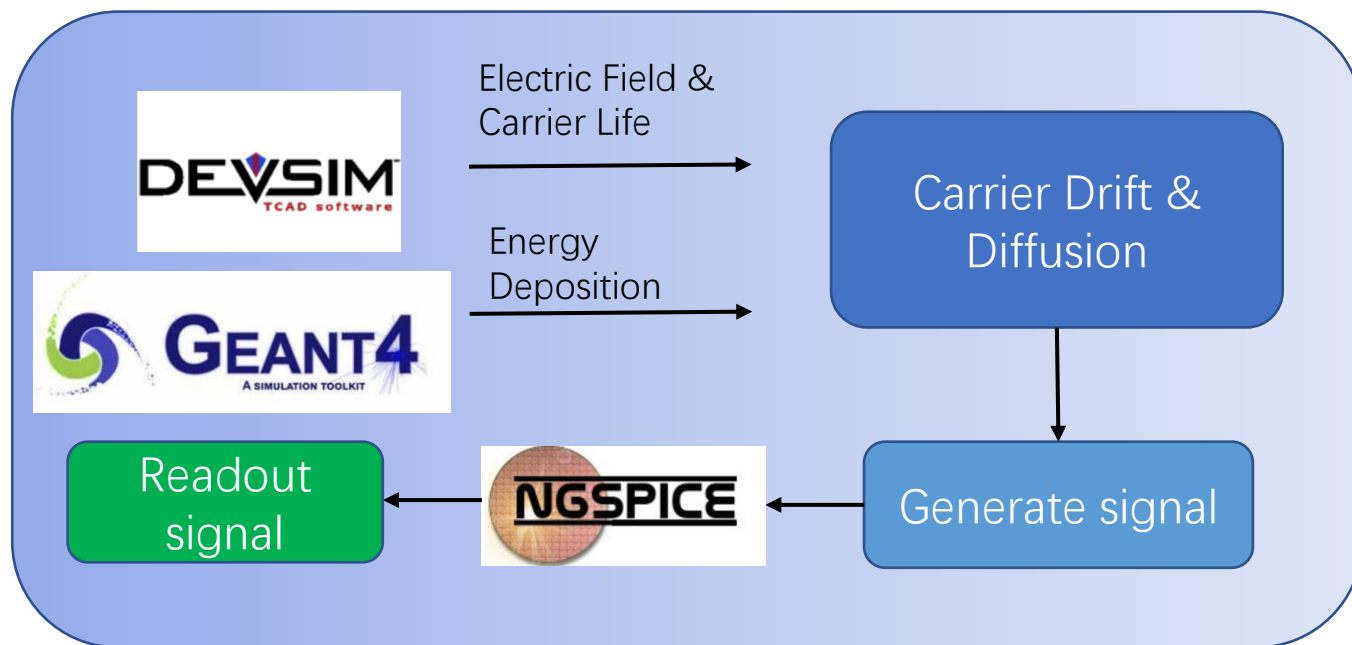


碳化硅的特性和优势



我们能做什么

- 合适的仿真能够大幅节约器件开发的时间和金钱成本，更好地理解工艺变量与电子器件参数之间的相关性
- 静态的电学特性→有限元仿真
(Sentaurus, Devsim)
- 粒子与物质相互作用→蒙特卡洛仿真
(Geant4, FLUKA)
- 产生电流信号→ (simulated by yourself)
- 读出信号→读出电路仿真 (ngspice)



Simulation work flow by RASER



生产

- 晶圆生产；版图设计；光刻；离子注入；刻蚀；划片……
- 挑战：难以控制的生产条件和高昂的生产成本

测试

- 漏电流测试；电容测试；电荷收集测试；辐照测试……
- 挑战：搭建合适的setup（测试仪器，读出系统，环境控制）；对实验现象及其背后物理过程足够的了解。

一个器件的生产不是一帆风顺的，通常需要以年为单位的研发生产测试周期



谢谢