

当生命意识到宇宙奥秘的存在时，距它最终解开这个奥秘只有一步之遥了。

—— 《朝闻道》



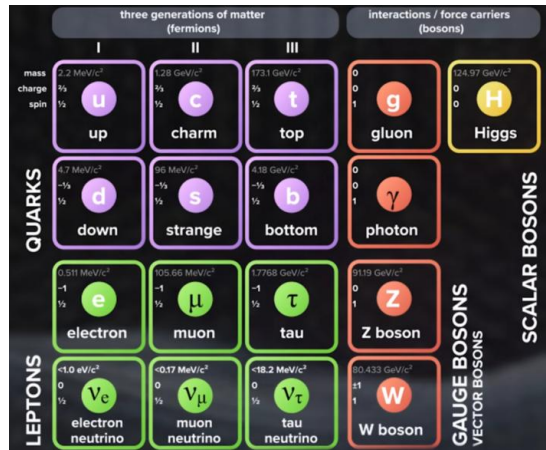
目录

- 常见粒子的分类
- 带电粒子与物质的相互作用
- 应用案例

物理实验流程概要

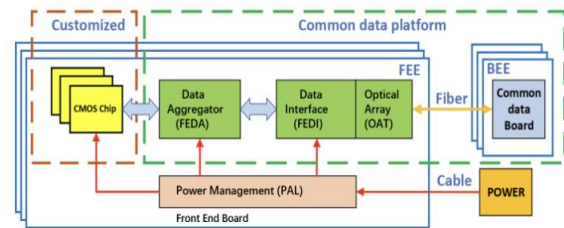
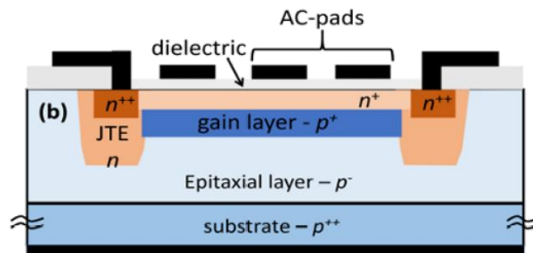
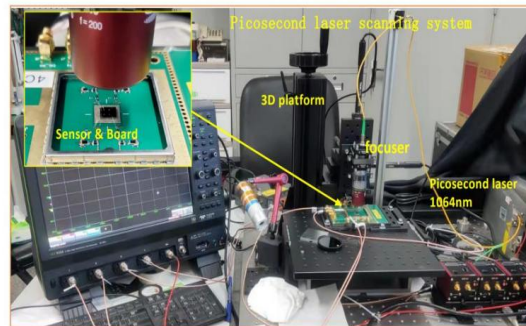
1、理论物理

- 标准模型
- 宇宙线起源
- 暗物质探测
-



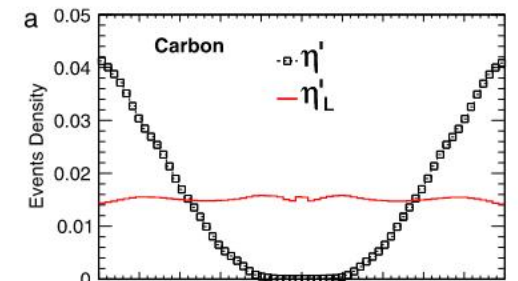
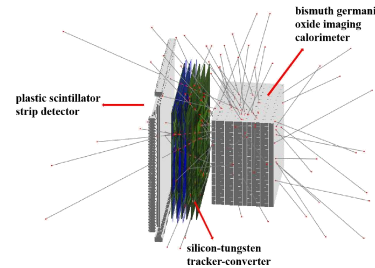
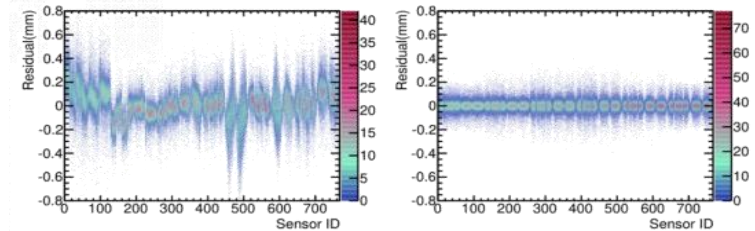
2、探测器

- 传感器设计(TCAD)
- 器件测试(树莓派、设备驱动等)
- 电子学(Vivado、ICC等)
- 机械装配(CAD)
- 冷却系统(CFD)



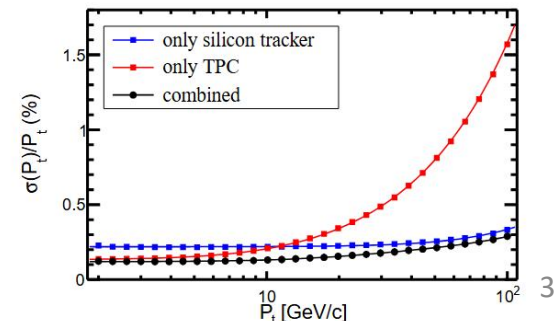
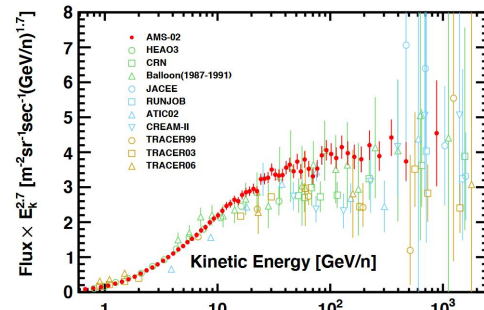
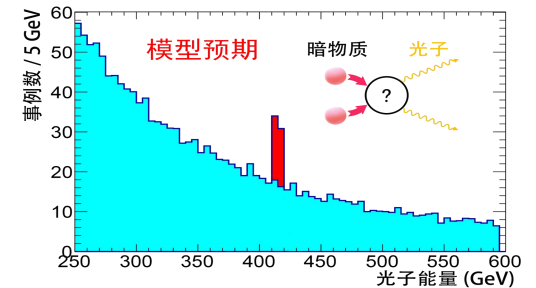
3、数据处理(ROOT、Geant4、LSF、Condor)

- 探测器标定
- 数据重建
- 探测器仿真



4、科学分析

- 宇宙线能谱
- 加速器物理
- 反物质寻找
-



粒子的分类

质量→	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
电荷→	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
自旋→	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u 上夸克	c 粲夸克	t 顶夸克	g 胶子	H 希格斯玻色子
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d 下夸克	s 奇夸克	b 底夸克	γ 光子	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e 电子	μ μ 子	τ τ 子	Z Z玻色子	
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e 电子中微子	ν_μ μ 子中微子	ν_τ τ 子中微子	W W玻色子	

夸克

轻子

- **强子** — 参与强相互作用的粒子，中性或带电。
 - **重子** — 自旋为 $1/2$ 和半整数的强子，由三个夸克组成，是费米子，服从费米-狄拉克统计规律。如：质子(uud)、中子(udd)、各类超子(含有奇异夸克的重子)等。
 - **介子** — 自旋为整数的强子，由夸克和反夸克组成，是玻色子，服从玻色-爱因斯坦统计规律。如： $\pi^+(ud)$ ， $K(us)$ 等
- **轻子** — 不参与强相互作用的粒子，自旋为 $1/2$ ，中性或带电。
 - 电子， μ 子， τ 子，各代中微子，……
- **场粒子** — 自旋为 1 ，传递相互作用的媒介子，又称矢量规范玻色子。
 - 光子，胶子，W、Z中间玻色子

规范玻色子

粒子的分类

- 粒子不能被直接观测，只有当它们与物质发生相互作用并转移能量时才能被探测到。粒子探测主要是指记录粒子数目，测定其强度，确定粒子的性质（能量、动量、飞行方向等）进而识别粒子。
- 根据粒子的带电性质分类
 - 带电粒子： α 、 p 、 e^{\pm} 、 π^{\pm} 、 κ^{\pm} 、 μ^{\pm} 等
 - 电磁辐射： x 射线、 γ 射线
 - 中性粒子： n 、 π^0 、 κ^0 、 ν 等

带电粒子与物质相互作用的分类

(仅限于与粒子探测相关并属于电磁相互作用范畴的各种具体相互作用)

□ 非弹性碰撞 (导致带电粒子损失能量)

■ 带电粒子与核外电子

□ 原子的电离和激发 (最重要的相互作用形式)

■ 带电粒子与原子核

□ 韧致辐射, 电子对直接产生, 光核作用 (只对很高能量的入射粒子重要, 并且后两者的贡献通常很小)

□ 弹性碰撞 (通常不会导致显著的能量损失)

■ 带电粒子与核外电子 (影响极小, 通常忽略)

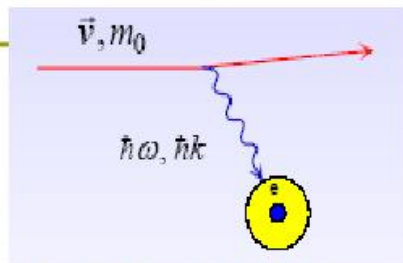
■ 带电粒子与原子核 (卢瑟福散射)

□ 多次库仑散射

□ 切伦科夫辐射, 穿越辐射 (能量损失很小)

一、带电粒子引起的电离和激发

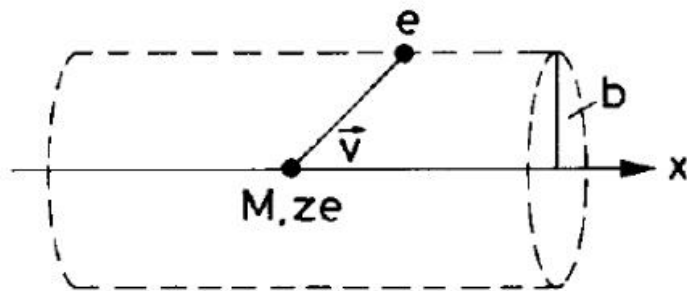
1. 电离和激发



- 入射带电粒子与物质原子的电子发生库仑相互作用而损失能量，物质原子的电子获得能量。当电子获得能量足以克服原子核的束缚，则电子就脱离原子成为自由电子。**这就是电离**。电离的结果形成一对正离子和自由电子。若内壳层电子被电离后，该壳层留下空穴，外层电子跃迁来填补，同时放出特征X射线或俄歇电子。
- 当电子获得能量较少，不足以克服原子核的束缚成为自由电子，将跃迁到较高的能级。**这就是原子的激发**。处于激发态的原子不稳定，作短暂停留后，将从激发态跃迁回到基态，这就是退激。退激时，释放的能量以光的形式发射出来。

电离能量损失的估计 (I)

■ 一个重 ($M \gg m_e$) 带电粒子所带电荷为 ze ，以速度 v 通过某种介质，与介质原子核外电子发生碰撞，产生电离和激发，从而损失能量。



- 通常入射粒子动能远大于介质原子中电子的结合能，因此可以假定电子处于自由静止状态。
- 入射粒子传递给电子的能量相比自身能量十分微小，因此可认为碰撞后入射粒子速度不变，仍按原方向作直线运动。

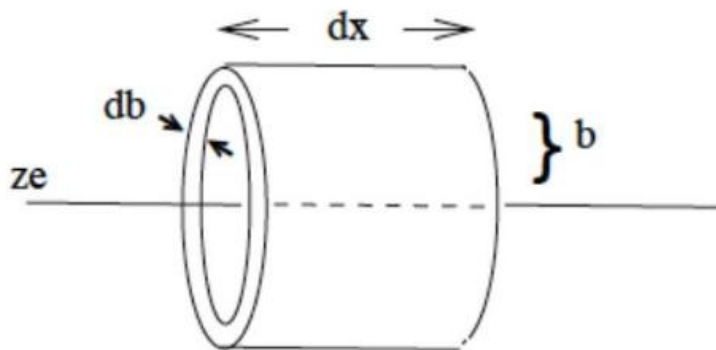
$$\begin{aligned} \Delta p_{\perp} &= \int F_{\perp} dt = \int F_{\perp} \frac{dt}{dx} dx = \int F_{\perp} \frac{dx}{v} \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ze^2}{(x^2 + b^2)} \cdot \frac{b}{\sqrt{x^2 + b^2}} \cdot \frac{1}{v} dx = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ze^2 b}{v} \left[\frac{x}{b^2 \sqrt{x^2 + b^2}} \right]_{-\infty}^{\infty} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2ze^2}{bv} \end{aligned}$$

注：纵向动量转移积分为0，因此不需考虑。

电离能量损失的估计 (II)

- 入射粒子转移给单个电子的能量即为

$$\Delta E(b) = \frac{\Delta p^2}{2m_e} = \frac{2z^2 e^4}{m_e b^2 v^2} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2$$



- 介质电子数密度 $n = Z \cdot N_A \cdot \rho / A$, 其中 N_A 为阿伏加德罗常数, Z 为介质原子序数, A 为原子量, ρ 为介质密度

- 考虑以入射粒子为轴, 半径为 b 的圆柱, 在 db 的微元内, 总电子数为 $n \cdot 2\pi b db dx$, 则总转移能量为

$$-dE(b) = \frac{\Delta p^2}{2m_e} \cdot 2\pi n b db dx = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{4z^2 e^4}{2b^2 v^2 m_e} \cdot 2\pi n b db dx = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{4\pi n z^2 e^4}{m_e v^2} \frac{db}{b} dx$$

对 b 积分则得到:

$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{4\pi n z^2 e^4}{m_e v^2} \cdot \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{db}{b} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{4\pi n z^2 e^4}{m_e v^2} \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}}$$

电离能量损失的估计 (III)

□ b_{\max} 和 b_{\min} 的确定

如前所述，单次碰撞的能量转移为 $\Delta E(b) = \frac{\Delta p^2}{2m_e} = \frac{2z^2 e^4}{m_e b^2 v^2}$

所以确定 b_{\max} 和 b_{\min} 的问题转化为了确定最小 (T_{\min}) 和最大能量 (T_{\max}) 转移的问题

- 核外电子实际并非自由电子，而是束缚在原子中，只能从入射粒子接受大于其激发能级的能量，因此，最小能量转移 T_{\min} =原子平均激发能 I
- 最大能量转移 T_{\max} 已经在前面推导过，对应入射粒子和一个自由静止电子的相对论两体弹性散射过程中电子能获得的最大能量。

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \rho \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{T_{\max}}{I} \right)$$

定义质量厚度 $dx' = \rho dx$ ，则有

$$\frac{dE}{dx'} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{T_{\max}}{I} \right)$$

$$\text{其中: } r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{m_e c^2}$$

Bethe-Bloch 公式（考虑更多的因素和修正）

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$$

$$r_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{m_e c^2}$$

T_{\max} : 单次碰撞最大能量转移

z : 入射粒子电荷数

Z : 介质原子的原子序数

A : 介质原子的原子数

I : 介质原子平均激发能

δ : 密度效应修正

N_A : 阿伏加德罗常数

m_e : 电子质量

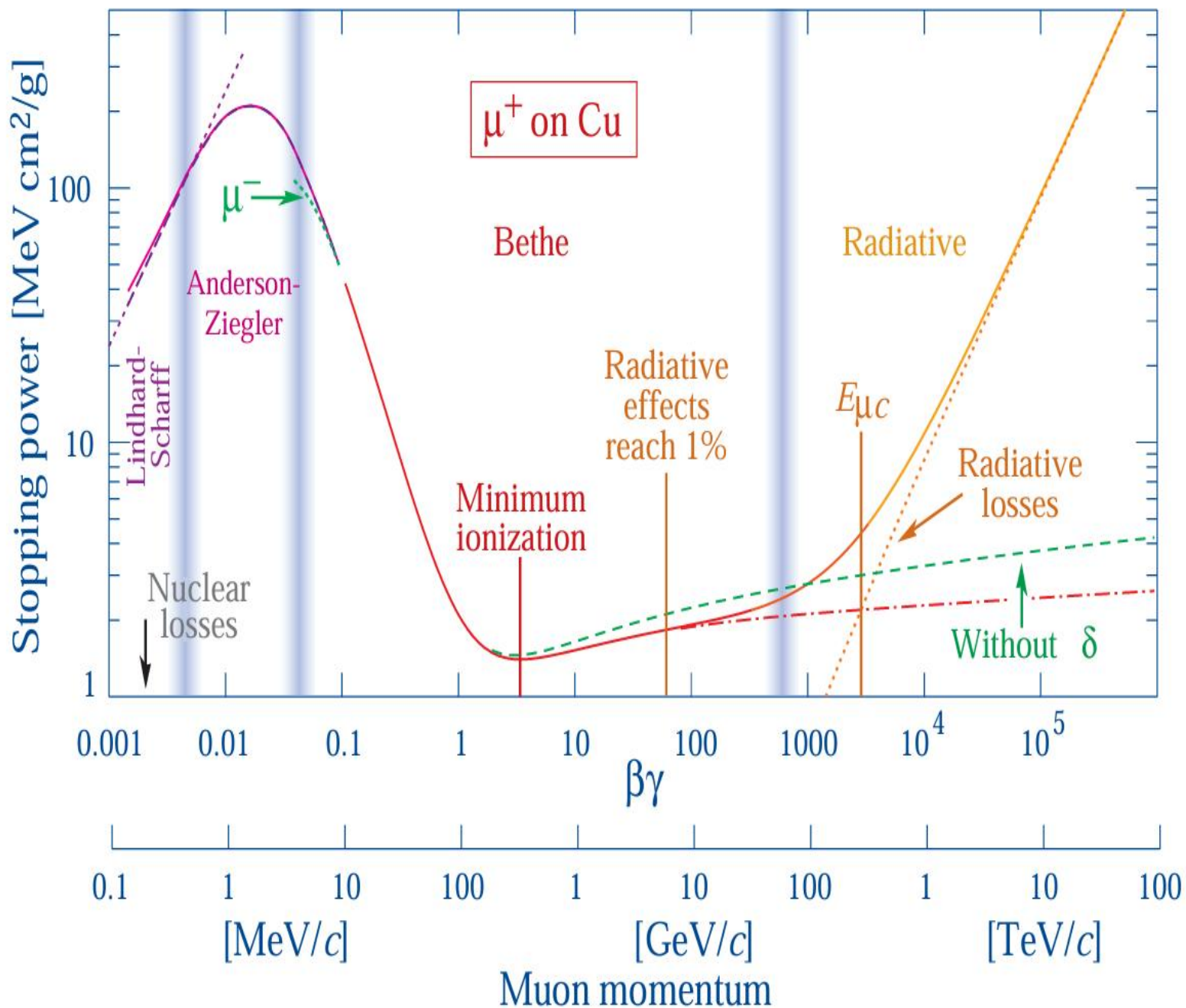
β : 粒子速度/ c

γ : $(1-\beta^2)^{-1/2}$

dx : 质量厚度

电离能损 dE/dx 与入射粒子的 Z/A 成正比，与入射粒子速度有关，与入射粒子质量无直接关系。

μ^+ 在铜内的能力损失与粒子动量和 $\beta\gamma$ 的关系

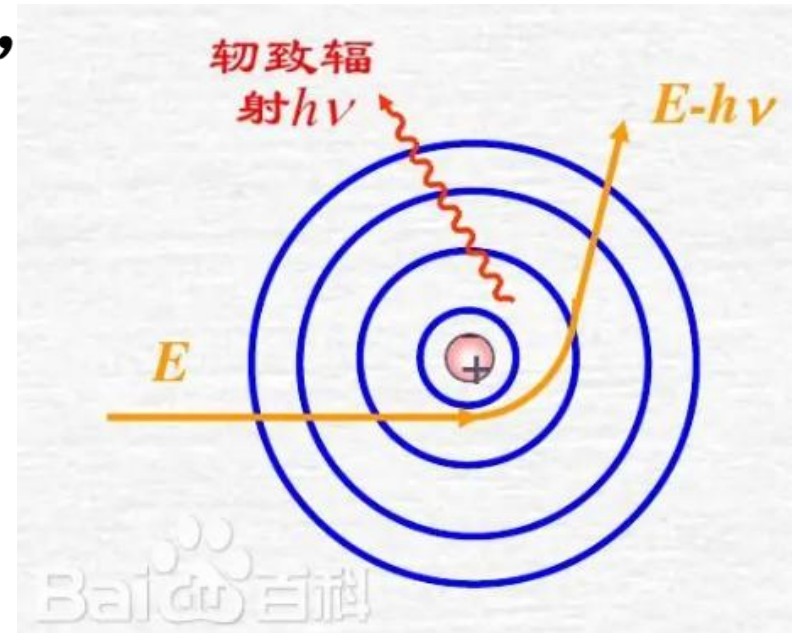


- 对于能量很低的粒子,当其运动速度与原子中电子的速度相当时,公式不再适用。
- 在 $0.01 < \beta\gamma < 0.05$ 区间,目前尚无令人满意的理论解释,只能依赖唯象拟合公式。
- 随着入射粒子能量的增加,电离损失很快减小,最低点在 $\beta\gamma \sim 3-4$ 附近。把能量损失为最小值的粒子称为最小电离粒子(Minimum Ionizing Particles或MIP)。
- 在 $\beta\gamma > 4$ 后,能量损失又开始缓慢上升,称作相对论上升。
- 随着能量继续增加,由于原子核外电子电荷密度的屏蔽效应,能量损失趋于饱和,物质中沉积的能量接近一个常数,称作费米坪。
- 当粒子能量很高时,韧致辐射能量损失开始起重要作用。

轫致辐射

1. 轫致辐射

- 当快电子与物质相互作用时，因受阻速度改变，同时将一部分动能以光子的形式发射出来，称为轫致辐射（**bremsstrahlung**）。
- 转换成轫致辐射的电子能量的份额随入射电子能量的增加而增加，也随吸收物质的原子序数的增加而增加。
- 轫致辐射谱是连续的。

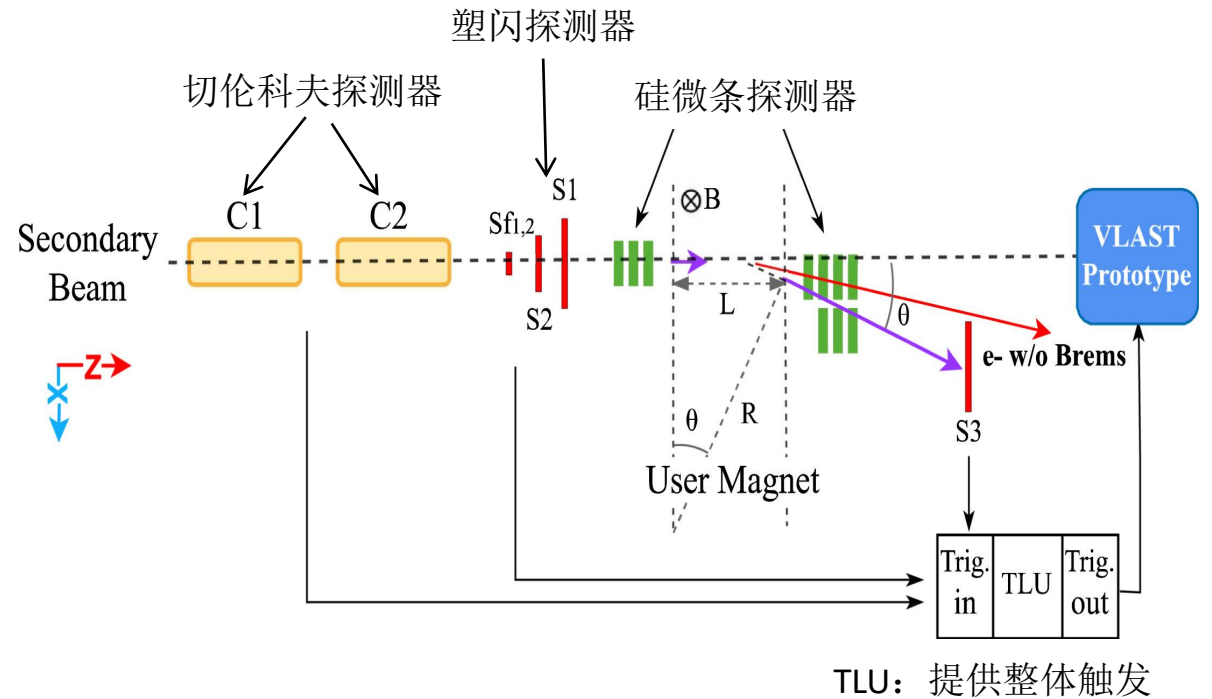


轫致辐射应用案例：电子束流产生光子

需要光子束流用于束流测试，在无法提供光子束流的情况下，通过电子束流的轫致辐射产生光子束流



束流实验现场图



探测器排布示意图

二、带电粒子通过介质时的多次库仑散射

- **库仑散射**:带电粒子穿过物质时受原子核和核外电子库仑势的影响（主要是原子核的影响，电子的影响可忽略），偏离原来的运动方向，这种现象称为库仑散射（弹性碰撞）。

$$\theta_{plane}^{rms} = \sqrt{\langle \theta_{plane}^2 \rangle} = \frac{13.6}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left(1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0} \right)$$

P入射粒子动量, 单位MeV/c; **X₀**介质的辐射长度,
x/X₀以辐射长度为单位的介质厚度。

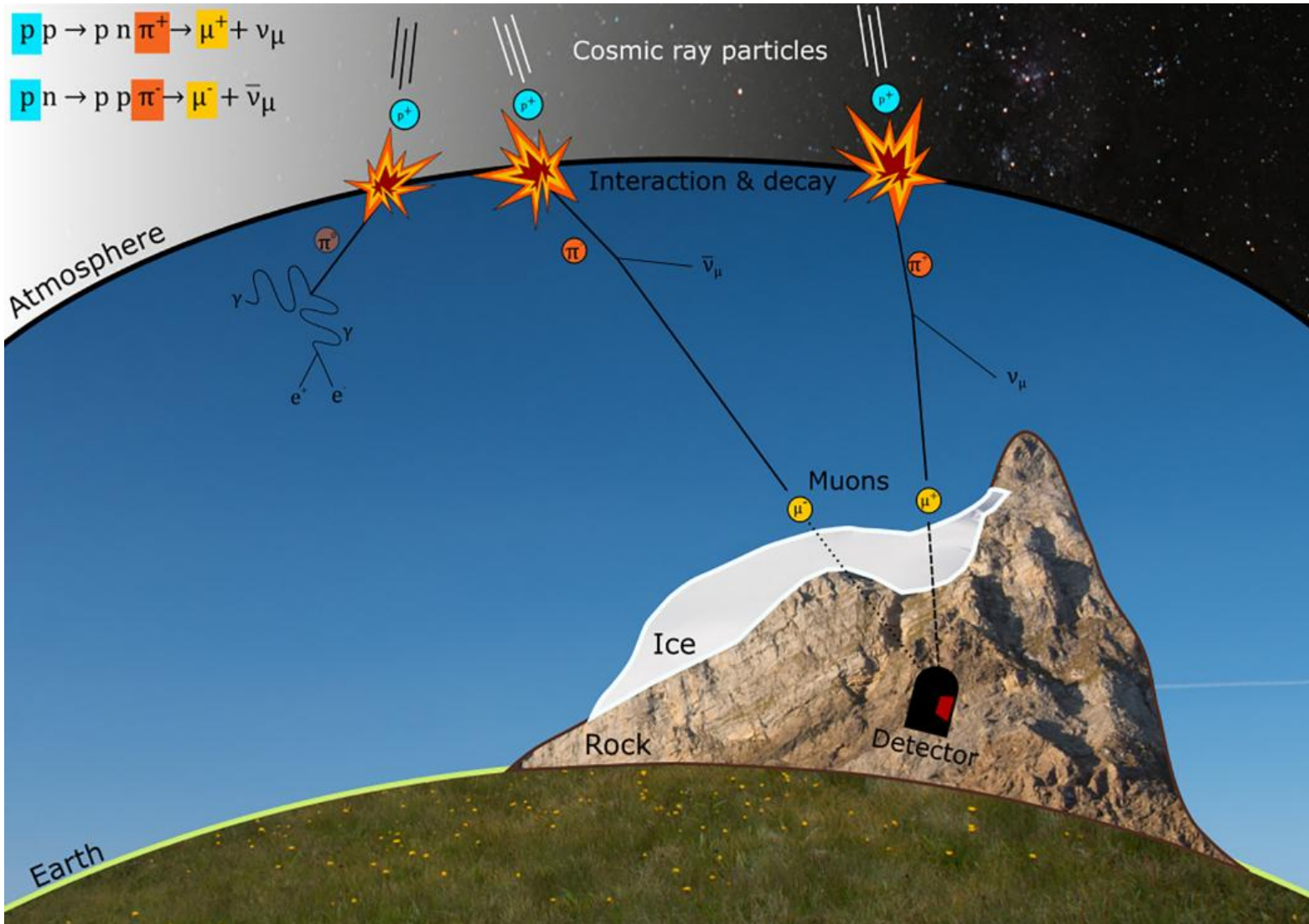
进一步简化,

$$\theta_{plane}^{rms} = \frac{13.6}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}}$$

$$\theta_{space}^{rms} = \sqrt{2} \theta_{plane}^{rms} = \frac{19.2}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}}$$

低动量粒子受多次散射影响显著。辐射长度近似与**Z(Z+1)**成反比（**Z**为介质原子序数），因此，**要减少多次散射效应，探测器应尽量选用原子序数低的材料制作，探测器的物质质量要保持尽量低。**

应用案例：地学研究中的缪子层析成像



- **信号源：**宇宙射线产生的u
- **u子探测器：**u在穿透物质时会因与物质微粒碰撞而损失能量。物质密度越大、厚度越深，u被阻挡和衰减得就越多
- 如果一个方向上冰多岩石少到达探测器的u子通量就会比较多，反之同理
- 适合测量冰川的硬件：核乳胶探测器

<https://doi.org/10.1016/j.earsci.rev.2021.103842>

作业

1、阅读粒子探测技术1、2两章的内容，并回答下面的问题

- 辐射长度和核作用长度分别是什么，简单比较经过1毫米厚的碳、铝、钨板后电子的能量衰减到原来的多少，对于1 GeV、10 GeV、100 GeV的电子，经过这些物质时，多重散射角分别为多大？（不需要非常精确的结果）

- 简单介绍粒子穿过厚、薄介质时，电离能量损失的分布有何不同，为什么？

2、泊松过程、泊松分布的性质和应用以及和二项分布、高斯分布的关系；母函数的性质及应用，例：利用母函数证明两个泊松分布的随机变量的和仍是泊松分布

3、从下面的链接中下载root文件，打开其中的r_strip (TH2D)，选取X方向前5个bin，将其投影到Y方向作为新的TH1D，这是粒子经过300微米硅微条探测器收集到的信号，指出其服从什么分布并拟合，并以论文的标准作图。

分享文件：result.root等[批量分享]

云盘链接：<https://pan.cstcloud.cn/s/vMvhmHm4TPI> 过期时间：2027-10-06 16:36:03

提示1：投影操作选取前5个的代码为r_strip→projectionY("",5,0)

提示2：提示1也许不那么可靠

提示3：作图可以参考分享文件中style.h，在绘图程序中加入其头文件后

(建议生成一份PDF文件上传)