

宇宙线粒子探测与 物理实验

王 喆

清华大学 工程物理系

地点、联系方式、实验报告

- 实验室：刘卿楼802
- 联系方式：王喆
 - 办公室：刘卿楼804
 - 电话：62794279, 13693213163
 - Email: wangzhe-hep@tsinghua.edu.cn
- 助教：陈琿有
 - 办公室：刘卿楼819
 - 电话：15827752671
 - Email: chenhuiy19@mails.tsinghua.edu.cn

人身和设备安全

1. 出门请按门右侧墙上有钥匙状图案的开关!
2. PMT必须在光密闭的条件下使用，在漏光情况下不能加高压，强电流会导致PMT损坏。
3. PMT使用1500V左右的高压，一般不超过1900V。HV系统功率很低，遇到漏电、高电流情况下会自动保护掉电。
4. 802实验室现在配备了很多重要设备、材料，注意安全，在不了解的前提下不要操作！（烷基苯，PPO，高电压设备，大量精密仪器）

本实验的重要安全事项

A. **Be careful**

1. **Move a scintillator detector. They are heavy.**
2. **Cables and connectors on the floor, fragile.**

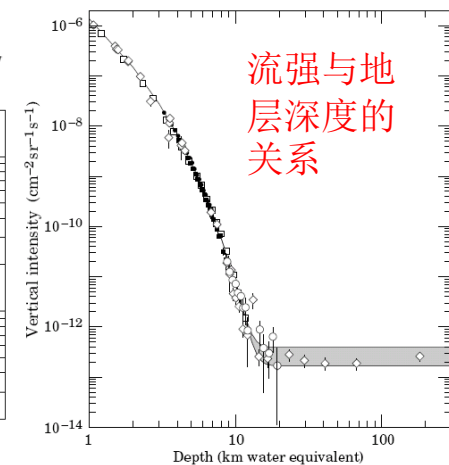
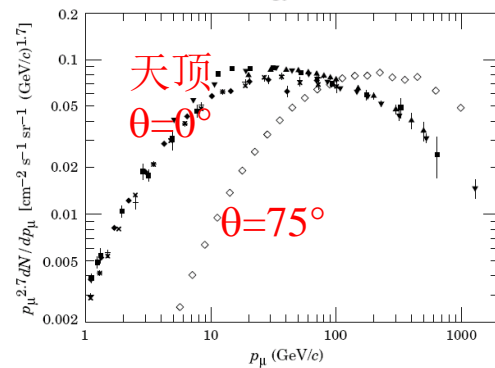
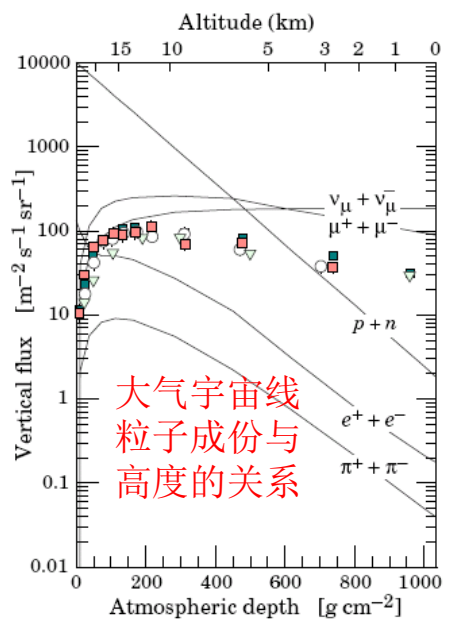
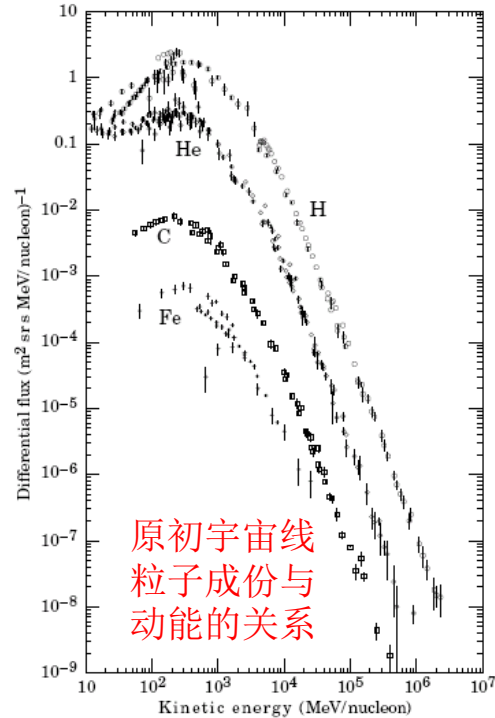
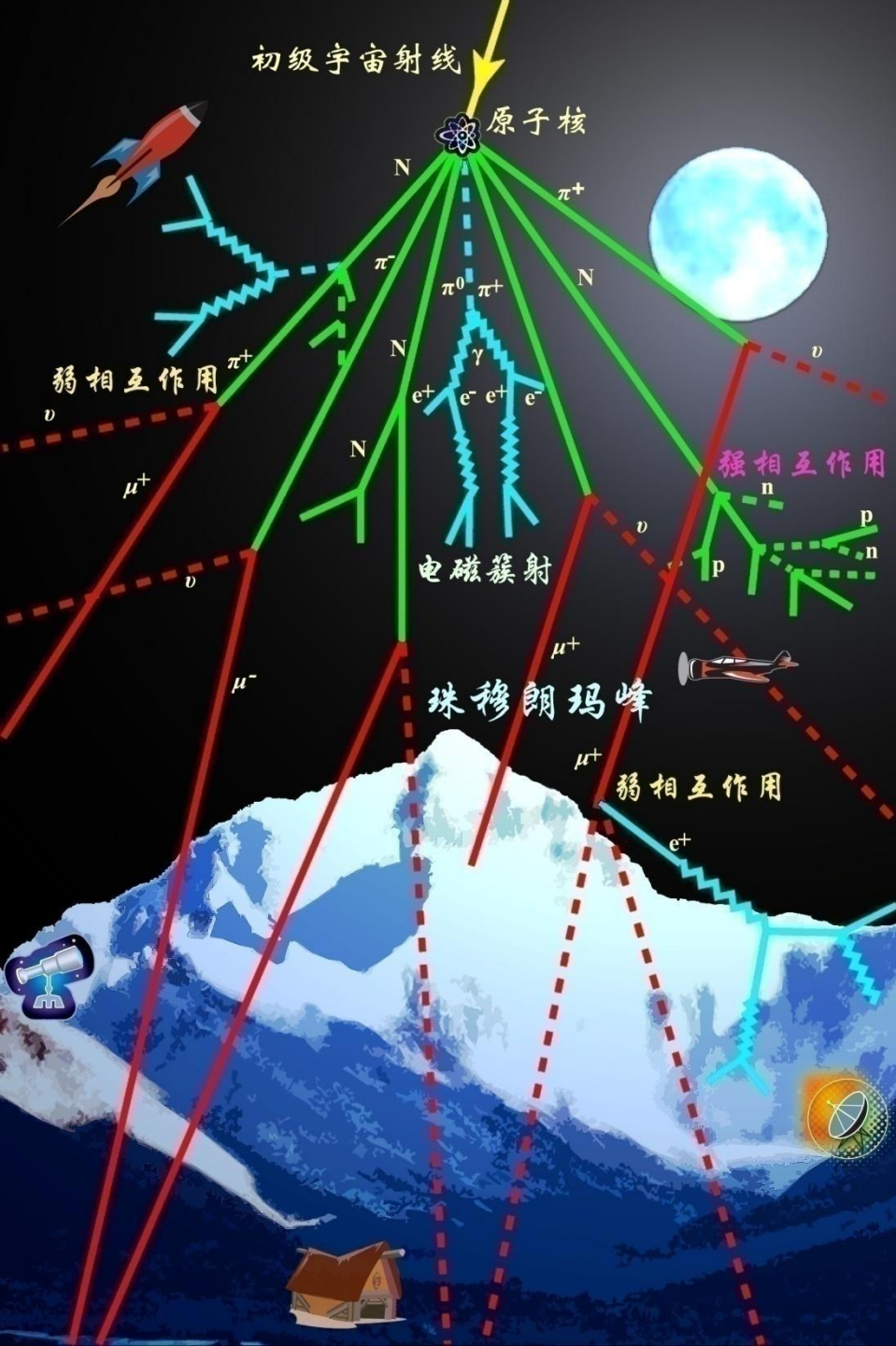
B. **You must:**

1. **No water in this room.**
2. **Turn HV off, before plug or unplug it.**
3. **Consult tutor for HV usage**
4. **Consult tutor for electronic module usage**

目标与最终要求

经历一个完整的高能物理实验，学习和感受全过程

- ▶ 了解宇宙线的成因、特点及应用；
- ▶ 理解与掌握辐射探测原理；
- ▶ 掌握核探测器相关的电子学知识
- ▶ 掌握在线数据获取的基本知识
- ▶ 掌握离线数据分析的基本知识
- ▶ 了解与宇宙线有关的物理研究和各种应用



- 原初宇宙线粒子由氢、氦、碳与铁构成
- 与大气中的原子核碰撞产生次级粒子
- 到达海平面的粒子主要是 μ^- 子与中微子
- μ 子动量与流强均随天顶角变化
- 海平面的 μ 子流强大约为 **1个/cm²/min**

宇宙线实验-高能物理实验的前沿之一

- ▶ 宇宙线和伽玛射线实验：
空间实验、气球实验、大气切伦科夫实验、大气荧光实验、空气簇射实验、中子监测...
- ▶ 高能中微子和地下缪子实验：
地下中微子实验、水下中微子实验、南极冰中实验、其他宇宙中微子实验
- ▶ 其他实验：
引力波实验、寻找暗物质

本课程需要完成的实验内容

- ▶ 基础：高压，扇入扇出，符合模块，甄别器，示波器使用，波形数据采集，离线波形分析
- ▶ 探测器性质与基本信号特征实验1：暗噪声（事例率，波形，特征参数），电子学噪声
- ▶ 探测器性质与基本信号特征实验2：缪子信号（宇宙线望远镜，事例率，波形，特征参数）
- ▶ 探测器性质与基本信号特征实验3：闪烁体能量响应，闪烁体衰减长度，闪烁体探测效率
- ▶ 物理实验1：宇宙线缪子通量及角分布测量
- ▶ 物理实验2：缪子寿命测量
- ▶ 物理实验3：Michael电子能谱测量

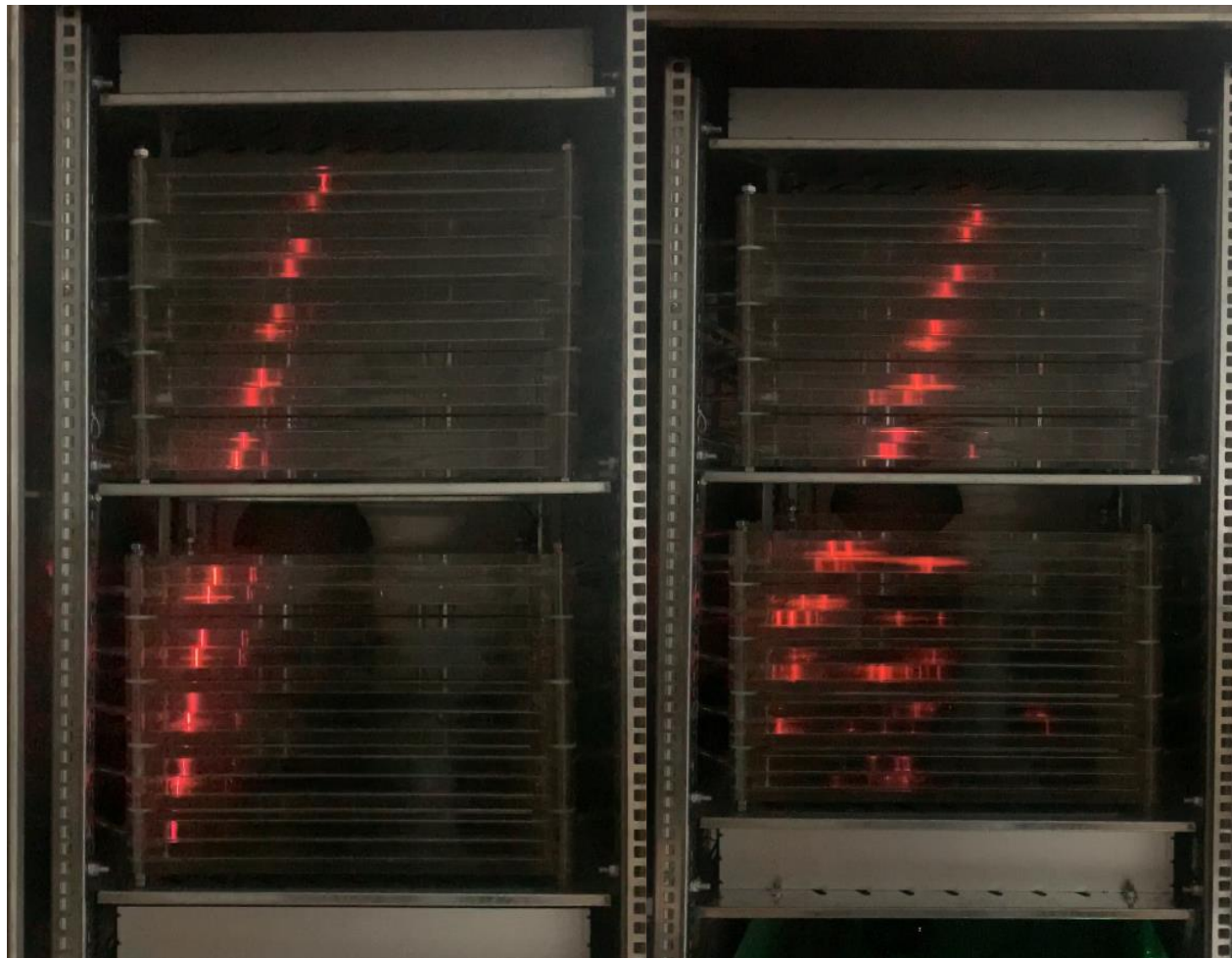
参考信息和书籍

- ▶ <http://hep.tsinghua.edu.cn/training/cosmicRay/index.html>
- ▶ 宇宙线物理
 1. 《Cosmic rays and particle physics》 T. K. Gaisser, R. Engel and E. Resconi
- ▶ 粒子与核物理探测实验
 1. 《Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment—A how-to Approach》, 2nd Revised Edition, W.R. Leo, Springer-Verlag, 1994
 2. 《粒子探测器与数据获取》, 谢一冈等, 科学出版社, 2003
 3. 《粒子探测技术》, 汪晓莲, 李澄, 邵明, 陈宏芳, 中国科学技术大学出版社, 2009
 4. 《粒子探测器》, Claus Grupen, Boris Shwartz著, 朱永生, 盛华义译, 中国科学技术大学出版社, 2015
- ▶ 数据分析
 1. 《Statistical Data Analysis》, Glen Cowan, Clarendon Press.Oxford,1998
 2. 《Statistics for Nuclear and Particle Physics》, Louis Lyons, Cambridge University Press, 1993

分组，考核和进行方式

- ▶ 2人一组
- ▶ 与助教和老师约时间进行实验，先讨论实验方案，可行后才可进行
- ▶ 总共在15-20小时左右，必须保证每周2小时的实验时间
- ▶ 4次报告，每两周一次
- ▶ 每次的报告讨论会，每个组都要介绍自己的实验进展，每组的两个人交替轮换报告
- ▶ 最后按照报告的结果，实验的投入程度，研究和学习的深度打分，期中实验结束，算总分（经常有些延迟）

先让缪子现身出来



闪烁体探测装置

本实验室采用的是光电倍增管经过光导与闪烁体耦合。



为了保证不漏光，在接头部位用黑条胶带缠绕。

光电倍增管的拆卸

本实验室采用的是飞利浦公司生产的 **XP2020** 型光电倍增管。旋转保护壳后部的金属盖即可将光电倍增管卸除。



拆卸后的闪烁体探测装置



光电倍增管基本构造

光电倍增管包括采光面窗口，光阴极，电子倍增部分以及其后部的分压器、读出与基座部分。



保持光电倍增管采光面的清洁

光电倍增管采光面必须保持干净，如发现尘埃，可以用无水酒精清洗干净。但注意不能使用酒精清洗闪烁体。



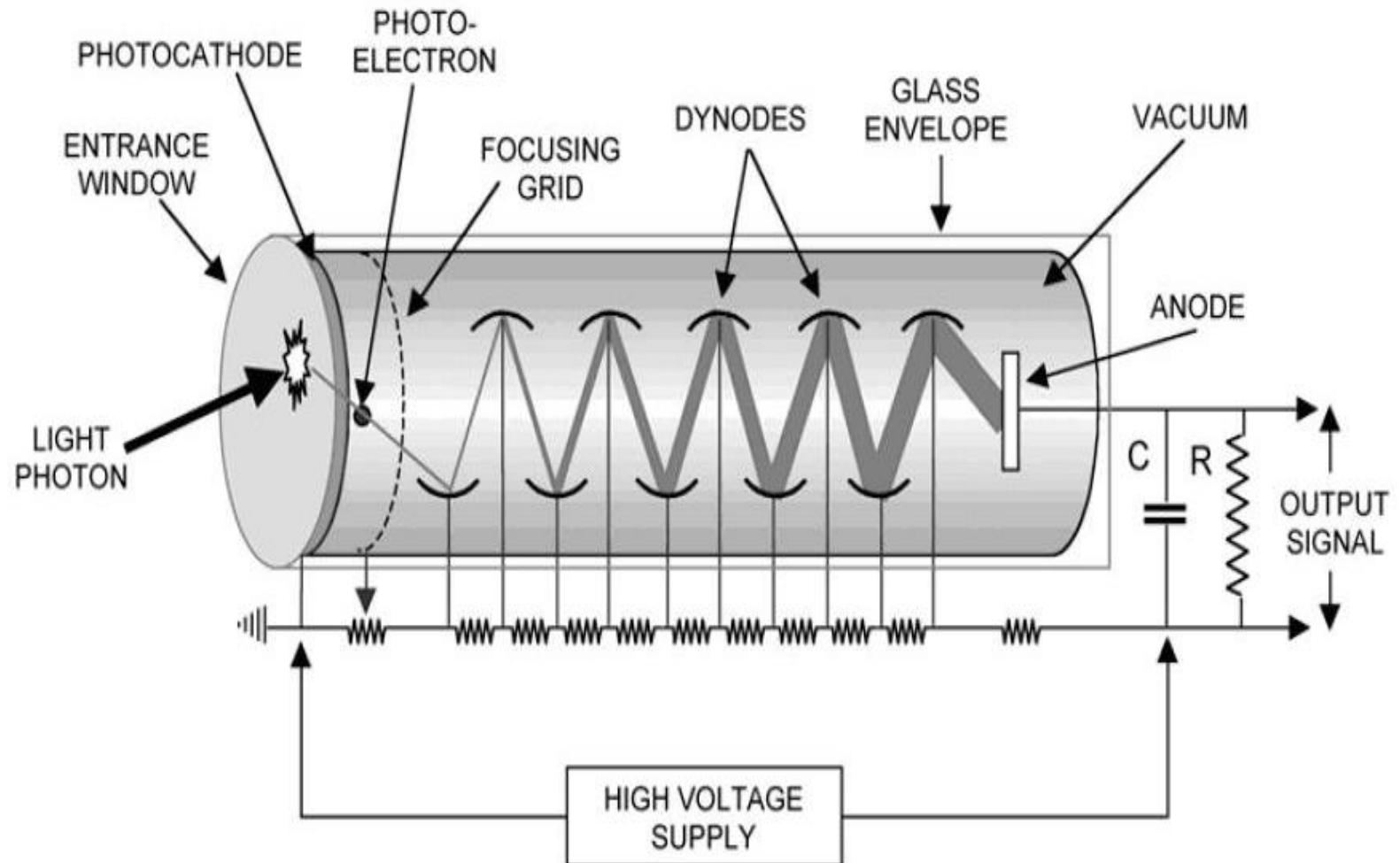
光电倍增管与探测器的耦合

为了使光电倍增管与光导或闪烁体之间有很好的耦合，可在采光面从中间向外均匀涂上一层硅油。

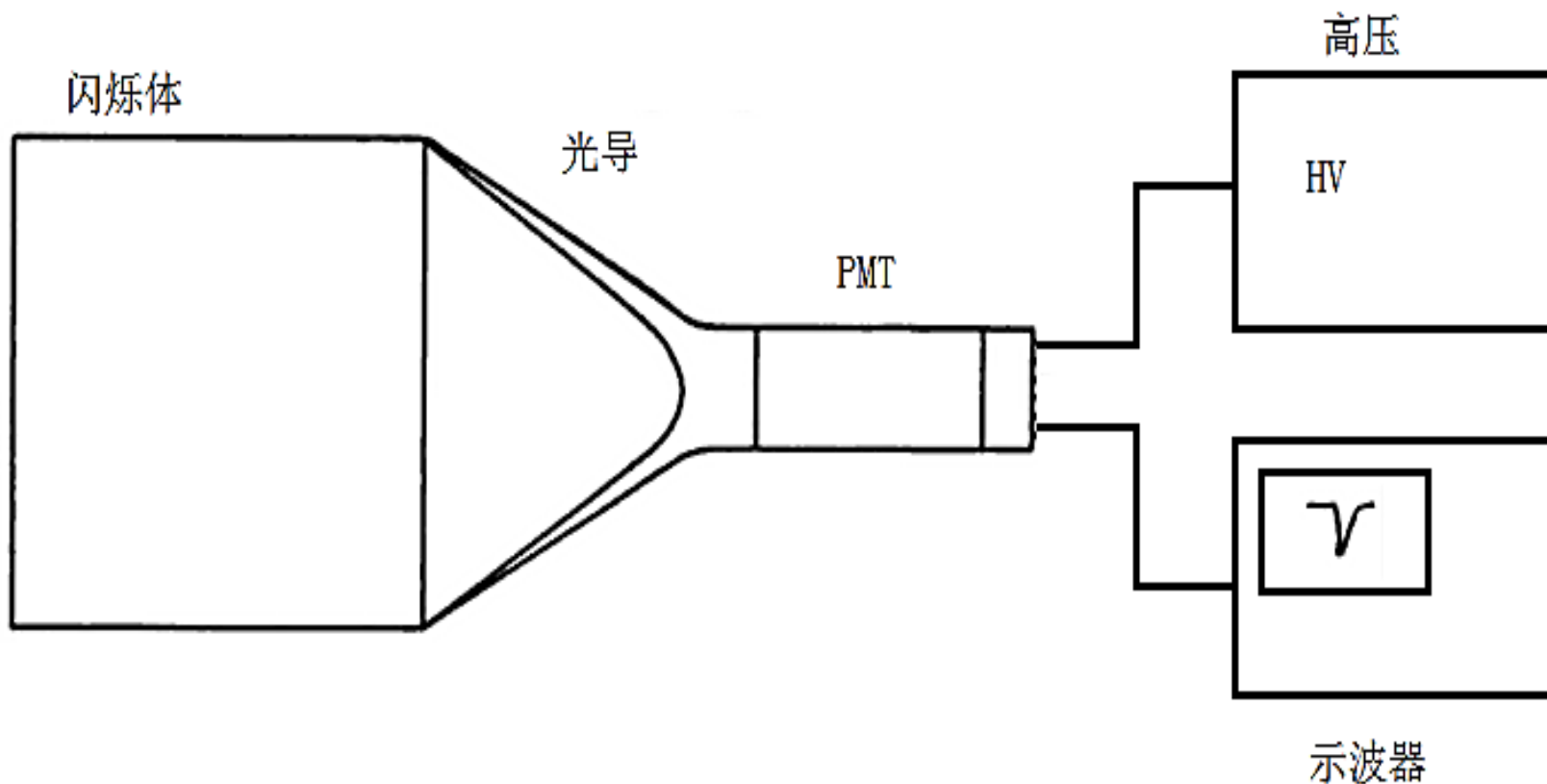


然后将光电倍增管重新装入金属保护壳，并将后盖旋紧。

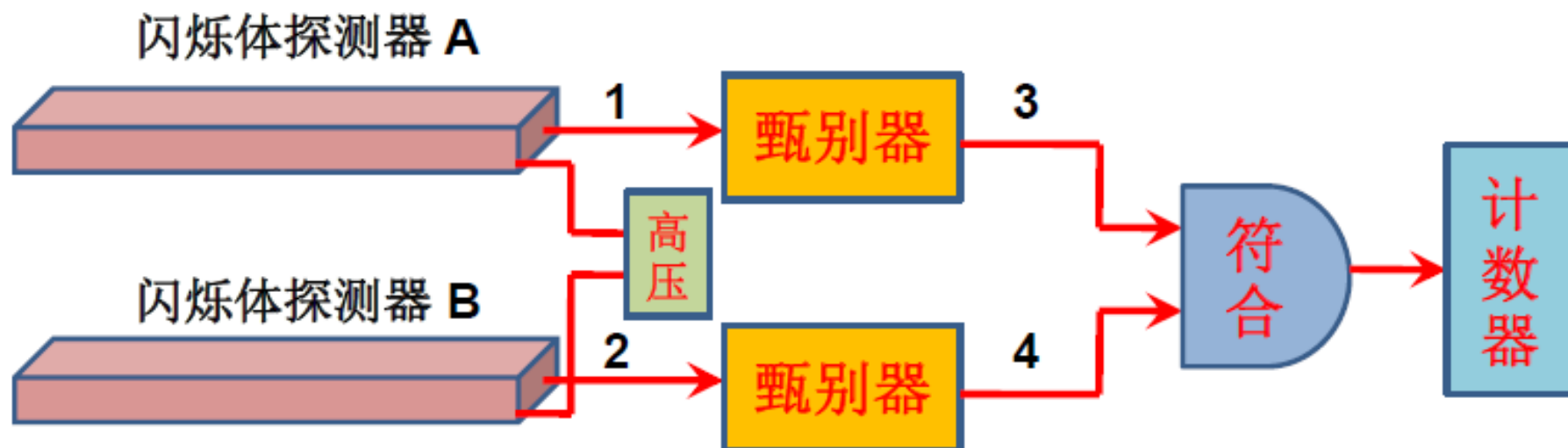
光电倍增管简介



观察高能宇宙线粒子信号



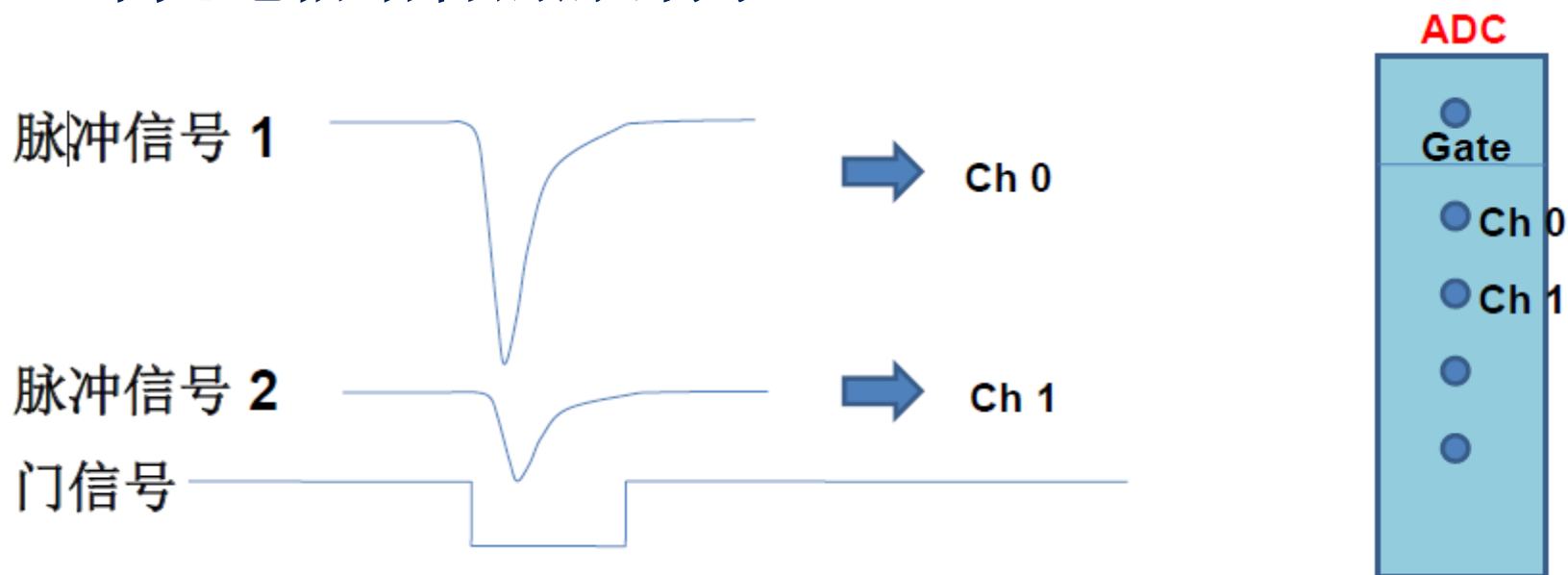
时间符合测量，组成宇宙线望远镜



- 连接光电倍增管的信号线与高压线，高压初始值设为**1500**伏；
- 利用示波器分布在**1**、**2**处观察光电倍增管输出信号随高压变化关系；
- 观察在没有**50**欧姆匹配电阻的情况下脉冲的变化与成因；
- 计算粒子穿过**A**、**B**给出信号到**1**、**2**处时，两者可能的最大时间差值；
- 按上图连接线路，用示波器观察**3**、**4**处甄别器输出的波形与符合情况；
- 用**3**处给出的脉冲做为触发在示波器观察**4**处给出的符合信号；
- 在计数器中记录**1**分钟内满足时间符合的事例数；
- 把**B**换为**A**的另一端，做双端时间符合，重复上述实验。

ADC Gate, 离线波形积分

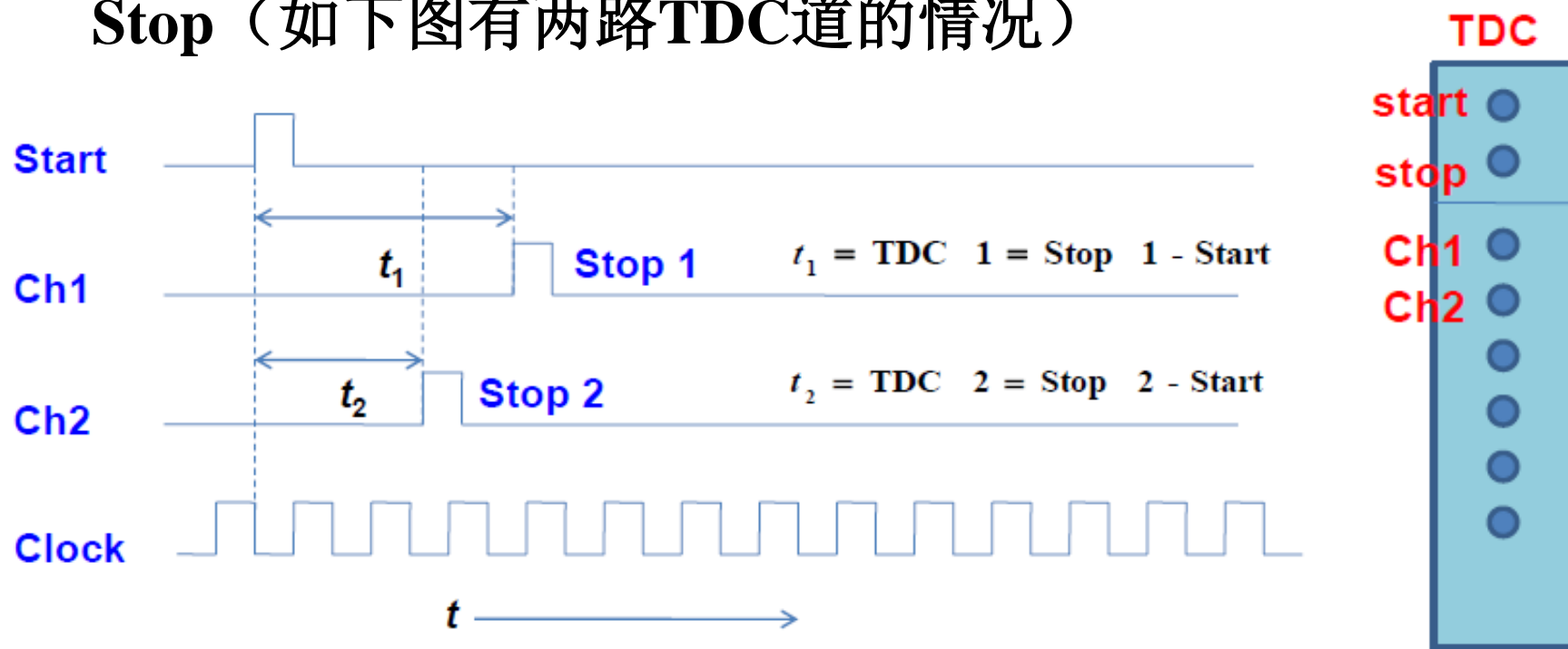
- 实验上通常需要测量脉冲的大小或对应的电荷量，正常光电倍增管的脉冲为



- ADC gate 就是给电子学插件一个门信号，使其对在门内的脉冲进行积分，得到对应的面积即电荷量。

TDC Common Start, 波形前沿

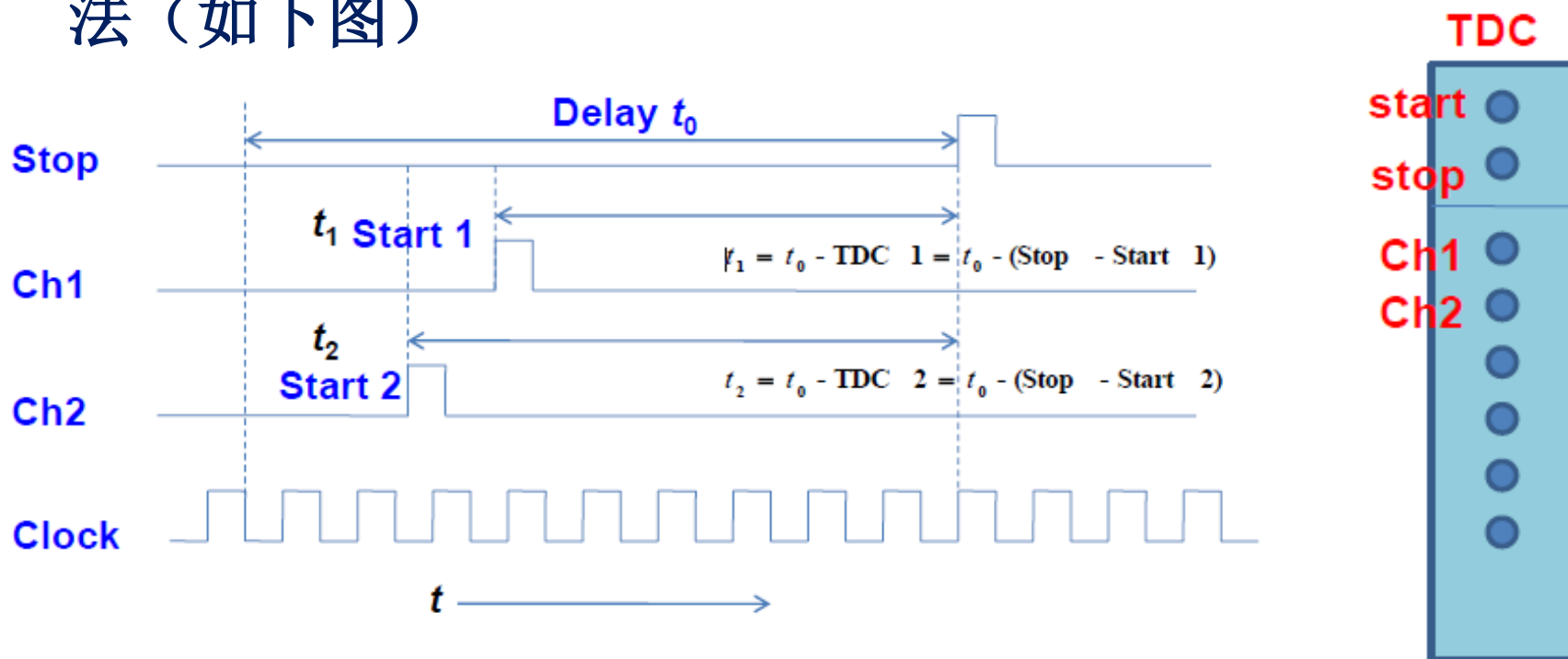
- 通常情况下，在TDC插件中时间的测量需要Start与Stop（如下图有两路TDC道的情况）



- 由于用作Start的电子学会引入延时，为使Ch1与Ch2的Stop一定在Start之后，需要对这两路进行延时。

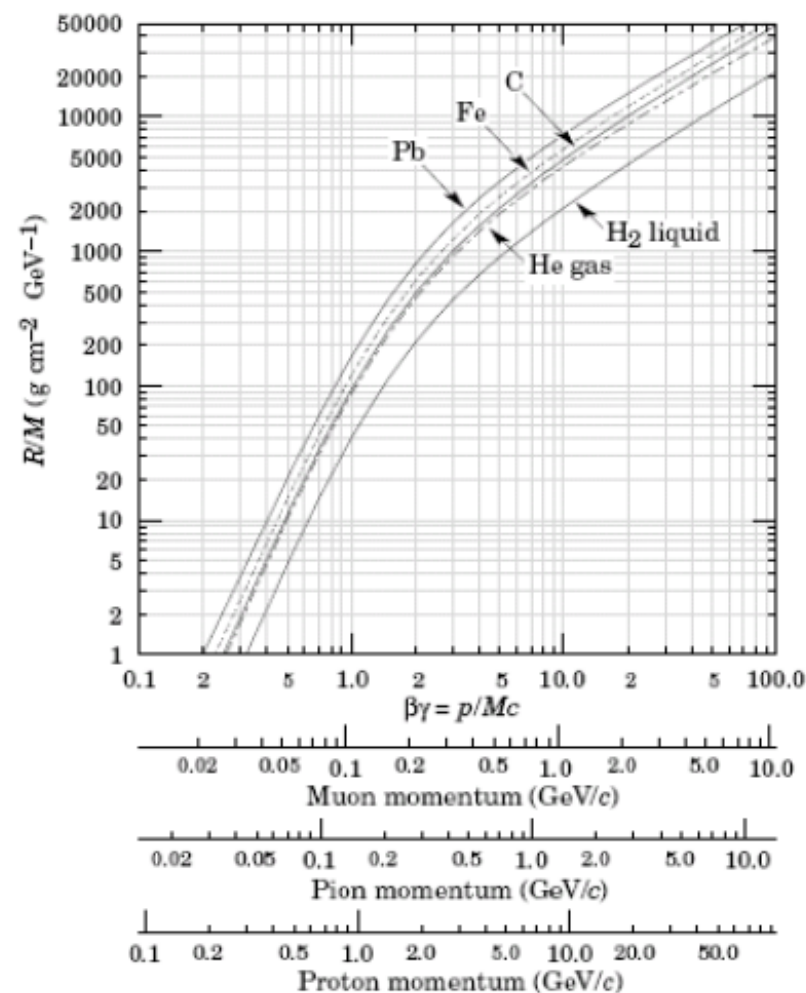
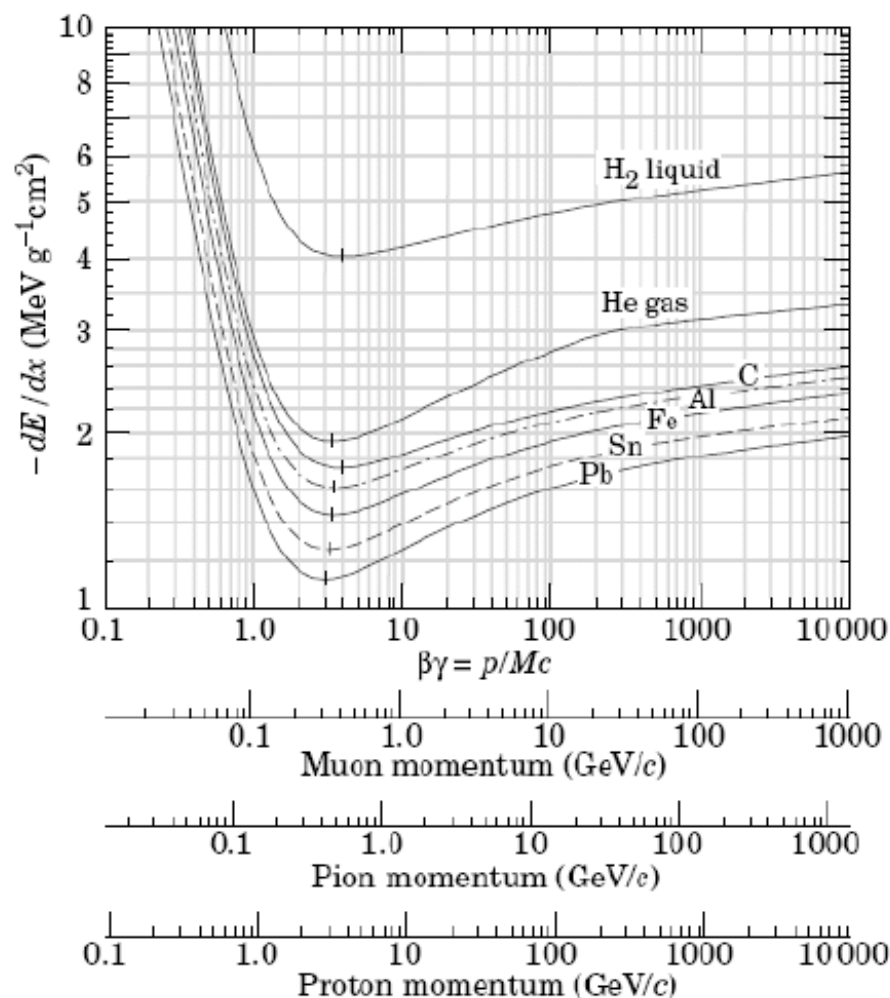
TDC Common Stop

- 如果延时的道数太多，就需要采用Common Stop的方法（如下图）



- 只要把用作Start的电子学道延时足够长的时间 t_0 ，用作Common Stop，就可以测多路的时间。

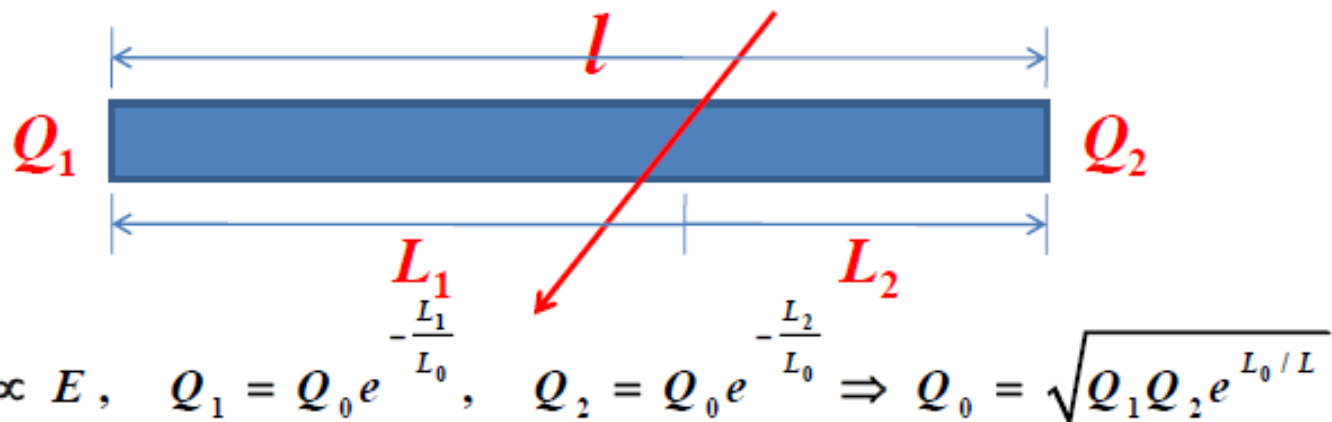
三种典型带电粒子在几种常用探测器物质中的平均能量损失比率 以及射程粒子质量比与动量的变化关系



(引自粒子数据组 PDG2007)

闪烁体能量测量

- 如果实验上可以对闪烁体两端读出光电倍增管的电荷测量 Q_1 与 Q_2 时，可以用来测量带电粒子穿过闪烁体时沉积的能量。令闪烁体的长度 l 和衰减长度 L_0



- 由于无论粒子击中闪烁体什么位置， l/L_0 均保持不变，因此可以把它吸收到电荷到能量转换系数中，因此

$$E = f \cdot Q_0 = f' \cdot \sqrt{Q_1 \cdot Q_2} \quad \longrightarrow \quad \text{可采用放射源或宇宙线确定系数 } f'.$$

缪子在闪烁体中的最小电离为：1.936MeVcm²g⁻¹，闪烁体密度：1.03gcm⁻³

利用双端电荷测量定位

- 如果实验上可以对闪烁体两端读出光电倍增管的电荷测量 Q_1 与 Q_2 时，按下式定义坐标时还可以确定粒子击中的闪烁体的位置

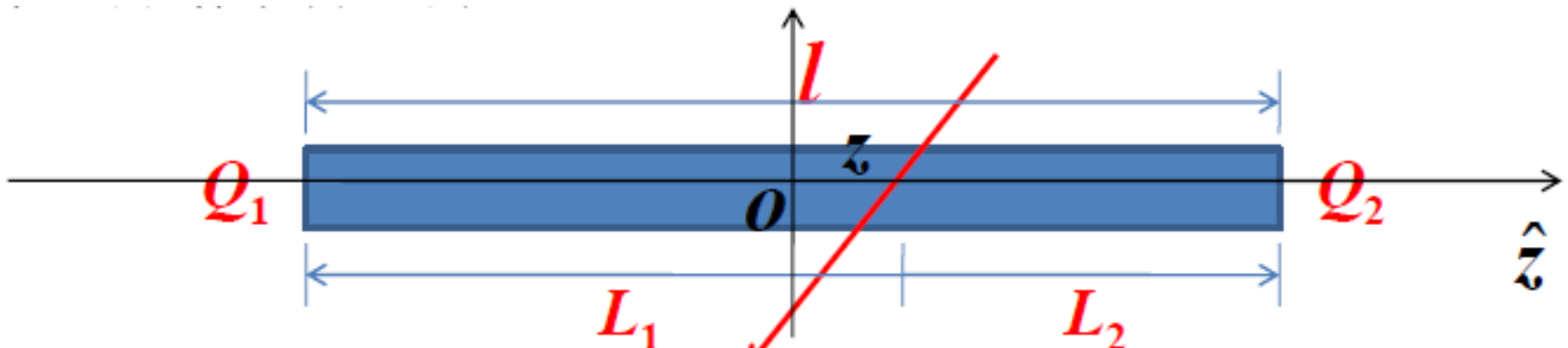


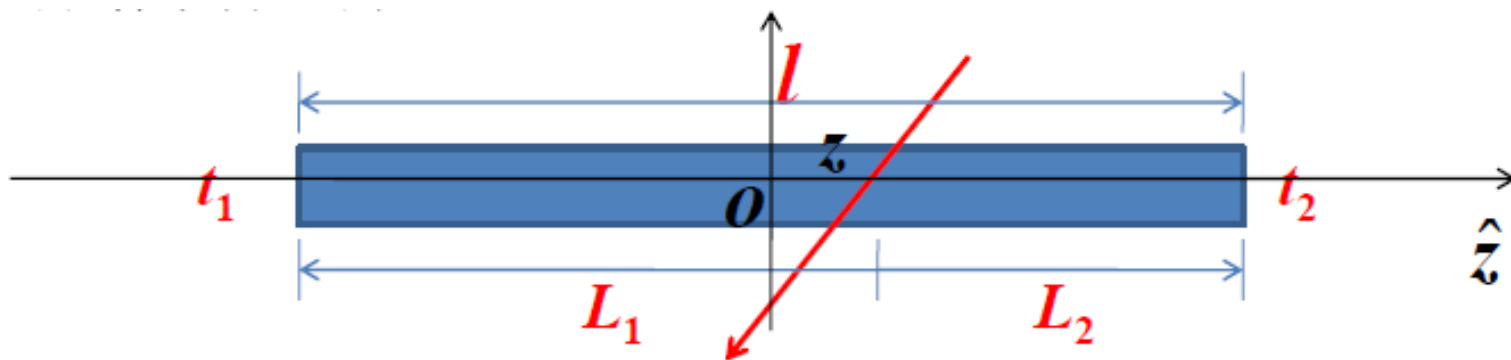
Diagram illustrating the setup for double-ended charge measurement for position determination. A horizontal scintillator of length l is shown, with charge measurements Q_1 and Q_2 taken at the left and right ends, respectively. The distance from the left end to the hit point is L_1 , and the distance from the hit point to the right end is L_2 . The hit position is z from the center O . A red arrow indicates the direction of the particle.

$$Q_0 \propto E, \quad Q_1 = Q_0 e^{-\frac{L_1}{L_0}}, \quad Q_2 = Q_0 e^{-\frac{L_2}{L_0}}, \quad L_1 = 0.5l + z, \quad L_2 = 0.5l - z$$

$$\Rightarrow z = \frac{\ln Q_2 - \ln Q_1}{2} = 0.5 \ln \frac{Q_2}{Q_1}$$

利用双端时间测量定位

- 如果实验上可以对闪烁体两端读出光电倍增管的时间测量 t_1 与 t_2 时，按下式定义坐标时还可以确定粒子击中的闪烁体的位置

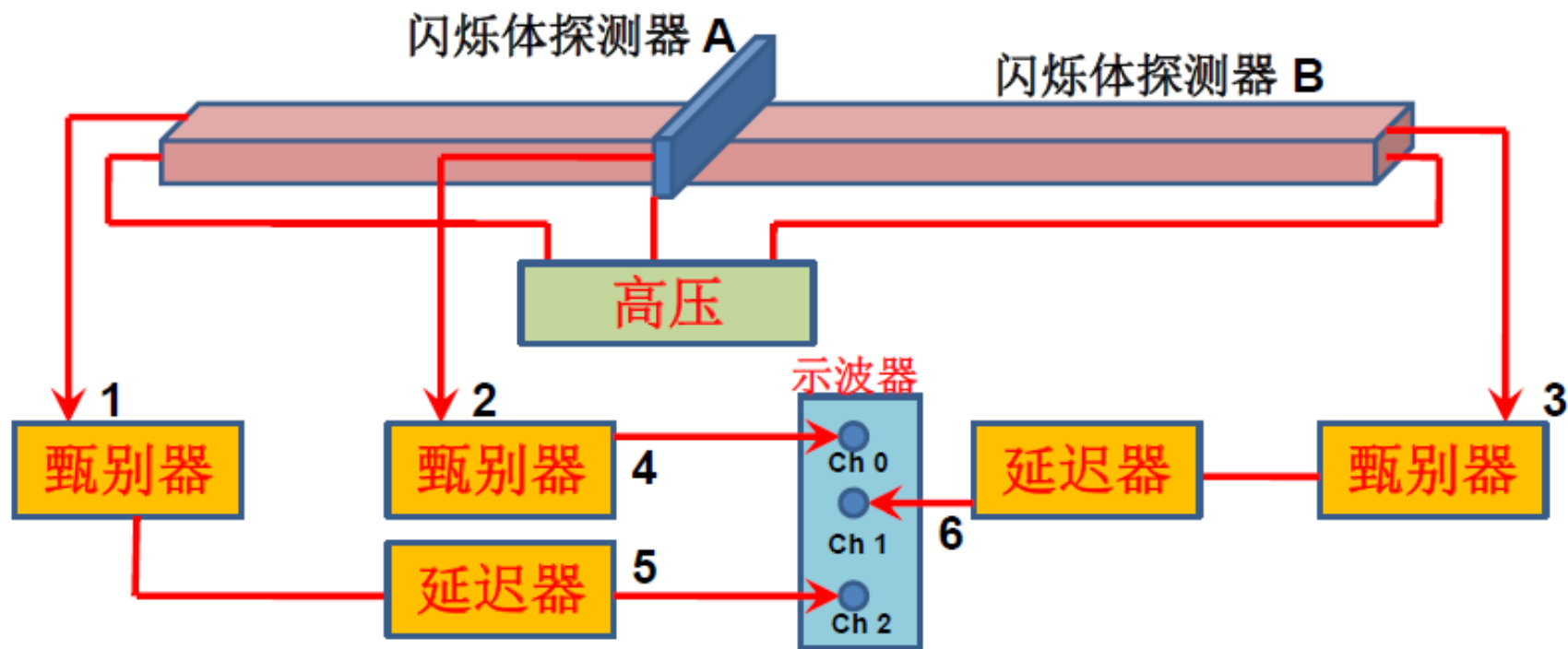


$$t_1 = L_1 / v = L_1 \cdot n / c, \quad t_2 = L_2 / v = L_2 \cdot n / c, \quad L_1 = 0.5l + z, \quad L_2 = 0.5l - z$$

➡
$$z = \frac{t_1 - t_2}{2} \cdot \frac{c}{n},$$

$$c = 299,792,458 \text{ ms}^{-1}, \quad n = 1.581$$

光在闪烁体中的传播



- 按上图连接线路，用示波器观察1、2、3处的脉冲信号；
- 将A置于B正中央，调整高压使1与3处的脉冲高度一致；
- 估计光从B不同位置到两端的时间差值，设置A与B的符合时间窗大小；
- 调整延迟器使A与B两端的信号脉冲落入符合时间窗内；
- 移动A，用示波器观察1/5与3/6时间差的变化；
- 调节1、3的甄别器，用示波器观察5与6时间差是否有明显变化。

探测器性质研究：衰减长度

- ▶ **基本原理：**闪烁光在闪烁体内传输时，由于光的吸收、散射等原因，光脉冲将逐渐减弱。不考虑几何因素时，光随着传输距离按下列方式衰减

$$N(x) = N_0 e^{-x/\lambda}$$

其中 N_0 为产生的光子数， x 为到发光点的距离，为衰减长度。利用宇宙线垂直穿过闪烁体不同位置时，具有等同的最小电离值，发光强度一致的特点，可以测量闪烁体的衰减长度。

- ▶ **实验的关键点：**如何确认看到宇宙线缪子穿过了？
- ▶ **实验的步骤：**根据基础实验给出的例子，画出探测器基本设置与电路图，在与指导教师讨论后，预约时间进行实验。

闪烁体探测效率

- ▶ **基本原理：**由于闪烁体老化、闪烁光在闪烁体的长距离传输衰减，以及在多数情况下要通过光导与光电倍增管过渡耦合，使光电倍增管输出脉冲幅度可能与噪音比较接近，而无法通过甄别阈而无法探测，形成效率问题。实验上可以利用宇宙线来定义横穿过待测的闪烁体探测器，从而达到测量探测效率的目的。
- ▶ **实验的关键点：**如何知道一定有宇宙线穿过待测闪烁体探测器；如何veto其它宇宙线的偶然符合；如何排除偶然符合的噪音；如何估计在1%的精度下所需的事例数与实验时间。
- ▶ **实验的步骤：**根据基础实验给出的例子，画出探测器基本设置与电路图，在与指导教师讨论后，预约时间进行实验。

闪烁体探测器的能量响应

- ▶ **基本原理：** 由于闪烁体有衰减长度的问题，因此对于同样的光强在闪烁体不同位置发光时，会给出不同的脉冲高度。如果不对所测量的能量响应按粒子穿越的位置进行修正，当衰减长度相对不够长时，会造成能量测量分辨率变差的问题。
- ▶ **实验的关键点：** 如何确定闪烁体双端给出的击中来自同一个闪烁光；如何 veto 其它宇宙线的偶然符合；如何排除偶然符合的噪音；如何保证宇宙线是垂直入射的；如何确定ADC的门宽；如何确保闪烁体双端测量的ADC值可以正确地叠加。
- ▶ **实验的步骤：** 根据基础实验给出的例子，画出探测器基本设置与电路图，在与指导教师讨论后，预约时间进行实验。

缪子通量

- ▶ **基本原理：**宇宙线缪子通量在海平面中的大小大约为每分钟每平方厘米约为1个，该数值包含了所有方向。由于宇宙线缪子基本不可能穿过地球，因此，它们都是来自天空的方向。对通量的测量需要包括来自所有方向的宇宙线。
- ▶ **实验的关键点：**如何包含不同方向的缪子；如何排除偶然符合的噪音。
- ▶ **实验的步骤：**根据基础实验给出的例子，画出探测器基本设置与电路图，在与指导教师讨论后，预约时间进行实验。

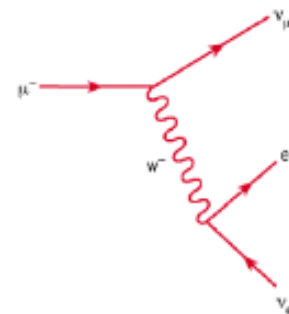
缪子角分布

- ▶ **基本原理：**如果大气层外的宇宙线各向同性，它们与大气中的原子相互作用后，产生的次级粒子也保持原有方向，那么由于路程的长短关系，会造成大气层对宇宙线的吸收大小有不同，因此在地面上观察到的缪子流强与天顶角有很大的关联。
- ▶ **实验的关键点：**如何测量不同方向的缪子；如何排除偶然符合的噪音。
- ▶ **实验的步骤：**根据基础实验给出的例子，画出探测器基本设置与电路图，在与指导教师讨论后，预约时间进行实验。

缪子寿命

- ▶ **基本原理：**在粒子物理标准模型理论中，零级近似下缪子的衰变几率为国际平均值：

$$\lambda_{\mu} = \frac{1}{\tau_{\mu}} = \frac{G_F^2 m_{\mu}^2 c^2}{192 \pi^3 \hbar^7}$$



国际平均值： $\tau_{\mu} = (2.19703 \pm 0.00004) \times 10^{-6} \text{ s}$

- ▶ **实验的关键点：**如何让缪子停止并衰变；靶材质的选取；如何veto其它宇宙线的偶然符合；如何确认时间测量的正确性；如何排除偶然符合的噪音。
- ▶ **实验的步骤：**根据基础实验给出的例子，画出探测器基本设置与电路图，在与指导教师讨论后，预约时间进行实验。

缪子衰变能谱的测量

- ▶ **基本原理：**正负缪子衰变产生的末态正负电子均称为米歇尔电子

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \quad \mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

在母体缪子静止衰变的情况下，米歇尔电子能谱应具有如下形式：

$$dN_e / dx = 2(3 - 2x)x^2, \quad x = 2 p_e / m_\mu$$

利用低能宇宙线在闪烁体靶停止并衰变的事例，来测量米歇尔电子能谱

- ▶ **实验的关键点：**如何veto其它宇宙线的偶然符合；如何排除偶然符合的噪音；如何尽最大的可能降低可测的米歇尔电子能量阈值；如何确保能量测量的精度。
- ▶ **实验的步骤：**根据基础实验给出的例子，画出探测器基本设置与电路图，在与指导教师讨论后，预约时间进行实验。

实验前要准备的知识（1）

- 1.宇宙线中的缪子是如何产生的？
- 2.为什么在海平面上接收到的缪子要比电子多得多？
- 3.宇宙线中带电粒子的正负电荷比会一样吗？为什么？
- 4.为什么高空产生的缪子可以到达地面而不衰变？
- 5.为什么缪子流强会与天顶角有关？
- 6.宇宙线缪子沿地心穿过地球所需的最小能量是多少？
- 7.能否估计地球每天从宇宙线中吸收的能量的大小？
- 8.高能缪子穿过5厘米厚的闪烁体时会沉积多少能量？

实验前要准备的知识（2）

1. 实验中经常描述两个信号是“同时”的，“同时的”概念是什么？
2. 采用闪烁体探测器时，时间与电荷是如何测量的？
3. 表征闪烁体探测器好坏有什么指标？
4. 测量粒子能量有哪几种方法？
5. 实验中“甄别阈”概念与“触发”概念分别是什么？
6. 电脉冲在电缆中传播的速度大约是多少？
7. 光电倍增管输出的信号与甄别器输出的信号有什么别？
8. 用示波器测量信号时，为什么要注意“阻抗匹配”问题？
9. NIM、TTL与ECL逻辑信号的电平是多少？
10. 什么是TDC、ADC？

一些英文的关键词

A. Physics related key words:

cosmic ray、 generation of cosmic ray muon、 cosmic ray muon flux、 zenith angle、 cosmic ray composition、 proton、 neutron、 electron、 π meson、 μ lepton、 neutrino、 decay、 polarization、 parity、 spin、 helicity、 lifetime、 capture、 Auger electron、 Michel electron、 minimal ionization、 dE/dx 、 range、 multiple scattering

B. Detection related key words:

plastic scintillator、 light guide、 wavelength shifter、 PMT、 coaxial cable、 time shift、 time jitter、 LEMO connector、 resistance match、 trigger logic、 coincidence and anti-coincidence、 delay、 dead time、 discrimination、 fan-in and fan-out、 TDC、 ADC、 CAMAC、 NIM、 VME、 PCI、 driver、 band width、 rising edge、 trailing edge、 discrimination threshold、 trigger threshold、 detecting efficiency、 target matter、 MIDAS、 ROOT

设备列表（1）

A. 机箱

1. ORTEC 4001C, MIM 机箱
2. DSP Technology, CAMAC 机箱
3. Wiener VME 6-U 机箱

B. 高压电源

1. CAEN SY 2527, 48 路高压机箱
2. CAEN SY 127, 40 路高压机箱
3. BERTAN 5 千伏, 2 路NIM标准高压插件
4. NHQ 104L-S, 4kV/1mA, 2 路NIM标准高压插件
5. FH4304 单路NIM标准高压插件

设备列表（2）

C. CAEN公司生产的NIM标准电子学插件

1. **CAEN N93B, Dual Timer** （双路计时器）
2. **CAEN N108A, Dual Delay** （双路延迟）
3. **CAEN N110, Dual Attenuator** （双路衰减）
4. **CAEN N840 8-ch LED** （8路前沿甄别器）
5. **CAEN N405, 3-Fold Logic Unit** （3重逻辑单元）
6. **CAEN N455, Quad Coincidence Logic Unit** （四重符合逻辑单元）
7. **CAEN N625, Quad Liner Fan-In Fan-Out** （四重线性扇入与扇出单元）
8. **CAEN V976, 4-Fold Coincidence Fan-In Fan-Out** （四重符合扇入与扇出单元）
9. **CAEN N454, 4-8 Logic Fan-in, Fan-out** （四重逻辑符合扇入与扇出单元）

设备列表（3）

D. **LeCroy**及其它公司生产的**NIM**标准电子学插件

1. **LeCroy Model 365AL 4-Fold logic unit** （四重逻辑单元）
2. **LeCroy Model 4608C OCTAL Discriminator** （八重甄别器）
3. **LeCroy Model 622, QUAD coincidence** （八重符合）
4. **LeCroy Model 222, Dual Gate Generator** （双路门产生器）
5. **ORTEC 974 QUAD Counter/Timer** （四路计数/定时器）
6. **Phillps Model 755, 4-FOLD Logic Unit** （四重逻辑单元）

E. **CAMAC**标准电子学插件

1. **LeCroy 2228A 8路TDC**
2. **LeCroy 2249A 12路ADC**
3. **LeCroy 3377 32路TDC**
4. **Phillips 7106, 16路 Discriminator/LATCH** （甄别/锁相）
5. **KCS 3922 Parallel Bus Camac 机箱控制器**