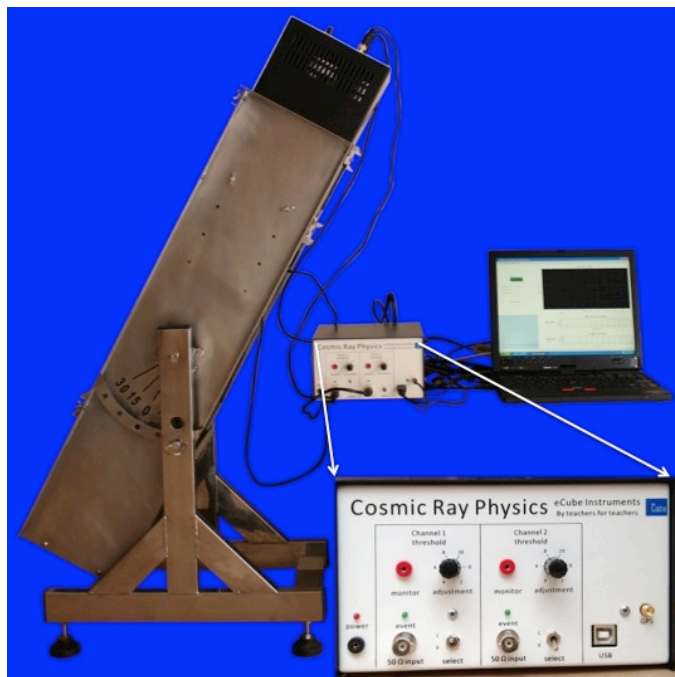
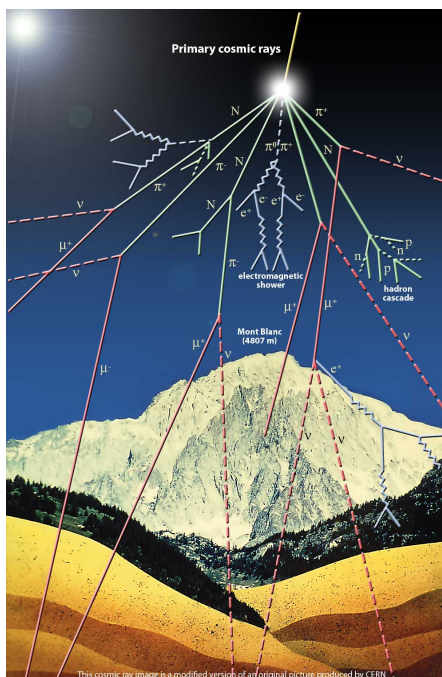


宇宙线物理教学实验 设备 3.1 型 (CRP V3.1)

eCube 仪器设备责任有限公司
(eCube Instruments LLC, Texas, USA)
广西南宁市自旋教学实验设备有限公司

2014 年 8 月



左图：大气中宇宙线的形成。图来源 http://www.science20.com/quantum_diaries_survivor/highestenergy_cosmic_rays_augur。
右图：宇宙线物理教学实验设备 3 型(CRP3)。该设备由置于支架中的上下探测器，读出主机和读出软件构成(不包括计算机)。支架可以将探测器指向垂直向上以及 15 和 30 度的方向从而通过上下探测器信号的符合来测量宇宙线通量随角度(地磁，当加上 GPS 的定位信息)的变化，适用于半天的基础物理实验课。下探测器中的大体积塑料闪烁体提供 μ 子衰变寿命测量，对学生提供包括数据分析和统计假设检验在内的数星期高级物理实验训练。加上 GPS 定时定位信息和多设备数据分享后的离线数据符合分析更为学生提供研究型，竞赛型和论文型的平台。

目录

实验意义	3
实验原理	6
设备使用	11
参考文献	12

实验意义

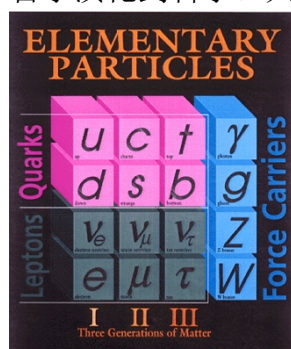
空气，水和食物是人类生存的根本。文字语言是人与人交流和社会形成的基础。数学是所有科学和工程学科的语言，而物理则是所有自然科学发展和工程设计的基石。这就是为什么语文，数学和物理教学存在于所有的高中和大学基础课程中的原因。

物理往往被人们视为很高深困难的一门学科，尤其是近代物理，比如量子物理，相对论理论等等。然而近代物理广泛存在于人们的生活中：没有量子物理就没有半导体工业，人们也就没有电视，电脑，手机和其它几乎所有的电器。广义相对论在卫星全球定位或导航仪（北斗，GPS, GLONASS 等）中起很重要的作用。开车去新地方的朋友都知道这种导航仪是多么大的帮助。

为了培养出更多更好的科学家和工程师，物理教学非常重要。物理教学中的教学实验有助于将抽象的概念形象化，概括的公式具体化。物理教学实验仪器设备在中国已有长足的发展。但近代物理教学实验仪器设备在中国还需与时俱进，赶上发达国家。在核及粒子物理方面我们尤为欠缺。在这方面 eCube 仪器设备责任有限公司愿意和广大物理教师一道做出贡献。

和以发展于十七世纪的牛顿力学为代表的经典物理相比，近代物理发展于二十世纪并以量子力学和相对论为代表。经典物理的研究对象为大尺度(原子尺度以上) 和低速（远低于光速）的物体。近代物理的研究对象则为小尺度(原子尺度以下) 和高速（接近光速）的物体。从这里已看出进行近代物理教学实验的困难。

从我们祖先的“天有五行，水火金木土，分时化育，以成万物”到俄国科学家门捷列夫(Dmitri Mendeleev)于 1869 年首创的元素周期表可谓人类对物质起源的认识从哲学演化到科学。人类找寻宇宙万物的基本组成单元及其相互间作用力的努力一直



推动着科学的发展和技术的进步。上世纪后期完成的基本粒子表（如左图）奠定了我们对宇宙的认识。我们的世界由第一代基本粒子（ u , d 夸克，电子 e 和电子中微子 ν_e ）构成。第二，三代基本粒子存在于宇宙形成的初期，现在的宇宙线和人造的大型加速器中。比如，最重的顶夸克（Top 或 t quark）于 1995 年在美国费米国家实验室被发现。中国科学院高能物理所对 τ 轻子质量的精确测量是世界公认的重大贡献。我们已知的电磁，强和弱相互作用则由最右一列的力传播子实现。人们对重力的认识还很不够，重力的传播子不在此表中。现在粒子物理的前沿之一是在中微子的研究上。我们现在知道，宇宙中 95% 以上是由暗物质和暗能量组成。暗物质的探测是目前科学上的“兵家必争之地”。在教学中让学生接触到这些基本粒子将大大缩短他们今天的学习和今后科研的距离。可是，如何将这些基本粒子引进教室呢？

在 eCube 我们利用大量存在于宇宙线中的 μ 子来为学生展开一套较完整的近代物理实验。该设备，从最初的 1 型发展到现在的 3 型，能满足从基础物理的 3 小时实验课到研究型，竞赛型和论文型的实验要求，充分体现设备的使用价值。由于 μ

子来源于“天赐”的宇宙线中，该实验无使用成本，也无需象多数的近代物理实验那样要学生接触放射线和放射源。狭义相对论中的时间膨胀效应使得在大气层上部产生的只有 2.2 微秒 (μs) 衰变寿命的 μ 子能到达地面。借助于粒子物理中通用的闪烁光探测技术和光电转换，快信号放大技术，以及现代电子学技术中的数字信号处理芯片可编程集成电路技术，我们实现了将基本粒子的测量“便宜地”搬进教室使其和学生们“见面”的目标。

作为南宁市自旋的开创性实验仪器，我们展示这一套经过多年研发的宇宙线物理教学设备。该设备由 eCube 仪器设备责任有限公司, eCube Instruments LLC, Dallas, Texas, USA 设计和研发，广西南宁市自旋教学实验设备有限公司生产和维护。如下图 (左图：上下探测器及支架；右图：读出主机面板)。



该仪器可以：

1 ▪ 测量宇宙线通量随与地面垂直角度度的变化。宇宙线中带正负电荷的粒子(μ 子)受地磁的不同作用会产生微弱的方向(东西南北)效应。学生也可以和位于不同学校的设备进行数据分享来研究宇宙线通量随经纬度的变化，甚至昼夜的变化，从而将一个课堂里的基础物理实验延伸到高级研究型实验。

2 ▪ 测量宇宙线中 μ 子的平均寿命，从而验证原子核及粒子物理中的一个普遍而重要的衰变公式：

$$N(t) = N_0(t_0)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

此处 $N(t)$ 为在时刻 t 的粒子数。 $N_0(t_0)$ 为在时刻 t_0 的粒子数，也就是原初粒子数。 t 为时间变量。 τ 即为该粒子的平均寿命。

3 ▪ 训练学生决定实验条件和调试实验设备，从而认识测量过程和测量结果之间的关系，学习分析物理本底和排除设备噪声事例。

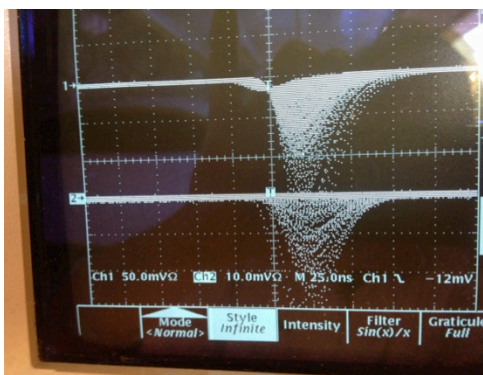
- 4 ▪ 训练学生认识数据的随机性和统计性，用适当的统计数学理论由浅而深地处理不同时期的数据，并对结果的统计置信度进行评估。
- 5 ▪ **演示和验证爱因斯坦狭义相对论中的时间延长效应。**为了能直接验证狭义相对论，实验者需要有一物体运行在接近光速（每秒 30 万公里，或绕地球 7 圈半）的速度，同时该物体上有一时钟，实验者要能读出该时钟显示的时间。这样的要求听起来近乎不可能做到，尤其不能在教学实验中做到。因为教学实验要求简单，快捷，还有便宜。这也是为什么我们的仪器是世界上唯一能完成此项教学实验的设备。具体步骤将在后续的可开设实验文档中讨论。
- 6 ▪ **当多台分布在同一校园内的设备**联合使用时，学生可应用 GPS 提供的位置和时间信息进行宇宙线事例的符合分析，从而进行对宇宙线簇射的研究并进而对宇宙线原初粒子作初步的测量。这也将在今后的可开设实验文档中讨论。

在 eCube 和南宁市自旋我们有物理学工作者，大学教授和多年从事高科技研发的高级工程师。我们的宗旨是发展中国的教学实验仪器。我们的理念是应用现在的电子学技术将历史上各个学科中划时代的实验搬进教室。让学生们**在实验中学习**和**从学习中创造**。

实验原理

在本节中我们讨论粒子物理中常用的一种探测技术：用粒子在一些物质中产生的闪烁光探测粒子的特性。然后我们讨论实验物理中的一个常用测试手段：符合测量，以及一个基本的参数测量：粒子衰变寿命的测量。最后我们介绍该宇宙线物理教学设备的构造，光电转换及电子学读出系统，以及获取的数据格式。

闪烁光和闪烁体：高能带电粒子在物质中运动时会激发物质中原子或分子的轨道电子。这些电子在退激发时能量以电磁辐射的形式发出。当此电磁辐射为荧光时，被称为闪烁光，而发此荧光或闪烁光的物质则被称为闪烁体。比如 α 粒子照射在硫化锌的玻璃上可产生荧光的现象早在 1903 年就为人们所发现。1909 年卢瑟夫划时代的 α 粒子散射实验（发现了原子核从而建立了卢瑟夫原子模型）就是靠 α 粒子在硫化锌中产生荧光来进行的。闪烁体分无机，有机闪烁体；气体，液体和固体闪烁体。以水为基体的闪烁体的研发是目前探测器科学的前沿并用于中国的大亚湾中微子实验，取得了国际上认可的一流科研成果。



符合测量：符合测量用于检测两个和两个以上探测信号的同时性。左图显示的是该宇宙线物理教学设备中上下探测器光电倍增管输出信号的相对时间（在示波器上用一路输出出来触发第二路输出信号）。输出信号脉冲底部宽度为 75 ns（纳秒）。从图上可以看出，如果我们把 100 ns 时间窗口定为符合测量中的“同时”，我们可以记录穿过上下探测器的同一个 μ 子。由于在海平面的 μ 子通量为 0.8 粒子 / cm^2 /分钟，上下探测器的单独计数率为 10-15 Hz，在

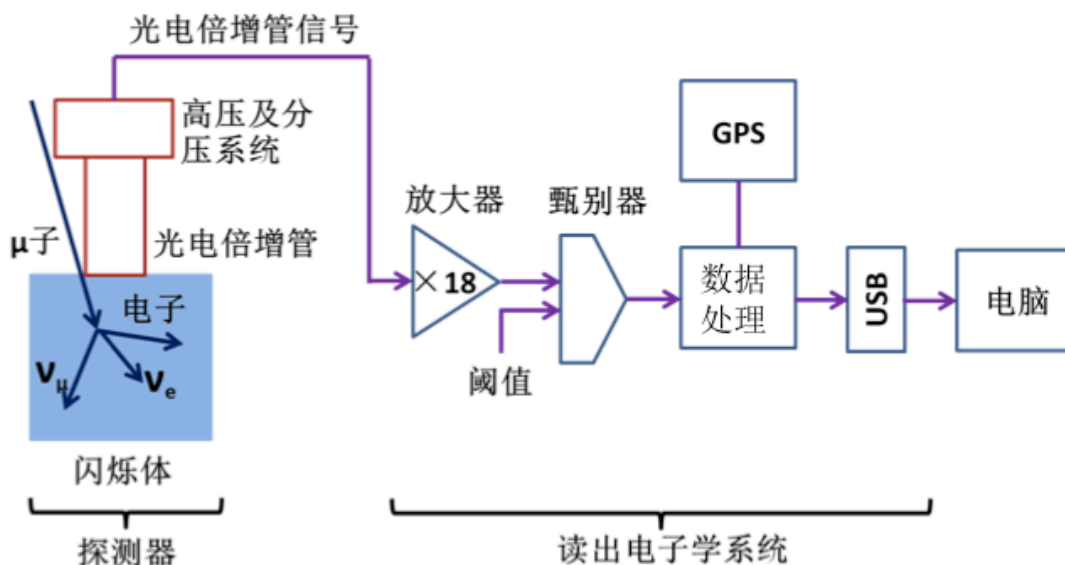
100 ns 时间窗口里有两个 μ 子分别通过上下探测器的可能性几乎为零。

粒子衰变寿命的测量：设一种粒子在 dt 时间内的衰变数 dN 和粒子在此时刻 t 的粒子总数 $N(t)$ 成正比，即： $-dN = \lambda \cdot N \cdot dt$ 或 $-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$ 。公式中的比例系数 λ 称

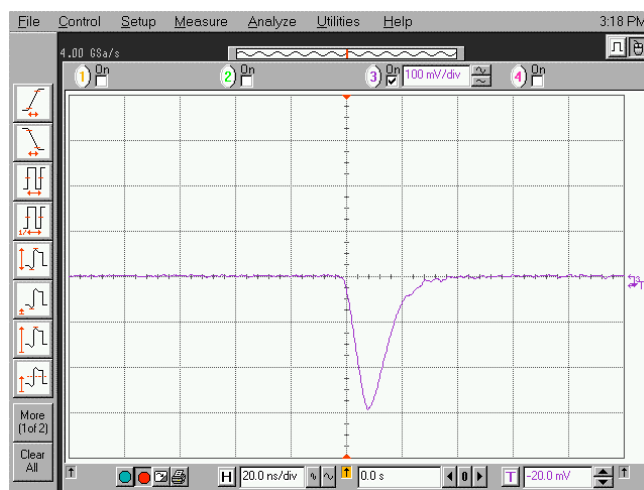
为衰变常数。该公式的积分形式为： $N(t) = N(t=0) \cdot e^{-\lambda t} \equiv N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ 。公式中定义 $N_0 \equiv N(t=0)$ 为在开始计时那一时刻的粒子总数； $\tau \equiv 1/\lambda$ ，称为粒子寿命，是粒子的基本属性之一。在讨论同位素衰变时，也常用半衰期 $\tau_{1/2}$ 来表述核素的寿命，它指的是不稳定核素衰变到原来数目的一半时需要的时间。显然， $\tau_{1/2} = 0.693\tau$ 。由

上述公式： $-dN = \lambda \cdot N \cdot dt = \lambda N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot dt$ ，通过记录在时刻 t 的粒子衰变数 dN ，即可拟合出粒子寿命 τ 。

设备构造，光电转换，电子学读出和数据格式：该宇宙线物理教学设备由两台探测器（分为探测器 1 或下探测器和探测器 2 或上探测器）和读出电子学系统两部份组成，其一路探测器加读出电路如下图所示。



探测器由固体塑料闪烁体，光电倍增管及高压电源系统构成。光电倍增管将带电粒子产生的微弱光信号转变为电信号并放大约一百万倍。光电倍增管的输出信号经 $50\ \Omega$ 同轴电缆送至输入阻抗为 $50\ \Omega$ 的二级放大电路。如果将此信号接入示波器（ $50\ \Omega$ 输入，输入的模拟带宽 $> 250\ \text{MHz}$ ），我们可以观察到如下图所示的负电压信号。



该信号在反向放大约 20 倍后由甄别阈值的快速甄别器去掉噪声，选出信号及时间。该时间信号被送入数字信号处理的可编程芯片。在该芯片内我们对信号根据读出主机面板上选择(select)开关的选项进行处理。选项列表和功能如下：

通道 1 选择开关	通道 2 选择开关	数字信号处理芯片作如下的处理
1	1	通道 1 与 2 的符合计数 [*]
1	0	通道 1 计数和 μ 子衰变寿命测量 ^{**}
0	1	通道 2 计数和 μ 子衰变寿命测量 ^{**}
0	0	通道 1 与 2 计数的反符合计数 ^{***}

*：即通道 1 与 2 的逻辑“AND”。

**：由于上探测器（探测器 2）由一片较薄的闪烁体构成，仅适合用于计数，不适于 μ 子衰变寿命测量。当进行 μ 子衰变寿命测量时，请用下探测器（探测器 1）。当选 01 组合时，可作为寿命测量中本底测量的一种方法。

***：即通道 1 与 2 的逻辑“XOR”。

当宇宙线粒子在闪烁体内停下并衰变时，数字信号处理芯片会记录该粒子的衰变时间。由于在海平面可产生闪烁光的宇宙线粒子中 95%是 μ 子，其它是高能光子和电子，我们将所有被闪烁体记录的粒子归为 μ 子，所有的粒子衰变归为 μ 子衰变（光子和电子为稳定粒子，不衰变）。数字信号处理芯片的晶振时钟为 50 MHz，结合程序处理的方式，我们可以获得起始时间为 60 ns 后的 20 ns 时间测量精度。

当高能 μ 子进入闪烁体并产生闪烁光，数字信号处理芯片内的计时器即开始计时。如果这一个 μ 子直接穿过闪烁体，没有停下并衰变（绝大部分 μ 子是这样的），计时器计满 22 μ s（约寿命 τ 的 10 倍）即产生溢出信号，并复零。如果这一个 μ 子在闪烁体内停下并衰变为电子加两个中微子，该电子，从 μ 子的质量获得动能，会在闪烁体内产生第二个闪烁光信号。此信号将使计时器停止计时，并产生读出信号。

数据来源于两部分：GPS 接收器和探测器。数据格式由在数字信号处理芯片中的固件程序确定，并由 USB 用 ASCII 码写入电脑供进一步的处理。使用 ASCII 码是为学生后续的数据分析提供方便。数据的含义取决于主机面板上选择(select)开关的选项（11，10，01，或 00）。数据以每一秒为单元输出到电脑，如下图所示。

当开关选择为 10 或 01 时：

&GPGGA,035900.000,3302.4578,N,09654.6548,W,2,09,0.8,167.3,M,24.0,M,2.8,0000*42

&GPGLL,3302.4578,N,09654.6548,W,035900.000,A,D*4C

&GPRMC,035900.000,A,3302.4578,N,09654.6548,W,0.00,,010414,,,D*65

&GPVTG,,T,,M,0.00,N,0.0,K,D*16

44E912265D

44E94B2DCD

44E9F0C88F

234A241BC4
44EAC7F1AF
44EAD416D8

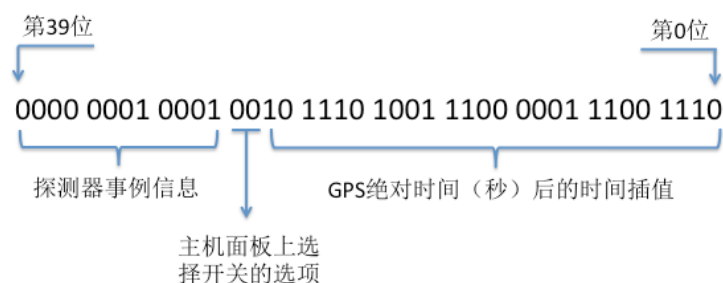
当开关选择为 11 时：

&GPGGA,040100.000,3302.4578,N,09654.6548,W,2,10,0.8,167.3,M,-24.0,M,1.8,0000*43
&GPGLL,3302.4578,N,09654.6548,W,040100.000,A,D*46
&GPRMC,040100.000,A,3302.4578,N,09654.6548,W,0.00,,010414,,,D*6F
&GPVTG,,T,,M,0.00,N,0.0,K,D*16
001DFFD688
002E202C8F

当开关选择为 00 时：

&GPGGA,040153.000,3302.4578,N,09654.6548,W,2,10,0.8,167.3,M,-24.0,M,1.8,0000*45
&GPGLL,3302.4578,N,09654.6548,W,040153.000,A,D*40
&GPRMC,040153.000,A,3302.4578,N,09654.6548,W,0.00,,010414,,,D*69
&GPVTG,,T,,M,0.00,N,0.0,K,D*16
003030ECAD
0051C040A1
00626C9813
0082B93749
00A2D6F56C
00D2D74325
00F2E9C15A
0112E9C1CE

数据的第一部分来自 GPS 接收器，为标准的 GPS 数据格式。数据中含有位置信息（地理坐标）和准确到秒的绝对时间（GPS 中的 PPS 信号，精度为约 1 微秒）。数据的第二部分是一行行的 10 位数字和字母，它们是发生在这一秒内的探测器事例和信息。该部分的数据为 16 进制码。每一个数字或字母代表 4 位 2 进制码，因此每一行 10 位数字和字母代表一个 40 位的 2 进制码探测器信息。左边为高位（第 39 位），右边为低位（第 0 位）。从左边数起，第 39 位至第 28 位是探测器事例信息，其含义在下面讨论。第 27 位和 26 位记录主机面板上选择(select)开关的选项（11，10，01，或 00）。第 27 位代表通道 2，第 26 位代表通道 1。第 25 位至第 0 位是该事例的时间在 GPS 提供的绝对时间秒内的以步长为 20 ns 的插值。比如 0112E9C1CE 事例记录的 2 进制码为 0000 0001 0001 0010 1110 1001 1100 0001 1100 1110，如下图所示，



其中从左数起的 0000 0001 0001 为是探测器事例信息，随后的 00 为主机面板上选择开关的选项，再后的 10 1110 1001 1100 0001 1100 1110 代表此事例在 GPS 给出的绝对时间（秒）后的 48873934 （此 26 位 2 进制码所代表的 10 进制数）个 20ns，也即 0.9774768 秒。这一相对于绝对时间秒的时间，结合 GPS 给出的绝对时间，提供了该事例的绝对时间从而为离线数据的符合分析提供了条件。在没有 GPS 信号时，时间精度由所用的计算机确定，一般为 1 ms. 在有 GPS 信号时，时间精度由所用的 GPS 接收器确定，一般为 1 μ s。

当开关选择为 10 或 01 时，第 39 位至第 28 位（共 12 位）是被选中（开关为 1）的探测器（通道）中的时间信息。比如，44E 对应十进制的 1102。乘上单位 20ns，即为 22030ns 或 22.03 μ s，表示一个直接穿过闪烁体的 μ 子。当此三位数小于 44E 时，比如 234，对应十进制的 564，乘上单位 20ns，即为 11280ns 或 11.28 μ s，这是一个 μ 子在闪烁体内停下并衰变为电子和中微子，衰变时间为 11.28 μ s。简单数一下在一秒内有多少这样的 10 位数字和字母记录就可以知道有多少 μ 子到达了被选中的探测器。

当开关选择为 11 时，探测器 1 和 2 进行符合计数。符合时间为 100ns。此时第 39 位至第 28 位（共 12 位）的探测器信息为一简单的计数器。每秒钟内的计数可以由最后一条记录获得，也可以数记录数（尤其当此秒钟内没有事例时）。

当开关选择为 00 时，探测器 1 和 2 进行反符合计数。反符合时间为 100ns。此时第 39 位至第 29 位（共 11 位）的探测器信息为一简单的计数器来记录此反符合计数。第 28 位为 0 时代表通道 1 被击中，为 1 时代表通道 2 被击中。

用 GPS 获得的绝对时间对分布在大约 10 平方公里（约一个大学校园的面积）的多个实验设备所获取的数据进行离线的符合（同时性）分析，学生可以对多个宇宙线物理题目进行研究。这将在后续的可开设实验文档中讨论。

设备使用

该设备可在实验楼的任何位置使用，但当多台设备联网用于宇宙线簇射测量时，为了避免不同楼层对宇宙线的不同吸收，建议将设备安放在建筑物的同楼层的房间里，或顶层房间里。GPS 天线须安放在面南的窗户内侧但紧靠玻璃。每一台设备收集的数据可以单独使用，也可以集中在一起使用。这将在后续的可开设实验文档中讨论。这里我们只介绍如何调试单台设备。

该设备为探测器和读出电子学电路分体式。该设备的工作温度为从 -40°C 至 $+25^{\circ}\text{C}$ ，或在有强制通风（电风扇）的环境里可工作至 $+40^{\circ}\text{C}$ 。交流供电为 100 – 240 V, 50 – 60 Hz，功耗小于 15 W，可常年开机运行。在开启电源后，红色 “Power” LED 发光以示电源工作正常。该设备应避免在强磁场（高于地磁场数倍）环境内工作。电源对读出主机供电。该主机有两路同样的+12V 直流电源输出对探测器供电。探测器信号由 50 Ω 的 BNC 电缆送到读出主机。探测器的高压应设在光电倍增管的正常工作区。一般从 -900V 至 -1100V 为好。在探测器的面板上有一对万用表笔插座供监测高压设置(HV Monitor)。当用万用表的电压挡读此处的电压时，其对应的高压为 1: (-250)。也就是说当读出的电压为 1V 时，对应的高压为 -250V 。在主机的前面板上同样有黑红两色的万用表笔插座（为省面板空间，只有一个黑色插座为系统的公共地），用于监测甄别阈电压。每一通道的甄别阈电压大约 200 mV 为最佳，但可在 50 mV 至 400 mV 间工作。如果要观测探测器经过光电倍增管的输出信号，可将上述的 50 Ω 同轴电缆从读出主机上拔下，然后连接在示波器上。示波器要求有 250 MHz 以上的输入带宽，50 Ω 输入阻抗，最好是数字示波器。探测器信号为负脉冲，大约为 10 mV 至 300 mV，前沿约 15 ns, 脉冲底部宽约 40 – 100 ns。学生应能从观察到的探测器信号与噪声的大小（和所加的高压有关），根据实验原理一章中有关电子学读出系统的讨论而确定最佳甄别阈电压。将读出主机和计算机用 USB 电缆相连，启动数据获取程序，就可以开始取数据了。数据获取程序的使用另有说明。该程序目前只在 Windows 操作系统下运行。如果是第一次将设备和计算机用 USB 电缆相连，计算机会自动安装 USB 及串行口的驱动程序。一些旧版本的 Windows 操作系统可能无法自动安装驱动程序，此时在我们提供的 U 盘上寻找驱动程序。学生必须根据自己计算机上该 USB 口对应的 COM 口号（比如 COM3）设定输入口，然后按 “START” 开始获取数据。

参考文献

1. 核与粒子物理导论，中国科学技术大学出版社，第 1 版 (2009 年 8 月 1 日)，ISBN: 731202310x, 9787312023101
2. 粒子探测技术，陈宏芳。中国科学技术大学出版社，第 1 版 (2009 年 6 月 1 日)，ISBN: 9787312022999