

宇宙射线的观测

——适合高中以上学生进行之近代物理实验

萧先雄

美国费米国家加速器实验室(FNAL)在2000年成立夸克网(QuarkNet)的组织,开始推动一个结合高能物理及网络技术的教学计划,参与的学生能够测量及分析宇宙射线,不但可以了解相关的近代物理知识及高能实验的技术,也学习到团体合作及互相讨论的科学精神。2006年,由东吴大学物理系为代表加入了夸克网的计划,成立台湾夸克网的组织,目前已有六所大学(东吴大学、辅仁大学、联合大学、中央大学、成功大学及高雄师范大学)物理相关的系所、中央研究院物理所、网格中心(ASGC)及台北市立天文教育馆参与。以下先介绍夸克网的计划缘起及内容,然后解释能够进行的近代物理实验及在线实验室(e-Lab)的使用,最后说明台湾夸克网的近程及远程的目标,希望能广泛地邀请各高中及大学加入。

一、夸克网

科学是一个团队合作的工作,学生也应该在大型的科学计划里扮演重要的角色,而且科学本身也提供了一个建构式的学习环境,因此我们可以整合部分的研究内容,探讨只具有粗略架构的问题,就能够有效地帮助学生学习到最新的知识及培养解决问题的能力。

一个由美国费米国家加速器实验室主持的科学教育计划,名称是夸克网,设计了一套教室型宇宙射线探测器及透过网络使用的在线实验(e-Lab),非常适合高中生以上程度的学生使用。目前北美洲已经有50个不同区域的学校参与,此计划也继续推广到美国之外的地区,有机会成为一个深具科学教育意涵及全球性的宇宙射线探测网,同时也提供其他研究课题,例如LHC的CMS实验及重力波实验的LIGO,作为推广科学教育的一个范本。

夸克网的宇宙射线探测器主要包括:四支闪烁体计数器、一片数据获取卡、温度计、气压计及一



个全球定位系统(GPS),全部只需要一个5伏的直流电源就可以操作。这套探测器能准确地获取宇宙射线到达的时间及数量,而闪烁体计数器有足够的灵敏度捕捉从低到高能量的宇宙射线中的基本粒子,甚至有获得极高能量的稀少事件的可能性,这些经过数据获取卡判读的记录,经USB线传输储存在计算机的硬盘里,之后再上传到网络的服务器,形成一个庞大的数据库。参与夸克网计划的学生可以组成一个研究群,联合广大区域内的其他学校的探测器形成一个团队,当数据都上传到了网络上的服务器后,利用在线实验室选择不同学校的数据进行分析,即使学校没有相关的仪器,学生也可以在在线实验室上取得这些数据,分析这些数据。加入这个计划,学生就拥有了一个学习的好机会,同时也可以对宇宙射线的科学研究做出实质的贡献。



图1 夸克网的宇宙射线探测器

二、以探测宇宙射线为主题的近代物理实验

1912年,赫斯(Victor Hess)乘坐气球至数千米的高空,证实了宇宙射线的存在。之后,宇宙射线就一直是科学研究里的一个很重要的课题。事实上,在我们的大气层的上层部分,充满了从遥远星

球过来的这些粒子，大部分的粒子也都有足够的能量穿过大气层，产生很多的次级粒子到达地表，平均每分钟在一平方厘米的范围内，就有一个这样的粒子穿过。最让我们惊讶的是；有些宇宙射线的能量，不但具有千万倍以上人造加速器的最大能量，同时更有些粒子的能量多出六倍以上现在理论容许的范围。目前已经探测到两个这样的事件，而科学家也积极地在研究它们的来源。

因此我们知道，大自然本身就是一个绝大的加速器，它产生高能粒子（宇宙射线），充斥在我们的四周。虽然粒子物理的实验都需要高能粒子加速器来进行，但是我们只要利用现成的宇宙射线，一样可以在学校里进行高能的实验。利用夸克网的仪器，有四项适合学生做的实验，分别是：1. 闪烁体计数器最佳工作状态参数的设定；2. 地表的宇宙射线以 μ 占大多数，测量在各种情况下宇宙射线即 μ 的通量（flux）；3. 验证狭义相对论时间变慢的效应及测 μ 寿命（lifetime）的实验；4. 测量大范围的宇宙射线空气簇射（Cosmic Ray Air Shower）。以下分别叙述这几项实验的内容。另外，为了增加说服力及提升同学的兴趣，我们也设计了一个可以目视并可用摄影机记录宇宙射线轨迹的云雾室，可以让同学有机会探讨其他物理领域的知识。

1. 闪烁体计数器最佳工作状态参数的设定

学生第一次使用仪器时，先要将闪烁体与光电倍增管确实封装成计数器，然后透过连接的计算机下指令控制数据获取卡，进行校正及测试计数器的反应，得到让计数器工作的适当电压值及模拟信号数字化的阈值。



图2 组装一支闪烁体计数器后，先进行基本的量测

2. 宇宙射线的通量实验

学生在这个项目里，可以研究宇宙射线通量随时间的变化、随太阳活动的变化、因地磁影响而呈现东西方向的差异、随水平夹角的变化、随气压、随高度的变化，等等。学生可以有自己的想法，并且加以验证。图3是2010年，大二同学在暑假期间，用间隔110cm的两支计数器，测量通量值与水平夹角的关系，图4是测量值分析的结果，显示在误差范围内与理论预测的关系是一致的。



图3 简易的方式进行水平夹角的变化

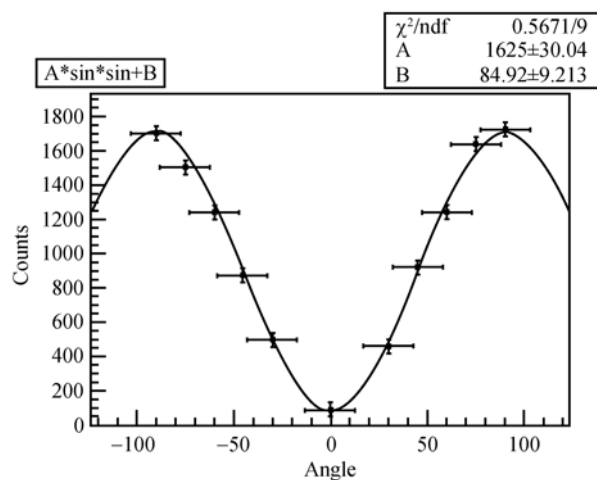


图4 在误差范围内，显示理论与实验的吻合度佳

3. 验证狭义相对论时间变慢的效应及测 μ 的寿命的实验

μ 的寿命只有2.2微秒，而大部分的 μ 是在大气层上层约30千米处产生的，即使以光速进行，也要100微秒的时间才能到达地面。但是学生确实可以在教室里用计数器测到 μ 的通量，因此学生就应该会感觉奇怪，为什么还会有很多 μ 到达地面？而会想要追究原因了。这在近代物理里，是一个经典的实验，

可以证明狭义相对论时间变慢的效应。当然，这个时间变慢的解释是要用到 μ 是在上层大气产生的假设，所以同学需要用不同高度的学校取得的数据来推算出时间变慢的效应。

如果有些 μ 在经过计数器时停留下来了，并且产生衰变的过程，我们利用数据获取卡取得 μ 衰变的信号，再利用在线实验室分析得到 μ 寿命的实验值，如图 5 所示。

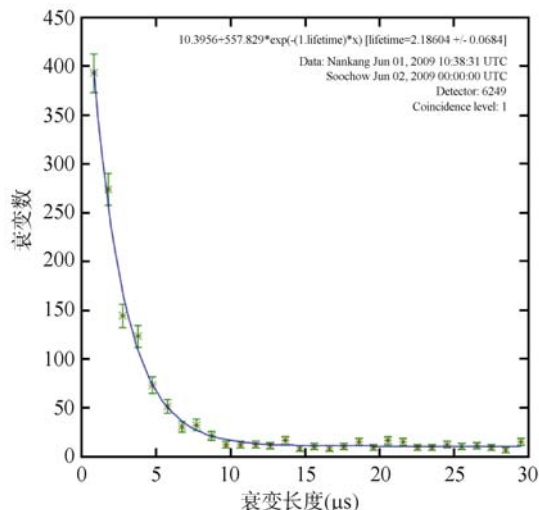


图 5 利用在线实验室分析 μ 寿命，得到 2.18 微秒的结果

4. 空气簇射的实验

每一支计数器的联机有 10 米长，四支计数器就已经可以形成一个小型的探测网，但是链接的全球定位系统 GPS 提供了一个分辨率很好的绝对时间值，更可以结合不同地点的探测仪形成一个广大范围的探测网。在此项实验里，学生可以使用分布在校园里的仪器研究范围较小、能量较低的簇射或与其他学校联合研究范围较大、能量较高的簇射。图 6 是用我们设计的云雾室实际观察到的簇射现象，就可以说明此项实验的目的。



图 6 由照片上方进入云雾室几乎平行的一束轨迹线，疑似是发生在附近的空气簇射现象

三、台湾夸克网的近程及远程的目标

2006 年东吴大学邀请美国三位夸克网的专家巴丁 (Marge Bardeen)、切奇雷 (Ken Cecire)、乔丹 (Tom Jordan)，在东吴大学举办了为期三天的第一届台湾夸克网工作坊，指导参加的人员架设宇宙射线探测器，并由几所大学的学者专家讲演相关的课题。之后 2009 年及 2010 年相继举办第二及第三届的工作坊，分别由台北天文科学教育馆及辅仁大学主办。

届至目前为止，所有的经费，包括购买探测器在内（每套约美金 5 千元），都是由参与的单位协助支出，以训练自己的学生为主；其中辅仁大学物理研究所已有一篇硕士论文，以此为题目进行深度的研究；东吴大学物理系在今年把此计划的实验项目纳入了四年级近代物理实验里，预计明年成功大学也会比照进行；也有数组参与中研院物理所的大学专题生，利用寒暑假学习高能物理的机会，一并学习了夸克网探测器的使用方法。

就科学教育的观点来看，台湾夸克网与美国夸克网一样都是提供高中教学，甚至是大学到研究所教学所需要的有关粒子物理与宇宙学的一个教学的平台；不同的地方在于：1. 除了闪烁体计数器外，我们也提供了云雾室为辅助；2. 台北天文科学教育馆帮忙进行夸克网在线实验室的中文文化，以适合在中文的环境推广；3. 增加宇宙射线与环境的课题，学生可以深入了解全球气候的变迁。目前有几组的大学教授帮忙设计及编辑学生学习的教材，也有专业的信息人员帮忙做资源整合及系统的维护。我们不但安排大学生参与各项的工作，也指导研究生以夸克网的理论及实验为主题，进行深入的了解，台湾夸克网以类似美国 outreach 计划的做法，继续推动、参与国内的科学教育。

综观以上所述，我们短期目标是要推广夸克网到全台湾的阶程，不但要完成中文化的在线实验室，还预备建立 3 个完整的夸克网中心，其中至少有一个夸克网中心是具备 20 套宇宙射线探测器的网络，然后继续加强与美国费米实验室的关系，进而推广夸克网到全球性的阶程；我们长期目标是要成立一个有经费支持、有专任人员的团队，可以维护及协助发展全台湾的夸克网，成为一个结合科学教育与科学研究的模范网络，然后在这个基础上推广 e-Science，并让 e-Science 在台湾生根。

(台北市东吴大学物理学系 111)