

探索 1 PeV 伽马射线的梦想

曹 臻

(中国科学院高能物理研究所 100049)

1983年,高能天体物理界传出一个震动全球的消息:位于天鹅座的一个X射线源天体,名叫X-3,可能发出能量高达 10^{15} 电子伏特的伽马光子,而且被地球上一个小小的宇宙线探测装置,位于德国北部港口城市基尔的一个小型宇宙线广延空气簇射探测阵列,记录下来! (M. Samorski and W. Stamm, *Astrophys. J.* 268, L17 (1983))。这是一条爆炸性的新闻。由于这一句话里,包含了太多专业性的词汇与内容,本来就不容易懂,又是爆炸性新闻,我先来讲解一下。

首先,顾名思义,“天体物理”是研究太阳系乃至银河系以外天体上发生的物理过程的科学领域。除了开展天体上相关物理过程的理论研究,更重要的是通过观测,获取新现象。一方面检验理论预言的正确性,另一方面是激发新的理论探索以解释新的现象。而观测的基本手段就是传统天文学的观测方法,即使用各种望远镜,接受来自各源天体的电磁波,其中最传统的就是在可见光波段的天文观测。但为了研究细致的物理过程,观测的波段在20世纪80年代已经扩展到相当宽阔的范围,向光子能量更低的方向到了比可见光低十万倍的微波波段,向更高能量方向达到了比可见光高十万倍的X射线波段,甚至于一亿倍的伽马射线波段。如果用电子伏特为单位来描述光子的能量,可见光光子就正好在几个电子伏特(eV)附近。

其次,“高能”天体物理,就是指采用X射线和伽马射线开展观测研究,研究产生如此高能量辐射相联系的物理现象。这里用一个例子来说明这个“高能”的意义:大家知道太阳作为一颗普通的恒星,主要的发光机制是类似氢弹爆炸的热核反应过

程,可以产生比可见光高百万倍的伽马射线,却只能产生极少数能量更高的伽马射线,比如达到比可见光能量高一亿倍的光子,因此,太阳这一类普通恒星还不是高能天体物理研究的对象。这里讲的,是能量更高的过程。当时,美国的Gamma Ray Observatory(GRO)卫星探测器进入轨道,开启了GeV伽马天文学的时代,即打开了10亿倍可见光光子能量($1\text{ GeV}=10^9\text{ eV}$)的波段,大大扩展了人类认识宇宙的眼界,高能伽马射线源天体的数目随时间按指数增长,展现了完全不同于以往的高能宇宙。天体物理研究正处于高速发展的兴奋期。

再次,这也很自然地激励人类去探索更高能量的天体物理现象,而对于探索100 GeV以上的光子的观测手段,就与传统的天文观测方法相去甚远,必须采用高能物理(也叫粒子物理)的实验方法,也就是传统的“宇宙线”探测方法。当时人们正在尝试改进宇宙线的探测技术,建设新型的探测装置瞄准100 GeV以上的波段,也就是后来称为“甚高能伽马天文学”的工作波段。当这么高能量的伽马光子从天顶进入大气之后,立即就与空气中的氧或氮原子核发生碰撞,引起了1个粒子变2个、2变4、4变8……的级联反应(也叫簇射过程)。探测这些甚高能伽马光子有两种平行发展的手段。一是采用大气切伦科夫成像望远镜技术,通过记录簇射中这许许多多的粒子发出的切伦科夫光来探测那个进入大气顶端的高能伽马射线,第二种方法是采用高能粒子探测器排成阵列,直接记录这个级联过程发展到地面时的高能粒子来反推射进大气层顶部的伽马射线的方向和能量。基尔的探测器阵列就属于后者。

最后,我们来看看基尔的结果为啥引起轰动。

当时,虽然大家都在积极准备各种规模的探测装置,力争首先发现甚高能伽马光子,也就是100 GeV以上的光子,但的确是处于发现的前夜。直到6年之后,才首次确定地探测到甚高能伽马光子,来自于著名的“蟹状星云”,但能量仅仅1 TeV(=1000 GeV)左右。由此可见,如果真的已经观测到了能量更高出1000倍的1 PeV伽马射线,那是多么激动人心的大发现啊。

其实,不仅仅是这种时间上奇迹般的超前发现,当然还有更深层次的物理根源激动着这个领域内的粒子天体物理学家们。20世纪天体物理的四大发现之一是宇宙大爆炸遗迹,即弥漫整个宇宙的3K微波背景辐射。对于来自宇宙深处的宇宙线包括伽马射线来说,其存在犹如一堵墙,对能量超过70,000 PeV的任何一种带电的宇宙线粒子,或者1 PeV以上的伽马射线,都要被这堵墙挡住、吸收掉。如上所述,伽马射线是人类赖以探索宇宙的基本媒介即电磁波,因此有一个形象的描述:在1 PeV以上,宇宙就不再是“透明”的了。而70,000 PeV也给宇宙探索者们设置了一道极限!某种意义上说,就是人类探索宇宙的边界与前沿,称之为探索极高能量现象的前沿。任何超出这些“极限”的研究成果,无论是1 PeV的伽马射线还是70,000 PeV的宇宙线,必定牵动人们的心弦,因为这意味着基本物理规律可能被撼动。给大家一个参考数字:现今最大的人工加速器,欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC)用来加速两个质子,然后让它们对撞,从有效的相互作用能量(或质心系能量)看,这就相当于一个100 PeV宇宙线质子打进大气层,离上述极限前沿还有700倍之遥。

当然,基尔的“发现”后来被证明就像科学探索过程中经常出现的一个小小的误会,时至今日,任何实验都未确认测到1 PeV的伽马射线。激动过后,留下的是一个探索和发现的梦想:努力开拓,奋力提高探测器的灵敏度,捕捉1 PeV光子!受此梦想驱动的,不仅有我的导师谭有恒研究员在内的一批中国、日本、意大利、美国的宇宙线科学家,也有像

诺贝尔奖获得者、芝加哥大学教授James W. Cronin(1931~2016)。1986年前后,还在谭老师带领我们在怀柔一小片桃园里(现国科大校园内)用56台样机尝试建设我国自己的伽马天文观测阵列的时候,Cronin就已经在美国犹他广袤的干旱沙漠性谷地上开始了宏伟的逐梦计划,即著名的CASA-MIA实验,直接奔向发现PeV光子的目标而去。CASA是由芝加哥大学(C)建设的空气簇射(AS)探测阵列(A),由1000多个闪烁计数器组成地面阵列覆盖1/4平方千米,海拔高度1500米,探测阈能0.16 PeV。MIA是由密歇根大学(MI)建设总面积为2560平方米的缪子探测器阵列(A),将成片的闪烁计数器(64平方米)下埋3米的沙土之中,专门探测簇射中具有穿透性的缪子,而探测器上方的土层将把伴随的其他粒子都吸收掉。之所以要专门精确测量缪子的个数,是因为伽马射线产生的簇射里几乎没有缪子,而普通宇宙线产生的簇射中会大量产生缪子,这就可以把只占普通宇宙线事例中万分之一或甚至十万分之一的伽马射线挑出来,是鉴别原初射入大气顶端的那个粒子是否伽马光子的一个非常有效的手段。但是,正是因为伽马引起的簇射缪子数目很小,甚至是零个,如果探测缪子的子阵列面积占整个探测阵列的面积比不够大,就不能充分发挥这种鉴别能力。可是,缪子探测器造价不菲,还要掘地三米(不是三尺)进行投放安装,对于当时的建设能力,即使处于盛极之时的美国也非易事。最后CASA-MIA实验中的缪子探测器与全阵列的有效面积之比定格为1%左右。这实际上就对这种鉴别能力打了很大的折扣。另外一个关键的因素是犹他的海拔高度,1500米处的大气深度太深了,达到每平方厘米870克,对于能量高达1 PeV的伽马引起的簇射也被严重地吸收,探测的效率远低于置于海拔4000米以上的探测阵列。通俗地讲,伽马射线信号本来就很少(十万分之一),鉴别能力又不足,自然就很难探测到伽马射线。结果,在1992年发表在《物理评论》D卷的文章宣布了没有探测到来自天鹅座X-3、武仙座X-1和蟹状星云的伽马射线,仅仅

设置一个上限(J. W. Cronin et al., Phys. Rev. D 45, 4385(1992)),也就是说如果有伽马射线存在的话,不会高于这个值。而采用切伦科夫望远镜技术的另一个实验,位于亚利桑那州的 Whipple 实验,已经于3年前成功地发现了来自蟹状星云能量 1 TeV 附近的伽马射线(G. Vacanti et al., Astrophys. J. 377, 467 (1991)),并以此打开了甚高能(Very-High-Energy)伽马天文窗口,开启了接下来近30年的辉煌,发现了200多颗 VHE 伽马射线源。

与 CASA-MIA 同步,谭有恒研究员与日本东京大学宇宙线研究所的汤田利典教授(1939~2016)和意大利那不勒斯大学的 Benedetto D'ETorre Piazzoli 教授一起发起了建设高海拔伽马天文观测站的合作倡议,并迅速付诸实施,也就是称之为“西藏计划”的宇宙线/伽马射线探测计划。由于经费严重短缺等种种原因,最先启动的就是迄今仍然在运行的西藏 AS γ 实验。经过深入的思考与精心的策划,决定尽量发挥高海拔的地域优势,在接近 PeV 簇射的最佳观测高度,即 4000~4500 米的高山建设与 CASA 类似的地面粒子探测器阵列。在此高度上,大气深度减少到每平方厘米 600 克左右,簇射受到的吸收效应大为减弱,到达地面时簇射的发展正好达到其峰值,这样就比在 1500 米的“低”海拔地区的探测效率大幅提高,簇射本身的涨落所带来的测量误差也最小。建设一个规模小得多的探测阵列,甚至没有昂贵的缪子探测器阵列的帮助,也可能有效地开展伽马射线的探测。这些设计,与当时的国力相称。第一阶段的实验仅中日两国的合作,于 1990 年建成了一个仅 100 m \times 100 m 的阵列,由 49 个闪烁计数器组成,笔者于 1991 年最后一天第一次赴西藏羊八井,参加了 AS γ 实验的第一次正式值班,为期四月。(更详细的“西藏计划”始末,可见谭有恒的“立足高原雪域,登攀科学高峰”<http://www.doc88.com/p-3897515729778.html>)。1992 年发表在《物理评论快报》(M. Amenomori, Z. Cao et al., Phys. Rev. Lett., 69, 2468 (1992)) 的文章就表明第一期 AS γ 已经具有与 CASA-MIA 相当的灵敏度,虽然还没有测到伽马

射线,但为天鹅座 X-3、武仙座 X-1 和蟹状星云的伽马射线流强设了上限,这个上限已经非常接近随后观测到的蟹状星云的伽马射线流强。虽然极尽艰辛,我们稳稳地踏上这条逐梦之旅。到了 20 世纪 90 年代后期,与意大利的合作终于落地,同样在羊八井,于 2006 年建成了国际上首个全覆盖的探测阵列,即 ARGO-YBJ 实验,进一步提高了探测灵敏度,在 2013 年结束其观测运行之时,首次实现了用地面探测器阵列发现新型伽马射线源:位于天鹅座的 TeV“超泡”(Super Bubble)(B. Batorli et al., Astrophys. J. 790, 152 (2014))。AS γ 实验经过了 20 多年的不断扩建,达到了 6.57 万平方米的覆盖面积,更为重要的是,在 2014 年终于建成了大面积的缪子探测器阵列,达到 3400 平方米,占阵列面积的 5%。大幅度提高了探测伽马射线的灵敏度,于 2019 年记录到来自于蟹状星云的 0.45 PeV 的伽马光子,逼近了实现探索 PeV 伽马射线的梦想(M. Amenomori et al., Phys. Rev. Lett., 123, 051101 (2019))。

相比于在低海拔站址建设设备齐全、性能强大的探测装置,在高海拔更容易实现伽马射线的探测,尤其是开展逼近 1 PeV 极限的前沿探索。20 多年前启程逐梦之旅,即使身如蝼蚁之时,尚有鸿鹄之志,何况当下睡狮觉醒,鹏翅已展。我国具有广袤的世界屋脊,高海拔站址资源丰富,随着全国性基础设施的大规模建设,机场、道路、数字光纤干线等基础条件迅速覆盖了广大的高海拔区域,为我们建设现代化的伽马天文观测设施奠定了实实在在的基础。“十二五”重大科技基础设施启动之时,国务院颁布了 2010~2030 重大科技基础设施建设规划,“高海拔宇宙线观测站(LHAASO)”立项,成为“十二五”期间优先支持的项目之一,为实现这一梦想注入了至关重要的希望与活力,射出了关键性的临门一脚球。到了新世纪第一个十年之末,甚高能伽马射线源的数目已经超过 100,我们很清楚要去看什么类型的源,需要多大的探测阵列。我国的综合实力稳步提升,具备了建设高灵敏度、高性能的大型科技设施的能力,是完全正确的时间;2013 年

我们在四川稻城寻找到了良好的高海拔观测站址,位于4410米的海子山顶,距离著名的稻城亚丁机场仅10公里,即将完成翻修的高品质省道217给观测站的建设提供了良好的交通运输便利,从场地200米远处穿行而过的国家骨干光纤通讯网络给我们提供了极其便利的数据传输通道,以及优良的通讯条件。更加宝贵的是,虽地处4400米无人居住的高原,却地势平整,水源充沛,到处盛开高山小叶杜鹃等各种花草,在略低于站址的4000米高山之上,竟然郁郁葱葱,林木繁茂。这对于建设大量使用水切伦科夫探测原理的大型装置来说,真是再正确不过的地点;我们决定要做正确的事,那就是在探测灵敏度所要求的面积上尽量建设足够多的缪子探测器,确保微量伽马射线的鉴别能力。为此,我们采用最便宜的水为探测介质,反复优化缪子探测器的设计,多次进行各种规模的试验,尽量提高探测器的灵敏度,以最小的代价,实现最大的探测面积。最终,我们设计并建设了国际上最大的缪子探测器阵列,达到40,000平方米,占整个1平方千米探测阵列(KM2A)的4%。于2019年底,建成了整个阵列的1/2,并迅速投入科学观测运行,仅6个月的观测,累计观测灵敏度就超过了AS γ 实验7年的积累。终于实现了探测PeV伽马射线的梦想!天道酬勤,功夫不负有心人,KM2A强大的伽马射线探测灵敏度不仅圆了我们探测PeV伽马射线的梦,还带来了巨大的惊喜:银河系内几乎所有已知的伽马射线源,只要其流强足以被KM2A探测到,都具有强劲的100 TeV以上伽马射线的辐射,展现了一个全新的宇宙,这不仅对近30年来VHE伽马天文学研究中一个流行的理论,即100 TeV以上存在能谱的“截断”,标志着银河系内粒子加速能力的极限,提出了巨大的挑战,同时也打开了100 TeV以上这个电磁波段的窗口,按照现有的宇宙学模型和电磁理论,也是最后的一个波段,开启了称之为“超高能”伽马天文(Ultra-High-Energy, UHE, gamma ray astronomy)的研究。拨云见日,我们看到的是广阔的研究空间:这些广泛存在的伽马射线源意味着产生光子的“父辈粒子”至少

具有1 PeV的能量,也就是说,银河系内存在大量PeV粒子加速器(PeVatron),虽然我们尚未搞清楚它们如何加速粒子到如此之高的能量,但已经知道它们在哪里,未来更加深入、细致的观测和理论研究,将把我们引到超高能宇宙线起源这个“终极”目标跟前,揭开它的神秘面纱,谁知道在追逐这个更大的梦想的征程中,又会有怎样的惊喜在等待着我们?有一点是肯定的:未来的十几年是LHAASO的辉煌时刻,有太多的发现等待我们去完成。

兴奋之余,静思过往,笔者不由感慨:几代人的追求、逐梦,恍如昨日之故事,昔日的智者已经仙去,但他们的音容依旧历历在目。1992年笔者还是研究生,到田无东大宇宙线研究所短期访问,与汤田先生朝夕相处,请教科学问题,学习簇射相关的知识,讨论强相互作用的模型与理论,他知识渊博,酷爱音乐,尤其是贝多芬,后来对勃拉姆斯情有独钟,还告诉我这是年龄长了的原因!2002年,因Cronin教授来犹他大学授课一学期,几乎每个工作日笔者都有幸与他一起午餐,那是大家交流、探讨宇宙线相关问题的最佳时刻。笔者对他做科学研究的严谨、执着深表敬意。虽年事已高,还亲自动手试图解决Pierre Auger Observatory(PAO)实验的水切伦科夫探测器信号中缪子成分的提取问题,午餐期间谈论最多的就是具体的科学问题,PAO的探测器、簇射的重建、各种探测手段的配合与协调,等等。当然,印象最为深刻的,则是他对宏大科学目标不懈的追求,对核心科学问题的敏感与关注。在早年取得CP破坏现象的发现而获得诺贝尔奖之后,就转向宇宙线物理研究,如上文所述很快就盯上了PeV伽马射线的发现这样的重大科学问题。在1996年CASA-MIA停止观测之后,他又发起了PAO计划,率领15个国家的科学家,云集阿根廷们多萨的小镇马拉圭,建设了3000平方千米的PAO探测阵列,再一次瞄准极高能的前沿问题,即前文所述的70,000 PeV以上带电宇宙线粒子的探测。科学探索,就是如此这般的前仆后继,永远向更远的目标前行,艰苦卓绝,但惊喜不断!