

# 甚高能

# 射线天文

徐 春 娟

## 全波段天文观测

天文学是一门古老的学科，它曾为计时和航海提供了科学依据。而今天正在进行着的大规模天文观测研究，已远远超出了这种实用的目的。现代天文学与原子物理、核物理、高能物理以及宇宙学都有着密切联系，它为宇宙和天体的起源、演化提供了重要依据，成为涉及多种学科的、学术性很强的研究领域。

直到今天，我们关于宇宙天体的许多知识几乎全部是从观测分析天体的电磁辐射得到的（中微子和引力效应的天文研究正在探索之中），各波段观测虽然是独立地、采用全然不同的技术进行的，但它们又被天体上发生的具体物理过程联系在一起。丢掉任何一个波段，就不可能有全面本质的天文研究，故全波段天文观测势在必行。

光学天文以它得天独厚的条件率先发展起来——大气层对  $7600 \text{ \AA} - 3900 \text{ \AA}$  的光学波段几乎透明，而人类又长着一双光学灵敏的眼睛。随着技术的发展，射电（mm—m 波）、红外（ $\mu\text{m} - 1000 \mu\text{m}$ ）、紫外（ $100 - 3000 \text{ \AA}$ ）以及 X 射线（ $0.1 \text{ keV} - 0.5 \text{ MeV}$ ）和  $\gamma$  射线（ $> 10^6 \text{ eV}$ ）天文都先后发展起来，形成了专门的研究领域。

## $\gamma$ 天文学

$\gamma$  射线天文涉及到光子的能量在  $10^6 - 10^{20} \text{ eV}$  之间，一般  $10^6 - 10^{10} \text{ eV}$  的  $\gamma$  射线叫高能  $\gamma$  射线（写作 HE  $\gamma$  射线）， $10^{11} - 10^{13} \text{ eV}$  叫甚高能  $\gamma$ （VHE  $\gamma$ ）射线、 $10^{14} - 10^{17} \text{ eV}$ ，甚至到  $10^{20} \text{ eV}$  的  $\gamma$  光子称为超高能  $\gamma$ （UHE  $\gamma$ ）射线。这种划分在很大程度上是由探测技术区分的。

$\gamma$  射线天文研究的意义在于：（1）它的能量跨度为十几个量级，而在每一小能段都可能存在未知的源和新现象。探索未知领域的渴望，导引着人们来开发这一广袤的领域；（2） $\gamma$  射线居电磁波谱的最高能段，它必定是在更高能量过程中产生的，故它暗示着高能

粒子和高能过程的存在，而这又总是与超新星、脉冲星、黑洞等高能天体的活动和爆发相关联。因此通过  $\gamma$  射线的探测应能揭示高能天体演化的奥秘；（3）与高能荷电粒子相比， $\gamma$  射线有不受星际磁场的偏转，能更多保持源的方向信息的长处；与中微子、引力波等相比它又有便于探测的优点。很可能 VHE 和 UHE  $\gamma$  射线天文将为宇宙线起源这个历史上的老问题提供关键证据。

## 地面 $\gamma$ 射线天文观测

70 年代，在微电子技术和空间运载工具发展的基础上，人们利用卫星上的粒子探测器，直接探测高能  $\gamma$

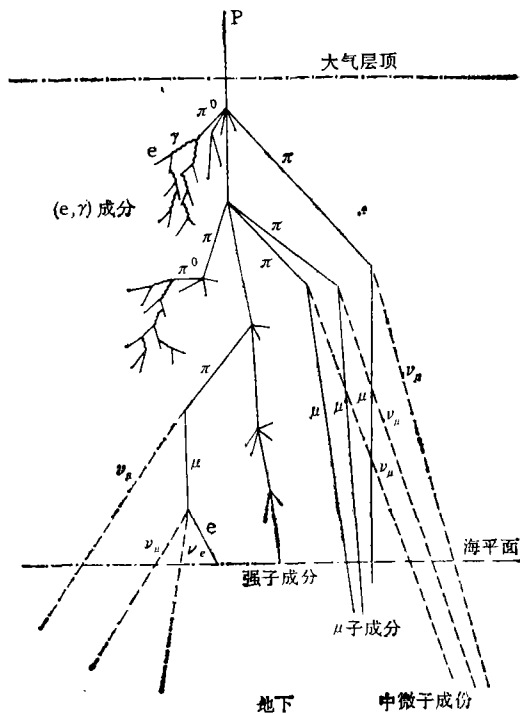


图 1 广延大气簇射 (EAS) 示意图

射线,打开了高能 $\gamma$ 射线天文研究的窗口。在十多年时间就取得了若干重要成果:发现了25个分立 $\gamma$ 射线源和银河系弥漫 $\gamma$ 射线背景,得到存在河外 $\gamma$ 射线源的证据,也发现了 $\gamma$ 射线爆现象,还探测到 $\gamma$ 射线谱线等。像美国的小天文卫星2号(SAS-II)和西欧联合卫星COS-B都是著名的 $\gamma$ 射线天文研究卫星。但卫星上的探测器由于空间和重量的限制,使收集面积不能很大;而 $\gamma$ 射线的流量又随能量上升急剧下降,这就使 $\gamma$ 射线的空间探测只能在低于 $10^{10}$ eV能段。

自60年代宇宙线工作者就试图借助于高能宇宙线(质子、电子、 $\gamma$ 射线以及少量重核)穿过大气层时,与空气核发生的强作用和电磁作用生成的次级粒子的探测,达到观测研究原初入射粒子的目的。在相互作用过程中,若次级粒子的能量足够高,则又可起始新的核作用和电磁作用,这样雪崩似地发展下去,形成所谓核级联和电磁级联过程。另一方面,这些次级粒子也要被物质散射、吸收,和衰变成其它粒子。这样次级粒子的数目在大气层的-定高度(约10公里)达到极大值,之后便逐渐减少,直到级联结束。在这过程中除了纵向发展,还有横向的扩展,通常称它为广延大气簇射(记为EAS)。图1是EAS现象的示意图。当入射到大气顶层的是一个高能 $\gamma$ 光子时,通过电子对产生和韧致辐射形成纯电磁级联,按通常理论,这时的 $\mu$ 子数量应比质子起始的EAS中的 $\mu$ 子含量低得多,约为十分之一。

利用地面粒子探测器阵列,探测EAS中的荷电粒子的时间和空间分布,是目前超高能宇宙线观测的主要方式。但由于大气对次级荷电粒子的吸收,这种方法只能探测到能量大于 $10^{14}$ eV的入射粒子,即使在海拔二千米的高度,也只有垂直入射的 $5 \times 10^{13}$ eV以上的EAS的次级粒子能被探测到。而甚高能 $\gamma$ 天文所采用的大气契伦科夫技术,则是通过探测EAS次级荷电粒子发出的契伦科夫光,达到研究原初入射粒子的目的。

### VHE $\gamma$ 射线天文观测概况

用大气契伦科夫技术探测初级宇宙线和 $\gamma$ 点源的尝试虽然开始于50年代,但由于受当时技术水平的限制并没取得很有意义的结果。1968年脉冲星发现后,激发了人们寻找甚高能 $\gamma$ 射线脉冲发射的兴趣,使甚高能 $\gamma$ 观测日趋活跃。八十年代以来,该领域进入蓬勃发展时期,英国的达拉姆组是极其活跃的一员。他们先后建造了四套望远镜系统,标号Mark1—Mark4。早期在英国、美国等地进行观测,Mark3正在澳大利亚观测,建造中的Mark4准备在西尼LaPalma岛上工作。该组的引人注目的结果是得到了天鹅座X-3的12.6毫秒的VHE  $\gamma$ 周期信号,若此结果能得到进一步证实,将对VHE  $\gamma$ 射线的产生机制有重大影响。

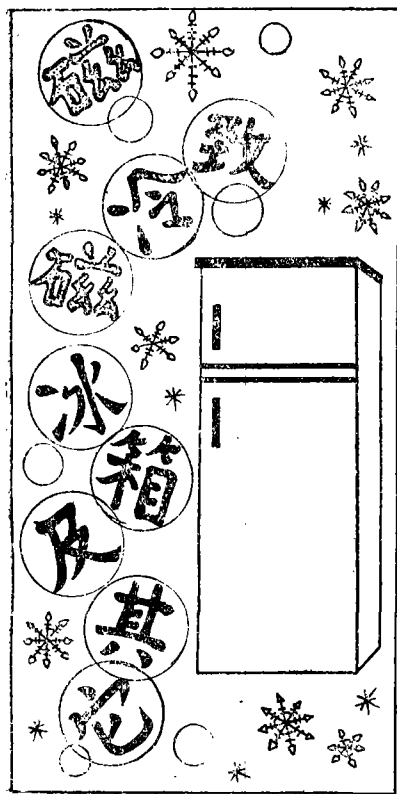
美国是较早发展大气契伦科夫成像系统的国家,除Hopkin山上的10米镜和37个光电倍增管组成的系统正在运行外,还在发展更高分辨的成像望远镜:由10米镜和193个光电管构成,相同的两套相距120米放置。每套的总视场 $4.75'$ 、探测灵敏度可达 $2.2 \times 10^{-12}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。该组宣称他们已发现30几个可能的VHE  $\gamma$ 射线源。美国与希腊合作在夏威夷还有一个VHE望远镜在工作。美国物理专业委员会在九十年代宇宙线物理研究规划中说:要给利用地面技术研究VHE和UHE宇宙线和 $\gamma$ 射线源以最高的优先级;同时也强调,卫星上的实验是宇宙线的心脏。

苏联是最早开展VHE  $\gamma$ 射线天文观测的国家,第一个报导了天鹅座X-3在1972年9月2日有VHE  $\gamma$ 射线发射。在克里米亚和天山设有大气契伦科夫望远镜,并正在建造新的观测系统。正在进行观测或建造观测系统的还有澳大利亚、印度、南非、法国、日本和中国。

### 几个VHE $\gamma$ 射线源

随着技术的发展和分析方法的完善,甚高能 $\gamma$ 天文观测已取得很大进展。现在已确认:多个VHE  $\gamma$ 射线源,其发射天体有孤立的脉冲星,也有双星X射线源;有银河系内的天体,也有河外天体;距离从1600光年直到1500万光年;时间变化尺度从毫秒直到日、月。

天鹅座X-3是个有代表性的VHE  $\gamma$ 射线源,1966年火箭实验中发现它是该星座中第三强的X射线源,故此得名天鹅座X-3。作为X射线源,它有4.8小时周期的正弦光变曲线,显示了它是一个双星系统,但并没发现有快速脉冲。苏联克里米亚观测台首次报导它有VHE  $\gamma$ 射线发射,西德的基尔组在分析他们1976—1980年的EAS阵资料时又发现它有大于 $10^{15}$ eV的超高能 $\gamma$ 射线发射,这些结果被后来的观测所证实。而英国达拉姆组所得到的它有12.6毫秒的VHE  $\gamma$ 脉冲发射,则是需进一步确认的重大事件,这对VHE  $\gamma$ 射线的发射机制将有重大影响。目前关于它的讨论有三个问题:(1)它的VHE  $\gamma$ 发射的4.8小时和12.6毫秒的周期问题;(2)它的UHE  $\gamma$ 发射的4.8小时周期;(3)是否存在来自天鹅座X-3的4.8小时周期的粒子发射。第三个问题的提出,是因为美国的质子衰变实验组以及在意大利边界做核子稳定性实验的小组声称:发现在天鹅座X-3方向上的高能 $\mu$ 子( $>500\text{GeV}$ )呈4.8小时的周期性,且其谱指数较一般宇宙线的要小,若认为它是来自天鹅座X-3的VHE  $\gamma$ 射线与大气和岩石作用产生的次级 $\mu$ 子,则其数量不符合通常的电磁级联理论。所以有人建议这是该天体发出的一种新型中性粒子与地壳作用生成的 $\mu$ 子(上述实验均是地下实验)。这一切均有待进一步证实。



罗河烈

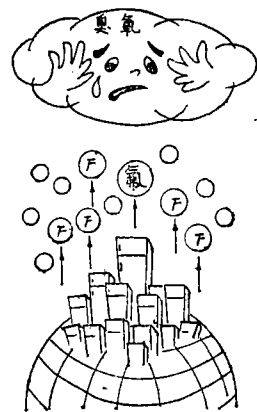
### 等熵冷却

由于在恒定体积或恒定压强下，一个系统的熵或无序程度是温度单调增加的函数，所以任何一冷却过程都可看作有序度增加或熵减少的过程。现代的冷冻

系统就是利用液体蒸发时会吸收外界热量，压缩气体时会放出热量的原理。例如在压缩式冰箱中，电力供给压缩机产生压力，作用在冷凝器之内的二氯二氟代甲烷 (Freon) 或氨的挥发性冷媒上，这个压力引起蒸汽温度的上升，而这些热经由管路送到大气中，经过这种过程后，冷媒会凝结或液化，然后经由管路被抽送到冰箱内部，在那里转为蒸汽。在这个过程中，冷媒在冷冻室中吸收热量，降低冷冻室的温度。当冷媒由吸热阶段挥发后，再一次流回冷凝器，过程又重新开始。这种冰箱已广泛地在商业和家庭中使用。

魏斯 (Weiss) 早在 1918 年发现铁磁体绝热磁化时会伴随着可逆的温度改变，他把这种现象称为磁热卡罗利效应 (Magneto Caloric Effect)。磁致冷就是利用这个效应来获得低温的。近来由于环境保护和它的考虑，研究室温至 50K 温区应用磁致冷技术受到了重视。

利用等温压缩和绝热膨胀来冷却气体而获得低温受到气体在低温下液化的限制。例如液氮的温度为 4K，因此用这种方法很难得到比 1K 更低的温度。此外，目前绝大部分冷冻系统，如冷冻机、冰箱、汽车和建筑物的冷气装置等使用的制冷剂都是氯氟化碳，它不仅是造成大气污染，形成“温室效应”起主要作用的化合物之一，而且会破坏地球高空的臭氧层，造成南北极上空臭氧层的空洞。大家知道，臭氧层可以过滤波长短于 290 nm 的紫外线，保护地球上的生物。因此 1987 年有 24 个国家在加拿大蒙特利尔签订条约，规定到 1998 年底，签约国把现在的氯氟化碳产量减少一半。限制或取消它的生产，就要研制其代用品或利用新的致冷技术。由于这个原因和下面所讲的一些理由，磁致冷技



强，以及船帆座脉冲星的 89 毫秒周期的 VHE  $\gamma$  发射。

另外像武仙座 X-1，脉冲星 PSR1937 + 21，半人马座 A 以及超新星遗迹 SN1987 A 等均有存在 VHE  $\gamma$  射线发射的报导。

甚高能宇宙线和  $\gamma$  射线观测是人类认识宇宙的重要窗口；在我国，它是一个急待开发的研究领域。它的观测仪器——大气契伦科夫望远镜是一个相对来说简单、廉价的设备。而且，我国现有的光学观测台站均具备这一观测所需要的环境条件。例如北京天文台的兴隆站、南京紫金山天文台的青海德令哈站，云南天文台的昆明站均是很好的观测地点。宇宙线工作者若能与天文界合作开展该领域的研究，可节省开支和人力，取得事半功倍的效果。目前，高能所宇宙线研究室的 VHE  $\gamma$  射线观测组正在与北京天文台的有关单位密切合作，为在北京天文台的兴隆站建造起我国第一个甚高能  $\gamma$  射线望远镜系统而努力。

蟹状星云脉冲星是 70 年代前后的著名天体，它同时有射电、光学、X 和  $\gamma$  射线 ( $\sim 100\text{MeV}$ ) 周期发射，因此自然成为 VHE  $\gamma$  天文的观测对象。早在 73 年便获得了它有 33 毫秒周期的 VHE  $\gamma$  发射，但在周期结构的细节上存在着很不一致的报导。例如英国达拉姆组报导：蟹状星云脉冲星的 VHE  $\gamma$  射线的周期结构是：有个较窄的主峰和一个简直分辨不出来的次峰。这结果对下述模型有利：脉冲星的 VHE  $\gamma$  射线是从恰在光速圆柱内的外磁层产生的，低能脉冲应与 VHE  $\gamma$  在时间上一致，VHE 的主脉冲窄、无次脉冲出现。而另一小组在夏威夷的观测认为蟹状星云脉冲星的 VHE  $\gamma$  射线具有双峰结构。近年发现该天体的 VHE  $\gamma$  射线存在着从分钟直到日、月的变化。

船帆座 X-1 是南天区的双星 X 射线源，南非的一个小组报导了对此天体的观测结果：有 283 秒周期的 VHE  $\gamma$  射线发射，并具有宽的非对称的光变曲线。还发现在 X 射线被掩蚀期间，它的 VHE  $\gamma$  发射反倒增