

· 学科进展与展望 ·

# 物理学中的世纪难题:高能宇宙线的起源之“谜”

曹 臻 刘加丽 白云翔

(中国科学院高能物理研究所,北京 100049)

**[摘 要]** 自从上世纪 20 年代宇宙线被发现以来,其起源问题一直为人们所困惑。这一未解之谜也因此被列入 21 世纪 11 大科学难题之中。在宇宙线起源的探寻中,不受磁场偏转影响的中性成分(如光子和中微子)很自然的成为宇宙线源头的信使。此外,通过测量受磁场影响微小的高能( $>50 \text{ EeV}$ )带电粒子,也可以获取源的信息。通过大量的实验研究, $\gamma$ 天文学取得了巨大成就,并有望破解世纪之谜。为了提高地面探测器的观测能力,发展宽视场和高灵敏度的巡天扫描探测手段有着至关重要的意义。位于我国西藏羊八井国际观测站的两个实验所采用的正是这种大气簇射的测量方法,它们分别是中意合作 ARGO 实验和中日合作 AS $\gamma$  实验。为获得更高灵敏度,我们提出了在西藏羊八井建立集 5 种探测手段于一身的大型复合实验阵列(LHAASO)。本文对宇宙线观测的发展历程以及前景做了详细介绍,在后半部分对 LHAASO 的物理背景和实验方案进行了详尽的阐述。

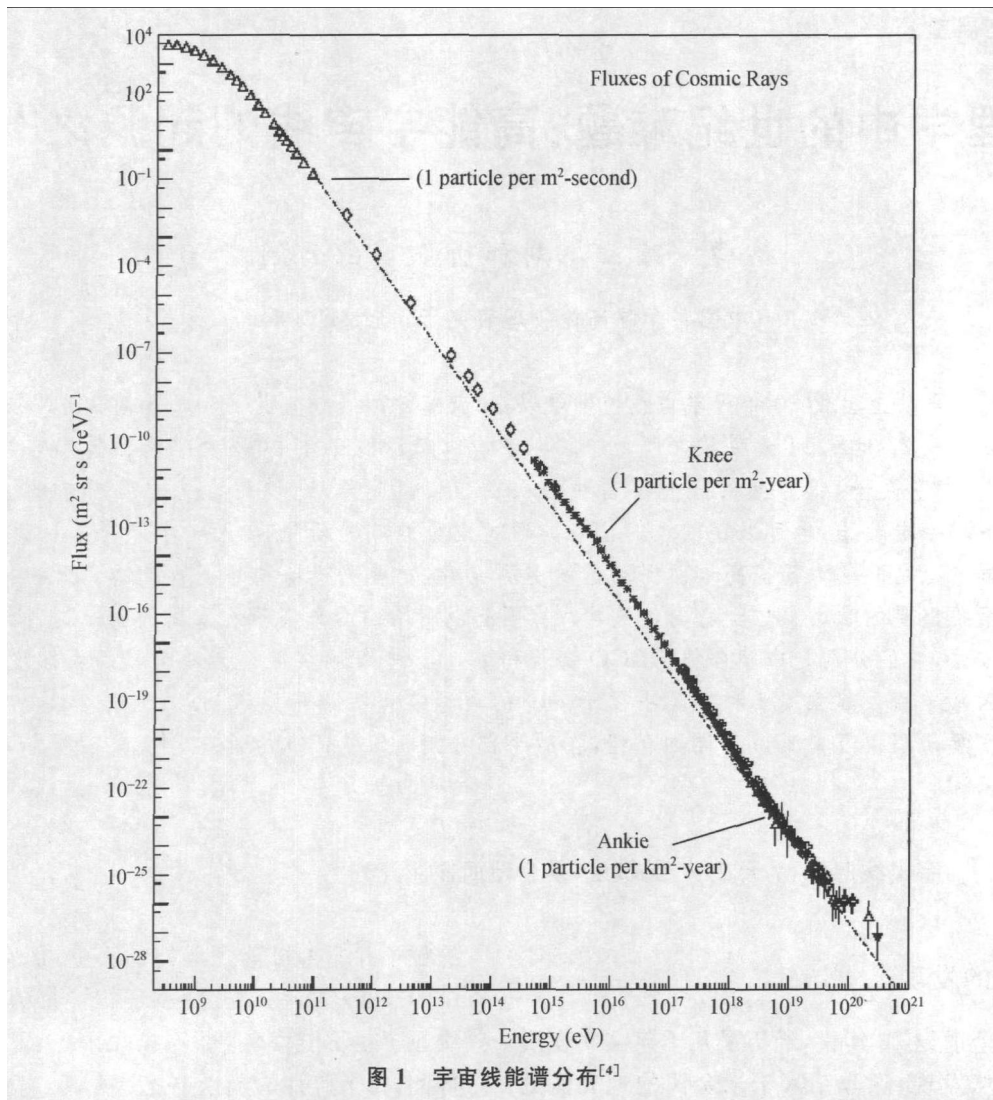
**[关键词]** 宇宙线起源, $\gamma$ 天文学,灵敏度,复合地面探测阵列

## 1 宇宙线的发现

直到上个世纪 20 年代,经历了几千年文明发展的人们才蓦然发现,除非钻入千米余深的地壳深处或洞穴之中,地球上的万物生灵原来每时每刻都受到这些带电粒子持续不断的轰击,其单位面积的接收频度大得令人瞠目:在海平面约为  $200 \text{ Hz/m}^2$ ,随着高度的增加,这一频度还不断上升,在世界屋脊青藏高原的高度,约为  $1500 \text{ Hz/m}^2$ 。这种神秘粒子是由非常执着的奥地利物理学家 Victor Hess 冒着严重缺氧的生命危险乘热气球发现的<sup>[1]</sup>。随着探索的不断加深,人们发现,宇宙线不但强度惊人,每个粒子的能量也高得吓人,我国的北京正负电子对撞机中每个电子/正电子的能量是 1.6 京电子伏( $10^9 \text{ eV}$ ),海平面的宇宙线粒子中大约 40% 都高于这一能量,而迄今记录到的最高能量的宇宙线粒子的能量达到  $3 \times 10^{20} \text{ eV}$ <sup>[2]</sup>,比人类制造的最大加速器,即欧洲核子研究中心的 LHC 产生的粒子能量还要高约 3000 倍,这相当于“天王”级选手发出的网球!好在地球上的万物生灵有大气层的保护,这样

的粒子并非直接落到我们的头上,而是首先被大气中的原子核接住。虽然原子核被打碎,入射的宇宙线粒子也不能幸免,也碎成几十上百个碎片。尽管如此,每个碎片的能量也还是太高,它们再次与大气中的原子核碰撞,重复上述过程。经过十几、二十次这样的剧烈碰撞,原来的宇宙线粒子已经不再具有如此高的能量,但在整个伴生的过程中,在大气层中形成了一场粒子“阵雨”(Air Shower),我们称之为空气簇射,总带电粒子数可以达到数十万兆( $10^{11}$ )之多,洒遍方圆数公里乃至数十公里的范围!而这一现象是由法国物理学家 Pierre Auger 于 1938 年发现的<sup>[3]</sup>。同时人们也发现,宇宙线粒子的能量大小与数量多寡服从一个简单的数学分布,即能量越高的粒子越少,更准确地说,粒子的数目随能量按大约负 3 次幂率谱下降,即能量高了 10 倍,粒子数目就少了 1000 倍,图 1 就显示了迄今所有测量到的宇宙线粒子流强(单位面积、单位立体角、单位时间内测量到的单位能量间隔内的粒子数目)随能量的变化<sup>[4]</sup>。

本文于 2009 年 6 月 15 日收到。



在宇宙线这个神秘的天外来客被发现后,自然产生了一系列疑问:这些粒子是什么?它们来自何方?是什么物理过程把这些粒子加速到如此之高的能量?为何能在横跨十多个量级的宽广能量范围内满足如此简单的谱分布?在从其发源地传播到地球的遥远路途当中都经历了怎样的宇宙空间环境?这些问题伴随着宇宙线粒子的发现而产生,它们的回答决定着人们对宇宙形成、演化的认识,决定着人们对物质世界的构成及相互作用的认识。

## 2 世纪之谜

为了解开宇宙线物理中的问题,科学家们展开了艰辛的探索。前述诸多问题也逐渐发展壮大为几个重要的研究领域,甚至于成为一门独立的极为重要的物理学科。比如对第一个问题的探究——这些粒子是什么,就产生了上个世纪对人类文明影响巨大的粒子物理,也叫高能物理,在宇宙线观测中发现了最早的一批“基本”粒子,如正电子、 $\mu$ 子、 $\pi$ 子

等<sup>[5]</sup>。随着人工加速器在上个世纪 50 年代成为产生高能粒子的主要工具,宇宙线才逐渐淡出了作为高能粒子唯一来源的历史角色。反过来,粒子物理在上个世纪的飞速发展,也大大加深了我们对“什么是宇宙线”这一问题的理解,同时还大大地丰富了这一问题本身的内涵。后几个问题伴随着天文学的发展,成为当代天文学最关注的基本问题之一,即高能天体现象相关的辐射机制、演化行为等等。

随着研究的深入,问题的展开,人们对宇宙线认识越来越多,但每一个问题仍没有得到完满、清晰的回答,究其根源就是因为关键的第二个问题始终没有得到回答——它们来自何方。如今我们已经知道,能量低于 100 GeV 的宇宙线粒子主要来自太阳这颗离我们最近的普通恒星,但除此之外,人们至今未知显示在图 1 中的几乎所有的宇宙线粒子发源于何处。近一个世纪以来物理学家们从小到一只手可以拿起的实验设备做起,直到当今覆盖 3000 平方公里的巨型实验 Auger<sup>[6]</sup>,从直接探测原初宇宙线粒

子的卫星探测器 Pamela<sup>[7]</sup> 到位于南极冰下两三公里的 1 立方公里巨型中微子望远镜实验 IceCube<sup>[8]</sup>, 人类探索的努力不能称之为不巨, 但宇宙线的起源问题始终为未解之谜, 以至于在新世纪到来之际, 人类清理自己的知识、总结尚未解决的残留问题之时, 毫不犹豫地将宇宙线的起源列为本世纪 11 大未解之科学难题之一, 成为宇宙线物理学学科的核心问题<sup>[9]</sup>。

追究宇宙线的起源之所以难于寻找之原因, 主要是由于在宇宙线粒子成份中, 带电粒子占绝对优势, 而广袤的宇宙中到处都分布着磁场, 受其影响, 这些带电的宇宙线粒子在经过漫长的传播路途之后, 已经历严重的偏转, 早已丢失了发源地的方向信息。换句话说, 在地球上进行观测的我们不能通过带电粒子的到达方向反推其来源。因此, 寻找宇宙线起源最好是以中性粒子作为信使, 因为它们在磁场中不发生偏转。基于对宇宙线的多年观测, 人们已经知道到达地球的原初宇宙线粒子主要是各种原子核, 以氢核(即质子)居多, 还包括约十万分之一的光子和更少一些的电子, 还应当包含为数众多的中微子。显然, 光子和中微子就成为最佳的信使候选者。另外, 当宇宙线粒子的能量高到一定的程度, 如前面提到的最高能量的粒子, 在宇宙磁场中的偏转微小到可以忽略, 也就可以用来探索其产生的源头了。由此, 就自然形成了当今宇宙线研究的三大前沿领域, 即以覆盖 3000 平方公里的 Auger 实验为代表的极高能宇宙线粒子天文学、以立方公里大小的 IceCube 实验为代表的超高能中微子天文学和以探测仅占十万分之一的高能光子的  $\gamma$  天文学, 其中尤以甚高能  $\gamma$  天文学发展得最为充分, 已经确认的能够发射能量高于 100 GeV 光子源的数目达到了 81 颗<sup>[10]</sup>, 并从 1989 年发现第一颗这类高能辐射源, 即蟹状星云<sup>[11]</sup> 以来, 保持了新发现的源数目随时间指数增长的骄人记录, 成为当今高能物理和高能天体物理中最具有活力、最具有出现重大突破可能的活跃领域之一。

虽然已经探测到如此众多的甚高能  $\gamma$  射线源并不代表就发现了宇宙线的源, 但已经向核心问题逼近了一大步, 人们已经“看”见了广袤宇宙中某些天体正在发射如此高能量的光子, 而这种光子只能在高能粒子相互作用的过程里才能被产生, 剩下的问题就是确认这些光子确是由被加速到更高能量的宇宙线粒子所产生。 $\gamma$  天文学的兴起, 给不懈探索的科学家们带来了另一条线索, 也给漆黑的宇宙带

来了一缕光明, 透过这缕光明, 我们或许能够窥见宇宙线的发端之源。

### 3 $\gamma$ 射线天文学

$\gamma$  射线天文学就是以  $\gamma$  光子作为信使的天文学研究(所谓  $\gamma$  光子, 就是我们平时比较熟悉的已经广泛使用于癌症的放射性治疗时所产生的的一种高能射线), 起步于上个世纪 60 年代, 光子的能量已经达到兆电子伏(MeV), 直到上个世纪 80 年代中期  $\gamma$  射线探测器放到卫星上(COSB 探测器),  $\gamma$  射线天文学才真正迎来了蓬勃的发展, 发现新源的数目达到 50 多个并保持指数增长。在不到 5 年的时间里, 采用完全不同的探测手段, 探测能量又高了近一百万倍的甚高能光子的地面探测系统, 发现了前面提到的第一颗源, 从而打开了一扇全新的天文观测窗口, 随之而来的就是甚高能  $\gamma$  天文的飞速发展。这里所说的新探测手段叫 Cherenkov 成像技术。

Cherenkov 成像技术就是通过探测空气簇射中的带电粒子所激发的 Cherenkov 光来对整个空气簇射发展过程进行成像的一种探测技术。当来自宇宙深处的  $\gamma$  光子的能量高达一兆兆电子伏(1 TeV =  $10^{12}$  eV)左右时, 光子打到大气中的原子核上, 就会产生前面讲到的空气簇射, 产生的总带电粒子数目可以达到 1000 个以上, 而大多数带电粒子都以超过空气中光的速度飞向地面, 并在沿  $\gamma$  光子入射的方向几度的范围内产生 Cherenkov 光辐射。通过收集 Cherenkov 光, 可以重建出产生簇射的原初  $\gamma$  光子的方向和能量, 实现对甚高能(能量大于 100 GeV)光子的探测, 获取发射源的信息。经过二十多年的发展, Cherenkov 成像技术已然成为  $\gamma$  射线天文学研究的重要手段, 实验发展迅速并且遍布全球, 目前拥有位于南半球的 HESS 实验(德国)<sup>[12]</sup>、KANGAROO 实验(日本与澳大利亚)<sup>[13]</sup> 和北半球的 MAGIC 实验(德国与西班牙)<sup>[14]</sup>、VERITAS(美国)<sup>[15]</sup> 等大型实验。通过这些实验的努力, 物理学家们成功地发现了绝大多数  $\gamma$  源。不仅如此, Cherenkov 成像实验以其越来越高的角度分辨能力和  $\gamma$  光子的能量分辨能力, 测量获得了源区高分辨图像<sup>[16]</sup>, 多波段联合观测显示出某些源(超新星遗迹 RXJ-1713-3946<sup>[16]</sup>)  $\gamma$  射线和 X-射线源区的辐射强度分布, 显示了清晰的壳状激波分布情况, 而且表现出强有力的 X 射线与  $\gamma$  射线具有共同的起源特征。同时也精确测量了从微波波段到 TeV  $\gamma$  射线宽广范围内的能谱分布(图 2)<sup>[17]</sup>。结合源区激波分布和能谱的行

为,人们正逐渐提高区分产生 $\gamma$ 光子的上一代粒子种类的能力。当我们通过这些仔细的 $\gamma$ 射线观测并

如愿以偿地找出强子为其上一代粒子时,我们就发现了宇宙线的源头了。

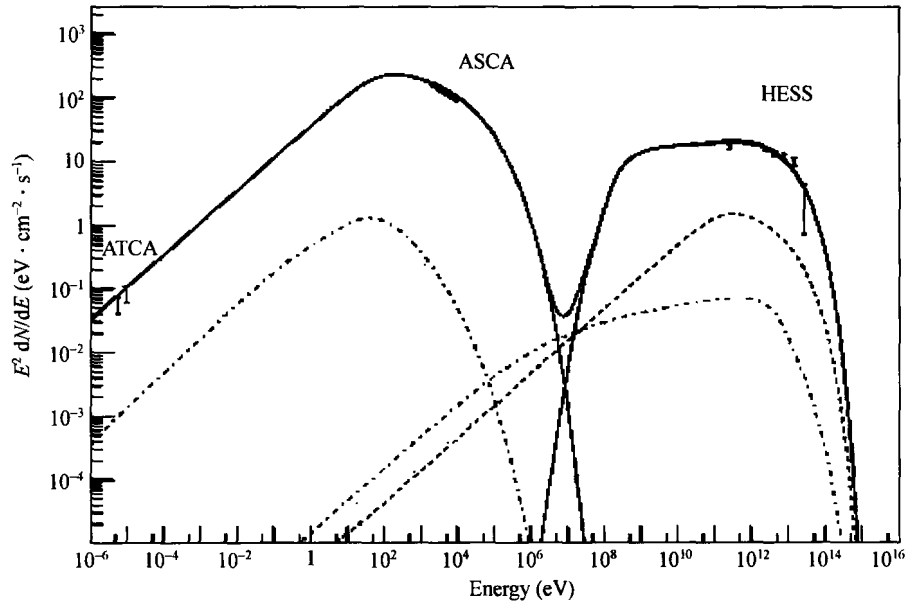


图2 超新星遗迹RXJ-1713-3946的 $\gamma$ 射线、X射线和微波多波段测量的能谱分布<sup>[17]</sup>

其中虚线表示用被加速的电子产生同步辐射和逆Compton散射辐射机制对数据的解释,实线表示用被加速的质子通过与源区周围的弥散物质发生相互作用产生 $\pi^0$ 并衰变成为 $\gamma$ 射线的机制对数据的解释,似能更好地解释数据。

纵观天文学发展的历史轨迹,人们清醒地认识到随着最明亮的一批强源被发现之后,要想彻底弄清各种各样源的辐射机制,必须具备对每一类源相当数量的累积,才能在纷杂的现象中找出具有统计显著性的规律性特征行为,从而再通过对个体进行更细致、精确的观测,对规律进一步检验使之得到提高、发展和完善。这样,再发现几个新的源已经不再是了不起的激动人心之壮举,而是需要成批地找出可能的同类源,增大统计样本的规模。因此,天文学的发展素来都沿两条几乎平行的路线发展,一是要不断提高用于定点观测模式的高分辨窄视场望远镜系统的分辨能力,二是要提高用于巡天扫描的宽视场望远镜系统的灵敏度。自然,甚高能 $\gamma$ 天文的发展也不例外。随着空气簇射Cherenkov成像望远镜成功、稳步的发展,采用地面探测器阵列测量簇射的带电粒子本身的探测技术也在不断的发展之中,其优势就在于其宽广的视野。这一技术不仅可以同时监测分布于其视野范围内的所有可能的源,而且可以随地球的转动对天空进行扫描。位于我国西藏羊八井的两个大型国际合作实验就采用类似的探测手段和方法,它们分别是中意合作的ARGO-YBJ实验<sup>[18]</sup>和中日合作的AS $\gamma$ 实验<sup>[19]</sup>,两个实验都具有一定的灵敏度观测到重要的 $\gamma$ 点源,证明了这种探

测技术之有效性。但是,定点观测的高分辨能力与巡天扫描的高灵敏度似乎不能兼得,要在宽广的角度范围内对每一个点源具备与Cherenkov望远镜可比的灵敏度决非易事。人们在追求宽广的视野的时候,不得已牺牲了角度分辨率,从而降低了对宇宙线本底的抑制能力。因此,必须克服本底太强带来的巨大困难。美国的Milagro实验<sup>[20]</sup>采用稍微不同的水Cherenkov探测阵列技术,摸索出一套利用簇射的横向分布形状来区分 $\gamma$ 产生的簇射的有效办法,大大发展了地面粒子探测阵列技术用于 $\gamma$ 天文观测。Milagro实验发现了位于天鹅座方向等几个源,并且特别显示了对于具有较宽尺度的扩展源的特殊观测能力,优于Cherenkov望远镜技术<sup>[20]</sup>。由于仅仅具有与第一代Cherenkov望远镜类似的灵敏度,Milagro实验仅发现了强度仅次于作为标准烛光的蟹状星云的源,但足以证明地面粒子探测阵列技术的有效性,为大力发展下一代以粒子探测阵列为技术基础的巡天扫描望远镜做出了极为重要的可行性保证。

#### 4 问鼎世纪之谜——中国的LHAASO计划

在解答宇宙线世纪之谜的道路上我国的科学家取得了重要成果。1989年到2009年的20年间,我

国的宇宙线物理学家们与国际同行在位于海拔 4300 米的西藏羊八井宇宙线国际观测站分别建立起了中日合作 AS $\gamma$  实验和中意合作 ARGO 实验, 开始了  $\gamma$  天文的观测研究。

总结地面粒子探测技术发展的经验教训, 我们充分体会到大力发展有效抑制宇宙线本底的技术之关键意义, 制定了以测量簇射  $\mu$  子含量为核心的大型复合式探测器阵列的发展路线, 同时瞄准高(阈能为 30 TeV)、低(阈能为 300 GeV)两个能量范围内的重大前沿问题, 即巡天扫描 300 GeV 以上的  $\gamma$  源并精确测量其高端能谱行为, 探寻宇宙线的起源, 冲击世纪难题。为此, 我们提出了在西藏羊八井国际宇宙线观测站建设覆盖 1 平方公里的大型  $\gamma$  天文巡天扫描探测系统——大型高海拔空气簇射观测站 (LHAASO) 计划。该计划利用我国特有的高海拔观测基地在扫描观测中的有利条件, 强调与 Cherenkov 探测技术的互补性, 在 Cherenkov 探测技术难于发挥的高能区 ( $>30$  TeV) 和扩展源探索(角半径  $>2^\circ$ ) 方面寻求突破点, 探测灵敏度将远高于未来 Cherenkov 探测器, 如欧洲未来的 Cherenkov 望远镜阵列 (CTA) 计划。LHAASO 凭借定点观测和巡天扫描的双重优势将完成下列科学目标: (1) 对北天区展开  $\gamma$  源的扫描搜索, 达到能覆盖几乎所有已知源的灵敏度; (2) 精确测量河内  $\gamma$  源高端能谱, 希望由此确认宇宙线加速源; (3) 精确测量源区  $\gamma$  射线强度分布, 结合多波段分析手段探索宇宙线加速的具体机制<sup>[21]</sup>。

为了实现这些科学目标, 关键问题在于抑制宇宙线本底, 提高探测器灵敏度。Milagro 的成功经验在于巧妙利用了强子簇射中大量产生的  $\mu$  子以及  $\mu$  子在水 Cherenkov 探测器中能够产生数十倍于簇射中主要分量(光子和电子)的信号的特征, 即使在较低的能量下, 为数不多的几个  $\mu$  子也能够造成簇射形态上较为明显的特征, 因为对于几乎不存在强子和  $\mu$  子成份的  $\gamma$  射线引起的簇射在探测器中只会形成相当规则的横向扩展图像。利用这种差别, 可以数倍乃至数十倍地提高  $\gamma$  射线的信号-噪声比, 从而提高探测器的灵敏度。从根本上来讲, 探测灵敏度最终还是取决于探测有效面积的大小, 为了实现扫描探索与已经发现的强度相当的源, 未来的 LHAASO 计划将拥有 9 万平方米类似探测技术的灵敏面积, 其探测灵敏度随能量的变化如图 3<sup>[21]</sup> 中

实心圆点所示, 基本达到目前 Cherenkov 望远镜实验的灵敏度水平, 以标准烛光蟹状星云的  $\gamma$  射线流强 ( $I_{\text{crab}}$ ) 为单位, 可以达到 2%—3%  $I_{\text{crab}}$  的水平。与未来 CTA 实验相比, 虽然对单个点源的灵敏度仍然小一个量级左右, 但其天空覆盖率却增大了 360 多倍! 其中的互补性是显而易见的。在 高能端, LHAASO 计划将拥有 4 万平方米地面  $\mu$  子探测器阵列, 加上 9 万平方米水 Cherenkov 探测器对  $\mu$  子的响应, 强子和光子引起的簇射  $\mu$  子含量的巨大差别可以用来把光子从宇宙线背景中挑选出来, 这样可以将宇宙线背景抑制 1 万到 10 万倍, 在 50 TeV 以上, 更可以完全去掉宇宙线背景而实现零噪声测量, 巨大的覆盖面积将使其探测灵敏度达到如图 3 中实心圆点曲线的高能部分, 成为全球最灵敏的探测器, 比 CTA 要高出几倍甚至十几倍! 同时, 对簇射总能量的测量误差达到 20% 以下, 满足了对  $\gamma$  射线能谱测量以判断其产生机制的要求。高海拔优势在这里得到了充分的体现, 因为探测器阵列所在的位置已经非常接近簇射发展的极大所在高度, 所记录到的簇射次级粒子数目最多, 而且粒子总数随大气深度的变化最为平缓, 从而将由于簇射发展的涨落所导致的系统误差减至最小, 保证簇射总能量测量达到最佳的精度<sup>[22]</sup>。

LHAASO 计划的实施将对  $\gamma$  射线天文未来 5 到 10 年的发展产生重大的影响, 一经提出立刻引起了国际同行的高度关注, 尤其是高灵敏度扫描观测的巨大潜力, 吸引了最先进的 Cherenkov 探测技术加入 LHAASO 计划, 在未来实验中成为实现第三个科学目标的重要组成部分, 使得 LHAASO 实验具有精确测量源区  $\gamma$  射线强度分布的能力。为此, 以德国和西班牙为主的 MAGIC 实验提议在 LHAASO 项目的基础上, 增加两台目前最先进的 Cherenkov 望远镜, 这将有效地降低探测阈能至 40 GeV 左右, 再一次体现了高海拔观测站的优势, 并实现 1%  $I_{\text{crab}}$  的探测灵敏度, 如图 3 中实心圆点曲线的低能部分, 与目前在轨的高性能  $\gamma$  射线天文卫星探测器 FERMI 实现了对接。这样, 不但使 LHAASO 能测到源区辐射强度分布, 还能够结合多波段分析手段, 在探索宇宙线加速的具体机制方面做出重大的贡献, 实现从 40 GeV 到 400 TeV 以上横跨 4 个多量级的  $\gamma$  射线连续、一致的能谱。

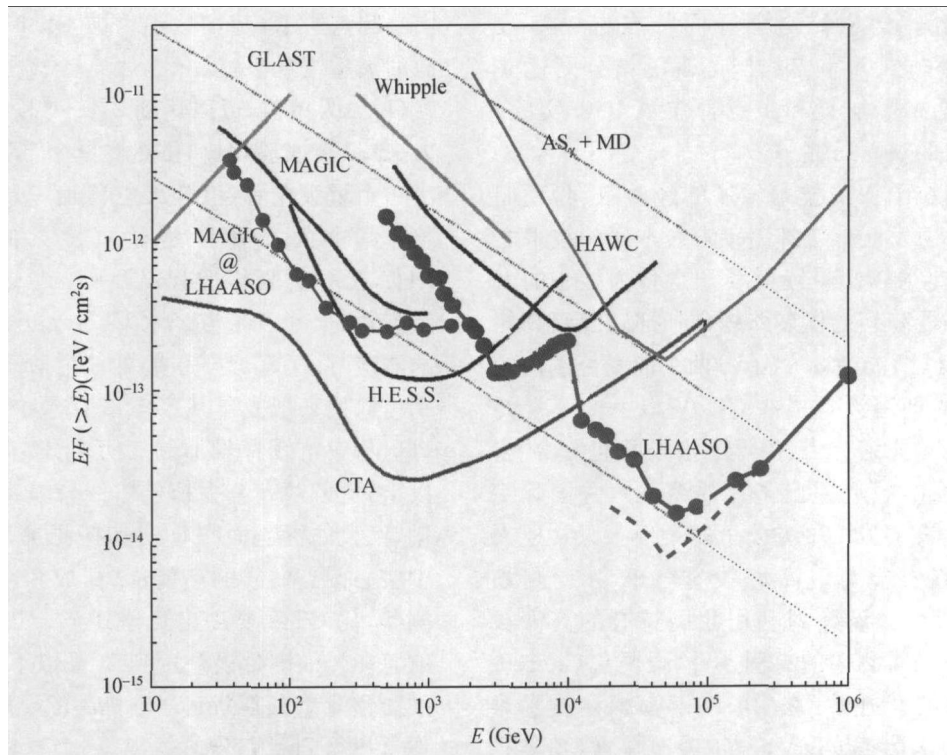


图3 根据大量簇射和探测器的模拟计算得到的 LHAASO 计划  $\gamma$  射线探测灵敏度(带圆点线)与其他现有实验和未来计划的灵敏度对比

高能端的虚线表示了最理想的  $\gamma$  与质子簇射区分情况下 LHAASO 的灵敏度。在低能端标以“MAGIC @ LHAASO”的部分表示利用 Cherenkov 望远镜将 LHAASO 的探测能区覆盖范围向低能延伸的结果,表明已经具有与卫星探测器 GLAST(最近更名为 FERMI)完美连接的能力。

LHAASO 计划将 5 种探测器集成为一个覆盖 1 平方公里的复合探测器阵列,如图 4 所示。其中基本的探测器包括:(1) 由 1 平方米闪烁体探测器组成间距 15 米的正三角阵列,测量簇射前锋粒子到达时间差和数目,用于测量原初粒子的到达方向和能量;(2) 由 36 平方米闪烁体探测器组成间距 30 米的正三角阵列,覆盖 2.5 米土滤掉簇射中的电子和光子成分,用于测量簇射的  $\mu$  子含量以区分原初粒子的种类;(3) 由 2.25 万平方米水 Cherenkov 探测器,组成  $2 \times 2$  阵列,每个探测器水深 4 米,底部有间距 5 米的光电倍增管点阵,记录簇射粒子产生的 Cherenkov 光到达时间,以确定原初粒子的到达方向;(4) 两台大型 Cherenkov 望远镜;这一阵列系统的基本性能是,以 0.07 度的精度测量 40 GeV 以上  $\gamma$  射线到达方向,主要利用簇射  $\mu$  子含量的信息,消除宇宙线背景,并以最佳 0.2 度的精度测量 500 GeV 到 1 PeV  $\gamma$  射线到达方向;(5) 由 24 台宽视场 Cherenkov 望远镜组成的阵列,以测量簇射发

展到极大时的位置与大气深度,从而探测宇宙线能谱及其成份,同时还包括覆盖 5000 平方米的簇射芯区高能粒子能流的闪烁体探测器密集阵列<sup>[23]</sup>。值得一提的是,LHAASO 通过第 2 组探测器的精确测量,获得簇射  $\mu$  子含量的信息,这些参数几乎可以分辨出每个宇宙线事例的原初成份,并测量各种成份的能谱,理解为什么宇宙线遵从这样一个能谱分布,循另一条途径,逼近宇宙线起源这一核心问题。这也是高海拔探测器阵列不可替代的优势所在。

LHAASO 瞄准最有希望取得突破的高能  $\gamma$  射线天文观测,吸收了国际上宇宙线测量的先进技术,一经建成,必将大大加强我国在该领域的实验观测水平研究力量。同时,通过高水平的国际合作,LHAASO 将建成为世界高海拔甚高能  $\gamma$  天文观测研究中心,并作为国际上最为活跃的宇宙线物理实验研究平台,为整个国际  $\gamma$  射线天文研究领域作出贡献,为解决宇宙线的未解之谜作出贡献。



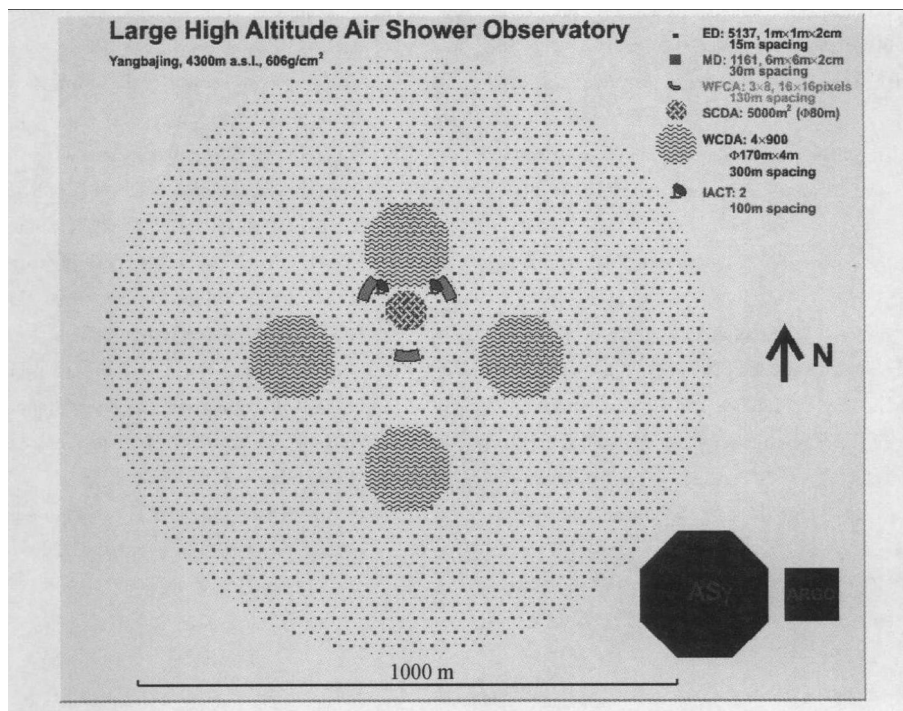


图4 LHAASO计划探测器布局设计

其中ED表示地面闪烁体带电粒子探测器阵列;MD表示地面闪烁体 $\mu$ 子探测器阵列;WFCA表示宽视场Cherenkov望远镜阵列;SCDA表示探测簇射芯区高能粒子探测器阵列;WCDAs表示水Cherenkov探测器阵列;IACT表示大型成像大气Cherenkov望远镜。右下角显示了现有两个国际合作实验ARGO和ASy的规模和布局。

## 5 总结

综上所述, $\gamma$ 射线天文学的飞速发展,对世纪之谜的宇宙线起源问题形成了强大的冲击,借近20年来持续的成功产生的强劲发展势头,欧、美等科技发达国家纷纷提出各种大型研究计划,进一步加大探测器规模、提高探测灵敏度和增强探测器性能,各种迹象表明,在未来5至10年内,将迎来 $\gamma$ 射线天文的又一蓬勃发展高潮,产生可以或不可以预见的重大突破。天文学的历史一次又一次的表明,随着探测灵敏度或分辨率的提高,新的现象就会出现。我国已经拥有位于西藏羊八井的大型国际宇宙线观测站,具有目前惟一的正在运行的 $\gamma$ 射线扫描探测器,在未来新一波 $\gamma$ 射线天文观测研究的高潮到来之际,我们已经提出了建设以高海拔优势为特征的第四大国际 $\gamma$ 射线天文研究中心,牢牢把握与其他三大中心高度互补这一重要机会,积极迎接挑战,积极开展与先进国家、成功合作组的国际合作,共同对整个宇宙线研究领域作出重大贡献。

## 参 考 文 献

- [1] Hess V F. Penetrating radiation in seven free balloon flights. *Phys Z*, 1912, 13: 1084.
- [2] Zhang B K, Cao Z. The measurement of UHECR spectrum with the HiRes experiment in stereo mode. *Nucl Phys Proc Suppl*, 2008, 175—176: 241—244.
- [3] Auger P et al. Extensive cosmic-ray showers. *Rev Mod Phys*, 1939, 11: 288—291.
- [4] Swordy S P. The energy spectrum and anisotropies of cosmic rays. *Space Science Reviews*, 2001, 99: 85—94.
- [5] 徐春娟,朱清棋译. 宇宙线入门. 1987,北京:科学出版社.
- [6] Matthiae G on behalf of the Pierre Auger Collaboration. The Auger experiment status and results. Invited talk at the 10th ICATPP Conference, Como, October 2007.
- [7] Mocchiutti E for the PAMELA collaboration. The PAMELA Space Experiment. *Astro-ph*, 2009, 0905.2551.
- [8] Berghaus P for the IceCube Collaboration. IceCube: Status and First Results. *Nucl Phys Proc Suppl*, 2009, 190: 127—132.
- [9] 夸克同宇宙建立联系,美国国家科技委员会对新世纪11个科学问题做出响应. [www.ihep.ac.cn/kejiyuandi/news/040528-yuzhouwuli/yuzhouwuli-index.htm](http://www.ihep.ac.cn/kejiyuandi/news/040528-yuzhouwuli/yuzhouwuli-index.htm)
- [10] VHE  $\gamma$ -ray Sky Map Source Catalog. [www.mppmu.mpg.de/~rwagner/sources](http://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/sources)
- [11] The MAGIC Collaboration. Observation of Pulsed  $\gamma$ -Rays Above 25 GeV From the Crab Pulsar with MAGIC. *Science*, 2008, 322: 1221—1224.
- [12] Chaves R C G et al. on behalf of HESS collaboration. The HESS galactic plane survey. *AIP Conf Proc*, 2009, 1085: 219—222.

- [13] Ohishi M et al. for Kangaroo collaboration. Very high energy gamma-ray observations of the Galactic Plane with the CANGAROO-III telescopes. *Astropart Phys*, 2008, 30: 47—53.
- [14] Scapin V on behalf of the Magic collaboration. Recent results from the MAGIC telescope. *Nucl Instrum Meth A*, 2008, 595: 77—79.
- [15] Holder J et al. for the Veritas collaboration. *AIP Conf Proc*, 2009, 1085: 657—660.
- [16] Berge D et al. for the HESS collaboration. H. E. S. S. observations of the shell-type SNR RX J1713.7-3946. *29th International Cosmic Ray Conference*, 2005, 4: 117—120.
- [17] Aharonian F for the HESS collaboration. A detailed spectral and morphological study of the gamma-ray supernova remnant RX J1713.7-3946 with H. E. S. S. *Astron Astrophys*, 2006, 449:223—242.
- [18] Z. Cao for ARGO Collaboration. The status of the ARGO experiment in Tibet. *29th International Cosmic Ray Conference*, 2005, 5:299—302.
- [19] Amenomori M et al. for the Tibet ASy collaboration. A northern sky survey for steady tera-electron volt gamma-ray point sources using the Tibet air shower array. *Astrophys Jour*, 2005, 633: 1005—1012.
- [20] Casanova S. The galactic plane survey performed by the Milagro detector. *AIP Conf Proc*, 2008, 966: 55—61.
- [21] Cao Z for the LHAASO collaboration. A Future Project at Tibet: The Large High Altitude Air Shower Observatory (LHAASO). 2009, *International Cosmic Ray Conference Proceeding*.
- [22] Cui S W and Ma X H for the LHAASO collaboration. LHAASO simulation: sensitivity on gamma ray sources above 30 TeV. 2009, *International Cosmic Ray Conference Proceeding*.
- [23] He H H for the LHAASO collaboration. LHAASO Project: detector design and prototype. 2009, *International Cosmic Ray Conference Proceeding*.

## UNSOLVED PHYSICS PUZZLE IN THE LAST CENTURY: WHAT ARE SOURCES OF HIGH ENERGY COSMIC RAYS

Cao Zhen    Liu Jiali    Bai Yunxiang

(*Institute of High Energy Physics, Beijing 100049*)

**Abstract** Since they were found in the 1920s, cosmic rays have been being investigated thoroughly for locating their sources. It is still one of 11 unsolved puzzles that drive people to work hard in their own fields. Neutral components of the cosmic rays, photons and neutrinos are naturally selected as messengers between the source objects in the universe and us. It is also found that even if the ordinary charged cosmic ray particles can be used as such a messenger as long as their energies are sufficiently high, e. g. above 50EeV. Large scale experiments in those fields form a frontier of a campaign for searching for the sources. Gamma ray astronomy seems to be the most successful and most likely to break through. For keeping the strong momentum, a significant boost in sensitivity of survey observational power with wide field of view instrument is essential. The international observatory at Tibet, China has developed well with two major experiments, ARGO-YBJ and ASy, collaborating with Italy and Japan with the right techniques, namely air shower observation. We propose building a large complex array with five components at Yang Ba Jing, Tibet to boost the source survey sensitivity. Details about physics perspectives and tentative design are discussed in this paper.

**Key words** origin of Cosmic rays,  $\gamma$  ray astronomy, sensitivity, complex detector array