

宇宙线研究进展评述与展望

何会海[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2012-09-29 收到

[†] Email: hhh@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20130104

摘要 近年来,宇宙线探测技术发展迅速,天基和地基宇宙线实验均取得了多项重要成果,打破了宇宙线研究领域多年来的沉寂.多手段复合观测是精确测量宇宙线能谱和成分的必要途径,甚高能伽玛射线天文学成为探索宇宙线起源这一世纪之谜的最有效手段.高海拔宇宙线观测站(LHAASO)计划将以最高的超高能伽玛射线探测灵敏度和甚高能伽玛射线巡天灵敏度以及最宽的宇宙线能量覆盖范围探索领域的基本问题.

关键词 宇宙线起源,加速,传播,伽玛射线天文学

Review and prospects of cosmic ray studies

HE Hui-Hai[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In recent years, cosmic ray detection has developed rapidly. Space-borne and ground-based cosmic ray experiments have achieved many important results, breaking the lull in cosmic ray research that has lasted for many years. Hybrid observation with multi-techniques is the only way to achieve accurate measurement of the energy spectrum and composition of cosmic rays, while very high energy gamma ray astronomy provides a possible key to the century-old mystery—the origin of cosmic rays. The Large High Altitude Air Shower Observatory project will explore the basic problems in this field with its highest sensitivity to ultra-high energy gamma rays, highest survey sensitivity to very high energy gamma ray sources, and widest cosmic ray energy coverage.

Keywords origin of cosmic rays, acceleration, propagation, gamma ray astronomy

1 来自宇宙的粒子炮弹

1912年，奥地利科学家赫斯在气球飞行实验中发现了宇宙线，人类从此获得了一个新奇的科学宝藏和一种远强于卢瑟福用以发现原子核的天然粒子炮弹，用以轰开原子核这个坚固的堡垒，探寻基本粒子的大千世界。自上世纪30年代起的20多年间，人类在宇宙线实验中相继发现了正电子、 μ 子、 π 介子、K介子及 Λ 超子、 Σ 超子等基本粒子，开创了粒子物理学。宇宙线的发现是人类科学史上的一大里程碑，把人们的视界扩到了粒子层次的微观世界，并把无限小的微观世界与无限大的宇观世界自然地连接了起来。

宇宙线^[1]是来自宇宙空间的唯一物质载体，宇宙线中含量最高的是质子，其次还有元素周期表中从氦到铁元素中的多种原子核，它们构成宇宙线的最主要成分，同时宇宙线中还包含少量光子、电子、中微子以及反粒子等。迄今为止所观测到的宇宙线能量最高可达 10^{20}eV ，比人类制造的最大加速器，即欧洲核子研究中心的大型强子对撞机(LHC)产生的粒子能量还要高出约3000倍。宇宙线提供了人类探索相对论性非热宇宙的探针，科学家们相继发展了宇宙线物理、伽玛射线天文学、中微子天文学、极高能宇宙线物理等分支学科，同时借以开展了反物质和暗物质的探测。

自从人类认识到宇宙线这个神秘的天外来客在不断拍打着人类家园的大门，就有一系列的问题困扰着物理学家，如这些粒子来自何方？什么样的物理过程才能把宇宙线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简单的幂律谱分布？宇宙线在从其发射源传播到地球这一漫长而遥远的旅途中经历了什么？这些问题的回答决定着人类对天体形成和演化的认识，决定着人们对物质世界的构成及相互作用的认识，而起源是其核心问题。

2 捕捉宇宙线,追踪其起源

当宇宙线粒子进入到大气层之后，和大气中的

原子核相遇，在撞击原子核的同时，自身也不能幸免被原子核撞成许多的碎片，如正负电子、 μ 子、K介子、 Λ 、 Σ 和 Ξ 等粒子。粒子物理早期发现的新粒子有些就来自于这些碎片。经过一次撞击之后，这些碎片仍然携带着较高的能量，还会继续撞击大气中的原子核，从而产生一些能量更低的碎片。经过十到二十次这样的撞击，原来能量较高的宇宙线粒子被许许多多能量较低的粒子所替代，这些粒子就像一场瞬间(10^{-9}s)粒子“阵雨”一样到达地面，我们把这场粒子“阵雨”称之为广延大气簇射。簇射中的粒子数可高达千亿，并且散布在数平方公里的面积上。这种现象是在1938年被诺贝尔奖获得者法国物理学家Auger第一次发现的。地球表面接收到的带电粒子并非是原初的宇宙线，而大多是原初宇宙线在空气中产生的次级粒子。通过捕捉这些次级粒子可以实现对原初粒子的探测(见图1)。

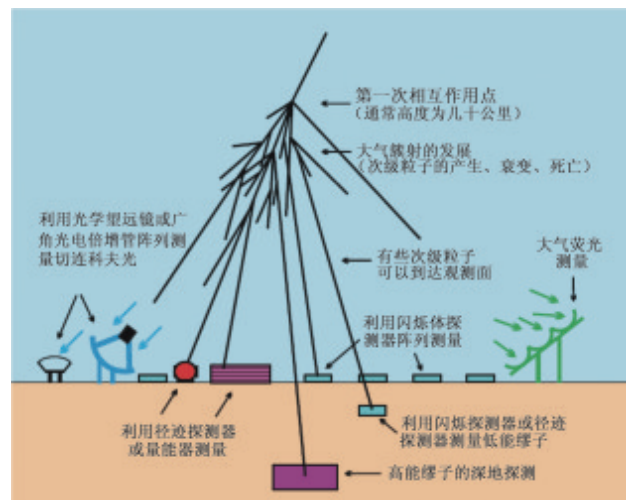


图1 广延大气簇射过程及各种探测手段示意图

由于宇宙线粒子在大气中要发生广延大气簇射过程，所以在地面无法直接探测宇宙线原初粒子，对宇宙线原初粒子的直接测量只能在大气层外，也即气球、卫星和空间站上进行。但由于卫星和气球运载能力有限，星载和球载实验的探测器面积无法做得很大，制约了这些实验观测到的宇宙线的最高能量，对能量低于 10^{14}eV 宇宙线能谱及成分的研究结果大都来自这些实验。在更高能量上则只能通过在地面构建大型宇宙线探测器探测宇宙线在广延大气簇射过程中产生的次级粒子来间接测量原初粒子的信息，即所谓的地面粒子阵列。广延大气簇射中

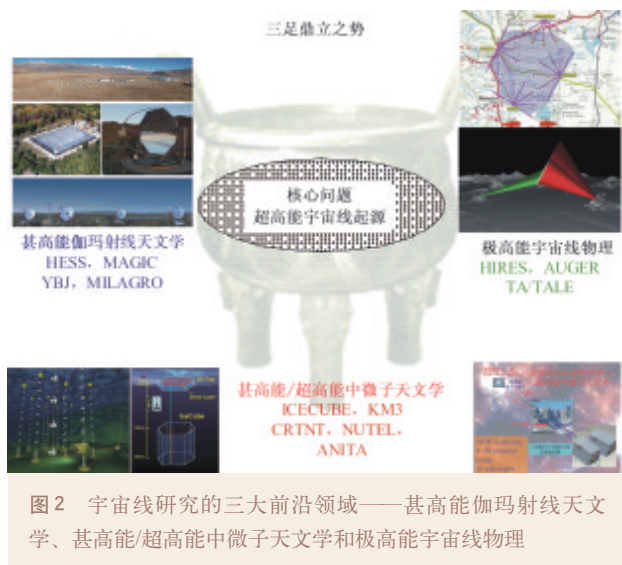


图2 宇宙线研究的三大前沿领域——甚高能伽玛射线天文学、甚高能/超高能中微子天文学和极高能宇宙线物理

产生的 μ 子具有很强的穿透力，可以穿透厚达几公里的岩层，位于山洞中的地下实验也可以通过探测这些粒子来研究宇宙线。经过几十年的努力探索，逐步形成了当今研究宇宙线起源的三大前沿领域——高能伽玛射线天文学、超高能中微子天文学和极高能宇宙线物理(见图2)。

寻找宇宙线起源的困难在于宇宙线中绝大部分粒子是带电粒子，而在我们银河系内部以及更为遥远的宇宙空间中都存在着磁场，带电的宇宙线粒子在广袤的宇宙空间中飞行的时候总是受到磁场的偏转，逐渐失去了原来的方向：磁场就像一台搅拌机，打乱了宇宙线原来的方向。因此根据我们在地球上观测到的宇宙线到达方向并不能反推出宇宙线发射源的方向，不能像肉眼看星星一样“看”到发射宇宙线的天体。

随着宇宙线能量的升高，宇宙中的磁场对宇宙线的偏转能力也随之减小，当宇宙线的能量高到某一程度时，如接近 10^{20}eV ，宇宙中的磁场对宇宙线的偏转很小，所观测到的宇宙线的到达方向能够近似反映其发射源所在的方向，使得极高能宇宙线天文研究成为可能。但这些极高能宇宙线非常稀少，在 1km^2 的面积上100年才落下一个，要积累到足够用于物理分析的统计量需要建造面积巨大且能长时间运行的探测器，如著名的Auger实验的探测器覆盖面积达到 3000km^2 ，如此庞大规模的实验要积累足够多的极高能宇宙线粒子仍然需要观测10年甚

至更长的时间。在极高能宇宙线领域，具有代表性的实验有业已结束运行的位于日本的AGASA实验和位于美国的HiRes实验，正在运行的有位于美国的TA/TALE实验以及位于阿根廷的Auger实验。该领域主要研究极高能宇宙线成分、能谱以及到达方向各向异性，如宇宙线到达方向成团现象，宇宙线和某类天体(如活动星系核)在方向上的相关性，宇宙线在某些特殊的方向(银心、天鹅座区等)上是否存在超出等。

幸运的是，宇宙线中的伽玛射线和中微子不带电，在宇宙磁场中穿行不受磁场的偏转，可以直接指向源的方向，因而可以作为寻找宇宙线源的理想“信使”，由此产生了高能伽玛射线天文学和超高能中微子天文学。高能伽玛射线可产生于轻子过程，也可产生于强子过程，如果能够测到来自某个或某类天体的伽玛射线产生于强子过程也就间接找到了宇宙线源。另外，强子过程会伴随产生高能中微子，轻子过程则匮乏中微子，如果能够找到高能中微子源，也就是找到了宇宙线源。中微子是弱相互作用粒子，与物质发生相互作用的截面极小，如要捕获中微子则需要庞大的探测介质，这些庞大的探测介质非人力能为，通常取自天然，如南极冰盖(美国的冰立方(ice cube)实验)、海水(欧洲的水立方KM3计划)、山体(中国的CRNT计划)等。中微子天文学是一个新兴的领域，在未来十年该领域有望得到蓬勃发展。

和其他两种寻找宇宙线源的方法相比，对伽玛射线的探测则容易了许多。但是由于高能伽玛射线的流强比宇宙线低4—5个量级，如何排除宇宙线强子本底一度成为高能伽玛射线天文学研究的瓶颈。20世纪90年代，Whipple实验组成功研制了大气切连科夫成像望远镜，在极大地提高角分辨(优于 0.1°)的前提下，突破了宇宙线本底排除的瓶颈，观测到了来自蟹状星云的甚高能伽玛射线辐射，实现了甚高能伽玛射线源零的突破。在此基础上，大气切连科夫成像技术得到快速发展(位于纳米比亚的HESS实验、位于大西洋中部La Palma岛上的MAGIC实验和美国亚利桑那州的VERITAS实验等)，迄今业已发现130多颗甚高能伽玛射线源，源的种类呈现出一定的多样性，开启了甚高能伽玛射

线天文学这一崭新的天文窗口^[2]。

在大气切连科夫技术蓬勃发展的同时，用地面探测器测量广延大气簇射中的次级带电粒子的技术也在不断的发展之中。切连科夫望远镜的视场一般在 3° — 5° ，只能对点源进行观测，对尺度稍大的扩展源几乎无能为力；且其只能在晴朗的无月夜进行观测，平均年有效观测时间只有10%—15%，比较适于观测稳定源，对时变源的观测难度较大。而地面粒子阵列的视场比切连科夫望远镜不止大100倍，且能够全天候不间断观测，年有效观测时间高于90%，可以同时观测视场中的所有可能源，实现大天区扫描，并监测可能的时变现象。地面粒子阵列的劣势在于其角分辨(0.2° — 1°)较差，排除宇宙线强子的本领较低，从而导致其对点源观测的灵敏度比切连科夫望远镜一般差10到几十倍，难以发现新的伽玛射线源。这类实验的典型当称位于我国西藏羊八井宇宙线观测站(见图3)的中日合作AS γ 实验、中意合作ARGO-YBJ实验以及位于美国新墨西哥州的Milagro实验。

业已发现的甚高能伽玛射线源主要为脉冲星风云、壳形超新星遗迹、巨型分子云、双星系统以及活动星系核等，这些伽玛射线源的发现把解决宇宙线起源这个“世纪之谜”向前推进了重要的一步。然而伽玛射线的发射并不一定直接关联于源区宇宙线的加速，已发现的甚高能伽玛射线源大多适用于于

轻子模型，即所观测到的伽玛射线在源区是由电子产生而非宇宙线。

要彻底解决宇宙线起源的问题需要收集到足够的甚高能伽玛射线源样本，对其进行宽范围的能谱测量和源区深度观测，结合其他波段的观测结果，分析其伽玛射线辐射机制，确认单个宇宙线源；当经过确认的宇宙线源足够多时，才可以在统计上确认发射宇宙线的各类天体，进而研究这些天体对宇宙线的加速机制、宇宙线在空间的传播机制以及空间环境，从而最终解释人类所测量到的宇宙线究竟来自哪里。当前领域急需的是对整个天空的巡天扫描观测，以发现大批的甚高能伽玛射线源。当前最活跃的切连科夫望远镜都拿出宝贵的观测时间，凭借其狭小的视场，艰难地进行小天区的巡天观测，如HESS实验在银河系中心区域^[3]和VERITAS实验在天鹅座区域所展开的扫描观测，虽然区域很小，但这些区域所含源的密度较高，所以取得了丰富的成果。但囿于其小视场及观测时间，所扫描的天区不到整个天区的10%，要扫描整个天区只能依靠未来的实验。

3 三位一体：宇宙线起源、加速及传播机制

宇宙线的起源、加速和传播机制相互纠结，其中起源是核心问题，不知道宇宙线来自于哪里，便



图3 羊八井宇宙线观测站。左侧为中日合作AS γ 阵列，右侧蓝色房子为中意合作ARGO-YBJ实验大厅

无法确定源区粒子加速的环境、什么样的加速机制将粒子加速到这么高的能量以及宇宙线的传播过程；宇宙线加速机制提供了其起源天体的可能特征，将可能的起源限定在某些特定种类的天体，帮助人类去寻找其起源。要将带电粒子加速到很高的能量，加速区必须具有足够大的尺度，同时源区磁场要能将低能粒子长时间束缚在加速区中；宇宙线来自遥远的宇宙，对其测量却只能在地球附近进行，测量结果不可避免地会混入传播效应。宇宙线在传播过程中和磁场、光子场及空间尘埃发生相互作用，会被吸收，也会产生辐射，可以借此示踪宇宙线的空间分布及其起源。宇宙线的能谱、成分以及各向异性的测量是研究其起源、加速及传播机制的主要手段。

能量覆盖 10 多个量级的宇宙线能谱基本服从幂律分布，表明其可能源于同样的加速机制。在 10^{14}eV 以下，球载/星载等空间直接测量可以有效区分原初成分，同时凭借其量能器也可以对粒子能量进行较为精准的测量。图 4 显示了该能段各种成分宇宙线的能谱^[4]，以前人们一直认为在 10^{14}eV 以下宇宙线能谱不存在明显的结构，近期 CREAM 实验发现，在 10^{12}eV 能段，宇宙线能谱变平^[5]，其理论

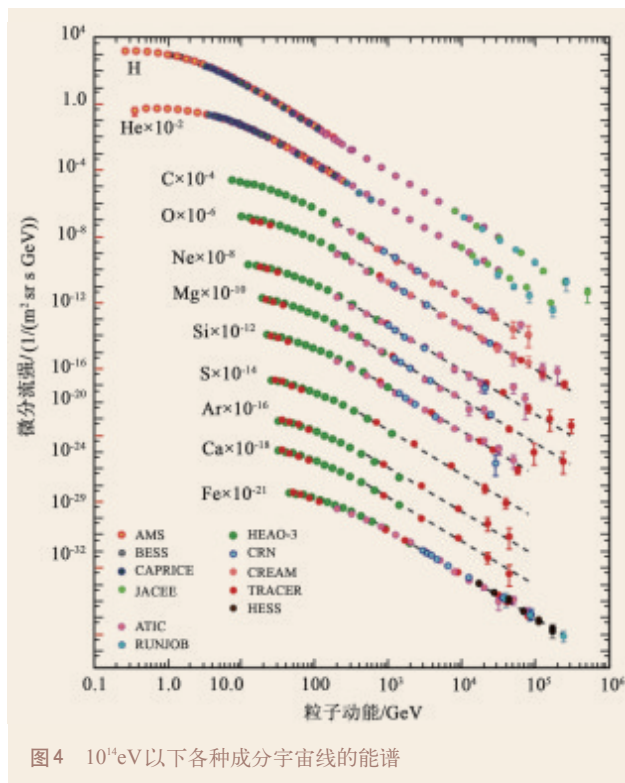


图 4 10^{14}eV 以下各种成分宇宙线的能谱

解释尚未有定论。

近年来，空间实验的重要观测结果当属气球实验 ATIC 发现了电子在 600GeV 处有个堆积状的超出^[6]，PAMELA 实验则在 10GeV 至 100GeV 的能区里发现正电子占有所有电子的比率也有超出，而宇宙线中的反质子的比率却是正常的，同时期，Fermi 实验尽管没有看到 ATIC 实验那样多的超出，但也肯定了超出的存在。这些电子的超出和能谱结构可以用暗物质粒子的湮灭和衰变来解释，也有人认为是来自天体物理过程。另外，Fermi/LAT 近期所发现的 Fermi Bubble 也非常值得关注，而 AMS 实验的结果则更加令人期待。

10^{14}eV 以上的宇宙线能谱^[4]存在着 3 个明显的转折(见图 5)，分别是位于 $10^{15.5}\text{eV}$ 和 $10^{17}\text{—}10^{18}\text{eV}$ 的两个“膝”(能谱变陡)以及 $10^{18.5}\text{eV}$ 处的“踝”。通过对能谱中这些明显特征的研究，科学家推断，低于“踝”能量的宇宙线来自于银河系，而更高能量的宇宙线很可能来自于银河系外。经典理论模型认为，银河系内的宇宙线产生于超新星遗迹，带电粒子被其激波加速到很高的能量时抛射出来，在银河系磁场中做回旋运动，它们被磁场束缚在银河系内部达数百万年之久，在银河系内部呈各向同性的均匀分布，也即包括地球在内的银河系内部任何地方看到的来自各个方向的宇宙线数目都基本相等。超新星遗迹对不同粒子的加速能力最高只能达到 $10^{15}\text{—}10^{17}\text{eV}$ ，同时银河系磁场对不同种类、不同能量的粒子的束缚能力也不同，上述原因导致了宇宙

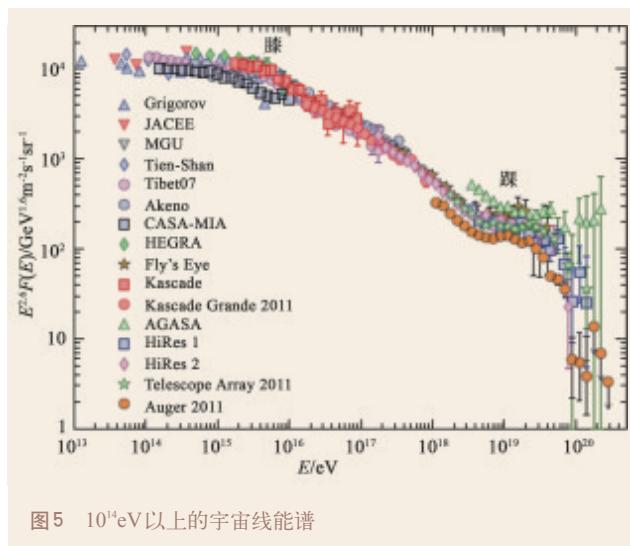


图 5 10^{14}eV 以上的宇宙线能谱

线能谱上的“膝”结构。理论模型虽然能够基本解释观测到的宇宙线能谱，但迄今为止人类尚未找到超新星遗迹是银河系宇宙线源的确切证据。对“踝”的解释由于依赖其相邻部分能谱的解释，所以依然停留在近乎猜测的阶段。在宇宙线能谱的最高端，一般认为这些宇宙线来自于银河系外部(如活动星系核、 γ 射线暴等)，它们在漫长的宇宙旅途中与银河系外背景光子发生作用，在能谱上形成截断，即著名的GZK截断。GZK截断现象涉及粒子物理、宇宙学、宇宙线等诸多领域中的重大前沿问题，其能量远远高于人造加速器所能达到的能量，相关研究只能依赖宇宙线实验(如HiRes、Auger、Telescope Array等实验)，但迄今宇宙线观测在该能段的统计量极度匮乏，需要积累更大的统计量，甚至需要发展新的探测手段，才能对该截断行为进行更精细的研究。

在 10^{14} eV以上的能段，不同实验的宇宙线的测量结果呈现明显的非一致性，其主要原因在于该能段只能通过地面间接测量实现，难以有效区分原初成分，大气作用模型存在很大的不确定性，缺乏有效的能量定标手段，同时能量跨越很大，一种探测器难以覆盖整个能段，而不同探测手段之间缺乏统一的能标。如何区分原初粒子种类，能谱测量实现和空间直接测量的有效衔接，在整个能量范围内实现连续一致的精确能量测量，都是地面间接测量实验急需解决的关键问题。大型强子对撞机上的LHCf和TOTEM实验有望解决膝区相互作用模型问题，从而降低该能段由于模型不确定性引入的能量测量不确定性。在 10^{12} eV能段，中意合作ARGO-YBJ实验凭借其高海拔全覆盖地面粒子阵列，利用月地天然磁谱仪对其能量测量进行了绝对刻度，能量不确定性小于13%，首次实现了地面间接测量和空间直接测量的轻成分能谱的对接^[7]。切连科夫成像望远镜实验HESS通过测量原初粒子在大气中的直射切连科夫光实现对原初铁核的有效鉴别，进而在 10^{13} — 10^{14} eV能段实现了与空间直接测量的能谱对接(见图4)。

相比于能谱的测量，极高能宇宙线成分的测量更为艰难，测量结果也呈现明显的非一致性。Auger实验对极高能宇宙线簇射极大处的深度的测量

显示，随能量的升高，极高能宇宙线成分变重，该结果和其对簇射极大分布宽度的测量结果相吻合^[8]，但和HiRes实验的结论相矛盾。

银河系宇宙线被其磁场束缚了近千万年，它们在到达地球前早就失去了原初方向的信息，其达到方向呈现各向同性，难以从其达到方向上直接寻找其起源。在 10^{12} eV能段，AS γ 、ARGO-YBJ、Milagro、IceCube等实验均在 10^{-3} 量级上观测到宇宙线的大尺度各向异性^[9]，暗示可能存在临近的宇宙线源。当粒子的能量高于 $10^{19.5}$ eV时，其在星系际及银河系磁场中的拉莫尔半径大到其方向偏转在度的量级，其到达方向携带了源的信息，可以用来做天文学研究(极高能粒子天文学)。但由于极高能宇宙线流强极低(能量高于 10^{20} eV的极高能宇宙线每平方公里每个世纪一个)，现有的极高能宇宙线实验虽然其有效面积高达上千平方公里，其累计统计量仍然很低，只能通过对极高能宇宙线成团现象以及其到达方向和天体的关联对其起源展开研究。覆盖面积达3000km²的Auger实验的研究结果显示，极高能宇宙线可能与活动星系核相关联，但是随着统计量的积累，该结果并没有得到证实。

4 高海拔宇宙线观测站(LHAASO)

世界上的科技强国在21世纪初纷纷提出了更大规模的实验计划，其中最著名的就是欧洲各国共同提出的切连科夫望远镜阵列(CTA)计划，该计划耗资1.5—2亿欧元，分别在南、北半球建造由100台望远镜组成的成像切连科夫望远镜阵列，阵列覆盖10km²的面积，拓展现有切连科夫望远镜的能量范围，提高灵敏度，并尝试巡天观测。美国的原Milagro合作组提出了HAWC计划，在4000多米的海拔高度上建设4倍于Milagro面积的水切连科夫探测器，大幅度提高灵敏度，充分发挥其全天扫描的优势。

面对领域机遇，基于多年高海拔宇宙线研究的基础，我国宇宙线物理学家们提出了高海拔宇宙线观测站(LHAASO)计划(见图6)，针对传统地面粒子阵列排除宇宙线强子本底本领低的瓶颈，在覆盖1km²的地面粒子阵列中铺设面积高达40000m²的 μ

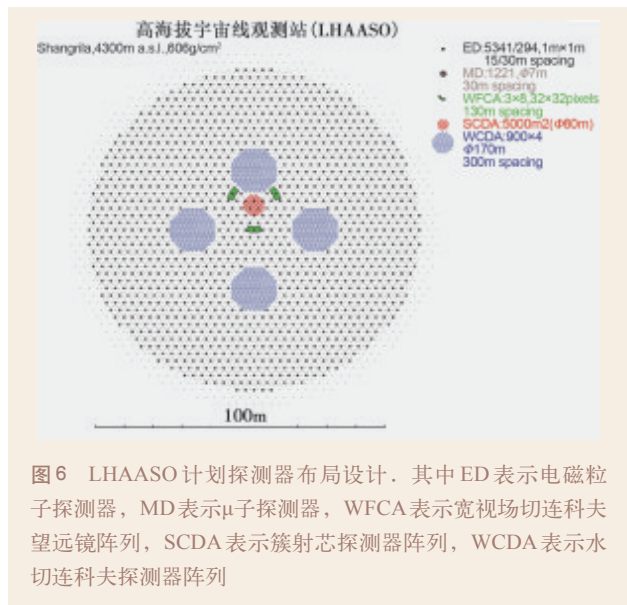


图6 LHAASO计划探测器布局设计. 其中ED表示电磁粒子探测器, MD表示 μ 子探测器, WFCAs表示宽视场切连科夫望远镜阵列, SCDA表示簇射芯探测器阵列, WCDA表示水切连科夫探测器阵列

子探测器, 通过测量簇射 μ 子含量, 实现对宇宙线中强子的甄别, 在 $5 \times 10^{13} \text{eV}$ 以上实现对伽玛射线的零背景观测, 同时精确测量该能段的能谱, 其灵敏度远高于现有实验和其他未来计划. LHAASO计划在超高能端直接瞄准银河系宇宙线起源这一物理目标, 不但可以发现大批银河系内伽玛射线源, 更重要的是可以有效地确认哪些伽玛射线源是真正的宇宙线源, 进而揭示宇宙线起源的奥秘. 在甚高能段($10^{12} - 10^{13} \text{eV}$), 通过构建4倍于HAWC面积的大型水切连科夫探测器, 实现对银河系外宇宙线源的巡天观测, 并监测视场中的时变现象. 利用 1km^2 阵列提供的簇射 μ 子信息和 5000m^2 的簇射芯探测器提供的簇射近芯区信息, 以及24台宽视场切连科夫望远镜对簇射极大的测量, 实现对宇宙线成分和能谱测量的精确测量, 彻底改变目前“膝”区宇宙线成分和能谱测量的混乱局面, 为解释“膝”的成因提供多参数测量结果; 24台宽视场切连科夫望远镜具有可移动性, 经重新组合可以工作于大气荧光模式, 将观测能区向高端拓展, 从而覆盖 $10^{13} - 10^{18} \text{eV}$ 的宽广能量范围, 低端与球载/星载等直接测量实验衔接, 获得绝对能标, 并将其传递到极高能宇宙线实验的能区, 为解释宇宙线从银河系内到银河系外起源的过渡提供连续一致的实验结果.

LHAASO计划一旦实现, 将成为世界高海拔

甚高能伽玛天文观测研究中心, 必将大大提高我国在该领域的研究水平, 并作为国际上最为活跃的宇宙线物理实验研究平台, 为整个国际宇宙线研究领域做出贡献, 该计划已被列入国家发改委“十二五”大科学装置规划.

5 总结

为解决宇宙线物理中的基本问题, 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, 直到覆盖 3000km^2 的巨型实验Auger; 从直接探测原初宇宙线粒子的卫星探测器Pamela, 到位于南极冰下的 1km^3 巨型中微子望远镜实验——冰立方(ice cube), 人类一直苦苦探寻着这些问题的答案, 但是时至今日, 仍然没有得到清晰、完美的解答. 其中最关键的问题就是不知道这些粒子来自何方. 在21世纪到来之际, 人类在清理自己的知识、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大未解科学难题之一. 目前, 欧美等发达国家不断加大在此领域的投入, 研制拥有更高探测灵敏度的探测器, 在未来的10年至20年内, 有望产生突破性的结果. 我们应该抓住机遇, 迎接挑战, 立足高海拔宇宙线观测站的优势和多年的经验积累, 积极开展与先进国家、成功合作组的国际合作, 开拓创新, 发展新一代的大型高海拔复合探测器, 探索宇宙线起源之谜.

参考文献

- [1] Gaisser T K. Cosmic Rays and Particle Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1991
- [2] Aharonian F. Very High Energy Cosmic Gamma Radiation. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004
- [3] Chaves R C G *et al.* on behalf of HESS collaboration. AIP conf. proc., 2009, 1085: 219—222
- [4] <http://www.pdg.lbl.gov>
- [5] Yoon Y S *et al.* Astrophys. J., 2011, 728: 122
- [6] Chang J, Adams Jr J H, Ahn H S *et al.* Nature, 2008, 456: 362
- [7] Bartoli B *et al.* Physical Review D, 2012, 85: 092005
- [8] Abraham J *et al.* Phys. Rev. Letters, 2010, 104: 091101
- [9] Amenomori M *et al.* Science, 2006, 314: 439