

银河宇宙线起源、加速和传播问题的

一些研究进展

胡红波

宇宙线研究在我国已经走过了半个多世纪，从 20 世纪 50 年代建于云南落雪山海拔约 3180 米的观测站，到文革后建于西藏甘巴拉山海拔近 5400 米的高山乳胶实验观测站，再到 1990 年建成的位于海拔 4270 米的羊八井国际宇宙线观测站，我国研究人员为揭示宇宙线的奥秘进行了不懈的努力，作出了重要的贡献。本文，结合国外相关研究，介绍我国在银河宇宙线起源、加速和传播问题的研究方面所取得的一些新进展。

宇宙线研究历程的简单回顾

1912 年，奥地利物理学家赫斯乘坐热气球上升到 5350 多米的高空。在 6 小时飞行当中，通过对电离室中电流的测量，发现高空空气的电离率是地面的数倍，从而说明这种空气中的电离现象是由地球外边的“辐射”（后被称为宇宙线）所致。赫斯实验后来被人们认为是标志宇宙线发现的实验，他也因此获得了 1936 年的诺贝尔物理学奖。此外，与赫斯同时代的其他很多人也各自相对独立地为宇宙线的发现做出过许多重要的工作。

从宇宙线发现到 20 世纪 50 年代人们将第一台同步加速器用于高能粒子物理实验之间的一个相当长的时间里，人们在宇宙线的研究中发现了许多基本粒子，带来了粒子物理学的飞速发展。1932 年，安德森从宇宙线中发现了正电子，使得我们对于正、反物质世界的认识向前跨越了极大的一步，他因发现正电子于 1936 年荣膺诺贝尔奖；1937 年，安德森和尼德迈尔利用云雾室又在宇宙线中发现了 μ 子；1947 年，鲍威尔在高空核乳胶中发现了汤川秀树于 1934 年预言的能传递强相互作用的 π 介子，汤川秀树因此获得 1949 年度诺贝尔物理学奖，而鲍威尔则获得 1950 年度诺贝尔物理学奖。

作为联系微观粒子和宏观宇宙的桥梁，宇宙线研究既对粒子物理也对天体物理作出了重要贡献。一个突出的例子，就是对太阳中微子和超新星中微子的观测。在长达 24 年的观测中，雷蒙德·戴维斯发现了太阳中微子的缺失，为研究不同味道中微子

之间的振荡效应作出了卓越贡献；小柴昌俊所领导的神冈实验除了证实太阳中微子缺失，还发现了超新星 SN1987A 爆炸时所发出的中微子，直接验证了恒星演化晚期形成超新星的理论。为此，他们共同获得了 2002 年度诺贝尔物理学奖。

宇宙线的起源、加速和传播问题

宇宙线主要由亚原子粒子构成，含量最多的是质子，以及氦、碳、氮、氧、铁等恒星演化产生的稳定原子核，此外还有正负电子、伽玛射线、中微子和其他未知的粒子，比如人们正在寻找的暗物质粒子等。宇宙线粒子的能量分布于 10^9eV 到 10^{20}eV 量级之间。在能量升高 11 个量级的情况下，流强下降约 30 个量级，能谱基本表现为幂率谱。所谓幂率谱，就是谱形与能量幂次成正比的能谱。但是，在 $\text{TeV}^{\text{①}}$ 、 PeV （“膝”）、 EeV （“踝”）和几十 EeV （GZK 截断）等能区，能谱也会出现细微的转折变化（图 1）。迄今为止，观测到的宇宙线粒子的最高能量已达到 $3 \times 10^{20}\text{eV}$ ，约合 50 焦耳，相当于一个 5 千克重的铅球由 1 米高度跌落地面时所携带的动能！不

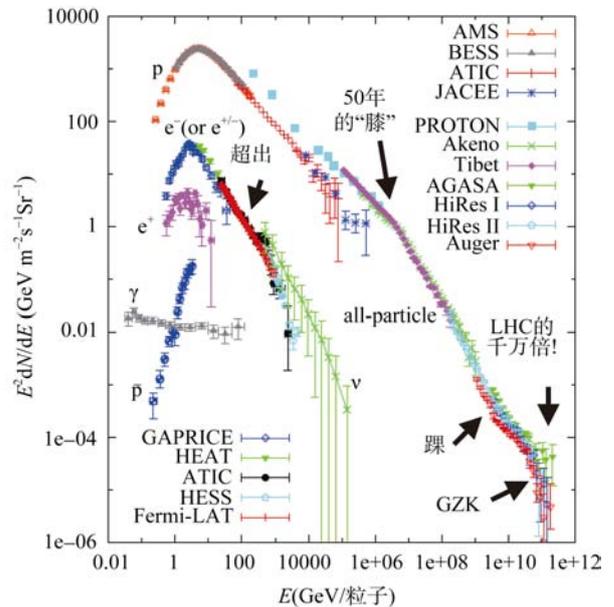


图 1 宇宙线的总能谱及一些重要宇宙线成分的分能谱的测量结果（袁绘制图）

过如此高能量的宇宙线粒子非常稀有，地球上每世纪每平方千米的面积上仅能观测到一个！

如此高能量的宇宙线粒子来自哪里，它们是如何被加速，又是怎样在太空传播等，一直是人们非常关心的问题，也是宇宙线研究中的三个根本问题，至今尚无最终答案。一种广为人知的理论认为，宇宙线起源于剧烈的天体演化（爆炸或爆发）并被其产生的激波加速。激波是由喷发出来的超声速粒子和环境中的介质相撞时挤压而成，在这高速运动的薄层里，高温高压使物质电离成为含有湍流的等离子体。当一个带电的粒子和这个激波面相碰时，会有一定的概率被激波里的无规磁场反弹回去。在质心坐标系里这是一个弹性的散射，但在实验室坐标系里看则是激波把一部分机械能传递给了粒子，使粒子得到了加速。加速后的粒子会飞向远处，但由于普遍存在的磁场，一部分粒子又会回转过来，被激波再次加速。正是由于再次加速的只是部分的粒子，其他粒子已经逃逸出加速区，高能粒子就越来越少，其能谱将呈现幂率谱的形式。

一般认为，能量大于 E_{eV} 的宇宙线，来自银河系外，可能是在超大质量黑洞吸积周围物质所产生的激波上被加速出来的，也可能是从伽玛射线暴的激波上被加速出来的。来自银河系外的高能宇宙线在传播过程中会和微波背景光子发生反应。接近 E_{eV} 能量的宇宙线质子可以把微波背景光子变成一对正负电子，导致其自身能量损失，从而解释能谱在 E_{eV} 处的“踝”形结构。而能量超过 $50E_{\text{eV}}$ 的质子则可以通过和微波背景光子的反应形成核子共振态，然后衰变为核子和 π 介子，从而损失原先的能量，使能谱快速下降，这被称为 GZK 截断。GZK 截断现在已经在实验中得到了验证。能量小于 E_{eV} 的宇宙线，通常被认为起源于银河系内。传统的看法是，起源于银河系的宇宙线，或称银河宇宙线，大多来自超新星的爆发。但是，近年来，这种看法也不断遭到质疑。为了维持银河系宇宙线的功率，需要每个世纪有 3 颗超新星的爆发。但根据天文观测的记载，近一千年来，银河系只发生了 8 次超新星爆发，而最近 400 年，尽管观测技术有了飞跃式的发展，却没有观测到新的银河系的超新星爆发，这无疑给宇宙线起源的超新星爆发理论投下一些阴影。另外，人们对超新星爆发的最大加速能量，对在超新星遗迹附近并未观测到预期强度的伽玛射线

发射，以及没有观测到超新星模型所预期的较大的各向异性，都提出了质疑：银河宇宙线或许真的另有起源？！

由于存在星际磁场，逃出加速区的宇宙线粒子在传播过程中会丢失原先的方向信息，从而最好地研究起源的方法是观测来自加速源的中性粒子，比如伽玛射线或中微子，但这样的方法只适用于寻找正在加速之中的宇宙线的源。伽玛射线或中微子可以来自宇宙线核子和环境物质的相互作用所产生的 π^0 和 π^+/π^- 衰变，这些伽玛射线或中微子具有和宇宙线核子接近的谱，观测到这样的末态粒子将是有关宇宙线核子起源和加速的直接证据。此外，伽玛射线还可以来自宇宙线电子的辐射，比如逆康普顿散射过程，通常还会伴随着从射电到 GeV 伽玛射线的同步辐射发射。现在已经观测到很多的伽玛源（约一千五百个 GeV 源和一百多个 TeV 源），这些具有 TeV 伽玛发射的源基本上都可以解释为高能电子的辐射。比如，“蟹状星云”的多波段电磁辐射谱中的双峰结构就是来自电子辐射的典型特征。可以说，宇宙线电子加速源已经发现不少，加速机制也有了很大的研究，按理讲，在这些源上，带正电荷的核子也会同样得到加速，但直接的证据还没有找到。

另一方面，对于古老宇宙线的研究只能靠对宇宙线自身的观测了。银河宇宙线在 4PeV 有一个被称为“膝”的转折，发现于 1958 年。这个转折的结构可能是因为加速源能最高加速的粒子能量大约在 4PeV 所致，也可能和宇宙线粒子逃离银河系磁场的束缚有关，还可能是因为宇宙线在加速源上或传播过程中发生的某种相互作用的阈能就在 4PeV 。要区分这些机制还需要对宇宙线能谱，尤其是各种不同成分的能谱做出准确的测量，需要克服强相互作用模型的不确定性。在宇宙线全粒子能谱测量方面，我国西藏羊八井的中日合作宇宙线实验已经做出了具有国际先进水平的工作，为理解这些现象提供重要的信息。

作为由带电粒子构成的等离子体，宇宙线的传播可以用磁流体的方法来描述。宇宙线等离子体在规则和不规则的银河系磁场中进行着包含扩散和对流的运动。宇宙线的能量密度和银河系磁场的能量密度相当，约是 $1\text{eV}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。宇宙线的传播受着银河磁场的约束，反过来，宇宙线又对银河系的磁场结构起着重要作用，宇宙线形成的电流也可以成为银

河系大尺度电流探测的一个探针。宇宙线在传播过程中和星际介质发生反应可以产生初级宇宙线中所不包含的锂、铍、硼等次级宇宙线粒子，从它们的丰度和能谱的测量，人们得到了大量有关宇宙线传播的知识。此外通过测量反应中来自 π^0 衰变的高能的伽玛射线，我们也能得到宇宙线在银河系各处的分布信息并发现宇宙线在银河系里的分布还是相当均匀的，其差别在一个量级以内。高能宇宙线的传播也可以通过各向异性的观测来直接得到研究，当然这样的观测只能在地面上做，因而是银河系里在一个点上的取样研究。目前羊八井的中日合作实验在宇宙线传播研究中也做出了国际领先的成绩。

国内外相关研究的一些新进展

2008 年底和 2009 年初，气球实验 ATIC 发现了电子在 600GeV 处有个堆积状的超出；HESS 实验随后发现电子谱在 1TeV 有个截断；PAMELA 实验则在数 10GeV 至 100GeV 能区发现正电子占有所有电子的比率有超出。同时期，Fermi 实验尽管没有看到 ATIC 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被很多人用来研究暗物质的湮灭和衰变效应，但也有人认为是来自附近的脉冲星的电子加速过程。我国研究人员指出了另一种可能性，即这些电子来自于加速源上的高能宇宙线和背景可见光的产生电子对的反应，他们发现：这一模型不仅可以解释上述的正负电子超出，还可以解释宇宙线“膝”的结构。如果这个模型是正确的，那么宇宙线加速器在把粒子加速到 PeV 能量时，还需要拥有很强的可见光的背景场。一个可能的候选源是年轻的超新星，由于它的中心有个带有很强磁场的脉冲星，爆发之后很快就可以把粒子能量加速到上百 PeV 能量，与此同时，超新星抛射物质也会达到成千上万度的高温，可见光辐射很强且可以持续数月，恰好满足模型所需要的条件。然而，考虑到每个年轻的超新星的特点可能不一样，它们所产生的宇宙线的“膝”的结构和位置也可能不一样，这样，叠加起来的总能谱的拐折就应该比较平缓。但是，由羊八井中日合作实验和其他多个实验测量到的“膝”其实很尖锐。这个现象表明太阳系观测到的宇宙线主要来自同一个源，这个源，或者是离地球很近，或者是不很近但很强。附近的符合条件的脉冲星是有的，然而在这样近的距离上，大量来自脉冲星的宇宙线会导致很强的宇宙线的各向异性，即在

源的方向上，宇宙线的强度会很强。羊八井中日实验是北半球观测宇宙线的各向异性最精确的一个实验，现在国际上已有多家实验在南北半球都开展了宇宙线各向异性的测量，综合所有实验观测，我们发现各向异性的幅度远小于附近有宇宙线加速源的情况下所能预期的幅度。这表明源可能不在附近，而是比较远又比较强。最容易想到的一个候选者就是银河系的中心。

Fermi 空间望远镜自 2008 年发射升空以来，已经有了许多重要和有趣的发现。最近的一个发现就是在银心处，银盘上下对称分布着两个伽玛射线的“巨大泡泡”。它们的能谱很硬，接近正比于 E^{-2} 的幂率谱，而且在空间形态上和 WMAP 观测到的微波的“晕”相符合，这个“巨大泡泡”的边缘还和 X 射线所观测到的空间形态特点相符合，这些一致性和关联性表明这个具有多波段辐射的来源应该是高能电子。定量的研究也支持这个结论，有趣的是，根据这个“巨大泡泡”的能谱反推得到的电子谱应该和 ATIC 所观测到的超出电子谱接近。据此，研究人员认为，约一千万年以前，银心处发生过一次巨大的爆炸，可能是超大质量黑洞或核区星暴活动所致。

前面提到，ATIC 的电子谱和宇宙线的“膝”之间可能存在着内在的关联。那么现在银心处的伽玛射线的“巨大泡泡”又把 ATIC 电子和银心关联起来了，那么宇宙线的“膝”从而也就是宇宙线的加速源就和银心关联起来了。根据定量的分析，如果主要的宇宙线都起源于一千万年以前银心处的一次爆炸，那么把释放的能量调整到一个适当的值就能同时解释产生“巨大泡泡”所需要的电子流强和今天银河系里所有的宇宙线核子流强。而且，从细节上看，ATIC、PAMELA 的正负电子超出和宇宙线能谱“膝”的起因也都自然得到了解释。如果这个图像是真的话，那么宇宙线从银心传播出来的过程中会和银心处较密的气体物质发生强相互作用，产生大量的 π^\pm 介子并马上衰变到正负电子，遗留下来成为遗迹。它们会不断损失能量，最后变成热运动的粒子，进而结合成电子偶素，随后湮灭成两个 511keV 的伽玛射线。非常有趣的是，这些 511keV 的伽玛射线果然在银河系中心约 3000 光年的范围内被观测到，而在银河系其他部分都没有明显地被观测到。定量分析表明，这些 511keV 的伽玛射线

的流强和“银心加速为主”的银河宇宙线模型的预期一致。

2006年，羊八井的中日合作实验通过分析9年获取的高质量数据，得到了北半球最精确的宇宙线各向异性分布的测量结果（图2）。这些结果不仅以更高的精度描绘了沿银河坐标系北天极方向的宇宙线的缺少和接近旋臂旋入方向的宇宙线的增强，还发现了来自天鹅座方向（即沿旋臂旋出方向）的宇宙线的较少量增强。此外，由于在300TeV能区没有观测到宇宙线的各向异性，我们得出结论，宇宙线等离子体和太阳系一样绕银河系的中心旋转，不然的话，就像快速骑车的人在无风的时候也会感到迎面扑来的风一样，太阳在静止的宇宙线等离子气体中运动应该会感受到相向而来的宇宙线的风，也就是增强的宇宙线强度。这个结论不难推广到全银河系，成为有关宇宙线在银河系整体传播行为的第一个实验结果。如果把各向异性的主要起因归结为宇宙线的运动，那么北天极方向宇宙线强度的减少意味着宇宙线向北天极流出，沿旋臂方向的加强则是沿旋臂方向的流入或流出。

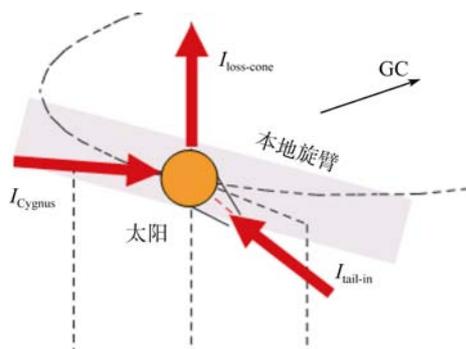


图2 羊八井中日合作 ASy 实验观测到了 TeV 宇宙线各向异性的三个分量（曲晓波、张毅绘图）。Loss Cone 方向对应于北天极方向，Tail-in 方向对应于太阳系所在的本地悬臂由外至里的切线方向，而 Cygnus 方向对应由里向外的切线方向。箭头表示宇宙线相应的三个运动方向，如果这些各向异性果然出自宇宙线的整体运动的话。GC 对应银河系中心的方向

考虑到太阳系在银河系里并不处于一个特别的位置上，而且如上所述，在我们太阳系观测到的宇宙线的各向异性的方向具有很好的一般性，因为这些强度发生变化的方向或在北天极方向，或在旋臂方向，这使我们可以猜想银河系普遍存在朝银河系北天极方向的宇宙线强度的减少（流出）和沿旋臂方向的强度的加强（流入更多，流出少些）。理解这样的图像并不困难，宇宙线大都被约束在银盘的磁

场里，这里密度高，因而会在垂直盘的方向上流出去，盘上面，往北银极流；盘下面，往南银极流；沿旋臂，可以往外流出。然而，我们知道高能宇宙线中带正电的核子多，因为电子很容易在磁场中通过同步辐射损失掉能量，能量低的粒子在磁场中传播更慢，所以，流出的宇宙线更多的是带正电荷的粒子。为了保持整体的电中性，流出的正电粒子还需要再流回来（这时能量会损失掉一些），流入的最恰当的方向是旋臂的方向，因为银河系在盘上的磁场是沿旋臂方向分布的，宇宙线在此方向上流入或流出是最容易的。

要直接检验这样的图像是不可能的，因为我们无法去银河系的另一个位置上测量宇宙线的各向异性。但是，如果宇宙线是这样整体运动的话，它们就会产生一个大尺度的电流，这个大尺度的电流又会产生一个大尺度的磁场，而银河系大尺度的磁场近些年来是有很好的观测的。不久前，我国宇宙线的研究人员通过计算发现，在这样的图像下，宇宙线所产生的大尺度磁场和银河系里观测到的大尺度“晕”磁场在结构上是非常一致的（图3）。这不仅为我们理解对银河大尺度磁场提供了一个新的方法，也使我们对于宇宙线在银河系里的传播提供了一个新的理解。也让我们感受到了科学迷人的另一面，即科学有助于让我们通过对局部事物的观测和研究而了解全局和整体事物的规律和图像。

最终回答宇宙线起源、加速和传播问题的道路依旧漫长，但探索的道路上总会有很多激动人心的未知发现会给我们带来新的惊喜，进而激发我们不断的改进工作。前面谈到，目前已被发现的 TeV 源中人们还没有看到宇宙线核子所发射伽玛射线的信号，我们需要把观测能量提高到 100TeV 的能区。因为在这样的能量下，高能电子会很快地辐射掉能量，从而这个能量的电子数量会很少。那么在此能量观测到的伽玛射线就会更多的来自核子的贡献。由于伽玛射线的微分能谱大约是正比于 E^{-2} 的幂率谱，100TeV 的高能伽玛射线的流强比 TeV 处的要弱成百上千倍，探测这样的伽玛射线需要大的接收面积。而这正是羊八井中日合作实验的一个优势。中日合作实验现有的有效面积接近 4 万平方米，由大约 800 个单元面积 0.5 平方米的塑料闪烁体探测器摆在相距间隔 7.5 米的格点上，它探测

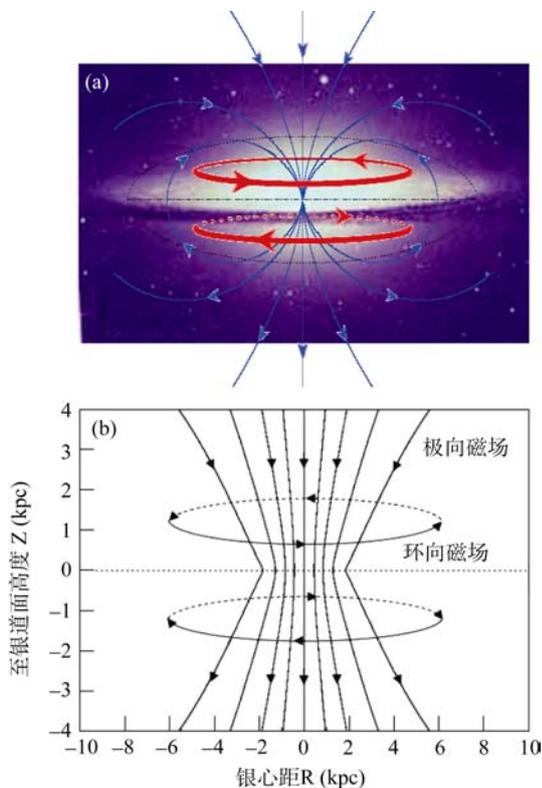


图3 (a) 天文观测得到的银河大尺度磁场的“晕”结构分布的示意图(取自国家天文台韩金林的研究文章); (b) 根据羊八井中日合作 ASy 实验观测到了 TeV 宇宙线各向异性的三个分量推测的大尺度银河系磁场的结构图, 和观测的结构非常类似(曲晓波、张毅绘图)

TeV 的伽玛射线效率大概是 1%, 有效面积大约 400 平方米, 而探测 100TeV 的伽玛射线时效率可以达到 100%。但是, 宇宙线中核子的数量远远超过伽玛射线的数量, 前者可以是后者的数千倍。如果探测器不能把宇宙线核子和伽玛区分开来, 微弱的伽玛信号就会被本底掩盖掉, 这正是这个实验自 1990 年建成以来 20 年里所处的状况。

宇宙线或伽玛射线都不是直接被羊八井实验探测到的, 它们在进入大气层时早已和大气里的空气分子发生了级联的簇射反应, 在羊八井探测器的位置上, 到达的只是次级的正负电子, 低能的伽玛射线和 μ 子。重要的是, 原初的伽玛射线在大气中发生的是电磁级联过程, μ 子数量稀少, 而核子发生的是强子级联(次级粒子中的电磁成分发生次级的电磁级联)过程, μ 子数量丰富, 而且 μ 子数量随能量近似线性地增加, 在 100TeV 能量上, μ 子数量已经很容易测量到。2010 年, 中日实验组利用水切伦可夫技术在现有阵列之下建造了 4500 平

方米的地下 μ 子探测器, 即将调试运行。这将使中日实验在 10TeV 以上能区成为国际上最为灵敏的伽玛射线和宇宙线电子的探测器。我们预计将会发现 100TeV 的伽玛射线源, 为解决宇宙线的起源问题作重要贡献。此外, 我们将可以测量 10TeV 以上能区的宇宙线电子能谱和弥散的伽玛射线能谱, 为理解宇宙线在传播过程中所发生的反应提供重要信息, 此外, 如果这些能谱中被发现有新的结构, 将对暗物质粒子的湮灭和衰变研究提供重要的信息。

研究前景展望

宇宙伽玛射线对于高红移宇宙的研究也意义非凡。近年来, 主要是通过观测红移约为 1100 的微波背景辐射和红移基本上小于 1 的 Ia 型超新星, 宇宙学迈入了精确研究的时代。其实, 宇宙在其不同的演化阶段遗留下了丰富多彩的电磁辐射的背景(图 4 是能谱乘以能量平方随能量变化关系), 红外背景是仅次于微波背景辐射的第二重要的宇宙电磁辐射背景, 其中包含了早期宇宙中星系形成和演化的历史, 而通过观测几十 GeV 能区的伽玛射线暴的能谱变化, 是我们现在所知的探测大红移早期宇宙红外背景辐射的唯一方法。同时, 几十 GeV 的伽玛射线暴还在多个方面扮演着 Ia 型超新星在宇宙学研究中的角色, 其能谱和亮度等观测测量中也包含着高红移时期的宇宙演化信息。几十 GeV 的伽玛射线暴的观测现在还处于起步阶段, 受限于现有实验的灵敏度,

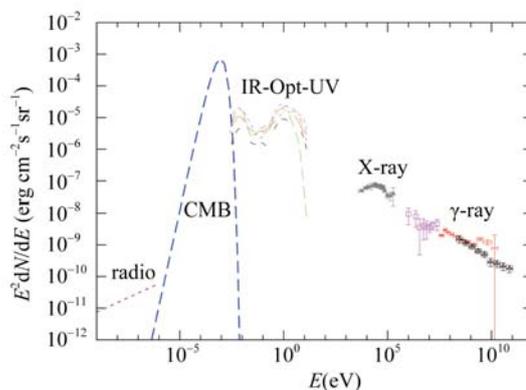


图4 宇宙电磁辐射能谱乘以能量平方随能量的分布(袁强绘图)。根据星系形成和演化的模型, 红外、可见光和紫外波段是除了 CMB 以外最强的电磁背景辐射, 还包含有宇宙演化的信息。直到目前为止, 其实验测量的结果还几乎是空白, 观测几十 GeV 的伽玛射线的能谱行为是当前所知道的唯一能够测量大红移处红外背景辐射的实验方法

观测到的几十 GeV 的光子数量屈指可数,远不足以开展定量的研究。类似于羊八井的地面宇宙线实验,如果能够在更高的海拔(5000~6000米)上开展,将会成为国际上观测几十 GeV 能区伽玛射线暴最为灵敏的先驱性实验,这将使我国所拥有的独特地理优势得到最好的发挥。海拔每上升一千米,探测几十 GeV 能区伽玛射线的效率就会提高 6~7 倍,从而可以节省仪器建造的资金和时间,此外,能量分辨率和角度分辨率也会有很大的改善。几十 GeV 能区伽玛射线暴的观测,对于伽玛射线暴物理和量子引力效应等深层次物理学基本规律的研究,也都具有重要的意义。我们希望在未来的西藏,我国研究人员能在更高海拔建造宇宙线和伽玛射线的新观测站,并不断改进探测技术,为宇宙线、天体物理和宇宙学研究做出重大的贡献。

致谢:作者感谢厉光烈主编,袁强、郭义庆和冯朝阳等同志仔细阅读本文并提出宝贵的修改意见。

(中国科学院高能物理研究所 100049)

作者简介

胡红波,男,1964年11月出生。1981年考入北大物理系,1985年毕业后直转研究生,1991年获博士学位。1993年9月至2001年8月参加了 ALEPH 实验以及 BaBar 实验。2000年入选中国科学院“引进国外杰出人才”,现为中科院高能物理所研究员。参与西藏羊八井宇宙线观测站的中日 AS γ 及中意 ARGO 实验。2006年带领中方团队以国际最高精度测量了银河系宇宙线的各向异性分布,结果在《科学》杂志上发表。自2008年11月以来任国际纯物理和应用物理(IUPAP)的宇宙线分委员会(C4)的委员。



① $1\text{GeV}=10^9\text{eV}$, $1\text{TeV}=10^{12}\text{eV}$, $1\text{PeV}=10^{15}\text{eV}$, $1\text{EeV}=10^{18}\text{eV}$

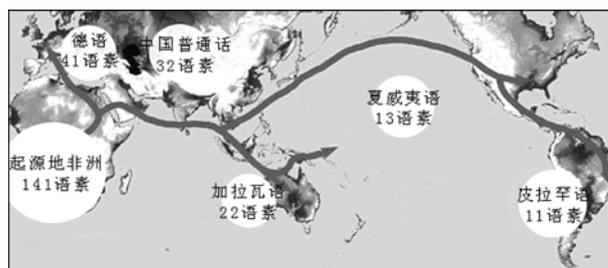
科苑快讯

人类语言出自非洲

人类基因和表型的多样性呈现距离非洲越远则越少的趋势。奥克兰大学的阿特金森(Quentin Atkinson)发现在现代语言中,距离非洲越远地区的语素(语言的最小单位)也越少。含有最多音素的方言存在于非洲所说的语言之中,而所含音素最少的口语则存在于南美洲和太平洋的热带岛屿(如图)。通过《语言结构的世界地图》(World Atlas of Language Structures)中504种语言的数据,他发现所有语言都出自非洲。5万~7万年前人类大批走出非洲,带走部分音素。这与非洲考古学发现也是相吻合的。

世界各地的这种音素使用的模式反映了人类基因的多样性模式,因为基因多样性也随人类活动范围从非洲向外扩张而衰减。一般而言,地球上的那

些最近才有人居住区域的地方语言中所含的音素较少,而那些容留人类生活数千年之久的区域(特别是撒哈拉以南的非洲)仍然有着最多的音素。这一音素使用的衰减无法通过人口的移动或其他地区性的因素来解释,它强有力地证明了现代人语言起源于非洲。



(高凌云编译自2011年6月《欧洲核子中心快报》)