



阮同泽

二十世纪初叶,人们发现,大气永远处在弱电离状态。利用探空气球还发现,这种电离的程度,在一定高度范围内,随着高度的增加而增加,如果把验电器密封起来沉入海里,则又观测到这种电离的程度随着海水深度的增加而降低。因此人们假设,大气的电离是由宇宙空间进入大气层的某种穿透性很强的辐射引起的。人们把这种辐射叫做宇宙线。

通过宇宙线物理学工作者的长期努力,利用了气球、火箭和人造卫星等观测手段,现在了解到近地空间的宇宙线有以下几点特性:(1)宇宙线的成分,主要是质子,约占90%弱;其次是 α 粒子(氦原子核),

约占10%弱;其它各种原子核约占1—2%;还有很罕见的重粒子。(2)宇宙线粒子的能量很高,从 10^8eV (eV—电子伏)到 10^{20}eV 的都有。观测到能量最高的已达 10^{21}eV 。这比目前人工加速所能达到的最高能量($5 \times 10^{11}\text{eV}$)高 10^9 倍以上!能量是 $10^{10}—10^{20}\text{eV}$ 的粒子的能谱在图1中表示。(3)能量是 $10^{11}—10^{18}\text{eV}$ 的宇宙

线具有高度的各向同性。就是说,这种宇宙线是从天空各个方向均匀地向地球袭来的。能量大于 $2 \times 10^{19}\text{eV}$ 的宇宙线才表现出各向异性。

宇宙线起源问题

物质世界,小的像光子、中微子以及其它“基本”粒子(线度在 10^{-13} 厘米以下),大的像宏观物体到行星、恒星、星云、星团、……星系(线

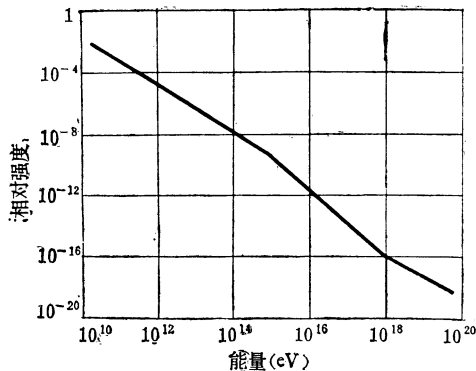


图1 宇宙线的能谱。纵坐标表示能量大于横坐标所给数值的粒子的相对数目。

度约 10^{23} 厘米)、…,呈现着丰富多彩的姿态。在无垠的宇宙空间里,有物质相对密集的地方,有相对空旷的地方,但是时刻都有着宇宙线(微观粒子)穿行其间。这些高能粒子究竟是从哪儿来的?它们的能量是怎样获得的?这就牵涉到了宇宙线起源的问题。

宇宙线是带电粒子,一个带电粒子在磁场的作用下,它运动的路径会弯曲。而太阳系、星际空间普遍地存在着或强或弱的磁场,因此要想从宇宙线粒子来到地球大气顶部时的方向反推回去找它的源,这种办法既不合理也行不通。正因为这样,研究宇宙线起源问题所遇到的困难显得特别突出,成为现代天体物理学的中心问题之一。

为探索宇宙线的源头,让我们先看一下我们所处的环境。按离太阳的距离来说,我们的地球是太阳系中第三个大行星,沿椭圆轨道绕太阳运行。太阳又是银河系中的一个普通星体。银河系大约由 10^{11} 个像太阳那样的星体组成,它的形状大致像个铁饼,直径大约10万光年,中心厚度大约2万光年。银河系的中心叫银心;“铁饼”的中心平面叫银面。太阳位于离银河系中心约3万光年的地方。在银河系外还存在着许多星系,叫做河外星系。它们的大小和组成大都和银河系类似。我们用光学望远镜和射电望远镜所能观测到的那一部分宇宙,称为总星系,它的半径是100亿光年。在这广漠的宇宙环境中,究竟是什么地方产生着高能宇宙线粒子呢?

起源于超新星的假设

我们首先想到的是离地球最近的星体:太阳。太阳是个大火球,质量是 2×10^{27} 吨。在它的内部,物质进行着猛烈的核反应过程。过程中所产生的粒子,因为埋得太深,除中微子外是很难逃出表面的。在太阳表面,有时会出现耀斑,它是太阳表面局部爆发的标志。在一次强烈的表面爆发中,太阳抛出大约 10^{33} 个

粒子，它们可被加速到的能量仅达 10^6-10^9 eV 之间，而数量上也仅占宇宙线的十分之一左右，所以太阳产生的宇宙线，能量低而数量少，它不是宇宙线的主要来源。

其次，从间接的估计，银河系内宇宙线粒子的产生率应是 10^{43} 个/秒。另外，从太阳耀斑爆发的频率估计太阳宇宙线粒子的产生率是 10^{26} 个/秒。前面说过，银河系内包含约 10^{11} 个像太阳那样的星体，那末由银河系的全部恒星产生的宇宙线的产生率应是 10^{37} 个/秒，这远比 10^{43} 个/秒小。所以类似于太阳那样的恒星也不可能是宇宙线的主要来源。

那末，是否会存在某些特殊的天体，可作为宇宙线的源头呢？我们知道天文学中早已发现有些星体的亮度是会变化的，这种星叫变星。变星当中有一类爆发式变星，它的亮度可在几天之内突然增到原来的 10^3-10^4 倍，能维持一段时间，然后亮度逐渐减弱。这种星体叫新星。爆发规模更大的新星叫超新星，它在几天之内亮度可增加至原来的 10^7-10^8 倍。我国古代天文学史料中记录了不少这种星体。例如一〇五四年的超新星，西方没有记录，而在我国宋史中曾详细地被记录下来。这颗超新星位置在金牛座 α 星西北一度，离我们约 5,000 光年。一〇五四年爆发时，亮度超过金星，连续 23 天在白天都能看见。现在用光学和射电观测可观测到在它四周留下一个气壳，它仍以每秒 1100 公里的速度向外扩张着，这就是著名的蟹状星云。从气壳的扩张速率推算，表明爆发是在一〇五四年开始的。这样就确认蟹状星云是一〇五四年超新星爆发后的遗迹。蟹状星云是一个很大的气体云，发着淡淡的白光。还重迭着一个范围更广的射电发射区。光学辐射和射电辐射的总能量现在仍是太阳的 10^5 倍。一九六九年又在蟹状星云的中心发现了一颗脉冲星，它发射短而有规律的脉冲。脉冲周期是

33 毫秒。脉冲辐射包括射电、可见光、X-射线和 γ -射线，波谱很宽，但周期都相同。

超新星被发现不久，一九三四年有人提出超新星是一种巨大的爆炸，它抛出大量物质，这可能是宇宙线的源，能提供宇宙线所携带的能量。在银河系内有历史记载的公认的超新星大约有 7 颗（见题头银河系平面图。超新星多发生在银河系平面。圆圈表示历史上有记载的超新星的位置，数字表示观测到它爆发的年代）。射电天文观测资料表明，银河系内超新星遗迹多数分布在离银心约 1—2 万光年的地方。有一种看法，认为大多数宇宙线来自超新星，这就是宇宙线的超新星起源假设。

前面提到，宇宙线具有各向同性的性质。人们从这点出发，自然可假设宇宙线是银河系以外来的，这就是宇宙线的河外起源假设。因为河外星系的分布基本上是各向均匀的，而银河系中的星体、超新星则主要集中在银面内。相对于河外起源来说，超新星起源假设则属于银河系内的起源假设。

目前，对于宇宙线起源的问题，大致上可分为河内、河外两类。河内的主要是指超新星、磁星，或是银河系核心的爆发和核心的活动；河外的指各种类型的星系，特别是射电星系和能量特别大的类星体，在宇宙线起源的各种假设当中，多数人认为超新星起源假设是最有希望的一个。

早在一九五〇年有人提出，在蟹状形星云中如果存在着宇宙线电子，那末这些电子在蟹状星云的磁场中运动时将产生连续的光学辐射，并予言这种辐射具有同步辐射的性质。应是高度偏振的。后来不久，果然被观测到，而且证实这种同步辐射是偏振的。这说明蟹状星云中出现有宇宙线电子。这是在观测上第一个对宇宙线的超新星起源假设的支持。人们想像，既然超新星遗迹中有电子，自然也会有质

子、原子核存在。后来又发现，大多数射电源的辐射都具有同步辐射的性质。

γ -射线给予的信息

人们很早就认识到观测宇宙线中的高能 γ -射线可以对解决宇宙线的起源问题提供重要的信息。 γ 光子不带电，它不受磁场的影响。它是宇宙线源中的间接产物。例如 100 多 MeV (兆电子伏) 的 γ 光子是 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 过程的产物，而 π^0 介子是高能宇宙线和星际气体分子相碰撞的产物。因此如果能在空间某处找到这种高能 γ 光子，就可推断在附近产生着宇宙线。

要在地面观测 γ -射线是不容易的，因为大气层内次级宇宙线中就存在大量 γ -射线本底，要避免产生混淆，就必须在大气层外进行观测。近年来，人造卫星技术的提高，使得这种观测成为可能。最近在人造卫星上观测到蟹状星云和维拉超新星（位置在船帆座）遗迹处发出 100 MeV 的 γ -射线，说明它们中间产生着宇宙线。

但是从这两个超新星遗迹的观测出发，能否推论说一切超新星遗迹都产生宇宙线，从而说明超新星是宇宙线的主要源呢？这还不行，还需要对全部天空进行 γ -射线的观测后才能下结论。

一九七五年有一颗人造卫星，载着丝火花室 γ -射线望远镜对银纬（天体在银道坐标系中的一个坐标，银面为 0° ，银极为 $+90^\circ$ ） $\pm 10^\circ$ 以内的天空作了观测，给出了沿银面来的高能（ >100 MeV） γ -射线的分布，见图 2。观测到在蟹状星云、维拉超新星遗迹处以及银心方向 γ -射线强度很大。对银纬 $>30^\circ$ 的范围选择了 6 个区域进行选测，观测到的 γ 射线基本上是很小的均匀的本底。

另一方面，最近对星际气体（主要是分子氢）的分布也做了测定。可惜只对全部银径的一半多一点的地方定出了分布，还不完全。有人根

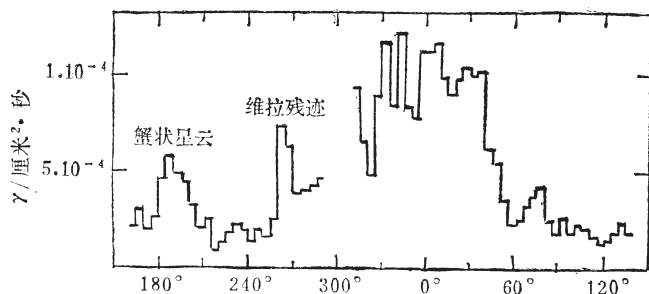


图2 从银面来的高能 γ -射线沿银径的强度分布

据上面两项观测结果进行了分析。假设宇宙线的分布和河内超新星的分布是类似的,由宇宙线粒子和星际气体分子的作用可推算出 π^0 介子的产生率分布,从而计算出 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 的 γ -射线分布。这个分布和卫星观测到的 γ -射线分布符合得很好。反之,如果假设宇宙线分布是均匀的,得到的 γ -射线分布在向银心方向则小于观测值;背银心方向则是观测值的两倍。明显地和观测值不符。从这一分析得出结论:宇宙线的分布与银河系中超新星的分布明显地相似,说明了超新星产生着大批的宇宙线粒子流。这个卫星的观测对宇宙线的超新星起源假设是个重要的支持。

但是起源问题是否完全解决了呢?还不能这样说。 γ -射线的观测结果,说明 γ -射线的分布存在着各向异性。在 γ -射线发源地的附近有 π^0 介子产生,也就是说存在着宇宙线粒子分布的各向异性。考虑到超新星产生高能粒子的各种可能的机制,产生粒子的能量最高是 10^{16} — 10^{18} eV。另外,超新星遗迹中有的有一个脉冲星。人们认为脉冲星是高速旋转着的中子星,它是超新星爆发后所残留的星体,处在星体演化的末期。它具有很大的密度($\sim 10^9$ 吨/厘米³)、极强的磁场($\sim 10^{12}$ 高斯)。在它的自转轴与磁轴不重合时会发射强大的低频电磁波,估计可将场中的粒子加速到 10^{21} eV。可是银河系的磁场很弱,平均磁场强度约 10^{-6} 高斯,这一点磁场对于能

量大于 10^{16} eV的粒子来说是不足以把它们牵制住并贮存在银河系内的。这样,超新星如果产生能量大于 10^{16} eV的粒子,那末应在近地空间表现出各向异性来。但观测到的事实是能量大于 2×10^{19} eV时才表现出各向异性,因此存在问题还很多。另外,从图1的能谱看,在 10^{15} 和 10^{18} eV处有折断,即斜率有改变,这暗示着粒子的产生有不同的机制。不过,考虑到图1所表示的相对强度,可以说 10^{16} eV以下多数的宇宙线粒子,比较可能是起源于超新星的。它们一旦产生,通过星际空间,在星际磁场中改变速度的方向,来到近地空间,自然就表现出各向同性来了。

还可以问一下,观测到的 γ -射线是否确是从 π^0 衰变来的?这还有待于进一步的澄清。

宇宙线从一十年代发现起,人们就一直在探讨它的起源,可是起源问题作为天体物理问题来考虑仅是五十年代的事。因为一九四八年才发现宇宙线中还有质子以外的原子核;一九五〇年才知道宇宙中大部分射电辐射具有同步辐射的性质。射电天文学和宇宙线研究的结合诞生了高能天体物理,它包括宇宙线天体物理、X-射线天文学和 γ -射线天文学。射电天文学带来了星际空间、星系际空间中宇宙线电子的信息; γ -射线天文学则带来关于宇宙线质子、原子核的信息。使得我们对宇宙线的研究,从近地空间(距离只几十个光分)一下子跨到

星际空间(例如5,000光年)或更远的地方去。的确, γ -射线天文学把宇宙线物理学的研究推进到了一个新的阶段。

意 义

研究宇宙线的起源又有什么意义呢?我们知道,天体演化、物质结构和生命起源是自然科学的三大基本研究课题,这三大课题的解决对人类认识世界、改造世界具有重大的意义。宇宙线是宇宙空间的高能粒子流,它和宇宙空间中发生的天体物理过程紧密联系着,它直接反映了天体在演化过程中一定阶段上的情况,因此它携带着天体演化的重要信息,为天体演化的研究提供很宝贵的材料。另一方面,宇宙线本身包含着微观粒子的无限的多样性,因此必然不能和物质结构的研究割裂开来,例如宇宙线中罕见的重粒子的发现(参见本刊76年第1期18页),它可能是物质结构中的下一层次的东西,又反过来给起源问题增添新的内容。

近年来,宇宙线天体物理学发展很迅速,但对于宇宙线的起源问题来说,还有很长的路要走。正如毛主席教导我们的“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。因此人类总得不断地总结经验,有所发现,有所发明,有所创造,有所前进”。我们相信不久的将来,宇宙线起源问题的研究会有更新的进展。