

谈一谈 宇宙线天体物理

霍安祥 徐春娴

宇宙线天体物理研究的是宏观世界中各种基本粒子的产生和它们的相互作用过程，以及这些现象和天体演化过程的关联。其探测手段和方法同高能物理、核物理研究中所使用的差不多，所不同的是把它们放置在空间运载工具——卫星、火箭和气球上对天体进行观测。至于对宇宙线中超高能现象，即对能量大于 10^{13} 电子伏的粒子的研究，常常是在地面和高山上，用规模较大的设备作实验；但主要是通过探测由高能粒子穿过大气层过程中多次反应产生的次级粒子，或更多次的次级粒子作间接研究。

宇宙线中高能粒子主要来源于银河系和河外星系。在地球或地球附近被观测到的宇宙线，仅限于稳定粒子，如质子、各种原子核、电子、阳电子、各种反粒子、光子和中微子。至于不稳定粒子通过这样大的宇宙空间到达地球附近时早已衰变为其他稳定的粒子。带电粒子在宇宙空间传播过程中容易受星际磁场的偏转，会与星际物质发生作用，加上宇宙空间其他物理因素的影响，不能保持原来产生时的方法和某些特征。光子，特别是高能光子，虽然也会受到空间很稀疏介质的影响，但穿透性较好。中微子则受影响甚微，能直线传播很远。但中微子这种粒子与物质作用极弱，所以探测它也极其困难。下面我们想着重谈一谈在宇宙线研究中观测到的一些现象。

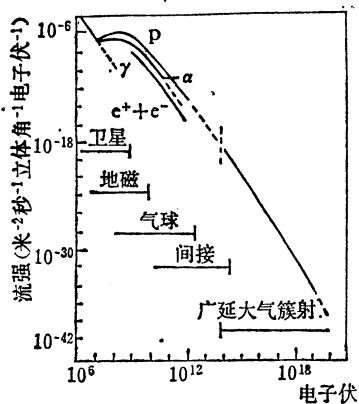


图1 宇宙线初级粒子能谱

一、初级宇宙线的能谱和成分

在地球大气层外，速度接近光速的宇宙线粒子的总通量约为每秒、每平方米一个粒子，相应的能量密度为每立方厘米1电子伏或 10^{-12} 尔格/厘米³。粒子的能量呈幂律分

布(图1)。在能量大于 10^9 电子伏时，其微分能谱(在一定的能量间隔内粒子数目随能量的变化，我们称为此粒子的微分能谱)指数为 -2.6 ，从 10^{15} 电子伏至 10^{18} 电子伏斜率变陡，指数为 -3.2 ，而在 10^{18} 电子伏以上，斜率又变为较平。利用广延大气簇射方法间接测得的高能粒子能量已达 10^{20} 电子伏— 10^{21} 电子伏。在 10^{15} 电子伏能区所发生的明显变化，至今仍没有确切解释，但有两个可能性：一个是宇宙线起源或重核的丰度变化；另一个是在 10^{15} 电子伏区域，宇宙线与大气原子核作用时产生了新现象。

在初级宇宙线中，除了占优势的质子(氢原子核)外，几乎包括从氢核一直到铀核的所有自然界存在的原子核。因此可以认为宇宙线的核成分是在宇宙物质演化过程中产生的。由于原子序数 Z 大于40的原子核仅观测到数百个事例，虽然有迹象表明初级宇宙线中 $Z \geq 90$ 的重原子核有可能比太阳系中丰度大一个数量级，但还有待于今后大量数据的积累。对于原子序数 Z 小于30的宇宙线核成分丰度和太阳系丰度的比较见图2。可以看出：实验测得的宇宙线核丰度大体上与其他方法测得的太阳系核丰度一致。不同的是轻原子核Li(锂)、Be(铍)、B(硼)比太阳系丰度高5个数量级，近铁元素($Z=19-25$)的丰度也显著的高。另外，宇宙线成分中相邻的原子序数偶数核与奇数核丰度之差(例如氧核与氮核丰度之差)小于太阳系二者之差。这些不同之点可用宇宙线在星际空间传播时与其介质产生核碰撞来解释。如C(碳)、N(氮)、O(氧)等核在碰撞后，一部分

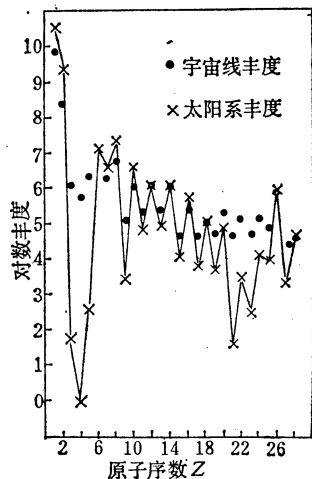


图2 宇宙线和太阳系元素的相对丰度

分裂为 Li (锂)、Be (铍)、B (硼)。而 Fe (铁)核在碰撞后,部分分裂为近铁原子核。随着初级宇宙线能量的增加,在元素丰度之间的比值也有一些变化,但这方面的实验还较粗糙。

对于初级宇宙线成分中同位素的研究是十分重要的。因为它将给我们提供宇宙线在宇宙空间传播情况的信息。我们可用它来检验各种传播模型。这些模型大都涉及到它们的母体成分、核作用过程、路程长度的分布、游离能量损失和太阳的调制。对这个问题目前虽然有了大量测量的信息可供分析,但是到现在还未能得到较好的解决。

二、初级电子的观测

1950年在射电天文的观察中,发现了射电波谱有相当宽的频带。这个现象可以用高能相对论性电子在银河磁场中的同步辐射来解释,这是在初级宇宙线中存在电子的重要论据。首次探测到初级电子是在1961

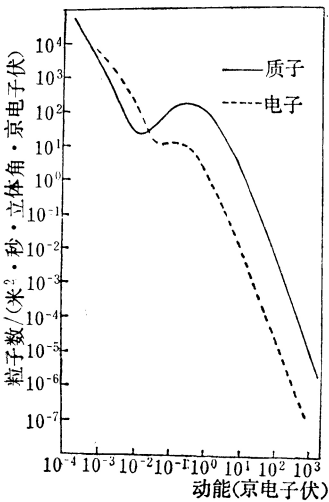


图3 初级电子能谱和初级质子能谱的比较

年,接着也观测到了阳电子。图3综合了近年来关于初级电子能谱的测量数据,虚线表示电子从0.1兆电子伏到1000京电子伏能区的能谱。连续线表示质子的能谱。其低能段可以用在宇宙空间的宇宙线粒子与空间介质的原子外层电子相碰撞而产生的电子来解释,50兆电子伏至几百兆电子伏之间的电子流强是由 π 介子衰变为 μ 子再衰变成电子产生的。而在高能区,可以看出高能电子谱与质子谱有相同的谱形,这反映了它们有相同的加速机制。

实验指出:阳电子的流强与正、反电子之和的流强比值,在1京电子伏能量以下时小于0.4;在1京电子伏能量以上时小于0.1。这说明电子在能高时主要不是由次级产生源产生的。因此,人们希望在更高能量如1000京电子伏以上时,对电子能谱进行精确测定之后,能获得关于初级电子的加速机制和传播过程的新信息。

三、 γ 射线天文学

近10年来,人们利用飞速发展的空间技术,对

宇宙空间来的 γ 射线进行了大量的观察和研究,形成了 γ 射线天文学;从而把天文学的观察从光波推向电磁波的全波段。 γ 射线的产生和作用往往直接与一些高能过程有关,而且它又有很强的穿透性——在横越银盘^[1]直径时只有百分之一的作用几率,所以它能从遥远的宇宙深处到达地球。 γ 射线不带电,可不受星际磁场的影响,因而能较多保留源的方向的信息,从而得到有关天体起源、演化和结构的知识。

但是,由于 γ 射线流强比 α 射线和荷电宇宙线粒子流强低得多,使对它的观测遇到了较大的困难。然而由于技术的进展,虽然成功的 γ 实验观测只有近10年的历史,但已取得相当大的进展。例如:已观测到来自银面^[2]、银心^[3]的 γ 射线,确认了各向同性的弥漫 γ 射线背景的存在;发现了宇宙 γ 暴;并确认了一批分立的 γ 射线源。1972年对大的太阳耀斑 γ 射线线状谱进行了成功的观测,它给研究天体的成分和核聚变过程提供了新手段、新线索。这些新成就已使 γ 射线天文学进入满怀希望的发展阶段。

1. 银盘和银心的 γ 射线的发射;银盘和银心是银河系物质的稠密区。60年代通过射电波段21厘米射线的观察,确定了银河系中氢原子的分布区域聚集在银盘的旋臂上,这与密度波理论是一致的。人们联想到这一区域也可能有 γ 射线发射。果然在1972年,OSO—III卫星首次观察到来自银盘和银心的 γ 发射,见图4。其后,这一现象被大量的卫星和气球观测所证实。

现在一般认为:银河系内100兆电子伏以上的 γ 光子,70%是产生于 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 过程,30%产生于宇宙线电子与背景辐射场的逆康普顿散射。而在10至30兆电子伏间的 γ 射线,则主要是在宇宙线电子与电磁场和物质的相互作用中产生,这也提供了探索宇宙线电子在银河系中分布的方法。

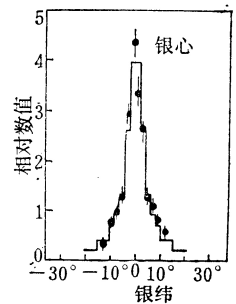


图4 在银盘上来自银心的能量大于100兆电子伏的 γ 射线分布

2. 弥漫 γ 背景:许多实验组都观测到各向同性的

[注] 银盘、银心和银盘面:

银河系是一圆盘型的复杂星系,由各种类型的恒星、双星、星团和弥气体星云、尘埃星云所组成。这个有着旋涡结构的圆盘型星系的中部向两面凸出,越到边缘越薄,它的直径约十万光年,边缘厚度三千到六千光年,中央部分呈扁球状,厚达一万五千光年。它的成员围绕着通过圆盘(即银盘)的中心(即银心)与圆盘的平面(称为银盘面)垂直的轴旋转,大约两亿五千万年转一周,轨道差不多呈圆形。

弥漫 γ 背景。它构成了直到 200 兆电子伏的连续背景谱，这个谱基本上符合幂律分布。关于这种辐射的来源有许多说法不一的猜测：有的认为这是在全宇宙历史过程中宇宙线与物质作用产生的 γ 射线的积累效应，有的认为这是正、反物质湮没产生的，或是宇宙线电子与 2.7°K 微波光子逆康普顿散射的结果等等，但也有人认为是银河系外许多 γ 点源发射的综合结果。

3. 核 γ 线谱的观测，1972 年利用 OSO-7 卫星对大的太阳耀斑进行观测，成功地测到 0.5 兆电子伏和 2.2 兆电子伏的 γ 线状谱，作者认为 0.5 兆电子伏 γ 线状谱是太阳耀斑加速质子，经与周围物质作用后产生的 e^+ 、 e^- 湮没所形成。而 2.2 兆电子伏 γ 线谱是核作用产生的中子被质子捕获后形成氦核而辐射的单能线状谱。1973 年，在阿波罗飞船 15 和 16 号上，用 γ 谱仪探测到月亮表面发出的 γ 线谱，并由此线谱推导出月亮表面的氧、镁、铝、硫和钾等元素的丰度，其结果与月岩样品分析得出的结论相一致。1973 年也报导了在银心观察到 0.473 兆电子伏的 γ 线谱，这被认为是 0.511 兆电子伏 γ 射线红移后而形成。

4. 宇宙 γ 射线暴： γ 射线暴是能量为几个千电子伏至几个兆电子伏的高能光子流在极短时间内的陡增

现象。它的强度可比其他天体的 γ 发射大几个数量级。最早它是被维拉卫星偶然发现。到现在为止，利用卫星、气球已观察到近百个 γ 暴事例，现已达到每月一个 γ 暴的事例频数。它的主要特征是：i) 起始脉冲上升时间为 0.002—3 秒，持续时间小于 0.1—10 秒。ii) 整个暴一般由 1—5 个或更多个分立脉冲组成，其间隔 1—30 秒。iii) 到达的能流是 3×10^{-6} — 10^{-3} 尔格/厘米²·秒，平均是 10^{-4} 尔格/厘米²·秒。iv) γ 暴的能谱在低能端符合热韧致辐射谱形，而在高能端服从幂律。v) 已发现的 γ 暴在天球上的分布与各向同性假设不矛盾。

应该说： γ 射线天文学现在还仅处于开始阶段，大量积累资料以及仪器探测效率和分辨能力的提高，将进一步推动这方面研究工作的深入开展。

从以上几个方面的简单叙述，我们可以看到宇宙线天体物理研究中的一个重大课题，就是宇宙线(包括宇宙 γ 射线)的起源。这个问题从宇宙线物理学诞生的那一天就一直存在着，它又是整个天体物理学的一个重要部分。虽然近若干年来，在这方面有了一定的进展，各种实验观测都提供了不少新的数据，但是距离问题的基本解决还十分遥远! (题头：陈世铮)