

揭示高能宇宙的奥秘

——空间高能 γ 射线的产生

范 敏 敏

长期以来,宇宙线的起源一直是个十分令人困惑的问题,至今仍得不到圆满的解释.究其原因,主要的一点就在于,从星体射出的高能宇宙线荷电粒子,在星际或星系际空间的磁场中运动时,会不断地改变方向.于是,在地面附近所观测到的高能宇宙线粒子的入射方向并不与它们在星体源中的出射方向有关,也就是说根据所观测到的高能宇宙线粒子的径迹,无法去追溯它们的源头.这样,高能宇宙线起源的研究就受到了很大的限制.

近年来,从一些分立的星体上陆续观测到了某些高能 γ 射线流.由于这些 γ 射线流往往是高能粒子在星体源附近发生的各种相互作用的直接或间接产物,同时,由于 γ 射线不受空间磁场的影响,它们从分立源出射后可以径直来到地球,因此,在地面附近通过对星体高能 γ 射线流的观测,可以直接指明在这类天体中存在着高能粒子流,从而为高能宇宙射线源的证认提供可靠的观测依据.

从分立星体源出射的高能 γ 射线流,基本上都是星体内部相对论性电子或核子与星体物质发生相互作用的产物.因此,空间高能 γ 射线发射机制的研究与星体内部的物质分布、粒子的加速过程以及恒星的晚期演化等都有密切的关系.目前有关这方面的研究还

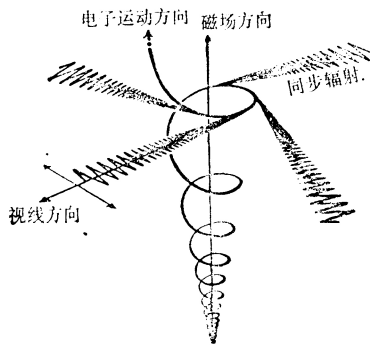


图1 电子在磁场中运动发射同步辐射

不很成熟,我们仅对几种可能的发射过程作些说明.

1. 同步辐射 从某些星体发出的相对论性电子,当它穿越星体磁场时,由于受到洛伦兹力的作用,电子将围绕着磁场方向作螺旋状运动.按照电磁理论,这样运动的电子将向外辐射电磁波.这类辐射称为同步辐射(见图1).在这类辐射中,虽然光子能谱的峰值所

对应的能量比初始电子能量要低得多.但如果在星体源中电子能被加速到很高的能量(10^{12} 电子伏以上),那末同步辐射将是星体高能 γ 射线的一个重要来源.

自从在一些射电脉冲星上观测到某些高能及超高能 γ 射线流以来,不少人认为,这些 γ 射线流就起源于同步辐射.这是因为,在高速旋转的磁化中子星——脉冲星上,如果其旋转轴与磁轴不重合,将会不断地发射低频电磁波.电子在具有大量低频辐射的波场中降落,可以被加速到很高的能量($\sim 10^{13}$ — 10^{16} 电子伏).与此同时,在脉冲星形成的过程中,由于快速塌缩,被“冻结”在星体中的磁场将随着星体的不断收缩而增强,最终在脉冲星表面可以形成极强的磁场(强度 $\sim 10^{12}$ 高斯).高能电子在如此强的磁场中的同步辐射就有可能出射高能 γ 射线.进一步的分析指明,上述辐射机制对于解释脉冲星的小于 10^{11} 电子伏的高能 γ 射线流,似乎是比较成功的.但对于能量大于 10^{11} 电子伏的超高能 γ 射线流,却还存在着困难.

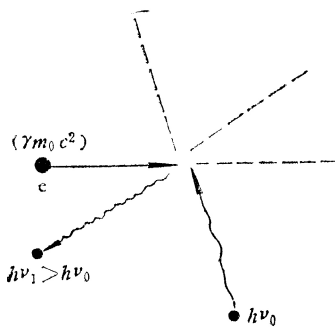


图2 在实验室系中观测光子与电子的逆康普顿散射

2. 逆康普顿散射 在某些星体周围存在着较弱的磁场,从这种星体出射的相对论性电子在弱磁场中的同步辐射将产生出大量的低能光子.当这些光子与高速电子碰撞时,可以引起逆康普顿散射,即光子在碰撞过程中从电子那里获得一部分能量,并以较高能量的形式发射出来(见图2).这一过程是康普顿散射的逆过程.通过逆康普顿散射,可以使星体光子的能量有很大的增殖,从而成为空间高能 γ 射线产生的一种可能的机制.

以蟹状星云为例,它作为一个超新星遗迹,常常被认为是一个重要的宇宙射线源.对这个星云的射电、光学以及X射线波段的观测表明,这些电磁辐射可以很好地解释为相对论性电子(能量一直可达 10^{14} 电子伏)在星云磁场($\sim 10^{-4}$ 高斯)中的同步辐射.这些同步辐射光子,当它们与高能电子进行逆康普顿散射时,

就能产生出相当高能量的 γ 光子。这类高能 γ 光子实际上可以看作是同步辐射与逆康普顿散射这两个过程的综合产物。仔细的分析表明,在蟹状星云中,与同步辐射所产生的 γ 射线流相比,在 γ 射线能量小于 10^8 电子伏范围内,由同步辐射-逆康普顿散射过程所贡献的 γ 射线流是微不足道的,但是在大于 10^8 电子伏以后,随着能量的增大,同步辐射-逆康普顿散射过程会逐渐地变得重要起来。例如由同步辐射所产生的较高能量光子,当它们与 10^{13} — 10^{14} 电子伏的高能电子进行逆康普顿散射时,就能产生出 10^{11} — 10^{12} 电子伏的 γ 光子。据认为这是蟹状星云高能及超高能 γ 射线的一个重要来源。此外,对于最早证认的河外高能 γ 射线源——半人马座 A 源,其超高能 γ 射线的发射过程,也曾经有人用在星系致密核中产生的上述同步辐射-逆康普顿散射过程来解释。

3. 介子和超子的衰变 如上所述,从某些星体出

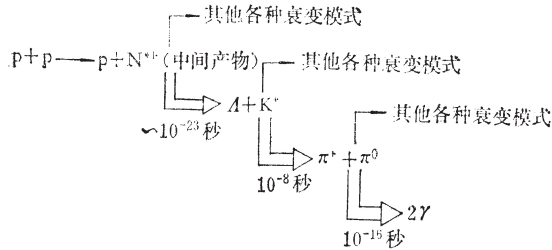


图3 高能质子-质子相互作用产生高能光子

射的高能电子流,在与星体物质的相互作用过程中会发射出高能 γ 射线流。除此之外,星体的高能质子流与星体核物质的碰撞也能贡献出相当一部分高能 γ 射线流。在这类碰撞中, π^0 介子是一类常见的产物(见图3)。 π^0 介子通过衰变会转换成一对能量较高的 γ 光子。在实验室系中,这类光子的最小能量与最大能量之和将等于 π^0 介子的总能量。因此,高能质子-质子碰撞通过高能 π^0 介子的衰变而成为较高能量 γ 射线的一个重要来源。在这类碰撞中所产生的 γ 射线强度主要依赖于高能质子流的强弱、能谱以及碰撞物质的密度等。例如在蟹状星云中,假若高能质子与星云气体的碰撞被分散在整个星云体积内,则根据星云的密度及质子流的总能量可以推知,由高能 π^0 介子衰变所产生的高能 ($>10^8$ 电子伏) γ 射线流将是微不足道的,但如果上述碰撞被限制在一个比星云体积小数千倍的范围内,同时,如果碰撞气体的总质量仍保持有一个太阳质量,碰撞区域内质子总能量可达到 10^{40} 尔格,在这些条件下,高能 π^0 介子衰变将成为蟹状星云中高能及超高能 γ 射线的重要来源。由此可见,星体高能 γ 射线的 π^0 起源过程与星体物质的分布以及高能质子流的起源等有着密切的关系。

在质子-质子碰撞中,除了高能 π^0 介子以外,

高能量的 K 介子和 Σ^+ 、 Σ^0 、 Λ 超子以及不稳定的重子共振态的形成及其衰变也是高能 γ 射线的可能来源。在形成这些不稳定粒子的相互作用过程中,虽然作用截面一般都比较低,但由于初始质子能量的很大一部分会转移给这些粒子,而这些高能粒子的衰变又经常伴随着高能 γ 光子的发射。因此,很高能量 γ 射线流的相对强度将随着不稳定粒子的不断发射而增强。

4. 弯曲辐射 近年来发展了一种叫“弯曲辐射”的模型,它可以用来解释脉冲星上高能及超高能 γ 射线是如何产生的。如上所述,脉冲星表面存在着非常强的磁场,在脉冲星的极冠附近,磁场力线高度密集,而且被强烈弯曲。当由脉冲星所加速的高能电子在极冠附近这样的磁场中向外运行时,由于其运动方向不断被弯曲,因而能以 γ 光子的形式向外辐射能量,这就是所谓的弯曲辐射。这类辐射的主要特征是 γ 光子可以具有很高的能量,甚至能与辐射电子的能量相比拟。于是,在脉冲星的极冠附近,可以比较容易地形成能量高达 10^{12} — 10^{13} 电子伏的 γ 射线流。不过,如此高能量的 γ 射线在脉冲星极区附近的强磁场中很容易转换成正负电子对,因而,这些高能 γ 射线能否从极区附近逃逸出去仍是个问题。近来,对这个模型作了某些新的改进,可望弥补这方面的不足,从而使弯曲辐射有可能成为脉冲星高能 γ 射线的一个重要来源。