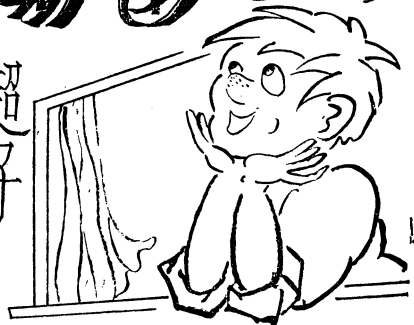


观测宇宙中微子 的一个新窗口

——漫谈超
高能中微子
天文学



范钦敏

天文观测表明，离我们银河系较近的一个特殊星系 M82 正在发生剧烈的爆发。在爆发过程中，星系本身会发射十分强大的光子流和荷电粒子流，除此之外，它还能发射很强的高能中微子流。据估计，这类高能中微子的辐射能流可达到太阳各种辐射能流总和的几十亿倍，简直可以和我们银河系的总辐射能流相比拟。可见，M82 星系是一个多么巨大的空间高能中微子源。这些高能中微子是如何在星系中产生的？它们与什么样的天体过程相联系？如今又怎样去探测它们？这些都是目前中微子天文学所面临的重要课题，它们与高能物理学也有着密切的关系。

空间高能中微子的产生

宇宙空间存在着大量的中微子，各种不同能量的空间中微子是各种不同天体过程的产物。超高能中微子天文学所要观测的是来自宇宙空间的能量 $\geq 10^{13}$ 电子伏的超高能中微子。这类中微子经常都是由空间高能粒子通过与其它粒子的各种相互作用产生的。最常见的一类相互作用，是高能质子打在星体云或星际介质的核子上，通过强作用产生出 π 、 K 介子，而后这些介子衰变便形成中微子。在这类作用过程中，由于高能质子每次都把相当大一部分能量转移给介子，而介子通过衰变又把一部分能量传给中微子，因此只要入射质子的能量足够高，在这个过程中就能形成高能的空间中微子。此外，质子-质子碰撞还能直接产生中微子。不过，只有当入射质子能量极高时 ($\geq 10^{16}$ 电子伏)，直接作用产生的高能中微子才能与间接过程相比拟。总之，高能质子的强相互作用是产生空间高能中微子的主要途径。

此外，高能质子与光子的电磁相互作用也能产生空间高能中微子。原来，在宇宙空间存在着一种到处都有的能量很低的光子流，通常称为宇宙微波背景辐射。当具有很高能量的质子流在宇宙空间飞行时，随时随地都可能与微波背景辐射光子发生相互作用，并形成 π 介子。由于这类介子是通过与光子作用产生的，故称它们为“光致 π ”。很高能量的光致 π ，通过其衰变，便会产生高能中微子。不过，由于光致 π 产生过程的阈能很高，因此只有在质子能量很高时 ($\geq 10^{19}$ 电子伏)，这类过程才会发生。同时，由于光致 π 过程属于电磁作用过程，随着质子能量在大于阈能之范围内继续增加，这类过程的截面会明显地增大，因而在极高能量下该过程有可能产生出与强作用过程可以相比拟的特高能量 ($> 10^{17}$ 电子伏) 的中微子。可见，光致 π 过程对于特高能量中微子的产生也起着重要的作用。

在地面附近所观测到的天然高能中微子流中，除了上述在星体或星际空间形成的空间中微子流以外，还有一部分是由高能宇宙射线在地球大气层中形成的高能大气中微子流 (参看图 1)。

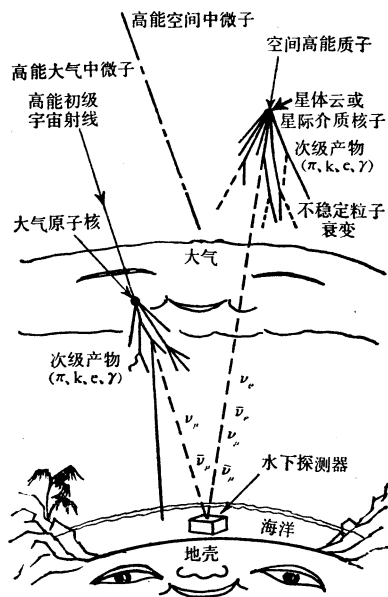


图 1 高能的空间中微子和大气中微子及其探测

由于形成地点的不同，在它们的组成及能量等方面也有很大的差异。高能的空间中微子主要是通过高能质子与星体物质或星际介质的强相互作用产生的。在这些中微子中，除了很少一部分是直接产生的以外，绝大部分都是 π 、 K 介子衰变的产物。由于产生这类中微子的强作用过程都发生在比较遥远的宇宙空间，因此，在这个过程中所形成的各类介子都有足够长的时间进行衰变。于是，在空间中微子中，包括有介子衰变所形成的各种类

型中微子,例如电子中微子(ν_e), μ 子中微子(ν_μ)以及它们的反粒子($\bar{\nu}_e$ 、 $\bar{\nu}_\mu$)等。

高能量的大气中微子虽然主要也是由初级宇宙射线与大气物质作用产生的 π 、 K 介子的衰变而形成的。但是,作为衰变产物的高能 μ 子,由于在大气厚度中很少有机会进行衰变,因此,较高能量大气中微子大部分是 μ 型中微子,而且 ν_μ 比 $\bar{\nu}_\mu$ 来得多。随着入射的初级宇宙射线能量的增大,按理说,这类中微子的能量也应随之增大。但实际上,这种增加是有一定限制的。这是因为,很高能量(例如 $\geq 10^{14}$ 电子伏)的初级宇宙射线入射到大气层中,虽然也能产生出很高能量的 π 、 K 介子,但由于相对论性时间扩展,在实验室系中,这些介子有很长的寿命,在它们产生其它相互作用之前,很少进行衰变,因而,在大气中微子中,超高能量($\geq 10^{13}$ 电子伏)的部分是很少的,与超高能空间中微子相比,它们可以被忽略。这一点对于超高能空间中微子的观测特别重要。因为,这样就减少了大气中微子的本底,从而为在地球上观测宇宙中微子开设了一个新的窗口。

空间超高能中微子的探测

由于中微子与核子的作用截面,在相当宽的能量范围内,都随着能量而增大,因此,在同样条件下,由高能中微子引起的作用事例将比低能中微子来得多,这是探测高能中微子的一个有利条件。然而,对于空间超高能中微子来说,虽然大气本底的干扰可以略去,但由于高能中微子源一般地说离我们相当遥远,能到达地面的这类中微子流十分微弱,因而,空间超高能中微子的探测仍然是一件十分艰巨的工作。

目前,空间超高能中微子的探测正准备在海水中进行。为了排除其它粒子的干扰,探测装置要安放在足够深的海底附近,利用很厚的水层把其它高能粒子屏蔽掉。整个装置是由数千个装有移波器的光电倍增管组成的,它们被排列在体积足够大(例如1立方公里)的深海里,形成一个很大的探测器阵列。从地球以外飞来并到达探测器周围的超高能空间中微子,当与水的原子核发生作用时,便会产生出相当高能量的强子,并形成核-电磁级联(参看图2)。电磁级联在水中可以形成很强的契伦柯夫光。例如当中微子能量大于 10^{13} 电子伏时,由级联所产生的契伦柯夫光子总数可高达 10^9 个以上。用上述探测器阵列的数千个光电倍增管来捕捉这些契伦柯夫光并把它们转换成电信号,就能对产生级联的空间超高能中微子进行探测。为了尽可能多地捕获中微子事例,目前设计的水下探测器所包罗的海水容量已高达 10^9 吨。

在超高能中微子天文学中,对中微子的探测还要求有较好的空间分辨,也就是说,对所测得的中微子要能给出其入射方向,以便寻找对应的空间中微子源。这

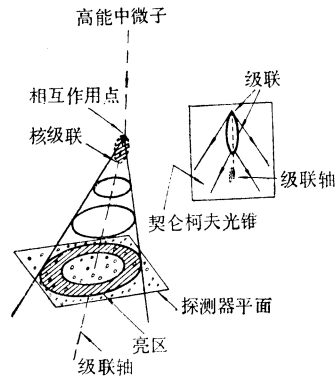


图2 由高能中微子引起的核-电磁级联及契伦柯夫光锥的形成

一点可以根据中微子所产生的核-电磁级联的特性来确定。从某个天区射来的具有一定能量的超高能中微子,当它在水中形成级联时,级联是沿一定方向(称为级联轴)发展的,电磁级联所产生的契伦柯夫光子则是围绕级联轴的一个角锥体(称为契伦柯夫光锥)所限定的(见图2)。当超高能中微子事例收集得足够多时,通过契伦柯夫光锥及级联轴分布的测定,就可以确定这些中微子的入射方向。从而有可能仔细地研究某个天区所发射的超高能中微子的特性。由此可见,上述水下探测器也可以看作是一个良好的超高能中微子望远镜。

对于空间超高能中微子的探测,除了深水契伦柯夫光探测器以外,近年来正在发展一种深水中的声探测器。它是根据超高能中微子形成的级联簇射的发声效应研制的。对于特高能量($\geq 10^{15}$ 电子伏)空间中微子的探测来说,这类装置是较为适宜的。

空间超高能中微子的探测,目前还处于开创阶段。由于可探测的事例十分稀少,因此,这类观测需要很长的时间(以年为计)。只有在收集到足够多数据的基础上,才能得到有意义的中微子信息。

空间高能中微子源

空间高能中微子源包括有弥散源与非弥散源。弥散源指的是由高能宇宙射线同星际介质或星系际介质作用而形成的高能中微子源。由于这类源分布范围相当广,在中微子望远镜中看起来不是一个点源,故称它们为弥散源。非弥散源指的是由某个星体发出的高能质子流在这个星体周围靶物质中形成的高能中微子源。这类中微子源看起来往往是一个角径比较小的分布比较狭窄的源,故称为非弥散源。这里,我们着重讨论非弥散的高能中微子源。在这类源中,由于高能中微子是通过高能质子与星体物质的相互作用而产生的,由此可以推想,在宇宙空间要形成这样的源必须具备两个条件。一是这些源能有效地产生并发射出高能质子流;二是在高能质子源附近有足够多的靶物质,能使相当多的高能质子与靶物质发生作用。近年来的观测和分析表明,宇宙空间满足这样两个条件的星体或星系还是比较多的,也就是说宇宙空间存在着比较多的非弥散高能中微子源。寻找这些中微子源并探索它

们与天体演化的过程以及高能物理过程的种种内在联系,乃是当今中微子天文学的重要课题。

空间非弥散高能中微子源类型很多,试举例如下:

超新星 一般地说,超新星大多是比较强的高能质子源。例如,有些超新星耗费在高速粒子方面的总能量可以达到银河系一年之内所辐射的总能量。因此,在这类超新星附近,具备形成高能中微子源的第一个条件。同时,因为超新星都属于快速演化的大质量星体,在它形成的过程中,常有大量物质向外抛射。如果抛射物质在超新星周围能形成密集的星体云,那末从超新星发射的高能质子流就会与星体云发生频繁的碰撞,从而形成大量的高能中微子。由此可见,在致密云中形成的超新星是一个高能中微子源。据估计,若用前述的包含有 10^9 吨水的水下探测器来观测超新星的超高能中微子源,其计数水平约达 10^2 /年。

脉冲星 脉冲星尤其是年轻的脉冲星也常常是高能质子源。由脉冲星所加速的高能质子流,当它与脉冲星外围的超新星壳体发生多次碰撞时,就会产生很多的高能中微子。有一类脉冲星属于双星系统,它是由一个脉冲星与另一个伴星组成的体系。在这类双星系统中,伴星常常能发出很强的恒星风,并在脉冲星附近形成较高密度的吸积云。对于脉冲星的高能质子流来说,这些吸积云是很好的靶物质。例如,如果伴星是一个红巨星,则从脉冲星发射的高能质子流,将约有一半会被来自红巨星的吸积云所阻挡住。因此,脉冲星特别是属于双星系统的脉冲星是一个强的高能中微子源。若用上述水下探测器观测双星系脉冲星的超高能中微子,其计数水平估计达 10^3 /年。

爆发星体 在某些星体的爆发过程中,在爆发最剧烈的阶段,常有大量的高能粒子在短时间(如若干天)内喷射出来,形成高能粒子爆。如果这类爆发产生在一个有伴星的双星系统中,则高能粒子爆将会在伴星云中引起高能中微子爆,从而在短时间内形成巨大的高能中微子流。据估计,在上述的水下探测器中,由这类中微子爆发所引起的总计数可达 10^8 。

星系核 除了上述突发性的中微子爆以外,最强的高能中微子源要算是活动星系核,例如某些射电星系核、塞福特星系核,此外还可能包括类星体。这是因为,这类星系核的辐射能流特别大,而其中很大一部分是高能粒子辐射,也就是说在星系核内高能粒子流特别强。与此同时,这些高能粒子大多产生在星系核的最深部区域,那里物质密度极大,高能粒子在逃逸出星系核之前,将经历十分频繁的碰撞。在这类碰撞过程中,高能粒子可以把自身无法辐射出去的很大一部分能量转移给中微子,通过中微子再辐射出去。例如,有些活动星系核通过上述碰撞可以把其全部能流的百分之十左右转移给高能中微子,从而使高能中微子的辐射功率竟可达到银河系总辐射功率的数十倍。可见,

高能中微子在这里扮演着十分重要的角色。星系核的高能中微子流,在上述水下探测器中所引起的计数率,估计为 10^3 — 10^4 /年。

综上所述,宇宙空间存在着非弥散型高能中微子源,而且名目繁多。它们既是空间高能物理过程的产物,同时又是那些不稳定性天体自身演化过程的产物。

超高能空间中微子观测的意义

超高能空间中微子的观测对于高能物理与天体物理都有着相当重要的意义。

目前,加速器的能量最高只能达到 10^{14} 电子伏。所以,在今后较长一段时间内,超高能空间中微子依然是地球上可以获得最高能量中微子。这类中微子的观测,对高能物理学仍将起着某种推动作用。因为,通过这类观测,可以和已有的超高能作用模型进行比较,从而为今后建立更好的物理模型作出某些约束。

在天体物理方面,空间超高能中微子的观测更能显示出它的重要性。由于中微子不受星际磁场的影响,它们从产生处可以径直来到地球,因此,通过超高能中微子的观测,可以对那些能形成非弥散中微子源的天体进行直接的证认,从而加深对这类天体的认识。此外,中微子可以从非常致密的星体中心区域跑出来,携带着这些区域天体运动的宝贵信息,而且,与高能中微子密切相关的高能质子流又是很多不稳定性天体内部过程的重要产物。因此,通过高能中微子的观测,可以揭示出不稳定性天体内部运动的种种奥秘,从而有助于对恒星晚期演化及星系演化的认识。

由光致 π 过程产生的特高能量空间弥散型中微子源的观测,对于研究宇宙微波背景辐射、超高能电磁相互作用以及可能存在的宇宙中微子背景辐射等也都都有着十分重要的意义。

超高能中微子是观测宇宙中微子的一个新窗口。对于那些不稳定性天体来说,这个窗口是特别“明亮”的,此窗口可射进高能宇宙的五颜六色的“光芒”,从而引导人们去谱写高能天文学和高能物理学的新篇章。