

2002 年诺贝尔物理奖

宋黎明

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

陆 焱

(南京大学天文系 南京 210093)

2002 年的诺贝尔物理奖使得天文研究领域再次成为人们关注的焦点。斯德哥尔摩瑞典皇家科学院宣布,2002 年度的诺贝尔物理奖将授予雷蒙德·戴维斯(Raymond Davis Jr, 美国宾州大学物理天文系)、小柴昌俊(Masatoshi Koshiha, 日本东京大学国际基本粒子物理中心)和里卡尔多·贾科尼(Riccardo Giacconi, 美国华盛顿特区联合大学公司),以表彰他们在天体物理学领域的先驱性贡献。这里包括两项成就,前两位是因为宇宙中微子的探测,后一位是因为发现宇宙 X 射线源。

中微子是基本粒子中最难探测的一种粒子。要探测一个粒子,就要使这个粒子至少在探测器中发生一次碰撞,产生一个信号。但是,中微子与物质的作用很弱,即使一个中微子穿过上亿个地球,也很难发生一次碰撞。因此,中微子是最难发现、最难探测的一种粒子。要探测中微子,必须用非常庞大的探测器,对着非常强的中微子源,持续非常长的时间。

中微子是泡利在 1930 年为了解释 β 衰变中的电子连续能谱而预言的一种电中性的粒子,它的质量极其微小,几乎等于零。由于中微子和物质的作用非常弱,要探测它的存在是非常困难的。从理论上提出中微子的概念,到证实它的存在,科学家差不多用了 25 年的时间。第一个提出验证中微子存在的实验方案是我国的王淦昌。早在 1942 年,他就建议用 ^7Be 来做实验。 ^7Be 通过俘获一个电子而变成 ^7Li 并放出一个中微子。只要测定 ^7Li 的反冲动量,就可以推知中微子的性质。20 世纪 50 年代初,阿伦和戴维斯等人才完成这个实验,显示中微子的确存在。这是间接的测量方法。直接方法直到 1955 年才由考万和莱因斯完成。他们用了 200 公升的水和 370 加仑的液体闪烁体做探测器,埋在很深的地下,对着核反应堆放射出来的极强的中微子(实际是反中微子)束,经过很长的时间,才成功地测量到为数不多的中微子。这个工作也获得了诺贝尔奖,可惜考万死得

太早,1995 年迟到的诺贝尔奖只授给了莱因斯。

戴维斯的工作是证实了太阳中微子的存在。太阳能量的来源曾经使科学家困惑了很长的时间,因为有证据显示太阳已经存在了约 50 亿年,如果太阳是一堆“煤”,只能维持数千年,如果太阳释放的是自身的引力势能,这种能量能维持数千万年。很显然,要维持太阳的辐射,这些能量过程都不行。1920 年科学家发现,由 2 个质子和 2 个中子及 2 个电子组成的氦原子质量要略小于 4 个由 1 个质子和 1 个电子组成的氢原子的质量,英国天文学家爱丁顿根据爱因斯坦的质能互换公式推测缺少的质量被转变成能量释放出来,这就是核聚变,太阳发光靠的就是核聚变。现在我们认为,太阳内部能源的约 98% 来自于质子-质子循环,大约 2% 来自于碳-氮-氧循环,这两者的效果都是把 4 个氢原子核转化为 1 个氦原子核,并以能量的形式将质量差额释放出来,在太阳内每聚变形成一个氦原子就会释放出约 2.4×10^7 电子伏特的能量和 2 个中微子。如果能探测到来自太阳的中微子就能证实太阳的核聚变,不过当时科学家认为,探测太阳中微子几乎是不可能的。诺贝尔奖委员会称戴维斯是 20 世纪 50 年代惟一一位敢于探测太阳中微子的科学家。戴维斯是利用过程 $\nu + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ 来探测中微子的。他的实验是在深埋于胡姆斯塔克 1500 米深的矿井中进行的。那是一个装有 615 吨 C_2Cl_4 液体的大容器。当中微子与液体中的 ^{37}Cl 碰撞而放出电子时就转变为 ^{37}Ar ,只要探测到 ^{37}Ar 的存在,就能证实中微子的存在。由于中微子的作用非常微弱,由此产生的 ^{37}Ar 在整个容器中只有若干个原子。 ^{37}Ar 是半衰期为 35 天的放射性同位素。一、二个月就得从这么大的容器中提取十来个 ^{37}Ar 原子。用这个办法探测中微子,真是大海里捞针,相当于在整个撒哈拉沙漠中寻找一粒金子,其难度可想而知。戴维斯持续了 30 年时间,才探测到约 2000 个中微子。观测到太阳中微子,这

现代物理知识

直接证明了太阳内部确实在进行着由氢聚变为氦的核聚变反应。但是,与太阳中微子的理论计算值相比,流量只有不足一半,这就是有名的“太阳中微子短缺”。

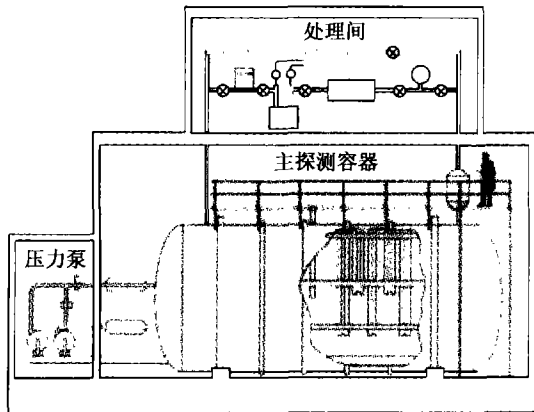


图1 戴维斯证实太阳中微子存在的实验装置,主探测设备是一个直径6.1米、长14.6米的大容器

小柴昌俊在日本神冈建造了另一台大型中微子探测器,是一个装有2140吨水的大容器,在水箱的周围装有上千个光电倍增管。中微子有可能与水中的电子或质子相互作用,产生一个高能电子,这个电子可引起微弱的闪光,探测这种微弱的闪光就可证实中微子的存在,这是神冈中微子探测器的工作原理。小柴昌俊的探测器探测到了来自太阳的中微子,并且证实了戴维斯的实验结果,即来自太阳的中微子其流量不足理论值的一半。“太阳中微子短缺”是一个非常重要的结果,由此引发了对中微子性质的进一步深入研究。一种可能性是中微子在传播过程中会有震荡,从一种中微子变为另一种中微子,比如从电子中微子变为 τ 中微子,而目前我们还不能探测到 τ 中微子。中微子震荡的一个直接推论就是中微子有静止质量,这将对宇宙学理论产生深远的影响。由此可以看出“太阳中微子短缺”这个结果的意义。

1987年2月23日在大麦哲伦云中爆发了一颗超新星。这是400年来第一次有如此近的超新星。当恒星核心部分的核能源用尽之后,由于失去维持恒星平衡的辐射压,在自身的引力作用下,恒星将发生塌缩,在塌缩的过程中,有大量的引力势能释放出来,引力塌缩是许多高能天体物理现象的根源,同时伴随着一系列剧烈的物理过程,这就是超新星爆发的基本图像。在引力塌缩中,质子逐渐变成中子,并有反应 $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$, 同时当塌缩的核心密度变得

很高,达到 10^{11} 克/厘米³ 时,物质对于中微子变得不透明,这时有 $e^+ + e^- \leftrightarrow \nu + \bar{\nu}$, 形成大量的热中微子。超新星爆发的能量主要以中微子辐射的形式释放,超新星爆发主要是中微子的爆发,由于与其他物质的作用很弱,即使是在星体核心产生的中微子,也能不经碰撞地穿出星体之外,因此这些中微子携带了用光学、射电、X射线辐射都不可能得到的星体核心的信息。小柴昌俊的探测器观测到了来自这颗超新星的中微子,这是人类第一次观测到太阳以外的宇宙中微子。这种探测的难度也是极高的,他们实际上是仅从经过探测器的一亿亿(10^{16})个中微子中探测到了12个。这个成功探测直接证明了超新星爆发过程中确实形成了中子星。

戴维斯和小柴昌俊的发现开辟了一个新领域,这就是“中微子天文学”。

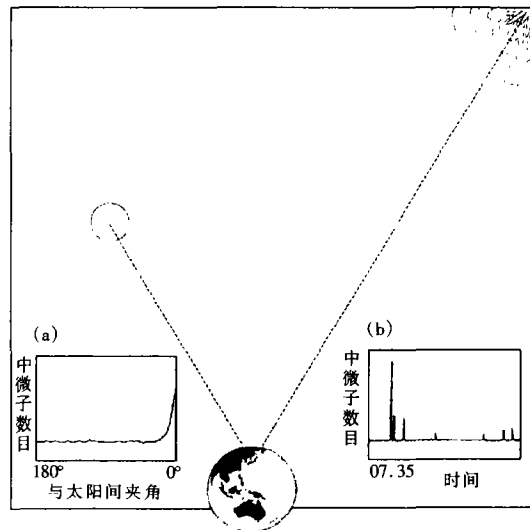


图2 小柴昌俊在日本神冈建造的大型中微子探测器得到的实验结果

(a) 在对应太阳的方位上中微子数目有明显的超出,并证实了戴维斯的结论。(b) 1987年2月23日大麦哲伦云中超新星爆发(编号1987A)时,神冈的实验装置探测到了12个中微子信号,中微子信号到达的时间约为世界时1987年2月23日7时35分

与戴维斯和小柴昌俊的不同,贾科尼的工作引导人们发现了宇宙X射线源。由于X射线会被大气层吸收,所以,X射线的观测要在外层空间进行。X射线天文观测遇到的第二个问题是由于X射线的强穿透性,使得X射线的反射系数很小,在对天体进行X射线观测时,不能像光学观测那样利用透镜对光线聚焦,这样对天空的成像观测就是非常困难的。贾科尼在这两个方向上对X射线天文学都作

出了先驱性的贡献。

实际上,在二次世界大战后的 1949 年,利用德国的 V2 火箭,美国海军实验室的弗里德曼小组将一个盖革计数器送上了太空,并发现了太阳的 X 射线辐射。1959 年,当时 28 岁的贾科尼开始了空间探索计划的旅程。贾科尼及其合作者制订了利用火箭探测空间 X 射线辐射的计划。1962 年 6 月 18 日,在经历了两次失败后,终于把 3 个盖革计数器放在火箭上发射到高空去,并利用火箭的旋转来确定 X 射线源的方向。这次空间飞行的原意是探测月亮反射的来自太阳的 X 射线荧光。在火箭滞空的 6 分钟中,没有发现来自月亮的 X 射线辐射,却意外地发现了太阳以外的第一个宇宙 X 射线源,同时还看到了银河系的 X 射线背景辐射。由于没有很好的准直器,使得空间分辨率很差,这个 X 射线源当时没有被证实和辨认出来,后来人们知道这个第一个被发现的太阳系外 X 射线源是天蝎座 X-1 (Scorpius X-1),随后他们又发现了蟹状星云中的 X 射线源。随着进一步的研究,人们发现天蝎座 X-1 在 X 射线能段辐射的能量要比在可见光波段强数千倍,而蟹状星云在 X 射线能段辐射的能量比太阳强 10 亿倍。这是和正常恒星完全不同的天体,这些意外的发现成为推动 X 射线天文学的巨大动力,贾科尼的工作开辟了天文学的一个新领域,这就是“X 射线天文学”。

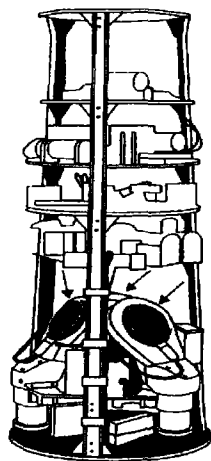


图 3 贾科尼及其合作者 1962 年发射的火箭探空装置。安装了 3 个盖革计数器。利用透过窗厚度的不同,3 个计数器可以记录不同能量的 X 射线辐射。整个装置长约 1 米

为了扩展观测时间,1963 年,贾科尼和他的合作者一起提出利用卫星进行宇宙 X 射线巡天观测的计划。在 1960 年,贾科尼和罗西 (Bruno Rossi) 提出了利用光的掠射原理进行太空 X 射线成像观测

的设想,这个设想被贾科尼和他的合作者进一步发展并付诸实施。1970 年 10 月 12 日,贾科尼领导下的小组完成的第一颗 X 射线天文卫星 (UHURU) 成功升空,这个卫星采用自旋稳定模式,并安装了 2 套收集面积为 840 平方厘米的正比计数器。UHURU 卫星的第一次巡天观测,发现了 339 个 X 射线源,并发现了致密 X 射线双星。贾科尼还领导过第一颗 X 射线掠射成像卫星 HEAO-2 (爱因斯坦) 的建造,爱因斯坦卫星取得了极大的成功,它的分辨率最高可以达到 2", 贾科尼和罗西提出的利用掠射成像进行 X 射线天文观测的设想在 18 年后终于成为现实。由于比以前高得多的灵敏度、空间分辨率和能量分辨率,爱因斯坦卫星可以研究弱得多的天体,可以进行弥散源的成像观测并进行能谱分析。1976 年,在爱因斯坦卫星正在建造时,贾科尼等就提出了建造下一代天文卫星的提议,这颗卫星就是后来的 Chandra-AXAF, 这颗卫星大大发展了爱因斯坦卫星的技术,其空间分辨率更是达到了 0.5"。直到 1981 年,贾科尼一直在 AXAF 卫星科学委员会主席的位置上工作,为 AXAF 的建造作出了重要的贡献。1999 年,耗资 15 亿美元的 AXAF 被发射升空,并得到了大量的结果。这些天文卫星的升空,取得了巨大的成功,开阔了我们的眼界,给出了宇宙新的 X 射线图像,极大地促进了 X 射线天文学的发展。例如探测到一些双星 X 射线源,这些源大多天文学家认为包含有黑洞;发现了正常恒星的 X 射线辐射、超新星遗迹中的重元素和星系的 X 射线喷流等。

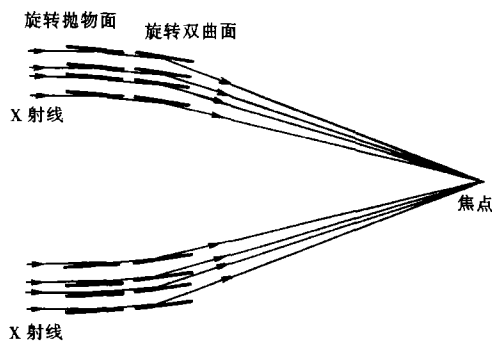


图 4 X 射线掠射聚焦成像示意图,在最前端是一个旋转抛物面,后面是一个旋转双曲面,通过掠射作用将 X 射线汇聚到焦点上

现在,我们知道,X 射线辐射是天体高能现象最重要的表征之一,X 射线天文学的研究目标遍及各个层次的天体:从正常恒星,到星系、星系团,直到最远的类星体。X 射线可以发生在高温等离子体中,

现代物理知识

生活中的热力学

钟立新

(浙江师范大学数理学院 浙江 313200)

在我们的日常生活中,常常会遇到这样的情况:有些看似平常的事,要做到却很难,有些甚至是不可能做到的。这是为什么呢?实际上,这与许多物理学规律是紧密联系在一起的。

一、热力学定律

热力学第一定律是能量守恒定律在涉及热现象宏观过程中的具体表述。

一般说来,在一个热力学过程中既做功又传热,这时系统内能的增量为: $U = A + Q$,式中 A 是外界对系统所做的功, Q 是外界传递给系统的热量, U 为系统内能的增量。由于系统内能是态函数, A 和 Q 之和即 U ,只由系统的初态和末态决定,与过程无关,上述表达式就是热力学第一定律的数学表达式。在这里我们看到,内能和热量重要区别,是内能是态函数,而热量不是态函数,热量的数值依赖于过程。在一定的体积或压强下,我们可以说某温度的气体具有多少内能,但不能说它具有多少热量。在上式中, A 和 Q 分别代表外界对系统所做的功和外界传递给系统的热量,它们都是代数量,可正可负。外界对系统做负功,表示系统对外界做正功,外界传递给系统负热量,表示系统传递给外界正热量,反之亦然。

热力学第一定律和能量守恒有关,而热力学第二定律则与可逆和不可逆过程有关。在物理学中我

们这样定义可逆过程和不可逆过程:一个系统由某一状态出发,经过某一过程达到另一状态,如果存在另一过程,它能使系统和外界完全复原(即系统回到原来的状态,同时消除了系统对外界引起的一切影响),则原来的过程称为可逆过程;反之,如果用任何方法都不可能使系统和外界完全复原,则原来的过程称为不可逆过程。上述不可逆的论述表明,自然界的过程是有方向性的,沿某些方向可以自发地进行,反过来则不能,虽然两者都不违反能量守恒定律。克劳修斯于 1850 年提出热力学第二定律的一种表述之后,第二年开尔文提出了另一种表述,两种表述是等价的。热力学第二定律的克劳修斯表述(1850 年)为:不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化。热力学第二定律的开尔文表述(1851 年)为:不可能从单一热源吸取热量使之完全变为有用的功而不产生其他影响。

二、热力学定律与永动机

历史上曾有人幻想制造这样一种机器:这种机器能够在循环过程(即从初态出发经过一系列状态后又回到初态的过程)中对外界做功,而无需外界供给能量。这种机器叫作第一类永动机。这种幻想曾经是很具有吸引力的,但一切制造这类机器的尝试都失败了,其失败的原因就在于它违背了热力学第一定律。实际上,对于循环过程,由于末态和初态相

也可以由某些非热过程引起。X 射线辐射机制的研究还导致对天体的一种重要产能机制的重视,使吸积理论成为当代理论天体物理的一大支柱,促进了对致密天体的深入观测和研究。X 射线天体物理学已经和基本的物理概念联系在一起,它的研究促进了我们对黑洞、宇宙暗物质、致密天体和极端条件下物理过程的了解,在宇宙中找到了天然的实验室,用于对基本的物理理论进行检验。另一方面,在天体的极端条件下,基本的物理过程和规律将起着更为显著的作用,通过对这些天体的研究,有可能发现新

的物理过程和规律。我们有理由相信,在未来物理思想变革的过程中,高能天体物理将扮演重要的角色。贾科尼创建了 X 射线天文学,实际上,也开创了蓬勃发展着的高能天体物理学。

目前,X 射线天文学已经发展成为一门可以与光学天文学和射电天文学相媲美的学科,是目前最活跃的研究领域。随着一系列天文卫星的升空,大量的观测资料将使我们宇宙的认识更加深入,我们相信高能天体物理学将在人们了解宇宙的进程中发挥更大的作用。