

拟着手建造一个能量为 2GeV 超导同步加速器模型。

美国国立加速器实验所拟建立一个超导同步加速器,将现有的 500GeV 加速器的束流注入到它里面,继续加速到 1000GeV。由于其注入能量较高,剩磁的不均匀性比较容易克服。计划 1973 年底完成实际加速器的一个周期,并进行功率试验。

苏联近年来也开展这方面工作,1971 年制成了一个孔径为 80 毫米、长 70 厘米的二极磁体,磁场 4.5T,验证理论与实际可能达到的磁场精度。也进行减小损耗等问题研究。电子物理仪器研究所制成了铌三锡螺线管磁体,场强 20 T。

总之各实验所都有设想的具体方案,但由于上述各项问题,还加上剩磁的不均匀性等等,近年内还不可能经济地用来建造加速器。对于前景的估计,美国各实验所较之西欧更为乐观些,认为再过 4—5 年即可着手建造;而西欧各实验所则认为尚需 7—8 年。西欧联合核子研究中心原来有个设想的计划,在现正在建造能量为 300GeV 的质子同步加速器中,将来补上若干超导磁体,可使能量提高到 500GeV。1973 年 4 月和 6 月^[11],几个实验所开会讨论,并最后决定改变这个计划,但这并不是由于超导磁体研究发生什么新的困难,而是方案上的变化。因为 300GeV 或 500GeV 同步加速器的注入器计划用能量为 28GeV 的同步加速器,但注入时能量为 10GeV。如果超导磁体参加工作以后,磁场变化的幅度的相应能量从 10GeV 上升到 500GeV。由于 10GeV 时磁场较低,不容易达到 0.1—0.01% 的剩磁均匀性,以及因为磁场变化幅度大而交流损耗也大,整个成本增加。这样一个方案的布局,不如另一个方案更为经济和把握,即将来用 300GeV 同步加速器作为注入器,注入到一个 1000GeV 的超导同步加速器里。这个加速器不要另建厂房,而是把超导磁体安在现在 300GeV 加速器的铁磁体上,这就相当于美国国内加速器实验所能量加倍的计划。

到目前为止,制成的超导脉冲磁体,都用铌钛线,主

要是由于它工艺性较好,但是它的场强很有限,比较好的铁磁体仅高一倍多,依然不能满足更高能量加速器的需要。近年来研究出很多高场的超导体,可是要使这些超导体能用来做成真正的脉冲磁体,还要经过一段研究。从这个意义上说,脉冲超导磁体的研究工作时间还很短。我们依靠毛泽东思想,发挥社会主义制度的优越性,学习外国好的经验,走自己的道路,向新的方向迎头赶上去,是一定可以赶超世界先进水平的。

参 考 文 献

- [1] Taylor, C. F., *Superconducting Magnets, International Conference on High Energy Accelerators*, (1961), 291.
- [2] Barbalat, O., *Catalogue of VIII. Internc. Conference on High Energy Acc.*, (1971), 2.
- [3] Smith, P. F., *Superconducting Synchrotron Magnets, VIII. Intern. Conference on High Energy Acc.*, (1971), 35.
- [4] *Economic Factors Involved in the Design of a Proton Synchrotron or Storage Ring with Superconducting Guide Field*, USAEC-UCRL-18186.
- [5] Wenzel, W. A., *Test Results—Pulsed Superconducting Synchrotron-type Dipole Magnet, VIII. Intern. Conference on High Energy Acc.*, (1971), 206.
- [6] Bronca, G., *Studies and Construction Superconducting Magnets Applied to Synchrotron of Morethan 1000GeV*, 同上, 175 页。
- [7] Group Rutherford Lab., *Superconducting Application, J. Phys.*, **D3** (1970), 1517.
- [8] Thomas, D. B., *Superconducting Pulsed Magnet for a 1000GeV Synchrotron, VIII. Intern. Conference on High Energy Acc.*, (1971), 190.
- [9] Heinz, W., *Superconducting Synchrotron Magnet Performance in a Closed Circuit Cryogenic System*, 同上, 181 页。
- [10] Green, G. K., *Superconducting Synchrotron Development at BNL*, 同上, 196 页。
- [11] *CERN Courier* (1973), 6.

近代天体物理学中的几个问题

杨 楦

(中国科学院原子能研究所)

长期以来,人类用以观测天体的波段,主要被限制在可见光辐射这一相当狭窄的频率范围之内。这一方面是由于设备和技术的不足,另一方面也由于人类长期居住在稠密的地球大气底层,而大气层仅对可见光等几段比较狭窄的电磁辐射透明的原故。这个情况在近十余年来开始有了很大的改变。由于射电天文等技

术的发展,人造地球卫星探测设备的应用,人类终于逐步地冲破了大气透光性的限制,可以在从无线电波频起直到高能 γ 射线止的、宽达 14 个量级以上的电磁波以及其他辐射区域内,对天体进行观测;这就大大地扩展了探索宇宙天体的眼界,导致了许多重要的新发现,提出了很多新的问题,进一步丰富了我们对于天体演化

规律性的了解,使天体物理成为近代物理中最活跃的部门之一。本文将就这个领域中六十年代后发现的几个重要现象:类星体、中子星和太阳中微子问题,作一些简单的介绍。

一、类星体的红移

1. 类星体的发现和它的红移现象

六十年代初期,在使用射电望远镜对天空进行扫描时,发现在天空某些位置有强烈的射电源。由于射电望远镜分辨率的不足,直到1963年前后才陆续地找到了对应于这些射电源的“星体”。由光学望远镜观测,它们都是一些很“蓝”的星体,富于蓝光和紫外光。在分光时发现它们的光谱中有一些明线,起初很难辨认是属于哪些元素。其后发现,这些谱线都属于一些普通元素(氢、氦、镁等),但具有很大的“红移”值。

“红移”是天体物理中常用的一个概念,它的基本原理就是多普勒效应。当一个光源(例如一颗恒星)以径向速度 v 远离我们而去时,我们在分光中观测到它发射的谱线波长应变长(即自光谱的“紫”端向“红”端移动),其变长的部分 $\Delta\lambda$ 与原来的波长 λ 、径向速度 v 和光速 c 之间应符合以下关系:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}, \quad (1)$$

式中的 z 值通称为“红移”值。

一般观测到的远星或星系常有一定的红移现象,但 z 值都不甚大,很少能超过0.3。而类星体的主要特点是,它们大都具有特别巨大的红移值,例如截至1969年为止,发现红移超过1.0的类星体多达62个^[1];1970年发现 $z = 2.887$ 的类星体,而去年又发现了红移高达3.53的类星体^[2]。以常测的Mg II亮线为例,它本来是紫外线($\lambda = 2798 \text{ \AA}$),经过例如 $z = 2$ 的红移以后,将越过整个可见光部分而跑到红外区($\lambda^* = 2798 + 2 \times 2798 = 8394 \text{ \AA}$)去了!根据多普勒原理,巨大的红移对应于巨大的速度。如果按(1)式计算,这些“星体”的径向速度将超过光速。但这是不可能的。实际上在 $v \approx c$ 时,(1)式须经过相对论修正。但即使经过修正后这些“星体”后退的速度也是惊人的。 $z = 2$ 约相当于光速的80%(每秒24万公里)。我们知道,从普通回旋加速器加速出来的粒子也仅有30%光速,而现在以80%光速运动的不是少量的粒子,而是整个星体,这就更令人惊奇了。

由于这些“星体”的共同特性——强射电、蓝光、巨大红移,又由于通过观测知道它们不是一般的恒星或星系(比恒星大,比星系小),因而给它们取了一个新名称:类星体。

2. 类星体所引起的一些问题

但是,更重大的问题不仅在于后退速度。在天体中,后退速度和它们离我们之间的距离两者之间有一个简单的正比关系,即所谓哈布耳(Hubble)定律:

$$\text{后退速度} = \text{哈布耳常数} \times \text{距离}, \quad (2)$$

式中哈布耳常数的数值大体为每百万光年25公里/秒。按这个规律推算,类星体离我们的距离可达 10^9 — 10^{10} 光年;也就是说,我们现在看到的它的光是在约100亿年以前就发出来了。当这些光在广袤的空间里孤独地前进的时候,在银河里逐渐地诞生了我们的太阳和地球;在这些光走完了全程的万分之九千九百九十九的时候,地球上才出现了原始的人类。这真是离我们最远、也是我们看到的最古老的星体了。

但是,问题还不仅在此。当我们根据上面的推理进一步去计算类星体的释能时,矛盾就突出来了。因为类星体的可见光和射电的亮度是可以测定的。如果再假定它们离我们的距离可以根据哈布耳公式定出的话,就不难由亮度和距离算出它们的总释能速度。可以预料,如果这样遥远的星体还能为我们看到的话,它的绝对亮度一定非常之大(普通星系在 $z > 0.5$ 后就很难辨识了)。计算的结果确是非常惊人的:对一般的类星体言,它的光能应约为 10^{46} 尔格/秒,而其射电能为 10^{44} 尔格/秒;也就是说,它释放的光能将超过我们整个银河系(约 10^{11} — 10^{12} 颗恒星)总光能的100倍,而射电能竟超过整个银河系的10万倍!不仅如此,从它的变光周期观察,它的大小不会超过3—4光年,甚至更小^[3];而银河系直径则达10万光年。对比之下,在这样小的空间里会放出这样大的能量,普通恒星的热核反应是远不能达到的。那么,它的能源是什么?又是怎样释放出来的呢?

除了释能问题以外,它的能量分布也极特殊。前已讲过,类星体都有强烈的射电。这些射电大都属于“同步回旋辐射”机制,带有显著的偏振,这说明它们是由于极高能量的电子或其他带电粒子(能量 $\sim 1 \text{ BeV}$ 以上)在磁场中运动而产生的。那么,这样高能的高粒子流又是从哪里来的呢?一般恒星的热致辐射(由高温引起的辐射,能谱服从“黑体辐射”律)是完全不符合类星体的辐射情况的,尤其不能解释高能粒子的来源(这将违反热力学第二定律!).这至少暗示类星体的释能可能是一种我们迄今尚未明了的新的物理过程所引起的。这又是什么过程呢?

正是这些新奇的现象和尖锐的矛盾,使类星体自发现起十多年来一直成为天体物理界热烈讨论的中心题材之一。

3. 关于类星体性质的一些探讨

总结以上的观测结果,我们可以得到三个直接的数据:

(1) 类星体的红移数值;

(2) 类星体的光和射电光谱(包括强度和能量分布情况等);

(3) 类星体的光度变化情况等等。

各种理论都必须至少能解释以下几个问题:

(1) 红移的来源(是否服从哈布耳定律,或者说,类星体是否处在极远的地方)?

(2) 如果承认它是在极远的地方,那末它的巨大能源自何而来?

(3) 它辐射的强烈非热致(即非黑体辐射)机制,包括高能粒子的来源是什么?

在早期(1963—1965年间),理论工作比较趋近于用引力溃缩现象来说明类星体^[4],因为:

(1) 它是唯一已知的,可以导致远比热核反应为大的释能机制。普通裂变反应仅能放出相当于物质质量的 $\sim 1/1000$ 的能量,聚变(热核反应)也只能放出相当于质量的 $\sim 1/100$ 的能量,这都难以解释类星体的巨大能源。唯有引力溃缩——至少在理论上——可以放出相当于物质的70%,80%甚至90%以上的质量的能量,而且没有元素限制,它是目前已知的最强大释能机制;而在宇宙中一些地区(例如星系的核心部分)集中了大量的物质(上千万个太阳质量),这种溃缩是完全有可能出现的。

(2) 引力溃缩过程中产生巨大的引力红移,可以解释类星体多普勒效应以外的红移。

因而,从这两点看来,这似乎是对类星体现象最可能的解释,也因此这个论点首先被注意。但经过更具体的计算后,发现理论所预示的时间过程与实际观察不符;也就是说,引力溃缩似乎不能维持这样长期、稳定的释能机制。特别是溃缩所导致的红移只是短时(几天到数月)的变化,更无法解释类星体长期稳定的红移现象;因而这个理论看来是不能令人满意的。

由于在能量上矛盾太大,此后又有一些人大胆地抛开了哈布耳定律,而设想类星体或在近处,或有其他的红移来源。例如曾设想类星体只是由本星系(银河系)核心部分以很大速度射出去的一种物质^[5],这样由于它们距离近,由光度算出的能量就不那么大了,能源的矛盾可以解决。但由此带来了两个新的困难:第一是什么机制使它获得这样大的速度?第二是既然本星系可以发射这种东西,其他星系也应当能发射,因而我们应当有可能观测到由其他星系发射来的、具有“蓝移”的类星体;这一点在观测中没有得到任何证实。

此外另一种企图是找出多普勒效应以外的其他红移来源。例如最近有人曾设想光子具有极微小的静止质量,因而它可以与空间的辐射产生非弹性散射而损失能量(红移),但定量的计算也否定了这种想法^[6]。

其他有关“远近”方面的争论,这里就不再详述了,读者可以从参考文献[7]所列举的材料中去找。

关于能源和释能机制方面,同样也是不清楚的。近

年来积累了更多的观测资料,因而也有过种种设想:例如发现脉冲星(即中子星,见后)之后,由于它们的发射谱和类星体有某些类似之处,于是就有人认为两者可能有共同来源^[8];在发现非射电然而又有类似于类星体的某些性质的赛弗特(Seyfert)型星系核^[9]后,有人就认为类星体和它们一样都是遥远星系的核心部分,集中有大量物质,通过某种剧烈反应而释出大量能量,但这些在目前仍还是一些假说。

总之,类星体自从被发现起到现在已有十多年了,但是对于它的一些基本性质(简单到远近的问题)却始终没有弄清楚。因为对它的解释涉及到宇宙发展中的许多根本问题和一些可能但又未知的新释能机制,所以长期成为观测、研究和讨论的重要对象。我们期望在不久的将来能在这方面有所突破。

二、星体演化的末态——白矮星、中子星、“黑洞”

在六十年代以前,对恒星的研究主要集中在主星序(即赫-罗图中的主序,相当于星体的“壮年”阶段)上;对于这些星体(包括太阳)内部的各种物理过程和变化,可以说基本上弄清楚了,并且从观测中也大部得到了证实。但是,对于星体演化的末态,或者说恒星的“晚年”,虽然有过不少理论性的探讨,然而观测上除了白矮星外,还缺乏直接的验证。这方面近年来(特别在1968年后)有了重要的发展。

与人的生命过程相比,恒星的演化看来是很慢的。但是,和宇宙中一切事物一样,星体也是处在不断变化的过程之中。我们知道,恒星具有很大的质量(例如太阳的质量 $M_{\odot} = 2 \times 10^{33}$ 吨^[1]),因而,它经常处于两种力量的对峙之下:一方面,巨大的引力不断地对它进行压缩;另一方面,它依靠消耗轻元素进行着大量的热核反应(例如太阳“燃”氢的速度约每秒七亿吨)不断发出巨大的能量(光、热)抵抗住引力的压缩。从这里不难看出,这种平衡只是相对的,因为引力是永远存在的,而星体中的轻元素却总会有耗尽的一天。那么,在“烧”尽了它的燃料,平衡破坏后,它的结局将是怎样呢?这是星体演化中的一个重要问题。

1. 白矮星

理论计算表明,一个质量大体与太阳相同的恒星,在演化的终段(这里略去了中间过程的描述),消耗尽它的轻元素之后,将不能抵抗住强大的引力,而被压缩到只有目前直径的百分之一(即约一万四千里,略大于地球)的大小。在这种高压下,它的密度可达到 10^6 克/立方厘米(表面)至 10^8 克/立方厘米(核心)。这时构成它的物质将进入电子简并态:根据泡利不相容原理,不能有两个电子占据同一个能态,因而即使冷到绝

对零度物质中的电子也将保留一定的动能。正是这些处在简并态的电子“气体”的运动，支持住了巨大的压力，使星体达到新的平衡状态，直到完全冷却。这时，我们观测到的就是一颗小而重的“白矮星”。它首先在1915年作为天狼星的伴星被发现，此后又发现多个。估计其总数约占全体星数的3%左右。它们的密度、直径等物理特性与理论计算十分符合。它是我们最早发现的末态星体。

2. 中子星的理论

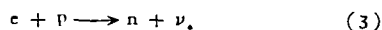
但是，很早就从理论上发现^[10]，电子简并态能耐受的压力并不是无限的，它只是质量约相当于 $1M_{\odot}$ 的星体的末态。观测表明，天空中很多的恒星质量都超过了 $1M_{\odot}$ ，最大的达到 $50M_{\odot}$ 左右；因而，它们的演变终期不能停留在白矮星阶段，就是说，在冷却后它们巨大的质量导致的引力压缩将会把电子简并态压垮。那么，它们的命运将如何呢？

五十年代前后大量积累的、有关固体物理、核物理等方面的基本知识，使得天体理论工作者可以对这种重星的末态作出理论上的分析。从计算的结果看出，质量大于 $1.5-1.6M_{\odot}$ ^[11]的星体，其末态与白矮星很不相同^[11]。概略地讲，它大体可以分为以下几个阶段^[1]：

(1) 在它们的轻元素(氢、氦)耗尽后，由于质量较大，它们内部的温度将继续由于压缩而升高($\sim 10^7$ °C以上)。在这样的高温条件下，它内部的元素仍可继续向合成更重元素的方向发展，一直发展到组成结合能最大的 Fe^{56} 附近；在这个过程中，通过合成可以释出一些能量，但不大；

(2) 此后它的核心部分温度仍继续升高。这时热平衡不再有利于最大结合能元素，一部分 Fe^{56} 开始破碎为氦，并通过各种反应道开始形成更重的元素，一直到超铀。这一阶段与上一阶段很大的不同点是，由于 Fe 的破碎和自 Fe 向 U 方向的演变不是释热而是吸热的反应，因而这个过程不是“抵制”而是“助长”了引力的压缩。这将导致星体的不稳定和迅速溃缩。

(3) 在这个溃缩的过程中，星体中心部分的压力增大到了前面提到的、电子简并态所不能耐受的数值(此点通常称为第一崩溃点)。这时费米电子气中的电子速度已接近光速，可以与核内的质子产生逆 β 衰变而形成中子和中微子：



式中的 ν 表示中微子。这一过程同样也是吸热反应。并且由于中微子具有极大的穿透力(见后面“太阳中微子问题”一节)，它的形成和扩散更增大了星体核心部分的散热速度。由于电子简并态的崩溃、中子核的形成加上中微子的“冷却”效应，使星体的核心部分发生了急剧的变化：密度迅速跃升到 $10^{13}-10^{15}$ 克/厘米³(即每c.c.十亿吨)，接近于原子核的密度，而体积缩小

到仅有白矮星直径的 $\sim 1/100$ 左右，也就是说，星体中心“塌陷”，演化进入“骤变”阶段。

(4) 在前面两个“早期”过程中，由于星体物质的密度还不很大，引力主要只起着压缩的作用，引力释能的作用并不显著。但上面(3)的过程使星体中心物质突增到核密度附近，其大小和质量已接近引力溃缩的临界值(见后“黑洞”第(4)式)，这时引力释能机制就成为极重要的因素。计算表明，在一个质量约为 $1M_{\odot}$ 的“中子核”周围，释能的大小已接近于质量的10%。也就是说，10克物质(有人比之为“一朵玫瑰花”)落到这个核上时，释放出来的能量将相当于一颗原子弹！由于这时核心以外的大量物质向中心塌陷，使得这个区域在极短的时间内释放出惊人的能量，其结果将是星体外壳产生强烈的爆炸。一般相信这种巨大的爆炸也就是在天空中出现过的超新星事件的来源(一次超新星爆炸发出的光可以盖过整个银河系，其总能量约相当于 10^{21} 个氢弹)。爆炸使大量构成星体外壳的重元素被抛入宇宙空间，而残留的核心将是一个被压缩到接近于核密度的“中子星”——这就是60年代初期在理论上构成的一幅关于超新星、中子星的图画。但问题是始终未能在天空中发现中子星，因而这些理论还缺乏直接的证明。

3. 中子星的发现¹⁾

1968年，通过射电探测发现了一种极为奇异的射电源——脉冲星。它的名字是由于发现它发射短暂而极有规律的射电“脉冲”而得的。例如第一个被发现的脉冲星其脉冲宽度约50毫秒，脉冲间隔为1.337秒，重复频率的稳定度达到一亿分之一，几乎可以和标准石英振荡器媲美！由于这些奇特的性质，它立即引起了天文工作者极大的注意。通过广泛的探测，很快就找到了多个这种“脉冲星”。1969年，在蟹状星云中找到了一个周期极短($\sim 1/30$ 秒)的脉冲星。同年，发现了它的光学对应星，并证明它的光也是用同样的频率在闪烁。1970—1972年间，通过火箭和卫星观测站的探测，发现它还发射各种频率的X射线和 γ 射线。例如当时测出的一组约600 KeV，另一组为5—25 MeV，也以同样的脉冲形式射出。就是说，它发射的能谱自射电起经过可见光直达高能 γ 射线，占了13个量级以上的频率宽度，全是同样的脉冲！它是什么东西呢？

蟹状星云脉冲星的发现，为脉冲星的性质提供了极为重要的线索。

蟹状星云位于金牛座，它是公元1054年本星系内

1) 以下我们统用 M_{\odot} 代表太阳质量。
2) 这个临界值的大小目前还有争论
3) 这个过程细节，例如(2)和(3)的先后主次关系等目前仍有争论。为简明计，本文是按最常用的说法叙述的。

一次超新星爆发后的余迹。这次爆发西方没有记录，但为我国北宋天文学家所记载。根据当时的描述，这颗“犯天关”的“客星”曾照亮天空约 650 天左右，最亮时亮度超过了全天空最亮的星体——金星。现在的观测表明，蟹状星云是当时爆炸后被抛出的气壳，目前仍以大约每秒 1100 公里的速度在扩张。它是早已知道的一个强射电源，有着强烈的同步回旋辐射，云体发着淡淡的白光，它的光和射电总能量输出目前仍为太阳的 100,000 倍。为什么它在爆发 900 多年后还有这么大的能源，长期以来曾是一个谜。现在，又在它的核心部分发现了脉冲星。根据上面理论的推测，这颗脉冲星是否就是我们长期寻找的“中子星”呢？

虽然“脉冲星”仅提供了两个数据(脉冲的宽度和周期)，但天体物理工作者却最充分地利用了这个简单的资料，进行了细致的分析。

首先，从脉冲星发出的脉冲宽度可以判断，它不会是一个大的星体。因为如果一个大的星体发射脉冲的话(不管是什么机制)，由于从它不同部位发出的脉冲到达观测者的时间不同，脉冲本身就会展宽；所以这样狭的脉冲只能由很小的星体(白矮星或中子星)发出。

其次，不论发射的机制如何，作为星体，它只能通过以下三种形式之一发出周期性的脉冲：

(1) 胀缩运动；(2) 双星互相绕转；(3) 自转。

计算首先排除了胀缩运动的可能性：星体如果有胀缩运动的话，其周期将与密度的平方根成反比。计算表明，对白矮星讲，它的周期比观测值过长，而中子星则过短。

其次，对于相互绕转的假设来看，一对白矮星最短的互绕周期(两星表面已相接触)为 1.7 秒，大于多数脉冲星的脉冲间隔。中子星相互绕转的周期虽可与测得的数值相近，但计算表明，这样高密度的星体在相互绕转时将因大量辐射引力波而迅速变慢，这和测出的脉冲频率高稳定度不符。因此相互绕转的可能性也被排除了。

对自转的计算表明，白矮星如果以这样大的速度自转的话，离心力将使星体飞散。

因而，留下的唯一可能是，“脉冲星”的脉冲是由一颗绕轴自转的中子星发出的。

再回到蟹状星云的问题。由于蟹状星云的能源问题长期未能解决，在发现它的核心里有中子星后，有人就设想它的能量可能是由旋转的中子星以某种方式补给的。由此可以预言，由于不断把能量输出给星云，中子星的自转速度(脉冲周期)将会逐渐变慢。由已知的星云辐射计算出的中子星变慢率(每年约增大 1.35 微秒)与观测值符合得很好。

由于以上一些分析，目前一般已经肯定，脉冲星就是长期以来理论上预言的中子星。对于其他一些脉冲星的研究也进一步证实了上述的假定。中子星终于被

找到了。这是近代天体物理方面一个很大的成就。

4. 目前有关中子星的几个问题

虽然中子星的发现是基本肯定了，但是几个重要的问题仍有待解决：

第一是它为什么会发射脉冲？这个问题目前比较倾向于用旋转磁场来解释。它的基础是：一般恒星都具有一定的磁场(例如太阳的磁场强度约 1 高斯，而某些磁性星如磁 A 型星可达到 1000 高斯以上)；在溃缩过程中，由于星体是良导体，磁场不能逃逸，它将和星体物质同样被挤压到极高的密度；按这样的估计，一颗中子星的磁场强度可达 10^{12} — 10^{13} 高斯的数值。若这时它的磁极和自转轴不在一起，它自转时将使强磁场以高速在周围空间扫过，可通过各种机制与带电粒子相互作用而形成高能粒子流和辐射。由于最近观测到它的 X 射线也有偏振，有人认为我们探测到的高能宇宙线极可能也是起源于上述机制的中子星辐射^[13]。

第二个是涉及中子星本身的结构问题。前已讲过，中子星的密度高达 10^{13} — 10^{15} 克/厘米³，但它也不是纯由中子组成的。根据理论的估计，它可能具有多层结构：表面可能是铁或多中子重元素组成的硬壳，在高压下形成晶格态；其下面应为含有大量中子和少量其他粒子的、处在超流态的“费米中子海”；而在核心部分还可能有介子和其他重粒子存在^[14]。有趣的是，最近对一些脉冲星的观测中发现它们的脉冲重复频率会发生种种变化，例如有过频率突增之后经过几月或几年又慢慢恢复原状的现象，有人设想这是由于它的硬壳变动引起的“星震”^[15]造成的，因而恢复的缓慢似乎是支持了“硬壳在超流体上浮动”的假设。总之，对脉冲星的观测也为研究中子星的结构问题提供了具体资料。

5. “黑洞”简介

在从理论上“发现”中子星的同时，人们就已推导出，中子星也是不稳定的。中子简并态虽然能够承受比电子简并态更大的压力，但是它的耐压能力也不是无限的，质量略大于 1.6 — $2M_{\odot}$ 的中子星，就支撑不住引力的压缩，达到了所谓“第二崩溃点”。这时中子简并态也被压溃，星体将继续被压缩下去^[16]。

这次压缩会不会再停止在新的什么平衡点上呢？虽然我们不知道物质在更高的密度($>10^{16}$ 克/厘米³)下会变成什么样子，但是从已知的自然规律却很容易推导出，物质此后的耐压性是有一定限度的^[16]。而引力却由于星体半径的缩小不停地增大。也就是说，越过了第二崩溃点之后，已经没有什么力量再保持平衡了，星体将无可挽回地、无限制地被压下去，

1) 关于脉冲星——中子星的发现和性质等，已有不少综合性的介绍，例如文献[12]。

一直到完全不见!

这是什么结局呢? 也就是说, 一些更大、更重的星体, 它们的“末日”又是什么状态呢? 在这种情况下无论物理概念和数学工具上都遇到很大的困难, 也就是所谓的“奇点”(Singularities)问题。在这里, 只能给出一个简单的图景:

理论的预计是, 它们将形成一个“黑洞”。虽然从经典物理出发似乎也可以得到某些类似的结果(早在1798年拉普拉斯就设想过最重的星应是谁也看不见的星, 因为引力将大到使它的光“粒子”射不出去^[17]), 但是, 在这样大的密度状况下, 我们不能从经典的物理概念出发, 而应考虑由巨量物质的集中而引起的时空弯曲问题(广义相对论效应)。计算表明, 任何物质都有一个与其质量有关的静态临界重力半径 R^* ^[18]

$$R^* = 2GM/c^2, \quad (4)$$

式中 G 为引力常数, c 为光速。

对各种物质 R^* 值很易算出, 例如太阳的临界半径为 2.6 公里, 质子的临界半径为 10^{-33} 厘米。当任何物体由于某种原因(例如重星受引力压缩)被压到临界半径之后, 它受到自身的引力将集中到这样一个程度, 使得它的表面逃逸速度(即我们通称的第二宇宙速度)等于光速。这时, 一方面, 物质将由于无法抵御巨大的引力而以不可挽回的趋势向中心溃缩下去(即所谓“引力溃缩”); 另一方面, 由于巨大的质量集中导致的时空弯曲这时已达到了“闭合”的程度, 在临界半径内的辐射将无法逸出, 于是, 半径以内和以外的时空似乎是被“隔绝”了。但是由于时空转换的关系, 虽然从位于溃缩临界半径内的“观察者”看来, 引力溃缩过程(从临界半径一直压缩到“不见”)可以有一个既定的时限, 但从半径以外的观测者看来, 星体却是以无穷长的时间无限趋近于临界半径, 由它发出的辐射将迅速变“红”(引力红移)而最后不见(这个过程从外界看来却是比较快的, 例如对质量约为 $1M_{\odot}$ 的星体仅有几个毫秒)。于是这个重星将从视野中“消失”而不复可见; 虽然它的引力场还可以从外界察觉。这就是所谓的“黑洞”。预言中的这种第三类星体末态, 是否能在天空找到呢?

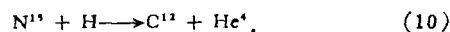
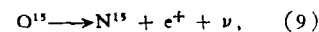
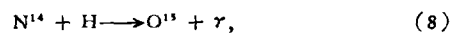
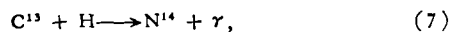
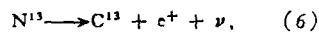
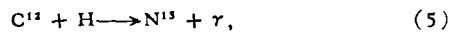
目前搜索“黑洞”的方法有两种。一种是根据“黑洞”看不见而又具有引力场这一点出发, 期望能找到某些具有“看不见的重伴星”的双星系以证明“黑洞”的存在。这方面已有不少报导, 如御夫- σ 、天琴- β 等^[19]。另一种是通过理论上对“黑洞”的进一步探讨, 从“黑洞”可能表现出的其他物理现象来搜索黑洞。例如最近有人推导出, 在双星系中的“黑洞”可能吸引其伴星的物质而产生不规则的 X 辐射, 因而认为测得的某些 X 射线源(例如天鹅 X-1)可能是“黑洞”^[19]。但是一般对这些“发现”还保持怀疑的态度。

三、太阳中微子问题

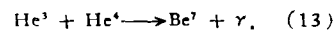
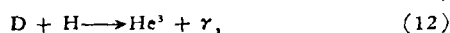
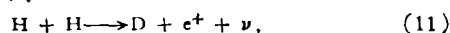
事物的发展常是曲折的。正当天体物理在极为辽远的空间现象研究上不断有所发现, 取得进展时, 却出乎意外地在“自家大门口”前出了问题。这就是 1968 年开始觉察, 而到 1972 年发展得更突出的所谓“太阳中微子问题”^[20]。

1. 问题的提出

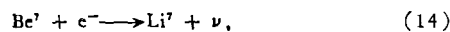
“问题”本身并不复杂: 太阳是靠热核反应发出能量的, 这点现在是一般人都知道的常识了。关于在太阳中进行热核反应的具体过程, 理论上也早有了详细的分析。大体说来, 它是按两个系列进行的, 一个叫作“碳氮循环”, 这个循环以 C^{12} 为媒介, 经过四次与氢的反应将氢转变为氦:



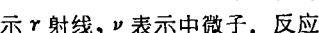
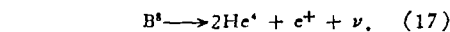
另一个叫“质子-质子反应”, 是太阳能的主要来源, 它的过程如下:



在 Be^7 形成后随温度不同可以有两条途径:



或



式中 e 表示电子, γ 表示 γ 射线, ν 表示中微子。反应所释出的粒子动能和 γ 射线构成太阳的能量。

这些反应早在四十年代就详细探讨过。在这个基础上发展出来的主序星(包括红巨星系)演化的理论, 被一系列观测所证实, 成为天体物理上最成功的理论之一。但还留有一个问题, 就是上述核反应尚无法由观测直接证明。这是因为这些反应只能在高温高压的星体核心部分进行, 而星体的外层因为温度不够, 不能产生反应, 结果构成了一个很厚的“外壳”, 把活性区隔绝在里面。具体地说, 太阳的活性区半径仅约 230,000 公里(占总半径的 1/3); 而其不起作用的“屏蔽层”厚度达 470,000 公里, 将近 40 个地球直径, 使得我们无法直接观测它的反应区。计算表明, 一个光子(γ 线)要经过

1) 这个临界体积的大小目前也有争论。

2) 亦称施瓦茨西德(Schwarzschild)半径。

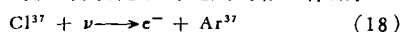
一千万年的多次反复散射才能由核心扩散到表面,更不用说反应核了。因此,我们直接看到的太阳表面只是一个经历了无数次辗转碰撞散射而达到热平衡的、6000 K 的黑体辐射,它当然给不出内部的核反应情况。

但是,在前面所述的反应中,又确有一种粒子几乎可以毫无阻挡地穿透太阳的屏蔽层射入空间,这就是中微子。我们知道,中微子静止质量为零,又不带电荷,它与物质几乎不起作用,因而,它一经产生出来,就可以自由地以光速从核心区逸出。既然太阳以每秒七亿吨的巨大速度“燃”氢,那么,根据上面的反应理论,它就应当是一个极强的中微子源。那么我们是否可以通过测量太阳中微子流强度的方法来验证上述理论所提到的核反应呢?

2. 戴维斯等人的实验

早在五十年代,就有一些科学工作者开始着手这项试验。最早的是美国戴维斯(Davis, R.)等人。可以想象,中微子既然可以那么自由地穿透约40个地球直径的厚度而不受阻挡,那它和物质的相互作用(截面)就是微乎其微,不易探测;此外,还必须把探测到的效应和比这种反应大得多的其他效应(宇宙线、天然放射性等)区别开来,因而,工作是异常困难的。

为了避免宇宙射线的本底,戴维斯等的设备^[11]安装在一个离地面深达1,500米的废矿井中。它的主要部分(探测器)是一个巨大的钢桶,里面装了总量为610吨的四氯化二碳(C₂Cl₄)液体。它利用液体中的Cl³⁷同位素与太阳射来的、能量大于0.814 MeV的中微子(主要来自(14)(17)两种反应)之间的相互作用:



来探测中微子。Ar³⁷是一种放射性同位素,其半衰期约35天。每经过约三个月的照射后,整个系统用混有少量Ar³⁶的氦气反复冲洗,再将抽出的混合气体用冷凝法将其中的Ar气吸附在活性碳上,然后用正比管通过幅度-升起时间双重鉴别来测定Ar³⁷的放射性。从而推算出太阳中微子穿过地球的程度。

由于技术上的种种困难,虽然实验在五十年代就已开始,但直到1968年之后才陆续给出可靠的结果。

3. 实验结果和理论比较

为了便于比较起见,我们先给一个中微子通量的单位。目前此单位简称s.n.u. (“太阳中微子单位”的英文缩写)。1 s.n.u. 对应于探测器中10⁻²⁶个中微子俘获/每个Cl³⁷原子·秒,约相当于7×10⁵个中微子/厘米²·秒的强度。

先从理论值看,理论的计算各家略有出入。最早1964年给出的数值为28 s.n.u.,此后经过多次改进,近年基本拉平在6—8 s.n.u.之间,不能再低了^[10]。

实验方面,1968年戴维斯等经过长期的工作后公布了他们的结果;上限约为3 s.n.u.,比理论低了一倍以上。这样的分歧引起了理论和实验双方很大的疑问,各方面都致力于找出问题所在。但是,经过了三年多的等待和努力,到1972年,戴维斯等在作了各方面的改进和分析之后,公布了他们更精确的结果:0.3±0.6 s.n.u.,也就是说,上限不但没有升高,反而下降到1 s.n.u.左右。根据戴维斯个人的意见,他甚至怀疑他的探测系统根本没有发现中微子!

这就引起了疑问:太阳中微子哪里去了?因为,太阳如果确在进行热核反应的话,无论从何种理论出发,它总要发射中微子,现在中微子通量这样小,怎样解释太阳的能量呢?这就是在1972年后引起普遍注意的“太阳中微子问题”。

4. 问题出在哪里?

问题出在哪里?现在从天体物理、核反应、中微子物理以至于探测技术各方面都还在继续找原因。由于这问题从1968年发现起已经找过三年了,使得各方面再找时都有“山穷水尽”之感。曾假设(18)式反应截面有错误,但这一点迅速被否定了^[12]。有人认为可能在考虑(11)–(17)反应系列中出了什么漏子,例如可能存在He³–He³低能量共振导致Be⁷和B⁸产额下降,或者Be⁷、B⁸在蜕变前出现其他反应,但分析和实验也否定了这个可能性^[13]。此外也有人大胆设想太阳内部可能会产生定期的“搅动”,这种“搅动”可以暂时地降低核心温度而使核反应停止,而且目前太阳正处在这个阶段。有的作者甚至把它和地球上一定时期出现的“冰期”也联系起来,但这个“理论”也遭到了反对^[14]。还有一些设想例如认为中微子可能有一定半衰期,或者太阳有一个高速旋转的核心等^[15],也仅仅是设想。总的看来,要解决这个疑团,大约还要花一些时间。

* * *

上面述及的,仅是近代天体物理学许多问题中的一部分,但仅从这一部分也不难看出,天体这个领域目前是很引人入胜的。各种宽波段的观测设备从不同角度上给我们提供了极其丰富的原始资料。对这些资料的分析,有些导致了我们的深入,有些则反映了我们认识的不足。特别值得注意的是,在所提到的几个问题中,有一些问题已经积累了多年的观测资料,花了许多天体和物理工作者的精力和时间,但矛盾迄今仍几乎和当年一样尖锐。它是否反映了我们正在接触一些尚未被我们发现的规律呢?自然科学史已一再证明,剧烈的矛盾往往孕育着重大的发展,因而我们对天体物理今后的进展,寄以殷切的期望。

参 考 文 献

- [1] Burbidge, G. R. et al., *Nature*, **222** (1969), 375
- [2] Wampler, E. J. et al., *Nature*, **243** (1973), 336.
- [3] Pecker, J. C. et al., *Nature*, **241** (1973), 339.
- [4] Chiu, H. Y., *Physics Today*, **17-5** (1964), 21.
- [5] Terrell, J., *Astrophys. J.*, **147** (1967), 827.
- [6] Aldrovandi, R., *Nature*, **241** (1973), 340.
- [7] Rowan-Robinson, M., *Nature*, **236** (1972), 112.
- [8] Sturrock, P. A., *Astrophys. J.*, **170** (1971), 85.
- [9] Demoulin, M. H. et al., *Astrophys. J.*, **154** (1968), 3.
- [10] Oppenheimer, J. R. et al., *Phy. Rev.*, **55** (1939), 374.
- [11] (a) Burbidge, E. M. et al., *Rev. Mod. Phys.*, **29** (1957), 547.
(b) Colgate, S. A. et al., *Astrophys. J.*, **143** (1966), 626.
- [12] Smith, F. G., *Reports on Prog. in Physics*, **35** (1972), 399.
- [13] *Science*, **179** (1973), 671.
- [14] Cameron, A. G. W., *Ann. Rev. Astrophys.*, **8** (1970), 179.
- [15] Reichley, P. E. et al., *Nature (Phy. Sci.)*, **234** (1971), 48.
- [16] Wheeler, J. A., *Gravitation and Relativity*, edited by H. Y. Chiu and W. F. Hoffman, W. A. Benjamin Inc., (1964), 195.
- [17] LaPlace, P. S., *Allgemeine Geographische Ephemeriden, Verfasst von Einer Gesellschaft Gelehrten*, 603 IVB ds 1st (Weimer, May 1798), 1799.
- [18] (a) Wilson, R. E., *Astrophys. J.*, **170** (1971), 529.
(b) Wilson, R. E., *Nature*, **234** (1971), 406.
- [19] (a) Shaprio, S. L., *Astrophys. J.*, **180** (1973), 531.
(b) Webster, B. L., *Nature*, **235** (1972), 37.
- [20] Trimble, V. et al., *Review of Mod. Phys.*, **45** (1973), 1.
- [21] Davis, R., *Phy. Rev. Letters*, **20** (1968), 1205.
- [22] Lanford, W. A. et al., *Phy. Rev. Letters*, **29** (1972), 606.
- [23] Parker, P. D. et al., *Nature (Phy. Sci.)*, **241** (1973), 106.
- [24] Ulrich, R. K. et al., *Nature (Phy. Sci.)*, **241** (1973), 111.
- [25] (a) Bahcall, J. N. et al., *Phy. Rev. Letters*, **28** (1972), 316.
(b) Demarque, P. et al., *Nature (Phy. Sci.)*, **246** (1973), 33.



电子简并态, 费米电子气

最早人们曾以为在金属(或等离子体)中自由电子的性质类似于理想气体, 其后发现它们和理想气体有很大的差别: 它们遵从泡利不相容原理和费米-狄拉克统计规律; 也就是说, 即使温度降到绝对零度时, 它们也不会静止, 而是按一定能级分布直到某一最大能量 E_0 为止。这种状态称为电子的完全简并态, 具有这种能量分布的电子“气体”一般称为“费米电子气”。

实际上, 上述简并态并不仅在低温下才出现。理论表明, 只要电子总数 N 和其所占的总体积 V 以及温度 T 之间存在

$$kT \ll \frac{h^2}{2m} \left(\frac{N}{V} \right)^{2/3}$$

的关系, 电子就可进入高度简并态(式中 k 为玻耳兹曼常数, h 为普朗克常数, m 表示电子质量)。因而, 在天体物理的条件下, 即使温度很高, 只要压力大到使上式中的体积 V 缩小到一定程度之后, 简并态即可出现, 这

时电子的运动将代替分子力而成为抵抗外加压力的主要力量, 且其压强几乎和温度无关。这就是白矮星的物态。

中子简并态, 费米中子海

由于中子和电子同样属于费米型粒子(它们都具有半整数的自旋, 服从费米统计律), 因此他们可以同样在高压下进入简并态, 其性质和上述电子简并态相似, 仅仅其密度和耐压程度远大于电子简并态而已。在中子星表层以内, 一般相信就是由这种简并态的中子所组成的“海洋”, 因而有人称它为“费米中子海”。

正比管和幅度-升起时间双重鉴别

幅度-升起时间双重鉴别是一种具有抗干扰性的弱放射源测量设备。所用的正比管是一种利用电离效应探测放射性的计数管。它所产生的讯号电脉冲的振幅和电压上升时间都和入射粒子的品种有关。在戴维斯所用的系统中, 利用这一特性, 使用了既能鉴别脉冲幅度, 又能鉴别脉冲电压上升时间的线路, 这样它可以“认识”并自动选出确属于 Ar^{37} 的放射性, 而将不属于 Ar^{37} 的本底(如岩洞中的天然放射性)除去。