

# 高能天体物理前沿与瞭望



(上)

方励之

## 高能天体物理起源

很容易确定天体物理诞生的日子，也很容易确定现代宇宙学诞生的日子。前者由基尔霍夫的太阳光谱观测确定，后者由爱因斯坦发表第一个宇宙解确定。但是，很难确定高能天体物理诞生的日子。也许可以作为高能天体物理诞生标志的是巴德和兹威基于1934年发表的一篇论文，题目为《超新星和宇宙线》，文章很短，照录如下：

在每个星系(星云)中每几百年要发生一次超新星爆发。一个超新星寿命大约是二十天，当它们绝对亮度极大时，可高达  $M_v = -14^m$ 。超新星的可见辐射  $L_v$  大约为我们太阳辐射的  $10^4$  倍，即  $L_v = 3.78 \times 10^{36}$  尔格/秒。计算指出，总辐射(包括可见的和不可见的在内)数量大约是  $L_T = 10^7 L_v = 3.78 \times 10^{43}$  尔格/秒。所以，超新星在它的寿命中发射的总能量为  $E_T \geq 10^7 L_v = 3.78 \times 10^{43}$  尔格。如果超新星最初是十分普通的质量为  $M < 10^{33}$  克的恒星，则  $E_T/C^2$  与它本身的  $M$  同量级。在超新星过程中，大块的物质湮灭了。此外，还可以设想，宇宙线是由超新星产生的。假定在每个星云中每一千年左右有一颗超新星出现，则在地球上所观测到的

宇宙线强度的数量级应为  $\phi = 2 \times 10^{-7}$  尔格/厘米<sup>2</sup>·秒。观测值约为  $\phi = 3 \times 10^{-7}$  尔格/厘米<sup>2</sup>·秒。作为存照，我们还提出这样的观点：超新星是表示从普通星到中子星的过渡。所谓中子星，就是星的最终阶段，它完全由挤得极紧的中子构成。

巴德和兹威基的这篇短文几乎覆盖了现今高能天体物理学的全部课题。即：超新星；超新星爆发与星系；引力坍缩与致密星(中子星、黑洞)；宇宙线。

高能天体物理的真正发展是六十年代以来的事。因为，直到六十年代才具备了研究高能天体物理的必要条件：理论条件及观测条件。理论条件主要是建立了恒星演化理论，观测条件主要是空间探测及地下探测的发展。

## 恒星的演化

恒星有千千万万。恒星的性质主要用两个参数来

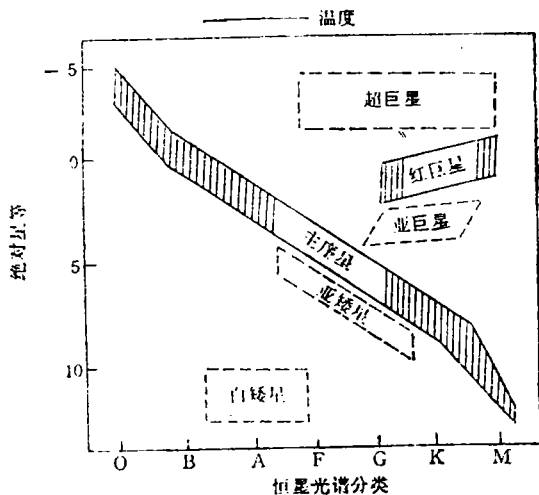


图1 恒星在赫罗图上的分布

表示，一是恒星表面的温度，一是恒星的亮度，或绝对星等。恒星表面温度分布在二、三千度到四、五万度范围中，绝对星等分布在正十余等到负五、六等范围。用表面温度作横坐标，绝对星等作纵坐标，每个恒星在这种图上都应一个点。这种图最早是丹麦天文学家赫兹普隆和美国天文学家罗素在1905年到1913年间开始

系，而且还在于基于物理学原理，可以发展出一代又一代新的物理技术。新一代技术的出现，又导致新兴工业的形成和发展。

今天，高技术的洪流正在世界范围内逐渐形成，它对未来世界的经济、技术、军事、政治等方面将产生深远影响，直至引起社会生产方式、人类生活方式以及人们观念的改变。

世界高技术发展进程中，对物理学将提出层出不穷的研究课题，而物理学的研究成果将源源不断地在高技术中得到应用。越来越多的有远见的企业家事业家已经看到，物理学人才在今天的经济-技术结构中将起不可缺少的作用。

人类正在进入以高技术为特征的时代，创造与高技术时代相对应的物理学进展与成就，这是历史赋予今天以及未来的物理学家们的光辉使命。

使用的、所以常常简称为赫罗图。恒星在赫罗图上的位置分别集中在几个区域中(参见图1)。大多数星处在斜贯全图的一条窄带上。处在这条带上的星称为主序星。对主序星,温度越高,绝对光度越大。太阳是颗主序星,它的表面温度约六千度,它正处在主序星的中段,还有较少的星位于图的右上部,它们是些光度较大而表面温度较低的恒星,称为红巨星,亚巨星及超巨星等。还有为数更少的星散见于图的下部,它们是些温度较高但光度很小的白矮星。

之所以有如此不同种类的星,就是由于星的演化。按照现行的理论,恒星是从弥漫的气云收缩而成的,气云的成分主要是氢。由于收缩,气云的温度不断升高而开始发光,当它内部温度高到数百万度以上时,就开始发生热核反应,氢聚变成较重的元素,并以辐射形式释放出大量能量。到这时,一颗恒星就正式诞生了。恒星形成之后,就处在主序星阶段,在这个阶段中,恒星非常稳定,它的光度和表面温度在极长的时间中可

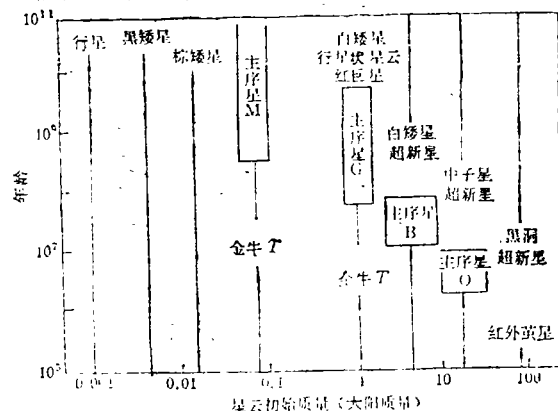


图2 各种质量星体的演化过程

以说保持不变。质量越大的主序星,温度越高,光度也越大,所以主序星在赫罗图上分布成一条斜带。正因为恒星在这个阶段停留时间很长,所以我们看到的星大部分都是主序星。待到恒星核心中的氢耗尽之后,就到了一个转变期。这时恒星核心部分发生收缩,温度升高,辐射增加,而星体的外层在强大的辐射作用下迅速胀大,成了一个大而发红的星,就是红巨星。恒星在红巨星阶段停留时间较短,所以看到的也就较少。

演化到红巨星之后,恒星有几条不同的出路。质量较小的红巨星,最后会坍缩而形成白矮星、质量大于5个太阳质量以上的红巨星,当其核心坍缩后会导致星体外层的大爆发,这就是超新星。爆发过程以光能、动能及宇宙线能的形式放出大量能量,其核心部分则形成白矮星、中子星或黑洞等致密天体。图2表示了各种质量天体的演化过程。

## 引力坍缩

如前所述,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热压力。结果,在自身引力的作用下,将发生大塌缩。在塌缩过程中有大量引力势能释放出来,所以,引力坍缩是许多高能天体物理现象的根源。

一个具有太阳质量及太阳大小的星体核,坍缩到10公里大小时,总共应释放引力能约 $10^{47}$ 尔格。可是由光学测量知道,超新星放出的总光能和总动能都约为 $10^{51}$ 尔格,即只有总引力能的1%。因此,引力坍缩的能量并不主要由光能及爆发动能释放出来。

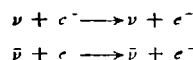
超新星的放能,主要是以发射中微子的方式完成。在引力坍缩中,大量的中微子生成,生成中微子的方式有两种,一种是星体中质子在坍缩时逐渐变成中子,即以 $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ 方式放射中微子 $\nu_e$ ;另一种方式是热中微子,即当坍缩的核心密度变得很高,达到 $10^{11}$ 克/厘米<sup>3</sup>时,物质对于中微子是不透明的。这时,由于电子与中微子之间有反应, $e^- + \bar{\nu}_e \rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e$ ,从而有大量热中微子形成并参与发射。这种中微子的温度约为100—1000亿度。

所以,引力坍缩,或者超新星爆发,首先应是中微子发射的爆发,而光发射是次要的。研究引力坍缩过程中能量如何释放,是前沿课题之一。特别,早已注意到,超新星发生的频次太少。如果恒星晚期都要经历一次超新星爆发,则平均而言应当每十余年在银河中就应有一次超新星爆发,而实际上要上百年才有一颗。所以,很可能存在暗的超新星爆发,即发光很弱的超新星。当然,这种超新星仍是强的中微子源。这种观点得到超新星1987A的支持。已经注意到这颗超新星的光度比“标准”的超新星低得多,而中微子却符合标准引力坍缩理论的预言。如果的确存在大量暗超新星,则一方面可以解释上述的频次矛盾,另一方面也提出,用中微子观测有可能发现更多的超新星。

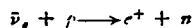
## 中微子天文学

1987年初,日本、美国、欧洲等几个天文观测站接收到了来自超新星1987A的中微子。这件事已经成了河外中微子天文学诞生的标志。

这些观测站中的接收器,大都是用水作为工作物质。比如,日本神冈的装置就是一个充满水的容器,装有2140吨水。在水箱周围布满上千个光电倍增管,用以记录高能电子在水中引起的契连科夫辐射。这种装置有两种方式记录中微子,一种是电子散射过程,即



另一种是捕获过程,即



这两种反应都可能产生高能电子或正电子,从而被记录下来。

利用中微子天文学可以得到许多用光学望远镜不

能得到的知识。比如，虽然用光学方法能看到超新星爆发，但不能窥知超新星内部的引力坍缩。用中微子天文学则可以进行这项研究。因为，中微子是弱作用粒子，它有极强的穿透本领。哪怕在星体核心产生的中微子，也有可能不经碰撞也穿透到星体之外，这些中微子携带着丰富的有关星体核心的信息。

利用接收到的来自超新星 1987-A 的中微子，就可以推知超新星核心引力坍缩后的温度。其方法和光学天体物理是一样的。我们知道，根据星光的颜色就可以推得星体表面的温度，如黄色的温度约为 6000 度，红色的低于 6 千度，蓝色的高于 6 千度。所谓颜色就是光子的平均能量。因此，根据中微子的平均能量，我们就能算出相应温度，其结果为 4MeV，即大约一百亿度以上。这完全符合关于引力坍缩的理论推断。这是中微子天文学的第一个成功。

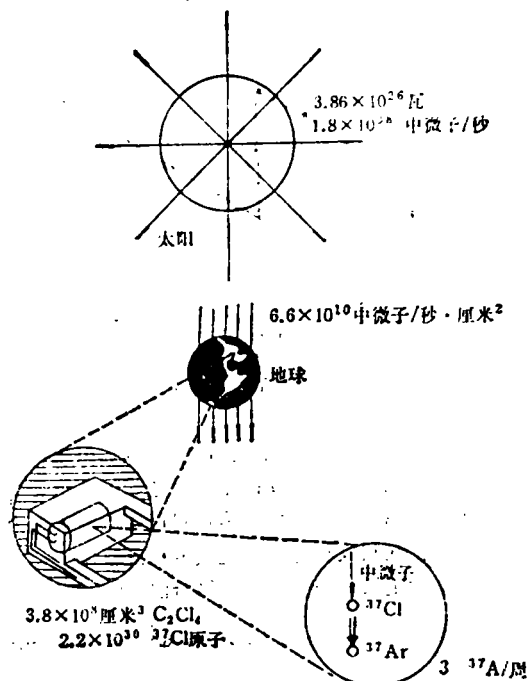


图3 对太阳中微子的探测

其实，在此之前中微子天文学已颇有名气，不过不是以成功而有名。相反，是由于失败。这就是太阳中微子短缺。太阳中心的核反应也会放出大量的中微子，在地球上也是可测的。特别，因为太阳的光度等有很准确的值，所以，对中微子的预言也是非常确定的。如图3所示，太阳光度为  $3.86 \times 10^{26}$  尔格/秒，中微子强度应为  $1.8 \times 10^{10}$  个/秒，落到地球上的流强应为  $6.6 \times 10^{10}$  个/秒·厘米<sup>2</sup>。

美国布鲁克海文实验室进行了太阳中微子探测。他们在南达科他的詹姆斯代克金矿中安放探测器，用  $C_2Cl_4$  作为工作物质，利用反应  $\nu_e + ^{37}Cl \rightarrow e^- + ^{37}Ar$  来探测中微子。

按理论预计，在他们的体积为  $3.8 \times 10^3$  厘米<sup>3</sup> 的  $C_2Cl_4$  探测器中每周应当约有 12 个  $^{37}Ar$  产生，而实际上只有 3 个，即只有理论值的 25%。这是一个严重的矛盾。

目前，解释这个矛盾的最成功的模型，是中微子振荡。即不同种类的中微子之间可能发生转变。太阳核心所产生的电子中微子，在通过太阳物质飞出太阳时，有相当部分已转变成  $\mu$  中微子，以致发生电子中微子短缺。

进一步的观测检验正在安排，其方案是用  $^{71}Ga$  做工作物质，用反应  $\nu_e + ^{71}Ga \rightarrow e^- + ^{71}Ge$  来探测太阳中微子，这种反应对探测太阳中微子来说更加有效。另外，除了中微子数，有的设计也还准备探测更多的物理量，包括能量，到达时间，到达方向等等。

### 脉冲星与中子星

引力坍缩之后可能形成中子星，这一理论是脉冲星发现之后才得到证实的。1967 年，英国剑桥大学天文学家建造了一架射电望远镜，来研究行星际闪烁现象。工作波段是 81.5MHz，又因为闪烁是很快的。所以该望远镜应有高的时间分辨率。这样一来，望远镜应有很大的接收面积。建成后，它竟占地三十亩，是一个  $16 \times 128$  个偶极天线阵。

这个望远镜已写进了天文学史，不是因为它研究闪烁有功，而是它发现了脉冲星。脉冲星是周期地发射射电脉冲的星体，最初发现的脉冲星，周期约在 1 秒。八十年代以来，又发现一批周期只有毫秒量级的脉冲星。已知周期最短的脉冲星为 G × 339 - 4，其周期为 1.13 毫秒。

脉冲星周期如此之短，而周期又非常稳定，稳定度达到  $10^{-11}$  以上。因此，脉冲星的唯一解释是中子星。即由完全挤紧的中子物质构成的星体。物质密度极高，达到  $10^{14}$  克/厘米<sup>3</sup>。中子星很小，半径数十公里。因此，中子星可以高速转动而不撒掉。我们观测到的脉冲是由于中子星有束状的射电发射，它每转一圈该射电束扫过地球一次，我们就接收到一个脉冲。脉冲星是高速转动的中子星这一论断，现在已被公认了。

脉冲星的进一步的研究，分成了两个方面，一是外层辐射过程的研究，一是内层中子星构的研究。

外层研究也就是脉冲星的磁层研究。因为，束状发射主要是由磁场导致的，中子星具有强的偶极磁场，并且，磁轴与转轴既不平行也不反平行。因此，这种几何位形在形式上是与地环磁层相似的。但就空间尺度及磁场强度而言，脉冲星磁层与地球磁层是十分不同的。后者可称为低能磁层，前者则是高能磁层。高能磁层与低能磁层有些物理过程是相似的，但也有十分不同之点。例如，高能磁层中电子对产生过程是可能的，而低能磁层中则没有。相应将导致波及稳定性方面的差

别。这正是天体等离子体物理中的重要课题之一。

致于脉冲星内部，则是核物理问题为主了。中子星的结构是高密态物理学的极好应用。关于各种核物质状态方程对中子星结构的影响，已经研究得十分多了。另外，一些特殊核态，如反常中子态、超子态、夸克-胶子态，在中子星中的可能存在，也已有广泛的讨论。图4画出现有高空高温物态的理解。普通的核只占其中一很小范围，而中子星在图中属于重要地位。可见，就研究高密的核物质而言，中子星的确是一个非常有用的对象。

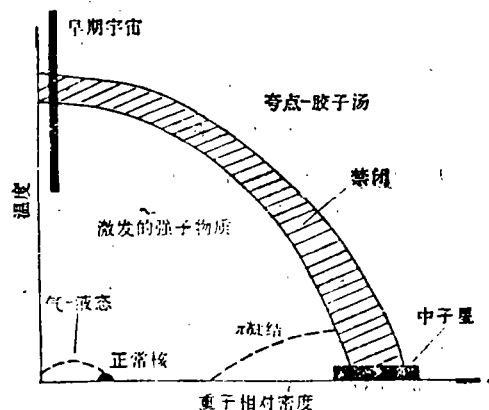


图4 高温高压下的物态

利用中子星来研究核的性质的一个例子是星震。早就观测到，有的脉冲星的周期会有突然的变短。图5表示船帆座脉冲星的周期随时间的变化。在一般情况，周期随时间变长，这是由于转动动能损失所致。但是，有时周期跳跃式地变短，这是由于星震导致转动惯量突然变小所致。

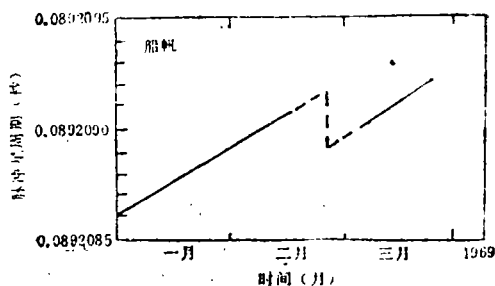


图5 船帆座脉冲星的周期的跳跃式变化

有趣的是，一些高自旋核有十分相似的现象。图6表示 $^{152}\text{Er}$ 的转动周期随时间的变化，其形式与图5几乎完全一样，只是尺度不同。图6中画出的周期突然变短，称为核震，其效果也是使核的转动惯量变小。

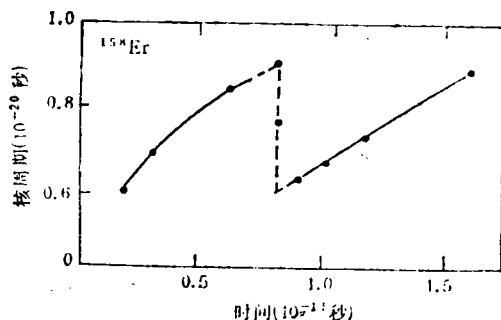


图6  $^{152}\text{Er}$  的转动周期的跳跃式变化

星震与核震当然不是由于全同的机制，但也有共性，它们都是由于内部物质的重排而造成的。核震与核子的成对有密切关系，而星震则可能由于中子星中的涡旋结构。在尺度相差如此之大的核及星体上，存在着如此对应的物理，充分显示了物理规律的普适性。

## 封面设计

### 的构想

嘱我为《现代物理知识》设计封面，不胜荣幸！于是，我开始构思：似乎是鬼使神差，我马上想到了一幅互补型的骑士图案，其构思之巧妙，真可谓天衣无缝。于是，我将它「谈出」作为封面的背景，意在表现物理学，乃至自然界中无所不在的和谐美、对称美。讲到物理，离不开时空，即四维空间，于是，我把版面一分为四，而作为其中一维的时间恰好提供了期刊的年度及期数，当然，我采用了当今最时髦的数码管七笔字型。物理学是讲相互作用的，在宇宙中的任何一个物体要与其它物体发生关系，这种复杂的、多元的联系似乎正好用由多种颜色混成的灰色来表现。因此，我决定将这种色彩赋予中、英文刊名。自然界的丰富多采就如白光分化为彩虹那样绚丽，因此，我把红橙黄绿蓝靛紫谱上了版面，通过与灰色背景的对比，力求版面生辉，同时，它近可使人产生光学的联想，此外，每期封面都将刊登一张彩色照片，使现代物理各分支学科在此「亮相」。

陆柱国

一九八八年国庆于高能所