

相对论天体物理研究在中国

方励之

(中国科学技术大学)

天体物理是一个老的领域,但是,在中国物理界,开展这方面研究的历史并不长,特别是相对论天体物理的研究,至今仅有十年的历史,中国引力及相对论天体物理学会的成立,也不过三年。

在这个不长的时期中,工作发展还是较快的。目前,除科学院的有关研究所外,已约有十三、四所大学的物理系科或多或少地开展了天体物理的研究。已发表过论文的人数约达七十。最近,在上海召开的有中、外近三百名物理学家参加的第三届格罗斯曼会议上,中国学者提出的相对论天体物理论文,约有三十篇。

之所以有这样的进展,是与这门学科的总的形势密切相关的。所谓相对论天体物理,实际上泛指在最近不到二十年的时间发展起来的新的天体物理分支——与基础物理关系最紧密的一个分支。它首先包括一系列的新发现,主要有:类星体(1963);微波背景辐射(1965);脉冲星(1967);X射线双星(1970);射电源超光速膨胀(1971);太阳中微子反常(1976);双星的引力辐射阻尼(1978);巨 γ 射线爆(1979);引力透镜(1979);原初反质子流反常(1980);巨洞(1981);宇宙线中可能的磁单极事例(1982)。这些发现大都使用了物理学所提供的新的探测技术,许多发现本身就是由物理学家完成的。其中微波背景辐射、脉冲星以及探测射电源所应用的几项综合孔径技术,已获得诺贝尔物理学奖。

相对论天体物理另一方面就是理论,顾名思义,它是基于爱因斯坦的广义相对论的天体物理理论。的确,上述发现的理论解释几乎都要涉及相对论。但是,天体物理的一个特征是,

对物理理论的应用往往是综合性的。解释上述现象也离不开其他的物理领域,如原子、分子、核、超密物态以及等离子体等等。所以,相对论天体物理不同于引力理论或引力实验那种纯引力物理的研究,我们应当说,它是一个把基础物理与天体现象全面结合起来的领域。特别是最近三、五年来,粒子物理以及新的引力理论开始起越来越大的作用。下面列举几个最新的研究课题,从中可以看到新物理和天体问题相结合的深度和广度:

中微子品种数和氦丰度;有静质量的中微子、引微子(gravitino)、光微子(photino)与星系的形成和星系的构造;不可视的 axion 与星体能量损失; Higgs 相变与宇宙的均匀各向同性;磁单极的短缺与极早期的过冷相;大统一理论与重子反重子不对称的生成;新引力理论(超引力、诱生引力等)与宇宙的普朗克时期。这种全面的结合,是吸引越来越多的物理学家转向天体物理研究的基本原因。

我国的研究工作主要限于理论方面。近年开放之后,也开始有人参与国外的观测工作,但为数尚少。下面分几个方面来介绍一些主要的研究成果^[1]。

一、宇宙学

微波背景辐射发现之后,热大爆炸宇宙模型逐渐得到普遍承认。在这种标准宇宙学中,时空几何决定于两个参数:哈勃常数 H_0 及减速参数 q_0 。 H_0^{-1} 大体是宇宙的年龄, $q_0 > 1/2$ 及 $q_0 < 1/2$ 分别相应于有限及无限的宇宙。

哈勃常数已有较确定的数值,大体在 50—

100 公里/(秒·百万秒差距) 之间。但 q_0 尚未很好确定, 甚至是否大于 1/2 也还没有定论。

1976 年, 中国科学技术大学小组首先使用光度指标方法来分析类星体的哈勃图, 用以确定 q_0 。他们所用的光度指标是双射电子源类星体的两子源的间距。随后, 南京大学、北京师范大学等小组采用光度分类方法研究类似问题, 所用的光度分类标准有闪烁性质和光变性质等。虽然这些分析所根据的标准不同, 统计对象不同, 但求出的 q_0 均在 1—2 之间, 即相应于宇宙应当是有限而封闭的。国际上关于类星体哈勃图的类似分析始于 1977 年, 采用过不同的光度指标或光度分类, 得到的 q_0 值和中国同行是完全一样的^[2]。

最近, 中国科学技术大学、爱尔兰顿辛克天文台和紫金山天文台小组, 在全面分析评价各种确定 q_0 的结果之后发现, 不同方法所给出的 q_0 值之间存在着系统性的偏差。凡用平均质量密度方法得到的 q_0 一般总小于 1/2; 相反, 凡用哈勃图方法得到的 q_0 一般总大于 1/2。它的解释只可能有三个: (1) 类星体及星系的演化使哈勃图方法有误; (2) 由于存在大量不可视物质使平均质量密度方法有误; (3) 标准宇宙学模型是不对的^[2]。

我国国内的许多研究工作都倾向于支持第二种解释, 即存在不可视物质。因为, 已经有许多迹象表明, 发光的星、星系、星系团等可能只占宇宙中质量的一小部分。例如, 星系的转动曲线明显偏离开普勒定律; 质光比随着系统尺度的增大而增大, 都暗示各种天体系统中存在许多看不见的物质。

发现中微子静质量可能不为零之后, 不可视物质存在的猜测得到更直接的支持。只要中微子具有约 10 电子伏的静质量, 则中微子质量密度就会比可视物质的质量密度高约一百倍。这足以使宇宙成为封闭的。南京大学、中国科学院理论物理研究所、中国科学技术大学等小组参加了中微子宇宙学的研究热潮。一个有意义的结果是, 宇宙中有静质量中微子成分的存在, 将有助于星系团尺度上的非均匀性的形成,

而另一方面中微子的不均匀性并不会带来明显的微波背景辐射的非均匀性^[3]。

由此更加明确, 宇宙是由可视的发光星体及不可视物质两部分组成的。研究整个宇宙的结构应当研究这两部分各自的特点。一个最主要的进展是, 可视的天体存在着显著的大尺度的非均匀性; 不可视物质的分布则可能是相当均匀的, 没有强的非均匀性。这个结果, 是由中国科学技术大学、北京天文台及北京师范大学等几方面的工作而得出的^[4]。

不可视物质的均匀性, 是由分析引力闪烁效应对微波背景辐射的各向异性的贡献而给出的。可视天体的大尺度非均匀性, 由我国的研究工作所确认的有: 类星体团; 类星体在 100 百万秒差距上的大尺度不均匀; 类星体及中介吸收云的分布中具有波长为 300—600 百万秒差距的周期成分。

这些非均匀性应起源于宇宙极早期。一个可能是由早期相变带来的。含有自发对称破缺的规范场, 将会在宇宙早期高热时期引起真空相变。为了解释磁单极子的短缺, 这种相变最可能是一级的。这就使得早期宇宙可能要经历一个过冷真空的暴涨态。在这阶段中, 主要的物理过程是相变泡的形成及演化。对泡与泡之间的碰撞, 我国也进行了研究。另外还提出, 相变时的反常耗散可能是产生宇宙熵的一个重要原因^[5]。

二、坍缩天体

超新星爆发时, 将伴随着星体的引力坍缩。由坍缩形成的天体, 有哪些种? 这是相对论性星体结构理论中的第一个问题。从大类来说, 坍缩天体有白矮星、中子星和黑洞。南京大学、中国科学技术大学、内蒙古大学的共同研究提出, 可能存在着非正常的中子星, 例如反常中子星、夸克星等, 并且提出这些星体之间可能会通过相变而互相转化¹⁾。

1) 见曲钦岳 1982 年在中国-西德天体物理讨论会上的报告。

从我国的古籍中可以找到有关河内超新星的历史记录。最有名的是公元 1054 年的超新星,因为它就是产生蟹状星云的事件。最亮的超新星是公元 1006 年的爆发。由于 1006 和 1054 两个超新星的年龄相似,最近美国用爱因斯坦 X 射线天文台对二者进行了对比研究。结果发现二者差别很大,1054 的中心星体的表面温度约为三百万度,而 1006 的则不到百万度。按照中子星的冷却理论可以推知中子星的表面温度随着年龄下降的数值,1054 的结果与理论相符。而 1006 应有反常大的冷却速度,所以,1006 的中心星体可能是非正常的中子星。另外,我国的古籍中还发现了 1006 超新星在公元 1016 年有再次爆发的记录,这可能是由正常中子星变到非正常中子星的相变释能所引起的。所有这些结果都支持了存在不同类型的中子星以及星体相变的理论观念。

南京大学的小组提出,中微子对的迴旋辐射是使中子星转动减速的一个重要因素。特别是对于具有超流内部状态的中子星,当运转周期大于 1 秒时,转动的减速主要是由中微子机制引起的。统计分析表明,周期大于 1 秒的脉冲星的周期变率的确与短周期的脉冲星有所不同,与理论预言的趋势是一致的¹⁾。

另外一些统计分析的结果是:(1)中子星的偶极磁场是衰减的;(2)具有长的脉冲消失的脉冲星,其射电辐射区的磁场应临近某一临界值¹⁾。

黑洞物理的第一个问题是临界质量,即当星体质量大于此值时,引力坍缩的后果只有形成黑洞。中国科学技术大学、南京大学及云南天文台等小组对不同物态方程所给出的临界质量进行过计算,也讨论过星体电荷对临界质量的影响。所得到的最大的临界质量是 $3.18 M_{\odot}$,这与现在一般使用的数值 $3.2 M_{\odot}$ 非常接近¹⁾。

黑洞作为一个天体,其主要的物理过程是吸积,即将周围伴星的物质或星际物质吸引到黑洞周围,最终落入黑洞。吸积物可在黑洞周围形成盘状结构,是黑洞周围的主要发光区。一般说盘的外区温度低,中心温度高。中国科学

技术大学和南京大学的工作证明,在特定条件下,盘的中心部分也会出现一个突然的降温区。并且在这个区域中可能存在着相干的复合发射条件,这可能适用于 SS433 等天体现象。另外,关于吸积的研究还指出,电子正电子对在吸积盘的高温区将起重要作用,特别是在研究硬 X 射线波段的发射时,必须考虑它的作用。这种观点现在已被广泛接受¹⁶⁾。

三、相对论效应的天文检验

广义相对论的预言,最早都是依靠天文现象来证实的。相对论天体物理在观测和理论两方面的发展提供了对广义相对论进行天文检验的更多的机会。

在这方面,最重要的一项进展是利用脉冲星双星 PSR1913 + 16 检验引力辐射的存在。双星是一个引力辐射源,因此,由引力辐射阻尼的作用双星将损失能量而使周期变短。双星的引力辐射阻尼问题最早是由北京大学的小组研究的²⁾。PSR1913 + 16 的发现使这种检验成为可能。因为,一般的双星,有许多因素会使它的周期发生变化。只有用两致密星的双星体系,才有可能检验引力辐射阻尼。1974 年,当 PSR 1913+16 刚刚发现时,中国科学技术大学及北京天文台的小组即指出,这个射电脉冲星双星极可能是由双致密星构成的。这个推测,与当时以及后来的理论及观测研究结果是一致的。

黑洞周围的发光体,是在强引力场中,因而它们的观测表现,也可以作为检验相对论的一种方法。例如,在黑洞周围的发光环及发光盘的谱线轮廓;含有黑洞的双星的谱线轮廓;有晕的紧密天体周围的发射特征,这些都由中国科学技术大学、复旦大学、新疆工学院等小组研究过。特别是,SS433 发现之后,其中一些预言开始具有实际价值,因为,一种模型即认为 SS433

1) 见黄介浩 1982 年在中国-西德天体物理讨论会上的报告。

2) 见胡宁 1982 年在第三届格罗斯曼会议上的报告。

是黑洞周围的一个发光环, 这个光环给出具有大红移及大兰移的谱线^[6].

中微子若有静质量, 则在星系或其他星体周围存在着中微子晕. 它的质量可能很大, 但是光学透明的. 因此, 透明中微子晕所引起的红移、光线弯曲、引力透镜等现象是可观测的相对论效应的候选者. 复旦大学及中国科学技术大学等对这个问题做了详尽的研究^[1].

除了上述几个系统的方面外, 我国物理学家还作过其他许多不同方面的工作. 例如, 相对论球状星团的结构和演化; 有核体系的结构及稳定性的相对论理论; 超光速膨胀的统计分析及其解释; 引力聚焦的波动光学理论; 非标准的宇宙学模型等.

一些富有相对论天体物理意义的观测工作也在进行或与国外合作进行了. 例如, 类星体的证认, 大红移类星体吸收线的系统性观测和分析, 大红移类星体的找寻, 武仙座 X-1 的朗道能级的线发射等.

美国科学院天文部主席费尔德最近说, 天文学正又处在一个黄金时代, 主要根据是在下一个十年里一些国家将联合建造几个大型观测

设备, 新的 X 射线探测器的灵敏度将比现有的提高十倍, 大型射电望远镜将使我们能测量极遥远的天体的自行, 新的光学望远镜的口径将达到十五米以上, 比现有望远镜的有效面积增大九倍, 空间天文台将把 2.04 米的望远镜放到大气层外. 所有这些, 对许多悬而未决的宇宙问题, 对发现新的宇宙现象, 都是极富有吸引力的. 我国的物理学家如果在观测上更多地介入这些大型设备的使用, 在理论上继续坚持我们的有特点的独创作法, 那么, 在下一个十年后再来回顾相对论天体物理在中国, 定是另有一番景色了.

参 考 文 献

- [1] 方励之, *Chinese Astronomy and Astrophysics*, **5** (1981), 1.
- [2] 方励之、江涛、程富华、胡佛兴, *Quart. J. Roy. Astron. Soc.*, **23** (1982), 363.
- [3] 陆焱、方励之, *物理学进展*, **2**(1982), 67.
- [4] 方励之, *Astrophysical Cosmology*, Ed. M. S. Longair, (1982).
- [5] 方励之, *物理学进展*, **1**(1981), 180.
- [6] 方励之, R. Ruftini, L. Stella, *Vistas in Astronomy*, **25** (1981), 185.

1) 见须重明 1982 年在第三届格罗斯曼会议上的报告.

(上接第 352 页)

$p_{\mu^+} = 29.7877 \pm 0.0014 \text{ MeV}/c$. 根据这一数值和 m_{π^+} 以及 m_{μ} 的数值得到 $m_{\nu_{\mu}} < 0.57$ 兆电子伏/ c^2 .

Perl 的文章^[1]中把 $m_{\nu_{\tau}}$ 值列为 < 250 兆电子伏/ c^2 . 这仅是从 $\tau - \nu_{\tau}$ 弱相互作用流中一些常数的估计中或 $\tau^- \rightarrow \nu_{\tau} + e^- + \bar{\nu}_e$ 分支比的值中估计得到的. 因此是非常不确切的.

除 Simpson 对于出现中微子态的混合的可能性略加探讨外, 其它的实验测量都没有对这方面加以考虑. 看来这方面的影响将是微弱的, 或者是在实验测量的范围以外, 需要更细致的或测量范围更大的实验, 来验证 Shrock^[10] 所指出的由于中微子质量本征态的混合而在 β 能谱中出现的扭结 (kinks) 是否存在.

参 考 文 献

- [1] M. L. Perl et al., *Phys. Rev. Lett.*, **35** (1975), 1489.
- [2] H. Georgi & S. L. Glashow, *Phys. Rev. Lett.*, **32**, (1974), 438; J. C. Pati and A. Salam, *Phys. Rev., D*, **D8**, (1973), 1240.
- [3] J. N. Bahcall & R. Davis, Jr., *Science* **191** (1976), 264.
- [4] S. Bileny & B. Pontecorvo, *Physes Reports*, **41**, (1978), 225.
- [5] C. Baltay, *Neutrino Oscillation Workshop*, Ed. by BNL, (1981), 307.
- [6] K. Bergkvist, *Nucl. Phys.*, **B39**, (1972), 317.
- [7] V. A. Lyubimov et al., *Phys. Lett.*, **B49**, (1980), 266.
- [8] J. J. Simpson, *Neutrino Oscillation Workshop*, Ed. by BNL, (1981), 229.
- [9] M. Daum et al., *Phys. Rev.*, **D20**, (1979), 2692.
- [10] R. E. Shrock, *Neutrino Oscillation Workshop*, Ed. by BNL, (1981), 249.