

引力理论与天体演化

邹 振 隆

(中国科学院北京天文台)

引 言

引力是物质的一种极普遍的相互作用,在今天人们知道的自然界的四种基本相互作用中,引力最弱.按作用强度比较排列如下:

强相互作用	1
电磁相互作用	10^{-2}
弱相互作用	10^{-10}
引力相互作用	10^{-40}

例如氢原子中的电子和质子间引力与电磁力之比, $GM_e M_p / e^2 \sim 10^{-39}$. 因此,引力一般略去不计(近来已有人开始考虑计算引力相互作用来克服基本粒子理论中的困难).然而,在天文学的领域内,由于所处理的对象质量极其巨大,引力就成为不仅支配着天体的运动,而且决定天体的结构和演化的一个基本因素.

历史上第一个引力理论,就是牛顿在前人工作的基础上,依据天文观测发现的月亮及行星运动规律而总结出来的.以此为出发点发展起来的天体力学,不仅使人们可以精确地计算太阳系内天体的轨道,预言海王星的存在,实现宇宙航行等等,而且在太阳系外双星的运动,星团和星系动力学,恒星(主要是主序星)的结构和演化的研究方面,也取得了很大的成功.这一系列的成就说明,牛顿的引力定律是人类对引力相互作用认识史上的一个经受了实践长期考验的相对真理.

然而,“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上.”自从勒维耶(1859)以及后来纽康(1898)肯定地知道了水星近日点的进动中,有不能用牛顿理论解释的部分以后,不少物理学家作了推广万有引力定律的各种尝试.1902年任勒克^[1]发表的一篇文章可以看作是这些不成功的早期努力的一个总结.

1905年,爱因斯坦狭义相对论的发表,从根本上突破了牛顿的绝对时空观念,否定了瞬时超距作用的观点,它的成功使人们把注意力转向建立一个满足洛伦兹协变的平直空间的引力理论^[2],尽管遇到各种困难(主要是难于从物理上合理地说明现有的全部观测事实),这种努力还是一直继续到今天.

1915年,爱因斯坦把狭义相对性原理加以推广,取消了惯性参考系的优越地位,提出了广义相对论,把由时空的度规张量描写的引力场同物质的能量动量张量联系起来.第二年,史瓦西求得了爱因斯坦引力场方程在球对称条件下的精确解,除了在零级近似下回到牛顿理论以外,还预言了光谱线的引力红移,光线在引力场中的偏折,对行星近日点的进动得出了比牛顿力学所给出的较大的数值,这些结果都为以后天文学的观测所证实.

三十年代哈勃等人发现了河外星系光谱线的红移,如果解释为多普勒效应,就意味着它们以正比于其距离的速度在彼此分开;六十年代发现的各向同性微波背景辐射,如果解释为 2.7K 黑体辐射,则好象是伽莫夫四十年代提出的原始火球爆炸的残余.这两项发现究竟如何解释,一直存在不同观点的争论,但国外多数人认为,它们给二十年代德西特、弗里德曼等人在广义相对论基础上建立的“膨胀宇宙”模型提供了观测上的支持.这一切使广义相对论成了国际上近代引力理论的主流.

不过,应当指出,广义相对论还远不是一个成熟的理论,它的一些基本困难(如引力场能量动量的协变定义,任意坐标变换的物理解释,宇宙论中的奇点等问题)长期未得解决,在目前实验的精度范围内,还有一些别的引力理论(如认为引力常数不是常数的狄拉克、布朗斯、迪克的标量-张量理论^[3])与它抗争.近来,认为由物质的能量动量张量和动力学自旋流共同决定引力场的引力规范理论^[4]也引起了人们的注意.这些理论中,到底哪一个更深刻正确地反映了引力场的本质,有待进一步的科学实践,特别是天文学实践的检验.

六十年代天体物理学的重大发现中,许多很可能是同引力现象密切相关的.例如类星体的大红移如果解释为宇宙学效应,那它的能量就高得连核反应也无法提供,于是使人们回忆起奥本海默^[5]等人 1939 年提出的“引力坍缩”概念;如果这种红移不取宇宙学解释,也要考虑它由引力场产生的可能性.至于 1969 年韦伯^[6]宣布他发现的来自银河中心的引力波同引力理论的关系,就更是不言而喻了*.上述情形引起了各国天文学和物理学工作者的重视,自 1963 年以来,他们定期召开国际性会议专门讨论这方面的问题,到 1972 年 12 月,仅德克萨斯相对论天体物理讨论会就开了六次,这些努力的结果,导致了“相对论天体物理”这门年轻学科的诞生.

本文仅就引力理论的实验检验的进展和恒星演化与引力理论的关系作一粗略介绍.

引力理论实验检验的进展^[7]

首先,作为广义相对论出发点之一的等效原理的基础——引力质量等于惯性质量,其实验精度十年来有了显著的提高.1962—1964 年,美国的迪克等在 Eötvös 实验基础上作了一些重大改进,把精度提高两个量级,达到 10^{-11} .据最近报道,苏联的布拉金斯基小组已使这个检验达到 0.9×10^{-12} 的精度.

其次,关于所谓“三大验证”,六十年代以前天文观测得到的结果只是同广义相对论的预言定性符合,定量方面是不够令人满意的,有的误差达 20—30%.六十年代以来,由于观测技术的进步,提供了在更高的精度上进行三个经典检验和新检验的可能性.

1958 年发现了穆斯保尔效应后不久,邦得等人就利用它来作地球上的引力红移实验.他们用 Fe^{57} 的 $14.4\text{keV}\gamma$ 射线作无反冲共振吸收,吸收器离发射源的垂直高度为 22.5 米,按广义相对论计算, $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{GM}{C^2 R^2} \cdot h \approx 2.5 \times 10^{-15}$.

设观测值同理论值之比为 y .1960 年得到的结果是 $y = 1.05 \pm 0.10$,精度为 10%,1965 年经改进后的结果是 $y = 0.9990 \pm 0.0076$,精度提高到 1%.

二次大战后射电天文技术的发展,提供了检验相对论的新手段.1967 年夏皮诺等首次建

* 近来,一些人重复韦伯的实验得到零结果.例如见 Tyson, J. A., *Phys. Rev. Letters*, **31** (1973), No. 5, 326. 这个问题还需进一步研究.

议用射电干涉仪来测量射电波被太阳引力场的偏折(按广义相对论 $\Delta\theta = \frac{4GM_{\odot}}{C^2 l}$, l 为瞄准参量)。做这个实验最理想的源是 3C273 和 3C279。后者每年 10 月 8 日被太阳掩食,而前者在天空离开约 8° ,可用来作为消除某些系统误差的参考。

1969 年,两个小组用短基线干涉仪首次进行了成功的测量。姆勒曼组用的频率为 2388 兆赫,基线长 20 公里,得到的观测值同理论值之比 $\lambda = 1.04 \pm 0.15$,塞尔斯塔得组用高频(9602 兆赫)观测以消除日冕的影响,基线长 1 公里,结果为 $\lambda = 1.01 \pm 0.12$ 。1970 年和 1971 年史拉曼等用三元短基线干涉仪,倍频技术,得到的结果为 $\lambda = 0.94 \pm 0.06$ 。今后如果用角分辨本领更高的长基线干涉仪和更好的倍频技术,可望将精度提到 0.3% 以上。

此外,1964 年夏皮诺提出用雷达回波信号的延迟来作广义相对论的第四检验。从地球上发射雷达信号到内行星,再接收返回信号,两者间有一时间差,如认为光速不变,则它仅决定于地球和该行星的瞬时距离。但按广义相对论,光线在引力场中速度要减小,这就使往返时间有

一附加延迟 $\Delta\tau = \frac{4GM_{\odot}}{C^3} \ln \left[\frac{(R_e + \sqrt{R_e^2 - l^2})(R_r + \sqrt{R_r^2 - l^2})}{l^2} \right]$ 。其中, R_e 为日地距离, R_r

为太阳到行星的距离, l 为日心到地球行星联线的距离(瞄准距离)。当行星上合时,这种效应可以大到能观测的程度(约 160 微秒)。1967 年金星上合时,用海斯塔克 120 呎天线观测了这个效应,所用的频率为 7840 兆赫,发射功率为 300 瓦,接收到的返回信号功率为 10^{-21} 瓦,观测值同理论值之比为 1.02 ± 0.05 。1970 年春,水手 6 号和 7 号相继上合,用安装在飞船上的主动雷达进行了类似测量,得到的比值为 1.00 ± 0.04 。

关于水星近日点的进动,广义相对论的预期值 $\varphi = \frac{6\pi GM_{\odot}}{C^2 a(1 - e^2)}$ / 圈,相当于 $43''03$ / 百年。从实际观测值中扣去普遍进动和其它行星(主要是金星)的摄动影响后,同理论值的偏差约 1%。近年来,行星的雷达测距资料更精确地肯定了这个结果。这看来是足够令人满意的。但迪克认为上述计算没有考虑太阳扁率的影响,他和同事们设计了一套装置来测量太阳扁率,给出的 $J = (2.7 \pm 0.5) \times 10^{-5}$,这可能使水星近日点产生 $4''$ / 百年的附加进动,他认为这对他的标量-张量引力理论更有利。不过,由于用光学方法测量太阳的扁率十分困难,而且是否就代表质量四极矩也不一定。将来发射离太阳 0.2 天文单位的飞船可望提高精度一个数量级,使局势明朗化。

除了采用新技术使上述的老实验精度进一步提高以外,人们还正在准备进行一些新型的引力实验,例如引力波的探讨,观测绕地轨道上的超导陀螺自旋轴的进动,月球激光测距,地球陆潮和自转率的年变化,以及白矮星稳定性和脉动的研究等等。

总之,六十年代的新发现和新技术,使在七十年代系统地、高精度地检验引力理论成为可能,这些检验将在各色各样的引力理论中决定取舍,使我们能用更可靠的引力理论(也许是广义相对论,也许是别的理论)武装起来,更深刻地去认识天体演化的规律。

恒星演化同引力理论的关系^[8]

天体物质的运动有两种互相矛盾着的倾向,一是在万有引力作用下的向心倾向,一是由热运动、辐射压及其它非热斥力(如转动、简并态费米气体的压强等)产生的离心倾向。这两种倾向的矛盾和斗争,贯穿于天体诞生、发展和消亡的整个演化历程。一般认为,恒星是由极稀薄

的气体尘埃云(主要成分是氢),在引力的作用下凝聚而产生的。在收缩阶段中,恒星的光度是引力势能释放的直接结果。由于温度低,几乎没有核能释放,这个阶段对于大质量恒星只有几十万年,对于太阳约四千万年。

随着恒星进一步收缩,内部温度不断升高,开始了氢转变为氦的聚合反应,恒星进入赫-罗图上的主星序。在这个阶段,引力和排斥势均力敌,恒星处于相对平衡状态。这个阶段约持续一百亿年(依质量大小而长短不同)。利用牛顿力学、热力学、核物理学的理论算出了恒星的光度、半径、光谱和演化,得到的结果同观测大体上是符合的。

随着温度进一步升高,氢燃烧开始,各种不稳定性发生了,天体失去相对平衡,转变为脉动或爆发。脉动变星、超新星等就属于这种情形。这一段演化过程还了解得不够充分,但不管怎样,演化的总方向是朝着核燃料的耗尽发展,其结局同剩余质量的大小有关。质量较小的恒星最后演化为白矮星,质量较大的恒星经过超新星爆发演化为中子星或黑洞。

随着恒星的收缩,密度(因而引力势)愈来愈高,广义相对论效应将愈来愈显著。因此,这个阶段又称为恒星演化的相对论性阶段。用广义相对论来代替牛顿引力理论得到的流体静平衡方程组为

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{G(\rho + P/C^2)(m + 4\pi r^3 P/C^2)}{r^2(1 - 2Gm/rC^2)} \quad (1)$$

$$dm = 4\pi r^2 \rho dr \quad (2)$$

$$P = P(\rho) \quad (3)$$

其中, P 为压强, ρ 为物质密度, $m = m(r)$ 为半径 r 的球内的质量。

不难看出,方程(1)是牛顿理论中流体静平衡方程 $\frac{dP}{dr} = - \frac{G\rho m}{r^2}$ 的推广,这意味着在密度很高时,压强本身也成为引力的一个重要来源,本来是离心倾向的因素部分转化过来加强了向心倾向。

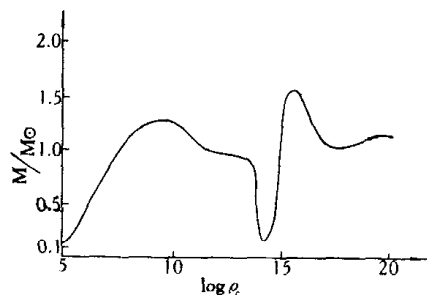


图1 平衡态冷星的质量作为中心密度的函数

给定一个恒星模型(例如假设它由零温理想费米气体组成),可以首先确定其物态方程(3),然后从不同初条件(中心密度 ρ_c)出发,对方程组(1)–(3)作数值积分,将得到的结果作成 $M - \log \rho_c$ 图。

从图上可以看到,平衡态冷星的质量 M 有两个极大值:一个约为 $1.2M_\odot$ ($M_\odot$ 为太阳质量),称为张德拉塞卡极限,所对应的中心密度约为 10^9 克/厘米³,半径约几千公里。与引力抗衡的,是简并态电子气体的压强。质量小于这个极限的恒星最后可以处于这种平衡态。理论的这个预言已为大量白矮星的观测结果所证实。

另一个极大值为 $2M_\odot$ 。(依不同的星体模型和各种物态方程可在 0.7 至 $3M_\odot$ 间变化),称奥本海默极限,所对应的中心密度同原子核密度同数量级,在这样高的密度下,原子核外的电子被“挤”入核内同质子诱发逆 β 衰变,生成中子(在更高的密度下,还可能产生各种超子)。中子简并气体的压强可以与引力抗衡。质量小于这个极限的恒星可以最后处于这种平衡态,称中子星,它的半径只有十几公里。1967年以来发现的近一百个脉冲星以及最近发现的X射线脉冲星如武仙座 X-1,差不多已公认为就是高速自转着的中子星。

如果剩余质量超过奥本海默极限,在目前物理学的范围内,再也找不到能与引力抗衡的力

量,也就是说,恒星将永远不可能处于平衡态(严格地说,这对广义相对论才是对的. 对于布朗斯迪克的引力理论,仍用同样的物态方程,就不存在奥本海默极限*,也不会无限坍缩). 一般认为,它将无限地收缩下去,这就是“引力坍缩”. 最近,谷超豪^[9]就压强等于零,密度为单调不减函数的坍缩过程进行了讨论.

按照广义相对论,从坍缩着的天体表面发出的光,在自引力场的作用下将发生偏折和红移两种效应,如果发射线同径向的夹角大于某一临界角度,则光线将重新折回恒星,随着坍缩的继续,这个临界角愈来愈小. 当达到史瓦西半径 $(r_g = \frac{2Gm}{C^2})$ 时,临界角将缩为零. 同时,由于红移趋于无限大,即使沿径向发出的光也永远不会到达遥远观测者眼里,留下来的,便是一个看不见的“黑洞”.

“黑洞”现象并不是广义相对论特有的结果,说来新奇,其实是古已有之的. 早在 1798 年,拉普拉斯就根据牛顿理论预言说“最亮的天体是看不见的”. 他的论据是: 光线不能逃出其表面脱离速度大于光速的重天体,就象地面上发射的速度小于 11.2 公里/秒的东西不可能脱离地球一样. 有趣的是,牛顿理论中表达这种现象的条件 $v = \sqrt{\frac{2Gm}{r}} = C$ 即 $r = \frac{2Gm}{C^2}$, 竟与广义相对论所预期的完全相同. 一般说来,只要一个引力理论允许光线受引力场偏折,这种现象就会出现.

如上所述,当一个星体成为黑洞之后,外面的观察者是看不见它了. 但它本身会遭到什么命运呢? 按广义相对论描绘的图景,站在星体表面同它一起收缩的观察者将会发现,在一段有限的时间里,它将被挤压到无限高的密度,落到中心的时空奇点,就是它最后的归宿.

有一个时期,人们认为这种不可思议的情形是假设了精确的球对称条件的结果. 在现实的情况下,存在于初始状态中的任何不对称性,可能随着星体的收缩而变得突出起来,以至星体的各部分彼此错开,甚至从黑洞里再跑出去. 然而,彭诺斯^[10]等人证明,在广义相对论的框架里,这种情况是决不会发生的,一旦物体成为黑洞,某种形式的奇态就不可避免.

1963 年,克尔^[11]找到了代表一个转动天体外场的广义相对论非球对称精确解. 这个解有两个参数 m 和 a : m 代表质量, ma 代表角动量. 有两个特征面,一个是“无限红移面”,一个是“事件地平”(它象一个单向阀一样只准进不准出). 当 $a = 0$ 时,就退化为史瓦西解,两个面重合为一. 换句话说,即使有转动,黑洞还是可能存在的. 华金^[12]等人甚至证明: 任何稳定的黑洞必定是克尔解. 由此可见,为了避免奇点的出现,只有从突破广义相对论现有的体系(或者考虑引力场量子化,或者考虑自旋产生的挠率等等)去寻找出路.

鉴于天文观察发现宇宙中发生着猛烈的能量释放过程(如: 类星体、星系核爆炸、引力波等). 不少研究者设想了储藏在黑洞中的质能在某种条件下释放到外界的可能性. 比较可能的是两个黑洞的联合. 对于非转动黑洞,定义其表面积 $S = 4\pi r_g^2 = 16\pi G^2 M^2 / C^4$, 由于“事件地平”的单向阀性质,黑洞的质量 M (因而其表面积 S) 是不会减少的——这就是所谓“面积增加定理”. 如果两个质量为 M 的黑洞碰到一起,合成一个质量为 M' 的黑洞,按上述定理有:

$$\frac{16\pi G^2 M^2}{C^4} + \frac{16\pi G^2 M^2}{C^4} \leq \frac{16\pi G^2 M'^2}{C^4},$$

即 $M' \geq \sqrt{2} M$. 末质量 M' 和初质量 $2M$ 之差代表系统在结合之中损失的静质量,即通过引

* 见 Сакиян, Равновесные конфигурации выраженных газовых масс.

力波或其它形式带走的能量小于 $(2 - \sqrt{2})MC^2$, 这相当于原来静能量 $2MC^2$ 的 29%, 当 $a \neq 0$ 时, 这个上限还可提高到 50%. 不过, 究竟放出多少能量, 以何种方式放出还搞不清楚.

最后谈一谈黑洞的探测问题. 在广义相对论预言的恒星演化三归宿中, 只有黑洞直到今天还没有发现. 不断有人提出某些双星系统中不可见子星的质量如果大于奥本海默极限, 就可能是黑洞. 近来呼声较高的是天鹅座 X-1, 已发现它就是周期为 5.6 天的单线分光双星 HDE226868, 估计其主星的质量为 $30M_{\odot}$, 不可见伴星的质量大于 $10M_{\odot}$, 因而可能是一个黑洞, 而 X 射线可解释为主星的物质被黑洞吸积时产生的. 当然, 这还只是一种猜测, 不能作为定论.

最近, 方励之^[13]等提出观测单线分光双星的谱线轮廓, 可能是一种证明黑洞存在的有效方法.

结 语

天文学的历史告诉我们, 宇宙是无限的, 但个别天体和天体系统却是有限的, 都有自己发生、发展和消亡的过程, 一个过程结束了, 又会出现新的矛盾, 永远不会到达所谓“无差别的境界”. 就吸引和排斥这对矛盾而言, 我们应当认真研究每一方的特点及其相互关系, 摆在我们面前的任务是很多的:

1. 引力相互作用的实验研究, 特别是引力波的探测;

2. 对现有的各种引力理论进行分析比较, 探索新的引力理论. 最近物理研究所理论组的同志提出了引力规范理论的一种方案, 得到了一些有趣的初步结果^[14-16], 它的进一步发展是值得注意的;

3. 将引力理论的研究同天文学, 特别是天体演化晚期的现象密切结合起来. 对于目前比较活跃的黑洞问题, 一方面, 可以在广义相对论的范围内继续研究, 进一步探索其存在与观测的可能性, 另一方面可试用新的引力理论来重新考虑这个问题.

1973 年是伟大的波兰天文学家哥白尼诞生五百周年. 哥白尼提出的日心说为近代自然科学的革命奠定了基础, 也是人类认识引力规律的直接序幕. 历史在发展, 时代在前进, 只要我们自觉地用唯物辩证法的宇宙观作指导, 坚持走实践—理论—实践的道路, 我们对引力规律和天体演化的认识一定会产生一个新的飞跃.

参 考 文 献

- [1] Zeneck, J., *Enzyklopädie der Mathematischen Wissenschaften*, Band V (1903—1921), 1, 26.
- [2] Whitrow, G. T., *Nature*, **188** (1960), 790.
- [3] Brans, C. and Dicke, R. H., *Phys. Rev.*, **124** (1961), 925.
- [4] Sciama, D. W., in *Recent Developments in General Relativity* (1962), 415.
- [5] Oppenheimer, J. R., *Phys. Rev.*, **56** (1939), 455.
- [6] Weber, J., *Phys. Rev. Lett.*, **22** (1969), 1320.
- [7] Shapiro, I., *GRG*, **3** (1972), No. 2, 135.
- [8] Zeldovich, Ya. B. and Novikov, I. D., *Relativistic Astrophysics* **1** (1971).
- [9] 谷超豪, 复旦大学学报, 自然科学版 (1973), 3, 72.
- [10] Penrose, R. and Hawking, S., *Proc. Roy. Soc. London, A* **314** (1970), 529.
- [11] Kerr, R. P., *Phys. Rev. Lett.* **11** (1963), 237.
- [12] Hawking, S. W., *Comm. Math. Phys.*, **25** (1972), 152.
- [13] 方励之、张家鋈、区 智, 中国科学技术大学学报, **3** (1973), 1, 45.
- [14] 郭汉英、吴泳时、张元仲, 科学通报, **18** (1973), 2, 72.
- [15] 吴泳时、邹振隆、陈 时, 科学通报, **18** (1973), 3, 119.
- [16] 张元仲、郭汉英, 科学通报, **18** (1973), 3, 122.