



# 引力无穷的神秘黑洞

苏景顺

(河北建筑工程学院基础部 张家口 075000)

“黑洞”是20世纪最具神奇色彩的术语之一。形象而又多少带有恐怖色彩的字眼使人联想到了将要吞噬一切的巨兽之口。虽然黑洞最初仅仅是一种纯理论推理演绎的数学模型,但随着在宇宙观测中逐步得到证实,使人不得不承认黑洞的真实性。无论人类对黑洞的研究探索最终发展到何种地步,但至今为止,黑洞研究已极大地丰富了20世纪物理学内容。

经典的“黑洞”概念源于1783年,最初是英国的约翰·米歇尔(J. Michell)按照牛顿力学定律导出的一种极限模型。按照牛顿的力学理论,物体摆脱地球引力的第二宇宙速度为:

$$V = (2GM/r)^{1/2}$$

从该公式可以得出,若 $M/r$ 足够大,以至使得 $V$ 接近光速 $c$ 时,那么,任何物体都不可能逃逸。即使是光也不能例外。这就是说,密度足够大的恒星将会产生足够强的引力,以至从恒星表面发出的光线也不能逃逸。这一概念1796年法国数学、天文学家拉普拉斯也曾经独立地提出过。

然而,经典的“黑洞”概念有着不能自恰之处。按照经典力学理论,在引力作用下恒星的半径由 $r_1$ 收缩为 $r_2$ 过程中所释放的能量为 $\Delta E$ :

$$\Delta E = GM^2(1/r_2 - 1/r_1)$$

当 $r_2 \rightarrow 0$ 时, $\Delta E \rightarrow \infty$ ,这显然是不合实际的。因为 $\Delta E$ 必须是一个有限值,它不可能大于 $Mc^2$ 。而且,如果按照经典的“光的微粒说”,将光视为类似于子弹的粒子,自然无法解释光以不变的速度 $c$ 单向运动。如果按照经典的“光的波动说”,光波应不受引力的影响。所以,经典的“黑洞”概念与现代“黑洞”概念有着本质的区别。

20世纪的黑洞理论源于1915年爱因斯坦建立的广义相对论。广义相对论在研究引力对光作用的基础上所建立的引力场方程描述了引力场的完整时空结构。从广义相对论引力场方程的特解可以得出这种完整时空结构的特殊区域,落入该区域的任何物质都将被之所吞噬,这种特殊的时空区域即称之为“黑洞”。下面,我们就来回顾一下20世纪有关黑洞的研究成果,以及由此带给我们的新思想、新观念。

## 1. 无法抗拒的引力——黑洞成因

我们知道,早期的恒星是通过自身的热核反应产生的热能以抵御强大的引力作用维持平衡的。热核反应导致粒子剧烈的热运动,从而产生压力抵抗引力阻止坍缩。但在恒星生命周期的末期,最终它将耗尽核燃料而逐渐冷却并开始收缩。对于质量较小的恒星,这种收缩持续到一定程度时将终止。因为按照泡利不相容原理,当物质粒子靠得很近时不能具有完全相同的态。即两个相同的自旋为 $1/2$ 的粒子不可能同时具有相同的位置和速度。这将导致粒子在吸引、接近过程中将产生很强的斥力以平衡引力。

然而,按照相对论理论,粒子之间的相对速度是不能大于光速的。这意味着由泡利不相容原理所产生的斥力有上限。物理学家经计算给出了这种斥力所对应的引力质量极限,这种极限约为太阳质量的1.5倍。称之为钱德拉塞卡极限。美籍印度物理学家钱德拉塞卡由于准确预言已坍缩的白矮星的结构和变化,以及对黑洞研究的贡献,获得了1983年诺贝尔物理学奖。

对于质量小于钱德拉塞卡极限的恒星,收缩引

的事物的种类就越多,它的应用范围就越广,它给人们印象就越深刻,这个理论也就越美。

综上所述,物理学简单性始终贯穿于整个物理学发展史中,成为物理学科学美不可或缺的重要组

成部分,其重要意义在于能以最简洁的形式最大限度地表述物理学的普遍规律,同时,也是物理学科学美的重要审美标准之一,其表现形式则是灵活的、多种多样的。

起电子简并,这时电子之间由泡利原理所产生的斥力如果能够平衡导致收缩的引力,这时收缩将被遏制,从而维持半径不变。这就是我们常提到的所谓“白矮星”。即白矮星是以电子简并所产生的斥力抵御强大引力的。对于密度较“白矮星”更大的恒星,以电子之间泡利原理产生的斥力已不能抵御收缩引力,原子在巨大压力的作用下将使电子与质子结合成中子,这将引起所谓的“超新星爆发”。在超新星爆发时将以辐射的方式释放大量的结合能,最终或许再次成为密度较小的白矮星。但更有可能成为中子化的核心。这就是我们常提到的所谓“中子星”。中子星是中子紧缩由泡利原理产生的斥力抵御收缩引力,从而维持半径不变的。

对于质量大于钱德拉塞卡极限的恒星,无论是电子间斥力,还是质子、中子间的斥力,都将无法抗拒强大的收缩引力。强大的收缩引力最终将引起引力坍缩。按照广义相对论理论,强引力场会使光线发生弯曲并引起光谱红移现象。观测者所观测到的光谱频率  $\nu'$  与光源发出频率  $\nu$  的关系是:

$$\nu' = \nu(1 - 2GM/rc^2)^{1/2}$$

对应的能量关系是:

$$E' = E(1 - 2GM/rc^2)^{1/2}$$

这说明观测者所观测到的频率与能量都小于光源发出的实际频率与能量。如果强大的引力导致恒星收缩,直到恒星收缩到某一临界半径  $r_0$  时,  $r_0 = 2GM/c^2$ , ( $G$  是引力常数,  $M$  是恒星质量,  $c$  是光速)

$E' = 0$ , 这意味着辐射将完全被吸入其内而无法逃逸。同时,波长变得越来越长,观测者将无法观测到光线的发出。于是,恒星坍缩成“黑洞”。黑洞的边界称之为“视界”。任何物质、任何辐射一旦进入“视界”都不能再逃逸。

## 2. 并不复杂的结构——黑洞种类与性质

黑洞虽然神秘,但黑洞的结构、种类、性质却并不复杂。因为无论什么形态的物质一旦进入黑洞的视界都将转化为黑洞的质能。而最终的黑洞仅需要质量、角动量、电荷量、视界半径等几个有限的物理量即可描述。

1915年12月,德国人施瓦西对爱因斯坦引力场方程给出了一种特解。该解所描述的是质量呈球对称分布的强引力场,这就是所谓的“施瓦西黑洞”。施瓦西黑洞不旋转,没有角动量,也不带电荷。视界半径  $r$  是施瓦西度规的奇点。视界半径  $r$  与区域内

质量  $M$  的关系是:

$$r = 2GM/c^2$$

继“施瓦西黑洞”提出之后不久,莱斯纳(Reissner)和诺斯特隆(Nordstrom)对广义相对论场方程给出了另一种特解。该特解所描述的也是质量呈球对称分布的强引力场。它不旋转,没有角动量,但带有电荷。这种黑洞称之为“莱斯纳黑洞”。

1962年,新西兰物理学家罗伊·克尔(L. Kell)对爱因斯坦引力场方程给出了另一族精确解。该解所描述的是质量呈轴对称分布的强引力场。它旋转,具有角动量,但不带电荷。这种旋转黑洞的大小与形状依赖于其质量和旋转速度,它的旋转是由于形成黑洞以前的恒星的旋转造成的。这种黑洞称之为“克尔黑洞”。克尔黑洞的视界半径为:

$$r_k = (GM + \sqrt{G^2M^2 - L^2}) / c^2$$

此后,特别是进入70年代,英国理论物理学家斯蒂芬·霍金等人先后证明,存在既有角动量、也带有电荷的黑洞。而且,稳定黑洞的引力源质量  $M$  一定是轴对称分布的。

在描述黑洞的形状与旋转状态时,常用自转参数  $a$ ,

$a = cJ/Gm^2$ , ( $J$ : 黑洞的角动量;  $G$ : 引力常数;  $c$ : 光速;  $m$ : 黑洞质量。)

自转参数  $a$  在 0—1 之间取值。若  $a$  等于零,黑洞是球形的,没有自转。若  $a$  接近 1,黑洞呈扁平的,高速旋转。

黑洞的性质也较为简单,下面的定理概括了其性质。

### (1) 黑洞的“无毛定理”

按照黑洞的研究理论,黑洞是一个单向膜。无论什么物质只能进入而不能复出。坍塌的最终结果都是一样的。原子内的电子被质子俘获成为相同的中子。所有进入视界的物质只是改变了黑洞的质量。最终的黑洞只需要质量、角动量和电荷这三个参量就可以完全确定其时空结构。这一结论称之为黑洞的“无毛定理”。它是由惠勒(Wheeler)最先提出,经霍金等人证明的。黑洞的“无毛定理”的意义在于告诉人们,黑洞与引力坍缩成黑洞前的物体种类无关,也与物体的形状无关。引力坍缩丢失了几乎全部的信息。有了“无毛定理”,黑洞的类型大大简化了。任何有关黑洞形成之前的大量复杂信息都不可能在黑洞形成之后而获知,我们能够得到的只是最终形成黑洞的质量、旋转速度、电荷量。

现代物理知识

## (2) 黑洞的“面积不减定理”

黑洞的边界称之为“视界”。它是由恰不能从黑洞逃逸的光线在时间—空间的轨迹所形成的。“黑洞边界所决定的视界面积是不会减小的”。这一结论被称之为黑洞理论中的“面积不减定理”。即随着物质或辐射掉进黑洞,视界面积将不断增大。如果两个黑洞相撞合二为一,最终形成的黑洞的视界面积将大于原先两个黑洞视界面积之和。“面积不减定理”说明热力学第二定律在黑洞研究中也是正确的。当辐射、物质掉进黑洞,或黑洞相撞形成新的黑洞,自然会增加黑洞的无序程度,即增加黑洞的熵。视界的面积正是黑洞熵的量度。熵总是不减的,因此视界面积不会减小。

## 3. 茫茫太空的寻觅—发现黑洞

黑洞作为一种理论推测,最终须得到观测结果的验证。1967年科学家首次发现了脉冲星。1968年科学家证明:脉冲星的实质是向空间发出辐射束的旋转中子星。中子星的存在证明黑洞是真实的,从而坚定了人们探寻黑洞的决心。

按黑洞的定义,它不能发出任何辐射。那么,我们又将如何发现它呢?黑洞最大的特征是有强大的引力,这种引力自然会对周围星体的运动产生作用。人们正是通过黑洞的引力作用去探索、发现黑洞的。目前,人们探索、发现黑洞主要有两种方法。

一种是通过黑洞对其伴星所产生的引力效应发现黑洞。在宇宙中有许多双星系统,构成双星系统的两颗恒星凭借彼此之间的引力而互相围绕着运动。其中一颗可以通过观察发现,而另一颗虽不能直接观察发现,但可从已发现的恒星的运动规律得以证实。如果已发现的恒星存在观测不到的伴星,这颗伴星极有可能就是黑洞。有些恒星的伴星不止一个,这说明在它周围可能存在多个黑洞。例如,目前已经得到普遍认同的天鹅 X-1中心黑洞正是应用这一原理得以发现的。1971年,美国通过天文卫星在距离我们大约 8000 光年的天鹅座区域发现存在强大的 X 射线脉冲源,经证实,这是质量约为 6 倍太阳质量、半径约为 20 千米的黑洞。

发现黑洞的另一种方法是利用“微透镜探测技术”寻找黑洞。按照广义相对论,大质量星体会引起周围恒星光线的弯曲。这种作用类似于光学中透镜的作用。光线弯曲的程度与大质量星体的质量相关。通常这种弯曲程度是很有限的。因此大质量星体被称之为“引力微透镜”。由于引力微透镜的作

用,当我们用太空望远镜观测恒星时,会发现恒星的影像会变亮。这也就是说,当我们观察到某颗恒星在望远镜中的影像变亮时,极有可能是有大质量星体在它附近运动对它产生了影响。这种用其他方法观察不到的大质量星体极有可能就是黑洞。例如,1998年澳大利亚科学家在堪培拉用直径为 0.9m 和 1.9m 的天文望远镜发现了银河系中心区域一颗恒星的亮度增加并持续了一定的时间。经分析,认为这是由于一个约为 6 倍太阳质量的孤立黑洞从该恒星附近经过引起的。最新的报道表明,美国科学家利用哈勃望远镜和“微透镜探测技术”也在银河系发现了孤立黑洞。

## 4. 能够辐射的黑洞——黑洞的新观念

自黑洞理论诞生以来,人们关于黑洞所形成的观念始终是黑洞只能吸收任何辐射而不能发出辐射。然而,关于黑洞的这种认识观念在 1974 年被霍金的创新性理论打破了。

1974年,霍金将量子理论应用于黑洞的研究,指出如果宇宙发生大爆炸的最初是一种混沌状态,应当产生大量的小型黑洞。霍金证明,并非所有的黑洞都不能发出辐射,这种质量小于  $10^{13}\text{kg}$  的小型黑洞将按照量子力学的规律发出辐射。这种辐射被称之为“霍金辐射”。量子理论在“霍金辐射”中起着决定性作用。

霍金辐射的理论依据是狄拉克的“真空量子理论”。按照狄拉克的“真空量子理论”,所谓“真空”是充满了“虚”的正反粒子对。因为场不可能严格为零,否则与不确定原理是不相容的。既然在真空中随处存在互为反粒子的虚粒子对,那么在黑洞表面附近也应如此。即在黑洞附近存在由宇宙真空产生的正、反粒子对,分别带有正能量和负能量。这些正、反粒子对有些会相遇湮灭,而那些没有相遇的正、反粒子中的一些负能态粒子被吸入黑洞,一些正能态粒子则逸出黑洞。对于观测者来说,这些逃逸的粒子如同由黑洞发出的辐射一样。这就是所谓的“霍金辐射”。

负能态粒子进入黑洞将引起恒星质量减少以及黑洞总的正能减少。而恒星质量的减少又进一步导致黑洞温度的升高和辐射率的增加,从而使黑洞质量减少得更快。如果进入黑洞的负能态粒子足够多,将会引发剧烈的蒸发或爆炸。由于“霍金辐射”引起黑洞物质的消耗,这样的黑洞最终将蒸发殆尽。

“霍金辐射”只在质量较小的黑洞可能发生。霍

金曾预言：在宇宙初期形成的太初黑洞是这种“霍金辐射”的例子。一些太初黑洞由于辐射已经蒸发殆尽。另一些与宇宙年龄相当的太初黑洞正在蒸发。而质量更大的一些太初黑洞则仍在辐射 $\gamma$ 射线与X射线。虽然霍金预言的这种太初黑洞至今尚未找到，但科学家们普遍认为广义相对论与量子力学理论是正确的，由此导出的“霍金辐射”是成立的。

霍金辐射使我们进一步看到了量子力学与经典力学的区别。霍金辐射在经典力学中是不可能的事情，但在量子力学中却是允许的。这很有点类似于“势垒贯穿”效应。由于黑洞周围“壁垒的厚度”正比于黑洞的大小，这正是质量较小的黑洞容易观察到霍金辐射的原因。对于大质量黑洞，“霍金辐射”是很微弱的，所引起的蒸发过程也是极为缓慢的。

在经典力学中，粒子的位置与动量可以同时确定。但在量子力学中，粒子的位置与动量却不能同时确定。然而，在黑洞辐射中，粒子的位置、动量均不能确定。黑洞辐射不仅经典力学的因果律不成立，而且量子力学的统计律也动摇了。

### 5. 神奇的魅力——黑洞研究的意义

如前所述，黑洞最初作为一种纯数学的理论模型，在没有任何实验依据的情况下却在理论上发展到了几乎神乎其神的地步，这在科学史上是极为罕见的。黑洞对于物理学家具有如此神奇的魅力，这不仅是因为它与宇宙的起源及未来有着密切的关系，而且是因为它是关系到物理学基本理论未来发展的重要问题。

自然界从来就没有永恒的事物，黑洞也是如此。从恒星坍缩成黑洞，到最终以大爆炸的方式消亡再产生新的物质，黑洞在不断地演化着。按照黑洞理论，

## 三只眼睛的卡尔·萨根

“在过了一段短暂的定居生活后，我们又在恢复古代的游牧生活方式。我们遥远的后代们，安全地布列在太阳系或更远的许多世界上……”

“他们将抬头凝视，在他们的天空中竭力寻找那个蓝色的光点。”“他们会感到惊奇。这个贮藏我们全部精力的地方曾经是何等容易受伤害，我们的婴儿时代是多么危险……我们要跨越多少条河流，才能找到我们要走的道路。”

这是萨根著的《暗淡蓝点》书末的两段话。

黑洞消亡时产生大爆炸的剧烈程度与自然界的的基本粒子数目有关。如果所有物质都是由6种夸克组成的话，据科学家推测，黑洞最终爆炸的能量相当于千万年氢弹爆炸释放的能量。如果我们能够观测到黑洞的爆炸，即使是间接地通过观测爆炸产生的高能 $\gamma$ 射线，也将对基本粒子物理学产生最直接的影响。

黑洞以大爆炸的方式消亡，这使人们再次联想到了宇宙的大爆炸理论。1965年英国物理学家罗杰·彭罗斯(R. Penroso)指出：大质量恒星在自身引力下不断塌缩，最终将会出现体积趋于零，密度无限大的状态。这种状态被称之为“奇点”。对于奇点，所有的物理学定律已不成立。然而，奇点却很可能是创造新物质、新宇宙的起点，我们的宇宙或许就起源于奇点。研究黑洞消亡发生爆炸时如何产生粒子与研究宇宙大爆炸最初如何产生粒子，似乎有着异曲同工之处。这意味着研究黑洞演化与研究宇宙演化存在着一种必然联系。

黑洞是一种特殊的时空区域，它打破了物理学中诸多的守恒定律。如粒子物理学中奇异数、重子数、轻子数以及诸多量子数守恒法则都已被黑洞的无毛定理排斥了。特别是黑洞视界内的奇点，所有的物理学定律已完全失效，这更加增添了黑洞的神秘色彩。

纵观20世纪物理学对于黑洞的研究，虽然存在着许多推测性的东西，但这些推测是以量子力学和广义相对性理论为理论依据的。这些推测最终能否得到证实，它将关系到物理学基本理论的未来发展。研究黑洞是人类向自然科学极限发起的一项挑战。无论如何，由此取得的任何进展都将从根本上改变人类对宇宙、对自然的认识观念。

萨根——以及智慧、悟性及志向与之相匹的科学家们，似乎已经找到了这样一条漫漫而修远的通天之路，一条人类文明的未来之路。这不由得令人联想起斯蒂芬·茨威格对罗曼·曼兰的评论：“他的目光总是注视着远方，盯着无形的未来。”

卡尔·萨根正是这样的人，因此，人们自然而然地对他充满着崇敬之情。美国的《每日新闻》曾作评论：“萨根是天文学家，他有三只眼睛。一只眼睛探索星空，一只眼睛探索历史，第三只眼睛，也就是他的思维，探索现实社会……。”诚哉斯言，人类文明的进步需要更多像萨根那样的有三只眼睛的科学家！

(摘编自2001年3月9日《科技日报》卞毓麟的同名文章)

现代物理知识