

# 黑洞及其视界附近的物理规律

刘晓军

## 人类对黑洞的认识过程

在 1796 年,法国天文学家拉普拉斯在他的著作 5 宇宙体系论 6 中就预言:如果它引力足够强,光速也不足以成为逃逸速度的话,我们可能会看不见它。宇宙中最大的天体可能是完全看不见的,这种观点是建立在牛顿引力理论基础上的,当时没有任何办法能够验证他的想法。直到 100 年后,爱因斯坦发表了广义相对论,它在基本概念上与牛顿引力理论完全不同。在广义相对论中,空间和时间构成了一个四维时空,时空的几何性质与物质,通过爱因斯坦引力方程联系起来,物质是引力的源,也决定了时空的弯曲。

广义相对论发表后不久,德国天文学家史瓦西立即对球对称的情况求出了爱因斯坦引力方程的解。按照这个解,质量为  $M$  的不旋转的球形天体存在一个临界半径  $R_g$ , 半径内外时空性质迥然不同,而  $R_g$  定义为引力半径或史瓦西半径。同以前的拉普拉斯一样,他也不知道这种天体是否真地存在。这个问题直到 1939 年才得到证明,当时奥本海默和一个学生共同证明:一颗冷却的、质量非常大的恒星,理论上必然要无限坍缩而变成黑洞,即黑洞可能是真实的天体。

## 黑洞的形成

目前认为黑洞是质量达太阳数十倍的巨型星球在其生涯的最后一刻发生大爆炸后形成的。在恒星内部的高温高压条件下,原子核进行着强烈的聚变反应,这种热核反应释放出来的核能与聚向中心的引力相抗衡,使恒星维持着稳定的状态,同时向外界辐射出巨大的光能和热能,时间长达几十亿、几百亿年。但稳定的热核反应不可能永远持续,当热核反应不能稳定进行时,恒星就走向毁灭。

衰老的恒星如何演变,取决于剩下的星核的质量。其中,小质量和中等质量星核的恒星将成为白矮星;而当剩下的星核的质量达到太阳质量的 114

倍时,其引力足以把星核内的原子压缩到使电子和质子结合成中子的程度,此时星核就成了一颗中子星;而当星核质量超过太阳质量的 2~3 倍时,再不会有任意力能够与引力抗衡,星体将不可避免地一直坍缩下去))) 理论上,最后成为体积为零、密度无穷大的点。

需要说明的是,以上黑洞的形成过程目前还只是天体物理理论的一种推测。

史瓦西半径 任何天体都存在一个临界半径,即史瓦西半径  $R_g$ 。在  $R_g$  的里面,时空弯曲得非常厉害,以致光都不能逃逸出来。按照狭义相对论:光速是任何物体可能达到的最大速度,因此也就没有任何别的物体能从史瓦西半径以内的区域逃出。史瓦西半径的数学表达式为

$$R_g = 2GM/c^2 \quad (1)$$

其中  $c$  为光速,  $G$  为牛顿万有引力常数,  $M$  为质量。从这个数学表达式,我们可以看到史瓦西几何所具有的普遍性,因为它与恒星的类型无关,而只依赖一个参数))) 质量。因此按照公式(1)可以计算任何一个球形天体的史瓦西半径的大小,比如太阳。像太阳这样质量的恒星,带入公式后算出史瓦西半径大约为 2195 千米,即如果太阳被压缩进直径 519 千米的球内时,它将成为黑洞。而地球若成为黑洞,则地球上的一切物质,包括大气、海洋、山脉、河流和一切生物,要全部压缩到直径为 1 厘米的小球内。

视界 视界是黑洞的边界,是黑洞表面距离中心半径为  $R_g$  的一个球面。因此它的半径依赖于黑洞的质量。视界是时空的分界,它将所有事件分为两类。在视界以外,可以由光信号在任意距离上相互联系,这就是我们所居住的正常宇宙;而在视界以内,光线并不能自由地从一个物体传播到另一个物理,而是朝向中心集聚。而且进入视界的外来辐射也将继续进入黑洞,而不可能被反射出去。

奇点 用视界包围的质量和体积计算的平均密

列车。这种列车目前我国还处于试验运行阶段。

为使列车快速通过弯道,工程技术人员遵循力学规律,做出了许多努力。力学知识对工程技术的

发展起着重要的作用,在飞速发展的科技新时代,力学更有着广阔的用武之地。

(河南郑州铁路职业技术学院力学教研室 450052)

现代物理知识

度与质量的平方成反比, 因此黑洞的质量越小、平均密度越大。当天体坍缩到越过视界时, 引力仍占压倒性优势, 它将继续向中心坍缩, 天体的所有物质最后聚集在中心的一个点上。体积为零, 质量虽然有限, 但密度却无穷大, 这个点就是奇点。

### 黑洞的简单物理规律

**引力规律** 天体(或天体系统)的引力半径  $R_g$  与它的实际尺度  $R$  之比率  $R_g/R = 2GM/(Rc^2)$ , 标志着该天体(或天体系统)引力场的强弱: 若  $R_g/R \ll 1$ , 则属于弱引力场; 若  $R_g/R \approx 1$ , 则属于强引力场。地球、银河系、太阳、白矮星、中子星和黑洞引力场的数量级依次为  $10^{-81}$ 、 $10^{-6}$ 、 $10^{-514}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-1}$  和 1。由此可见, 大部分天体(或天体系统)的引力场很弱, 时空弯曲很小, 牛顿引力理论完全适用; 但黑洞引起的时空弯曲很大, 必须用广义相对论处理。从以上列举的几个数字就可以理解, 黑洞强大的引力, 没有任何力量可以与之抗衡。

图 1 表示一个球对称恒星引力坍缩的四个阶段, 越来越多的光逐渐被留住。坍缩之前(图 1a), 恒星的体积远大于史瓦西半径所规定的尺度; 按照广义相对论, 它的引力场对光线几乎没有影响, 从恒星表面上某一点发出的光可以朝任何方向沿直线传播。随后, 恒星坍缩(图 1b), 随着其半径趋近于史瓦西半径, 引力阱加深, 时空弯曲程度增大, 光线被迫弯曲, 偏离直线。当恒星半径等于 115 倍史瓦西半径时, 出射的光线会背道而驰, 落回恒星表面, 就像喷泉的水。这些光线组成一个光球, 像茧一样包裹着坍缩中的恒星。远处的观测者只能偶尔看到少数逃逸出来的光子。随着引力坍缩的继续, 能够逃逸的光子越来越少, 光的逃逸锥在不断缩小(图 1c), 当恒星达到临界的史瓦西半径时, 所有光线都被捕获, 即使那些沿径向射出的也不例外。逃逸锥完全关闭, 光球消失, 黑洞也就形成(图 1d)。其表面, 即史瓦西球面, 就是不可见区域的边界, 也就是所谓的视界。

**黑洞无毛定理** 对于物理学家来说, 一个黑洞或一块方糖都是极为复杂的物体, 因为对它们的完整描述, 即包括它们的原子和原子核结构在内的描述, 需要有亿万万个参量。与此相比, 一个研究黑洞外部的物理学家就没有这样的问题。黑洞是一种极其简单的物体, 如果知道了它的质量、角动量和电荷, 也就知道了有关它的一切。

黑洞几乎不保持形成它的物质所具有的任何复杂性质。它对前身物质的形状或成分都没有记忆, 它保持的只是质量、角动量、电荷。消繁归简或许是黑洞最基本的特征。有关黑洞的大多数术语的发明家约克#惠勒, 在 60 年前把这种特征称为“黑洞无毛”。

一开始, 这只是一种猜测, 20 世纪 70 年代得到了严格的数学证明。这是包括默东天文台的布兰登#卡特和澳大利亚的加里#班亭在内的理论物理学家 15 年努力的结果。他们证明, 描述一个平衡态黑洞周围的时空几何只需要 3 个参量, 从而证实了惠勒的表述。

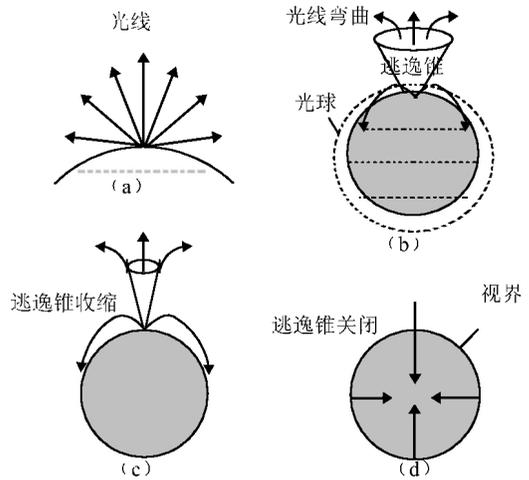


图 1 光被囚禁阶段示意图

黑洞的参量是可以精确测量出来的, 尽管是借助于理想实验。可以把一颗卫星放在围绕黑洞的轨道上, 并测量卫星的轨道周期, 从而得到黑洞的质量。黑洞的角动量可以通过比较朝向视界的不同部分的光线的偏转来测量。

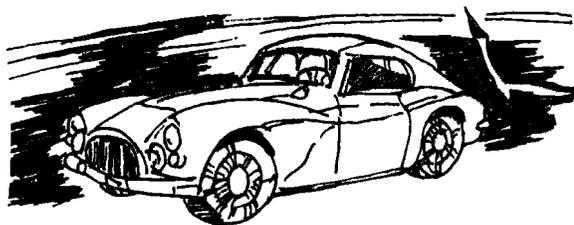
对于上文提到的有一定质量的克尔-纽曼黑洞, 电荷和角动量都有上限, 也就是都受到保证视界这一条件的限制。如果在某个大质量恒星的引力坍缩过程中, 这个限制被违反, 黑洞就成了裸奇点, 并能影响到宇宙中的远距离处。然而, 物理学家有充足的理由相信, 这种情况被自然规律所禁止, 因而不会发生。

既然只由 3 个参量支配, 一个黑洞就像一个基本粒子一样简单。尽管基本粒子也是把质量、角动量、电荷集中在一个很小的体积内。但是, 只要考虑一下视界存在的条件, 就知道没有什么比基本粒子与黑洞的差别更大。以电子为例, 实验已经确定它的 3 个参量, 就相同质量来说, 电子的电荷和角动量

# 传感器技术在汽车上的应用

周 芳

不同用途的传感器装置在汽车的相关部位上,可有效监测车辆各个部位的工作状况。它们能够发现车辆的异常情况,以电信号方式向计算机报告,以便及时



排除车辆故障,确保行车安全。目前传感器在汽车上的应用主要在以下几个方面。

## 一、空气温度传感器(ACT)

空气温度传感器(ACT)感测进入发动机进气歧管的空气温度。这种装置有一个热感电阻的触头,装置在空气滤清器或汽缸进气歧管的进气口。其电阻值随周围空气温度的变化而变化,从而发出不同电流值信号。如果进入发动机的空气温度低(或高)时,空气密度,即重量,会相应变大(或变小),传感器的这个信号将帮助电子计算机控制燃油喷射量,把空气-燃油混合的混合比调控到理想值,从而提高汽缸的燃烧效率,降低油耗。

## 二、氧气量传感器(EGO)

氧气量传感器(EGO)能感测发动机排气中的

氧气含量,又称为排气传感器。它能够指示发动机空气-燃料混合气是否过浓或过稀,是一个很重要的传感器。它牢固地拧装在排气总管或排气管上,触头伸入发动机排气管中。它的触头护套内部有一个二氧化

锌陶瓷制作的特制芯套体,芯体表面镀上白金。这种芯体在一定的高温时,若内、外两表面分别与含氧量不同的气体接触,会产生微小的电压差,构成电压信号源。芯体装在一个金属壳套内,引出两个接线端头与电子计算机电路连接。传感器触头芯体的内外表面分别与汽缸排气和外界大气接触,在温度不高时它是不起作用的。但当达到 $150^{\circ}\text{C}$  ( $300^{\circ}\text{F}$ )时,它就发出微弱的电压信号。若发动机的空气-燃料混合气过浓,将使排气中含有较少的氧气。这时因芯体两侧表面感应的氧气量差别增大,负氧离子(电子)在芯体内流动形成为微弱电流。发出不大于 $1\text{V}$ 的电压。电压信号传送到电子计算机后,计算机就控制燃油喷射器减少喷油量,从而把空气-燃料混合气调整为恰当的混合比。

超过黑洞上限的 $10^{88}$ 。这个令人惊愕的数字甚至超过了可观测的宇宙基本粒子总数,而这正是一个电子和一个克尔-纽曼黑洞之间差异的量度。

**X射线辐射规律** 理论上认为物质掉入黑洞时会有X射线辐射,我们以气体为例讲述一下物质发生辐射的物理过程。当气体围绕黑洞旋转而趋近黑洞时,相对于黑洞会有较大的角动量,还会形成气盘。气盘中的气体会受到挤压,同时相邻气体的粘滞性引起摩擦产生热能。随着气体旋转速度的加快,它们被压缩得也愈加厉害,温度也随之越来越高。这种下降的热涡气流旋的温度和密度最后变得非常高,当它们接近视界时就会发射X射线。

有关黑洞的其他一些物理性质,因涉及量子理论和现代物理学原理,如黑洞的熵、黑洞蒸发等黑洞的量子性质,在这里没有详细介绍。因为黑洞的量子理论似乎导致了物理学中的一个新的不可预测

性层次,它超出了与量子力学有关的通常的不确定性。这是因为黑洞看来具有内在熵,并使信息从我们所在的宇宙区域中失去。应当指出,这些说法是存在争议的:许多研究量子引力的人(包括从粒子物理学进入这一领域的几乎所有人)都本能地反对关于一个系统的量子状态信息可能丢失的概念。量子理论认为黑洞发出辐射并损失质量,最终它们似乎完全消失,带走了内部存储的信息。遗憾的是,与海森伯的不确定性原理不同,黑洞这一额外的层次很难用实验验证。关于黑洞的研究和认识会随着更先进的观测手段和物理理论不断进步,取得新的成果。这个神秘的天体最终会以崭新的面貌呈现于我们面前,那个时候我们对宇宙和自然的认识将取得更多的成果。

(黑龙江齐齐哈尔大学理学院物理系 161006)