

第一章 初窥黑洞

加尔各答黑洞

我们上来先讲一段题外话。

地球上曾有一个叫黑洞的地方，在印度的加尔各答。那里有一座城堡，印度作为英国的殖民地时，它曾是英军的据点。城堡中有一间不到 24 平方米的牢房，只有两个小窗，英军用它来关押喝醉酒的士兵，通常可以关三四个人。他们称这间牢房为“黑洞”。

有一次印度爆发了反抗殖民者的民族起义，起义军围攻这座城堡，展开了一场血战，尸横遍野。4 天后，战斗结束，愤怒的胜利者把 146 个俘虏使劲都塞进了这个“黑洞”，关押了 10 个小时。当时正值最炎热的 6 月，第二天早晨打开“黑洞”的门时，其中 123 人已经死去，只剩下 23 个人还活着。

20 世纪 90 年代在加尔各答开了一次天体物理研讨会，中国科技大学的卢炬甫教授向主办者提出能否参观一下这个“黑洞”。主办方表示抱歉，说这座城堡已经拆掉了。卢教授很惊讶，说怎么会拆掉，如果在我们中国，一定会保存下来作为爱国主义的教育基地。印度朋友说：“哦，你搞错了，当时不是英国人把印度人关到里面，而是印度人把英国俘虏塞到了里面。”

拉普拉斯与米歇尔的“暗星”

今天我们所说的黑洞是相对论预言的天体，然而在 19 世纪末，欧洲的两位学者就曾依据牛顿力学预言过黑洞的存在。不过他们当时没有称其为黑洞，只是讨论过这种质量巨大、发光可能很强，但远方观测者又看不见的暗星。

其中一位学者拉普拉斯(1799 年)曾在他的巨著《天体力学》和科普书《宇宙体系论》中谈到过这种暗星，他在书中写道：

“天空中存在着黑暗的天体，像恒星那样大，或许像恒星那样多。一个具有与地球同样密度，而直径为太阳 250 倍的明亮星体，它发射的光将被它自身的引力拉住，而不能被我们接收。正是由于这个道理，宇宙中最明亮的天体很可能却是看不见的。”

然而最早预言这种暗星的还不是拉普拉斯，而是英国剑桥大学的学监米歇尔。他在 1784 年的一篇论文中谈到，由于恒星发射的光在万有引力作用下光速会越来越慢，如果恒星足够大，大到一定程度，就会使自身发射的光被自身的引力拉回来，于是远方的人就看不见这颗星了。

现在我们先回顾一下牛顿和他的物理理论，然后再来介绍拉普拉斯和米歇尔关于暗星的预言是如何从牛顿理论得出，又如何被否定的。

苹果落地的故事

大家都知道牛顿与苹果落地的故事。这个故事说，牛顿 20 多岁在乡下庄园里生活的时候，有一次坐在苹果树下思考问题，这时突然有一个苹果从树上落下来，使牛顿一下子想出了万有引力定律(图 1-1)。

这个故事非常有趣，只可惜其真实性很值得怀疑。牛顿生前从来没有人听到过这个故事，牛顿一死这个故事就冒出来了。而把这个故事传播到全世界的是法国大文豪伏尔泰。

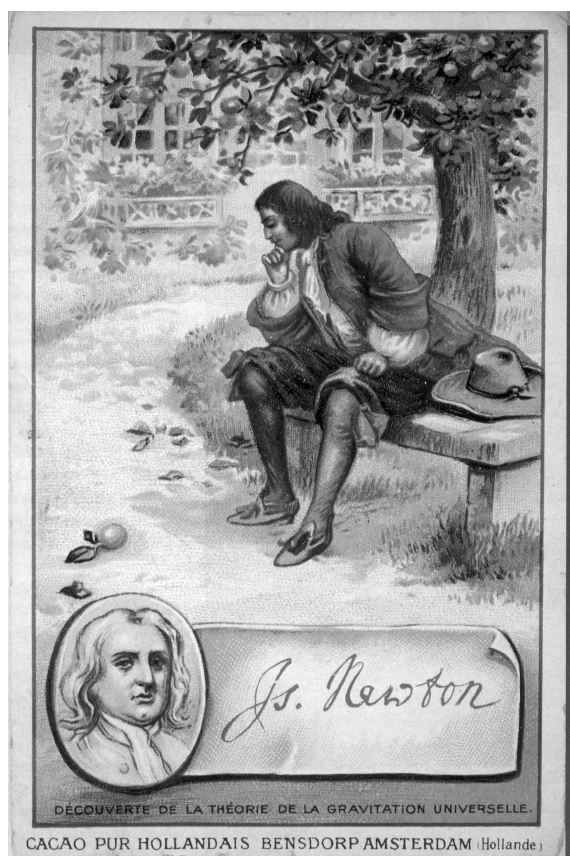


图 1-1 苹果落地的故事

牛顿去世时,恰好伏尔泰被法国当局驱逐出境,流亡在英国。他看到有好几万人给牛顿送葬,深受感动,觉得这个人实在太伟大了,于是去拜访了牛顿的亲属。

牛顿一辈子没有结婚,先是他的妹妹照顾他的生活,妹妹去世后就由他的外甥女照顾他的生活。伏尔泰拜访的就是牛顿的外甥女婿,这位绅士给伏尔泰讲述了苹果落地的故事。才华横溢的伏尔泰把这个故事加以润色演绎写进自己的文章,使它传遍全球。

然而,在此之前外界从未有人听说过这个故事。伏尔泰把它传播开后,有人对其真实性感到怀疑,这时又有几个在牛顿身边生活过的人出来说,他们也听牛顿讲过这个故事。

这么一个重要的使牛顿产生伟大灵感的故事，牛顿在世时居然没有和一位学者谈到过。何况中年以后的牛顿并不是一个谦虚的人，他后半生一直在跟别人争夺各项科研成就的发现权，其中很重要的一部分就是和胡克争夺万有引力定律的发现权。牛顿与外人进行了如此多的争吵，怎么一次也没有在争吵中提及这一故事呢？所以，许多人认为，这个故事很可能是牛顿的亲属为了确保他对万有引力定律的发现权而编出来的。

牛顿关于万有引力定律的论述最早出现在他的巨著《自然哲学之数学原理》中，此书是在他 45 岁时出版的。而苹果落地的故事发生在牛顿 23～25 岁之间，在乡下庄园里躲避鼠疫的时候。这个故事的出现，把牛顿发现万有引力定律的时间整整提前了 20 年，那是胡克等人所望尘莫及的。

童年的牛顿

牛顿的童年是不幸的，他是一个遗腹子，还没有出世，父亲就去世了。他的父亲是一个农民，文盲，而且脾气暴躁，不过据说智力还可以，家里也不算太穷。牛顿的父亲家族基本没有文化，母系家族有点文化，但也不高。

后来母亲改嫁给一位 60 多岁的牧师。牛顿的继父有文化，也有些钱财。但这位“思想道德工作者”本人的道德水平并不高，他不能善待前夫的儿子。

牛顿小时候饱受歧视，与同父异母的弟弟关系很差，只与妹妹关系较好。幼年的牛顿由外祖父母抚养，很少得到母爱。这样的生活状况对牛顿性格的形成造成了极大的影响，致使晚年的牛顿显得尖刻而贪婪。

在这样的家庭条件下，童年的牛顿身体很差，学习也很差，和同学相比他什么都不行，对自己也缺乏信心。此时一个突发事件改变了牛顿的人生。

他们班上有一个小霸王，欺负牛顿，踢了他的肚子一脚，疼得牛顿忍无可忍。愤怒之下，小牛顿不顾自己身单力薄，憋足了全身力气，把那个小家伙揍了一顿。没想到居然打赢了，小牛顿马上信心大增，觉得自己还行啊。他想，既然打架能赢，说不定学习也行。打架产生的自信没有把牛顿引向邪路，反而使他走上了刻苦学习的正轨。于是他的功课大有起色，而且越来越好。

不幸的是,牛顿 10 岁时,继父又去世了,家中缺少劳动力。上中学时,母亲把他召回家,让他干农活。但他农活儿干不好,也不大上心,他放的羊把别人家的庄稼吃了不少。还是牛顿的舅舅有远见,觉得自己的外甥别看干农活儿不行,也许在学习上是一块好料。于是说服姐姐让牛顿继续读书。

中学毕业时,牛顿的舅舅又积极活动,使他得以进入剑桥大学学习,并为他从学校争取了补助金。其实此时牛顿的母亲已从前夫那里继承了遗产,并不贫困,但她不愿为儿子掏学费。牛顿能拿到补助金,正合他母亲的心意。

然而,舅舅为牛顿争取到的这点补助金不是白给的,穷学生们必须为富有的同学打扫宿舍,买东西,甚至倒尿壶。这样的大学生涯,对于牛顿后来的性格形成肯定也有负面影响。好在牛顿的求知欲望强烈,而且确实才华出众,他终于以优异的成绩在剑桥毕业,并有幸留校当了教师。

牛顿的丰收年

刚刚留校,英国就闹鼠疫,牛顿不得不到乡下母亲的庄园中去躲避。他 23~25 岁之间,在那里度过了一年半岁月。不过他没有虚度光阴,这时的牛顿已步入了科研的正轨,他在那里思考、研究了许多问题。据后来他自己说,他的力学三定律、万有引力定律、光的微粒说、色散理论、微积分,都是在那段时间中研究出来的。不过,他没有提到苹果落地的故事。这个故事如果有,就应该发生在这段时间。

牛顿在庄园中度过的这一年半时间,后来被称为牛顿的“丰收年”。

青年牛顿是幸运的,他留校后碰到了伯乐式的导师巴罗。实际上,牛顿的很多哲学和物理思想来源于巴罗。在巴罗的著作中我们可以看到他对绝对空间、绝对时间以及物体运动等许多重要概念的论述。在牛顿的巨著《自然哲学之数学原理》中不难看到巴罗的影子。

当时一位叫卢卡斯的富翁为了支持自然科学研究,给剑桥大学捐了一笔钱,设立了一个叫做“卢卡斯数学讲座”的教席,为数学和物理专业的教授支付薪金。

巴罗是第一任卢卡斯讲座教授,但他看到牛顿的杰出才华后,立刻让贤,把这一讲座教授的位置让给了牛顿。牛顿当时才 27 岁。牛顿确实身手不凡,他 30 岁时又当上了皇家学会会员(相当于院士)。

牛顿在《自然哲学之数学原理》(图 1-2)中,论述了自己对力学的研究成果,谈到了绝对空间与绝对时间,还谈到相对空间与相对时间。他认为:

“绝对空间,就其本性而言,与任何外部事物无关,它总是相同的和不可动的。相对空间是绝对空间的某个可动的部分或量度……”

“绝对的、真实的和数学的时间自身在流逝着,而且因其本性均匀地、与任何外部事物并不相关地流逝着,它又可以叫做延续性。相对的、表观的和普通的时间是延续性的一种可感知的、外部的(无论是准确的或不均匀的)借助运动来进行的量度,我们通常就用它来代替真实时间;例如一小时、一个月、一年。”

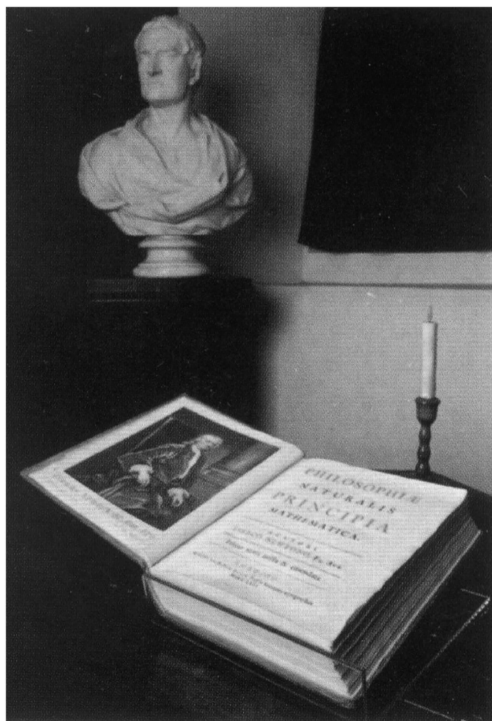


图 1-2 《自然哲学之数学原理》第一版

牛顿列出了力学三定律,给出了万有引力定律。这部书奠定了经典力学的基础,其内容之完善,逻辑之严谨都堪称科学著作的楷模,值得所有热爱物理学的青年学子浏览。

毫无疑问,牛顿是迄今为止最伟大的物理学家之一。

牛顿、胡克与万有引力定律的发现

牛顿时代的天文学家和物理学家,都熟知开普勒通过精细的天文观测得到的行星运动三定律(图 1-3):

- 第一定律: 行星绕日运动的轨道是一个椭圆,太阳位于椭圆的一个焦点上。
- 第二定律: 行星的矢径在单位时间内扫过的面积相等。
- 第三定律: 行星绕日运动周期的平方,与椭圆轨道半长轴的立方成正比。

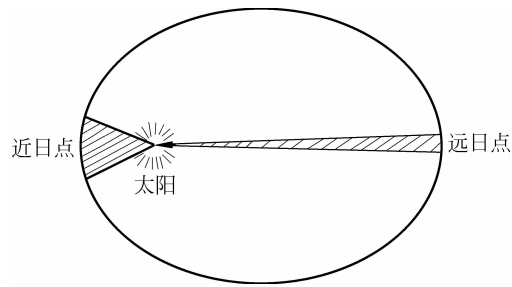


图 1-3 开普勒的行星运动定律

牛顿和胡克等人几乎同时认识到,如果开普勒第三定律成立,则太阳和行星间的引力就一定与距离的平方成反比。问题是,与距离平方成反比的力是否一定能导致行星运动轨道是一个椭圆?

有一次,哈雷与胡克等人在一起议论这个问题,胡克说,与距离平方成反比的引力,一定能导致行星运动轨道是椭圆,而且声称他证明过这一点。哈雷想看看他的证明,胡克不肯。

于是哈雷又去请教牛顿,牛顿也说,与距离平方成反比的引力一定能导致椭圆轨道,自己也证明过。哈雷说他想看一下牛顿的证明,牛顿当场找了半天,

也没有翻出来。不过牛顿答应再证一遍给哈雷看。不久之后，哈雷收到了牛顿的来信，看到了牛顿的证明。

当牛顿发表《自然哲学之数学原理》一书时，遇到了麻烦。胡克说你书中的万有引力定律是我先发现的，于是二人争吵起来，导致书无法出版。牛顿不得不做出让步，在书的序言中被迫写上胡克也是“万有引力与距离平方成反比”的发现者之一。不过，给出万有引力定律的正确而完整表达式(1.1)的人，肯定是牛顿。

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (1.1)$$

牛顿与夫莱姆斯梯德的冲突

除去与胡克争夺万有引力定律的发现权之外，牛顿还与天文学家夫莱姆斯梯德发生了争吵。牛顿在《原理》一书中引用了夫莱姆斯梯德的许多天文观测数据。《原理》一书再版时，牛顿听说夫莱姆斯梯德又有了许多新数据，就向他要，夫莱姆斯梯德不给。牛顿当时已经坐上了皇家学会会长的宝座，傲气十足，就命令夫莱姆斯梯德把数据交出来。夫莱姆斯梯德就是不给，牛顿也没有办法。于是牛顿又想了一招，让他的好友哈雷去向夫莱姆斯梯德借这批数据，哈雷拿到数据后，按照牛顿的主意把这批数据用在自己写的一本书上。牛顿想，哈雷这本书一出版，自己就可以光明正大地引用这批数据了。不料此事被夫莱姆斯梯德觉察到了，他就把哈雷告上了法庭，法庭裁决不许哈雷出版这本“剽窃的著作”。

牛顿一气之下，删掉了《原理》一书中原已引用过的来自夫莱姆斯梯德的所有数据。

夫莱姆斯梯德非常愤怒，此后不再和牛顿讲话。他认为“牛顿是一个阴险的，野心勃勃的、极其贪婪的沽名钓誉者，根本不能容纳不同意见……”，不过他最后还是表现得比牛顿有度量，较为公正地评价了牛顿，“……归根到底是个好人，但生性多疑。”

牛顿与莱布尼茨的争吵

最著名的冲突发生在牛顿与德国数学家莱布尼茨之间，二人争夺微积分的发现权。现在已经清楚，二人是各自独立创建微积分的。牛顿是在研究速度时发现的，莱布尼茨则是在研究切线斜率时发现的。牛顿的发现时间要早一点，但他公布发现的时间晚于莱布尼茨。

当时二人公开争吵，双方的朋友都出来帮忙。牛顿的朋友写文章说是牛顿先创建的，莱布尼茨的朋友则发表文章说是莱布尼茨先创建的。不过后来发现，不少牛顿朋友所写文章实际上是牛顿本人先写好，然后以他朋友的名义发表的。

在争吵中莱布尼茨犯了一个错误。当时英国的科学比德国发达，于是莱布尼茨请求英国皇家学会出面成立一个“公正的委员会”来裁决一下，究竟是谁先发现了微积分。

让莱布尼茨没有想到的是，作为皇家学会会长的牛顿就敢胡来，牛顿以会长身份指定了一个全部由自己的朋友组成的“公正的委员会”，这一委员会“裁决”莱布尼茨剽窃，牛顿还私下为这个委员会起草了裁决书。

委员会裁决之后，牛顿还觉得不解气，又化名写了一篇文章，回顾这件事情的来龙去脉，以彻底把莱布尼茨搞臭。据说，莱布尼茨非常伤心，不久就去世了，牛顿则沾沾自喜。

莱布尼茨是一位才华横溢的学者，他不仅研究数学，还研究物理、哲学、历史、法律、神学和外交。

莱布尼茨与牛顿不仅在微积分的发现权上产生冲突，而且还在哲学和时空观上进行过争吵。牛顿说存在一个“绝对空间”和一个“绝对时间”，莱布尼茨说根本就没有“绝对空间”，也没有“绝对时间”，一切都是相对的。“空间”不过是物体相对位置和方向的表现。时间不过是事件发生的先后顺序的排列。没有物质，就没有时间和空间。



绘画: 张京

神坛上下的牛顿

牛顿的科学发现基本上都是在青年和中年时期做出的，他为此付出了艰苦卓绝的劳动。他的秘书曾经回忆牛顿在写作《原理》那段时期的情况：“他从不作任何娱乐和消遣，他不骑马外出换空气，不散步，不玩球，也不做任何其他运动。认为不花在研究上的时间都是损失。他常常工作到半夜三更，往往忘记吃饭，当他偶尔在学院的餐厅出现时，常常穿一双磨掉了后跟的鞋，袜子乱糟糟，披着衣服，头发也几乎不梳。”

牛顿的伟大成就对物理学产生了深远的影响。然而中年以后的牛顿，不是一个招人喜欢的人，他很谦虚，不停地与人争吵，在自然科学上不再有建树。

有人说晚年的牛顿特别想发财，最后终于当上了造币厂的厂长。不过，牛顿确实了不起，他在管理金融时提出的“金本位”主张，对经济产生了深远影响。英镑和美元最硬的时候，都是在它们的币值与黄金挂钩的时候，脱钩后，就不可避免地走向了衰落。所以，“金本位”的主张，值得崛起中的大国深思。

牛顿有一句名言：“我之所以有成就，是因为站在了巨人的肩上。”许多人以为这是牛顿谦虚的表现，事实并非如此。这句话是在牛顿给胡克的信中出现的。胡克是个矮子，而且有点驼背。牛顿是想说，我能够做出成就是因为站在了笛卡儿等巨人的肩上，跟你胡克这个矮子无关。

晚年的牛顿也还是有谦虚的时候，不过他敬畏的对象不是某个人而是自然界。他曾说过：“我不过像一个在海边玩耍的小孩，时而发现一块光滑的石子，时而发现一个美丽的贝壳，但真理的广阔海洋，却还在我的面前有待发现。”

如何得出暗星的预言

拉普拉斯和米歇尔是依据牛顿的万有引力定律和力学第二定律预言这类暗星的。他们算出暗星形成的条件是：

$$r \leq \frac{2GM}{c^2} \quad (1.2)$$

其中 r 、 M 分别是恒星的半径和质量, G 和 c 分别是万有引力常数和真空中的光速。不过他们当时还不知道 c 是一个常数, 更不知道光速是自然界最高的极限速度。他们以为光速和一般质点的速度一样, 在外力下会依据牛顿第二定律而变化。他们认为, 如果式(1.2)的条件被满足, 这颗恒星的光就会被自身的引力拉回去, 成为外界看不见的暗星。

我们从经典力学的动能与势能关系很容易推出此式。设光子的质量为 m , 则它的动能为 $\frac{1}{2}mc^2$; 光子位于恒星表面时, 万有引力势能为 $\left(-G\frac{Mm}{r}\right)$ 。光子抵达远方的条件是它的动能能够克服势能, 如果动能小于势能, 远方的观测者就接收不到这个光子了。所以形成暗星的条件可以从

$$G\frac{Mm}{r} \geq \frac{1}{2}mc^2 \quad (1.3)$$

导出, 于是我们得到了式(1.2)。

从今天看来, 上面的论证有两方面错误, 第一是按照狭义相对论, 光子动能不是 $\frac{1}{2}mc^2$, 而是 mc^2 , 而且真空中的光速 c 是一个常数, 不会在外力作用下改变。第二是万有引力与一般力不同, 是一种几何效应, 万有引力定律只不过是爱因斯坦广义相对论的一个近似。有趣的是, 这两方面的错误相互抵消, 式(1.2)与后来从相对论得出的黑洞形成条件恰好一致。

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} \quad (1.4)$$

式中, r_g 与 M 分别为黑洞的半径和质量, r_g 又称星体的引力半径。

高傲的拉普拉斯

拉普拉斯是当时世界上最杰出的数学家和天体物理学家, 他的五卷巨著《天体力学》受到拿破仑的关注。这位关心科学技术的独裁者在翻阅了拉普拉斯的《天体力学》后, 召见了这位同胞, 问他: “这部书中怎么没有提到上

帝的作用?”拉普拉斯高傲地回答:“我不需要这个假设。”

拉普拉斯在《天体力学》第一版(1796年)和第二版(1799年)中都谈到了自己预言的暗星,但在1808年出版的第三版中却悄悄地删除了有关暗星的叙述。

这是因为在第二版和第三版的出版之间,托马斯·杨完成了光的双缝干涉实验,这表明光是波而不是微粒。拉普拉斯感到自己建立在牛顿微粒说基础上的暗星预言,看来不对了。

托马斯·杨的功绩

英国的托马斯·杨小时候是个神童,长大后成了才子。托马斯·杨2岁时就能读书,4岁的时候把《圣经》通读了两遍,到14岁的时候就学会了拉丁语、希腊语、法语、希伯来语、意大利语、阿拉伯语、波斯语等,会多国的语言。他先是学医,研究近视眼,弄清了散光的原因;又对光学感兴趣了,完成了双缝干涉实验,证明了光是波动,而且是横波,还提出了颜色的三色理论。

托马斯·杨在十来个领域都有贡献。特别滑稽的是,他对考古学也有贡献,他把古埃及的罗塞塔石碑上的文字破译了几个,古埃及文研究的第一次突破就是他首先认出了几个字,当然没有全部突破,但也是一个很重要的进展。

光的波动说和微粒说经历过长时期的争论。最先是笛卡儿、胡克、惠更斯等人提出波动说,认为光是波动。这些人都比牛顿资格老。牛顿在剑桥大学任教后,提出光的微粒说,认为光是微粒。他把论文投给英国皇家学会的会刊,遭到学会干事长胡克的否定。胡克认为光是波动已有定论,牛顿的论文是胡扯,他把牛顿的论文退了回去。

牛顿一气之下,从此以后不再给皇家学会会刊投稿,所以牛顿一生论文发表得很少,他的主要成就都刊登在45岁时出版的《自然哲学之数学原理》和65岁时出版的《光学》这两本巨著中。世间后来流传的一些牛顿的论文如“论运动”等,都截自牛顿与别人的私人通信。

在《光学》一书中,牛顿叙述了自己对光学的研究成果,阐述了光的微粒说。由于他在力学方面的巨大成功,大家相信他对光的论述也应该是正确的,因为

他是伟人。

何况惠更斯学派一直未能解释清楚，作为波动的光为什么一直观察不到干涉现象。这样，牛顿的微粒说就压倒了惠更斯的波动说，这一压倒就是一百多年，直到托马斯·杨完成光的双缝干涉实验。

由于牛顿是伟人，是英国民族的骄傲，所以托马斯·杨在论述波动说时小心翼翼。他一再肯定牛顿的伟大，一再申明自己仰慕牛顿的大名，只是希望自己能对牛顿的失误作一点修正，使牛顿的物理理论更加完美。

但这也不行，托马斯·杨受到来自学术界和社会的双重压力，有人说他的文章“没有任何价值”，他的双缝干涉实验根本“称不上是实验”。托马斯·杨的论文无法发表，只好自费印了一些小册子，但也只卖出了一本。不过，真理是否定不了的。牛顿的微粒说无法解释双缝干涉实验，光的波动说最后还是战胜了微粒说。

奥本海默的暗星

光的波动说战胜微粒说之后，米歇尔和拉普拉斯建立在微粒说基础上的暗星预言，逐渐被人们淡忘。

学术界再次谈论暗星是 100 多年以后的事。1939 年美国物理学家奥本海默和施耐德在研究中子星的时候，用爱因斯坦的广义相对论再次论证了存在暗星的可能性。

广义相对论可以看作万有引力定律的发展和推广。这一理论认为，万有引力不是一般的力，而是时空弯曲的表现。

奥本海默等人用广义相对论算出的暗星形成条件如式(1.4)所示，与米歇尔、拉普拉斯给出的条件一致。但是他们依据的理论已远非拉普拉斯等人依据的经典力学可比，他们认为暗星的存在不是万有引力把光拉了回来，而是星体质量造成的巨大时空弯曲，把光束束缚在了暗星内部，无法逃逸。

然而，暗星的“密度”大得几乎无法让人相信，太阳如果形成暗星，半径会从 70 万千米缩小到 3 千米，密度似乎会达到每立方厘米 100 亿吨。这真是一个让

人无法接受的“天文数字”！

当时已知密度最大的物质是白矮星上的物质，其密度也不过每立方厘米1~10吨。更为可怕的是，暗星内部的物质似乎都会缩到中心的一点上，形成密度和时空曲率都为无穷大的“奇点”。包括爱因斯坦在内的绝大多数物理学家都不相信宇宙间真会有这样的暗星存在。

不久之后，奥本海默受命主持原子弹的研制，对暗星的研究再次中断。

1964年前后，美国相对论专家惠勒重新研究了奥本海默的暗星形成理论，并用美国核试验基地的大型计算机作了恒星在万有引力作用下塌缩的模拟计算，确认了中子星塌缩真的会形成暗星。他把这一喜讯告诉了奥本海默，然而当时奥本海默由于被人诬陷泄露原子弹机密，而遭到联邦调查局的反复审查，这使他情绪低落，失去了继续研究暗星的兴趣。

不过惠勒的工作终于引起了相对论界的重视，对暗星的探索重新启动，惠勒还给这种暗星起了个专用的名字叫“黑洞”，于是黑洞一词逐渐传播开来。

第二章 恒星演化,走向黑洞

赫罗图

在远离城市的郊外,仰望晴朗的夜空,可以看到万点繁星。如果使用望远镜,就能更好地欣赏那五颜六色的恒星。它们都是遥远的太阳。

天文学家根据恒星的发光本领(光度)和温度,绘制出一种图,是用制作此图的天文学家赫茨普龙和罗素的名字来命名的,称为赫罗图(图 2-1)。此图的横坐标表示恒星的温度,纵坐标表示它们的光度。

恒星的温度可以用它们发射的光的光谱来确定。温度较低的恒星,发射的光波长较长。4000K 左右的恒星主要发红光,呈现红色,温度更低的恒星则发射红外线、微波或波长更长的无线电波。6000K 左右的恒星主要发黄光,呈现黄色,例如我们的太阳;1 万度左右的恒星主要发白光,呈现白色。温度更高的恒星则发射蓝光、紫外线甚至 X 射线。

肉眼所见的恒星亮度不仅决定于星体自身,而且决定于它们离我们的远近。同样种类和大小的恒星,离我们越近,显得越亮。我们感兴趣的不是这种视亮度,而是恒星的“绝对亮度”。通过天文测量,可以知道恒星离我们的距离。我们把所有恒星都折算到离我们 10 个秒差距的距离(1 秒差距 $\approx$ 3.259 光年),它们这时候显示给我们的亮度,称为绝对亮度,它反映恒星的真实发光本领——

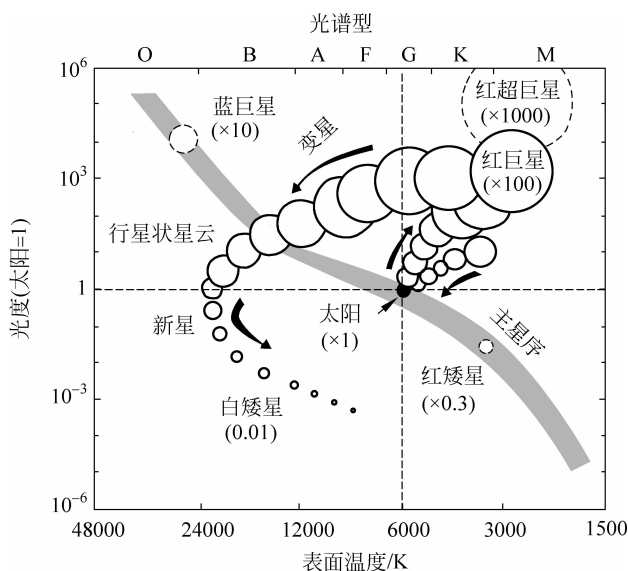


图 2-1 赫罗图

光度。

赫茨普龙和罗素根据不同恒星的光度和颜色，把它们一一标记到赫罗图中。结果显示，大多数恒星都分布在从左上角到右下角的对角线附近，形成一个恒星比较集中的带，称为主星序。主星序上的恒星称为主序星，我们的太阳就是一颗主序星。还有一些恒星分布在主星序的两侧，有体积较大温度较低的红巨星，有体积较小温度较高的白矮星，此外还有蓝巨星、红矮星等。

吻我一下吧，仙女！

根据恒星光谱中某些谱线的特征，天文学家把恒星分成 O, B, A, F, G, K, M 等若干种光谱型，标记在赫罗图上方。这些光谱型的排列顺序较为难记，有人编了一个笑话来帮助记忆，说有一个青年第一次来到天文台，用望远镜来看夜空，那五颜六色的天体让他惊叹，不禁喊了一声：

Oh, be a fine girl, kiss me!

“哦，真像一个美丽的仙女，吻我一下吧！”这句话每个英文单词的第一个字

母恰好表示按顺序排列的光谱型。

研究表明,恒星在赫罗图中的位置,显示它们的不同演化阶段。主星序上的恒星比较年轻。老年的恒星逐渐离开主星序,先演化成红巨星或超红巨星,再进一步演化成白矮星或者其他致密星。

爱丁顿的贡献

最初,物理学家们认为恒星发光发热的能量完全来自引力势能。他们认为在气体星云收缩为恒星时,气团的引力势能会转化为热能,使恒星温度升高,发光发热。不过,他们认为,此后维持这一发光发热过程的能量依然来源于引力势能,来源于恒星物质的继续收缩。也就是说,引力能是恒星热能和光能的唯一来源。著名物理学家开尔文和亥姆霍兹等人就持这种观点。

然而,后来发现恒星的寿命很长,达到几十亿年,恒星物质的引力势能远不能维持如此长时间的发光发热。于是英国天体物理学家爱丁顿提出,恒星的能量源泉是核的聚变反应(即通常所说的热核反应),是4个氢核聚合成氦核的聚变反应。

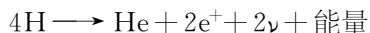
当时核物理学尚不发达,许多核物理学家认为氢核(质子)所带的正电荷会同性相斥,它们不可能聚合到一起。要使质子靠近,需要给它们提供足够的动能,也就是说,恒星温度要非常高,而当时估计的恒星温度远没有这样高。

针对核物理学家认为恒星温度不够高,不可能形成氢聚合成氦的热核反应的观点,爱丁顿高傲地回答:“我们不同那些说恒星温度不够高的批评者争辩,我们只告诉他们,往前走,去找到为什么会有更高温度的理由。”

历史表明,爱丁顿是对的,恒星的收缩的确可以使其中心的温度非常高,同时压强非常大,使得质子的动能达到足以克服它们之间的静电斥力,相互靠近而发生热核反应的程度。而且,随着核物理学的发展,人们认识到,当质子、中子等核子趋近到 10^{-15}m (原子核大小)的时候,会出现一种远比静电斥力强大得多的吸引力——核力(即强相互作用力)。正是这种核力把质子、中子聚拢在一起,形成稳定的原子核。

爱丁顿使学术界认识到，恒星的能源不是引力势能，而是聚变反应释放的核能。万有引力势能的作用仅限于“点火”，即原来温度不高，不会产生聚变反应的恒星物质，在万有引力作用下收缩，引力势能转化为热能，使恒星温度不断升高，压强不断增大，直到恒星中心部分的温度和压强达到了诱发热核反应的程度，完成聚变反应的点火。此后，恒星发光发热的能源就不再是引力能，而是核能了。

现在知道，以太阳为代表的主序星的热核反应为



即 4 个氢核(质子)，聚合生成一个氦核(由两个质子和两个中子组成)、两个正电子 e^+ (与通常我们熟悉的电子类似，只不过带的是正电荷)和两个中微子 ν ，并释放出核能。

霍伊尔的贡献

天体物理学家霍伊尔发展了爱丁顿的思想，他首先认识到氦元素还能发生进一步的聚变反应，生成碳元素、氧元素；碳和氧等又可再进一步聚变，生成更重的元素，例如铁、硅等。这不仅解释了恒星发展各个阶段的产能机制，例如白矮星、中子星的形成，以及超新星爆发过程，而且解释了宇宙中重元素的来源。

大家知道，宇宙初期只存在氢和氦两种元素，但今天的宇宙中存在各种重元素(铁、硅等)，这些重元素从哪里来？天体物理学家原本不清楚，霍伊尔的工作解开了这一秘密。不过最初的研究是令人沮丧的。

人们发现，两个氦核聚合的生成物(4 个质子与 4 个中子)，或者一个氦核与一个氢核聚合的生成物(3 个质子与 2 个中子)均不稳定，这样的聚变反应不可能发生。3 个氦核聚合在一起生成的碳(6 个质子与 6 个中子)倒是稳定的，但 3 个核同时碰在一起的概率很低，这样的反应似乎更难发生。这一严重困难被霍伊尔解决了。

霍伊尔猜测，碳核可能存在一种激发态，其能量恰好与 3 个氦核加起来的总能量相等，这时在 3 个氦核与激发态碳核之间会发生一种“共振反应”，使聚

合概率大大提高。生成的激发态碳核又会很快跃迁到基态，形成稳定的碳核。这样氦聚合成碳元素的聚变反应就得以进行了。

一些核物理学家最初不相信霍伊尔的猜测，但他们查找后，真的发现存在这种碳的激发态，确认了“共振反应”的存在。大家终于明白了，通过“共振反应”，氦可以进一步聚合生成碳，释放出大量核能。而且碳还可以与氦再进一步聚合成氧。

研究表明，氧还可以再进一步与氦聚合……这样一步步聚合下去，生成各种重元素。各种元素与氦或氢进一步聚合，生成更重的元素，都是可以进行的。各级聚变反应就像一架天梯，每种元素的核与一个氦核或一个氢核聚合，就迈上一个梯级，聚合成更重元素的核。

不过，这架天梯的最下面两级却是残缺的，即两个氦核的聚变不会发生，氦核与氢核的聚变反应也不会发生，天梯中原子量为 8 或 5 的梯级都不存在。不过，再往上，天梯就比较完美了，聚变反应可以步步升级，生成的重元素的种类也越来越多。

我们看到，爱丁顿与霍伊尔对天体物理学的贡献是巨大的。不过，伟人也会犯错误，后面我们会看到爱丁顿与霍伊尔的失误。

恒星的演化

现在我们就来简介一下恒星的演化历程，它们如何形成，如何成长，又如何衰老，如何消亡(图 2-2)。

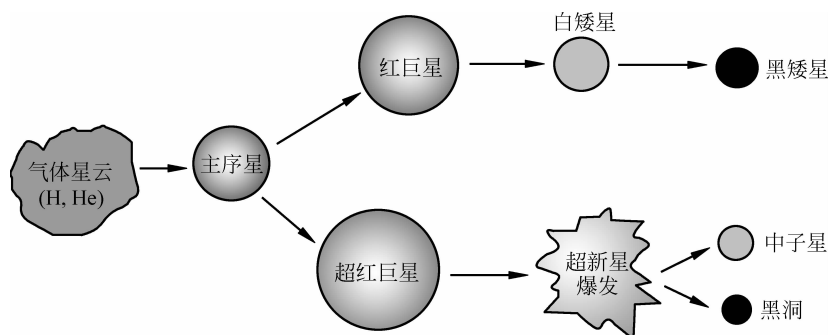


图 2-2 恒星的演化