

时间延缓与引力红移

在前一篇文章中我们曾指出,星球的大小越接近引力半径,时钟走得越慢。这就是说从一个远离黑洞的观察者看来,黑洞附近强引力场中任何过程的进程都变慢了。比如,随着星球不断收缩,它的

内部振动变慢了。这使得它发出的光子频率变小。这样的光到达观察者时,观察者就会觉得光的颜色向红色偏移了。人们称这种现象为引力红移,它是用来检验爱因斯坦理论正确性的一个基本实验。光的发射区越靠近黑洞边界,时间的延缓越厉害,引力红移现象也就越显著。当时间延缓变得趋于无穷大时,实际上一切过程都似乎停下来了。有趣的是,可以设想把一块石头扔向黑洞,你会发现,当石块接近引力半径时,速度会越来越小。只有经过无限长的时间,它才会到达黑洞的边界。

如果一个处于很远地方的观察者观察一个黑洞的产生过程,也就是观察星球在引力作用下向着中心收缩的过程,他所看到的情况也同上面讲的类似,即星球表面要经过无穷长的时间才能达到引力半径,变成一个所谓的施瓦西球。在引力半径处,收缩似乎完全停止了。所以也有人称黑洞为一个“冻结星”。

观察者真的能看到星球表面冻结在引力半径处吗?为了回答这个问题,让我们再来研究一下时间的延缓和红移现象。随着星球表面向引力半径收缩,尽管这个表面所产生的光子实际上并没有改变,但观察者所看到的却是越来越红。红移的光子频率低、能量小,传播所用的时间间隔长,因此观察者接收到的光的强度自然越来越小。除了由于强引力场所引起的时间延缓造成的这种引力红移之外,由于收缩着的星球表面有一个离观察者而去的退行速度,还要产生一种多普勒红移。这两种红移联合起作用,观察者见到的光将更快地偏向红色,强度下降得更快。根本等不到收缩为引力半径,这个星球就完全看不见了。光的这种消失过程实际上几乎是瞬时完成的。一个和太阳质量相同的量,收缩到两倍引力半径大小之后,大约再经过十万分之一秒,就完全“熄灭”了。

不仅任何望远镜都看不到冻结在引力半径处的星的表面,无线电雷达也无能为力。无线电波需要无穷长时间才能传播到引力半径,它绝不可能再反射回到发射这些波的观察者。这个星球对于远距离的观察者而言是完全消失了,只有它的引力场尚存。观察者绝不可能看到这个星球收缩到引力半径之后还会发生什么。

细心的读者会发现,这里有一个令人迷惑不解的问题:既然星球收缩到引力半径大小就需要无穷长的时间,谈论收缩到引力半径之后还有什么意义呢?这个问题涉及到广义相对论的一个重要的结论:时间的相对性。时间的快慢是与观察者的运动状态相关的。直接的物理实验已经证实,高速飞行的火箭上的钟比地面上的观察者的钟要慢。如果一个时钟掉到黑洞里,你会发现时间的相对性表现得更为奇妙。

现在我们来做一个假想实验。沿着指向黑洞中心的一条直线,依次安排一些观察者,使他们保持与黑洞相对静止的运动状态。例如,可以让他们各自乘坐一艘飞船,调整飞船的发动机使飞船能够抵抗黑洞的引力,保持与黑洞相对静止。再假想有另一位观察者乘坐一艘关闭了发动机的飞



船,向着黑洞自由下落。在下落过程中,他依次以越来越大的速度经过那些静止的观察者。当这个观察者趋近引力半径时,其速度将接近光速。对于静止的那些观察者而言,运动的飞船上的时间过得越来越慢,直到无穷大的时间,下落的飞船才会接近引力半径。而下落着的飞船上的观察者记录的时间是一个有限的值,而且是一个极为短暂的有限值。这就是广义相对论告诉我们的一个奇怪的结论:静止的飞船上的观察者记录到的一个无穷大时间间隔等于下落的飞船上的观察者记录到的一个极短的有限时间间隔!按照收缩着的星上的时钟,这颗星在一个有限的时间内收缩到引力半径,然后继续收缩下去。而一个远处的观察者根本看不到这种演化的后一段。

在黑洞的引力场中天体的运动

按照牛顿的引力理论,在一个星球的引力场中物体或沿一条开放的曲线(抛物线或双曲线)或沿一条闭合曲线(椭圆)运动,取决于该物体初始速度是大还是小。在远离黑洞的地方,引力场很弱,天体的运动在很高的精度上仍可用牛顿理论描写,牛顿的天体力学规律仍然适用。但当我们靠黑洞越近时,与这些定律的偏离越来越厉害。

按照牛顿理论,如果物体的速度比逃逸速度小,它将绕引力中心沿一个椭圆轨道运动。这个椭圆上有一点靠中心最近(“近地点”),还有一点离中心最远(“远地点”)。按照爱因斯坦理论,如果物体运动速

度低于逃逸速度，它的轨道也有一个“近地点”和一个“远地点”，但不再是一个椭圆。它仍保持在一个平面内，但轨道的形状是非常复杂的。如果这个轨道离黑洞足够远，它将是一个在空间缓慢旋转的椭圆。水星椭圆轨道的缓慢转动使其在 100 年中发生 43 秒的角位移，它成为爱因斯坦引力理论正确性的最早的实验验证。

最有趣的是来看一看一个物体在黑洞的引力场中所做的最简单的周期运动，即圆周运动。按照牛顿的理论，距离引力中心任意大小的地方，都可以发生圆周运动。爱因斯坦理论表明情况不是这么简单。物体离引力中心越近，在圆周运动的轨道上速度越高。在圆的半径为引力半径的一倍半时，这个速度达到光速。比这个半径再小的圆运动是不可能的，因为那时速度必须超过光速。

实际上人们发现半径大于上述值，直到三倍引力半径，绕黑洞的圆周运动也是不可能的，尽管那时物体的速度只有光速的一半左右。这是因为这样的圆运动是很不稳定的。只要有一点小的扰动，都会使物体偏离圆周轨道，或者掉到黑洞里面去，或者逃逸到空间。

再有，按照牛顿理论，如果物体运动速度大于逃逸速度，它将沿一个抛物线或双曲线轨道，从远处飞近一个引力物体，然后又飞离它。除非撞在引力中心上，否则靠得再近，也不会被居于引力中心的物体俘获。在黑洞的引力场中则不同。只有在远离黑洞，比如引力半径的几十倍或更远些的地方经过黑洞，才能沿牛顿理论规定的抛物线或双曲线运动。如果它靠黑洞足够近，它的轨迹将完全不同于抛物线或双曲线。例如，如果它的速度小于光速很多，而轨道靠近两倍于引力半径，则该物体将绕黑洞转几圈，然后跑掉了。靠得更近，就会被黑洞俘获，或者绕黑洞做圆周运动，或者最后掉到黑洞里面，永远也不会再飞离。

总结上述，我们可以得到这样的结论：一个物体能否逃离黑洞而不被俘获，不仅取决于它的速度是否大于逃逸速度，而且还决定它的速度方向与它同黑洞连线之间的方位角。如果它就是沿指向黑洞的径向运动，无论速度大小如何都会掉到黑洞里去的。如果方位角很小，即使速度大于逃逸速度，也避免不了被俘获的命运。只有当方位角大于一个临界值时，它才可能不被俘获。而这个临界角的大小依赖于它与黑洞之间的距离。

引力波的发射及其探测

爱因斯坦引力理论还预言，在黑洞的引力场中的运动一定伴随有引力波的发射。众所周知，电磁波是快速振荡的电磁场，脱离开产生它的源而以光速在空间中传播。引力波与之完全类似，是从源分离出来的振荡的引力场以光速在空间传播。原则上，只要用一个带电的小球就可以探测电磁波。当电磁波落到小球上时，小球就会振动起来。探测引力波时，一个小球就不够了，至少需要两个小球，它们之间要分开一段距离（带电与否无关紧要）。当引力波落在它们上面时，这两个球交替地靠近与分离。测量这两个球之间的距离就可以探测是否有引力波。

为什么只用一个球不行呢？原因是这样的，如果没有任何其他力作用在这个球上，它是以一种失重的状态漂浮在引力场中的，感受不到引力的作用。这与宇宙飞船中的宇航员的情况是相同的，他们在太空中处于失重状态，不可能探测到引力场的。把两个球分开一段距离，它们将处在稍有不同的引力场中，加速度不完全相同，利用它们的相对运动，可以探测到引力波的作用。

真正用来探测电磁波的是各种形状的天线。为了探测引力波，人们也设计了许多种引力天线。引力波的探测，理论上似乎很简单，实际上，不管

在什么条件下，我们所要探测的引力波都是极其微弱的。任何一个重的物体在加速运动时都要发射引力波，但即使是在天体运行中发射的引力波，其能量也都是小得可以忽略不计。比如，太阳系中行星运动产生的引力能，其功率大约只有一百支电灯的功率。如果把它与太阳所发的光的功率相比，绝对是可以忽略的。后者是前者的 10^{11} 倍。迄今，尽管建立了不少实验室，也设计了许多新的设备，但所有的实验均未能观测到引力波的信号。然而，一些天文学观测表明，天体运动的确导致引力波的发射。例如，在双星系统中，当星体做轨道运动时，发射的引力波要带走一些能量，通常，能量的这种丢失是极小的。但由于双星系统的星体质量很大，分开的距离又很小，引力波发射的强度就比较大。能量的损失导致两颗星逐渐靠拢，使双星系统绕质心运动的周期逐渐减小。尽管这个过程的进展极为缓慢，但总有一种特殊的观测方法能够鉴别出这种微小的变化。结果发现周期的减小与爱因斯坦理论的预言完全一致。

现在我们回到物体绕黑洞做圆周运动的情况。它将伴随有引力波的发射，轨道的半径将逐渐减小。这个过程一直持续到轨道半径达到三倍引力半径。如前所述，再小的半径的圆周运动就是不稳定的了。转几圈之后就会掉到黑洞中去。

在物体绕黑洞做圆周运动，半径缓慢减少的这段过程中，以引力波形式发射出多少能量呢？尽管发射的强度是极低的，然而这个过程持续的时间是非常长的。因此，发射能量的总量将是很大的。我们可以用下列对比给出一个粗略的估计。在氢原子核聚变成氦核或其它更重的核时，大约至多有百分之一的质量转化成了能量。而在上述绕黑洞运动中因发射引力波而损失的质量可以达到百分之六！

由此可见，黑洞原则上可以用作一种能源。释放能量的方式看来

在居里夫人实验室的日子里

施士元



(续前)

六、自尊自爱,真心诚意

卡拉勃尔是高中毕业后来到实验室里当实验员的,她二十来岁,眉清目秀,淡金黄色的长发披在两肩上,两颊白里透红,碧蓝的眼睛。居里夫人要她作我的助手。因为有时我的实验工作一个人干不了,必须有人帮助。

她爱唱歌,但实验室内不能,也不准唱歌。只许有机器声,不许有歌声。

她爱跳舞,弧步也好,圆舞也好,她想要我伴她一起跳,我不行,我不会,我没有时间,因为正在全力做实验。

当年中国驻法大使馆对留学生是不管的。是好是坏全靠自己。我在法国人的环境中,总觉得似乎有人盯着我。若要人不知,除非己莫为。想象中,我的一举一动,背后一定有人在议论着。我想我似乎是像西游记上的唐僧去西天取经,遇到各种各样的妖魔鬼怪。这是玉皇大帝对他的考验。我自重自爱,以礼待人。真心诚意,克制自己。

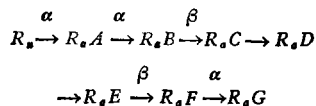
所以在研究所里四年功夫,上上下下人们对我比较尊重。

七、D'espine 的悲剧

D'espine 从中学毕业后进入巴黎大学,考取普通物理,普通化学及普通数学三个文凭后,进入镭研究

是简单的,但可惜的是,没有什么实际应用价值。因为引力波与物质的相互作用实在太微弱了。以引力波的这种形式所释放的能量极难收集起来,它们最终都耗散在宇宙空间

所从事他博士论文工作,居里夫人给他的题目是用内转换电子能谱来决定 γ 射线谱。当时用的是镭系的放射性沉淀物,当氡(Radon)衰变下来时衰变公式为:



实验中接触到大量的放射性物质,尤其是氡气是一种放射性很强的惰性气体。

工作两年多,测得了一些数据,发表了一篇文章,但他同时吸收了相当剂量的氡气。他本来是个身强力壮的好小伙子,可是工作进行过程中身体愈来愈消瘦,经常咳嗽。有一天突然发作,住院检查,是急性肺炎,这是放射性元素内照射引起的。

在医院里,他的病情越来越严重,医生对此亦束手无策。这是不可救药的病。

正是一失足成千古恨,再回头已是百年身。这件事当时在巴黎科学界中曾引起一阵骚动。法国青年闻之,不敢到镭研究所来工作。

居里夫人给我的题目就是给 D'espine 的题目。她说 D'espine 不小心,希望我格外小心从事。千万不要将有害气体吸入肺部。我听了并不在意。可以说糊里糊涂地把题目接受下来了。糊涂在两个方面。其一是对于辐照的危害性,因为没去了。以后我们将看到,还有一些其它的方法利用黑洞的极其巨大的引力能。

(编译自 Igor Novikov 著 Black holes and the Universe)

有切身体会,无动于中。第二是对于这个题目的意义可以说莫明其妙。老师给学生的题目,学生从来不向老师提出题目有什么意义之类的问题的。当时我只是想怎样做好这个题目,而并不推敲这个题目有什么意义。

八、斯各勃尔琴的干扰

斯各勃尔琴是苏联派到居里夫人那里进行研究工作的访问学者。后来他成为苏联科学院院士。他高高个儿,穿着一身半新不旧的藏青西装,两眼发红,老是象没有睡醒的样子,也许他有严重的砂眼。我们见面时,只是点点头,很少交谈。虽则他的题目,实质上是和我的一样的。不过他用云室,我用聚焦照相法。他把单个内转换电子的能量从云室照片上定出来。我把一群单能内转换电子聚焦后,把它们的能量定出来。目标是一致的,从内转换电子能谱来定 γ 射线能谱。

云室中活塞突然膨胀时,室温下降,水汽凝聚在离子迹线上,照相版上可以出现电子的很细的迹线。云室如果在磁场中,则电子的迹线形成螺旋形。

斯各勃尔琴实验时,每隔 20 分钟云室扩张一次。这时电源线路中产生一个巨大的非线性脉冲。这对我的实验是一个很大的干扰。因为我和他都是用市内电源。每次脉冲使我对我的电磁铁的电流失去控制。我的实验于是得不到结果。洗出来的照片上看不见什么谱线。我把这个情况向居里夫人报告。她亲自来看我的电表上波动的情况,要我和斯的实验轮流做。例如我在