

光压·引力·彗尾

邵宇晓



光是我们日常生活中的常伴，而引力更是无时无刻不紧跟着我们；彗星及其美丽的长尾倒是很罕见，但它与我们一

样都和光及引力密切相关。

轻柔的光压与强劲的光能

1864年，经典物理学中与牛顿三大定律以及万有引力定律拥有同等显赫地位的麦克斯韦电磁理论横空出世。麦克斯韦根据他的方程组推导出描述电磁场产生与变化的波动方程，其中自然而然地包括了光速这一波速项，由此他断言光就是一种电磁波。接下来顺理成章的就是：在入射光中的电场与磁场这两个分量的共同作用下，被照射的物体中的电荷必然感受到一种向内推动的压力，这样从理论上又推断出光压的存在。1900年，列别捷夫用实验证明了确实有这种光的压力，只是一般它都很微弱。

1905年，爱因斯坦在发表他的著名的狭义相对论之前三个月，还提出了被他本人称为更具革命性的光量子假说（现在已几乎无人再认为光子只是假说了）。从此，光不仅仅只是电磁场的波动了，它同时还是总以光速飞驰的一颗一颗的微粒的束流。光的身兼二职引出了迄今仍让大多数人深感困惑的所谓的“波粒二象性”这种微观世界的奇异特性，它是这样的难以理解，以至于爱因斯坦在晚年坦承自己尽管思考了半个多世纪还仍是不明白光到底是什么。

以光子的观点来解释光压会更直观易懂。如果把光子类比成豆大的雨滴，那我们在暴雨中感受到的雨点敲打，伞面向下的压力的产生机理，就与光子敲打被照射物体而产生光压十分相似。再若将光子比作空气分子，那光压就如同风力或者气体压强。

我们通常接触到的光压非常小，以至于大多数人从未想过光居然也会有压力。夏天的烈日下，片刻工夫，你就会汗流浹背；或者，在冬日的艳阳下享受和煦的温暖，你也许会感叹阳光的能量真够

大，但你觉察到光子传递给你的动量——光压了吗？

（力等于动量的变化率，亦即单位时间内传递的动量越多，相应的力越大。）应该还是没有，因为假如你是躺在沙滩上晒太阳，那阳光对你肌肤造成的压力，只相当于给你盖上一层薄纱时你对其重量的感觉；而这层纱又薄到什么程度呢？粗略的估算表明，它仅有普通纸张的万分之几！如此薄纱，你若感觉不到其重量不奇怪，感觉到了才奇怪呢！

关于“光能大而光压小”的感性认识，不妨再对比一下光子和空气分子的一些具体参数以加深理性认识：黄绿光的光子质量约 $4 \times 10^{-36} \text{kg}$ ，而空气分子（取氧分子与氮分子按实际比例的平均值）约 $5 \times 10^{-26} \text{kg}$ ，相差百亿倍！黄绿光子质量乘以光速即得光子动量，约 $1 \times 10^{-27} \text{kg} \cdot \text{m/s}$ ；空气分子质量乘以室温下空气分子的平均速率（接近 2km/s ）即得分子动量，约 $8 \times 10^{-23} \text{kg} \cdot \text{m/s}$ ；可见，分子动量比光子动量大近十万倍。（这是大气压远比光压大的一个原因，另一原因是相同体积里空气分子比光子多，还有一个造成相反效果的原因是光速远大于分子的速度，具体就不展开说了。）光子动量再乘光速即得光子动能，约 $4 \times 10^{-19} \text{J}$ ；分子动量乘其速率的一半得分子动能（之所以出现“一半”这个因子，与相对论有关——相对论的动能公式在低速近似下就是经典的动能公式，而对于静质量为零的光子，其全部能量 mc^2 就是其动能），约 $6 \times 10^{-20} \text{J}$ ；现在是光子的动能反过来要比分子的动能大近十倍了！至此，各位看出光子能量大而动量小的关键之所在了吗？那就是：光子质量极小，但速度极大。

集宏大与细微于一身的万有引力

尽管光压对个人而言微乎其微，不过，对于整个地球来说，太阳对它的光压可也不算小，那相当于一艘航空母舰的重量呢！然而，比起太阳对地球的万有引力，光压又变得九牛一毛了。应用早在1687年牛顿就正式提出的计算公式，太阳对地球的万有引力高达 $3.6 \times 10^{22} \text{N}$ ，这比太阳光压高出14个量级，也就是百万亿倍！难怪在计算行星运行轨道时根本不必考虑光压。

万有引力在四大基本力中是最早被认识到的，

现代物理知识

但迄今它仍是其中最神秘莫测的。自从牛顿首先提出其计算公式以来的二百多年间，它始终保持着那个正比于质量的乘积、反比于距离平方的简单却不甚精确的形式；直到1915年，爱因斯坦推出了他的伟大的广义相对论，万有引力才又获得了一个崭新的形式——爱因斯坦引力场方程；该方程的形式在不断创新和提炼的数学符号的表达下甚至比牛顿的形式更简洁，但其实际计算却往往极度困难，以至于到今天仍有许多数学家还在钻研怎样更全面地求解这一非线性的场方程。

广义相对论是当代的引力理论，它同牛顿的引力理论一样只是并不完美的相对真理，未来必有更好的引力理论来超越它。尽管尚不清楚未来理论会有怎样的具体形式，但它的部分特征已初见端倪：简言之，就是多数物理学家都同意其中应含有量子力学的成分，引力场应是量子化的，引力应由或实或虚的引力子来传递。

作为现代物理两大基石之一的量子力学，其核心就是海森堡的测不准原理（又称不确定原理）。它告诉我们，在一个有限的时间内，任何一个物体的能量都不是绝对确定的。由此，可以简单地估算一下太阳发射的、用以束缚地球的单个的虚引力子会有多大。具体来说，太阳发射出一个引力子就相当于自身减少了一点能量 E ，如果太阳能在一段时间 T 内又收回同样大小的一个引力子，并且 E 与 T 的乘积不大于普朗克常数 h ，那么就没人能测出在 T 这段时间里太阳曾减少过 E 这么多的能量。（这不是人类的测量手段不够，而是在原则上也测不出的，否则就违反了量子力学的第一原理——测不准原理。）于是，就只能认为太阳一直是能量守恒的，而它吐出又吞下的引力子是虚的。引力子也以光速飞行，它往返日地的最短时间是16分钟，相应的单个引力子的质量上限是 10^{-53}kg 这个量级。要体会这种穿梭于日地间的引力子有多小，不妨对比一下太阳发出的光子。以发射最多的黄绿光子为例，其质量约 $4 \times 10^{-36}\text{kg}$ ，这已比电子质量小了数十万倍，但却又比上述引力子大了18个数量级——百亿亿倍！回顾前面所述，你也许会惊讶于光压和引力的奇特反差：相比于光压，日地间的引力是何等之巨大；而承载这两种力的微粒却又有着截然相反的对比——相比于单个光子，单个引力子是何等渺小。这必然导致的一个后果就是，引力子一定比光子多

得多。估算的结果是：在地表附近，每毫升体积中平均有一千万个光子，而其中还聚集着的引力子则多达 10^{38} 个！（对于某个固定的空间，光子和引力子都是快速穿过，但出去和进来的数量大体相同，所以该空间内的数量可保持不变。）

光压如雨点敲伞或子弹击靶，而物质微粒发出又收回的虚引力子则有点儿类似于澳洲土著抛接的那种叫“飞去来”的飞镖。与宏观事物的类比也只能是有一点形似而已，因为从本质上看，微观世界的奇异性是全新的，是我们日常生活中从未经验过的。正因如此，连伟大的爱因斯坦也被描述微观奇异世界的量子力学困扰一生。

光压与引力有一个共同点，那就是在通常情况下它们的强度都是与距离的平方成反比。不妨这样来简要地理解一下它们共同的平方反比律：不论实光子还是虚引力子，它们其实都是某种形式的能量；物质微粒发射这两种能量，总的来说也都是朝四面八方均匀辐射的，一般不会向某个特定方向发射得更多；而两者也都不会静止，一旦被发射就以光速向外疾驶。不难设想某时刻前后一个极短的时间段内，飞出的这两种能量都是分布在一个小的薄球壳内。随着时间的推移，此球壳越变越大（类似于爆炸时迅速向四周膨胀的烟尘，只是更快得多），分布其中的能量密度（它等于刚才设想的那个极短时间段里发出的能量除以不变的薄球壳的厚度与持续增大的球壳的表面积的乘积）则不断下降。由于球壳表面积与球半径的平方成正比，所以上述能量密度就反比于球半径的平方。当以光速扩展着的球壳遭遇到另一个物质微粒时，两者相交处（此时的球壳半径就是两物质粒子的距离）的能量将被吸收或交换。显然，这些能量越多，相关的力就越强。综上所述，可以看出力的大小确实反比于微粒间距的平方。

再来看光压与引力的又一种差异：光子与地球的相互作用，大体上只是光子轰击地球表面（因为地球除大气和海洋浅层以外的固体部分几乎是不透明的，光子不可能深入地下）；而引力子则可毫不费力地贯穿整个地球，与地球的每个原子都要打交道（图1）。因此，光压是所谓的“面力”——只直接作用于表面，内部的受力要通过地球自身的弹性应力来由表及里、从一侧到另一侧地“传递”；而引力是所谓的“体力”——它直接作用于地球内外的各

个部分，不必借助于弹力（当然，引力对各部分的力在大小和方向上都有差异，为保持地球形状基本不变，需要弹力以及摩擦力的协助。与此相关的是由引力不均匀所引发的潮汐力）。如此一来，光压就与被照射物体尺度的平方（即面积）成正比，而引力则与被吸引物体尺度的立方（即体积）成正比。设想一大块物体不断被切开并分散，其组成单元逐渐增多，个头却逐次减小（但其密度和表面性质保持不变）。不断变小的单元所受到的来自一个不变的发光体的光压和引力会不断减小，但引力减小得更快，具体来说就是引力与光压的比值正比于物体单元的尺度。既然地球所受引力比光压大 14 个量级，那么在尺度上比地球小 14 个量级的一粒细小的尘埃（约十分之一微米）所受引力和光压就差不多一样大了。这种光压与引力的关系拿来解释尘埃彗尾的形成是很合适的。

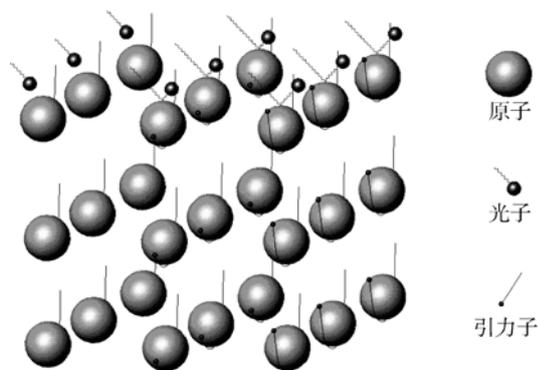


图 1 光子仅作用于表层而引力子则深入体内的示意图

光压和引力共同造就弯曲的彗尾

彗星是个巨大的“脏雪球”，主要成分是冰和干冰（即固态的水和二氧化碳），以及夹杂其中的某些气体和尘埃。当彗星从远方不断飞近太阳时，越来越多的热量使冰蒸发，气体和尘埃也随之挥发出来。引力把它们向太阳方向拉，光压则要将其推到背离太阳的方向。

先来看最简单的情形：当尘埃约为十分之一微米大小时，作用其上的引力和光压正好等大而反向，亦即这样的尘埃所受合外力为零。所以它一旦摆脱彗星的束缚逃逸出来，就将一直保持匀速直线运动状态，而其速度大致就是此尘埃脱离彗星时彗星在当时的运行速度。周期性彗星（如著名的哈雷彗星）是沿着一条极扁的椭圆轨道运动的（太阳位于此椭圆的一个焦点上），其运行速度不断变化，离太阳越

近速度越大（这就类似于下落的物体离地面越近速度越大）。一颗飞向太阳的彗星，在到达火星、地球、金星、水星的公转轨道时的速度依次增大，而它在以上四处挥发的尘埃的速度也依次增大（并且速度的方向也略有不同，这可用来解释下述的彗尾弯曲）。尘埃一放出就保持匀速，而彗星还不断向太阳方向加速飞行，这样尘埃就逐渐落后于彗星而拖出一条有些弯曲的彗尾。当彗星从近日点开始逐渐远离太阳时，情况正相反，彗星在持续减速，而它在沿途放出的尘埃却保持着比它高的速度匀速向前，这样跑得更快的尘埃就更远地背离太阳了。

更复杂也更真实的情形是：尘埃自然有大有小，相应的引力与光压的合力一般就不为 0，并且此合力的方向既有可能背离太阳，也有可能指向太阳。尘埃彗尾的形成与上段中的最简单的情形是类似的，只是更繁复一些，细致的分析需要借助于精密的数学演算。总之，尘埃彗尾发生的本质原因是彗星的表层物质受热挥发以及光压和引力对抗所形成的合力，而直接原因则应是尘埃与彗星的运动速度存在差异，以往常说的“尘埃彗尾是光压把挥发物质推离太阳”的说法是不够精确的。事实上，当尘埃较大，从而引力大于光压时，合力是往太阳方向拉的，但此时照样可以形成彗尾，因为尘埃与彗星的不同速度才是直接原因，光压之推，只能算是一种重要的间接原因（正是它削弱了引力对尘埃的吸引作用，导致尘埃速度变得与彗星母体不同）。

彗星通常会有两条彗尾，上面说的尘埃彗尾粗短且略有弯曲，而另一种所谓的气体彗尾（也称离子彗尾）则细长而笔直（图 2）。一开始科学家就意识到光压不足以将其“吹”成那样，后来发现了太阳还时刻向四周喷出粒子流（主要是质子与电子），



图 2 这三颗彗星都有明显的两条彗尾

我心目中的现代物理

于建峰

生活在地球上的人们，面对广阔无垠的宇宙，人类常常被宇宙的浩瀚而震撼！对于宇宙，人类从未停止过探索，而且还编出各种各样的神话故事。到了近代，天文学才从神话学中分离出来，成为现代的天文学。

自 16 世纪以来，随着天文学和力学的长足发展，哥白尼、伽利略、牛顿等以自然科学的观点和实验手段研究天体方面取得了巨大的成就。特别是牛顿的万有引力定律，为研究天体方面取得了一系列巨大成就。并且为人们描绘了一幅宇宙结构的自然图景：无限多的星体均匀地分布在无限的绝对的空间中，靠万有引力作用相互联系着，它们沿着各自的轨道运行着。现代天文学是以爱因斯坦的广义相对论为基础。随着粒子物理学以及整个理论物理学的发展，结合天体观察手段的进步，天文学获得了迅速的发展。现代天文学全方位地研究宇宙的结构、起源和演化。20 世纪 60 年代以来，天体物理观测上的一系列重大发现，极大地推动了现代天文学的发展，近几十年，高能物理学和粒子物理学的发展，特别是规范场论、大统一理论的发展，使得天文学的研究紧密结合起来，互相推动。目前现代天文学已经成为整个自然科学的重要研究领域。

宇宙是万物的总称。人们对宇宙的认识，小到地球，大到银河系、河外星系、星系团，乃至整个宇宙。目前，天文观测的视野已经达到一百亿光年（一光年= 9.6×10^{12} km）。我们生活的地球可以说是宇宙海洋中的微不足道的小沙粒，而太阳也只是银河系中 2000 多颗比较亮的恒星之一，而银河系中各类

才知道原来主要是太阳风造就了气体彗尾。太阳风中的高速带电粒子先是大量撞碎彗星挥发气体中的分子而使其电离，然后就以强大的静电引力“裹挟”着这些电离气体快速远离太阳而去（同时电离气体在分子复合时还会发出幽蓝的光芒，这不同于尘埃彗尾主要是反射太阳光而呈现的土黄色），这比光压的推斥作用大不少，当然更比引力大多了。

一大群光子和更大群的虚引力子在介于宏观与

恒星的总数已达几千亿颗。

银河系是一个巨型旋涡星系，包含一二千亿颗恒星。形状呈扁平

的圆盘，共有 4 条巨大的旋臂，中间厚边缘薄，整个圆盘的直径约为 10 万光年，中间最厚的部分约 12000 光年。它还有一个由分布比较稀疏的恒星组成的直径约 100000 光年的球状晕——银晕。银河系估计的总质量为 1000 亿个太阳质量。其中银晕的质量占总质量的 10%。太阳位于离银河盘的中心约 30000 光年处，在盘中心平面稍微“偏北”的地方。离太阳最近的恒星是比邻星，它与太阳的距离约有 4.3 光年。整个银河系盘子在旋转，速度达 250km/s，并且呈现出巨大的旋臂，整个银河系在空中非常雄壮。20 世纪初人们所说的宇宙大致就是我们的银河系。

70 多年前，美国天文学家哈勃在银河系外找到了一些新的星系，这些新发现的星系与银河系一样，也是由许多恒星组成，称为河外星系。这几十个河外星系距地球都在 200 万光年以上。哈勃的重要发现使人类对宇宙的观测突破了银河系，进一步扩展了人类对宇宙的认识。目前，用较大的光学和射电望远镜，在我们的银河系之外已经发现了约有 10^{11} 个星系，其中大的星系包括 10^{13} 颗恒星，小的也有 10^6 颗恒星。它们的形状各不相同，有球形、椭圆形、旋涡状（银河系就是这种外形）、棒旋状等，还有稀

微观之间的一颗尘埃——这在它们看来是广袤无垠的战场上相互对抗、彼此角逐，从而影响了这颗尘埃的运动，并进而营造了弯曲彗尾这一美丽而宏大的天文现象。这样的情景在我看来是美妙而有趣的，因此，我把光压、引力、彗尾写到了一起。

（福建省机电工业职业中专学校 350101）

本文获“我心目中的现代物理”征文优秀奖

