

物理学中几个重要的常数

谢柏松 北京师范大学

众所周知，在物理学理论中，一些基本物理常数 (Fundamental Constants of Physics) 起着决定性的作用，例如经典物理牛顿力学中的引力常数 G ，量子力学中的普朗克常数 \hbar 和电磁学和相对论物理中的光速常数 c 。基本物理常数是物理领域的一些普适常数。这些常数的准确数值，由于从理论上来说，与测量地点、测量时间以及所使用的测量仪器及材料均无关联，因此称为基本物理常数^[1]。

除了基本物理常数外，还有一些很重要的常数，例如广义相对论中的宇宙学常数 Λ ，天文物理中的哈勃常数 H ，以及玻尔兹曼常数 k_B 等等。

下面我们就分别仔细看看几个重要常数的来历和作用。

1. 引力常数

牛顿 (图 1) 发现的万有引力定律是说两个物体之间互相吸引，其吸引力正比于两个物体各自的质量，反比于它们之间距离的平方，这个比

例系数就是引力常数 G 。目前公认的结果是卡文迪许测定的值 $G=6.754 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ，最新推荐的标准为 $G=6.67259 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。通常取 $G=6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ，如果使用厘米克秒单位制，则是 $G=6.67 \times 10^{-8} \text{dyn} \cdot \text{cm}^2/\text{g}^2$ 。



图 1: 艾萨克·牛顿爵士 (1643—1727)
(图片来自百度百科)

虽然从物理学发展的历史来看，是先有牛顿的经典力学，之后才有爱因斯坦的狭义相对论和广义相对论以及上个世纪与相对论差不多同时发展出的量子力学，但这些理论之间内在的逻辑关系是超越其历史发展顺序的，这一点在当今高度融合的物理思潮中尤其显得突出和明显。

牛顿引力常数 G 的物理意义除了一般教科书上那种上述两个物体之间吸引力的比例系数的经典理解外，基于物理学内在逻辑自洽性的新的理解也有着独特的魅力。1968年前苏联物理学家萨哈罗夫(Sakharov)基于广义相对论的启发，并通过量纲分析，他认为在引力的真空涨落模型中，牛顿引力常数 G 应通过一个与真空零点涨落(Zero-point-Fluctuation, ZPF)谱中有效的普朗克截止频率有关的表达式来确定。在这种方法中，引力常数的小值(但有限)是ZPF高频截止的高值(但不是无限)的可逆反映^[2-3]。

很显然，在萨哈罗夫提出的这个模型中，引力不是一个单独存在的基本力，而是与真空零点波动(ZPF)相关的诱导效应，就像是范德瓦尔斯力和卡西米尔力一样，这也是后来有人认为引力是一种熵力表现的最初的思想根源^[4]。

1989年，Puthoff建立了一个符合并满足萨哈罗夫假设的点-粒子相互作用模型^[5]。在该模型下，引力质量及其相关的引力效应被证明是在电磁ZPF诱导了粒子颤动(德文 Zitterbewegung)运动后导出的。也就是说引力是一种与粒子对电磁场零点涨落颤动响应有关的一个长程的类似于范德瓦尔斯的力。因此，引力相互作用的力，与短程的真正的范德瓦尔斯力和卡西米尔力一起发生了，这三种力都是从粒子与真空电磁场零点涨落相互作用基本动力学现象中涌现产生出来的。

2010年荷兰的Verlinde^[6]研究了从第一性原理和一般假设出发的牛顿引力定律问题。在他发

展的理论中，牛顿引力定律是通过全息性结构出现的空间里自然而然不可避免要产生的。这时引力就被解释为一种熵力，它是由与物质位置相关的信息变化引起的。其相对论性的推广还能直接导致爱因斯坦方程。

该文最后的一段评论耐人寻味，这里录入如下：“众所周知，牛顿受到同时代人的批评，特别是胡克的批评，胡克认为他的万有引力定律作用于远处，没有像弹性力那样直接的机械原因。具有讽刺意味的是，这正是为什么胡克的弹性力如今不被视为基本力的原因，而牛顿的引力在三个多世纪以来一直保持着这一地位。牛顿不知道，当然胡克也不知道，宇宙是全息的。当然，全息也是一种假设，可能看起来就像远处的一个作用力一样荒谬。本文的主要观点之一是全息假说为引力的产生提供了一种自然机制。它允许与一个物体和另一个物体都相关的自由度之间的某种直接“接触”的相互作用，因为一个体积内的所有物体都可以映射到同一个全息屏幕上。一旦这个假设成立，牛顿的引力机制与胡克的弹性力原理就惊人地相似了。我很怀疑对于这样一个结论，这两个对手可能都不会感到高兴”。

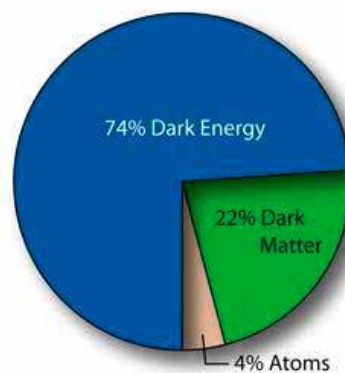


图2: 宇宙构成中暗物质与暗能量的贡献
(图片来自百度百科)

2016年 Verlinde^[5]进一步研究了所谓引力的涌现问题,他认为万有引力定律包含了一个额外的“暗”引力,描述由熵位移引起的“弹性”响应的力。用重子质量、牛顿常数 G 和哈勃加速度标度来估计这个额外的力的强度,并提供证据证明这个额外的“暗引力”解释了星系和星系团中观测到的现象,而这些现象的标准解释在学术界是归因于暗物质的(图2)。

2. 普朗克常数

再来看看普朗克常数,普朗克常数记为 \hbar , 是一个可以描述很多量子现象的基本物理常数,在量子力学中扮演重要的角色。马克斯·普朗克(图3)在1900年研究物体热辐射的规律时发现,只有假定电磁波的发射和吸收不是连续的,而是一份一份地进行的,计算的结果才能和试验结果相符。这样的一份能量叫做能量子,每一份能量子正比于辐射电磁波频率,这个比例系数 h 为一常量,称为普朗克常数。在海森堡的不确定性原理中普朗克常数有重要地位,粒子位置的不确定性与粒子动量的不确定性的乘积要大于或等于普朗克常数。 \hbar 是 h 除以 2π 后的约化普朗克常数,其数值大约是 $\hbar = 6.582 \times 10^{-25}$ GeVs。

毋庸置疑,普朗克常数在量子力学中起到了基石性的作用,可以这样说,没有这个常数就没有量子力学。如果它消失或者趋于0,理论就回归到了经典力学或经典物理。

它的意义还在于它与光速常数 c 和牛顿引力常数 G 一起构成了我们宇宙中最重要的三个普朗克物理量的度^[6]: 最小的普朗克空间尺度 $l_p = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1.6 \times 10^{-33}$ cm, 最小的普朗克时间尺



图3: 马克斯·普朗克(1858—1947)
(图片来自百度百科)

度 $t_p = \sqrt{\hbar G/c^5} = 5.3 \times 10^{-44}$ s, 和普朗克质量

$$m_p = \sqrt{\hbar c/G} = 1.2 \times 10^{19} \text{ GeV}/c^2。$$

普朗克常数更大的意义还在于它不仅是连接微观粒子的粒子性与波动性的纽带,更是所有量子世界中不可或缺的基本构件。在最新的圈量子引力中,时空也是量子化的。另外它自然地出现在各种物理效应中,例如前面提到的由卡西米尔效应得到的卡西米尔力^[7]: 在真空中两片平行的平坦金属板之间的吸引力,这种吸引压力是由平板之间的空间中的虚粒子数目比没有平板时正常数目少而引起的。在 Unruh 效应中^[7], 在一个加速参考系中的观察者会看到粒子具有一个与加速度 a 成比例的热温度 T , 即 $k_B T = \hbar a/2\pi c$ 。当然,它也出现在著名的黑洞霍金辐射中,以及信息熵 S 正比于黑洞视界面积 A 的关系 $S = Ak_B c^3/4\hbar G$ 中^[8]。

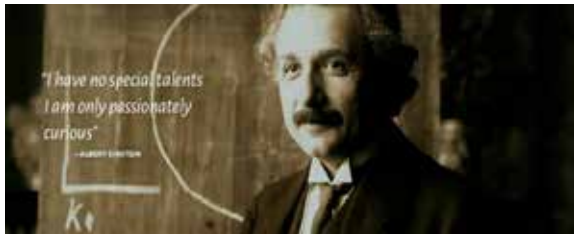
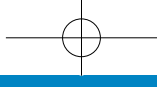


图 4: 阿尔伯特·爱因斯坦 (1879–1955)
(图片来自百度百科)

3. 光速常数

说完了完全经典和宏观效应的牛顿引力常数 G 和完全量子与微观效应的普朗克常数 h 后,我们现在回过头来看看电磁学和相对论物理中的光速常数 c ,这个常数虽然为大家熟悉,但实际上它的神秘面纱至今还未被人们完全揭开。

首先 c 是一个定义值(真空光速定义值 $c=299792458\text{m/s}$,通常取近似值为每秒30万千米,即每秒绕地球七圈半),它的测量值只是在有介质的情况下有与真空定义值比较的意义;其次它是物体运动所能达到的最高速度(尽管理论上存在超光速,但直至今目前实验上并未发现);最后最重要的是爱因斯坦(图4)指出光速不变原理是一条基本假设,也就是在任何惯性坐标系下光速保持不变。因此“……时间便失掉了其绝对的特征……尤其是同时性的绝对特征……”^[9]。可以这样说,没有光速常数的不变性,就没有相对论。

光速常数的物理意义远比人们所能看到的要深刻,它保持不变的原因还不清楚。一方面它联系着宏观效应,是相对论洛伦兹不变性的基石,也是电磁场规范不变性的纽带,另一方面它又联系着微观效应。对于基本粒子来说,它既刻画了波粒二象性中的粒子能量与动量的质能关系(图

5),又刻画了波的频率和波数之间的关系。而这些关系本质上都是时间和空间关系的折射。

总之,牛顿的引力常数 G ,与普朗克常数 h 和光速常数 c ,一起构成了当代物理学大厦的骨架,也是理解这个宇宙和时空本质不可或缺的一把钥匙。

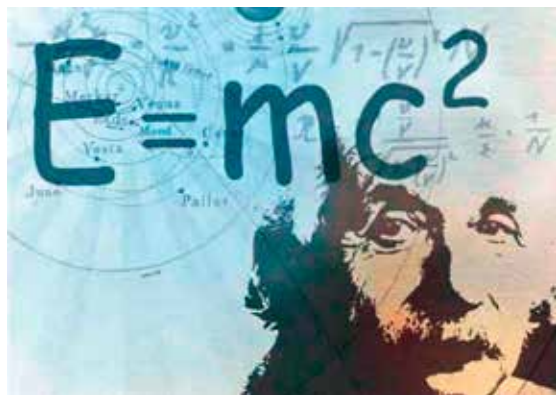


图 5: 爱因斯坦著名的质能关系式
(图片来自百度百科)

4. 宇宙学常数

最后我们来聊聊宇宙学常数 Λ 。爱因斯坦认为空间本身有一种内在能量,称其为宇宙学常数,对宇宙的稳定负责。也就是说宇宙学常数的排斥力可以平衡大尺度上普通物质的引力,从而保证宇宙是静止的,既不膨胀也不收缩。

具体地说,在1917年,爱因斯坦利用他的引力场方程,对宇宙整体进行了考察。为了解释物质密度不为零的静态宇宙的存在,他在场方程中引进一个与度规张量成比例的项,这个比例系数就是他人为了数学性地添加了一个宇宙学常数项 Λ (图6)。爱因斯坦在写给德西特的的信中明确地表达了有些微妙的观点^[10]:“广义相对论的引力场方程容许宇宙学常数的引入。……能够

超越经验的方法，确定宇宙学常数是否为零。信念是一种很好的动机，但不是一种好的判断方法。”

但随着 1929 年哈勃发现了哈勃定律和宇宙正在膨胀的观测结果后，爱因斯坦又去掉了这个常数项，并宣称这是他“一生犯的最大的错误”。有人曾质疑爱因斯坦是否真的这样说过，主要是这个说法是伽莫夫传出来的，而伽莫夫是个喜欢开玩笑的人，所以故事的准确性大打折扣。

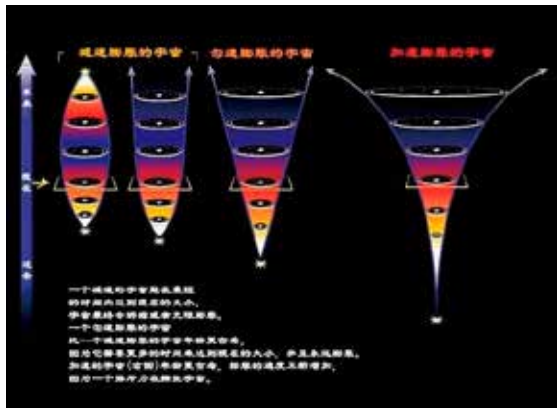


图 6：与宇宙学常数相关的不同膨胀宇宙
(图片来自百度百科)

然而今天，科学家重新引入了宇宙学常数项，这和当初爱因斯坦引入以给出静态宇宙模型不同，现在的宇宙学常数项代表了暗能量和暗物质项，现在看来，这个极其微小又不为零的宇宙学常数 $\Lambda \approx 10^{-55}$ 是现代宇宙学中必不可少的。因为就在爱因斯坦引入该常数的 80 多年之后，人们仔细研究了大量光谱线，即由遥远恒星发出的光，就像爱因斯坦曾经预计的那样，人们用实证方法而不仅仅靠信念来确定宇宙学常数是否为零的问题。令人震惊的是，越来越多的证据表明宇宙学常数确实不等于零。

根据量子力学理论，真空本身的微小涨落具有真空能量，也就是前面提到的 ZPF 能量，它恰

好是宇宙学常数的来源。但根据理论得到的对这一常数的估计值是在 10^{67} 以上，理论与实际观测的误差超过了 120 个数量级，这也是迄今为止物理学中最匪夷所思的一件事。这说明宇宙学常数问题远远没有被人们理解和认识清楚。

还有一点要指出，爱因斯坦的引力方程左边是只与时空有关的几何量，即爱因斯坦张量，右边是关于物质的能量动量的张量。爱因斯坦曾经把他的方程比喻为一座建筑，这座建筑的一半是用精美的大理石砌成，即左边的描述时空结构的优美的几何量，另一半却是用劣质的木料建造的，即右边描述物质分布的可能会千差万别的物质质量^[1]。因此如果把包含有宇宙学常数的项写在左边，它就是连带反映时空组成部分的真空密度，就是个真正的常数，但如果把这个项移到右边，也就是把真空当作特殊的物质，带宇宙学常数的项就是一种场能，它就只是个貌似常数。人们对她的这种双重角色非常诧异，对其深入的认识和理解还在进一步探索之中。



图 7：爱因斯坦引入的宇宙学常数
(图片来自百度百科)



5. 结束语

当然其他的物理常数也很重要，例如玻尔兹曼常数 k_B ，它描述了不规则的热运动，不仅跟统计物理现象有关，而且人们还发现它对生物的存在也非常重要。还有基本电荷大小的常数 e ，为什么每个电子电荷量都是 e 也的确神秘，这直接导致了狄拉克对磁单极子的研究和断言其存在，尽管直到目前并未发现磁单极，另外也导致惠勒认为宇宙中只存在一个电子，但其出现太快而像无处不在似的，既然是同一个电子，当然就是一个不变的 e 了。限于篇幅我们不打算一一介绍其他常数了。

最后，我们对上述详细介绍过的四个常数再做些进一步的阐述，以便尽可能多读者有些深入的理解。

与光速不变常数相联系的爱因斯坦质能关系式，在不确定原理下意味着甚至真空中也充满了虚的正负粒子对的涨落，因此真空下的无限能量似乎对应着无限的质量，而其引力的吸引就会将宇宙卷曲到无限小的尺度^[12]，这为后来为了克服无穷和发散问题而引入重整化提供了必要的概念性基础。

另外，在一种物理终极统一理论的追求下，人们认识到在广义相对论中只能调整引力强度和宇宙常数，但这两个调整不足以取消所有的无穷大^[12]。这说明普朗克常数在逻辑的链条上是必不可少的。这同时也说明了一方面物理逻辑要求这些常数是必须存在和互相制约的，另一方面也是时空和时空中物理事件可以被描述的物理性实在的基础。

还需要着重指出的是，物理常数到底是我们这个宇宙中独有的基本的不变常数，还是其本身也有一定的动力学演化意义上的可变性？这个

问题还没有最终的答案。在还没有完全令人信服的引力量子化理论出现之前，在相对论与量子力学的真正统一实现之前，各种对物理学基本常数非基本和非常数的怀疑将会一直存在，而另一方面，从实用主义或者人择原理出发，我们对这些物理学常数的依赖性和信赖也是有目共睹的。这就好比是一枚硬币的两面，或者说是莫比乌斯带的扭折，我们不会因为其貌似不稳固的常数性而敬而远之，不敢去挑战它的神迹性和权威。相反，人们更倾向于时不时地停下脚步，在它们貌似简单其实深刻的数与理相辅相成的王国里寻找宇宙真谛的蛛丝马迹。

在神性的闪电和人类意识深处的惊雷般的相互作用下，物理学常数就像是哈姆雷特之剑或者斯芬克斯之谜一般有一种自我指涉的命运指针：当一切就绪和条件合适时，物理学常数就是我们生活和思考世界里的大海星辰，也是我们探索广袤宇宙、追寻生命和灵魂终极答案不可或缺的密码！

参考文献

- [1] <https://www.baidu.com/>
- [2] Sakharov A D. Dokl. Akad. Nauk SSSR [Sov. Phys.—Dokl.12, 1040 (1968)].
- [3] Puthoff H E. Gravity as a zero-point-fluctuation force. Phys. Rev. 39: 2333–2342 (1989).
- [4] Verlinde G. On the Origin of Gravity and the Laws of Newton. arXiv: 1001.0785 [hep-th] (2010).
- [5] Verlinde G. Emergent Gravity and the Dark Universe. arXiv: 1611.02269 [hep-th] (2016).
- [6] Becker K, Becker M, and Schwarz J H. String theory and M-theory: A modern introduction. Cambridge University Press, UK, 2007.
- [7] Mukhanov V F and Winitzki S. Introduction to Quantum Effects in Gravity. Cambridge University Press & Beijing World Publishing Corporation 2010.
- [8] Susskind L, Lindesay J. An introduction to black holes, information and the string theory revolution: The Holographic Universe. World Scientific Publishing, Singapore, 2005.
- [9] 阿尔伯特·爱因斯坦 著, 方在庆 韩文博 何维国 译. 爱因斯坦晚年文集. 海南出版社, 海口, 2014: p70–p71.
- [10] 布莱恩·格林 著, 李剑龙 权伟龙 田苗 译. 隐藏的现实. 人民邮电出版社, 北京, 2013: p150–p151.
- [11] 卢昌海 著. 从奇点到虫洞—广义相对论专题选讲. 清华大学出版社, 北京, 2013: p1–p5.
- [12] 史蒂芬·霍金 著, 许明贤 吴忠超 译. 时间简史. 湖南科学技术出版社, 长沙, 2006: p212–p215.



【作者简介】谢柏松, 1965年7月生, 男, 汉族, 安徽桐城人, 理论物理博士。现为北京师范大学核科学与技术学院教授、博导, 研究方向为等离子体物理和强场量子电动力学等, 已发表 SCI 论文 150 多篇。业余爱好诗歌、科学哲学与周易等。