

# 究竟是谁在变——由精细结构常数变化引发的问题与挑战

## Questions Caused by the Fine-Structure Constant and Their Challenges

黄志洵

(北京广播学院, 教授 北京 100024)

### 一、精细结构常数 在自然科学中的重要地位

20 世纪上半期, 电子的量子理论建立起来。设电子质量为  $m$ , 电荷为  $(-e)$ , 真空中光速为  $c$ , 则可算出  $e^2/mc^2 = 2.8 \times 10^{-13} \text{cm}$ , 其值约为电子的经典半径。另一方面, 令  $h$  为 Planck 常数,  $h/mc$  为电子的 Compton 波长。如取两者之比, 则得一无量纲常数:

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{2\pi e^2}{\hbar c} \cong \frac{1}{137} \quad (1)$$

它表征基本电荷相互作用的强弱; 后来发现, 为描写基本粒子与电磁场相互作用的大小必须用  $\alpha$ , 故又称为精细结构常数 (fine structure constant, FSC)。我们知道, 氢原子的超精细结构裂距是指该原子两状态的能量差, 状态一为轨道电子自旋与核质子自旋同向, 状态二为两者反向。把上述裂距与量子电动力学 (QED) 的理论公式相结合可以求出  $\alpha$  的值; 当然也可用别的原子来求值, 故 FSC 具体数值与原子系统有关。从基本物理常数的发展史看, 从 1950 年到 20 世纪末  $\alpha$  值的精确度约提高了两个数量级; 1998 年国际科技数据委员会 (CODATA) 给出的标准值为  $\alpha^{-1} = 137.03599976$ , 精确到小数点后第 8 位。<sup>[1]</sup>

精细结构常数在自然科学中具有重要地位。它决定原子分子的性质, 影响电子与质子的相互作用并决定它们的约束能。如  $\alpha$  太大, 原子、分子将不能存在, 而且恒星也不能形成, 因为其中心温度将过低, 难以造成自身的核反应。若没有恒星, 也就没有地球的诞生和人类的形成。

正如英国剑桥大学的科学家 J. D. Barrow 于 2002 年 9 月在《New Scientist》杂志上发表的文章中所说, 迄今人们不知道  $\alpha$  为什么是现在这个值, 而且更加神秘的是国际科学界已发现了“FSC 异常”, 即  $\alpha$  值在某些情况下发生变化。“常数”不“常”, 这类问题给科学家们带来很大的困扰, 通过理论分析和精确实验来澄清有关矛盾现象的任务已尖锐地

摆在了人们面前。

### 二、FSC 异常的发现

1982 年后的实验, 特别是 1997 年 I. Levine 等人提出的报告, 说明  $\alpha$  随实验中碰撞时的动量转移而变; 具体讲, 高能时的  $\alpha$  值比低能时的  $\alpha$  值增大大约 7%, 即  $\alpha^{-1} \cong 128.5$ 。这一发现立即引起争论<sup>[2,3]</sup>。

2001 年 8 月, 美国《Phys. Rev. Lett.》杂志报道了澳大利亚科学家 J. K. Webb 为首的多国科学家研究组对类星体光线的观测结果<sup>[4]</sup>。众所周知, 类星体 (quasars) 的光谱红移特别大, 按 Hubble 定律推算, 它们距离地球可达百亿光年以上, 故接收和研究类星体发出的光就是收到和研究宇宙诞生后早期发出的光, 它们如今才到达地球。这种观测和研究本身就具有奇妙的色彩。Webb 小组利用设在美国夏威夷的世界最大的望远镜对多个高亮度类星体进行了观测。光通过星际物质时由于吸收而在光谱上出现暗线, 其位置可导致测出  $\alpha$  值。J. D. Barrow 是 Webb 小组的成员之一, 参加研究工作达两年之久。他说: “我们观察不同化学元素的吸收谱线间隔 (它取决于发生吸收时红移中  $\alpha$  的任何微小变化); 由于光是在 50~110 亿年前离开这些星辰的, 把观察到的谱线间隔同现在实验室测到的谱线间隔作比较, 就可以判断  $\alpha$  在过去 110 亿年内有否变化。在两年里, 我们观测了 147 个类星体, 结果大大出乎意料——早期的  $\alpha$  值比现在小了  $7 \times 10^{-6}$  左右”。

文献 [4] 说: 在红移范围观察类星体这一研究方法的优点是可以探测宇宙大部分历史中的精细结构常数值; “有趣的是, 此前一些独立的研究结果支持我们的  $\alpha$  变化趋势, 宇宙微波背景辐射 (CMB) 数据表示在过去  $\alpha$  要小百分之几”。所谓“一些独立的研究结果”主要指 P. P. Avelino 等于 2000 年在《Phys. Rev. D》上发表的文章和 R. A. Battye 于 2001 年在同一刊物上发表的文章, 它们均根据 CMB 观测结果说在宇宙早期  $\alpha$  值比现在小百分之几。

无论是百万分之几或是百分之几, 都表明自宇

宙创生以来 $\alpha$ 是逐年增大的。这就产生了两个重大问题:首先,造成 $\alpha$ 变化的原因是什么?其次,这种变化会带来什么影响?从下面的论述,我们会看到这些问题的回答关系到我们对物质结构、宇宙构成和自然科学基本理论的认识,并表明人类在一些重大问题上至今还相当无知!

### 三、是否电子电荷 $e$ 在变化?

在 FSC 的定义式中, $\alpha$  包括  $e$ 、 $h$ 、 $c$  这 3 个基本物理常数。无论它们之中任何一个发生变化,都会使 $\alpha$ 变化。当然,也不能排除它们之中有两个、甚至 3 个同时变化的可能,这就使问题更趋复杂。为简单计,我们先考虑前一种可能的情况,即  $e$ 、 $h$ 、 $c$  这三者之一未能保持恒定。当然,这对于物理学家来讲也是难以接受的,但在面对新的实验事实时我们不妨从理论上努力去分析和思考,看看能找出怎样的观念和结论。

首先考虑电子电荷  $e$ 。根据 CODATA 于 1998 年推荐的平差值,  $e = 1.602176462 \times 10^{-19} \text{C}$ 。艾小白曾指出<sup>[12]</sup>, W. Pauli 于 1958 年曾从电荷守恒定律论证电子电荷  $e$  是 Lorentz 不变量;而电荷守恒定律不能轻易否定。艾小白认为 Pauli 证明是一种误会,结论为:  $e$  不是 Lorentz 不变量,故不与电荷守恒律矛盾。但倪光炯则认为 Pauli 的论证正确,因为 Lorentz 变换(LT)讨论的是两个作匀速相对运动的参考系,看到的  $e$  确实是 LT 的。总之,倪光炯认为  $h$  和  $c$  作为普适常数是不会变的, $\alpha$  的可变性源于  $e$  的可变性,认为“一个粒子的电荷  $q$  不再是常数了,自然界不存在关于  $q$  的守恒定律”;<sup>[13]</sup>而艾小白虽然同意上述观点的前半部分,却反对其后半部分,认为“跑动的精细结构常数仅仅意味着电子电荷  $e$  不是 Lorentz 不变量”,却不表示自然界不存在电荷守恒定律。

根据公式(1),对照 Webb 等人的实验,如果早期宇宙时的 $\alpha$ 较小是  $e$  引起的,那么早期宇宙时的  $e$  值会较小。2002 年 8 月, P. Davies 等在《Nature》上发表文章<sup>[5]</sup>,运用热力学第 2 定律(关于熵)和黑洞理论进行分析,结果是认为电子电荷  $e$  不会变化。对此,艾小白并不同意,而认为黑洞的存在至今并未最后证实;并且即使存在,不同种类的黑洞是否都带电荷  $Q$ ,这些都还是问题。

### 四、是否 Planck 常数 $h$ 在变化?

根据 CODATA 于 1998 年公布的平差值, Planck 常数  $h = 6.62606876 \times 10^{-34} \text{JS}$ , 归一化 Planck 常数  $\hbar = h/2\pi = 1.054571596 \times 10^{-34} \text{JS}$ 。<sup>[11]</sup>根据公式(1),对照 Webb 等的实验,如果早期宇宙时的 $\alpha$ 较小是  $h$  引起,则早期宇宙时的  $h$  值会较大。

如所周知,1900 年 M. Planck 的工作只是使构成

黑体壁的振子的振动能量量子化,或说他的量子只是一种为导出辐射公式所用的计算工具。1905 年, A. Einstein 则把光量子当作一种物理实在<sup>[6]</sup>,认为量子化是电磁辐射和光在构成上的基本特征。根据 Einstein 的推导,可知 Planck 常数为:

$$h = \frac{R\beta}{N_A} \quad (2)$$

式中  $N_A$  是 Avogadro 数,  $R$  是气体常数,  $\beta = 4.866 \times 10^{-11}$  (据 Einstein<sup>[6]</sup>)。分析  $h$  的恒定性是一个复杂的问题。不妨认为, Webb 等的观测证明了“放出类星体光的原子结构与地球上人类所见的原子结构稍有不同”,然后再从 Einstein 公式入手进行研究。

笔者不久前提出<sup>[17]</sup>:当我们研究早期的稠密宇宙时,不能忽视最初的亚原子规模的随机量子起伏的影响;并且不能排除下述可能,即早期宇宙时光子能量较大,故早期的  $h$  值可能较大。

然而,艾小白在即将发表的一篇英文论文中,针对高能物理实验中发现的“在高动量转移下 FSC 值会增大”进行了研究,从狭义相对论(SR)出发证明了 Planck 常数  $h$  是 Lorentz 不变量。就是说,他认为  $h$  一定不会变,而  $e$  可能会变。

### 五、是否真空中光速 $c$ 在变化?

1972 年,美国标准局(NBS)在光速测量上实现了历史性突破,即以高达  $6 \times 10^{-10}$  的精度对激光实现了光频测量。根据有关研究成果,国际计量局于 1973 年 6 月决定取  $c = 299\,792\,458 \text{m/s}$  作为公认的光速值;同年 8 月,国际天文联合会决定采用。1975 年,第 15 届国际计量大会认可了这个值。1998 年, CODATA 公布的平差表也是这个值<sup>[1]</sup>。

根据公式(1),对照 Webb 等的实验,如果早期宇宙时的 $\alpha$ 较小是  $c$  引起,那么早期宇宙时的  $c$  值会较大。这是相对论学者们最不愿意听到的话,因为 SR 的第二公设便是“光速不变原理”。<sup>[8]</sup>正如大家所知,在 20 世纪末,以英美一些科学家正式提出“光速可变理论”(varying speed of light theory, VSL)为标志,表明反对“光速不变”的声音在增大。J. Magueijo、J. Barrow 和 A. Albrecht 在 1999 年发表的文章“光速随时间而变——宇宙学疑迷的一个解答”中说<sup>[9]</sup>:宇宙学一般理论遵守光速不变假设,故不能解释早期宇宙的均匀性;VSL 理论认为那时的光传播速度比  $c$  大很多,依靠运动极快的光把不同区域联系在一起并使之均匀。……他们企图解释大爆炸理论中的“在极短时间内创生的宇宙就完成了区域密度和温度的均一化过程”的论点。2002 年, H. Sandvik 等在《Phys. Rev. Lett.》上的文章中对遥远天体的某些光谱线确已显示出 FSC 值在宇宙早期时比现在小的现象,也是按照“光速可变”来作解释的。

Webb 小组在 2001 年发表的论文<sup>[4]</sup>也认为:“光

速可能随宇宙演变而变化”，并且对新闻界宣布了估计值——宇宙早期的光速大约比现在高 1%（即  $V = 1.01c$ ）。Webb 小组的文章发表后仅 1 周，剑桥大学举行了有 30 多位宇宙学家参加的研讨会（S. Hawking 也在其中）。会议指出，科学家们可能必须修改某些一直被认为是支配宇宙的法则，“光速恒定不变”即为其中之一。2002 年 8 月，P. Davies 说：“光速可能是不恒定的，它在数十亿年间减慢了”。他认为这只代表相对论的漏洞之一，但其影响与探索不尽的宇宙一样是难以估计的。此外，如果  $c$  不是常数，还会影响到  $E = mc^2$  公式的正确性<sup>[5]</sup>。

笔者同意有的专家的如下观点——包括相对论在内的一些科学理论可能只是今天的“稳态宇宙”时期的理论，而早期宇宙则可能存在光速可变以及超光速（即  $V > c$ ）的情况。今天的科学家在面對大量新的实验事实面前，如何正确地估价和发展现有理论，已是当前刻不容缓的任务。

## 六、为什么这些常数就是这么大？

国际科学界面临的另一个问题是：今天我们已知的基本物理常数为什么就是这么大？或者说，表达物理世界特征的所有可测量无量纲参数原则上是否都可以推算？或，进而断定，它们取决于偶然性因素因而是无法推算的参数！实际上，迄今无人知道这些基本物理常数为什么就是这么大。虽然科学家们已能在实验室中通过非常复杂的技术极精确地确定这些常数，但对其起源仍一无所知。例如，真空中光速  $c$  的精确值是  $299\,792\,458\text{m/s}$ ；但它为什么就不是  $886\,443\,297\text{m/s}$ ？！尽管这些常数（如  $e$ 、 $h$ 、 $c$ 、 $\alpha$ ）是表征宇宙和自然的特征值，我们却说不出其中深藏着的道理。

有一种看法认为：正是这些常数值决定了银河系、恒星这些宇宙构成可以存在的条件，并为生命的诞生和发展创造了前提。但这就像“人择原理”，即把一切存在都看成是为了人类的诞生和存在、发展服务的。

无可怀疑的事实是，地球和人类都不是宇宙的

中心，它们的存在与否对浩渺无边的宇宙而言都无关紧要。其实，正是 A. Einstein 最早思考了这类相关的问题。他风趣地想象“上帝创世”时的情况——在引发大爆炸前，“上帝”坐在控制台前揣摩：“我该把光速定在多少？”“我该给电子带上多少电荷？”“我该怎样给决定量子大小的参数（ $h$ ）取值？”……人们不清楚，“上帝”是经过深思熟虑还是随便抓来几个数字，便创造了宇宙的一切？！

现在是 21 世纪初，科学家们产生了更大的疑虑：某些被称为“基本物理常数”的参数到底是不是常数，是不是会随时间而变？！如果真是这样，那就麻烦了——这些缓变的参数会不会有一天威胁到生命的存在？！这也从一个重要方面映证了基本的宇宙学理论和物质结构理论的重要性。因为只有不断深化对自然本质的认识，才能理解不断出现的新的实验现象，才能正确地认识人类的未来。

### 参考文献

- [1] 刘瑞珉，张钟华，沈乃澄．基本物理化学常数的 CODATA 最新推荐值．物理，2000，29（10）：602~ 609
- [2] 艾小白．“跑动”精细结构常数的物理意义到底是什么．物理，2000，29（4）：244~ 246
- [3] 倪光炯．从事实出发还是从概念出发．物理，2000，29（4）：247
- [4] Webb J. et. al. Further evidence for cosmological evolution of the fine structure constant. Phys. Rev. Lett., 2001, 87（9）：091301 1~ 4
- [5] Davies P, et. al. Cosmology: black holes constrain varying constants. Nature, 2002, 418: 602~ 603
- [6] 爱因斯坦．关于光的产生和转化的一个启发性观点．爱因斯坦文集（第二卷），第 37~ 53 页．北京：商务印书馆，1973（译者范岱年等）
- [7] 黄志洵．精细结构常数的测量和光速的变化．北京广播学院学报（自然科学版），2002，9（4）：1~ 7
- [8] 爱因斯坦．论动体的电动力学．爱因斯坦文集（第二卷），第 83~ 115 页．北京：商务印书馆，1973（译者范岱年等）
- [9] Albrecht A, et. al. Time varying speed of light as a solution to cosmological puzzles. Phys. Rev. D, 1999, 59（4）：1~ 3

（责任编辑 蔡德诚）

（上接第 24 页）

和其他组织也应在自己的范围内制定应对措施，以便最大限度地利用技术融合带来的机遇。

### 5. 更大程度地发挥专家在科技决策中的作用

DOC 和 NSF 这类对重大问题组织专家研讨会的方式，值得我们借鉴。2001 年 5 月 11 日，美国国家科学基金会先召开了一次准备会议，为 12 月份的专题研讨会制定议事日程，确认参会人选，并要求与会专家提供书面论文。当年 12 月，来自各领域的科学带头人和政策制定者在研讨会上就纳米、生物、信息、认知四大技术的融合作演讲并提交书面论文。会后 NSF 又根据与会者提交的论文和对研讨会的总结，汇编成有价值的报告。我国科技部门亦

应联合相关部门，定期组织几大技术领域的专家进行专题讨论，研究科学技术融合的发展趋势，确定当前应重点研究的领域及课题，使我们不是总处于跟随的地位，而是能够及时地发现新问题、察觉新趋势，争取技术融合领域中的主动权。

### 参考文献

- [1] [http://www.wtec.org/Converging Technologies](http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies). Converging Technologies for Improving Human Performance
- [2] <http://www.infocastinc.com/NBIC/nbic.asp>
- [3] <http://www.ccidbiotech.com/wlkj.htm>
- [4] Ottawa's Technology Convergence Opportunity. Ottawa Center Research and Innovation

（责任编辑 蔡德诚）