

谈普朗克质量*

汪世清

(中央教育科学研究所 北京 100088)

摘要 简要介绍了普朗克于1912年提出的三个基本物理量:普朗克质量、普朗克长度和普朗克时间.它们已被列入1986和1998年基本物理常数表.该文只讨论普朗克质量.假定原子核内存在量化的核力场,命名其场量子为“引斥子”,其质量推算出恰好等于普朗克质量.由此可用4个耦合常数定量地描述四种相互作用的强度比,从而还可找到一种测定 G 的新方法.

关键词 普朗克质量,引斥子,耦合常数

ON PLANCK'S MASS

WANG Shi-Qing

(China National Institute for Educational Research, Beijing 100088, China)

Abstract A brief review is presented of three fundamental physical quantities derived by Max Planck in 1912, referred to have as the Planck mass, Planck length and Planck time which had been arranged in the tables of 1986 and 1998 fundamental physical constants. Here we shall only discuss on Planck mass. Suppose that there is a quantized field of the nuclear forces in the nucleus with a quantum unit which we call the attrarepelom with a mass just equal to the Planck mass. Then the intensity ratio of the four mteractions can be described quantitatively by their four coupling constants. A new method can then be found to measure the newtonian constant of gravitation, G .

Key words Planck mass, attrarepelom, coupling constants

早在1912年,德国物理学家普朗克(Max Planck, 1858—1949)在所著《热辐射理论》¹⁾一书中,引用万有引力常数 G 、真空中光速度 c 和普朗克常数 h 等三个基本物理常数,导出质量、长度和时间三个基本物理量,以表示这些量在物理世界的客观规定性.他计算的结果如下:

$$\text{质量为 } (hc/G)^{1/2} = 5.37 \times 10^{-5} \text{ g};$$

$$\text{长度为 } (Gh/c^3)^{1/2} = 3.99 \times 10^{-33} \text{ cm};$$

$$\text{时间为 } (Gh/c^5)^{1/2} = 1.33 \times 10^{-44} \text{ s}.$$

后来就把这三个量分别叫做普朗克质量、普朗克长度和普朗克时间.

1982年9月到1983年6月,在北京举办了一系列“物理学史讲座”,我在“物理学的几个基本常数”一讲中,提到这三个量,并认为“这些量肯定都有各自的物理意义,只是目前尚未为人所了解.”²⁾

1986年,柯恩(E. R. Cohen, 1922—)和泰勒(B. N. Taylor, 1936—)发表“1986年基本物理常数的平差”报告^[1],在该报告的表7“1968年基本物理常数推荐值”中,第一次把这三个量与 c, G, h 一起

列为基本物理常数的普适常数.这说明,这三个量在物理学中的重要地位已为物理学界所肯定.但报告中并未阐述它们的物理意义.

1999年,莫尔(P. J. Mohr)和泰勒(B. N. Taylor)发表“CODATA 1998年基本物理常数推荐值”^[2]一文,在该文的表24中,仍在“普适常数”下列出这三个量:

$$m_p = (hc/G)^{1/2} = 2.1767(16) \times 10^{-8} \text{ kg};$$

$$l_p = (Gh/c^3)^{1/2} = 1.6160(12) \times 10^{-35} \text{ m};$$

$$t_p = (Gh/c^5)^{1/2} = 5.390(40) \times 10^{-44} \text{ s}.$$

上面三式中 $\hbar = h/2\pi$,右边括号内的数字分别为各个计算值的标准不确定度.这就是这三个量的最新推荐值.它们的相对标准不确定度均为 7.5×10^{-4} .

* 2001-08-08收到初稿 2001-12-13修回

1) 此书原有1912年出版的德文本,而笔者所见为1959年出版的英文本 *The Theory of Heat Radiation*. 三个量的计算结果见英文本第174—175页.

2) 见北京物理学会《物理学史专题讲座汇编》(1984年编印内部发行)第283页.

在这三个量中,普朗克质量似乎更能体现物理世界的本质,因而理所当然地受到更多的关注.现在就只谈一谈普朗克质量.这个量是由 G, c, h 的最简单结合而得出的.它的数量级在国际单位制中是 10^{-8} 与宏观量相比很小,是地球质量的 10^{32} 分之一,而与微观量相比却很大,是电子质量的 10^{22} 倍.在物理世界的微观领域,例如在原子核内,如果存在质量如此之大的实体,那它就具有很大的能量,约为质子能量的 10^{19} 倍.这样便很自然地与核力联系起来.如所周知,存在于核子之间而使原子核保持相对稳定状态的是一种核力,它既不同于通常的电磁力和万有引力,也不同于弱相互作用.它的主要特征是:作用距离短,一般小于 10^{-15} m, 强度大,既大于电磁力和弱相互作用,更远大于万有引力;不仅体现引力,而且体现斥力.这就是所谓的强相互作用.

假定在原子核内存在着一种核力场,它对核子既有引力,又有斥力,本质上是一种引力和斥力对立统一的引力场,而且是量子化的,具有一定的场量子.按照这个引力场的特征,不妨把这个场量子命名为引斥子.于是在核子与核力场之间的相互作用,便是由引斥子来传递的,因而也就是强相互作用的传递子.但是作为传递子,它在核力场的作用范围内所具有势能和动能是不断转化的,在表现为势能的瞬间体现着引力,而在表现为动能的瞬间又体现着斥力,故称它为引斥子.

首先应该肯定,引斥子具有质量.令 M_0 表示引斥子的质量.在原子核的范围 ($r = 10^{-15}$ m) 内,引斥子具有最小势能为 GM_0^2/r , G 是万有引力常数.而通过 r 的最短时间是 r/c , c 是真空中光速度.于是结合于引斥子的最小作用量,便是 $(GM_0^2/r) \times (r/c) = GM_0^2/c$.既然引斥子是场量子,这个最小作用量应当等于作用量子 h ,即普朗克常数,因而得

$$GM_0^2/c = h.$$

由此便有

$$GM_0^2 = hc, \quad (1)$$

从而可得

$$M_0 = (hc/G)^{1/2}. \quad (2)$$

以 $2\pi\hbar = h$ 代入(2)式,并在右边除以 $(2\pi)^{1/2}$,便成为

$$M_0 = (\hbar c/G)^{1/2}. \quad (3)$$

用 G, c, h 的最新推荐值代入(3)式,计算结果取5位有效数字(以下计算所得结果均以此为例),即得

$$M_0 = 2.1767 \times 10^{-8} \text{ kg}.$$

很显然,这就是普朗克质量的最新推荐值.由此可得普朗克质量的明确的物理意义,它就是核力场的场量子,引斥子的质量.

现在要问,引进具有普朗克质量的引斥子,能说明什么呢?答案之一是,利用引斥子可以定量地说明四种相互作用的相对强度和它们之间的强度比.

先介绍一个量度相互作用的自然尺度,那就是 $\hbar c$,两个普适常数的相乘之积,自然也是一个恒定的量.在国际单位制中,相乘所得为

$$\hbar c = 3.1615 \times 10^{-26} \text{ Jm}. \quad (4)$$

在原子核内,核子具有的势能随作用距离而变化.作用距离一定时, $\hbar c$ 这一恒定的量可以表示在作用范围内的势能,而相互作用与势能成正比.因此,这一恒定的量可以用作量度相互作用的自然尺度.

先从(1)式说起.从(1)式可得

$$GM_0^2/\hbar c = 1. \quad (5)$$

如前所述, GM_0^2 体现着在原子核内的最小势能,而用 $\hbar c$ 来量度恰好等于1,却是最大.这也就是说,用 $\hbar c$ 来量度强相互作用,正好与这一自然尺度相等.设以 α_0 表示强相互作用耦合常数,按定义, $\alpha_0 = GM_0^2/\hbar c$.而根据(5)式,可得

$$\alpha_0 = 1. \quad (6)$$

这表明,在四种相互作用的相对强度中,强相互作用的相对强度为最大.

再来探讨一下其余三种相互作用.

凡·戴克(R. S. Dyck, Jr.)在纪念英国物理学家狄拉克(P. A. M. Dirac, 1902—1984)70寿辰所写的一篇题为“基本常数和它们的时变”^[3]的论文中,以8个基本常数为基础,导出5个无量纲常数,其中3个为

$$\alpha = e^2/\hbar c = 7.3 \times 10^{-3}, \quad (7)$$

$$\beta = gm^2 c/\hbar^3 = 9 \times 10^{-6}, \quad (8)$$

$$\gamma = Gm^2/\hbar c = 5 \times 10^{-39}, \quad (9)$$

α, β, γ 分别为电磁相互作用耦合常数、弱相互作用耦合常数和引力相互作用耦合常数, e 是基本电荷, m 是质子质量, g 是费米常数.当时采用厘米克秒单位制, g 值取 $1.4 \times 10^{-49} \text{ erg} \cdot \text{cm}^3$. (7)–(9)式的右边就是分别计算的结果.现在分别论述如下:

先说 α , 这是精细结构常数,亦即电磁相互作用耦合常数.在国际单位制中,

$$\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0 \hbar c, \quad (10)$$

式中 ϵ_0 是电常数(原称电容率.)以各量的最新推荐值代入(10)式,计算结果得

$$\alpha = 7.2974 \times 10^{-3}. \quad (11)$$

这表明,两个带电粒子之间的相互作用,如以 hc 来量度,只是这一自然尺度的 10^3 分之一.用(10)式除以 $\alpha_0 = GM_0^2/hc$,即得 $\alpha/\alpha_0 = (1/4\pi\epsilon_0)e^2/GM_0^2$.因为 $\alpha_0 = 1$,所以

$$\alpha = (1/4\pi\epsilon_0)e^2/GM_0^2, \quad (12)$$

这就是电磁相互作用与强相互作用的强度比,即前者是后者的 10^3 分之一.由此可以定义精细结构常数为电磁相互作用与强相互作用的强度比,从而取得一种新的物理意义.

次说 β ,这是弱相互作用耦合常数,亦即费米耦合常数.由于弱相互作用产生于 β 衰变中,因此(8)式中的 m 可以电子质量 m_e 代之, g 则改作 G_F .于是(8)式可化为下式:

$$\beta = G_F m_e^2 c / \hbar^3 \quad (13)$$

G_F 是费米常数,第一次出现在“CODATA1998年基本物理常数推荐值”一文的表24中.在“原子的和原子核的”常数的“电弱”子目录下,列出了“费米耦合常数” $G_F/(\hbar c)^3 = 1.16639 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$.由此得 $G_F = 1.16639 \times 10^{-5} (\hbar c)^3$.经过单位换算后,计算结果是 $G_F = 1.4363 \times 10^{-62} \text{ Jm}^3$.这与费米常数曾取得的观测值 $(1.4350 \pm 0.0011) \times 10^{-62} \text{ Jm}^{3[4]}$ 相符合.

现以(13)式右边的分子和分母各乘以 c^3 ,然后再除以 $(\hbar c)^3$,整理后可得

$$\beta = G_F (m_e c / \hbar^2) \hbar c, \quad (14)$$

式中的 $m_e c / \hbar$ 是康普顿波长 λ_c 的倒数,故得

$$\beta = G_F (1/\lambda_c^2) \hbar c. \quad (15)$$

以 λ_c 的最新推荐值代入(15)式计算,结果是:

$$\beta = 3.0460 \times 10^{-12}. \quad (16)$$

这表明,在 β 衰变中的弱相互作用,如以 hc 来量度,只是这一自然尺度的 10^{12} 分之一.再用(15)式除以 $\alpha_0 = GM_0^2/hc$,便得 $\beta/\alpha_0 = G_F (1/\lambda_c^2) \hbar GM_0^2$.因为 $\alpha_0 = 1$,所以

$$\beta = G_F (1/\lambda_c^2) \hbar GM_0^2. \quad (17)$$

很显然,这就是弱相互作用与强相互作用的强度比,前者只是后者的 10^{12} 分之一.

再说 γ ,这是引力相互作用耦合常数.从(9)式取质子质量 m_p ,即有

$$\gamma = Gm_p^2/\hbar c. \quad (18)$$

用各量的最新推荐值代入(18)式,计算结果是

$$\gamma = 5.9047 \times 10^{-39}. \quad (19)$$

这表明,在核子与核子之间的引力相互作用,如以

hc 来量度,只是这一自然尺度的 10^{39} 分之一.用(18)式除以 $\alpha_0 = GM_0^2/hc$,得 $\gamma/\alpha_0 = m_p^2/M_0^2$.因 $\alpha_0 = 1$,所以

$$\gamma = m_p^2/M_0^2. \quad (20)$$

按(20)式计算,亦可得 $\gamma = 5.9047 \times 10^{-39}$.显然,这就是引力相互作用与强相互作用的强度比,前者是后者的 10^{39} 分之一.由此可定义引力相互作用耦合常数为核子质量的平方与引斥子质量的平方之比.

综上所述,4种相互作用的相对强度,可以用相应的4个耦合常数的数量级来表述如下:

$$\alpha_0 : \alpha : \beta : \gamma = 10^0 : 10^{-3} : 10^{-12} : 10^{-39}.$$

这就说明,在探讨4种相互作用的统一理论中,普朗克质量是一个具有关键性的物理量,而如果在高能物理学的发展中一旦发现具有普朗克质量的引斥子,那就更有着理论与实践相结合的重大意义.那么,在原子核内,能否存在引斥子这样的实体呢?一般说来,引斥子的质量总是蕴藏在具有的势能之中,而势能又是随作用距离成反比变化的.在核力作用范围的尺度(10^{-15} m)上,引斥子具有的势能为最小;设想在普朗克长度的尺度(10^{-35} m)上,引斥子具有的势能为最大.这样,引斥子可能具有的势能,便在 $10^{-21}—10^{19} \text{ GeV}$ 之间.随着高能物理学的发展和精密测量技术的进步,总有可能从原子核内部的运动中,用实验方法在这一能量范围内,测出相应的势能,从而取得普朗克质量的实验值,以证实引斥子的存在.

特别值得注意的是,从上述(12)(17)和(20)三式,都可以从测得的有关基本物理常数来测出 M_0 .例如,从(20)式便可得 $M_0 = m_p/(\gamma)^{1/2}$.如果用实验方法测得 γ ,就可以取得普朗克质量的实验值,以与理论值相比较,而使之得以确认.一旦从实验上测得普朗克质量,便可把万有引力常数 G 与其他基本物理常数联系起来,从而可以另辟途径来测定万有引力常数 G .柯恩在1988年发表的一篇题为“基本物理常数”^[5]论文中曾指出:“量纲分析可以写出 $G = \hbar c/m_{\text{pl}}^2$,这里 m_{pl} 是普朗克质量 $21.77 \times 10^{-9} \text{ kg}$,但这无助于测定 G 值,因为没有独立的方法来测定 m_{pl} .”现在从上面的叙述中可以找到独立的方法来测定普朗克质量,自然也可以用新的方法来测定 G 值了.在基本物理常数的测定史上,无疑具有划时代的重要意义.

就当前 G 的测定工作来看,从1996到1999的4年中,至少已发表了9个单位的9个测定 G 值的结

果(见文献 2 第 1788 页表 13). 这 9 个测定单位和取得的测定结果如下:

德国物理技术联合学院(PTB)于 1996 年测得

$$G = 6.7154(56) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad 8.3 \times 10^{-5};$$

美国洛斯阿拉莫斯国家实验室(LANL)于 1997 年测得

$$G = 6.674(7) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad 1.0 \times 10^{-4};$$

俄罗斯金波特赫发展公司(TB&D)于 1998 年测得

$$G = 6.672(5) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad 7.8 \times 10^{-5};$$

美国国家标准和技术研究所和科罗拉多大学联合研究所(TILA)于 1999 年测得

$$G = 6.6873(94) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad 1.4 \times 10^{-3};$$

中国华中科技大学(HUST)于 1999 年测得

$$G = 6.669(7) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad 1.0 \times 10^{-4};$$

新西兰测量标准实验室(MSL)于 1999 年测得

$$G = 6.674(7) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad 1.0 \times 10^{-4};$$

国际计量局(BIPM)于 1999 年测得

$$G = 6.68(11) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad 1.7 \times 10^{-3};$$

瑞士苏黎世大学(Uzur)于 1999 年测得

$$G = 6.6754(15) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad 2.2 \times 10^{-4};$$

德国伍佩特尔大学(UWup)于 1999 年测得

$$G = 6.6735(29) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \quad 4.3 \times 10^{-4}.$$

由上可知,这 9 个 G 的测定值互有歧异,相对

标准不确定度都较高,说明影响测定精确度的因素,大都未被消除或降低,以致 G 的最新推荐值,宁可采用基本是 P. R. Heyl 和 P. Ckrganowski 1942 年的测定值,见“J. Res. Natl. Bur. Standards”,1942,US29:1—31. 这与当前基本物理常数的测定日趋精密,是极不相称的.

最后还要指出,上述 9 个测定值的相对标准不确定度,数量级有 2 个是 10^{-5} ,5 个是 10^{-4} ,2 个是 10^{-3} . 而采用的最新推荐值, $G = 6.673(10) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ 相对标准不确定度是 1.5×10^{-3} , 在所有基本物理常数中是最高的,而且比 1986 年 G 推荐值的相对标准不确定度 1.5×10^{-4} 还提高了一个数量级. 这显然是不能满意的. 而由此也可以进一步认识到普朗克质量的实际意义.

参 考 文 献

- [1] Cohen E R, Jaylor B N. *Codata Bulletin*, No. 63, Nov. 1986:1—32 (表 7 见第 21—24 页)
- [2] Mohr P J, Tarlor B N. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1999, 28(6): 1713—185(表 24 见第 1809—1813)
- [3] Dyck R S Jr. *Contemp. Physics*, 1973, 14(4) 389
- [4] Lee T D. *Phys. Rev. Lett.*, 1971, 26(13) 801
- [5] Cohen E R. *Fundamental Physical Constants*. In: Sabbata V De, Melnikov V N ed. *Gravitational Measurements, Fundamental Metrology and Constants*. London: Kluwer Academic Publishers, 1988. 74

女物理工作者国际会议简讯

(International Conference on Women in Physics)

由国际纯粹与应用物理联盟(IUPAP)主办的“关于女物理工作者国际会议”(International Conference on Women in Physics)于 3 月 7—9 日在巴黎联合国教科文组织(UNESCO)总部召开. 来自 65 个国家的 300 多名代表参加了会议,其中约 10% 为男性. 会议邀请了世界各地的多位知名女物理学家做大会报告,包括我国教育部部长陈至立(特邀报告,由中国驻 UNESCO 大使张学忠代为宣读). 中国科学院物理研究所吴令安研究员(团长、IUPAP 女物理工作者小组成员)、北京工业大学谢谄成教授、北京师范大学实验中学王敏特级教师、上海交通大学严燕来教授、中国科学院金属研究所隋曼龄研究员、中国物理学会田淑琴副秘书长、中国科协国际部张虹副处长应邀参加了会议.

会议的议题是探讨为什么从事物理学相关职业的女性如此之少的原因以及研究增加女性在物理学领域的比例和影响的发展策略. 会议还特别就六个专题进行了分组讨论. 六个专题分别为(1)吸引女学生学习物理(2)开始成功的物理事业(3)使女性进入国内和国际物理领域的领导岗位(4)改善女物理工作者的工作环境(5)从地区差距中学习(6)家庭与事业相平衡. 与会代表经过热烈讨论,提出了如何增加女性在物理学领域的比例及影响的可能的发展策略,一致通过了本次大会决议. 该决议将提交今年 9 月的 IUPAP 全体代表大会通过. 会议的详细情况请关注后续报道.

(中国科学院物理研究所 吴令安)