

第五种力?

徐德之

物质的运动规律为物质之间的相互作用所支配。到现在为止,人们已确切知道自然界有四种形式不同的力——强作用、电磁作用、弱作用和引力作用。由于电磁作用和引力作用在日常生活中就很容易观察到,所以人们很早就对它们进行了深入的研究,并且有了比较深刻的认识。相比之下,对强作用和弱作用的认识就差得多。尤其是强作用,人们对它的认识或许刚开始。但就在人们认为已认识得很清楚的引力作用中,最近也出现了一些新的现象,使人们对它进行更深入的研究。人们猜测或许存在第五种力,它的作用荷也是物质的质量,但是它在物质之间不是互相吸引的而是排斥的。

我们知道引力作用存在于所有的物质之间,它的作用荷是物质的质量。万有引力定律告诉我们,引力的大小和相互作用的两物体的质量乘积成正比,而与它们之间的距离平方成反比

$$(F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}),$$

但与物质的组成是无关系的。因此两个质量相同的物体在同样的高度上受到地球的引力是相同的,即它们的重量是相同的。于是,在真空中从同一高度降落的一克鸡毛将和一克铁同时到达地面。这种实验已为人们重复了多次。1922年匈牙利的 Baron Roland von Eötvös 用比较的方法来研究地球对质量相同的物质的引力,结果仍然肯定了这种性质。Eötvös 的实验是这样的:把两个惯性质量相同,但组成不同的物质挂于可以转动的平衡天平的两端。如果引力对它们的作用不一样,则天平就会转动。通过测量这种转动就可确定这两个物体所得到的重力加速度之差 Δa 。虽然 Eötvös 的实验结果表明 Δa 不严格为零,而有一个小的分布,但这种分布一直被认为是由于对此体系的微小扰动引起的随机效应。所以 Eötvös 的实验几十年来被看成是惯性质量和引力质量等价的实验证据。

但是近年来的一些研究使一些科学家对这种等价性提出了疑问。他们认为可能存在第五种力。由于它的存在,使得 Galileo 从比萨斜塔实验得到的结论,只是一种近似的结果。实际上一克鸡毛将不与一克铁同时到达地面。

第五种力的存在有理论上和实验上两方面的要求。

理论上,当在超对称性理论中引进引力时,要求除

了有自旋为 2 的引力子传递引力作用以外,还有自旋为 1 和自旋为零的粒子。前者称为引力光子,它使物质和物质互相排斥而物质和反物质互相吸引。后者称引力标量粒子,它使所有的物质互相吸引。这两种粒子是 Joel Scherk, Ken Macrae 和 Cosmas Zachos 首先提出的。

实验上,有三类实验使人们认真地考虑第五种力存在的可能性。

第一类是所谓地球物理测量。澳大利亚, Queensland 大学的 Frank Stacey 在世界各地的矿井和深洞中测量了引力加速度。他发现所测得的引力加速度 G 比实验室中测到的总是高百分之一左右。即使考虑了地球物理测量中的不确定性,这种不一致性也还存在。为了解释这一现象,他假设存在一种新的力,它是一种排斥力,其强度为万有引力的百分之一,力程小于几千米,可能几有几百米。于是在这样的范围内它将抵消掉一部分万有引力而使引力加速度减小。但在深矿井内,由于来自上下左右的排斥力互相抵消,万有引力不被减小,于是深矿井中测到的 G 就比实验室中测到的大。

第二类实验是 Brookhaven 实验室的物理学家 Sam Aronson 和 Chicago 大学的 Gregory Boch 发现的 K^0 介子反常作用。这种反常作用使 K^0 介子的一些基本参数,如长、短寿命 K^0 介子的质量差和寿命差以及 CP 破坏参数 η_{+-} (它是 K_L^0 和 K_S^0 到 $\pi^+\pi^-$ 的跃迁振幅之比)都随能量变化。当然,由于有 Lorentz 收缩,飞行粒子的寿命要比静止粒子的寿命长。但通过 Lorentz 变换变到静止系后的寿命应是确定的,它不应与在变换前的坐标系中的粒子能量有关。但 Aronson 和 Boch 发现事实上不是这样。因而 Lorentz 不变性就成问题了。为了解释这个现象,美国 Purdue 大学的 Ephraim Fischbach 提出当中性 K^0 介子高速飞行时将和一种新的长程力发生作用。这个力和超荷 Y 耦合。由于

$$Y = B + S$$

(这里 B 为重子数, S 为奇异数),所以对普通的原子来说,它正是原子核中的核子数 B 。于是这种新的长程力将正比于 B ,也就近似地正比于原子的质量。但对 K 介子来说, K^0 的 $Y = +1$, \bar{K}^0 的 $Y = -1$,因此周围核子和它们的作用不一样,由此可解释上述反常现象。当然,和地球物理的测量一样,这种反常还没有得到确证。最近, Fermi 实验室的 Winstein, James Cronin 等人想重复这个实验,但没有测到这种反常。

第三类就是 Eötvös 的实验。前面已谈到 Eötvös 认为这个实验更证实了等价原理。但是 Fischbach 和 Hai-Yang Cheng 在分析了 K^0 介子的反常作用后提出了存在第五种力的可能性。由于结合能的不同,单位质量的重子数是不一样的。对元素周期表中部的元

素核子间的束缚最紧,故单位质量的重子数最多;而对周期表两端的元素,核子间的束缚最松,故单位质量的重子数就最少. 第五种力的强度是与单位质量的重子数有关的. 所以 Fischbach 期望对不同的物质,地球的作用力会引起不同的加速度,即 $\Delta a \neq 0$ 不是一种随机效应,而是一种实在的物理效应. 于是他们就着手重新分析 Eötvös 的实验. 他们测量了天平两端的两个比较物体间的单位质量重子数的差 $\Delta(B/M)$, 并利用 Eötvös 测到的 Δa 的值,画出 $\Delta a - \Delta(B/M)$ 图. 在此图上每组实验对应一个点. 他们预期,如果 Δa 只是一种随机效应,则这些实验点将随机地散落在原点附近. 反之,如果测到的 Δa 不是随机效应,则这些点将分布在通过原点的一条直线上,这条直线的斜率将确定第五种力的强度. 由于时光已流逝了 70 多年,当时 Eötvös 所用材料的详细资料已不得而知,试验地点的周围情况也不清楚了,这给重新分析 Eötvös 的数据带来了很大的困难. 如在他的实验中,有一实验点是测量一种叫树根木 (Snakewood) 的木料和铂之间的加速度差. 人们只知道树根木是一种热带植物,却不知道怎样去计算它的 B/M . 后来 Fischbach 费了很大的周折找到了一位保加利亚的 balalaika 琴的制造者,在他的地窖里有许多蛇根木. Fischbach 这才分析出了蛇根木的化学式,从而得到了它的 B/M 数值. 结果发现这一组实验点的确在一直线上. 对其它的实验点也有一些麻烦,但经过 Fischbach 的努力,都得到了重新分析,并且这些点都近似地落在一条几乎过原点的直线上. 图 1 就是 Fischbach 经过重新分析后画出的

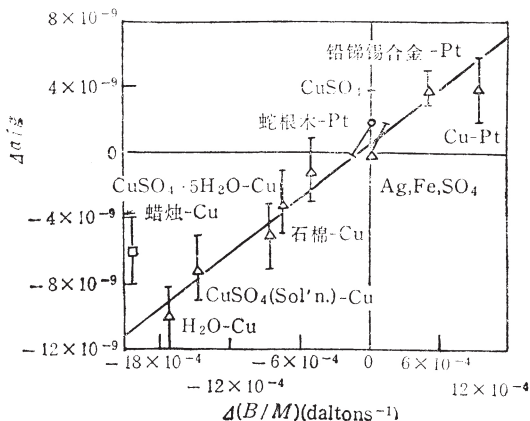


图 1

图. 我们看到除了一个点外,其它的点在实验误差范围内都落在一条直线上. 这表示物质所受的引力是与物质的组成有关的. 这是一种新的力. 如果我们把这个新的力参数化成具有 Yukawa 型位势的力:

$$U(r) = f^2 Y_1 Y_2 e^{-r/\lambda} / r$$

则上面三类实验中的任何一类都无法单独确定其中的两个参数 f^2 及 λ . 但利用任何一类实验都可在 f^2 - λ

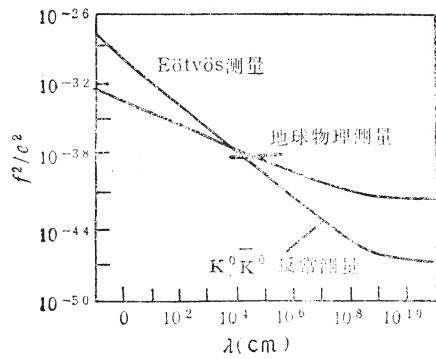


图 2

平面上确定一条曲线. 人们发现三条曲线几乎交于一点 (见图 2). 这个交点确定了这个力的力程为几百米, 而它的强度约为 $f^2/e^2 \approx 10^{-38}$. 这里 e 为电磁作用的耦合常数, 上式中 Y_1, Y_2 分别为两个作用物体的超荷, r 为它们之间的距离. 三条曲线交于一点使人们有理由相信第五种力的存在, 因为这不大会只是一种巧合. Fischbach 的分析, 引起了物理学家们的注意, 他们不再把第五种力看成是无稽之谈, 而开始进行认真的讨论. 在 1986 年 7 月于 Stockholm 召开的第 11 届国际广义相对论和引力理论会议上物理学家们热烈地讨论了如何寻找更广泛和更精确的数据以证实第五种力的存在. 如 Bars 和 Peter Thieberger 建议在悬崖峭壁上重复 Eötvös 的实验. 这时峭壁作用于试验物体上的第五种力将更明显地显示出来. Goldman 则建议测量物质与反物质之间的作用力, 因为第五种力在物质-反物质之间是和物质-物质之间不同的.

近两年来, 人们围绕是否存在第五种力进行着实验和理论的探讨, 特别是正在进行和将要做的实验会告诉人们关于第五种力存在的结论. 如果第五种力确实存在, 那将是轰动物理界的一个重要发现.