

原始 Eötvös 数据的重新分析和第五种力

万有引力定律已发现三个世纪,但迄今对引力常数 G 测定的精确度仍未超过 10^{-3} 。目前 G 最精确的值是从近代经过改良的 Cavendish 类型的实验得出的。在这类实验中,人们是在实验室里测量相距几米以内的试验物体在水平方向的作用力。行星距离以上,在 G 的精度范围内平方反比律已为观测很好地确证。可是,迄今为止,在从几米到几百公里(人造地球卫星的飞行距离)之间还存在一段值得注意的空隙。在这一段距离上,平方反比律并未被仔细验证过。

一、地球物理方法测量 G 的反常结果

为了从地表以上下落的物体加速度 g 中计算出 G ,应当独立地对地球整体的密度分布进行精确的测量。这是难以作到的。但在上世纪中叶 Airy 提出了一种既可确定在中等距离上的 G 而又无需精确测量整个地球密度分布的方法。他证明,如测出由地表到深井中的重力加速度 g 的变化,则仅需了解地壳从地表到井底的局域密度就足以确定 G 值。这些年来,澳大利亚的 Stacey 等人正是用这种地球物理方法来检验中等距离上的万有引力定律的。他们在世界各地的深井中进行过实验。有趣的是,所得到的 G 值均比实验室测得的高出 1% 左右。虽然地球物理测量中的不准确性至少相当于这种偏差的一半,但是由于这种偏差的符号和大小始终保持大体一致,这就给人一种印象:可能还存在着一种迄今尚不知道的排斥力,其强度为引力的 1% 左右而力程为数百米。Stacey 等人在最近发表的论文^[1]中说,一组新的测量更增强了在一千米尺度上牛顿定律可能有缺陷的证据。但他们又表示,因为对地球深处质量不规则性引起的局域的或更广范围内的密度梯度还不了解,仍然难以作出结论。

二、K 介子实验的异常

Fischbach 第一个将这种假设的中等力程的力提到第五种力的高度上来。实际上,他是从完全不同的角度来探讨问题的。他曾和 Aronson, Bock 等人一道试图解释一些很令人迷惑的实验结果。这些结果是早些时候 Aronson 等人在 Fermi 实验室进行中性 K 介子高能相互作用实验时挑选出来的。

在这些实验结果中,中性 K 介子系统的一些基本参数,如长和短寿命的 K^0 介子、 η_{+-} 的质量和寿命之差以及描述 CP 破坏的衰变 $K_{L,S}^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 中的复合参数等,看来都似乎随能量改变。我们知道,衰变的粒子在实验室中的寿命通常和被观测粒子的能量有关。但通过洛伦兹变换变到粒子静止的参照系时,我们确信能得到粒子的正常平均寿命。可是, Aronson 的这些实验资料看起来破坏了这一神圣的洛伦兹不变性。

Fischbach 提出,当高能中性 K 介子穿越实验室时,可能会与周围物质间发生某种比超荷耦合的力程较长的相互作用。正常原子中,超荷(重子数 B 与奇异性 S 之和)等于质子数和中子数之和,大约与原子质量成正比。但是, K^0 的奇异性是 +1 而 \bar{K}^0 的为 -1。Fischbach 猜测,由于两种中性 K 介子和周围物质间有相反的长程耦合,这也许可以解释 K 介子参数对能量的异常的依赖性。

和 Stacey 的实验一样,中性 K 介子异常也并非实验上确认的结论。Aronson 在实验中的主要合作者 Winstein 就表示,这些数据还不能构成存在 K 介子异常的可靠依据。近来, Winstein 和诺贝尔奖金获得者 Cronin 在 Fermi 实验室所作的实验也未证实这种中性 K 介子异常的存在。

三、经典 Eötvös 实验的再分析

如果存在一种与超荷耦合的力，或更一般地存在一种与重子数和奇异性的某种线性组合有关的力，则它可以表现为对引力在中等距离上的修正。这种修正与 Stacey 认为他们在地球物理实验中所发现的那种力类似。由于周期表中部的核束缚最强，每单位质量的重子数最多，而当过渡到两端的氢和铀时则逐渐减少，可以预期，这种假设的中程力对标准万有引力的修正对不同物质略有不同。这使得 Fischbach 等人想到本世纪初 Eötvös 等人所作的验证等效原理的经典实验。

任何悬挂在地球上的质量，都沿引力和地球转动所产生离心力的合力方向下垂。等效原理要求物体的引力质量和惯性质量严格地成比例，而与物体的组成无关。在中等纬度处沿东西向放置的扭秤两端分别放置不同材料的二平衡质量，如果此二试验质量的惯性质量与引力质量之比有任何差异，则在扭秤的悬丝上就会有力矩作用。这就是 Eötvös 实验的基本思想。所有课本上都告诉我们，实验结果证明，等效原理在 10^{-9} 精确度内被证实是正确的。

Fischbach 从完全不同的角度考虑 Eötvös 型实验。他想，如果两个试验物体的单位质量重子数相差足够大时，Eötvös 型实验应探测到与重子数有关的中程力产生的力矩。他首先调查这类实验在 Eötvös 之后是否有人以更高灵敏度作过。发现，Dicke 等人曾重复过 Eötvös 实验。但他们的实验是用来比较试验物对太阳的加速度的。而太阳对检验力程仅为几公里的力来说是太远了。这样，Fischbach 等人被迫更仔细地考察原始的 Eötvös 实验。如取这种力的势为汤川型

$$U(r) = +\beta Y_1 Y_2 e^{-r/\lambda} / r,$$

其中 r 是超荷为 Y_1 及 Y_2 的二质点间的距离。仅由地球物理实验或中性 K 介子实验都不能精确确定强度 β 或力程 λ 。但是，这两种实验的结果却能够在 β - λ 平面内用两条曲线表示。此二曲线的交点的 λ 约为数百米而 β 约为

$10^{-38} \times e^2$ ，其中 e^2 为电磁作用的耦合强度。当距离远小于 λ 时， $+10^{-38} e^2$ 表示在通常粒子间比引力弱一百倍左右的排斥力。

Fischbach 等人假定原来 Eötvös 可以探测到小至 10^{-9} 的与牛顿加速度的偏离，则由计算可以在 β - λ 平面上得出一条表示该实验灵敏度极限的曲线。令人惊奇的是，此曲线通过非常靠近地球物理实验和中性 K 介子曲线的交点处(图 1)。这三条不同来源的曲线都经过 β - λ 图上接近相同的位置，暗示了从原始 Eötvös 实验数据中能获得的新东西都会与另外两个实验一致。这给了 Fischbach 等人对 Eötvös 实验进行认真分析的动力。他们的分析是根据 Eötvös 原始文献中发表的数据来进行的。这些文献中列出了进行比较的一对物质，和由扭秤读出来的重力加速度之差 Δa 。他们以 Δa 和一对被比较物质的单位质量重子数之差 $\Delta(B/M)$ 为坐标作图(见图 2)。如果对超荷力的猜想是正确的，实验数据给出的点应形成一条过原点的直线。

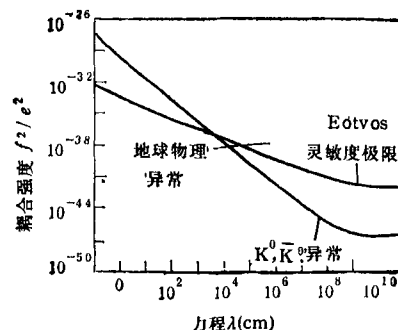


图 1 猜想的第五种力的力程和耦合常数

这种对 Eötvös 实验进行重新分析的工作是细致的而且需要耐心的。工作中出现过一系列的曲折。例如，在 Eötvös 表中记录有蛇根木与铂比较的数据。但却不知道是什么样的蛇根木。直到后来他们从一位保加利亚移民处得到了保存多年的蛇根木，并对它进行化学分析后才确定出相应点的位置。又如，在 Eötvös 数据中还有比较铂和溴化镱的结果。此结果对 Fischbach 等人的分析带来更多的问題。最初，

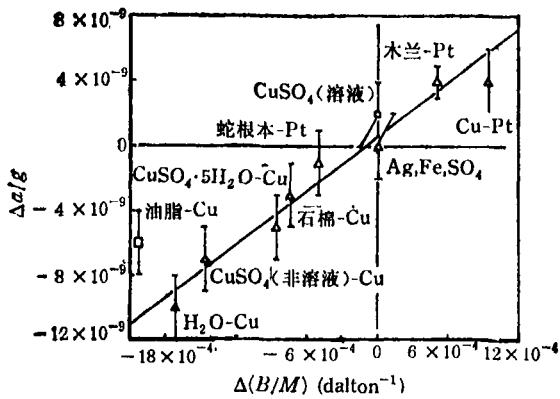


图2 用 Eötvös 实验中进行比较过的一对对物质的数据画在 $\Delta a - \Delta(B/M)$ 图上的分布

他们考虑到放射性生热可能产生扰动从而舍弃了这一点。但是，批评者指出 Pt-RaBr₂ 将有可能导致 Eötvös 实验结果的不自洽。因为少量 RaBr₂ 是放在铜容器中的，这一数据实质上是在比较铂和铜之后得到的。Eötvös 数据表中已有 Pt-Cu 的数据并且和 Pt-RaBr₂ 的值很不相同，这是一个严重的矛盾。Fischbach 等人不得不又回到原始数据中去。最终，发现 Eötvös 在将读数换算为 Δa 时弄错了一个符号。正是这样一个点一个点的分析，随着每一个点都落在预期的直线上时，Fischbach 也随之愈来愈自信。

四、局域不均匀性对 Eötvös 实验的影响

当他们关于 Eötvös 实验的重新分析一文^[2]一发表，立即引起广泛的注意并激起了一个从理论上和实验上对此进行研究的热潮。从这些研究中立刻发现，将地球物理参数与 Fischbach 公式结合所得 $\Delta a - \Delta(B/M)$ 图上直线的斜率比由 Eötvös 数据所得的要低一个量级。而且更糟的是，斜率的符号表明附加的力不是预期的排斥力而是吸引力。

原来 Fischbach 等人在处理 Eötvös 实验对力程有限的力的响应时，所采用的基本公式有错误。为了方便，他们在分析 Eötvös 资料时假定地球是理想球体，而只有力程为无限大时才是恰当的近似。对中程的第五种力其起因应

是邻近的地表。如果局域条件是轴对称的，将不会有任何力矩作用在悬丝上^[3]。因此，第五种力在 Eötvös 实验中产生的任何效应都应来自局域条件的不均匀性，例如建筑物、地下室和岩层与理想大地水准面的偏离等。Fischbach 等人又开始从地球物理资料来重新计算 Eötvös 斜率。在 λ 约为 200m 时，墙壁、地下室和邻近建筑物的情况变得至关重要。例如，一个地窖是排斥力源场中的一个空洞，它表现为产生吸引的物体。计算所得斜率的符号甚至可能取决于地窖在左边还是右边。基于对 Eötvös 进行实验时局域情况的大致了解，Fischbach 等人计算了和 Eötvös 数据符合的直线的斜率^[4]。所得斜率的符号变得正确了，而其数值比由地球物理实验获得的仅大三倍。目前，Fischbach 正计划对 Eötvös 的实验室及其周围环境作进一步的更仔细的实际了解。此外，他们的计算尚未考虑局部地表与理想大地水准面的偏离，而这也许比人工建筑物的结构更为重要。

五、新的实验研究和理论上的猜测

上述分析把注意力集中在很早以前的实验上。在没有新观测资料时，这不失为迈出了大胆的一步。更重要的自然还是目前和将来的实验研究。1986年6月在斯德哥尔摩召开的第十一届国际广义相对论和引力会议上的情况表明，对第五种力的实验研究正在迅速开展起来。会议的报告中包括用引力地平水准仪，自由落体，Eötvös 型装置和 Cavendish 型装置来对第五种力进行研究的计划方案，其中有的已经开始进行。但在当时尚无任何实验取得实质性结果。理论和粒子物理学家们又是怎样对待第五种力这一问题的呢？力程为百米量级的排斥力，暗示了有一种质量非常轻 (10^{-9}eV) 的矢量玻色子 γ_V (被称为超光子)。理论物理学家对这种粒子是否存在，倘若存在应当在理论上如何表现出来都存在着各种不同的看法。

欧洲联合核子中心的 De Rújula 指出^[5]，从近代夸克味的观点来看，超荷是有些过时了的语言，它并不具有确定的量子数。他认为应

该以质子数和中子数的线性组合取代它。他和另一些理论物理学家还指出,在寻找理论上假定的另一种很轻的粒子——轴子(axion)时,曾进行过带电K介子衰变的实验。这一衰变过程是 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm + X$, 其中X表示质量极小的中性粒子。此实验观测所确定的上限,排除了与超荷直接耦合而又具有地球物理实验所确定的参数的力存在的可能性。可是,Fischbach 争论说,如果将超荷推广为重子数和奇异性的某种线性耦合 $B \cos \theta + S \sin \theta$ (其中 θ 为特定的 Cabibbo 式的混合角),而且当 θ 取得很小时,有可能将预期的 $K^\pm \rightarrow \pi^\pm + \gamma$ 的反应率降到与轴子观测的实验相符。当然,如果 θ 太小,则理论上与中性K介子实验数据将完全没有联系。Fischbach 希望,可以找到一个适当的 θ 值,能使带电K介子衰变和中性K介子实验结果协调起来。更喜欢存在一种新长程力想法的另一些理论物理学家,倾向于这种作用不和奇异性之类的不守恒量子数耦合,或者它在相同“荷”间是吸引而非排斥。这种观点抛弃了对新矢量玻色子的需要。Bars 和 Visser 认为第五种力只与重子数耦合,但却希望有质量很小的新矢量玻色子。Bars 声称^[6],从十维超弦理论的一种五维简化模型上,他们发现在紧致到四维时将会产生一种质量很小的矢量玻色子。它与通常夸克间的耦合常数很小,此耦合常数等于典型的夸克质量与普朗克质量 (10^{19}GeV) 之比。这恰好和地球物理数据所得的接近相同。

Nussinov 等人则更倾向于第五种力是交换标量 Goldstone 玻色子产生的吸引力。1985年他们曾指出^[7],弱电和强子相互作用的标准理论可得出存在一种除符号外与 Fischbach 所提出的力并无什么区别的长程力。他们论证说,排斥力与标准理论矛盾。目前,地球物理数据明显倾向于排斥力,但 Eötvoš 斜率却涉及地下室位置之类的问题而难以肯定地限定第五种力的符号。Nussinov 在 Fischbach 的文章发表之后又指出^[8],尽管假设的第五种力极弱且其量子也非常轻,但其质量和耦合常数之比 m/f 的值(约为 100GeV)却是我们熟悉而又有

启发性的。此比值接近传递弱作用的中间玻色子的质量,也接近于给出这些中间玻色子质量的 Higgs 粒子的质量。这启发 Nussinov 想到,超光子可能从同样的 Higgs 机制中获得质量。假如这些并非数值巧合,它们就暗示我们,第五种力与弱电力标准模型间有某种深刻的联系。

另一些理论物理学家的考虑是沿着另一个方向。他们注意到第五种力与引力的相似性,质子质量与 G 的乘积约为 $100f^2$ 。有一类引力理论,其中会自然地出现对广义相对论的修正。这种修正的量级为 1%。Moffat 提出的理论^[9]就是一例。这一理论的优点是能清楚地给出可以在新一代 Eötvoš 实验中检验的预言。这种理论预言存在一种与费米子数耦合的张量吸引力,它随距离按 r^{-5} 变化。即使局域地表是理想大地水准面,这种非汤川型的力也会在 Eötvoš 扭秤上产生一力矩。还有一些物理学家对第五种力持怀疑态度。Glashow 归纳说,不令人信服又未被进一步实验所证实的K介子数据,取决于地下室情况的 Eötvoš 实验的重新分析以及误差达两倍方差的地球物理反常,由此编出的第五种力的故事我很难相信。

第五种力的提出已引起各方面的注意。但目前无论在实验或理论上都还难以有明确的结论。相信在不久的将来,新一代实验的结果和更进一步的理论探讨将会给出明确的答案。

(邓祖淦编译)

参 考 文 献

- [1] S. Holding et al., *Phys. Rev. D*, **33**(1986), 3487.
- [2] E. Fischbach, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56**(1986), 3.
- [3] D. H. Eckhardt, *Phys. Rev. Lett.*, (1986), to be Published.
- [4] E. Fischbach et al., to be published in Proc. 2nd Conf. on Interactions Between Particle and Nucl. Phys., Lake Louise, Canada, May, (1986).
- [5] A. De Rújula, CERN preprint TH. 4466/86, (1986).
- [6] I. Bars, M. Visser, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986), 25.
- [7] D. Chang et al., *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 2835.
- [8] S. Nussinov, *Phys. Rev. Lett.*, **56** (1986), 2350.
- [9] J. W. Moffat et al., Univ. Toront. Preprint, March, (1986).