

# 寻找第五种力

## ——牛顿定律要作修正吗？

苏联科学院通讯院士 E. Александров

**原编者按** 现代物理学确认，所有观察到的形形色色的自然现象，都可用四种基本力，即引力、电磁力和强、弱两种核力的相互作用来解释。目前物理学家正在试图建立这样一种理论，它能够将所有这些相互作用统一起来，并且将参与相互作用的所有可能的基本粒子也统一起来。换言之，当今一代的学者们正在严肃思考一种“大统一理论”（爱因斯坦毕生渴望建立的大体上正是这种理论）。突然间，1986年初，一组美国物理学家，发表了与这种将所有自然界的相互作用都统一起来的想法很不协调的见解。他们说，在自然界还可能存在着另一种力，即第五种力，其基础性丝毫不亚于已知的相互作用的传统“四人合奏”。当然，如果新的力确实存在，那将可能导致令人惊奇的现象：例如，由于它的缘故，在介质阻力“消失”的真空中，羽毛可能比铅块或铁砧向地面落得快些。此外，如果在自然界存在着这种力的话，则严格说来，无论是牛顿的万有引力定律，还是作为广义相对论基础的爱因斯坦等效原理，都不能成立（见 Наука и жизнь, No. 2—4(1987)）。因此，一些有利于说明“第五种力”存在的认真的论据，定会引起科学界的轰动就很容易理解了。关于这些论据究竟有多么认真，著名苏联物理学家，苏联科学院通讯院士 E. Александров 在下面的文章中作了阐述。

30年以前，每位好的物理学家在浏览科学杂志时总觉得内疚——本应该阅读，而不是浏览。现在，当他浏览文章的标题时同样感到内疚——阅读标题仅仅在自己的科研方向范围内才能做得到。

不过也存在这样一些课题，它们的诱惑力是如此之强烈，以致即使现在也仍有一些文章能吸引住所有专业的物理学家的视线。引力就是此类课题之一。引力是为人已知的基本力中的第一个力，它最弱而同时又最有威力，它无所不在而同时又几乎完全逃避了对它的研究：实际上所有关于引力相互作用的现有实验数据，在上个世纪的教科书上就都已经有了。

在引力研究中理论早就超前于实验，后者暂时还应付不了给它提出的课题。引力波地发现就是其中最驰名的问题。它具有非同寻常的难度，想解决此问题的尝试已经持续了几十年。可是现在在引力问题上似乎出现了由实验抓住新发现的主动权的良机：从1986年1月6日起，在文献中便热烈地讨论着一些有利于说明存在着引力的前所未有的分力的证明。实际上现在可以这样来提出问题：在自然界是否存在第五种力？

及时刊载物理学最重要新事物的前沿物理学杂志 The Physical Review Letters 所发

表的一组美国物理学家的文章，成了探讨此问题的开端。

下面就是探讨的具体内容。

正象在中学里所教的那样，两个相隔一定距离的质点质量相互吸引。这种吸引遵守牛顿万有引力定律（见图1）。行星围绕太阳的运动受这个定律的控制，就是其中实例之一。牛顿定律的绝妙优点之一是惊人的简单：为确定牛顿物体间的引力，只需知道它们的质量及其间距就行了。甚至为描述破碎成小团粒的牛顿物体的运动，用此定律也足够了。

图1 牛顿定律

两个质点质量  $m_1$  和  $m_2$ ，其间距为  $r$ ，相互吸引的力为

$$F_N = G_0 \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

式中  $G_0 = 6.67 \times 10^{-8} \text{cm}^3 \text{g}^{-1} \text{s}^{-2}$  为引力常数。

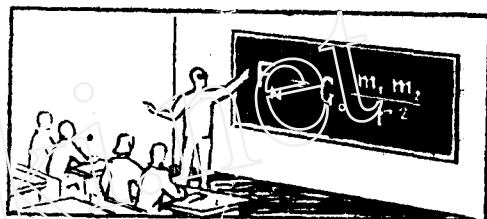
“常数”一词表示数值不变之意。确实，物理学家认为  $G_0$  是普适的，即在宇宙间的所有点上它的数值完全一样，正是  $G_0$  确定引力的强度。如果用牛顿定律来评估基本粒子间引力相互作用的能量，例如，两个质子，其间距为  $1 \text{fm} = 10^{-13} \text{cm}$ ，则此能量为  $U = -G_0 \frac{m_1 m_2}{r} \approx$

$1.7 \times 10^{-42} \text{erg} \approx 10^{-36} \text{MeV}$ ，也就是说，差不多是两个质子在此间距上的静电（库仑）相互作用的  $1/10^{36}$ 。换言之，在基本粒子相互作用过程中，引力实际上没有任何影响。但是，当物体间的距离为天文学数字时，引力就“大翻身”了，此时电磁相互作用已变得微乎其微。

至于引力对距离的依赖关系，则牛顿定律被天文观测以极高的精度（达  $10^{-8}$ ）所证实。而引力数值大小的量度，即万有引力常数，是在实验室中测量的，不过其精度要小得多，小数点后第三位是否可靠已值得怀疑了。但是今天，怀疑的阴影已落到第一位数上，甚至连无可非议的引力对距离的依赖关系也成问题了！

在很久以前理论家就已经讨论过引力的抽象的非经典模型了。为尝试揭示引力偏离牛顿定律的原因，在许多国家进行了引力对距离依赖关系的精细测量。结果表明，在物体间距为  $1 \text{cm}$  至  $10 \text{m}$  的范围内，引力常数以千分之几的精度保持不变。而在间距小于  $1 \text{cm}$ ，以及间距为  $10 \text{m}$  至数万  $\text{km}$  的范围内，原则上存在着偏离牛顿定律的可能性。

在缺乏实验事实的情况下，所有关于非牛顿引力的理论实际上都是无对象的。但在前面提及的那些文章发表之后，该问题就升级为现实物理课题了。上述 *Phys. Rev. Letters* 杂志中那些文章的作者们所依据的原始材料，是不久前发表的，在矿井的不同深度上对自由落体加速度的多年的测量结果。在矿井周围的地质结构知道得很清楚的情况下，这些测量数据提供了独立确定引力常数的可能性，而其结果比实验室中用卡文迪什秤测得的数据约大  $1\%$ 。在此基础上，上述文章的作者们提出了存在斥力的假说，斥力的作用半径为  $200 \text{m}$  左右，力的大小与物质的重子数成正比。此后他们通过与经典实验数据作比较来检验这个假说。结果表明，理论与实验的一致令人印象深刻，从而在科学界引起轰动和极热烈的反响；只经过半年时间就已经接着发表了  $10$  篇左右的论文和简讯，其中大部分文章是关于采用新方法检验此



假说的建议。不过，在谈论检验假说之前，需要哪怕只是稍微讲一下假设存在的新力的本质。

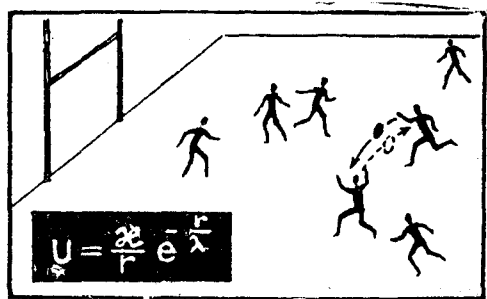
根据现有的概念，所有自然界中已知的力都是由于相互作用物体间交换某种粒子所引起的。这时相互作用的势能是所谓的“汤川势”（见图2），而力的作用半径与传递相互作用的粒子的静质量成反比。电磁力和引力是由静质量为零的粒子——光子和引力子传递的，从而对应于无穷大的作用半径。换言之，在这里不存在随距离增大而以指数规律下降的力；磁场和引力场都是远程作用场。与上述两力不同，使核子保持在原子核中的核力，以及与原子核的 $\beta$ 衰变有关的力（弱相互作用），则是由交换又重又大的粒子，即强子和矢量玻色子引起的，从而使得它们成为作用距离非常短的短程作用力；它们只在原子核内部显现其影响，而在原子核之外，在宏观物体世界里，它们从不“露面”。按照这种概念系统，由假说引进的“第五种力”的存在，要求有这样一种粒子，其静质量非常非常之小，不过终究还不等于零。为使此力的相互作用半径是数百m，这种粒子的质量应该比电子的质量小15个量级！物理学还从不知道有这样的一些粒子，不过找到第五种力正好预示这些粒子的发现。由此可见，引力定律与基本粒子物理之间原来存在着密切的联系。

图2 汤川势

量子物理与经典物理差别很大。它们之间最重要的差别之一，是对于物质的两种形式，即实物和场的不同的理解。在经典物理中，宇宙是由在空间中按牛顿定律运动着的实物的小团粒和场所组成，后者对置于其中的“试验”粒子施加力的影响。虽然场和粒子在经典物理中可以用相互作用的复杂链条联系起来，但宇宙物理图象的这两个基元，却始终是有根本区别的。

量子理论抹掉了粒子与场之间的差别：物质的点状小团粒变得“模糊”了，而它们的行为则由波动方程来描述；在经典物理中认为是连续的场，例如电磁场，具有了粒子的性质（出现了光子）。这样很自然地产生下述问题：若在量子理论中场和粒子是如此地相似，那么一般说来是否存在某种原则来将物质区分为这两种基元呢？基本粒子物理，或者按现在通用的名称——高能物理，给出了这个问题的答案：存在着场粒子的集合或谱，同属一个集合的场粒子，通过相互交换另一集合的场粒子即力的载体或相互作用的传递者，而发生相互作用。例如，带电粒子间相互交换光子，这样就产生了电磁相互作用，此处光子就是场的量子，该场将实物的带电粒子相互联系在一起，瞬时牛顿超距作用不复存在。

原子核中的质子和中子以完全相同的方式相互“粘合”在一起。与电磁相互作用相比，其差别在于核力的传递者，即“粘合”原子核的场量子具有相当大的质量。正是由于这个原因，核力才成为如此的短程作用力：质量越大，粒子就越接近于经典的点粒子——粒子的“模糊度”越小，从而力的作用半径也就越小。光子没有质量，因此电磁力的作用半径为无穷大。核力的势能通常用图中的公式来描述，其中指数函数前面的因子



表征相互作用的强度，而指数函数的指数表征力的作用半径。这个表达式通常称为“汤川势”，它是日本著名物理学家汤川的名字命名的。汤川在1935年提出了存在着传递粒子——介子，其质量介于电子质量和质子质量之间。1947年在宇宙线中发现了这种现在称为 $\pi$ 介子的汤川粒子。

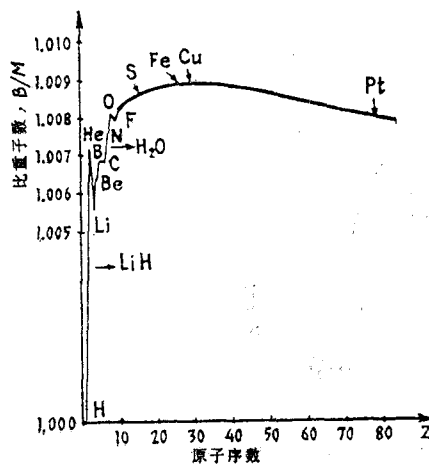
在图中画出了通过相互交换的方式进行相互作用的模型。两个运动员在橄榄球比赛场上，由于相互传球而组成了能攻破敌方防卫的稳定对。换言之，这两个运动员由于交换相互作用的传递者而象一个整体在空间存在着和移动着。

任何形式的相互作用都涉及物质的一定特性，即每种力曳引着自己的吊钩。对于电力，它是物质的电荷，对于经典的引力，它是质量，并且此质量的起源可以是任意的。（顺便提一下，由于这个缘故，引力也稍稍作用于光，因为光具有能量，从而也就具有质量。见 Наука и жизнь, No. 3, 4 (1987).) 根据假定，新的力类似于核力那样作用于物质的重子数，或者简单地说，它只决定于物体中质子和中子数目的总和。这个情况应该作为新力与经典引力的补充区别条件（与对距离的依赖关系并列），因为经典引力作用于质量，而质量并不与重子数成比例。确实如此，虽然质量首先依赖于物质中的重的核子数，即重子数，但是质子与中子的质量稍微有差别，因而在总数目相同时，或者象物理学家说的那样，在给定重子数的条件下，总质量依赖于质子数与中子数的比例。此外，在原子的质量中还包含没有重子数的电子的质量，而且还要从前者中减去“质量亏损”——原子核中的核子相互作用能量以及向原子核吸引电子的能量。

正是揭示出的这种差别被所讨论文章的作者们当做实验发现新力的基础：由于在质量和重子数间没有比例关系，因而可以预料，对于质量相等而元素成分不同的物体来说，假说中的斥力将是不一样的。此预言反过来使假说要承受非常严酷的考验。问题在于，从伽利略时代起，引力与化学成分无关的论断，已经受过许多次精度总是在不断提高的试验的“检验”。今天，关于引力与相互吸引物体的化学成分无关的论断，已认为是不容置疑的事实，它已成为引力质量与惯性质量等效原理的基础。而等效原理本身又已被爱因斯坦作为广义相对论的基础（见 Наука и жизнь, No.2—4(1987)）。因此，新假说立刻就有了某种“异端邪说”的色彩。

图3 比重子数与门捷列夫表中元素序号的关系

比重子数即重子数与原子质量之比，取氢元素的此种比值为1。位于周期表中间的元素的那个比值变得最大。因此，与“第五种力”的假说相一致，对于此类实物，它们的斥力也最强。位于周期表“边”上的元素，其上述比值要下降千分之几。所以可以预期，在其他条件相同的情况下，不同成分物体的相互引力，可能相差十万分之几（ $<0.01\%$ ）。显而易见，精确地测量如此之小的差值，是实验物理学的困难课题。

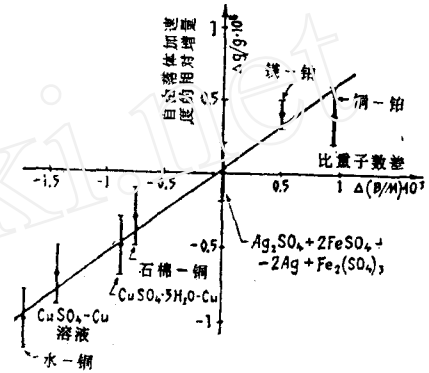


为了检验新假说的生命力，需要估计一下该假说所预期的，因物体成分不同而产生的引力的差别，并将此估计值与最精确的实验结果作比较。

首先，立即就很清楚，尽管所要寻求的斥力成为——甚至按日常生活的理解——牛顿引力的可以觉察的部分（约为1%），但在研究补加的斥力时被测的量却要小得多。实际上，我们打算比较的不是斥力和引力，而是不同成分的物体间斥力的差别。事实上斥力本身比此差别要大好些倍。为了证实这一点，需要计算一下不同元素的重子数对原子质量的比值，然后将它们加以比较（见图4）。

图4 不同实物对的自由落体加速度的相对差值随它们的比重子数差值的变化关系

图中给出了测量结果的均方散布。重子数差值为零的实验点，对应于将反应物混合物（硫酸银和硫酸亚铁）与反应产物混合物（金属银和硫酸亚铁）作比较的情况。



### 非牛顿引力模型

在这些模型中，两物体相互作用的势能  $V(r)$  通常表示为两项之和（第一项为牛顿势能项  $V_N(r) = -G_0 \frac{m_1 m_2}{r}$ ，第二项为补加的能量项  $\Delta V(r)$ ，后者随距离按指数规律下降）：

$$V(r) = V_N(r) + \Delta V(r) = V_N(r) (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

其中参数  $\alpha$  确定引力补加分量的相对影响，而  $\lambda$  是这样的“相互作用半径”，当  $r = \lambda$  时补加分量下降为其最大值的  $e^{-1}$  倍。当距离非常大，即  $r \gg \lambda$  时，这种相互作用变为纯牛顿型的，从而自动地与天体力学一致。当距离非常小，即  $r \ll \lambda$  时，相互作用在形式上也是牛顿型的，只是此时应该用常数  $G = G_0(1 + \alpha)$  代替纯牛顿定律的  $G_0$ 。

实际上在实验中进行比较的不是两物体间的相互引力随物体成分的变化，而是试验物体与非常大的第三物体间的引力。伽利略首先做了这样的实验，他测量了不同成分和不同重量物体向地面的自由落体加速度。如果牛顿定律正确的话，即如果物体的重量严格地与其质量成比例，则自由落体加速度应该是常数。正是这样的结论被伽利略以千分之几的精度证实了。

在此类实验中，最高的精度是由 В. Б. Брагинский 和 В. И. Панов 于 1971 年在莫斯科大学做的实验中获得。在这个实验中，自由落体加速度的差别被限制为加速度本身值的  $10^{-12}$ 。遗憾的是，由于 Брагинский 和 Панов 测量的是试验物体向太阳的自由落体加速度，因而其结果不能用来检验所讨论的假说。换言之，在他们的实验中所研究的相互作用

物体间的距离是如此之大，以至按指数衰减的斥力的影响应该完全消失。

因此假说的作者们转向纯“地球上”的实验，即转向匈牙利知名学者罗兰德·冯·埃特维什(1848—1919)的实验研究。在埃特维什的实验中，将离心力与重力作了比较。这里的离心力与地球旋转有关，且作用于地球上的任何物体。此实验持续了10年之久，其详细总结报告是在埃特维什死后，由他的同事Д. Пекар和Э. Фекете于1922年发表的。这个报告以高达 $10^{-8}$ 的精度证明了任何物体的自由落体加速度为常数而载入物理学史中。不过，对埃特维什小组的上述报告仔细研究表明，在实验数据中仍然发现了不同物体的自由落体加速度存在着很小的，但统计学上有意义的差别。例如，曾证实水在自由下落时，其加速度比铜的小亿分之一，即小 $(1.0 \pm 0.2)10^{-8}$ 。但是因为对于其余9对试验物体，类似的差别更小，同时没有发现此差别与物体的化学成分有任何逻辑联系，所以埃特维什的同事们未能以应有的注意力采集所发现的偏差值，而只是限于断定在 $10^{-8}$ 界限以外没有影响的结论。然而，正是在自由落体加速度上的这些细微的差别，吸引了1986年1月份Phys. Rev. Letters杂志中文章的作者们的注意力。

通过重子数来产生相互作用的假说提供了线索，借助于它可以试着对埃特维什的实验结果的杂乱无章之处进行整理分析。图4中复制了上述文章的曲线。图中给出了一组试验物体的加速度差的测量值随这些物体的比重子数差值的变化关系。由图中可见，埃特维什的测量结果明显地集聚在通过坐标原点的一条直线附近，而按第五种力假说的逻辑推理，也正应该如此！

应该承认，图4使人产生了深刻的印象。对于每一试验实物对，测量结果的散布范围很大，但是对于不同的试验实物对，测量结果却相互支持，从总体上看，这些结果是很令人信服的。可信程度可以定量地予以表征。例如，如果假定图4中的实验数据以偶然的方式偏离其零点真值，则此假定的正确性概率不超过百万分之一。

不过说到可信度，不得不注意不同情况，其中也包括那些超出精确科学范围的情况。当实验者想找到某种现象时，总是存在着对随机误差和系统误差作有倾向性的解释的危险性。正如心理学家委婉地陈述的那样，这种危险性的程度与论证理由的综合水平和实验者的个性有关。（所以在重要情况下，学者们感兴趣的不仅是实验工作本身的详细情况，而且还包括进行此实验的人的情况。）不言而喻，在所提及的实验中，类似的倾向性问题并不存在——该实验是在提出上述假说70年以前完成的。

不过现阶段对埃特维什的实验结果的整理是可能有倾向性的。对已提及的Phys. Rev. Letters杂志1986年1月份文章的作者们的此类指责，在同一杂志的6月号上就已经出现了。事实是，图4中给出的并不是埃特维什的全部实验数据，有3个试验实物对的测量结果被丢弃了。在被丢弃的实物对中，两个实物对含有化学成分不确定的实物——炼过的油脂及“蛇木”。这种不确定性正是排除掉这些结果的原因。在化学成分不确定的因素中也包括作者们指出的，这些材料中可能含有水。而批评者则认为，动物油脂的化学成分以及木材的成分是

1) 与伽利略不同，埃特维什没有直接测量自由落体加速度。他采用了非常巧妙的方法。该方法是基于利用卡文迪什扭秤——悬于极细的线上的秤杆，在其端部悬挂着试验物体。当改变秤底座相对于子午线的方向时，悬线将旋转相应的角度。自由落体加速度之差就是根据此角度的测量结果计算的。

足够确定的，所以应该计及这些数据。同时，结果表明对于图4的直线关系，这些补加点在在第一篇文章中用到的点符合得差些。究竟观察到的效应在多大程度上与理论所预期的一致，也是受到批评审查的问题。已经提到过，如果物体间的距离远小于“第五种力”的作用半径，则预期的不同成分物体所受引力的差别可以达到10万分之几。可是在 $\Theta_{\text{TBEM}}$ 的实验中，试验物体被地球吸引，后者的半径比“第五种力”的作用半径要大3万倍。这意味着，只有最靠近试验物体的地球表面层对斥力才有所贡献，而牛顿引力却是由地球的全部质量引起的。这个情况又减小了加速度的预期差值约为同样的3万倍之多。精确地计算这种效应实际上是不可能的，因为计算结果强烈地依赖于试验物体附近地球表面及其内部的质量分布图。对于均质球的地球模型来说，预期的效应是 $\Theta_{\text{TBEM}}$ 的实验值（指的是图4上直线的倾角）的1/16。

此外，正象批评者们所声称的那样， $\Theta_{\text{TBEM}}$ 的结果有利于证实存在引力的分力，不过此分力不是斥力，而是吸引力。愈来愈严重了！确实如此，例如在 $\Theta_{\text{TBEM}}$ 的实验中水比铜下落得慢些，可是重子斥力假说所预言的正相反（见图3）。Phys. Rev. Letters杂志1986年1月号文章作者们在该文中没有对此矛盾进行讨论，不过他们在该杂志的6月号文章中解答了这个问题。他们对批评者解释说，在 $\Theta_{\text{TBEM}}$ 的实验装置四周的局部质量积聚（例如实验台外壳体壁），可能在很宽的范围内改变效应的大小，包括改变其正负号。一切都决定于局部质量的大小，决定于它相对于试验物体的位置以及相对于子午线方向所处的位置。在 $\Theta_{\text{TBEM}}$ 秤旁有大块岩石的极限情况下，秤的指示数已经不再与物体受地心的吸引力及地球旋转有关，而是直接反映不同试验物体被吸向岩石的引力的差别。并且，若岩石的大小为假说的力的作用半径量级，则此差别可能达到10万分之几，从而比 $\Theta_{\text{TBEM}}$ 记录下来的效应要大几十倍。

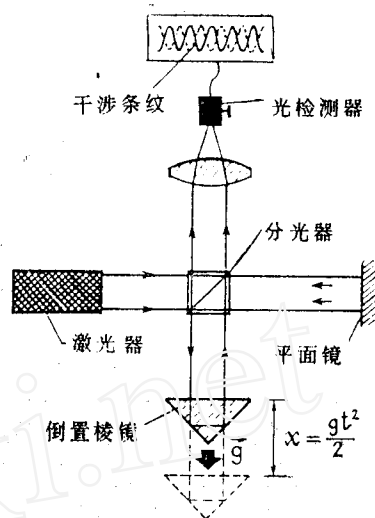
由此可见，争论表明，在 $\Theta_{\text{TBEM}}$ 型的实验中（在他们独特的实验安排中），无论效应的正负号，还是其数值大小，都不能作为检验重子斥力假说的有代表性的征兆。对假说有利的论据，只是效应存在本身以及它与试验物体化学成分的有规律的联系。

总之，有两个确定的迹象表明存在“第五种力”，它引起相距不太远的任何物体间产生斥力效应。第一个迹象与地球物理的研究有关，由于此途径要求的工作量极大，所以在近期内很难指望将会补充新的资料。相反，由复查 $\Theta_{\text{TBEM}}$ 旧实验工作引起的第二个迹象预示将有迅速的发展。已经就专为检验重子假说的新实验提出了建议。例如有的作者建议采用激光重力仪（见图5）来直接测量自由落体的加速度，即在现代水平上来重复伽利略的实验（见Наука и жизнь, No. 4 (1987)）。遗憾的是，这种实验还不能马上就做：首先需要将重力仪的精度提高约100倍，而这是相当复杂的工作。

或可试试检验斥力对距离的依赖关系：使两个由不同材料制成的重物在天平上平衡，然后将天平抬离地面比如说1km高，看看平衡状态怎样变化。不过为此需要有分辨率为 $10^{-9} - 10^{-10}$ 的天平。而现有的最好的天平的分辨率为 $10^{-8}$ 。这又意味着要制作还不曾有过的仪器。看来，最现实的途径是修改 $\Theta_{\text{TBEM}}$ 实验，使其在岩石壁附近进行实验测量。不过就连在这里也不能期望会轻而易举地成功。在这条途径上研究人员要转向200年前由库仑和卡文迪什发明的扭秤。遗憾的是，现代强有力的实验技术在这里能够提供的帮助是意外地少，因而不得不几乎在同等的水平上与物理学的祖辈们竞争。

图 5 激光重力仪

它可以是迈克耳孙干涉仪(见Наука и жизнь, No. 3 (1987)), 它的一个光学“臂”是可移动的, 比如它可以是能自由落下的棱镜。当棱镜下落时, 两股在相互垂直方向上传播的相干光束的光程差发生变化, 从而对落在光检测器接收面小区域上的光强进行周期性调制。通过电子线路图换算出“闪光”数(干涉条纹的位移), 便可以求出自由落体的加速度。



最后, 讲几句关于假想中发现第五种力的意义。不言而喻, 第五种力的出现, 对于地面上的力学实际上不会有任何影响, 对于天体力学就更是如此了。在物理学中一般也可以这样说。唯一例外的是基本粒子物理, 或者象现在常说的, 高能物理。对高能物理来说, 发现“第五种力”就象是开辟了新纪元。在这个对物质有最深入的知识领域中, 会继续一个有辉煌成就和伟大希望的时代。在不久前成功地创立了电磁相互作用和弱相互作用的统一理论以后, 高能物理已经预先感受到未来的胜利——创立所有基本力的统一理论。新假说不能直接列入现有关于未来统一理论的草图中去, 因此实验上发现第五种力, 对统一理论的探索方向可能导致重要的改变, 而且也可能给这种探索以新的决定性的推动力。从事将实验的事实拼凑成宇宙统一图案的理论物理学家们, 满怀期望等待着现尚或缺的可能是关键性的分幅图。不过, 由于大发现罕有出现, 因而上述那些期望是与自然会有不信任感混在一起的。最近的将来会表明, 是物理学整个基础上的偶然的阴影, 还是深入内部的暗道的线索, 吸引了研究者的注意力。

唐锦荣译自: Наука и жизнь, 1 (1988): 50—55. (沈 青校)