

关于第五种力的研究

Research on the Fifth Force

杨新社

(中国科学院地球物理研究所)

刘易成

(中国科学院高能物理研究所)

提 要 第五种力是物理学中提出不久,且尚待进一步研究的新型中程力。因其效应微弱,不易检测,所以目前尚未定论。尽管其效应微弱,但其存在性却意义重大。本文简要概述第五种力研究若干方面的进展。

牛顿引力反平方律是严格的吗?

自牛顿发表他的名著《自然哲学的数学原理》,正式提出万有引力定律或牛顿反平方律以来,人们对引力本质的认识在不断加深。在其后的几百年间,牛顿引力定律在阐明月球与行星运动方面取得了一系列成功,海王星的发现使牛顿理论达到了顶峰。牛顿引力理论已成为现代天文学和现代重力学的理论基石。

但是,在解释水星近日点进动问题上,牛顿理论第一次遇到了困难,这曾使纽科姆(Newcomb)在1895年一度怀疑牛顿反平方律的严格性。直到爱因斯坦创立了广义相对论,水星近日点的(多余)进动问题才得到了圆满的解释。

爱因斯坦从一个全新的角度来研究引力问题,他从广义协变性出发,于1916年完成了广义相对论的研究,提出了著名的场方程。广义相对论的弱场极限就是牛顿理论,因此广义相对论并未推翻牛顿反平方律,而是正确地指出了这个定律的适用范围。当引力场很强时,必须考虑广义相对论效应;在人类活动通常所能触及的范围内,引力场都极其微弱,反平方律应是严格成立的。因此,广义相对论是加强而不是削弱了人们对牛顿反平方律的信赖程度。

但和牛顿理论一样,爱因斯坦理论中也出现了一个不随时间和距离变化的万有引力常数G。

因此,1937年狄拉克(Dirac)的“大数假设”首次给出了G随时间变化的一种可能理论;而富吉(Y. Fujii)和朗(D. R. Long)则研究了G可能随距离变化的问题。这种“变引力常数”理论实质上意味着牛顿引力反平方律不再严格成立,而应存在微小的“偏离”。朗于1976年用实验检验他的“变引力常数”理论,并宣称测到了对引力反平方律的偏离,其偏离值约0.2%左右。朗的实验使世界上关于G与距离的关系及牛顿反平方律的严格性问题的研究活跃了起来。

自然界中仅有四种基本相互作用力吗?

自然界中已发现的基本相互作用共有四种:万有引力作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用,对应于这四种相互作用的力分别称为引力、电磁力、强力 and 弱力。这四种相互作用差别很大,不同的粒子参与不同的相互作用。重子和介子参与四种相互作用,因其参与强相互作用而被统称为强子。轻子只参与弱相互作用和电磁相互作用,其中中微子只参与弱相互作用。光子只参与电磁相互作用。强作用和弱作用为短程相互作用($< 10^{-15}$ 米),引力作用和电磁作用为长程相互作用(可大到宇宙尺度)。那么自然界中仅有这四种相互作用力吗?存在第五种相互作用力吗?关于这一问题的研究可以追溯至1971年富吉的工作,并很自然地与牛顿引力反平方律的严格性这一关

键问题联系了起来。

早在70年代初,当试图将引力与其它三种基本相互作用力统一起来时,富吉从粒子物理和统一场论的研究中就假定有力程在几十米到几公里的范围内,引力对牛顿反平方律的偏离。奥汉朗(O'Hanlon)从度规理论出发,也得到了与富吉相同的结果。这激起了人们研究新型基本相互作用力和检验牛顿反平方律严格性的热情。1977年迈克尔森(Mikkelsen)、布里尼柯夫(Blinikov)则从太阳物理和星系结构的实际资料分析中得出,这种偏离远小于10%,从而与朗的实验结果相呼应。然而,1979年帕诺夫(Panov)等人的结果并不支持这个结论,同时,斯皮洛(Spero)和纽曼(Newman)等人的更精确的扭秤实验,似乎以更高的置信度否定了朗的实验结果。

然而,事情并非如此简单。1981年,斯特西(Stacey)等人在深约1公里的矿井中测定了不同深度的重力加速度和各层岩石的密度,以此来检验牛顿反平方律,结果发现有近0.8%的偏离。斯特西的工作是继朗之后第二个表明引力作用可能偏离反平方律的实验。特别值得注意的是,这一工作检验的是千米尺度上的引力常数,而且是这一尺度上的唯一检验,它不能被斯皮洛和纽曼的高精度实验(实验尺度为米级)所否定。

1986年,菲施巴赫(E. Fischbach)等人则重新分析了半个多世纪前的厄缶(Eotvos)实验,提出了第五种力存在的可能性,相继出现了一系列寻求这一新型相互作用力的实验。这再次激起了人们研究新相互作用和检验牛顿反平方律的热情。

第五种力理论简介

菲施巴赫根据对朗、斯特西、厄缶实验的重新分析及 $K^0 - \bar{K}^0$ 介子的实验结果指出,可能存在一中程力的作用,使引力作用偏离牛顿反平方律。如果存在这样的中程力,且假定该力是与超荷或更广泛地与重子数和轻子数的线性组合相耦合,则其一级近似就可解释上述各实验结果。由于不同材料的单位质量所含的重子数、轻子数不尽相同,因此,不同物质材料可能因这一中程力的作用而对常规反平方律有不同程度的偏离,但这种偏离甚小。

菲施巴赫将这一中程力的作用用汤川型势

$$U_5(r) = \pm f^2 Y_1 Y_2 e^{-r/\lambda} / r \quad (1)$$

表示。其中 r 是两个带荷 Y_1 和 Y_2 的质点间的距离, f^2 是力的作用强度(正、负号分别对应于矢量和标量相互作用), λ 是作用力程。由于这一中程力的作用之大小与材料成分相关,与通常的引力、电磁、强

和弱相互作用不同,故称之为“第五种相互作用力”,简称“第五种力”(the Fifth Force)。

考虑到第五种力的作用,两点间的引力——第五种力作用势可写成:

$$V(r) = -\frac{G \infty M m}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda}) \quad (2)$$

其中, G_∞ 是 $r \rightarrow \infty$ 时的万有引力常数, α 为第五种力对常规牛顿引力的相对强度参数, M, m 为参与作用的两质点的质量。菲施巴赫的早期分析给出: λ 约200米, α 约为-0.0075,即第五种力应是一种排斥力。

显然,对 α 有三种情况:

1. 若 α 与物质成分无关,则附加的作用项也与成分无关,只与质量有关,这种附加作用力也纯属引力作用。其结果是引力作用偏离了严格的牛顿反平方律。这时,这一中程力可等效地化为“变引力常数”,从而与奥汉和朗的理论相一致。

2. 若 α 与成分有关, $\alpha = \xi \left(\frac{Y}{\mu}\right)_1 \left(\frac{Y}{\mu}\right)_2 = \xi C_1 C_2$ 。 ξ 为常数, $\left(\frac{Y}{\mu}\right)$ 为物质荷 Y 与以氢核 m_H 为质量单位的质量数 μ 之比,近似为1,但不同物质材料的 (Y/μ) 不同。 C_1, C_2 称为“成分荷”,即与物质成分相关的一种荷。 α 与成分相关,表明这一中程作用已不是纯引力作用,而是一种新型相互作用。故有时文献中也相应地称为“非牛顿力”或“成分相关力”。

3. 若 $\alpha < 0$,表明第五种力是排斥力,其作用机制可能来源于矢量场相互作用;若 $\alpha > 0$,表明第五种力是吸引力,其作用机制应起源于标量场相互作用。目前的实验尚未能表明第五种力究竟是排斥力还是吸引力。

第五种力的效应及其意义

虽然,第五种力的效应极其微弱,但其存在的意义却很重大。第五种力的存在首先表明,自然中除已有的四种基本相互作用外,还应存在第五种基本相互作用,甚至第六、第七种……基本相互作用。这说明人类对自然界本质的认识在不断深入。其次,第五种力的存在将对天体质量、引力常数 G 、重力加速度等产生影响;同时,对天文学、地球物理学、大气物理学甚至宇宙学也将产生深远的影响。它还为现代物理学理论的“大统一”提供了一条新的研究途径。

下面对第五种力的几个典型效应作一简要说明:

1. 第五种力对等效原理的影响

等效原理是爱因斯坦广义相对论的重要基础,对等效原理的检验在物理学,特别是引力理论中,占有相当重要的地位。上世纪末和本世纪初厄

厄缶用一种零实验在实验室内以 10^{-9} 的精度验证了惯性质量和引力质量的等价性。众所周知,厄缶实验的检验结果成为爱因斯坦建立广义相对论的最基本出发点。60年代,狄克(Dicke)等改进了厄缶实验,将检验精度提高到 10^{-11} 量级。厄缶-狄克实验被认为是引力实验中最重要、最精巧的实验之一。但是由于实验体的结合能仅占总质量的不足 10^{-27} 量级,因此,这些实验被认为仅是对弱等效原理的检验。

现在,由于激光测月精度的提高,检验强等效原理已成为可能。由于地球的引力结合能已占其自身总质量的近二十亿分之一,如果强等效原理不成立,则月球轨道将会发生扭曲,其扭曲幅度用现代技术已可能测出。这方面的测量工作在过去的20多年中有了一定的进展,例如,1976年的测月资料的分析所得结果能在 10^{-11} 量级(95%的置信度)上与强等效原理和广义相对论的预言很好地符合。

但是,正如诺得维特(Nordtvedt)所指出的,仅当无其它干扰力,如非常微弱的成分相关的第五种力存在时,这种检验在一定程度内才是精确的。那么,在什么精度上能使我们确信第五种力不影响月球和地球相对太阳的加速度,从而掩盖了对强等效原理的破坏呢?从布拉金斯基(Braginsky)和厄特-沃什(Eot-Wash)1988年的最新分析结果来看,至少在 10^{-13} 的量级上第五种力对强等效原理无实质性影响或无破坏性。也就是说,如果第五种力对强等效原理有影响,那么其效应将在 10^{-14} 或更小的量级上才能表现出来。这还有待于更高精度的实验来证实。

2. 第五种力对自由落体运动的影响

由于第五种力与物质成分有关,即相同质量而不同材料的两物体,受到的引力作用可以相同,而受到的第五种力的作用则不同,因而,在重力场中的同一点,不同材料的物体的自由下落加速度将会略有不同。例如,两个大小相等、质量相同的铅球和铜球,由于这一第五种力效应,在地球引力场中二者的自由下落加速度将会有 5×10^{-9} 米/秒的差异,而这一差异用现代的重力测量技术已可能测出。法勒(Faller)的双落体实验正是在这种思想的基础上进行的。

依此原理,可以设计出一系列实验来检验第五种力的存在。除法勒型实验外,还有蒂伯格(Thieberger)的浮球实验、斯塔布斯(Stubbs)的旋转扭秤实验和博因顿(Boynton)的扭摆实验等。但到目前为止,此类实验因实验误差和信号同量级,因而尚未能给出较明确的结果。科学家们仍在积极努力提高实验精度,以期在不久的将来能有所突破。

3. 第五种力对现代重力学的影响

如果第五种力存在,则引力定律将偏离严格的反平方形式,地球物理学和天文学中,由牛顿严格反平方律计算的重力效应势必会有偏差,而必须进行第五种力的修正。

利用第五种力是中程力的特点,可以很容易地计算出地球对地面上空高 h 处的测点的第五种力的影响为 $240e^{-h/\lambda}$ 微伽,显然,在地面上($h=0$),第五种力贡献约为240微伽。可见,第五种力的贡献随高度呈指数变化。这样,若测出不同高度的重力值(目前微重力测量的精度已达5微伽级),并考虑到地球物质分布的不均匀性引起的局部重力异常、日月潮汐、地下水起伏等影响因素,就可确定出第五种力的大小,此种测量法即为埃克哈特(Eckhardt)等所用的高塔重力法。

虽然第五种力为中程力,且其效应微弱,但它对局部重力异常产生影响(量级在1毫伽以下),对区域异常却无影响。因此,在进行微重力测量的近区地形改正时,要视具体的研究对象来决定是否进行第五种力修正。一般来说,微伽级的重力测量应考虑第五种力的影响才能确保结果的精度。有关第五种力对地球物理测量的影响(如对大地水准面异常的影响在毫米量级)的问题尚须作进一步的研究。

除了第五种力的上述效应外,近来人们还讨论了第五种力对引力红移的影响,更有趣的是勒卡米(Recami)等发现有限作用程的“第五种力”居然与宇宙常数 Λ 会有着某种内在联系,这方面的理论问题仍在积极探索之中。

第五种力的实验检验现状

自从菲施巴赫正式提出“第五种力”概念以来,国际上一直在努力寻求其实验证据。目前,已有近20个实验结果呈现出来。这种寻求第五种力的实验可以分成两大类:一类是寻求成分相关效应的引力实验;另一类是寻求引力作用随距离偏离牛顿反平方律的实验。从目前已有的实验看,第一类的代表实验有斯塔布斯的扭秤实验(1987)、博因顿的扭摆实验(1987)、蒂伯格的浮球实验(1987)、法勒的双落体实验(1987)及斯皮克(Speake)的天平实验(1988);第二类的代表实验有斯太西的矿井实验(1981)、艾克哈特的高塔实验(1988)、安德(Ander)的砧井实验(1989)与穆勒(Muller)的水库实验(1990),以及笔者所做的高塔重力梯度实验(1991)等。综合分析这些众多的实验结果,我们发现,大多数物质成分相关的实验没有发现第五种力的可靠证据,而大多数地球物理实验则显示出相互不一致的正结果。许多

人对地球物理方法的实验结果提出了质疑,其中包括汤姆斯(Thomas)和笔者等人,在另外的同类独立实验中没有观测到非牛顿引力的证据。最近,艾克哈特等人改进了当初的分析方法使其结果也能与牛顿引力定律相一致。

国内开展这方面的研究相对较少,起步也晚些,但仍有一些可喜的或有希望的实验在积极开展中。如我国旅英学者陈应天在卡文迪什(Cavendish)实验室所进行的实验,用圆柱体作实验源,以高精度否定了朗的结果;张平华等人的实验是一个类斯皮洛实验,但其实验安排具有更好的对称性和抗干扰性,而且是在斯皮洛的工作发表前确定他们的实验方案的,遗憾的是受其它条件的限制,没有达到方案应有的实验精度。本文第一作者提出了共振扭摆环方法,目前在积极进行中,其实验精度可望有较大的改善。本文第二作者等人的双频激光落体法,其实验精度可望远高于法勒的双落体法,但激光差频与第五种力效应有耦合,不易分离,目前在积极解决此方面的技术关键问题。另外,罗俊等人的共振引力实验也是一个有希望的实验。

真的存在第五种力吗?

从前述的各实验结果看,各实验条件及实验精度相差很大,所得结果也很不一致,没有一个实验能始终令人信服地观测到了第五种力存在的证据。有些实验,如艾克哈特的高塔实验和蒂伯格的浮球实验,起初发现有异常大的第五种力信号,但后来却发现是由其它因素(如温度梯度或密度不均匀或地形起伏)所引起的假象。所以,关于第五种力的存在性问题目前尚不能过早地下定论,因为如果各实验均能以较高的置信度和很高的信噪比测出稳定的第五种力信号,并与理论预言的信号值量级一致,则可以说第五种力是存在的;如果各实验在实验精度内没能观察到第五种力信号,也不能排除其存在的可能性,这也可能表明第五种力的信号比理论预言的要弱,目前的实验精度达不到所致,更何况第五种力理论的预言值有一定范围的可调节性呢。

值得一提的是,尽管我们相信第五种力是有可能存在的,并且目前的实验尚未能排除其存在性,但实验结果所表征的第五种力强度不像非施巴赫理论所分析的那么强,其强度可能为引力作用强度的0.1%,甚至还要弱得多。尽管从第五种力的发展简史看,它经历几次起落,但对其存在性的实验检验在国际、国内仍是有一定“热度”的前沿课题,并在积极进行中。我们期待着在不久的将来能有所突破,无论是证实或否定其存在,它在科

学史上的价值和在寻求四种基本相互作用之外的基本相互作用上的意义都是非常重大的。

(责任编辑 刘先曙)

(上接第49页)

大幅度降低(吨钢煤耗降至800~900公斤非焦煤),劳动生产率及品种质量大幅度提高,钢铁工业的投资大量降低,冶金工业将变为无公害的工业。所以在下一轮世界性的钢铁工业技术竞争中,我国如果要想不被淘汰,必须认真对付下一个年代技术进步的挑战。在今后的10年,不必急于扩大产量,不必引进国外即将或已经淘汰的二手设备,而应更加注意对新技术的开发和掌握。在建设用高新技术武装的新厂的同时,逐步淘汰落后的亏损厂。希望国家技术决策部门能认真抓住这一历史性的机会,作出用高新技术武装我国钢铁工业的战略决策。

五、独立自主和引进相结合

独立自主地发展高新技术是各个先进工业国家都遵循的方针。但是在国际市场日益开放的年代,独立自主和引进也可以是互补的。例如日本,50年代引进氧气转炉技术,与之同时,开发了大量经改进的专利,并用到生产上去,形成自己的技术。这对我们是有益的经验,值得借鉴。南朝鲜的钢铁冶金工业发展的经验更证明了这一点。

在此,也应着重指出,由于冶金企业投资较重,在现有企业基础上进行技术改进仍将有很大的发展,如高炉富氧喷煤粉,铁水、钢水炉外精炼等新技术均应尽早掌握,使现有流程能日臻完善,增强其竞争能力。这里的大量科技工作,均应依靠国内技术力量来实现。

在熔态还原及近终形连铸方面,必要时可以引进一些装备,但必须建立自己的开发研究队伍,拟定总体的战略步骤。目标是针对我国具体条件,开发出在未来国际竞争中有生命力的新流程。最先进的技术不可能永远靠引进来实现。

当前,我们国家高度重视科学技术的发展,并大力推进各生产部门的技术进步。有鉴于这一形势,希望于在本世纪的最后十年里,钢铁工业的发展不着重于增加产量,而大力增加科技的投入,把钢铁工业中的高新技术抓上去,以使钢铁工业在下个世纪从品种、质量、消耗、成本各方面接近甚至跃居世界先进水平。

(责任编辑 宋义荣)