

What is the nature of gravity?

引力的本质是什么?

秦成刚, 邵成刚, 涂良成*

华中科技大学物理学院, 基本物理量测量教育部重点实验室, 武汉 430074

* 联系人, E-mail: tlc@hust.edu.cn

2016-08-29 收稿, 2016-09-21 修回, 2016-09-22 接受, 2017-04-28 网络版发表

国家自然科学基金(11325523)资助

摘要 自然界存在4种基本相互作用力, 其中电磁、强、弱相互作用能够成功地进行量子力学描述, 但是由广义相对论描述的引力却和量子理论不协调. 本文从量子力学和广义相对论出发, 讨论了对引力进行量子描述时出现的矛盾, 同时介绍当今比较有希望解决这个矛盾的超弦理论对这个问题的解释, 最后对引力基本性质的实验检验情况作简单介绍.

关键词 引力, 标准模型, 超弦理论

大自然存在4种基本作用力: 强力、弱力、电磁力和引力. 20世纪70年代, 物理学家已经能够对强力、弱力和电磁力进行量子力学的描述, 但是在对引力量子化的时候却遇到了巨大的困难, 引力和量子力学不协调, 具体表现在当结合两个理论计算的时候出现无穷大. 现在的问题在于: 引力的本质是什么? 怎样才能将引力和量子理论结合于一个框架中.

1915年, 爱因斯坦发表了爱因斯坦场方程建立的广义相对论, 对何为引力给出了解释. 在广义相对论中, 时空是连续并且光滑的, 引力不是一种力, 而是时空弯曲的体现. 更为具体的说明是, 在广义相对论的图像中, 时空是连续而且光滑的, 物质和时空会相互影响, 这个体现在了爱因斯坦的场方程上, 物质的存在会导致它周围时空结构发生弯曲, 而同时物质又是在这弯曲的时空中运动, 它走的是弯曲时空中“直线”. 一幅比较经典的类比图像就是, 一张橡皮膜上放一个重球, 橡皮膜的结构因重球发生扭曲凹陷下去, 假如以某一初始速度在重物附近的膜上释放一个小玻璃珠, 玻璃珠的运动轨迹将会是曲线, 在玻璃珠的初始速度和方向都适当的情况, 玻璃珠将

会绕着重球做圆周运动. 这样, 根本不存在引力这种力, 经典理论中仅受引力作用的物体的运动, 在广义相对论中解释为物体在弯曲的时空中走测地线. 2015年9月14日LIGO的两个探测器首次探测到了短暂的引力波信号^[1], 验证了广义相对论对引力波存在的预言. 引力波是时空的涟漪, 对它的成功探测让科学家更加确认了广义相对论的正确性.

标准模型中, 电磁力、强力、弱力都有最小的组成粒子, 分别是光子、胶子和弱规范波色子(W和Z波色子), 这些粒子是没有内部结构的最基本的粒子, 为它们所组成的力提供了微观的传递机制, 力就是这些最小组成粒子的传递. 例如, 电磁场是由一群光子组成, 两个带电粒子的电磁力实际上就是两个带电粒子在不断地相互交换光子的效应. 和宏观图像不同的是, 异性带电粒子交换光子产生的是相互吸引的力, 同性带电粒子交换光子产生的是相互排斥的力. 强力和弱力也通过交换胶子和弱规范波色子产生力. 这样推测, 引力的最小单元是引力子, 在这里对引力的解释是物质之间引力子的交换, 交换引力子的效果是在物质之间产生相互吸引的力. 胶

引用格式: 秦成刚, 邵成刚, 涂良成. 引力的本质是什么? 科学通报, 2017, 62: 1555–1558

Qin C G, Shao C G, Tu L C. What is the nature of gravity (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2017, 62: 1555–1558, doi: 10.1360/N972016-00948

子和光子都是零质量自旋为1的粒子,弱规范玻色子是具有非零质量自旋为1的粒子,这3种粒子实验上都已经验证,而引力子是一种零质量自旋为2的粒子,其存在性仍然需要实验来检验^[2].

量子力学中的海森堡不确定性原理导致的量子涨落对任何事物都有影响,包括引力场.按照不确定性原理位置越精确,动量不确定度越大.与量子力学中的情况相似,量子力学可以证明,不存在引力场的空间中引力场仅表现是平均值上为零,而微观尺度上引力场会因量子涨落而不为零.尺度越小的空间,量子涨落越剧烈,引力场起伏越大.引力场通过时空弯曲来表现,而量子涨落也同样通过时空的强烈弯曲表现,这样在广义相对论中本应光滑的时空被量子涨落所破坏了,量子力学的不确定性原理和广义相对论时空的光滑性不协调.一些物理学家期望通过修正广义相对论或者量子理论来消除这个矛盾,广义相对论描述着宏观物体的运动,而量子理论精确描述了微观的物理世界,微观到宏观的过渡是否存在没有考虑到的因素,许多尝试都失败了.实验上对广义相对论和量子理论的检验也在不断进行,但是到目前为止的所有试验都符合这两个理论的预言.所以,许多物理学家从其他角度出发,比如超对称、对偶性,或者考虑其他理论,比如下面提到的超弦理论.

超弦理论是很有希望解决广义相对论和量子力学矛盾的一个理论.这个理论认为宇宙的基本构成要素不是点粒子,而是振动的弦.这里的弦是构成微观粒子的超微观最基本组成单元,尺度十分小,平均只有普朗克长度的量级(10^{-35} m),所有的物质和力都是来自于弦的振动,弦的不同共振模式精确地决定所谓的基本“粒子”的质量、力荷和自旋.胶子、弱规范玻色子和光子等粒子都对应着相应的共振模式.值得一提的是,有一种共振模式完全满足引力子性质,这把引力也引入了超弦理论.

超弦理论之所以能有大量的追求者,是由于它提供了方法解决引力和量子力学的矛盾.根据前面可以知道在普朗克长度以下,由于剧烈的量子涨落,破坏了广义相对论光滑的时空的基本概念.超弦理论这样处理这个矛盾^[3]:对于微观尺度的探测,需要探针(如光子等),由不确定性原理知道探针的灵敏度大约为它的量子波长,这个量子波长就表明了对位置探测的不确定度.在用点粒子作探针时,由于点粒

子的量子波长反比于它的动量,通过提高粒子的动量,可以提高不确定度,探测更为精细的物理或空间结构,理论上可以探测无限小的结构.而弦和点粒子的表现不同,弦本身是有空间大小的,这会限制它探测的精度.考虑到量子力学,能量较小的情况刚开始增加弦的能量时,弦和点粒子类似能探测更小的尺度结构,但是当能量超过普朗克长度以下的能量时,多余的能量会使弦增大,减小弦能探测的尺度结构.由于弦的典型大小是普朗克长度,这些因素结合导致不可能探测到普朗克长度以下的空间尺度结构.宇宙的物质基元都无法探测的尺度,这尺度下的量子涨落也就对宇宙事物没有影响,即时空是不能无限分割的,在广义相对论的时空光滑性被破坏之前,时空的分割已经到极限了.在一个存在时空间隔下限的宇宙,普朗克尺度以下出现的矛盾自然也就不存在了.

超弦理论的超对称解决了快子等问题,10或11维时空解决了负概率的问题,同时还能处理引力和量子理论的矛盾,这个看似完美的理论还存在问题.物理学家发现可以通过5种不同的方法把超对称引入弦理论形成5种超弦理论,它们分别是:I型理论、IIA型理论、IIB型理论、杂化O(32)型理论和杂化 $E_8 \times E_8$ 型理论.这5种理论可以将弦理论的性质都表现出来,只不过细节有所不同,而一个最终统一的理论不应该存在5种不同的形式.第二次超弦革命的结果表明,这5个看起来完全独立的理论,实际上是一个暂时被称为M-理论的统一框架的一部分,这个理论有11维时空(10维空间和1维时间),能够为把弦理论的5个形式结合在一起提供基础;另外,它不仅仅包含振动弦,还包含了其他东西:振动的2维薄膜,涨落的3维液滴和其他一些物质的构成元素.M理论的名字代表很多意思,比如说母(Mother)理论(理论之母的含义),谜一般的(Mystery)理论,膜(Membrane)理论(膜是理论的一部分),矩阵(Matix)理论等,可见科学家们对M理论了解也仅仅是冰山一角,什么是M理论的真实面貌,仍然是个谜题.实验方面也一直在检验引力的基本性质,最广为人知的是引力反平方定律的实验检验.与其他3种作用力对比,引力的作用强度太弱.考虑引力和电磁力,这两种力都是远程力,作用力程可以为无限远,但是它们的作用强度差别十分大,两个负电子之间的引力使它们相互靠近,而电磁斥力使它们分开,利用基本的常数可以得到,两电子之间

的电磁力是引力的百亿亿亿亿(10⁴²)倍,这是一个十分巨大的数字. 同样,强力和弱力属于短程力,作用力程小于原子尺度,它们的强度与电磁力相近. 现在的实验证明,强力比电磁力强100倍,比弱力强10万(10⁵)倍,这3种力的强度是相近的,唯独引力过于微弱,这在物理学上看起来是“不合理”的. ADD (Arkani-Hamed, Dimopoulos, and Dvali)理论试图用时空存在“额外维”解释这个问题. 华中科技大学的引力中心、华盛顿大学、科罗拉多大学、斯坦福大学以及其他实验小组的一系列实验在微米到毫米范围检

验了反平方定律,否定了相应作用程内ADD理论预言的“额外维”^[4]. 此外,2012年欧洲核子中心利用大型强子对撞机(LHC)探测到了希格斯粒子,验证了希格斯粒子的存在(希格斯粒子解释了标准模型中粒子质量的来源). 之后2015年LHC再次启动,其科学任务包括了探索“额外维”存在等的任务,这些实验或许会加深对引力本质的认识.

物理学家都梦想着能统一4种基本作用力,构造一个万物统一的理论,对引力本质的认识,有可能为这个梦想提供途径.

参考文献

- 1 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 061102
- 2 Goldhaber A S, Michael Martin Nieto M M. Photon and graviton mass limits. *Rev Mod Phys*, 2010, 82: 939–979
- 3 Greene B R. *The Elegant Universe* (in Chinese). Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2004 [Greene B R. 宇宙的琴弦. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2004]
- 4 Tan W H, Yang S Q, Shao C G, et al. New test of the gravitational inverse-square law at the submillimeter range with dual modulation and compensation. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 131101

Summary for “引力的本质是什么?”

What is the nature of gravity?

QIN ChengGang, SHAO ChengGang & TU LiangCheng*

Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities Measurements of Ministry of Education, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

* Corresponding author, E-mail: tlc@hust.edu.cn

There are four conventionally accepted fundamental interactions in nature—gravitational, electromagnetic, strong, and weak forces. The gravitational force, based on Einstein’s general theory of relativity, is described as a continuous classical field. The other three, part of the standard model of particle physics, are described as discrete quantum fields, and their interactions are each carried by a quantum, an elementary particle. Two theoretical frameworks upon which all modern physics rests have been developed and have been able to withstand almost all the experimental tests so far individually, but they are mutually incompatible—they cannot both be right. It is a puzzle in physics that the two perfect theories are not compatible, and how to reconcile quantum theory with general relativity is still an open question. Our understanding on the nature of gravity is the key issue. In this article, we first introduce interpretation of gravity in the framework of general relativity, in which gravity is not a real force but a representation of the curved spacetime. On the other hand, the standard model gave a different interpretation of gravity, in which gravity is effects of exchange of gravitons between two masses. Graviton is the fundamental particle, whose mass is zero and spin is two, but it has not been found in any experiments. Then, the contradiction when scientists attempt to unify general relativity and quantum theory is introduced. The superstring theory, a quantum theory not of point particles and a possible candidate in pursuit of a theory of everything in nature, seems to give an unique solution to solve the contradiction, in which all of the particles and interactions of nature are modelled as the vibrations of tiny supersymmetric strings, and the price to pay is unusual features such as six extra dimensions of space in addition to the usual three. The size of the string is about 10^{-35} m, the Plank scale. String and its vibration could construct everything, which also includes gravity, and the physical properties of forces and particles were decided by the frequencies of the string, such as spin and mass. The superstring theory had a puzzle that supersymmetry could be drew into string theory to form five different superstring theories by five different methods. M-theory was born with the development of superstring theory, which unified five different forms of superstring theory. Finally, the experimental tests of the nature of gravity is briefly introduced.

gravity, standard model, superstring theory

doi: 10.1360/N972016-00948



涂良成

华中科技大学物理学院教授, 博士生导师. 2006 年获华中科技大学物理学博士学位, 2008 年获全国优秀博士学位论文, 2013 年获国家杰出青年科学基金, 现任华中科技大学物理学院副院长, 基本物理量测量教育部重点实验室副主任. 研究领域为精密测量物理, 从事实验室引力实验研究、精密测控技术攻关、以及精密重力测量仪器研发.