

Are neutrinos their own antiparticles?

夸克有内部结构吗?

赵强^{1,2,3}

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;
 2. 中国科学院大科学装置理论物理中心, 北京 100049;
 3. 中国科学院大学物理学院, 北京 100049
- E-mail: zhaoq@ihep.ac.cn

2017-05-02 收稿, 2017-05-02 修回, 2017-05-02 接受, 2017-05-24 网络版发表

摘要 “夸克”是目前人类所知的构成物质世界的基本粒子之一, 也是在粒子物理“标准模型”中参与所有已知的基本相互作用的唯一的基本粒子. 实验寻找比夸克更小的基本粒子, 或者验证是否夸克具有更加细微的内部结构, 这是现代高能物理研究寻找超出标准模型新粒子的重要手段, 也是高能量前沿的重要研究课题.

关键词 夸克, 标准模型, 超出标准模型新物理

“夸克”是目前人类所知的构成物质世界的基本粒子之一. 基于我们所知道的目前最成功的“标准模型”理论, 自然界存在6种不同“味道”的夸克, 即(u, d, c, s, t, b), 它们的反粒子(即反夸克)被表示为($\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{c}$, $\bar{s}$, $\bar{t}$, $\bar{b}$). 这些夸克和反夸克有一个共同的特点: 它们都是具有1/2自旋的费米子, 并且参与“标准模型”理论中所有的基本相互作用. 然而它们也具有各自不同的一些性质, 使得它们在“标准模型”理论中扮演着不同的角色. 例如夸克带有电荷, (u, c, t这三种夸克带有2/3倍电子电荷单位的正电荷, d, s, b则带有1/3倍电子电荷单位的负电荷, 反夸克的电荷与它们相应的夸克之间电荷相反), 因此夸克之间可以通过交换“光子”发生电磁相互作用; 夸克还带有“色荷”, 具有1/3的重子数(反夸克具有-1/3的重子数), 夸克之间、反夸克之间、以及夸克与反夸克之间可以通过交换同样带有“色荷”的胶子发生强相互作用, 描述这样的强相互作用的理论即是“量子色动力学(QCD)”.

有趣的是, 当一定数目的夸克或反夸克之间通过交换带有“色荷”的胶子而形成具有“中性色荷”(即“色单态”)的夸克集团时, 这样的体系很有可能形成

一个稳定的夸克集团体系, 这一现象称为“色禁闭”, 这样形成的具有“色单态”的夸克集团即是“强子”态. 目前实验上发现大部分的“重子”(具有半整数自旋的强子)是由三个夸克构成的“色单态”, 而“介子”(具有整数自旋的强子)是由“夸克-反夸克”构成的“色单态”. 实际上对QCD强相互作用而言, 如果我们把形成“色单态”作为将带“色荷”的基本粒子(夸克和胶子)束缚在一起形成稳定强子态的条件的话, 我们有可能在高能物理实验中找到比上述最简单的强子结构更加复杂的夸克-胶子构成的强子态. 虽然夸克是构成强子的更加基本的粒子, 但是由于“色禁闭”限制, 自然界不存在单个自由的夸克, 这使得强子实际上是目前能从物质中分离出来的、具有内部结构的最小单元.

在“标准模型”中夸克是没有结构的点状的粒子, 这在几何意义上似乎有点不可思议. 然而从物理上来看, 这并非意味着如果我们用一个高能电子去轰击强子中的夸克时, 电子被夸克散射的概率等于0. 这是由于夸克与电子之间可以通过交换“光子”发生电磁相互作用, 或者交换 $W^\pm$ 、 Z^0 发生弱相互作用, 从而可以探知电子被夸克散射的概率. 换言之, 如果“标准模型”是一个终极的理论(这仅仅是一个假设,

引用格式: 赵强. 夸克有内部结构吗? 科学通报, 2017, 62: 2047–2049

Zhao Q. Does quark have internal structures (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2017, 62: 2047–2049, doi: 10.1360/N972017-00464

因为我们已经有足够的证据表明这是一个需要完善的理论), 那么当我们把这样一个散射过程中的所有可能的相互作用都考虑了以后, 夸克就退化成一个与观测无关的点状结构了. 这样一个推论其实提示我们可以通过实验测量夸克的“大小”, 然后与“标准模型”理论计算进行对比, 由此来寻找可能存在的超出“标准模型”的新物理迹象. 设想一下, 如果我们对高能电子与夸克散射的过程(由于强相互作用导致夸克“色禁闭”, 我们不能获得自由的夸克, 所以电子-夸克散射通常是通过电子与质子散射来实现, 例如: 深度非弹性散射实验)进行了周密可靠的计算, 获得了这样一个过程中电子与夸克发生散射的概率. 当我们把这个计算结果与实验测量进行对比时, 发现两者具有明确的差异, 这将可能成为某种超出“标准模型”的新物理与夸克发生相互作用而使其表现出具有一定的结构的证据, 或者表明夸克本身具有内部结构, 是由更微小的基本粒子构成. 从这个意义上, 对夸克结构的测量不仅可以验证“标准模型”, 同时也是寻找新物理的手段之一.

自从“标准模型”在20世纪70年代建立起来以后, 科学家们在这个方向上已经开展了很多相关的理论和实验研究. 实际上, 以电子-质子非弹散射为例, 无论是“标准模型”理论计算^[1]还是实验测量^[2~4]都是

对物理学家们的极大挑战. 最新的ZEUS合作组的实验测量^[4]表明, 夸克的有效半径在95%的置信度范围内是 0.43×10^{-16} cm. 也就是说“标准模型”在比这个尺度大的范围内认为夸克就像一个没有结构的点状粒子, 而如果超出标准模型的新物理存在的话, 它有可能在小于 0.43×10^{-16} cm的尺度上显示出一定的结构. 这个半径大小比质子的特征尺度1 fm($=10^{-15}$ m)要小大约2000倍.

毫无疑问, 如果我们需要在更小的尺度上通过探测夸克的大小来确定新物理存在的迹象, 那么我们需要更大能量的散射实验来提供一个更加精细的电磁探针. 根据量子力学中的德布罗意(de Broglie)关系, 高能电子通过交换光子在散射中传递给夸克的动量 p 决定了能探测到的带电结构的最小尺度约为光子的德布罗意波长: $\lambda = h/p$, 其中 $h (=6.626 \times 10^{-34}$ J s)是普朗克(Planck)常数. 可以看出如果目前最高能量的强子-电子环形对撞机HERA (Hadron-Elektron Ring Anlage)和大型强子对撞机LHC(Large Hadron Collider)的实验仍然不能确定新物理出现的标度, 那么未来的高能物理实验设施需要建造更高能量的加速器来继续寻找超出“标准模型”的新物理, 这方面的实验和理论研究也是未来国际高能物理发展的高能量前沿研究课题.

参考文献

- 1 Lai H L, Huston J, Kuhlmann S, et al. CTEQ Collaboration. Global QCD analysis of parton structure of the nucleon: CTEQ5 parton distributions. *Eur Phys J C*, 2000, 12: 375–392
- 2 Acciarri M, Achard P, Adriani O, et al. L3 Collaboration. Search for manifestations of new physics in fermion pair production at LEP. *Phys Lett B*, 2000, 489: 81–92
- 3 Aaron F D, Alexa C, Andreiev V, et al. H1 Collaboration. Search for Contact Interactions in e^+p Collisions at HERA. *Phys Lett B*, 2011, 705: 52–58
- 4 Abramowicz H, Abt I, Adamczyk L, et al. ZEUS Collaboration. Limits on the effective quark radius from inclusive ep scattering at HERA. *Phys Lett B*, 2016, 757: 468–472

Does quark have internal structures?

ZHAO Qiang^{1,2,3}

¹ *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

² *Theoretical Physics Center for Science Facilities, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³ *School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

E-mail: zhaoq@ihep.ac.cn

Quark is one of the fundamental particles so far known by human being as a building block of our matter world. It is the only one which participates all known fundamental interactions in the framework of the Standard Model (SM). As part of the SM, the gauge theory that describes the strong interactions between quarks and gluons is called Quantum Chromo-Dynamics (QCD). Since quarks and gluons always carry “color charges”, any single quark or gluon cannot be isolated from hadrons to act as a free particle. This phenomenon, known as “color confinement”, implies that hadrons instead of quarks or gluons are actually the so-far smallest inseparable particles. The other feature with QCD is that when the larger energy or momentum transfers occur between quarks, the weaker their interactions become. This paves a way for probing the structure of quarks by high energy hadron-hadron scatterings or electron-hadron scatterings which can better resolve the structure of such tiny colored objects. Evidence for smaller fundamental particles than the quarks or possible proof for internal refined structures of the quarks would request new physics beyond the SM and they may dramatically change our view of the matter world. These studies are actually the high energy frontier of modern high energy physics in both experiment and theory.

quark, standard model, new physics beyond standard model

doi: 10.1360/N972017-00464



赵强

1988~1998 年就读于北京大学，获学士、硕士、博士学位；1998~2000 年，法国 Orsay 核物理研究所博士后；2000~2005 年，英国 Surrey 大学物理系博士后，2004 年入选英国 EPSRC 青年人才计划 Advanced Research Fellow；2005 年至今，中国科学院高能物理研究所研究员，中国科学院“引进国外杰出人才(百人计划)”；中国科学院大学岗位教授。2007 年获中国核物理学会颁发的第三届“胡济民教育科技奖”；2014 年获国家自然科学基金委员会“杰出青年科学基金”资助；2016 年入选中华人民共和国科学技术部“2015 年中青年科技创新领军人才计划”。主要从事中高能核物理、强子物理和粒子物理唯象理论研究。