

“渐近自由”的实验证明

何景棠

2004年10月5日,瑞典皇家科学院宣布,将2004年的诺贝尔物理学奖授予美国加州大学圣巴巴拉分校卡夫利理论物理研究所的戴维·格罗斯(David J. Gross)、加州理工学院的戴维·波利策(H. Davis Politzer)和麻省理工学院的弗兰克·维尔切克(Frank Wilczek),以表彰他们发现了粒子强相互作用的理论中的“渐近自由”行为。

自然界存在引力、电磁力、弱相互作用力和强相互作用力。月亮围绕地球转、地球围绕太阳转受引力支配;电磁力把原子核与电子组成原子,把原子组成分子;核的 β 衰变受弱相互作用力支配;戴维·格罗斯、戴维·波利策和弗兰克·维尔切克发现的粒子强相互作用中的“渐近自由”行为,解决了多年来人们一直寻找的强相互作用力的性质。

一、夸克模型和寻找自由夸克

第二次世界大战以后,1948年,塞西尔·鲍威尔(Cecil Powell)利用核乳胶在南美的高山宇宙线站照射后,分析核乳胶照片,发现了 π 介子,这是粒子物理研究一个新时代开始的标志。塞西尔·鲍威尔(C. Powell)获得1950年诺贝尔物理学奖。直到60年代初,世界上各个高能物理实验室已经发现的“基本粒子”已有100多个。人们思考一个问题:100多种化学元素可按门捷列夫周期表分类,那末,能否找到一种办法,也把“基本粒子”按类似门捷列夫周期表的办法分类?1962年盖尔曼 Gell-Mann 和茨韦格(Zweig)终于找到了把“基本粒子”分类的办法。他们设想,自然界存在u(上)、d(下)、s(奇异)三种夸克,以及它们的反夸克。介子是由夸克和反夸克组成的;而重子是由三个夸克组成的。于是,可以把当时实验上找到的介子和重子有规律地分类。夸克模型就能解释当时实验上找到的所有的介子和重子的性质。盖尔曼(M. Gell-Mann)因为创建夸克模型的成功,获得1969年诺贝尔物理学奖。

按照夸克模型,质子由(uud)三个夸克组成,中

子由(ddu)三个夸克组成。所以,组成物质的最小单元是夸克。由于质子的电荷是+1,中子的电荷是0,所以,u夸克的电荷是 $Q_u = (+2/3)$,d夸克的电荷是 $Q_d = (-1/3)$ 。

构成物质的另一类最小单元是轻子,它们是电子、 μ 子、 τ 轻子以及它们的中微子。电子有它的反粒子——正电子。电子和正电子对的最低能态是处于费米海中。如果 γ 射线的能量足够高,高于产生自由电子和自由正电子对的阈能,那么,这样的高能 γ 射线与物质相互作用,就可以打出自由的电子和自由的正电子对。如果物质是由夸克组成的,是否存在自由夸克呢?是否可以像打出自由的电子和自由的正电子对那样,打出自由的夸克和自由的反夸克呢?

60年代末70年代初,寻找自由夸克是粒子物理的重大课题。由于夸克带有分数电荷,如果存在自由夸克,那么,是很容易探测到它们的。因为带电粒子穿过物质时,产生的电离效应是与它所带的电荷量的平方成正比的。由于u夸克的电荷是 $Q_u = (+2/3)$,所以,如果存在自由的u夸克,则它穿过物质时,产生的电离效应是质子穿过相同物质时产生的电离效应的4/9;由于d夸克的电荷是 $Q_d = (-1/3)$,如果存在自由的d夸克,则它穿过物质时,产生的电离效应是质子穿过相同物质时产生的电离效应的1/9。只要看一看是否存在4/9或1/9电离效应的粒子,就知道是否存在自由的u夸克,或自由的d夸克了。

从60年代末起,全世界几乎所有的粒子物理实验室,核物理实验室,宇宙线物理实验室都设计和进行了寻找自由夸克的实验。从类似于测量电子电荷的密立根实验,磁悬浮实验,分析从月球取回的样品,到深海找锰瘤样品,分析牡蛎贝壳,寻找超重水;用气球或人造卫星把探测器带到高空,探测宇宙线产生的自由夸克;在地面,利用大型的云雾室、汽泡

通过各种望远镜观测撞击彗星的过程和结果,并通过因特网转播。

人们期盼“深入撞击”号能够取得优异的探测结

果,这无疑将为科学家研究太阳系起源和演化提供全新的线索。

(北京西外大街《天文爱好者》编辑部 100044)

室、流光室, 测量穿过的宇宙线中的自由夸克; 利用不同能量的加速器产生的高能粒子与物质的相互作用, 希望产生自由夸克。然而, 寻找自由夸克的所有实验都得到负的结果——自然界不存在自由夸克。

很难理解夸克模型的成功和自然界不存在自由夸克的实验事实, 但戴维·格罗斯、戴维·波利策和弗兰克·维尔切克提出了粒子强相互作用中的“渐近自由”性质的划时代的理论, 解决了矛盾。戴维·格罗斯和弗兰克·维尔切克以及戴维·波利策的两篇文章同时发表在《物理评论通讯》1973年第30卷第26期上。当时, 弗兰克·维尔切克在普林斯顿是戴维·格罗斯的研究生, 只有22岁, 而戴维·波利策是哈佛大学的研究生, 只有24岁。从1973年以来, 经过粒子物理各种实验的检验, 证明强相互作用中的“渐近自由”性质是正确的。戴维·格罗斯、戴维·波利策和弗兰克·维尔切克在提出粒子强相互作用中的“渐近自由”性质的划时代理论30年后, 终于获得了2004年的诺贝尔物理学奖。

二、崭新的概念, 划时代的理论

以粒子强相互作用中的“渐近自由”为基础, 从70年代初以来, 根据许多新的实验事实, 在各国科学家的共同努力下, 发展出了量子色动力学(Quantum Chromodynamics, 简称QCD)。量子色动力学包含了许多新的物理概念, 可简要地归纳如下:

①参加强相互作用的夸克带有颜色, 有三种颜色。我们知道, 参加电磁相互作用的电子带有电荷, 而参加强相互作用的夸克除了带有电荷外, 还带有色荷。

②夸克间的强相互作用由胶子传递。胶子带有颜色——一共有八个胶子。传递电磁相互作用的光子不带有电荷, 因此光子没有自耦合作用, 但传递强相互作用的胶子带有色荷, 因此胶子有自耦合作用, 可以由两个或三个胶子组成新的粒子态——胶子球(Glueball)。

③由夸克组成的物质, 例如介子、重子没有颜色。夸克被囚禁在质子、中子里面, 即自然界不存在自由夸克。

④描写强相互作用的耦合常数 α_s 不是常数, 是一个跑动的耦合常数(Running Coupling Constant)。 $\alpha_s(q^2) = 1/B \ln(q^2/\Lambda^2)$ 。 q 是四动量传递, B 和 Λ 是常数。

跑动耦合常数 α_s 清楚地描述了粒子强相互作用

的“渐近自由”性质。量子力学认为, 粒子的波长与动量成反比, $\lambda \sim 1/p$ 。当粒子间的距离大时, 即在能量低的情况下, α_s 变大, 但当粒子间的距离小时, 即在能量高的情况下, α_s 变小, 它的变化反比于能量的对数关系, 在超高能的情况下, 夸克间的距离很小时, 作用力反而小了, 似乎是自由了, 所以称为“渐近自由”。

⑤由于弱相互作用, 电磁相互作用和强相互作用都是杨振宁和米尔斯于1954年发现的规范场相互作用。所以, 弱相互作用和电磁相互作用的耦合常数也是跑动耦合常数, 它们随着能量增大而增大。但强相互作用耦合常数 α_s 随着能量增大而变小。在非常高能的情况下, 例如在宇宙大爆炸时, 弱相互作用, 电磁相互作用和强相互作用的强度一样, 三个耦合常数相等, $\alpha_{弱} = \alpha_{电磁} = \alpha_{强}$ 。强相互作用力“渐近自由”是大统一理论一个重要的分支。

三、“渐近自由”的实验证明

颜色、色荷、胶子、胶子球、夸克被囚禁、跑动耦合常数、弱相互作用、电磁相互作用和强相互作用的大统一, 这一大堆新的物理概念, 似乎是难以置信的。实验是检验一切真理的唯一标准。从70年代开始, 一系列的粒子物理实验, 证明了强相互作用力的“渐近自由”的正确性。

1. 夸克带有三种颜色的实验证明

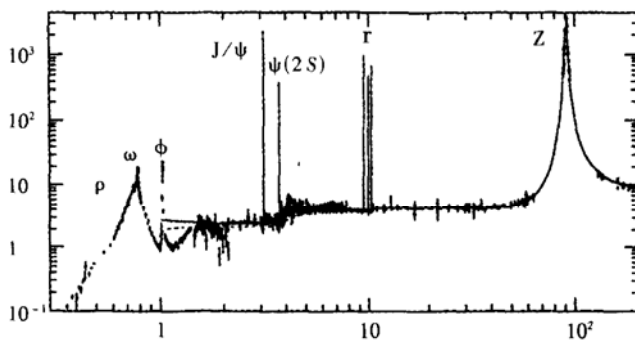


图1 R 值与正负电子对撞机的质心能量的关系

电子正电子对撞产生强子对与 μ 子对的比为:

$$R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子}) / \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \sum Q_i^2$$

式中, Q_i 是第 i 种夸克的电荷, 如果 e^+e^- 对撞的质心能量少于3GeV, 这时, 只有3种夸克有贡献, 它们是 u, d, s 夸克, 因此,

$$R = (Q_u^2 + Q_d^2 + Q_s^2) = [2/3]^2 + (-1/3)^2 + (-1/3)^2 = 6/9$$

但实验结果是 $R=2$ 。如果夸克带有三种颜色,

R 值就变成:

$$R = 3(Q_u^2 + Q_d^2 + Q_s^2) = 3[2/3)^2 + (-1/3)^2 + (-1/3)^2] = 3(6/9) = 2.$$

与实验结果相符。图 1 是目前不同实验测量到的 R 值的结果。图中的 ρ 、 ω 、 ϕ 、 J/Ψ 、 Y 、 Z 是共振峰, 从平滑曲线可以看到, 在 $\sqrt{S} < 3\text{GeV}$ 时, $R = 2$ 。在 e^+e^- 对撞的质心能量少于 10GeV , 这时, 有 4 种夸克有贡献, 它们是 u, d, s, c 夸克, 因此,

$$R = 3(Q_u^2 + Q_d^2 + Q_s^2 + Q_c^2) = 3[2/3)^2 + (-1/3)^2 + (-1/3)^2 + (2/3)^2] = 3(10/9) = 3.3。$$

在 e^+e^- 对撞的质心能量大于 10GeV , 这时, 有 5 种夸克有贡献, 它们是 u, d, s, c, b 夸克, 因此,

$$R = 3(Q_u^2 + Q_d^2 + Q_s^2 + Q_c^2 + Q_b^2) = 3[2/3)^2 + (-1/3)^2 + (-1/3)^2 + (2/3)^2 + (-1/3)^2] = 3(11/9) = 3.7$$

不同实验测量到的 R 值的结果都表明夸克带有颜色, 而且是三种颜色。

2. 胶子存在的实验证据

a. 轻子核子深度非弹性散射的实验结果

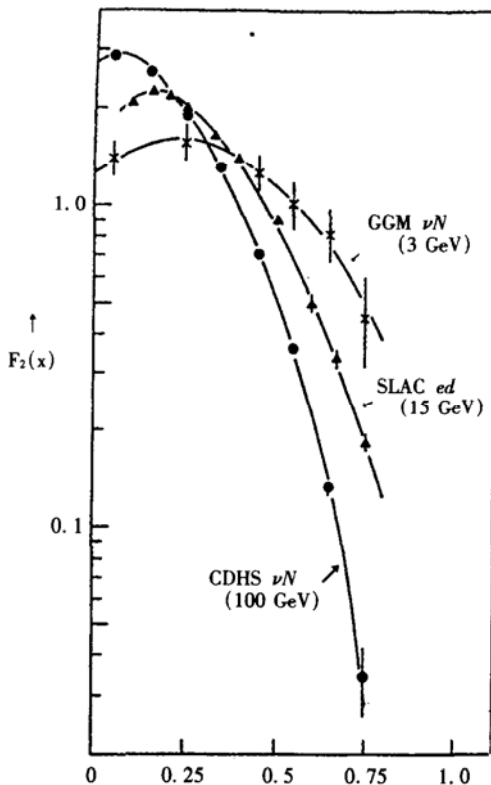


图 2 美国斯坦福加速器中心 SLAC 做电子与核子散射、欧洲核子中心的 GGM、CDHS 合作组做中微子核子散射测得的夸克和反夸克的动量分布; 纵坐标是 $F_2(x) = [Q(x) + \bar{Q}(x)]$, 横坐标是夸克所带四动量分额的 x 值

从 70 年代开始, 粒子物理学家利用轻子(电子、 μ 子) 与核子散射, 测量夸克在核子内的动量分布。有一个新发现。设 $Q(x)$ 和 $\bar{Q}(x)$ 为带有核子四动量分额 $x = p/P$ (p 为夸克带有的四动量, P 为核子带有的四动量, $0 < x < 1$) 的夸克和反夸克在核子内的动量分布函数。按理, 把所有夸克带有的四动量加起来, 应该等于核子的四动量, 即对夸克的动量分布积分等于 1。但实验测得夸克和反夸克在核子内的动量分布如图 2 所示。求积分得:

求积分得:

$$\int_0^1 [Q(x) + \bar{Q}(x)] dx = 0.5$$

也就是说, 组成核子的夸克和反夸克只带有核子一半的动量。粒子物理学家就认为, 核子另一半的动量由胶子带走。这是存在胶子的第一个实验证据。

b. 电子正电子对撞产生三喷注

电子正电子对撞可以产生夸克和反夸克对:

$$e^+e^- \rightarrow Q(x) + \bar{Q}(x)$$

由于自然界不存在自由夸克, 所以, 夸克和反夸克要碎裂化 (Fragmentation), 因此, 实验看到的是由夸克和反夸克分别形成的喷注:

$$e^+e^- \rightarrow Q(x) + \bar{Q}(x) \rightarrow \text{jet}_1 + \text{jet}_2$$

在 1979 年, 丁肇中领导的 MarkJ 实验组和其他实验组: TASSO, JADE, PLUTO 在德国汉堡的 PETRA 电子正电子对撞机上所作的实验发现, 有少量的电子正电子对撞产生三喷注:

$$e^+e^- \rightarrow \text{jet}_1 + \text{jet}_2 + \text{jet}_3$$

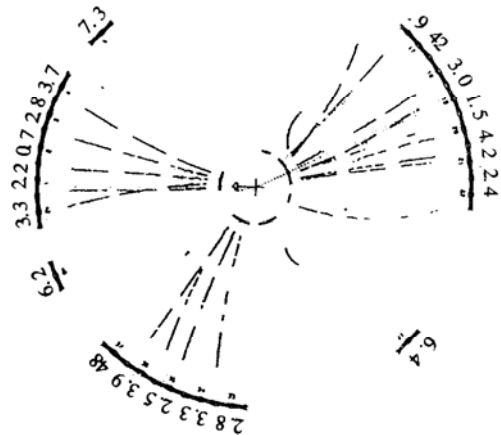


图 3 一个电子 - 正电子对撞产生三喷注的事例图

电子正电子对撞产生三喷注的解释是: 电子正电子对撞首先产生夸克和反夸克对, 然后, 其中一个夸克或反夸克辐射一个胶子, 随后, 夸克, 反夸克和胶子碎裂化 (Fragmentation), 从而形成实验看到的

三喷注。图 3. 是电子正电子对撞产生三喷注的一个事例。由于胶子是辐射产生的, 所以, 由胶子产生的喷注的能量较少, 把能量较少的第三个喷注作角分布分析, 得出胶子的自旋宇称是 1^{--} , 与光子的自旋宇称相同。图 4. 是实验结果。图中, 带误差的点是实验点, 实线代表胶子的自旋宇称是 1^{--} 的拟合结果, 而虚线代表胶子的自旋宇称是 0 的拟合结果, 说明胶子的自旋宇称是 1^{--} , 与光子的自旋宇称相同。电子正电子对撞产生三喷注是存在胶子的直接实验证据。

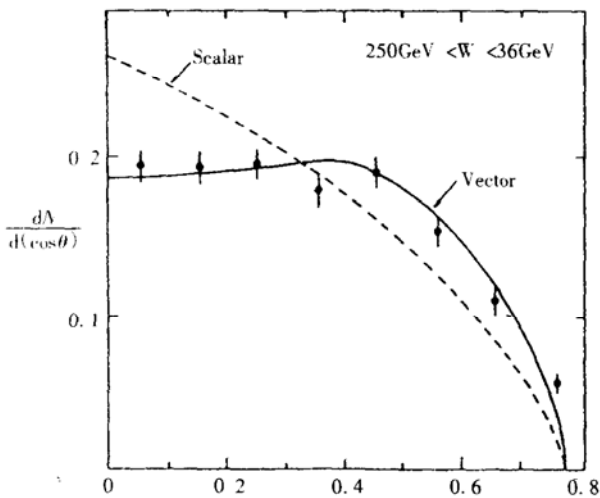


图 4 对有胶子辐射产生的能量较低的第三个喷注做角分布的拟合结果: 虚线为胶子自旋为 0, 实线为胶子自旋为 1 的拟合结果, 证明胶子自旋为 1, 与实验点相符。

用波长更短, 能量更高的轻子(电子, μ 子, 中微子)作探针, 与核子作深度非弹性散射, 测量到核子

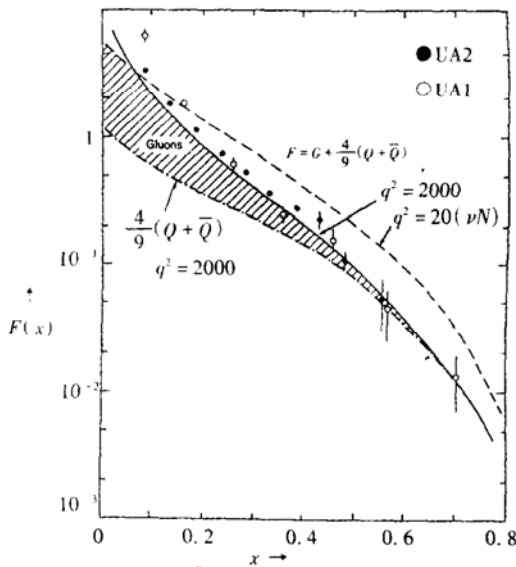


图 5 实验测量到的胶子、夸克和反夸克的动量分布函数 $G(x)$ 、 $Q(x)$ 和 $\bar{Q}(x)$

内的夸克, 反夸克和胶子动量分布如图 5 所示。现在夸克模型的物理图像与以前的简单的夸克模型的物理图像有很大的不同。按门捷列夫周期表分类的 100 多种化学元素的化学性质是由最外层的电子决定的, 最外层的电子叫做价电子; 与此相类似, 现在决定质子性质的 (uud) 三个夸克和决定中子性质的 (ddu) 三个夸克叫做价夸克, 此外, 质子和中子内部还有夸克—反夸克对, 叫做海夸克, 此外, 质子和中子内部还有大量的胶子。这种核子结构的新物理图像叫做夸克—部分子模型 (Quark-Parton Model)。以“渐近自由”为核心的量子色动力学能很好地解释夸克—部分子模型的许多新的实验结果。

c. 可能存在新粒子态: 胶子球 (Glueball)

因为胶子有自耦合作用, 所以, 两个胶子或三个胶子可以组成新粒子态——胶子球, 存在胶子的更直接的证据是找到胶子球。产生两个胶子比较容易, 由于胶子的自旋是 1, 如果两个胶子自旋方向相反, 胶子球的自旋为 0; 如果两个胶子的自旋方向相同, 夸克球的自旋为 2。如果找到一个新粒子, 它不能填到夸克模型中去, 此外, 介子、重子是由夸克组成的, 它们衰变时会夸克味道依赖, 而胶子是中性的, 胶子球衰变时没有夸克味道依赖。这是判定是否存在胶子球的最基本的标准。目前, 实验上已经找到几个自旋为 0 的可能的胶子球候选者, 它们是: $f_0(1370)$, $f_0(1500)$, $f_0(1710)$, 和几个自旋为 2 的可能的胶子球候选者, 它们是: $\xi(2230)$, $g_1(2200)$, $g_2(2230)$, $g_2(2300)$, 由于目前积累的数据还不够多, 还不能准确无误地把哪个粒子确定为胶子球。

3. 自然界不存在自由夸克

由于夸克模型的伟大成功, 鼓励了在实验上寻找存在自由夸克的努力。60 年代末 ~ 70 年代初, 在实验上寻找存在自由夸克是粒子物理的重大课题。全世界几乎所有的粒子物理实验室、核物理实验室、宇宙线实验室, 所有的质子加速器、质子反质子对撞机、电子正电子对撞机, 都设计和进行了不同的实验, 去寻找自由夸克。然而, 寻找自由夸克的所有实验都得到负的结果。直到 80 年代, 寻找自由夸克的高潮已经过去, 到了 90 年代, 粒子物理的主流物理学家普遍接受自然界不存在自由夸克的实验事实。

自然界不存在自由夸克的实验事实, 说明了强相互作用力“渐近自由”的正确性。

4. 跑动耦合常数的实验测量

常数 (Constant) 的定义是永远不变。例如, 真空中光速 c 是常数。在任何惯性系中, 光速 c 都是每秒 30 万千米。强相互作用力“渐近自由”的核心是强相互作用耦合常数 α_s 为跑动耦合常数 (Running Coupling Constant), 它与相互作用能有关, 随着能量增大而对数减少:

$$\alpha_s(q^2) = 1/B \ln(q^2/\Lambda^2)$$

q 是相互作用中的四动量传递, B 和 Λ 是常数。

$$B = -\beta_0, \beta_0 = 1/12\pi(4n_f - 11n_c)$$

$\Lambda^2 = \mu^2 \exp\{-1/B\alpha_s(\mu^2)\}$, μ 是质量标度, 如果取 Z^0 作为标准, $\mu = 90\text{GeV}$ 。

n_c 是颜色对称性因子, $n_c = 3$, n_f 是夸克代数, 有三代夸克 $n_f = 3$ 。

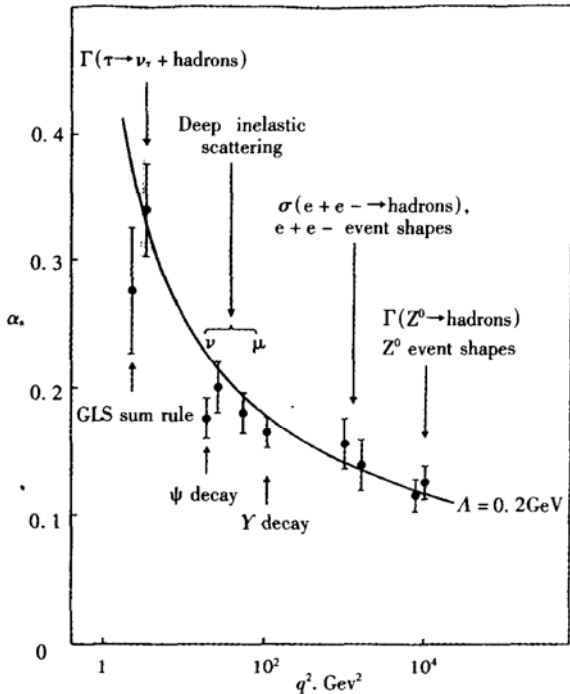


图 6 强相互作用跑动耦合函数 α_s 与 q^2 关系的实验测量结果

从 70 年代中开始, 在不同的能量标度下, 测量 α_s 随相互作用能的变化, 是粒子物理的重大课题。全世界所有的粒子物理实验室, 都用它可能的办法, 测量 α_s 的值。例如, 通过测量 τ 轻子衰变宽度, 轻子与核子深度非弹性散射, J/ψ 衰变, Y 衰变, 测量 $(e^+e^- \rightarrow \text{强子})$ 的截面, $(e^+e^- \rightarrow \text{强子})$ 事例的形状, 中性中间玻色子 Z^0 衰变宽度, Z^0 衰变事例的形状, 测量 α_s 随 q^2 的变化。结果如图 6 所示。可以看到, 从 τ 轻子衰变宽度测得 $\alpha_s(1.8\text{GeV}) \cong 0.35$, J/ψ 衰变测得 $\alpha_s(3\text{GeV}) \cong 0.2$, 到 Z^0 衰变测得 $\alpha_s(90\text{GeV}) \cong 0.12$, 可以看到 α_s 的确是一个跑动耦合常数, 即

α_s 随着能量增大而对数减少。这是“渐近自由”的正确性的直接证明。

5. 弱相互作用, 电磁相互作用和强相互作用大统一的实验证据

1967 年, 温伯格 (Steven Weinberg)、格拉索 (Sheldon Glashow)、萨拉姆 (Abdus Salam) 利用杨振宁 - 米尔斯发现的规范场相互作用, 把弱相互作用和电磁相互作用统一起来, 创立了弱电相互作用统一的理论。发现弱相互作用和电磁相互作用的耦合常数也是跑动耦合常数, 它们随着能量增大而增大。1973 年, 戴维·格罗斯、戴维·波利策和弗兰克·维尔切克把杨振宁 - 米尔斯于 1953 年发现的规范场相互作用, 用于强相互作用, 得出了粒子强相互作用中的“渐近自由”性质, 强相互作用耦合常数 α_s 随着能量增大而对数变小。由于弱相互作用, 电磁相互作用和强相互作用都是杨振宁 - 米尔斯于 1953 年发现的规范场相互作用。所以, 弱相互作用和电磁相互作用的耦合常数也是跑动耦合常数, 它们随着能量增大而增大; 但强相互作用耦合常数 α_s 随着能量增大而对数变小。在非常高能的情况下, 弱相互作用, 电磁相互作用和强相互作用的强度一样, 三个耦合常数相等: $\alpha_{\text{弱}} = \alpha_{\text{电磁}} = \alpha_{\text{强}}$ 。强相互作用力“渐近自由”是大统一理论一个重要的分支。

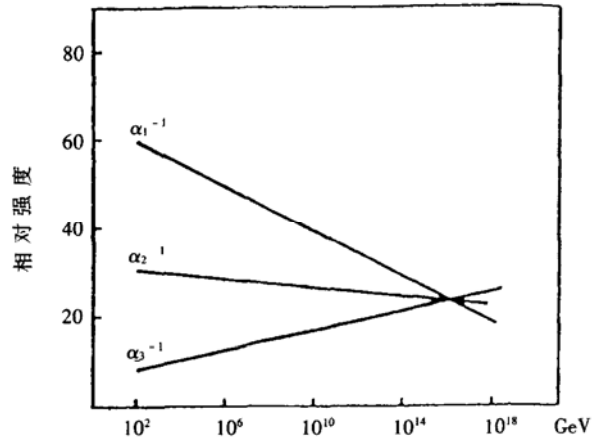


图 7 弱相互作用耦合常数 α_1 、电磁相互作用耦合常数 α_2 和强相互作用耦合常数 α_3 与能量的关系; 在能量约为 10^{16}GeV 时, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 相交于一点, 即 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$

图 7 是利用现在的高能加速器测量到的 α_{weak} 、 α_{em} 和 α_s 的值, 按耦合常数与能量的关系的数学公式外推的结果。为作图和外推方便, 图 7 上使用的是 α 的倒数 α^{-1} 的值, 其中, α_1 为弱相互作用耦合常数 α_{weak} 、 α_2 为电磁相互作用耦合常数 α_{em} 和 α_3 为

反物质的寻找和理论研究现状

官衍香

反物质研究是宇宙学的重要课题之一。近年来这方面的研究比较活跃,比如华裔科学家丁肇中主持的轰动一时的“ α 磁谱仪计划”,其主要目的就是捕获宇宙中的反粒子。去年我国成功发射了“神舟”五号载人飞船,标志着我国航空航天技术已步入世界前沿,其目的也是为将来进行包括反物质问题在内的一系列科学研究创造条件。其他的研究设备还包括各种大型的国际空间站等等。几十年来人们利用各种方法和途径在自然界中寻找反物质,并且试着利用各种科学的手段在实验室中制造反物质。在理论上,利用成熟的粒子物理理论去解释正反物质不对称的根本原因。虽然现在的理论还不能真正解释正反物质的不对称性,但理论研究上的困难和不断出现的新问题都给物理学本身的发展带来了许多新的契机。和其他悬而未决的科学问题一样,宇宙中的反物质等各种谜团吸引着一代又一代的物理学家去发掘自己的聪明才智,揭开自然界的神秘面纱,对反物质的研究体现了科学家的创造性、想像力和不屈不挠的科学精神。现在人们对反物质的看法分成两种。一种认为宇宙中正反物质应当是等量的,需要的是从更远处去寻找反物质星系存在的证据。另一种认为事实已暗示,宇宙中没有大量的反物质存在,需要的是从宇宙的演化中去寻找造成今天没有反物质的原因。本文前两部分为这两方面的研究历史和现状。反物质研究的意义当然是解开宇宙之谜,一旦发现或人工制造出来,也有其

强相互作用耦合常数 α_s ,可以看到, α_{weak} 和 α_{em} 随着能量增大而增大;但 α_s 随着能量增大而变小,在非常高能的情况下,约为 10^{16}GeV 时,弱相互作用,电磁相互作用和强相互作用的强度一样,三个耦合常数相等: α_1 、 α_2 和 α_3 相交于一点, $\alpha_{\text{弱}} = \alpha_{\text{电磁}} = \alpha_{\text{强}}$ 。

目前世界上正在建造的高能加速器:大型强子对撞机LHC,它的对撞能量为 $8\text{TeV} \times 8\text{TeV}$,离 10^{16}GeV 还相差很远,不过,人们认为,在宇宙大爆炸时的超高能情况下,弱相互作用,电磁相互作用和强相互作用的强度一样, $\alpha_{\text{弱}} = \alpha_{\text{电磁}} = \alpha_{\text{强}}$ 。

把 α_s 、现有测量的值外推,与 α_{weak} 、 α_{em} 的外推

诱人的应用价值,这是本文第三部分的内容。

一、反物质的发现和寻找

众所周知,我们的这个世界是由物质组成的,而物质又是由原子、分子等微观粒子所构成。反物质则与之相反,它是由原子、分子的反粒子,即反原子和反分子所构成,因此,反物质具有与物质完全相反的性质。反物质这一概念的提出由来已久,但它首先要从正电子的预言与发现说起。早在1928年,英国物理学家狄拉克在尝试将20世纪的两个最重要原理——相对论与量子力学结合起来的实践中就发现了这一现象,并预言了正电子的存在。而所有这一切则是由狄拉克建立的电子的相对论波动方程中得出负能量值的解引起的。

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Psi - \nabla^2 \Psi + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \Psi = 0 \quad (1)$$

狄拉克在对这个方程求解的过程中共得到了4个描述电子内部状态的解,用以说明电子应当具有4个内部状态。其中两个状态可以用电子的自旋及自身磁矩的存在加以解释;但对于方程的另外两个附加解的求解过程中却得到了负能量值的解这一离奇的结论。如果在原子中有负能级存在,那么所有原子都不可能具有能量最低的基态,因为正能级的电子都可以跃迁到负能级而放出辐射。由于负能量可以无限大,因此所有的电子都可能不断地无限地跳到更负的能级而放出能量,这与物理事实完全冲突。这就是狄拉克理论中的“负能困难”。为

值,在非常高能的情况下相交于一点,是粒子强相互作用中的“渐近自由”性质的重要实验证明。

1973年,戴维·格罗斯、戴维·波利策和弗兰克·维尔切克提出了粒子强相互作用中的“渐近自由”性质的划时代理论。经过30年粒子物理各种实验的检验,证明强相互作用中的“渐近自由”性质的理论是正确的。众望所归,戴维·格罗斯、戴维·波利策和弗兰克·维尔切克终于获得了2004年的诺贝尔物理学奖。

(中国科学院高能物理研究所粒子天体物理重点实验室 100049)