

现代物理学

参考资料

第五集

科学出版社

现代物理学参考资料

第五集

541.1165/26



科学出版社

1980

内 容 简 介

本译文集主要翻译国外书刊上发表的有关物理学和天体物理学方面综述性的和中级科普性的文章,供我国广大科技工作者、高等院校师生和中等文化水平的读者参考。本集选译了十一篇高能物理方面的文章,由中国科学院高能物理研究所郑林生负责编选。

现代物理学参考资料

第五集

《现代物理学参考资料》编辑组

(中国科学技术大学)

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年2月第一版 开本: 787×1092 1/16

1980年2月第一次印刷 印张: 10 插页: 1

印数: 0001—17,140 字数: 234,000

统一书号: 13031·1188

本社书号: 1658·13—3

定价: 1.10元

目 录

粒子物理学概貌	1
强相互作用粒子	11
带色和味的夸克	36
新粒子族的寻找	54
带粲数的基本粒子	70
物理学中对称性的违背	92
时间反演	104
用中微子探索弱作用力	118
中性弱流的探测	132
基本粒子的统一规范理论	145
我们如今在哪里?	156

粒子物理学概貌

J. Fry

近几年来,由于实验知识和理论模型方面都取得了惊人的进展,我们对决定基本粒子和它们相互作用的基本自然力的了解有了突破。我们一方面亲眼看到了中性流、获得诺贝尔奖金的 J/ψ 粒子和粲数的发现;另一方面也亲眼看到了场论的数学进展,它对我们了解基本力和相互作用有巨大的贡献。关于强子分类方面的很多进展,以及由粒子相互作用得到的有关夸克基本组成的实验证据,已有人作过评论。因此,本文的重点主要放在对粒子物理学基本问题了解的理论进展上。

对我们来说,已经知道的有四种力。按强度逐渐减小的次序,它们是强作用力(或核力)、电磁力、弱作用力和引力。其中大家最熟悉的引力,被认为是对所有粒子都起作用的力,但它如此之弱,以至于在亚原子物理这个小尺度的世界中不能观察到它的效应。所有带电粒子对电磁力都是敏感的。除传递电磁力的光子外,全部实验上已发现的粒子都经受弱作用力。除光子和轻子(虽然已有新的重轻子的某些迹象,目前这仍指电子、 μ 子、电子中微子和 μ 子中微子)外,所有统称为强子的别的粒子,它们的相互作用都很强。由于这些力的强度差别很大,较弱的力的效应就被较强的力(假如它存在的话)的效应所掩盖。因此,例如对强子,只有在没有强作用和电磁作用的情况下,它们的弱作用才呈现出来。

守 恒

实验上发现,有些量在相互作用中是不变的。这种守恒量在日常物理中最熟悉的例子是能量和电荷。守恒定律就是一些限制。每当我们发现某个过程该出现而未出现,那么,我们会想到引进一个新的守恒定律。例如质子,从能量上来看,它可以自发地分解为几个更轻的粒子,如 π 介子;但它是稳定的,因此,我们就引进一个新的守恒量,叫做重子数。对重子,例如质子和中子,重子数为1。对介子,例如 π 子和K子,重子数为0。同样,我们引进了轻子数,四个轻子的轻子数为1,所有其他粒子的轻子数为0。粒子所固有的那些守恒量(比如电荷或重子数,而不是指能量那样的量),叫做量子数。而且,对应每一种粒子有一种反粒子,它具有同样的质量,但全部可加的量子数都反号。

同电磁相互作用和强相互作用相比,在弱相互作用中守恒量要少一些。因此,早在20年前就发现了,在强相互作用中,K子从来不单独产生,但K子及其反粒子则可以同时产生。但是,单个K子总是通过弱作用衰变为较轻的粒子。因此,我们引进了一个在强作用(和电磁作用)中守恒的、而在弱作用中不守恒的新量子数,叫做奇异数。最近,又同样地引进了“粲数”这个量子数。表1概括了有关守恒定律和相互作用的情况。

表 1 守恒定律和相互作用

力	传递子	相对强度	作用程	守恒量
强	胶子	1	$\approx 1 \text{ fm}$	J, B, L, Q, P, S, C, I
电磁	光子	10^{-2}	∞	J, B, L, Q, P, S, C
弱	$W^+W^-Z^0$	10^{-10}	≈ 0	J, B, L, Q

注: J 自旋; B 重子数; L 轻子数; Q 电荷; P 宇称; S 奇异数; C 粲数; I 同位旋。

相 互 作 用

粒子相互作用的场论将狭义相对论和量子力学结合了起来。它描述一个类点的,或者说没有结构的费米子(自旋为 $1/2$ 的粒子,例如电子或中微子,但不是强子)和一个无质量的量子化力场的相互作用。电磁相互作用可在这个框架内得到很好的描述,这个量子化力场就是光子,这个理论叫做量子电动力学(QED)。它将电磁场的麦克斯韦方程和带电粒子的狄拉克运动方程综合在一起,并且在很宽的条件范围内与实验测量符合得很好。

两个电子间最低量级的相互作用可用一种叫做费曼图的图示方法来表示,如图 1。在

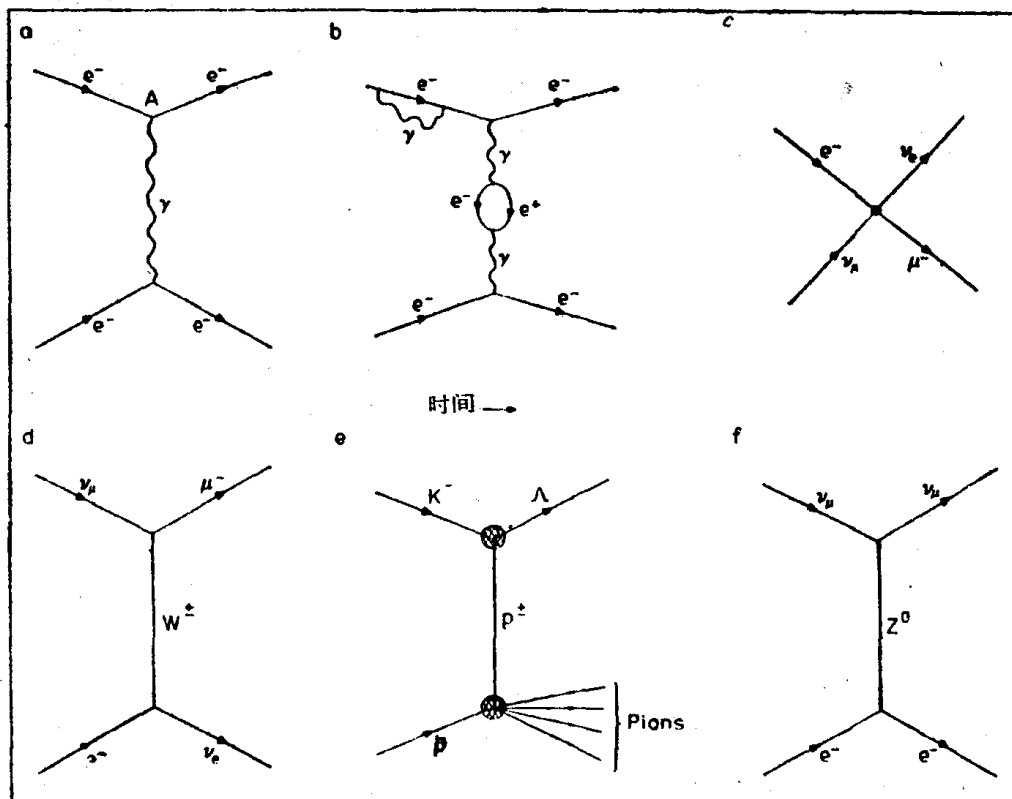


图 1 粒子相互作用的示意图

- a——电磁相互作用的第一级;
- b——电磁相互作用的较高级;
- c——弱相互作用的点耦合;
- d——通过带电流的弱相互作用;
- e——通过粒子交换的强相互作用;
- f——通过中性流的弱相互作用。

相互作用的数学描述中出现两种类型的项,即光子和一对费米子(在图中 A 点和 B 点)的耦合,以及光子传播子对电子间动量传递的依赖关系。因为光子和电子间的耦合强度(叫做精细结构常数)很小,所以象图 1b 那样,一个电子暂时分解为光子和电子,以及一个光子暂时分解为一对电子和正电子的高级费曼图,对最低级的图来说,仅给出很小的可计算之差。但这种说法掩盖了使 QED 可重正化方面的早年主要突破。在理论中,一些对电磁相互作用给出很小实验影响的较高量级图是发散的,出现了无穷大。例如,电子质量变成了无穷大。这一点可以直观地从经典的角度来理解,因为质量来自库仑势能,对于一个点粒子它变成了无穷大。在场论中质量作为两个无穷大项之差而出现,人们正是用电子质量的实验值代替这个表达式。对电荷来说,也出现同样的情况。由于我们只有有限个实验可测量的量能用来代替无穷大的表达式,因此,理论之所以可重正化,只是因为发散项数目是有限的。光子质量为 0 的一个推论是电磁相互作用呈现为长程力。

已知弱相互作用的力程同 0 不矛盾,而且在现有能量下,唯象理论用入射轻子和出射轻子间点耦合形式(图 1c)描述弱相互作用很成功。但是,这种点耦合意味着反应截面随能量增大而无限地线性增大,而(基于几率守恒的)么正性的论证却给反应截面确定了一个上限。较高量级项对这种随能量变化的行为也没有明显的改进,因此,需要有新的理论途径。

形式上,弱相互作用可以在和电磁相互作用一样的基础上建立起来。类似光子,可以考虑交换一个有质量的粒子,即图 1d 中的 W 玻色子。从测不准原理可以知道,交换非零质量的粒子导致有限力程的相互作用。这与电磁相互作用的无限大力程不同,电磁相互作用中交换的是无质量的光子。如果 W 玻色子足够重,作用程就近似等于零。很遗憾,交换粒子的质量不等于零,在理论上,意味着相互作用中有无限多个较高量级项发散,因此是无法计算的。所以,这种形式地重新解释理论是不能满意的。由于弱相互作用的耦合强度特别小,可以忽略较高量级项,所以在解释现有实验数据中这并不成为一个问题。

强相互作用的情况更不妙:不仅理论不能计算,而且由于强子的耦合强度非常大,所以包括交换多于一个粒子的较高级项实际上应该比最低级的图(图 1e)更重要。但是,似乎最低级的图也给出了强相互作用的一个定性的认识。

走向相互作用的统一理论

最近几年来,朝纠正粒子物理理论处理中的上述缺陷迈出了很重要的一步,正象麦克斯韦在综合电和磁现象中所达到的那样,这一步导致基本相互作用的统一。不用严格的数学论证,我们只能谈谈这些激动人心的进展的风味,所以我希望下面的简短概括将加强读者的兴趣,而不至于不好理解。

在场论中,如同在高等经典力学中那样,最有用的概念是拉氏密度 L ,它是粒子波函数和力场以及它们的导数的函数。利用欧拉关系式从拉氏密度可推导出粒子的运动方程。在经典和量子力学两种情况下,拉氏量在变量(例如经典情况下的位置和动量)变换下的不变性都对应于一个对称群,这个对称群又与相互作用的一个守恒性质有关。

对应于空-时有关量的每一个连续对称性,拉氏量的不变性意味着一个守恒定律。因此,例如,倘若 L 不明显依赖时间,就意味着系统总能量守恒。而且,对每一个守恒量子

数,可以建立一种场的变换,这种变换使 L 保持不变,从而运动方程也不变. 对于一个不连续的量子数,例如电荷,守恒定律相应一个总(global)规范变换 $\varphi_i \rightarrow \exp(-iq_i\theta)\varphi_i$, 这里 q_i 是场 φ_i 的电荷, θ 是一个任意的常数参量. 电荷守恒也可以在初等量子力学中得到,这里上述变换相应于粒子波函数相位的变换. 实际上,量子电动力学的拉氏量在更确切的定域规范变换 $\exp[-iq_i\theta(r,t)]$ 下是不变的,这里 $\theta(r,t)$ 是一个空间和时间的任意函数. L 在定域规范变换下不变的这类理论叫做规范理论. 现在在 QED 的情况下,拉氏量是已知的,而且碰巧它是在定域规范变换下不变的,因此 QED 是一个规范理论;——但是这里有一个能推广到其他类型相互作用的重要特征: 如果对于 QED 我们并不知道 L , 则电荷守恒加上规范不变性将给出 L !

在建立定域规范变换不变的拉氏量时,我们引进了一个规范场,它以确定的方式与粒子场耦合,耦合强度仅与电荷有关. 而且,这个规范场必须是无质量的,它的变换与一个矢量(自旋为 1)玻色子一样,这恰好就是光子的力场. 电荷守恒同在对称群 $U(1)$ 下的变换有关,为它所采用的办法很容易推广用于同各种不同对称群有关的其他守恒量,特别是有三个矢量场的 $SU(2)$ 对称群和有八个矢量场的 $SU(3)$ 对称群已应用到弱相互作用和强相互作用,这将在下面讨论. ($SU(n)$ 对称群相应于将 n 个守恒量连系在一起的变换;同电荷守恒的 $U(1)$ 单规范场相比,这里有 $(n^2 - 1)$ 个独立的规范场与使拉氏量不变的对称变换有关.)

有质量的规范玻色子

引进有质量的而不是无质量的规范玻色子,而且在规范变换下拉氏量的可重正性并不消失,这是将规范理论运用于实际情况的一个主要发展. 从前面我们对弱相互作用的讨论可以领会到,这是很根本的一步. 在那里,我们知道必须交换一个重粒子——或规范场——才能使相互作用是短力程的. 这一发展中的第一部份归功于 Nambu 和 Goldstone, 叫做对称性的自发破缺. 他们证明,在拉氏量中加上一项与标量场(自旋为零)四次方有关的势后,就会出现这样的情况: 最低能态(基态)不再是对称态了,并且用场论术语来说, $(n + 1)$ 个独立的标量场可以解释为 n 个无质量的标量玻色子和一个有质量的标量玻色子.

第二部分应归功于 Higgs,即要求描写标量场和矢量场的拉氏量在适当的定域规范变换下不变. 这将原来的 n 个无质量标量玻色子和 n 个无质量矢量玻色子重新组合,形成 n 个有质量的矢量玻色子. 最后, Gerhard't Hooft 的工作证明了这个理论仍然是可重正化的.

为了理解在理论中出现上述有质量的规范玻色子,首先考虑图 2 的转动对称势 $V(\varphi_1, \varphi_2)$. 一个经典粒子的最小势能是在圆 AC 上,如果粒子从 A 点移开,它的势能只有向上(例如向 B 点)移动时才改变,而沿圆向 C 移动时不变. 如果我们这样选取坐标,使 A 位于 φ_1 的方向上,即 $\varphi_2 = 0$,这相当于说, φ_1 的小改变改变粒子的能量,而 φ_2 的小改变却不改变粒子的能量,因此 φ_1 可看作为有质量的场,而 φ_2 是无质量的场. 增加标量场的个数就是增加对称度(对称性的程度),因而增加无质量场的个数.

加上规范变换如何能将一个无质量标量玻色子和一个无质量矢量玻色子变为一个有质量的矢量玻色子呢? 这一点很难得到不同于数学方法的直观的理解. 但至少初始自由

度和最终自由度相等这一点是显然的,因为无质量矢量玻色子有两种螺旋性态(极化的方向),而有质量的矢量玻色子自旋有三个分量。按照这个理论,有质量的矢量玻色子和有质量的标量玻色子(叫做 Higgs 玻色子)两者都应该是能探测到的。

这种假设的基态不对称,来自所谓对称性自发破缺的机理,这种机理给规范场穿上了质量的“外衣”。但这如此地意外,尚须某些说明。可以拿一个铁磁样品来作比方,它的磁特性在居里点以上是空间对称的,但在居里点以下,形成了有一定指向的磁畴,所以是空间不对称的。假设目前研究粒子相互作用的能量范围对于对称性来说还太小,因此出现了与低温磁各向异性相类似的情况。

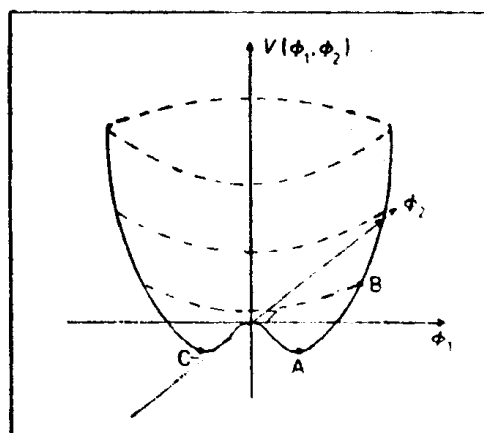


图2 两分量标量势的对称性自发破缺

弱相互作用和电磁相互作用

规范理论的最简单的应用归功于 Weinberg 和 Salam. 他们的模型将弱相互作用和电磁相互作用在同一个基础上合并了. 这个模型开始时是作为弱相互作用的理论出现的, 它把左旋中微子和具有右旋和左旋两个旋态的有质量的电子看作为带有矢量规范场 W^+ , W^- , W^0 的 $SU(2)$ 二重态 (ν, e_L) 和带有规范场 B^0 的 $U(1)$ 单态 (e_R) . 带电玻色子 W^+ 和 W^- 可以直接看作图 1d 中的带电荷 W 玻色子, 但 W^0 和 B^0 却是非物理的粒子. 但是后来弄清楚, W^0 和 B^0 的线性组合给出物理上可接受的玻色子, 就是光子 γ 和新的中性玻色子 Z^0 . 这种由不同的多重态的混合态组成物理粒子是在其他方面已经熟悉的: 例如物理的 ω 和 φ 粒子就是 $SU(3)$ 八重态和单态的混合态。

理论所说明的是: 弱相互作用和电磁相互作用本质上是同一个相互作用, 具有同样的仅依赖于电荷的耦合常数, 但弱规范场具有质量, 而光子没有质量. 弱相互作用之所以弱也可以理解了, 因为在唯象理论中唯一可测量的量等于耦合强度的平方除 W (或 Z) 玻色子质量的平方. 作为理论的一个结论, 预言了矢量玻色子 W 和 Z 的质量大于 $37 \text{ GeV}/c^2$, 这显然与相互作用短力程这一点是一致的。

理论的主要预言之一在 1973 年已由西欧中心在 Gargamelle 泡室中发现中微子被原子电子散射(图 1f) 而证实. 这个过程只能由中性流(Z^0 玻色子)来传递, 后来在其他实验室也发现了这个过程. 在最初提出中性弱流时, 反对它的主要论据之一是实验上没有发现应该出现的奇异数改变的过程. 这样, 弱衰变 $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ 等同于图 3a 的夸克-轻子反应 $s\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{u}e^+$, 因为出射粒子等同于入射反粒子. 这个反应以 4.8×10^{-2} 的几率通过交换一个 W^+ 而发生. 而衰变 $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$ 等同于图 3b 的反应 $s\bar{e}^+ \rightarrow \bar{d}e^+$, 它通过交换中性流而实现, 以 10^5 因子被抑制. 在 u , d 和 s 三个夸克的(旧)图象(见表 2) 下, 无法绕过这一异议, 因为 s 夸克同 u 夸克耦合, u 夸克又同 d 夸克相耦合. 但是奇异数改变的中性流的总效应当可以通过与一个类似过程的破坏性的干涉而被抑制. 在这个过程的中间态(见图 3c) 出现一种与 u 具有相同电荷的新夸克 c (粲夸克). 这就是 Glashow, Illiopoulos

和 Maiani 设想的处方。这种预言的一个推论是应该存在带粲量子数的粒子，它优先地(弱)衰变为奇异的而不是非奇异的终态，而且应该没有粲数改变的中性流相互作用。

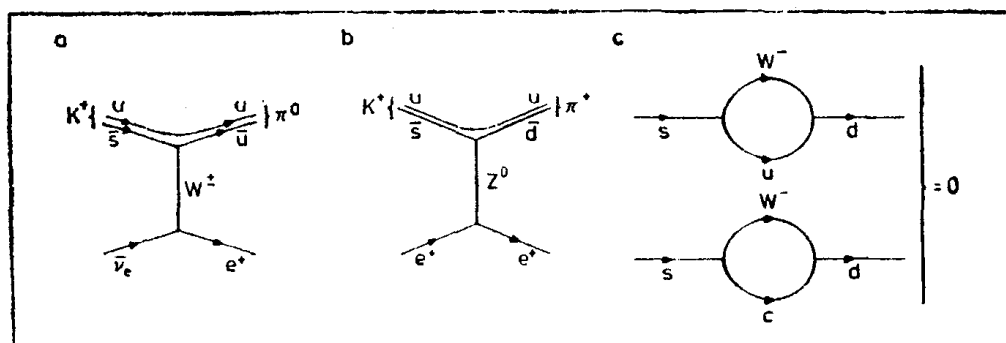


图3 奇异数改变的弱流,用表2的夸克标记

- a——奇异数改变的带电流相互作用;
b——实验上没有发现的奇异数改变的中性流相互作用;
c——奇异数改变的中性流被抑制的图示。

表2 四个已知夸克的量子数

夸克	电荷	重子数	自旋	宇称	同位旋	奇异数	粲数
u	2/3	1/3	1/2	+	1/2	0	0
d	-1/3	1/3	1/2	+	1/2	0	0
s	-1/3	1/3	1/2	+	0	-1	0
c	2/3	1/3	1/2	+	0	0	1

证 实

在过去几年中,这些想法完全被证实了。从丁肇中和 Richter 在 1974 年 11 月发现获得诺贝尔奖金的窄共振 J/ψ 开始, J/ψ 很快被解释为带粲数的夸克和反夸克的束缚态,所以它的净粲数为零,《物理汇刊》的读者亲眼见到了与之有关的粒子谱的出现 (*Physics Bulletin*, February, 1976, p. 60)。接着,又发现了明显带粲数的介子和重子 (*Physics Bulletin*, August, 1976, p. 340 和 November, 1976, p. 489), 它们衰变为奇异粒子的终态。现在的图象展示出在弱作用和电磁作用中产生粲粒子的深刻的一致性 (*Physics Bulletin*, July, 1977, p. 312), 在 SLAC 的最近的工作证明, 粲粒子确实象 Weinberg 和 Salam 的规范理论所要求的那样, 通过宇称不守恒的弱相互作用衰变。

此外,在弱相互作用的规范理论框架内,可以严格导出许多唯象的结果。这样,在假设 u, d 和 s 夸克质量小的基础上得到了全部流代数。而联系奇异数改变的弱作用耦合强度和奇异数不变的弱作用耦合强度的 Cabibbo 角是从理论导出的夸克质量比得到的。似乎实验上由粒子质量差定出的夸克质量可能完全不对。我们所看到的是“有效”夸克质量,这可能比真正的质量要大很多,这与电子在晶体布里渊区边界附近能态中的有效质量同实际质量差别很大是一样的。

应该记住, Weinberg-Salam 的模型只是一类理论中最简单的表示形式,可能尚需作

细节上的修改。特别是，这个模型在处理中性流的方法中有一个结论：在原子跃迁中预期有一个小的宇称不守恒的分量。但在牛津和华盛顿的大学所做的很灵敏的实验都没有测到这一分量的贡献 (*New Scientist*, March, 1977, p. 764)。但对这一类理论的关键性检验，是它预言的三个有质量的矢量玻色子 (W^+ , W^- 和 Z^0) 和一个有质量的标量 (Higgs) 玻色子。目前正在准备寻找这些粒子的实验。

强子结构和夸克

在规范理论的框架内讨论强相互作用之前，让我们回顾一下几百个强子的性质的规律性，以及根据它们的相互作用提出类点夸克次结构的证据，然后再集中考虑遗留下来的理论困难。在强子的两大类，重子和介子范围内，所有的粒子都在同样的基础上进行着很强的相互作用，但与类点的轻子不一样，它们具有一定大小，这一点本身就是有结构的一个直接证据。

认识到可以将具有不同奇异数的粒子分为包括一个，八个或十个成员的具有相同自旋和宇称的族，以及同一个族的成员在相互作用中的极大相似性，是 Neeman 和 Gell-Mann $SU(3)$ 对称性分类法的根据，也是基于三个带有分数电荷“积木块”(以后为了包括粲数又推广到四个)的夸克模型(表2)的根据。组成强子的规则是：由一个夸克和一个反夸克的任何组合给出介子，而三个夸克(反夸克)的任何组合给出重子(反重子)。强子的量子数由夸克的量子数按量子力学的标准规则相加而得到。这样不仅收容了所有的已知强子，而且还预言了新的强子。在1964年发现了 Ω^- ，并且它具有如图4a重子十重态所示的准确的预言质量和量子数，这可能是模型最有名的证明。第四个夸克的作用是扩大了

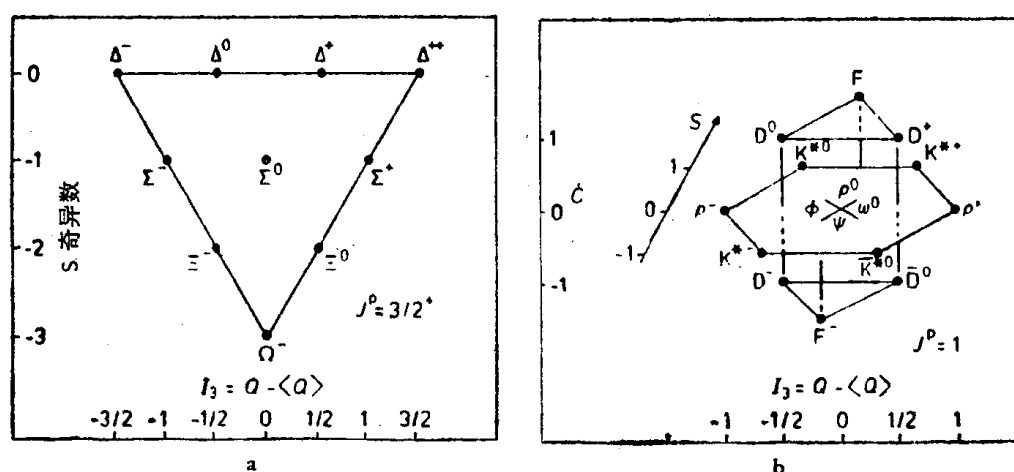


图4 典型的夸克模型强子族

a——三个夸克模型的最低的重子十重态； b——由四个夸克的模型预言的16个粒子的基本介子族。

基本的多重态，因此包括九个粒子的介子族变成了16个粒子(见图4b)，增加了6个新的粲粒子(其中四个已被发现)和一个具有隐粲数的 ϕ 型粒子，因为它由 c 和 $\bar{c}$ 夸克组成。

尽管有用四个夸克形式上组成了所有的强子这一大成功，但夸克到底是现实的呢还是仅仅是某种数学对称性的反映，仍然是留待解决的问题。还没有产生自由夸克的可信证据(后面我们还要回到这个问题上来)，但是，来自粒子散射实验的间接证明是无法否认的。因此，例如，高能质子-质子碰撞表明在大角度产生大能量次级粒子的几率比质子作

为一个整体来相互作用所应有的几率要大好多,同卢瑟福的经典 α 粒子散射实验类比,这说明质子可能有类点的次结构.来自高能、大动量转移、通过弱和电磁力的碰撞方面的证据,都与质子内类点粒子所发生的相互作用的各方面一致.例如、测到的中微子-质子总

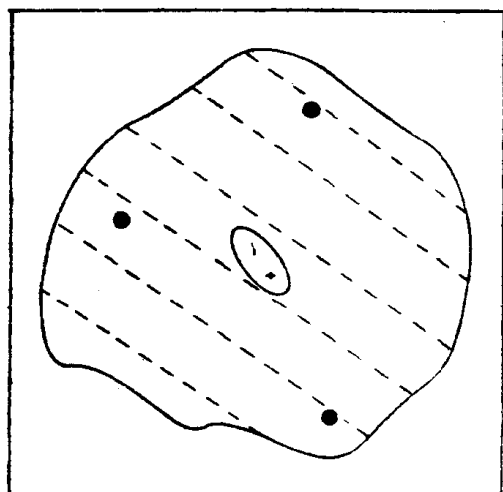


图5 质子的示意图

图上标出了三个价夸克和一对浸没在核“胶”中的虚夸克-反夸克对.

截面随能量的线性增加是这种类点粒子散射所特有的;而中微子和反中微子的截面比为3,表明散射体是类夸克的,而不是类反夸克的或两者的混合.

此外, ν -p 和 e -p 相互作用数据的比较表明,质子很象 (3.0 ± 0.6) 个带分数电荷的自旋为 $1/2$ 的点状物体,这同解释强子组分提出的夸克模型完全符合.进一步的研究证明,有来自质子内部自发物质化(和自发湮灭)的虚夸克-反夸克对的小贡献,从而使包含初始强子的夸克结构中所没有的奇异夸克和粲夸克的终态可能出现.在强相互作用下,质子并不只是夸克的集合,差不多有一半

动量被称为“胶”的某种东西所带有,而“胶”对弱力和电磁力是不敏感的.所以我们现有的(粗糙的)强子图象有点象图5那样,这里圈起来的正负号代表虚夸克-反夸克对.

颜色和夸克的禁闭

既然夸克有不可否认的间接证据,为什么在强子碰撞的碎片中并没有象从核碰撞中找到质子和中子那样看到夸克呢?认为夸克在质子中结合得这样牢固,目前比质子质能大60倍的可用能量尚不足以把它们打出来,这也没有用:这样的一个系统不可能象我们所看到的那样表现为一个准自由夸克的合成物.第二个主要问题是,为什么稳定的夸克系统只能由三个夸克组成或由一个夸克和一个反夸克组成,也就是,为什么夸克可以束缚在一起,但另一类叫做轻子的类点费米子却不能?

似非而是地,对这些问题一个可能答案,是由简单夸克模型的主要缺陷提供的.在简单夸克模型中,理论上证明对全部费米子都成立的泡利不相容原理被破坏了.例如在图4a的最低重子十重态中 Δ^{++} 包含三个 u 夸克,它们必须都处在相同的量子态.1964年 Greenberg 提出了这个问题的解答,他假设每种夸克可以有三个变种,它们的质量、自旋、电荷和其他可测量都相同,但在一个现在叫做“颜色”的附加性质上不同.为了将可能的强子态限制在实际观察到的态之内,所有的强子必须是“无色的”.这就是说,重子由三个不同颜色的夸克组成,而介子由每种颜色的夸克和反夸克的同等表象组成.用数学语言来说:颜色是一种精确的对称性,而且强子是 $SU(3)$ 的颜色单态.

我们现在对回答为什么轻子不束缚在一起,而夸克却以 $(q\bar{q})$ 和 (qqq) 的形式束缚在一起这个基本问题靠近一点儿了.假设我们把颜色看作为强相互作用中与电荷相当的量,则夸克带有“强荷”,而轻子不带强荷.同电荷类比,夸克带正强荷,反夸克带负强荷.

不同之点在于,这里有三种强荷,因此,除了不带有净强荷(无色)的同一种颜色的夸克和反夸克外,所有三种颜色或三种反颜色的组合也给出无色的总效果.所以“中性分子”由 $(q\bar{q})$ 或 (qqq) 组成.于是,我们认作为介子和重子间的强相互作用的只是夸克间强相互作用的微弱的反映,很象电中性分子间的范德瓦耳力只是核和电子间电磁力的影子.这种解释与很恰当地叫做量子色动力学(QCD)的强相互作用规范理论的结构适应得很好;在后者中,把严格的颜色 $SU(3)$ 结合进来,导致八个无质量的、带颜色的矢量规范玻色子,它们传递强作用力,称为“胶子”.恰好和QED中一样,胶子也是自旋为1的,具有场论的耦合特性:(强)荷相同的夸克相斥,强荷相反的夸克相吸.现在我们可以用与弱作用和电磁作用同样的理论方法来考虑强相互作用.所以,例如如图6的相互作用 $K^-p \rightarrow \phi\Lambda$,应该看作为夸克和反夸克对 $(u\bar{u})$ 湮灭变为一个胶子.胶子又同一对 $(s\bar{s})$ 耦合,而其他夸克实质上是旁观者.

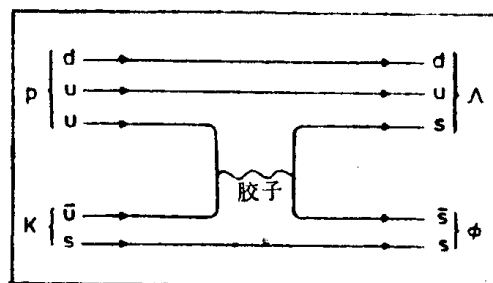


图6 用夸克-胶子耦合解释
强相互作用 $K^-p \rightarrow \phi\Lambda$. 为了清楚起见,将夸克束缚在强子内所交换的胶子在图中没有画出.

有力的证据

颜色的实验证据意外地十分有力. Adler 证明中性 π 子的衰变率依赖于夸克颜色数目的平方. 如果忽略颜色,则给出的值差一个因子9. 在电子和正电子互相湮灭的实验中,还出现另一个颜色效应. 那就是,在足够高的能量下,湮灭终态中产生的强子数目对 μ^- -反 μ^+ 对数目之比 R 应该趋近于一个常数,它等于夸克电荷的平方和: 对具有三种颜色的三个夸克,这个值等于2;而对于具有三种颜色的四个夸克,这个值等于 $10/3$. 不考虑共振,图7所示的 R 特性对颜色是很有力的支持,而且在相应于产生粲粒子的4GeV附近还有一个阈.

为什么实验上没有自由夸克? 对这个问题的进一步了解直接来自规范理论的数学,它涉及到荷的表(面)值的变化,因此涉及到耦合强度的变化,这种变化是离带荷粒子距离的函数. 在一个电子的心部有一个负电荷,叫做裸电荷,它很大,而且可能是无穷大. 在真空中,这个电荷在周围感应出一圈正电荷,它差不多与裸电荷相抵消,所以在离心部某个很小的距离之外,电荷将保持为常数.

由于带颜色的胶子间相互作用,强荷出现相反的情况,强荷的强度随距离增大. 因此有人猜测,当夸克互相很靠近时,耦合强度可能趋近于零,所以夸克实际上是自由粒子(就象由高能入射粒子所看到的那样). 而当夸克分开时,力随距离而增加,所以有限的能量将无法把它们分开;这时不是产生新的介子或夸克,而是导致夸克的有限的分开,即我们测出的强子大小. 这当然是一个很吸引人的假设,它可以解释全部散射数据,但它的最大好处可能是排除了更进一步的夸克次结构的任何可能性.

以上评述掩盖了很多重要的细节,而且作了许多简化以便能看出高能物理的进展. 强调的重点是,在规范理论的基础上我们已经为粒子物理勾画出了理论轮廓,在这个理论

中所有的物质都由自旋为 $1/2$ 的基本费米子组成，而所有的力由规范玻色子来传递。但是，为什么夸克具有分数电荷，以及夸克与轻子间是否有密切联系，这些仍然是未解决的问题。在弱相互作用下，两对夸克和轻子

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \text{ 和 } \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

的密切关系应该具有根本的意义，但除了研究高能物理外，似乎宇宙只需要其中的第一对。

夸克和轻子间的这种对称性已使人们产生了这样的猜测，如果前面提到的新的重轻子确实存在，就应该有相应的中微子和新的夸克对，它们一起组成第三个夸克和轻子对。

还必须记住，某些十分基本的知识，例如电子的质量和电荷，是经验地加进理论中去的，而不是从理论导出的，而且还没有将重力归入统一规范理论的重大进展。但无论如何，我们对粒子物理基本问题的理解已大大增长了。

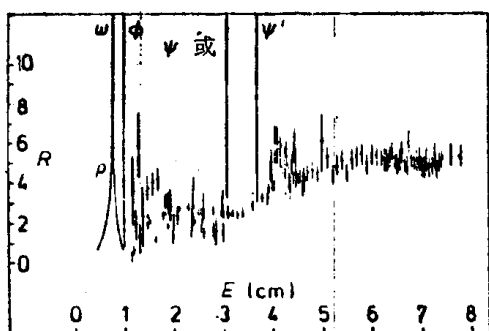


图7 比率 $\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$ 随质心系能量的变化

(金炳年译自《Physics Bulletin》，1977年11月号)

强相互作用粒子

G. F. Chew, M. Gell-Mann, A. H. Rosenfeld

本文介绍了高能物理的近期发展。能够和四种自然力中最强的那种力起作用的粒子似乎不再是“基本的”了，它们可能是互相构成的复合体。

仅仅在五年以前，人们还可以把当时已知的三十种亚原子粒子排列成一个很有条理性的表，并把它们叫做基本粒子。这在当时是没有什么疑虑的。但是，从那以后又有六、七十种亚原子物体被发现。显然，“基本的”这个形容词就不能再用到所有的这些粒子上了。因此，这篇文章的标题就小心地避开了这个形容词。现在，物理学家已经普遍认为，这篇文章所涉及到的主要粒子中，已经没有一个可以认为是基本的了。

在物理学中，过去也发生过现在这种情况。对于为数不多的观测，从前观察事物的老方法是胜任的，但是到后来，当提高观察的准确度和扩大观察的范围时，这种方法就显得很笨和不够了。托勒玫的描述行星运动的本轮天动说图象，就曾发生过这种情况。在本世纪初又发生了大致相似的情况。那时，光谱学家们在研究被激发的原子放出的光时发现了大量的不连续的波长，它们和经典电动力学所预言的波长是完全不同的。光谱学家们积累了大量的实验资料，包括一些决定这些激发原子所允许的态的“选择定则”，终于使得海森堡、薛定谔等人在1926年建立了一种新的力学，即量子力学。这种力学可以预言原子和分子范围内物质的大多数状态。

当前的粒子物理可能面临着类似的情况。虽然类似于量子力学那样的重大的导致统一的发现目前还看不到，但是，实验资料正在开始给出明显的和某种程度上可以预言的图象。总结现在可以得到的大量关于粒子的知识，我们可以说些什么呢？

首先，强相互作用粒子（如中子和质子）和其他粒子之间有明显的差别。正如大家所知道的，中子和质子是通过强的、短程的核力互相起作用，正是这种力把这些粒子结合在原子核内。除去光子（光粒子和其他电磁辐射）和四个叫做轻子的粒子（即电子、 μ 子和两种中微子）之外，目前发现的所有粒子都参与这种强相互作用。

强相互作用粒子的另一个显著的特性，就是它们的静止质量都不是很小的。所谓静止质量，就是一个粒子在没有运动时的质量，这是它所能具有的最小质量。这个质量现在一般都是用它的能量当量来表示，而不是像过去那样经常用电子质量单位来表示。最轻的强相互作用粒子是 π 介子，它的质量用能量当量来表示大约是137 MeV。作为对比，电子的质量大约是0.5 MeV，而光子和中微子的质量被认为是0。

第三个普遍观察结果，就是到目前为止那些急速增加的粒子差不多都是强相互作用粒子。虽然对物理学家来说，这种现象好像有些不好理解，但是在普通的原子核里以前也有过这种情况。我们知道，从氘（重氢）核到最重的原子核都可能存在着由基态和很多激

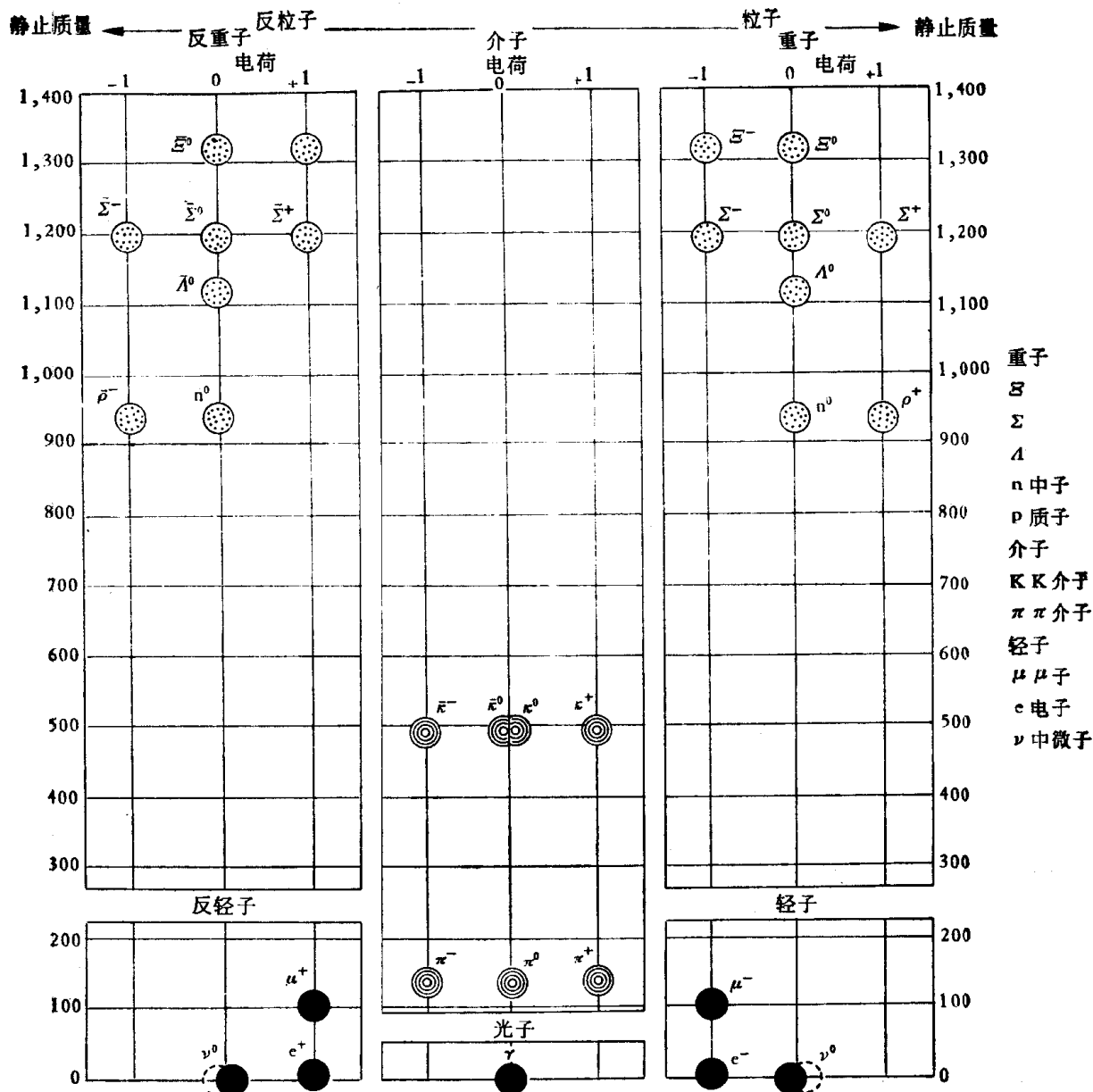


图1 1957年的30种粒子包括16种重子和反重子、7种介子、6种轻子和反轻子以及光子。(重子、介子和轻子分别表示重的、中间的和轻的粒子。)和强相互作用力或者核力发生作用的强相互作用粒子是用非黑球表示的。用黑球表示的粒子是不能与这种力发生作用的。这些粒子是那些在过去六年半的时间里迅速增加起来的,如在图2中所给出的粒子的先头部队。在这同一时期里轻子和反轻子的数目只增加了两个。现在已知中微子有两种而不是一种,每一种都有它的反粒子(在1957年知道的两种粒子旁用虚线表示)。大家认为还有另一种中性的无质量的粒子,即引力子,也就是万有引力的载体存在,但是在这里没有画出来。设想的弱作用力的载体将有很大的质量和一个单位电荷,这里也没有画出来。现在正在寻找它存在的证据。

发态所组成的一系能级。这些能级表示组成原子核的核子(中子和质子)之间结合能的大小不同,它们可以用好几种方法测量出来。当然,结合能就是强的核力的一种表现。

现在已经知道,这种核力同样可以使那些有时叫做基本粒子的强相互作用粒子处于多种能态。较低的态是“束缚态”或稳定态。较高的态只是部分束缚态或不稳定态,它们

在远小于 1 秒的时间内就要衰变。结果是，所有的强相互作用粒子都显示出一个没有明显上限的能级谱。

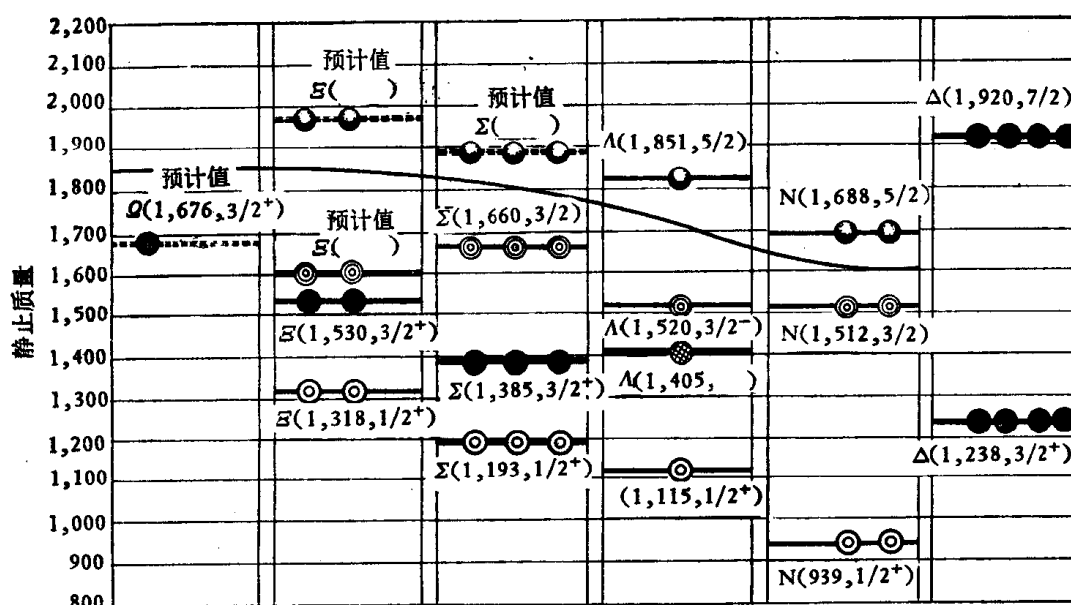


图 3 具有相同的超荷 (Y) 和同位旋 (I) 值的重子多重态被排列在一个纵列里。现在只知道有六种 Y 和 I 的组合，每种组合用一个大大的希腊字母来表示。粒子的符号和颜色的原则与图 2 中所用的相同。在黄褐色底色的断裂线上的粒子是低能态的再现点。

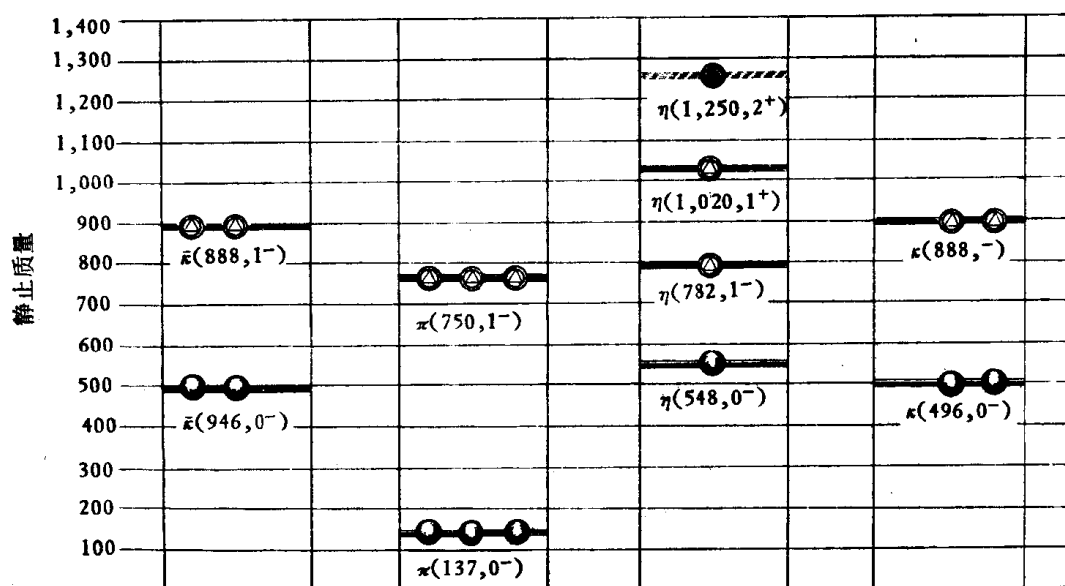


图 4 具有同样的 Y 和 I 值的介子多重态被排列在一个纵列里。 Y 和 I 的四种组合用小写的希腊字母表示。还没有找到介子的再现点。第一个预言的再现点是在 1700 MeV 附近的 π 三重态。

由于轻子不参与强相互作用，所以，从没有质量的中微子到质量为 106 MeV 的 μ 子，它们的态的谱自然也就与任何已知的动力学谱没有什么类似之处。近来，物理学家们已经掌握了大量关于轻子的简单性和规律性的知识，但是，对这些粒子存在的原因却一无所知。

在下面的讨论中，我们将从强相互作用力在四种相互作用力的体系中所占的地位开