

北京大学学报

BEIJING DAXUE XUEBAO

自然科学

ZIRAN KEXUE

“基本粒子”结构理论专刊

2

1966

戴元本

北京大学学报(自然科学)編輯委员会

周培源(主编)

邢其毅

王竹溪

汤佩松

程民德

赵以炳(副主编)

申又枨

张青莲

谢义炳

叶企孙

张龙翔

虞福春

乐森璿

黃子卿

(以姓氏笔划为序)

北京大学学报

自然科学

第十二卷 第二期(总37期)

Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,

Vol. XII, No. 2, 1966.

編輯者 北京大学学报(自然科学)
編輯委员会

出版者 北京 大学
北京西郊海澱

印刷者 中国科学院印刷厂

总发行处 北京市邮局

订购处 全国各地邮电局

代售处 全国各地新华书店
科学出版社各地门市部

(京) 1-3,100

1966年5月出版

定价: 0.70 元

本刊代号: 6-414

目 录

强相互作用粒子的结构模型.....	北京大学理论物理研究室基本粒子理论组 中国科学院 数学研究所 理论物理研究室	(103)
强子结构模型的协变场论方法.....	中国科学院 数学研究所 理论物理研究室 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组	(113)
结构模型中的 $\frac{1}{2}^+$ 重子流	北京大学理论物理研究室基本粒子理论组 中国科学院 数学研究所 理论物理研究室	(124)
结构模型中 $\frac{1}{2}^+$ 重子的电磁形式因子 ...	北京大学理论物理研究室基本粒子理论组 中国科学院 数学研究所 理论物理研究室	(137)
结构模型中 $\frac{1}{2}^+$ 重子的轻子型弱相互作用	北京大学理论物理研究室基本粒子理论组 中国科学院 数学研究所 理论物理研究室	(150)
结构模型中的 $\frac{1}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+$ 重子流.....	中国科学院 数学研究所 理论物理研究室 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组	(162)
在结构模型中的 $N^{*+} \rightarrow \gamma + p$ 衰变 ...	中国科学院 数学研究所 理论物理研究室 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组	(167)
结构模型中的 $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 l^- \bar{\nu}_l$ 衰变	中国科学院 数学研究所 理论物理研究室 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组	(176)
从结构模型中重子流的独立结构因子看内部运动及对称性	中国科学院 数学研究所 理论物理研究室 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组	(183)
结构模型中的介子流.....	北京大学理论物理研究室基本粒子理论组 中国科学院 数学研究所 理论物理研究室	(189)
结构模型中介子的电磁衰变和轻子型弱衰变	北京大学理论物理研究室基本粒子理论组 中国科学院 数学研究所 理论物理研究室	(194)
“亚基本粒子”的电荷和矢量介子的电磁衰变.....	何祚麻	(205)
介子结构波函数的时空对称性质.....	北京大学理论物理研究室基本粒子理论组 中国科学院 数学研究所 理论物理研究室	(209)
介子结构波函数与贝特——沙尔波特方程	北京大学理论物理研究室基本粒子理论组	(213)
在束缚态中基础粒子的有效质量.....	北京大学理论物理研究室基本粒子理论组	(225)
基本粒子的旋转激发态.....	北京大学理论物理研究室基本粒子理论组	(230)
高激发态的单粒子近似.....	刘耀阳	(237)

ACTA SCIENTIARUM NATURALIUM UNIVERSITATIS

PEKINENSIS, Vol. XII, No. 2, 1966

CONTENTS

The Structure Model of the Hadrons.....	<i>Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University, and Inst. Math., Academia Sinica</i> (103)
The Covariant Field Theoretical Method for the Structure Model of Hadrons.....	<i>Inst. Math., Academia Sinica, and Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University</i> (123)
The $\frac{1}{2}^+$ Baryon Currents in the Structure Model.....	<i>Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University, and Inst. Math., Academia Sinica</i> (136)
The Electromagnetic Form Factors of the $\frac{1}{2}^+$ Baryons According to the Structure Model.....	<i>Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University, and Inst. Math., Academia Sinica</i> (149)
The Weak Interaction with Leptons of the $\frac{1}{2}^+$ Baryons in the Structure Model.....	<i>Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University, and Inst. Math., Academia Sinica</i> (161)
The $\frac{3}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+$ Baryon Currents in the Structure Model.....	<i>Inst. Math., Academia Sinica, and Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University</i> (166)
The Decay of the $N^{*+} \rightarrow \gamma + p$ in the Structure Model.....	<i>Inst. Math., Academia Sinica, and Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University</i> (175)
The Decay of the $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + l^- + \bar{\nu}_l$ in the Structure Model.....	<i>Inst. Math., Academia Sinica, and Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University</i> (182)
On the Connection of the Inner Movement and Outer Symmetry with the Independent Structure Form Factors of Baryon Currents in the Structure Model.....	<i>Inst. Math., Academia Sinica, and Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University</i> (188)
The Meson Currents in the Structure Model.....	<i>Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University, and Inst. Math., Academia Sinica</i> (193)
The Electromagnetic and Weak Decays of Mesons in the Structure Model.....	<i>Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University, and Inst. Math., Academia Sinica</i> (204)
The Charge of Ur-hadrons and the Electromagnetic Decays of Vector Mesons.....	<i>Ho Tso-hsiu</i> (208)
The Space-time Symmetry Properties of the Structure Wave Functions of the Mesons.....	<i>Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University, and Inst. Math., Academia Sinica</i> (212)
The Structure Wave Functions of Mesons and the Bethe-Salpeter Equation.....	<i>Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University</i> (224)
The Effective Mass of the Basic Particles in Bound States.....	<i>Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University</i> (229)
The Rotational Excited States of the Elementary Particles.....	<i>Division of Elementary Particles, Lab. Theor. Phys., Peking University</i> (236)
The Individual-particle Approximation of the Higher-Excited States.....	<i>Liu Yao-yang</i> (241)

世界是无限的。世界是充满着矛盾的。万事万物都是对立的统一。没有一个事物不存在矛盾，没有一个事物是不可分的。一分为二，这是个普遍的现象，这就是辩证法。自然界是如此，社会是如此，人类的认识也是如此。否认这一点，就是形而上学。

摘自“红旗”杂志发表坂田昌一《关于新基本粒子观的对话》一文的编者按语

强相互作用粒子的结构模型*

北京大学理论物理研究室基本粒子理论组
中国科学院数学研究所理论物理研究室

一、引言

近年来，基本粒子物理实验和理论研究中许多迹象表明，基本粒子不是物质的最原始的点粒子，而是由更基本的物质单元所组成的复合体系，这种情况已经在文献[1, 2]中作了分析。

目前，实验上发现了大量共振态和新粒子。关于基本粒子对称性（特别是 SU_3 和 SU_6 对称性）的研究给出了这些粒子的分类，并且揭示了基本粒子质量谱的规律性。这种情况与元素周期律揭示了化学元素性质之间相互联系的规律性十分相似。我们知道元素周期律所揭露的规律性反映了各种元素的原子具有统一的结构以及原子中电子排列的周期性。同样，基本粒子之间广泛的对称性联系，也隐示了各种各样的基本粒子具有统一的结构基础，而且它们的相互作用具有统一的内部原因。高能电子散射和高能中微子反应的实验从另一方面揭示了基本粒子的结构性质，现在实验上已经测得了核子的电磁形式因子和弱形式因子，说明核子的电荷和“弱荷”不是集中在一点，而是有一定的分布。微扰论和色散关系理论不能满意地解释所观察到的形式因子，这说明这些以点粒子模型为基础的理论不能真实地反映具有一定内部结构的基本粒子的性质。

理论上，点模型场论所具有的发散困难是人们早就知道的，这个困难本身就说明必须把基本粒子当作有内部结构的东西去处理。但是，不少西方物理学家却只是把这个困难当作数学上的困难、处理方法上的困难，他们满足于点模型场论所得到的某些成功，而认为研究对象（基本粒子）本身就是数学的点。在他们看来，只要把理论形式作一些改动，原

* 1966年4月12日收到。

有的量子场论就能够成为没有发散困难的最终理论。这种情况,正象《红旗》杂志所指出的那样:“在人们追求物质结构的真理的过程中,每深入一步,都有人中途停顿下来,认为已经达到‘物质的始原’,认为这种‘物质的始原’再不可分了,再不包含内在的矛盾了,企图完成所谓最终的理论。自然科学的历史无情地嘲弄着这样的形而上学者们,越来越清楚地揭示出自然界固有的辩证法。”^[3]

现在,实验和理论的发展已经在我们面前提出了一个任务,要进入物质结构的更深的层次,研究基本粒子的内部结构。这是一个全新的领域,当研究工作进入到这样一个新领域的时候,正确的方法论指导尤其具有决定性的意义。

什么是我们的方法论呢?我们的方法论就是经过无数实践考验的唯物辩证法,就是实践论和矛盾论。

毛主席教导我们“人的正确思想,只能从社会实践中来,只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来。”^[4]在探索新理论的时候,必须而且只能以实验事实为出发点。这是我们的第一条原则。

但是,我们不是实证主义者。我们的目标绝不是满足于寻找经验事实之间的外部联系,而是要透过事物的表面现象和事物的各个方面,抓住事物的本质,事物的全体,事物的内部联系。因此,无论是对待各种实验资料,还是各种理论方法,我们都要加以去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里的改造制作,使之能更深刻地反映客观的物理本质。这是我们的第二条原则。

我们还必须把根据实验事实经过分析提升得到的初步理论再用到丰富的实验事实中去,经过反复实践来检验和发展理论。在基本粒子理论的研究中,常常会遇到这种情况:某个理论起初得到一些实验的支持,但是却经不起新的实验事实的考验,而暴露出严重的局限性和片面性,甚至根本就是错的。因此,当我们的研究进入更深一层的时候,必须注意我们的工作与各个实验领域特别是与新的实验事实的联系,不能把一些成功的经验绝对化,要在反复的、多方面的实践中,不断检验,改造和发展理论,这是我们的第三条原则。

毛主席还告诉我们:“自然界存在着许多的运动形式,机械运动、发声、发光、发热、电流、化合、等等都是。所有这些物质的运动形式,都是互相依存的,又是本质上互相区别的。每一物质的运动形式所具有的特殊的本质,为它自己的特殊的矛盾所规定。”^[5]“如果不研究矛盾的特殊性,就无从确定一事物不同于他事物的特殊的本质,就无从发现事物运动发展的特殊的原因,或特殊的根据,也就无从辨别事物,无从区分科学研究的领域。”^[5]毛主席的这段话,对我们的工作有很重大的指导意义。从理论物理的发展来看,人们过去已经总结出对微观低速粒子(如原子,原子核)适用的量子力学,也发展了一套处理微观高速的基本粒子现象的量子场论,而今天则已深入到基本粒子内部结构这个超微观领域。很显然,一方面,量子力学、量子场论和强子结构理论体现着研究微观客体运动规律的一步步深入,它们有着继承与发展的关系。另一方面,组成基本粒子的更为“基本”的“基础粒子”的运动规律同基本粒子、微观低速粒子的运动规律相比,是本质上互相区别的。我们必须深入研究超微观领域所具有的特殊的矛盾,从而掌握超微观运动的本质。期望用旧有的量子力学或量子场论来全部解决基本粒子结构问题是不可能的。在应用这些理论处理结构问题时,势必遇到许多矛盾。我们绝不能害怕矛盾,绝不能在新领域面前

畏缩不前。物理学发展中的许多事实表明,新的实验事实同旧有理论的尖锐矛盾正是理论发展的突破点。为了探寻超微观领域的新规律,我们仍然需要先利用原有的量子场论方法来处理结构问题。一方面,找出新规律与原来量子力学、量子场论规律之间的联系和继承关系,另一方面在同实验比较中突出现有理论处理结构问题的主要矛盾所在,进而改造理论,发展理论,为寻找超微观运动规律准备条件。喜欢矛盾,通过反复实践暴露事物的内在矛盾,并在揭露矛盾解决矛盾的过程中不断前进,这是我们的又一条原则。

二、对称性理论的发展和结构模型的提出

五十年代初,实验上发现了一系列“奇异粒子”,盖尔曼和西岛^[6]总结分析了这些奇异粒子的性质,发现它们的量子数(电荷、同位旋、重子数和奇异量子数)之间满足一个统一的简单关系式。这一事实向人们暗示了不同的基本粒子之间存在着内在的本质联系。

对于隐藏在实验事实和实验规律背后的本质,只有用正确的方法论作指导,从辩证唯物主义的观点出发才能看得清楚,才能真正理解。1955年,日本物理学家坂田昌一遵循恩格斯物质结构无限层次的思想 and 列宁关于电子不可穷尽的思想,指出盖尔曼——西岛关系是基本粒子内部结构的反映,提出了著名的坂田模型^[7]。按照这个模型,所有的强相互作用粒子都是由质子、中子和 Δ 粒子(统称为“基础粒子”)以及它们的反粒子组成的。在此基础上,坂田的合作者还指出^[8],如果忽略 Δ 粒子和核子的质量差,强相互作用可能满足三维么正群的不变性,从而预言了当时尚未发现的 η 粒子的存在。

然而,一些受着实证主义思潮统治的西方科学家却拒绝透过经验来寻求事物的本质,透过表面现象来研究基本粒子的内部结构。在他们看来,只有经验才是可靠的,理论研究的目的只不过是寻找经验事物之间的外部联系。因此,坂田模型提出后长期没有受到他们的重视。直到1961年,由于实验上发现了大量的共振态粒子,才有人比较认真地研究了坂田等人的工作,并在坂田模型的基础上,提出了基本粒子 SU_3 对称性的八重态方案^[9]。

以后两年所作的大量理论分析和实验检验工作表明,八重态方案的若干重要预言取得了较好的实验验证。这一事实进一步说明了基本粒子具有内部结构,并且应该可以据此对组成基本粒子的“基础粒子”的性质及基本粒子结构图象作进一步的探索。可是,许多西方科学家走了另一条道路。他们在建立理论时受到了坂田模型的启示,而建立起理论以后就丢开了坂田模型中最本质的东西,即结构的观点、层次的观点,只承认唯象的对称性。他们不理解对称性理论的成功是由于它在一定程度上反映了基本粒子内部结构的客观物理实际。相反,他们却片面地夸大唯象的对称性理论的威力,盲目地加以扩充,提出了大量的缺少物理基础、得不到实验检验的“对称群”,在理论工作上走了不小的弯路。

但是,实验事实无情地摒弃了各种走入歧途的“理论”,它迫使人们不得不回到结构模型的概念上来。为了解释一些突出的实验事实(例如,重子属于多重态1、8、10,介子属于多重态1和8),盖尔曼在1964年提出了“夸克”模型^[10],认为介子由一对正反“夸克”组成,重子由三个“夸克”组成。这一模型成功地说明了一些实验现象,同时为对称性理论的进一步发展提供了一种可能的物理图象。

即使在这个时候,那些受着实证主义哲学思想束缚的西方科学家仍然不敢面对基本粒子具有内部结构的事实。他们一再强调“夸克”只是一种数学符号。事实上,在建立

SU_6 、 $S\tilde{U}_{12}$ 这些新的对称性理论时都用到了“基本粒子由夸克组成”的概念,但在建立起理论之后他们又赶快把这一概念抛掉了。因此,他们只能在群的框框内兜圈子,给出一些唯象的关系,而不能对基本粒子相互作用中的一些复杂现象作出统一的合理的解释。

对称性理论在从 SU_3 到 SU_6 、 $S\tilde{U}_{12}$ 的发展过程中取得了若干进一步的成功。例如,对于 $J^P = 0^-, 1^-$ 的介子和 $\frac{1}{2}^+, \frac{3}{2}^+$ 的重子的分类,以及质子、中子的磁矩比等静止性质作出了较好的预言。但是在另一些问题上, SU_6 和 $S\tilde{U}_{12}$ 理论又显出和实验的尖锐矛盾。例如散射问题,高共振态的衰变问题等等^[1]。这种“既对称又不对称”的错综复杂的局面从纯粹唯象的对称性观点是很难理解的。只有摆脱掉错误的哲学思想的束缚,才能从迷雾中看清道路。

我们的认识是:一方面,对称性理论的预言得到了较广泛的实验验证,说明它比较正确地反映了基本粒子之间的某些联系;另一方面,对称性理论所给出的基本粒子之间的联系带有唯象的特征,没有能够从它的本质,从它的内因加以说明。由于基本粒子内在本质的复杂性,对称性理论不能完整地反映基本粒子之间的相互联系。它所反映的联系是局部的、有条件的。因此,为了进一步研究对称性产生的内因和对称性起作用的外部条件,不能仅仅停留在唯象的对称性描写,而需要深入到基本粒子的内部去研究它的结构。

从这样的观点看问题,我们认为^[1]基本粒子之间所呈现的这样一种“既对称又不对称”的错综复杂的局面正说明基本粒子存在着内部结构,是基本粒子内部的矛盾性所决定的。基本粒子可能是由若干更基本的物质单元——“基础粒子”所组成的*,基本粒子之间所表现出来的某些对称性(特别是 SU_6 、 $S\tilde{U}_{12}$ 对称性)联系是“基础粒子”结合成基本粒子时性质的体现,而不是基本粒子之间相互作用所固有的。因此,我们当然只能期望在分类、磁矩这些主要体现基本粒子内部结合特征的情况表现出 SU_6 对称性,而不能贸然要求所有相互作用过程都有 SU_6 对称性。

深入到基本粒子内部研究它的结构,就是要摸清基本粒子内部的矛盾,要探明基本粒子是由什么样的“基础粒子”组成的?“基础粒子”遵从什么样的运动规律?它们是怎样结合成基本粒子的?要解决这些问题遇到很大的困难。首先,目前实验上还没有找到组成基本粒子的“基础粒子”。其次,在基本粒子内部这个超微观领域,现有的量子场论是否正确是一个很大的疑问,基本粒子的内部结构问题可能有着全新的规律性。

但是,这些困难不能阻挠我们对基本粒子结构问题的研究。如果由于实验上目前还没有发现“基础粒子”就不敢相信它的存在,否认产生对称性的内在本质,就是实证主义,是一种错误的伪科学的观点。而如果我们只是停留在“基本粒子由基础粒子组成”这一观点上,只看到“基础粒子服从全新的规律”,而不把所设想的结构模型用到实践中去反复检验,也就不可能揭露基本粒子的内在矛盾,不可能使我们的认识真正深入一步。

正确的方法是,首先根据唯象规律的启示,根据对现有对称性理论的分析提出一个结构模型的初步物理图象,然后回到实验中去检验,修改,再检验,再修改,在不断的实践中

* 这里我们借用了坂田模型中“基础粒子”一词作为构成“基本粒子”的、更基本的物质单元的称呼。和“基本粒子”一词的意义一样,“基础粒子”并不是物质的始原,而只不过是物质结构无限层次中比“基本粒子”更深入一层的物质单元。从唯物辩证法的观点来看,“基础粒子”也还是可分的。在文献[2]中把它称为“亚基本粒子”,意义是相同的。在以后的文章中,为了简单起见,我们略去所加的引号。

发展物理图象,逐步达到对基本粒子内部结构的正确了解。

为了将结构模型的物理图象回到实践中去检验,必须通过一定的理论方法建立基本粒子内部结构和基本粒子之间外部反应外部过程的联系。可以肯定,在内部结构领域中,会有新的规律,需要新的理论方法。但是这种新的理论方法不可能凭空产生,只能在对现有理论一分为二分析的基础上发展起来。在基本粒子内部,旧有的量子场论一定有其正确的和不正确的部分。为着去伪存真,必须通过实践先把旧理论应用到新的领域中去,以便突出矛盾,找出旧理论的突破点,从而过渡到新的理论。

在运用现有理论处理基本粒子结构问题的时候,有两个矛盾可能是重要的。其中之一是由于基本粒子经常以高速运动而产生的。这就要求我们处理一个质心运动为相对论性的束缚态问题。这是一个困难。目前场论中已有的描述束缚态的相对论性方程只有一个贝特—沙尔波特方程,但是它能不能用来描述基本粒子结构是一个很大的疑问。而且这个方程的解及其物理含义也存在许多疑义。在此情况下,我们并不试图马上就寻找并解出基本的运动方程,而是唯象地假设存在一个描写基本粒子结构特性的波函数,通过计算结果与实验的比较来确定这一波函数的性质,从而对基本粒子内部“基础粒子”的运动状况有所了解。同时,也尝试用现有的贝特—沙尔波特方程对波函数作一些讨论,以便进一步澄清物理图象,并揭露新的矛盾。

另一个矛盾是由于基本粒子能够不断地相互转化。现有的量子场论着重地反映了基本粒子的这一特性,如果把这种理论观点贯彻到底,就只有相互转化的关系,没有谁组成谁的关系。而现在实验事实告诉我们,基本粒子具有相对稳定的内部结构。因此在运用场论来处理结构问题时就必须加上一定的附加假定,例如“单道近似”的假定(参见下节)。

可以认为基本粒子内部结构的相对稳定性主要决定了描写基本粒子这一复合体系的“结构波函数”的对称性质。例如,如果使“基础粒子”结合起来的超强相互作用有自旋无关性,并且基本粒子内的“基础粒子”相对运动足够慢,在质心系中可以忽略旋量波函数的小分量,则结构波函数就具有 $(U_6 \times U_6)_F$ 的对称性^[11]。但是基本粒子的转化过程则破坏这一对称性。例如在共线过程中就只剩下 $(SU_6)_W$ 对称性^[12],而在更复杂的过程中对称性就更低。正是这两个方面的矛盾斗争决定了基本粒子相互作用所呈现的既对称又不对称的复杂情况。对于基本粒子的静止性质,稳定结构的特征占主要地位,因而表现出较好的对称性;对于散射、湮没这些过程,运动的效应,转化的效应十分显著,对称性就遭到较大的破坏。对于低自旋粒子,内部运动可能主要是简单的 S 波,稳定结构的特征比较显著,因而体现的对称性较高;对于高自旋粒子,内部运动较为复杂,对称性残留得较少。这样,从内部结构的观点出发,我们就有可能对基本粒子在相互作用中表现的性质作出统一的解释。

自然,要真正达到对于基本粒子性质的本质的整体的认识,就必须把握基本粒子内在的矛盾暴露它的本质。这需要我们通过细致深入的工作,用目前已提出来的基本粒子结构模型去和基本粒子各方面的实验事实作系统的比较,在实践中不断地揭露矛盾,不断地修改和发展目前的模型和方法。

三、强子结构模型中的基本物理图象和协变场论方法

根据现有的实验和理论的知识,可以给强相互作用粒子的结构模型提出下述基本物理图象^[1]:

1. 基本粒子具有内部结构,它们是由一些更为基本的“基础粒子”组成的。
2. “基础粒子”之间的相互作用主要部分是 SU_3 不变的。
3. 存在三种不同的“基础粒子”,它们构成 SU_3 群三维基础表示的基,作为一种可能性^[10],可以假定它们的超荷 Y 、同位旋第三分量和电荷 Q 分别为:

	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
Y	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$
I_3	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0
Q	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$

“基础粒子”的自旋假定是 $\frac{1}{2}$, 它的质量可能很大,例如大于一百亿电子伏。

赝标介子八重态和矢量介子单态、八重态由一对正反“基础粒子”组成;重子八重态和重子十重态由三个基础粒子组成。

4. 基本粒子内部“基础粒子”之间的强相互作用可能分成两种类型。一种是超强相互作用,它基本上具有自旋无关性,使得“基础粒子”形成很强的束缚态(基本粒子),它决定了基本粒子的结构波函数和质量的大小。但由于某种动力学机制或对称性原因,超强作用并没有在基本粒子之间的相互作用中显现出来。另一种是次强相互作用。这种自旋有关的相互作用破坏了 SU_6 和 SU_3 对称性,它决定了束缚态波函数的畸变和质量的分裂。次强作用在基本粒子之间的相互作用中显现出来,表现为通常的强相互作用。

由于次强相互作用造成的质量分裂比束缚态的结合能小得多,可以认为次强相互作用远较超强相互作用为弱。因此,在通常情况,在略去次强相互作用对质量的二次修正的同时,可以略去它对基本粒子结构波函数的一级修正。

这样,我们可以说,原来属于 SU_6 群 **35** 表示的 $J^P = 0^-$ 和 1^- 的介子是由一对正反“基础粒子”所组成的 S 波状态。在质心系中波函数的空间部分相同,赝标介子八重态之间及矢量介子九重态之间的自旋波函数也分别相同。原来属于 SU_6 群 **56** 表示的 $J^P = \frac{1}{2}^+$ 和 $\frac{3}{2}^+$ 重子是由三个“基础粒子”所组成的对于自旋指标和 SU_3 指标全对称的 S 波状态。在质心系中这些重子波函数的空间部分相同,八重态重子之间和十重态重子之间的自旋波函数分别相同。在这种情况下,如果“基础粒子”是通常的费米子,则重子内部运动(轨道)波函数应是全反对称的;反之,如果内部运动波函数是对称的话,“基础粒子”应当满足反常费米统计^[12],或者具有新的全反对称内部自由度^[13]。

5. 由于核子的电磁分布半径(约为 0.8×10^{-13} 厘米)远大于“基础粒子”的康普顿波长(约为 0.01×10^{-13} 厘米),说明束缚在基本粒子内部的“基础粒子”之间的距离远大于

“基础粒子”本身的大小,处在束缚态的“基础粒子”之间的相对动量远小于自由“基础粒子”的静止质量。于是,在基本粒子的质心系中,可以将“基础粒子”自旋波函数的小分量完全略去。在此近似下,质心系中的波函数就是 SU_6 波函数。而运动的基本粒子结构波函数可以通过洛仑兹变换得到,具有 $(U_6 \times U_6)_F$ 对称性。

6. 各个基本粒子之间的相互作用是“基础粒子”之间相互作用的表现,由“基础粒子”间的相互作用所统一描述。例如,基本粒子的电磁相互作用或轻子型弱相互作用可以归结为“基础粒子”与电磁场或轻子的相互作用。值得注意的是,由于“基础粒子”本身并不是物质的始原,肯定也会有一定的结构,因而它可能具有一定大小的反常磁矩。一般地说,“基础粒子”与电磁场的相互作用也会有“形式因子”出现,反映“基础粒子”的结构。由于这是更深入一层的问题,我们以后暂不予考虑。

按照前述基本物理图象,基本粒子的结构特征首先由一个相对论性的结构波函数来表征。我们尝试采用场论中的束缚态波函数来描述基本粒子的结构。从标准的协变性及其它时空对称性考虑,可以写出介子和重子的结构波函数的普遍形式^[4]。可以证明,如果在质心系的自旋波函数中略去基础粒子之间的相对动量,则波函数就满足巴格曼—维格纳方程,并且具有 $(U_6 \times U_6)_F$ 对称性。然而应当指出,这只是一个近似,当进一步考虑“基础粒子”之间的相对运动效应时,波函数就会变得十分复杂。

其次,由于基本粒子之间的相互作用可以看作束缚在其中的“基础粒子”分别相互作用的总体效果,因而当我们取定了结构波函数后就可以按照通常的规则写下基本粒子之间相互作用的矩阵元。在写相互作用矩阵元时,我们作了一个重要的假定,即“单道近似”的假定,假定一个束缚态介子主要地转化为一对正反“基础粒子”而同其它场发生作用;一个束缚态重子主要地转化为三个“基础粒子”而同其它场发生作用。这个“单道近似”假定的根据正是在于基本粒子具有相对稳定的结构特征。此外,我们认为,束缚态强子也可以作为中间态传播而在相互作用矩阵元中出现,我们给出了其传播函数的具体形式^[5]。

总起来说,我们处理结构问题的方法有两点主要反映了基本粒子的结构特征:一是基本粒子的结构波函数;一是相互作用中的“单道近似”假定。同时有两点主要反映了“基础粒子”之间相对运动的效应:一是在轨道波函数中,或者还可能在自旋波函数中含有相对动量 p ,体现了“基础粒子”组成束缚态时的内部相对运动;一是在相互作用矩阵元中,没有同其它场发生相互作用的“基础粒子”贡献一个因子 $S_F^{-1}(p) \sim M + i\hat{p}$ ^[6],这就不仅在束缚态内部,而且在同外场相互作用时也体现了“基础粒子”之间相对运动的效应^[11]。这些特点正反映了结构模型中基本粒子相互作用既对称又不对称的特征,它们是结构模型所特有的,同对称性纯粹唯象的群论处理有着概念上和方法上的根本区别。

四、结构模型的主要结果和讨论

根据前节提出的模型和计算方法,我们就可以计算基本粒子的相互作用过程。由于目前我们关于电磁相互作用和弱相互作用的知识比较可靠,这些过程中结构特征比较显著,我们将首先利用上述方法研究基本粒子的电磁相互作用过程和弱相互作用过程。

从计算的结果可以看出,我们的结构模型有以下几个特点:

1. 结构波函数具有一定的对称性,因此能够给出原来唯象的对称性理论所得到的一

些结果,同时,结构模型方法给出了原来唯象理论中的形式因子与基本粒子结构波函数的确定联系,因而能够赋予原来那些对称性结果以结构的内容.形式因子中有的部分体现了自旋波函数的影响,有的部分体现了内部运动(轨道)波函数的影响.一旦基本粒子的结构波函数得到以后,这些形式因子就随之而确定下来了.

2. 结构模型方法得到了一些纯粹对称性方法所得不到的结果,给出了更多的实验现象之间的内在联系.这种联系可以分成两种.一种是通过波函数把某类基本粒子在不同的相互作用中的物理量串联起来.在电磁相互作用和弱相互作用过程中出现相同的内部波函数积分——我们以后称之为结构形式因子^[16],简称结构因子.通过这种结构因子直接建立了重子电磁形式因子与弱形式因子之间的联系.例如,核子的轴矢形式因子 $B_1(q^2)$ 直接同核子磁形式因子的同位旋矢量部分 $G_M^p(q^2) = G_M^p(q^2) - G_M^n(q^2)$ 相联系^[17],通过内部波函数在坐标空间原点的数值 $f(0)$,建立了 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 和 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 过程的联系^[18],等等.另外一种联系是,由于各种基本粒子之间的相互作用由“基础粒子”的相互作用所统一描述,因而可以建立起不同的基本粒子在某一类相互作用过程中的关系.例如,在轻子型弱相互作用中,可以建立起重子流矢量耦合常数与介子流矢量耦合常数的关系,在结构的基础上阐明了矢量流普适耦合的意义,同样可以建立重子流的轴矢耦合常数和介子流轴矢耦合常数的关系^[17,18](其中还包含有零点波函数 $f(0)$).

所有这些联系,是单纯的群论方法所不能得到的,它们反映了基本粒子由于有内部结构所引起的相互之间的本质联系.把这些联系同实验结果相比较,如果暂不考虑一些结构因子的修正(把它们的值近似取为1),所给出的数量级关系与实验符合;如果在一定的假定下估计结构因子的影响(例如利用瞬时作用近似,利用三度波函数的积分计算这些因子,考虑洛伦兹收缩效应^[2])可以得到与实验符合较好的结果.这些结果是对我们的结构模型的支持.

3. 结构模型方法一定程度上消除了原有场论中的发散困难.例如按照普适费米作用理论, π 介子通过核子对衰变为一对轻子,其结果是发散的;在结构模型中, π 介子“通过”一对“基础粒子”衰变成轻子的矩阵元除了一些确定的质量因子以外,只依赖于介子的零点波函数 $f(0)$,^[2,18]因此不存在发散的问题.

4. 结构模型方法还给出了若干类型的对称性破坏效应:(i) 由于次强作用所引起的初终态基本粒子质量分裂效应,表现为矩阵元中出现确定的质量因子;^[16,19,20] (ii) 由于“基础粒子”与外界相互作用时相对运动所引起的破坏效应,表现为矩阵元 S_F^1 中 β 因子的出现,在重子流中出现结构因子 T . 这一项的存在给出了对 $SU(6)$ 对称性的破坏; (iii) 由于束缚态基本粒子的传播所引起的破坏效应,表现为 $\pi \rightarrow \gamma\gamma$ 过程矩阵元中出现一个新的结构因子 V^∞ ^[18];最后我们还可以考虑(iv)束缚态内的“基础粒子”之间的相对运动所给出的波函数修正,这一点我们已在前一节中提到.

所有这些破坏的物理意义是清楚的,从对称性的角度看,它们所对应的群的变换性质也是清楚的.

在某些物理过程中,这些破坏效应的影响十分重要,例如重子流中出现结构因子 T ,就有可能解释中子电荷分布半径非零的事实^[21];并且可以解释 $N^* \rightarrow p\gamma$ 过程中所存在的电四极跃迁^[22],这些现象是原先 SU_6 理论所不能解释的.

在目前的模型中,我们暂且假设了构成基本粒子的“基础粒子”具有同“夸克”粒子相似的性质,但是,这里所采用的结构模型方法是和“基础粒子”的具体性质无关的,它同样可以适用于其它模型的研究。

应该指出,我们现在的模型和计算方法都还需要进一步发展。要找到一个能够反映基本粒子内部结构主要特征的模型和比较符合实际情况的束缚态场论方法,需要通过实践不断地揭露矛盾和不断地加以改进。从我们已经研究过的问题来看有几个问题需要进一步注意:

1. 我们的模型和实验结果的比较表明,零级近似结构波函数——即在质心系中忽略自旋波函数中的小分量情况下得到的波函数——在一般情况下给出了较好的结果。这说明用它来作为基本粒子波函数的近似描写的合理性。但是,另一方面,自旋波函数中小分量一点都不出现是很难想象的,在进一步的近似中应当考虑自旋波函数对巴格曼——维格纳波函数的偏离,在文献[11]中将指出,自旋波函数中的小分量可能是与“基础粒子”传播函数 S_F^{-1} 中 $\hat{p}$ 项属于同一级或更高级的改正、如果同时考虑这两种因素就可能在保证中子电荷为零的前提下改进理论预言的 μ_n/μ_p 值。

2. 在各种基本粒子反应过程中,所得到的形式因子都依赖于内部波函数的积分,因此这些形式因子的贡献都强烈地依赖于内部波函数的性质,需要在进一步的工作中研究这些波函数如何依赖于内部动量和外部动量。

3. 在“基础粒子”的传播函数 S_F^{-1} 中 M 可以理解为束缚在基本粒子内的“基础粒子”在受到基本粒子外部相互作用时的“等效质量”,这个“等效质量”的大小对某些结果的影响比较敏感,因此需要作进一步的研究。

此外,还应当注意对于强相互作用、非轻子衰变以及高自旋粒子这样一些单纯对称性理论中难以解决的问题的研究。这些问题的澄清将会对我们改进现有的模型和理论起重大的推动作用。

所有这些问题我们将在以后作进一步的研究。

我们感谢在中国科学院原子能研究所、中国科学院数学研究所、中国科学技术大学和北京大学四单位联合举办的讨论班上许多同志对这一工作提出的许多有益的意见和批评。特别是中国科学院原子能研究所的同志们,在他们的工作正式发表之前,就把他们的许多研究成果供给我们作系统的参考,本文中有些部分就是参照他们的意见写成的。

附 记

北京大学理论物理研究室基本粒子理论组和中国科学院数学研究所理论物理研究室参加本期专刊工作的有(按姓氏笔划排列):

北 京 大 学

刘 连 寿 宋 行 长 杨 国 桢 陈 激* 胡 宁 赵 光 达

* 吉林大学进修教师,参加部分工作。

赵志泳 秦旦华 钱治琰 高崇寿 黄朝商

中国科学院数学研究所

朱重远 安 瑛 张宗燧 陈庭金 周龙骧 赵万云
胡诗婉 侯伯宇 戴元本

参 考 文 献

- [1] 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组, 高等学校自然科学学报, 物理学版, **1**, 57, 1966.
- [2] 中国科学院原子能研究所基本粒子理论组, 原子能, 第3期, 137, 1966.
- [3] “红旗”编者按语, 红旗, 第6期, 1965.
- [4] 毛主席的四篇哲学论文, 第129页, 人民出版社, 1965.
- [5] 毛主席的四篇哲学论文, 第35, 36页, 人民出版社, 1965.
- [6] Gell-Mann M., Nuovo Cimento, **4**, Suppl. 2, 848, 1956; Nishijima K., Prog. Theor. Phys., **13**, 285, 1955.
- [7] Sakata S., Prog. Theor. Phys., **16**, 686, 1956.
- [8] Ogawa S., Prog. Theor. Phys., **21**, 110, 1959; Ikeda M., Ohnuki Y. & Ogawa, S., Prog. Theor. Phys., **22**, 715, 1959; **23**, 1073, 1960.
- [9] Neeman Y., Nucl. Phys., **26**, 222, 1961; Gell-Mann M., Phys. Rev., **125**, 1067, 1961.
- [10] Gell-Mann M., Phys. Lett., **8**, 214, 1964.
- [11] 中国科学院数学研究所理论物理研究室, 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组, 北京大学学报 (自然科学), **12**, 183, 1966.
- [12] Messiah A. M. L. & Greendeng O. M., Phys. Rev., **136**, B248, 1964; **138**, B1155, 1965.
- [13] 刘耀阳, 原子能, 第3期, 232, 1966.
- [14] 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组, 中国科学院数学研究所理论物理研究室, 北京大学学报 (自然科学), **12**, 209, 1966.
- [15] 中国科学院数学研究所理论物理研究室, 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组, 北京大学学报 (自然科学), **12**, 113, 1966.
- [16] 北京大学理论物理研究室基本粒子研究组, 中国科学院数学研究所理论物理研究室, 北京大学学报 (自然科学), **12**, 124, 1966.
- [17] 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组, 中国科学院数学研究所理论物理研究室, 北京大学学报 (自然科学), **12**, 150, 1966.
- [18] 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组, 中国科学院数学研究所理论物理研究室, 北京大学学报 (自然科学), **12**, 194, 1966.
- [19] 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组, 中国科学院数学研究所理论物理研究室, 北京大学学报 (自然科学), **12**, 189, 1966.
- [20] 中国科学院数学研究所理论物理研究室, 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组, 北京大学学报 (自然科学), **12**, 162, 1966.
- [21] 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组, 中国科学院数学研究所理论物理研究室, 北京大学学报 (自然科学), **12**, 137, 1966.
- [22] 中国科学院数学研究所理论物理研究室, 北京大学理论物理研究室基本粒子理论组, 北京大学学报 (自然科学), **12**, 167, 1966.

强子结构模型的协变场论方法*

中国科学院数学研究所理论物理研究室

北京大学理论物理研究室基本粒子理论组

一、引言

近年来高能物理实验和理论研究提供了充分的根据说明强相互作用粒子具有内部结构^[1-3],它们是由一些更为基本的“基础粒子”组成的。这些“基础粒子”的自旋是 $1/2$ 。自旋、宇称为 0^- 及 1^- 的介子由一对正反“基础粒子”组成;自旋、宇称为 $\frac{1}{2}^+$ 及 $\frac{3}{2}^+$ 的重子由三个“基础粒子”组成。

基础粒子相对于基本粒子说来,属于物质结构更深入的层次。按照辩证唯物主义观点,这种更深入的层次很可能具有完全新的运动规律。但是人们对于这种全新的运动规律的认识不可能凭空一下子建立起来,它只能在运用旧理论来处理新问题的过程中,不断地揭露矛盾、解决矛盾、又揭露新的矛盾,经过许多次反复,逐步地发展起来。正是根据这种观点,我们试图运用原有的量子场论方法来研究基本粒子的结构模型。在研究过程中进一步澄清结构模型的图象,同时不断地揭露旧理论的矛盾,为理论的进一步发展提供线索。

我们假定,基础粒子是自旋为 $1/2$ 的基本量子场。它们能结合成基本粒子,同时也参与电磁相互作用和弱相互作用。强相互作用粒子是基础粒子形成的束缚态,它们和光子、轻子的相互作用都归结为基础粒子同这些场的相互作用。

在这篇文章里,我们从上述假定出发给出书写具体物理过程的 S 矩阵元的规则。我们将以介子所参与的过程为例来说明这一规则。它不难直接推广到重子的情况^[4,5]。

二、介子波函数与介子——基础粒子顶角

按假定,基础粒子是基本的量子场,用 ψ 和 $\bar{\psi}$ 表示海森堡表象的基础粒子场算符。介子是由一对正反基础粒子组成的束缚态,它的波函数由

$$\chi(x_1, x_2) = \langle 0 | T(\psi(x_1)\bar{\psi}(x_2)) | M \rangle, \quad (2.1)$$

$$\bar{\chi}(x_2, x_1) = \langle M | T(\psi(x_2)\bar{\psi}(x_1)) | 0 \rangle \quad (2.2)$$

描述**, 其中 $|M\rangle$ 是介子的态矢量。 χ 与 $\bar{\chi}$ 的关系见本文附录及文献[6]。

四度动量为 P 的 0^- 介子波函数是

$$\chi_P(x_1, x_2) = \langle 0 | T(\psi(x_1)\bar{\psi}(x_2)) | P \rangle, \quad (2.3)$$

* 1966年4月12日收到。

** 介子波函数和基础粒子场算符都应该有内部自由度的指标,例如 SU_3 指标。本文中全部略去了这类指标。

四度动量为 P , 极化矢量为 e^σ 的 1^- 介子波函数是*

$$\chi_P^\sigma(x_1, x_2) = \chi_{P\mu}(x_1, x_2) e_\mu^\sigma = \langle 0 | T(\psi(x_1) \bar{\psi}(x_2)) | P, \sigma \rangle, \quad (2.4)$$

在本节中我们将具体讨论 0^- 介子波函数, 但是一切结果都适用于 1^- 介子波函数.

引进质心坐标 X 和相对坐标 x

$$X = \frac{x_1 + x_2}{2}, \quad x = x_1 - x_2 \quad (2.5)$$

应用平移不变性改写 (2.3) 式为

$$\begin{aligned} \chi_P(x_1, x_2) &= e^{iPX} \langle 0 | T\left(\psi\left(\frac{x}{2}\right) \bar{\psi}\left(-\frac{x}{2}\right)\right) | P \rangle = \\ &= e^{iPX} \chi_P(x), \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \bar{\chi}_P(x_2, x_1) &= e^{-iPX} \langle P | T\left(\psi\left(-\frac{x}{2}\right) \bar{\psi}\left(\frac{x}{2}\right)\right) | 0 \rangle = \\ &= e^{-iPX} \bar{\chi}_P(x), \end{aligned} \quad (2.7)$$

转到动量表象, 令**

$$P = p_1 - p_2, \quad p = \frac{p_1 + p_2}{2}, \quad (2.8)$$

定义

$$\chi_P(p) \equiv \chi\left(\frac{P}{2} + p, -\frac{P}{2} + p\right) = \int d^4x e^{-ipx} \chi_P(x), \quad (2.9)$$

则有

$$\begin{aligned} \int d^4x_1 d^4x_2 e^{-i(p_1x_1 - p_2x_2)} \chi_P(x_1, x_2) &= (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - P) \chi_P(p) = \\ &= (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - P) \chi(p_1, p_2), \end{aligned} \quad (2.10)$$

同样有

$$\bar{\chi}_P(p) \equiv \bar{\chi}\left(-\frac{P}{2} + p, \frac{P}{2} + p\right) = \int d^4x e^{ipx} \bar{\chi}_P(x), \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \int d^4x_1 d^4x_2 e^{i(p_1x_1 - p_2x_2)} \bar{\chi}_P(x_2, x_1) &= (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - P) \bar{\chi}_P(p) = \\ &= (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - P) \bar{\chi}(p_2, p_1). \end{aligned} \quad (2.12)$$

* 极化矢量 e_μ^σ 满足

$$P_\mu e_\mu^\sigma = 0, \quad \sum_{\mu=1}^4 e_\mu^\sigma e_\mu^{\sigma'} = \delta_{\sigma\sigma'}, \quad \sum_{\sigma=1}^3 e_\mu^\sigma e_\nu^\sigma = \delta_{\mu\nu} + \frac{P_\mu P_\nu}{m^2}.$$

以下计算中都采用线极化. 如令 P 方向为 z 轴, 则有

$$e_\mu^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e_\mu^{(2)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad e_\mu^{(3)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{E}{m} \\ i \frac{|\mathbf{P}|}{m} \end{pmatrix}.$$

** 这里为了下面计算方便, 取束缚在介子内基础粒子的动量为 p_1 , 反基础粒子的动量为 $-p_2$, 在坐标表象中

$$p_1 = -i \frac{\partial}{\partial x_1}, \quad p_2 = i \frac{\partial}{\partial x_2}, \quad P = -i \frac{\partial}{\partial X}, \quad p = -i \frac{\partial}{\partial x}.$$

海森堡表象的基础粒子场算符满足狄拉克方程

$$\begin{aligned} \gamma_\mu \frac{\partial \phi(x)}{\partial x_\mu} + M\phi(x) &= J(x), \\ -\frac{\partial \bar{\phi}(x)}{\partial x_\mu} \gamma_\mu + M\bar{\phi}(x) &= \bar{J}(x). \end{aligned} \quad (2.13)$$

其中 J 是包含一切相互作用在内的流算符。利用上式可以写出四度动量为 P 的介子分解成四度动量为 p_1 的基础粒子和四度动量为 $-p_2$ 的反基础粒子 (离开质量壳的) S 矩阵元 (图 1a)

$${}^{\text{in}}\langle p_1, -p_2 | P \rangle^\lambda = \int d^4x_1 d^4x_2 e^{-i(p_1x_1 - p_2x_2)} \bar{u}(p_1) \langle 0 | T(J(x_1) \bar{J}(x_2)) | P \rangle v(-p_2), \quad (2.14)$$

以及四度动量为 p_1 和 $-p_2$ 的基础粒子对合併成四度动量为 P 的介子的矩阵元 (图 1b)

$${}^{\text{in}}\langle P | p_1, -p_2 \rangle^\lambda = \int d^4x_1 d^4x_2 e^{i(p_1x_1 - p_2x_2)} \bar{v}(-p_2) \langle P | T(J(x_2) \bar{J}(x_1)) | 0 \rangle u(p_1). \quad (2.15)$$

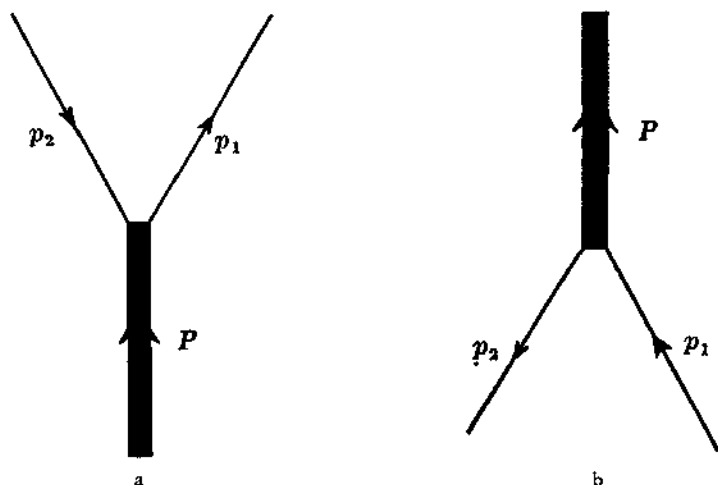


图 1

因此, 定义介子分解成基础粒子对的顶点为

$$(2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - P) \frac{1}{\sqrt{2P_0}} \Gamma(p_1, p_2) = \int d^4x_1 d^4x_2 e^{-i(p_1x_1 - p_2x_2)} \times \langle 0 | T(J(x_1) \bar{J}(x_2)) | P \rangle, \quad (2.16)$$

基础粒子对合併成介子的顶点为

$$(2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - P) \frac{1}{\sqrt{2P_0}} \bar{\Gamma}(p_2, p_1) = \int d^4x_1 d^4x_2 e^{i(p_1x_1 - p_2x_2)} \times \langle P | T(J(x_2) \bar{J}(x_1)) | 0 \rangle, \quad (2.17)$$

就有

$$\begin{aligned} {}^{\text{in}}\langle p_1, -p_2 | P \rangle^\lambda &= (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - P) \frac{1}{\sqrt{2P_0}} \bar{u}(p_1) \Gamma(p_1, p_2) v(-p_2), \\ {}^{\text{in}}\langle P | p_1, -p_2 \rangle^\lambda &= (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - p_2 - P) \frac{1}{\sqrt{2P_0}} \bar{v}(-p_2) \bar{\Gamma}(p_2, p_1) u(p_1). \end{aligned} \quad (2.18)$$

介子—基础粒子顶点 Γ 和介子波函数 χ 之间有直接的关系。实际上, 将 (2.13) 式代