

π 介子是什么?

林春灿

马维兴

陈崇光 (编译)

(中国科学院高能物理研究所)

(中国科学院研究生院)

摘要: 本文评论了在了解 π 介子的非常特殊性质方面的近期发展。讨论了 π 的二重性:它一方面作为与手征对称性破缺有关的Goldstone玻色子,另一方面作为束缚夸克-反夸克对。文中指出了 π 介子作为长程核力的生成元起了很好的作用,也指出了有关 π 的大小和衰变在符合实验方面存在的悬而未决的问题。

一.引言

半个世纪以前,汤川秀树发表他的开创性的工作,也就是“关于基本粒子相互作用”的工作。过了许多年后,他的介子交换图像已经发展成非常成功的核力的唯象理论。

因为 π 介子的质量小,因此它在这个发展中起到了突出的作用,人们认为它是长程核子-核子势的生成元。它的康普顿波长 $\lambda_\pi = \hbar/m_\pi c = 1.4$ 费米,这决定了核物理的长度尺度。已知若假设核子与 π 介子都是点粒子,则在核子间距 $r \geq 1.4$ 费米的范围内单 π 介子交换(OPE)能定量解释实验结果。由于不论核子或 π 介子都不是无结构的类点实体,所以OPE能获得这么好的结果是令人费解的。实验上测量到的核子电荷半径为 $\langle r_N^2 \rangle^{\frac{1}{2}} = 0.84$ 费米,而经验的 π 介子电荷半径仅稍小一些, $\langle r_\pi^2 \rangle^{\frac{1}{2}} = 0.66$ 费米。如果强子大小是和所指的电荷半径一样大的话,就很难理解为什么OPE位能够取得如此成功。这一问题在手征袋模型中已部分地得到解决。在这一模型中核子被描述成为由一个三个夸克核心和围绕这核心的 π 介子云组成。质子夸克核心的均方根半径比电荷半径小得多,而电荷半径是由荷电的 π 介子云对电荷形状因子的贡献所确定的。在这种图像中,核子的半径均根值约为半个费米,能够使人们理解汤川

秀树理论所暗示的长程性质。另一方面,在这样的近似下, π 介子才可以认为是类点的实体。在零质量的近似下, π 介子是一个Goldstone玻色子,它是为使核子的轴流为守恒量而引入的,在这样的模型中,同基本的夸克-反夸克结构是没有关系的。因为固有结构的唯一迹象是 π 介子的衰变常数, $f_\pi = 93$ MeV,作为一个唯象参数而出现的。于是量子色动力学(QCD)产生的手征模型对 π 介子赋予一个很特殊的作用,它与标准夸克模型把介子描述为束缚的夸克-反夸克对显然没有联系。这个特征在最近引起很大兴趣的Skyrmion模型中是十分明显的。在这一模型中,核子是作为非线性手征有效的理论的拓扑孤粒子解。重子数与拓扑电荷等同,赝标量“介子”场重新作为基本实体处理。

这些发展产生了一个明显的问题: π 介子的Goldstone玻色子性质如何与它测量到的大小及夸克-反夸克结构相一致呢?

二.有关 π 介子的事实

下面我们对经验上所定出的 π 介子的性质给予简要的总结。

在微观上(除了 π 介子质量)所了解的至关重要的数是从 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ 反应的振幅导出的衰变常数 $f_\pi = 93$ MeV。在标准模型中, f_π 是与在 π 介子中心找到 $q\bar{q}$ 对的振幅有关的。另外

一个重要的衰变道是 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 。经验的衰变宽度为 8eV ，很接近部分守恒轴流(PCAC)所预告的 $\Gamma(\pi^0 \rightarrow 2\gamma) = \alpha^2 m_\pi^2 / 64\pi^3 f_\pi^2$ 值，其中 $\alpha = 1/137$ 。

π 介子的电荷半径 $\langle r_\pi^2 \rangle^{1/2}$ 是从高能 π 介子被液体氢靶的电子所散射测量到的形状因子推导出来的。在类时 q^2 区域内， π 介子形状因子在 $q^2 = m_\rho^2 \approx 0.59\text{GeV}^2$ 处明显的展示出 ρ 介子共振占主要的。这就意味着 π 介子电荷半径的大部分实际上是跟 π 介子周围的 $\pi^+\pi^-$ 云有关而不是 π 介子核心本身的固有电荷分布。事实上，自然的 ρ 介子占优势的模型给出 $F_\pi(q^2) = F_\pi(0)/(1 - q^2/m_\rho^2)$ ，所以 $\langle r_\pi^2 \rangle$ (ρ 为主的) $= 6/m_\rho^2 = 0.38(\text{费米})^2$ ，这已占了经验的 $\langle r_\pi^2 \rangle = 0.44(\text{费米})^2$ 的绝大部分。这个图像可能太简单了，不过它指出了 π 介子心(也就是 π 介子强相互作用的半径)的大小，它可能比 π 介子的电荷半径小得多。

迄今我们已讨论在低 q^2 所得到的数据。在高 q^2 ($|q^2| > 25\text{MeV}^2$) 时，可以期望 π 介子的夸克-反夸克价结构更直接地显示它本身。这是Drell-Yan过程所揭示的，这个过程是高能 π 介子的一个反夸克同靶核子的一个夸克湮灭形成 μ 介子对，然后分析这 μ 子对。利用现存的核子结构函数的信息，人们可以导出 π 介子的结构函数。结果可以概括为由价夸克和海夸克的结构函数组成的振幅 $\bar{F}_\pi(x)$ ， x 是在 π 介子中由夸克所带走的部分动量。

在大 x 处的数据按照在 π 介子中价夸克-反夸克对图像能完全了解，对于小的 x ，有证据表明像“海”分量所表示的那样更复杂的结构。很显然，低于 $x \leq 0.2$ 的数据是很有趣的。

三. π 介子的模型

Brodsky和Lepage已讨论了 π 介子内部固有波函数的唯象处理。他们的分析是基于这样的主张进行的，即 π 介子波函数的Fock空间分解比单个束缚 $q\bar{q}$ 对所包含的内容要丰富

得多：

$$|\pi\rangle = \sqrt{z} |q\bar{q}\rangle + c |q\bar{q} + \text{gluons}\rangle + d |qq\bar{q}\bar{q}\rangle + \dots \quad (1)$$

而 $Z + C^2 + d^2 + \dots = 1$ 。现在， π 衰变常数 f_π 测量在方程(1)中的 $q\bar{q}$ 分量并且 f_π 与方均根半径 R_π 成反比。

$$f_\pi = \text{常数} \frac{\sqrt{z}}{R_\pi}$$

式中的常数是纯几何性的。另一方面， $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 的振幅与 $\sqrt{z} R_\pi$ 成正比，从两种衰变的组合分析发现 $Z \lesssim 1/4$ 和 $R_\pi \lesssim 0.4$ 费米。因此，Brodsky等人得出这样的结论：在 π 介子中发现单个 $q\bar{q}$ 的几率大为减小，同时强子的 π 介子的半径确实比经验电荷半径小得多。这些发现表明：把 π 介子当作禁闭位中 $1S_{1/2}$ 轨道上单个 $q\bar{q}$ 对是不对的。另外，在这个模型中小的 π 介子质量不能自然地产生出来。

与单个束缚的 $q\bar{q}$ 对完全不同的图像是把 π 介子作为非微扰QCD真空中的集体 $q\bar{q}$ 激发来看待。这就使得 π 介子与所有其它的介子相比显得非常特殊。本文中所发展的概念与强相互作用的多体系统中的低能集体模式非常相似。在这个意义上， π 介子是相似于一种低的集体性强的粒子空穴态，粒子和空穴是分别与夸克和反夸克相对应，而较重的介子是非集体的。

原来无质量的 u 和 d 夸克的基本QCD拉格朗日在夸克场的手征变换 $\psi \rightarrow \exp[i\gamma_5 \vec{\tau} \cdot \vec{\theta}] \psi$ 下是不变的。格点计算表明手征对称性动力学上是破缺的，并且夸克得到大的质量。 π 介子是相应的Goldstone玻色子，而它的集体性可以认为是与手征对称性破缺机制密切相关。Brown指出， π 介子和在超导体中Anderson模式的相似性，在超导体中，动力学对称性破缺产生了准粒子谱型的能隙，而这里夸克得到了它们的组分质量。

表明手征对称性破缺机制的基本模型是Nambu和Jona-Lasinio(NJL)模型。事实上，几乎所有 π 介子的近代描述多少都是直接根

据原来的NJL思想。它从无质量具有手征不变的有效相互作用 $G[(\bar{\psi}\psi)^2 + (\bar{\psi}i\gamma_5\vec{\tau}\cdot\vec{\psi})^2]$ 的 u 和 d 夸克开始。当耦合强度 G 达到某个临界值时,这个相互作用产生了一有限夸克质量 m 并且由于夸克凝聚的出现,而物理真空得到了一种非一般的结构。即非零的期待值 $\langle\bar{\psi}\psi\rangle$ 。同时,相互作用是在赝标同位矢量夸克-反夸克态中的强引力作用。这一相互作用把 $q\bar{q}$ 模式的质量从 $2m$ 变到 0 ,这就是Goldstone定律所要求的。NJL机制是一种非常普通的性质,它与手征不变性相互作用的形式细节无关。事实上,如果有效的夸克-胶子耦合强度 a_s 达到数量级 1 的话,单胶子的交换也能导致手征对称性破缺。(自然不应该得到这样的结论,手征对称性破缺的根源是微扰)。

关于格点上的蒙特卡罗计算的结果指出手征对称性破缺和禁闭是密切相关的。具有这些性质的粗略模型已被研究过,它用了和核物理上类似的无规位相近似(RPA)的语言。在这一模型中,NJL近似的耦合常数 G 主要地是用一个位置有关的耦合强度 $G(r)$ 来代替的,它是这样选择的,为了产生动力学夸克质量 m 而进行的自洽手续导致一个禁闭夸克的标量势 $m(r)$ 。这个势有一系列的带有 π 介子量子数的 $q\bar{q}$ 束缚态,这些态我们可称为“袋模型” π 介子态。这些态的最低一个是约束在 $1S$ 轨道上的夸克和反夸克,它应该最接近物理 π 介子,不过它的质量太大了,即使包括进行了质心修正也无济于事,除非把半径选得大到不合理的地步。这就是无剩余夸克-反夸克相互作用的情形。一旦NJL型的手征相互作用应用到具有 π 介子量子数的 $q\bar{q}$ 态上时, π 介子模式就作为袋模型 π 介子 $q\bar{q}$ 对的相干迭加而出现。事实上,对于原来无质量的 u 和 d 夸克,按照Goldstone理论,这个模式应该在零质量结束,用有限的但很小的夸克质量 m_u 和 m_d 就可得到具有质量 $m_\pi = 140$ MeV的现实物理 π 介子。RPA方法自然地导致了特征关系 $m_\pi^2 = \text{常数}$ 、 $(m_u + m_d)$ 与熟知

的流代数结果 $f_\pi^2 m_\pi^2 = -(m_u + m_d)\langle\bar{\psi}\psi\rangle$ 相一致。

π 介子的物理性质可以通过检验物理真空的 π 介子激发 $|\pi_n\rangle$ 的强度函数作出最好的说明,

$$S(E) = \sum_n |\langle O | \bar{\psi}i\gamma_5\vec{\tau}\cdot\psi | \pi_n \rangle|^2 \delta(E - E_n)$$
。在纯禁闭势或袋模型描述中, $S(E)$ 分布在无关联的 π 介子 $q\bar{q}$ 对的质量具有大致相等强度时,才出现峰。但是,用了剩余手征 $q\bar{q}$ 相互作用后,强度几乎完全从这些状态离开了,并且集中到具有低质量的一个集体态上,这可以用物理的 π 介子来鉴别。强度函数满足能量权重和规则, $[dEES(E) = \text{常数}]$ 。所以人们期望可以看到除了有经验介子谱中的 π 介子外还能看到很小的赝标同位矢量强度。而袋模型预告了在高于 $1S$ 轨道上有几个这样作为无关联的 $q\bar{q}$ 对的 π 态。NJL的有效相互作用的手征不变性暗示只有 π 模式变为集体的,而矢量介子态例如 ρ 和 ω ,就几乎无微扰地留在它们的“袋模型”位置上。对于低的集体态,正如所期望的,人们发现 π 介子波函数有多 $q\bar{q}$ 分量的混合,非常类似RPA所描述的低能集体粒子-空穴态基态关联。于是,在 π 介子的FOCK空间表象中单 $q\bar{q}$ 分量大为减小,在方程(1)中 $Z = 0.3$ 附近的值是典型的。来自方程(2)的 π 介子衰变常数 f_π , π 介子的半径方均根大约在 0.4 费米。这个结论和Brodsky等人所得到的相似。事实上 π 衰变常数 f_π 对比率 \sqrt{Z}/R_π 加上了一种约束,这是有一定意义的。在 π 介子的RPA描述中,波函数含有 n 夸克- n 反夸克分量,而 $n = 1, 3, 5, \dots$ 等等;但是没有 $2q\bar{2}\bar{q}$ 结合。另一方面,在类时 q^2 的区域中经验 π 介子形状因子和大的 $\rho \rightarrow \pi\pi$ 衰变宽度暗示了强的 $\pi \leftrightarrow \rho\pi$ 耦合,所以在 π 介子波函数中混入了不可忽略的 $\rho\pi$ 。这些和其它另外的分量将进一步减小单个 $q\bar{q}$ 几率 Z 。为了使 f_π 不变,半径 R_π 必须相应的减小,所以期望 $R_\pi \sim 0.4$ 费米可能是一个上限。

(下转25页)

业无损探伤、治疗肿瘤、橡胶硫化、核爆模拟实验、消毒、杀菌等。而离子加速器主要用于核分析技术，核物理实验，模拟宇宙空间辐照，材料辐照效应研究等。

能区在11.0~33.0MeV的加速器有515台左右，其中电子加速器占66%，主要用于高分子材料辐照改性，废水辐照处理，工业无损探伤，治疗肿瘤等，而离子加速器主要用于同位素生产，核物理研究，模拟宇宙空间辐照，中子治癌等方面。

我国有小型加速器近200台，其中200KeV以下的离子注入机、中子发生器占一半以上。电子加速器约30多台，质子静电加速器，高压倍加器各有20多台。回旋加速器4台，质子直线加速器一台。但是我国自己研制生产的加速器的性能比国外先进水平还有一段差距；离子源寿命只有几百小时，比国外短几十倍，电源稳定性比国外差一个数量级，束流的离子种类、能量散度和稳定性、束流的脉冲、扫描性能、束流聚焦和靶点、加速管的寿命、自动控制等方面和国外先进水平差距都较大，需要我们吸收国外先进技术、组织联合攻关、迎头赶上。但我国已有1000多人的加速器研究、设计人员，上海占200多人。今后上海要发展成为我国小型加速器的研制生产基地，准备引进一些加速器的先进工艺和技术，组织研究、设计和生产联合攻关，形成横向协作网，使上海小型加

速器的研制生产水平和产量有一个显著的提高。

表一： 世界各种加速器台数统计表*

能 区 MeV	1972年统计台数		1983年统计台数		1983年合 计台数
	电子加 速器	离子加 速器	电子加 速器	离子加 速器	
0.03—0.3	1000	550	2800	1500	4300
0.31—1.0	180	80	380	600	980
1.1—3.0	150	85	350	150	500
3.1—10.0	250	56	1400	80	1480
11.0—33.0	150	60	340	175	515
合 计	1730	831	5270	2505	7775
总 计	2561		7775		

*说明：上述统计是不完全的，有一定误差。

上海从1961年JJ-2型电子静电加速器投产以来，22年共研制生产了约40台小型加速器，其中电子静电加速器15台，最大功率10千瓦左右，而国外已投产了100千瓦的加速器，正在研制300千瓦的加速器。上海还生产了高压倍加器13台，质子静电加速器4台，10MeV电子直线加速器4台，还有离子注入机、中子发生器各几台。主要研制生产单位有上海原子核所、上海先锋电机厂、复旦大学等。今后主攻大功率电子辐照加速器和强流离子注入机，并使其产量提高到每年十台以上。（未完待续）

（上接3页）

我们讨论了 π 介子的两种相反的观点：单一强的束缚 $q\bar{q}$ 对和按非微扰QCD真空的集体激发。集体模型的主要优点是它提供了 π 介子的Goldstone玻色子性质和 $q\bar{q}$ 准结构之间的联系。集体 π 介子有大为减小的 $q\bar{q}$ 分量和小的半径($R_\pi < 0.4$ 费米)。遗憾的是，发展的模型迄今仍然很粗陋，并且太简单以致于不能进一步做出定量的结论。作为一个

束缚 $q\bar{q}$ 对的 π 介子，它的方均根半径相当于甚至大于电荷的半径，那么它与Goldstone玻色子的联系是难以理解的。

在某种程度上，从手征袋和孤粒子模型中类点 π 介子的引入来看，集体 π 介子有较小的尺度这还是正确的。这也有助于了解为什么单 π 交换核子-核子相互作用工作在大距离处是很精确的。