

核力与电荷无关吗

王秋玲 宁平治

(南开大学物理系 天津 300071)

在核物理教科书中,几乎都要讲到核力的电荷无关性,或者说同位旋不变性。所谓核力与电荷无关是指一对核子,不论是中子-中子,质子-质子或中子-质子,只要处于同样的空间状态和自旋状态,就具有相同的核力作用。核力的电荷无关性也可表述为两个核子之间的作用与两个核子的总同位旋投影 T_3 无关。但是,核力的电荷无关只是近似成立,核力在同位旋空间的转动不变性,并不是绝对的,而是存在着破缺。这种破缺包括电荷无关性破缺(CIB)和电荷对称性破缺(CSB),总共约有 1% 的量级。关于这种破缺的根源和对核物理各方面的影响已有不少研究。从夸克层次上看,假设忽略 u-d 夸克质量差异, u 夸克和 d 夸克的相互作用是完全相同的,这时存在电荷对称性。电荷对称算符 P_{cs} 对应着 u、d 夸克的变换,

$$P_{cs}|u\rangle = -|d\rangle, P_{cs}|d\rangle = |u\rangle,$$

如果电荷对称性成立,则算符 P_{cs} 与哈密顿量对易。目前的研究结果表明,算符 P_{cs} 并不是一个守恒量, u 夸克、d 夸克之间的质量差加上电磁相互作用可以解释所有的电荷对称性破缺。

近 20 年来,核力电荷相关性课题无论在实验上还是在理论上都引起了广泛的兴趣,从核力的介子交换理论来看,中子和质子的质量差异是电荷对称性破缺的基本原因,它影响着核子的动能和核力相互作用的介子交换。而核力电荷无关性破缺的主要原因则是同位旋矢量介子的质量分裂,尤其是 π 介子和 ρ 介子的质量分裂。

CIB 和 CSB 可以表现在低能 NN 散射实验中有有效参数的差异以及镜像核结合能的差异,下面分别介绍一下。

在低能核子-核子散射中定义了两个有效参量,称为“散射长度”和“有效力程”,它们可以由实验定出,也可以由给定的核力形式从理论上算出。如果包含 CIB 和 CSB,核力表达式中就有一个电荷相

关因子,将对散射长度(a)和有效力程(r)产生影响,特别是对自旋单态 1S_0 影响最大,散射长度对核力的微小变化尤其敏感,故适合于 CSB 和 CIB 的研究。

扣除电荷作用的影响后,散射长度和有效力程的最新实验数据给出

$$\begin{aligned} a_{pp} &= -17.3 \pm 0.4 \text{ fm}, & r_{pp} &= 2.85 \pm 0.04 \text{ fm}, \\ a_{nn} &= -18.8 \pm 0.3 \text{ fm}, & r_{nn} &= 2.75 \pm 0.11 \text{ fm}, \\ a_{np} &= -23.75 \pm 0.01 \text{ fm}, & r_{np} &= 2.75 \pm 0.05 \text{ fm}, \end{aligned}$$

定义下述平均值:

$$\bar{a} \equiv 1/2(a_{pp} + a_{nn}) = -18.05 \pm 0.5 \text{ fm}$$

$$\bar{r} \equiv 1/2(r_{pp} + r_{nn}) = 2.80 \pm 0.12 \text{ fm}$$

因此, np 参数与这些平均值之差就反映出电荷无关性破缺的程度。

$$\Delta a_{\text{CIB}} \equiv \bar{a} - a_{np} = 5.7 \pm 0.5 \text{ fm}$$

$$\Delta r_{\text{CIB}} \equiv \bar{r} - r_{np} = 0.05 \pm 0.13 \text{ fm}$$

由此可见,自旋单态的 NN 散射长度提供了强相互作用中 CIB 的一个很好的依据。

我们早就知道,单 π 介子交换(OPE)中带电介子与中性介子的质量差异可以解释 50% 的 Δa_{CIB} 。同时考虑 OPE 和 TPE(双 π 介子交换)的质量差异,采用 Bonn 介子交换势,计算结果发现 80% 的 Δa_{CIB} 可以得到解释。表 1 给出新近文献中的结果,其中列出了新近发表的 CD-Bonn 核子相互作用势中不同原因的 CIB 对 Δa_{CIB} 和 Δr_{CIB} 的影响。

表1 CD-Bonn势中CIB的影响

	OPE	2π	$\pi\rho$	$\pi\sigma+\pi\omega$	总和	实验值
$\Delta a_{\text{CIB}}(\text{fm})$	3.243	0.360	-0.383	1.0426	4.646	5.7 ± 0.5
$\Delta r_{\text{CIB}}(\text{fm})$	0.099	0.002	-0.006	0.020	0.115	0.05 ± 0.13

对于电荷对称性破缺,类似地可以定义

$$\Delta a_{\text{CSB}} \equiv a_{pp} - a_{nn} = 1.5 \pm 0.5 \text{ fm}$$

$$\Delta r_{\text{CSB}} \equiv r_{pp} - r_{nn} = 0.1 \pm 0.12 \text{ fm}$$

$$\Delta \delta_{\text{CSB}}^{\text{LSJ}}(T_{\text{lab}}) = \delta_{nn}^{\text{LSJ}}(T_{\text{lab}}) - \delta_{pp}^{\text{LSJ}}(T_{\text{lab}})$$

表 2 给出了用 CD-Bonn 模型关于 CSB 对有效参数

现代物理知识

及相移影响的结果。

表2 CD-Bonn势中CSB的影响

	动能	OBE	2π	$\pi\rho$	$\pi\sigma+\pi\omega$	总和
$\Delta a_{CSB}(\text{fm})$	0.246	0.013	2.888	-1.537	-0.034	1.575
$\Delta r_{CSB}(\text{fm})$	0.004	0.001	0.055	-0.031	-0.001	0.027
$\Delta \delta_{CSB}(\text{fm})$	0.287	0.015	3.417	-1.856	-0.041	1.822

从表2可看出,CSB主要来自 2π 交换,而单 π 交换的作用反而很小,应该指出的是 1S_0 散射长度差异的实验值可以单独从核子质量分裂得到解释。对相移差,最大部分仍在低能(例如1MeV)。对其他态则影响很小。

另外,从实验上直接检验核子-核子相互作用电荷对称性破缺的工作也开展起来了。如果合理对称性成立,极化中子束被未极化的质子散射,同位旋单态和三重态两束粒子的分析本领(A)相同,反之亦然。因此,任何分析本领的非零差值($A = A_n - A_p$)都是电荷对称性破缺的明显例证。关于这方面的一系列实验得到了预期的结果。第一次测量是TRIUMF实验组在477MeV能量下的np弹性散射实验,得到中心束在 $59^\circ-80^\circ$ 角度范围内的 $\Delta A = (47 \pm 22 \pm 8) \times 10^{-4}$,另一个类似的实验是IUCF在183MeV能量下的实验,结果是中心束在 $82.2^\circ-116.2^\circ$ 范围内的 $\Delta A = (34.8 \pm 6.2 \pm 4.1) \times 10^{-4}$,后来TRIUMF又做了一个更精确的能量为347MeV的实验,得出与477MeV实验相似的结果。这些实验都比较了极化np和np散射中分析本领的差异,也都观察到了 π, γ 以及 $\rho-\omega$ 交换引起的电荷对称性破缺。

值得注意的是,TRIUMF和IUCF实验中,后者明显观察到了介子交换中 $\rho-\omega$ 混合的作用,似乎 $\rho-\omega$ 混合能描述大部分的CSB特征。但是最近有人指出这一解释有某些困难,就是所谓 $\rho-\omega$ 势能问题, $\rho-\omega$ 混合振幅强烈与动量相关,在约0.9fm处势能有一节点,因此势能要改变符号,此时势能很小,其重要性将大为降低。

核力的电荷对称性破缺也反映到Nolen-Schiffer(NS)反常问题上。NS反常是核物理中长期悬而未决的一个问题,它指的是镜像核或同位旋相似态的结合能差的理论解释与实验值之间存在分歧,而且这一分歧 $\delta = \Delta E_{\text{exp}} - \Delta E_{\text{th}}$ 随质量数 A 的增加而增加, $A = 208$ 时达到 $\sim 900\text{KeV}$ 。

NS反常引起了许多理论方面的研究,许多核结

构细节的作用,如同位旋混合效应,关联效应,核极化等等,都被研究过。但得到的结论是所有这些作用的总和仍不足以解释实验值。而一旦引入CSB,就可以弥补所需要的(5—7)%的理论值。

前述介子交换 $\rho^0-\omega$ 混合也能够解释镜像核结合能差。已经计算了 $A = 11, 13, 15, 17, 27, 29, 31, 33, 39$ 和41镜像核的结合能差,考虑了 $\rho^0-\omega, \pi^0-\eta$ 混合以及单 π 和双 π 交换的贡献。其结果接近较近的精确实验测出的 $\langle \rho^0 | H | \omega \rangle$ 值。

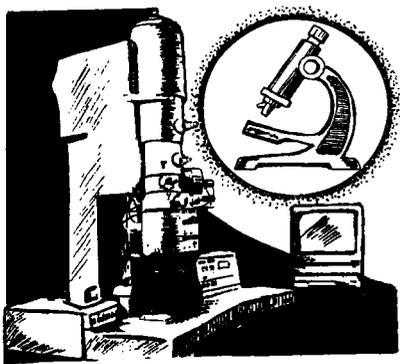
如表3所示, $\rho^0-\omega$ 混合的作用决定了CSB,而考虑了CSB就解释了Hartree-Fock多体理论和实验值之间的大部分分歧。对所有质量数来说, $\rho^0-\omega$ 混合的贡献都是一个重要部分。同时,从表3中也可以看出,CSB作用可以解释大约85%的NS反常。

表3 CSB对NS反常解释的贡献

质量数A	轨道态	$\rho^0-\omega$ 混合(KeV)	总和(KeV)	实验值(KeV)
15	$P_{3/2}^-$	161	189	190
	$P_{1/2}^-$	200	256	290
17	$d_{5/2}$	116	129	190
	$s_{1/2}$	192	228	210
	$d_{3/2}$	169	223	270
39	$1s_{1/2}^-$	256	303	270
	$d_{3/2}^-$	248	319	430
41	$f_{7/2}$	154	172	350
	$1p_{1/2}$	228	265	340
	$1p_{1/2}$	249	303	330

另一方面,随着核多体研究的进展,60年代到80年代发展起来的一些经典势模型,作为多体计算的输入量越来越显得粗糙了。同时,实验数据精度也达到了理论计算中微小的差别都不能忽视的地步。自90年代以来,经典NN势已经被一些新的势模型取代。所有这些势模型都是电荷相关的,它们的长程范围内都有单 π 交换特征,短程处理时分为唯象和介子理论两种。

以现代NN势Argonne v_{18} (95)(以下简称 Av_{18})和CD-Bonn(96)为例。 Av_{18} 势是半唯象势,它有一个OPE的“尾部”,由18个自旋-同位旋-轨道算符乘不同的径向函数组成。其中包括14个算符的电荷无关部分(即经典的 Av_{14} 势),以及4个算符的电荷无关破缺部分,同时还有一个电磁作用势。 Av_{18} 势由于其结构简单尤其适合核物理的计算。CD-Bonn势以相对论性的介子交换模型为基础,因而不可能由定域势函数来描述,相反,由分波



显微镜概述

侯淑莲 李石玉

(华北煤炭医学院物理教研室 河北唐山 063000)

人类总要不断探索微观领域的秘密,要亲眼见到超微尺度的自然现象,显微镜是人们所能依赖的最好工具。在历史的长河中,显微镜经历了光学显微镜,电子显微镜,扫描隧道显微镜,扫描探针显微镜的漫长历程。由于显微镜的研制也曾造就了四位诺贝尔物理奖得主,显微镜促进了科学技术的发展,特别早期对生物医学领域做出重要贡献,而科学技术的发展及理论突破又是产生更新型显微镜的温床和催化剂。

一、光学显微镜

人类对于生物微观世界的认识,有着一段漫长的历史,与显微镜的发明与改进密切相关。荷兰人列文虎克(1632—1732)创造成功世界上第一架显微镜,由于初期复式显微镜有严重缺陷,它把毕生精力用于发展单式显微镜上并成为显微镜学和微生物学的开拓者。第一个设计较好性能较高的显微镜是物理学家胡克(1635—1702)制做的,并首次提出“cell”这个词。推进了细胞学的建立。随着显微镜的不断改进,加上切片机的发明及固定染色等技术的进步,凡是光学显微镜能看到的一切细胞构造,都于19世纪最后30年中发现。在显微镜的发明和改进的基础上建立了细菌学,明确了细菌的致病作用,德国人柯赫因此荣获1905年生理医学奖。当时对光学显

微镜的最主要改进是消除象差。至1830年英国科学家利斯特向英国皇家学会宣读了“论显微镜的改进”的论文,提出由火石玻璃与冕牌玻璃制成的物镜消除了色差与球差,这就是至今仍在使用的利斯特物镜。这个发现使得物镜制造从全凭经验进入到理论计算的阶段。光学显微镜发展中转折性的飞跃来自德国物理学家阿贝。1873年阿贝和亥姆霍兹各自独立发现光学的正弦条件。阿贝还从他的成像公式推导出了众所周知的关于显微镜的分辨距离的公式,光的衍射效应限制了光学显微镜进一步提高分辨率的可能性。依据阿贝的公式他提出了“数值孔径”这个名词。在前人(如胡克)工作的基础上,阿贝于1878年设计成功浸没物镜。在以后关于光学显微改进工作中一方面努力减少象差提高成像质量,另一方面就是提高数值孔径,减少用光波长以提高分辨率,向极限分辨率迈进,随着用途的不同至20世纪前半叶已制成各种显微镜,如暗场显微镜、紫外显微镜、偏光显微镜、相衬显微镜(其发明者荷兰的泽尔尼克获1953年诺贝尔物理奖)、荧光显微镜、干涉显微镜、离心显微镜、倒置显微镜、体视显微镜等等。由于探测精度被阿贝散射限制,观察的分辨率只能到几百个纳米,放大倍数为几千倍。这对于生物观察来说只能停留于细胞水平,对于介于细胞水平和分子水平的亚显微结构就无能为力了,更不用说分子水平的超微结构了。人们曾寄希望于减小波长用波长更短的光源—紫外光,1904年柯勒等

来表示则很方便。 Av_{18} 和CD-Bonn势,作为高精度NN势模型,虽然它们的数学结构差别很大,但在各自有效的范围内却能预言完全相同的相移。

电荷相关的高精度现代NN势,是近年来日益精确的多体计算所需要的。迅猛发展的计算机技术,使这些多体计算成为可能,这为我们在核子相互作用层次理解核结构提供了前所未有的机会,同时,也使得在检验CIB和CSB的微弱作用方面的研究显得更加重要。

总的来说,核力的电荷无关性和电荷对称性都是理想的情况,是对实际核子-核子相互作用的良好近似,其不确定程度仅约1%左右。然而,随着实验技术的进步和理论计算能力的大幅度提高,90年代以来,这1%左右的不确定性已成为实验和理论上不可忽视的因素。各种新型核力势模型都不再是电荷无关的,而是包含了电荷无关性破缺和电荷对称性破缺。对于这些破缺的根源及其在核现象中表现的研究正进一步丰富人们对核力和原子核的认识。