

夸克退定域色屏蔽模型与 KN 的 S 波共振态

邓成荣, 平加伦

(南京师范大学物理科学与技术学院 210097, 江苏, 南京)

[摘要] 利用夸克退定域色屏蔽模型, 通过计算等效势, 研究了 KN 系统可能的 S 波共振态. 发现不可能存在 $I=1$ 的共振态, 在 $I=0$ 的系统中, 存在相当强的等效吸引, 容许共振态的存在. 讨论了最近“发现”的五夸克态与原有 KN 散射实验的相容性.

[关键词] 多夸克系统, 夸克退定域色屏蔽模型, KN 等效势, Θ^+

[中图分类号] O572.33, [文献标识码] A, [文章编号] 1001-4616(2005)01-0042-04

S-Wave Resonance of KN in the Quark-Delocalization, Color-Screening Model

Deng Chengrong, Ping Jialun

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, China)

Abstract : By calculating the KN effective-potential, we study the possible s -wave resonance of KN system in the QDCSM. The resonance for $I=1$ is excluded. However, there is a strong effective attraction in $I=0$ system. The existence of $I=0$ resonance is possible. The consistency between the “discovery” of pentaquark and the existing KN scattering data is also discussed.

Key words : multiquark, QDCSM, KN effective-potential, Θ^+

0 引言

多夸克系统是人们了解 QCD 的低能行为的良好场合. 它比通常的强子(重子和介子)提供了更多的信息. 特别是最近关于五夸克态, 实验上有了些重要进展. 至今, 有多个实验宣称发现了一个五夸克态: $\Theta^{+[1-4]}$, 其同位旋和自旋为 0 和 $\frac{1}{2}$, 夸克组成为 $uudds$, 可衰变为核子和 K 介子, 衰变宽度小于 25 MeV.

另有一个实验声称找到了 Θ^+ 的同伴 $\Xi^{--[5]}$, 还有实验报道发现了 Θ_c^+ 存在的证据^[6]. 另外在四夸克态和六夸克态方面, 实验上也发现了一些迹象. 但也有一些实验没有观测到 $\Theta^{+[7]}$. 虽然在五夸克态上, 已有了大量的理论工作, 但到现在为止, 还没有任何一个符合强子性质的模型得到与实验一致的五夸克态. 从 QCD 理论, 我们知道, 夸克间的相互作用是多体相互作用, 并且与夸克所处的状态有关(夸克分布与胶子分布是相互影响的). 20 多年的研究表明, 对于通常的强子(重子和介子), 它可以很好地用两体相互作用来代替. 但多夸克系统具有更丰富的色结构, 直接将这种代替推广到此是否合适, 是一个需要研究的问题. 另外由于多夸克系统具有各种几何结构和颜色结构, 多夸克系统的计算原则上是多道耦合计算. 目前五夸克系统的研究也表明了这一点. 多体相互作用的多道耦合计算是一个相当复杂和困难的计算. 寻找一条能够考虑以上各种因素、计算上仍然可行的途径是目前研究的一个重要方面.

夸克退定域色屏蔽模型是南京大学王凡教授和他的合作者在 20 世纪 90 年代提出的用于研究重子-重子相互作用的模型^[8]. 它考虑了夸克间的相互作用与夸克所处的状态有关, 采用色屏蔽势来近似描

收稿日期: 2004-06-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90103018).

作者简介: 邓成荣, 1978—, 硕士研究生, 主要从事强子物理的学习与研究. E-mail: xrdeng78@163.com

通讯联系人: 平加伦, 1963—, 教授, 主要从事强子物理的教学与研究. E-mail: jlping@pine.njnu.edu.cn

写这种性质,将各种不同的轨道结构用夸克的退定域近似描写.在某种意义上,考虑了夸克和胶子场的相互影响,利用变分法(系统动力学来决定夸克退定域参数)作了一种自洽计算.将该模型应用于研究核子-核子、核子-超子散射,氦核的性质,取得了成功^[8-10].应用于六夸克系统,得到了一些有意义的结果^[11].本文就是利用此模型来研究核子和K介子系统是否存在吸引,吸引是否足够强以至于形成目前实验上可能观测到的五夸克态.

1 夸克退定域色屏蔽模型

有关 QDCSM 可以参考文献 [9—11], 此处只给出计算所必需的 QDCSM 的哈密顿量、波函数. 三夸克体系的哈密顿量和以往的势模型中一样, 对于五夸克体系, 哈密顿量可以写成:

$$H_5 = \sum_{i=1}^5 \left(m_i + \frac{p_i^2}{2m_i} \right) - T_{CM} + \sum_{i<j}^5 (V_{ij}^C + V_{ij}^G) \quad (1)$$

其中

$$T_{CM} = \frac{1}{2M} \left(\sum_{i=1}^5 p_i \right)^2, \quad M = \sum_{i=1}^5 m_i \quad (2)$$

$$V_{ij}^C = \begin{cases} -\alpha_c \lambda_i \cdot \lambda_j r_{ij}^2, & \text{当 } ij \text{ 在同一团时} \\ -\alpha_c \lambda_i \cdot \lambda_j \frac{1 - e^{-\mu r_{ij}}}{\mu}, & \text{当 } ij \text{ 不在同一团时} \end{cases} \quad (3)$$

$$V_{ij}^G = \alpha_s \frac{\lambda_i \cdot \lambda_j}{4} \left[\frac{1}{r_{ij}} - \frac{\pi \alpha(r)}{2} \left(\frac{1}{m_i^2} + \frac{1}{m_j^2} + \frac{4 \sigma_i \cdot \sigma_j}{3 m_i m_j} \right) \right] \quad (4)$$

式中 m_i, p_i, r_{ij} 分别代表夸克的质量、动量和夸克之间的距离, V_{ij}^C 是单胶子交换势, V_{ij}^G 是囚禁势, α_c 是囚禁势的强度, α_s 是强相互作用的耦合常数, λ 是盖尔曼矩阵元. 单粒子轨道波函数为:

$$\phi_L = \left(\frac{1}{\pi b^2} \right)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{1}{2b^2} \left(r + \frac{r}{2} \right)^2} \quad (5)$$

$$\phi_R = \left(\frac{1}{\pi b^2} \right)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{1}{2b^2} \left(r - \frac{r}{2} \right)^2} \quad (6)$$

其中 s 为两夸克团质心之间的距离, QDCSM 模型中退定域单粒子轨道波函数为:

$$\psi_l = \frac{\phi_L + \varepsilon \phi_R}{N(\varepsilon)} \quad (7)$$

$$\psi_r = \frac{\phi_R + \varepsilon \phi_L}{N(\varepsilon)} \quad (8)$$

其中

$$N(\varepsilon) = \sqrt{1 + \varepsilon^2 + 2\varepsilon e^{-\frac{s^2}{4b^2}}} \quad (9)$$

引入了退定域参数 ε , 表示夸克从一团跑到另一团的几率, 它的大小通过多夸克系统的动力学变分给出.

五夸克系统的波函数为:

$$\Psi_{5q} = A [\Psi_B^S(123) \Psi_M^S(45)]_{s=\frac{1}{2}}^{I=0} \quad (10)$$

$$\Psi_B^S(123) = \psi_c(1) \psi_c(2) \psi_c(3) \chi_c^{[111]}(123) \eta_{sf}^{[3]}(123) \quad (11)$$

$$\Psi_M^S(45) = \psi_c(4) \psi_c(5) \chi_c^{[111]}(45) \chi_c(45) \quad (12)$$

因为 K 介子为 Goldstone 玻色子, 组分夸克模型计算的质量偏高, 因此采用绝热近似的方法计算 Θ^+ 的能量. 对于每一个 s , 可以通过变分条件

$$\frac{\partial E_s}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (13)$$

得出五夸克的能量, 两团之间的等效势为

$$V_{\text{eff}}(s_0) = E_5(s_0) - E_5(\infty) \quad (14)$$

Θ^+ 的能量为

$$M_s = m_K + m_N + V_{\text{eff}} + E_0 \tag{15}$$

这里 m_K, m_N 分别为 K 介子和核子的质量 E_0 为它们之间的零点振动能 $E_0 = \frac{3\hbar^2}{4ms_0^2}$ 其中 m 是它们的约化质量.

2 结果与讨论

利用重子的性质和氘核的性质,可确定模型参数. 参数的具体数值见表 1.

表 1 模型参数

$m_u/(MeV)$	$m_d/(MeV)$	$m_s/(MeV)$	$\alpha_v/(10^{30}MeV/m^2)$	α_s	$b/(10^{-15}m)$
313	313	560	25.13	1.54	0.602

采用上述模型及参数,我们计算了 $KN(I=1), KN(I=0)$ 和 K^+n 道的等效势. 图 1 给出的是 $KN(I=1)$ 的结果. 从图 1 可看到 KN 间是纯排斥势($\mu=1$) 这与 KN 的散射数据是一致的. 为了比较,图 1 还给出朴素夸克模型的结果($\mu=0$) 排斥更强些. 图 2 给出的是 $KN(I=0)$ 的结果. 与 $KN(I=1)$ 不同,此时 KN 间存在等效吸引($\mu=1$),可以允许共振态存在,这与 KN 的散射数据原来的分析矛盾^[12],但与 KN 的散射数据新的分析是相容的^[13]. 实验上要得到 $KN(I=0)$ 散射相移,需要利用 K^+n 的散射相移,将其分解为 $I=0$ 和 $I=1$ 的分量,而 $I=1$ 的分量可从 K^+p 散射得到. 这是一个很困难的事. 因为需要从非常小的相移(对应于 K^+n) 分解出两个具有相反符号的较大分量(对应于 $I=0$ 和 $I=1$) 结果灵敏地依赖于 K^+n 的精确测定,而 K^+n 散射相移分析可能存在问题. 我们得到的 $KN(I=0)$ 系统的能量极小值为 1706 MeV,位于 $R_0 = 0.6 \times 10^{-15}m$ 处. 和实验上的 Θ^+ 相比,能量偏高. 部分原因是由于在夸克模型中, K 介子的质量被高估了. 计算值为 $M_K = 650 MeV$. 为了尽量消除 K 介子质量过高的影响,我们采用如下步骤:首先根据式(14)计算系统的等效势,并得出最小值 $V_{\text{eff}}(R_0)$,然后加上 N 和 K 的实验质量和零点振动能 $\frac{3\hbar^2}{4\mu_{KN} R_0^2}$ (μ_{KN}

为 N 和 K 的约化质量, $R_0 = 0.6 \times 10^{-15}m$ 为等效势的极小点) 这样我们得到 $M_{\Theta^+} = 1615 MeV$. 它仍然比实验上得到的质量高 75 MeV. $\mu=0$ 曲线对应的朴素夸克模型结果基本上是纯排斥,无法说明可能存在的五夸克态 Θ^+ .

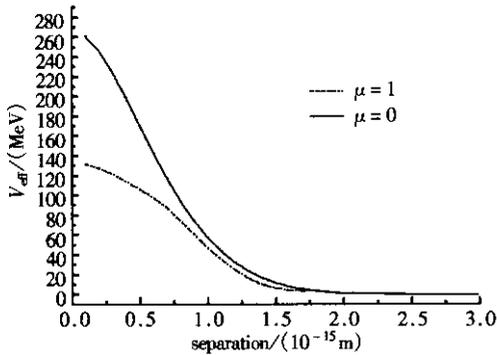


图 1 $KN(I=1)$ 的等效势曲线

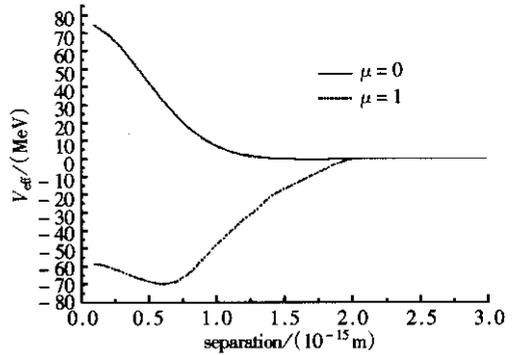


图 2 $KN(I=0)$ 的等效势曲线

K^+n 道的等效势在图 3 中给出. 我们知道 K^+n 的等效势就是 $KN(I=1)$ 和 $KN(I=0)$ 的等效势直接相加的结果. 由于 $I=0, 1$ 等效势的相互抵消, K^+n 间的相互作用非常弱. K^+n 散射振幅无法直接从实验上测量,需要利用 K^+d 的实验数据,将小分量 K^+n 和大分量 K^+p 分开. 这种分离是很困难的,往往带有较大的误差. 最近 Gibbs 的分析指出 K^+d 散射中多次散射是重要的,以往的分析没有考虑这个效应会导致相当大的误差,得到的 $KN(I=0)$ 散射的 S 波相移是排斥的结论也是值得进一步研究的.

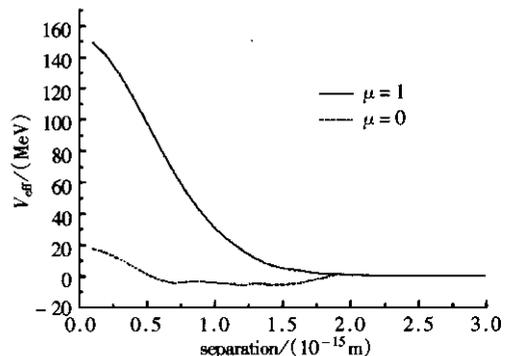


图 3 K^+n 的等效势曲线

3 结论

利用夸克退定域色屏蔽模型,我们计算了 $KN(I=1)$, $KN(I=0)$ 和 K^+n 道的等效势,发现 $KN(I=0)$ 存在相当的等效吸引,有可能形成共振态.但 K^+n 道的相互作用非常弱,基本上不曾存在吸引,所以在 K^+n 的散射实验中,很难发现 Θ^+ 存在的信号.虽然在我们的模型中容许 KN 共振态的存在,但我们得到的能量偏高.也许多道耦合或动力学计算可以进一步降低系统的能量.这需要进一步的研究.

由于 Θ^+ 的能量高于 KN 的阈值,衰变到 KN 的宽度很小,其空间结构、色结构和 KN 应该有较大差别.采用其它结构,如三角形或正四面体等来研究 Θ^+ 可能得到更好的结果,此项工作正在进行.

[参考文献]

- [1] Nakano T, Ahn D S, Ahn J K *et al.* Evidence for a narrow $s = +1$ Baryon Resonance in photoproduction from the Neutron [J]. *Phys Rev Lett* 2003 91(1) 012002 - 1—012002 - 4.
- [2] Stepanyan S, Hicks K, Carman D S, *et al.* Observation of an exotic $s = +1$ Baryon in exclusive photoproduction from the Deuteron [J]. *Phys Rev Lett* 2003 91(25) 252001 - 1—252001 - 5.
- [3] Abdel-Bary M, Abdel-Samad, Brinkmann K-Th *et al.* Evidence for a narrow resonance at 1530 MeV/c² in the K^0P system of the reaction $pp \rightarrow \sum^+ K^0P$ from the COSY-TOF expermen [J]. *Phys Lett B* 2004 595(1—4) :127—137.
- [4] Chekanov S, Derrick M, Krakner D, *et al.* Evidence for anarrow baryonic state decay into $K^0 sp$ [J]. *Phy Lett B* 2004 591(1—2) :7—22.
- [5] Alt C, Anticic T, Batar B, *et al.* Observation of an Exotic $s = -2$ Baryon Resonance in Proton-Proton [J]. *Phys Rev Lett*, 2004 92(4) 042003 - 1—042003 - 5.
- [6] Aktas A, Andreev V, Anthonics T, *et al.* Evidence for a Narrow Anti-charmed Baryon State [J]. *Phy Lett B* 2004 588(1 - 2) :17—28.
- [7] Bai J Z. Search for the pentaquark state in $\Psi(2s)$ and J/Ψ decay to $K_s^0 p K^- \bar{n}$ and $K_s^0 \bar{p} K_n^+$ [J]. *Phys Rev D* 2004 70(1) : 012005 - 1—012005 - 7.
- [8] Wang F, Wu G H, Teng L J *et al.* Quark delocalization, color screening, and nuclear intermediate range attraction [J]. *Phys Rev Lett*, 1992 69(3) 2901—2904.
- [9] Wu G H, Teng L J, Ping J L, *et al.* Quark delocalization, coloring screening and $N - N$ intermidate range attraction: p waves [J]. *Phys Rev C*, 1996 53(3) :1161—1166.
- [10] Wu G H, Ping J L, Teng L J *et al.* Quark delocalization, color screening model and nucleon-baryon scattering [J]. *Nucl Phys A* 2000 673(1 - 4) 279—297.
- [11] Wang F, Ping J L, Wu G H *et al.* Quark delocalization, color screening and dibaryon [J]. *Phys Rev C*, 1995 51(6) : 3411—3420.
- [12] Workman R L, Arndt R A, Strakovsky I I. Effect of exotic $s = +1$ resonance $K_L^0 P$ scattering data [J]. *Phys Rev C* 2004 70(2) 028201 - 1—028201 - 2.
- [13] Gibbs W R. The pentaquark in the K-plus-d total cross section data [J]. *Phys Rev C* 2004 70(4) 045208 - 1—045208 - 8.

[责任编辑:丁蓉]