

# 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 ,  $\Theta^+$

[ 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 ,  $\Theta^+$

## 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 , 实验上有了一些重要进展 . 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  $\Theta^+$  的同伴  $\Xi^{-- [5]}$  , 还有实验报道发现了  $\Theta_c^+$  存在的证据<sup>[6]</sup> . 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们在 20 世纪 90 年代提出的用于研究重子-重子相互作用的模型<sup>[8]</sup> . 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<sup>[8-10]</sup>.应用于六夸克系统,得到了一些有意义的结果<sup>[11]</sup>.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

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

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

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

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,  $V_{ij}^G$  是单胶子交换势,  $V_{ij}^C$  是囚禁势,  $\alpha_c$  是囚禁势的强度,  $\alpha_s$  是强相互作用的耦合常数,  $\lambda$  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  $\varepsilon$ , 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:

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

$$\Psi_B^S(123) = \psi(1) \psi(2) \psi(3) \chi_c^{[111]}(123) \eta_{sf}^{[31]}(123) \quad (11)$$

$$\Psi_B^S(45) = \psi(4) \psi(5) \chi_c^{[111]}(45) \chi(45) \quad (12)$$

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  $\Theta^+$  的能量. 对于每一个  $s$ , 可以通过变分条件

$$\frac{\partial E_5}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (13)$$

得出五夸克的能量, 两团之间的等效势为

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

$\Theta^+$  的能量为

万方数据

$$M_S = m_K + m_N + V_{\text{eff}} + E_0$$

(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

$m_u/(\text{MeV})$	$m_d/(\text{MeV})$	$m_s/(\text{MeV})$	$\alpha_c/(10^{30}\text{MeV}/\text{m}^2)$	$\alpha_s$	$b/(10^{-15}\text{m})$
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<sup>[12]</sup>,但与  $KN$  的散射数据新的分析是相容的<sup>[13]</sup>. 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  $R_0 = 0.6 \times 10^{-15}\text{m}$  处. 和实验上的  $\Theta^+$  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  $M_K = 650\text{MeV}$ . 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  $\frac{3\hbar^2}{4\mu_{KN}R_0^2}$  ( $\mu_{KN}$  为  $N$  和  $K$  的约化质量,  $R_0 = 0.6 \times 10^{-15}\text{m}$  为等效势的极小点) 这样我们得到  $M_{\Theta^+} = 1615\text{MeV}$ . 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  $\Theta^+$ .

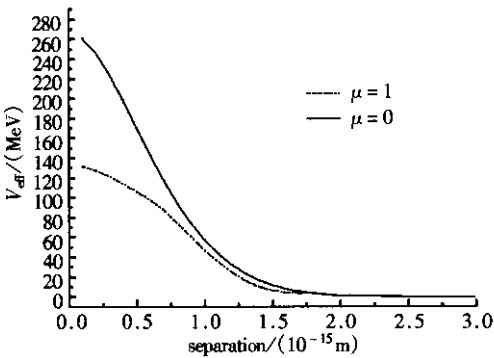


图 1  $KN(I=1)$  的等效势曲线

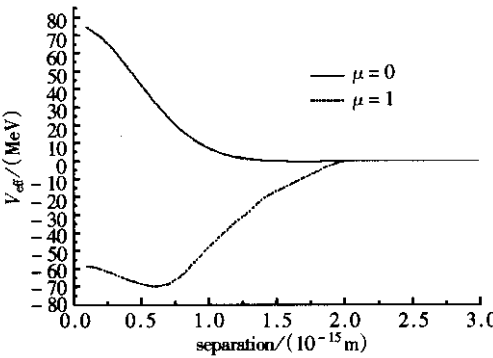


图 2  $KN(I=0)$  的等效势曲线

$K^+n$  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.

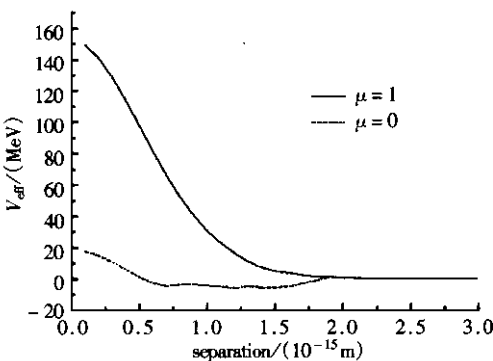


图 3  $K^+n$  的等效势曲线

### 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  $\Theta^+$  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。这需要进行进一步的研究。

由于  $\Theta^+$  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  $\Theta^+$  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/c<sup>2</sup> 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 a narrow baryonic state decay into  $K^0 \pi^0$  [ J ]. *Phys 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 ]. *Phys Lett B* 2004 588( 1 - 2 ) 17—28.
- [ 7 ] Bai J Z. Search for the pentaquark state in  $\Psi(2s)$  and  $J/\Psi$  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 ,color screening and  $N - N$  intermediate 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 ]