

组分夸克模型下研究高次分波的核子 - 核子散射

黄虹霞, 平加伦

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210046)

[摘要] 在手征夸克模型和夸克蜕定域色屏蔽模型框架下, 利用共振群方法研究高次分波的核子 - 核子散射相移, 两个模型结果基本一致, 且与实验相符. 在 3F_2 、 3F_3 、 3F_4 和 3H_4 分波中, 两个模型都没有找到任何共振态.

[关键词] 核子 - 核子散射相移, 高次分波, 共振态, 组分夸克模型

[中图分类号] O572.33 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2011)04-0043-06

Study of Nucleon-Nucleon Scattering for High Partial Waves in Constituent Quark Models

Huang Hongxia, Ping Jialun

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: By using the chiral quark model and quark delocalization colour screening model, the phase shifts of NN scattering for high partial waves are studied. The results of these two models are almost equivalent. None of the quark models used have found any resonance-like structure in 3F_2 , 3F_3 , 3F_4 and 3H_4 partial waves.

Key words: NN scattering phases, high partial waves, resonance states, constituent quark models

人们对核子 - 核子(NN) 相互作用的研究已经 70 多年了. 虽然介子交换理论能够很好地描述实验值, 但还是有很多问题有待解决. 比如说如何解释 pp 散射截面中 2.2 ~ 2.4 GeV 能区的宽共振^[1, 2]; 如何解释 1D_2 , 3F_3 , 3P_2 - 3F_2 和 3F_4 - 3H_4 分波的 NN 散射振幅的结构^[3-5].

一直以来, 量子色动力学(QCD) 被公认为研究强相互作用的基本理论, 因此人们希望用 QCD 理论来研究 NN 相互作用. 然而, 由于非微扰 QCD 的复杂性, 在研究低能问题时存在困难, 因此直接应用 QCD 理论来研究 NN 相互作用是有困难的. 最近, 格点 QCD 做了一些相关的工作, 并有了一点进展^[6], 但还有很多问题有待解决. 因此, 到目前为止, 具有 QCD 精神的夸克模型仍然是研究重子 - 重子相互作用的主要方法.

研究 NN 相互作用最常用的夸克模型是手征夸克模型(ChQM)^[7-9]. 这个模型主要是利用 σ 介子交换来提供中程吸引. 虽然近几年的实验观察到了作为 $\pi\pi S$ 波共振的 σ 介子, 但是这样的 σ 介子很难给出核子 - 核子相互作用所需要的中程吸引^[11]. 是否存在其他的中程吸引产生机制? 我们组在上个世纪 90 年代发展起来的夸克蜕定域色屏蔽模型(QDCSM) 给出了另一种回答^[13-16]. 这是基于核力和分子力之间的相似性而提出的一种模型, 对于单个强子, 它就是传统的组分夸克模型. 在推广到重子相互作用时, QDCSM 考虑了夸克间的相互作用与夸克所处的状态有关, 并将各种不同颜色结构的耦合效应应用色屏蔽来近似, 对哈密顿量作了修正, 另一方面, 借鉴分子结构中电子非定域化的概念, 引入了夸克蜕定域效应, 特点是允许许多夸克系统通过自身的动力学效应来选择一个合理的结构, 这样就扩大了模型所采用的 Hilbert 空间. 由于夸克蜕定域和色屏蔽效应的引入, QDCSM 能很好地给出核子相互作用中的中程吸引. 我们已经证明了在研究 $IJ = 01$ 态的 S 和 D 分波的 NN 散射相移时, 这两个模型得到了一致的结果, 并能与实验值相符^[17], 这告诉我们, 在这种情况下, σ 介子交换效应能用夸克蜕定域和色屏蔽效应来替代. 我们也很感兴

收稿日期: 2011-04-20.

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目(11KJB14003).

通讯联系人: 黄虹霞, 讲师, 研究方向: 强子物理. E-mail: hxhuang@njnu.edu.cn

趣 在研究高次分波的 NN 散射相移时,这两个模型是否能得到一致的结果?

自从 1977 年 Jaffe 提出了双重子态 H 粒子^[18] 以来,实验上和理论上进行了大量的工作来寻找这个态和其他多夸克态,但至今为止,没有一个多夸克态得到实验的证实.最近,CELSIUS-WASA 实验组报道了他们的最新实验结果,在 $pn \rightarrow d\pi^0\pi^0$ 反应中,在能量 ~ 2.36 GeV 的地方可能存在 $\Delta\Delta$ 共振态($J^P = 1^+$ 或 3^+),宽度为 ~ 80 MeV^[19],这是我们理论上感兴趣的态.另外, pp 散射截面中 2.2 \sim 2.4 GeV 能区的宽共振^[1,21], 1D_2 , 3F_3 , $^3P_2 - ^3F_2$ 和 $^3F_4 - ^3H_4$ 分波的 NN 散射振幅中有增强的结构^[3-5],这些都是我们感兴趣的问题.因此,我们想研究核子-核子散射相移的高能区来寻找是否有共振态.

最近,我们已经利用 ChQM 和 QDCSM 这 2 个模型研究了 S、P、D 分波的 NN 散射相移以及可能存在的双重子态^[20,21].这里,我们要把模型推广到计算 NN 的高次分波(F、G、H 和 I) 的散射相移.一方面,我们要研究在计算高次分波的 NN 散射相移时,这 2 个模型是否能得到一致的结果;另一方面,我们想进一步寻找双重子共振态,尤其是在 3F_2 , 3F_3 , 3F_4 和 3H_4 分波中.

1 计算方法

1.1 手征夸克模型(ChQM)

手征夸克模型的具体描述可以参考文献[17],在这里我们只给出哈密顿量和参数,

$$\begin{aligned}
 H &= \sum_{i=1}^6 \left(m_i + \frac{p_i^2}{2m_i} \right) - T_c + \sum_{i<j} [V^G(r_{ij}) + V^\pi(r_{ij}) + V^\sigma(r_{ij}) + V^C(r_{ij})], \\
 V^C(r_{ij}) &= \frac{1}{4}\alpha_s\lambda_i \cdot \lambda_j \left[\frac{1}{r_{ij}} - \frac{\pi}{m_q} \left(1 + \frac{2}{3}\sigma_i \cdot \sigma_j \right) \delta(r_{ij}) - \frac{3}{4m_q^2 r_{ij}^3} S_{ij} \right] + V_{ij}^{G,LS}, \\
 V_{ij}^{G,LS} &= -\frac{\alpha_s}{4}\lambda_i \cdot \lambda_j \frac{1}{8m_q^2 r_{ij}^3} [r_{ij} \times (p_i - p_j)] \cdot (\sigma_i + \sigma_j), \\
 V^\pi(r_{ij}) &= \frac{1}{3}\alpha_{ch} \frac{\Lambda^2}{\Lambda^2 - m_\pi^2} m_\pi \left\{ \left[Y(m_\pi r_{ij}) - \frac{\Lambda^3}{m_\pi^3} Y(\Lambda r_{ij}) \right] \sigma_i \cdot \sigma_j + \left[H(m_\pi r_{ij}) - \frac{\Lambda^3}{m_\pi^3} H(\Lambda r_{ij}) \right] S_{ij} \right\} \tau_i \cdot \tau_j, \quad (1) \\
 V^\sigma(r_{ij}) &= -\alpha_{ch} \frac{4m_u^2}{m_\pi^2} \frac{\Lambda^2}{\Lambda^2 - m_\sigma^2} m_\sigma \left[Y(m_\sigma r_{ij}) - \frac{\Lambda}{m_\sigma} Y(\Lambda r_{ij}) \right] + V_{ij}^{\sigma,LS}, \quad \alpha_{ch} = \frac{g_{ch}^2 m_\pi^2}{4\pi 4m_u^2}, \\
 V_{ij}^{\sigma,LS} &= -\frac{\alpha_{ch}}{2m_\pi^2} \frac{\Lambda^2}{\Lambda^2 - m_\sigma^2} m_\sigma^3 \left[G(m_\sigma r_{ij}) - \frac{\Lambda^3}{m_\sigma^3} G(\Lambda r_{ij}) \right] [r_{ij} \times (p_i - p_j)] \cdot (\sigma_i + \sigma_j), \\
 V^C(r_{ij}) &= -a_c \lambda_i \cdot \lambda_j (r_{ij}^2 + V_0) + V_{ij}^{C,LS}, \\
 V_{ij}^{C,LS} &= -a_c \lambda_i \cdot \lambda_j \frac{1}{8m_q^2 r_{ij}} \frac{dV^C}{dr_{ij}} [r_{ij} \times (p_i - p_j)] \cdot (\sigma_i + \sigma_j), \quad V^C = r_{ij}^2, \\
 S_{ij} &= \frac{(\sigma_i \cdot r_{ij})(\sigma_j \cdot r_{ij})}{r_{ij}^2} - \frac{1}{3} \sigma_i \cdot \sigma_j.
 \end{aligned}$$

这里 S_{ij} 是张量算符, $Y(x)$ 、 $H(x)$ 和 $G(x)$ 是标准的 Yukawa 势^[9], T_c 是质心动能.

1.2 夸克蜕定域色屏蔽模型(QDCSM)

夸克蜕定域色屏蔽模型的详细描述参见文献[13-16,23].哈密顿量的形式与(1)式基本相同,只是没有 σ 介子交换项,以及色囚禁势的形式不同,具体形式如下:

$$\begin{aligned}
 V^C(r_{ij}) \ \&= -a_c \lambda_i \cdot \lambda_j [f(r_{ij}) + V_0] + V_{ij}^{C,LS}, \\
 f(r_{ij}) \ \&= \begin{cases} r_{ij}^2, & \text{如果 } i, j \text{ 在同一重子团内} \\ 1 - \frac{e^{-\mu r_{ij}}}{\mu}, & \text{如果 } i, j \text{ 在不同重子团内.} \end{cases} \quad (2)
 \end{aligned}$$

这里 μ 是色屏蔽常数,通过调节核的质量来确定.

模型中的夸克蜕定域参数由系统的动力学性质决定,夸克集团中的单粒子波函数形式如下:

$$\begin{aligned}
 \psi_\alpha(\vec{S}_i, \varepsilon) &= (\phi_\alpha(\vec{S}_i) + \varepsilon \phi_\alpha(-\vec{S}_i)) / N(\varepsilon), \\
 \psi_\beta(-\vec{S}_i, \varepsilon) &= (\phi_\beta(-\vec{S}_i) + \varepsilon \phi_\beta(\vec{S}_i)) / N(\varepsilon), \\
 N(\varepsilon) &= \sqrt{1 + \varepsilon^2 + 2\varepsilon e^{-S_i^2/4b^2}}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\phi_\alpha(\vec{S}_i) = \left(\frac{1}{\pi b^2}\right)^{3/4} e^{-\frac{1}{2b^2}(r_\alpha - \vec{S}_i/2)^2},$$

$$\phi_\beta(-\vec{S}_i) = \left(\frac{1}{\pi b^2}\right)^{3/4} e^{-\frac{1}{2b^2}(r_\beta + \vec{S}_i/2)^2}.$$

表 1 列出了模型参数. 为了比较两个模型的中程吸引机制, 我们在两个模型中用了完全相同的单胶子交换势和 π 介子交换势, 且参数 $b, \alpha_s, \alpha_{ch}, m_u, m_\pi, \Lambda$ 也完全相同, 只有中程吸引部分不同. 在 ChQM 中用 σ 介子交换来产生中程吸引, 而在 QDCSM 中用夸克蛻定域和色屏蔽效应来产生. 在 QDCSM 中, 我们还用了两组参数, 来研究模型对参数的敏感程度.

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of quark models

| | ChQM | QDCSM1 | QDCSM2 |
|-------------------------------|--------|---------|---------|
| $m_{u,d}$ (MeV) | 313 | 313 | 313 |
| b (fm) | 0.518 | 0.518 | 0.60 |
| a_c (MeV fm ⁻²) | 46.938 | 56.755 | 18.5 |
| V_0 (fm ²) | -1.297 | -0.5279 | -1.3598 |
| μ (fm ⁻²) | | 0.45 | 1.00 |
| α_s | 0.485 | 0.485 | 0.996 |
| m_π (MeV) | 138 | 138 | 138 |
| α_{ch} | 0.027 | 0.027 | 0.027 |
| m_σ (MeV) | 675 | | |
| Λ (fm ⁻¹) | 4.2 | 4.2 | 4.2 |

1.3 计算结果和讨论

在手征夸克模型和夸克蛻定域色屏蔽模型框架下, 利用共振群方法 [24 25] 我们计算了高次分波 (F, G, H 和 I 分波) 的核子 - 核子 (NN) 散射相移, 用来比较的实验数据 (SP07) 来源于参考文献 [5].

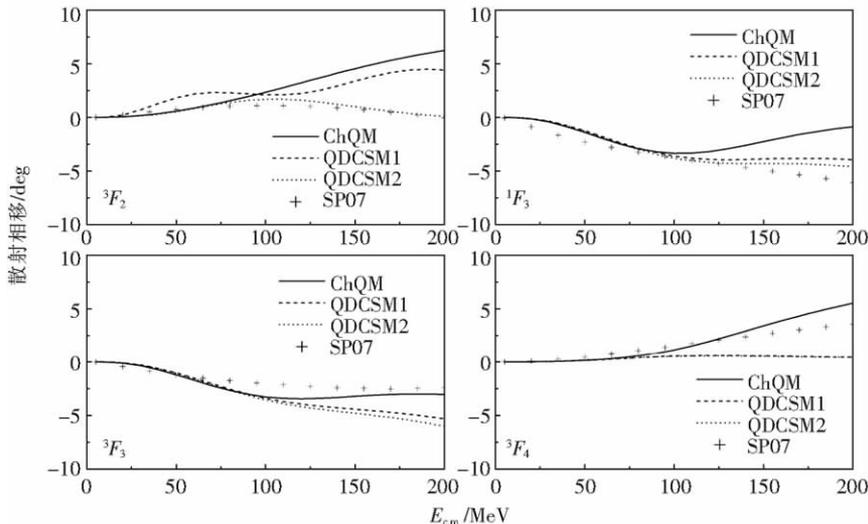


图 1 NN 的 F 波散射相移

Fig.1 The F-wave phase shifts of NN scattering

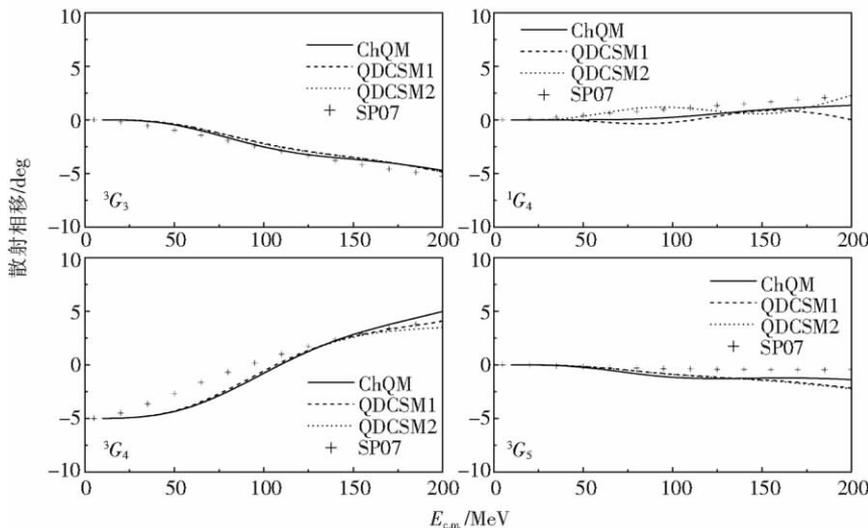


图 2 NN 的 G 波散射相移

Fig.2 The G-wave phase shifts of NN scattering

图 1 ~ 4 分别给出了 F 、 G 、 H 、 I 分波的 NN 散射相移. 三组模型基本都能得到与实验相符的结果, 除了在 1I_6 分波中, QDCSM2 得到的结果与实验值相反(见图 4). 另外, 对于 F 波, 只有在低能区(质心能量 $E_{c.m.} = E - 2M_N < 100$ MeV, 其中 E 是系统的总能量)模型计算与实验相符. 另外, 三组模型计算的结果与文献 [7] 和 [26] 也一致.

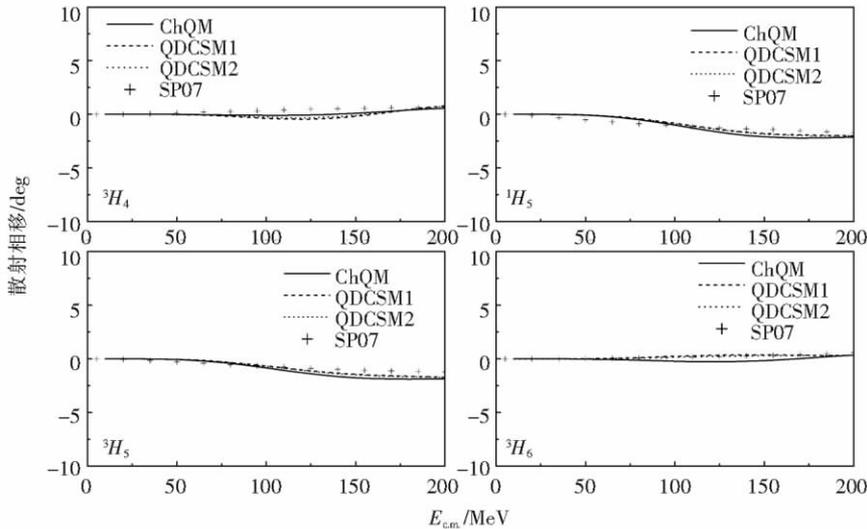


图 3 NN 的 H 波散射相移

Fig3 The H -wave phase shifts of NN scattering

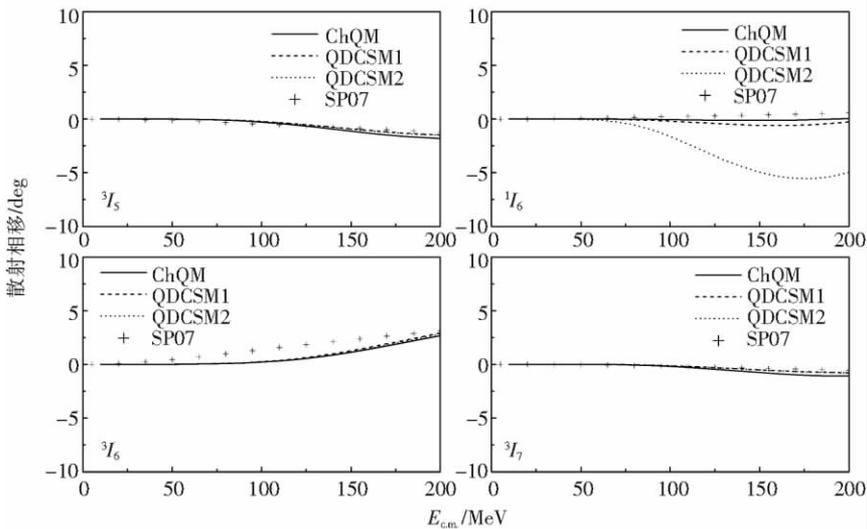


图 4 NN 的 I 波散射相移

Fig4 The I -wave phase shifts of NN scattering

为了探究 $N\Delta$ 、 $\Delta\Delta$ 共振态, 我们还做了进一步的计算, 把 NN 散射的入射能量加大到 $N\Delta$ 和 $\Delta\Delta$ 的阈值以上. 我们知道, 在实验上, 1D_2 、 3F_3 、 3P_2 、 3F_2 和 3F_4 、 3H_4 分波的 NN 散射相移中都发现过有增强的结构^[3-5]. 理论上, 我们曾经利用 QDCSM2 计算 $^1D_2^{NN}$ 散射相移得到了一个 $^5S_2^{N\Delta}$ 共振态, 但是在 $^3P_2^{NN}$ 散射相移中没有发现任何共振态^[21]. 这里, 我们三组模型计算得到的高次分波的 NN 散射相移中也没有发现任何共振态. 图 5 ~ 8 分别给出了 3 组模型计算得到的 3F_2 、 3F_3 、 3F_4 和 3H_4 分波的 NN 散射相移, 其中 sc. 表示 NN 单道结果, cc. 表示包含了 $N\Delta$ 、 $\Delta\Delta$ 的道耦合结果.

一般情况下, NN 道中考虑 $N\Delta$ 、 $\Delta\Delta$ 道耦合后吸引会加强, 在这里我们计算的 H 和 I 分波中, 这种影响却很小, 几乎可以忽略不计. 从图 5 中我们还发现, QDCSM2 计算得到的 $^{NN}F_2$ (这个态有 8 个道耦合, 包括 $^3P_2^{NN}$ 、 $^3P_2^{N\Delta}$ 、 $^3P_2^{\Delta\Delta}$ 、 $^3F_2^{NN}$ 、 $^3F_2^{N\Delta}$ 、 $^3F_2^{\Delta\Delta}$) 散射相移在入射能量 550 MeV 附近有个很小的鼓包, 这也正好在 $\Delta\Delta$ 阈值附近, 这里可能有个共振态. 另外, 在 $^{NN}F_3$ (这个态有 5 个道耦合, 包括 $^7P_3^{\Delta\Delta}$ 、 $^3F_3^{NN}$ 、 $^3F_3^{N\Delta}$ 、 $^3F_3^{\Delta\Delta}$)

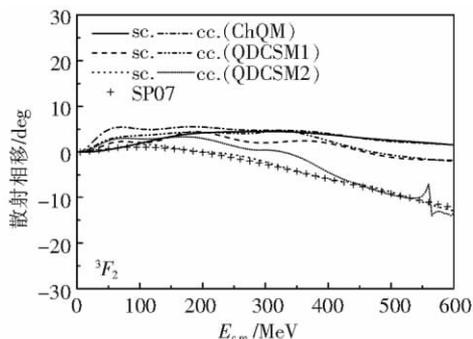


图5 3F_2 NN 散射相移
Fig5 3F_2 NN phase shifts

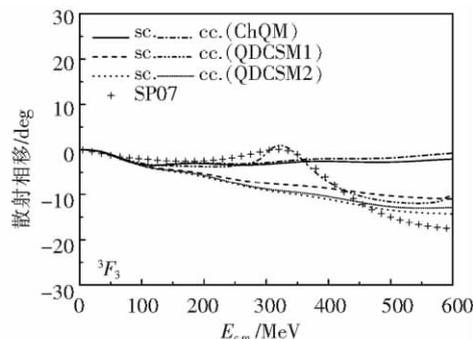


图6 3F_3 NN 散射相移
Fig6 3F_3 NN phase shifts

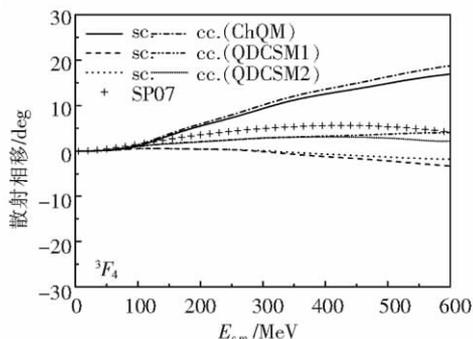


图7 3F_4 NN 散射相移
Fig7 3F_4 NN phase shifts

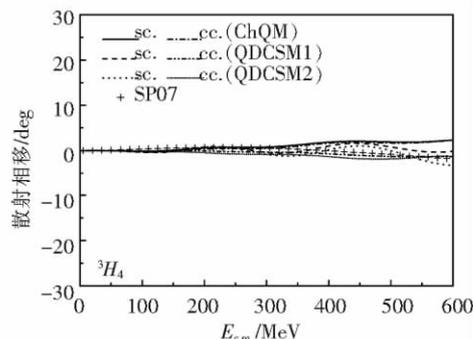


图8 3H_4 NN 散射相移
Fig8 3H_4 NN phase shifts

散射相移中入射能量 300 MeV 附近也有个较宽的鼓包(见图 6), 这表明对于 $N\Delta$ 单道计算虽然是个束缚态, 但与 NN 道耦合后, 就会使得能量高于 $N\Delta$ 阈值, 从而使得这个态不存在.

2 总结

我们利用手征夸克模型和夸克蛇定域色屏蔽模型计算了高次分波(F 、 G 、 H 和 I 分波) 的核子 - 核子 (NN) 散射相移. 对于大部分态, 两种模型得到的结果基本一致, 且与实验值相符, 这再次说明了这两个模型在研究 NN 相互作用的一致性. 在 3F_2 、 3F_3 、 3F_4 和 3H_4 分波的 NN 散射中考虑 $N\Delta$ 、 $\Delta\Delta$ 道耦合时没有得到任何共振态, 建议理论和实验上对这些分波做进一步研究.

[参考文献]

- [1] Yao W M. Review of particle physics[J]. J Phys G: Nucl Part Phys, 2006, 33 (1): 1-4 232.
- [2] Machleidt R, Slaus I. The nucleon-nucleon interaction[J]. J Phys G: Nucl Part Phys, 2001, 27(5): R69-R108.
- [3] Arndt R A, Hyslop J S, et al. Nucleon-nucleon partial-wave analysis to 1100 MeV[J]. Phys Rev D, 1987, 35 (1): 128-144.
- [4] Arndt R A, Roper L D, Workman R L, et al. Nucleon-nucleon partial-wave analysis to 1.6 GeV[J]. Phys Rev D, 1992, 45 (11): 3 995-4 001.
- [5] Arndt R A, Briscoe W J, Strakovsky I I, et al. Updated analysis of NN elastic scattering to 3 GeV[J]. Phys Rev C, 2007, 76(2): 025209-1-025209-10.
- [6] Ishii N, Aoki S and Hatsuda T. Nuclear force from lattice QCD[J]. Phys Rev Lett, 2007, 99(2): 022001-1-022001-4.
- [7] Valcarce A, Garcilazo H, Fernandez, et al. Quark-model study of few-baryon systems[J]. Rep Prog Phys, 2005, 68 (5): 965-1 041.
- [8] Fujiwara Y, Nakamoto C, Suzuki Y. Effective meson-exchange potentials in the SU6 quark model for NN and YN interactions[J]. Phys Rev C, 1996, 54 (5): 2 180-2 200.
- [9] Zhang Z Y, Yu Y W, Shen P N, et al. Hyperon-nucleon interactions in a chiral SU(3) quark model[J]. Nucl Phys A, 1994, 711(1-2): 1-12.

- 1997 ,625 (1/2) : 59-70.
- [10] Dai L R , Zhang Z Y , Yu Y W , et al. NN interactions in the extended chiral SU(3) quark model [J]. Nucl Phys A ,2003 , 727 (3/4) : 321-332.
- [11] Kaiser N , Grestendorfer S , Weise W. Peripheral NN-scattering: role of delta-excitation , correlated two-pion and vector meson exchange [J]. Nucl Phys A ,1998 ,637 (3) : 395-420.
- [12] Kaskulov M M , Clement H. Correlated two-pion exchange and large- N_c behavior of nuclear forces [J]. Phys Rev C ,2004 , 70 (1) : 014002 - 1-014002 - 12.
- [13] 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) : 2 901-2 904.
- [14] Wu G H , Teng L J , Ping J L , et al. Quark delocalization , color screening , and NN intermediate range attraction [J]. Phys Rev C ,1996 ,53(3) : 1 161-1 166.
- [15] Wu G H , Ping J L , Teng L J , et al. Quark delocalization , color screening , and nucleon-baryon scattering [J]. Nucl Phys A ,2000 ,673 (1/4) : 279-297.
- [16] Ping J L , Wang F , Goldman T. Effective baryon-baryon potentials in the quark delocalization , color screening model [J]. Nucl Phys A ,1999 ,657 (1) : 95-109.
- [17] Chen L Z , Pang H R , Huang H X , et al. Alternative approach to σ -meson exchange in the nucleon-nucleon interaction [J]. Phys Rev C ,2007 ,76(1) : 014001 - 1-014001 - 4.
- [18] Jaffe R L. Perhaps a stable dihyperon [J]. Phys Rev Lett ,1977 ,38 (5) : 195-198.
- [19] Bashkanov M , Bargholtz C , Berlowski M , et al. Double-pionic fusion of nuclear systems and the “ABC” effect: approaching a puzzle by exclusive and kinematically complete measurements [J]. Phys Rev Lett ,2009 ,102 (5) : 052301 - 1-052301 - 5.
- [20] Huang H X , Chen L Z , Pang H R , et al. Influence of spin-orbit force on nucleon-nucleon scattering in the quark delocalization colour screening model [J]. Chin Phys Lett ,2008 ,25(5) : 1 617-1 620.
- [21] Ping J L , Huang H X , Pang H R , et al. Quark models of dibaryon resonances in nucleon-nucleon scattering [J]. Phys Rev C ,2009 ,79(2) : 024001 - 1-024001 - 12.
- [22] Entem D R , Fernandez F , Valcarce A. Chiral quark model of the NN system within a Lippmann-Schwinger resonating group method [J]. Phys Rev C ,2000 ,62(3) : 034002 - 1-034002 - 18.
- [23] Ping J L , Pang H R , Wang F , et al. d^* dibaryon in the extended quark-delocalization , color-screening model [J]. Phys Rev C ,2002 ,65(4) : 044003 - 1-044003 - 5.
- [24] Kamimura M. Chapter V. A coupled channel variational method for microscopic study of reactions between complex nuclei [J]. Prog Theo Phys Suppl ,1977 ,62: 236-294.
- [25] Oka M , Yazaki K. Short range part of baryon-baryon interaction in a quark model. I [J]. Prog Theo Phys ,1981 ,66 (2) : 556-571.
- [26] Qi L J , Zhang J H , Shen P N , et al. A study of the nucleon-nucleon spin-orbit force in the quark model [J]. Nucl Phys A , 1995 ,585 (4) : 693-704.

[责任编辑: 顾晓天]