

t 夸克偶素能谱的计算

谢 凤 仙

(中国人民解放军海军工程学院)

1986年6月9日收到

提 要

本文利用考虑胶子质量的重夸克偶素位势

$$V = -\frac{4}{3} \alpha_s \frac{e^{-\mu r}}{r} + (g_v + g_s) r \left(\frac{\mu r}{2} \right)^{1/2} + V_0,$$

计算了 t 夸克偶素的能谱。

一、引 言

胶子的质量问题是粒子物理中比较关心的问题之一。按纯规范场理论,胶子应该是具有零质量的媒介子,夸克通过它相互作用而被禁锢在强子中。可是胶子如果具有非零质量,对禁闭机制,禁闭位势都会有影响^[1]。我们曾经用经典禁闭场论的方法^[2],利用一个特殊的口袋模型导出了计及胶子质量效应的长程位势,用这一位势计算了 J/ψ 家族和 Y 家族的能级。在正反夸克组成的束缚态中,当两夸克间距离拉开足够大,夸克将要以自由夸克的形态存在,即夸克将不禁闭。从位势的观点来看,禁闭位势在足够大的距离处,将不再继续无限增长,而是趋向于一个常数,且胶子质量越大,位势趋向于常数越快。当胶子质量具有 0—0.8 GeV 时,与 J/ψ 家族, Y 家族的能谱实验并不矛盾,且与以前文献所载的计算结果相比,与实验值更接近。说明引进胶子质量的新位势具有合理性。

自从第五种夸克 b 及其反夸克 $\bar{b}$ 组成的介子发现以后,理论上研究指出,轻子与夸克的对称性强烈地暗示,一定有第六种夸克——t 夸克存在。因此,近年来高能物理实验中普遍注视的一个问题是寻找 t 夸克。

莱比锡第二十二届国际高能物理会议上,对欧洲核子研究中心 UA-1 实验组关于发现 t 夸克的事件,进行分析讨论认为: 1) 发现 t 夸克的事件被考虑作衰变

$$\begin{aligned} W^+ &\rightarrow t\bar{b} \\ &\quad \downarrow \\ &\quad e^+(\mu^+)\nu_b; \end{aligned} \quad (1)$$

2) t 夸克的质量被局限于 $30\text{GeV} < m_t < 50\text{GeV}$ 。

为了进一步寻找 t 与 $\bar{t}$ 组成的介子态 topponium, 对 topponium 的能谱进行计算是

必要的.

二、能谱的计算

计算 toponium 采用的中心位势是考虑胶子质量的重夸克偶素位势^[3]

$$V_c = -\frac{4}{3}\alpha_s \frac{e^{-\mu r}}{r} + (g_v + g_s)r \left(\frac{\text{th} \frac{\mu r}{2}}{\frac{\mu r}{2}} \right)^{1/2} + V_0. \quad (2)$$

上式等号右端第一项是由近距离处单胶子交换引起的汤川势,它具有矢量的性质. 第二项是由一定的口袋模型导出的长程位势, g_v 与 g_s 分别表示洛伦兹结构为矢量部分及标量部分.

$t\bar{t}$ 系统的总哈密顿量(至 p^2/m^2 量级)

$$H = H_0 + V_{s1} + V_{sd}, \quad (3)$$

其中 $H_0 = 2m + \frac{P^2}{m} + V_c(r)$ 为非相对论的哈密顿量; V_{s1} 为自旋无关的相对论修正(至 p^2/m^2 量级); V_{sd} 为自旋有关的相对论修正(至 p^2/m^2 量级); m 为 t 夸克质量; μ 为胶子质量; V_{s1} , V_{sd} 的具体形式见文献[3].

通过数值计算解定态薛定谔方程

$$\left[\frac{P^2}{m} + 2m + V_c(r) \right] \phi = E\phi,$$

给出各中心位能级及各能级波函数. 然后用微扰论的方法, 计算出自旋无关的相对论修正 $\langle V_{s1} \rangle$ 及自旋有关的相对论修正 $\langle V_{sd} \rangle$, 即可求得各能级的数值.

本文所采用的参数 μ , α_s , g_v , g_s , V_0 的数值是经优选过的, m 的数值取自第 22 届国际高能物理会上报道的 t 夸克质量范围.

三、结果与讨论

1. 按照中心位势(2)式计算的几组结果列于表 1 至表 3 和表 5 至表 7. 由计算结果表明: 取不同的 μ 值(在 $\mu \leq 0.8\text{GeV}$ 的情况下)时都给出相同的能级次序且数值相差较小.

2. 考虑到胶子质量后, 禁闭位势在足够大的距离处, 将不再无限继续增长, 而采取水平的形式. 对 $\mu = 0.6\text{GeV}$, 当 $r \geq 1.5285\text{fm}$ 时位势采取水平形式, 用这种位势计算的结果列于表 4 和表 8. 由计算结果可以看出: 水平位势对 3S 以下的态影响极小, 而对 4S 态影响较大, 这都与 J/ψ , Υ 家族能级的理论计算一致.

3. 由计算结果还可以看出: 除 1S 态外, 其它各态由相对论修正引起的能级分裂很小. 这是因为整个与自旋有关的相对论修正值与夸克质量 m 的平方成反比. t 夸克质量较大, 因此, 相对论修正引起的能级分裂很小.

表 1 t 夸克偶素能级

(参数: $\mu = 0.2\text{GeV}$, $\alpha_s = 0.22$, $g_v = 0.74\text{GeV/fm}$, $g_s = 0.70\text{GeV/fm}$,
 $m_t = 40.0\text{GeV}$, $V_0 = -1.370\text{GeV}$, 表中数字单位为 MeV)

谱 记 号	$\langle V_c \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle + \langle V_{sd} \rangle$
1^1S_0	77997	77998	77962
1^3S_0	77997	77998	78010
1^3P_0	78675	78672	78660
1^3P_1	78675	78672	78668
1^3P_2	78675	78672	78679
1^1P_1	78675	78672	78670
2^1S_0	78725	78721	78712
2^3S_1	78725	78721	78724
1^3D_1	78917	78915	78913
1^3D_2	78917	78915	78915
1^3D_3	78917	78915	78916
1^1D_2	78917	78915	78915
3^1S_0	79028	79022	79017
3^3S_1	79028	79022	79024
4^1S_0	79246	79240	79235
4^3S_1	79246	79240	79241

表 2 t 夸克偶素能级

(参数: $\mu = 0.4\text{GeV}$, $\alpha_s = 0.20$, $g_v = 0.85\text{GeV/fm}$, $g_s = 0.80\text{GeV/fm}$,
 $m_t = 40.0\text{GeV}$, $V_0 = -1.482\text{GeV}$, 表中数字单位为 MeV)

谱 记 号	$\langle V_c \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle + \langle V_{sd} \rangle$
1^1S_0	77997	77998	77962
1^3S_0	77997	77998	78010
1^3P_0	78675	78672	78660
1^3P_1	78675	78672	78668
1^3P_2	78675	78672	78679
1^1P_1	78675	78672	78670
2^1S_0	78725	78721	78712
2^3S_1	78725	78721	78724
1^3D_1	78917	78915	78913
1^3D_2	78917	78915	78915
1^3D_3	78917	78915	78916
1^1D_2	78917	78915	78915
3^1S_0	79028	79022	79017
3^3S_1	79028	79022	79024
4^1S_0	79246	79240	79235
4^3S_1	79246	79240	79241

表 3 t 夸克偶素能级

(参数: $\mu = 0.6\text{GeV}$, $\alpha_s = 0.19$, $g_v = 1.06\text{GeV/fm}$, $g_s = 0.92\text{GeV/fm}$,
 $m_t = 40.0\text{GeV}$, $V_0 = -1.6146\text{GeV}$, 表中数字单位为 MeV)

谱 记 号	$\langle V_c \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle + \langle V_{sd} \rangle$
1^1S_0	77995	77989	77958
1^3S_0	77995	77989	77999
1^3P_0	78641	78637	78627
1^3P_1	78641	78637	78635
1^3P_2	78641	78637	78641
1^1P_1	78641	78637	78637
2^1S_0	78699	78692	78684
2^3S_1	78699	78692	78695
1^3D_1	78888	78886	78884
1^3D_2	78888	78886	78886
1^3D_3	78888	78886	78887
1^1D_2	78888	78886	78886
3^1S_0	79012	79006	79001
3^3S_1	79012	79006	79008
4^1S_0	79238	79233	79228
4^3S_1	79238	79233	79234

表 4 t 夸克偶素能级(水平位势)

(参数: $\mu = 0.6\text{GeV}$, $\alpha_s = 0.19$, $g_v = 1.06\text{GeV/fm}$, $g_s = 0.92\text{GeV/fm}$,
 $m_t = 40.0\text{GeV}$, $V_0 = -1.6146\text{GeV}$, 表中数字单位为 MeV)

谱 记 号	$\langle V_c \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle + \langle V_{sd} \rangle$
1^1S_0	77995	77989	77958
1^3S_0	77995	77989	77999
1^3P_0	78641	78637	78627
1^3P_1	78641	78637	78635
1^3P_2	78641	78637	78641
1^1P_1	78641	78637	78637
2^1S_0	78699	78693	78685
2^3S_1	78699	78693	78696
1^3D_1	78888	78886	78884
1^3D_2	78888	78886	78886
1^3D_3	78888	78886	78887
1^1D_2	78888	78886	78886
3^1S_0	79012	79006	79000
3^3S_1	79012	79006	79007
4^1S_0	79229	79224	79220
4^3S_1	79229	79224	79225

表 5 t 夸克偶素能级

(参数: $\mu = 0.2\text{GeV}$, $\alpha_s = 0.22$, $g_v = 0.74\text{GeV/fm}$, $g_s = 0.70\text{GeV/fm}$,
 $m_t = 45.0\text{GeV}$, $V_0 = -1.370\text{GeV}$, 表中数字单位为 MeV)

谱 记 号	$\langle V_c \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle + \langle V_{sd} \rangle$
1^1S_0	87785	87787	87734
1^3S_0	87785	87787	87804
1^3P_0	88627	88621	88608
1^3P_1	88627	88621	88618
1^3P_2	88627	88621	88626
1^1P_1	88627	88621	88621
2^1S_0	88666	88650	88639
2^3S_1	88666	88650	88653
1^3D_1	88889	88886	88884
1^3D_2	88889	88886	88886
1^3D_3	88889	88886	88888
1^1D_2	88889	88886	88886
3^1S_0	88981	88974	88967
3^3S_1	88981	88974	88976
4^1S_0	89197	89191	89186
4^3S_1	89197	89191	89192

表 6 t 夸克偶素能级

(参数: $\mu = 0.4\text{GeV}$, $\alpha_s = 1.65$, $g_v = 0.85\text{GeV/fm}$, $g_s = 0.80\text{GeV/fm}$,
 $m_t = 45.0\text{GeV}$, $V_0 = -1.482\text{GeV}$, 表中数字单位为 MeV)

谱 记 号	$\langle V_c \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle + \langle V_{sd} \rangle$
1^1S_0	87900	87899	87860
1^3S_0	87900	87899	87912
1^3P_0	88634	88629	88618
1^3P_1	88634	88629	88626
1^3P_2	88634	88629	88632
1^1P_1	88634	88629	88629
2^1S_0	88679	88671	88662
2^3S_1	88679	88671	88674
1^3D_1	88882	88880	88878
1^3D_2	88882	88880	88879
1^3D_3	88882	88880	88881
1^1D_2	88882	88880	88880
3^1S_0	88985	88980	88974
3^3S_1	88985	88980	88982
4^1S_0	89201	89195	89191
4^3S_1	89201	89195	89197

表 7 t 夸克偶素能级

(参数: $\mu = 0.6\text{GeV}$, $\alpha_s = 0.19$, $g_v = 1.06\text{GeV/fm}$, $g_s = 0.92\text{GeV/fm}$,
 $m_t = 45.0\text{GeV}$, $V_0 = -1.6146\text{GeV}$, 表中数字单位为 MeV)

谱 记 号	$\langle V_c \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle + \langle V_{sd} \rangle$
1^1S_0	87905	87904	87870
1^3S_0	87905	87904	87915
1^3P_0	88600	88596	88586
1^3P_1	88600	88596	88593
1^3P_2	88600	88596	88599
1^1P_1	88600	88596	88595
2^1S_0	88653	88647	88638
2^3S_1	88653	88647	88650
1^3D_1	88851	88849	88847
1^3D_2	88851	88849	88849
1^3D_3	88851	88849	88851
1^1D_2	88851	88849	88849
3^1S_0	88967	88962	88957
3^3S_1	88967	88962	88964
4^1S_0	89192	89186	89182
4^3S_1	89192	89186	89188

表 8 t 夸克偶素能级(水平位势)

(参数: $\mu = 0.6\text{GeV}$, $\alpha_s = 0.19$, $g_v = 1.06\text{GeV/fm}$, $g_s = 0.92\text{GeV/fm}$,
 $m_t = 45.0\text{GeV}$, $V_0 = -1.6146\text{GeV}$, 表中数字单位为 MeV)

谱 记 号	$\langle V_c \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle$	$\langle V_c \rangle + \langle V_{sl} \rangle + \langle V_{sd} \rangle$
1^1S_0	87905	87904	87870
1^3S_0	87905	87904	87915
1^3P_0	88600	88596	88586
1^3P_1	88600	88596	88593
1^3P_2	88600	88596	88599
1^1P_1	88600	88596	88595
2^1S_0	88653	88647	88639
2^3S_1	88653	88647	88650
1^3D_1	88851	88849	88847
1^3D_2	88851	88849	88849
1^3D_3	88851	88849	88851
1^1D_2	88851	88849	88849
3^1S_0	88967	88961	88955
3^3S_1	88967	88961	88963
4^1S_0	89185	89180	89176
4^3S_1	89185	89180	89181

参 考 文 献

- [1] CHAO Kuang-ts, *Commun. in Theor. Phys.*, **3**(1984), 81.
- [2] Ruan Tu-nan, Chen shi and Ho Tso-hsiu, Proceedings of the Guangzhou Conference on Theoretical Particle Physics, (1980), p. 953.
- [3] 林大航、谢凤仙, 物理学报, **33**(1984), 1569.

CALCULATION OF THE SPECTRA FOR TOPPONIU WITH A NONZERO GLUON EFFECTIVE MASS

XIE FENG-XIAN

(Naval Engineering Institute of PLA)

ABSTRACT

In this paper, we calculate the spectra for topponium, using a quarkonium potential with a nonzero gluon effective mass.