پژوهشگاه دانش‌های بنیادی

شماره مقاله : ۸۸

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

تعیین انرژی بستگی پنتاکوارک‌ها از طریق حل دقیق معادله شرودینگر

نادرالاصلی، شیلا؛ منعم زاده، مجید؛ تعظیمی، نرگس

دانشکده فیزیک دانشگاه کاشان

چکیده

در این مقاله معادله شرودینگر غیر نسبتی با درجه آزادی D را برای پنتاکوارکها بدست می آوریم و با استفاده از مختصات ژاکوبی و تعریف فوق شعاع تابع موج و رابطه انرژی بستگی در حالت پایه برای سیستم‌های چند ذره‌ای مانند دوترون و پنتاکوراک‌ها را به دست می‌آوریم. همچنین از میان پتانسیل‌های پیشنهادی، پتانسیل یوکاوا را انتخاب می‌کنیم و به طور همزمان جرم و ثابت جفت شدگی سیستم های ۵ کوارکی را بدست می‌آوریم.

Identification Pentaquark Binding Energy through Exact Solution of Schrodinger Equation

Naderolasli, sh ; Monemzadeh, M ; Tazimi, N

Department of Physics, University of Kashan, Kashan

Abstract

In this paper, we solve the nonrelativistic schrodinger equation with the degree of freedom D for pentaquarks. We also use Jacobian coordinates and define wave function hyper-radius and the binding energy in the ground state for few-body systems such as deutrons and pentaquarks. From the proposed potentials, we choose Yukawa potential and we obtain the mass and coupling constant of penraquark systems simultaneously.

PACS No : ۱۱

مقدمه:

پتانسیل مناسب بین نوکلئون‌ها یکی از پدیده‌های مهم در فیزیک هسته‌ای است. باداشتن پتانسیل مناسب، می‌توان مشخصات نوکلئون‌ها را محاسبه کرد و نتیجه را با داده‌های تجربی مقایسه نمود. در فیزیک هسته‌ای، پتانسیل می‌تواند یکی از سه فرم زیر باشد:

پتانسیل چاه مربعی، پتانسیل گوسین، پتانسیل یوکاوا. این پتانسیل‌ها براساس فاصله نسبی بین پروتون و نوترون هستند و فقط به فاصله بین آنها وابسته است. اگرچه پتانسیل چاه‌مربعی برای بررسی تحلیلی راحتر است ولی برای برهم کنش نوکلئون- نوکلئون از دید فیزیک مورد قبول نیست. و بازه کوتاهی را در بر می‌گیرد و انتظار نمی‌رود نمودار پتانسیل به طور تیز قطع شود. در عرض پتانسیل یوکاوا باورکردنی است، این به دلیل تبادل مزونی که در فرضیه یوکاوا وجود دارد، می‌باشد. بر هم کنش N-N با تبادل مزرون مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای بررسی برهم کنش بین دو نوکلئون ساده‌ترین نوکلئون که همان دوترون است انتخاب می‌شود. موضوع دوترون اطلاعاتی در رابطه با نیروی هسته‌ای بین نوترون و پروتون را به ما می‌دهد. و پتانسیل یوکاوا را در بازه کوتاهی بسط داده‌اند تا به پتانسیل مناسب دست پیدا شود. نهایتاً انرژی بستگی در حالت پایه دوترون را بدست می آوریم[۱]. هم چنین انرژی حالت پایه نوترون و باریون به عنوان سیستم سه ذره‌ای را نیز می‌توان با استفاده

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

از این روش هماهنگ فوق‌کروی محا سبه کرد. باریون‌ها مانند فرمیون‌ها دارای ا سپین نیمه صحیح ه ستند و لازمه کار این ا ست که کوارک‌ها با ا سپین نیمه صحیح توصیف شوند که در منبع [۲] نیروهای کوارک- کوارک وابسته به اسپین باریون ها در طیف جرمی بررسی شده‌اند.

باحل معادله دیراک یا شـرودینگر می توان به توصـیف حرکت نوکلئون‌ها در هسـته پرداخت. با توجه با نتایج آزمایش‌های پراکندگی، انرژی جنبشـی نوکلئون‌ها در داخل هسته حدود 10Mev است بنابراین با اطمینان خاطر می‌توان از مکانیک کوانتوم غیرنسبیتی استفاده کرد.[۳]

بررسی پنتاکوارک در قالب سیستم دو ذره‌ای:

دراین ق سمت ابتدا معادله شرودینگر غیر ن سبیتی با درجه آزادی D را در نظر می‌گیریم و معادله شرودینگر را به طور تحلیلی برای سی ستم های پنتاکوارک (در قالب سیستم دو جسمی مقید متشکل از یک مزون و یک باریون) با استفاده از پتانسیل یوکاوا حل می کنیم و تابع موج این سیستم ها و انرژی را در حالت پایه بدست می‌آوریم، البته می‌توان پنتاکوارک را به عنوان سیستم پنج ذره‌ای در نظر گرفت همان طور که در مورد دوترون می‌توان به عنوان سیستم دو ذره‌ای و نیز به عنوان سیستم شش ذره‌ای بررسی کرد. انرژی بستگی پنتاکوارک در سیستم دو ذره‌ای در حالت پایه را تعیین می کنیم و در نهایت ثابت جفت شدگی پتا سیل یوکاوا را به د ست می آوریم. همچنین با ا ستفاده از نتایج به‌د ست آمده رابطه بین ثابت جفت شدگی منا سب در معادله پتانسل یوکاوا با جرم کاهش یافته سیستم دو ذره‌ای و پنج ذره‌ای پنتاکوارک را معرفی کرده و نتایج عددی آن را نشان می‌دهیم.

فرم کلی معادله شرودینگر در D بعد به این صورت است:

$$\left(\frac{-\hbar^{۲}}{۲\mu}\nabla_D^{۲} + V(x) - E_{n,l}\right)\psi_{n,m,l}(x,\Omega_D) = ۰ \qquad (۱)$$

که عملگر لاپلاسین در مختصات کروی به صورت زیر است:

$$\nabla_D^{۲} = \frac{\partial^{۲}}{\partial x^{۲}} + \frac{D-۱}{x}\frac{\partial}{\partial x} - \frac{l(l+D-۲)}{x^{۲}} \qquad (۲)$$

قسمت شعاعی معادله برای D=3N (تعداد ذرات-۱ =N) به صورت زیر در می‌آید:

$$\left(d^2/dx^2 - 2/x\, d/dx - \frac{l(l+1)}{x^2}\right) R_{n,l}(x) +$$

$$2\bar{\mu}/\hbar^2\,(E - v(x))R_{n,l}(x) = 0 \qquad (3)$$

برای حل این معادله از مختصات ژاکوبی و مرکز جرم استفاده می‌کنیم . همچنین پتانسیلی که در این قسمت استفاده می کنیم پتانسیل یوکاواست:

$$V(r) = -\frac{g^2\exp(-kr)}{r} \qquad (4)$$

که k=138 MeV و g^2 ثابت جفت شدگی پتانسیل یوکاواست.

روشهای مختلفی برای حل معادله ۱ وجود دارد. اما در کار حاضر با پیش بینی یک جواب مناسب برای تابع معادله بالا و یافتن ضرایب آن می توانیم جواب معادله را به دست آوریم. با تغییر متغیر $\emptyset(x) = xR(x)$ رابطه ساده می‌شود:

$$d^2/_{dx^2}\,\emptyset(x) + \left[2\mu\big(E - V(u)\big) - \frac{l(l+1)}{x^2}\right]\emptyset(x) = 0 \quad (5)$$

با در نظر گرفتن پتانسیل یوکاوا و جایگزینی آن در رابطه بالا برای جواب تابع در حالت پایه، جواب پیشنهادی را به صورت زیر در نظر می‌گیریم

$$\emptyset(x) = h(x)e^{g(x)} \quad (6)$$

که:

$$h(x) = 1$$

$$\mathrm{g}(x) = \frac{-1}{2}\alpha x^2 + \beta x + \gamma ln(x) \quad (7)$$

که در آن g(x) چند جمله ای است که با توجه به پتانسیل برهمکنشی سیستم تعیین می شود و h(x) برای حالت پایه در نظر گرفته شده است. با استفاده از این اطلاعات به روابط بازگشتی زیر می‌رسیم

$$\beta\gamma = -\mu g^2$$
$$\alpha^2 = \frac{-\mathrm{k}^3}{6}(2\mu\mathrm{g}^2)$$
$$2\beta\alpha = {k^2}/_2\,(2\mu\mathrm{g}^2)$$
$$-\alpha(2\gamma+1) + \beta^2 = -2\mu E + 2\mu g^2 k \quad (8)$$

که μ همان جرم کاهش یافته سیستم و k همان جرم پایون است. رابطه آخر رابطه انرژی بستگی در حالت پایه است. محاسبات برای دو نوع پنتاکوارک درقالب سیستم دو ذره ای انجام شده است. با استفاده از این روابط انرژی بستگی و ثابت کوپلینگ پتانسیل یوکاوا را بدست آورده ایم که در جدول زیر نشان داده ایم. همچنین بعد از تعیین انرژی با توجه به رابطه زیر جرم سیستم را تعیین کرده ایم:

$$M = \sum m_i + E_b \quad (9)$$

انرژی بستگی و جرم محاسبه شده

پنتاکوارک	g^2	E_b	$Mass$	Mass in Ref[8]
$\theta_\mathrm{b}(\mathrm{uudd\bar{b}})$	0.163	8.22	2973.3	2985±50
$\theta_\mathrm{c}(\mathrm{uudd\bar{c}})$	0.13	6.7	6345.3	6391±50
$\theta_\mathrm{bs}(\mathrm{budd\bar{s}})$	0.16	8.28	3006.7	2950
$\theta_\mathrm{cs}(\mathrm{cudd\bar{s}})$	0.128	25	6514.6	6660

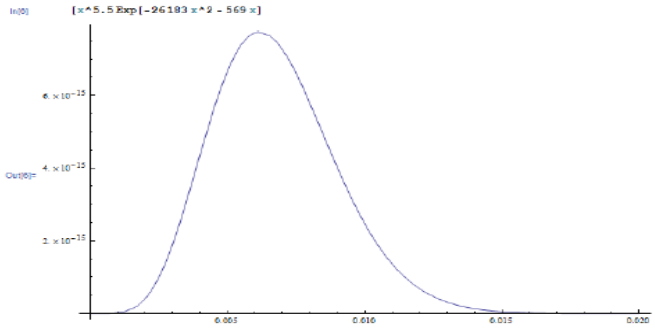
این محاسبات برای دوترون به صورت سیستم دوذره‌ای بررسی شد و انرژی بستگی در حالت پایه برای دوترون حدود $E_b = 2.2MeV$ و ضریب ثابت برای پتانسیل یوکاوا برای دوترون را g^2 =0.05 بدست آوردیم. در جدول زیر نتایج مان را با دیگر نتایج تجربی و تئوری مقایسه کردیم. هم چنین می‌توان دوترون را به صورت سیستم شش‌تایی و همچنین پنتاکوارک را به صورت سیستم پنج‌تایی بررسی کرد و انرژی بستگی در حالت پایه آنها را محاسبه نمود. البته می‌توان اثرات اسپین و ایزواسپین را در این محاسبات در نظر گرفت.

در انتها تابع موج حالت پایه دوترون در قالب سیستم دو ذره‌ای و تابع موج حالت پایه دوترون در قالب سیستم شش ذره‌ای و تابع موج حالت پایه پنتاکوراک را بعنوان سیستم پنج ذره‌ای کرده ایم.

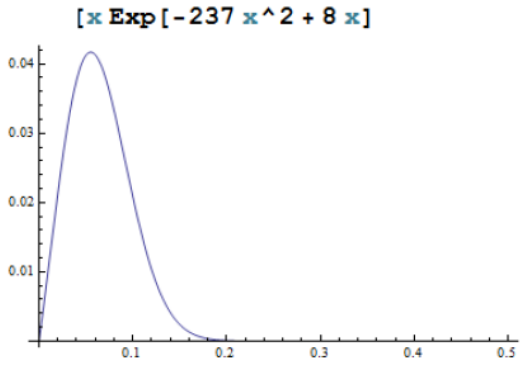
دوترون	(kim et al. ,2010) HQCD[۱]	(kim et al.,2010) MornnB[۱]	نتیجه تجربی Hons,2001[۱]
انرژی حالت پایه	2.3	2.224	2.22

نتیجه:

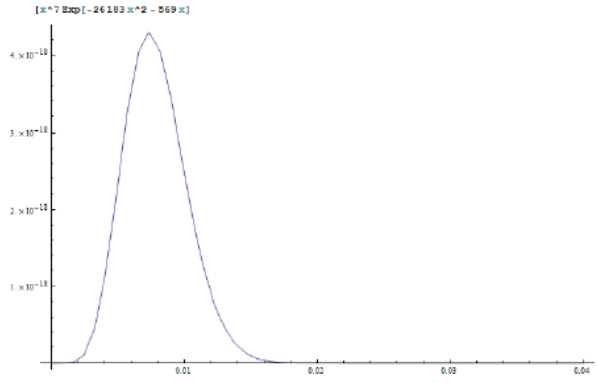
با حل معادله شرودینگر و استفاده از پتانسیل یوکاوا توانستیم انرژی حالت پایه سیستم های چند جسمی از جمله ۵ و ٦ جسمی را حساب کردیم و همچنین ثابت کوپلینگ پتانسیل یوکاوا را بدست آوردیم. در نتیجه میتوان ضرائب مجهول پتانسیل را با استفاده از این روش بدست آورد. همچنین میتوان طیف جرمی سیستم های مورد نظر را برای حالت های مختلف J و S بدست آورد.



تابع موج حالت پایه یکی از پنتاکوارک‌ها در سیستم پنج ذره‌ای



تابع موج حالت پایه دوترون در سیستم دو ذره‌ای



تابع موج حالت پایه دوترون در سیستم شش ذره‌ای

مراجع

[1] A.A. Rajabi., M.M. Shojaei,.T. Karimi, Appl. phys .Rev, vol.3,No.1,(2011).
[2] Nr. Lall, Sp. Verma,Indian journal of Pure & Applied Phys., Vol48,951 (2010)

[3] ح. فیضی، ع.رجبی ع، م. شجاعی ، مقاله‌نامه کنفرانس فیزیک ایران (۱۳۹۰)

[4]. R. L. Jaffe, Phys. Rept. **409**, 1 (2005) [Nucl. Phys. Proc. Suppl **142**, 343 (2005)].

[5] Y.Amaguchi et al. ,Few- body System (2012)؛

[6] Sm.Gevosgufa.Vi. KoehKin ., ArXiv: 1407.270V2[hep-ph] (2014)
[7] S.cho ,et.al [EXHFC collabratian]arxir: 1011.0852V2(2011)
[8]M. Karliner ,H.J. Lipkin, Phys.Lett.B**575**:249-255,2003