مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۴، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۳

یادداشت پژوهشی

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران

توصیف برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای هسته‌ای در چارچوب نظریهٔ تغییر شکل کوانتومی

الهه یعقوبی‌پور

گروه فیزیک، دانشکدهٔ علوم، دانشگاه اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۹/۱۲ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۳/۲/۲۷)

چکیده

یک تحقیق فرمیونی فشردهٔ جبر همتافت $sp(۴)$، خود چارچوبی طبیعی برای مطالعهٔ همبستگی‌های تزویج برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای در هسته‌ها است. در اینجا، از مفهوم تغییر شکل کوانتومی برای توصیف همبستگی‌های تزویج در هسته‌های اتمی استفاده می‌کنیم. در حالی‌که، حد تغییر شکل نیافتهٔ نظریه، توصیف همه‌جانبه‌ای از ویژگی‌های خاص هسته‌ای و اثرهای ساختار ریز را فراهم می‌کند، نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل q نقش مهمی در درک اثرهای مرتبهٔ بالاتر در برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای ایفاء می‌کند.

واژه‌های کلیدی: نظریهٔ تغییر شکل کوانتومی، برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای، جبرهای کوانتومی و تزویج نوکلئونی

۱. مقدمه

کاربردهای موفقیت‌آمیز الگوهای جبری در مکانیک کوانتومی مسیر نوینی به سوی درک ماهیت فیزیکی سامانه‌های بس‌ذره‌ای گشوده است. علاوه بر آزمون‌های کاملاً ریاضی، مطالعات اخیر شامل کاربردهای این نظریه، در عرصه‌های مختلف فیزیک همچون اپتیک کوانتومی [۱ و ۲]، مکانیک آماری [۳] و فیزیک هسته‌ای [۴، ۵، ۶] است. از دیدگاه ریاضی، برای نگاشت اعداد یا عملگرها x به همتاهای تغییر شکل یافته‌شان، از یک پارامتر تغییر شکل q استفاده می‌کنیم. در واقع عبارت $[X]_p = \frac{q^{pX} - q^{-pX}}{q^p - q^{-p}}$ را داریم. $[X]_p$ برحسب x غیرخطی است. همچنین تحت تبدیل $q \to q^{-۱}$ ناوردا است. یکی از ویژگی‌های جبرهای کوانتومی آن است که در حد $q \to ۱$ نتایج تغییر شکل نیافته بازیابی می‌شوند. در این حد $[X]_p \to X$ را داریم. این ویژگی همانند ویژگی بازیابی مکانیک کلاسیک در حد $\hbar \to ۰$ مکانیک کوانتومی است.

اولین کاربردهای جبر کوانتومی در ساختار هسته‌ای مربوط به‌کاربرد $SU_q(۲)$ در توصیف نوارهای چرخشی هسته‌های تغییر شکل یافتهٔ محوری [۷] و تزویج شبه ذره [۸ و ۹] است. برهم‌کنش‌های دو جسمی مؤثر در هسته‌ها از جملات تزویج و چهار قطبی اثر می‌پذیرند. برهم‌کنش تزویج مسئول تشکیل زوج است و باعث ایجاد گاف تزویج در بیناب‌های هسته‌ای می‌شود. جملهٔ چهار قطبی، گذارهای چهار قطبی الکتریکی را در نوارهای چرخشی جمعی بهبود می‌بخشند. عملاً در چارچوب

الگوی پوسته‌ای نوسانگر هماهنگ، هر دو حد ساختار جبری مشخصی دارند. در این طرح، بیناب‌ها یک تقارن دینامیکی از خود نشان می‌دهند. در حد تزویج، به‌منظور طبقه‌بندی بیناب‌ها از عدد کوانتومی ارشدیت [۱۰ و ۱۱] استفاده می‌شود. از سوی دیگر، در حد چهار قطبی $Sp(۴,R)$ همتافت بر دینامیک تعیین شکل [۱۲] حاکم است.

مسئلهٔ تزویج که ابتدا در فیزیک اتمی مطرح شد، در فیزیک هسته‌ای به‌منظور کوششی برای توصیف انرژی‌های بستگی هسته‌ها و بیناب ارتعاشی حالت‌های برانگیختهٔ پایین به‌کار برده شد. همچنین این مسئله، در پدیده‌های اخترفیزیک نیز مورد توجه قرار گرفته است. این احیاء توجه به مسئلهٔ تزویج، از پیشرفت اخیر وسایل پرتو رادیو اکتیو و کوشش‌ها برای متصل کردن ملاحظات ساختار هسته‌ای با پدیده‌های اختر فیزیک به‌وجود آمده است.

در فیزیک هسته‌ای، یک الگوی میکروسکوپیک دو جسمی با تقارن $sp(۴)$ به ما اجازه می‌دهد که روی همبستگی‌های تزویج هم‌بردارنوترون – پروتون و شبه ذره متمرکز شویم. علاوه بر این می‌توانیم برهم‌کنش‌های هم‌نرده‌ای pn را به حساب آوریم. ویژگی‌های هسته‌ای درون این چارچوب [۱۳ و ۱۴] به خوبی توصیف می‌شوند. برچسب‌های طرح $sp(۴)$، درک پایه‌ای از نظم‌های کلی را به‌دست می‌دهد. آنچه در اینجا، ارائه می‌شود گسترشی از نظریه‌ای است که شامل انحراف‌های وضعی از جواب‌های تزویج از طریق تغییر شکل q جبر $sp(۴)$ است. گسترش کوانتومی $sp(۴)$ الگوسازی تحلیلی مجموعه‌ای از برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای را ممکن می‌سازد. به‌طور کلی پرداختن به برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای بسیار پیچیده است. این مقاله بدین شکل سازمان‌دهی شده است، در بخش اول نسخهٔ کوانتومی جبر $sp(۴)$ را برحسب عملگرهای فرمیونی معرفی می‌کنیم. سپس در بخش دوم الگوی تزویج غیرخطی را معرفی می‌کنیم. در بخش سوم با استفاده از هم‌ارزی برهم‌کنش و تغییر شکل [۱۵] به بررسی ویژگی‌های نوینی از برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای می‌پردازیم که تنها به مدد استفاده از نظریهٔ تغییر شکل کوانتومی امکان‌پذیر هستند. سرانجام در انتها، ماهیت فیزیکی پارامتر تغییر شکل را تحلیل می‌کنیم.

۲. جبر همتافت $sp_q(۴)$

جبرهای همتافت برای توصیف سامانه‌های بس‌ذره‌ای به‌کار می‌روند. هنگامی‌که تعداد ذرات یا جفت‌شدگی بین ذرات به شیوه‌ای زوج‌وار از یک پیکربندی به دیگری تغییر می‌کند، صورت‌های فشردهٔ جبرهای $sp(۲n)$ و غیر فشردهٔ $Sp(۲n,R)$ به‌طور طبیعی پدیدار می‌شوند. در این میان جبرهای تغییر شکل یافته، درجهٔ آزادی جدیدی را معرفی می‌کنند که می‌تواند بیان بهتری از اثرهای غیرخطی را ارائه کنند. مطالعهٔ این جبرها به درک عمیق‌تری از مفهوم فیزیک تغییر شکل منتهی می‌شود. در بخش اول این مقاله، نسخهٔ تغییر شکل یافتهٔ کوانتومی جبر همتافت $sp(۴)$ فشرده که با جبر لی چرخش‌های پنج بعدی $so(۵)$ همریخت است [۱۶ و ۱۷]، را در نظر می‌گیریم. کاربردهای $sp(۴)$ به تعابیر متفاوت تعداد کوانتوم‌های فرمیونی مورد استفاده برای ساختن مولدهای گروه $sp(۴)$ مرتبط است. این جبر به‌ویژه برای بررسی همبستگی‌های تزویج در هسته‌ها به‌کار می‌رود.

از عملگرهای آفرینش و نابودی فرمیونی تغییر شکل یافتهٔ q یعنی $\hat{\alpha}^{\dagger}_{m,\sigma}$ و $\alpha_{m,\sigma}$ برای ساختن مولدهای جبر $sp_q(۴)$ استفاده می‌کنیم. این عملگرها نوکلئونی با ایزواسپین σ و مؤلفهٔ سوم ایزواسپین m را خلق یا نابود می‌کنند. عملگرهای آفرینش و نابودی فرمیونی تغییر شکل یافته از روابط پادجابه‌جایی تغییر شکل یافتهٔ [۱۸]

$$\left\{\hat{\alpha}_{j,m,\sigma},\hat{\alpha}^{\dagger}_{k,n,\tau}\right\}_{q^{\pm\delta_{\sigma,\tau}}} = q^{\pm\frac{N_{\tau\sigma}}{۲\Omega}}\delta_{j,k}\delta_{m,n}\delta_{\sigma,\tau}. \qquad (۱)$$

تبعیت می‌کنند. مولدهای بالابرنده و پایین‌آورنده را بدین صورت تعریف می‌کنیم [۱۸]:

$$\hat{F}_{\sigma,\sigma'} = \xi_{\sigma,\sigma'}\sum_{m=-j}^{j}(-۱)^{j-m}\hat{\alpha}^{\dagger}_{m,\sigma}\alpha^{\dagger}_{-m,\sigma'}, \qquad (۲)$$

$$\hat{G}_{\sigma,\sigma'} = \xi_{\sigma,\sigma'}\sum_{m=-j}^{j}(-۱)^{j-m}\alpha_{-m,\sigma}\alpha_{m,\sigma'}, \qquad (۳)$$

و

$$\hat{T}_+ \equiv \hat{E}_{1,-1} = \eta \sum_{m=-j}^{j} \hat{\alpha}^{\dagger}_{m,1}\alpha_{m,-1},$$
$$\hat{T}_- \equiv \hat{E}_{1,-1} = \eta \sum_{m=-j}^{j} \hat{\alpha}^{\dagger}_{m,-1}\alpha_{m,1}. \quad (۴)$$

در روابط بالا داریم:

$$\xi_{\sigma,\sigma'} = \frac{\eta}{\sqrt{1+\delta_{\sigma,\sigma'}}}, \quad \eta = \frac{1}{\sqrt{2\Omega_j}}. \quad (۵)$$

همچنین عملگر تصویر ایزواسپین و عملگر تعداد کل نوکلئون‌ها را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\hat{T}_0 = \frac{1}{2}\left(\hat{N}_{+1} - \hat{N}_{-1}\right), \quad \hat{N} = \hat{N}_{+1} + \hat{N}_{-1}. \quad (۶)$$

لازم به‌ذکر است که این دو عملگر بدون تغییر شکل باقی می‌مانند.

۳. الگوی تزویج غیرخطی

کلی‌ترین صورتبندی هامیلتونی یک سامانه با تقارن دینامیکی $sp_q(4)$ که تعداد کل ذرات را پایسته می‌گذارد، بدین صورت نوشته می‌شود [۱۳]:

$$\hat{H}_q = -\varepsilon^{-q}\hat{N} - G_q\hat{F}_0\hat{G}_0 - F_q\left(\hat{F}_{+1}\hat{G}_{+1} + \hat{F}_{-1}\hat{G}_{-1}\right) - \frac{1}{2}E_q\left(\left\{\hat{T}_+, \hat{T}_-\right\} - \left[\frac{\hat{N}}{2\Omega}\right]\right) - C_q 2\Omega\left[\frac{1}{\Omega}\right]\left(\left[\hat{K}_0\right]^2_{\frac{1}{2\Omega}} - [\Omega]^2_{\frac{1}{2\Omega}}\right) - D_q\Omega\left[\frac{1}{\Omega}\right]\left[\hat{T}_0\right]^2_{\frac{1}{2\Omega}}. \quad (۷)$$

در هامیلتونی بالا

$$\varepsilon^q = \varepsilon^{-q} + \left(\frac{1}{2} - 2\Omega\right)C_q + \frac{D_q}{4} > 0. \quad (۸)$$

به‌عنوان تراز فرمی سامانهٔ هسته‌ای در نظر گرفته می‌شود. $\hat{K}_0$ به $\hat{N}$ مربوط است. پارامترهای $\gamma_q = \{G_q, F_q, E_q, C_q, D_q\}$ پارامترهای ثابت شدت برهم‌کنش هستند. الگوی ما، رفتار نوترون‌ها و پروتون‌های ظرفیت واقع در یک میدان میانگین یک مغزی هسته‌ای دو بار جادویی را توصیف می‌کند. حالت‌های پایه که با تعداد pn و زوج‌های شبه ذره مشخص می‌شوند، از کنش عملگر آفرینش روی حالت خلا به‌دست می‌آیند.

هامیلتونی تغییر شکل نیافتهٔ $\hat{H}$ که $\hat{H}_q \xrightarrow{q\to 1} \hat{H}$، برهم‌کنش دو جسمی مؤثری است که شامل تزویج هم‌بردار پارامتر (G) و همچنین جملهٔ تقارن (E) است. جملات مزبور با جملهٔ $\hat{N}^2$، به‌طور طبیعی از یک برهم‌کنش میکروسکوپیک ناوردای ایزواسپین و برهم‌کنش چرخشی دو جسمی ناشی می‌شوند. جملات E و C مسئول برهم‌کنش هم‌بردار pn هستند. جملات مزبور در پایه‌های ایزواسپین قطری هستند. این برهم‌کنش‌ها، پایین‌ترین حالت‌های مانستهٔ ایزوباری 0^+ هسته‌های با جرم سبک و میانی با عدد جرمی زوج $100 \le A \le 40$، را تعیین می‌کنند. هسته‌های مذکور دارای پروتون‌ها و نوترون‌هایی هستند که پوستهٔ اصلی یکسانی را اشغال می‌کنند. در اینجا، حد صفر ارشدیت تقریباً معتبر است [۱۳، ۱۴، ۱۹]. برای این حالت‌ها، الگوی تغییر شکل نیافته، توصیف همه جانبهٔ منطقی برای ۱۳۶ هستهٔ موجود را فراهم می‌کند [۱۳]. این واقعیت، شامل بازآفرینی چشمگیر انرژی حالت‌ها و جزئیات ساختارشان است. جزئیات مذکور، بازتابی از نقش‌های بی‌نظمی و ناوش، $N_{+1} = N_{-1}$ مشاهده شده است. به‌عنوان یک نتیجه، هر انحراف درون هسته از رفتار کلی مرجع، به اثرهای موضعی نسبت داده می‌شود. اثرهای مزبور، گرچه به‌طور نوعی کوچک هستند، اما برای تعیین جزئیات ساختار هسته‌های انفرادی مهم هستند و بدین ترتیب باید به حساب آورده شوند [۲۰، ۲۱، ۲۲].

به‌عنوان یک رهیافت نظریهٔ گروه، گسترش کوانتومی $\hat{H}$ شامل برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای در یک روش بسیار دقیق است؛ در حالی‌که سادگی جواب دقیق باقی می‌ماند. به هر حال، الگوی کوانتومی نه تنها تقارن دینامیکی $sp_q(4) \supset su_q(2)$ را دارد، بلکه شامل تقارن دینامیکی اصلی $sp(4)$ است.

۴. ویژگی‌های نوین برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای با استفاده از رهیافت نظریهٔ تغییر شکل کوانتومی

از چشم‌انداز تغییر شکل نیافته، تغییر شکل مرتبهٔ بالاتری از جملات بس‌ذره‌ای را در نظریه‌ای که فقط با برهم‌کنش‌های تک جسمی و دو جسمی آغاز می‌شود، معرفی می‌کند. راهی که در آن

اثرهای مرتبهٔ بالاتر در نظریه وارد می‌شوند، توسط تغییر شکل $[X]$ تعیین می‌شود [۱۵]. برحسب χ هر کمیتی از طریق

$$[X]=\frac{sinh(\chi X)}{sinh(\chi)}$$
$$=X\left(1+\chi^{2}\frac{X^{2}-1}{6}+\chi^{4}\frac{3X^{4}-10X^{2}+7}{360}+\ldots\right)\xrightarrow{\chi\to 0} .$$
(۹)

با تغییر شکل ارتباط دارد. پنجمین جملهٔ موجود در هامیلتونی (۸) را بدین صورت بازنویسی می‌کنیم [۲۳]:

$$-C_q 2\Omega\left[\frac{1}{\Omega}\right]\left[\frac{\hat{N}}{2}\right]_{\frac{1}{2\Omega}}-\left[\frac{\hat{N}}{2}-2\Omega\right]_{\frac{1}{2\Omega}} \qquad (10)$$

این جمله را برحسب χ بسط می‌دهیم:

$$-C_q 2\Omega\left[\frac{1}{2\Omega}\right]\left[\frac{N}{2}\right]_{1/2\Omega}\left[\frac{N}{2}-2\Omega\right]_{1/2\Omega}=-2C_q\frac{N}{2}\left(\frac{N}{2}-2\Omega\right)$$
$$-\frac{C_q\chi^{2}\left\{\left(16\Omega^{2}-24\Omega+5\right)\left(V^{(1)}+V^{(2)}\right)\right.}{96\Omega^{2}}$$
$$\left.+\frac{6V^{2}+(6-8\Omega)V^{(3)}+V^{(4)}\right\}}{96\Omega^{2}}-\ldots,$$
(۱۱)

در رابطهٔ بالا داریم:

$$V^{(1)}=\sum_{\nu_1}C^{\dagger}_{\nu_1}C_{\nu_1},\quad V^{(2)}=\sum_{\nu_1\nu_2}C^{\dagger}_{\nu_1}C^{\dagger}_{\nu_2}C_{\nu_1}C_{\nu_2},$$
$$V^{(3)}=\sum_{\nu_1\nu_2\nu_3}C^{\dagger}_{\nu_1}C^{\dagger}_{\nu_2}C^{\dagger}_{\nu_3}C_{\nu_1}C_{\nu_2}C_{\nu_3}, \qquad (12)$$
$$V^{(4)}=\sum_{\nu_1\nu_2\nu_3\nu_4}C^{\dagger}_{\nu_1}C^{\dagger}_{\nu_2}C^{\dagger}_{\nu_3}C^{\dagger}_{\nu_4}C_{\nu_1}C_{\nu_2}C_{\nu_3}C_{\nu_4}.$$

تقریب مرتبهٔ صفرم با نیروی دو جسمی تغییر شکل نیافته متناظر است. برای شدت $C_q=C$ این جمله بر همتای تغییر شکل نیافته‌اش منطبق است. جملات مرتبهٔ بالاتر، برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای را معرفی می‌کنند. این برهم‌کنش‌ها، قابل چشم‌پوشی نیستند. برای نمونه نتایج نشان می‌دهد [۱۸] که سهم انرژی برهم‌کنش چهار جسمی در عبارت بالا در هسته‌های واقع در پوستهٔ $1f_{\frac{5}{2}}2p_{\frac{1}{2}}2p_{\frac{3}{2}}1g_{\frac{9}{2}}$ می‌تواند به چندین مگاالکترون ولت برسد.

به‌طور مشابه، اگر فقط شدت پارامترهای تغییر شکل یافته با شدت پارامترهای تغییر شکل نیافته مساوی باشند، جملهٔ مرتبهٔ صفرم $\hat{H}_q$ رابطهٔ (۷) به برهم‌کنش تغییر شکل نیافتهٔ $\hat{H}$ منطبق است. وقتی که تغییر شکل معرفی می‌شود، این جمله باید بدون تغییر باقی بماند. زیرا نشان داده شده است که $\hat{H}$ به‌طور منطقی رفتار مشترک کلی همهٔ هسته‌های واقع در یک پوسته را به‌خوبی بازآفرینی می‌کند. این خود دلیلی است بر اینکه چرا ما مقادیر پارامترهای شدت برهم‌کنش را ثابت نگه می‌داریم و اجازه می‌دهیم که فقط χ تغییر کند.

جفت‌شدگی تغییر شکل از پارامترهای شدت برهم‌کنش تغییر شکل نیافته که برای مشخص کردن برهم‌کنش دوجسمی به‌کار می‌روند، خود بدین معنا است که مورد آخر می‌تواند به بهترین برازش مقادیر جهانی برای الگوی مورد ملاحظه، بدون مقایسهٔ کیفیت کلی نظریه منصوب شود. این امر، این واقعیت را مورد تأکید قرار می‌دهد که تغییر شکل ویژگی اساسی متفاوتی را ارائه می‌دهد. یک ویژگی که نمی‌تواند با مجاز دانستن شدت‌های برهم‌کنش تغییر شکل نیافته برای جذب اثر خودش، نمونهٔ هم‌اندازه‌ای باشد.

به‌طور خلاصه، تغییر شکل q، به نظریه، یک همبستگی میدان میانگین همراه با برهم‌کنش‌های دو جسمی، سه جسمی، چند جسمی، یک ویژگی میدان موضعی را اضافه می‌کند که به‌خوبی رفتار هسته‌ای را توصیف می‌کند. تغییر شکل می‌تواند مسئول اثر تک ذرهٔ باقی مانده و اثرهای بس‌ذره‌ای باشد.

۵. تحلیل نقش پارامتر تغییر شکل

چون پارامتر q با پدیده‌های موضعی همراه است، انتظار می‌رود که پارامتر مزبور از یک هسته به هسته‌ای دیگر تغییر کند. امکان وجود اثرهای موضعی که روی ویژگی‌های کلی حالت‌های 0^{+} مورد ملاحظه ساخته می‌شوند، درون یک هستهٔ انفرادی با انحراف انرژی تغییر شکل نیافتهٔ پیش‌بینی شده یعنی $\langle H\rangle$ از مقدار تجربی $E_{\exp}$ می‌تواند تأیید شود. اساساً، جواب معادلهٔ $\langle H_q\rangle=E_{\exp}$ تخمین هموراری برای χ فراهم می‌کند. به هر حال، در هسته‌هایی که $\langle H_q\rangle\geq E_{\exp}$ است، هیچ جوابی

وجود ندارد و نزدیک‌ترین پیش‌بینی نظری به تجربه در نقطهٔ تغییر شکل نیافتهٔ $\chi=0$ اتفاق می‌افتد.

تحلیل، مقادیر پارامتر تغییر شکل $|\chi|$ را برای هر هسته‌ای که روی منحنی هموار قرار می‌گیرد، به‌دست می‌دهد. رفتار هموار مشاهده شده برای χ، وابستگی تابعی پارامتر مزبور به اعداد کوانتومی الگو را آشکار می‌سازد. این نتیجه، حتی اگر به‌طور کیفی، این واقعیت را مورد تأکید قرار دهد که تغییر شکل q در حالی‌که توسط الگوی $sp_q(4)$ تجویز می‌شود، در ویژگی تصادفی نیست اما به بیان دقیق‌تر اساساً به برهم‌کنش هسته‌ای مربوط است.

در واقع، این امر به ما اجازه می‌دهد که یک وابستگی تابعی پارامترسازی شده‌ای برای پارامتر تغییر شکل به تعداد کل ذرات N و تصویر ایزواسپین قائل شویم. این امر، پیشرفت پیچیدهٔ اثرهای غیرخطی ملاحظه شده در [۲۳] را منعکس می‌کند.

به‌عنوان گام بعد، ما برای برازش کمینهٔ ویژه مقدارهای هامیلتونی (۷) به انرژی‌های تجربی متناظر هسته‌های زوج – زوج در پوسته‌های $1f_{7/2}$ و $1f_{5/2}2p_{1/2}2p_{3/2}1g_{9/2}$ از تابع تغییر شکل

$$\chi(N,T_0)=\xi_1\left(\frac{N}{2\Omega}-1\right)\left(\frac{N}{2\Omega}+\xi_2-2\theta(N-2\Omega)\right)\times e^{-0.5\left(\frac{2T_0}{\xi_3}\right)^2}+\xi_4\theta(N-2\Omega)|T_0|\sqrt{\frac{N}{2\Omega}-1}, \quad (13)$$

$$\theta(x)=\begin{cases}1, & x\geq 0\\ 0, & x\leq 0.\end{cases}$$

استفاده می‌کنیم. برای انجام این امر، هر پارامتر تغییر شکل یافتهٔ q بازبهنجار شده را، به‌خاطر امکان تأثیر سایر اثرهای موضعی که در الگو وجود ندارند، کمینه می‌کنیم. در فرایند برازش، فقط چهار پارامتر $\xi_{1,2,3,4}$ معادلهٔ (۱۳) معتبر هستند. پارامترهای مزبور که به‌طور آماری تعیین شده‌اند، تخمینی برای مفهوم تغییر شکل q درون یک پوسته فراهم می‌آورند.

نتایج $q\neq 1$، به‌طور یکنواختی به همتاهای تغییر شکل نیافته‌شان ارجحیت دارند. برای مثال، در پوستهٔ $1f_{5/2}2p_{1/2}2p_{3/2}1g_{9/2}$، الگوی تغییر شکل یافتهٔ q، مقادیر $SOS_q=130/21\left(\mathrm{MeV}^2\right),\left(\chi_q=1/28\mathrm{MeV}\right)$ به‌وضوح مقادیر نظریهٔ تغییر شکل نیافته $SOS=271/63\left(\mathrm{MeV}^2\right),\left(\chi=1/79\mathrm{MeV}\right)$ را بهبود می‌بخشد. مقادیر بهینهٔ به‌دست آمده برای $\xi_{1,2,3,4}$ عبارتند از:

$$\xi_1=-2/13,\quad \xi_2=0/37,\quad \xi_3=3/07,\quad \xi_4=0/15. \quad (14)$$

رفتار تغییر شکل q، همان‌گونه که توسط معادلهٔ (۱۳) تجویز می‌شود، در هر دو ناحیهٔ مورد ملاحظه یعنی پوسته‌های $1f_{7/2}$ و $1f_{5/2}2p_{1/2}2p_{3/2}1g_{9/2}$، با گرایش کلی مقادیر بالاتر وسط پوسته، جایی که افزایش تعداد ذره به اثرهای غیرخطی قوی‌تر منتهی می‌شود، سازگار است. در حالت کلی، الگوی موضعی q پیش‌بینی انرژی مقایسه شده با الگوی کلی تغییر شکل نیافته را بهبود می‌بخشد و انرژی‌هایی که بیشتر به تجربه نزدیک هستند را بازآفرینی می‌کند. یک دلیل، ممکن است آن باشد که فرمیون‌های تغییر شکل یافتهٔ q بر خلاف شبه ذرات معمول عملاً از قوانین پایه تبعیت می‌کنند.

ماهیت بس‌ذره‌ای برهم‌کنش دور از وسط پوسته، مهم‌تر است و برای بسیاری از هسته‌های زوج – زوج به ازای مقادیر معنادار q، زمانی‌که $N_+=N_-$ است و همبستگی‌های تزویج قوی مورد انتظار است، به قله می‌رسد. مقادیر پارامتر تغییر شکل $q\approx 1$ ممکن است در هسته‌هایی که فقط یک یا دو زوج حفره یا ذره از یک پوستهٔ بسته دارند، یافت شود. برای این هسته‌ها، تعداد کل ذرات برای نمونه‌سازی اثر جملات مرتبهٔ بالاتر در یک برهم‌کنش تغییر شکل یافته، کافی نیست و حد تغییر شکل نیافته، توصیف خوبی را ارائه می‌دهد.

اطراف وسط پوسته یعنی ناحیهٔ $N\approx 2\Omega$، تغییر شکل، نظریهٔ $\chi=0$ را بهبود می‌بخشد. این امر، پیشنهاد می‌کند که برای این هسته‌ها، برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای، همان‌گونه که توسط $\chi(N,T_0)$ معادلهٔ (۱۳) تجویز می‌شود، قابل چشم‌پوشی هستند و الگو، برای توصیف سایر انواع اثرهای موضعی که ممکن است وجود داشته باشند کافی نیست. این نتایج، دلالت می‌کنند که حتی اگر پارامتر q، برای همهٔ هسته‌ها آزادی اضافی بدهد، الگو را فقط اطراف ناحیه‌هایی بهبود می‌بخشد که

همبستگی‌های تزویج غالب هستند. به‌طور خلاصه، تشکیل زوج به برهم‌کنش‌های مرتبهٔ بالاتر غیر قابل چشم‌پوشی بین زوج تشکیل شده، که از طریق الگوی $sp_q(۴)$ قابل آشکارسازی است، شباهت دارد.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

مورد تغییر شکل یافتهٔ q، بهترین نتایج را در همه‌جا ارائه می‌دهد. رهیافت تقارن دینامیکی $sp(۴)$ یک جواب دقیق تغییر شکل یافتهٔ q به‌دست می‌دهد و ما را قادر می‌سازد که عناصر ماتریسی تغییر شکل یافتهٔ q برهم‌کنش را به شکل تحلیلی ساده به‌دست آوریم. علاوه بر شکستن تقارن‌های الگوی تغییر شکل نیافته، تغییر شکل q تقارن بین پروتون‌ها و نوترون‌ها را می‌شکند؛ که این مقدار برای هسته‌های سبک کوچک و با تجربه سازگار است. معرفی q، زمانی‌که q از یک افزایش می‌یابد، به کاهش گاف تزویج شبه‌ذره برای نوترون‌ها و افزایش آن برای پروتون‌ها می‌شود. این مشاهده، پیشنهاد می‌کند که در حالی‌که تغییر شکل نمی‌تواند روی برهم‌کنش دوجسمی اثر بگذارد، برهم‌کنش‌های مرتبهٔ بالاتر بین ذرات را معرفی می‌کند؛ که در اغلب الگوهای تغییر شکل نیافته از این اثرها چشم‌پوشی می‌شود. تغییر شکل q، وابسته به جرم و بعد پوسته است و اثرهای آن در ناحیهٔ جرم میانی بیشتر معنی دارد. در مطالعهٔ کنونی، پارامتر q به اندازهٔ ۱/۲۴۰ (یک ممیز دویست و چهل) یافت شد و انتظار می‌رود که اگر اثر آن روی همهٔ هسته‌های در یک پوستهٔ اصلی میانگین‌گیری نشود، مقدار پارامتر بیشتر باشد. این پیشنهاد می‌کند که نیازمند تحقیق مفصل‌تری روی نقش تغییر شکل q در هسته‌های انفرادی و رابطهٔ پارامتر q و ساختار هسته‌ای زیربنایی هستیم. در انتها، مفهوم تغییر شکل کوانتومی به رفتار هموار پدیده‌ها در فیزیک هسته‌ای مرتبط می‌شود.

گسترش غیرخطی تغییر شکل یافتهٔ q الگوی $sp(۴)$، که بر تقارن برای توصیف همبستگی‌های تزویج هم‌بردار و برهم‌کنش‌های هم‌نرده‌ای pn در هسته‌های اتمی تأکید می‌کند، مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. زمانی‌که با داده‌های تجربی مقایسه شد، نظریه، وابستگی تابعی هموار پارامتر تغییر شکل q را به تعداد نوترون‌ها و پروتون‌ها نشان داد. علاوه بر این، نتایج به‌طور یکنواختی به حد تغییر شکل نیافته‌شان ارجحیت دارند. نتیجه، پیشنهاد می‌کند که تغییر شکل، مفهوم فیزیکی دارد که به برهم‌کنش‌های هسته‌ای خیلی طبیعی و ماورای آنچه که می‌تواند به‌طور ساده توسط پیچش پارامترهای برهم‌کنش دو جسمی به‌دست آید، مرتبط است. ویژگی مشخصهٔ ساختار هسته‌ای که از طریق استفادهٔ موضعی q می‌تواند تحقیق شود، وجود و اهمیت برهم‌کنش‌های بس‌ذره‌ای همراه با همبستگی‌های تزویج غالب در هسته‌ها را آشکار می‌کند. این امر، علاوه بر این، یک توصیف خوب از ویژگی‌های کلی دینامیک هسته‌ای است که توسط برهم‌کنش دو جسمی تغییر شکل نیافته فراهم شد. اگر چه اکنون مفهوم فیزیکی تغییر شکل q، درون چارچوب نظریهٔ $sp(۴)$ پیشنهاد شد، به‌وضوح از الگو مستقل است و در بسیاری از پدیده‌های بس‌ذره‌ای گوناگون می‌تواند آشکار شود. همچنین این نتایج، به لزوم مطالعات بیشتر برای به‌دست آوردن درک جامع‌تری از تغییر شکل q در فیزیک هسته‌ای تأکید می‌کند.

قدردانی

نویسندهٔ مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از آقایان دکتر رسول رکنی‌زاده و دکتر حمیدرضا فلاح اعلام می‌دارد.

مراجع

1. Z Haghshenasfard, M H Naderi, and M Soltanokotabi, *J. Phys.* B: *Atom. Molec.* **41** (2008) 14.
2. A Mahdifar, W Vogel, Th Richter, R Roknizadeh, and M H Naderi, *Phys. Rev.* A **78** (2008) 63814.
3. A Lavagno and P Narayana Swamy, *Phys. Rev.* E **65**, 3 (2002) 036101.
4. Dennis Bonatsos, B A Kotsos, P P Raychev, and P A Terziev, *Phys. Rev.* C **66**, 5 (2002) 054306.
5. A Ballesteros, O Civitarese, F J Herranz, and M Reboiro, *Phys. Rev.* C **66**, 6 (2002) 064317.
6. O Civitarse, A Ballesteros, and M Reborio, *Phys. Rev.* C **68** (2003) 044307.
7. P P Raychev, R P Roussev, and Yu F Smirnov, *J.*

16. T Hayashi, *Commun. Math. Phys.* **127**, 1 (1990) 129.
15. A M Scarfone and P N Swamy, *J. Phys.* A: *Math. Theor.* **41** (2008) 275211.
14. K D Sviratcheva, A I Georgieva, and J P Draayer, *Phys. Rev.* C **69** (2004) 024313.
13. K D Sviratcheva, J P Draayer, and A I Georgieva, *J. Phys.* G: *Nucl. Part. Phys.* **29** (2003) 1281.
12. G Rosensteel and D J Rowe, *Phys. Rev. Lett.* **38**, 1 (1977) 10.
11. B H Flowers, *Proc. R. Soc.* A **212** (1952) 248.
10. G Racah, *Phys. Rev.* **63** (1943) 367.
9. D Bonatsos, *J. Phys.* A: *Math. Gen.* **25**, 3 (1992) 101.
8. S Shelly Sharma, *Phys. Rev.* C **46**, 3 (1992) 904.
7. *Phys.* G: *Nucl. Part. Phys.* **16** L (1990) 137.
17. B Abdesselam, D Arnaudon, and A Chakrabarti, *J. Phys.* A: *Math. Gen.* **28**, 13 (1995) 3701.
18. K D Sviratcheva, A I Georgieva, V G Gueorguiev, J P Draayer, and M I Ivanov, *J. Phys.* A: *Math. Gen.* **34**, 40 (2001) 8365.
19. J Engel, K Langanke, and P Vogel, *Phys. Lett.* B **389**, 2 (1996) 211.
20. P Navaratil and B R Barrett, *Phys. Rev.* C **59** (1999) 1906.
21. P Navaratil and W E Ormand, *Phys. Rev.* C **68** (2003) 034305.
22. F Pan, V G Gueorguiev, and J P Draayer, *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 112503.
23. K D Sviratcheva, C Bahri, A I Georgieva, and J P Draayer, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 152501.