مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۲، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۱

یادداشت پژوهشی

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران

بررسی چگالی ترازهای انرژی هسته‌های اگزوتیک

مهدی نصری نصرآبادی و محمد سپیانی

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

پست الکترونیکی: mnnasrabadi@ast.ui.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۲/۲۳ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۰/۸/۱۴)

چکیده

چگالی ترازهای انرژی هسته‌ای یکی از ویژگی‌های مختص هر هسته می‌باشد که اهمیت و کاربرد آن، شامل طیف وسیعی از حوزه‌ها از اخترفیزیک تا پزشکی هسته‌ای است. با توجه به اینکه تلاش‌های آزمایشگاهی و نظری بسیار کمی برای مطالعه بر روی هسته‌های دور از خط پایداری صورت گرفته است، بررسی چگالی ترازهای انرژی این هسته‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین از آنجایی که چگالی ترازهای هسته‌ای یک ورودی تعیین کننده در کدهای واکنش هسته‌ای می‌باشد، بررسی روش‌های معتبر برای محاسبه این کمیت ضروری است. در این تحقیق ضمن معرفی روش‌ها و مدل‌های محاسبه چگالی تراز برای کاربردهای عملی، ما از روش توزیع طیفی دقیق (SPDM) برای تعیین چگالی ترازهای انرژی دو هستهٔ اگزوتیک غنی از نوترون و غنی از پروتون با عدد جرمی یکسان استفاده کردیم.

واژه‌های کلیدی: چگالی ترازهای انرژی هسته‌ای، هسته‌های اگزوتیک، کدهای واکنش هسته‌ای، ساختار هسته‌ای

۱. مقدمه

چگالی تراز هسته‌ای کمیتی اساسی در بررسی آماری هسته به عنوان یک سیستم بس ذره‌ای است به‌طوری‌که تمام کمیت‌های ترمودینامیکی هسته از آن استخراج می‌شوند. به علاوه چگالی تراز هسته‌ای یک کمیت تعیین کننده در آنالیز آماری واکنش‌های هسته‌ای می‌باشد و نقش مهمی در محاسبه سطح مقطع واکنش‌هایی مانند تشکیل هسته مرکب و واکنش‌های پیش تعادلی و همچنین محاسبه سرعت واپاشی گامای هسته‌های شدیداً برانگیخته ایفا می‌کند و به دلیل اهمیت آن، از اولین روزهای فیزیک هسته‌ای بسیار مورد توجه بوده است. به علاوه این کمیت در توصیف و مطالعه ساختار هسته‌های دور از خط پایداری کاربرد دارد. اولین بار، بت در سال ۱۹۳۶، چگالی تراز هسته‌ای را بر اساس مدل گاز فرمی و با رهیافتی آماری محاسبه نمود و رابطهٔ تحلیلی ساده‌ای برای آن ارائه کرد [۱].

در استخراج رابطهٔ بت از یک مدل ذرهٔ مستقل همراه با تقریب‌ها و ساده‌سازی‌هایی استفاده شده است که باعث می‌شود انطباق قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی نداشته باشد و بنابراین نیاز به مدل‌ها و روش‌های واقع بینانه تر احساس می‌شود. پس از آن تلاش‌های بسیاری، چه به صورت آزمایشگاهی و چه به صورت تئوری، در این زمینه صورت گرفت که با وارد کردن اثراتی چون برهم کنش‌های باقی مانده، اثرات پوسته‌ای، اثرات جفت شدگی و اثرات تغییر شکل، منجر به ارائهٔ مدل‌هایی مانند مدل دما – ثابت (CTM)، مدل ابرشارهٔ تعمیم یافته پدیده شناختی (GSFM) و مدل گاز فرمی جابجا شده (BSFG) گردید [۲، ۳ و ۴].

علاوه بر روش‌های پدیده شناختی و نیمه تجربی، روش‌های

Archive of SID

www.SID.ir

مونت کارلوی ترکیبی و مونت کارلو مدل پوسته‌ای SMMC و مدل‌های میکروسکوپیک آماری HFM و ترکیبی COM و روش‌های بازگشتی و روش‌های توزیع طیفی SPDM و مدل ابر شارهٔ میکروسکوپی نیز مطرح شدند که بر اساس خواص میکروسکوپی هسته مانند ترازهای تک ذره‌ای، چگالی تراز را محاسبه می‌کنند [۵، ۶ و ۷].

همچنان که گفته شد چگالی تراز یک کمیت ورودی تعیین کننده در کدهای واکنش هسته‌ای است. این کدها از مدل‌های آماری مانند مدل Hauser - Feshbach، برای پیش بینی واکنش‌ها استفاده می‌کنند [۸]. محاسبات انجام شده توسط این کدها برای پیش بینی نتایج واکنش‌ها در بسیاری از حوزه‌ها کاربرد دارند که به عنوان مثال عبارت‌اند از: انجام محاسبات برای بهینه‌سازی تولید رادیو داروها، انجام محاسبات مربوط به طراحی شتابدهنده‌های باری‌که رادیواکتیو، سنتز هسته‌ای و راکتورهای شکافت و همجوشی.

بنابراین در این کار از مدل‌های چگالی تراز هسته‌ای به‌کار رفته در کدهای Talys و Empire برای انجام محاسبات و مقایسهٔ نتایج و تعیین اثر به‌کارگیری مدل‌های مختلف چگالی تراز هسته‌ای برروی این نتایج استفاده می‌کنیم. این مدل‌ها و روش‌ها، بیشتر برای هسته‌های نزدیک به خط پایداری و برای انرژی‌های پایین به‌کار رفته اند و برای هسته‌های غیر متعارف و یا در انرژی‌های بالا بررسی‌های بسیار کمی صورت گرفته است. این هسته‌ها که دارای نسبت‌های بسیار زیاد یا بسیار کم N/Z می‌باشند در طبیعت یافت نمی‌شوند و فقط در آزمایش‌های یون سنگین یا در انرژی‌های بالا دیده می‌شوند. این هسته‌ها در فرآیندهای سریعی که در انفجارهای کیهانی ابر نواخترها رخ می‌دهند ایجاد می‌شوند و می‌توانند قبل از واپاشی، دوباره هدف واکنش‌های گیراندازی و یا همجوشی بعدی قرار بگیرند. شار بسیار زیاد نوترونی و پروتونی و دماهای بسیار بالا در ابر نواخترها امکان شکل‌گیری چنین فرایندهایی را فراهم می‌آورد به‌طوری که فرصت کافی برای واپاشی هستهٔ اگزوتیک و ناپایدار میانی وجود ندارد. بسیاری از عناصر سنگین جدول تناوبی از طریق چنین فرایندهایی به‌وجود آمده‌اند به‌طوری که امکان تولید آنها از طریق سایر فرایندها وجود ندارد. سپس با انفجار این ابرنواخترها که در پایان عمر برخی از ستاره‌های سنگین ایجاد می‌شوند این عناصر به فضا ریخته می‌شوند.

در چنین فرآیندهایی بیشترین عدم قطعیت، مربوط به چگالی ترازهای انرژی هسته‌های اگزوتیک میانی است. چگالی ترازهای انرژی این هسته‌ها علاوه بر اینکه نقش تعیین کننده‌ای در محاسبات سطح مقطع‌ها و سرعت واکنش‌های هسته‌ای دارند، احتمال واپاشی به کانال‌های مختلف و فراوانی عناصر پس از این انفجارها را نیز تعیین می‌کنند و همچنین امکان استفاده از مدل‌های آماری واکنش‌های هسته‌ای نیز به این کمیت بستگی دارد. اما در واقع مشخص نیست که تا چه اندازه مدل‌ها و روش‌های مختلف محاسبهٔ چگالی تراز هسته‌ای می‌توانند در این شرایط معتبر باشند. لذا بررسی نظری این هسته‌ها با استفاده از مدل‌های دقیق ضرورت دارد و از آنجایی که از این مدل‌ها و روش‌ها در کدهای مختلف واکنش و تبخیر هسته‌ای برای شبیه‌سازی فرایندهای مختلف استفاده می‌شود سعی داریم که این مدل‌ها را به‌طور معتبر به این شرایط تعمیم دهیم. با مقایسهٔ نتایج حاصل از مدل‌های مختلف با مدل‌های میکروسکوپی واقع بینانه‌تر و روش‌های عددی می‌توان اعتبار سنجی لازم را انجام داد و یا حتی می‌توان پارامترهای تجربی آنها را در مقایسهٔ با نتایج این مدل‌های واقع بینانه تنظیم نمود، زیرا داده‌های آزمایشگاهی کمی بدین منظور وجود دارد. در بخش بعدی مدل‌ها و روش‌های نظری، که تاکنون برای کاربردهای عملی به‌کار برده می‌شدند را به اختصار توضیح می‌دهیم. در بخش‌های دیگر از آنها در جهت انجام محاسبات چگالی تراز استفاده و نتایج به‌دست آمده را آنالیز می‌کنیم.

۲. نظریهٔ چگالی تراز هسته‌ای

می‌دانیم که هسته یک سیستم کوانتومی پیچیده است که به منظور مطالعهٔ ساختار و خواص آنها باید تمام برکنش‌ها را در غالب یک هامیلتونین سیستم مشخص کرد و با حل مسئلهٔ بس ذره‌ای، ساختار ترازهای هسته‌ای را پیش بینی و توصیف کنیم. برای یک سیستم به اندازهٔ کافی کوچک می‌توانیم معادلات را

Archive of SID

www.SID.ir

حل کنیم و ترازهای انرژی را مشخص کنیم اما برای هسته‌های با عدد جرمی بزرگ، به ویژه در انرژی‌های بالا، حل دقیق امکان پذیر نیست. بنابراین یا باید از طریق مدل‌های هسته‌ای ساده تر به محاسبه چگالی تراز بپردازیم و یا اینکه از روش‌های میکروسکوپی آماری، ترکیبی و توزیع طیفی و روش‌های عددی استفاده کنیم که به دلیل مبنای فیزیکی واقع بینانه تر به ویژه برای هسته‌های دور از خط پایداری و در انرژی بالا، به نتایج بهتری،منجر می‌شوند. در ادامه چند مدلی را که بیشتر در کدهای واکنش و کدهای چگالی تراز به‌کار گرفته می‌شوند و برای کاربردهای عملی اعتبار کافی دارند بررسی می‌کنیم.

۲. ۱. مدل گاز فرمی (FGM)

با در نظر گرفتن هسته به عنوان گاز فرمیونی غیر برهم‌کنشی و با استفاده از روش تابع پارش و به‌کارگیری تقریب نقطه زینی به رابطهٔ معروف بت برای چگالی حالت می‌رسیم:

$$\omega_{FG}(E_x)=\frac{\sqrt{\pi}}{۱۲}\frac{\exp\left(۲\sqrt{aE_x}\right)}{a^{۱/۴}E_x^{۵/۴}}\quad , \qquad (۱)$$

اما برای بحساب آوردن برهم کنش‌های باقی مانده یا از مدل فرمیونهای برهم‌کنشی $FG-BCS$ استفاده می‌شود، که در آن برهم کنش جفت شدگی با روش BCS وارد می‌شود، و یا از رابطهٔ نیمه تجربی گاز فرمی جابه‌جا شده $BSFG$ با دو پارامترهای قابل تنظیم برای انطباق با داده‌های آزمایشگاهی استفاده می‌کنیم :

$$\rho_{BSFG}(E_x)=\frac{\sqrt{\pi}}{۱۲\sqrt{۲\pi\sigma}}\frac{\exp\left[۲\sqrt{a\left(E_x-\Delta\right)}\right]}{a^{۱/۴}\left(E_x-\Delta\right)^{۵/۴}}\quad , \qquad (۲)$$

که در آن پارامتر چگالی تراز هسته‌ای a و پارامتر گاف برهم‌کنش جفت شدگی Δ ، قابل تنظیم با داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند.

۲. ۲. مدل گیلبرت-کامرون (GCM or CTM)

در این مدل تا یک انرژی انطباق E_m از قانون تجربی دما - ثابت استفاده می‌شود:

$$\rho_T(E_x)=\frac{۱}{T}\exp\left[\frac{E_x-E_.}{T}\right], \qquad (۳)$$

و از آن به بعد رابطهٔ گاز فرمی بت با در نظر گرفتن اثر زوج - فرد به کارگرفته می‌شود. در این مدل نیز چهار پارامتر قابل تنظیم با داده‌های آزمایشگاهی وجود دارد.

۲. ۳. مدل ابرشارهٔ تعمیم یافته پدیده شناختی (GSFM)

در این مدل، از حالت ابرشارگی در انرژی پایین که در آن همبستگی جفت شدگی به شدت چگالی تراز را متأثر می‌کند، به ناحیه انرژی بالا که با مدل گاز فرمی توصیف می‌شود، یک گذار فاز داریم. با استفاده از روش آماری تابع پارش به رابطهٔ عمومی زیر برای چگالی حالت می‌رسیم:

$$\omega(E_x)=\frac{\exp(S(E_x))}{(۲\pi)^{۳/۲}\sqrt{D(E_x)}}\ . \qquad (۴)$$

با محاسبه آنتروپی S و دترمینان D و پارامتر قطع اسپین با استفاده از معادلهٔ حالت ابرشاره، داریم :

$$\phi=\tanh\left(\frac{T_c}{T}\phi\right), \qquad (۵)$$

که در آن T_c دمای بحرانی است و ϕ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi=۱-\frac{U}{U_c}\ , \qquad (۶)$$

$$S=S_c\frac{Tc}{T}(۱-\phi^۲), \qquad (۷)$$

$$D=D_c(۱-\phi^۲)(۱+\phi^۲)^۲. \qquad (۸)$$

در تمام مدل‌های پدیده شناختی می‌توان از رابطهٔ عمومی زیر برای پارامتر چگالی تراز وابسته به انرژی استفاده کرد:

$$a(E_x)=\tilde{a}\left(۱+\delta W\frac{۱-\exp\left[-\gamma U\right]}{U}\right), \qquad (۹)$$

همچنین می‌توان اثرات تجمعی را با استفاده از عوامل افزاینده چرخشی و ارتعاشی پدیده شناختی وارد کرد.

۲. ۴. مدل میکروسکوپی آماری (HFM)

در این روش محاسبات آماری با استفاده از پیش بینی‌های هارتری- فوک - BCS برای خواص ساختار حالت پایه، انجام می‌شود و با به‌حساب آوردن ساختار گسسته طیف تک ذره‌ای مرتبط با پتانسیل‌های واقع بینانه چگالی تراز هسته‌ای برای طیف وسیعی از هسته‌ها و انرژی‌ها محاسبه می‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir

در این مدل میکروسکوپی با استفاده از روش تابع پارش به رابطهٔ عمومی (۴) می‌رسیم. برای محاسبه آنتروپی و پارمتر قطع اسپین و دترمینان D از ترازهای تک ذره‌ای $HF-BCS$ استفاده می‌کنیم:

$$S(T)=2\sum_{q=n,p}\sum_{k}\ln\left[1+\exp(-E_q^k/T)\right]+\frac{E_q^k/T}{1+\exp\left(-E_q^k/T\right)}, \quad (10)$$

که در آن E_q^k انرژی شبه ذره‌ای است:

$$E_q^k=\sqrt{(\varepsilon_q^k-\lambda_q)^2+\Delta_q^2}, \quad (11)$$

که در آن ε_q^k ترازهای تک ذره‌ای هستند و Δ_q پارامتر گاف برهم کنش جفت شدگی است. با این روابط پارامتر قطع اسپین و چگالی تراز برای هسته‌های کروی و تغییرشکل یافته به صورت زیر خواهد بود:

$$\rho_{sph}(U,J)=\frac{2J+1}{2\sqrt{2\pi}\sigma^3}\exp\left[-J(J+1)/(2\sigma^2)\right]\omega(U) \quad (12)$$

$$\rho_{def}(U,J)=\frac{1}{2}\sum_{K=-J}^{J}\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}\exp\left[-J(J+1)/(2\sigma^2)+K^2\left(\frac{1}{\sigma^2}-\frac{1}{\sigma_\perp^2}\right)\right]\omega(U), \quad (13)$$

$$\sigma^2(T)=\frac{1}{2}\sum_{q=n,p}\sum_{k}\omega_q^{k^2}\sec h^2\left(\frac{E_q^k}{2T}\right). \quad (14)$$

مدل‌های آماری میکروسکوپی برای هسته‌های با عدد جرمی بزرگ و در انرژی‌های بالاتر معتبر می‌باشند. بنابراین برای هسته‌های اگزوتیک بیشتر بر این مدل‌ها تاکید می‌کنیم.

۲. ۵. مدل میکروسکوپی ترکیبی (COM)

روش ترکیبی، نگرشی است که در آن به یافتن تعداد راه‌های ممکن برای توزیع نوکلئون‌ها در ترازهای تک ذره‌ای در دسترس برای یک انرژی معین می‌پردازد. مدل میکروسکوپی شامل محاسبهٔ مفصل چگالی حالت ذاتی و فاکتورهای افزایندهٔ چرخشی و ارتعاشی تجمعی می‌شود که از طرح ترازهای تک ذره‌ای که در چارچوب Skyrme - Hartree - Fock - Bogoliubov تعیین می‌شوند، استفاده می‌کند. همچنین، گاه از روش‌های مونت کارلو برای کاهش زمان محاسباتی در شمارش پیکربندی‌های ممکن استفاده می‌شود. این مدل‌های میکروسکوپی نیز در صورت وجود داده‌های آزمایشگاهی با دو پارامتر زیر قابل تنظیم هستند:

$$\rho(E_x,J,\pi)=\exp\left[c\sqrt{E_x-\delta}\right]\rho_{HFM}\left(E_x-\delta,J,\pi\right) \quad (13)$$

۳. روش‌های میکروسکوپی دقیق

همان‌طور که در ابتدای این بخش گفته شد، برای تعیین دقیق چگالی تراز هسته‌ای می‌بایست مسئلهٔ بس ذره‌ای به‌طور کامل حل شود، برای این کار از روش فرمول‌سازی ماتریسی و کدهای کامپیوتری مختلفی (مانند NuShell, REDSTICK, ANTOINE, OXBASH) استفاده می‌شود که با انجام قطری‌سازی ماتریس هامیلتونین سیستم، ویژه مقادیر آن را تعیین نموده و چگالی تراز هسته‌ای را محاسبه می‌کنند. اما همانطور که گفته شد این کار تنها برای هسته‌های بسیار سبک (سیستم‌های به اندازهٔ کافی کوچک) و انرژی‌های پایین امکان پذیر است، بنابراین روش‌های دیگری باید ایجاد شوند که بتوانند تمام برهم‌کنش‌ها را در محاسباتشان وارد کنند و نیازی به انجام قطری‌سازی نداشته باشند. به تازگی روش‌های جدیدی بر مبنای محاسبهٔ گشتاورهای توزیع ترازهای هسته‌ای با استفاده از روش توزیع طیفی (طیف سنجی آماری) مطرح گردیده است که در ادامه آن را به اختصار بیان می‌کنیم.

۴. روش توزیع طیفی (طیف سنجی آماری) (SPDM)

روش توزیع طیفی که توسط فرنچ مطرح گردید[۷] در فیزیک هسته‌ای کاربردهای فراوانی دارد و به علت وارد کردن تمام برهم‌کنش‌های دو-جسمی، یک ابزار قدرتمندی در محاسبهٔ خواص سیستم‌های بس ذره‌ای است. این روش بر پایهٔ محاسبهٔ گشتاورهای مرتبهٔ پایین انرژی $(\mathrm{tr}\,H^n, n=1,2,3 \text{ and } 4)$ و استفاده از آنها برای محاسبهٔ توزیع ترازهای انرژی هسته‌ای قرار دارد. به این ترتیب که توزیع یک کمیت به‌طور مستقیم و بدون حل کامل مسئلهٔ بس ذره‌ای از گشتاورهای مرتبه پایینِ توزیع به دست می‌آید. بنابراین نیاز به انجام قطری‌سازی ماتریس هامیلتونی ندارد. برای یک فضای مدل متناهی، این توزیع گرایش به یک شکل گاؤسی دارد (قضیهٔ حد مرکزی در آمار). گشتاور اول توزیع (سنتروئید)، میانهٔ توزیع را نشان می‌دهد و گشتاور دوم با

Archive of SID

www.SID.ir

پهنای توزیع در ارتباط است و گشتاور سوم، عدم تقارن توزیع را نشان می‌دهد. این گشتاورها با استفاده از روش‌های مختلفی محاسبه می‌شوند و با تعیین یک مجموعه از المان‌های ماتریسی برهم‌کنش یک یا دو جسمی به سهولت می‌توان رابطه‌های تحلیلی سرراستی را برای محاسبهٔ چهار تا شش گشتاور اول به‌دست آورد و یا آنها را به صورت عددی تعیین کرد [۹–۱۵]. همچنین در فضاهای بزرگ برای کاهش زمان محاسباتی، فضای مدل را به زیرفضاهایی افراز می‌کنیم و در نتیجه بجای محاسبهٔ تعداد زیادی از گشتاورها روی کل فضا، تنها گشتاورهای مرتبهٔ پایین روی این زیرفضاها محاسبه می‌شوند. سپس گشتاورهای کل از مجموع این گشتاورهای پیکربندی حاصل می‌شوند. معمولاً برای تعیین برای مقادیر چشمداشتی این گشتاورها از نظریهٔ انتشارگر[۱] استفاده می‌شود که گشتاورهای یک سیستم m نوکلئونی را به صورت چندجمله‌ای‌هایی بیان می‌کند [۲۰]. محاسبهٔ گشتاورهای بالاتر بسیار مشکل است و اطلاعات مفصل‌تر و اضافی در مورد توزیع به ما می‌دهد. بنابراین در اکثر روش‌های توزیع طیفی تنها از گشتاورهای مرتبهٔ پایین استفاده می‌شود.

در این روش، ابتدا یک توزیع ساختگی اولیه تعیین می‌شود، سپس این توزیع با استفاده از ورودی‌هایی مانند ترازهای تک ذره‌ای (ناشی از یک پتانسیل مؤثر) تنظیم می‌شوند. این توزیع میزان شده نزدیکترین توصیف برای توزیع واقعی را نشان می‌دهد. ما در این محاسبات از توزیع دو جمله‌ای ساختگی زاکر بجای توزیع گاؤسی استفاده می‌کنیم [۱۴]:

$$(1-\lambda)^N = \sum_{k=1}^{N} \lambda^k \binom{N}{k}, \qquad (14)$$

و آن را با یک توزیع پیوسته تقریب می‌زنیم:

$$\rho(E_x) = \lambda^{E_x/\varepsilon} \frac{\Gamma(E_{\max}/\varepsilon+1)}{\Gamma(E_x/\varepsilon+1)\Gamma\left((E_{\max}-E_x)/\varepsilon+1\right)}. \qquad (15)$$

گشتاورهای پایین این توزیع نیز با استفاده از روابط نسبتاً ساده‌ای تعیین می‌شوند [۱۵].

از آنجایی که این روش یک روش طیف سنجی آماری است، در هسته‌های سنگین پس از انرژی‌های تحریکی ۱–۲ MeV و در هسته‌های سبک پس از انرژی‌های تحریکی ۴–۶ MeV، که تعداد ترازهای انرژی به اندازهٔ کافی زیاد می‌شوند، اعتبار و دقت قابل قبولی برای محاسبات دارد. در این روش، می‌توان توزیع یک کمیت در زیرفضاها را به‌طور مستقیم از گشتاورهای مرتبهٔ پایین نسبت به انرژی، آیزواسپین، تکانهٔ زاویه‌ای و غیره، بدون نیاز به حل کامل مسئلهٔ ویژه مقداری تعیین نمود و بدین ترتیب چگالی تراز هسته‌ای وابسته به اسپین، پاریته و آیزواسپین را به دست آورد.

۵. بررسی هسته‌های اگزوتیک

از روش‌هایی که در بخش قبل به بررسی آنها پرداختیم، برای بررسی هسته‌های اگزوتیک غنی از نوترون ^{80}Fe و غنی از پروتون ^{140}Dy و ^{80}Zr استفاده می‌کنیم. همانطور که در بخش‌های قبل به آن اشاره شد، برای این هسته‌ها داده‌های آزمایشگاهی موجود نمی‌باشند، بنابراین مدل‌های میکروسکوپی و روش توزیع طیفی دقیق، که اساس فیزیکی بهتری دارند و برای هسته‌های نزدیک به خط پایداری به‌طور قابل قبولی با داده‌های آزمایشگاهی منطبق می‌شوند، را می‌توان مبنای کار قرار داد و سایر مدل‌ها را با آنها مقایسه کرد.

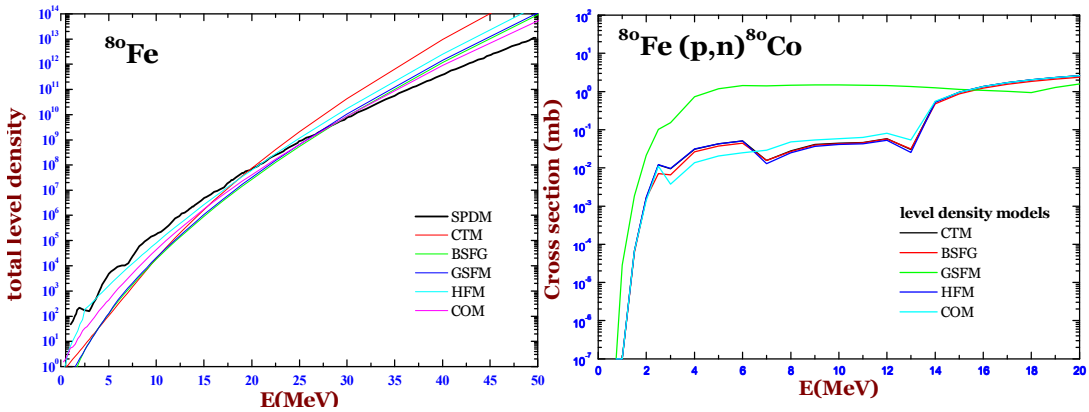
اما از آنجایی که در کدهای واکنش و تبخیر هسته‌ای از مدل‌های پدیده شناختی و میکروسکوپی مختلف بجای روش‌های دقیق استفاده می‌شود، لازم است که این مدل‌ها که فقط برای هسته‌های پایدار از آنها استفاده می‌شود، را به هسته‌های اگزوتیک تعمیم دهیم، تا بتوانیم از این کدها برای محاسبات اخترفیزیک و شتابدهنده‌های باریکهٔ رادیواکتیو و سایر حوزه‌هایی که این هسته‌ها در آن وارد می‌شوند، استفاده کنیم.

به عنوان مثال و برای نشان دادن تاثیر استفاده از مدل‌های مختلف بر روی سطح مقطع واکنش‌هایی که در کدهای واکنش هسته‌ای شبیه‌سازی می‌شوند، دو واکنش فرضی، که این هسته‌های اگزوتیک در آن وارد می‌شوند را بررسی کرده‌ایم که نتایج آن در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. در این نتایج، از مدل‌های مختلف چگالی تراز موجود در کدهای واکنش Talys [۱۸] و Empire استفاده شده است [۱۹] و چگالی ترازهای

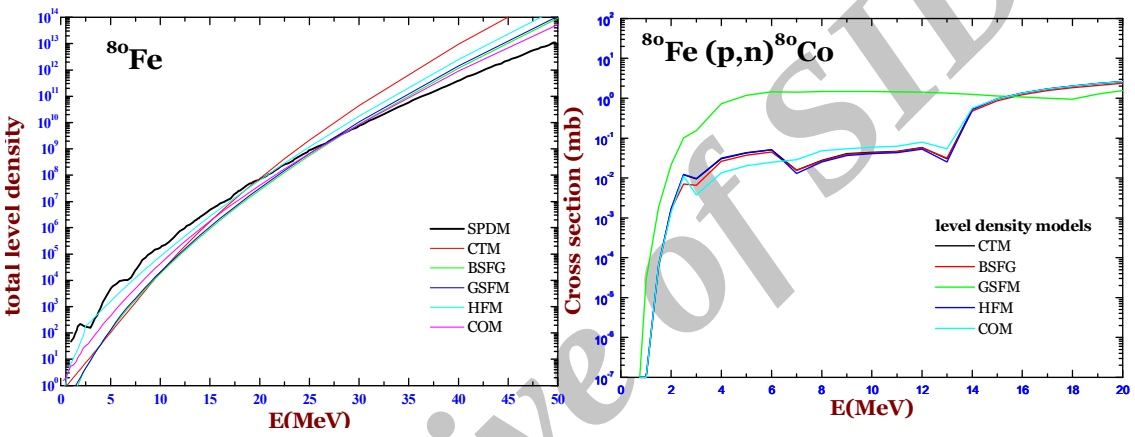
۱. Propagator theorem

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. سمت چپ: مقایسهٔ نتایج مدل‌های مختلف پدیده شناختی و میکروسکوپی. سمت راست: اثر به‌کارگیری این مدل‌ها در نتایج واکنش‌های هسته‌ای برای هستهٔ اگزوتیک ^{80}Fe.



شکل ۲. سمت چپ: مقایسهٔ نتایج مدل‌های مختلف پدیده شناختی و میکروسکوپی. سمت راست: اثر به‌کارگیری این مدل‌ها در نتایج واکنش‌های هسته‌ای برای هستهٔ اگزوتیک ^{140}Dy.

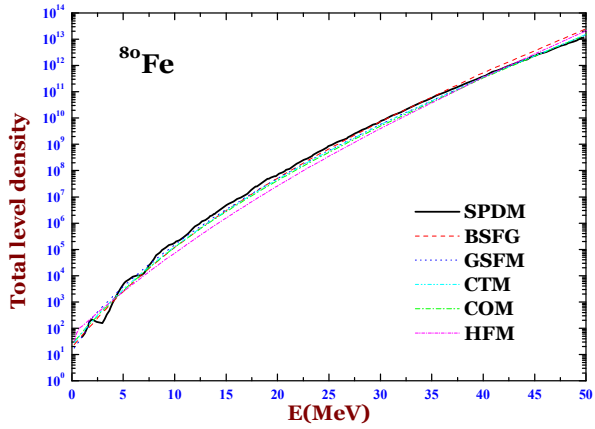
حاصل از این مدل‌ها نیز با هم مقایسه می‌شوند.

در تمام مدل‌های پدیده شناختی کدهای واکنش از رابطهٔ عمومی (۹) برای پارامتر چگالی تراز وابسته به انرژی (دربردارندهٔ اثر پوسته‌ای و عامل میرایی آن) استفاده می‌شود. در شکل‌های ۱ و ۲ به‌وضوح تاثیر استفاده از مدل‌های مختلف چگالی تراز بر روی نتایج واکنش‌هایی که این هسته‌های اگزوتیک را درگیر می‌کنند، مشخص می‌شود و اهمیت و لزوم استفاده از تنظیم معتبر پارامترهای قابل تنظیمی که امکان آن در این کدهای واکنش در نظر گرفته شده است، مشخص می‌شود.

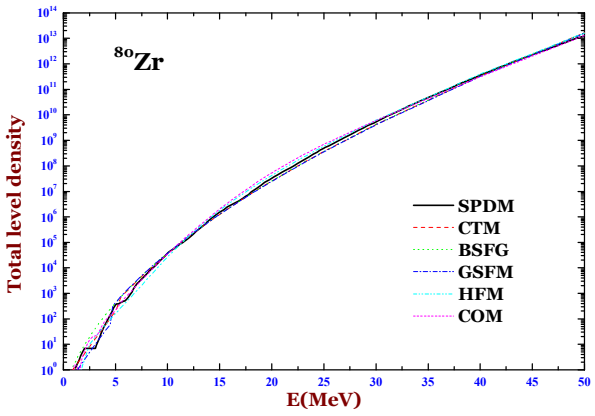
اما همان‌طور که گفته شد، اعتبار این مدل‌ها تنها برای هسته‌های پایدار، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی در دسترس اثبات شده است و پارامترهای آنها فقط با این داده‌ها تنظیم گردیده است. چنانچه بخواهیم از آنها برای هسته‌های اگزوتیک استفاده کنیم باید روشی بیابیم که این مدل‌ها را به‌طور معتبر به این شرایط تعمیم دهیم و اعتبار هر یک را نشان دهیم. برای این کار از نتایج روش توزیع طیفی دقیق استفاده می‌کنیم و با تنظیم پارامترهای قابل تنظیم مدل‌ها مختلف چگالی تراز در کدهای واکنش هسته‌ای، انطباق آنها را با این نتایج ارزیابی می‌کنیم. از این طریق سعی می‌کنیم که به‌طور معتبر این مدل‌ها را به مورد هسته‌های اگزوتیک تعمیم دهیم. این بررسی را برای دو هستهٔ اگزوتیک با عدد جرمی یکسان $A = 80$ در دو طرف درهٔ پایداری یعنی هستهٔ اگزوتیک غنی از نوترون ^{80}Fe و غنی

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۳. انطباق قابل قبول مدل‌های پدیده‌شناختی به‌وسیلهٔ تنظیم پارامترهای آنها با مدل‌های میکروسکوپی و توزیع طیفی دقیق برای هستهٔ اگزوتیک غنی از نوترون ^{80}Fe.



شکل ۴.انطباق قابل قبول مدل‌های پدیده‌شناختی به وسیلهٔ تنظیم پارامترهای آنها با مدل‌های میکروسکوپی برای هستهٔ اگزوتیک غنی از پروتون ^{80}Zr.

جدول ۱. تنظیم پارامترهای مدل‌های میکروسکوپی و پدیده شناختی در مقایسه با روش توزیع طیفی دقیق برای ^{80}Fe.

Models \ Parameters		a	$a(S_n)$	Δ
Phenomenological	BSFG	۸٫۱۲۸	۸٫۱۲۸	−۲٫۰۰
	CTM	۷٫۸۱۹	۸٫۱۲۸	−۲٫۲۹۶
	GSFM	۷٫۷۶۳	۸٫۲۵۹	۴٫۳۸۲
Microscopic	Models	c		Δ
	Comb	−۰٫۳۲۹		۲٫۸۳۳
	HFM	−۰٫۴۳۱		−۱٫۹۰۸

جدول ۲. تنظیم پارامترهای مدل‌های میکروسکوپی و پدیده شناختی در مقایسه با روش توزیع طیفی دقیق برای ^{80}Zr.

Models \ Parameters		a	$a(S_n)$	$E_.$	E_{xmatch}	T	Δ
Phenomenological	BSFG	۸٫۱۲۱	۸٫۷۰۷	-	-	-	۰٫۶۱۴
	CTM	۸٫۱۲۱	۸٫۷۰۷	۱٫۰۹۶	۵٫۲۳	۰٫۷۷۴۲	۰٫۶۱۴
	GSFM	۸٫۱۴۸	۸٫۷۰۷	-	-	-	۱٫۳۱۹
Microscopic	Models	c		Δ			
	Comb	۰٫۰۶۹		۰٫۸۳۹			
	HFM	−۰٫۳۴۱		۱٫۴۴			

از پروتون ^{80}Zr انجام داده‌ایم که نتایج آن در شکل‌های ۳ و ۴، پارامترهای مربوط به هر یک در جداول ۱ و ۲ آورده شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که می‌توان با تنظیم پارامترهای مدل‌های مختلف انطباق قابل قبولی را در انرژی‌های پایین به‌دست آورد. از این پارامترهای به‌دست آمده می‌توان در کدهای واکنش هسته‌ای برای تمام واکنش‌هایی که این هسته‌ها می‌توانند در آنها شرکت داشته باشند با اطمینان و به طور معتبر استفاده کرد. در بخش بعد بر روی نتایج این بررسی و

Archive of SID

www.SID.ir

پارامترهای به‌دست آمده بحث و نتیجه‌گیری انجام خواهد شد.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

چگالی تراز هسته‌ای در مطالعه ساختار درونی و رفتار میانگین هسته‌ها و در محاسبه سطح مقطع‌ها بسیار اهمیت دارد. عدم قطعیت‌هایی که در تعیین آزمایشگاهی و نظریهٔ چگالی تراز هسته‌ای حتی در مورد هسته‌های پایدار و انرژی‌های پایین وجود دارد این کمیت را به یکی از چالش برانگیزترین کمیت‌ها در فیزیک هسته‌ای تبدیل کرده است.

در مورد هسته‌های اگزوتیک، چگالی تراز هسته‌ای کمتر بررسی شده است، زیرا این هسته‌ها اغلب ناپایدار هستند و اطلاعات آزمایشگاهی کمی برایشان وجود دارد. دراین تحقیق به بررسی مدل‌های معتبر برای محاسبهٔ چگالی تراز برای کاربردهای عملی پرداختیم. از آنجایی که استخراج چگالی ترازهای انرژی این هسته‌ها با استفاده از مدل‌های معتبر برای کاربردهای بعدی مانند استفاده در کدهای واکنش و تبخیر هسته‌ای، محاسبات اختر فیزیک، سنتز هسته‌ای و تولید باریکه‌های رادیواکتیو ضروری است و به دلیل نبود داده‌های آزمایشگاهی کافی برای تنظیم پارامترهای مدل‌های معتبری که در کدهای واکنش و تبخیر هسته‌ای به‌کار می‌روند، لازم است که روش معتبری را برای تعیین چگالی ترازهای این هسته‌ها ایجاد کنیم.

اصولاً یک راه برای بررسی هسته‌های اگزوتیک، استفاده از روش‌های میکروسکوپی دقیق می‌باشد که اعتبار کافی را برای محاسبات دارند. اما از آنجایی که این روش‌های دقیق عمدتاً بسیار زمان‌بر هستند، استفاده از آنها در کاربردهای عملی از لحاظ زمان محاسباتی مقرون به صرفه نمی‌باشد. همچنین امکان تحلیل داده‌ها به دلیل نبود رابطه‌های تحلیلی برایشان وجود ندارد، بنابراین از نتایج این روش‌های میکروسکوپی بیشتر برای مطالعه بر روی این هسته‌ها و شرایط غیرقابل دسترس استفاده می‌شود.

در این تحقیق از روش توزیع طیفی دقیق (SPDM) برای تعیین چگالی ترازهای انرژی دو هستهٔ اگزوتیک غنی از نوترون و غنی از پروتون با عدد جرمی یکسان استفاده کردیم. با مقایسهٔ نتایج با سایرمدل‌های پدیده شناختی و میکروسکوپی و تعیین پارامترهای قابل تنظیم برای هر مدل بر اساس مدل میکروسکوپی دقیق، توافق خوبی در انرژی‌های پایین ($0 \le E_x \le 50$ MeV) حاصل گردید. همچنین با مقایسهٔ پارامترهای چگالی ترازی که برای هسته‌های اگزوتیک به‌دست آوردیم (^{80}Fe; $a \cong 8/128$, ^{80}Zr; $a \cong 8/121$)، با پارامتر چگالی تراز هستهٔ پایدار با عدد جرمی یکسان (^{80}Se; $a \cong 8/837$)، کاهش پارامتر چگالی تراز با دور شدن از خط پایداری مشخص می‌شود. این کاهش عمدتاً مربوط به اثر وابستگی به آیزواسپین بر روی چگالی تراز هسته‌ای است زیرا با دور شدن از خط پایداری، مولفهٔ سوم آیزواسپین ($T_z = (Z-N)/2$) افزایش می‌یابد. از آنجایی که کمترین مقدار آیزاسپین کل برابر با مولفهٔ سوم آن است و به عنوان مثال هسته‌هایی با آیزواسپین $T_z = \pm 1$ نمی‌توانند ترازهایی با آیزواسپین کل $T = 0$ داشته باشند، انتظار داریم که تعداد ترازهای هسته‌ای با دور شدن از خط پایداری کاهش یابند [۱۷]. این موضوع توسط طیف تبخیر برخی از آزمایشات یون سنگین نیز برای چند هستهٔ دور از خط پایداری نشان داده شده است [۱۶]. اگرچه ما برای استفاده در کاربردهای عملی به ویژه در فرایندهایی که در محیط‌های اخترفیزیک رخ می‌دهند، مانند سوختن‌های هسته‌ای در ستاره‌ها و سوختن‌های انفجاری هسته‌ای در ابر نواخترها، به اطلاعات معتبری دربارهٔ رفتار چگالی تراز هسته‌ای برای هسته‌های اگزوتیک نیاز داریم، سعی کردیم تا این اطلاعات را از مدل‌های دقیق به‌دست آوریم که تا حد بسیار زیادی برای استفاده در این کاربردهای عملی راه گشا بوده است. ولی از آنجایی که بسیاری از جنبه‌ها و خصوصیات این هسته‌ها هنوز ناشناخته است نیاز به انجام بررسی‌های آزمایشگاهی بیشتر در این زمینه وجود دارد. تنها داده‌های آزمایشگاهی قابل دسترس برای این هسته‌ها از برخی از واکنش‌های یون سنگینی به‌دست می‌آیند که در حال حاضر در بسیاری از مراکز تحقیقاتی جهان در حال انجام هستند. با ارائهٔ داده‌های مربوط به این آزمایشات و تجزیه و تحلیل این داده‌ها

Archive of SID

www.SID.ir

توسط کدهای واکنش هسته‌ای و کدهای مونت کارلوی تبخیر هسته‌ای می‌توان اطلاعاتی دربارهٔ رفتار چگالی تراز به‌دست آورد و اعتبار فرضیات و نتایج بسیاری از مدل‌های هسته‌ای را نیز ارزیابی نمود. همچنین با توجه به تغییرشکل‌های حدی هسته‌های اگزوتیک دور از خط پایداری، انتظار داریم که اثر تحریکات تجمعی (چرخشی و ارتعاشی) بر روی چگالی ترازهای هسته‌ای این هسته‌ها بسیار قابل توجه باشد. این اثرات تجمعی را نیز می‌توان به‌طور ضمنی در پارامترهای قابل تنظیم درنظر گرفت، بنابراین در این پارامترهای تنظیم شده بسیاری از اثرات، مانند اثرات آیزواسپین، پوسته‌ای، تغییرشکل و تجمعی نهفته می‌باشند و می‌توان به‌طور معتبر در کاربردهای عملی از آنها استفاده کرد.

مراجع

1. H A Bethe, *Phys. Rev*. **50** (1936) 332.
2. A Gilbert, and A G W Cameron, Can. *J. Phys*. **43** (1965) 1446.
3. W Dilg, W Schantl, H Vonach, and M Uhl, *Nucl. Phys*. A**217** (1973) 269.
4. A V Ignatyuk, K K Istekov, and G N Smirenkin, *Sov. J. Nucl. Phys*. **29**, **4** (1979) 450.
5. S Goriely, F Tondeur, and J M Pearson, *Atom. Data Nucl. Data Tables* **77** (2001) 311.
6. S Goriely, S Hilaire, and A J Koning, *Phys. Rev*. C **78** (2008) 064307.
7. J B French, and K F Ratcliff, *Phys. Rev*. C **3** (1971) 94.
8. W Hauser, and H Feshbach, *Phys. Rev*. **87** (1952) 366.
9. S S M Wong, "*Nuclear Statistical Spectroscopy*", Oxford University Press (1986).
10. S Ayik, and J N Ginocchio, *Nucl. Phys*. A **221** (1974) 285.
11. K K Mon, and J B French, *Ann. Phys*. **95** (1975) 90.
12. F S Chang, and A Zuker, *Nucl. Phys*. A **198** (1972) 417.
13. S M Grimes, S D Bloom, et al., *Phys. Rev*. C **27** (1983) 2893.
14. A P Zuker, *Phys. Rev*. C **64** (2001) 021303.
15. C W Johnson, J U Nabi, et al., *submitted to Phys. Rev. Lett*. (2001).
16. D R Chakrabarty, S K Rathi, et al., *Nucl. Phys*. A, **712** (2002) 23-36.
17. M N Nasrabadi, *Journal of Physics: Conference Series* **295** (2011) 012124.
18. A J Koning, and S Hilaire, et al., in Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, 22-27 April (2007), Nice, France, edited by F. Gunsing, E. Bauge, et al., (*EDP Sciences*, 211-214 (2008)).
19. M Herman, et al., "*Recent developments of the nuclear reaction model code EMPIRE*", The International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, Santa Fe, New Mexico, USA, (2004), AIP Conference Proceedings, **769** (2005) 1184.
20. E P Wigner, *Ann. of Math*. **62** (1955) 540; F S Chang, J. B. French, T H Thio, *Ann. of Phys*., **66** (1971) 137; T A Brody et al., *Rev. Mod. Phys*., **53** (1981) 387.

Archive of SID

www.SID.ir