مطالعه کثافت باندهای انرژی هسته‌های غنی از پروتون و غنی از نوترون

پوهنمل دکتور داوود میرزایی[۸]
تقریظ‌دهنده: پوهنوال فریبا احدیار

مجلهٔ علمی-تحقیقی حوزهٔ علوم طبیعی پوهنتون کابل، ۱ (۳) ۱۳۹۹

چکیده

کثافت باندهای انرژی هسته‌ای یکی از ویژگی‌های مختصِ هر هسته می‌باشد که اهمیت و کاربرد آن، طیف وسیعی از حوزه‌ها از اخترفیزیک تا طب هسته‌ای را شامل می‌شود. با توجه به این‌که تلاش‌های تجربی و تئوری بسیار کمی برای مطالعه بر روی هسته‌های دور از خط پایداری صورت گرفته است، بررسی کثافت باندهای انرژی این هسته‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هم‌چنین از آن‌جایی که کثافت باندهای هسته‌ای یک ورودی تعیین‌کننده در کدهای تعامل هسته‌ای می‌باشد، بررسی روش‌های معتبر برای محاسبهٔ این کمیت ضروری است. در این تحقیق روش توزیع طیفی دقیق برای تعیین کثافت باندهای انرژی دو هستهٔ جادویی غنی از نوترون و غنی از پروتون با عدد کتله‌ی یک‌سان مطالعه شد.

اصطلاحات کلیدی: کثافت باندهای انرژی هسته‌ای؛ هسته‌های جادویی؛ ساختار هسته‌ای؛ طیف‌سنجی احصائیوی؛ هسته‌های غنی از پروتون و مدل میکروسکوپی ترکیبی

Study of density of proton-rich and neutron-rich bands

Sr. Teaching Asstt. Dr. Dowood Merzaee

Abstract

Nuclear level density (NLD) is one of the properties of nuclei with widespread application including astrophysics and nuclear medicine. Since there has been little experimental and theoretical research on the study of nuclei which are far from stability line, studying NLD for these nuclei is of crucial importance. Also, NLD is an important input for nuclear researches codes and hence studying methods for calculations this parameter is essential. In this study, a detailed spectral distribution method was used to determine the density of two neutron-rich and proton-rich magical energy bands with the same mass number.

Keywords: Nuclear level density; Exotic nuclei; Nuclear structure; Statistical spectroscopy; Nucleus of proton-rich; Combined microscopic model

ارجاع

میرزایی، داوود. (۱۳۹۹). مطالعهٔ کثافت باندهای انرژی هسته‌های غنی از پروتون و غنی از نوترون. مجلهٔ علمی-تحقیقی حوزهٔ علوم طبیعی پوهنتون کابل، شمارهٔ ۱ (۳)، صص ۱۰۱ – ۱۰۸.

---

[۸] استاد پوهنځی فزیک، پوهنتون کابل

مقدمه

کثافت باند هسته‌ای کمیتی اساسی در بررسی احصایوی هسته به‌عنوان یک سیستم چند ذره‌ای است به‌طوری‌که تمام کمیت‌های ترمودینامیکی هسته از آن استخراج می شوند. به علاوه کثافت باند هسته‌ای یک کمیت تعیین‌کننده در آنالیز احصایوی تعامل‌های هسته‌ای می‌باشد و نقش مهمی در محاسبه سطح مقطع تعامل‌هایی مانند تشکیل هسته مرکب و تعامل‌های پیش-تعادلی و هم‌چنین محاسبه سرعت واپاشی گامای هسته‌های شدیداً برانگیخته ایفا می‌کند. اولین بار، بت در سال ۱۹۳۶م، کثافت باند هسته‌ای را بر اساس مدل گاز فرمی و با رهیافتی احصایوی محاسبه نمود و فرمول تحلیلی ساده‌ای برای آن ارائه کرد [۱].

در استخراج فرمول بت از یک مدل ذره مستقل همراه با تقریب‌ها و ساده سازی‌هایی استفاده شده است که باعث می شود انطباق قابل قبولی با داده‌های تجربی نداشته باشد و بنابراین نیاز به مدل‌ها و روش‌های واقع‌بینانه‌تر احساس می‌شود. پس از آن تلاش‌های بسیاری، چه به‌صورت تجربی و چه به‌صورت تئوری، در این زمینه صورت گرفت که با وارد کردن اثراتی چون تعامل‌های باقی مانده، اثرات پوسته‌ای، اثرات جفت‌شدگی و اثرات تغییر شکل، منجر به ارائه مدل‌هایی مانند مدل دما ثابت (CTM)، مدل ابرفلاکسه تعمیم یافته‌ی پدیده شناختی (GSFM) و مدل گاز فرمی جابه‌جا شده (BSFG) گردید [۲، ۳، ٤].

علاوه بر روش‌های پدیده شناختی و نیمه تجربی، روش‌های مونت کارلوی ترکیبی و مونت کارلو مدل پوسته‌ای SMMC و مدل‌های میکروسکوپیک احصایوی HFM و ترکیبی COM و روش‌های بازگشتی و روش‌های توزیع طیفی SPDM و مدل ابر فلاکسه میکروسکوپی نیز مطرح شدند که براساس خواص میکروسکوپی هسته مانند ترازهای تک‌ذره‌ای، کثافت‌باند را محاسبه می‌کنند [۵، ۸].

این مدل‌ها و روش‌ها، بیشتر برای هسته‌های نزدیک به خط پایداری و برای انرژی‌های پایین به‌کار رفته‌اند 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 Z/N 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 سوپرنواها رخ می‌دهند ایجاد می شوند و می‌توانند قبل از واپاشی، دوباره هدف تعامل‌های گیراندازی و یا هم‌جوشی بعدی قرار بگیرند. بسیاری از عناصر سنگین جدول تناوبی از طریق چنین فرایندهایی به‌وجود آمده اند به‌طوری که امکان تولید آن‌ها از طریق سایر فرایندها وجود ندارد.

تئوری کثافت باند هسته‌ای

می‌دانیم که هسته یک سیستم کوانتومی پیچیده است که به‌منظور مطالعه ساختار و خواص آن‌ها باید تمام برکنش‌ها را در غالب یک هامیلتونین سیستم مشخص کرد و با حل مسأله چند ذره‌ای، ساختار باندهای هسته‌ای را پیش‌بینی و توصیف کنیم. برای یک سیستم به اندازۀ کافی کوچک می‌توانیم معادلات را حل کنیم و باندهای انرژی را مشخص کنیم اما برای هسته‌های با عدد کتله‌ی بزرگ به‌ویژه در انرژی‌های بالا، حل دقیق امکان‌پذیر نیست. بنابراین، یا باید از طریق مدل‌های هسته‌ای ساده‌تر به‌محاسبه کثافت باند بپردازیم و چند مدلی را که بیشتر در کدهای تعامل و کدهای کثافت باند به‌کار گرفته می‌شوند و برای کاربردهای عملی اعتبار کافی دارند به‌صورت زیر می‌باشند:

۱. مدل گاز فرمی (FGM)

در این مدل با درنظر گرفتن هسته به‌عنوان گاز فرمیونی غیر تعاملی و با استفاده از روش تابع پارش و به‌کارگیری تقریب نقطه‌زینی در نهایت به فرمول بت می‌رسد.

۲. مدل گیلبرت-کامرون (GCM or CTM)

در این مدل تا یک انرژی انطباق از قانون تجربی دما- ثابت استفاده می‌شود و بعد از آن از فرمول گاز فرمی بت با درنظر گرفتن اثر زوج- فرد استفاده می‌شود، در این مدل مانند مدل گاز فرمی نیز چهار پارامتر قابل تنظیم با داده‌های تجربی وجود دارد.

۳. مدل ابرشاره تعمیم‌یافته‌ی پدیده‌شناختی (GSFM)

در این مدل یک گذار فاز از حالت ابرشاره‌گی در انرژی پایین که در آن همبستگی جفت‌شدگی به شدت کثافت باند را متأثر می‌کند، به ناحیه انرژی بالا که با مدل گاز فرمی توصیف می‌شود داریم. با استفاده از روش آماری تابع پارش به فرمول عمومی بت با کثافت مخصوص این مدل می‌رسد.

۴. مدل میکروسکوپی آماری (HFM)

در این مدل میکروسکوپی با استفاده از روش تابع پارش به فرمول عمومی بت می‌رسیم. و برای محاسبه آنتروپی و پارمتر قطع اسپین و دترمینان D از باندهای تک ذره‌ای BCS-HF استفاده می‌شود.

۵. مدل میکروسکوپی ترکیبی (COM)

روش ترکیبی، نگرشی است که در آن به یافتن تعداد راه‌های ممکن برای توزیع نوکلئون‌ها در باندهای تک‌ذره‌ای در دست‌رس برای یک انرژی معین می‌پردازد. مدل میکروسکوپی شامل

محاسبه مفصل کثافت حالت ذاتی و فاکتورهای افزاینده چرخشی و ارتعاشی تجمعی می‌شود که از طرح باندهای تک‌ذره‌ای که در چارچوب Bogolyubov - Fock - Hartree - Skyrme تعیین می‌شوند، استفاده می‌کند.

روش‌های میکروسکوپی دقیق

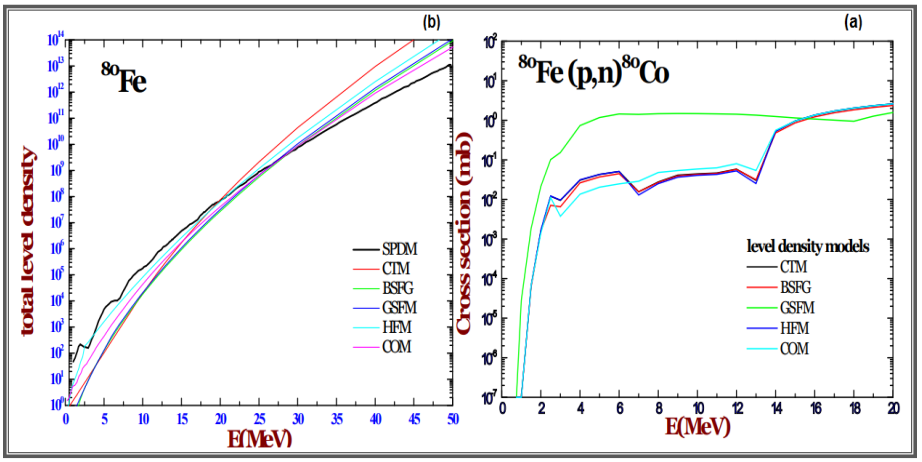
برای تعیین دقیق کثافت باند هسته‌ای می‌بایست مسئلهٔ چند ذره‌ای بطور کامل حل شود، برای این کار از روش فرمول‌سازی ماتریسی و کدهای کامپیوتری مختلفی (مانند OXBASH ,ANTOINE, REDSTICK, NuShell) استفاده می‌شود که با انجام قطری‌سازی ماتریس هامیلتونین سیستم، ویژه مقادیر آن را تعیین نموده و کثافت باند هسته‌ای را محاسبه می‌کنند. این کار تنها برای هسته‌های بسیار سبک (سیستم‌های به اندازه‌ی کافی کوچک) و انرژی‌های پایین امکان‌پذیر است، بنابراین، روش‌های دیگری باید ایجاد شوند که بتوانند تمام تعامل‌ها را در محاسبات شان وارد کنند و نیازی به انجام قطری سازی نداشته باشند. برای این منظور روش توزیع طیفی (طیف‌سنجی احصایوی) مطرح گردیده است که در ادامه آن‌را به اختصار بیان می‌کنیم.

روش توزیع طیفی (طیف سنجی احصایوی) (SPDM)

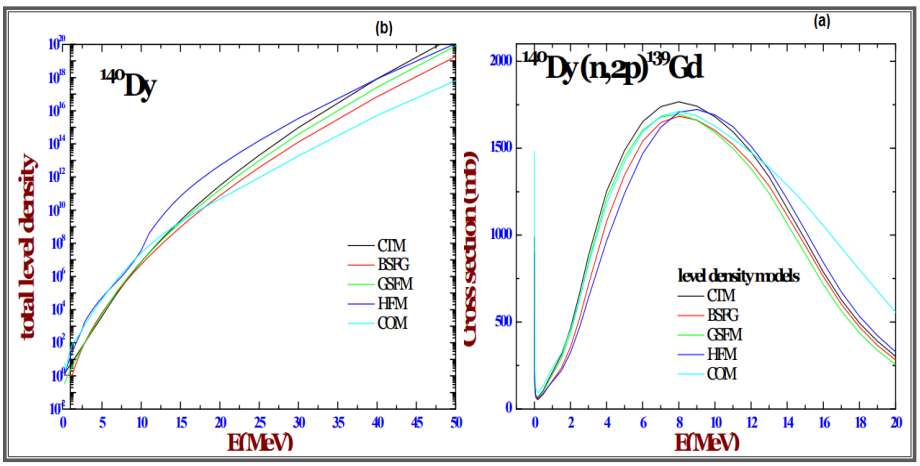
روش توزیع طیفی که توسط فرنچ مطرح گردید [۷]. در فیزیک هسته‌ای کاربردهای فراوانی دارد و یک ابزار قدرت‌مند در محاسبهٔ خواص سیستم‌های چند ذره‌ای با وارد کردن تمام تعامل‌های دو جسمی است. در این روش، ابتدا یک توزیع ساختگی اولیه تعیین می‌شود، سپس این توزیع با استفاده از ورودی‌هایی مانند باندهای تک‌ذره‌ای (ناشی از یک پتانسیل مؤثر) تنظیم می‌شوند. این توزیع تنظیم شده نزدیک‌ترین توصیف برای توزیع واقعی را نشان می‌دهد.

بررسی هسته‌های جادویی

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. برای نشان دادن تاثیر استفاده از مدل‌های مختلف بر روی سطح مقطع تعامل‌هایی‌که در کدهای تعامل هسته‌ای دو تعامل (فرضی) را که این هسته‌های جادویی در آن وارد می‌شوند مطالعه شد که نتایج آن در شکل‌های (۱ و ۲) نشان داده می‌شوند [۹، ۱۰].



شـکل ۱: بخش a مقایسـه نتایج مدل‌های مختلف پدیده‌شـناختی و میکروسـکوپی اسـت. بخش b اثر به‌کارگیری این مدل‌های در نتایج تعامل‌های هسته‌ای برای هسته جادویی ^{80}Fe

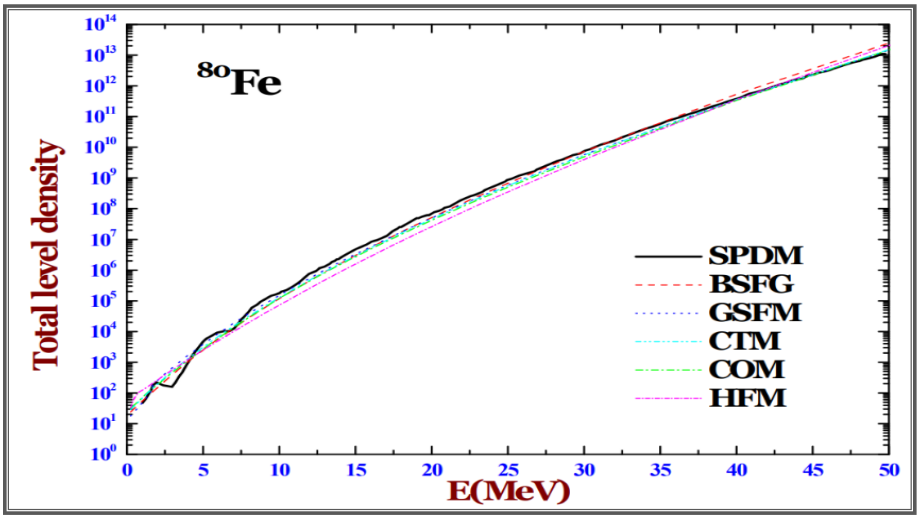


شکل ۲: بخش a مقایسه نتایج مدل‌های مختلف پدیده شناختی و میکروسکوپی. بخش b اثر به‌کارگیری این مدل‌ها در نتایج تعامل‌های هسته‌ای برای هسته جادویی ^{140}Dy

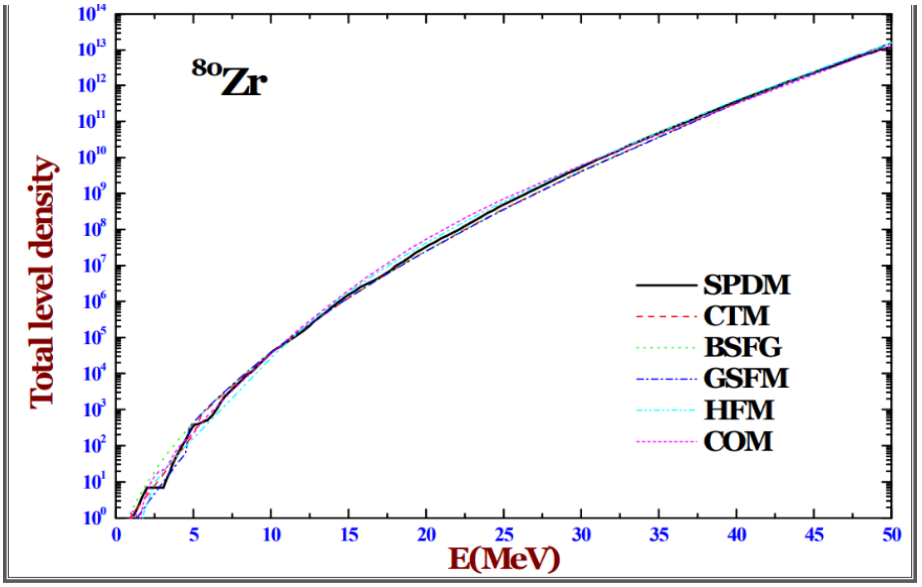
در شکل‌های (۱ و ۲) بوضوح تأثیر استفاده از مدل‌های مختلف کثافت باند بر روی نتایج تعامل‌هایی که این هسته‌های جادویی را درگیر می‌کنند مشخص می شود و اهمیت و لزوم ا ستفاده از تنظیم معتبر پارامترهای قابل تنظیمی که امکان آن دراین کدهای تعامل درنظر گرفته شده است، مشخص می‌شود.

اما همان‌طور که گفته شد، اعتبار این مدل‌ها تنها برای هسته‌های پایدار، با استفاده از داده‌های تجربی در دسـترس اثبات شـده اسـت و پارامترهای آن‌ها فقط با این داده‌ها تنظیم گردیده اسـت در روش توزیع طیفی این بررسـی را برای دو هسـتۀ جادویی با عدد کتله‌ی یکسـان A=80 در دو طرف

درهٔپایداری یعنی هستهٔ جادویی غنی از نوترون ^{80}Fe و غنی از پروتون ^{80}Zr مطالعه شد که نتایج آن در شکل‌های (۳ و ۴) آورده شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که می‌توان با تنظیم پارامترهای مدل‌های مختلف انطباق قابل قبولی را در انرژی‌های پایین به‌دست آورد.



شکل 3: انطباق قابل قبول مدل‌های پدیده‌شناختی به‌وسیلهٔ تنظیم پارامترهای آن‌ها با مدل‌های میکروسکوپی و توزیع طیفی دقیق برای هسته جادویی غنی از نوترون ^{80}Fe



شکل 4: انطباق قابل قبول مدل‌های پدیده‌شناختی به‌وسیلهٔ تنظیم پارامترهای آن‌ها با مدل‌های میکروسکوپی برای هسته جادویی غنی از پروتون ^{80}Zr

نتیجه‌گیری

کثافت باند هسته‌ای در مطالعه ساختار درونی و رفتار میانگین هسته‌ها و در محاسبه سطح مقطع‌ها بسیار اهمیت دارد. در این مطالعه روش توزیع طیفی دقیق (SPDM) برای تعیین کثافت باندهای انرژی دو هستۀ جادویی غنی از نوترون و غنی از پروتون با عدد کتله‌ی یک‌سان بررسی شد. با مقایسۀ نتایج با سایر مدل‌های پدیده‌شناختی و میکروسکوپی و تعیین پارامترهای قابل تنظیم برای هر مدل بر اساس مدل میکروسکوپی دقیق، توافق خوبی در انرژی‌های پایین مشاهده شد.

باید دقت داشته باشیم که تنها داده‌های تجربی قابل دسترس برای این هسته‌ها از برخی از تعامل‌های یون سنگینی بهدست می‌آیند که در حال حاضر در بسیاری از مراکز تحقیقاتی جهان در حال انجام هستند. با ارائۀ داده‌های مربوط به این آزمایشات و تجزیه و تحلیل این داده‌ها توسط کدهای تعامل هسته‌ای و کدهای مونت کارلوی تبخیر هسته‌ای میتوان اطلاعاتی دربارۀ رفتار کثافت باند بدست آورد و اعتبار فرضیات و نتایج بسیاری از مدل‌های هسته‌ای را نیز ارزیابی نمود.

منابع

[1]. Bethe H.A. (1936). Phys. Rev. 50 332.

[2]. Gilbert A. And Cameron A.G.W., Can. (1965). J. Phys. 43, 1446

[3]. Dilg W., Schantl W., Vonach H., and Uhl M. (1973). Nucl. Phys. A217, 269

[4]. Ignatyuk A.V., Istekov K.K., and Smirenkin G.N., Sov. (1979). J. Nucl. Phys. 29, No. 4, 450

[5]. Goriely S., Tondeur F., Pearson J.M. (2001). Atom. Data Nucl. Data Tables 77, 311

[6]. Goriely S., Hilaire S. and Koning A.J. (2008). Phys. Rev. C 78, 064307

[7]. French J.B. and Ratcliff K. F. (1971). Phys. Rev. C 3, 94.

[8]. Hauser W. and Feshbach H. (1952). Phys. Rev. 87, 366.

[9]. Koning A.J., Hilaire S., et al. (2008). 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, Les Ulis, France, 211-214).

[10]. Herman M., Oblozoinsky P., et al. (2005). ”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, 1184.