

مطالعه خطوط نوترون افشان

* مهدی ابراهیمی لوشاب - سید بیژن جیا - داود میرزایی - محمد هادی هادی زاده یزدی

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده علوم، گروه فیزیک

چکیده

در دهه های اخیر ایزوتوپ های هشت عنصر اول بطور تجربی تا مرز نوترون افشان مشاهده شده اند که فرمول نیمه تجربی جرم وایزاکر تا حدودی می تواند وجود این ایزوتوپ ها را توجیه کند، اما بسیاری از ایزوتوپ های دیگر توسط این فرمول غیر قابل توجیه است. ما با بکار بردن فرمول ترمیم یافته نیمه تجربی جرم که در آن شش جمله اصلاحی اضافی در نظر گرفته شده است، توانستیم مرز نوترون و پروتون افشانی را بدست آوریم که رابطه وایزاکر پیش بینی نمی کند و با تجربه سازگاری بیشتری دارد. همچنین این رابطه می تواند ایزوتوپ هایی را که هنوز مشاهده نشده اند نیز پیش بینی کند.

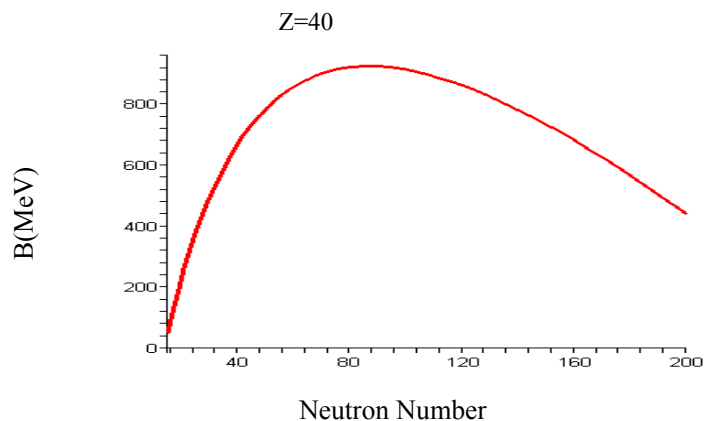
کلید واژه: مرز نوترون و پروتون افشان، فرمول نیمه تجربی جرم وایزاکر، فرمول نیمه تجربی ترمیم یافته، انرژی جدایی نوکلئون، ویژه هسته های مقید

مقدمه

هسته هایی که نوکلئون زیادی دارند و از خط پایداری سهمی جرم دور شده اند با واپاشی بتایی به سهمی پایداری جرم نزدیک می شوند. این هسته های ناپایدار به دو صورت اند، هسته هایی که واپاشی آنها در مدت زمان ۱ms تا چند ساعت یا بیشتر اتفاق بیفتد، هسته های مقید نام دارند که انرژی جدایی آخرین نوکلئون آن ها مثبت است. از طرفی هسته هایی که واپاشی آن ها در زمان خیلی کوتاه تری (در حدود 10^{-21} s) و با گسیل یک نوکلئون صورت می پذیرد و از این طریق خود را به خط پایداری نزدیک می سازند، هسته هایی هستند که حالت پایه آنها نامقید می باشد و انرژی جدایی آخرین نوکلئون آن ها منفی است. خطوط نوترون و پروتون افشان حدودی را برای تعداد نوترون ها یا پروتون ها مشخص می کند که فراتر از آن هسته ها دیگر مقید نخواهند بود و برای ایزوتوپ یا پروتون های خاص از این به بعد دیگر هیچ حالت مقیدی برای حالت پایه هسته یافت نمی شود که این حد را مرز نوترون یا پروتون افشانی می نامیم.

توصیف مرز نوترون و پروتون افشان بر اساس رابطه ی نیمه تجربی جرم وایزاکر [۱] می باشد. بر اساس این رابطه جایگه با اضافه کردن یک نوترون یا پروتون انرژی بستگی هسته کاهش می یابد را مرز نوترون یا پروتون افشان می گویند. بنابراین با توجه به شکل (۱) مرز نوترون افشان از رابطه ی $\left(\frac{\partial B}{\partial N}\right)_Z = 0$ بدست

می آید. و همچنین برای مرز پروتون افشان $(\frac{\partial B}{\partial Z})_N = 0$ را بکار می بریم. به عنوان نمونه برای زیرکونیم ($Z=40$) منحنی انرژی بستگی بر حسب عدد نوترونی در شکل (۱) ترسیم شده است. مرز نوترون افشان در جایی قرار دارد که به ازای آن تعداد نوترون ها، انرژی بستگی ماکزیمم مقدار خود را دارد و فراتر از مرز نوترون افشان (عدد نوترونی بزرگتر از جایکه به ازای آن انرژی بستگی بیشینه می باشد). هسته ها نامقید می- باشند و انرژی جدایی آخرین نوترون در آنها منفی می شود.



شکل (۱): انرژی بستگی زیرکونیم بر حسب عدد نوترونی

رابطه نیمه تجربی وایزاکر نمی تواند مرز نوترون _ پروتون افشان بسیاری از هسته ها را درست پیش بینی کند و با تجربه سازگار نیست. بعنوان مثال آخرین ایزوتوپ مقید پیش بینی شده توسط این رابطه برای Li در عدد نوترونی $N=6$ یعنی ${}^9\text{Li}$ اتفاق می افتد، در حالی که ایزوتوپ ${}^{13}\text{Li}$ نیز در تجربه مشاهده شده است و این ناسازگاری برای عناصر سنگین تر بیشتر است. در این پژوهش برای توصیف مرز نوترون - پروتون افشان از رابطه ترمیم یافته نیمه تجربی جرم (Kirson) [۲] استفاده شده است که می تواند مرز نوترون و پروتون افشان را با دقت بیشتری پیش بینی کند و نتایج بهتری را در توافق با مشاهدات تجربی به دست دهد

روش کار:

انرژی بستگی توسط فرمول نیمه تجربی جرم وایزاکر بصورت زیر بدست می آید

$$(1) \quad B = a_v A + a_s A^{2/3} + a_c A^{-1/3} Z(Z-1) + a_{asy} (A - 2Z)^2 / A$$

پس از برازش مقادیر چهار ضریب فوق چنین است [۱].

$$a_v = 15.56 \text{ MeV} \quad a_c = -0.691 \text{ MeV} \quad a_s = -16.42 \text{ MeV} \quad a_{asy.} = -22.53 \text{ MeV}$$

اما انرژی بستگی پیش بینی شده توسط فرمول وایزاکر با انرژی بستگی مشاهده شده در تجربه برای بسیاری از هسته ها کاملاً سازگار نیست. برای تطابق بیشتر این رابطه با تجربه، شش جمله ی اضافی دیگر به فرمول وایزاکر اضافه شده است [۱].

$$B = a_v A + a_s A^{2/3} + a_c A^{-1/3} Z(Z-1) + a_{asy.} (A-2Z)^2 / A + a_{xc} \frac{Z^{4/3}}{A^{1/3}} + \quad (۲)$$

$$a_w \frac{|N-Z|}{A} + a_{st} \frac{(N-Z)^2}{A^{4/3}} + a_p \frac{\delta(N,Z)}{A^{1/2}} + a_R A^{1/3} + a_m P + \beta_m P^2$$

که در آن چهار جمله اول همان رابطه معروف فرمول وایزاکر می باشد. اولین جمله اضافی مربوط به تصحیح تبادل کولنی، جمله دوم تصحیح ویگنر، جمله سوم تقارن سطحی، جمله ی چهارم شکل تصحیح شده ی اثر زوجیت، پنجمین جمله ی انحنا و آخرین جمله تصحیح اثرات پوسته ای می باشد. که در رابطه فوق P و $\delta(N,Z)$ به صورت زیر تعریف می شوند:

$$\delta(N,Z) = \frac{(-1)^Z + (-1)^N}{2} \quad (۳)$$

$$P = \frac{v_P v_N}{v_P + v_N} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) v_P و v_N (تعداد نوکلئون های ظرفیت) به ترتیب اختلاف بین تعداد پروتون ها و نوترون ها با نزدیک ترین عدد جادویی می باشد. بهترین مقادیر برازش شده برای ضرایب رابطه ی (۲) در زیر آمده است.

$$a_v = 16.58 \text{ MeV} \quad a_c = -0.774 \text{ MeV} \quad a_s = -26.95 \text{ MeV} \quad a_t = -31.51 \text{ MeV}$$

$$a_{xc} = 2.22 \text{ MeV} \quad a_w = -43.4 \text{ MeV} \quad a_{st} = 55.62 \text{ MeV} \quad a_p = 9.87 \text{ MeV}$$

$$a_R = 14.77 \text{ MeV} \quad a_m = -1.9 \text{ MeV} \quad \beta_m = 0.14 \text{ MeV}$$

برای بدست آوردن مرز نوترون افشان باید انرژی جدایی آخرین نوترون را بدست آوریم:

(۵)

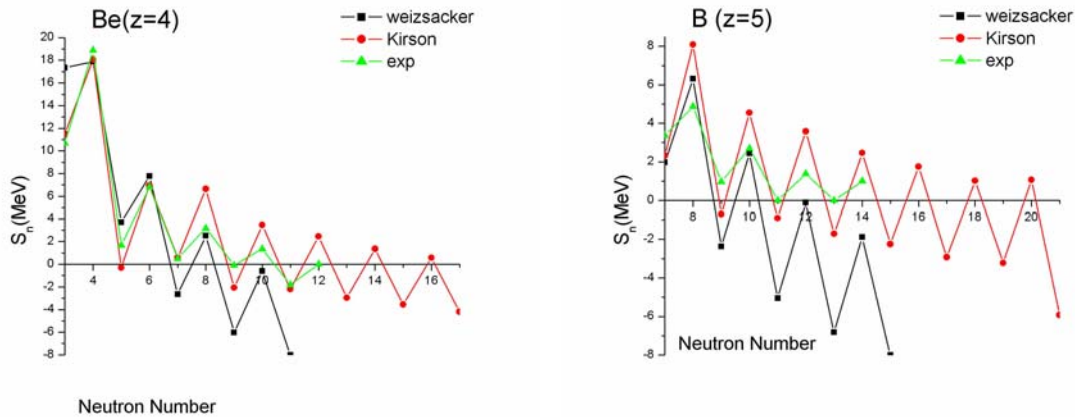
$$S_n = B(Z, N) - B(Z, N - 1)$$

بطور مثال برای یک عدد اتمی خاص با افزودن نوترون سرانجام به جایی خواهیم رسید که انرژی جدایی نوترون ظرفیت صفر و یا منفی می شود و این بدین معنی است که چنین نوترونی در قید هسته نیست. برای یک عدد نوترونی معین نیز به ازای یک تعداد معین از پروتون ها انرژی جدایی آخرین پروتون صفر یا منفی است.

با استفاده از رابطه (۲) و (۵) نمودار انرژی جدایی نوترون را بر حسب عدد نوترونی به ازای یک عدد اتمی خاص رسم می کنیم، این کار را برای عناصر Li تا Al انجام دادیم. با دقت در این نمودارها چند نکته نمایان است:

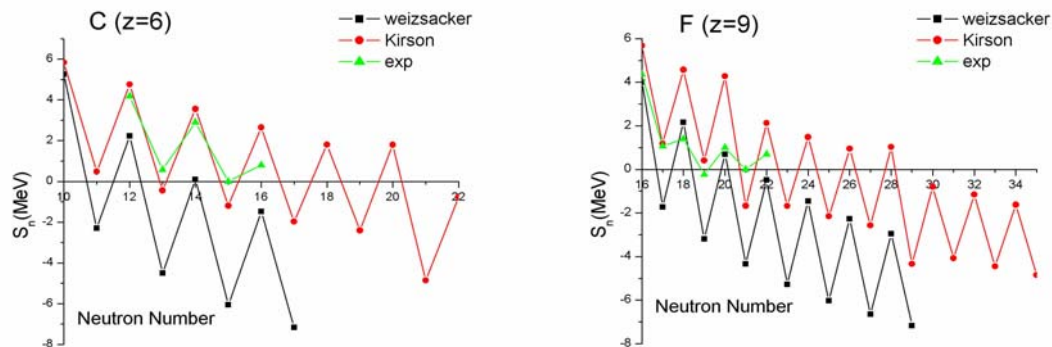
نخست آنکه در نزدیکی مرز نوترون و پروتون افشان ای ایزوتوپ های با تعداد نوترون ها و پروتون های فرد نامقیدند و تمامی آخرین هسته های مقید در نزدیکی مرز نوترون و پروتون افشان دارای تعداد نوترون و پروتون زوج هستند که این امر ناشی از وجود نیروی زوجیت و تمایل نوکلئون ها برای جفت شدن با هم است. بنابراین، هسته ها نزدیک مرز نوترون و پروتون افشان همان طور که در شکل ها مشخص است یک در میان مقید و نامقید می شوند.

برای عناصر بین Li و Al، مقادیر تجربی انرژی جدایی نوترون و همچنین مقادیر بدست آمده از فرمول نیمه تجربی وایزاکر به همراه مقادیر انرژی جدایی محاسبه شده طبق رابطه (۲) بر حسب عدد نوترونی در یک نمودار رسم شده اند. همان گونه که مشاهده می شود، مرز نوترون افشان بدست آمده بر اساس فرمول نیمه تجربی وایزاکر در بسیاری از موارد با تجربه مطابقت ندارد، بطور مثال با مشاهده شکل (۲) برای برلیم و بورون آخرین هسته های مقید بر اساس رابطه وایزاکر ^{10}B و ^{11}B پیش بینی می شود در صورتی که برای مقادیر تجربی مرز نوترون افشان در ^{14}Be قرار دارد و همچنین ^{10}B و ^{11}B در آزمایش های تجربی مشاهده شده اند و مقیدند، همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می شود رابطه تصحیح شده جرم (Kirson) در همخوانی با تجربه وجود این ایزوتوپ ها را پیش بینی می کند، البته در برخی موارد ایزوتوپ های مقید دیگری نیز توسط این رابطه پیش گویی می شود که تاکنون در آزمایش ها دیده نشده اند.



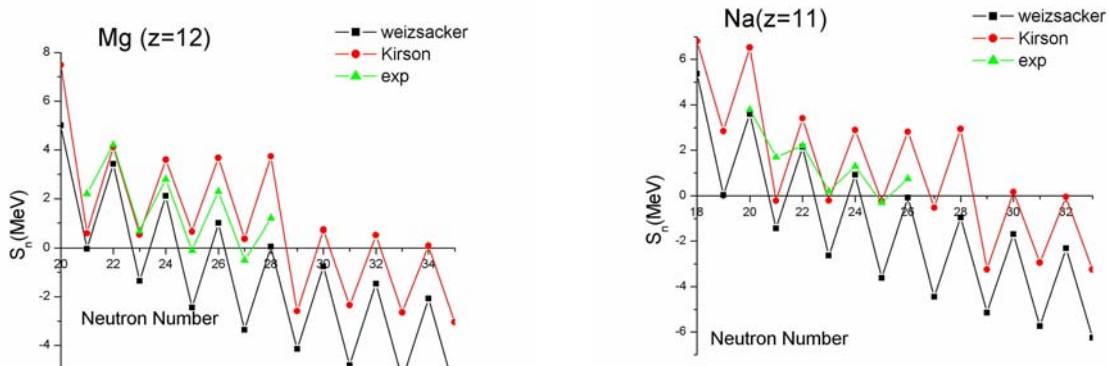
شکل (۲): انرژی جدایی برای عناصر برلیوم و بورون بر حسب عدد نوترونی

برای کربن فرمول نیمه تجربی وایزاکر آخرین ایزوتوپ مقید را ^{20}C پیش بینی می کند در صورتی که با دقت در نمودارهای شکل (۳) ملاحظه می شود که فرمول نیمه تجربی اصلاح شده (Kirson) وجود ایزوتوپ ^{22}C که در آزمایش ها نیز مشاهده شده است را پیش گویی می کند. همچنین فرمول تصحیح شده جرم وجود ایزوتوپ ^{31}F (و عدم وجود ^{30}F) را که در آزمایش ها دیده شده است تایید می کند.



شکل (۳): انرژی جدایی برای عناصر کربن و فلوئور بر حسب عدد نوترونی

آخرین ایزوتوپ مقید برای سدیم و منیزیم از فرمول نیمه تجربی جرم وایزاکر ^{35}Na و ^{38}Mg نتیجه می شود در حالی که همان طور که در نمودار های شکل (۴) دیده می شود فرمول نیمه تجربی ترمیم شده در هم خوانی با آزمایش وجود ^{37}Na و ^{40}Mg را به درستی می تواند پیش بینی می نماید.



شکل (۴): انرژی جدایی برای عناصر سدیم و منیزیم بر حسب عدد نوترونی

نتیجه گیری

مرزهای نوترون افشان مبتنی بر فرمول نیمه تجربی جدید وجود هسته های ^{14}Be ، ^{17}B و ^{19}B ، ^{26}O ، ^{31}F ، ^{41}Mg ، ^{32}Ne ، ^{43}Al که فراتر از مرزهای نوترون افشان مبتنی بر فرمول نیمه تجربی وایزاکر می باشند پیش بینی می نماید که تمامی این ایزوتوپ ها در سال های اخیر در تجربه یافت شده اند. علاوه بر این وجود ایزوتوپ های دیگری نیز توسط فرمول نیمه تجربی جدید پیش گویی می شود که تا کنون در آزمایش های تجربی رویت نشده اند.

مراجع:

- [1] C. Samnta and S. Adhikari, Physics Department, Virginia Commonwealth University, Richmond, Virginia 23284-2000
- [2] Michael W. Kirson, " Mutual influence of terms in a semi-empirical mass formula ", Nuclear Physics A 798 (2008) 29–60
- [3] M. Matsuo, Y. Serizawa, Nuclear Phys. A 788(2007)
- [4] Y. Blumenfed, Nuclear Phys, A 752(2005)