بررسی نیمه عمر نوترون های حاصل از شکافت ^{252}Cf

مهدی نصری نصرآبادی

دانشگاه اصفهان ، دانشکده علوم و فناوری های نوین ، گروه مهندسی هسته ای

چکیده:

نیمه عمرها ی نوترونها ی تأخیری حاصل از شکافت ^{252}Cf اندازه گیری شد. برای پیدا کردن مناسب ترین منحنی واپاشی حاصل از داده ها ، چند حالت مختلف برای چیدمان داده ها بر حسب زمان بررسی شده است و در هر مورد تعداد نیمه عمرهای قابل استخراج با استفاده از تکنیک Best Fit بدست آمد. در این مقاله به اهمیت نوترون های تأخیری نیز پرداخته شده است.

واژه های کلیدی: نوترونهای آنی، نوترونهای تأخیری ، پریود رآکتور، هسته های پیشرو، ضریب تکثیر

مقدمه:

دقت داریم که خوشبختانه همه نوترونهای تولید شده در رآکتور بلا فاصله پس از فرآیند شکافت بوجود نمی آیند[۱]. از روی آزمایشات دیده می شود که نوترونها بر اساس نیمه عمر هایشان از لحظه شکافت تا لحظه جذب به هفت گروه جدااز هم تقسیم می شوند.اکثریت یعنی بیش از ۹۹درصد از آنها نوترونهای آنی هستند. این نوترونها بطور مستقیم پس ازشکافت در حدود 10^{-13} ثانیه گسیل می شوند.باقیمانده که کمتر از یک در صد می باشند، حاصل پاره های شکافت هستند که به نوترونهای تاخیری معروف بوده ودر شش گروه ظاهر می شوند[۲]. یکی از آشناترین گسیلنده ها ی نوترون که به هسته های پیشرو موسومند ^{87}Br است. در اصل ^{87}Br یک گسیلنده β^- با نیمه عمر $t_{1/2}=54.6Sec$ یا عمر متوسط $\tau=78.78Sec$ می باشد. این هسته پس از گسیل β^- به ^{87}Kr در حالت برانگیخته وامی پاشد. در گذار از این حالت هستهٔ ^{87}Kr بیشتر به جای اینکه تابش γ صورت دهد بر طبق واکنش $^{87}Br\xrightarrow{\beta^-}{}^{87}Kr\xrightarrow{n}{}^{86}Kr$ یک نوترون گسیل می کند. یعنی در طول یکی از شاخه های نمودار واپاشی ^{87}Kr گسیل آنی یک نوترون درپی گسیل β^- را می بینیم. نیمه عمر یاد شده در واقع مربوط به واپاشی β^- است اما با توجه به اینکه بعد از واپاشی β^- بطور آنی گسیل نوترون صورت می گیرد، این نیمه عمر را بعنوان نیمه عمر هستهٔ پیشرو نیز در نظر می گیرند. بنابراین نیمه عمر اولین گروه واپاشی با نیمه عمرواپاشی β^- مربوط به ^{87}Br داده می شود.بطور مشابه برای گروه دوم از نوترونهای تأخیری با نیمه عمر $t_{1/2}=24.50Sec$، ^{137}I را داریم که طی واپاشی آن دو باره بر طبق واکنش $^{137}I\xrightarrow{\beta^-}{}^{137}Xe\xrightarrow{n}{}^{136}Xe$ گسیل آنی یک نوترون در پی گسیل β^- صورت می گیرد. بهمین ترتیب دیگر گروه نوترونها ی تأخیری را می توانیم مورد بررسی قرار

Archive of SID
www.SID.ir

دهیم. هر چند نوترونها ی تأخیری درصد کو چکی از نوترونهای کل را تشکیل می دهندولی اثر قابل تو جهی روی رآکتیویته دارند زیرا عمرهای متوسط آنها طولانی است. همچنین انرژی نوترونهای تاخیری کمتر از انرژی نوترونهای آنی است و همین امر باعث شده که احتمال فرار نوترونها ی تأخیری ونشت آنها در فرآیند کند سازی کمتر از نوترونها ی آنی باشد[۳].

تئوری:

در مورد یک راکتور در حالت فوق بحرانی یا زیر بحرانی ، کامل ترین رفتار قابل دسترس، برحسب یک راکتور لخت که تئوری فرمی برایش معتبر است ، داده می شود. رآکتور لخت، رآکتوری است که ترکیب مواد در قسمت بازتابنده و قلب آن یکسان باشد [۴] . برای چنین رآکتوری با استفاده از تئوری فرمی داریم:

$$D\nabla^2\phi - \sum_a \phi + K_\infty e^{-B^2\tau} \sum_a \phi = \frac{dn}{dt} \qquad (۱)$$

که در آن D ضریب پخش، ϕ فلوی نوترون، $\sum_a$ سطح مقطع ماکروسکوپیک جذب، K_∞ ضریب تکثیر بی نهایت ، B^2 باکلینگ، τ سن فرمی و سر انجام n تعداد نوترونها درواحد حجم می باشد. در مورد یک رآکتوربحرانی $\nabla^2\phi = -B^2\phi$ است و این عبارت بیانگر بستگی فلوی نوترون به هندسه رآکتور می باشد. حال اگر رآکتور در حالت غیر بحرانی باشد، این عبارت چندان درست نیست .لذا اگر فرض کنیم که رآکتور بمقدار بسیار کمی از حالت بحرانی دور شده، رابطه فوق بطور تقریبی درست است یعنی: $\nabla^2\phi \approx -B^2\phi$ است. برای یک راکتور تک گروهی (فعلا گروه حرارتی)، $\phi = n\upsilon$ است که در آن υ سرعت متوسط نوترونهای حرارتی است. به این ترتیب معادله (۱) به صورت زیر درمی آید.

$$K_\infty e^{-B^2\tau}\phi - (1 + L^2B^2)\phi = \frac{1}{\upsilon\sum_a}\frac{d\phi}{dt} \qquad (۲)$$

در معادله بالا از عبارت $\frac{\sum_a}{D} = \frac{1}{L^2}$ استفاده شده است. با فرض اینکه بتوانیم ϕ را به دو تابع وابسته به مکان و زمان بصورت $\phi(r,t) = \phi(r)T(t)$ تجزیه کنیم، آنگاه با تعریف K_{eff} بصورت زیر داریم:

$$\frac{K_\infty}{1 + L^2\beta^2} e^{-B^2\tau} = K_{eff} \qquad (۳)$$

$$K_{eff} - 1 = \frac{1}{\upsilon\sum_a}\frac{1}{1 + L^2\beta^2}\frac{1}{T(t)}\frac{dT(t)}{dt} \qquad (۴)$$

اما $\frac{1}{\upsilon\sum_o} = \frac{\lambda_a}{\upsilon}$ است که در آن λ_a بیانگر مسافت آزاد متوسط قبل از جذب (cm) و υ سرعت نوترونها (cm/Sec) می باشد. کمیت $\frac{\lambda_a}{\upsilon}$ که با ℓ_0 نمایانده میشود، برابر مدت زمانی است که یک نوترون حرارتی قبل از جذب سپری می کند. اگر این زمان در ضریب $\frac{1}{1 + L^2B^2}$ موسوم به احتمال عدم نشت

Archive of SID
www.SID.ir

نوترونهای حرارتی ضرب شود آنگاه معادله $\frac{l_0}{1+L^2B^2}=l_{th}$ عمر نوترونهای حرارتی در یک رآکتور محدود را بدست داده، سرانجام خواهیم داشت:

$$T(t)=Ae^{\frac{K_{ex}}{l_{th}}t} \qquad (۵)$$

که در آن $K_{ex}=K_{eff}-1$ است. $\frac{\ell_{th}}{K_{ex}}$ را با T نشان داده آن را به عنوان پریود رآکتور در نظر بگیریم ،آنگاه:

$$\phi(r,t)=\phi_0 e^{\frac{t}{T}} \qquad (۶)$$

که در آن $A\varphi(r)=\varphi 0$ است. اگر فرض کنیم که در یک راکتور استخری که برای آن $l_{th}=5\times10^{-5}Sec$ است ، ضریب تکثیر از 1 به 1.001 افزایش یابد، آنگاه $T=\frac{l_{th}}{K_{ex}}=0.05Sec$ خواهد شد. در چنین شرایطی پس از گذشت یک ثانیه فلوی نوترون به نسبت e^{20} افزایش می یابد و این یک عدد نجومی است ورآکتور را کاملا غیر قابل کنترل می سازد. پس بنظر می رسد که باید فکر چاره ای کرد. آری برای رهایی از این مشکل هیچ راهی جز در نظر گرفتن نوترونهای تأخیری نداریم . اگر ما بهره n_i و عمر متوسط τ_i مربوط به شش گروه نوترون تأخیری را بحساب آوریم بر طبق رابطه [۵]:

$$\bar{\tau}=\sum_{i=1}^{6}n_i t_i \Big/ \sum_{i=1}^{6}n_i \qquad (۷)$$

میانگین عمرهای متوسط این شش گروه نوترون تاخیری حدود 13sec میشود. در اینصورت با احتساب نوترونهای تاخیری با عمر متوسط حدود $13Sec$ ونوترونهای آنی با عمر متوسط حدود 5×10^{-5} sec ، می توانیم با توجه به کمیت β که بیانگر کسر موثر نوترونهای تاخیری است بر طبق معادله زیر عمر متوسط نوترونها (چه تأ خیری و چه آنی) را حساب کنیم.

$$\bar{l}=\frac{(1-\beta)+\beta\bar{\tau}}{(1-\beta)+\beta}=(1-\beta)+\beta\bar{\tau}=99.2\%\times5\times10^{-5}+0.8\%\times13=0.1Sec \qquad (۸)$$

ملاحظه می کنیم که با در نظر گرفتن هر دوی نوترونهای تأخیری و آنی پریود راکتور برای یک افزایش به اندازه 0.001 در ضریب تکثیر به صورت $T=\frac{\ell}{k_{ex}}=\frac{0.1}{0.001}=100Sec$ تغییر می یابد. با مقایسه این عدد با مقدار آن در غیاب نوترونهای تأخیری امّا با همان k_{ex}، اهمیت نوترونهای تاخیری در کنترل رآکتور بیش از پیش معلوم می گردد. از مطالب فوق این چنین برمی آید که میانگین زمان زندگی یک نسل با در نظر گرفتن نوترونهای تاخیری تفاوت زیادی با میانگین زمان زندگی یک نسل که فقط درمحاسبه آن نوترونهای آنی در نظرگرفته شده است دارد. بنابر این هر چند سهم نوترونهای تأخیری در کل کمتر از یک درصد میباشد با این حال همین تعداد کم از نوترونهای تأخیری باعث افزایش میانگین زمان زندگی یک نسل تقریبا به اندازه هزار برابر می شود. این افزایش برای زمان زندگی یک نسل به خاطر وجود نوترونهای تاخیری باعث حل مشکل

Archive of SID
www.SID.ir

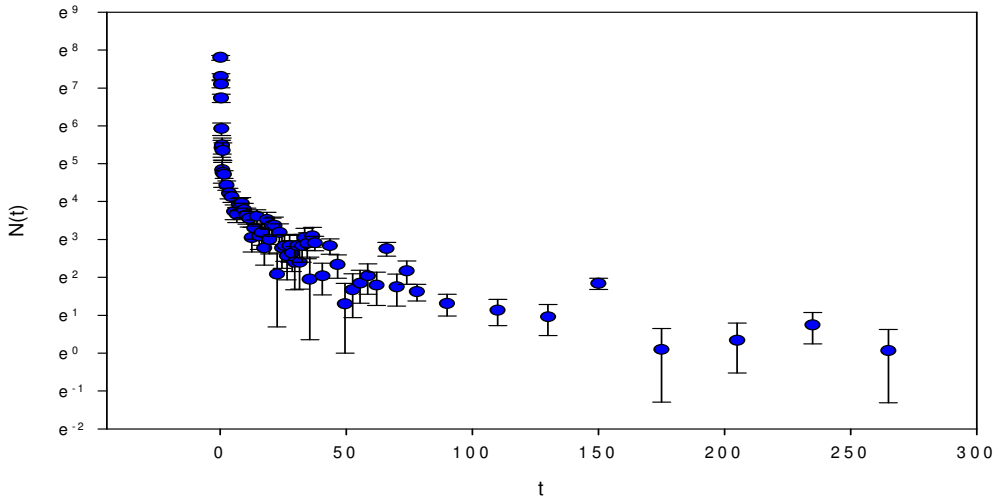
تکثیر بی رویه نوترونها و تامین کننده کنترل ایمن فرایند تکثیر نوترونها وهدایت راکتور می گردد. در اینجا لازم به ذکر است که هر چند ارزیابی های کمی توسط رادیوشیمی وجود هفت هسته و برخی تئوری ها امکان وجود بیش از ۵۰ هسته رادیو اکتیوکه به هنگام واپاشی β^- نوترون تاخیری ساطع می کنندرا پیش بینی می کنند، امّا بدون اینکه از دقت محاسبات کم شود، اغلب، تمام هسته های گسیلنده نوترون را به شش گروه طبقه بندی می کنند.

روش انجام کار:

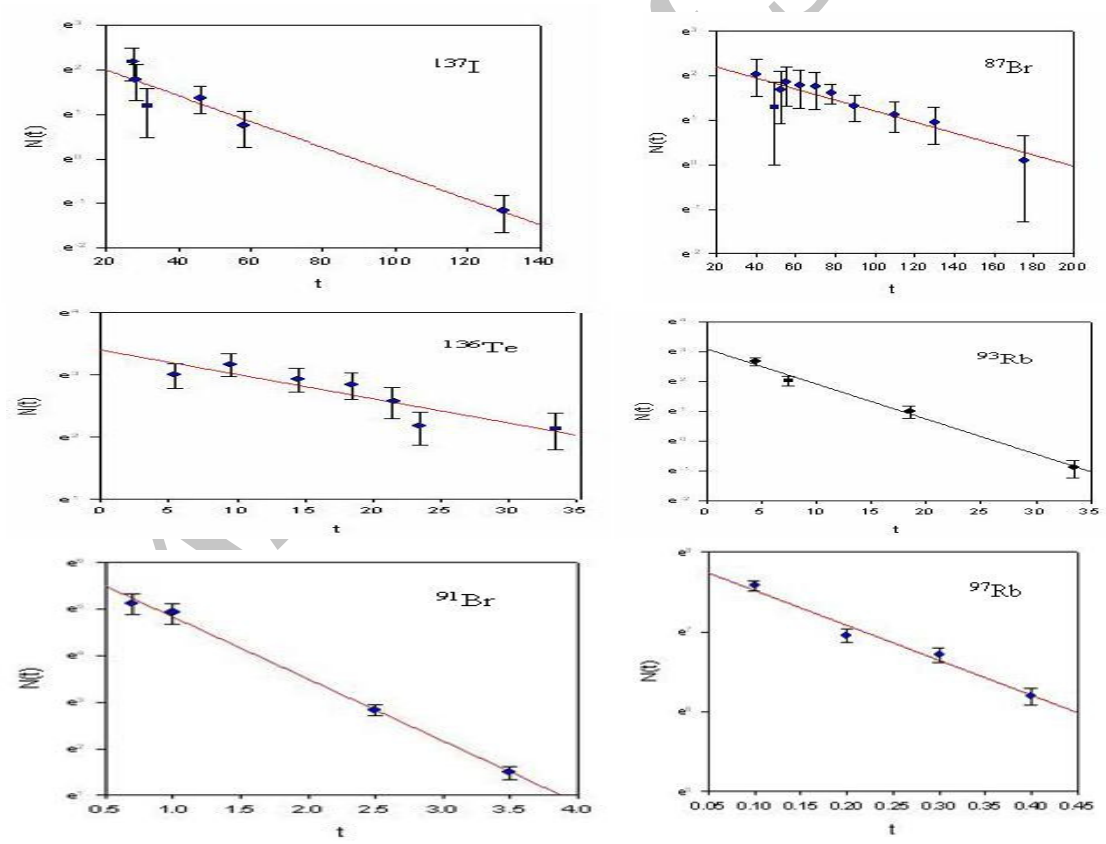
می دانیم که اگر یک چشمه نوترون برای مدتی در یک مجموعه زیر بحرانی قرار گیرد ، بعد از خارج کردن آن می توان واپاشی نوترونها را مشاهده کرد. حال اگر داده ها را جمع آوری و در یک کاغذ نیمه لگاریتمی اکتیوتیه را برحسب زمان رسم کنیم ، خواهیم دید که منحنی بدست آمده ، غیر خطی است زیرا پیشروهای نوترون های تأخیری با نیمه عمرهای مختلف واپاشی می کنند. این منحنی قابل تجزیه و جداسازی به خطوط مستقیمی می باشد. ما با توجه به این خطوط مستقیم می توانیم نیمه عمرها را بدست آوریم. علاوه بر نیمه عمرها، برون یابی و پیدا کردن محل تقاطع این خطوط مستقیم با محور عمودی، برآوردی از فراوانی نسبی نوترونهای تأخیری و پیشروهای وابسته را بدست می دهد. در این تحقیق ما قبل از اینکه چشمه در مجموعه زیر بحرانی قرار داده شود ، شمارش زمینه که عمدتاً مربوط به شکافت های خود بخود است را اندازه گیری می کنیم. این شمارش جهت تصحیح داده های بدست آمده در طول آزمایش ضروری است. سپس چشمه را به مدت 50 دقیقه در داخل قلب یک راکتور زیر بحرانی قرار می دهیم تا تمامی حالتهای شکافت برانگیخته شود. بدین منظور چشمهٔ ^{252}Cf را در یک کانال آلومینیومی در مرکز قلب قرار می دهیم. آشکارساز BF_3 را نیز در یک کانال آلومینیومی دیگر و در مرکز قلب با ارتفاع $50cm$ قرار می دهیم. همزمان با خارج کردن چشمه نوترون،سیستم MCA شروع به ثبت شمارش های آشکار ساز BF_3 می کند. آزمایش را برای فواصل زمانی شمارش 0.1، 1، 3، 4، 5، 10، 20و 30 ثانیه انجام می دهیم. سرانجام پس از ثبت شمارش ها در ثانیه نمودار اکتیونیه بر حسب زمان را در مقیاس نیمه لگاریتمی بصورت شکل (۱) رسم می کنیم.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل(۱)



شکل(۲)

پس از اینکه نتایج آزمایش منحنی شکل (۱) را به ما دادند، در شرایط ایده آل داده های نتهایی بر روی یک خط راست قرار می گیرند که نشان دهنده گروه اول از پیشروهای نوترونهای تأخیری است. با حذف کردن این داده ها از کل و رسم مجدد داده های باقیمانده، منحنی دومی بدست می آید که مجدداً داده های

www.SID.ir

انتهایی آن برروی یک خط راست قرار می گیرند که بیانگر گروه دوم نوترونهای تأخیری است. با ادامه این روش که به روش استریپینگ معروف است، دیگر گروه نوترونهای تأخیری راه با نیمه عمرهای آنها را بدست می آوریم. نتایج این کار در نمودار های شکل (۲) آمده است. سرانجام با استفاده از نمودارهای فوق، نیمه عمرهای مربوط به هسته های پیشرو را بدست می آوریم. نتایج آزمایش همراه با نتایج حاصل از محاسبات دقیق مرجع در جدول (۱) آمده است:

ith Group	Nucleus	Experimental Value	Reference
۱	^{87}Br	55.9000	55.6000
۲	^{137}I	23.9800	24.5000
۳	^{136}Te	17.6300	17.7000
۴	^{93}Rb	5.8700	5.9100
۵	^{91}Br	0.5220	0.5420
۶	^{97}Rb	0.1580	0.1690

جدول (۱)

بحث و نتیجه گیری:

همچنانکه ملاحظه می شود با وارد کردن خطای آماری آزمایش در محاسبات و انطباق نتایج با مقادیر ذکر شده در مرجع نتایج مطلوبی بدست آمده است و بدینوسیله با بررسی چندین حالت مختلف و رسم داده ها بر حسب زمان، در بهترین حالت، نیمه عمر شش هستهٔ پیشرو از منحنی اکتیویته استخراج گردید.

مراجع:

[1] D.J. Hughes, J. Dabbs, A. Cahn, and D. Hall, Delayed Neutrons from Fission of ^{235}U, Phys. Rev. 73, No. 2, (1948).
[2] J.R. Lamarsh, Introduction to Nuclear Reactor Theory, Addison – Wesley (1966).
[3] P.L. Reeder, J. F. Wright and L. J. Alquist, Phys. Rev. C, V. 15, No. 6, (1977).
[4] R.J. Keepin, Edison, Kinetic of the Nuclear Physics, Wisly (1960).
[5] G.D. Spriggs, Nucl. Sci. Eng., v. 114, p. 342, (1993).

Archive of SID

www.SID.ir