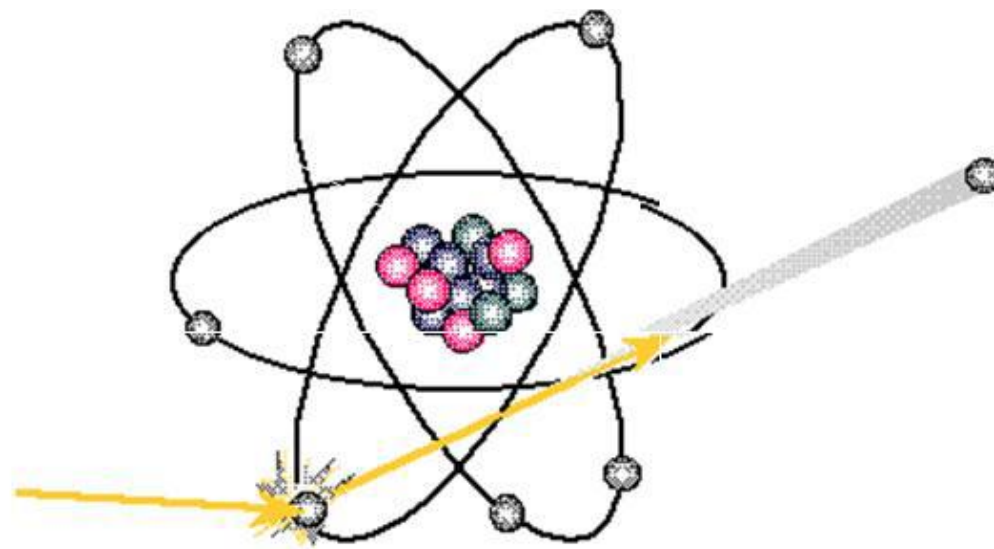


بهداشت پرتوها

کارشناسی پیوسته بهداشت حرفه ای

دانشگاه علوم پزشکی ایلام

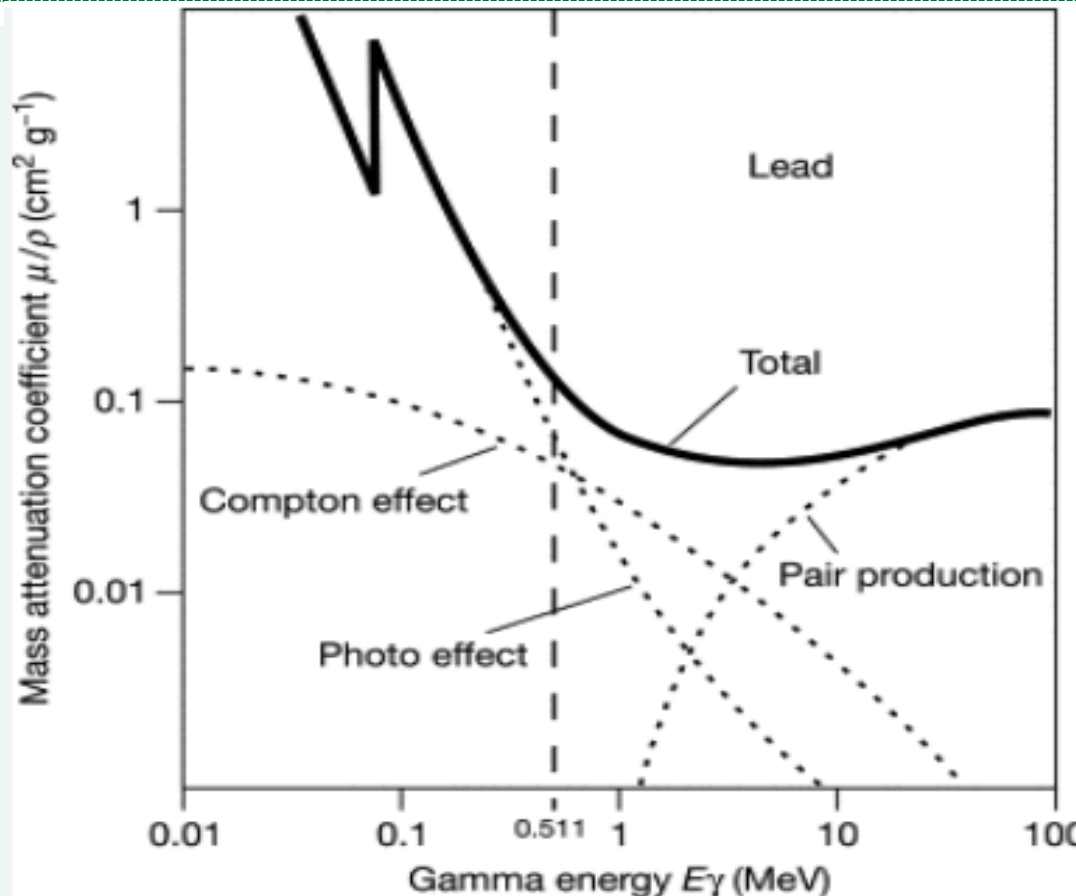
مبحث – پرتوهای یونساز (واکنش پرتو یونساز با ماده بخش ۲)



Presented By: Ahmad Mehri

روشهای برهمکنش پرتو گاما با ماده

2



روشهای برخورد یا برهمکنش پرتو گاما با ماده و تضعیف آن:

۱- جذب فوتوالکتریک (Photo effect)

۲- پراکندگی کامپتون (Compton effect)

۳- ایجاد زوج یون (Pair production)

۴- فروپاشی فوتونی (Photon Decay)

گزینه ۴ در شرایطی بسیار نادر و در نتیجه فعل و انفعالات فرآیندهای مصنوعی ایجاد می گردد.

نکته: این روشهای برخورد پرتوهای گاما برای پرتوهای ایکس قابل تعمیم است.

روشهای بر همکنش پرتو گاما با ماده (جذب فوتوالکتریک)

3

- اگر فوتونی به الکترونی از اتم برخورد کند که وابستگی انرژی آن به هسته زیاد باشد تمام انرژی فوتون در برخورد با الکترون از دست رفته و به عبارتی فوتون نابود شده و کل انرژی به الکترون داده می شود و انرژی الکترون برابر با انرژی فوتون منهای انرژی وابستگی آن به هسته خواهد بود.

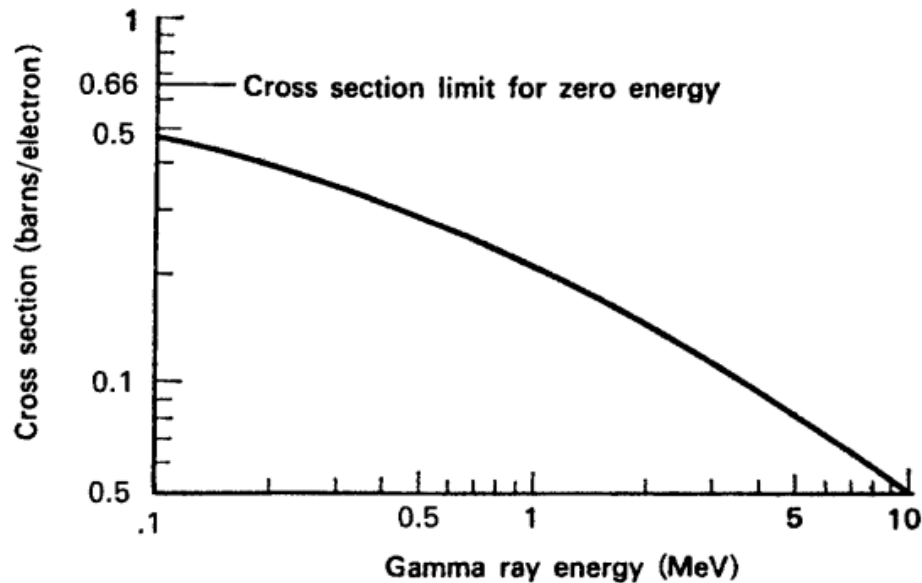
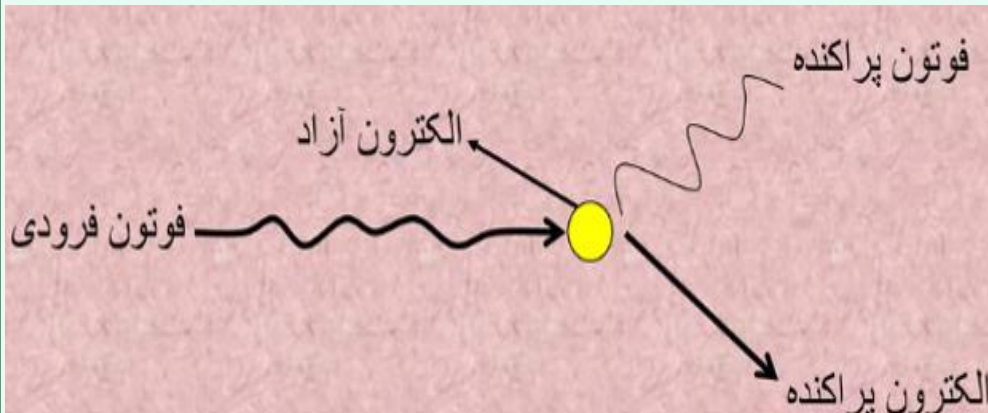
$$E_e = E_\gamma - E$$

E_e = کل انرژی الکترون، E_γ = انرژی فوتون گاما، E = انرژی وابستگی

- ذره یوننده اصلی حاصل از این بر همکنش، فوتو الکترون است.
- انرژی فوتوالکتریک عمدتاً از طریق برانگیزش و یونش در ماده، تلف می شود.
- اثر فوتوالکتریک برای فوتونهای کم انرژی و ماده های با اعداد اتمی بالا حائز اهمیت و در ماده هایی با عدد اتمی خیلی پایین اهمیت زیادی ندارند.
- همین بستگی شدید جذب فوتوالکتریک به عدد اتمی (Z) ماده است که سرب را برای حفاظت در برابر پرتوهای ایکس و گاما، عنصری چنان شایان توجه کرده است.

روشهای برهمکنش پرتو گاما با ماده (پراکندگی کامپتون)

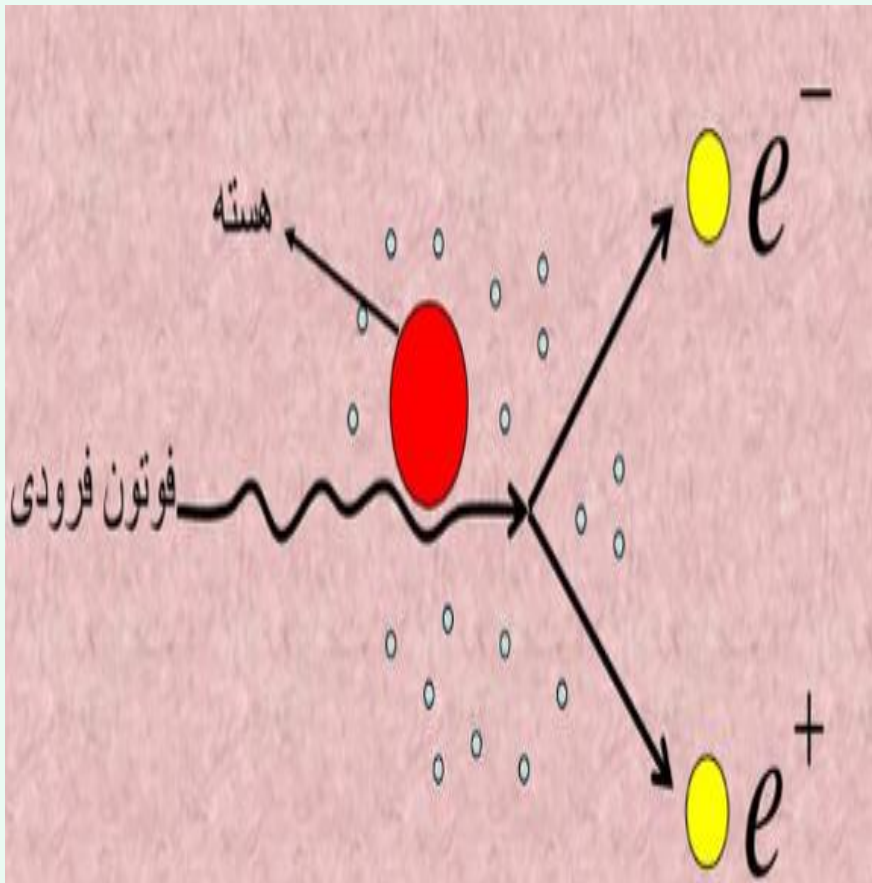
4



- پراکندگی کامپتون عبارت است از برخوردی بین یک فوتون و یک الکترون آزاد
- الکترون آزاد الکترونی است که انرژی بستگی اش به اتم خیلی کمتر از فوتون فرودی است.
- چون تمام انرژی فوتون به الکترون پراکنده منتقل نمی شود، بنابراین بخشی از انرژی فوتون پراکنده که دارای انرژی کمتر است به الکترون آزاد منتقل می شود و مابقی به صورت فوتون با انرژی کمتر منتقل می شود.
- احتمال برهمکنش پراکندگی کامپتون برای فوتونهای کم انرژی (همانند شکل روبه رو) و ماده هایی با عدد اتمی پایین، افزایش می یابد.

روشهای برهمکنش پرتو گاما با ماده (زوج یون)

5



- در صورتی که انرژی گاما بیشتر از 1.02 MeV باشد و به هسته ی ماده هایی با عدد اتمی بالا برخورد کند انرژی به صورت یک پوزیترون و یک الکترون پدیدار می شود که جرم هر یک از این دو ذره برابر با 0.51 MeV است.
- وقتی انرژی فوتون از مقدار آستانه 1.02 MeV تا حدود 5 MeV افزایش یابد، سطح مقطع یا ضریب تضعیف هم به آهستگی افزایش خواهد یافت.
- برای انرژیهای بالاتر، سطح مقطع متناسب با لگاریتم انرژی فوتون است. همین سطح مقطع فزاینده است که منجر به افزایش ضریب تضعیف در انرژی های بالا می شود.

روشهای برهمکنش پرتو گاما با ماده (زوج یون)

6

- بدین ترتیب، حاصل برهم کنش تولید زوج یون در این حالت چنین می شود: مثلاً در یک فوتون منفرد با انرژی 10 Mev به صورت دو فوتون با انرژی های 0.51 Mev در می آید و 8.98 Mev از انرژی باقیمانده در ماده تلف می شود.
- آنگاه پوزیترون در اثر ترکیب با الکترون از ماده نابود می شود، و بدین ترتیب دو فوتون با انرژیهای 0.51 Mev از ماده خارج می شوند (این فوتونها همچنین می توانند در فرآیندهای کامپتون و جذب فوتوالکتریک شرکت کنند).
- لازم است که این تبدیل انرژی به جرم در حضور یک ذره دیگر (نظیر یک هسته) صورت گیرد. این پدیده ممکن است در مجاورت یک الکترون نیز صورت گیرد، ولی احتمال وقوع آن در مجاورت هسته بیشتر است.

روشهای برهمکنش پرتو گاما با ماده (فروپاشی فوتونی)

7

- احتمال فروپاشی فوتونی معمولاً در انرژی های خیلی بالا اتفاق می افتد و در این حالت فوتون به داخل هسته نفوذ می کند و انرژی فوتون صرف بالا بردن سطح انرژی هسته می شود که نتیجه آن در بیشتر موارد گسیل نوترون از هسته است.
- قسمتی از انرژی فوتون که افزون بر انرژی آستانه است، به صورت انرژی جنبشی نوترون گسیل شده (گسیل یک نوترون از هسته برگسیل یک پروتون ترجیح دارد. زیرا نوترون برای فرار از هسته ملزم نیست که بر سد پتانسیل کولنی غلبه کند، و بدین جهت آستانه پایینتری دارد) پدیدار می شود و یا، اگر این فزونی انرژی به قدر کافی زیاد باشد، ممکن است باعث گسیل ذرات باردار از هسته جاذب شود.
- این نوع واکنش آستانه ای است که در آن انرژی فوتون باید از کمینه معینی که به هسته جاذب بستگی دارد، بیشتر باشد.
- این واکنش، خواص انرژی بالاست و **جز در موارد استثنایی، نوعی ساز و کار جذب برای گامای حاصل از ایزوتوپهای پرتوزا محسوب نمی شود.**
- یکی از موارد استثنایی مهم، هسته ^9Be است که در آن انرژی آستانه فقط برابر 1.666 Mev است.

روشهای برهمکنش پرتو گاما با ماده (فروپاشی فوتونی)

8

- در پی واکنش هسته مادر ${}^9\text{Be}$ ، هسته دختر، ${}^8\text{Be}$ به همراه پرتو گاما و نوترونهای تک انرژی گسیل می کند که این شرایط در چشمه آزمایشگاهی استفاده می شود.
- قابل ذکر است که فروپاشی فوتونی به تولید نوترون منجر می شود.
- نکته: به طور کلی، سطح مقطع فروپاشی فوتونی یا ضریب تضعیف ماده خیلی کوچکتر از سطح مقطع کلی است، از اینرو، در محاسبات مربوط به حفاظ گذاریها، سطح مقطع فروپاشی فوتونی را معمولاً بی اهمیت می گیرند و از آن صرفنظر می کنند.

اثرات جمعی روشهای برخورد پرتو گاما با ماده

9

نکته: سطح مقطع یا ضریب تضعیف هر واکنشی، هنگامی که برای یک ذره منفرد یا یک فوتون منفرد بررسی می شود، عبارت است از احتمال درگیر شدن این فوتون در واکنش با ماده

- چون به ندرت در بر همکنش گاما پدیده فروپاشی فوتونی رخ می دهد، بنابراین ضریب تضعیف کل از جمع ضرایب تضعیف مربوط به ۳ واکنش ذکر شده در زیر بدست می آید.

μ_t = ضریب تضعیف کل (pe)

μ_{pe} = ضریب تضعیف فوتو الکتریک (pe)

μ_{cs} = ضریب تضعیف کامپتون (cs)

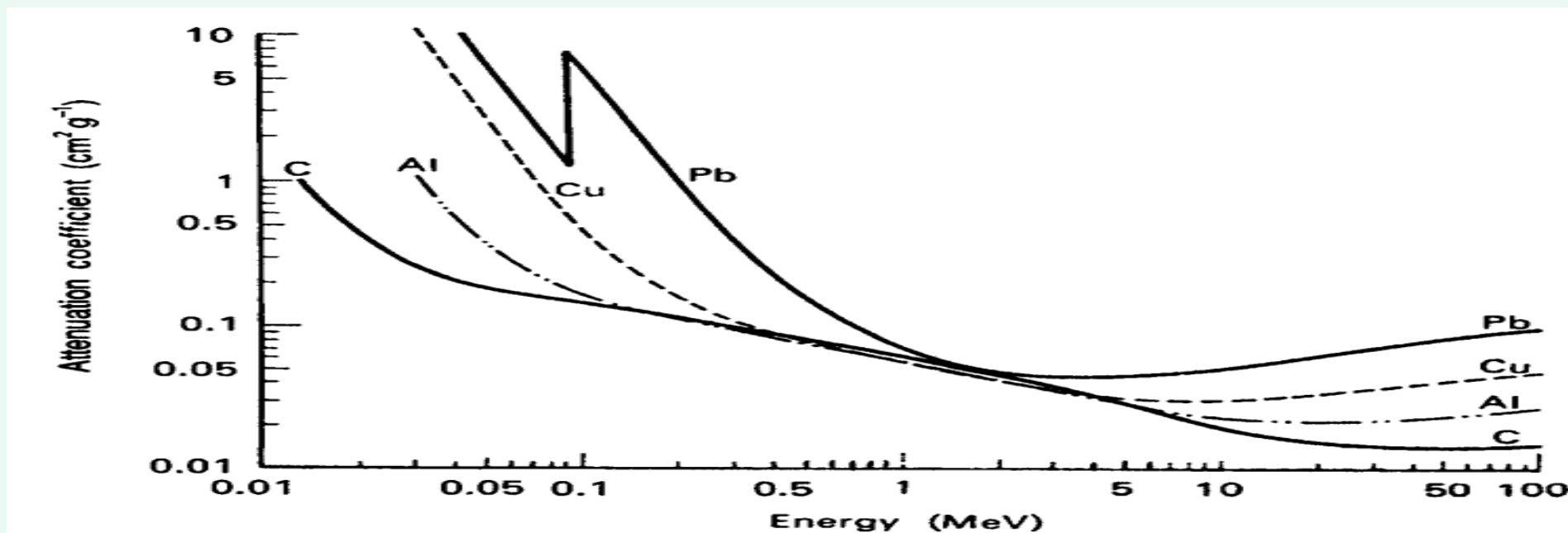
μ_{pp} = ضریب تضعیف زوج یون

$$\mu_t = \mu_{pe} + \mu_{Cs} + \mu_{pp}$$

اثرات جمعی برهمکنش پرتو گاما در چند ماده (کربن، آلومینیوم، مس و سرب)

10

- همانگونه در شکل زیر مشاهده می شود، خواص تضعیفی ماده با نظم خاصی بر حسب عدد اتمی ماده و انرژی پرتو گاما تغییر می کند.
- قابل ذکر است که در ناحیه ای که اثر کامپتون غلبه دارد، ضریب تضعیف جرمی (ضخامت چگالشی) تقریباً مستقل از عدد اتمی ماده جاذب خواهد بود.



فوتو الکتریک غالب است

عدد اتمی بالا و انرژی کم

اثر کامپتون غالب است،

عدد اتمی و انرژی پایین

زوج یون غالب است،

عدد اتمی و انرژی بالا

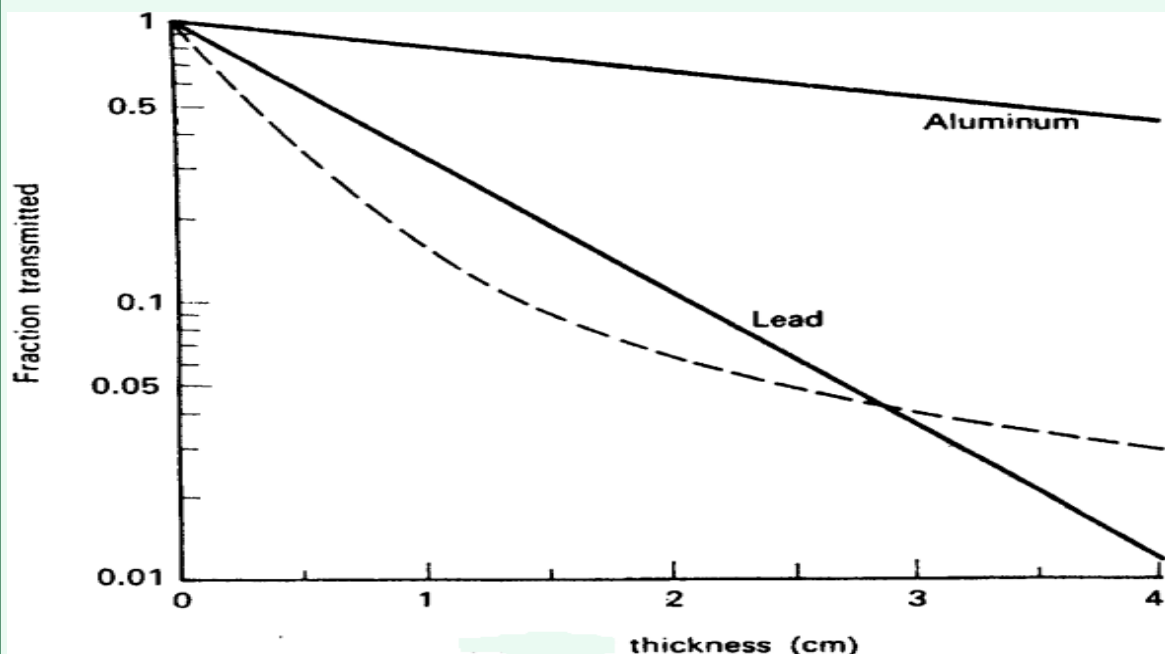
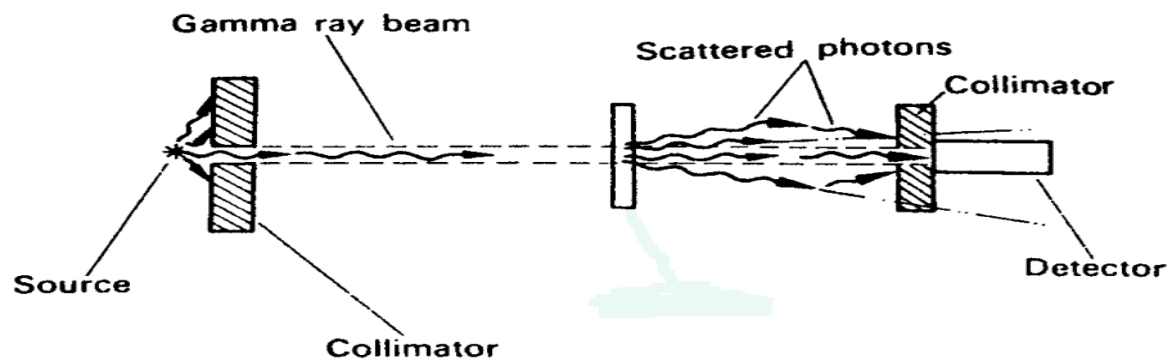
برهمکنش پرتو ایکس با ماده

11

- نکته مهم: تمام موارد ذکر شده در مورد پرتو گاما در مورد پرتو ایکس هم قابل تعمیم است.

برد در پرتوهای گاما

12



- چگونگی تضعیف تابش گاما با تضعیف هر دو تابش بتا و آلفا متفاوت است.
- در حالی که پرتوهای آلفا و بتا بردهای مشخص در هر ماده دارند و کاملاً قابل جذب هستند، اما در مورد تابش گاما با افزایش ضخامت ماده فقط از شدت تابش کاسته می شود و جذب کامل صورت نمی گیرد.
- اگر اندازه گیری تضعیف پرتو گاما در شرایط هندسی خوب، یعنی با استفاده از یک باریکه تابشی باریک و کاملاً موازی (مطابق شکل بالا) انجام و اطلاعات حاصل روی کاغذ لگاریتمی رسم شود، در صورتی که پرتو گاما تک انرژی باشد، یک خط مستقیم همانند شکل حاصل خواهد شد.
- اگر پرتو گاما چند انرژی باشد، نتیجه ای مانند منحنی خط چین در شکل مقابل حاصل خواهد شد.

برد در پرتوهای گاما

13

$$\ln I = -\mu t + \ln I_0$$

or

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu t.$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu t},$$

- معادله خط مستقیم حاصل (در شرایط هندسی خوب)، در اسلاید قبلی چنین است:

چنانچه از دو طرف آنتی لگاریتم بگیریم:

I_0 = شدت پرتو گاما در ضخامت صفر ماده

t = ضخامت ماده

I = شدت پرتو گاما پس از عبور از ضخامت t در ماده

e = پایه دستگاه لگاریتم طبیعی

μ = ضریب تضعیف

- از آنجا که در یک معادله نمایی لازم است که نما بدون بعد باشد، واحدهای μ و t باید عکس یکدیگر باشد.

- اگر ضخامت ماده (t) بر حسب سانتیمتر اندازه گیری شود، آنگاه بعد ضریب تضعیف که ضریب تضعیف خطی μ_L است باید (cm^{-1}) باشد.

- اگر ضخامت ماده بر حسب g/cm^2 یا ضخامت چگالشی باشد، در این صورت ضریب تضعیف جرمی μ_m می گویند. که واحد آن باید برابر $(\text{g/cm}^2)^{-1}$ یا (cm^2/g) باشد.

برد در پرتوهای گاما

14

- ارتباط بین μ_L (ضریب تضعیف خطی) و μ_m (ضریب تضعیف جرمی) با معادله زیر داده می شود:

ρ = چگالی ماده

$$\mu_L \text{ cm}^{-1} = \mu_m \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \times \rho \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

- ضریب تضعیف عبارت است از کسری از باریکه پرتو گاما که در طی گذار از واحد ضخامت ماده ناپدید می شود، و معادله معرف آن چنین است:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta I / I}{\Delta t} = -\mu$$

- که در آن $\Delta I / I$ کسری از پرتو گاما است که در طی عبور از ماده به ضخامت Δt ناپدید می شود.

برد در پرتوهای گاما

15

- جدول زیر مقادیری از ضرایب تضعیف خطی (μ_L) و چگالی چند ماده نشان می دهد:

TABLE 5-3. Linear Attenuation Coefficients, cm^{-1}

	$\rho, (\text{g/cm}^3)$	QUANTUM ENERGY (MeV)												
		0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	1.5	2	3	5	8	10
C	2.25	0.335	0.301	0.274	0.238	0.196	0.159	0.143	0.117	0.100	0.080	0.061	0.048	0.044
Al	2.7	0.435	0.362	0.324	0.278	0.227	0.185	0.166	0.135	0.117	0.096	0.076	0.065	0.062
Fe	7.9	2.72	1.445	1.090	0.838	0.655	0.525	0.470	0.383	0.335	0.285	0.247	0.233	0.232
Cu	8.9	3.80	1.830	1.309	0.960	0.730	0.581	0.520	0.424	0.372	0.318	0.281	0.270	0.271
Pb	11.3	59.7	20.8	10.15	4.02	1.64	0.945	0.771	0.579	0.516	0.476	0.482	0.518	0.552
Air	1.29×10^{-3}	1.95×10^{-4}	1.73×10^{-4}	1.59×10^{-4}	1.37×10^{-4}	1.12×10^{-4}	9.12×10^{-5}	8.45×10^{-5}	6.67×10^{-5}	5.75×10^{-5}	4.6×10^{-5}	3.54×10^{-5}	2.84×10^{-5}	2.61×10^{-5}
H ₂ O	1	0.167	0.149	0.136	0.118	0.097	0.079	0.071	0.056	0.049	0.040	0.030	0.024	0.022
Concrete ^a	2.35	0.397	0.326	0.291	0.251	0.204	0.166	0.149	0.122	0.105	0.085	0.067	0.057	0.054

^aOrdinary concrete of the following composition: 0.56% H, 49.56% O, 31.35% Si, 4.56% Al, 8.26% Ca, 1.22% Fe, 0.24% Mg, 1.71% Na, 1.92% K, 0.12% S.

Source: From White G. *X-ray Attenuation Coefficients*. Washington, DC: US Government Printing Office; 1952. NBS Report 1003.

برد در پرتوهای گاما

16

- مثال: الف) ضخامت ماده از نوع آلومینیوم و سرب چقدر باید باشد تا ۱۰٪ از باریکه ظریفی از تابش گاما به انرژی ۱ Mev عبور دهد؟
با توجه به جدول اسلاید قبلی، ضریب μ_L برای AL برابر 0.435 cm^{-1} و برای Pb 59.7 cm^{-1} است.

برای آلومینیوم داریم:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu t} = \frac{1}{10} = e^{-(0.435 \text{ cm}^{-1})(t \text{ cm})}$$
$$\ln 10 = 0.435 t$$
$$t = \frac{\ln 10}{0.435} = \frac{2.3}{0.435} = 5.3 \text{ cm Al}$$

به همین ترتیب، برای سرب هم خواهیم داشت:

در این مرحله برای انتخاب حفاظ هزینه راهبری را در نظر بگیرید.

$$\frac{1}{10} = e^{-(59.7 \text{ cm}^{-1})(t \text{ cm})}$$
$$t = \frac{2.3}{59.7 \text{ cm}^{-1}} = 0.04 \text{ cm Pb}$$

ب) در این مثال، ضخامت چگالشی AL و Pb را در هر قسمت مقایسه کنید. ضخامت چگالشی AL برای فوتونهای ۱ Mev $\therefore$

$$t_d(\text{Al}) = 2.7 \text{ g/cm}^3 \times 5.3 \text{ cm} = 14.3 \text{ g/cm}^2 \text{ and}$$
$$t_d(\text{Pb}) = 11.34 \text{ g/cm}^3 \times 0.04 \text{ cm} = 0.45 \text{ g/cm}^2.$$

برد در پرتوهای گاما

17

- (ب) مثال اسلاید قبل برای محاسبه پرتو گامای با انرژی 1 Mev تکرار کنید. ضریب μ_L برای AL برابر 0.166 و برای Pb برابر 0.771 است.

- ضخامت آلومینیوم:

$$\frac{1}{10} = e^{-(0.166 \text{ cm}^{-1})(t \text{ cm})}$$

$$t = 13.9 \text{ cm Al}$$

- ضخامت سرب:

$$\frac{1}{10} = e^{-(0.771 \text{ cm}^{-1})(t \text{ cm})}$$

$$t = 3 \text{ cm Pb.}$$

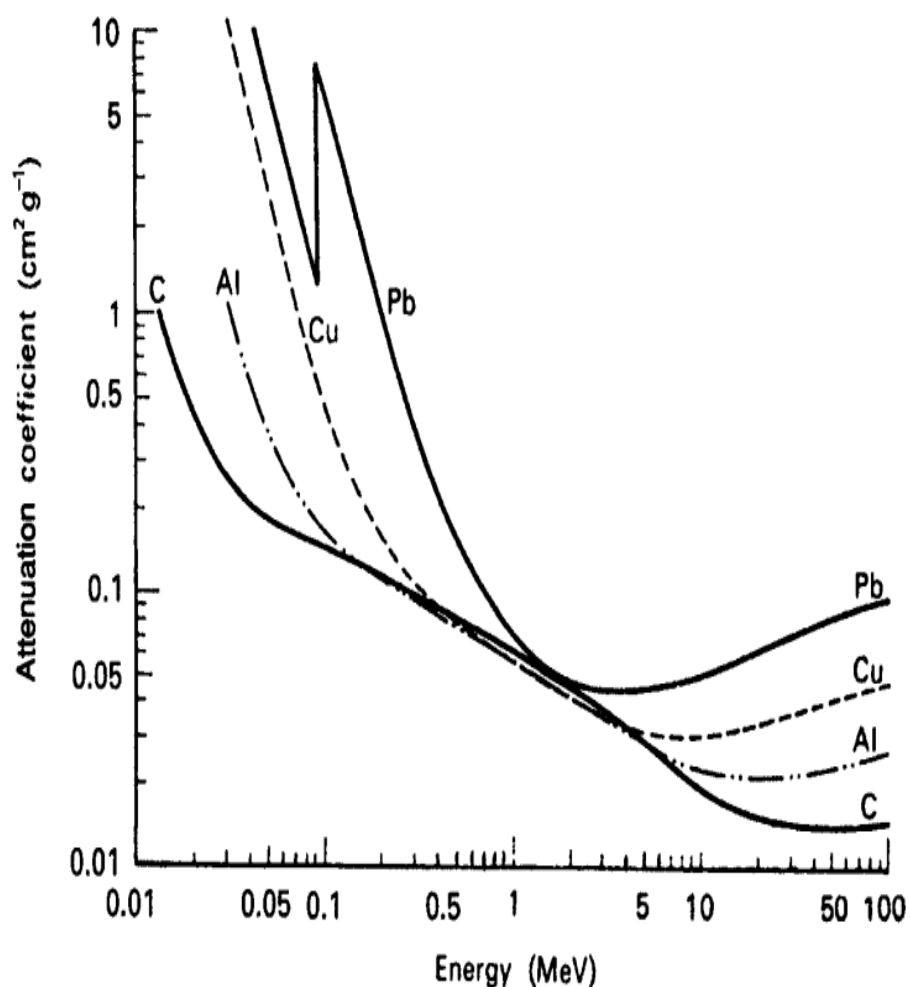
در مورد فوتونهای با انرژی 1 Mev ضخامت چگالشی AL و Pb :

$$t_d(\text{Al}) = 2.7 \text{ g/cm}^3 \times 13.9 \text{ cm} = 37.5 \text{ g/cm}^2$$

$$t_d(\text{Pb}) = 11.34 \text{ g/cm}^3 \times 3 \text{ cm} = 34 \text{ g/cm}^2.$$

برد در پرتوهای گاما

18



- این مثال نشان می دهد که از نظر جرم (یا ضخامت چگالشی)، برتری سرب بر آلومینیوم برای پرتو گامای پرانرژی، اندک است. اما از سوی دیگر، در فوتونهای کم انرژی، قدرت جذب سرب برتری انکارناپذیری بر آلومینیوم دارد.
- به طور کلی از لحاظ جرم، برای انرژی های بین حدود ۰/۷۵ تا ۵ Mev، خواص تضعیفی تمام مواد در مقابل پرتو گاما تقریباً یکسان است. بنابراین در تقریب اول در این گستره انرژی، خواص حفاظتی مواد تقریباً متناسب با چگالی آنهاست.
- بنابراین برای انرژیهای پایین تر و بالاتر از این گستره، مواد جاذب با اعداد اتمی بالا از مواد با اعداد اتمی پایین موثرتر است.

لایه نیم کننده و یک دهم کننده

19

- لایه نیم ارزش (Half Value Layer, HVL) یا لایه نیم کننده به عنوان ضخامت یک حفاظ تعریف می شود که سطح تابش اولیه را به نصف می رساند،

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} = e^{-\mu t}$$

- ضخامت سپر لازم برای کاهش شدت پرتو، در شرایط هندسه خوب، به نصف از معادله زیر محاسبه می گردد:

$$\ln \frac{1}{2} = -0.693 = -\mu t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} = \text{HVL}.$$

- هنگام محاسبه ضخامت حفاظ، ممکن است تعیین تعداد HVL های مورد نیاز برای کاهش تابش به سطح مورد نظر راحت باشد.

- مثال: برای محاسبه تعداد HVL آلومینیوم برای کاهش سطح پرتو گاما به میزان ۱ Mev به ۱۰٪، از معادله زیر بدست می آید:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{10} = \frac{1}{2^n}$$
$$n = 3.3 \text{ HVLs}$$

$$\text{HVL} = \frac{0.693}{\mu_1} = \frac{0.693}{0.166 \text{ cm}^{-1}} = 4.17 \text{ cm Al.}$$

Therefore,

$$\text{Shield thickness} = 3.3 \text{ HVL} \times 4.17 \frac{\text{cm Al}}{\text{HVL}} = 13.8 \text{ cm Al.}$$

لایه نیم کننده و یک دهم کننده

20

TABLE 10-7. Primary Barrier Tenth Value Layers (TVLs) for Ordinary Concrete (2.35 g/cm^3), Steel (7.87 g/cm^3) and Lead (11.35 g/cm^3)

ENDPOINT ENERGY	MATERIAL	TVL ₁ (cm)
4	Concrete	35
	Steel	9.9
	Lead	5.7
6	Concrete	37
	Steel	10
	Lead	5.7
10	Concrete	41
	Steel	11
	Lead	5.7
15	Concrete	44
	Steel	11
	Lead	5.7
18	Concrete	45
	Steel	11
	Lead	5.7
20	Concrete	46
	Steel	11
	Lead	5.7
25	Concrete	49
	Steel	11
	Lead	5.7
30	Concrete	51
	Steel	11
	Lead	5.7
Co-60	Concrete	21
	Steel	7.0
	Lead	4.0

- محافظی که یک پرتو تشعشع را تا 10 درصد سطح تابش اولیه آن کاهش می دهد، لایه دهم ارزشی یا یک دهم کننده نامیده می شود که با TVL نشان داده می شود.
- مفاهیم HVL و TVL (Tenth Value Layer) به طور گسترده در طراحی حفاظ استفاده می شود .
- جدول روبه رو TVL های بتن معمولی، فولاد و سرب را برای پرتوهای ایکس با چندین انرژی فهرست می کند.

نوترونها

21

Energy range	Classification		Energy range for neutron scattering
	Nuclear physics	Neutron scattering	
<1 keV	Slow	Ultra cold	<0.1 meV
		Very cold	0.1–0.5 meV
		Cold	0.5–5 meV
		Thermal	5–100 meV
		Epithermal or hot	0.1–1 eV
		Resonant	1–100 eV
1 keV–0.5 MeV	Intermediate		
0.5–10 MeV	Fast		
10–50 MeV	Very fast		
50 MeV–10 GeV	High energy or ultra fast		
>10 GeV	Relativistic		

- از آنجا که نوع واکنشی که نوترون انجام می دهند قویا به انرژی وابسته است، نوترونها را بر حسب انرژییشان به صورت زیر تقسیم بندی می کنند:
- نوترونهای آهسته (فوق العاده سرد، خیلی سرد، سرد، حرارتی، فوق حرارتی و تشدیدي)
- نوترونهای میانی
- نوترونهای سریع
- نوترونهای خیلی سریع
- نوترونهای انرژی بالا یا فوق العاده سریع
- نوترونهای نسبی گرا

روشهای برهمکنش نوترون با ماده

22

- **برخوردهای از نوع پراکندگی (Scatter neutron):** این برخورد به دو شکل زیر تقسیم بندی می شوند:

- پراکندگی کشسان (آلاستیک)

- پراکندگی غیرکشسان (غیر آلاستیک)

- **برخوردهای از نوع گیراندازی (Capture neutron):** این نوع برخوردها عمدتاً شامل چهار دسته اند:

- جذب (Absorber)

- پرتوزا کردن یا فعالسازی نوترونی (Activation)

- شکافت (Fission)

- هم جوشی (Fusion)

پراکندگی کشسان

23

- در برخورد کشسان (آلاستیک) نوترونهای سریع و خیلی سریع بخشی از انرژی خود را به هسته منتقل نموده اما جذب نمی شود که نتیجه آن پراکنده شدن نوترون می شود (همانند برخورد دو توپ بلیارد بر همدیگر).
- در برخورد کشسان ماهیت ماده تغییر نمی کند.
- در برخورد کشسان بیشترین تاثیر در مواد با هسته های سبک (عدد اتمی پایین) مشاهده می شود.
- مواد غنی از هیدروژن مانند آب، پلی اتیلن، دوتریم یا پارافین برای این نوع برخورد مناسب است. این مواد انرژی نوترون ها را از طریق انتقال انرژی جنبشی کاهش می دهند و برای کندسازی نوترونها از این مواد استفاده می شوند.
- این مواد به دلایل زیر مناسب هستند:
 - جرم مشابه نوترونها: هسته هیدروژن هسته مشابه با نوترون دارند. در برخوردهای کشسان اگر دو جسم جرم مشابهی داشته باشد، انتقال انرژی بهینه رخ می دهد و بخش زیادی از انرژی خود را به پروتون منتقل کرده و سرعتش کاهش می یابد.
 - سطح مقطع بالای برخورد: هیدروژن دارای سطح مقطع بالایی برای برخورد کشسان با نوترون است. به این معنی احتمال تعامل نوترونها با هسته هیدروژن بالاتر است.
 - کاهش سریع انرژی نوترون ها: به دلایل بالا، مواد غنی از هیدروژن می توانند نوترونها را به سرعت به انرژی پایین تر (نوترون حرارتی) کاهش دهد. که این امر در فرآیندهای مانند راکتورهای هسته ای بسیار مفید است.

پراکندگی غیرکشسان

24

- در پراکندگی غیرکشسان، نوترونهای با انرژی بالا (معمولاً بالاتر از تقریباً یک مگا الکترون ولت) بخشی بیشتری از انرژی خود را به هدف منتقل می کنند و خود با انرژی کمتری پراکنده می شوند (همانند برخورد گل تر با یک دیوار). در این حالت هسته ماده به حالت برانگیخته وارد می شود.
- موادی با عدد اتمی بالا، همانند اورانیوم، آهن و سرب، کربن در پراکندگی غیرکشسان موثر هستند. این مواد به دلیل سطح مقطع بالای خود برای تعاملات غیرکشسان می توانند نوترونها را تحریک کرده و انرژی جنبشی آنها را به انرژی داخلی هسته تبدیل کنند.
- هسته کربن به دلیل توانایی جذب انرژی نوترون یکی از مواد رایج در پراکندگی غیرکشسان می باشد (به عنوان کننده در راکتورهای هسته ای مانند گرافیت به کار می رود).
- هسته آهن توانایی بالایی در برانگیختگی دارد و انرژی نوترون ها را به خوبی جذب می کند (در ساخت تجهیزات صنعتی برای کاهش شدت تابش و پراکندگی استفاده می شود).
- هسته سرب با عدد جرمی بالا توانایی کاهش انرژی نوترونها را دارد و پس از پراکندگی غیرکشسان، پرتو گاما را منتشر می کند (در حفاظ های ترکیبی برای کاهش تابش نوترونی و گاما کاربرد دارد).
- هسته اکسیژن، در موادی مانند آب توانایی در شرکت در فرآیندهای غیرکشسان دارد.

تفاوت پراکندگی کشسان و غیر کشسان

25

• در پراکندگی کشسان:

- **حفظ انرژی کل:** انرژی جنبشی کل نوترون و هسته پس از برخورد ثابت می ماند و فقط ممکن است توزیع انرژی بین نوترون و هسته تغییر کند.
- **عدم تحریک هسته:** هسته هدف در این تعامل تحریک نمی شود و در همان حالت پایه باقی می ماند.
- **کاربرد:** از پراکندگی کشسان برای کاهش انرژی نوترونها (کنندکنندگی) در موادی مانند آب یا گرافیت استفاده می شود.
- **محتملترین برهمکنش کشسان بین نوترونها و مواد در شرایطی با مواد با عدد اتمی پایین رخ می دهد.**
- **هسته ضربه دیده، پس از دریافت بخش انرژی جنبشی به صورت یک ذره یوننده در می آید، و انرژی جنبشی اش را با ایجاد برانگیزش و یونش در ماده از دست می دهد.**

• در پراکندگی غیر کشسان:

- **از دست رفتن انرژی جنبشی کل:** بخش از انرژی جنبشی نوترون به انرژی داخلی هسته تبدیل می شود. این باعث تحریک هسته به یک حالت انرژی بالاتر می شود.
- **انتشار پرتو:** پس از تحریک، هسته به حالت پایه بر می گردد و در این فرآیند از طریق پرتو گاما، آلفا و یا شکافت انرژی خود را از دست می دهد.
- **محتملترین برهمکنش غیر کشسان بین نوترونها و مواد در شرایطی با مواد با عدد اتمی بالا رخ می دهد.** انرژی آستانه نوترون در برهمکنش ناکشسان از بی نهایت برای هیدروژن (پراکندگی ناکشسان با هیدروژن قابل تحقق نیست) تا حدود 6 Mev برای اکسیژن و تا کمتر از 1 Mev برای اورانیوم در تغییر است.

برخوردهای پراکندگی کشسان

26

- میانگین کاهش لگاریتمی انرژی ناشی از برخورد کشسان چنین تعریف می شود:

$$\frac{E}{E_0} = e^{-\xi}$$

$$\xi = 1 + \frac{\alpha \ln \alpha}{1 - \alpha}$$

$$\alpha = [(M - m) / (M + m)]^2$$

E_0 = انرژی نوترون فرودی، E = انرژی نوترون پس از برخورد، m = جرم نوترون فرودی، M = جرم هسته پراکنده

- کسر متوسط انرژی نوترون فرودی که در خلال یک برخورد پراکندگی کشسان به هسته هدف منتقل می شود، چنین خواهد بود:

$$f = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - e^{-\xi}$$

- بدین ترتیب در مورد هیدروژن ($f=1$) مقدار متوسط انتقال انرژی در برخورد با یک نوترون تند برابر ۶۳٪ انرژی جنبشی نوترون می شود، در حالی که در مورد کربن ($f=0.159$) به طور متوسط انتقال انرژی جنبشی نوترون در حدود ۱۴/۷٪ هستند که در برخورد کشسان با نوترون شرکت دارد.

گیراندازی (جذب و پرتوزا کردن)

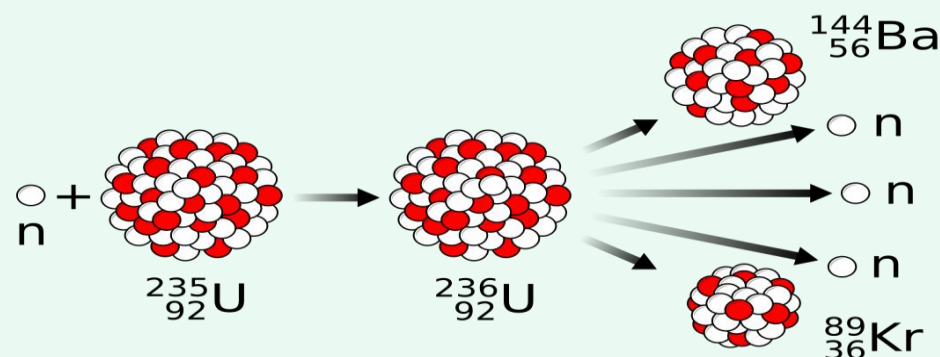
27

- در برخورد از نوع جذب، نوترونهای حرارتی جذب هسته هدف می شوند. پس از جذب هسته ها ممکن است ناپایدار شوند و ایزوتوپ پرتوزا تولید کند که آن در **پرتوزا کردن** یا **فعالسازی نوترونی (Activation)** می نامند که در نوترونهای حرارتی تا نوترونهای میانی رخ می دهد.
- به عنوان مثال **جذب نوترون حرارتی** توسط **^{10}B** ، ذره آلفا و مقداری انرژی تجزیه می شود. بور به دلیل داشتن سطح مقطع بالا برای نوترونهای حرارتی به طور گسترده ای در راکتورهای هسته ای و سپرهای حفاظتی استفاده می شود. و در فرآیندهایی مانند کنترل واکنشهای زنجیره ای هسته ای بسیار موثر است.
- یا جذب نوترون توسط کادمیوم (^{111}Cd) باعث تشکیل یک هسته برانگیخته می شود که می تواند پرتو گاما ساطع کند.

گیراندازی (شکافت و هم جوشی)

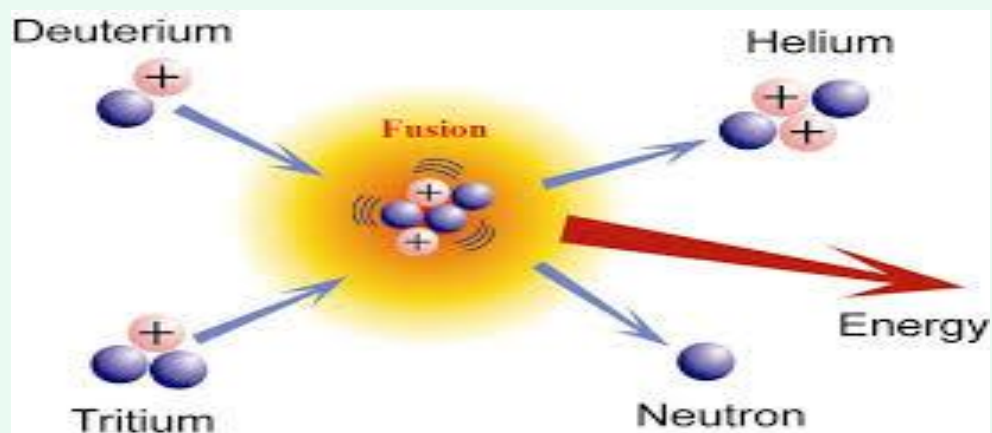
28

• برخورد شکافت (Nuclear Fission)



در این برخورد، یک نوترون حرارتی یا سریع (بستگی به نوع نوترون و هسته هدف) جذب یک اتم سنگین نظیر اورانیوم ۲۳۵ (جذب نوترون حرارتی) و اورانیوم ۲۳۸ (جذب نوترونهای سریع) شده و آنرا به دو پاره سبکتر و تعدادی نوترون و ذرات باردار تقسیم می کند.

• برخورد هم جوشی (Nuclear Fusion)



هم جوشی هسته ای ترکیب دو هسته سبک تر (مانند دوتریم و تریتیوم) برای تشکیل هسته سنگین تر، تشکیل نوترونهای سریعتر و آزاد سازی مقدار زیادی انرژی است. نوترون ها به طور مستقیم در هم جوشی هسته ای شرکت نمی کنند، اما نقش کلیدی در فرآیندهای مرتبط با آن دارند.

روشهای برهمکنش نوترون با ماده

29

- هنگامی که ماده را در مقابل باریکه ای موازی (در شرایط خوب هندسی) از نوترونها قرار می دهیم و مانند پرتوهای گاما شدت نوترونهای عبوری را اندازه گیری می کنیم، ملاحظه می شود که **نوترونها هم به طورنمایی از باریکه محو می شوند.**
- برای توصیف توانایی یک ماده در مسیر حرکت نوترونها از باریکه، به جای استفاده از ضرایب جذب جرمی یا خطی، معمولاً **فقط سطح مقطع میکروسکوپیک σ ماده جاذب** رامشخص می کنند.
- سطح مقطع ماکروسکوپیک (Σ) از حاصلضرب σN که در آن N تعداد اتمهای جاذب در هر cm^3 است، به دست می آید.
- بدین ترتیب، شدت نوترونهای خارج شده از باریکه را به صورت **رو به رو** تعیین می کنند.
- نکته: سطح مقطع نوترون، شدیداً وابسته به انرژی است.
- اگر نوترون بتواند با بیش از یک ساز و کار (برخوردها از نوع پراکندگی و گیراندازی) از باریکه خارج شود، سطح مقطع کل را به صورت حاصل جمع سطح مقطعی همه واکنشهای ممکن در نظر می گیرند.

$$I = I_0 e^{-\sigma N t}$$

روشهای برهمکنش نوترون با ماده

30



- لینک زیر مربوط به میزان سطح مقطع میکروسکوپی برهمکنش پرتو نوترون در ماده براساس جدول تناوبی است:

[JENDL-4.0](#)

NOTICE:

The users are requested to cite the [No.1 of the papers](#) given below for referencing JENDL-4.0.

Summary of JENDL-4.0

Purpose	To provide a Japanese standard library for fast breeder reactors, thermal reactors, fusion neutronics and shielding calculations, and other applications.
Number of nuclides	406
Incident neutron energy range	10^{-5} eV to 20 MeV
Format	ENDF-6 Format.
Pointwise files	prepared at 0K and 300K with LINEAR, RECENT and SIGMA1 (accuracy=0.1%)

Details of JENDL-4.0 (numerical data, descriptions, figures and tables of cross sections)

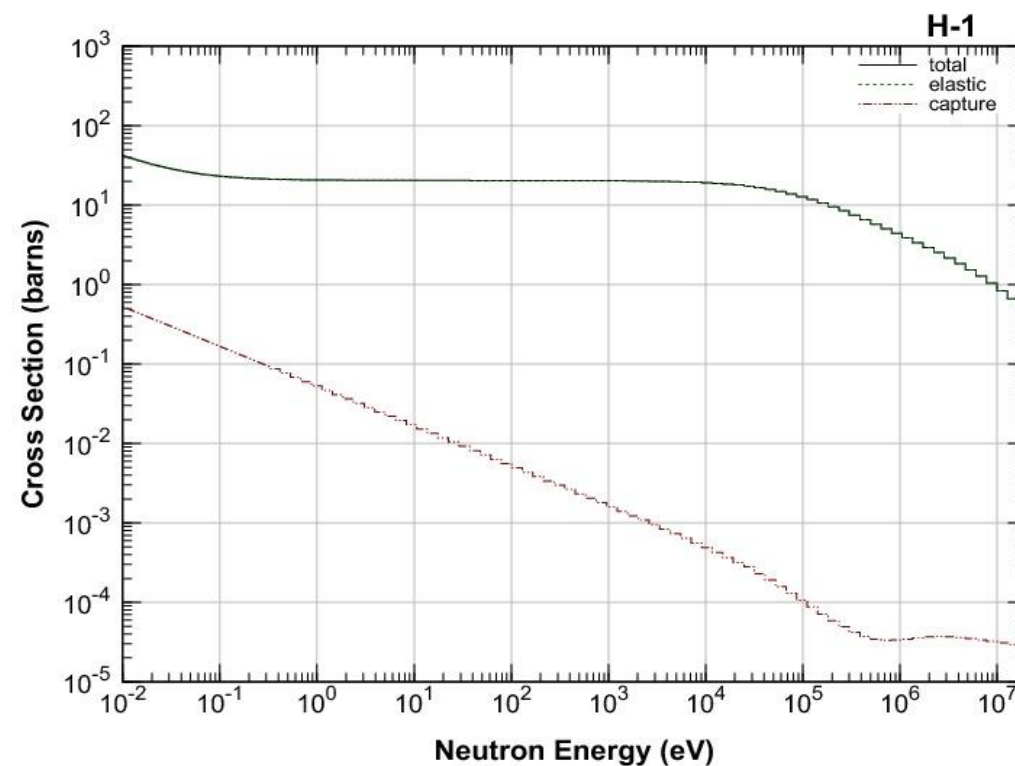
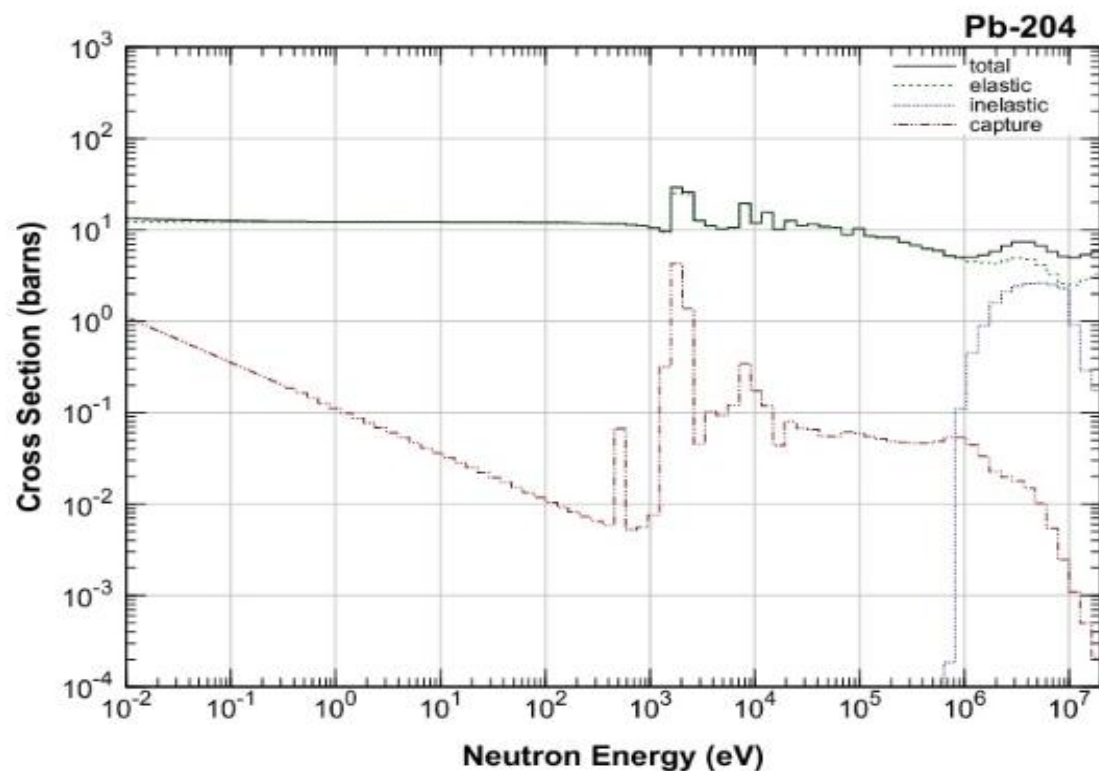
• Neutron Reaction Sublibrary

1. H	2. He	3. Li	4. Be	5. B	6. C	7. N	8. O	9. F	10. Ne
11. Na	12. Mg	13. Al	14. Si	15. P	16. S	17. Cl	18. Ar	19. K	20. Ca
21. Sc	22. Ti	23. V	24. Cr	25. Mn	26. Fe	27. Co	28. Ni	29. Cu	30. Zn
31. Ga	32. Ge	33. As	34. Se	35. Br	36. Kr	37. Rb	38. Sr	39. Y	40. Zr
41. Nb	42. Mo	43. Tc	44. Ru	45. Rh	46. Pd	47. Ag	48. Cd	49. In	50. Sn
51. Sb	52. Te	53. I	54. Xe	55. Cs	56. Ba	57. La	58. Ce	59. Pr	60. Nd
61. Pm	62. Sm	63. Eu	64. Gd	65. Tb	66. Dy	67. Ho	68. Er	69. Tm	70. Yb
71. Lu	72. Hf	73. Ta	74. W	75. Re	76. Os	77. Ir	78. Pt	79. Au	80. Hg
81. Tl	82. Pb	83. Bi	84. Po	85. At	86. Rn	87. Fr	88. Ra	89. Ac	90. Th
91. Pa	92. U	93. Np	94. Pu	95. Am	96. Cm	97. Bk	98. Cf	99. Es	100. Fm

روشهای برهمکنش نوترون با ماده

31

- نمودار سطح مقطع میکروسکوپی در برهمکنش نوترون با سرب ^{204}Pb و هیدروژن ^1H در انرژی های مختلف



روشهای برهمکنش نوترون با ماده

32

- مثال: برای حفاظ گذاری نوترونها با انرژی ۱۰ Mev از ۱ سانتیمتر سرب استفاده شده است. وزن اتمی سرب برابر با ۲۰۷/۲۱ گرم بر مول و چگالی آن ۱۱/۳ گرم بر سانتیمتر مکعب است. شار نوترونها چند درصد کاهش می یابد؟ $\sigma = 5.1$

$$\rho_{\text{atomic}} = \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ atoms/mol}}{207.21 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \times 11.3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 3.3 \times 10^{22} \frac{\text{atoms}}{\text{cm}^3}$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\sigma N t}$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\sigma N t$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = - \left(5.1 \times 10^{-24} \frac{\text{cm}^2}{\text{atom}} \times 3.3 \times 10^{22} \frac{\text{atoms}}{\text{cm}^3} \times 1 \text{ cm} \right) = 0.168 \text{ cm}^{-1}$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = 0.168 \text{ cm}^{-1}$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-0.168} = 0.845$$

طول پخش سریع و حرارتی در نوترونها

33

- قابل ذکر است که با توجه به برهمکنش بین نوترونها و ماده می توان نتیجه گرفت که نوترونها با انرژی بالا در ابتدا از طریق پراکندگی انرژی از دست داده و نوترونها کنده شده و سپس به نوترونهای حرارتی تبدیل شده و در انتها در ماده گیراندازی می گردد.
- **طول پخش سریع یا طول کند سازی (Thermal Diffusion Length)** به مسافتی اشاره دارد که نوترونهای پرانرژی (نوترونهای سریع) در ماده طی می کنند تا انرژیشان کاهش یابد و به نوترونهای حرارتی تبدیل گردند.
- **طول پخش حرارتی (Thermal Diffusion Length)** به مسافتی اشاره دارد که نوترونهای کم انرژی (نوترونهای حرارتی) در ماده طی می کند تا اینکه جذب شود. به عبارت دقیقتر طول پخش حرارتی به صورت ضخامتی از محیط تعریف می شود که بتواند باریکه ای از نوترونهای گرمایی را به اندازه $63/2\%$ تضعیف کند.

طول پخش سریع و حرارتی در نوترونها

34

- مقادیر طول پخش سریع و حرارتی و ضریب پخش نوترونها برای چند نوع محیط کند ساز در جدول زیر نشان داده شده است.

TABLE 5-7. Fast and Thermal Diffusion Lengths of Selected Materials

SUBSTANCE	FAST DIFFUSION LENGTH (cm)	THERMAL DIFFUSION LENGTH (cm)	DIFFUSION COEFFICIENT (cm)
H ₂ O	5.75	2.88	0.16
D ₂ O	11	171	0.87
Be	9.9	24	0.50
C (graphite)	17.3	50	0.84

طول پخش سریع و حرارتی در نوترونها

35

- معادله شدت نوترونهاى خارج شده ($\emptyset$) از ماده، نشان دهنده مقدار جريان نوترونها (تعداد نوترونها در واحد زمان و سطح)، است كه از سطح ماده خارج مى شوند. حل اين معادله به ما كمك مى كند تا شدت نوترونهايى كه از ماده فرار مى كنند را تعيين كنيم.
- در مورد يك چشمه نقطه اى، به شدت n_0 نوترون در هر ثانيه (S) كه در محيطى بدون تكثير (محيطى كه ماده شكافت پذير ندارد) و كروى شكل، شار نوترونهاى سريع خارج شده از سطح كره عبارت است از

$$\phi_f = \frac{S}{4\pi RD} \cdot e^{-R/L_f}$$

S = تعداد نوترون در هر ثانيه

R = شعاع كره

LF = طول پخش تند

D = ضريب پخش

شار نوترونهاى حرارتى خارج شده از سطح كره عبارت است از :

LF = طول پخش سريع

L_{th} = طول پخش حرارتى

R = شعاع كره

L = طول پخش گرمائى

D = ضريب پخش

$$\phi_{th} = \frac{SL^2}{4\pi RD[L^2 - (L_f)^2]} \cdot \left(e^{-\frac{R}{L_{th}}} - e^{-\frac{R}{L_f}} \right)$$

طول پخش سریع و حرارتی در نوترونها

36

- مثال: چشمه نوترونی از **PU-Be** (پلوتونیوم - بریلیوم) که در هر ثانیه تعداد 10^6 نوترون گسیل می کند. در مرکز یک حفاظ کروی از آب به قطر ۵۰ cm قرار گرفته است. در هر ثانیه از هر سانتیمتر مربع سطح حفاظ، چند نوترون سریع و حرارتی خارج می شود؟

چون شعاع حفاظ آب خیلی بزرگتر از طول پخش سریع مندرج در جدول بالا است، بنابراین تقریباً همه نوترونهاى تند به نوترونهاى حرارتی در می آیند. در نتیجه شار نوترونهاى سریع برابر است با:

$$\phi_f = \frac{S}{4\pi RD} \cdot e^{-R/L_f}$$

$$\phi_f = \frac{10^6 \frac{\text{neutrons}}{\text{s}}}{4\pi (25 \text{ cm}) \cdot 0.16 \text{ cm}} e^{-\frac{25 \text{ cm}}{5.75 \text{ cm}}} = 3.4 \frac{\text{neutrons/s}}{\text{cm}^2}$$

شار نوترونهاى سریع خارج شده از سطح کره عبارت است از

S = تعداد نوترون در هر ثانیه

R = شعاع کره

LF = طول پخش تند

D = ضریب پخش

$$\phi_{th} = \frac{SL^2}{4\pi RD[L^2 - (L_f)^2]} \cdot \left(e^{-\frac{R}{L_{th}}} - e^{-\frac{R}{L_f}} \right) \quad \phi_{th} = \frac{10^6 \frac{\text{neutrons}}{\text{s}} \cdot (2.88 \text{ cm})^2}{4 \cdot \pi \cdot 25 \text{ cm} \cdot 0.16 \text{ cm} \cdot [(2.88 \text{ cm})^2 - (5.75 \text{ cm})^2]} \cdot \left(e^{-\frac{25 \text{ cm}}{2.88 \text{ cm}}} - e^{-\frac{25 \text{ cm}}{5.75 \text{ cm}}} \right)$$

شار نوترونهاى حرارتی عبارت است از:

شار نوترونهاى حرارتی خارج شده از سطح کره عبارت است

LF = طول پخش سریع

L_{th} = طول پخش حرارتی

R = شعاع کره

L = طول پخش گرمایی

D = ضریب پخش

$$\phi_{th} = 85 \frac{\text{neutrons}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

$$\phi = \frac{10^6 \frac{\text{neutrons}}{\text{s}}}{4\pi (25 \text{ cm})^2} = 127 \frac{\text{n}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

برای مقایسه شار بدون آب:

بنابراین کل شار بدون آب با مجموع نوترونهاى حرارتی و سریع به دلیل جذب نوترونها متفاوت است.

جذب پرتوهای نوترون

37

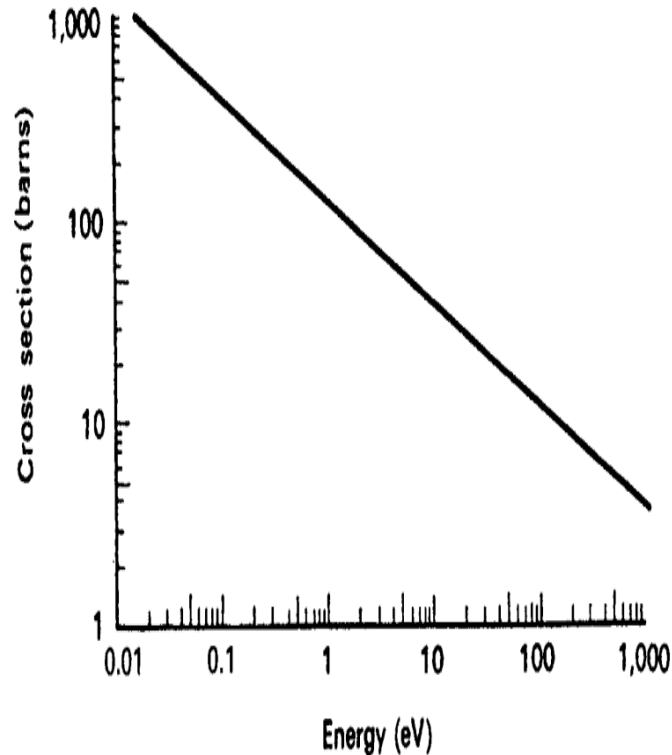


Figure 5-25. Neutron absorption cross sections for boron, showing the validity of the $1/v$ law for neutrons from 0.02 to 1000 eV in energy. The equation for the curve is $\sigma = 116 (eV)^{-1/2}$.

- اگر نوترونهای سریع، با موادی که اعداد اتمی پایین دارند بر هم کنش کنند، به سرعت انرژی شان را از طریق برخورد کشسان از دست می دهند.
- نوترونها هر چه به انرژیهای حرارتی نزدیکتر می شوند، احتمال گیراندازی شان توسط هسته جاذب بیشتر می شود.
- هنگامی که انرژی نوترون خیلی کم می شود، سطح مقطع جذب بسیاری از هسته ها با جذر انرژی جنبشی نوترون، و بنابراین با سرعت نوترون، نسبت عکس پیدا می کند. در جذب نوترونهای کند، این معادله را تحت عنوان (قانون یک روی V) می شناسند.

$$\sigma \propto \frac{1}{\sqrt{E}} \propto \frac{1}{v}$$

- همانطور که در شکل روبه رو مشاهده می شود، این رابطه برای B_{10} از انرژی 0.001 eV تا انرژی 1000 eV معتبر است.

جذب پرتوهای نوترون

38

- اگر سطح مقطع در انرژی E_0 برابر σ_0 باشد، در این صورت در گستره اعتبار قانون $1/v$ ، سطح مقطع در انرژی دیگر E چنین بدست می آید:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{v_0}{v} = \sqrt{\frac{E_0}{E}}$$

- از آنجایی که انرژی نوترون به طور مستقیم با دما تغییر می کند، معادله بالا می تواند به صورت نوشته شود

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{v_0}{v} = \sqrt{\frac{T_0}{T}}$$

where $T_0 = 293 \text{ K}$.

- مثال: سطح مقطع بور در واکنش ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ برای نوترونهای 0.025 eV برابر 753 b است. سطح مقطع بور برای نوترونهای 50 eV چقدر است؟

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{v_0}{v} = \sqrt{\frac{E_0}{E}}$$

$$\sigma (50 \text{ eV}) = 753 \text{ b} \sqrt{\frac{0.025 \text{ eV}}{50 \text{ eV}}} = 16.8 \text{ b}$$