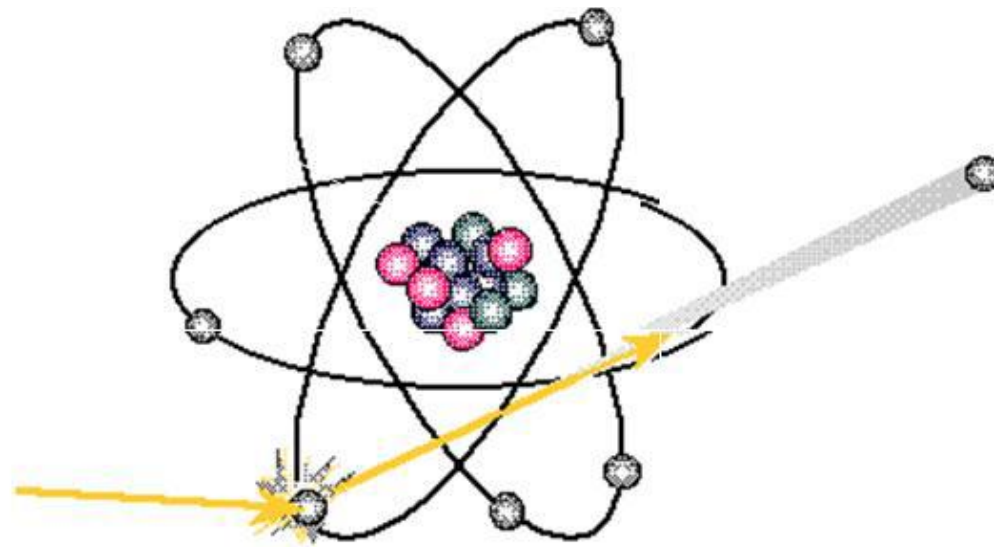


بهداشت پرتوها

کارشناسی پیوسته بهداشت حرفه ای

دانشگاه علوم پزشکی ایلام

مبحث – پرتوهای یونساز (واکنش پرتو یونساز با ماده بخش ۱)

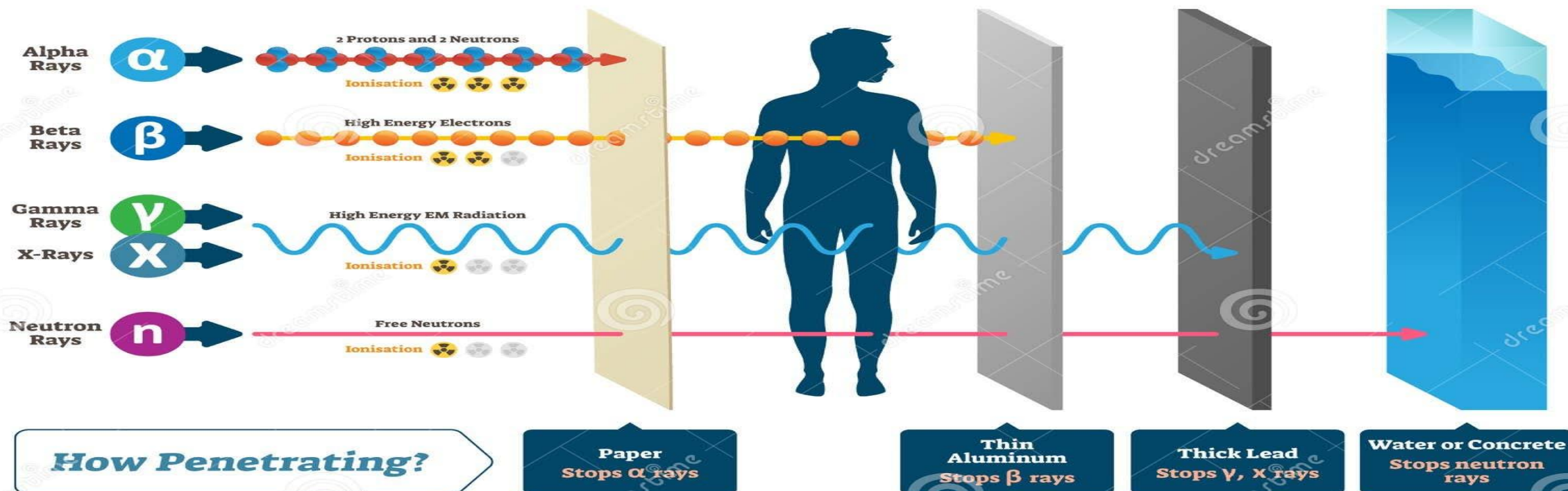


Presented By: Ahmad Mehri

مقایسه ای از برد و یونسازی ذرات و پرتوهای یونساز

2

TYPES OF RADIATION



واکنش پرتوهای یونساز با ماده

3

• احتمال وقوع هر نوع برهم کنش پرتوها با ماده و در نتیجه قدرت نفوذ پرتوها به دو عامل بستگی دارد:

۱- نوع و انرژی پرتو

۲- ماهیت ماده (حفاظ یا جسم در مقابل پرتو)

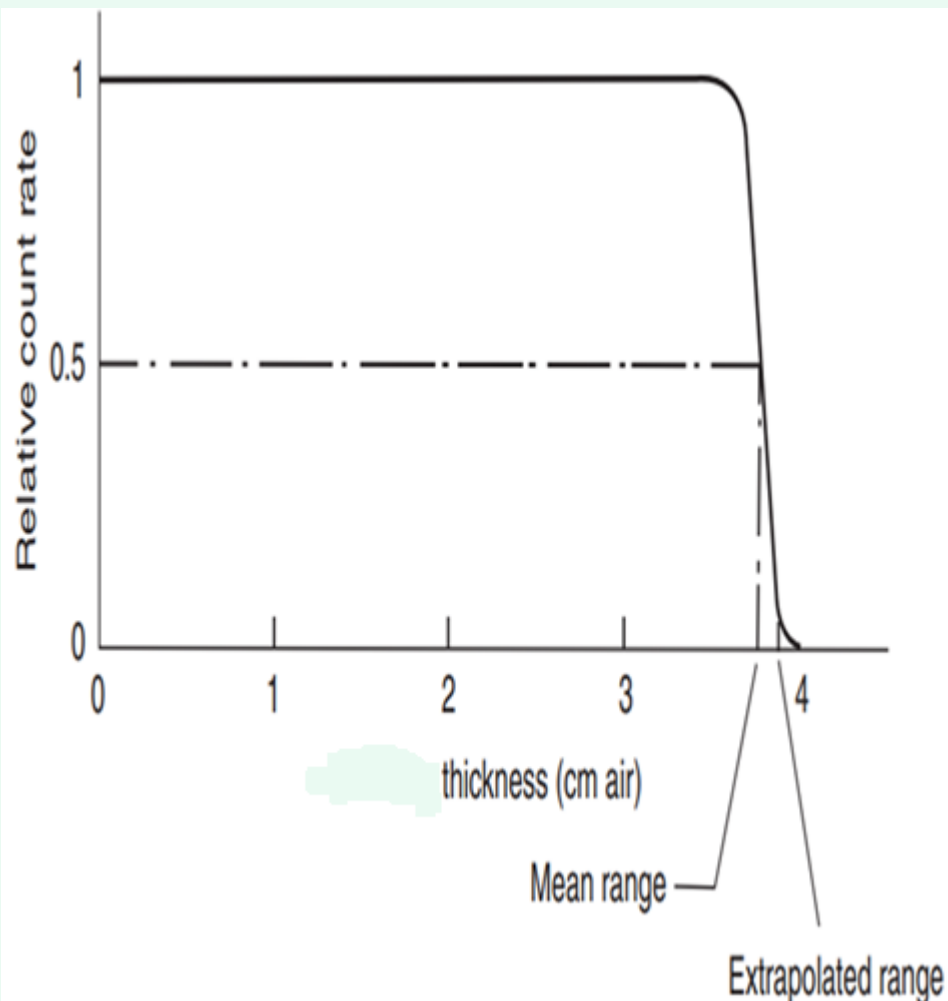
بر همکنش پرتوهای آلفا با ماده

4

- ذره آلفا از دو طریق زیر با ماده برهمکنش می کند:
 - عمدتاً با الکترونهای مداری، ایجاد یونیزاسیون و یا تهییج (برانگیختگی) می کند.
 - بعضی مواقع در انرژی های بالا با هسته اتم برخورد می کند.
- مسیر حرکت آلفا مستقیم است، زیرا جرم آن در مقایسه با الکترونهای مداری بسیار بالاست و در نتیجه منحرف نمی شود و فقط در انتهای مسیرش تفرق پیش می آید.
- پرتو آلفا کم نفوذترین نوع تابش است. برد پرنرژی ترین نوع ذرات آلفایی که از مواد پرتوزا گسیل می شود، فقط در حدود چند سانتی متر در هوا است، و در بافتهای حیوانی این برد در حد میکرون است.

برد (نفوذ پذیری) پرتوهای آلفا در ماده

5



- اصطلاح برد در مورد ذرات آلفا، ممکن است دو تعریف متفاوت داشته باشد:
- برد میانگین (mean range): بردی است که ۵۰ درصد ذرات آلفا از آن عبور می کنند.
- برد برونیابی شده (extrapolated range): با صفر انگاشتن تعداد ذرات آلفای عبور کرده حاصل می شود
- تفاوت میان این دو نوع برد را از روی منحنی جذب ذرات آلفا می توان دریافت.
- منحنی جذب ذرات آلفا اساسا تک انرژی است، بنابراین هر چه ضخامت ماده بیشتر باشد، صرفا انرژی ذرات آلفا که از آن عبور می کنند کاهش می یابد و تا زمانی که ضخامت به برد تقریبی نرسد تعداد ذرات کاهش نمی یابد. در یک نقطه، تعداد ذرات عبور کرده از ماده شدیداً کاهش می یابد.

برد (نفوذ پذیری) در پرتوهای آلفا

6

- متداولترین ماده برای مشخص کردن رابطه برد با توجه به انرژی ذرات آلفا هوا است.
- در هوای صفر درجه سانتیگراد و فشار ۷۶۰ میلیمتر جیوه (یا در شرایط هوای استاندارد)، برای ذرات آلفا انرژی بین ۲ تا ۸ Mev (مگا الکترون ولت) با تقریب ۱۰ درصد رابطه برد با توجه به انرژی بر حسب سانتیمتر از معادله زیر استفاده می گردد:

$$R_a = 0.322 E^{3/2}$$

- با توجه به رابطه برد با توجه به انرژی در هوا، محدوده ذرات آلفا در هر ماده دیگری که جرمی اتمی آن A و چگالی آن ρ است را می توان از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$R_a \times \rho_a \times (A_m)^{0.5} = R_m \times \rho_m \times (A_a)^{0.5}$$

R_a و R_m = برد هوا و ماده به ترتیب (cm)

A_a و A_m = جرم اتمی هوا و ماده

ρ_a و ρ_m = دانسیته هوا و ماده (gr/cm³)

برد (نفوذ پذیری) در پرتوهای آلفا

7

$$R_a \times \rho_a \times (A_m)^{0.5} = R_m \times \rho_m \times (A_a)^{0.5}$$

$$R = 0.322 \times (5.3)^{3/2} = 3.93 \text{ cm}$$

$$R_a = 3.93 \text{ cm},$$

$$A_m = 27,$$

$$A_a = (0.2 \times 16 + 0.8 \times 14)$$

$$\rho_m = 2.7 \text{ g/cm}^3, \text{ and}$$

$$\rho_a = 1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

مثال: چه ضخامتی از فویل آلومینیومی، چگالی ۲/۷ گرم بر سانتی متر

مکعب، برای متوقف کردن ذرات آلفا از ^{210}Po (پلونیوم) لازم است؟

انرژی ذره آلفا ^{210}Po 5.3, 210 مگا الکترون ولت (Mev) است.

R_a و R_m = برد هوا و فویل آلومینیومی به ترتیب (cm)

A_a و A_m = جرم اتمی هوا (۸۰ درصد نیتروژن و ۲۰ درصد اکسیژن) و فویل آلومینیومی

ρ_a و ρ_m = دانسیته هوا و محیط (gr/cm^3)

$$R_m = \frac{R_a \times \rho_a \times (A_m)^{0.5}}{\rho_m \times (A_a)^{0.5}} = \frac{3.93 \text{ cm} \times 1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3 \times (27)^{0.5}}{2.7 \text{ g/cm}^3 \times (0.2 \times 16 + 0.8 \times 14)^{0.5}}$$
$$= 2.58 \times 10^{-3} \text{ cm}.$$

برد (نفوذ پذیری) در پرتوهای آلفا در بافت بدن

8

- از آنجا که ترکیب اتمی موثر بافتهای بدن انسان تفاوت خیلی زیادی با ترکیب هوا ندارد، برای محاسبه برد ذرات آلفا در بافتهای بدن می توان از رابطه روبه رو استفاده کرد:

$$R_a \times \rho_a = R_t \times \rho_t$$

R_t و R_a = برد هوا و بافت بدن

ρ_t و ρ_a = دانسیته هوا و بافت بدن

- مثال: برد ذره آلفای ^{210}Po در بافت بدن انسان چقدر است؟

برد این ذره در هوا، در مثال اسلاید قبلی برابر با $3.93/93$ سانتیمتر بدست آوردیم. با فرض اینکه چگالی بافت بدن برابر با واحد (۱ گرم بر سانتیمتر مکعب) است. بنابراین برد ذره آلفا را چنین بدست می آوریم:

$$R_t = \frac{R_a \times \rho_a}{\rho_t} = \frac{3.93 \text{ cm} \times 1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3}{1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 5.1 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

بر همکنش پرتوهای بتا با ماده

9

برهمکنش پرتوهای بتا با ماده به ۴ طریق رخ می دهد:

۱- ایجاد یونیزاسیون و تحریک یا تهییج (یونش و برانگیزش)

۲- تابش ترمزی

۳- اثر تابش چرنکوف

۴- اثر پس پراکندگی

بر همکنش پرتوهای بتا با ماده (یونش و برانگیزش)

10

- زمانی که پرتو بتا با ماده برهمکنش می کند، میزانی از انرژی پرتو بتا برای ایجاد یونش یا برانگیزش در ماده صرف می گردد و مابقی انرژی به صورت انرژی جنبشی الکترون یا بتا پرتاب می شود.

$$E_k = E_t - \phi$$

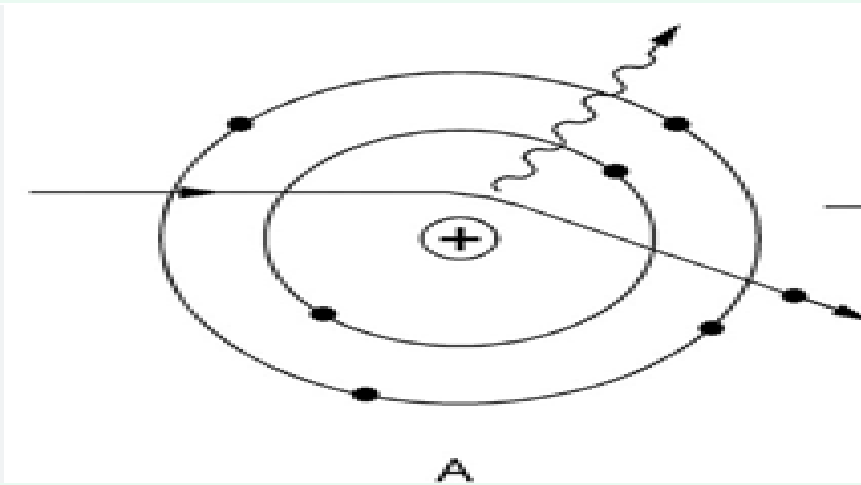
E_k = انرژی جنبشی الکترون یا بتا پرتاب شده

E_t = انرژی ذره بتا در حین برخورد

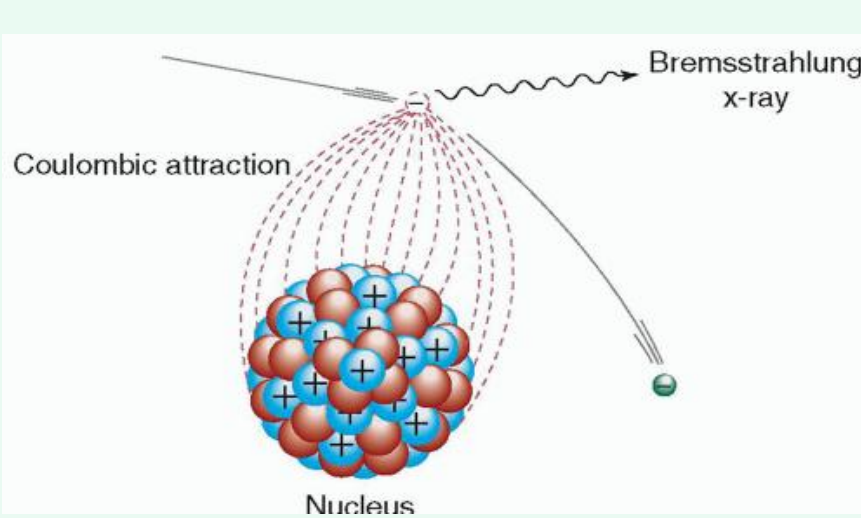
ϕ = پتانسیل یونش ماده

برهمکنش پرتوهای بتا با ماده (تابش ترمزی-Bremsstrahlung)

11



- هنگامی که ذره بتا از نزدیکی یک هسته یک ماده می‌گذرد، نیروی جاذبه قوی کولنی باعث می‌شود که ذره بتا به طور محسوس از مسیر اولیه اش منحرف شود که این تغییر جهت حرکت ذره بتا ناشی از شتاب شعاعی از طریق پرتوهای X گسیل می‌کند.



- این بدان معنی است که فوتونهای تابش ترمزی، توزیع پیوسته ای از انرژی دارند که از یک بیشینه نظری برابر با انرژی جنبشی ذره بتا، به طرف مقادیر کمتر گسترده است.

بر همکنش پرتوهای بتا با ماده (تابش ترمزی)

12

- کسر انرژی بتا که تبدیل به فوتون ایکس خواهد شد به دو عامل بستگی دارد:
 - (الف) **انرژی بتا:** هر چه انرژی پرتو بتا (یا الکترون) بیشتر باشد احتمال تولید فوتون ایکس بیشتر است.
 - (ب) **عدد اتمی ماده:** هر چه اتم سنگین تر باشد احتمال تولید فوتون بیشتر خواهد بود (نیروی جاذبه قوی کولنی).
- به عنوان مثال در مورد برخورد پرتو بتا ناشی از P_{32} محتوی $10^9 \times 4$ بکرل است و در دو محفظه ۲۵ میلی لیتری پلاستیکی و برنجی قرار می گیرند، دز تابش ترمزی در فاصله ۱۰ سانتیمتری از دو محفظه در محفظه برنجی بیش از ۳ برابر محفظه پلاستیکی است.

بر همکنش پرتوهای بتا با ماده (تابش ترمزی)

13

در عملیات برآورد مخاطرات تابش ترمزی ایجاد شده از ماده را می توان از رابطه تقریبی رو به رو استفاده کرد:

$$f_{\beta} = 3.5 \times 10^{-4} Z E_m$$

f_{β} = کسری از انرژی بتای فرودی که به صورت فوتون نمایان می شود

Z = عدد اتمی ماده

E_m = انرژی بیشینه ذرت بتا بر حسب Mev

بر همکنش پرتوهای بتا با ماده (تابش ترمزی)

14

$$\phi = \frac{f E_{\beta}}{4\pi r^2 E_{\max}}$$

$$f_{\beta} = 3.5 \times 10^{-4} Z E_m$$

$$f = 3.5 \times 10^{-4} \times 82 \times 1.71 = 0.049$$

$$E_{\beta} \text{ (MeV/s)} = \frac{1}{3} \frac{E_{\max} \text{ MeV}}{\beta} \times 3.7 \times 10^{10} \frac{\beta}{\text{s}}$$

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{f E_{\beta}}{4\pi r^2 E_{\max}} \\ &= \frac{0.049 \times \frac{1}{3} \times 1.71 \frac{\text{MeV}}{\beta} \times 3.7 \times 10^{10} \frac{\beta}{\text{s}}}{4\pi \times (10 \text{ cm})^2 \times 1.71 \text{ MeV/photon}} = 4.8 \times 10^5 \frac{\text{photons/s}}{\text{cm}^2} \end{aligned}$$

• مثال: چشمه بسیار کوچکی (از لحاظ فیزیکی) از ^{32}P با فعالیت $3/7 \times 10^{10}$ بکرل (۱ Cl) در داخل یک محفظه کره ای سربی قرار دارد و ضخامت آن درست به اندازه ای است که از خروج ذرات بتا جلوگیری می کند. شار تابشی ترمزی در فاصله ۱۰ سانتیمتری از چشمه چقدر است؟

حل: عدد اتمی سرب $Z=82$ و انرژی بیشینه ذره بتای حاصل از ^{32}P برابر MeV ۱.۷۱ است، بنابراین: چون میانگین انرژی پرتو بتا در حدود یک سوم انرژی بیشینه آن است، انرژی فروتابنده بر حفاظ از طریق بتا، E_{β} ، برابر است با:

در عملیات فیزیک بهداشت، فرض می شود که تمام فوتونهای تابش ترمزی انرژی بیشینه دارند. بنابراین، شار فوتونهای تابش ترمزی در فاصله $r(\text{cm})$ از چشمه بتای $3/7 \times 10^{10}$ بکرل (۱ Cl) عبارت است از:

بر همکنش پرتوهای بتا با ماده (اثر تابش چرنکوف و اثر پس پراکندگی)

15

اثر تابش چرنکوف:

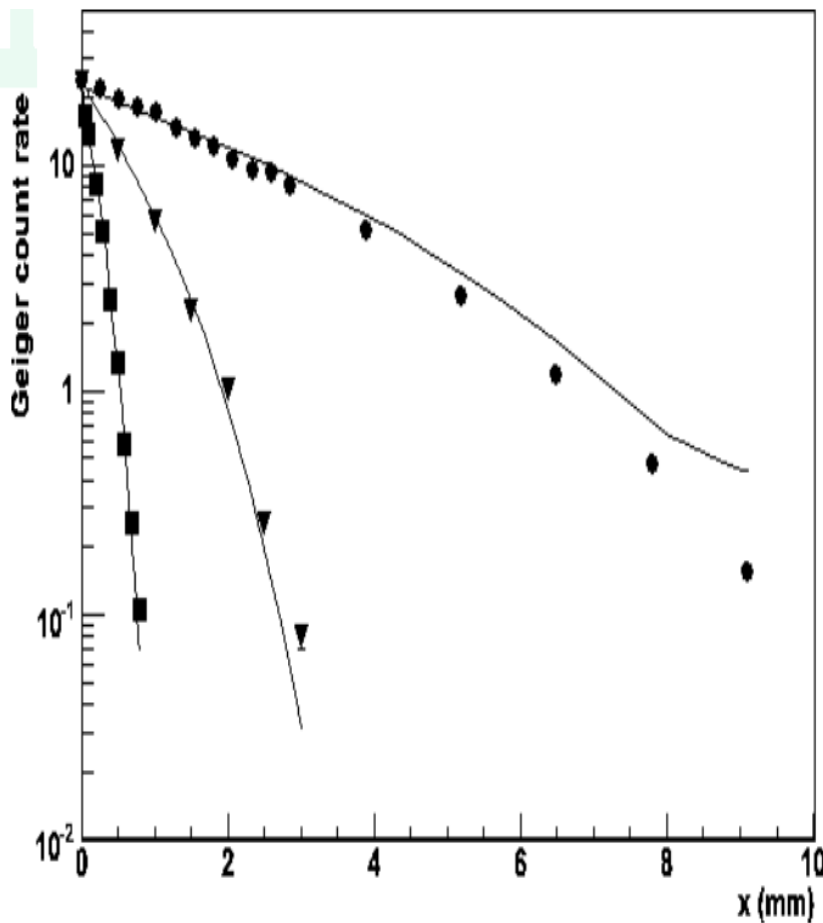
- در صورتی که سرعت ذره بتا هنگام عبور از ماده از سرعت نور بیشتر باشد، سرعت ذره تا سرعت سیر نور کاهش پیدا می کند که این کاهش معمولاً به صورت **طیف نور مرئی** نمایان می شود که به آن پرتو چرنکوف می گویند.
- با افزایش ضریب شکست محیط گسیل تابشی چرنکوف تشدید می شود.
 - افت انرژی توسط اثر چرنکوف حدود **یک هزارم** افت انرژی توسط اثرات یونیزاسیون و برانگیزش است.

اثر پس پراکندگی:

- برخی مواقع این احتمال وجود دارد که پرتوهای بتا پس از برخورد با ماده درست در راستای اولیه ولی در خلاف جهت پراکنده شوند.
- در این صورت پس پراکندگی رخ می دهد و این اثر به **عدد اتمی و ضخامت ماده** بستگی دارد.
- با افزایش عدد اتمی احتمال پس پراکندگی افزایش می یابد.

برد (نفوذ پذیری) در پرتوهای بتا

16



نقطه چین مربعی (برنج)، نقطه چین مثلثی (آلومینیوم)، نقطه چین دایره ای (کاغذ)

تضعیف پرتو بتا توسط هر ماده را می توان با قرار دادن ضخامتهای مختلفی از ماده در فاصله میان چشمه بتا و آشکارساز پرتو بتا (نظیر شمارشگر گایگر مولر) و شمارش تعداد ذرات بتای عبوری اندازه گیری کرد.

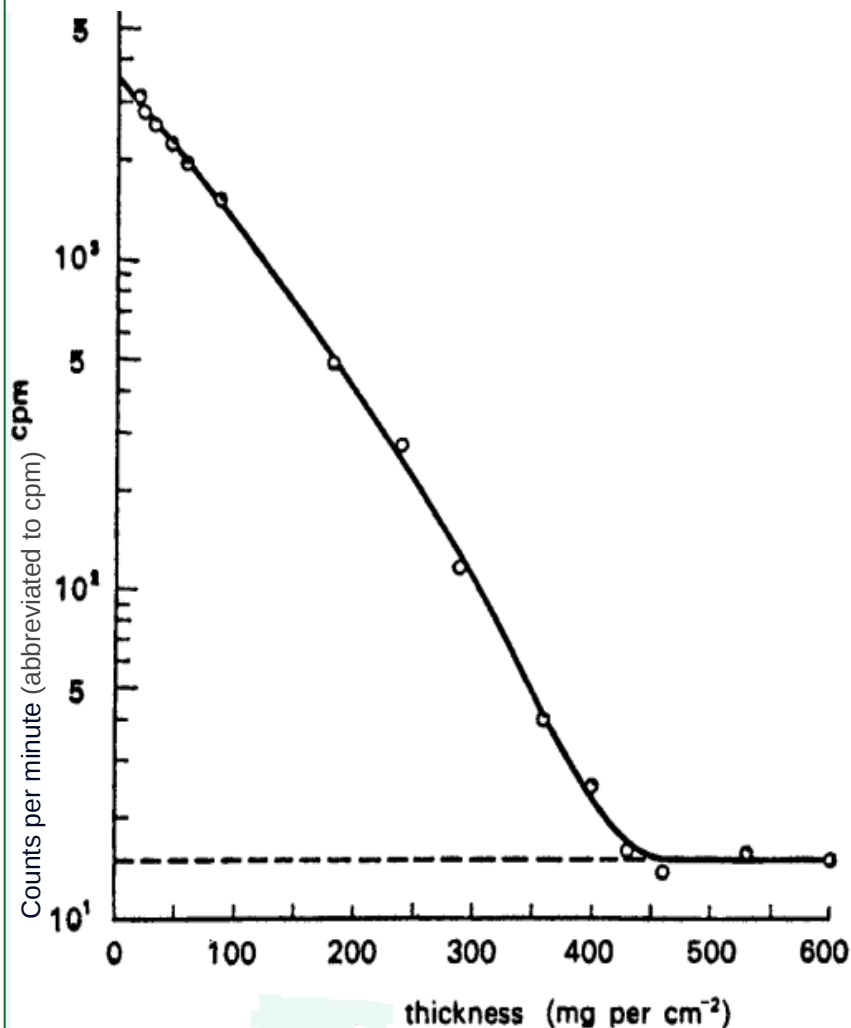
در هنگام آزمایشی گسیلنده خالص بتا در آغاز با افزایش ضخامت جذب کننده، آهنگ شمارش بتا کاهش می یابد. سرانجام به ضخامتی از ماده می رسیم که تمام ذرات بتا را متوقف می کند.

اگر اطلاعات حاصل را روی کاغذ لگاریتمی رسم کنیم، منحنی تغییرات شمارش تقریباً به صورت خطی راست بدست می آید. نقطه انتهایی منحنی جذب، جایی که از آن پس دیگر هیچ کاهشی در آهنگ شمارش دیده نشود که نشان دهنده برد پرتو بتا آن ماده است.

به دلیل تفاوت های در خواص مواد و چگالی های مختلف، دو ماده با **ضخامت خطی** (تنها به فاصله فیزیکی عبور پرتو در ماده اشاره دارد) یکسان ممکن است تاثیرات متفاوتی روی پرتوهای بتا داشته باشند. اما با استفاده از **ضخامت چگالشی یا چگالی سطحی** (به جرم ماده ای که پرتو بتا از آن عبور می کند وابسته است)، می توان این تفاوت ها را حذف کرده و تاثیر جرم ماده را به صورت دقیقتری محاسبه کرد. این روش امکان مقایسه بهتر بین مواد مختلف را فراهم می کند.

برد (نفوذ پذیری) در پرتوهای بتا

17



قدرت جذب انرژی پرتو ها، عمدتاً به تعداد الکترونهاى ماده موجود در مسیر پرتو، يعنى چگالى سطحى الکترونهاى جذب (يا الکترونهاى موجود در هر سانتيمتر مربع ماده جاذب) بستگى دارد. از اينرو به كميتى مى رسيم كه آن را ضخامت چگالشى (g/cm^2) مى ناميم و چنين تعريف مى كنيم:

ضخامت خطى $\times$ دانسيته = ضخامت چگالشى

$$t_d \left(\frac{gr}{cm^2} \right) = \rho \left(\frac{gr}{cm^3} \right) \times t_l (cm)$$

مثال: ضخامت چگالشى براى کاهش يكسان پرتو بتا براى دو ماده آلومينيوم و پلى اتيلن برابر $10 \frac{gr}{cm^2}$ است، ضخامت خطى مورد نياز براى اين ماده چند سانتيمتر است؟

$$t_d \left(\frac{gr}{cm^2} \right) = \rho \left(\frac{gr}{cm^3} \right) \times t_l (cm)$$

$$t_l (cm) AL = \frac{t_d \left(\frac{gr}{cm^2} \right)}{\rho \left(\frac{gr}{cm^3} \right)} = \frac{10}{2.7} = 3.70 \text{ cm}$$

$$t_l (cm) PE = \frac{t_d \left(\frac{gr}{cm^2} \right)}{\rho \left(\frac{gr}{cm^3} \right)} = \frac{10}{0.92} = 10.86 \text{ cm}$$

برد (نفوذ پذیری) در پرتوهای بتا

18

مثال: چگالی (دانسیته) آلومینیوم برابر با $2/7$ گرم بر سانتیمتر مکعب است. ضخامت چگالشی (چگالی سطحی) ورقه ای به ضخامت 1 سانتیمتر از آلومینیوم چقدر است؟

$$t_d \left(\frac{gr}{cm^2} \right) = \rho \left(\frac{gr}{cm^3} \right) \times t_l (cm)$$

$$t_d = 2.7 \frac{g}{cm^3} \times 1 \text{ cm} = 2.7 \frac{g}{cm^2}$$

برد (نفوذ پذیری) در پرتوهای بتا

19

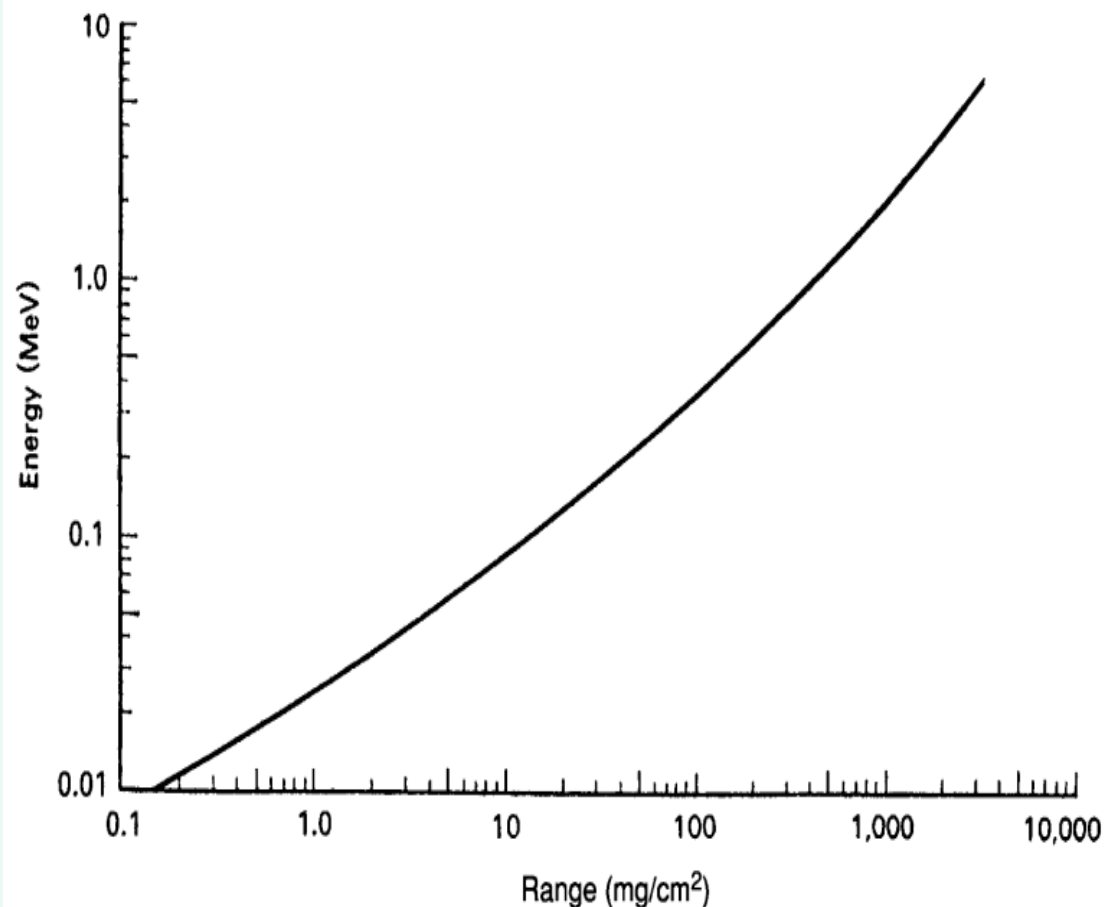


Figure 5-4. Range-energy curve for beta particles and for monoenergetic electrons. (Adapted from *Radiological Health Handbook*. Washington, DC: Office of Technical Services; 1960.)

شکل رو به رو منحنی برد (R) - انرژی (E) پرتو بتا را بر حسب انرژی بتا نشان می دهد:
بنابراین با توجه به شکل روبه رو، معادلات برد - انرژی در پرتو بتا به صورت زیر است:

$$E = 1.92 R^{0.725} \quad R \leq 0.3 \text{ g/cm}^2$$

$$R = 0.407 E^{1.38} \quad E \leq 0.8 \text{ MeV}$$

$$E = 1.85 R + 0.245 \quad R \geq 0.3 \text{ g/cm}^2$$

$$R = 0.542 E - 0.133 \quad E \geq 0.8 \text{ MeV}$$

where

R = range, g/cm² and

E = maximum beta energy, MeV.

برد (نفوذ پذیری) در پرتوهای بتا

20

مثال: حداقل ضخامت حفاظ چشمه استرانسیوم Sr ۹۰ که از الف) پلکسی گلاس و ب) آلومینیوم ساخته

شده است، چقدر باید باشد تا هیچ پرتو بتایی نتواند از آن بگذرد؟

در شکل روبه رو مشاهده می شود که انرژی بیشینه بتای گسیل شده از استرانسیم ۹۰ برابر با ۵۴۶ Kev است. اما از Y ۹۰ (ایتریم) که هسته دختر است، پرتوهای بتا با انرژی بیشینه ۲/۲۷ Mev گسیل خواهد شد. چون همیشه همراه با پرتوهای بتای Sr ۹۰، ذرات بتای Y ۹۰ نیز حضور دارند و سپس به زیرکونیوم (Zr) به حالت پایداری می رسد، ضخامت حفاظ باید به حدی باشد که تمام این پرتوهای پرانرژیتر را هم متوقف کند.

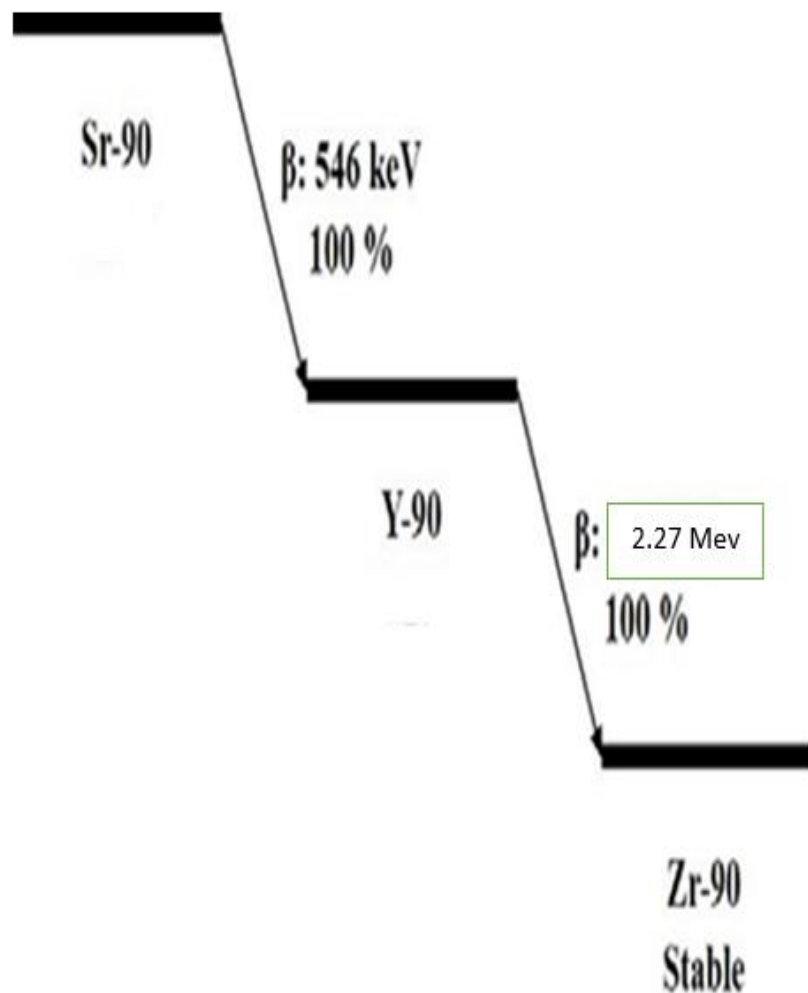
با توجه معادله اسلاید قبل، برد ذرات پرتو بتای ۲.۲۷ Mev برابر است با:

$$R = (0.542 \times 2.27) - 0.133 = 1.1 \text{ g/cm}^2$$

الف) چگالی پلکسی گلاس ۱.۱۸ g/cm³ است. ضخامت مورد نیاز پلکسی گلاس عبارت است از:

$$t_1 = \frac{t_d \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^2} \right)}{\rho \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)}$$

$$t_1 = \frac{t_d}{\rho} = \frac{1.1 \text{ g/cm}^2}{1.18 \text{ g/cm}^3} = 0.932 \text{ cm}$$



برد (نفوذ پذیری) در پرتوهای بتا

21

● بنابراین چون چگالی آلومینیوم برابر 2.7 g/cm^3 است که در نتیجه ضخامت مورد نیاز آلومینیوم برابر است با:

$$t_l(cm)AL = \frac{t_d(\frac{gr}{cm^2})}{\rho(\frac{gr}{cm^3})} = \frac{1.1}{2.7} = 0.41 \text{ cm}$$

نکته: متخصصان فیزیک بهداشت غالباً بری تشخیص چشمه های ناشناخته گسیلنده بتا، از رابطه برد-انرژی استفاده می کنند. این شناسایی بدین ترتیب انجام می شود که نخست برد پرتو بتا را اندازه گیری و سپس انرژی آن را تعیین می کنند.

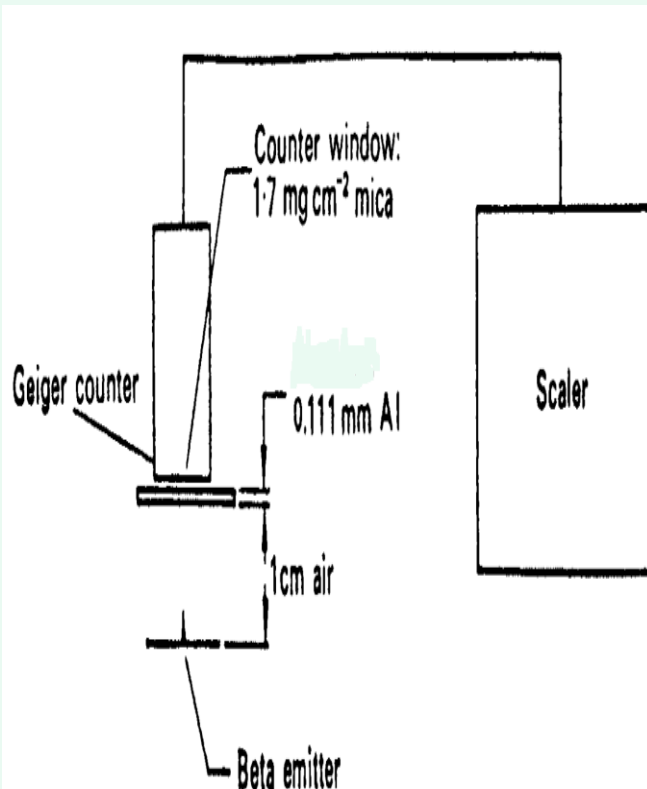
در این حال، با استفاده از جدول ایزوتوپها، ایزوتوپی را که منشا گسیل پرتو بتا با آن انرژی بوده است پیدا می کنند.

برد (نفوذ پذیری) در پرتوهای بتا

22

- مثال: با استفاده از آزمایشی به ترتیب شکل رو به رو برد یک نوع ذره بتای ناشناخته معادل 0.111 cm آلومینیوم بدست آمده است. در طی یک دوره ۱ ماهه، در فعالیت ایزوتوپ کاهش قابل اندازه گیری مشاهده نشده و تابش دیگری نیز از ایزوتوپ گسیل نشده است. الف) انرژی پرتو بتا چقدر است؟ ب) ایزوتوپ مورد آزمایش کدام است؟

حل: برد کلی پرتو بتا عبارت است از یک سانتیمتر هوا، 0.111 میلیمتر آلومینیوم و ضخامت دریچه گایگر مولر با چگالی سطحی 1.7 میلیگرم بر سانتیمتر مربع که در صورتی که ضخامتشان بر حسب ضخامت چگالشی بیان شود، با هم قابل جمع اند.



$$\text{Range} = 1.7 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} \text{ mica} + 1 \text{ cm air} + 0.111 \text{ mm Al.}$$

چگالی هوا در دما و فشار متعارف برابر 1.29 mg/cm^3 است.

$$t_d \text{ g/cm}^2 = \rho \text{ g/cm}^3 \times t_1 \text{ cm}$$

چگالی آلومینیوم برابر با 2.7 گرم بر سانتیمتر مکعب است

$$= 1.7 \text{ mg/cm}^2 + 1.29 \text{ mg/cm}^2 + 30 \text{ mg/cm}^2 = 32.99 \text{ mg/cm}^2$$

در نتیجه برد برابر است با:

بنابراین طبق شکل اسلایدهای قبل یا معادله مربوطه، انرژی متناظر با این برد در حدود 0.17 Mev است. بنابراین، ایزوتوپ نامعلوم ممکن است ^{14}C باشد که یک گسیلنده خالص بتا با انرژی بیشینه 0.155 Mev و نیمه عمر 5700 سال است.

بر همکنش پرتو پوزیترون

23

- نکته مهم: تمام موارد ذکر شده در مورد پرتو بتا در مورد پرتوهای ذره ای پوزیترون (بتا مثبت) قابل تعمیم است.

یونش ویژه هوا در ذرات بتا و آلفا

24

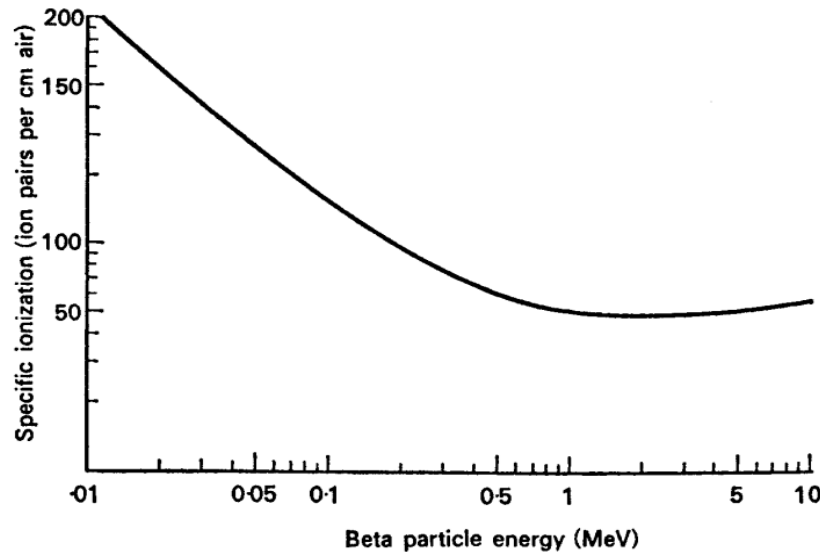


Figure 5-7. Relationship between particle energy and specific ionization of air.

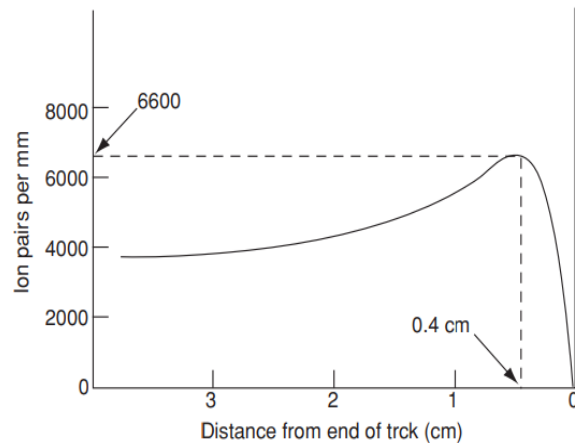


Figure 5-11. Specific ionization of a ^{210}Po alpha particle as a function of its remaining distance to the end of its range in standard air. (Lamarsh, John R.; Baratta, Anthony J., *Introduction to Nuclear Engineering*, 3rd Edition. © 2001, Pgs. 103–104. Reprinted by permission of Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.)

- یونش ویژه عبارت است از **تعداد زوج یونهای تشکیل شده در هر واحد مسافتی** که می پیماید.
- عموماً مقدار انرژی یونش ویژه برای ذرات بتا در انرژی های پایین نسبتاً بالا است.
- با افزایش انرژی ذره، یونش ویژه آن سریعاً کاهش می یابد تا اینکه در حدود انرژی 1 MeV به کمینه ای پهن می رسد.
- همانطور که در شکل بالایی مشاهده می گردد، اگر انرژی ذره بتا از 1 MeV هم تجاوز کند، یونش ویژه به آرامی شروع به افزایش مجدد خواهد کرد.
- ذره آلفا در گذر از هوا یا بافت نرم، به طور متوسط، در تولید هر زوج یون به اندازه 35 eV انرژی از دست می دهد.
- همانطور که شکل پایین مشاهده می گردد، یونش ویژه ذره آلفا، به خاطر بار الکتریکی زیاد و سرعت نسبتاً پایین آن، خیلی بالا و از مرتبه دهها هزار زوج یون در هر سانتیمتر از هواست.

انتقال انرژی خطی (LET) در ماده

25

- از اصطلاح یونش ویژه هنگامی استفاده می شود که توجه مان به افت انرژی تابش در هوا معطوف است.
- هنگامی که ماده یا حفاظی غیر از هوا مدنظر باشد، چیزی که در گذار ذره یوننده از ماده یا محیط برای ما اهمیت دارد آهنگ خطی جذب شدن انرژی در ماده یا حفاظ است.
- برای تعیین آهنگ جذب انرژی از اصطلاح انتقال انرژی خطی که به صورت اختصاری LET نامیده و با معادله زیر تعریف می شود، استفاده می کنیم:

$$LET = \frac{dE_L}{dl}$$

- که در آن dE_L متوسط انتقال موضعی انرژی به ماده توسط ذره بارداری با انرژی معلوم در گذار از فاصله dl است.
- کمیت LET را معمولاً بر حسب یکای $\text{Kev}/\mu\text{m}$ بیان می کنند.
 - LET انرژی منتقل شده به حجم از ماده را به دست می دهد.

توان ایستاندگی جرمی در ذرات آلفا و بتا

26

- برای اینکه بتوانیم **توان اتلاف انرژی** را در محیط های مختلف با هم مقایسه کنیم، از توان نسبی ایستاندگی جرمی استفاده می کنیم.
- توان ایستاندگی جرمی محیط های مختلف نسبت به توان ایستاندگی هوا را توان ایستاندگی جرمی می نامند.

$$\rho_m = \frac{S_{\text{medium}}}{S_{\text{air}}}$$

- مثال توان ایستاندگی جرمی هوا برابر 3.67 Mev/g/cm^2 و توان ایستاندگی جرمی گرافیت برای الکترونی با انرژی 0.1 Mev برابر 0.1 Mev/g/cm^2 می شود توان نسبی ایستاندگی برابر است با:

$$\rho_m = \frac{S_{\text{medium}}}{S_{\text{air}}} = \frac{3.70 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}}{3.67 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}} = 1.01$$