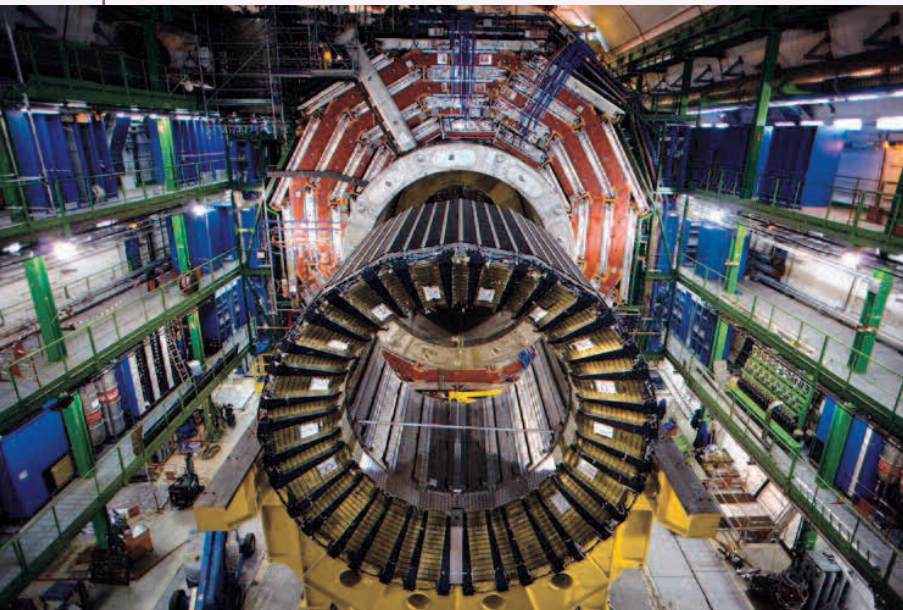


فیزیک جدید

آشنایی با تاپش یوننده،  
انرژی هسته‌ای و ذرات بنیادی  
جان کاتنل، کنت جانسون

ترجمه و متناسب سازی:  
روح الله خلیلی بروجنی، ناصر مقبلی

## آشنایی با تابش یوننده، انرژی هسته‌ای و ذرات بنیادی



ذرات بنیادی اجزای اولیه و اساسی تمام مواد هستند. آن‌ها با شتاب دادن ذراتی نظیر پروتون‌ها تا تندی‌های زیاد و برخورد شدید آن‌ها با هم مورد مطالعه قرار می‌گیرند. برخورد کننده هادرون بزرگ، طراحی شده است تا همین کار را انجام دهد. این برخورد کننده دارای یک حلقه بزرگ در زیر زمین است (به قطر  $8/6$  کیلومتر یا  $5/3$  مایل) و بخشی از تجهیزات آن در زیر فرانسه و بخشی در زیر سوئیس قرار دارند. پروتون‌های با تندی بالا در حلقه در جهت‌های مخالف حرکت می‌کنند، و ذرات بنیادی‌ای که بر اثر برخورد بین آن‌ها ایجاد می‌شود با آشکارسازهای خاصی مشاهده می‌شوند. این عکس آشکارساز CMS را در برخورد کننده هادرون بزرگ نشان می‌دهد.\*

\* Compact Muon Solenoid



فیزیک اثرهای زیستی تابش یوننده. تابش یوننده از فوتونها یا ذرات متحرکی تشکیل شده است که برای بیرون کشیدن الکترون از یک اتم یا یک مولکول و در نتیجه تشکیل یون انرژی کافی دارند. این فوتونها معمولاً در ناحیه‌های فرابنفش، پرتو X یا پرتو گامای طیف الکترومغناطیسی قرار دارند، جایی که ذرات متحرک می‌توانند ذرات  $\alpha$  و  $\beta$  گسیل شده در واپاشی پرتوزا باشند. برای یونیده کردن اتم یا مولکول به انرژی تقریبی ۱ تا ۳۵eV مورد نیاز است و ذرات و پرتوهای گامای گسیل شده در طی فروپاشی هسته‌ای اغلب چند میلیون الکترون ولت انرژی دارند. از این رو، یک ذره تنهای  $\alpha$  یا  $\beta$  یا پرتو  $\gamma$  می‌توانند هزاران مولکول را یونیده کنند. تابش هسته‌ای برای انسان بالقوه خطرناک است زیرا یونشی که ایجاد می‌کند می‌تواند ساختار مولکولها در سلول زنده را به مقدار زیادی تغییر دهد. این تغییر می‌تواند به مرگ سلول و حتی خود آن اندام منجر شود. ولی، به رغم مخاطرات

ممکن، تابش یوننده در پزشکی برای تشخیص و مقاصد درمانی نظیر شکستگی استخوان و مداوای سرطان مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر اصول پرتودهی تابش از جمله یکاهای دُز و اثرهای زیستی تابش در نظر گرفته شوند، می‌توان مخاطرات را به کمترین مقدار رساند.

**پرتودهی** معیاری از یونش حاصل در هوا توسط پرتوهای X و پرتوهای  $\gamma$  است و به ترتیب زیر تعریف می‌شود: یک باریکه از پرتوهای X یا پرتوهای  $\gamma$  به جرم  $m$  از هوای خشک در دما و فشار استاندارد فرستاده می‌شود (دمای  $0^\circ\text{C}$  و فشار 1 atm). با عبور از هوا، باریکه یون‌های مثبتی ایجاد می‌کند که بار کل آن‌ها  $q$  است. پرتودهی به صورت بار کل بر واحد جرم هوا تعریف می‌شود:  $q/m =$  پرتودهی. یکای SI پرتودهی کولن بر کیلوگرم ( $\text{C/kg}$ ) است. ولی، یکای اولیه تابش با **روننگن** تعریف شده بود که امروزه نیز به کار می‌رود. بار  $q$  بر حسب کولن (C) و  $m$  بر حسب کیلوگرم، پرتودهی بر حسب روننگن عبارت است از:

$$(1) \quad \text{پرتودهی (بر حسب روننگن)} = \frac{q}{2/58 \times 10^{-4} m}$$

بنابراین، وقتی پرتوهای X یا پرتوهای  $\gamma$  پرتودهی یک روننگن ایجاد کنند، به اندازه  $q = 2/58 \times 10^{-4} \text{ C}$  بار مثبت در  $m = 1 \text{ kg}$  هوای خشک ایجاد می‌شود:

$$1 \text{ R} = 2/58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

(هوای خشک در شرایط استاندارد)

چون مفهوم پرتودهی بر حسب توانایی‌های یونندگی پرتوهای X و پرتوهای  $\gamma$  در هوا تعریف می‌شود، اثر تابش در بافت زنده را مشخص نمی‌کند. برای مقاصد زیستی، دز جذب شده کمیت مناسب‌تری است زیرا انرژی جذب شده از تابش به ازای یکای جرم ماده جذب کننده است:

$$(2) \quad \text{انرژی جذب شده} = \frac{\text{انرژی جذب شده}}{\text{جرم ماده جذب کننده}} = \text{دُز جذب شده}$$

یکای SI دز جذب شده **گری** ( $\text{Gy}$ ) است و آن یکای انرژی تقسیم بر یکای جرم است:  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ . معادله ۲ برای تمام انواع تابش و محیط‌های جذب کننده به کار می‌رود. یکای دیگری که اغلب برای دز جذب شده به کار می‌رود، **راد** است

(کوتاه شده به صورت rad). واژه راد سر واژه radiation absorbed dose است. راد وگری با رابطه زیر به هم مربوط اند.

$$1 \text{ rad} = 0.01 \text{ gray}$$

مثال ۱ گری و راد را به عنوان یکاهای دز جذب شده مورد بحث قرار می‌دهد.

□ تحلیل مسئله‌های چند مفهومی

مثال ۱

دز جذب شده از پرتوهای  $\gamma$



شکل ۱ وقتی آب پرتوهای  $\gamma$  را جذب می‌کند دمای آن بالا می‌رود.

شکل ۱ پرتوهای  $\gamma$  را نشان می‌دهد که توسط آب جذب می‌شوند. دز جذب شده‌ای از پرتوهای  $\gamma$  (بر حسب راد) که دمای آب را از  $20/0^\circ\text{C}$  به  $50/0^\circ\text{C}$  می‌رساند چقدر است؟

**استدلال:** وقتی پرتوهای  $\gamma$  توسط آب جذب می‌شوند، باعث گرم شدن آن می‌شوند. دز جذب شده از پرتوهای  $\gamma$ ، برابر انرژی (گرمای) جذب شده توسط آب تقسیم بر جرم آن است. همان‌طور که می‌دانیم گرمایی که باید توسط آب جذب شود تا دمای آن به مقدار معینی بالا رود به جرم و گرمای ویژه آب بستگی دارد. از مفهوم گرمای ویژه آب برای محاسبه دز جذب شده پرتوهای  $\gamma$  بهره می‌گیریم.

**معلوم‌ها و مجهول‌ها:** در جدول زیر اطلاعات داده شده خلاصه شده است.

توصیف	نماد	مقدار
دمای اولیه آب	$T_0$	$20/0^\circ\text{C}$
دمای نهایی آب	$T$	$50/0^\circ\text{C}$
متغیر مجهول		
دز جذب شده پرتوهای $\gamma$ (بر حسب راد)	دز جذب شده	?

□ مدل‌سازی مسئله

**مرحله ۱: دز جذب شده:** دز جذب شده پرتوهای  $\gamma$  عبارت است از انرژی (گرمای)  $Q$  جذب شده توسط آب تقسیم بر جرم  $m$  (معادله ۲ را ببینید) که در

$$(2) \quad \text{دز جذب شده} = \frac{Q}{m}$$

ستون راست مشخص شده است. نه  $Q$  معلوم است و نه  $m$ . در مورد هر دو متغیر در مرحله ۲ بحث خواهد شد.

**مرحله ۲:** گرمای لازم برای افزایش دمای آب: گرمای  $Q$  برای افزایش دمای جرم  $m$  از آب به مقدار  $\Delta T$  عبارت است از  $Q = cm\Delta T$ ، که در آن  $c$  گرمای ویژه آب است. تغییر دمای  $\Delta T$  برابر است با دمای بالاتر  $T$  منهای دمای پایین تر  $T_0$  یا  $\Delta T = T - T_0$ . بنابراین، گرما به صورت زیر بیان می شود:

$$Q = cm\Delta T = cm(T - T_0)$$

این عبارت برای گرمای جذب شده توسط آب را می توان در معادله ۲، به ترتیبی که در ستون طرف راست نشان داده شده قرار دارد. توجه کنید که جرم  $m$  آب در صورت و مخرج ظاهر می شود، از این رو آن را می توان به طور جبری حذف کرد.

$$\text{دز جذب شده} = \frac{Q}{m} \quad (2)$$

$$Q = cm(T - T_0)$$

**حل:** با ترکیب جبری نتایج دو مرحله داریم

$$\text{دز جذب شده} \stackrel{\text{مرحله ۱}}{=} \frac{Q}{m} \stackrel{\text{مرحله ۲}}{=} \frac{cm(T - T_0)}{m} = c(T - T_0)$$

با قرار دادن گرمای ویژه آب، در می یابیم که دز جذب شده پرتوهای  $\gamma$  (بر حسب گری) برابر است با

$$\text{دز جذب شده} = c(T - T_0) = [4186 \text{ J / (kg} \cdot \text{C}^\circ)] (50 / \text{ }^\circ\text{C} - 20 / \text{ }^\circ\text{C}) = 1 / 26 \times 10^5 \text{ Gy}$$

مسئله دز جذب شده را به جای گری بر حسب راد می خواهد، برای این کار

$$\text{دز جذب شده} = (1 / 26 \times 10^5 \text{ Gy}) \left( \frac{1 \text{ rad}}{0.01 \text{ Gy}} \right) = 1 / 26 \times 10^7 \text{ rad}$$

### تکالیف مربوط به مسئله های ۷، ۱۰ و ۱۱

مقدار آسیب زیستی حاصل از تابش یوننده برای تابش های مختلف متفاوت است. به طور مثال، یک راد از نوترون ها با احتمال بیشتری از یک راد دز از پرتوهای X در چشم آب مروارید ایجاد می کنند. برای مقایسه آسیب حاصل از انواع مختلف

تابش، از تاثیر نسبی زیستی (یا RBE)<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. تاثیر نسبی زیستی یک نوع خاص از تابش عبارت است از نسبت دز ۲۰۰♣ پرتوهای X لازم برای ایجاد تاثیر زیستی به دز تابشی لازم برای آنکه همان تاثیر زیستی را ایجاد کند.

دز ۲۰۰keV پرتوهای X که اثر

تأثیر زیستی معینی را ایجاد کند

$$(3) \quad \text{دز تابشی ای که همان تاثیر زیستی را ایجاد کند} = \frac{\text{تأثیر زیستی معینی را ایجاد کند}}{\text{تأثیر نسبی زیستی (RBE)}}$$

دز تابشی ای که همان تاثیر

زیستی را ایجاد کند

**جدول ۱** تاثیر نسبی زیستی (RBE) برای تابش‌های مختلف.

RBE	نوع تابش
۱	پرتوهای X با انرژی ۲۰۰keV
۱	پرتوهای $\gamma$
۱	ذرات $\beta^-$ (الکترون‌ها)
۱۰	پروتون‌ها
۱۰ تا ۲۰	ذرات $\alpha$
۲	نوترون‌های کند
۱۰	نوترون‌های تند

♣ به طبیعت تابش یوننده و انرژی آن و همچنین به نوع بافت تحت تابش بستگی دارد. در جدول ۱ فهرستی از مقدارهای نوعی RBE برای تابش‌های مختلف آمده است، با این فرض که «میانگین» بافت تحت تابش قرار گرفته است. مقدار  $RBE = 1$  برای پرتوهای  $\gamma$  و ذرات  $\beta^-$  نشان می‌دهد که آن‌ها همان آسیب زیستی ۲۰۰♣ پرتوهای X را ایجاد می‌کنند. مقدار RBE بزرگ‌تر برای پروتون‌ها، ذرات  $\alpha$  و نوترون‌ها حاکی از آن است که آن‌ها اساساً آسیب بیشتری ایجاد می‌کنند. RBE اغلب همراه با دز جذب شده به کار می‌رود تا نشان دهنده خصوصیت آسیب‌رسانی تابش باشد. حاصل ضرب دز جذب شده بر حسب راد (نه گری) و RBE برابر دز معادل زیستی است:

$$(4) \quad \text{دز جذب شده} \times \text{♣} = \text{دز معادل زیستی}$$

(بر حسب rad) (بر حسب rem)

یکای دز معادل زیستی rem است.<sup>۲</sup> مثال ۲ استفاده از دز معادل زیستی را توضیح

می‌دهد.

### مثال ۲ مقایسه دز جذب شده پرتوهای $\gamma$ و نوترون‌ها

یک بافت زیستی با پرتوهای  $\gamma$  که RBE برابر با ۰/۷۰ دارد تحت تابش قرار گرفته است. دز جذب شده پرتوهای  $\gamma$  برابر با ۸۵۰rad است. بافت را بعداً با نوترون‌هایی با RBE برابر با ۳/۵ تحت تابش قرار می‌دهیم. دز معادل زیستی

۱. Relative Biological Effectiveness (RBE)

۲. Röntgen Equivalent Man (REM)