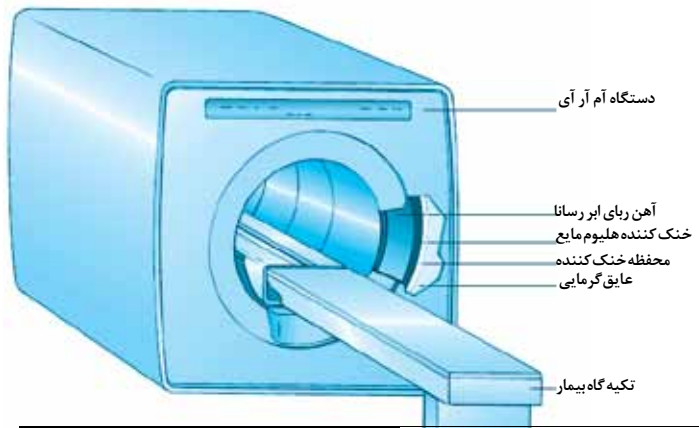




تصویربرداری پزشکی و تابش



لوتیس ای. بلومفیلد
روح الله خلیلی بروجنی
www.avang.org

می‌تابد. از هر زاویه، دستگاه تصویربرداری نشان می‌دهد که چه اجسامی در طرف چپ یا راست یکدیگر قرار دارند؛ ولی دستگاه نمی‌تواند بگوید که فاصله اجسام چقدر است. با وجود این، با جست‌وجوی اطلاعات و با مشاهده‌های متعدد و متفاوت دستگاه می‌توان محل هر جسم را به‌طور دقیق معلوم کرد.

شما می‌توانید این فرایند را با ریختن تعدادی سکه روی یک میز کوچک، بدون آنکه ببینید هر یک از آن‌ها در کجا قرار می‌گیرند، امتحان کنید. چشم‌های خود را ببندید و سر خود را تا ارتفاع سطح میز پایین بیاورید. حال، فقط یک چشم خود را باز کنید و نگاه کوتاهی به سکه‌ها بیندازید. اگر نور روشن و یکنواخت باشد و شما هم سر خود را حرکت ندهید مشکل بتوانید بگویید که فاصله سکه‌ها از چشم شما چقدر است. اگر چه شما چیزی در مورد اینکه هر سکه کجاست می‌دانید ولی در مورد محل دقیق آن روی سطح میز به‌قدر کافی نمی‌دانید. حال سر خود را به محل جدیدی، گرد میز، حرکت دهید و نگاه کوتاه دیگری بیندازید. باز نمی‌توانید بگویید که سکه‌ها چقدر از شما دورند، ولی در مورد مکان‌های نسبی آن‌ها بیشتر می‌دانید. آیا با چند بار مشاهده خواهید دانست که سکه‌ها به‌طور دقیق کجا هستند؟ وجود تعدادی سکه تیره در میان سکه‌ها چگونه مسئله را پیچیده می‌کند؟ چرا باز کردن دو چشم با هم تعیین محل سکه‌ها را برای شما بسیار آسان‌تر می‌کند؟

پرتوهای X

پرتوهای X، از زمان کشف آن‌ها در سال ۱۸۹۵ تا امروز، نقش مهمی در درمان‌های پزشکی ایفا کرده‌اند. در واقع، از همان ابتدای کشف پرتو X سودمندی آن آشکار شد. اما نخست بینیم پرتو X چگونه کشف شد. دانشمند آلمانی ویلهلم کُنراد رونتگن (۱۸۴۵-۱۹۲۳)، در حال آزمایش تخلیه الکتریکی در یک لامپ خلأ در آزمایشگاه خود بود. او اطراف لامپ را با مقوای سیاهی به‌طور کامل پوشانده بود و به‌علاوه در اتاقی تاریک کار می‌کرد. ناگهان، در فاصله‌ای از لامپ یک پردهٔ فسفردار شروع به درخشیدن کرد. رونتگن دریافت که نوعی تابش از لامپ خلأ آزاد و با گذشتن از مقوا و هوا سبب فلورسانسی آن پرده شده است. وی اجسام مختلفی را در راه تابش قرار داد ولی آن‌ها مانع جریان این تابش نشدند. سرانجام، او دست خود را در جلوی پرده قرار داد و در این وقت تصویر سایهٔ استخوان‌هایش را دید؛ چه اتفاقی افتاده بود؟ او پرتوهای X و در همان وقت مهم‌ترین کاربرد آن را نیز کشف کرده بود.

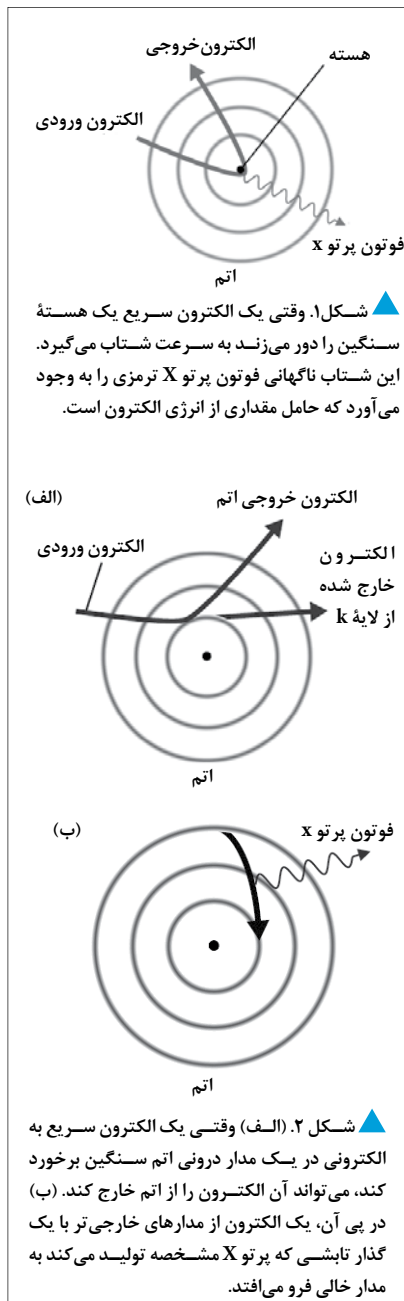
اولین استفادهٔ درمانی پرتوهای X در اوایل سال ۱۸۹۶ انجام شد که دو پزشک انگلیسی از آن برای یافتن سوزنی در دست یک زن استفاده کردند. طولی نکشید که، دستگاه‌های پرتو X در بیمارستان‌ها به عنوان روش جدید و شگفت‌انگیزی برای تشخیص پزشکی متداول شد. البته این قابلیت تصویربرداری بدون اثرهای جانبی نبود، و آن اینکه، اگر چه خود پرتوگیری

برخی از مهم‌ترین پیشرفت‌های اخیر در مراقبت از سلامتی، در مرز میان پزشکی و فیزیک صورت گرفته است. وقتی دانشمندان به درک خود از ساختار اتمی و مولکولی بهبود بخشیدند و یاد گرفتند که شکل‌های مختلف تابش را به کنترل درآورند، وسایلی را اختراع کردند که امروزه در تشخیص و معالجهٔ بیماری و جراحات فوق‌العاده با ارزش‌اند. این توسعه و تکامل ادامه یافت و کاربردهای جدیدی از فیزیک تقریباً همواره در موارد بالینی ظاهر می‌شود. در این مقاله، دو مورد از مهم‌ترین نمونه‌های فیزیک پزشکی را بررسی می‌کنیم: یکی روش‌های تصویربرداری که در تشخیص بیماری‌ها به‌کار می‌روند و دیگری پرتودرمانی‌هایی که برای درمان این موارد به‌کار می‌روند.

پرسش‌هایی برای اندیشیدن: تفاوت استخوان‌ها و بافت در چیست که استخوان‌ها در تصویر با پرتو X روشن دیده می‌شوند در حالی که بافت تاریک دیده می‌شود؟ چگونه روبش CT (سی‌تی‌اسکن) یا تصویربرداری MRI (ام‌آر‌آی) نمای از یک شخص زنده را نشان می‌دهد بدون اینکه با شخص تماس پیدا کند؟ اگر پرتوهای X نوعی از تابش الکترومغناطیسی هستند، چرا مواد کدر آن‌ها را جذب نمی‌کنند؟ چرا روبش CT اساساً استخوان را نشان می‌دهد در حالی که تصویر MRI عمدتاً بافت را نشان می‌دهد؟

ذره‌های زیر اتمی که در پرتودرمانی به‌کار می‌روند اغلب انرژی‌های خیلی زیادی دارند؛ این انرژی‌ها از کجا می‌آیند؟

آزمایش‌هایی برای انجام دادن: نقطه قوت تصویربرداری پزشکی توانایی آن در تعیین محل اجسام درون بدن شخص است بدون آنکه در واقع چیزی وارد بدن شود. این کار اغلب با استفاده از پرتوهای X صورت می‌گیرد که از چند زاویهٔ متفاوت به شخص



وقتی ذره باردار روی آنتن شتاب بگیرد، از خود موج‌های رادیویی گسیل می‌کند. با این حال، در یک آنتن رادیویی، الکترون‌ها به آرامی شتاب می‌گیرند و فوتون‌های کم‌انرژی گسیل می‌کنند. تابش ترمزی معمولاً در حالت‌هایی رخ می‌دهد که در آن‌ها ذره باردار فوق‌العاده سریع شتاب می‌گیرد و فوتون بسیار پر انرژی گسیل می‌کند. در تابش ترمزی لامپ پرتو X، یک الکترون سریع به دور یک هسته سنگین می‌گردد و چنان سریع شتاب می‌گیرد که یک فوتون پرتو X گسیل می‌کند (شکل ۱). این فوتون بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی جنبشی الکترون را با خود حمل می‌کند. هرچه الکترون به هسته نزدیک‌تر شود، شتاب بیشتری می‌گیرد و به فوتون پرتو X هم انرژی بیشتری می‌دهد. ولی، بیشتر احتمال دارد که فاصله الکترون از هسته، بیشتر از آن باشد که بتواند با آن برخورد کند، در نتیجه احتمال اینکه در تابش ترمزی، فوتون پرتو X انرژی پایین داشته باشد بیشتر است. در فلئورسانی پرتو X، یک الکترون سریع به الکترون داخلی در اتم سنگین برخورد می‌کند و آن الکترون را کاملاً از اتم بیرون می‌اندازد (شکل ۲). با این برخورد، اتم به صورت یون مثبت درمی‌آید با مداری خالی و نزدیک به هسته. آنگاه یک الکترون این یون گذار

بدون درد بود، اما قرار گرفتن مدتی طولانی در معرض پرتوهای X سبب سوزش شدید و بروز جراحاتی می‌شد که مدتی طول می‌کشید تا ظاهر شوند. بدون تردید پرتوهای X کاری خیلی بیشتر از گرم کردن ساده بافت انجام می‌داد.

پرتوهای X نظیر موج‌های رادیویی، ریز موج‌ها و نور نوعی از تابش الکترومغناطیسی هستند. این انواع مختلف تابش الکترومغناطیسی با بسامدها و طول موج‌هایشان از یکدیگر متمایز می‌شوند - در حالی که موج‌های رادیویی بسامدهای کم و طول موج‌های بلند دارند، بسامد پرتوهای X خیلی زیاد و طول موج‌های کوتاه دارند. آن‌ها، همچنین، با انرژی‌های فوتون‌هایشان متمایز می‌شوند. فوتون موج رادیویی، به دلیل بسامد کم آن، انرژی کمی دارد؛ فوتون با بسامد متوسط نور آبی یا فرابنفش حامل مقدار انرژی کافی است تا پیوندی را در یک مولکول بازآرایی کند؛ اما فوتون پرتو X با بسامد بالا چنان انرژی زیادی دارد که می‌تواند بسیاری از پیوندها را بشکند و مولکول‌ها را از هم جدا کند. در یک فریزموج فوتون‌های ریزموج با هم عمل می‌کنند تا غذا را داغ کنند و آن را بپزند. مقدار انرژی در هر فوتون ریزموج اهمیتی ندارد زیرا آن‌ها به تنهایی عمل نمی‌کنند، ولی در پرتودرمانی، فوتون‌های پرتو X مستقل هستند. هر یک از آن‌ها به قدر کافی انرژی دارد تا به هر مولکولی که آن را جذب کند آسیب برساند. به همین دلیل است که سوختگی با پرتو X سوزش کمی در بر دارد و مدتی پس از پرتوگیری ظاهر می‌شود - آسیب مولکولی ناشی از تابش پرتوهای X، پس از مدتی پخته‌ها را می‌کشد.

پرسش: کدام یک ارتباط بیشتری با پرتوهای X دارد: باریکه‌ای از الکترون‌ها که در لامپ مگنترون فریزموج حرکت می‌کند یا نور فروسرخ که از رشته داغ یک نان‌برشته‌کن ناشی می‌شود؟

پاسخ: نور فروسرخ رشته داغ ارتباط نزدیک‌تری با پرتوهای X دارد.

دلیل: نور فروسرخ و پرتوهای X هر دو نوعی از تابش الکترومغناطیسی هستند. چیزی که موجب تمایز آن‌ها از یکدیگر می‌شود بسامدها، طول موج‌ها و انرژی فوتون‌های آن‌هاست؛ گرچه باریکه الکترون‌های درون یک لامپ مگنترون نیز نوعی تابش است ولی شامل ذرات است نه موج‌های الکترومغناطیسی.

تولید پرتوهای X

چشمه‌های پرتو X پزشکی با برخورد شدید الکترون‌های سریع به اتم‌های سنگین کار می‌کنند. این برخوردها از طریق دو سازوکار فیزیکی متفاوت به تولید پرتوهای X می‌انجامد: تابش ترمزی^۱ و فلئورسانی پرتو X^۲.

تابش **ترمزی** وقتی صورت می‌گیرد که ذره باردار شتاب بگیرد. این فرایند در واقع چیز جدیدی نیست، چرا که می‌دانیم

مثل آلومینیم برای کم کردن نفوذ آن‌ها استفاده می‌کنند.

منشأ تابش سنکروترون

پرش: شتاب‌دهنده‌های بسیار بزرگ ذرات که در فیزیک انرژی بالا به کار می‌روند اغلب به صورت حلقه‌هایی چنان ساخته می‌شوند تا بتوانند بارها و بارها، از ذرات باردار الکتریکی یکسانی استفاده کنند. وقتی این ذرات، به صورت دایره‌وار به دور حلقه‌ها حرکت می‌کنند، از خود پرتوهای X گسیل می‌کنند. درباره این فرایند توضیح دهید.

پاسخ: چون ذره روی یک مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند شتاب می‌گیرد و در نتیجه موج‌های الکترومغناطیسی گسیل می‌کند. در این مورد، آن موج‌ها پرتوهای X هستند.

دلیل: یک ذره باردار که به سرعت شتاب می‌گیرد، چه به دور هسته یک اتم سنگین شتاب داشته باشد چه به دور حلقه یک شتاب‌دهنده ذره، پرتو X گسیل می‌کند. در یک شتاب‌دهنده، این پرتوهای X تابش سنکروترون نامیده می‌شوند. تابش سنکروترون در پژوهش و صنعت مفید است و اغلب آگاهانه با افزودن آهنرباهای خاصی به حلقه شتاب‌دهنده مقدار آن را زیادتر می‌کنند.

استفاده از پرتوهای X برای تصویربرداری

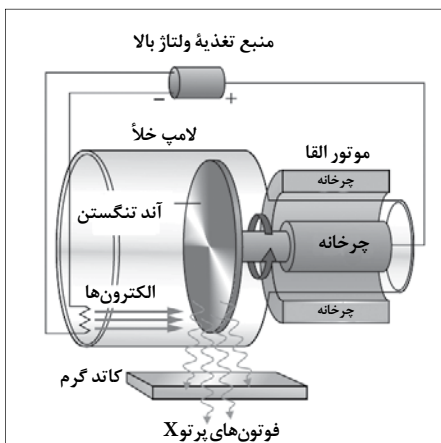
پرتوهای X دو استفاده مهم در پزشکی دارند: تصویربرداری و پرتودرمانی. در تصویربرداری با پرتو X، پرتوهای X با گذشتن از بدن بیمار به ورقه‌ای از فیلم، یا آشکارساز پرتو X، فرستاده می‌شوند. بخشی از پرتوهای X می‌توانند از بافت بگذرند، ولی بیشتر آن‌ها توسط استخوان متوقف می‌شوند و سایه استخوان‌های بیمار، روی فیلم پشت آن‌ها، به صورت تصویرهایی تشکیل می‌شود. اما در پرتودرمانی با پرتو X، پرتوهای X دوباره [برای عکس برداری] به بدن بیمار فرستاده می‌شوند، ولی چیزی که در اینجا اهمیت دارد چگونگی برهم‌کنش مرگبار آن‌ها با بافت ناسالم بدن است.

فوتون‌های پرتو X در طی چهار فرایند با بافت و استخوان برهم‌کنش می‌کنند:

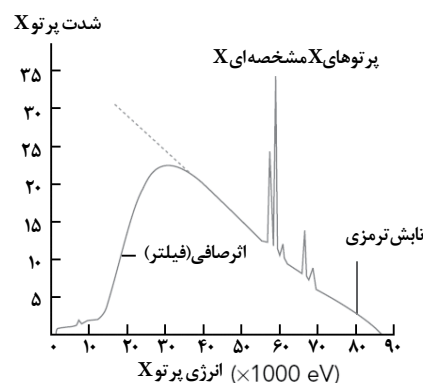
پراکندگی کشسان، اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، و تولید زوج الکترون-پوزیترون. پراکندگی کشسان را به عنوان دلیل یا عامل آبی بودن آسمان می‌شناسیم: اتم با عبور موج الکترومغناطیسی به صورت یک آنتن عمل می‌کند، آن را جذب و بدون جذب انرژی، دوباره گسیل می‌کند (شکل ۵). چون این فرایند تقریباً هیچ اثری روی اتم ندارد، پس پراکندگی کشسان در پرتودرمانی اهمیتی ندارد، اما در تصویربرداری با پرتو X عامل مزاحمی است زیرا زمینه تیره‌ای ایجاد می‌کند؛ بدین طریق که مقداری از پرتوهای X که از بدن بیمار عبور می‌کنند مثل توپ‌های کوچکی در محیط جنب‌وجوش می‌کنند و با زاویه‌های جور واجور به فیلم می‌خورند. برای حذف این فوتون‌های پرتو X بیرون انداخته شده، در دستگاه‌های پرتو X از صافی‌هایی استفاده

دارند، می‌توانند پیوندهای شیمیایی را بشکنند و سبب آفتاب‌سوختگی شوند. فوتون‌های پرتو X انرژی‌های خیلی بیشتری، حتی از فوتون‌های فرابنفش، دارند. در نوعی از لامپ پرتو X که در پزشکی کاربرد دارد، الکترون‌ها از یک کاتد گرم گسیل می‌شوند و در خلأ به طرف یک آند فلزی باردار مثبت شتاب می‌گیرند (شکل ۳). این آند صفحه‌ای از تنگستن یا مولیبدن است که به سرعت می‌چرخد تا مبادا در اثر گرمای شدید ذوب شود. انرژی الکترون‌ها موقع برخورد به آند را اختلاف پتانسیل دو سر لامپ تعیین می‌کند. در دستگاه پرتو X پزشکی، این اختلاف پتانسیل به‌طور نوعی حدود ۸۷۰۰۰ V است، به طوری که هر الکترون حدود ۸۷۰۰۰ eV انرژی دارد. چون الکترون بخش به نسبت زیادی از انرژی‌اش را به فوتون پرتو X تولید شده می‌دهد، فوتونی که لامپ را ترک می‌کند می‌تواند تا ۸۷۰۰۰ eV انرژی داشته باشد. پس تعجب‌آور

نیست که پرتو X بتواند به بافت بدن نیز صدمه بزند! وقتی الکترون‌ها به هدف اتم‌های سنگین برخورد کردند، آن‌ها، هم تابش ترمزی و هم پرتوهای مشخصه گسیل می‌کنند (شکل ۴). پرتوهای X مشخصه انرژی‌های خاصی دارند و بنابراین به صورت قله‌هایی در تمام طیف پرتو X ظاهر می‌شوند. پرتوهای X تابش ترمزی انرژی‌های متفاوتی دارند که در انرژی‌های کم بیشترین شدت را دارد. چون فوتون‌های پرتو X با انرژی کمتر به پوست صدمه می‌زنند برای تصویر برداری و تابش درمانی مفید نیستند، به همین دلیل، دستگاه‌های پرتو X پزشکی از مواد جذب کننده‌ای



شکل ۳. در یک دستگاه پرتو X پزشکی، الکترون‌ها از یک رشته داغ به طرف یک قرص فلزی با بار مثبت شتاب می‌گیرند و در هنگام برخورد با اتم‌های قرص، پرتوهای X گسیل می‌کنند. موتوری قرص را می‌چرخاند تا مانع از ذوب شدن آن شود. یک صافی نیز پرتوهای X کم‌انرژی بی‌فایده را جذب می‌کند.



شکل ۴. وقتی الکترون‌ها با انرژی ۸۷۰۰۰ eV به فلز تنگستن برخورد کنند، به دو طریق تابش ترمزی و فلونورسانی پرتو X گسیل می‌کنند. چون پرتوهای X تابش ترمزی گستره وسیعی از انرژی‌ها را دارند، یک صافی جذب‌کننده مانع پرتوهای کم‌انرژی آن‌ها می‌شود. پرتو X فلونورسانی، پرتوهای مشخصه با انرژی‌های خاص تولید می‌کند

می‌شود تا پرتوهای X را متوقف سازند تا این پرتوها نتوانند در جهت چشمه پرتو X به فیلم نزدیک شوند.

اثر فوتوالکتریک چیزی است که تصویربرداری پرتو X را ممکن می‌سازد. در این اثر، فوتون عبوری، در اتم گذار تابشی القا می‌کند؛ بدین ترتیب که یکی از الکترون‌های اتم، فوتون را جذب می‌کند و کاملاً از اتم خارج می‌شود (شکل ۶). اگر اتم از فوتون پرتو X برای انتقال الکترون از یک مدار به مدار دیگر استفاده می‌کند، باید درست مقدار دقیقی انرژی داشت. ولی، چون الکترون آزاد می‌تواند هر مقدار انرژی‌ای داشته باشد، اتم می‌تواند هر فوتون پرتو X را که انرژی کافی برای بیرون کردن یکی از الکترون‌هایش داشته باشد جذب کند. بخشی از انرژی فوتون صرف خارج کردن الکترون از اتم می‌شود و بقیه انرژی به صورت انرژی جنبشی به الکترون گسیل شده درمی‌آید.

با افزایش انرژی الکترون بیرون انداخته شده، احتمال این رویداد فوتوگسیلی کمتر می‌شود. این کاهش احتمال، جذب فوتون پرتو X در اتم کوچک (در مقایسه با اتم‌های بزرگ) را با مشکل مواجه می‌سازد. تمام الکترون‌های این اتم پیوند ضعیفی با اتم دارند، بنابراین فوتون پرتو X به الکترون بیرون انداخته شده انرژی جنبشی زیادی می‌دهد. یک اتم کوچک معمولاً به جای آنکه الکترونی با انرژی زیاد گسیل کند، فوتون پرتو X عبوری را نادیده می‌گیرد.

برعکس، در یک اتم بزرگ بعضی از الکترون‌ها پیوند کاملاً محکمی با اتم دارند و باید بیشتر انرژی فوتون پرتو X صرف خارج کردن آن‌ها از اتم شود. این الکترون‌ها با انرژی جنبشی نسبتاً کمی خارج می‌شوند. چون احتمال فرایند فوتوگسیل، با الکترون‌های کم انرژی بیشتر است؛ یک اتم بزرگ با احتمال بیشتری پرتو X عبوری را جذب می‌کند. براساس آنچه گفته شد، اتم‌های کوچک (کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن) که در بافت یافت می‌شوند به ندرت می‌توانند پرتوهای X پزشکی را جذب کنند، در حالی که اتم‌های بزرگ که در استخوان یافت می‌شوند (کلسیم و فسفر) قادرند پرتوهای X را به مقدار زیاد جذب کنند. اگرچه داشتن یک سایه تصویری از درون بدن بیمار به تشخیص شکستگی استخوان کمک می‌کند، اما شاید مشکلات ظریف‌تر در تنها یک تصویر پرتو X قابل مشاهده نباشد؛ لذا برای داشتن تصویر بهتری از آنچه که در درون بیمار می‌گذرد، پرتوشناس باید سایه‌ها را از چند زاویه مختلف ببیند. از این بهتر آن است که پرتوشناس بتواند از مقطع‌نگاری رایانه‌ای (CT)، یا همان سی‌تی‌اسکن، استفاده کند. این وسیله رایانه‌ای شده، به‌طور خودکار، تصویرهای سایه‌ای پرتو X از صدها زاویه در نقاط مختلف تشکیل می‌دهد و یک نقشه پرتو X سه بعدی تفصیلی از بدن بیمار به دست می‌دهد.

روبشگر CT هر بار روی یک «برش» بیمار کار می‌کند و پرتوهای X را از هر زاویه ممکن، از جمله دو زاویه نشان داده شده در شکل ۷، روی این برش نازک می‌فرستد و جای استخوان‌ها و بافت‌ها را روی آن برش تعیین می‌کند (شکل ۸). سپس روی بدن بیمار جابه‌جا می‌شود تا روی برش بعدی کار کند.

درک خود را واریسی کنید. دریچه‌های پرتو X آلومینیومی

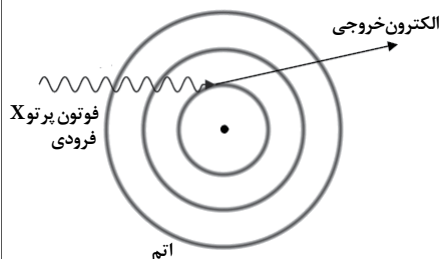
پرسش: می‌دانید که اتم‌های آلومینیم از اتم‌های کلسیم بسیار کوچک‌ترند، و اگرچه فلز آلومینیم مانع عبور نور مرئی می‌شود، ولی برای پرتوهای X پراثری نسبتاً شفاف است. در این باره چه توضیحی دارید؟

پاسخ: پیوند الکترون‌ها در اتم آلومینیم چنان ضعیف است که مشکل می‌تواند فوتون‌های پرتو X پراثری را با اثر فوتوالکتریک جذب کنند.

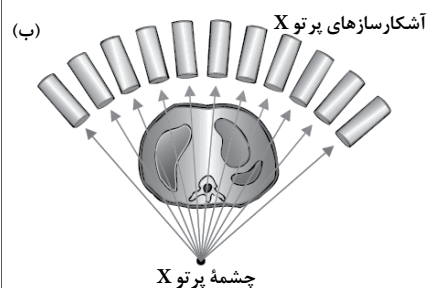
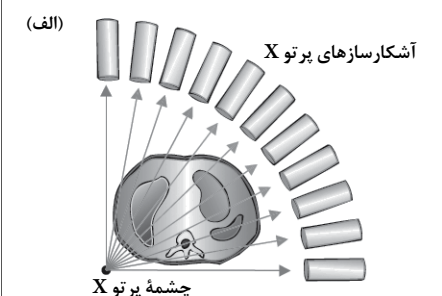
دلیل: نظیر اتم‌های کوچک در یک بافت زیستی، اتم‌های آلومینیم به ندرت از اثر فوتوالکتریک برای جذب پرتوهای X پر انرژی استفاده می‌کنند. این امر امکان می‌دهد تا لایه‌های نازک آلومینیومی به صورت پنجره‌ها و صافی‌هایی برای چشمه‌های پرتو X به کار روند.



▲ شکل ۵. وقتی فوتون پرتو X به‌طور کثیف از اتم پراکنده شود، تمام اتم به صورت یک آنتن عمل می‌کند؛ در نتیجه فوتون در حال عبور تمام بارهای اتم را به حرکت درمی‌آورد و این بارها فوتون را جذب و در جهت جدیدی بازگسیل می‌کنند.



▲ شکل ۶. در اثر فوتوالکتریک، فوتون جذب شده یک الکترون را از اتم بیرون می‌اندازد. البته بخشی از انرژی این فوتون صرف خارج کردن الکترون از اتم می‌شود و بقیه آن به انرژی جنبشی الکترون تبدیل می‌گردد.



▲ شکل ۷. مقطع‌نگاری رایانه‌ای یا تصویر روبشی CT (سی تی اسکن) با تحلیل تصویرهای سایه‌ای پرتو X که از زاویه‌ها و مکان‌های متفاوت گرفته شده است، تشکیل می‌شود. یک چشمه پرتو X و آرایه‌ای از آشکارسازهای پرتو X الکترونیکی حلقه‌ای را تشکیل می‌دهند که این حلقه، وقتی بیمار آهسته سر تا سر حلقه حرکت می‌کند، به دور بیمار می‌چرخد.

استفاده از پرتوهای X برای درمان

در پرتودرمانی نیز از پرتوهای X استفاده می‌شود، ولی نه از آن پرتوهایی که در تصویربرداری پزشکی به کار می‌رود. اگر چه بافت بدن، نسبت به استخوان، فوتون‌های تصویری کمتری را جذب می‌کند، بیشتر فوتون‌های تصویری، قبل از اینکه بتوانند از بافت ضمیمی بگذرند جذب می‌شوند.

به‌طور مثال، فقط حدود ۱۰ درصد فوتون‌های تصویرگیری حتی اگر به استخوان برخورد نکنند می‌توانند از ران بیمار بگذرند. این درصد برای ایجاد تصویر به‌قدر کافی خوب است، ولی برای پرتودرمانی مؤثر نیست، زیرا بیشتر پرتوهای X تصویرگیری خیلی قبل از اینکه به یک غده عمیق برسند جذب می‌شوند.

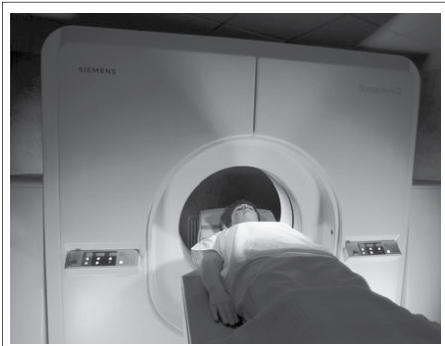
پرتودهی شدید پرتوهای X، به جای نابود کردن غده، بافت نزدیک به پوست بیمار را نابود یا تخریب می‌کند بنابراین، برای حمله کردن به بافت بدخیم در عمق زیر پوست، پرتودرمانی باید از فوتون‌های خیلی پرنرژی بهره بگیرد. وقتی انرژی فوتون‌ها به 10^6 eV نزدیک شود، اثر فوتوالکتریک در بافت و استخوان ناچیز می‌شود و در نتیجه احتمال بیشتری دارد که فوتون‌ها به غده برسند. در اینجا فوتون‌ها در بافت و غده انرژی نابودکننده‌ای به جای می‌گذارند؛ و البته این کار را به‌علت اثر جدیدی انجام می‌دهند که به آن پراکندگی کامپتون گفته می‌شود.

پراکندگی کامپتون وقتی روی می‌دهد که فوتون پرتو X به یک تک الکترون برخورد کند به‌طوری که این دو ذره پس بجهند (شکل ۹). در نتیجه فوتون پرتو X الکترون را از اتم بیرون می‌اندازد. این فرایند با اثر فوتوالکتریک تفاوت دارد زیرا پراکندگی کامپتون با کل اتم سرو کار ندارد و در این پراکندگی فوتون‌ها به جای جذب شدن پراکنده (واجهیده) می‌شوند. از

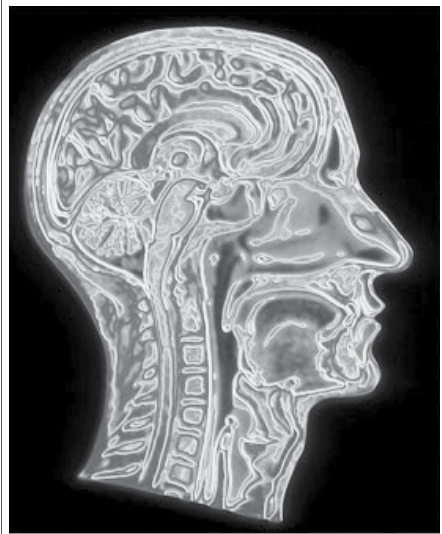
نظر فیزیکی، پشت صحنه این اثر مشابه برخورد کردن دو توپ بیلیارد با یکدیگر است، اگر چه توضیح بیشتر این امر، با توجه به نظریه نسبیت پیچیده است. این واقعیت که این امر پیش می‌آید ثابت می‌کند که فوتون، هم حامل انرژی و هم حامل تکانه است، و اینکه این کمیت‌ها، وقتی نور به ذره‌ای از ماده برخورد می‌کند، پایسته هستند. پراکندگی کامپتون در پرتو درمانی اهمیت بسزایی دارد. وقتی بیمار در معرض فوتون‌هایی با انرژی 10^6 eV قرار می‌گیرد، بیشتر فوتون‌ها از بدن او می‌گذرند، ولی بخش کوچکی نیز دچار پراکندگی کامپتون می‌شوند و مقداری از انرژی آن‌ها به‌جا می‌ماند. این انرژی بافت‌ها را نابود می‌کند از این‌رو می‌تواند در تخریب یک غده به کار رود، بدین ترتیب که با نزدیک شدن به غده از زاویه‌های مختلف و از سراسر بدن بیمار، پرتودرمانی کمترین صدمه را به بافت اطراف غده می‌زند در حالی که به خود غده مقدار تابش کشنده‌ای داده می‌شود.

پراکندگی کامپتون تنها اثری نیست که در پی برخورد فوتون‌های پرنرژی به ماده به‌وجود می‌آید. پرتوهای X با انرژی اندکی بیشتر از $1/022/000$ eV می‌توانند موقع گذشتن از اتم کار قابل توجهی انجام دهند؛ به این معنا که آن‌ها می‌توانند باعث تولید **زوج الکترون-پوزیترون** شوند. پوزیترون پادماده هم‌ارز الکترون است. عالم ما از بسیاری جهات متقارن است، و یکی از تقارن‌های تقریباً کامل وجود پادماده است. تقریباً هر ذره‌ای در طبیعت پادماده‌ای با همان جرم ولی با مشخصه‌های مخالف دارد. پوزیترون یا پادالکترون نیز همان جرم الکترون را دارد ولی بار آن مثبت است. پادماده به‌طور طبیعی در زمین وجود ندارد، ولی می‌تواند در برخوردهای پرنرژی تولید شود. وقتی فوتون پرنرژی با میدان الکتریکی یک اتم برخورد کند، فوتون می‌تواند تبدیل به یک الکترون و یک پوزیترون شود. همان‌طور که از بحث تبدیل ماده به انرژی می‌دانیم، تولید زوج نمونه‌ای از تبدیل انرژی به ماده است. حدود 111000 eV انرژی لازم است تا یک الکترون یا یک پوزیترون تشکیل شود، بنابراین فوتون باید دست‌کم 1022000 eV انرژی داشته باشد تا یکی از هر ذره را تولید کند. هر مقدار انرژی اضافی به انرژی جنبشی در دو ذره تبدیل خواهد شد.

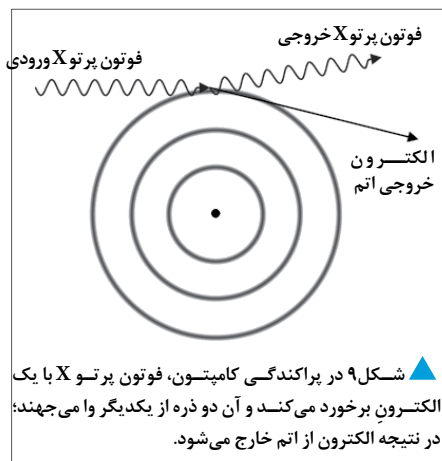
پوزیترون مدت زیادی در بدن بیمار نمی‌ماند، بلکه به زودی با الکترون برخورد می‌کند و آن دو یکدیگر را نابود می‌کنند. الکترون و پوزیترون ناپدید می‌شوند و جرم آن‌ها تبدیل به انرژی می‌شود. در واقع فوتون‌هایی با انرژی کل، دست‌کم، 1022000 eV به وجود می‌آید. بنابراین به‌طور خلاصه، در این فرایند، انرژی به ماده و سپس ماده به انرژی تبدیل می‌شود. این فرایند شگفت‌آور در پرتو درمانی با انرژی بالا وجود دارد به‌ویژه در انرژی‌های بالا، حدود 10^7 eV، کاملاً اهمیت پیدا می‌کند. شگفت‌آور نیست که به نابود کردن غده‌ها نیز کمک می‌کند.



شکل ۸. الف) دستگاه روبشگر مقطع نگاری رایانه‌ای (CT) در طرف چپ، در حال تصویربرداری لایه‌به‌لایه از بدن بیمار با استفاده از پرتوهای X است. این دستگاه یک نقشه سه‌بعدی رایانه‌ای (۳D) از عنصرهای سنگین موجود در بدن بیمار تهیه می‌کند.



ب) قسمتی از نقشه که سر بیمار را نشان می‌دهد.



▲ شکل ۹ در پراکندگی کامپتون، فوتون پرتو X با یک الکترون برخورد می‌کند و آن دو ذره از یکدیگر وا می‌جهند؛ در نتیجه الکترون از اتم خارج می‌شود.

حرکت می‌کنند و به‌ندرت با چیزی برخورد می‌کنند. آن‌ها چون بار ندارند در نیروهای الکترومغناطیسی نیز نقشی ندارند و برخلاف نوترون که از نظر الکتریکی خنثی است، به آن‌ها نیروی هسته‌ای وارد نمی‌شود. به آن‌ها فقط نیروی گرانشی و نیروی ضعیف وارد می‌شود. که نیروی ضعیف آخرین نیرو از چهار نیروی بنیادی شناخته شده در عالم است: (سه نیروی بنیادی دیگر

عبارت‌اند از: نیروی گرانشی، نیروی الکترومغناطیسی، و نیروی قوی- که شکل پیچیده‌تری از نیروی هسته‌ای است.) چون این نیرو ضعیف است و فقط بین ذراتی وجود دارد که خیلی به‌هم نزدیک‌اند به‌ندرت خود را نشان می‌دهد. یکی از چند موردی که این نیرو در آن‌ها نقش مهمی دارد واپاشی بتا است.

نوترینو که تقریباً راهی برای کشیدن یا فشار دادن ذره دیگری را ندارد، می‌تواند به آسانی از تمام زمین بگذرد. نوترینوها فقط گاهی به‌طور تصادفی و فقط به کمک آشکار سازهای عظیم آشکار سازی شده‌اند. به‌همین دلیل بود که دانشمندان، برای اولین بار، با اندازه‌گیری انرژی و تکانه، در قبل و بعد از واپاشی، نشان دادند که نوترینوها از نوترون‌های در حال واپاشی گسیل می‌شوند. پروتون و الکترون ناشی از واپاشی، انرژی و تکانه‌ای کلی را که نوترون قبل از واپاشی داشت ندارند. در اینجا چیزی باید انرژی و تکانه گم شده را با خود حمل کند، و آن چیز نوترینو است. وقتی ^{60}Co به ^{60}Ni تبدیل شد، واپاشی کاملاً تمام نشده است. هسته ^{60}Ni که تشکیل می‌شود هنوز دارای انرژی اضافی است. هسته‌ها دستگاه‌های پیچیده کوانتوم فیزیکی درست مثل اتم‌ها، هستند و حالت‌های برانگیخته نیز دارند. هسته ^{60}Ni در حالتی برانگیخته است و قبل از رسیدن به حالت پایه باید دو گذار تابشی داشته باشد. این گذارهای تابشی فوتون‌های بسیار پرانرژی یا پرتوهای گاما تولید می‌کنند که مشخصه هسته ^{60}Ni است یکی از انرژی 117000 eV و دیگری با انرژی 1330000 eV . پرتوهای گاما همان‌هایی هستند که پرتو درمانی با ^{60}Co را ممکن می‌سازند.

درک خود را واریسی کنید: ملاقات با دارو فروش

پرسش: اگر کسی بخواهد یک بطری نوترینو به شما بفروشد باید آدم نادانی باشید که آن را بخريد. در مفهوم «یک بطری نوترینو» چه اشکالی وجود دارد؟

درک خود را واریسی کنید: چیزهای خوب بیشتر

پرسش: یک فوتون حدوداً چقدر انرژی داشته تا بتواند زوج پروتون- پادپروتون تولید کند؟

پاسخ: به حدود $2 \times 10^6\text{ eV}$ نیاز دارد.

دلیل: پروتون حدود 2000 برابر الکترون جرم دارد، بنابراین تولید زوج پروتون- پادپروتون به حدود 2000 برابر 10^6 eV انرژی لازم برای تولید الکترون- پوزیترون نیاز دارد.

پرتوهای گاما

تولید فوتون‌های فوق‌العاده پرانرژی به آسانی تولید فوتون‌های مورد استفاده در تصویربرداری با پرتو X نیست. اصولاً، یک منبع تغذیه می‌تواند اختلاف ولتاژ عظیمی در لامپ پرتو X تولید کند به‌طوری که الکترون‌های انرژی بالا بتوانند به اتم‌های فلز برخورد کنند و فوتون‌هایی با انرژی بسیار بالا به‌وجود آورند. ولی منبع‌های تغذیه میلیون ولتی پیچیده و خطرناک‌اند. به همین دلیل به جای روش بالا، برای تولید آن‌ها تمهیدات دیگری به کار می‌رود. یکی از آسان‌ترین راه‌ها برای تولید فوتون‌های بسیار پرانرژی واپاشی ایزوتوپ‌های پرتوزا است. ایزوتوبی که خیلی در تابش درمانی متداول است کبالت ^{60}Co است. هسته ^{60}Co دارای نوترون‌های زیادی است و نظیر بسیاری از هسته‌های با نوترون زیاد، واپاشی بتا را پیدا می‌کند؛ یعنی یکی از نوترون‌های آن به یک پروتون، یک الکترون و یک نوترینو (یا دقیق‌تر، پادنوترینو) وامی‌باشد. با شروع این واپاشی بتا، ^{60}Co وارد فرایندی از تبدیل‌ها می‌شود که در نهایت به تولید دو فوتون پرانرژی می‌انجامد؛ یکی به میزان 1170000 eV و دیگری به میزان 1330000 eV . این فوتون‌ها به خوبی به بافت نفوذ می‌کنند و در از بین بردن غده‌ها بسیار مؤثرند. اگر چه فرایندی که در آن ^{60}Co دو فوتون پرانرژی تولید می‌کند پیچیده است، خود واپاشی بتا نشان می‌دهد که پروتون‌ها، الکترون‌ها و نوترون تغییر ناپذیر نیستند و نشان می‌دهند که ذرات زیر اتمی دیگری در عالم ما وجود دارند. نوترون‌هایی که یا خودشان پرتوزا هستند و یا در هسته‌هایی وجود دارند که تعداد خیلی زیادی نوترون دارند و پرتوزا هستند و واپاشی بتا را پیدا می‌کنند. وقتی این فرایند، یعنی واپاشی بتا، در یک هسته ^{60}Co رخ دهد، الکترون با بار منفی و نوترینوی خنثی به سرعت از هسته فرار می‌کنند و پروتون تشکیل شده جدیدی به جا می‌ماند.

در این صورت هسته قبلی (^{60}Co) به نیکل (^{60}Ni) تبدیل می‌شود.

نوترینو یک ذره زیر اتمی با جرم کم و بدون بار است. نوترینوها در اتم‌های معمولی یافت نمی‌شوند و اگر چه در فیزیک هسته‌ای و فیزیک ذرات از اهمیت برخوردارند ولی مشاهده مستقیم آن‌ها دشوار است. زیرا با سرعتی نزدیک به سرعت نور

پاسخ: بطری نمی‌تواند نوترینوها را در خود نگه دارد زیرا به‌ندرت با آن‌ها برهم‌کنش می‌کند.

دلیل: چون فقط گرانشی و نیروی ضعیف برنوترینوها اثر دارند و بطری نمی‌تواند آن‌ها را زیاد در خود محفوظ دارد. در واقع، شما در همه‌وقت در نوترینوهای ناشی از خورشید غوطه‌ورید بدون اینکه خودتان متوجه باشید. آن‌ها به‌همان اندازهٔ خاک عادی‌اند و نمی‌توانید هیچ‌کاری بکنید.

شتاب دهنده‌های ذرات

تابش الکترو مغناطیسی تنها تابشی نیست که در درمان بیماران به‌کار می‌رود. برای این‌کار، ذرات پرانرژی مثل الکترون‌ها و پروتون‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ذرات سریع نظیر توپ‌های کوچک بیلپارد، با اتم‌های درون غده برخورد می‌کنند و آن‌ها را از بافت جدا می‌کنند. مطابق معمول، این آسیب اتمی و مولکولی یاخته‌ها را می‌کشد و غده‌ها را تخریب می‌کند. به‌هرحال، ایجاد ذرات زیر اتمی بسیار پرانرژی کار ساده‌ای نیست. با اینکه منبع‌های تغذیه با ولتاژ بالا می‌توانند برای شتاب دادن الکترون یا پروتون تا حدود 50000 eV به‌کار روند، ولی بازهم این کافی نیست. وقتی یک ذرهٔ باردار وارد بافت می‌شود نیروهای الکتریکی توانمندی به آن وارد می‌شوند و ذره به آسانی از مسیرش منحرف می‌شود. پس، برای اطمینان از اینکه یک ذره مستقیم و درست به‌طرف

غده می‌رود، باید انرژی فوق‌العاده زیادی داشته باشد. حال، برای اینکه به هر ذرهٔ باردار میلیون‌ها یا حتی میلیارد‌ها الکترون ولت وارد شود، که در پرتو درمانی مورد نیاز است، باید از دستگاه شتاب دهندهٔ ذرات استفاده شود.

در شتاب دهنده‌های ذرات از کاواک‌هایی فلزی بهره می‌گیرند که نظیر خازن‌ها و آنتن‌ها عمل می‌کنند. هر ساختار فلزی تقریباً می‌تواند به‌طور هم‌زمان به دو صورت خازن و القاگر عمل کند و بنابراین دارای یک تشدید طبیعی برای به‌راه‌انداختن بار است. در کاواک‌های

تشدیدی یک شتاب دهندهٔ ذرات، این «بار» به حرکت درمی‌آید و میدان‌های الکتریکی بسیار بزرگی تولید می‌کند که با گذشت زمان تغییر می‌کند. همین میدان‌های الکتریکی به ذرات باردار فشار می‌آورند تا آن‌ها به انرژی‌هایی باور نکردنی برسند.

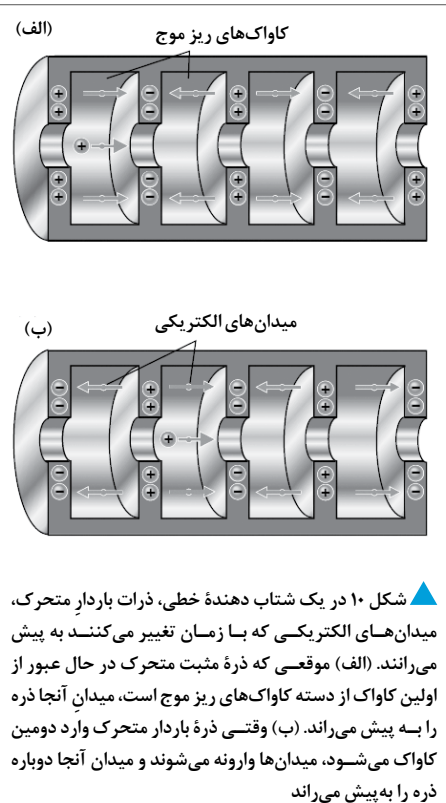
یک نوع مهم شتاب دهندهٔ ذرات شتاب دهندهٔ خطی است. در این وسیله میدان‌های الکتریکی در یک دسته کاواک‌های تشدید، ذرات را در خط مستقیمی به پیش می‌رانند (شکل ۱۰). در روی هر یک از این کاواک‌ها بارها به‌طور موزون به پس و پیش حرکت می‌کند. وقتی بستهٔ کوچکی از ذرات باردار از یک سوراخ وارد اولین کاواک می‌شود، ناگهان توسط میدان الکتریکی قوی درون آن کاواک به جلو رانده می‌شود (شکل ۱۰ - الف). بسته به جلو شتاب می‌گیرد و با انرژی جنبشی‌ای بیشتر از موقع ورود، اولین کاواک تشدید را ترک می‌کند؛ در اینجا میدان الکتریکی داخل آن کاواک روی بسته کار انجام داده است.

اگر میدان‌ها در کاواک‌ها ثابت بودند، میدان الکتریکی در کاواک دوم سرعت ذره را کاهش می‌داد. در شکل ۱۰، الف، می‌توانید ببینید که میدان‌های الکتریکی در کاواک دوم در جهت نادرست قرار دارد. وقتی بسته به کاواک دوم می‌رسد، باری که در دیواره‌های آن به حرکت افتاده است و نیز میدان الکتریکی وارون می‌شوند (شکل ۱۰ ب). بسته دوباره به پیش رانده می‌شود، و باز با انرژی جنبشی بیشتری از کاواک دوم خارج می‌شود.

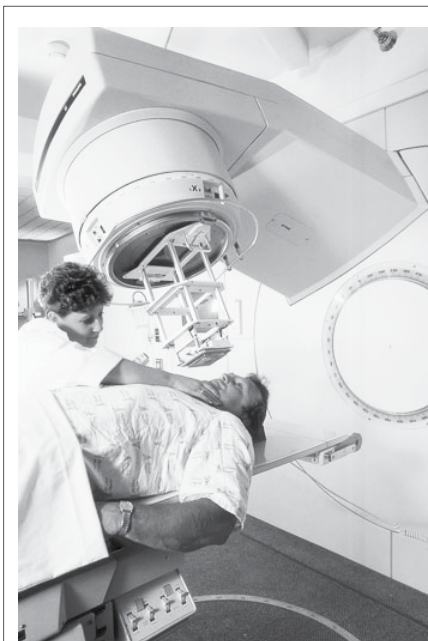
هر کاواک تشدید در این رشته انرژی بسته را زیاد می‌کند، به‌طوری که رشتهٔ درازی از کاواک‌ها می‌تواند به هر بسته از ذرات باردار میلیون‌ها و حتی میلیارد‌ها الکترون ولت انرژی بدهند. این انرژی ناشی از ژنراتورهای، ریزموج است که باعث حرکت پس و پیش بار در کاواک‌های تشدید شتاب‌دهنده می‌شود. شتاب‌دهندهٔ خطی با استفاده از وسیلهٔ مشابه درون لامپ تصویر تلویزیون، فقط باید ذرات باردار را به اولین کاواک وارد کند و آن ذره‌های باردار از آخرین کاواک با انرژی‌هایی باور نکردنی خارج می‌شوند (شکل ۱).

ولی، این روش شتاب‌دهی چند پیچیدگی دارد. مهم‌ترین آن‌ها این است که هر کاواک باید، در لحظهٔ درست، میدان الکتریکی‌اش را وارونه کند تا شتاب روی به جلوی بسته محفوظ بماند. برای سادگی عمل، همهٔ کاواک‌ها بسامد تشدید یکسانی دارند و میدان الکتریکی خود را هم‌زمان وارونه می‌کنند. از آنجا که بسته، مدت یکسانی را در هر کاواک می‌گذراند و چون با رفتن از یک کاواک به کاواک بعدی سرعت‌اش زیاد می‌شود، هر کاواک باید از قبلی درازتر باشد.

وقتی بسته به سرعت نور نزدیک می‌شود، چیز عجیبی اتفاق می‌افتد. افزایش انرژی بسته، در عبور از کاواک‌ها تداوم می‌یابد، ولی افزایش خیلی زیاد سرعت متوقف می‌شود. این



شکل ۱۰ در یک شتاب دهندهٔ خطی، ذرات باردار متحرک، میدان‌های الکتریکی که با زمان تغییر می‌کنند به پیش می‌رانند. (الف) موقعی که ذره مثبت متحرک در حال عبور از اولین کاواک از دسته کاواک‌های ریز موج است، میدان آنجا ذره را به پیش می‌راند. (ب) وقتی ذرهٔ باردار متحرک وارد دومین کاواک می‌شود، میدان‌ها وارونه می‌شوند و میدان آنجا دوباره ذره را به پیش می‌راند



▲ شکل ۱۱. این دستگاه پرتو درمانی، برای تولید ذرات زیراتمی با انرژی فوق العاده زیاد از شتاب دهنده خطی استفاده می کند. این ذرات به عمق بدن بیمار نفوذ می کنند تا یک غده سرطانی را از بین ببرند. خود شتاب دهنده خطی در اتاقک پشت این دستگاه از دید پنهان است ولی باریکه پرتوهای آن، توسط آهنرباهایی در یک بازوی قابل چرخش، به طرف محل مورد نظر، در بدن بیمار هدایت می شود. بازو در طی درمان به تناوب حرکت می کند به طوری که باریکه پرتوهای آن از جهت های متفاوت به غده برمی خورد در حالی که به بافت سالم مجاور آسیب کمتری می رساند. این راهبرد چند جهتی به طور وسیع در درمان با پرتو X و پرتو گاما نیز مورد استفاده قرار می گیرد.

مغناطیسی یا MRI است. این روش محل اتم های هیدروژن را از طریق برهم کنش با هسته های مغناطیسی آن ها پیدا می کند. چون هیدروژن در آب و مولکول های آلی وجود دارد، یافتن اتم های هیدروژن راه خوبی برای مطالعه بافت های زیستی است. هسته یک اتم هیدروژن معمولی، ^1H ، یک پروتون است. این پروتون، نظیر الکترون ها، دو حالت کوانتومی ممکن دارد، که معمولاً اسپین بالا و اسپین پایین نامیده می شود. نامیدن این دو حالت به صورت اسپین مناسب است زیرا پروتون های اسپین بالا و اسپین پایین تکانه زاویه ای مساوی ولی در جهت های مخالف دارند. وقتی بار الکتریکی و اسپین، هر دو، وجود داشته باشد، وجود مغناطیس تعجب آور نیست، چون جریان های الکتریکی مغناطیسی هستند. بدون شک پروتون ها دوقطبی های

مغناطیسی دارند؛ قطب های شمال و جنوب مساوی در فاصله ای از یکدیگر. پروتون اسپین بالا چنان عمل می کند که گویا دارای قطب شمال در بالاست، در حالی که پروتون اسپین پایین چنان عمل می کند که گویا قطب جنوب آن در بالاست.

وقتی یک پروتون وارد میدان مغناطیسی شد دو قطبی مغناطیسی آن در جهت میدان قرار می گیرد، که با این کار انرژی پتانسیل مغناطیسی آن کمینه می شود. ولی اگر چه پروتون ها در صفر مطلق کاملاً با میدان هم خط می شوند، اما در حوالی دمای اتاق توفیق کمتری دارند. انرژی گرمایی پروتون ها را آشفته می سازد به طوری که در یک میدان مغناطیسی قوی رو به بالا، انرژی پروتون های اسپین بالا از پروتون های اسپین پایین کمی بیشتر است.

در میدان مغناطیسی رو به بالا، هر پروتون دو حالت کوانتومی ممکن دارد؛ یکی در جهت با میدان (اسپین بالا) و دیگری در خلاف جهت میدان (اسپین پایین). چون قرار گرفتن در جهت میدان، انرژی پتانسیل مغناطیسی پروتون را کاهش می دهد، این

اثر نتیجه نسبیت خاص است؛ یعنی قاعده هایی که بر حرکت، در سرعت قابل مقایسه با سرعت نور حاکم است. همان طور که می دانیم ارتباط ساده ای بین انرژی جنبشی و سرعت وجود دارد ($E_k = \frac{1}{2}mv^2$).

این معادله برای اجسامی که تقریباً با سرعت نور حرکت می کنند دیگر معتبر نیست و به جای آن باید از معادله

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

استفاده کرد. به عنوان نتیجه بیشتری از نسبیت،

بسته می تواند به سرعت نور نزدیک شود ولی در عمل نمی تواند به آن برسد. اگر چه انرژی جنبشی ذره باردار می تواند به طور غیرعادی بزرگ باشد، سرعتش محدود به سرعت نور است.

چون افزایش سریع سرعت بسته، پس از گذشتن از چند کاواک اولیه شتاب دهنده خطی، به طور قابل ملاحظه ای کم می شود، طول کاواک های باقیمانده می تواند ثابت باشد. فقط چند کاواک اول باید به نحو خاصی طراحی شوند تا افزایش سرعت بسته درون آن ها به حساب آورده شود. ذرات باردار خارج شده از شتاب دهنده نزدیک به سرعت نور حرکت می کنند. آن ها از دریچه فلزی نازکی که هوا را بیرون از شتاب دهنده نگه می دارد می گذرند و وارد بدن بیمار می شوند. انرژی آن ها به قدرت زیاد است که قبل از متوقف شدن به عمق بافت نفوذ می کنند.

درک خود را وارسی کنید: بازیافت ذره

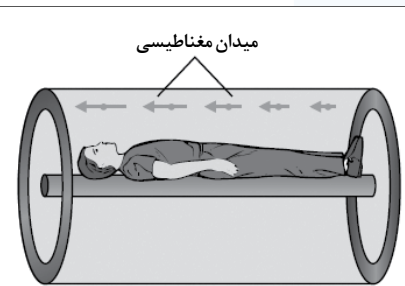
پرسش: در بسیاری از شتاب دهنده های پژوهشی، هر بسته از الکترون ها را چندین بار به رشته یکسانی از کاواک های تشدید می فرستند. پس از آنکه بسته از آخرین کاواک خارج شد، آهنرباها آن را به دور دایره ای هدایت می کنند و آن را دوباره به کاواک ها پس می فرستند. با هر عبور از کاواک ها، بسته انرژی بیشتری به دست می آورد، بنابراین چگونه می توانند با میدان های الکتریکی وارونه شونده در کاواک ها هماهنگ بمانند؟

پاسخ: بسته با سرعت نزدیک به سرعت نور در حرکت است، از این رو با افزایش انرژی سرعت آن چندان تغییر نمی کند.

دلیل: اگر سرعت ذره با هر بار گذشتن از کاواک ها افزایش می یافت، با میدان های الکتریکی وارونه شونده درون آن ها هماهنگ نمی ماند. ولی، سرعت ذرات وقتی به سرعت نور نزدیک شد چنان ثابت است که می تواند بدون هیچ مشکلی بارها و بارها از کاواک ها بگذرد.

تصویربرداری با تشدید مغناطیسی

اگرچه پرتوهای X در تصویربرداری از استخوان ها بسیار خوب عمل می کنند، اما برای تصویربرداری از بافت ها مناسب نیستند. روش بهتر برای مطالعه بافت، تصویربرداری با تشدید



▲ شکل ۱۲. دستگاه MRI بیمار را در یک میدان مغناطیسی قرار می‌دهد. این میدان، برحسب مکان تغییر می‌کند، به طوری که به پروتون‌های در محل‌های متفاوت از بدن بیمار، در میدان‌های متفاوتی قرار گیرند و فوتون‌های موج رادیویی مختلفی را جذب می‌کنند.

حالت پایه است - با حالت کمترین انرژی. حالت در خلاف جهت میدان حالت برانگیخته است.

با این دو حالت ممکن، یعنی حالت پایه و حالت برانگیخته، پروتون در یک میدان مغناطیسی می‌تواند رفتارهای گوناگونی را از خود بروز دهد. مهم‌ترین آن‌ها گذار تابشی پروتون بین دو حالت می‌تواند گذارهای تابشی داشته باشد.

پروتون حالت پایه می‌تواند فوتونی را جذب کند و گذار تابشی به حالت برانگیخته‌اش داشته باشد، و پروتون حالت برانگیخته می‌تواند فوتونی را گسیل کند و به حالت پایه انتقال یابد.

همان‌طور که می‌دانیم یک اتم معین می‌تواند فقط فوتون‌های معینی را جذب یا گسیل کند، و آن‌ها فوتون‌هایی هستند که دقیقاً مقدار مناسب انرژی برای گذار از یک حالت کوانتومی به حالت کوانتومی دیگر داشته باشند. برای مثال، علامت‌های نئون قرمزند، زیرا اتم‌های نئون حالت‌هایی دارند که انرژی آن‌ها به اندازه انرژی فوتون‌های قرمز از هم فاصله دارند. به همین ترتیب، پروتون در یک میدان مغناطیسی می‌تواند فقط فوتون‌های معینی را جذب یا گسیل کند، یعنی فوتون‌هایی که حامل مقدار درست انرژی برای گذار پروتون از یک حالت کوانتومی به حالت کوانتومی دیگرند.

ولی، برخلاف اتم نئون، که همواره با فوتون‌های قرمز برهم کنش می‌کند، پروتون واقع در میدان مغناطیسی، با فوتون‌هایی برهم کنش می‌کند که «رنگ» آن‌ها بسته به شدت میدان مغناطیسی تغییر می‌کنند. زیرا اختلاف انرژی دو حالت پروتون با میدان مغناطیسی‌ای که در آن قرار دارد متناسب است؛ در نتیجه، انرژی مورد نیاز پروتون برای ایجاد گذارهای تابشی بین دو حالت پروتون نیز متناسب با میدان مغناطیسی است. اگر میدان تغییر کند، انرژی فوتون نیز تغییر می‌کند. وقتی بیمار وارد میدان مغناطیسی قوی دستگاه MRI می‌شود (شکل‌های ۱۲ و ۱۳)، پروتون‌های بدن او به میدان واکنش نشان می‌دهند که در نتیجه تعداد پروتون‌های هم‌خط شده کمی زیاد می‌شود. تنها همین پروتون‌های هم‌خط شده اضافی هستند که برای دستگاه MRI اهمیت دارند زیرا اثرهای ناشی از بقیه پروتون‌ها، که به مقدار مساوی در جهت میدان و در جهت مخالف آن هستند، کاملاً خنثی می‌شود.

به عبارت دیگر، پروتون‌های در جهت میدان اضافی در حالت پایه خود همان‌هایی هستند که دستگاه MRI آن‌ها را بررسی می‌کند.

دستگاه MRI، با استفاده از فوتون‌های موج رادیویی، با این پروتون‌های در حالت پایه برهم کنش می‌کند - فوتون‌هایی با انرژی‌هایی درست برابر با اختلاف انرژی بین حالت‌های پایه و برانگیخته پروتون‌ها می‌توانند فوتون‌های موج رادیویی را جذب و سپس گسیل کنند، و نیز می‌توانند اثرهای تداخلی کوانتومی گوناگون خیره کننده و مفیدی از خود نشان دهند.

اگر بر پروتون‌های بدن بیمار میدان‌های مغناطیسی یکسانی اثر می‌کرد، همه آن‌ها با فوتون‌های موج رادیویی یکسانی برهم کنش می‌کردند، ولی برهمه پروتون‌ها میدان‌های یکسانی اثر نمی‌کند. دستگاه MRI طوری است که تغییر فضایی اندکی در میدان مغناطیسی خود ایجاد می‌کند؛ و چون میدان مغناطیسی برای پروتون‌های مختلف تفاوت دارد، فقط بعضی از آن‌ها می‌توانند با فوتون‌های موج رادیویی با یک انرژی خاص برهم کنش کنند. همین برهم کنش گزینشی است که چگونگی قرار گرفتن پروتون‌ها در بدن بیمار را مشخص می‌کند.

دستگاه MRI، در ساده‌ترین شکل خود، یک میدان مغناطیسی، تابع مکان به بدن شخص بیمار اعمال می‌کند. این دستگاه سپس موج‌های رادیویی مختلفی را به بدن بیمار می‌فرستد و برهم کنش فوتون‌های موج رادیویی با پروتون‌ها را دنبال می‌کند. چون فقط پروتونی که میدان مغناطیسی مناسب بر آن اثر می‌کند می‌تواند با فوتون موج رادیویی خاصی برهم کنش کند، دستگاه MRI می‌تواند تعیین کند که هر پروتون در کجا با فوتون‌ها برهم کنش می‌کند. با تغییر آرایش فضایی میدان مغناطیسی و تنظیم انرژی‌های فوتون‌های موج رادیویی، دستگاه MRI به تدریج محل پروتون‌ها را در بدن بیمار، تشخیص می‌دهد. این دستگاه نقشه‌ای سه بعدی از جزئیات از اتم‌های هیدروژن به وجود می‌آورد. یک رایانه این نقشه را بررسی می‌کند و تصویرهایی مقطعی با زاویه‌های مختلف از بدن بیمار به نمایش می‌گذارد.

درک خود را واری کنید: آهنرباهای اصلی

پرسش: بعضی از جدیدترین مدل‌های دستگاه‌های MRI از میدان مغناطیسی فوق‌العاده قوی استفاده می‌کنند. وقتی میدان مغناطیسی دستگاه قوی‌تر می‌شود، برای موج‌های رادیویی که برای برهم کنش با پروتون‌های درون بدن بیمار به کار می‌روند چه اتفاقی باید بیفتد؟

پاسخ: هر فوتون موج رادیویی باید حامل انرژی بیشتری باشد (موج‌های رادیویی باید بسامدهای بالاتری داشته باشند).

بی‌نوشت‌ها

1. Bremsstrahlung
2. X-Ray fluorescence
3. Characteristic X-Ray

منبع

How Things Work
Louis A. Bloomfield,
4th Edition, 2010



پیش‌نیازی به نام خلاء

مریم صابری، کارشناس ارشد آموزش فیزیک

چکیده

این مقاله یک تحقیق کیفی از میزان درک دانش‌آموزان دبیرستان از مبحث خلأ است. مبحثی که شاید ظاهراً در محتوای فیزیک دبیرستان مطرح نشود اما برای آموزش مطالبی مثل سقوط آزاد، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و ... کاربرد زیاد دارد. در این مطالعه خواهیم دید برخلاف تصور دبیران فیزیک، دانش‌آموزان هیچ درک درستی از مفهوم خلأ ندارند لذا در درک مباحث بالا که خلأ پیش‌نیازشان محسوب می‌شود، به‌شدت ناتوان‌اند. همچنین نتایج نشان می‌دهد زمانی که دانش‌آموزان قبل از تدریس این مباحث، ابتدا پیش‌نیاز خلأ را به‌درستی آموزش ببینند، مشکلات بسیار کمتری نسبت به سایرین خواهند داشت.

کلیدواژه‌ها: خلأ سقوط آزاد، پیش‌نیاز، کج‌فهمی

۱. مقدمه

علت اینکه مبحث خلأ را جهت بررسی انتخاب کردم آن بود که پیش از انجام این کار ضمن انجام دو تحقیق دیگر درباره مشکلات دانش‌آموزان در مبحث «سقوط آزاد» و همچنین کج‌فهمی‌های آن‌ها در زمینه «مفهوم میدان» دریافتم که تعدادی از پاسخ‌های دانش‌آموزان به‌وضوح نشانگر عدم آشنایی صحیح آن‌ها با خلأ است. در ریشه‌یابی علل این مشکل، با جست‌وجو در کتاب‌های علوم، شیمی و فیزیک جهت بررسی کیفیت محتوای اختصاص یافته به مبحث خلأ مشخص شد مطلبی که به آموزش مؤثر خلأ پرداخته باشد وجود ندارد. دانش‌آموزان تنها در یک جمله در علوم دوم راهنمایی می‌آموزند که «موج الکترومغناطیسی برخلاف امواج



▲ شکل ۱۳ (الف). بیمار در حال ورود به میدان مغناطیسی قوی یک دستگاه تصویربرداری با تشدید مغناطیسی (MRI) است. با استفاده از برهم کنش‌های میان موج‌های الکترومغناطیسی و پروتون‌ها، که در میدان‌های مغناطیسی رخ می‌دهد، دستگاه MRI نقشه‌ای سه‌بعدی از اتم‌های هیدروژن موجود در بدن بیمار تهیه می‌کند.

دلیل: هر چه میدان مغناطیسی‌ای که پروتون در آن قرار می‌گیرد قوی‌تر باشد اختلاف انرژی دو حالت پروتون [حالت پایه و حالت برانگیخته] بیشتر می‌شود. در این صورت، دستگاه MRI باید از بسامدهای بالاتری استفاده کند و موج‌های رادیویی پرنرژی‌تر باشند تا باعث گذارهای تابشی میان آن دو حالت شوند. استفاده از میدان‌های مغناطیسی فوق‌العاده قوی مزایای زیادی دارد که **نوفه پایین‌تر** و تفکیک مکانی بهتر تصویر از آن جمله است. ولی، میدان‌های مغناطیسی این دستگاه‌های MRI پیشرفته چنان قوی هستند که می‌توانند اطلاعات موجود در کارت‌های اعتباری سرتاسر اتاق را پاک کنند و اشیای فولادی را از جیب‌های شما درآورند!