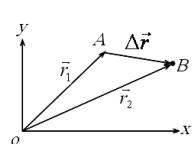


فصل اول: حرکت بر خط راست

صفحه ۱



بردار مکان: برداری است که مکان مختصات را به مکان نهایی متحرک وصل می‌کند. (مثال r_1 , r_2 و Δr)

بردار جابجایی: برداری است که مکان اولیه را به مکان نهایی متصل می‌کند.

تندی متوسط و سرعت متوسط: تندی متوسط و سرعت متوسط دونده به صورت زیر تعریف می‌شوند و تندی متوسط، کمیتی نرده‌ای و

$$\text{سرعت متوسط، کمیتی برداری است. سرعت متوسط } \bar{v}_{av} = \frac{\vec{d}}{\Delta t} \quad \text{تندی متوسط}$$

تعیین سرعت متوسط به کمک نمودار مکان زمان: سرعت متوسط متحرک بین دو لحظه از زمان برابر شیب پاره خطی است که نقاط

نقطه آن دو لحظه در نمودار مکان زمان را به یکدیگر وصل می‌کند

$$\left. \begin{aligned} v_{av} &= \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ \tan \theta &= \frac{\Delta x}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_{av} = \tan \theta$$

شتاب متوسط و شتاب لحظه‌ای: شتاب متوسط برابر نسبت تغییر سرعت به بازه‌ی زمانی است که سرعت تغییر کرده است. شتاب متوسط را با \bar{a} نشان می‌دهند.

$$\left. \begin{aligned} \bar{a} &= \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1} \\ a_{av} &= \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \\ \tan \theta &= \frac{\Delta v}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \Rightarrow a_{av} = \tan \theta$$

❖ شتاب لحظه‌ای شتابی است، که متحرک در هر لحظه دارد. و شتاب لحظه‌ای شیب نمودار سرعت زمان در هر لحظه است.

حرکت یکنواخت بر خط راست: حرکتی است که در آن همواره سرعت متحرک دارای اندازه و جهت ثابت باشد. شیب نمودار مکان زمان چنین حرکتی که همان سرعت است، همواره ثابت خواهد بود. در این نوع حرکت سرعت متوسط با سرعت لحظه‌ای برابر است. یعنی: $v_{av} = v$ معادله حرکت با سرعت ثابت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Rightarrow x = Vt + x_0$$

❖ مساحت زیر سطح نمودار سرعت-زمان، برابر جابجایی است. مثلا در نمودار نسبتاً پیچیده‌ی شکل زیر، برای محاسبه‌ی جابجایی مساحتهای S_1 و S_2 را باهم جمع و نتیجه را منهای S_2 می‌کنیم زیرا مساحت S_2 زیر محور و منفی است.

❖ شرط رسیدن دو متحرک به هم، در یک مسیر مستقیم الخط با یک اختلاف زمانی، این است که $X_A = X_B$ باشد.

حرکت بر خط راست با شتاب ثابت: اگر در حرکت در مسیر مستقیم شتاب در لحظه‌های مختلف یکسان باشد، آن را حرکت با شتاب ثابت در مسیر مستقیم می‌نامیم. در این حالت شتاب لحظه‌ای و شتاب متوسط با هم برابرند. (یعنی $a_{av} = a$) رابطه‌های اصلی در حرکت شتابدار با شتاب ثابت

$V = at + V_o$	$\Delta V = at$	معادله سرعت-زمان
$x = \frac{1}{2}at^2 + V_o t + x_o$	$\Delta x = \frac{1}{2}at^2 + V_o t$	معادله مکان-زمان
$x = \left(\frac{V_o + V}{2} \right) t + x_o$	$\Delta x = \left(\frac{V_o + V}{2} \right) t$	معادله مستقل از شتاب
$V^2 - V_o^2 = 2a(x - x_o)$	$V^2 - V_o^2 = 2a\Delta x$	معادله مستقل از زمان

❖ معادله مکان-زمان در حرکت شتابدار با شتاب ثابت از درجه ۲ است، لذا نمودار آن یک سهمی است. اگر انحنای (تقرع) این سهمی رو به بالا باشد، شتاب مثبت و اگر انحنای (تقرع) این سهمی رو به پایین باشد، شتاب منفی است.

❖ حرکت تند شونده، حرکت کند شونده: اگر در حرکت با شتاب ثابت شیب نمودار مکان-زمان کلی نتیجه می‌شود، حرکت تند شونده است و اگر شیب نمودار در هر لحظه کم شود، حرکت کند شونده خواهد بود. در حالت کلی نتیجه می‌شود که اگر شتاب و سرعت در یک حرکت هم علامت باشند، آن حرکت تند شونده خواهد بود و اگر شتاب و سرعت در یک حرکت غیر هم علامت باشند، آن حرکت کند شونده خواهد بود. یعنی:

$$\text{حرکت تند شونده} \rightarrow a > V > 0$$

سقوط آزاد: (فقط ریاضی): هر گاه جسمی از یک ارتفاعی نسبت به سطح زمین سقوط کند اگر از مقاومت هوا صرف نظر شود، با شتاب ثابت $g/8$ متر بر مجدور ثانیه به سمت زمین سقوط می‌کند یعنی در هر یک ثانیه تقریباً ۱۰ متر بر ثانیه به سرعت حرکت جسم افزوده می‌شود، حرکت جسم در سقوط آزاد به سمت زمین شتابدار ثابت تند شونده است و تنها نیروی وزن همان نیروی وزن جسم است. سقوط آزاد یک حرکت شتابدار در امتداد محور قائم است. در حرکت سقوط آزاد برای سادگی در حل مسائل بهتر است نقطه پرتاب را، مبدأ سنجش فرض کنیم ($y_{o=0}$) و جهت مثبت را رو به بالا در نظر بگیریم. اگر جسم رها شود یا سرعت اولیه صفر باشد ($V_o = 0$)، معادله‌های حرکت سقوط آزاد به شکل ساده‌ی زیر در می‌آیند:

$$V = -gt \quad y = -\frac{1}{2}gt^2 \quad V^2 = -2gy \quad y = \frac{V}{2}t$$

V سرعت در راستای عمودی، y جابجایی نسبت به محل سقوط آزاد، g شتاب جاذبه‌ی زمین که تقریباً ۱۰ است و t زمان است.

فصل دوم: دینامیک و حرکت دایری

دینامیک: علمی است با در نظر گرفتن نیرو به بررسی حرکت می‌پردازد.

توصیف نیرو: عاملی است که باعث تغییر وضعیت حرکت جسم می‌شود یعنی وقتی به یک جسم نیرو وارد می‌شود سرعت و یا شکل جسم تغییر می‌کند. (برهم کنش (تاثیر) دو جسم بر یکدیگر را نیرو نامند). (نیرو دارای اندازه و جهت است، بنابراین یک کمیت برداری است).

قانون اول نیوتون (لختی): یک جسم حالت سکون و یا حرکت یکنواخت روی خط راست خود را حفظ می‌کند، مگر آنکه تحت تأثیر نیرویی مجبور به تغییر آن حالت شود. یا: هرگاه بر جسمی نیرو وارد نشود (یا برآیند نیروهای وارد بر آن صفر شود) جسم اگر ساکن باشد همچنان ساکن می‌ماند و اگر دارای حرکت باشد به حرکت خود با سرعت ثابت ادامه می‌دهد.

لختی یا اینرسی: مقاومت اجسام در مقابل تغییر حرکت و سرعت را لختی یا اینرسی می‌نامند. این اصل مطابق با قانون اول نیوتون است. به همین علت قانون اول نیوتون درباره حرکت را قانون لختی نیز می‌نامند یا: تمایل اجسام برای حفظ حالت سکون یا حرکت یکنواخت روی خط راست، را لختی می‌گوییم.

قانون دوم نیوتون: اگر به یک جسم نیروهایی وارد شود، شتابی می‌گیرد که با برآیند نیروهای وارد بر جسم (نیروی خالص وارد بر جسم) نسبت مستقیم دارد و با آن هم جهت

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m} \Rightarrow \vec{F}_{net} = m\vec{a}$$

❖ **تکانه (اندازه حرکت):** حاصل ضرب جرم جسم در سرعت آن، تکانه نام دارد و آن را با \vec{p} نشان می‌دهیم، که کمیتی برداری است. یکای تکانه در SI، N.S یا $\frac{kg \cdot m}{s}$ است.

$$\vec{p} = m\vec{V}$$

❖ قانون دوم نیوتون بر حسب تکانه برای نیروی ثابت به صورت روبرو است:

$$\Delta\vec{P} = \vec{F}_{net}\Delta t$$

❖ یعنی نیروی خالص وارد بر جسم برابر با تغییر تکانه جسم تقسیم بر زمان تغییر آن است. همچنین از این رابطه نتیجه می‌گیریم که تغییر تکانه برای با حاصل ضرب نیرو در مدت زمان تأثیر آن است.

$$\vec{F}_{av} = \frac{\Delta\vec{P}}{\Delta t}$$

$$\Delta\vec{P} = \vec{F}_{av}\Delta t$$

قانون سوم نیوتون: هرگاه جسمی به جسم دیگر نیرو وارد کند، جسم دوم هم به جسم اول نیرویی هم اندازه‌ی آن ولی در خلاف جهت وارد می‌کند. نیرویی که جسم اول وارد می‌کند (کنش) و نیرویی که جسم دوم وارد می‌کند (واکنش) نامیده می‌شوند. این دو نیرو همواره هم اندازه هم راستا و در سوی مخالف یکدیگرند و هریک بر جسم دیگر وارد می‌شود. یا: برای هر عملی، عکس العملی است مساوی با آن ولی در جهت مختلف

$$\vec{W} = m\vec{g}$$

❖ جهت وزن و در نتیجه شتاب گرانشی همواره به طرف زمین (مرکز زمین) است. جرم یک جسم در مکان‌های مختلف ثابت است، اما وزن آن به مقدار g در آن مکان بستگی دارد. شتاب جاذبه (g) در سطح زمین تقریباً 9.8 N/kg است.

نیروی وزن: وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود. که به آن نیروی مقاومت شاره می‌گویند. ویژگی ۱: نیروی مقاومت شاره به بزرگی جسم، تندی آن و ... بستگی دارد. ۲) هر چه تندی جسم بیشتر باشد، نیروی مقاومت شاره بیشتر خواهد شد. ۳) اگر جسم در هوا حرکت کند، به این نیرو، نیروی مقاومت هوا می‌گویند.

نیروی عمودی سطح (نیروی عتمودی تکیه‌گاه): نیروی عمودی سطح ناشی از تغییر شکل سطح تماس دو جسم است و با F_N نشان داده می‌شود. برای جسم روی سطح افقی F_N است مگر آنکه نیروی دیگری، عمود بر سطح وجود داشته باشد.

نیروی اصطکاک: وقتی تلاش می‌کنیم جسمی را روی سطحی به حرکت در آوریم، چه جسم حرکت کند و چه ساکن بماند، با مقاومتی روبه‌رو می‌شویم که به آن نیروی اصطکاک گویند. این نیرو در خلاف جهت حرکت بر جسم وارد می‌شود و از نیروهای الکترومغناطیسی بین اتم‌ها ناشی می‌شود. نیروی اصطکاک بین دو جسم به جنس سطح دو جسم، وزیری و نرمی آنها و بستگی دارد. **نیروی اصطکاک بر دو نوع است:** ۱- **نیروی اصطکاک ایستایی:** در این حالت جسم نسبت به سطحی که بر آن قرار دارد، کشیده شده اما ساکن می‌ماند. ۲- **نیروی اصطکاک جنبشی (لغزشی):** در این حالت جسم نسبت به سطحی که بر آن قرار دارد در حرکت است.

❖ نیروی اصطکاک ایستایی دارای حداقلی است که با f_{smax} نشان می‌دهیم و به آن نیروی اصطکاک ایستایی در آستانه حرکت گفته می‌شود. اگر نیروی F بزرگ‌تر از f_{smax} باشد جسم شروع به حرکت می‌کند. اصطکاک ایستایی آستانه حرکت از رابطه روبرو به دست می‌آید.

❖ μ_s : ضریب اصطکاک ایستایی است و بستگی به جنس سطح تماس (زبری، صافی و ...) رطوبت محیط و ... دارد و چون یک مقدار ثابت است واحد ندارد.

نیروی اصطکاک جنبشی: وقتی جسمی روی سطحی می‌لغزد از طرف سطح بر جسم، نیروی اصطکاک جنبشی وارد می‌شود که موازی با سطح و در خلاف جهت لغزش جسم است. آزمایش نشان می‌دهد که اندازه نیروی اصطکاک جنبشی متناسب با اندازه نیروی عمودی سطح است.

$$f_k = \mu_k F_N$$

❖ که در آن F_N نیروی عمودی سطح و μ_k ضریب اصطکاک جنبشی است. ضریب اصطکاک جنبشی مانند ضریب اصطکاک ایستایی به عامل‌هایی مانند جنس سطح تماس دو جسم، میزان صافی و زبری آنها و ... بستگی دارد و بدون واحد است.

❖ μ_k همواره از μ_s بزرگ‌تر است لذا نیروی اصطکاک ایستایی از جنبشی بیشتر است. ($\mu_s < \mu_k$)

نیروی کشسانی (قانون هوک): اگر فری را تحت اثر نیروی کشش یا فشارنده‌ی F از حالت عادی خود خارج کنیم، فر نیرویی در خلاف جهت تراکم یا کشیده شدن وارد می‌کند این نیرو را نیروی کشسانی یا نیروی بازگرداننده فر می‌نامند. (نیروی F_e)

$$F_e = k\Delta l \quad \Delta l = l - l_o$$

ΔF تغییر طول فنر، l_0 طول اولیه فنر، T طول فنر در اثر نیروی F است. ثابت فنر و از مشخصه های فنر است که ضریب سختی فنر نیز نامیده می شود. ثابت فنر به اندازه شکل و ساختار ماده ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد و واحد آن N/m است.

دوره ازمان تناوب یا پریود: مدت زمانی است که متحرک روی مسیر دایره ای، یک دور کامل را طی می کند. دوره را با T نمایش می دهند و یکای آن در SI، ثانیه است. از آنجا که در این حرکت ذره محیط دایره ($2\pi r$) را ب تنیدی (V) در زمان T طی می کند، داریم:

$$T = \frac{2\pi r}{V}$$

شتاب مرکزگرا و قانون دوم نیوتون: دور حکمت دایره ای یکنواخت، اندازه سرعت ثابت است اما جهت آن دائم تغییر می کند. به همین دلیل حرکت دایره ای، حرکتی شتاب دار است. در حالتی که بازه زمانی خیلی کوچک انتخاب می شود، جهت ΔV به طرف مرکز دایره خواهد بود. پس جهت شتاب لحظه ای نیز به طرف مرکز خواهد بود. به

همین دلیل به آن شتاب مرکزگرا می گویند. شتاب مرکز گرا برابر است با:

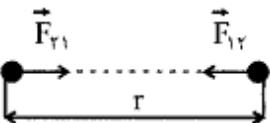
$$a_c = \frac{V^2}{r}$$

در حرکت دایره ای یکنواخت، شتاب جسم، همواره در راستای شاعع دایره و به طرف مرکز آن می باشد. طبق قانون دوم نیوتون، نیرو و شتاب، هم جهت با یکدیگر می باشند. در نتیجه در حرکت دایره ای یکنواخت، برآیند نیروهای وارد بر جسم (F_{net} ، به طرف مرکز دایره است.

قانون دوم نیوتون در حرکت دایره ای یکنواخت:

$$F_{net} = m \frac{V^2}{r}$$

نیروی گرانشی: نیروی گرانشی میان دو ذره با حاصل ضرب جرم دو ذره نسبت مستقیم و با مربع فاصله آنها از یکدیگر نسبت وارون دارد.



$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (\text{نیروی گرانشی بین دو ذره})$$

که در آن: m_1 : جرم جسم ۱ m_2 : جرم جسم ۲ r : فاصله بین دو جسم G : ثابت جهانی گرانش F : نیرو

* ثابت جهانی گرانش است که مقدار آن $G = 6.67 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$ است که مقداری بسیار کوچک می باشد. بنابراین نیروی گرانشی میان جسم های با جرم های

کوچک قابل ملاحظه نیست.

* دو جرم همواره یکدیگر را می ربانند. به عبارت دیگر نیروی گرانشی از نوع رانشی (دافعه) نیست.

چند نکته برای حل مسائل دینامیکی:

- ۱- ابتدا جسم را مشخص کرده و شکل ساده ای برای آن رسم می کنیم.
- ۲- نیروهایی که از طرف محیط به جسم وارد می شود مشخص (تعیین جهت و راستا) می کنیم. (دیگرام آزاد (نیروها عبارتند از وزن، عکس العمل تکیه گاه، اصطکاک، کشش نخ، نیروی موتور و غیره ...)
- ۳- دستگاه مختصاتی مناسب مشخص می کنیم. (جهت حرکت یا میل به حرکت، جهت + یکی از محورها است.)
- ۴- با استفاده از قانون دوم نیوتون، شتاب حرکت یا مجهول دیگر مسأله را به دست می آوریم.

فصل سوم: نوسان و موج

نوسان دوره ای: حرکتی است که متحرک، پس از طی زمان معینی، به وضعیت اولیه برگشته و حرکت خود را از نو، آغاز می کند. مانند حرکت منظم قلب، حرکت تاب، حرکت زمین به دور خورشید و ...

حرکت هماهنگ ساده: به نوسان های سینوسی، حرکت هماهنگ ساده (SHM) گفته می شود. در این حرکت، متحرک، روی یک پاره خط، حول نقطه ای تعادلی واقع در وسط پاره خط، حرکت رفت و برگشت، انجام می دهد. دو نمونه از حرکت هماهنگ ساده، عبارت از: ۱) حرکت آونگ، وقتی که، زاویه ای α خیلی کوچک باشد، ۲) حرکت نوسانی وزنه می متصل به فنر.

دوره تناوب: در حرکت هماهنگ ساده، مدت زمانی که جسم، یک بار رفت و برگشت را انجام می دهد، دوره ای حرکت نامیده و آن را با T نشان می دهیم و واحد آن هرتز است. بسامد: در حرکت هماهنگ ساده، تعداد رفت و برگشت ها، در مدت ۱ ثانیه، بسامد حرکت است. (توجه کنید که در حرکت دایره ای، بسامد، تعداد دوره های کامل در ۱ ثانیه بود).

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{یا} \quad T = \frac{1}{f} \quad \text{تعداد نوسانات در مدت زمان t ثانیه (N) برابر است با} \quad N = f t = \frac{t}{T}$$

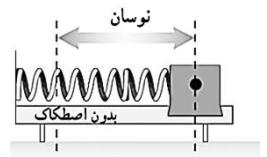
دامنه نوسان: در حرکت هماهنگ ساده، بیشترین فاصله ای نوسان گر از نقطه ای تعادل را دامنه ای حرکت نامیده و آن را با A نشان می دهیم و واحد آن متر می باشد. (معادله مکان در حرکت هماهنگ ساده) $x(t) = A \cos \omega t$

(*) بسامد زاویه ای و برابر $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ است. یکای بسامد زاویه ای در rad/s، SI است. وقتی نوسانگر در $x = \pm A$ است، سرعت آن برابر با صفر است به این نقطه ها اصطلاحاً نقطه های بازگشتی حرکت می گویند. وقتی $x = 0$ است (یعنی نوسانگر از نقطه تعادل می گذرد) اندازه سرعت بیشینه است.

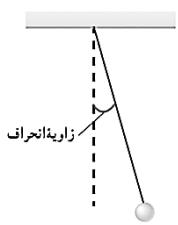
سامانه جرم فنر: دوره تناوب T، بسامد f و بسامد زاویه ای ω برای هر سامانه جرم فنر، برابر است با:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{و} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad , \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

* دوره تناوب سامانه جرم فنر با یک فنر معین ولی وزنه های متفاوت، با جذر جرم وزنه به طور مستقیم متناسب است. دوره تناوب سامانه جرم فنر با یک وزنه معین ولی فنر های متفاوت، با جذر ثابت فنر به طور وارون متناسب است.



آنگ ساده: آونگ ساده شامل وزنه کوچکی به جرم m است که از نخ بدون جرم و کش نیامدنی به طول L که سر دیگر آن ثابت شده، آویزان است. اگر زاویه انحراف آونگ از وضع تعادل کوچک باشد، آونگ حرکت هماهنگ ساده خواهد داشت. دوره تناوب آونگ ساده فقط به شتاب گرانشی (g) و طول آونگ (L) بستگی دارد، و از رابطه زیر به دست می آید:

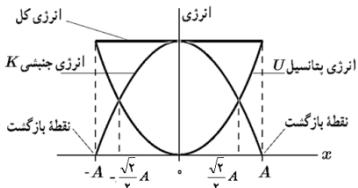


$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \sqrt{\frac{l_2}{l_1} \times \frac{g_1}{g_2}}, \omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

با توجه به رابطه دوره تناوب آونگ: دوره تناوب آونگ ساده به جرم و دامنه آن بستگی ندارد.

اگر اندازه گیری در محیطی به غیر از زمین باشد، به جای g شتاب گاذبه در آن محل را قرار می دهیم. مثلاً اگر اندازه گیری در آسانسور باشد، به جای g ، g' یعنی نتیجه شتاب خود آسانسور و شتاب زمین ($g' = g \pm a$) را قرار می دهیم.

انرژی در حرکت هماهنگ ساده:



در سامانه جرم-فner انرژی پتانسیل (U) متناسب با x^2 است. بنابراین انرژی پتانسیل سامانه جرم فner در نقاط بازگشتی ($x = \pm A$) بیشینه و در نقطه تعادل ($x = 0$) برابر صفر است.

انرژی جنبشی (K) جرم فner به جرم قطعه متصل به فner و تندی آن بستگی دارد.

هرچه فاصله (X) بیشتر، انرژی پتانسیل بیشتر و هرچه سرعت (V) بیشتر، انرژی جنبشی بیشتر است.

$$\text{در دامنه } \frac{\sqrt{2}}{2} A \pm \text{ مقدار انرژی جنبشی و پتانسیل با هم برابر است.}$$

انرژی مکانیکی سامانه جرم فner ($E = U + K$): انرژی کل یک نوسانگر هارمونیک ساده با مجدور بسامد، مجدور دامنه و جرم نوسانگر رابطه مستقیم دارد.

$$E = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 = 2\pi^2 m A^2 f^2$$

$$\frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \times \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2$$

تشدید: اگر در نوسانگری نوسان های واداشته با بسامد طبیعی نوسانگر برابر شود (یعنی $f_d = f_0$ ، در چنین وضعیتی اصطلاحاً گفته می شود که برای نوسانگر تشدید (رزونانس) رخ داده است. در این حالت دامنه نوسان افزایش می یابد).

نوع موج با توجه به محیط انتشار: ۱- **امواج مکانیکی**: این امواج برای انتشار، به محیط مادی نیاز دارند، بنابراین در خلا انتشار نمی یابند. مانند امواج صوتی، تشکیل موج بر سطح آب، موج ایجاد شده در طناب، فner و ... ۲- **امواج الکترومغناطیسی**: این امواج در همه جا (مایعات، جامدات، گازها و خلا) منتشر می شوند. مانند نور، امواج رادیویی، اشعه گاما و

نوع موج از لحاظ راستای ارتعاش: ۱) **امواج عرضی**: اگر راستای نوسان ذره های محیط، عمود بر راستای انتشار موج باشد، موج را عرضی می نامند.

۲) **امواج طولی**: اگر راستای نوسان ذره های محیط، موازی با راستای انتشار موج باشد، موج را طولی می نامند.

امواج مکانیکی عرضی، در محیط هایی منتشر می شوند که نیروی بین ذرات آن نسبتاً زیاد باشد. با این حساب، امواج مکانیکی عرضی، فقط در جسم های جامد و سطح مایع (به دلیل کشش سطحی در سطح مایع) ایجاد و منتشر می شوند. ولی امواج طولی در تمام حالات ماده، ایجاد و منتشر می شوند.

مشخصه های موج:

۱) **طول موج**: فاصله بین دو برآمدگی یا دو فرورفتگی مجاور، طول موج نامیده می شود و آن را با λ نشان می دهند. طول موج λ برابر با مسافتی است که موج در مدت دوره تناوب نوسان چشمۀ طی می کند.

۲) **دامنه (A)**: بیشینه فاصله یک ذره از مکان تعادل، دامنه موج نامیده می شود که همان فاصله قله یا دره نسبت به سطح آرام با ساکن است.

۳) **دوره تناوب (T)**: مدت زمانی که هر ذره محیط یک نوسان کامل انجام می دهد دوره تناوب موج نامیده می شود که برابر با زمانی است که چشمۀ موج یک نوسان کامل انجام می دهد.

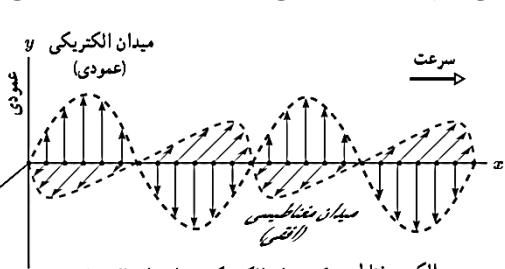
۴) **بسامد (f)**: تعداد نوسان های انجام شده توسط هر ذره محیط در یک ثانیه بسامد موج نامیده می شود که برابر با بسامد چشمۀ موج نیز هست. پس: $f = \frac{1}{T}$

۵) **تندی انتشار موج (v)**: اگر جبهه موج در مدت Δt مسافت L را طی کند، تندی انتشار موج از رابطه $v = \frac{L}{\Delta t}$ به دست می آید. از آنجا که طول موج λ در دوره T طی می شود، داریم: (تندی انتشار موج) $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$

عوامل مؤثر بر سرعت انتشار موج: سرعت انتشار موج در یک محیط، به ویژگی های فیزیکی آن محیط (جنس، دما، فشار و ...) بستگی دارد، اما به شرایط فیزیکی چشمۀ موج (بسامد، دامنه، انرژی مکانیکی و ...) بستگی ندارد.

دقیق کنید که تندی ارتعاش (نوسان) که بیشینه آن $A\omega$ است را با تندی انتشار موج که مقداری ثابت است، اشتباه کنید.

تندی انتشار موج عرضی در یک فner، تار یا ریسمان کشیده به نیروی کشش (F) و چگالی خطی جرم ($\mu = m/L$) بستگی دارد و از رابطه زیر به دست می آید:



موج الکترومغناطیسی که میدان الکتریکی در امتداد قائم (y) و میدان مغناطیسی در امتداد افقی (z) و انتشار موج در جهت x است.

$$\mu = \rho A \Rightarrow V = \sqrt{\frac{F}{\rho A}}$$

$$\mu = \frac{m}{L} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{F \times L}{m}}$$

امواج الکترومغناطیسی: امواج الکترومغناطیسی از تغییر هم زمان میدان های الکتریکی و مغناطیسی در فضا به وجود می آیند.

❖ میدان الکتریکی \vec{E} همواره عمود بر میدان مغناطیسی \vec{B} است.

❖ میدان های الکتریکی و مغناطیسی E و B همواره بر جهت حرکت موج عمود ند و در نتیجه موج الکترومغناطیسی، یک موج عرضی است.

❖ میدان ها با بسامد یکسان و همگام با یکدیگر تغییر می کنند.

❖ جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می توان مطابق شکل از قاعده دست راست تعیین کرد.

❖ جهت انتشار موج الکترومغناطیسی (\vec{k}) هم جهت با بردار $(\vec{E} \times \vec{B})$ است. همانند محورهای مختصات $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ ، پس اگر چها انگشت دست راست را در جهت \vec{B} طوری

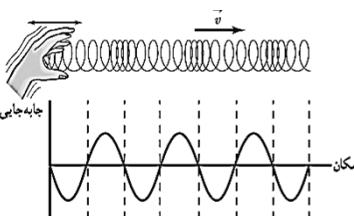
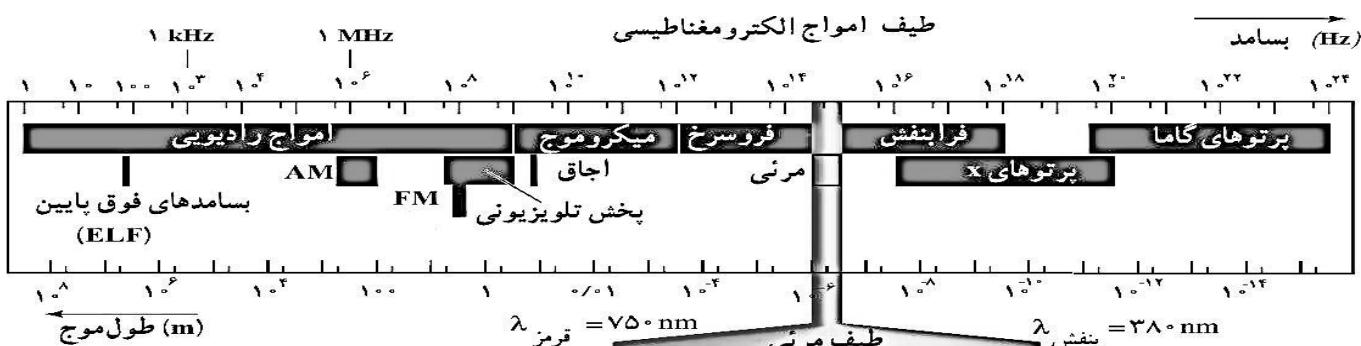
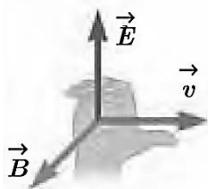
قرار داده که انگشت شصت دست راست در جهت \vec{E} باشد، آن گاه بردار \vec{k} از کف دست راست خارج می شود.

❖ تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلا از رابطه $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ به دست می آید. که در آن تراوایی مغناطیسی خلا $A = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$ و ضریب گذرهای الکتریکی خلا $\epsilon_0 = 8/85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

❖ نور هم یک موج الکترومغناطیسی است زیرا با تندی c منتشر می شود.

❖ امواج الکترومغناطیسی انرژی را صورت انرژی میدان های الکتریکی و مغناطیسی منتقل می کنند.



❖ موج طولی و مشخصه های آن: در مورد امواج طولی، طول موج برابر با فاصله بین دو تراکم (برای فنر، جمع شدگی) یا دو انبساط (برای فنر، بازشدگی) متوالی است. همچنین دامنه موج طولی برابر با بیشینه جایی از مکان تعادل است. برای امواج مکانیکی، تندی انتشار امواج طولی در یک محیط جامد بیشتر از تندی انتشار امواج عرضی در همان محیط است.

❖ موج صوتی: صوت یک موج طولی است که توسط جسمی مرتعش (چشممه صوت) تولید می شود. صوت در محیط های مادی مانند گاز، مایع، یا جامد می تواند ایجاد و منتشر شود. امواج صوتی مجموعه ای از تراکمها و انبساطها تشکیل شده اند.

❖ تندی انتشار صوت نیز مانند هر موج مکانیکی دیگری با رابطه $V = f\lambda$ به بسامد و طول موج مربوط می شود و به ویژگی های فیزیکی محیط بستگی دارد. تندی صوت افزون بر جنس محیط به دما نیز بستگی دارد.

❖ معمولاً سرعت صوت در جامدها بیشتر از مایع ها و در مایع ها بیشتر از گازها است.

❖ شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی ای است که توسط موج به واحد سطح، عمود بر راستای انتشار صوت می رسد یا از آن عبور می کند. که در آن \bar{P} آهنگ متوسط انتقال انرژی و A مساحت سطحی است که صوت با آن برخورد می کند. بنابراین یکای شدت صوت، وات بر متر مربع (W/m^2) است.

$$I = \frac{E}{At} = \frac{\bar{P}}{A}$$

❖ شدت صوتی که از سطح کره ای به مساحت $A = 4\pi R^2$ عبور می کند، از رابطه $I = \frac{P}{4\pi R^2}$ می آید.

$$I_o = 10^{-12} \frac{W}{m^2} = 10^{-12} \frac{\mu W}{m^2}$$

❖ شدت صوت میباشد: آستانه شنوایی صوتی با بسامد 1000 Hz برای گوش سالم است که برابر است با: $I_o = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. تراز شدت صوت یا شدت احساس نسبی صوت: تراز شدت صوت، در واقع درک انسان را از بلندی صوت بیان می کند و عبارت از لگاریتم در پایه های دو نسبت شدت آن صوت به شدت صوت میباشد که آن را با β نشان داده و واحد آن بیل می باشد:

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_o} (\text{db})$$

هر بیل ۱۰ دسی بیل است. بنابراین:

$$\beta = \log \frac{I}{I_o} (\text{b})$$

❖ بلندی نسبی صوت: تفاضل تراز شدت دو صوت را بلندی نسبی آن ها گویند. اگر صوتی به شدت I_2 با تراز β_2 و صوتی دیگر با شدت I_1 با تراز β_1 شنیده شوند، اگر $\beta_2 > \beta_1$ باشد، بلندی نسبی آن ها برابر است با:

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = 10 \log \frac{I_2}{I_1}$$

$$\Delta\beta = 2 \cdot \log \frac{d_1}{d_2} \quad \text{در نتیجه: } \frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2$$

از طرفی چون شدت نسبت عکس با مجدد فاصله دارد پس می‌توان نوشت:

ادراک شنوایی: با شنیدن هر تن، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت: ارتفاع و بلندی هر دو به ادراک شنوایی ما مربوط می‌شوند. ارتفاع، بسامدی است که گوش انسان درک می‌کند؛ مثلاً اگر چند دیاپازون با بسامدهای مختلف به طور یکسان نواخته شوند بسامد آنها را می‌توان از کمترین تا بیشترین مقدار تشخیص داد.

بلندی، شدتی است که گوش انسان از صوت درک می‌کند. اگر یک دیاپازون با بسامد مشخص را با ضربه‌هایی متفاوت به ارتعاش واداریم، با آنکه بسامد صدایی که می‌شنویم تغییر نمی‌کند، اما صدای‌هایی با بلندی متفاوت را حس می‌کنیم که این به شدت ضربه‌ها بستگی دارد.

بلندی متفاوت با شدت است. شدت را می‌توان با یک آشکار ساز اندازه گرفت، در حالی که بلندی چیزی است که شما حس می‌کنید. دستگاه شنوایی انسان به بسامدهای متفاوت حساسیت‌های متفاوتی نشان می‌دهد، به طوری که بیشترین حساسیت گوش انسان به بسامدهایی در گستره ۲۰۰۰ Hz تا ۵۰۰۰ Hz است، در حالی که گوش انسان قادر به شنیدن تن‌های صدای ۲۰ Hz تا ۲۰۰۰ Hz است.

اثر دوپلر: تغییر بسامدی که در اثر حرکت نسبی منبع صوت و شنونده ایجاد می‌شود را پدیده دوپلر گویند. (این پدیده برای امواج دیگر نیز اتفاق می‌افتد).

* اثر دوپلر نه تنها برای امواج صوتی بلکه برای امواج الکترومغناطیسی، مانند میکروموج‌ها، موج‌های رادیویی و نور مرئی نیز برقرار است.

الف) چشمۀ متحرک و ناظر(شوندۀ) ساکن:

اگر ناظر ساکنی را روی ماشین در نظر بگیریم، این ناظر طول موج کوتاه‌تری را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می‌گیرد، که این به معنی افزایش بسامد برای این ناظر است. در حالی که ناظر ساکن عقب ماشین طول موج بلندتری را نسبت به وضعیتی که ماشین ساکن بود اندازه می‌گیرد، که این به معنی کاهش بسامد برای این ناظر است.

ب) چشمۀ ساکن و ناظر(شوندۀ) متحرک:

در این حالت تجمع جبهه‌های موج در دو سوی چشمۀ ساکنی را می‌توان از این نظر طول موج کوتاه‌تری را نسبت به طرف چشمۀ حرکت کند، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج بیشتری مواجه می‌شود که این منجر به افزایش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود. در حالی که اگر ناظر از چشمۀ دور شود، در مقایسه با ناظر ساکن، در مدت زمان یکسان، با جبهه‌های موج کمتری مواجه می‌شود که این منجر به کاهش بسامد صوتی می‌شود که ناظر می‌شنود.

اثر دوپلر برای امواج الکترومغناطیسی: هر گاه چشمۀ موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمۀ تغییر می‌کند. وقتی چشمۀ نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً انتقال به سرخ می‌گویند و وقتی چشمۀ نور به ناظر نزدیک می‌شود، طول موج کاهش پیدا می‌کند که به آن اصطلاحاً انتقال به آبی می‌گویند.

فصل چهارم: برهم کنش‌های موج

بازتاب، شکست، پراش و تداخل برهم کنش‌های موج با محیط هستند.

بازتاب

پژواک صوت نمونه‌ای از بازتاب امواج مکانیکی است. خفاش برای یافتن طعمه از پژواک موج صوتی خود استفاده می‌کند. امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور) نیز بازمی‌تابند.

* تولید صدا در آلات موسیقی، پژواک صدای، دیدن ماه، دیدن صفحه کتاب، گرم شدن مواد غذایی در اجاق‌های خورشیدی، جمع شدن امواج رادیویی در کانون آنتن‌های بشقابی و ... مثال‌هایی از کاربرد بازتاب امواج در زندگی هستند.

* زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (فروید) را زاویه تابیده می‌نامند و با θ_t نشان می‌دهند.

* زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی بازتابیده را زاویه بازتابیده می‌نامند و با θ_r نشان می‌دهند.

* همواره زاویه بازتابیده برابر با زاویه تابیده است: یعنی $\theta_r = \theta_t$ که به آن، قانون بازتاب عمومی گفته می‌شود.

رسودار بر توبی همراه با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانع تخت

طرحی از جبهه‌های موج تابیده (خطوط توپر) و جبهه‌های موج بازتابیده (خطوط خط‌جین)

* اگر سطح بازتابنده نور همچون یک آینه، بسیار هموار باشد، بازتاب نور را بازتاب آینه‌ای یا منظم می‌گویند. نوع دیگر بازتابش، بازتاب پخشنده یا نامنظم است.

پژواک: اگر صوت پس از بازتاب، با یک تأخیر زمانی به گوش شنونده‌ای برسد که صوت اولیه را مستقیماً می‌شنود، به چنین بازتابی پژواک می‌گویند. اگر تأخیر زمانی بین این دو صوت کمتر از $1/180$ باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

مکان یابی پژواکی روشنی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می‌کند. مکان یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر، در تعیین مکان اجسام متحرک و نیز تعیین تندی آنها به کار می‌رود. همین طور در فناوری‌های نظیر اندازه‌گیری تندی شارش خون در رگ‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود.

همچنین در دستگاه سونار که در کشتی‌ها برای مکان یابی اجسام زیر آب به کار می‌رود، و در سونوگرافی نیز از مکان یابی پژواکی استفاده می‌شود. دستگاه لیتوتریپسی که از آن برای شکستن سنگ‌های کلیه، با کمک بازتابنده‌های بیضوی استفاده می‌شود.

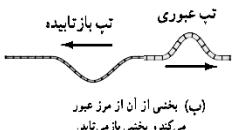
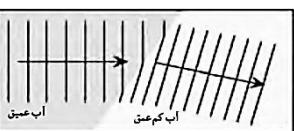
شکست وقتی رخ می‌دهد که جهت پیشروی موج در ورود به یک محیط جدید تغییر کند. شکست برای امواج مکانیکی نیز رخ می‌دهد.

رنگ‌های رنگین کمان، تصویری که با کمک عینک می‌بینیم، تصاویری که با استفاده از عدسی‌های ابزارهای نوری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می‌شود، و ... مثال‌های راجحی از شکسته شدن امواج نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به اندازه امواج نوری اهمیت ندارد..

امواج نه تنها با محیط بلکه با یکدیگر نیز برهم کنش می‌کنند. تداخل نمونه‌ای از برهم کنش امواج با یکدیگر است.

عبور یک تپ در طول طنابی را در نظر بگیرید که از دو بخش، یکی نازک و دیگری ضخیم، تشکیل شده است (شکل الف). وقتی این تپ از سمت بخش نازک به مرز دو بخش می‌رسد، بخشی از این تپ باز می‌تابد و بخشی دیگر عبور می‌کند (شکل ب). برای یک موج سینوسی

بسامد این دو موج همان بسامد موج فرودی است که توسط چشمۀ موج تعیین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، بنا به رابطه $V = \lambda f$ طول موج کمتر نسبت به موج فرودی خواهد داشت.



در حالات‌های دو یا سه بُعدی با عبور موج از یک مرز و ورود آن به محیط دیگر، تندی موج تغییر می‌کند و ممکن است جهت انتشار موج نیز تغییر کند و اصطلاحاً موج شکست پیدا کند. تندی امواج روی سطح آب به عمق آن بستگی دارد. با ورود موج به بخش کم عمق، تندی موج سطحی کاهش می‌یابد. روشن است، آن بخش موج که زودتر به ناحیه کم عمق می‌رسد، چون با تندی کمتر حرکت می‌کند از بقیه موج که هنوز وارد این ناحیه نشده عقب می‌افتد و بنابراین فاصله بین جبهه‌های موج و در نتیجه طول موج کاهش می‌یابد و به این ترتیب جبهه‌های موج در مرز دو ناحیه تغییر جهت می‌دهند.

قانون شکست عمومی: برای جبهه‌های موج تختی به طور مایل به مرز دو محیط می‌رسند و سپس شکست پیدا می‌کنند، رابطه زیر برقرار است که به آن **قانون شکست عمومی** می‌گویند

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

اگرموجی از محیطی که در آن تندی موج کمتر است وارد محیطی شود که در آن تندی موج بیشتر است، زاویه شکست بزرگ‌تر از زاویه تابش می‌شود و بر عکس یعنی اگر سرعت موج در محیط دوم کمتر باشد زاویه‌ی شکست کوچک‌تر از زاویه‌ی تابش می‌شود.

شکست امواج الکترومغناطیسی: یک موج پر قدرت رادیویی، با بسامد بین ۳ تا ۳۰ مگاهرتز، به لایه یون سپهر(یونسfer) بالای جو که در ارتفاع ۸۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتری سطح زمین واقع است فرستاده می‌شود. این لایه به علت وجود یون‌ها و الکترون‌های آزاد، پلاسمایی را ایجاد می‌کند.

یون سپهر(یونسfer) چه امواجی را عبور میدهد و چه امواجی را بازتاب می‌دهد؟ چرا؟ یون سپهر در حالی که نور مرئی و تابش فروسرخ را عبور می‌دهد، امواج رادیویی با طول موج‌های بلند (با لایه بزرگ‌تر از حدود ۱۰ m) را که در جهت‌های مناسبی به سوی این لایه ارسال شده باشند، به طرف زمین برمی‌گرداند. دلیل این اتفاق، یکنواخت نبودن چگالی الکترون‌های آزاد در این لایه و در نتیجه، تفاوت تندی امواج رادیویی در قسمت‌های مختلف آن است، به طوری که در سازوکاری مانند پدیده سراب، امواج را به سمت پایین باز می‌گرداند.

ضریب شکست: برابر با نسبت تندی نور در خلاء به تندی نور در یک محیط است:

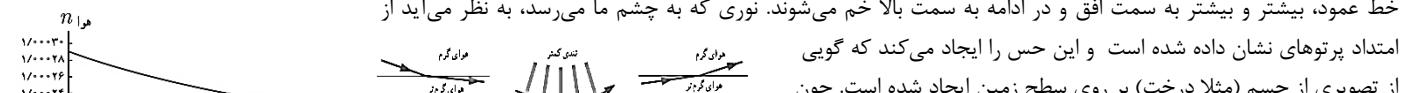
$$n = \frac{\text{تندی نور در خلاء}}{\text{تندی نور در یک محیط}} = \frac{c}{v}$$

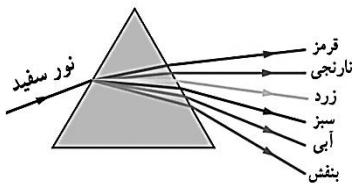
چون تندی نور در خلاء بیشترین تندی ممکن است، ضریب شکست همراه بزرگ‌تر یا مساوی ۱ است (که ۱ مربوط به خلاء است).

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{در حالت کلی: } n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

سراب: در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. چگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد که این سبب کاهش ضریب شکست می‌شود. با پایین آمدن هر چه بیشتر پرتوهای نظیر جبهه‌های موج، آنها با ضریب شکست‌های کوچک‌تر و کوچک‌تر روبه‌رو می‌شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق و در ادامه به سمت بالا خم می‌شوند. نوری که به چشم ما می‌رسد، به نظر می‌آید از امتداد پرتوهای نشان داده شده است و این حس را ایجاد می‌کند که گویی

از تصویری از جسم (مثلاً درخت) بر روی سطح زمین ایجاد شده است. چون این اتفاق وقتی می‌افتد که آب روی زمین است، تصور می‌شود آب روی زمین است.

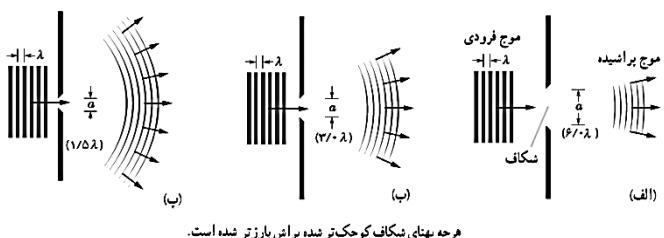




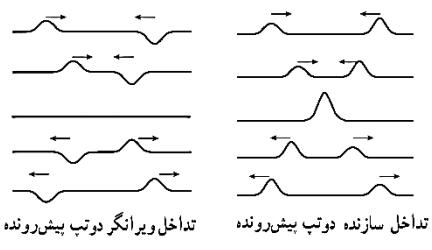
پاشندگی نور: وقتی باریکه نور سفید خورشید به وجهی ازیک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود. دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به جز خالاً به طول موج نور بستگی دارد. یعنی وقتی باریکه نوری شامل پرتوهایی با طول موج های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در زاویه‌های مختلفی شکسته می‌شوند. به این پخش شدگی نور، پاشندگی نور می‌گویند.



عموماً ضریب شکست یک محیط معین برای طول موج های کوتاه تر، بیشتر است. اگر مثلاً دو باریکه نور آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد شیشه شوند باریکه آبی بیشتر از باریکه قرمز خم می‌شود.



پراش موج: در صورتی که ابعاد مانع یا شکاف در حدود طول موج باشد، بخشی از موج که از لبه‌ها یا شکاف‌ها عبور می‌کند، بهوضوح به اطراف مانع یا شکاف گسترده می‌شود. به این پدیده که موج در عبور از یک شکاف با پهنایی از مرتبه طول موج، به اطراف گسترده می‌شود، پراش می‌گویند. پراش برای همه انواع موج اتفاق می‌افتد. اگر پراش نوری تکفam از یک شکاف باریک یا لبه‌ای تیز را روی یک پرده ملاحظه کنیم، همواره نوارهای تاریک و روشنی موسوم به نقش پراش را موازی با لبه‌های شکاف مشاهده می‌کنیم.



اصل برهم نهی امواج: وقتی چندین موج به طور هم زمان بر ناحیه‌ای از فضای تأثیر بگذارند، اثر خالص آنها برابر مجموع اثرهای مجرایی هر یک از آنها است.

به ترکیب موج‌ها با یکدیگر، تداخل می‌گویند. به بیان دیگر تداخل، ترکیب دو یا چند موج است که هم زمان از یک منطقه عبور می‌کنند.

* اگر تپ‌ها هنگام همپوشانی تپ بزرگ‌تری را ایجاد کنند به آن **تداخل سازنده** می‌گویند، و اگر تپ‌ها هنگام همپوشانی اثر یکدیگر را حذف کنند به آن **تداخل ویرانگر** می‌گویند.

تداخل امواج سطحی آب: دو دسته موج دایره‌ای در سطح آب وقتی به هم می‌رسند، در برخی نقاط هم‌دیگر را تقویت می‌کنند و تداخل سازنده انجام می‌دهند و در برخی نقاط هم‌دیگر را تضعیف می‌کنند و تداخل ویرانگر انجام می‌دهند. به این ترتیب، در برخی نواحی روی سطح آب دامنه موج برایند بیشینه و در برخی ناحیه‌ها، کمینه است. چنین نقش متناوب یک درمانی از بیشینه‌ها و کمینه‌ها را نشان تداخلی امواج سطحی آب می‌نماییم.

تداخل امواج صوتی: امواج صوتی نیز می‌توانند تداخل کنند. دو بلندگو که به یک مولد سیگنال الکتریکی متصل‌اند امواج سینوسی هم بسامدی را در فضای متنشر می‌کنند. با حرکت دادن میکروفون در امتداد خط فرضی نشان داده شده در شکل که در فاصله مناسبی از بلندگوها قرار دارد در می‌باییم که بلندی صدا به طور متناوب کم و زیاد می‌شود. علت این پدیده براساس تداخل‌های سازنده و ویرانگر امواج صوتی توضیح داده می‌شود.

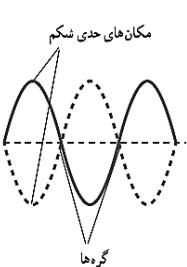
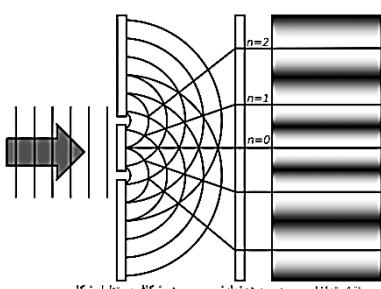
تداخل امواج نوری: توماس یانگ طور تجربی ثابت کرد نور یک موج است. زیرا نور نیز مانند امواج سطحی آب، امواج صوتی و همه انواع موج‌های دیگر تداخل می‌کند.

آزمایش یانگ: نور حاصل از یک چشم می‌تابد و بر تک شکافی می‌تابد و دو شکاف S_1 و S_2 را روشن می‌کند. امواج حاصل از پراش نور توسط این دو شکاف با یکدیگر تداخل می‌کنند. روی پرده، نقطه‌های با تداخل سازنده، نوارها یا فریزهای روشن را تشکیل می‌دهند و نقطه‌های با تداخل ویرانگر نوارها یا فریزهای تاریک را تشکیل می‌دهند. نوارهای روشن و تاریک روی پرده که ناشی از تداخل‌های سازنده و ویرانگرند، نقش تداخلی خوانده می‌شود. با استفاده از آزمایش یانگ می‌توان طول موج نور به کار رفته در آزمایش را تعیین کرد.

موج ایستاده و تشدید در رسمنان کشیده: وقتی موج بازتابیده از انتهای ثابت با موج تابیده ترکیب شوند موجی برایند ایجاد می‌کنند که شکل آن از اصل برهم نهی حاصل می‌شود. مکان‌هایی در طول رسمنان که در اثر تداخل ویرانگر ساکن هستند، گره نامیده می‌شوند و مکانهایی که دامنه موج برایند در اثر تداخل سازنده بیشینه است، را شکم می‌گویند. نقش موج برایند را در این حالت، موج ایستاده می‌گویند.

* فاصله گره‌های مجاور از هم برابر با نصف طول موج ($\lambda/2$) و بنابراین فاصله گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر با ربع طول موج ($\lambda/4$) است.

* همیشه موج‌های تابیده و بازتابیده در محل گره‌ها یکدیگر را حذف می‌کنند (تداخل ویرانگر)، این دو موج در این نقطه‌ها (گره‌ها) کاملاً ناهم‌فاز (در فاز مخالف)‌اند. اما در مکان‌هایی که از شکم‌ها وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در تمام لحظات به گونه‌ای است که هم‌دیگر را



تقویت می کنند (تداخل سازنده). در این حالت اصطلاحاً می گوییم این دو موج در این نقاط هم فازند.

بسامدهای تشدیدی تار: در یک تار کشیده شده، در بسامدهای معینی، تداخل موجب ایجاد موج ایستاده مشخص یا یک مُد نوسان در تار می شود. این بسامدهای تشدیدی خوانده می شوند. اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدیدی نوسان کند موج ایستاده بارزی ایجاد نمی شود.

$$L = n \left(\frac{\lambda_n}{2} \right) \quad n=1,2,3,\dots \quad \lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} \quad n=1,2,3,\dots$$

$$f_n = \frac{nv}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

اگر بجای v رابطه آن را قرار دهیم:

اختلاف بسامد دو هماهنگ متواالی با بسامد هماهنگ اصلی است:

$$f_n = nf_1, \quad f_{(n+1)} = (n+1)f_1 \Rightarrow \Delta f = f_1$$

بسامدهای نوسان را با بسامدهای تشدیدی مشخص می کنند. پایین ترین بسامد را که مربوط به $n=1$ است، بسامد اصلی و مدد مربوط به آن را مدد اصلی یا هماهنگ اول می گویند. بسامد هماهنگ دوم به ازای $n=2$ بسامد هماهنگ سوم به ازای $n=3$ و ... به دست می آید. به n عدد هماهنگ گفته می شود.

موج ایستاده و تشدید در لوله های صوتی: وقتی موج های صوتی از هر انتهای تابند و به درون لوله بازمی گردند، حتی اگر آن انتهای باز باشد. اگر طول لوله مضرب های معینی از طول موج صوتی باشد، برهم نمی موج های پیش رونده در جهت های مختلف، نقش موج ایستاده بارزی را در لوله ایجاد می کند. مانند تار در لوله های صوتی هم فاصله گرهای مجاور از هم برابر با نصف طول موج ($\lambda/2$) و بنابراین فاصله گرهها از شکم های مجاور برابر با ربع طول موج ($\lambda/4$) است.

تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز: یک بطری مانند یک لوله صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدیدی معینی دارد. وقتی در دهانه یک بطری می دمیم گستره وسیعی از بسامدها ایجاد می شود. حال اگر یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدیدی بطری منطبق باشد، یک موج صوتی قوی ایجاد می شود. تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله های صوتی بسامدهای تشدیدی معینی دارند و هرگاه بسامد یک صوت برابر با یکی از بسامدهای تشدیدی آنها باشد، تشدیدگر پاسخ قوی تری به این صوت می دهد.

فصل پنجم: آشنایی با فیزیک اتمی

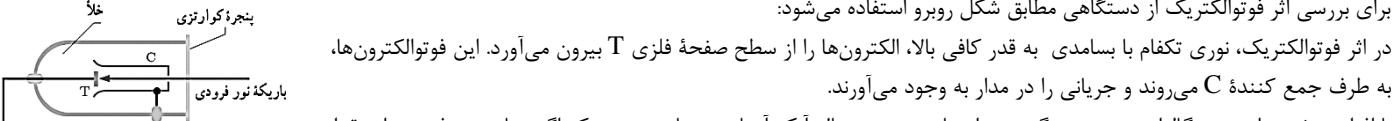


حوزه های فیزیک، از جمله مکانیک نیوتونی، ترمودینامیک و نظریه الکترومغناطیس ماكسل امروزه به نام فیزیک کلاسیک شناخته می شود.

نسبت خاص (مربوط به مطالعه پدیده ها در تندی های بسیار زیاد و قابل مقایسه با تندی نور)، نظریه نسبیت عام (مربوط به مطالعه هندسه فضا زمان و گرانش) و نظریه کوانتومی (مربوط به مطالعه پدیده ها در مقیاس های بسیار کوچک، مانند اتم ها و ذره های سازنده آنها) سه نظریه فیزیک جدید هستند.

اثر فتوالکتریک و فوتون: وقتی نوری با بسامد مناسب مانند نور فرابینش به سطحی فلزی بتابد الکترون هایی از آن گسیل می شوند. این پدیده فیزیکی را، اثر فتوالکتریک و الکترون های جدا شده از سطح فلز را فتووالکترون می نامند. در اثر فتوالکتریک الکترون ها، انرژی نور فرودی را جذب می کنند و از سطح فلز خارج می شوند.

برای بررسی اثر فتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل رو برو استفاده می شود:



در اثر فتوالکتریک، نوری تکفام با بسامدی به قدر کافی بالا، الکترون ها را از سطح صفحه فلزی T بیرون می آورد. این فتوالکترون ها، به طرف جمع کننده C می روند و جریانی را در مدار به وجود می آورند.

با افزایش شدت این نور، گالوانومتر عدد بزرگتر را از نشان می دهد، حال آنکه آزمایش نشان می دهد که اگر بسامد نور فرودی از مقدار معینی کمتر باشد، هر چقدر هم که شدت نور فرودی افزایش یابد این پدیده رخ نمی دهد و گالوانومتر عبور جریانی را نشان نمی دهد.

تجویی فیزیک کلاسیک درباره فتوالکتریک: هنگام برهم کنش موج الکترومغناطیسی (نور فرودی) با سطح فلز، میدان الکتریکی این موج، نیروی $F = -eE$ به الکترون های فلز وارد کند و آنها را به نوسان وادارد. به این ترتیب، وقتی دامنه نوسان برخی از الکترون ها به قدر کافی بزرگ شود انرژی جنبشی لازم را برای جدا شدن از سطح فلز پیدا می کنند.

مشکل فیزیک کلاسیک در تجویی اثر فتوالکتریک:

۱) بنابراین دیدگاه کلاسیکی، این پدیده باید با هر بسامدی رخ دهد در حالی که این نتیجه با تجربه سازگار نیست.

۲) یکی دیگر از پیامدهای نظریه الکترومغناطیسی ماكسل این است که شدت نور با مربع دامنه میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است ($E^2 \propto I$). به این ترتیب انتظار می رود به ازای یک بسامد معین، اگر شدت نور فرودی بر سطح فلز را افزایش دهیم باید الکترون ها با انرژی جنبشی بیشتری از فلز خارج شوند، نتیجه ای که تجربه آن را تأیید نمی کند.

ایشتنین در نظریه فتوالکتریک فرض کرد که نور با بسامد f را می توان به صورت مجموعه ای از بسته های انرژی در نظر گرفت. هر بسته انرژی، که بعدها فوتون نامیده شد، دارای انرژی ای است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$E = hf \quad \Rightarrow \quad E = \frac{hc}{\lambda}$$

در این رابطه h ثابت پلانک نامیده می شود و به طور تجربی معلوم شده است که مقدار آن $J.S. 6.63 \times 10^{-34}$ است.

در حالت کلی $E = nhf$ که n یک عدد صحیح مثبت است و معروف تعداد کوانتوم‌های انرژی (hf) می‌باشد و عدد کوانتومی نام دارد.

با مقایسه بزرگ انرژی را با یکای ژول می‌سنجیم. (ژول برابر انرژی با ۱ کولنی، تحت ولتاژ ۱ ولت است $U = qV = q$). در قلمرو اتمی، ژول یکای بزرگی است و معمولاً از یکای کوچک تری به نام الکترون ولت (eV) استفاده می‌کنیم که با عبارت مقدار انرژی یک الکترون تحت ولتاژ ۱ ولت، تعریف می‌شود.

$$1eV = 1/6 \times 10^{-19} J$$

ثابت پلانک بر حسب $eV.s$ برابر است با $h = 4 \times 10^{-15} eV.s$

کمیت hc در بسیاری از محاسبه‌های این فصل لازم است. با جاگذاری مقادیر آن داریم:

$$hc = 6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 = 19.9 \times 10^{-26} J.m$$

اگر h را بر حسب eV و سرعت نور را بر حسب nm برگایه بنویسیم داریم:

$$hc = 1240 eV.nm$$

تفسیر کوانتومی پدیده فتوالکتریک (نظریه اینشتین): هنگامی که نور به سطح فلز می‌تابد، یک فوتون با انرژی hf ، به طور کامل توسط فقط یک الکترون جذب شده و انرژی خود را به الکترون می‌دهد، بخشی از انرژی صرف کندن الکترون شده (W) و باقی مانده صرف انرژی جنبشی فتوالکترون گسیل شده از سطح فلز می‌شود.(K)

$$hf = W + K$$

W کار(انرژی) لازم برای خارج کردن الکترون‌ها از سطح یک فلز و K انرژی جنبشی آنها پس از جدا شدن از سطح آن فلز است. انرژی جنبشی سریع‌ترین فتوالکترون‌های گسیل شده از آن برابر خواهد بود با:

$$K_{max} = hf - W_o \quad (\text{معادله فتوالکتریک})$$

W_o را تابع کار فلز می‌نامند که به جنس فلز بستگی دارد و کمینه کار لازم برای خارج کردن یک الکترون از یک فلز معین است.

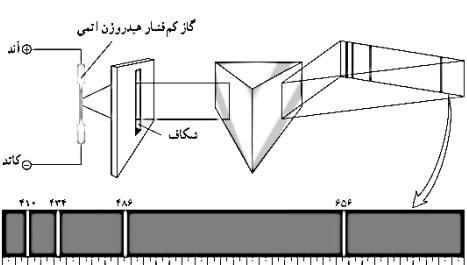
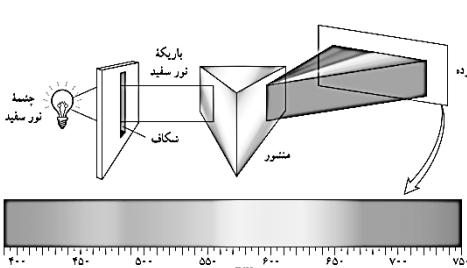
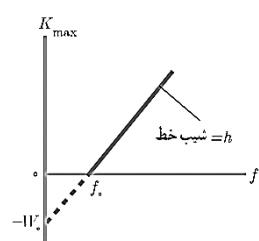
بسامد قطع f_0 (طول موج قطع): کمترین بسامدی (بلندترین طول موج) که می‌تواند اثر فتوالکتریک را ایجاد کند. در این بسامد (طول موج) انرژی فوتون درست به اندازه‌ای است که بتواند فتوالکترون را از جا بکند و اضافه بر این چیزی نمی‌ماند که به شکل انرژی جنبشی ظاهر شود. اگر f کمتر از f_0 باشد ($\lambda > \lambda_0$) تک فوتون‌ها، انرژی کافی برای کندن فتوالکترون نخواهند داشت و هیچ فرقی هم نمی‌کند که تعداد آن‌ها چقدر باشد، یعنی هیچ فرقی نمی‌کند که تابش نور چقدر شدید باشد.

$$K_{max} = 0 \Rightarrow hf_o = W_o \Rightarrow f_o = \frac{W_o}{h} \Rightarrow \lambda_o = \frac{hc}{W_o}$$

نمودار بیشینه انرژی جنبشی فتوالکترون‌ها بر حسب بسامد نور فروودی به صورت شکل روبرو است. وقتی بسامد نور فروودی بزرگ‌تر از f_0 یا مساوی با آن باشد فوتون‌ها می‌توانند الکترون‌ها را از فلز خارج کنند.

در بسامد آستانه الکترون بدون هیچ انرژی جنبشی‌ای در آستانه ترک فلز است.

$$\lambda_o = \frac{hc}{W_o} \quad f_o = \frac{W_o}{h} \quad (\text{طول موج قطع})$$



گاز‌های کم فشار و رقیق، که اتم‌های منفرد آنها از برهم کنش‌های قوی موجود در جسم جامد آزادند به جای طیف پیوسته، طیفی گسیل می‌شود. اجسام در دماهای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می‌کنند. در دماهای معمولی، بیشتر تابش گسیل شده از سطح اجسام در ناحیه فروسرخ طیف قرار دارد.

برای یک جسم جامد، نظریه داغ یک لامپ روشن، این امواج شامل گستره پیوسته‌ای از طول موج هاست که آن را طیف گسیلی پیوسته یا به اختصار طیف پیوسته می‌نامند. تشکیل طیف پیوسته توسط جسم جامد، ناشی از برهم کنش قوی بین اتم‌های سازنده آن است.

طیف خطی ایجاد شده و همچنین رنگ نور گسیل شده، به نوع گاز درون لامپ بستگی دارد. طیف خطی هر عنصر، مانند اثر انگشت انسان‌ها، از ویژگی‌های منحصر به فرد هر اتم است. لذا به کمک طیف‌نمایی می‌توان عناصر را از هم تشخیص داد.

طیف گسیلی اجسام جامد ملتهب، پیوسته و مانند هم می‌باشند. لذا به کمک این طیف نمی‌توان عناصر را از یکدیگر تشخیص داد.

این که چرا هر عنصر طول موج‌های خاص خود را تابش می‌کند و این که چرا هر عنصر تنها طول موج‌های خاصی را جذب می‌کند و بقیه‌ی طول موج‌ها را جذب نمی‌کند از دیدگاه فیزیک کلاسیک قابل توجیه نیست.

رابطه‌ی ریدبرگ: طول موج تمامی خطوط طیف اتم ئیدروزن را با استفاده از رابطه‌ی زیر که به رابطه‌ی ریدبرگ مشهور است، به دست آورد:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n'} - \frac{1}{n} \right), \quad R_H = 10.11(nm)^{-1}, \quad n' < n$$

که در آن R_H ثابت ریدبرگ برای اتم ئیدروزن نامیده می‌شود. n شماره‌ی تراز بالاتر است که الکترون روی آن فرود می‌آید. دقیق کنید که طول موج در این رابطه، برحسب نانومتر است.

❖ به ازای هر مقدار معین n' مجموعه‌ی طول موج‌های به دست آمده از رابطه‌ی ریدبرگ- بالمر را یک رشته می‌نامند.

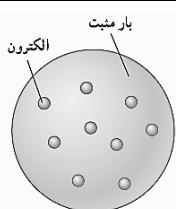
❖ به ازای n در هر رشتة، بلندترین طول موج خطوط آن رشتة یا حد بالای رشتة به دست می‌آید.

❖ هر چه n بزرگ‌تر باشد، طول موج‌های کوتاهتری می‌شوند پس، به ازای $n \rightarrow \infty$ ، کوتاهترین طول موج خطوط هر رشتة یا حد پایین رشتة پیدا می‌شود.

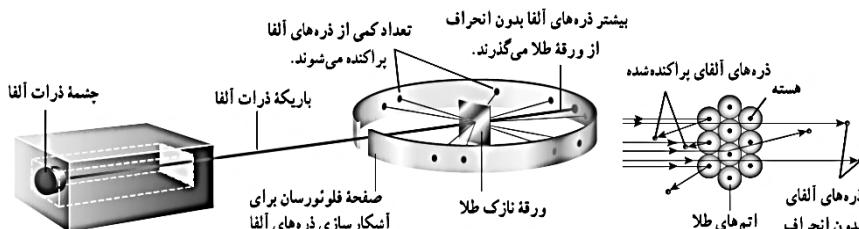
$$n = \infty \Rightarrow \frac{1}{\lambda_{\min}} = R_H \left(\frac{1}{n'} - \frac{1}{\infty} \right) \Rightarrow \lambda_{\min} = \frac{n'}{R_H} \quad n = n' + 1 \Rightarrow \frac{1}{\lambda_{\max}} = R_H \left(\frac{1}{n'} - \frac{1}{(n'+1)} \right)$$

گستره‌ی طول موج	مقدارهای n	رابطه‌ی ریدبرگ	مقدار n'	نام رشتة
فرابینفش	$n = 2, 3, 4 \dots$	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{n} \right)$	$n' = 1$	لیمان
فرابینفش و مرئی	$n = 3, 4, 5 \dots$	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n} \right)$	$n' = 2$	بالمر
فرو سرخ	$n = 4, 5, 6 \dots$	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{n} \right)$	$n' = 3$	پاشن
فرو سرخ	$n = 5, 6, 7 \dots$	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n} \right)$	$n' = 4$	براکت
فرو سرخ	$n = 6, 7, 8 \dots$	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{n} \right)$	$n' = 5$	پفوند

به ازای $n' = 2$ رشتة بالمر به دست می‌آید که در ناحیه مرئی طیف قرار دارد.

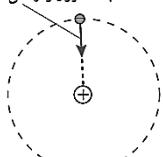


مدل اتمی تامسون (مدل کیک کشمکشی): جزوی تامسون موفق به کشف الکترون و اندازه‌گیری نسبت بار به جرم (e/m) آن شد. در مدل تامسون، اتم همچون کره‌ای است که بار مثبت به طور همگن در سرتاسر آن گسترش شده‌است و الکترون‌ها که سهم ناچیزی در جرم اتم دارند در جاهای مختلف آن پراکنده شده‌اند. این مدل را گاهی مدل کیک کشمکشی هم می‌گویند. در مدل اتمی تامسون، وقتی الکترون‌ها با بسامدهای معیّنی حول وضع تعادلشان نوسان می‌کنند این نوسان سبب تابش امواج الکترومغناطیسی از اتم می‌شود. بسامدهای تابش گسیل شده از اتم، که مدل اتمی تامسون پیش‌بینی می‌کرد، با نتایج تجربی سازگار نبود.



نتیجه آزمایش رادرفورد: ارنست رادرفورد باریکه‌ای از ذره‌های دارای بار مثبت (هسته اتم هلیم یا ذره آلفا) بر سطح ورقه‌ای نازک از جنس طلا فرو تاباند و نتیجه گرفت باید هسته‌ای چگال و دارای بار مثبت در مرکز هراتم باشد.

نیروی زیان‌کننده که از طرف هسته به الکترون وارد می‌شود.



بنابراین مدل رادرفورد (مدل هسته‌ای اتم)، اتم دارای یک هسته بسیار چگال و کوچک (10^{-15} شاعع هسته) و با بار مثبت است که با تعدادی الکترون در فاصله‌هایی به نسبت دور احاطه شده است.

مدل اتمی رادرفورد: در این مدل، همه‌ی بار مثبت اتم، در یک ناحیه‌ی مرکزی با حجم بسیار کوچکی به نام هسته، متمرکز شده و اطراف آن را الکترون‌ها با بار منفی در فاصله‌ای زیاد احاطه کرده‌اند، به گونه‌ای که می‌توان گفت: فضای بین الکترون‌ها خلا می‌باشد.

اشکالات مدل اتمی رادرفورد:

(۱) اگر الکترون‌ها در اطراف هسته، ساکن باشند، نیروی جاذبه‌ی الکتریکی بین هسته و الکترون‌ها، باعث می‌شود الکترون روی هسته سقوط کند. یعنی ساختار داخلی اتم، فرو می‌ریزد، در صورتی که اتم پایدار است.



(۲) اگر الکترون‌ها، مانند سیاره‌های منظمه‌ی خورشیدی، که به دور خورشید در حرکتند، به دور هسته در گردش باشند، طبق نظریه‌ی فیزیک کلاسیک که هر ذره‌ای باردار شتاب دار، نور گسیل می‌کند، چون الکترون به طور پیوسته شتاب دارد و طبق مبانی کلاسیکی، بسامد موج گسیل شده با بسامد دوران الکترون برابر است، لذا باستی به طور پیوسته نور گسیل کند و چون انرژی از دست می‌دهد، شاعع مداری آن به طور پیوسته کاهش یافته و در نتیجه بسامد آن به طور پیوسته زیاد شده و درنهایت، مارپیچ وار به داخل هسته سقوط می‌کند، یعنی طیف اتمی باستی پیوسته بوده و اتم پایدار نباشد، در صورتی که طیف اتمی، گسته است و اتم پایدار می‌باشد.

نتیجه: الگوی اتمی رادرفورد از دو ایراد عمدۀ رنج می‌برد:

- (۱) نمی‌تواند پایداری حرکت الکترون‌ها در مدارهای اتمی و در نتیجه پایداری اتم‌ها را توضیح دهد.
- (۲) قادر به توجیه طیف گسسته اتمی نیست.

موقوفیت‌های مدل اتمی بور چیست؟ (۱) بور مدلی را برای اتم هیدروژن ارائه کرد که مسئله ناپایداری اتم را در مدل رادرفورد حل می‌کرد. (۲) معادله ریدبرگ برای طیف خطی اتم هیدروژن را به دست می‌آورد.

اصول مدل اتمی بور به صورت زیر است:

۱- مدارها و انرژی‌های الکترون‌ها در هر اتم کوانتیده‌اند؛ یعنی فقط مدارها و انرژی‌های گسسته معینی مجاز هستند.

۲- وقتی یک الکترون در یکی از مدارهای مجاز است، هیچ نوع تابش الکتروموغناطیسی گسیل نمی‌شود. از این رو گفته می‌شود الکترون در مدار مانا یا حالت مانا قرار دارد.

۳- الکترون می‌تواند از یک حالت مانا به حالت مانا دیگر برود. هنگام گذار الکترون از یک حالت مانا با انرژی بیشتر E_U به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_L که فوتون تابش می‌شود.

(شعاع مدارهای الکترون برای اتم هیدروژن) ($r_n = a_o n^{\frac{1}{2}}$ ، $a_o = 0.545 A$)

(ترازهای انرژی الکترون در اتم هیدروژن)

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{E_R}{n^2} \quad E_R = 2/17 \times 10^{-18} J = 13.6 eV$$

در این روابط n عدد کوانتومی نامیده می‌شود. a_o شعاع کوچک ترین مدار در اتم هیدروژن که شعاع بور برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود.

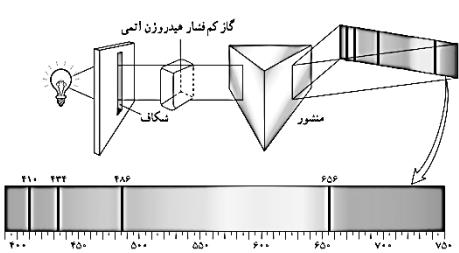
انرژی الکترون در $n=1$ برابر $E_1 = 13.6 eV$ است که اندازه آن رامعمولاً یک ریدبرگ می‌نامند و با نماد E_R نشان می‌دهند. در این صورت انرژی فوتون تابش شده برابر اختلاف انرژی بین دو مدار اولیه و مدار نهایی است، یعنی:

$$(معادله گسیل فوتون از اتم) \quad E_U - E_L = hf$$

$$E_U - E_L = \frac{hc}{\lambda}$$

بنابراین بور، وقتی الکترونی از مداری با انرژی بیشتر به مداری با انرژی کمتر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود.

با این تراز انرژی، حالت پایه نامیده می‌شود تا از ترازهای بالاتر که حالت‌های برانگیخته نامیده می‌شوند تمایز باشد. در اتم هیدروژن و در دمای اتاق، الکترون اغلب در حالت پایه قرار دارد. کمترین انرژی لازم برای خارج کردن الکترون از حالت پایه، انرژی یونش الکترون نامیده می‌شود. انرژی یونش اتم هیدروژن $13.6 eV$ است.

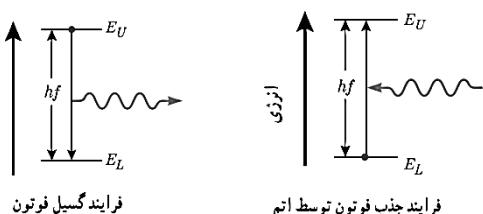


فرانهوفر، با مشاهده دقیق طیف خورشید، خطهای تاریک نازکی را در آن کشف کرد. خطهای تاریکی که فرانهوفر در طیف خورشید کشف کرد، ناشی از جذب طول موج‌های مربوط به این خطهای توسط گازهای جو خورشید و جو زمین پدید می‌آیند.

طیف جذبی خطی: برای مشاهده طیف‌های جذبی، نور یک چشمۀ نور سفید را از ظرفی حاوی گاز کم فشار هیدروژن اتمی (یا گاز عنصر دیگری) عبور داده و توسط منشور پاشیده می‌شود و طیف آن روی پرده تشکیل می‌شود. خطهای تاریک روی طیف، به طول موج‌هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم‌های گاز جذب شده‌اند.

مطالعه و مقایسه همچنین طیف‌های گسیلی و جذبی عنصرهای مختلف نشان می‌دهد که:

- (۱) در طیف گسیلی و در طیف جذبی اتم‌های گاز هر عنصر، طول موج‌های معینی وجود دارد که از مشخصه‌های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- (۲) اتم‌های هر گاز دقیقاً همان طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کنند که اگر دمای آنها به اندازه کافی بالا رود و یا به هر صورت دیگر برانگیخته شوند، آنها را تابش می‌کنند.



بر اساس مدل بور می‌دانیم که خطهای گوناگون در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی وقتی به وجود می‌آیند که الکترون‌های اتم‌های هیدروژن، که به هر دلیلی برانگیخته شده‌اند، از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین تر جهش کنند و فوتون‌هایی را گسیل کنند.

الکترون‌ها می‌توانند در جهت عکس گذار کنند، یعنی در فرایندی که جذب فوتون خوانده می‌شود از ترازهای انرژی پایین تر به ترازهای انرژی بالاتر بروند در این حالت، اتم، فوتونی را که دقیقاً انرژی لازم برای گذار را دارد جذب می‌کند.

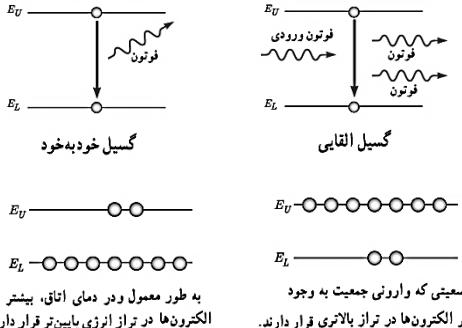
موقوفیت‌های مدل بور: مدل بور تصویری از چگونگی حرکت الکترون‌ها به دور هسته ارائه می‌کند. این مدل در تبیین پایداری اتم، طیف گسیلی و جذبی گاز هیدروژن اتمی و محاسبه انرژی یونش اتم هیدروژن با موقوفیت همراه است.

نارسایی‌های مدل بور:

- ۱) این مدل برای وقتی که بیش از یک الکترون به دور هسته می‌گردد به کار نمی‌رود، زیرا در مدل بور، نیروی الکتریکی که یک الکترون بر الکترون دیگر وارد می‌کند به حساب نیامده است.
- ۲) این مدل نمی‌تواند متفاوت بودن شدت خطوط طیف گسیلی را توضیح دهد. برای مثال مدل بور نمی‌تواند توضیح دهد که چرا شدت خط قرمز با شدت خط آبی در طیف گسیلی گاز هیدروژن اتمی با یکدیگر متفاوت است.
- اتم هیدروژن گونه به اتم هایی گفته می‌شود که تنها یک الکترون دارند.

لیزر

وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین تر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود. فرایند گسیل خود به خود یا گسیل القایی باشد.

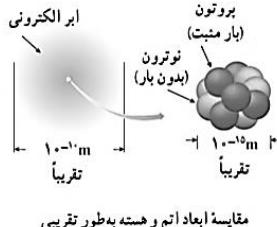


در گسیل خود به خود فوتون درجهٔ کاتورهای گسیل می‌شود. در حالی که در گسیل القایی یک فوتون ورودی، الکترون برانگیخته را تحریک (یا القا) می‌کند تا تراز انرژی خود را تغییر دهد و به تراز پایین تر برود. برای گسیل القایی، انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی های دو فوتون خارج می‌شود. به این ترتیب این فرایند گسیل القایی سه ویژگی عمده دارد:

- ۱) یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می‌شود.
- ۲) در همان جهت فوتون
- ۳) اینکه فوتون گسیل شده با فوتون ورودی همگام با دارای همان فاز است. به این ترتیب فوتون هایی که باریکه لیزری را ایجاد می‌کنند هم بسامد، هم جهت و هم فاز هستند.

در گسیل القایی یک چشمۀ انرژی خارجی مناسب باید وجود داشته باشد تا الکترون‌ها را به ترازهای انرژی بالاتر برانگیخته کند. این انرژی می‌تواند به روش‌های مختلفی از جمله درخشش‌های شدید نور معمولی یا تخلیه‌های ولتاژ بالا فراهم شود. اگر انرژی کافی به اتم‌ها داده شود، الکترون‌های بیشتری به تراز انرژی بالاتر برانگیخته خواهند شد، شرطی که به وارونی جمعیت معروف است. وارونی جمعیت الکترون‌ها در یک محیط لیزری، مربوط به وضعیت است که تعداد الکترون‌ها در ترازهایی موسوم به ترازهای شبه‌پایدار نسبت به تراز پایین تر بسیار بیشتر باشند.

در این ترازها، الکترون‌ها مدت زمان بسیار طولانی‌تر (10^{-8} s) نسبت به حالت برانگیخته معمولی (10^{-10} s) باقی می‌مانند. این زمان طولانی‌تر، فرصت بیشتری برای افزایش وارونی جمعیت و در نتیجه تقویت نورلیزر فراهم می‌کند.

فصل ششم (آشنایی با فیزیک هسته‌ای)

فیزیک هسته‌ای، شاخه‌ای از فیزیک است که در آن با ساختار، برهمنش‌ها و واپاشی هسته‌های اتمی سروکار داریم. ساختار هسته: با کاوش درون اتم، در مرکز آن، هسته را می‌یابیم که شعاع آن تقریباً $\frac{1}{100000}$ شعاع اتم است. هسته اتم از نوترون‌ها و پروتون‌ها تشکیل شده است که به طور کلی نوکلئون نامیده می‌شوند. نوکلئون بار الکتریکی ندارد، و جرمش اندکی بیشتر از پروتون است.

تعداد پروتون‌های هسته را عدد اتمی (Z) می‌نامند و در عنصرهای مختلف متفاوت است. در یک اتم خنثی، تعداد پروتون‌های هسته با تعداد الکترون‌های دور هسته برابر است. تعداد نوکلئون‌های هسته، عدد نوترونی (N) نامیده می‌شود. همچنین مجموع تعداد کل پروتون‌ها و نوکلئون‌ها را عدد جرمی (A) می‌نامند. پس:

$$A = Z + N$$

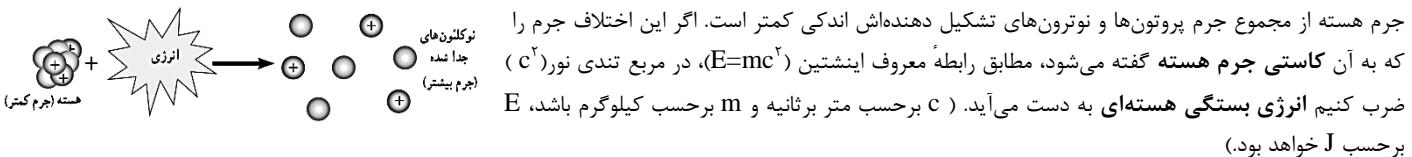
برای یک عنصر با نام شیمیایی X نماد هسته به صورت Z^AX نشان داده می‌شود.

ایزوتوپ‌ها: ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوکلئون‌های آن تعیین می‌کند. خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی Z) تعیین می‌کند. به همین سبب هسته‌هایی که تعداد پروتون مساوی ولی تعداد نوکلئون متفاوت دارند خواص شیمیایی یکسانی دارند، در نتیجه این هسته‌ها در جدول تناوبی عناصر هم مکان هستند و بنابراین ایزوتوپ (هم مکان) نامیده می‌شوند.

پایداری هسته: ابعاد هسته در مقایسه با ابعاد اتم بسیار کوچک‌تر است. با وجود این، بیشتر جرم اتم (بیش از ۹۹٪ درصد آن) در هسته متمرکز شده است. با توجه به اینکه نیروی الکتروستاتیکی رانشی خیلی قوی بین پروتون‌های درون هسته، که بسیار به یکدیگر نزدیک‌اند، وارد می‌شود، تنها چیزی که مانع از هم پاشیدن هسته می‌شود نیروی هسته‌ای است. این نیرو نمی‌تواند گرانشی باشد، زیرا جاذبه حاصل از نیروی گرانشی بین نوکلئون‌ها، چنان ضعیف است که نمی‌تواند با نیروی الکتروستاتیکی رانشی مقابله کند. **ویژگی‌های نیروی هسته‌ای:** ۱) نیروی هسته‌ای رباش است ۲) نیروی هسته‌ای قوی‌تر از گرانشی و الکترواستاتیکی است ۳) نیروی هسته‌ای، کوتاه بُرد است و تنها در فاصله‌ای کوچک‌تر از ابعاد هسته اثر می‌کند. ۴) نیروی هسته‌ای مستقل از بار الکتریکی است، یعنی نیروی رباشی هسته‌ای یکسانی بین دو پروتون، دو نوکلئون، یا یک پروتون و یک نوکلئون وجود دارد. به همین دلیل از منظر نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوکلئون وجود ندارد و دلیل نام گذاری آنها با نام عام نوکلئون نیز همین است.

چرا با افزایش تعداد پروتونها در عناصر سنگین تعداد نوکلئونها بیشتر از پروتونها افزایش می‌یابد؟ برای پایداری هسته، باید نیروی دافعه الکتروستاتیکی بین پروتون‌ها با نیروی جاذبه بین نوکلئون‌ها، که ناشی از نیروی هسته‌ای است، موازن شده باشد. ولی به دلیل بلند بُرد بودن نیروی الکتروستاتیکی، یک پروتون تمام پروتون‌های دیگر درون هسته را دفع می‌کند، در حالی که یک پروتون یا یک نوکلئون، فقط نزدیک‌ترین نوکلئون‌های هسته‌ای مجاور خود را با نیروی هسته‌ای جذب می‌کند. به همین دلیل وقتی تعداد پروتون‌های درون هسته افزایش یابد، اگر هسته بخواهد پایدار باقی بماند، باید تعداد نوکلئون‌های درون هسته نیز افزایش یابد.

انرژی بستگی هسته‌ای و ترازهای انرژی هسته: برای جدا کردن نوکلئون‌های یک هسته، انرژی لازم است. انرژی لازم برای این منظور، انرژی بستگی هسته‌ای نامیده می‌شود.



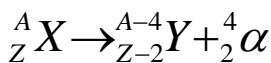
انرژی نوکلئون‌های واپسیه به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های واپسیه به اتم، کوانتیدهاند و نوکلئون‌های درون هسته نمی‌توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنان، همان طور که الکترون‌های اتم می‌توانند با جذب انرژی از تراز پایه به تراز برانگیخته بروند، نوکلئون‌ها نیز می‌توانند با جذب انرژی به ترازهای انرژی بالاتر بروند و در نتیجه هسته برانگیخته شود. هسته برانگیخته با گسیل فوتون به تراز پایه بر می‌گردد. انرژی فوتون گسیل شده، با اختلاف انرژی بین تراز برانگیخته و تراز پایه برابر است.

اختلاف بین ترازهای انرژی نوکلئون‌ها در هسته از مرتبه keV است، در حالی که اختلاف بین ترازهای انرژی الکترون‌ها در اتم از مرتبه eV است. از این رو، هسته‌ها در واکنش‌های شیمیایی برانگیخته نمی‌شوند.

پرتوزایی طبیعی: وقتی یک هسته ناپایدار یا پرتوزا خودبه خود و اپاشی می‌کند، نوع معینی از ذرات یا فوتون‌های پر از این روزایی طبیعی نامیده می‌شود. در پرتوزایی طبیعی سه نوع پرتو ایجاد می‌شود: پرتوهای آلفا (α) پرتوهای بتا (β) و پرتوهای گاما (γ) در پرتوهای α کمترین نفوذ را دارند و با ورقه نازک سربی با ضخامت ناچیز (0.1 mm) متوقف می‌شوند، در حالی که پرتوهای β مسافت خیلی بیشتری را ($\approx 1\text{ mm}$) در سرب نفوذ می‌کنند. پرتوهای γ بیشترین نفوذ را دارند و می‌توانند از ورقه ای سربی به ضخامت قابل ملاحظه‌ای ($\approx 100\text{ mm}$) گذرند.

در تمام فرایندهای واپاشی پرتوزا مشاهده شده است که تعداد نوکلئون‌ها در طی فرایند واپاشی هسته‌ای پایسته است؛ یعنی تعداد نوکلئون‌ها، پیش از فرایند با تعداد نوکلئون‌ها پس از فرایند مساوی است.

واپاشی a: در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، ذرات باردار مثبت از جنس هسته اتم هلیم (${}^{4}\text{He}$) از هسته اتم خارج می‌شود. معادله واکنش به صورت زیر است.



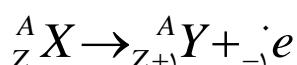
در این واکنش، X و Y دو عنصر متفاوت هستند، چون عدد اتمی متفاوت دارند.

واپاشی همراه با گسیل ذرهی بتا (β): این متدالول ترین نوع واپاشی در هسته‌ها است. در این واپاشی هسته ناپایدار با گسیل الکترون یا پوزیترون (ذرهای دارای جرم برابر جرم الکترون و بار مخالف آن) به هسته‌ی جدیدی تبدیل می‌شود. ذرهی β، از جنس الکترون (e^-) یا پوزیترون (e^+) است. اما هسته، الکترون یا پوزیترون ندارد. پس ذرهی β، از کجا می‌آید؟ پاسخ آن است:

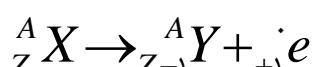
الف) (واپاشی β منفی) اگر در واپاشی، گسیل الکترون را داشته باشیم، یک نوترون در هسته، متلاشی شده و تبدیل به یک پروتون و یک الکترون می‌شود:

$$n \rightarrow p + e^-$$

به این ترتیب یک نوترون از هسته کم می‌شود و یک پروتون به آن اضافه می‌شود. بنابراین جرم هسته، تغییر چندانی نمی‌کند، ولی عدد اتمی یک واحد زیاد می‌شود:

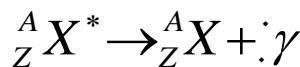


ب) (واپاشی β مثبت) اگر در واپاشی گسیل پوزیترون را داشته باشیم، یک پروتون هسته به نوترون و پوزیترون تبدیل می‌شود:



محصول این واپاشی، هسته‌ی عنصر جدیدی است که در جدول تناوبی قبل از X قرار دارد.

واپاشی γ: رفتنه از حالت برانگیخته به حالت پایه، همراه با گسیل ذرهی گاما (γ) پرتو γ، از جنس امواج الکترومغناطیسی است. جرم و بار پرتو γ، صفر است. بنابراین با گسیل پرتو γ، نه عدد جرمی تغییر می‌کند و نه عدد اتمی. اما هسته مقداری انرژی از دست می‌دهد و به حالت پایدارتری می‌رسد:

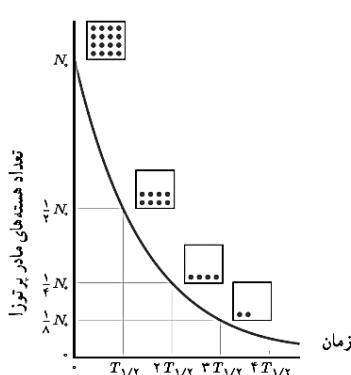


اگر یک هسته پرتوزا چند نوع تابش انجام دهد برای موازنی آن و به دست آوردن مجھول (X) باید نکات زیر را در نظر گرفت:

(۱) مجموع اعداد اتمی در دو سمت واکنش هسته‌ای باید یکسان باشد.

(۲) مجموع اعداد جرمی در دو سمت واکنش هسته‌ای باید یکسان باشد.

در تمام واکنش‌های فوق، به X هسته‌ی مادر و به Y هسته‌ی دختر گویند.



نیمه عمر، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا تعداد هسته‌های مادر موجود در یک نمونه، به نصف بررسنده.

نیمه عمر ماده‌ی پرتوزا: نیمه عمر یک ماده‌ی پرتوزا، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا طی آن نیمی از هسته‌های پرتوزا موجود در آن واپاشیده شوند و آن را با $T_{\frac{1}{2}}$

نشان می‌دهند. در واقع نیمه عمر، به نوعی سرعت واپاشی یک ایزوتوپ را نشان می‌دهد.

پس از گذشت هر نیمه عمر، تعداد هسته‌های ایزوتوپ پرتوزا اولیه، نصف می‌شود. بنابراین پس از گذشت n نیمه عمر، تعداد این هسته‌ها $\frac{1}{2^n}$ برابر می‌شوند

بنابراین اگر پس از مدت زمان t ، تعداد هسته‌های ماده‌ی رادیواکتیو از N_0 به N کاهش یابد، داریم:

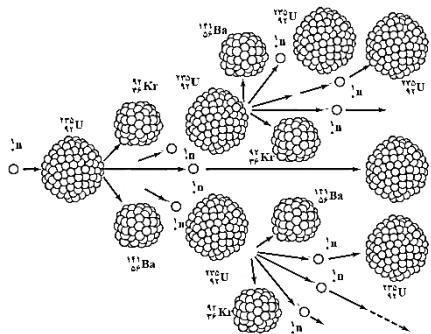
$$N = \frac{N_0}{2^n} \Rightarrow N' = N_0 - N, n = \frac{t}{T_{\frac{1}{2}}}$$

(تعداد نیمه عمرها، تعداد هسته‌های باقی مانده و تعداد هسته‌های متلاشی شده است).

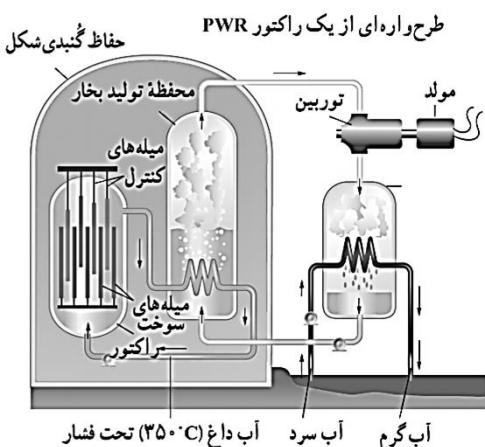
شکافت هسته‌ای: فرایند تقسیم شدن یک هسته سنگین به دو هسته با جرم کمتر، شکافت هسته‌ای نامیده می‌شود. در فرایند شکافت اورانیم، ترکیب‌های متفاوتی از هسته‌های کوچک‌تر همراه با تعدادی نوترون (بین ۲ تا ۵) به وجود می‌آید.

وقتی نوترونی با هسته اورانیم ۲۳۵ برخورد کند و جذب شود، هسته اورانیم شروع به ارتعاش می‌کند و تغییر شکل می‌دهد. ارتعاش تا وقتی ادامه می‌یابد که تغییر شکل چنان جدی شود که نیروی جاذبه هسته‌ای دیگر نتواند با نیروی دافعه الکتروستاتیکی بین پروتون‌های هسته متوازن شود. در این هنگام، هسته به پاره‌هایی وامی پاشد که حامل انرژی (به طور عمدۀ انرژی جنبشی) هستند.

واکنش زنجیری: با جذب یک نوترون گُند فرایند شکافت آغاز می‌شود. در این فرایند چند نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بار الکتریکی ندارند، هسته‌های دیگر آنها را دفع نمی‌کنند. نوترون‌ها پس از گُند شدن، توسط هسته‌های دیگر جذب می‌شوند و باعث شکافت در تعداد بیشتری هسته اورانیم دیگر می‌شوند و واکنش به طور زنجیره‌ای ادامه می‌یابد.



در واکنش‌های شکافت هسته‌ای، جرم محصولات شکافت، کمتر از جرم هسته مرکب است. این اختلاف جرم بنا به رابطه $E = mc^2$ ، سبب آزاد شدن انرژی گرمایی زیادی می‌شود.



غنجی سازی اورانیم: فرایند افزایش درصد یا غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در یک نمونه، غنی سازی گفته می‌شود. بیشتر راکتورهای تجاری تولید برق، از اورانیمی استفاده می‌کنند که در آنها ایزوتوپ تا ۳ درصد غنی سازی شده است. در بیشتر راکتورهای پژوهشی، از سوختی استفاده می‌شود که تا ۲۰ درصد غنی سازی شده است.

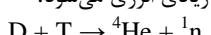
راکتورهای شکافت هسته‌ای: نوترون‌های آزاد شده در فرایند شکافت انرژی جنبشی زیادی دارند و با ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ واکنش انجام نمی‌دهند. اگر بتوان نوترون‌های تبدیل را به نجوي گُند ساخت احتمال جذب آنها افزایش می‌یابد. آب سنگین و گرافیت (اتم‌های کربن) به عنوان گُندساز نوترون‌ها در واکنش‌های شکافت هسته‌ای استفاده می‌شوند.

راکتورهای هسته‌ای افزون بر سوخت هسته‌ای و ماده کُندساز دارای میله‌های کنترل و شاره‌ای (معمولاً آب) هستند که گرمای را به خارج راکتور انتقال می‌دهند. با وارد کردن میله‌های کنترل، آهنگ واکنش شکافت، یعنی تعداد نوترون‌های موجود برای به وجود آوردن شکافت، تنظیم می‌شود.

میله‌های کنترل معمولاً از مواد جذب کننده نوترون، مانند کادمیم یا بور، ساخته می‌شوند.

گداخت (همجوشی) هسته‌ای

واکنش هسته‌ای که منشأ تولید انرژی در ستارگان و از جمله خورشید است، گداخت یا همجوشی هسته‌ای نام دارد. در فرایند گداخت هسته‌ای، دو هسته سبک (برای مثال دوتريوم D و تريتيوم T) با یکدیگر ترکیب می‌شوند و هسته سنگینتری به وجود می‌آورند. در واکنش گداخت، مجموع جرم محصولات فرایند، کمتر از مجموع جرم هسته‌های اولیه است. این اختلاف جرم سبب آزاد شدن مقدار زیادی انرژی می‌شود.



مشکلات در ساخت راکتور گداخت به این علت پیش می‌آید که دو هسته کم جرم باید به قدر کافی به هم نزدیک شوند تا نیروی کوتاه بُرد هسته‌ای بتواند آنها را کنار هم نگه دارد و واکنش گداخت انجام شود. ولی، هر هسته، بار مثبت دارد و هسته دیگر را دفع می‌کند، برای آنکه هسته‌ها با وجود این نیروی رانشی بسیار قوی، بتوانند به هم گداخته شوند، باید دما بسیار بالا باشد تا هسته‌ها با انرژی جنبشی زیادی به یکدیگر برخورد کنند. به همین دلیل، برای انجام این واکنش باید مقدار زیادی انرژی صرف کرد. به طور مثال، برای شروع واکنش دوتريوم-تريتيوم، به دمایی حدود دهها میلیون درجه سلسیوس نیاز است. دمایی از این مرتبه در ستارگان و خورشید وجود دارد.

