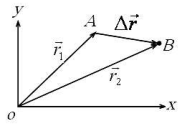


فصل اول: حرکت بر خط راست

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

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

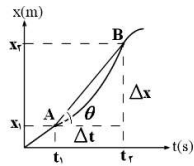


تندی متوسط و سرعت متوسط: تندی متوسط و سرعت متوسط دونده به صورت زیر تعریف می‌شوند و تندی متوسط، کمیتی نرده ای و

سرعت متوسط، کمیتی برداری است. $\vec{v}_{av} = \frac{\vec{d}}{\Delta t}$ سرعت متوسط $s_{av} = \frac{l}{\Delta t}$ 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

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



$$v_{av} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow v_{av} = \tan \theta$$

$$\tan \theta = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

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.

$$\bar{a} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_2 - V_1}{t_2 - t_1}$$

شتاب متوسط متوسط بین دونقطه از نمودار سرعت-زمان برابر است با شیب خطی که آن دونقطه را به هم

$$a_{av} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow a_{av} = \tan \theta$$

$$\tan \theta = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

وصل می‌کند.

شتاب لحظه‌ای شتابی است، که متحرک در هر لحظه دارا رد. 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 نسبتا پیچیده‌ی شکل زیر، برای محاسبه‌ی جابجایی

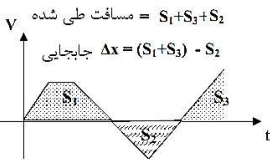
مساحت‌های S_1 و S_3 را باهم جمع و نتیجه را منهای S_2 می‌کنیم زیرا مساحت S_2 زیر محور و منفی است.

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



$V = at + V_0$	$\Delta V = at$	معادله سرعت-زمان
$x = \frac{1}{2}at^2 + V_0t + x_0$	$\Delta x = \frac{1}{2}at^2 + V_0t$	معادله مکان-زمان
$x = \left(\frac{V_0 + V}{2}\right)t + x_0$	$\Delta x = \left(\frac{V_0 + V}{2}\right)t$	معادله مستقل از شتاب
$V^2 - V_0^2 = 2a\Delta x$	$V^2 - V_0^2 = 2a\Delta x$	معادله مستقل از زمان

معادله‌ی مکان-زمان در حرکت شتابدار با شتاب ثابت از درجه ۲ است، لذا نمودار آن یک سهمی است. اگر انحناء (تقعر) این سهمی روبه بالا باشد، شتاب مثبت و اگر

انحناء (تقعر) این سهمی روبه پایین باشد، شتاب منفی است.

حرکت تند شونده، حرکت کند شونده: اگر در حرکت با شتاب ثابت شیب نمودار مکان-زمان در هر لحظه زیاد شود، 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:

$$a \times v < 0 \rightarrow \text{حرکت کند شونده}$$

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

سقوط آزاد: (فقط ریاضی): هر گاه جسمی از یک ارتفاعی نسبت به سطح زمین سقوط کند اگر از مقاومت هوا صرفنظر شود، با شتاب ثابت 9.8 متر بر مجذور ثانیه به سمت

زمین سقوط می‌کند یعنی در هر یک ثانیه تقریبا 10 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 وارد بر جسم 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، مبدا سنجش فرض کنیم، ($v_0 = 0$) و جهت مثبت را رو به بالا در نظر بگیریم. اگر جسم رها شود یا سرعت اولیه صفر باشد ($v_0 = 0$)، 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 تقریبا 10 است و t زمان است.

فصل دوم: دینامیک و حرکت دایره‌ای

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 (تأثیر) دو جسم بر یکدیگر را نیرو نامند). (نیرو دارای اندازه و جهت است، بنابراین یک کمیت برداری است).

قانون اول نیوتن (قانون 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 نیوتن است. به همین علت قانون اول نیوتن 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 نیوتن: اگرچه 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

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

است و با جرم جسم نسبت وارون دارد یعنی:

❖ **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، $N \cdot s$ یا $\frac{kg \cdot m}{s}$

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

است.

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

$$\vec{F}_{net} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$$

❖ 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 برابر با حاصل ضرب نیرو در مدت زمان تأثیر آن است.

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

❖ برای بازه زمانی بزرگ به جای نیروی خالص باید نیروی خالص متوسط در فاصله زمانی مورد نظر را به کار برد. یعنی:

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

❖ تغییر تکانه یک جسم را می‌توان از سطح زیر نمودار نیرو زمان نیز به دست آورد.

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

قانون سوم نیوتن: 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

نیروی وزن: وزن یک جسم روی زمین، نیروی گرانشی است که از طرف زمین بر جسم وارد می‌شود.

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

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 مقاومت شاره: وقتی جسمی در یک شاره (مایع یا گاز) قرار دارد و نسبت به آن حرکت می‌کند از طرف شاره نیرویی در خلاف جهت حرکت جسم، به آن وارد می‌شود که به آن **نیروی مقاومت شاره** می‌گویند. ویژگی‌ها: (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 عمودی 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 $F_N = W$ است مگر آنکه نیروی دیگری، عمود بر سطح وجود داشته باشد.

نیروی اصطکاک: وقتی تلاش می‌کنیم جسمی را روی سطحی به حرکت درآوریم، چه جسم حرکت کند و چه ساکن بماند، با مقاومتی روبرو 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، و زبری 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 حداکثری است که با $f_{s,max}$ نشان می‌دهیم و به آن **نیروی اصطکاک ایستایی در آستانه حرکت** گفته می‌شود. اگر نیروی F بزرگتر از $f_{s,max}$ باشد جسم شروع به حرکت می‌کند. اصطکاک ایستایی **حرکت** از رابطه روبرو به دست می‌آید.

$$f_{s,max} = \mu_s F_N$$

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

نیروی کشسانی (قانون هوک): اگر فنری را تحت اثر نیروی کشش یا فشارنده‌ی F از حالت عادی خود خارج کنیم، فنر نیرویی در خلاف جهت تراکم یا کشیده شدن وارد

$$F_e = k\Delta l \quad \Delta l = l - l_0 \quad (F_e \text{ نیروی فنر می‌نامند.})$$

می‌کند این نیرو را نیروی کشسانی یا نیروی بازگرداننده‌ی فنر می‌نامند.

Δl تغییر طول فنر، l_0 طول اولیه فنر، l طول فنر در اثر نیروی F است. k ثابت فنر و از مشخصه‌های فنر است که ضریب سختی فنر نیز نامیده می‌شود. ثابت فنر به اندازه، شکل و ساختار ماده ای که فنر از آن ساخته شده بستگی دارد و واحد آن N/m است.

دوره (زمان تناوب یا پریدود): مدت زمانی است که متحرک روی مسیر دایره ای، یک دور کامل را طی می‌کند. دوره را T نمایش می‌دهند و یکای آن s ثانیه است. از آنجا که در این حرکت ذره محیط دایره $(2\pi r)$ را با تند v در زمان T طی می‌کند، داریم:

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

شتاب مرکزگرا و قانون دوم نیوتون: در حرکت دایره ای یکنواخت، اندازه سرعت ثابت است اما جهت آن دائماً تغییر می‌کند. به همین دلیل حرکت دایره ای، حرکتی شتاب دار است. در حالتی که بازه زمانی خیلی کوچک انتخاب می‌شود، جهت Δv به طرف مرکز دایره خواهد بود. پس جهت شتاب لحظه‌ای نیز به طرف مرکز خواهد بود. به همین دلیل به آن شتاب مرکزگرا می‌گویند. شتاب مرکزگرا برابر است با:

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

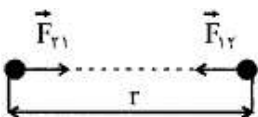
در حرکت دایره ای یکنواخت، شتاب جسم، همواره در راستای شعاع دایره و به طرف مرکز آن می‌باشد. طبق قانون دوم نیوتن، نیرو و شتاب، هم جهت با یکدیگر می‌باشند. نتیجه در حرکت دایره ای یکنواخت، برآیند نیروهای وارد بر جسم (F_{net}) ، به طرف مرکز دایره است.

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

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، F : نیرو، G : ثابت جهانی گرانش



G 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 می‌باشد. بنابراین نیروی گرانشی میان جسم‌های با جرم‌های کوچک قابل ملاحظه نیست.

❖ دو جرم همواره یکدیگر را می‌ربایند. به عبارت دیگر نیروی گرانشی از نوع رانشی (دافعه) نیست.

چند نکته برای حل مسائل دینامیکی:

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

فصل سوم: نوسان وموج

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

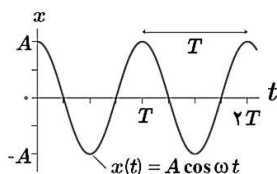
حرکت هماهنگ ساده: به نوسان‌های سینوسی، حرکت هماهنگ ساده (SHM) گفته می‌شود. در این حرکت، متحرک، روی یک پاره خط، حول نقطه تعادلی واقع در وسط پاره خط، حرکت رفت و برگشت، انجام می‌دهد. دو نمونه از حرکت هماهنگ ساده، عبارت از: (۱) حرکت آونگ، وقتی که، زاویه θ خیلی کوچک باشد، (۲) حرکت نوسانی وزنه متصل به فنر.

دوره تناوب: در حرکت هماهنگ ساده، مدت زمانی که جسم، یک بار رفت و برگشت را انجام می‌دهد، دوره‌ی حرکت نامیده و آن را T نشان می‌دهیم و واحد آن، ثانیه است **بسامد:** در حرکت هماهنگ ساده، تعداد رفت و برگشت ها، در مدت t ثانیه، بسامد حرکت است. (توجه کنید که در حرکت دایره ای، بسامد، تعداد دورهای کامل در t ثانیه بود

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{یا} \quad T = \frac{1}{f}$$

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

دامنه‌ی نوسان: در حرکت هماهنگ ساده، بیشترین فاصله‌ی نوسانگر از نقطه‌ی تعادل را دامنه‌ی حرکت نامیده و آن را A نشان می‌دهیم و واحد آن متر می‌باشد.



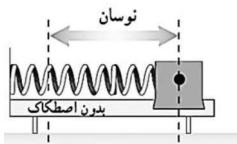
$$x(t) = A \cos \omega t \quad (\text{معادله مکان زمان در حرکت هماهنگ ساده})$$

ω بسامد زاویه‌ای و برابر $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$ است. یکای بسامد زاویه‌ای در SI، rad/s است.

وقتی نوسانگر در $x = \pm A$ است، سرعت آن برابر با صفر است به این نقطه‌ها اصطلاحاً نقطه‌های بازگشت حرکت می‌گویند. وقتی $x = 0$ است (یعنی نوسانگر از نقطه تعادل می‌گذرد) اندازه سرعت بیشینه است.

سامانه جرم فنر: دوره تناوب T ، بسامد f و بسامد زاویه‌ای 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 وزنه‌های متفاوت، با جذر جرم وزنه به طور مستقیم متناسب است
- ❖ دوره تناوب سامانه جرم فنر با یک وزنه معین ولی فنرهای متفاوت، با جذر ثابت فنر به طور وارون متناسب است.

آونگ 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:



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

- ❖ با توجه به رابطه‌ی دوره تناوب آونگ: دوره تناوب آونگ ساده به جرم و دامنه آن بستگی ندارد.
- ❖ اگر اندازه‌گیری در محلی به غیر از زمین باشد، به جای g شتاب جاذبه در آن محل را قرار می دهیم. مثلاً اگر اندازه‌گیری در آسانسور باشد، به جای g ، g' یعنی نتیجه‌ی شتاب خود آسانسور و شتاب زمین ($g' = g \pm a$) را قرار می‌دهیم.

انرژی در حرکت هماهنگ ساده:

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

انرژی جنبشی (K) جرم فنر به جرم قطعه متصل به فنر و تندی آن بستگی دارد. هرچه فاصله (x) بیشتر، انرژی پتانسیل بیشتر و هرچه سرعت (v) بیشتر، انرژی جنبشی بیشتر است.

در دامنه‌ی $\pm A$ مقدار انرژی جنبشی و پتانسیل با هم برابر است.

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

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

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

تشدید: اگر در نوسانگری نوسان‌های وارد شده با بسامد طبیعی نوسانگر برابر شود (یعنی $f_d=f_0$)، در چنین وضعیتی اصطلاحاً گفته می‌شود که برای نوسانگر تشدید (رزونانس) رخ داده است. در این حالت دامنه‌ی نوسان افزایش می‌یابد.

انواع موج با توجه به محیط انتشار: ۱- امواج مکانیکی: این امواج برای انتشار، به محیط مادی نیاز دارند، بنابراین در خلأ انتشار نمی یابند. مانند امواج صوتی، تشکیل موج سطح آب، موج ایجاد شده در طناب، فنر و ... ۲- امواج الکترومغناطیس: این امواج در همه جا (مایعات، جامدات، گازها و خلأ) منتشر می‌شوند. مانند نور، امواج رادیویی، اشعه‌ی گاما و ...

انواع 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 محیط‌هایی منتشر می‌شوند که نیروی بین ذرات آن نسبتاً زیاد باشد. با این حساب، امواج مکانیکی عرضی، فقط در جسم‌های جامد و سطح ما (یع‌به‌دلیل 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 می‌شود و آن را با λ نشان می‌دهند. طول موج λ برابر با مسافتی است که موج در مدت دوره تناوب نوسان چشمه طی می‌کند.

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

۳) **دوره تناوب (T):** مدت زمانی که هر ذره محیط یک نوسان کامل انجام می‌دهد دوره تناوب موج نامیده می‌شود که برابر با زمانی است که چشمه موج یک نوسان کامل انجام می‌دهد.

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

۵) **تندی انتشار موج (v):** اگر جهت موج در مدت Δt مسافت L را طی کند، تندی انتشار موج از رابطه $v = \frac{L}{\Delta t}$ به دست می‌آید. از آنجا که طول موج λ در دوره T طی می‌شود، 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 چشمه موج (بسامد، دامنه، انرژی مکانیکی و ...) بستگی ندارد.

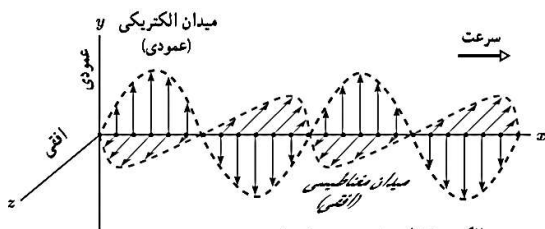
❖ دقت کنید که تندی ارتعاش (نوسان) که بیشینه‌ی آن $A\omega$ است را با تندی انتشار موج که مقداری ثابت است، اشتباه کنید.

❖ **تندی انتشار موج عرضی در یک فنر، 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:**

$$\mu = \rho A \Rightarrow v = \sqrt{\frac{F}{\rho A}} \quad \text{و} \quad v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad \text{❖}$$

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

امواج الکترومغناطیسی: امواج الکترومغناطیسی از تغییر هم زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در فضا به وجود می‌آیند.



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

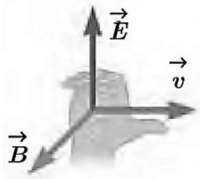
مشخصه بارز امواج الکترومغناطیسی

- ❖ میدان الکتریکی \vec{E} همواره عمود بر میدان مغناطیسی \vec{B} است.
- ❖ میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی E و B همواره بر جهت حرکت موج عمودند و در نتیجه موج الکترومغناطیسی، یک موج عرضی است.
- ❖ میدان‌ها با بسامد یکسان و همگام با یکدیگر تغییر می‌کنند.
- ❖ جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی را می‌توان 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 $(\vec{E}, \vec{B}, \vec{k})$ ، پس اگر چپا انگشت دست راست را در جهت \vec{B} توری قرار داده که انگشت شصت دست راست در جهت \vec{E} باشد، آن‌گاه بردار \vec{k} از کف دست راست خارج می‌شود.

تندی انتشار امواج الکترومغناطیسی در خلأ از رابطه $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$ به دست می‌آید. که در آن تراوایی مغناطیسی خلأ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A}$ و ضریب گذردهی الکتریکی خلأ $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$

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



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

❖ امواج الکترومغناطیسی انرژی را صورت انرژی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی منتقل می‌کنند.



موج طولی و مشخصه‌های آن: در مورد امواج طولی، طول موج برابر با فاصله بین دو تراکم (برای فشرده‌شدگی) یا دو انبساط (برای فشرده‌شدگی) متوالی است. همچنین دامنه موج طولی برابر با بیشینه جابه‌جایی 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 (چشمه صوت) تولید می‌شود. صوت فقط در محیط‌های مادی مانند گاز، مایع، یا جامد می‌تواند ایجاد و منتشر شود. امواج صوتی مجموعه‌ای از تراکم‌ها و انبساط‌ها تشکیل شده‌اند.

❖ تندی انتشار صوت نیز مانند هر موج مکانیکی دیگری با رابطه $v = f\lambda$ به بسامد و طول موج مربوط می‌شود و به ویژگی‌های فیزیکی محیط بستگی دارد. تندی صوت افزون بر جنس محیط به دما نیز بستگی دارد.

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

❖ **شدت و تراز شدت صوت:** شدت یک موج صوتی (I) در یک سطح، برابر با آهنگ متوسط انرژی‌ای است که توسط موج به واحد سطح، عمود بر راستای انتشار صوت می‌رسد یا از آن عبور می‌کند. که در آن \bar{P} آهنگ متوسط انتقال انرژی و A مساحت سطحی است که صوت با آن برخورد می‌کند. بنابراین

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

❖ شدت صوتی که از سطح کره‌ای به مساحت $A = \pi R^2$ عبور می‌کند، از رابطه‌ی روبرو به دست می‌آید.

$$I_0 = \frac{P}{\pi R^2} \rightarrow \frac{\mu W}{m^2} \rightarrow \frac{W}{m^2}$$

تراز شدت صوت یا شدت احساسی نسبی صوت: تراز شدت صوت، در واقع درک انسان را از بلندی صوت بیان می‌کند و عبارت از لگاریتم در پایه‌ی ده نسبت شدت صوت به شدت صوت مینا که آن را با β نشان داده و واحد آن بل می‌باشد:

$$\beta = \log \frac{I}{I_0} (db)$$

هر بل ۱۰ دسی بل است. بنابراین:

$$\beta = \log \frac{I}{I_0} (b)$$

بلندی نسبی صوت: تفاضل تراز شدت دو صوت را بلندی نسبی آن‌ها گویند. اگر صوتی به شدت I_1 با تراز β_1 شنیده شوند، اگر

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

باشد، بلندی نسبی آن‌ها برابر است با:

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

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

ادراک شنوایی: با شنیدن هر تن، دو ویژگی را می‌توان از هم متمایز ساخت: ارتفاع و بلندی آن. ارتفاع و بلندی هر دو به ادراک شنوایی ما مربوط می‌شوند.

ارتفاع، بسامدی است که گوش انسان درک می‌کند؛ مثلاً اگر چند دیپازون 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 دیپازون با بسامد مشخص را با ضربه‌هایی متفاوت به ارتعاش واداریم، با آنکه بسامد صدایی که می‌شنویم تغییر نمی‌کند، اما صداهایی 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 ۲۰۰۰۰ Hz است.

اثر دوپلر: تغییر بسامدی که در اثر حرکت نسبی منبع صوت و شنونده ایجاد می‌شود را پدیده‌ی 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) چشمه متحرک و ناظر (شنونده) ساکن:

اگر ناظر ساکنی را روبه روی ماشین در نظر بگیریم، این ناظر طول موج کوتاه تری 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) چشمه ساکن و ناظر (شنونده) متحرک:

در این حالت تجمع جبهه‌های موج در دو سوی چشمه یکسان است. اگر ناظر به طرف چشمه 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 چشمه 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 چشمه موج الکترومغناطیسی نسبت به ناظر (آشکارساز) در حرکت باشد، بسامد و طول موج دریافتی از این چشمه تغییر می‌کند. وقتی چشمه نور از ناظر (آشکارساز) دور می‌شود، طول موج افزایش می‌یابد که به آن اصطلاحاً **انتقال به سرخ** می‌گویند و وقتی چشمه 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

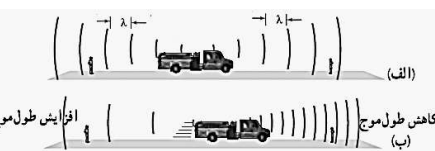
پژواک صوت نمونه‌ای از بازتاب امواج مکانیکی است. خفاش برای یافتن طعمه از پژواک موج صوتی خود استفاده می‌کند. امواج الکترومغناطیسی (از جمله نور) نیز بازمی‌تابند.

❖ تولید صدا در آلات موسیقی، پژواک صداها، دیدن ماه، 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.

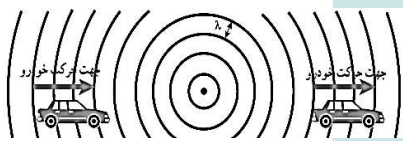
❖ زاویه بین خط عمود بر سطح مانع و پرتوی تابیده (فرودی) را **زاویه تابش** می‌نامند و با θ_i نشان می‌دهند.

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

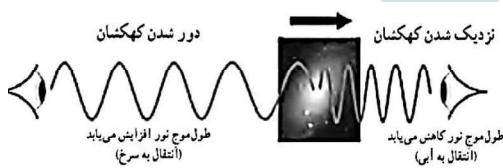
❖ همواره زاویه بازتابش برابر با زاویه تابش است: یعنی $\theta_i = \theta_r$ که به آن، **قانون بازتاب عمومی** گفته می‌شود.



افزایش طول موج



کاهش طول موج

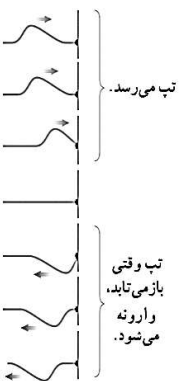


دور شدن کهکشان

نزدیک شدن کهکشان

طول موج نور افزایش می‌یابد (انتقال به سرخ)

طول موج نور کاهش می‌یابد (انتقال به آبی)



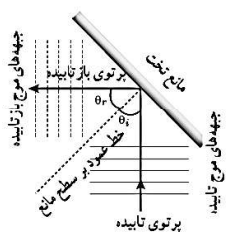
تپ می‌رسد.

تپ و تپ

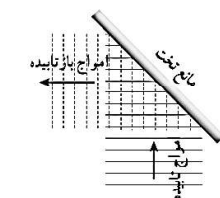
باز می‌تابد،

و آروند

می‌شود.



نمودار پرتویی همراه با جبهه‌های موج برای بازتاب امواج تخت از سطح مانعی تخت



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

❖ 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 شنونده‌ی برسد که صوت اولیه را مستقیماً می‌شنود، به چنین بازتابی **پژواک** می‌گویند. اگر تأخیر زمانی بین این دو صوت کمتر از ۱/۱۵ باشد، گوش انسان نمی‌تواند پژواک را از صوت مستقیم اولیه تمیز دهد.

مکان‌یابی پژواکی روشی است که بر اساس امواج صوتی بازتابیده از یک جسم، مکان آن جسم را تعیین می‌کند.

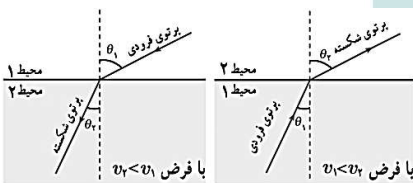
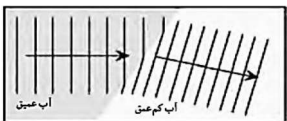
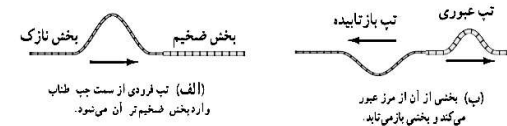
مکان‌یابی پژواکی به همراه اثر دوپلر، در تعیین مکان اجسام متحرک و نیز تعیین تندی آنها به کار می‌رود. همین‌طور در فناوری‌هایی نظیر اندازه‌گیری تندی شارش خون در رگ‌ها نیز از این روش استفاده می‌شود.

همچنین در دستگاه سونار که در کشتی‌ها برای مکان‌یابی اجسام زیر آب به کار می‌رود، و در سونوگرافی نیز از مکان‌یابی 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 رنگین‌کمان، تصویری که با کمک عینک می‌بینیم، تصویری که با استفاده از عدسی‌های ابزارهای نوری مانند میکروسکوپ و دوربین دیده می‌شود، و ... مثال‌های رایجی از شکسته شدن موج‌های نوری در پیرامون ما است. این پدیده برای امواج صوتی نیز رخ می‌دهد ولی به اندازه موج‌های نوری اهمیت ندارد..
- ❖ امواج نه تنها با محیط بلکه با یکدیگر نیز برهم‌کنش می‌کنند. **تداخل** نمونه‌ای از برهم‌کنش 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 چشمه موج تعیین می‌شود. بنابراین موج عبوری که تندی آن در قسمت ضخیم کمتر است، بنا به رابطه $V = \lambda f$ طول موج کمتری نسبت به موج فرودی خواهد داشت.



در حالت‌های 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

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

اگر موجی 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 برعکس یعنی اگر سرعت موج در محیط دوم کمتر باشد زاویه شکست کوچکتر از زاویه تابش می‌شود.

شکست امواج الکترومغناطیسی: یک موج پر قدرت رادیویی، با بسامد بین ۳ تا ۳۰ مگاهرتز، به لایه یون سپهر (یونسفر) 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 (یونسفر) چه امواجی را عبور میدهد و چه امواجی را بازتاب میدهد؟ چرا؟ یون سپهر در حالی که نور مرئی و تابش فرسوخ را عبور می‌دهد، امواج رادیویی با طول موج‌های بلند (با λ ی بزرگ‌تر از حدود ۱۰m) 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 خلأ به تندی نور در یک محیط است:

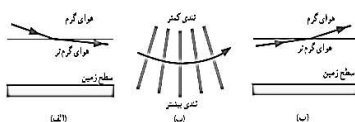
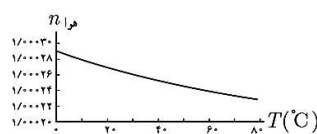
$$n = \frac{\text{تندی نور در خلأ}}{\text{تندی نور در یک محیط}} = \frac{c}{v}$$

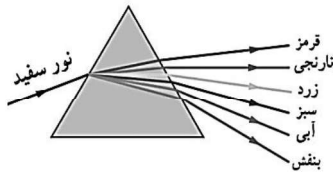
چون تندی نور در خلأ بیشترین تندی ممکن است، ضریب شکست همواره بزرگ‌تر یا مساوی ۱ است (که ۱ مربوط به خلأ است).

$$\text{قانون شکست اسنل} \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{در حالت کلی:} \quad \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

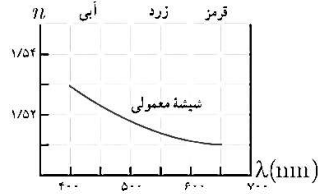
سراب: در روزهای گرم هوای سطح زمین نسبتاً داغ است. چگالی هوا با افزایش دما کاهش می‌یابد که این سبب کاهش ضریب شکست می‌شود. با پایین آمدن هر چه بیشتر پرتوهای نظیر جبهه‌های موج، آنها با ضریب شکست‌های کوچک‌تر و کوچک‌تری روبه‌رو می‌شوند و در هر مرحله با دور شدن از خط عمود، بیشتر و بیشتر به سمت افق و در ادامه 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.

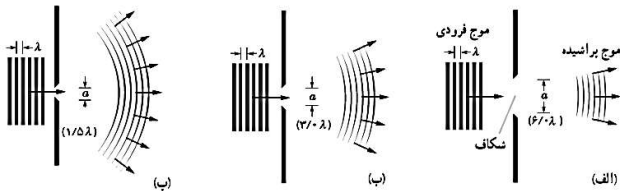




پاشندگی نور: وقتی باریکه نور سفید خورشید به وجهی از یک منشور می‌تابد، در عبور از منشور به رنگ‌های مختلفی تجزیه می‌شود. دلیل این پدیده آن است که ضریب شکست هر محیطی به جز خلأ به طول موج نور بستگی دارد. یعنی وقتی باریکه نوری شامل پرتوهایی با طول موج‌های مختلف باشد، این پرتوها هنگام عبور از مرز دو محیط در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

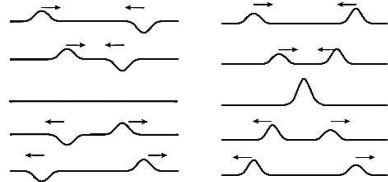


عموماً ضریب شکست یک محیط معین برای طول موج‌های کوتاه‌تر، بیشتر است. اگر مثلاً دو باریکه نور آبی و قرمز با زاویه تابش یکسانی از هوا وارد شیشه شوند باریکه آبی بیشتر از باریکه قرمز خم می‌شود.



مرجه پهنای شکاف کوچک‌تر شده بر این بارزتر شده است.

پراش موج: در صورتی که ابعاد مانع یا شکاف در حدود طول موج باشد، بخشی از موج که از لبه‌ها یا شکاف‌ها عبور می‌کند، به وضوح 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 تکفام 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.



تداخل سازنده دو تپ پیش‌رونده تداخل ویرانگر دو تپ پیش‌رونده

تداخل امواج

اصل برهم نهی امواج: وقتی چندین موج به طور هم‌زمان بر ناحیه‌ای از فضا تأثیر بگذارند، اثر خالص آنها برابر مجموع اثرهای مجزای هر یک از آنها است.

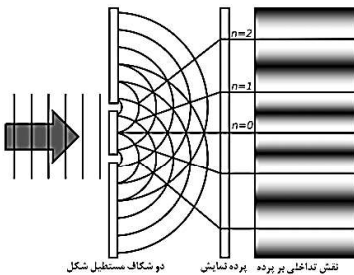
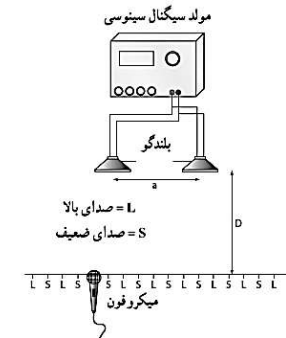
به ترکیب موج‌ها با یکدیگر، **تداخل** می‌گویند. به بیان دیگر تداخل، ترکیب دو یا چند موج است که هم‌زمان از یک منطقه عبور می‌کنند.

❖ 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 برآیند بیشینه و در برخی ناحیه‌ها، کمینه است. چنین نقش متناوب یک درمیانی از بیشینه‌ها و کمینه‌ها را نقش تداخلی امواج سطحی آب می‌نامیم.

تداخل امواج صوتی: امواج صوتی نیز می‌توانند تداخل کنند. دو بلندگو که به یک مولد سیگنال الکتریکی متصل‌اند امواج سینوسی هم‌بسامدی را در فضا منتشر می‌کنند. با حرکت دادن میکروفون در امتداد خط فرضی نشان داده شده در شکل که در فاصله مناسبی از بلندگوها قرار دارد درمی‌یابیم 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 موج‌های سطحی آب، موج‌های صوتی و همه انواع موج‌های دیگر تداخل می‌کند.



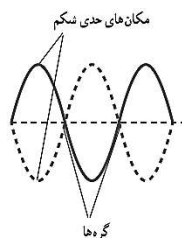
نقش تداخلی بر پرده دو شکاف مستقل شکل

آزمایش یانگ: نور حاصل از یک چشمه تکفام بر تک شکافی می‌تابد و دو شکاف S_1 و S_2 را روشن می‌کند. موج‌های 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 ریسمان کشیده: وقتی موج بازتابیده از انتهای ثابت با موج تابیده ترکیب شوند موجی برآیند ایجاد می‌کنند که شکل آن از اصل برهم نهی حاصل می‌شود. مکان‌هایی در طول ریسمان که در اثر تداخل ویرانگر ساکن هستند، **گره** نامیده می‌شوند و مکان‌هایی که دامنه موج برآیند در اثر تداخل سازنده بیشینه است، را **شکم** می‌گویند. نقش موج برآیند را در این حالت، **موج ایستاده** می‌گویند.

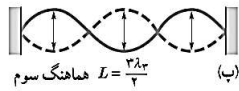
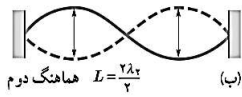
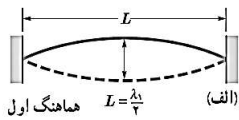
❖ فاصله گره‌های مجاور از هم برابر با نصف طول موج ($\lambda/2$) و بنابراین فاصله گره‌ها از شکم‌های مجاور برابر با ربع طول موج ($\lambda/4$) است.

❖ 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 مکان هر یک از شکم‌ها وضعیت موج‌های تابیده و بازتابیده در تمام لحظات به گونه‌ای است که همدیگر را



تقویت می‌کنند (تداخل سازنده). در این حالت اصطلاحاً می‌گوییم این دو موج در این نقاط **هم‌فازند**.

بسامدهای تشدید تار: در یک تار کشیده شده، در بسامدهای معینی، تداخل موجب ایجاد موج ایستاده مشخص یا یک مد نوسان در تار می‌شود. این بسامدهای معین **بسامدهای تشدید** خوانده می‌شوند. اگر تار در بسامدی غیر از بسامدهای تشدید نوسان کند موج ایستاده با رزی ایجاد نمی‌شود.



$$L = n \left(\frac{\lambda_n}{2} \right) \quad n=1,2,3,\dots \quad \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (\text{طول موج های تشدید تار})$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L} \quad n=1,2,3,\dots \quad (\text{بسامدهای تشدید تار})$$

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

اگر بجای v رابطه آن را قرار دهیم: اختلاف بسامد دو هماهنگ متوالی برابر با بسامد هماهنگ اصلی است:

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

مدهای نوسان را با بسامدهای تشدید مشخص می‌کنند. پایین‌ترین بسامد را که مربوط به $n=1$ است، بسامد اصلی و مد مربوط به آن را مد اصلی یا هماهنگ اول می‌گویند. بسامد هماهنگ دوم به ازای $n=2$ بسامد هماهنگ سوم به ازای $n=3$ و ... به دست می‌آید. به n عدد **هماهنگ** گفته می‌شود.

موج ایستاده و تشدید در لوله های صوتی: وقتی موج های صوتی در هوای درون لوله حرکت می‌کنند، از هر انتها باز می‌تابند و به درون لوله بازمی‌گردند، حتی اگر آن انتها باز باشد. اگر طول لوله مضرب های معینی از طول موج صوتی باشد، برهم نهی موج های پیش رونده در جهت های مخالف، نقش موج ایستاده با رزی را در لوله ایجاد می‌کند. مانند تار در لوله‌های صوتی هم فاصله گره‌های 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.

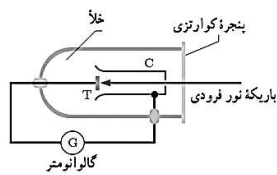
تشدید در بطری و تشدیدگر هلمهولتز: یک بطری مانند یک لوله صوتی با یک انتهای باز است که بسامدهای تشدید معینی دارد. وقتی در دهانه یک بطری می‌دمیم گستره وسیعی از بسامدها ایجاد می‌شود. حال اگر یکی از این بسامدها با یکی از بسامدهای تشدید بطری منطبق باشد، یک موج صوتی قوی ایجاد می‌شود. تشدیدگرهای هلمهولتز نیز همانند لوله‌های صوتی بسامدهای تشدید معینی دارند و هرگاه بسامد یک صوت برابر با یکی از بسامدهای تشدید آنها باشد، تشدیدگر پاسخ قوی‌تری به این صوت می‌دهد.

فصل پنجم: آشنایی با فیزیک اتمی

حوزه‌های فیزیک، از جمله مکانیک نیوتونی، ترمودینامیک و نظریه الکترومغناطیس ماکسول امروزه به نام فیزیک کلاسیک شناخته می‌شود. نسبت خاص (مربوط به مطالعه پدیده‌ها در تندی‌های 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 پدیده‌ها در مقیاس های بسیار کوچک، مانند اتم ها و ذره های سازنده آنها) سه نظریه فیزیک جدید هستند.



اثر فوتوالکتریک و فوتون: وقتی نوری با بسامد مناسب مانند نور فرابنفش به سطحی فلزی بتابد الکترون‌هایی از آن گسیل می‌شوند. این پدیده فیزیکی را، **اثر فوتوالکتریک** و الکترون های جدا شده از سطح فلز را **فوتوالکترئون** می‌نامند. در اثر فوتوالکتریک الکترون‌ها، انرژی نور فرودی را جذب می‌کنند و از سطح فلز خارج می‌شوند. برای بررسی اثر فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل روبرو استفاده می‌شود:



در اثر فوتوالکتریک، نوری تکفام با بسامدی به قدر کافی بالا، الکترون‌ها را از سطح صفحه فلزی T بیرون می‌آورد. این فوتوالکترئون‌ها، به طرف جمع کننده C می‌روند و جریانی را در مدار به وجود می‌آورند.

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

توجیه فیزیک کلاسیک درباره فوتوالکتریک: هنگام برهم کنش موج الکترومغناطیس (نور فرودی) با سطح فلز، میدان الکتریکی این موج، نیروی $F = -eE$ به الکترون‌های فلز وارد کند و آنها را به نوسان وادارد. به این ترتیب، وقتی دامنه نوسان برخی از الکترون‌ها به قدر کافی بزرگ شود انرژی جنبشی لازم را برای جدا شدن از سطح فلز پیدا می‌کنند.

مشکل فیزیک کلاسیک در توجیه اثر فوتوالکتریک:

(۱) بنا به این 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 ماکسول این است که شدت نور با مربع دامنه میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی متناسب است ($I \propto E^2$). به این ترتیب انتظار می‌رود به ازای یک بسامد معین، اگر شدت نور فرودی بر سطح فلز را افزایش دهیم باید الکترون‌ها با انرژی جنبشی بیشتری از فلز خارج شوند، نتیجه ای که تجربه آن را تأیید نمی‌کند.

اینستین در نظریه فوتوالکتریک فرض کرد که نور با بسامد f را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از بسته‌های انرژی در نظر گرفت. هر بسته انرژی، که بعدها **فوتون** نامیده شد، دارای انرژی ای است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

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

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

❖ با مقیاس بزرگ انرژی را با یکای ژول می‌سنجیم. (ژول برابر انرژی بار الکتریکی، تحت ولتاژ اولت $U = q\Delta V$). 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 اولت، تعریف می‌شود.

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

❖ ثابت پلانک برحسب $eV.s$ برابر است با $h = 4.136 \times 10^{-15} eV.s$

❖ 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 برحسب $eV.s$ و سرعت نور را برحسب nm برثانیه بنویسیم داریم: $hc = 1240 eV.nm$ (بهتر است حفظ شود).

تفسیر کوانتومی پدیده ی فوتوالکتریک (نظریه ی 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 فوتوالکتریک گسیل شده از سطح فلز می‌شود (K)

$$hf = W + K$$

قانون پایستگی انرژی در اثر فوتو الکتریک

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 فوتوالکتریک‌ها گسیل شده از آن برابر خواهد بود با:

$$K_{max} = hf - W_0$$

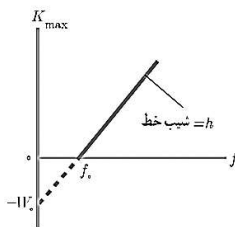
(معادله فوتو الکتریک)

W_0 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 λ_0): کمترین بسامدی (بلندترین طول موج) که می‌تواند اثر فوتوالکتریک را ایجاد کند. در این بسامد (طول موج) انرژی فوتون درست به اندازه‌ای است که بتواند فوتوالکتریک را از جا بکند و اضافه بر این چیزی نمی‌ماند که به شکل انرژی جنبشی ظاهر شود. اگر f کم‌تر از f_0 باشد (λ بزرگ‌تر از λ_0) تک فوتون‌ها، انرژی کافی برای کندن فوتوالکتریک نخواهند داشت و هیچ فرقی هم نمی‌کند که تعداد آن‌ها چقدر باشد، یعنی هیچ فرقی نمی‌کند که تابش نور چقدر شد باشد.

$$K_{max} = 0 \Rightarrow hf_0 = W_0 \Rightarrow f_0 = \frac{W_0}{h} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{hc}{W_0}$$

نمودار بیشینه انرژی جنبشی فوتوالکتریک‌ها بر حسب بسامد نور فرودی به صورت شکل روبروست. وقتی بسامد نور فرودی 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.

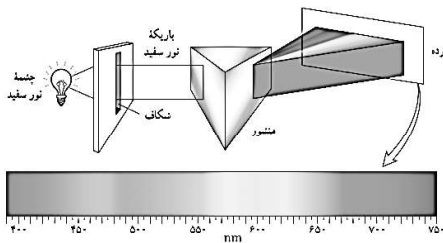


$$f_0 = \frac{W_0}{h} \quad (\text{بسامد آستانه فوتو الکترون ها}) \quad \lambda_0 = \frac{hc}{W_0} \quad (\text{طول موج قطع})$$

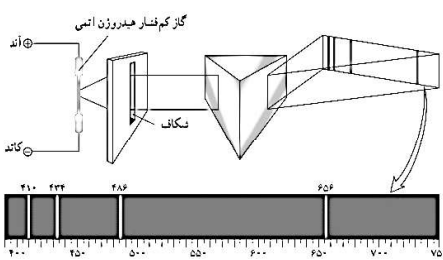
شکست مدل موج الکترومغناطیسی در توضیح برخی پدیده‌ها مانند اثر فوتوالکتریک به این معنی نیست که مدل موجی نور باید کنار گذاشته شود. ولی، باید متوجه باشیم که مدل موجی، تمام ویژگی‌های نور را دربر ندارد و به همین دلیل قادر نیست توجیه درستی از تمامی پدیده‌های فیزیکی مرتبط با برهم کنش نور با ماده را ارائه کند.

طیف خطی: همه اجسام در هر دمایی که باشند، از خود امواج الکترومغناطیسی گسیل (نشر) می‌کنند که به آن تابش گرمایی گفته می‌شود. اجسام در دماهای بالا از سطح خود نور مرئی گسیل می‌کنند. در دماهای معمولی، بیشتر تابش گسیل شده از سطح اجسام در ناحیه فرورسوخ طیف قرار دارد.

برای یک جسم جامد، نظیر رشته داغ یک لامپ روشن، این امواج شامل گستره پیوسته‌ای از طول موج‌هاست 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.



گازهای کم فشار و رقیق، که اتم‌های منفرد آنها از برهم کنش‌های قوی موجود در جسم جامد آزادند به جای طیف پیوسته، طیفی گسسته را گسیل می‌کنند که شامل طول موج‌های معینی است. این طیف گسسته را، معمولاً طیف گسیلی خطی یا به اختصار طیف خطی می‌نامند و طول موج‌های ایجادشده در آن، برای اتم‌های هر گاز منحصر به فرد هستند و سرنخ‌های مهمی را درباره نوع و ساختار اتم‌های آن گاز به دست می‌دهند.



❖ 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 طیف نمایی 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 ریذبرگ: طول موج تمامی خطوط طیف اتم هیدروژن را با استفاده از رابطه ی زیر که به رابطه‌ی ریذبرگ مشهور است، به دست آورد:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad R_H = 1.097 \times 10^7 \text{ (nm)}^{-1}, \quad n' < n$$

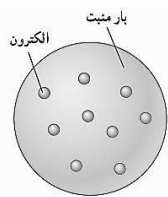
که در آن R_H ثابت ریذبرگ برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود. شماره‌ی تراز بالاتر است که الکترون ابتدا روی آن قرار داشته و n' شماره‌ی تراز پایین تر است که الکترون روی آن فرود می‌آید. دقت کنید که طول موج در این رابطه، برحسب نانومتر است.

- ❖ به ازای هر مقدار معین n' ، مجموعه‌ی طول موج‌های به دست آمده از رابطه‌ی ریذبرگ- بالمر را یک رشته می‌نامند.
- ❖ به ازای کوچک ترین مقدار ممکن n (یعنی $n'+1$) در هر رشته، بلندترین طول موج خطوط آن رشته یا حد بالای رشته به دست می‌آید.
- ❖ هر چه n بزرگتر باشد، طول موج‌های کوتاهتری می‌شوند پس، به ازای $n \rightarrow \infty$ ، کوتاهترین طول موج خطوط هر رشته یا حد پایین رشته پیدا می‌شود.

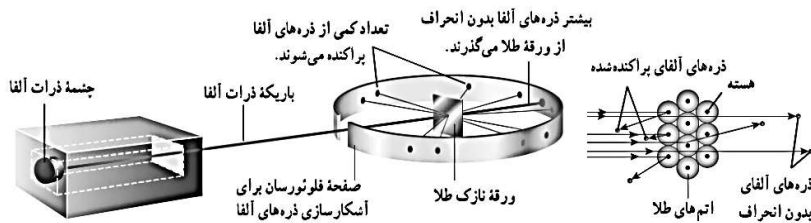
$$n = \infty \Rightarrow \frac{1}{\lambda_{\min}} = R_H \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{\infty} \right) \Rightarrow \lambda_{\min} = \frac{n'^2}{R_H} \quad n = n'+1 \Rightarrow \frac{1}{\lambda_{\max}} = R_H \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{(n'+1)^2} \right)$$

نام رشته	مقدار n'	رابطه‌ی ریذبرگ	مقدارهای n	گسترده‌ی طول موج
لیمان	$n' = 1$	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 2, 3, 4 \dots$	فرابنفش
بالمر	$n' = 2$	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 3, 4, 5 \dots$	فرابنفش و مرئی
پاشن	$n' = 3$	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 4, 5, 6 \dots$	فرو سرخ
براکت	$n' = 4$	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{16} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 5, 6, 7 \dots$	فرو سرخ
پفوند	$n' = 5$	$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{25} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 6, 7, 8 \dots$	فرو سرخ

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



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



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

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

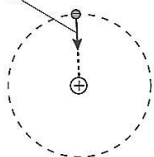
مدل اتمی رادرفورد: در این مدل، همه‌ی بار مثبت اتم، در یک ناحیه ی مرکزی با حجم بسیار کوچکی به نام هسته، متمرکز شده و اطراف آن را الکترون‌ها با بار منفی در فاصله‌ای زیاد احاطه کرده‌اند، به گونه‌ای که می‌توان گفت: فضای بین الکترون‌ها خلأ می باشد.

اشکالات مدل اتمی رادرفورد:

۱) اگر الکترون‌ها در اطراف هسته، ساکن باشند، نیروی جاذبه ی الکتریکی بین هسته و الکترون ها، باعث می‌شود الکترون روی هسته سقوط کند یعنی ساختار داخلی اتم، فرو می ریزد، در صورتی که اتم پایدار است.

۲) اگر الکترون‌ها، مانند سیاره های منظومه ی خورشیدی، که به دور خورشید در حرکتند، به دور هسته در گردش باشند، طبق نظریه فیزیک کلاسیک که هر ذره ی 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 بایستی به طور پیوسته نور گسیل کند و چون انرژی از دست می دهد شعاع مداری آن به طور پیوسته کاهش یافته و در نتیجه بسامد آن به طور پیوسته زیاد شده و در نهایت، مارپیچ وار به داخل هسته سقوط می‌کند، یعنی طیف اتمی بایستی پیوسته بوده و اتم پایدار نباشد، در صورتی که طیف اتمی، گسسته است و اتم پایدار می باشد.

نیروی رپایش الکتریکی که از طرف هسته به الکترون وارد می‌شود.



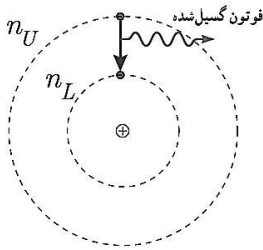
نتیجه: الگوی اتمی رادرفورد از دو ایراد عمده رنج می برد:

- ۱) نمی‌تواند پایداری حرکت الکترون ها در مدارهای اتمی و در نتیجه پایداری اتم ها را توضیح دهد.
- ۲) قادر به توجیه طیف گسسته ی اتمی نیست.

موفقیت‌های 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 معنی مجاز هستند.
- ۲- وقتی یک الکترون در یکی از مدارهای مجاز است، هیچ نوع تابش الکترومغناطیسی 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 مانای دیگر برود. هنگام گذار الکترون از یک حالت مانا با انرژی بیشتر E_U به یک حالت مانا با انرژی کمتر E_L ک فوتون تابش می‌شود.



$$(r_n = a_0 n^2 \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad a_0 = 0.529 \text{ \AA})$$

(شعاع مدارهای الکترون برای اتم هیدروژن) (ترازهای انرژی الکترون در اتم هیدروژن)

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{E_R}{n^2} \quad E_R = 13.6 \text{ eV}$$

در این روابط n عدد کوانتومی نامیده می‌شود. a_0 شعاع کوچک ترین مدار در اتم هیدروژن که شعاع بور برای اتم هیدروژن نامیده می‌شود.

انرژی الکترون در $n=1$ برابر $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ است که اندازه آن را معمولاً 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:

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

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

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

پایین‌ترین تراز انرژی، حالت پایه نامیده می‌شود تا از ترازهای بالاتر که حالت‌های برانگیخته نامیده می‌شوند متمایز 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 خط‌ها توسط گازهای جو خورشید و جو زمین پدید می‌آیند.

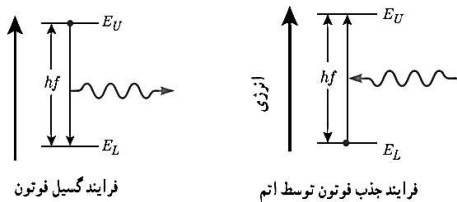
طیف جذبی خطی: برای مشاهده طیف‌های جذبی، نور یک چشمه نور سفید را از ظرفی حاوی گاز کم فشار هیدروژن اتمی (یا گاز عنصر دیگری) عبور داده و توسط منشور پاشیده می‌شود و طیف آن روی پرده تشکیل می‌شود. خط‌های تاریک روی طیف، به طول موج‌هایی از نور سفید مربوط است که توسط اتم‌های گاز جذب شده‌اند.

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 پایین‌تر 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 پایین‌تر به ترازهای انرژی بالاتر بروند در این حالت، اتم، فوتونی را که دقیقاً انرژی لازم برای گذار را دارد جذب می‌کند.



موفقیت‌های 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 موفقیت همراه است.

نارسایی‌های مدل بور:

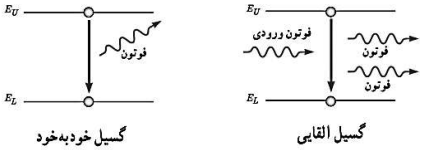
(۱) این مدل برای وقتی که بیش از یک الکترون به دور هسته می‌گردد به کار نمی‌رود، زیرا در مدل بور، نیروی الکتریکی که یک الکترون بر الکترون دیگر وارد می‌کند به حساب نیامده است.

(۲) این مدل نمی‌تواند متفاوت بودن شدت خط‌های 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 اتم‌هایی گفته می‌شود که تنها یک الکترون دارند.

لیزر

وقتی یک الکترون از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایین‌تر جهش می‌کند یک فوتون گسیل می‌شود. فرایند گسیل می‌تواند به صورت گسیل خود به خود یا گسیل القایی باشد.

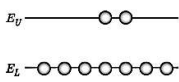


گسیل خود به خود

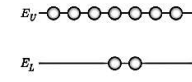
گسیل القایی

در گسیل خود به خود فوتون در جهتی 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 پایین‌تر برود. برای گسیل القایی، انرژی فوتون ورودی باید دقیقاً با اختلاف انرژی‌های دو تراز یعنی $E_U - E_L$ یکسان باشد.

گسیل القایی سه ویژگی عمده دارد: (۱) یک فوتون وارد و دو فوتون خارج می‌شود. به این ترتیب این فرایند تعداد فوتون‌ها را افزایش می‌دهد و نور را تقویت می‌کند. (۲) فوتون گسیل شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت می‌کند. (۳) اینکه فوتون گسیل شده با فوتون ورودی همگام یا دارای همان فاز است. به این ترتیب فوتون‌هایی که باریکه لیزری را ایجاد می‌کنند هم بسامد، هم جهت و هم فاز هستند.



به طور معمول در دمای اتاق، بیشتر الکترون‌ها در تراز انرژی پایین‌تر قرار دارند.



در وضعیتی که وارونی جمعیت به وجود آید بیشتر الکترون‌ها در تراز بالاتری قرار دارند.

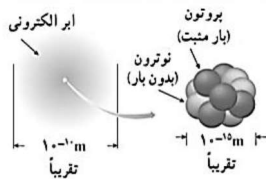
در گسیل القایی یک چشمه انرژی خارجی مناسب باید وجود داشته باشد تا الکترون‌ها را به ترازهای انرژی بالاتر برانگیخته کند. این انرژی می‌تواند به روش‌های متعددی از جمله درخش‌های شدید نور معمولی و یا تخلیه‌های ولتاژ بالا فراهم شود.

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 وضعیتی است که تعداد الکترون‌ها در ترازهایی موسوم به ترازهای شبه پایدار نسبت به تراز پایین‌تر بسیار بیشتر باشند.

در این ترازها، الکترون‌ها مدت زمان بسیار طولانی‌تری (10^{-3} s) نسبت به حالت برانگیخته معمولی (10^{-8} s) باقی می‌مانند. این زمان طولانی‌تر، فرصت بیشتری برای افزایش وارونی جمعیت و در نتیجه تقویت نور لیزر فراهم می‌کند.

فصل ششم (آشنایی با فیزیک هسته‌ای)



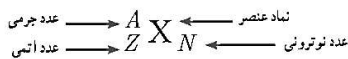
مقایسه ابعاد اتم و هسته به‌طور تقریبی

فیزیک هسته‌ای، شاخه‌ای از فیزیک است که در آن با ساختار، برهم‌کنش‌ها 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.

نوترون 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 نوترون‌های هسته، عدد نوترونی (N) نامیده می‌شود.

همچنین مجموع تعداد کل پروتون‌ها و نوترون‌ها را عدد جرمی (A) می‌نامند. پس: $A = Z + N$

برای یک عنصر با نماد شیمیایی X نماد هسته به صورت ${}^A_Z X_N$ نشان داده می‌شود.

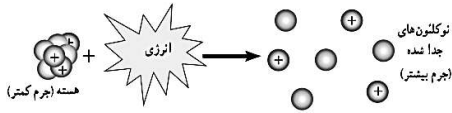
ایزوتوپ‌ها: ویژگی‌های هسته را تعداد پروتون‌ها و نوترون‌های آن تعیین می‌کند. خواص شیمیایی هر اتم را تعداد پروتون‌های هسته (عدد اتمی Z) تعیین می‌کند. به همین سبب هسته‌هایی که تعداد پروتون مساوی ولی تعداد نوترون متفاوت دارند خواص شیمیایی یکسانی دارند، در نتیجه این هسته‌ها در جدول تناوبی عناصر هم مکان هستند 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 ۹۹/۹ 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 رایش است (۲) نیروی هسته‌ای قوی‌تر از گرانشی و الکترو استاتیکی است (۳) نیروی هسته‌ای، کوتاه برد است و تنها در فاصله‌های کوچک‌تر از ابعاد هسته اثر می‌کند. (۴) نیروی هسته‌ای مستقل از بار الکتریکی است. یعنی نیروی رایشی هسته‌ای یکسانی بین دو پروتون، دو نوترون، یا یک پروتون و یک نوترون وجود دارد. به همین دلیل از منظر نیروی هسته‌ای، تفاوتی بین پروتون و نوترون وجود ندارد و دلیل نام گذاری آنها با نام عام نوکلئون نیز همین است.

چرا با افزایش تعداد پروتون در عناصر سنگین تعداد نوترون‌ها 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، موازنه شده باشد. ولی به دلیل بلند برد بودن نیروی الکتروستاتیکی، یک پروتون تمام پروتون‌های دیگر درون هسته را دفع می‌کند، در حالی که یک پروتون یا یک نوترون، فقط نزدیک‌ترین نوکلئون‌های 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 نوترون‌های 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.

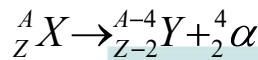


جرم هسته از مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های تشکیل دهنده‌اش اندکی کمتر است. اگر این اختلاف جرم را که به آن کاستی جرم هسته گفته می‌شود، مطابق رابطه معروف اینشتین ($E=mc^2$)، در مربع تندی نور (c) ضرب کنیم انرژی بستگی هسته‌ای به دست می‌آید. (c برحسب متر برثانیه و m برحسب کیلوگرم باشد، E برحسب J خواهد بود).

انرژی نوکلئون‌های وابسته به هسته نیز مانند انرژی الکترون‌های وابسته به اتم، کوانتیده‌اند و نوکلئون‌های درون هسته نمی‌توانند هر انرژی دلخواهی را اختیار کنند. همچنین، 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 تا مرتبه MeV 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 واپاشی می‌کند، نوع معینی از ذرات یا فوتون‌های پر انرژی آزاد می‌شوند. این فرایند واپاشی، پرتوزایی طبیعی نامیده می‌شود. در پرتوزایی طبیعی سه نوع پرتو ایجاد می‌شود: پرتوهای آلفا (α) پرتوهای بتا (β) و پرتوهای گاما (γ) پرتوهای α کمترین نفوذ را دارند و با ورقه نازک سربی با ضخامت ناچیز ($\approx 0.1mm$) متوقف می‌شوند، در حالی که پرتوهای β مسافت خیلی بیشتری را ($\approx 1mm$) در سرب نفوذ می‌کنند. پرتوهای γ بیشترین نفوذ را دارند و می‌توانند از ورقه ای سربی به ضخامت قابل ملاحظه‌ای ($\approx 100mm$) گذرند. در تمام فرایندهای واپاشی پرتوزا مشاهده شده‌است که تعداد نوکلئون‌ها در طی فرایند واپاشی هسته‌ای پایسته است؛ یعنی تعداد نوکلئون‌ها، پیش از فرایند با تعداد نوکلئون‌ها پس از فرایند مساوی است.

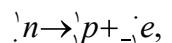
واپاشی α : در این نوع واپاشی که در هسته‌های سنگین صورت می‌گیرد، ذرات باردار مثبت از جنس هسته اتم هلیم (4_2He) از هسته اتم خارج می‌شود. معادله‌ی واکنش به صورت زیر است.



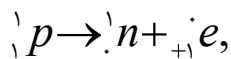
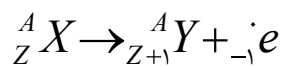
در این واکنش، X و Y دو عنصر متفاوت هستند، چون عدد اتمی متفاوت دارند.

واپاشی همراه با گسیل ذره β (β): این متداول‌ترین نوع واپاشی در هسته‌ها است. در این واپاشی هسته‌ی ناپایدار با گسیل الکترون یا پوزیترون (ذره‌ای دارای جرم برابر جرم الکترون و بار مخالف آن) به هسته‌ی جدیدی تبدیل می‌شود. ذره β از جنس الکترون (${}_{-1}^0e$) یا پوزیترون (${}_{+1}^0e$) است. اما هسته، الکترون یا پوزیترون ندارد. پس ذره β از کجا می‌آید؟ پاسخ آن است:

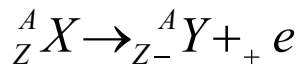
الف) (واپاشی β منفی) اگر در واپاشی، گسیل الکترون را داشته باشیم، یک نوترون در هسته، متلاشی شده و تبدیل به یک پروتون و یک الکترون می‌شود:



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:

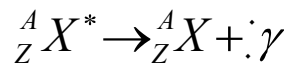


ب) (واپاشی β مثبت) اگر در واپاشی گسیل پوزیترون را داشته باشیم، یک پروتون هسته به نوترون و پوزیترون تبدیل می‌شود:



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

واپاشی γ : رفتن هسته از حالت برانگیخته به حالت پایه، همراه با گسیل ذره γ (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:

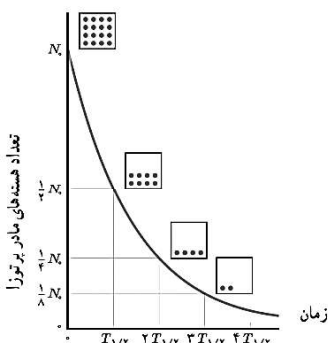


❖ اگر یک هسته پرتوزا چند نوع تابش انجام دهد برای موازنه‌ی آن و به دست آوردن مجهول (X) باید نکات زیر را در نظر گرفت:

(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 هسته های مادر موجود در یک نمونه، به نصف برسند.

نیمه عمر ماده ی پرتوزا نیمه عمر یک ماده ی پرتوزا، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا طی آن نیمی از هسته های پرتوزای موجود در آن واپاشیده شوند و آن را $\frac{T_{1/2}}{2}$ نشان می‌دهند. در واقع نیمه عمر، به نوعی سرعت واپاشی یک ایزوتوپ را نشان می‌دهد.

پس از گذشت هر نیمه عمر، تعداد هسته های ایزوتوپ پرتوزای اولیه، نصف می‌شود. بنابراین پس از گذشت n نیمه عمر، تعداد این هسته ها $\frac{1}{2^n}$ برابر می‌شوند.

بنابراین اگر پس از مدت زمان t ، تعداد هسته های ماده ی رادیواکتیو N کاهش یابد، داریم:

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

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

شکافت هسته ای: فرایند تقسیم شدن یک هسته سنگین به دو هسته با جرم کمتر، شکافت هسته ای 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 وامی‌پاشد که حامل انرژی (به طور عمده انرژی جنبشی) هستند.

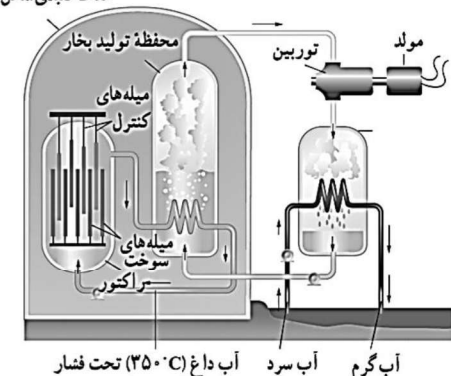
واکنش زنجیری: با جذب یک نوترون گند فرایند شکافت آغاز می‌شود. در این فرایند چند نوترون به وجود می‌آید. چون نوترون‌ها بار الکتریکی ندارند، هسته‌های دیگر آنها را دفع نمی‌کنند. نوترون‌ها پس از گند شدن، توسط هسته‌های دیگر جذب می‌شوند و باعث شکافت در تعداد بیشتری هسته اورانیم دیگر می‌شوند و واکنش به طور زنجیره‌ای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

غنی 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.

طرح راه‌ای از یک راکتور PWR حفاظت گنبدی شکل



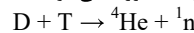
راکتورهای شکافت هسته‌ای: نوترون‌های آزاد شده در فرایند شکافت انرژی جنبشی زیادی دارند و با ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵ واکنش انجام نمی‌دهند. اگر بتوان نوترون‌های تند را به نحوی گند ساخت احتمال جذب آنها افزایش می‌یابد. آب معمولی، آب سنگین و گرافیت (اتم‌های کربن) به عنوان گندساز نوترون‌ها در واکنش‌های شکافت هسته‌ای استفاده می‌شوند.

راکتورهای هسته‌ای افزون بر سوخت هسته‌ای و ماده گندساز دارای، میله‌های کنترل و شاره‌ای (معمولاً آب) هستند که گرما را به خارج راکتور انتقال می‌دهد. 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 دوتریوم D و تریتیوم 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 برد 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 دوتریم-تریتیوم، به دمایی حدود ده‌ها میلیون درجه سلسیوس نیاز است. دمایی از این مرتبه در ستارگان و خورشید وجود دارد.

