فیزیک اتمی و هسته‌ای

قابل‌استفاده برای داوطلبان آزمون‌های کارشناسی‌ارشد

فیزیک‌پزشکی، رادیوبیولوژی و فناوری‌تصویربرداری‌پزشکی

تالیف و گردآوری:

دکترفرزانه قربانی دکترای تخصصی فیزیک‌پزشکی

هادی اکبری‌زاده دانشجوی دکترای تخصصی فیزیک‌پزشکی

SCIENCE AZMOON

فیزیک اتمی و هسته‌ای

قابل‌استفاده برای داوطلبان آزمون‌های کارشناسی‌ارشد رشته‌های
فیزیک‌پزشکی، رادیوبیولوژی و فناوری تصویربرداری پزشکی

گروه آموزشی ساینس آزمون

وابسته به شرکت نوآفرینان علم آزمون

t.me/scienceazmoon1

https://www.scienceazmoon.com

تالیف و گردآوری:

دکتر فرزانه قربانی دکترای تخصصی فیزیک‌پزشکی

هادی اکبری‌زاده دانشجوی دکترای تخصصی فیزیک‌پزشکی

حقوق مالکیت مادی و معنوی

کلیه حقوق مادی و معنوی اثر متعلق به شـــرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشـابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد.

فهرست مطالب

بخش اول: درس‌نامه جامع فیزیک جدید و اتمی **۷**

فصل اول: پدیده دوگانگی موج-ذره **۹**

اثرات ذره‌ای امواج الکترومغناطیسی ۱۰

خواص موجی ذرات ۲۸

سوالات بخش اول – فصل اول ۴۰

فصل دوم: فیزیک اتمی **۷۵**

اتم ۷۶

مدل‌های اتمی ۷۷

طیف‌های اتمی ۸۶

نظریه اتمی بوهر ۹۰

اتم‌های چند الکترونی ۹۶

سوالات بخش اول – فصل دوم ۱۰۸

فصل سوم: سینماتیک و دینامیک نسبیتی **۱۲۹**

اصل نسبیت ۱۳۱

آزمایش مایکلسون و مورلی ۱۳۳

تبدیلات لورنتس ۱۳۴

کمیت‌های ویژه ۱۳۵

جرم و اندازه حرکت نسبیتی ۱۳۷

انرژی نسبیتی ۱۳۹

اثر دوپلر نسبیتی ۱۴۳

سوالات فصل سوم - بخش اول ۱۴۴

بخش دوم: درس‌نامه جامع فیزیک هسته‌ای **۱۵۴**

سنجش آزمون

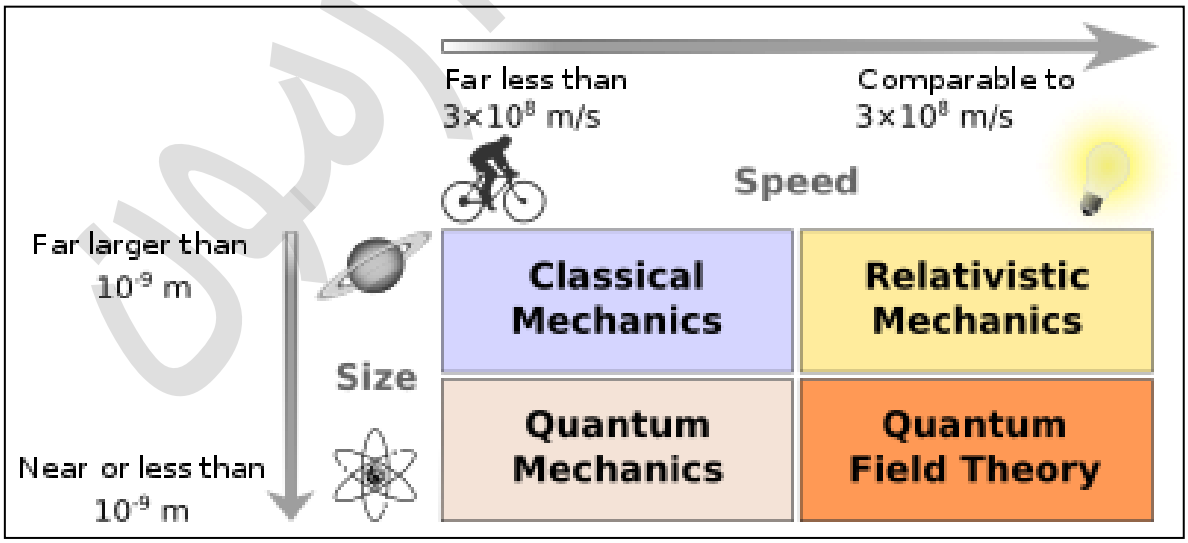
بخش اول: درس‌نامه جامع فیزیک جدید و اتمی

فصل اول: پدیده دوگانگی موج–ذره

فیزیک‌جدید شامل نظریه‌هایی در مورد پدیده‌ها و مشاهداتی است که در شرایط خاص (سرعت‌های بالا و ابعاد ریز) با قوانین فیزیک‌کلاسیک قابل‌توجیه نیستند. بعبارت دیگر قوانین فیزیک کلاسیک در ابعاد بسیار کوچک (حدود $10^{-10}m$) و سرعت‌های نزدیک به‌سرعت‌نور دچار تناقض می‌شود و کاربردی ندارد. بدین‌ترتیب نظریه‌ای توسط جمعی از فیزیک‌دانان مانند پلانک، هایزنبرگ، بوهر و شرودینگر تحت عنوان نظریه کوانتومی و نظریه نسبیت توسط انیشتین مطرح‌شد. در فصل اول و دوم به قوانین مکانیک کوانتومی و در فصل سوم به نظریه نسبیت می‌پردازیم.

مکانیک‌کوانتومی به دنبال یکسری نارسائی‌ها در توجیه فیزیک ذرات‌خرد (ذرات با ابعاد اتمی) بوجود آمد. البته آثار کوانتومی را بعضی اوقات می‌توان در ابعاد ماکروسکوپی نیز مشاهده‌کرد مانند خاصیت ابرشارگی و اثر مایسنر. اولین قدم‌ها را پلانک در راه نظریه کوانتومی گذاشت، او بر روی تابش امواج الکترومغناطیس از اجسام سیاه مطالعه می‌کرد که دچار یک مشکل بزرگ‌شد و فیزیک‌کلاسیک از توجیه آن عاجز بود. بیان موفقیت‌آمیز نظریه تابش الکترومغناطیسی یک جسم جامد که در سال 1900 میلادی توسط ماکس پلانک ارائه شد، شروع نظریه کوانتومی بود. در ادامه تعدادی از آزمایش‌هایی که با مکانیک و الکترودینامیک کلاسیک قابل توجیه نیستند، بیان می‌شوند.

لازم به ذکر است که در سرعت‌های کم و ابعاد ماکروسکوپی، قوانین فیزیک‌کلاسیک برقرار هستند که در **شکل۱** می‌توان حوزه‌های مختلف نظریه‌های فیزیکی برحسب سرعت و اندازه جسم دید.



شکل ۱ حوزه‌های مختلف نظریه‌های فیزیکی برحسب سرعت و اندازه جسم

اثرات ذره‌ای امواج الکترومغناطیسی

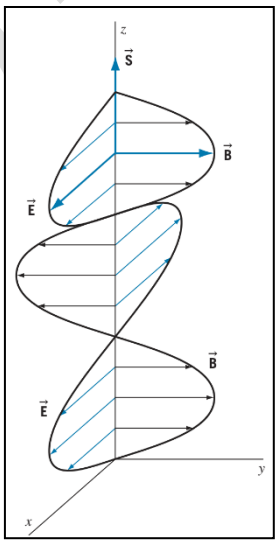
مروری بر امواج الکترومغناطیسی

در اطراف هر ذره باردار یک میدان‌الکتریکی ($\vec{E}$) و در اطراف هر جریان ثابت از ذرات‌باردار یک میدان‌مغناطیسی ($\vec{B}$) وجود دارد. مقادیر این میدان‌ها به فاصله از بار نقطه‌ای و سیم حامل‌جریان ذرات‌باردار بستگی دارد. اگر ذره باردار شتاب بگیرد و یا جریان با زمان تغییر کند، یک میدان الکترومغناطیسی ایجاد می‌شود که مولفه‌های $\vec{E}$ و $\vec{B}$ آن علاوه بر اینکه تابعی از مکان هستند، به زمان نیز وابسته هستند.

- روابط موجی یک میدان الکترومغناطیسی که در صفحه xy است و در جهت محور z منتشر می‌شود بصورت زیر است:

$$\vec{B} = \vec{B}_0\, sin(kz - \omega t) \quad و \quad \vec{E} = \vec{E}_0\, sin(kz - \omega t)$$

  - که در آن k عدد موج است ($k = \frac{2\Pi}{\lambda}$)،
  - ω فرکانس زاویه‌ای ($\omega = 2\pi\vartheta$)
  - $c = \lambda\vartheta$ و $c = \frac{\omega}{k}$.
  - $B_0 = \frac{E_0}{C}$ که $c = 3 \times 10^8\, {}^{m}/_{s}$ سرعت‌نور در خلا است.
- جهت میدان‌مغناطیسی ($\vec{B}$) بر جهت میدان‌الکتریکی ($\vec{E}$) و جهت انتشار موج الکترومغناطیسی عمود است.
- جهت انتشار در راستای بردار حاصل از ضرب برداری (ضرب خارجی) $\vec{E} \times \vec{B}$ است.



شکل ۲ جهت انتشار و مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی یک موج الکترومغناطیسی

- یک موج الکترومغناطیسی انرژی را از مکانی به مکان دیگر منتقل می‌کند. شار انرژی توسط بردار پوئینینگ ($\vec{S}$) مشخص می‌شود: $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0}\vec{E} \times \vec{B}$

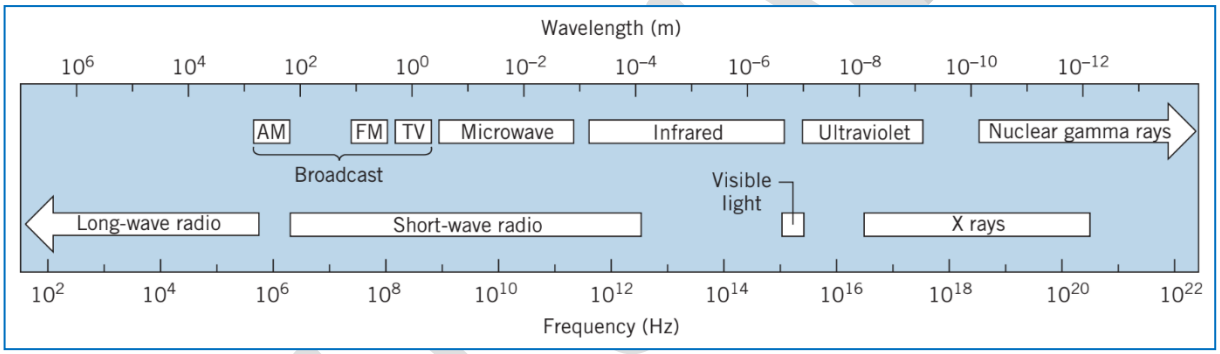
کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد

- برای موج صفحه‌ای که در بالا ذکر شد: $\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} E_0 B_0 \sin^2(kz - \omega t)\hat{k}$
  - $\hat{k}$ بردار یکه در جهت محور z است، بنابراین انتقال انرژی توسط موج‌الکترومغناطیسی در راستای حرکت آن است.
  - یکای S توان بر واحد سطح است بعبارت دیگر $\left[\frac{J/s}{m^2}\right]$ یا $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.
- اگر یک گیرنده امواج الکترومغناطیسی را در راستای حرکت (z) قرار دهیم و سطح حساس به امواج الکترومغناطیس که بر محور z عمود است برابر A باشد، توان دریافتی توسط گیرنده عبارت‌است از:

$$P = SA = \frac{1}{\mu_0} E_0 B_0 A \sin^2(kz - \omega t) = \frac{1}{\mu_0 C} E_0^2 A \sin(kz - \omega t)$$

شدت موج که عبارت‌است از میانگین توان به ازای واحد سطح از رابطه زیر بدست می‌آید، دقت‌شود که میانگین مقدار $\sin^2\theta$ برابر ½ است. $I = \frac{P_{av}}{A} = \frac{1}{2\mu_0 C} E_0^2 = \varepsilon_0 E^2 c$.

امواج الکترومغناطیسی بر حسب افزایش انرژی و کاهش طول‌موج:

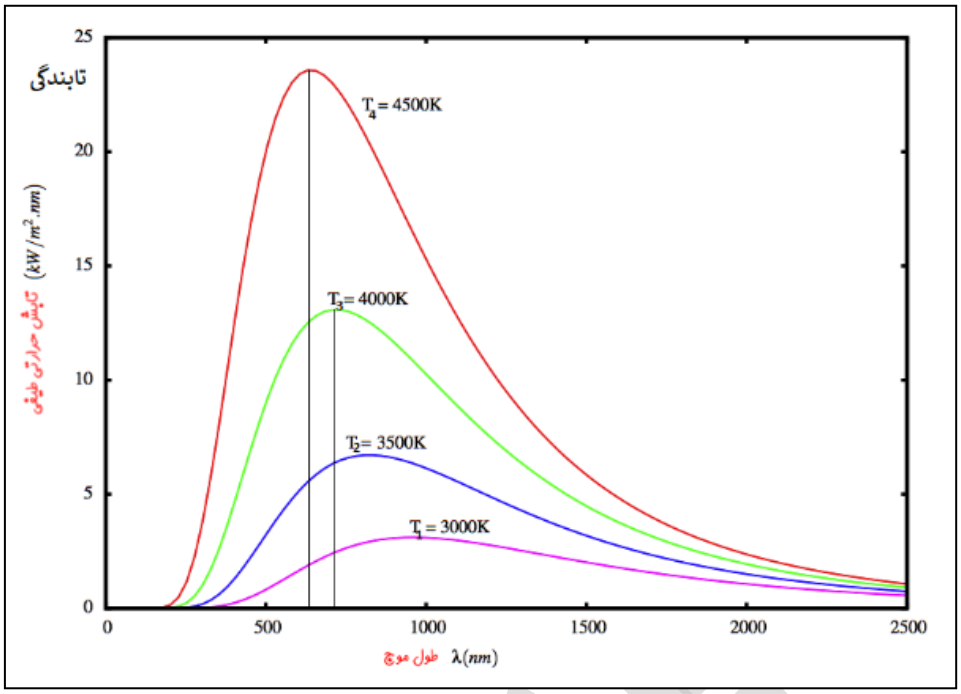


شکل ۳ طیف امواج الکترومغناطیسی

تابش جسم سیاه

اگر جسمی تمام پرتوهای تابیده‌شده به خود را، با هر طول‌موجی، جذب‌نماید به آن **جسم سیاه** گفته می‌شود. فرض کنید دیواره‌های داخلی یک حفره را جسم سیاه تشکیل‌دهد و در این حفره منفذ کوچکی ایجاد کنیم. در این صورت تابشی که از حفره به بیرون ساطع می‌شود را **تابش جسم سیاه** می‌گویند. این تابش کاملا همگن و همسانگرد می‌باشد. بر طبق قانون دوم ترمودینامیک، دیواره‌های چنین حفره‌ای علاوه بر جذب کامل باید تابش نیز داشته باشند، در غیر اینصورت می‌توان بدون انجام هیچ‌گونه کاری با قراردادن جسمی در چنین حفره‌ای گرما را از جسم سرد به جسم گرم منتقل کرد.

کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد



شکل۴ نمودار تابش جسم سیاه، تغییرات شدت تابش بر حسب طول‌موج

- در این نمودار $T_1 > T_2 > T_3 \rightarrow \lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$

- برای اولین بار وین نشان‌داد که با داشتن دمای‌مطلق یک جسم، شدت تابش دارای یک پیک (حداکثر شدت تابشی) در یک طول‌موج مشخص است، که از رابطه **قانون جابه‌جایی وین** بدست می‌آید. b یک ثابت جهانی است.
$\lambda_{max}\, T = b = 2.898 \times 10^{-3} mk$

- قانون جابجایی وین نشان‌می‌دهد که وقتی دمای جسم‌سیاه تغییرکند قله طول‌موج در طیف‌تابشی بطور معکوس با دمای مطلق جابجا می‌شود، یعنی جسم‌سیاه با افزایش دما قرمز سفید و آبی می‌شود.

- رایلی و جونز توانستند به کمک قوانین کلاسیک، قسمت طول‌موج‌های بلند نمودار شدت بر حسب طول‌موج را بدست‌آورند؛ ولی نتیجه آن‌ها انرژی کل را بی‌نهایت برآورد می‌کرد. وین نیز به کمک یک‌سری استدلال‌ها حد طول‌موج‌های کوتاه را برای نمودار بدست‌آورد.

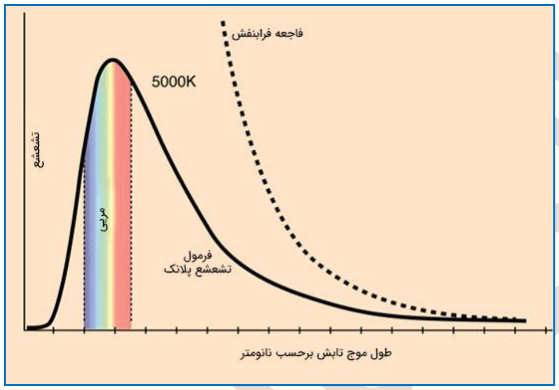
تابش جسم‌سیاه نخستین نشانه نارسایی نظریه‌موجی تابش الکترومغناطیسی بود، چرا که نظریه الکترومغناطیسی نمی‌توانست طیف مشاهده‌شده در تابش جسم‌سیاه را توصیف‌کند. مطابق فیزیک‌کلاسیک بایستی نمودار تابندگی یک جسم به‌صورت زیر درمی‌آمد. همچنین تابندگی برای طول‌موج‌های بسیار کوتاه (محدوده فرابنفش) در هر دمایی باید بی‌نهایت شود که این موضوع بر روی نمودار **شکل۵** کاملاً قابل‌درک است. چنانچه در نمودار مربوط به تابندگی دیدیم که چنین نیست. حتی در دماهای خیلی بالا و حداکثر تابندگی در محدوده فروسرخ یا مرئی خواهدبود و هنگام ورود به ناحیه فرابنفش به‌شدت کاهش می‌یابد.

- ماکس‌پلانک با در نظرگرفتن تابش بصورت **بسته‌های انرژی (کوانتوم‌های انرژی)** این نمودار را بطور کامل توجیه‌کرد.

کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد

ماکس پلانک برای حل مشکل بوجودآمده پیشنهاد خود را به‌صورت «تابش اجسام کوانتیده است» ارائه‌کرد. واژه‌ی کوانتوم با ریشه کوانتا به معنی بسته، بدین معنا است که انرژی به‌صورت بسته‌هایی مشخص است و دارای مقادیر خاصی است که نمی‌تواند مقادیر کم‌تر یا بیشتر از آن باشد. به بیان ساده‌تر ضریب صحیحی از بسته مبنا می‌باشد. این مفهوم را در بارالکتریکی هم داریم، که بار الکتریکی ضریبی از بارالکتریکی الکترون معادل $1.6 \times 10^{-19}c$ است و خرده الکترون نداریم.

مطابق نظریه پلانک اجسام نمی‌توانند هر مقدار که می‌خواهند انرژی تابش‌کنند! به‌عبارت‌دیگر مقدار انرژی‌تابشی که از یک جسم گسیل می‌شود کمیتی پیوسته نیست بلکه گسسته است به این معنا که انرژی هر موج الکترومغناطیسی باید مضربی از یک مقدار پایه باشد که پلانک آن را کوانتوم انرژی آن موج نامید.



شکل ۵ نارسائی فیزیک کلاسیک و فاجعه فرابنفش

- اگر بسامد موجی برابر ν باشد، دراین‌صورت کوانتوم انرژی آن موج برابر است با: $E = h\nu$
- دراین‌رابطه h ضریب ثابتی است که آن را ثابت پلانک می‌نامیم و مقدار تقریبی آن برابر $h = 6.63 \times 10^{-34} Js$ است.
- ازآن‌جایی‌که انرژی کوانتوم یک موج بسیار کم‌تر از $1J$ است از واحد کوچک‌تری بنام الکترون‌ولت استفاده می‌کنیم که با eV نمایش می‌دهیم و معادل $1.6 \times 10^{-19} J$ است. یک الکترون‌ولت عبارت‌است از تغییر انرژی یک الکترون هنگامی‌که تحت ولتاژ یک ولت جابجا می‌شود.
- با توجه به رابطه $\nu = \frac{C}{\lambda}$، رابطه‌ی پلانک را می‌توان به‌صورت $E = \frac{hc}{\lambda}$ نوشت که کاربرد زیادی در حل تست‌ها دارد.
- مقدار hc محاسبه شده و به‌صورت زیر برحسب eV / A^0 و keV / A^0 به‌صورت زیر است:

$$hc = 124000\text{eV} = 12.4\text{keV}$$

- از سطح همه اجسام در هر دمایی امواج الکترومغناطیس گسیل می‌شود، که گسیل امواج از سطح اجسام را تابش‌گرمایی یا به‌اختصار تابش می‌نامیم. مقدار انرژی تابشی که از سطح جسم گسیل می‌شود به سه عامل بستگی دارد:

۱) دمای جسم
۲) مساحت
۳) ویژگی‌های سطح آن

کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد

- در تابشی که از سطح یک جسم گسیل می‌شود همه طول موج‌ها از فروسرخ تا فرابنفش به‌صورت پیوسته وجود دارد. نکته حائز اهمیت این‌است که افزایش دما علاوه‌بر آن‌که تابش گرمایی را تشدید می‌کند، موجب تغییر رنگ نور تابشی که از سطح جسم می‌شود. به‌عنوان مثال تابش جسمی که در دمای اتاق قراردارد به‌صورت فروسرخ و جسم در دماهای بالا علاوه‌بر درخشش سفیدرنگ، مقدار زیادی تابش فرابنفش خواهد داشت (مانند خورشید).

- توان گسیل $E(\lambda,t)$ یک جسم عبارت‌است از انرژی گسیل‌شده در طول‌موج λ در واحد سطح و در واحد زمان. به ازای یک طول‌موج مشخص، نسبت توان گسیل E به ضریب‌جذب A (که بنا به تعریف کسر تابش فرودی با طول‌موج λ است که جسم جذب می‌کند)، برای تمام اجسام یکسان‌است.

- برای جسم سیاه که تمام تابش فرودی را کاملا جذب می‌کند، A=1 خواهدبود.

- توان گسیل کل جسم سیاه از رابطه $E(T)=\sigma T^4$ بدست می‌آید.

همان‌طور که می‌بینیم توان تابشی با T^4 رابطه مستقیم دارد و $\sigma = 5.6\times10^{-8}\frac{w}{m^2k^4}$ ثابت استفان-بولتزمن است .

- تابش جسم سیاه هرگز به جنس جسم بستگی ندارد.

- اگر جسمی در دمای اتاق باشد، طول‌موج‌های فروسرخ را با بیشترین تابندگی گسیل خواهدکرد و تابندگی سایر طول‌موج‌ها به‌مراتب کم‌تر از تابندگی موج‌های فروسرخ خواهد بود.

- با افزایش دما میزان تابندگی همه طول‌موج‌ها افزایش خواهد یافت و طول‌موجی که بیشترین تابندگی ($I_{\lambda_{max}}$) را دارد، به سمت چپ جابه‌جا می‌شود.

- سطح زیر نمودار تابندگی برابر شدت تابش جسم (I) است.

اثر فوتوالکتریک

الکترون می‌تواند طی فرآیندهای مختلفی از سطح ماده جدا شود که عبارتند از

۱) **گسیل گرما یونی**: گرم کردن فلزات، که با انتقال موثر انرژی گرمایی به الکترون‌ها، تحریک می‌شوند و از سطح فلز خارج می‌شوند.

۲) **گسیل ثانوی**: با برخورد ذراتی به سطح فلز، انرژی‌جنبشی به الکترون‌ها منتقل می‌شود.

۳) **گسیل میدانی**: با اعمال یک میدان الکتریکی قوی خارجی، الکترون‌ها از فلز جدا می‌شوند.

۴) **اثر فوتوالکتریک**: با تابش امواج الکترومغناطیسی بر روی سطح تمیز فلزی، در صورت وجود شرایط خاص که در ادامه تشریح می‌شوند، الکترون‌ها از سطح جدا می‌شوند.

اثر فوتوالکتریک توسط هاینریش هرتز در جریان آزمایش‌هایی کشف‌شد که هدف عمده‌ی آن‌ها تایید پیشگویی‌های نظری ماکسول در مورد وجود امواج الکترومغناطیس حاصل از جریان‌های الکتریکی نوسانی بود. وابستگی اثرفوتوالکتریک به فرکانس (بسامد) از دید فیزیک‌کلاسیک قابل‌توجیه نبود که در ادامه به تشریح بیان خواهدشد.

کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد

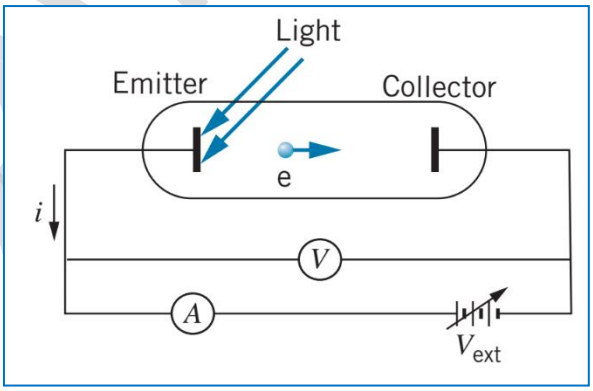
الکترون‌های ظرفیت با وجود آزادی درون فلز بازهم مقداری به فلز مقید هستند. در اثر فوتوالکتریک، یک باریکه نوری به یک الکترون مقداری انرژی مساوی یا بیشتر از انرژی بستگی آن الکترون به سطح فلز می‌دهد و باعث فرار الکترون می‌شود. به الکترون‌های خارج‌شده از این طریق، فوتوالکترون می‌گویند. به میزان انرژی لازم برای رها کردن الکترون از سطح فلز، تابع کار فلز گفته می‌شود. تابع کار به خواص ذاتی فلز بستگی دارد و برای فلزات مختلف مقادیر متفاوتی دارد. در صورت وقوع فرآیند فوتوالکتریک، تعداد قابل‌توجهی الکترون از سطح فلز (آند) جدا می‌شوند. در صورتیکه انرژی نور فرودی بیشتر از انرژی لازم برای کندن الکترون باشد، باقی‌مانده انرژی بصورت انرژی‌جنبشی به الکترون داده‌می‌شود.

الکترودها در یک محیط خلأ قرار دارند تا برخوردهای بین فوتوالکترون‌ها با مولکول‌های گاز محیط، حذف شود. فوتوالکترون‌های رهاشده از سطح فلز به سمت کاتد حرکت می‌کنند. با رسیدن فوتوالکترون‌ها به سطح کاتد، یک جریان الکتریکی در مدار برقرار می‌شود. وجود جریان‌الکتریکی تاییدکننده وقوع پدیده فوتوالکتریک و اندازه جریان‌الکتریکی متناسب با تعداد فوتوالکترون گسیل‌شده‌است.

اگر از یک نور تکفام (یک منبع نوری تک فرکانس) استفاده‌کنیم، با توجه به اینکه تابع کار فلز ویژگی ذاتی است و با فرض وجود خلا کامل، انرژی فوتوالکترون‌های ساطع‌شده یکسان است. یک اختلاف پتانسیل‌الکتریکی را بین دو الکترود به‌گونه‌ای اعمال کنیم که مانع رسیدن فوتوالکترون‌ها به کاتد شود. هنگامیکه کار انجام‌شده بواسطه این اختلاف‌پتانسیل دقیقا برابر با انرژی‌جنبشی‌اولیه فوتوالکترون‌ها باشد، آن‌ها دقیقا جلوی کاتد به حالت سکون می رسند و جریانی ایجاد نخواهد شد. به همین دلیل به این اختلاف‌پتانسیل، پتانسیل قطع می‌گویند. در این شرایط داریم:

$$eV = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

که در آن v سرعت الکترون‌ها هنگام ترک سطح آند و V اختلاف‌پتانسیلی است که باعث توقف فوتوالکترون‌ها به جرم سکون m_0 و بار e می‌شود.



شکل ۶ شماتیک آزمایش فوتوالکتریک. با تابش نور، الکترون‌ها از سطح الکترود تابش‌کننده (آند) جدا می‌شوند و بدلیل اختلاف پتانسیل بین دو الکترود به سمت کاتد شتاب می‌گیرند. تعداد الکترون گسیل‌شده از طریق خوانش جریان اندازه‌گیری می‌شوند.

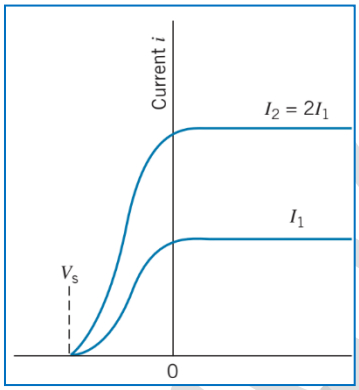
نتایج تجربی اثر فوتوالکتریک

۱) با تابش نور، جریان فوتوالکترونی (i) تقریبا بصورت آنی (حداکثر $10^{-10}s$) آغاز می‌شود. از نظر فیزیک‌کلاسیک، انتظار می‌رفت در تابش‌های با شدت کم تأخیر زمانی بین تابش و دریافت اولین فوتوالکترون به وجود آید، که برخلاف مشاهدات تجربی بود.

کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد

۲) برای هر بسامد ثابت (باریکه نوری با رنگ مشخص، ϑ) و پتانسیل ترمزی معین (V)، جریان فوتوالکترونی (i) مستقیما با شدت باریکه نوری (I) متناسب است. بعبارت دیگر، تعداد فوتوالکترون‌هایی که در واحد زمان از سطح فلز خارج می‌شوند (i) با شدت نور تابشی (I) متناسب هستند.

۳) برای یک بسامد (ϑ) و شدت نور مشخص (I)، جریان فوتوالکترونی (i) با افزایش پتانسیل ترمزی V کاهش می‌یابد و سرانجام در پتانسیل قطع (V_0) به صفر می‌رسد. از منظر دیگر اگر پتانسیل قطع اعمال شود، مهم نیست باریکه نوری چه شدتی دارد، جریانی ایجاد نمی‌شود. این پدیده با نظریه کلاسیک توجیه نمی‌شود.

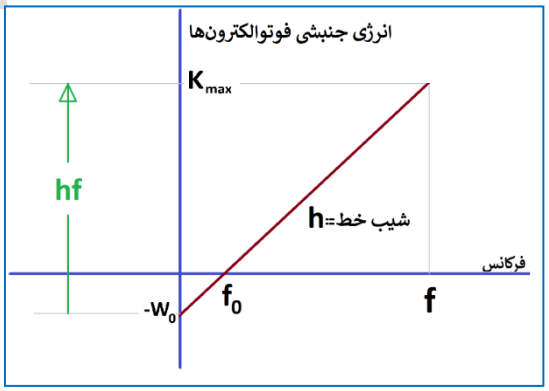


شکل ۷ عدم وابستگی پتانسیل قطع به شدت نور فرودی

۴) مقدار پتانسیل قطع (V_0) برای هر سطح بخصوصی به بسامد نور (ν) بستگی دارد ولی از شدت‌نور مستقل‌است. به عبارت‌دیگر، حداکثر انرژی فوتوالکترون‌ها به هیچ‌وجه به مقدار کل انرژیی که در واحد زمان به سطح می‌رسد، بستگی ندارد. نظریه کلاسیک نمی‌تواند چنین اثری را پیشگویی کند. یک رابطه خطی بین پتانسیل قطع (V_0) و بسامد نور (ϑ) وجود دارد. شیب نمودار خطی V_0 برحسب ϑ برابر $\tan\theta = \frac{h}{e}$ (یا شیب نمودار انرژی‌جنبشی برحسب فرکانس برابر h است).

$$V_0 = \frac{h\vartheta}{e} - \frac{W_0}{e}$$

$$\tan\theta = \frac{h}{e}$$

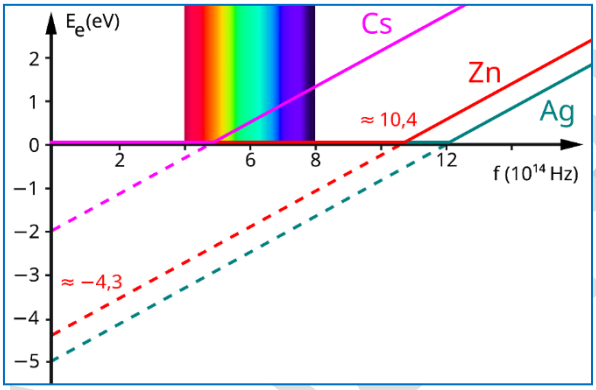


شکل ۸ تغییرات خطی انرژی‌جنبشی فوتوالکترون‌ها با فرکانس نور فرودی، شیب خط برابر با ثابت پلانک است و عرض از مبدا برابر با تابع کار فلز

کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد

۵ برای هر فلزی یک بسامد مشخص ν_0 به‌نام بسامد آستانه وجود دارد. گسیل فوتوالکترونی در صورتی روی می‌دهد که $\vartheta > \vartheta_0$ باشد. بعبارت دیگر هرچند شدت باریکه نوری (I) بسیار زیاد هم باشد، اگر فرکانس نور فرودی کمتر از فرکانس آستانه لازم برای آن فلز باشد، پدیده فوتوالکتریک رخ نمی‌دهد. این نتیجه با فیزیک‌کلاسیک توجیه نمی‌شود. زیرا براساس فیزیک‌کلاسیک انتظار می‌رفت که با افزایش شدت نور فرودی در هر فرکانسی، فوتوالکترون‌ها به جریان درآیند، همچنین انتظار می‌رفت به ازای کاهش شدت‌جریان در تمام فرکانس‌ها،جریانی رخ ندهد؛ که در عمل این اتفاق نمی‌افتد و برای $\vartheta > \vartheta_0$ حتی در شدت‌های کم نیز، اثر فوتوالکتریک رخ می‌دهد.

بسامد آستانه برای اکثر فلزات در ناحیه نور فرابنفش قرار می‌گیرد.



شکل ۹ بسامد آستانه به جنس فلز بستگی دارد که برای اکثر فلزات در ناحیه فرابنفش است، شیب نمودار برای تمام فلزات برابر h است اما عرض از مبدا به جنس فلز بستگی دارد. بطور مثال برای فلز نقره (Ag) فرکانس‌های بیشتر از $12 \times 10^{14} Hz$ منجر به وقوع پدیده فوتوالکتریک می‌شود.

انیشتین تابش را متشکل از کوانتوم‌های با انرژی $h\vartheta$ درنظرگرفت که در آن ϑ بسامد نور است. جذب یک کوانتوم منفرد توسط یک الکترون، انرژی الکترون را به اندازه $h\vartheta$ افزایش می‌دهد. مقداری از این انرژی صرف جدا کردن الکترون از فلز می‌شود. این مقدار انرژی، که تابع کار فلز نامیده می‌شود، برای هر فلز مقدار مشخصی است و به انرژی الکترون وابسته نمی‌باشد. بنابراین براساس قانون پایستگی انرژی داریم:

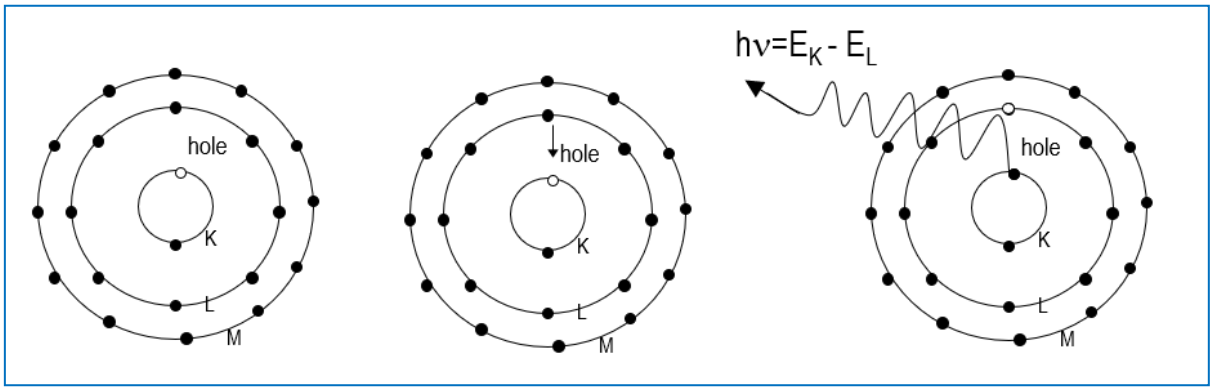
$$K_e = \frac{1}{2}mv^2 = h\vartheta - W$$

اگر بسامد آستانه برای وقوع پدیده فوتوالکتریک برای یک فلز ϑ_0 باشد، تابع کار آن $W_0 = h\vartheta_0$ است و بنابراین حداکثر انرژی‌جنبشی فوتوالکترون‌ها برابر با $k_{max} = h\vartheta - W_0 = eV_0$ است.

پیامدهای اثر فوتوالکتریک

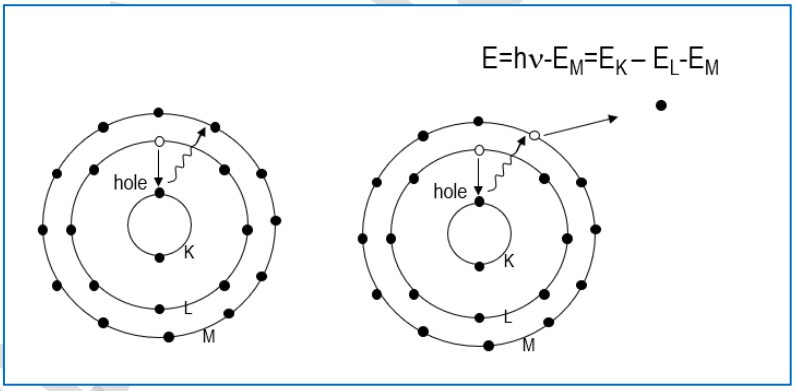
پدیده فوتوالکتریک عمدتاً در اثر برخورد فوتون با الکترون مقید به اتم روی می‌دهد. در اثر جدا شدن، برای پر کردن جای خالی آن، یک الکترون از مدارهای بالاتر به پایین‌تر سقوط کرده که در اثر آن مقداری اختلاف انرژی به وجود می‌آید. این اختلاف انرژی به‌صورت تابش پرتوی x ظاهر می‌شود. به این پرتو به‌اصطلاح پرتو ایکس مشخصه یا تشخیصی گفته می‌شود. لازم به ذکر است که پدیده فوتو الکتریک عمدتاً با لایه K اتم انجام می‌گیرد.

کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد



شکل ۱۰ طرحواره تولید پرتو ایکس اختصاصی

در برخی مواقع ممکن‌است که تابش ایکس ایجادشده به‌جای خروج از اتم، سبب ایجاد پدیده فوتوالکتریک دیگری با یکی دیگر از الکترون‌های آن اتم شود. در اثر این پدیده الکترون دیگری از اتم خارج می‌شود که آن را الکترون اوژه می‌نامیم. با توجه به این‌که انرژی تابش‌ایکس حاصل برابر اختلاف‌ترازهای اتمی K و L است، $h\vartheta = E_K - E_L$، پس شرط آزادشدن الکترون‌اوژه بصورت $(E_B)_K - (E_B)_L \geq (E_B)_M$ می‌باشد. به زبان ساده‌تر الکترون اوژه زمانی آزاد می‌شود که اختلاف انرژی ترازهای K و L بزرگ‌تر مساوی انرژی بستگی الکترون‌ثانوی باشد. پس پدیده فتوالکتریک همیشه با یک فرایند ثانوی همراه خواهدبود که یا تابش ایکس یا گسیل الکترون اوژه می‌باشد.



شکل ۱۱ طرحواره تشکیل الکترون اوژه

- پدیده فوتوالکتریک در محدوده انرژی‌های حدود 70 KeV تا 100 KeV غالب بود و به‌طورکلی در انرژی‌های کمتر از 100 KeV رخ می‌دهد. همچنین این پدیده در مواد سنگین با عدد اتمی (Z) بالا مورد اهمیت خواهد بود.

- با توجه به این مطالب می‌توان‌گفت سطح‌مقطع جذب فتوالکتریک به‌صورت تقریبی با موارد زیر متناسب است:

$$\tau \propto Z^3 E_r^{-3}$$

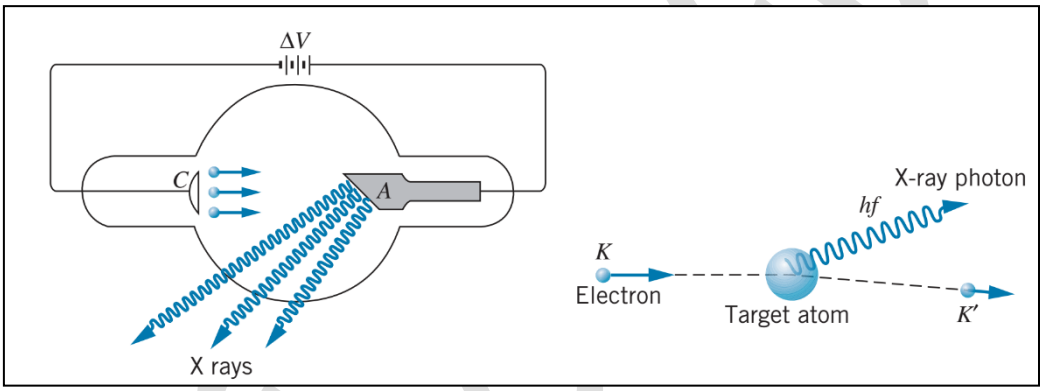
$$\tau \propto z^5 E_r^{-3.5}$$

کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد

تولید پرتو ایکس و تابش‌ترمزی

ویلیام رونتگن دریافته‌بود که وقتی الکترون‌های سریع به ماده برخوردمی‌کنند، تابش‌های پرنفوذی را با ماهیت نامعلوم ایجادمی‌کنند. مشخص‌شد که این پرتوهای ایکس که در خطوط‌مستقیم سیر می‌کنند، تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی قرار نمی‌گیرند. هرچه الکترون‌های اولیه سریع‌تر باشد، پرتوهای‌ایکس حاصل‌شده نفوذ بیشتری دارند و هر چه تعداد الکترون‌ها بیشترشود، شدت باریکه پرتو ایکس بیشتر می‌شود.

یک بار الکتریکی شتاب‌دار، امواج الکترومغناطیسی تابش می‌کند و الکترونی که با سرعت در حال حرکت است و ناگهان وادار به توقف می‌شود مسلماً دارای شتاب است. تابشی که از تغییر شتاب الکترون در میدان هسته به وجود می‌آید موسوم به **تابش‌ترمزی (برمزشترالانگ)** است.



شکل ۱۲ تولید پرتو ایکس ترمزی (برمزشترالانگ)

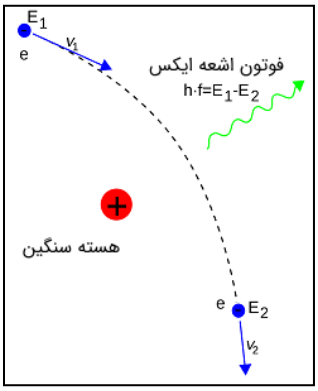
نظریه کلاسیکی الکترومغناطیس پیشگویی می‌کند که هر بار الکتریکی شتابداری انرژی الکترومغناطیس تابش می‌کند. نظریه کوانتومی ایجاب می‌کند که هر انرژی الکترومغناطیسی تابش‌شده‌ای شامل کوانتوم‌های گسسته یا فوتون‌ها باشد. بنابراین انتظار می‌رود که الکترون منحرف‌شده (و در نتیجه شتاب‌دار) یک یا چند فوتون تابش کند و محل برخورد را با انرژی‌جنبشی کمتری ترک‌کند. طبق قانون بقای انرژی انرژی:

$$K - K' = h\nu$$

انرژی لازم برای تولید پرتوهای ایکس از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$K = h\nu_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}} = eV$$

کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد



شکل ۱۳ گسیل فوتون ایکس ترمزی بواسطه عبور یک الکترون از مجاورت یک هسته سنگین

اتلاف انرژی ناشی از تابش‌ترمزی برای الکترون‌ها از اهمیت بیشتری نسبت‌به ذرات سنگین برخوردار است، زیرا الکترون‌ها در مسیرشان وقتی از نزدیکی هسته‌ها عبور می‌کنند با شدت بیشتری شتاب می‌گیرند. هرچه انرژی الکترون بزرگ‌تر، و هر چه عدد اتمی هسته‌هایی که با آن مواجه می‌شوند بزرگ‌تر باشد، تابش‌ترمزی پرانرژی‌تر خواهد بود.

کسری از انرژی ذره باردار که به تابش‌ترمزی تبدیل می‌شود از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\text{تابش ترمزی}}{\text{کل تابش}} = f = 3.5 \times 10^{-4} zE$$

پرتوهای ایکس شامل امواج الکترومغناطیسی یا فوتون‌ها با طول‌موج حدود $1A^0$ هستند. بطور تجربی تاییدشده که پرتوهای ایکس پدیده‌های موجی تداخل، پراش و قطبی‌شدن را نمایش می‌دهند.

اثر کامپتون

آزمایشی که سرراست‌ترین مدرک ماهیت ذره‌ای تابش را در اختیار قرار می‌دهد، اثر کمپتون است. کمپتون کشف‌کرد تابشی با یک طول‌موج معین در ناحیه پرتو ایکس و گاما که از یک ورقه فلزی می‌گذرد، به گونه‌ای پراکنده می‌شود که با نظریه تابش کلاسیک سازگار نیست. بطور مختصر، بنا بر نظریه کلاسیک، در نتیجه این برخورد شدت نور بازتابش‌شده توسط الکترون‌هایی که با تابش فرودی به نوسان واداشته شده‌اند، در زاویه θ متناسب با $(1 + cos^2\,\theta)$ است که به طول‌موج تابش فرودی بستگی ندارد. براساس بررسی‌های کامپتون، تابش پراکنده‌شده در یک زاویه معین دارای دو بخش است. مولفه‌ای که طول‌موج آن همان طول‌موج تابش فرودی است و مولفه دیگری که طول‌موج آن نسبت به طول‌موج فرودی به مقداری که بستگی به زاویه دارد انتقال پیدا کرده‌است.

کامپتون با در نظرگرفتن تابش فرودی به صورت باریکه‌ای از فوتون‌ها که هر یک از آن‌ها دارای انرژی $h\vartheta$ است و باعث پراکندگی کشسان یک الکترون منفرد می‌شود، توانست مولفه تغییر یافته (تغییر طول‌موج فوتون) را توضیح بدهد:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 C}(1 - cos\,\theta) = 0.0242(1 - cos\,\theta)A^0$$

$\frac{h}{m_0 C}$ طول‌موج کامپتون الکترون نامیده‌می‌شود و مقدار آن برابر با $2.4 \times 10^{-10} cm$ است.

کلیه حقوق اثر متعلق به شرکت نوآفرینان علم آزمون می‌باشد و هرگونه تکثیر، بازنویسی و یا برداشت به هر نحوی (الکترونیکی، فتوکپی، عکس و فیلم و موارد مشابه) چه از متن کامل و یا جزئی از آن، مجاز نبوده و منجر به پیگرد قانونی می‌باشد