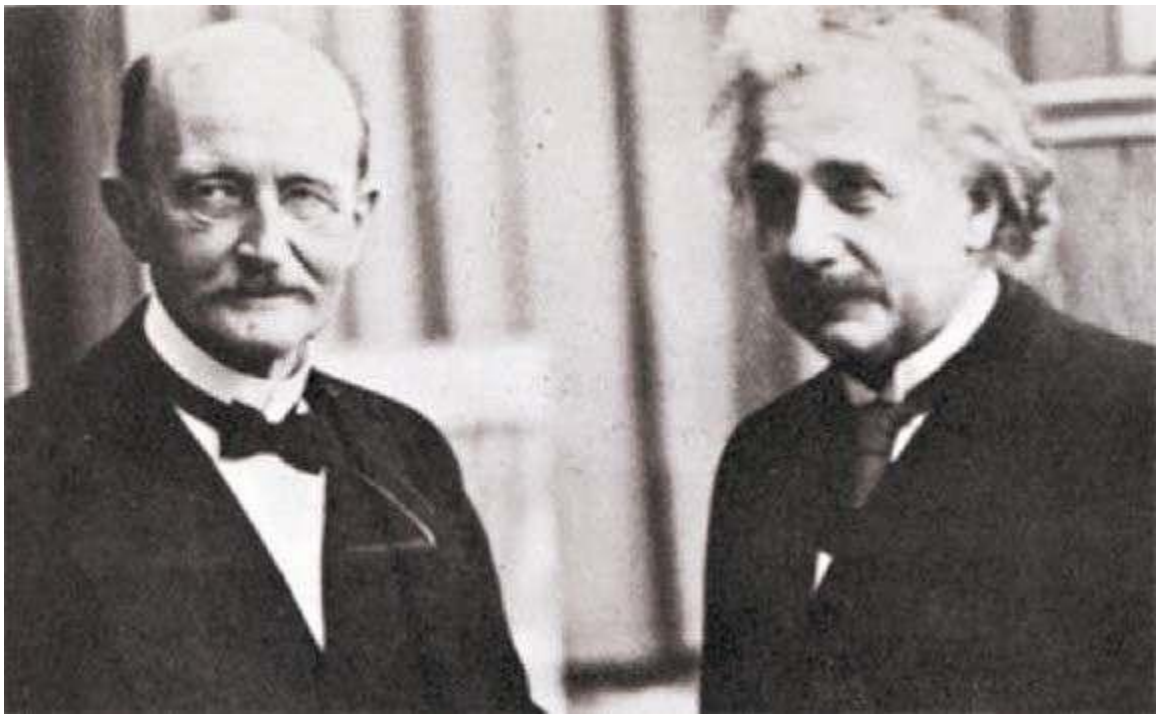
به نام خالق علم

مبحث: آشنایی با فیزیک اتمی

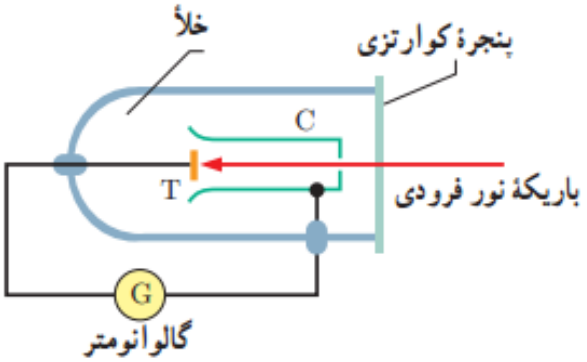
مدرس: دکتر امید سلطانی



اثر فوتوالکتریک و فوتون

جداسازی الکترون از سطح یک جسم توسط تابش نور را پدیده‌ی فوتوالکتریک گویند . الکترون‌های گسیل شده از سطح فلز را فوتوالکترون می‌نامند.

بررسی پدیده فوتوالکتریک:



برای بررسی اث فوتوالکتریک از دستگاهی مطابق شکل روبه‌رو بهره می‌بریم. در این دستگاه باریکه نور فرودی به فلز T شکل برخورد می‌کند و الکترون‌های کنده شده از فلز توسط محفظه‌ی C جمع آوری می‌شوند. در نتیجه گالوانومتر(آمپرسنج دقیق) جریان فوتوالکتروهای گسیلی را اندازه‌گیری می‌کند.

از آنجاییکه نور موج الکترومغناطیسی است انتظار داریم با هر بسامدی به مرور زمان الکترون‌های سطح فلز را به نوسان در بیاورد و با گذشت زمان در صورت بزرگ بودن دامنه حرکت الکترون‌ها به مقدار کافی و فراهم بودن انرژی جنبشی مورد نظر الکترون از سطح فلز کنده شود. از نظر دیدگاه فیزیک کلاسیک این پدیده در هر فرکانسی رخ خواهد داد.

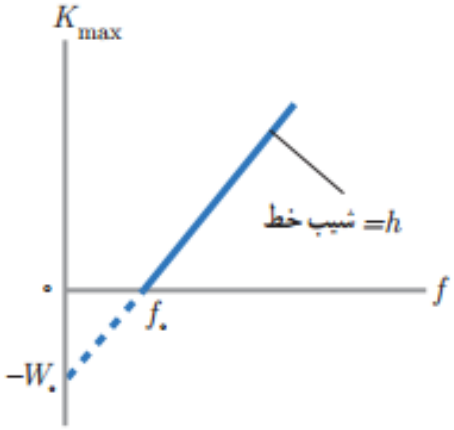
از طرف دیگر بنابر نظریه الکترومغناطیس ماکسول(ماهیت موجی نور) شدت نور با مربع میدان الکترومغناطیسی رابطه مستقیم دارد. لذا انتظار داریم با افزایش شدت نور در یک فرکانس ثابت، انرژی جنبشی فوتوالکترون‌ها افزایش یابد.

اما هیچکدام از انتظارات ذکر شده در آزمایش تجربی در آزمایشگاه دیده نمیشد!

نتایج آزمایشگاه فوتوالکتریک در آزمایشگاه به شرح زیر بود:

۱) یک فرکانس آستانه برای فوتوالکترون‌ها وجود دارد. لذا در صورت کمتر بودن موج فرودی از این فرکانس آستانه هیچ فوتوالکترونی از فلز کنده نمی‌شود حتی با افزایش شدت نور.

۲) با افزایش شدت نور در یک فرکانس ثابت انرژی جنبشی الکترون‌ها تغییر نمی‌کند اما جریان الکتریکی افزایش می‌یابد.



۳) با افزایش فرکانس(در شدت ثابت) هم انرژی جنبشی الکترون‌ها افزایش می‌یابد و هم جریان الکتریکی بیشتری تولید می‌شود.

٤) هیچ گونه تاخیر زمانی برای تولید فوتوالکترون‌ها وجود ندارد.

اینیشین با فرض هوشمندانه فرض کرد که نور در حقیقت دریایی از تابش ذرات است که هر ذره دارای انرژی گسسته است. در حقیقت گسستگی در انرژی به هنگام جذب و نشر نوسانگرها قبل از اینیشین توسط پلانگ مطرح شده بود که توسط اینشتین به ذرات نور نسبت داده شد. لذا اینشتین هر ذره از نور را فوتون نامید که انرژی آن توسط رابطه‌ی زیر بدست می‌آمد:

$$E = hf$$
$$h = 6.6\times10^{-34} J.s$$

بر طبق این فرض تمامی نتایج حاصل شده به درستی پاسخ داده میشد. زیرا:

۱) به محض برخورد ذرات به الکترون‌های سطح فلز، فوتون الکترون‌ها حاصل می‌شوند لذا هیچ تاخیر زمانی شاهد نخواهیم بود.

۲) انرژی فوتون‌ها تابعی از فرکانس است و در صورت کافی بودن این فرکانس انرژی لازم برای ایجاد فوتوالکترون‌ها پدید می‌آمد.

۳) هر چه فرکانس نور فرودی افزایش یابد انرژی جنشی فوتوالکترون‌ها افزایش خواهد یافت.

لذا اگر فرض کنیم انرژی لازم برای غلبه بر انرژی مقید کننده الکترون به فلز W باشد می‌توان قانون پایستگی انرژی برای پدیده فوتوالکتریک را به فرم زیر نوشت:

$$hf = W + K \rightarrow K_{maX} = hf - W_0$$

لذا حداقل فرکانس نور جهت کندن فوتون الکترون‌ها را فرکانس آستانه می‌نامیم که با صفر قرار دادن انرژی جنبشی در قانون پایستگی انرژی حاصل می‌شود:

$$K = 0 \rightarrow hf_0 = W_0 \rightarrow f_0 = \frac{W_0}{h}$$

مثال۱: طول موج نوری برابر ۰/۱ میکرون است. انرژی هر فوتون از این نور را بر حسب الکترون ولت کدام است؟

۱) ۱/۲۳ ۲) ۱۲/۳ ۳) ۱٤/۳ ٤) ۱/٤۳

مثال۲: نوری با طول موج ۲ میکرون برای جدا شدن از سطح الکترود مقدار 4×10^{-20} ژول کار انجام می‌دهد. انرژی جنبشی الکترون هنگام خروج از سطح الکترود چند ژول است؟

۱) 3.8×10^{-20} ۲) 4.3×10^{-20} ۳) 7.2×10^{-20} ٤) 5.9×10^{-20}

مثال۳: تابع کار فلزی 2×10^{-17} ژول است. ماکزیمم انرژی یک فوتون الکترون با طول موج ۱۰ آنگستروم کدام است؟

۱) 17.2×10^{-17} ۲) 17.8×10^{-17} ۳) 16.8×10^{-17} ٤) 15.8×10^{-17}

مثال٤: تابع کار تنگستن ٤/٥٢ الکترون ولت است.

الف) بسامد و طول موج قطع تنگستن را بیابید.

ب) بیشینه انرژی جنبشی و تندی الکترون را هنگامیکه طول موج ۱۹۸ نانومتری به کار می‌رود را حساب کنید.

طیف پیوسته و طیف خطی

می‌دانیم که همه اجسام در هر دمایی که باشند، از خود امواج الکترومغناطیسی گسیل (نشر) میکنند که به آن تابش گرمایی گفته می‌شود. برای یک جسم جامد، نظیر رشته داغ یک لامپ روشن، این امواج شامل گستره‌ی پیوسته‌ای از طول موج‌هاست. به همین دلیل طیف ایجاد شده در این شرایط را **طیف گسیلی پیوسته** یا به اختصار **طیف پیوسته** می‌نامند. تشکیل طیف پیوسته توسط جسم جامد، ناشی از برهمکنش قوی بین اتمهای سازنده‌ی آن است.

حال آنکه گازهای کم فشار و رقیق، که اتم‌های منفرد آنها از برهمکنش‌های 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 درباره‌ی نوع و ساختار اتم‌های آن گاز به دست می‌دهند. دو نمونه آشنا از گازهای کم فشار و رقیق، در لامپ‌های نئون و لامپ‌های جیوه‌ای وجود دارد.

در سال ۱۸۸۵ میلادی، بالمر، ریاضیدان سوئیسی، رابطه‌ای ساده پیشنهاد کرد که طول موج هر یک از خط‌های شناخته‌شده مربوط به طیف گسیلی خطی هیدروژن اتمی را به دست میداد. این رابطه عبارت است از:

$$\lambda = (364.56nm)\frac{n^2}{n^2-4}$$

رابطه‌ی فوق بدون هیچگونه ملاحظات فیزیکی بدست آمده بود. از طرفی در این رابطه n همواره عددی بزرگتر و مساوی ۳ بود. لذا طول موج‌های طیف گسیلی اتم هیدروژن در ناحیه مرئی به صورت زیر بدست می‌آمد:

$n=۳ \rightarrow \lambda_۱=۶۵۶/۲۰\text{nm}$ (خط قرمز)

$n=۴ \rightarrow \lambda_۲=۴۸۶/۰۸\text{nm}$ (خط آبی)

$n=۵ \rightarrow \lambda_۳=۴۳۴/۰۰\text{nm}$ (خط نیلی)

$n=۶ \rightarrow \lambda_۴=۴۱۰/۱۳\text{nm}$ (خط بنفش)

ریدبرگ، فیزیکدان سوئدی، در راستای همین موضوع تلاش فراوانی برای کاملتر کردن طیف گسیلی خطی هیدروژن انجام داد و در سال ۱۸۸۸ میلادی معادله بالمر را به صورت زیر اصلاح و بازنویسی کرد:

$$\frac{1}{\lambda}=R_H\left(\frac{1}{n'^2}-\frac{1}{n^2}\right)$$

$$n'>n$$

رشتهٔ خط‌های طیف گسیلی هیدروژن اتمی

نام طیف	تاریخ کشف	مقدار n'	رابطهٔ ریدبرگ مربوط به رشته	مقدارهای n	ناحیهٔ طیف
لیمان	۱۹۰۶ـ۱۹۱۴	۱	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۱^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)$	۲,۳,۴,...	فرابنفش
بالمر	۱۸۸۵	۲	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۲^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)$	۳,۴,۵,...	فرابنفش و مرئی
پاشن	۱۹۰۸	۳	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۳^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)$	۴,۵,۶,...	فروسرخ
براکت	۱۹۲۲	۴	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۴^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)$	۵,۶,۷,...	فروسرخ
پفوند	۱۹۲۴	۵	$\frac{۱}{\lambda}=R\left(\frac{۱}{۵^۲}-\frac{۱}{n^۲}\right)$	۶,۷,۸,...	فروسرخ

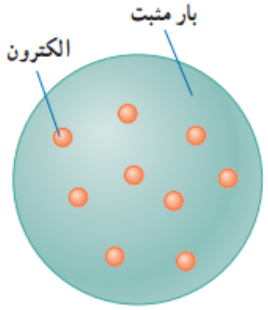
مثال۵: کوتاهترین و بلندترین طول موج‌های سری لیمان اتم هیدروژن را حساب کنید؟

مثال٦: اگر الکترون در اتم هیدروژن در تراز n=٤ باشد، چه طول موج‌هایی را می‌تواند تابش کند؟

معادله ریدبرگ که برگرفته از داده‌های تجربی است، طول موج‌هایی را به دست می‌دهد که هیدروژن اتمی در طیف الکترومغناطیسی گسیل میکند. ولی مدل‌های اتمی رایج آن زمان در خصوص اینکه چرا تنها طول موج های معینی توسط هیدروژن اتمی تابش می‌شود، پاسخی نداشتند. نیلز بور، فیزیکدان دانمارکی با اصلاح مدل اتمی رادرفورد، برای نخستین بار توانست توضیح مناسبی برای طول موج‌های گسسته تابش شده توسط گاز هیدروژن اتمی ارائه دهد. در واقع مدل بور، آغاز راهی برای درک این موضوع بود که چگونه ساختار اتم، طول موج‌های تابش شده را به مقدارهای معینی محدود می‌کند.

مدل اتمی تامسون

در این الگو اتم به صورت توزیع کروی یکنواختی از جرم و بار مثبت در نظر گرفته شده است که الکترون‌ها مانند کشمش درون یک کیک قرار دارند.



مدل اتمی رادرفورد

در این الگو اتم شامل هسته‌هایی با بار مثبت است و اطراف آن را فضای خالی و الکترون‌ها فراگرفته‌اند.

نقطه‌ی ضعف الگوی اتمی رادرفورد:

طبق این مدل و با در نظر گرفتن نظریه الکترومغناطیسی کلاسیک اگر الکترون‌هایی به دور هسته گردش کنند باید تابش نمایند. بسامد این تابش با بسامد گردش الکترون به دور هسته باید برابر باشد. به علت تابش انرژی توسط الکترون‌ها، انرژی آن‌ها کاهش می‌یابد و به تدریج در مدارهایی به شعاع کوچکتر حرکت می‌کنند. بنابراین الکترون‌ها به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند و بسامد حرکت آنها به صورت تدریجی افزایش می‌یابد و بسامد نور گسیلی نیز باید به تدریج افزایش یابد. از این رو علاوه بر پیوسته بودن طیف گسیلی الکترون به دلیل کاهش انرژی باید روی هسته بیفتد! لذا به صورت کلی ایرادات وارد بر مدل اتمی رادرفورد به ۲ مورد زیر برمی‌گردد:

۱) نمی‌تواند حرکت الکترون‌ها یا سکون آنها را توضیح دهد.
۲) طیف گسیلی(ناپیوسته) مشاهده شده را توضیح نمی‌دهد.

مدل اتمی بور

بور از ادغام مدل اتمی رادرفورد و نظریه‌ی کوانتومی پلانک موفقترین مدل اتمی آن زمان را برای اتم هیدروژن ارائه داد. او رفتار مدل اتمی مورد نظر را بر ۳ اصل زیر بیان نمود:

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

طبق مدل اتمی بور شعاع و انرژی هر تراز از روابط زیر بدست خواهد آمد:

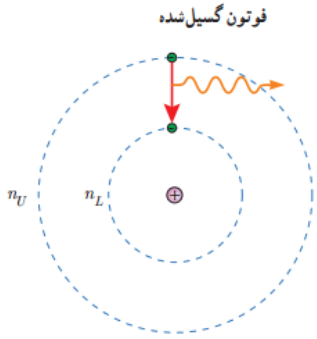
$$r_n = a_0 n^2$$

$$a_0 = r_1 = 5.29 \times 10^{-11} m$$

$$E_n = \frac{-13.6 eV}{n^2}$$

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 یک فوتون تابش می‌شود در این صورت انرژی فوتون تابش شده برابر اختلاف انرژی بین دو مدار اولیه و مدار نهایی است، یعنی:



$$E_U - E_L = hf$$

انرژی الکترون در کمترین تراز را حالت پایه و انرژی ترازهای بالاتر را انرژی حالت برانگیخته می‌نامیم. همچنین کمترین انرژی لازم برای بردن الکترون از تراز پایه به تراز برانگیخته را انرژی یونش الکترون می‌نامیم.

مثال۷: انرژی بستگی الکترون اتم هیدروژن در حالت پایه چند برابر انرژی بستگی آن در تراز سوم است؟

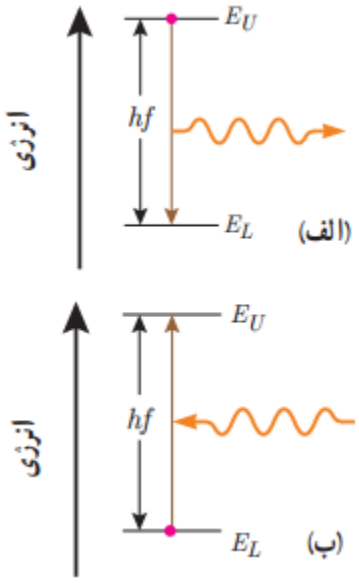
۱) ۱ ۲) ۳ ۳) ۱/۳ ٤) ۱/۹

استخراج معادله‌ی ریدبرگ برای اتم هیدروژن از مدل بور:

طیف جذبی گاز هیدروژن اتمی و مدل بور:

طیف جذبی اتمی طیف نور سفیدی است که بعضی از خطوط با طول موج‌های آن جذب شده باشد. لذا در طیف نور خورشید هزاران خطوط تیره مشاهده می‌شود که دلیل آن جذب برخی از طول موج‌های تابشی توسط بخار عناصر مختلف موجود در جو خورشید و زمین است. به این خطوط تیره، خطوط فرانهوفر نیز گفته می‌شود.

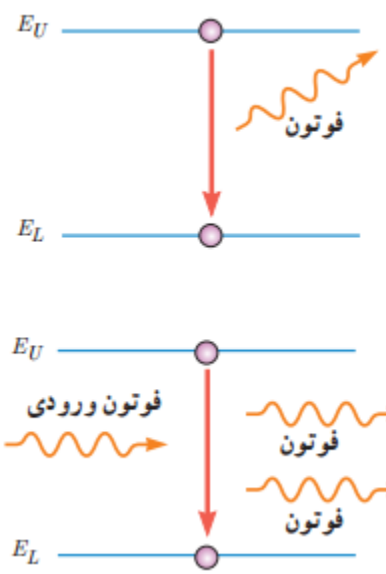
- ❖ هم در طیف گسیلی و هم در طیف جذبی اتم‌های گاز هر عنصر، طول موج‌های معینی وجود دارد که از مشخصه‌های آن عنصر است. یعنی طیف گسیلی و طیف جذبی هیچ دو گازی همانند یکدیگر نیست.
- ❖ اتم‌های هر گاز دقیقاً همان طول موج‌هایی را از نور سفید جذب می‌کنند که اگر دمای آنها به اندازه کافی بالا رود و یا به هر صورت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



موفقیت‌ها و نارسایی‌های 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. افزون بر این، مدل بور را برای اتم‌های هیدروژن گونه نیز می‌توان به کار برد. اتم هیدروژن گونه به اتم‌هایی گفته می‌شود که تنها یک الکترون دارند. برای مثال، اتم لیتیم که در حالت خنثی سه الکترون دارد اگر دو الکترون خود را از دست داده باشد، یک اتم هیدروژن گونه است. مدل بور میتواند انرژی یونش و همچنین طول موج‌های طیف خطی اتم‌های هیدروژن گونه مانند لیتیم دو بار یونیده(Li^{2+}) را پیشبینی کند که با تجربه سازگاری خوبی دارد. مدل بور به رغم موفقیت‌هایی که اشاره شد، نارسایی‌هایی نیز دارد که تنها به دو مورد از آنها اشاره می‌کنیم. 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. همچنین این مدل نمی‌تواند متفاوت بودن شدت خط های 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.

لیزر



مطابق مدل اتمی بور 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 و یا گسیل القایی باشد. در گسیل خود به خود فوتون در جهتی کاتورهای گسیل می‌شود. در حالی که در گسیل القایی که برای نخستین بار در سال ۱۹۱۷ میلادی توسط اینشتین مطرح شد، 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. **اول اینکه** یک فوتون وارد و دو فوتون خارج میشود به این ترتیب این فرآیند تعداد فوتون‌ها را افزایش می‌دهد و نور را تقویت میکند **دوم اینکه** فوتون گسیل شده، در همان جهت فوتون ورودی حرکت میکند. **سوم اینکه** فوتون گسیل شده با فوتون‌ورودی همگام یا دارای همان فاز است. به‌این‌ترتیب‌فوتون‌هایی‌که باریکه لیزری را ایجاد می‌کنند **هم بسامد،هم جهت و هم فاز** هستند.

در گسیل القایی یک چشمه انرژی خارجی مناسب باید داشته باشد تا الکترون‌ها را به ترازهای برانگیخته ببرد. این انرژی را می‌توان به روش های متعددی از جمله درخش‌های شدید نور معمولی و یا تخلیه‌های ولتاژ بالا فراهم ساخت. اگر انرژی کافی به اتم‌ها داده شود الکترون‌های بیشتری به تراز برانگیخته می‌روند لذا حالتی موسوم به وارونی جمعیت خواهیم داشت. وارونی جمعیت الکترون‌ها مربوط به حالتی است که ترازهایی موسوم به ترازهای شبه پایدار تشکیل شده باشند. الکترون‌ها در این ترازها مدت زمان بیشتری نسبت به تراز برانگیخته می‌توانند باقی بمانند لذا زمان کافی برای افزایش وارونی جمعیت و در نتیجه تقویت نور لیزر فراهم می‌شود.