

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سوادکوه

دانشکده علوم - گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته فیزیک - گرایش هسته ای

عنوان :

طراحی و ساخت آشکارساز گازی تناسبی حساس به مکان

اساتید راهنما:

دکتر طیب کاکاوند (دانشگاه زنجان)

دکتر کیومرث کمالی مقدم (سازمان انرژی اتمی ایران)

استاد مشاور:

دکتر محمد مهدی ناصری (سازمان انرژی اتمی ایران)

۱۷ / ۱۲ / ۱۳۸۶

پژوهشگر: بهادر شریفی

بهمن ۸۶

۱۰۲۴۶۱

سازمان اطلاعات و ارتباطات  
جمهوری اسلامی ایران



دانشگاه سبزگان

## صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای بهادر شریفی رشته فیزیک گرایش فیزیک هسته ای

تحت عنوان: طراحی و ساخت آشکارساز تناسبی گازی حساس به مکان

در تاریخ ۸۶/۱۱/۳ با حضور هیأت محترم دوران در دانشگاه زنجان برگزار گردید و نظر هیأت داوران بشرح زیر می باشد:

قبول (با درجه: عالی) امتیاز: ۱۹,۸ (دفاع مجدد  مردود )

نوزده و هشت

۱- عالی (۲۰-۱۸)

۲- بسیار خوب (۱۷/۹۹-۱۶)

۳- خوب (۱۵/۹۹-۱۴)

۴- قابل قبول (۱۳/۹۹-۱۲)

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر طیب کاکاوند	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر کیومرث کمالی مقدم	استادیار	
۳- استاد مشاور	دکتر محمدمهدی ناصری	استادیار	
۴- استاد ممتحن	دکتر فرشید طباطبائی	استادیار	
۵- استاد ممتحن	دکتر یوسفعلی عابدینی	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدعلی اسم خانی	استادیار	

دکتر نعمت آ... ارشدی  
مدیر تحصیلات تکمیلی دانشگاه

دکتر نصرا.. عباسی  
معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی  
دانشکده علوم

تقدیم به لطیف‌ترین بارش الهی مادر  
به خاطر تنها یک نگاه بهشتی‌اش

تقدیم به آسمان بی‌کران زندگی پدر  
به خاطر یک لحظه از سایه لاهوتی‌اش

تقدیم به خواهران مهربانم بهاره و بشری و  
برادر عزیزم ایمان،

آنان که بی‌ریاسترین محبت‌ها را نثارم می‌کنند.

(( عاشقانه دوستشان دارم ))

## قدردانی و تشکر

سپاس خدای سبحان را که فرصتی دیگر برای اندوختن دانشی هر چند اندک، عطایم فرمود.  
بدین وسیله از اساتید راهنمای محترم جناب آقای دکتر طیب کاکاوند و جناب آقای دکتر کیومرث کمالی مقدم که در انجام این مجموعه مرا راهنمایی نموده‌اند، سپاسگزاری می‌کنم و همچنین از استاد گرانمایه ام جناب آقای دکتر محمد مهدی ناصری که همچون پدری دلسوز مرا همواره مورد عنایت پرتوهای راهنمایی‌هایشان قرار می‌دادند، کمال تشکر و قدردانی را دارم و از کلیه دوستان عزیزم در سازمان انرژی اتمی ایران (تهران) و دانشگاه زنجان که هر یک به نحوی مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نموده‌اند، تشکر می‌کنم و صحت و سلامتی این بزرگواران را از خداوند متعال خواهانم.

## چکیده

در این پایان نامه ابتدا به برهمکنش‌های پرتوهای ایکس و گاما با ماده پرداخته و سپس توضیحات مختصری در مورد الکترونیک هسته‌ای و دستگاه‌های اندازه‌گیری ارائه شده است. در ادامه به توضیحاتی پیرامون آشکارسازهای گازی و نحوه عملکرد و فرآیندهایی که منجر به تولید پالس گشته، پرداخته شده است و در انتها به منظور ساخت آشکارسازهای تناسبی (چند سیمی و تک سیمی) حساس به مکان از نوع گاز جاری، دو طرح متفاوت ارائه شده است. در آشکارساز از نوع چند سیمی از مقاومت‌های ۱ کیلو اهمی برای نشان دادن خاصیت حساس به مکان استفاده شده است. در آشکارساز دوم (تک سیمی) خاصیت حساس به مکان بودن آن بر اساس تغییر تدریجی فاصله آند و کاتد می‌باشد و در ادامه به بحث در مورد نتایج تجربی و ویژگی‌های آشکارسازهای ساخته شده پرداخته شده است.

## فهرست

چکیده	.....	پنج
مقدمه	.....	هفت

### ۱ برهمکنش های پرتو های ایکس و گاما با ماده

۱.۱	اثر فوتوالکتریک	.....	۲
۲.۱	پراکندگی کامپتون	.....	۵
۳.۱	تولید زوج	.....	۷
۴.۱	ضریب تضعیف کل	.....	۹

### ۲ الکترونیک هسته ای و دستگاه های اندازه گیری

۱.۲	دستگاه های شمارنده	.....	۱۲
۱.۱.۲	آشکار ساز	.....	۱۳
۲.۱.۲	مفهوم <i>NIM</i>	.....	۱۵

۱۶	.....	۳.۱.۲	منبع تغذیه ولتاژ بالا
۱۶	.....	۴.۱.۲	پیش تقویت کننده
۱۷	.....	۵.۱.۲	تقویت کننده
۱۷	.....	۶.۱.۲	تبعیض گر یا تحلیل گر تک کاناله
۱۸	.....	۷.۱.۲	شمارش گر و ساعت الکتریکی
۱۸	.....	۸.۱.۲	اسیلوسکوپ
۱۹	.....	۹.۱.۲	تحلیل گر چندکاناله

### ۳ اصول کار و ویژگی های آشکارسازهای گازی تناسبی

۲۲	.....	۱.۳	کاربرد انواع آشکارسازهای تناسبی
۲۳	.....	۲.۳	مقدمه ای بر آشکارسازی
۲۴	.....	۳.۳	حالت پالسی
۲۵	.....	۱.۳.۳	ملاحظات
۲۶	.....	۴.۳	رابطه بین ولتاژ و بار جمع آوری شده
۲۸	.....	۱.۴.۳	انواع مختلف شمارنده های گازی
۳۱	.....	۵.۳	تکثیر گازی در شمارنده تناسبی
۳۳	.....	۱.۵.۳	روش دیگر برای توصیف $M$
۳۶	.....	۶.۳	گاز شمارنده های تناسبی
۳۸	.....	۷.۳	طیف ارتفاع پالس



۴۰	تائیرات بارفضایی	۸.۳
۴۱	منحنی پلاتو	۹.۳
۴۲	انواع مختلف شمارنده‌های تناسبی و کاربرد آن‌ها	۱۰.۳
۴۳	شمارنده‌های تناسبی $BF_3$	۱.۱۰.۳
۴۳	شمارنده‌های تناسبی معادل بافت	۲.۱۰.۳
۴۴	شمارنده‌های تکثیری با صفحات موازی	۳.۱۰.۳
۴۴	شمارنده‌های تناسبی $HPXe$	۴.۱۰.۳
۴۵	شمارنده‌های تناسبی چند آندی	۵.۱۰.۳
۴۵	هندسه چندسیمی	۱۱.۳
۴۶	پتانسیل	۱.۱۱.۳
۴۷	ظرفیت به‌ازای واحد طول	۲.۱۱.۳
۴۷	فرمول میدان	۳.۱۱.۳
۴۸	مشخصات زمانی پالس‌ها	۴.۱۱.۳
۵۲	مسیر حرکت یون‌ها	۵.۱۱.۳
۵۲	زمان جمع‌آوری یون‌ها	۶.۱۱.۳
۵۴	وابستگی ضریب بهره‌گازی به $\alpha$	۷.۱۱.۳

#### ۴ طراحی، ساخت و عملکرد آشکارساز حساس به مکان از نوع گاز جاری

۵۶	آشکارسازهای حساس به مکان	۱.۴
----	--------------------------	-----

۵۷	..... روش‌های تعیین موقعیت مکانی پرتوها	۲.۴
۵۹	..... مراحل آماده سازی و نصب	۱.۲.۴
۶۰	..... طراحی و ساخت آشکارساز چند سیمی یک بعدی	۳.۴
۶۲	..... ساختار مکانیکی	۱.۳.۴
۶۳	..... نصب و مونتاژ	۲.۳.۴
۶۴	..... عملکرد اولیه	۳.۳.۴
۶۶	..... اندازه گیری ها و نتایج	۴.۴
۶۶	..... محدوده کاری	۱.۴.۴
۶۷	..... محاسبه ضریب تکثیر گازی	۲.۴.۴
۶۸	..... نتایج تجربی برای اثبات حساس به مکان بودن آشکارساز	۳.۴.۴
۷۵	..... طراحی و ساخت آشکارساز تک سیمی حساس به مکان با روش نوین تغییر تدریجی فاصله بین الکترودها	۵.۴
۷۹	..... قدرت تفکیک مکانی	۶.۴
۸۳	..... بحث و نتیجه گیری	۷.۴
۸۶	..... پیوست	
۱۰۲	..... مراجع	

## مقدمه

شمارنده‌های گازی جزء اولین وسایلی هستند که برای آشکارسازی پرتوها مورد استفاده قرار گرفتند. در سال ۱۹۰۸ اولین و ساده‌ترین عضو از آشکارسازهای گازی به نام اتاقک یونش<sup>۱</sup> متولد شد که زمینه را برای کشف آشکارسازهای گازی دیگر فراهم ساخت. همچنین در این سال‌ها بود که گایگر با مولر برای آشکار کردن ذرات پراکنده شده از آزمایش مشهور راترفورد، آشکارساز گایگر-مولر ( $G. - M$ )<sup>۲</sup> را ساختند [2]. تاونزند<sup>۳</sup> مطالعه سیستماتیک را بر روی تخلیه الکتریکی گازها انجام داده بود و نتایجی را که رادرفورد در سال‌های ۱۹۰۱-۱۹۰۲ برای ارائه یک مدل جدید از آشکارسازها شبیه سازی کرده بود، به چاپ رسانید که بعدها آشکارساز تناسبی نامیده شد.

آشکارساز تناسبی را که مالان می‌شناسیم، از سال ۱۹۴۸ شروع به پیشرفت کرد. در سال ۱۹۴۸ مطالعه اولیه بوسیله *Curann, Cockcroft, Angus* انجام گرفت که منجر به ساخت آشکارسازی شدند که توانستند طیف کامل بتای حاصل از تریتیوم را بدهد که دامنه‌اش متناسب با انرژی بتای اولیه بود.

در این سال‌ها پیشرفت‌های فراوانی در زمینه تکنیک و درک مکانیزم آشکارساز تناسبی بدست آمد که در ادامه منجر به ساخت آشکارساز تناسبی حساس به مکان<sup>۴</sup> (تک سیمی و چند سیمی) گشت که در سال ۱۹۸۲ *Charpak* برای ساخت آشکارساز تناسبی چند سیمی، جایزه نوبل را از آن خود کرد [3,4].

آشکارسازهای گازی با استفاده از یونش تولید شده از تابشی که از یک گاز عبور می‌کنند، کار می‌کنند. معمولاً چنین شمارنده‌ای دارای دو الکترود است که بین آن‌ها یک پتانسیل الکتریکی برقرار می‌شود و فضای بین الکترودها را از یک گاز پر می‌کنند. تابش یوننده با عبور از فضای بین الکترودها، تمام یا بخشی از انرژی را با تولید زوج‌های الکترون - یون از دست می‌دهد. هم الکترون‌ها و هم یون‌ها حامل بارهایی هستند که تحت تاثیر میدان الکتریکی حرکت می‌کنند. حرکت آن‌ها جریانی در الکترودها القاء می‌کند که می‌توان آن را اندازه گرفت و یا با استفاده از الکترونیک مناسب، بار تولید شده از تابش را می‌توان تبدیل به تپ کرد که در این صورت

<sup>۱</sup> Ionization Chamber

<sup>۲</sup> Geiger - Muller

<sup>۳</sup> Townsend

<sup>۴</sup> Position Sensitive Detector

می‌توان تک تک ذرات را شمرد [1,2,5]. در ناحیه آشکارسازی تناسبی، بار جمع‌آوری شده، به خاطر یونش ثانویه الکترون‌ها، آغاز به افزایش می‌کند که نتیجه‌اش تکثیر تعداد بارهاست. میدان الکتریکی چنان قوی است که الکترون‌های ناشی از یونش اولیه، در بین برخوردها انرژی کافی برای ایجاد یونش اضافی بدست می‌آورند. ضریب تکثیر گازی،<sup>۵</sup> یعنی نسبت یونش تولید شده کل به یونش اولیه به‌ازای یک ولتاژ ثابت مفروض، مستقل از یونش اولیه است. از این‌رو، خروجی شمارنده متناسب با یونش اولیه است. ارتفاع تپ در خروجی متناسب با انرژی از دست رفته در شمارنده است، لذا بازشناسی و اندازه‌گیری انرژی ذره امکان پذیر است. این ناحیه را چنانچه درخور آن است، ناحیه تناسبی<sup>۶</sup> می‌خوانند [1-7].

در آشکارساز تناسبی حساس به مکان بیشتر از دوروش برای پیدا کردن موقعیت مکانی پرتو استفاده می‌شود که عبارتند از:

(۱) روش تقسیم بار (*Charge Division Method*)

(۲) روش زمان خیزش (*Rising Time Method*)

روشی که امروزه بیش از دیگر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش تقسیم بار است که ما در این جا از این روش استفاده کرده‌ایم [28]. روش تقسیم بار بر این واقعیت استوار است که در مدارهای الکترونیکی، هنگامی که جریان الکتریکی به یک نقطه انشعاب از مدار می‌رسد، به نسبت عکس مقاومت تقسیم می‌شود به طوری که حاصل ضرب جریان هر شاخه در مقاومت آن، مقدار ثابتی است. بر طبق اصل بقای بار الکتریکی، جریان ورودی با مجموع جریان‌های خروجی برابر می‌باشد [29].

آشکارسازهای تناسبی حساس به مکان، به دو نوع یک بعدی<sup>۷</sup> و دو بعدی<sup>۸</sup> تقسیم می‌شوند که برای یافتن مکان پرتو ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طور کلی برای بررسی مکانی پرتوها در هر جایی که یک توزیع فضایی معناداری وجود داشته باشد از آن‌ها استفاده می‌شود که دارای کاربردهایی در اسپکتروسکوپی مغناطیسی و تهیه طرح پراش اشعه ایکس یا نوترون و همچنین تصویربرداری در مواردی که نیاز به وضوح بالا نیست (سیستم‌های تصویربرداری در امور امنیتی - حفاظتی) می‌باشد، هرچند که در گذشته از این نوع وسایل در کاربردهای حساس پزشکی نیز استفاده می‌شد [22-26].

---

<sup>۵</sup> Gas Multiplication

<sup>۶</sup> Proportional

<sup>۷</sup> Single Wire Position Sensitive

<sup>۸</sup> Multi Wire Position Sensitive

## فصل اول

# برهمکنش های پرتوهای ایکس و گاما با ماده

پرتو ایکس یا پرتوهای گاما جزء تابش الکترومغناطیسی هستند. اگر آنها را به صورت ذره در نظر بگیریم، وقتی که با سرعت نور حرکت می کنند، جرم سکون و بار آنها صفر است. نام مشترک برای پرتوهای  $x$  و  $\gamma$  وقتی بصورت ذره در نظر گرفته می شود، فوتون است. رابطه بین انرژی  $E$ ، بسامد  $\nu$  و طول موج  $\lambda$  بصورت زیر می باشد.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}. \quad (1.1)$$

فوتون گسیل شده از هسته در حالت برانگیخته را پرتو  $\gamma$  و فوتون گسیل شده ناشی گذارهای اتمی را پرتو  $X$  می نامیم. در آنچه که بدنبال می آید، اصطلاح فوتون را برای  $x$  و  $\gamma$  بکار خواهیم برد. فوتون با آنکه فاقد بار الکتریکی است، ولی با این وجود با بارهای الکتریکی و ماده ای که دارای بار الکتریکی است برهمکنش می کند. احتمال و شیوه برهمکنش فوتون با ماده شدیداً به انرژی فوتون و عدد اتمی ماده بستگی دارد. تولید  $x$  معمولاً در اثر گذارهای اتمی مثل برانگیزش و یونش صورت می گیرد. پرتوهای  $\gamma$  در گذارهای هسته ای تولید می شوند، همچنین فوتون ها از پدیده تابش ترمزی ذرات باردار مثبت و منفی نیز تولید

می‌شوند. پرتوهای  $x$  یا  $\gamma$  که از اتم‌ها یا هسته‌ها تولید می‌شوند، تک انرژی هستند در حالی که تابش ترمزی دارای یک طیف پیوسته است. احتمال برهمکنش یک پرتو  $x$  یا  $\gamma$  بایک اتم در مقایسه با احتمال برهمکنش ذرات باردار معمولاً بسیار پایین است در نتیجه پرتوهای  $x$  یا  $\gamma$  از قدرت نفوذ بالاتری نسبت به ذرات باردار برخوردارند. گرچه تعداد زیادی مکانیزم محتمل در برهمکنش پرتوهای  $x$  یا  $\gamma$  در ماده شناخته شده است، اما در گستره انرژی  $10 (keV)$  تا  $10 (MeV)$  فقط سه دسته برهمکنش اصلی وجود دارد که در برهمکنش های فوتون با ماده نقش مهمی ایفا می‌کنند که عبارتند از:

(۱) جذب فوتو الکتریک،

(۲) پراکندگی کامپتون،

(۳) تولید زوج.

مشخصه بارز برهمکنش های  $x$  و  $\gamma$  با ماده از طریق هر کدام از سه برهمکنش بالا، تولید یک ذره باردار پرانرژی (الکترون یا پوزیترون) است که متعاقباً انرژی خود را با تولید یون یا برانگیزش از دست می‌دهد. به این دلیل تابش  $x$  و  $\gamma$  بعنوان تابش یون‌ساز غیرمستقیم شناخته می‌شوند. تمام این فرآیندها موجب انتقال کامل یا جزئی انرژی به الکترون می‌شود که در این فرآیند انتقال انرژی، فوتون یا کاملاً ناپدید می‌شود؛ یا با زاویه قابل توجهی نسبت به جهت حرکت اولیه پراکنده می‌گردد.

## ۱.۱ اثر فوتوالکتریک

اثر فوتوالکتریک<sup>۱</sup> برهمکنشی است بین یک فوتون و یک الکترون اتمی مقید، که در طی آن تمام انرژی فوتون به یکی از الکترون های اتم منتقل شده و باعث رها شدن الکترون از لایه اتمی مربوطه می‌گردد که به این فوتو الکترون می‌گویند. جذب انرژی بوسیله اتم، از طریق گسیل الکترونی با انرژی فوتون ( $h\nu$ ) منهای انرژی بستگی الکترون ( $B.E$ ) یعنی  $E = h\nu - B.E$  به یونش می‌انجامد. الکترون می‌تواند از هر لایه اتمی

<sup>۱</sup> Photoelectric Effect

رهانیده شود. برای فوتون‌هایی با انرژی  $0.5 MeV$  فوتوالکترون‌ها با احتمال زیاد از لایه  $K$  یک اتم بیرون انداخته می‌شوند اگر الکترون از لایه داخلی مثل  $(K)$  خارج شود، جای خالی در این لایه ایجاد می‌شود که متعاقباً بوسیله الکترونی از لایه‌های بالاتر مثل  $L$  یا  $M$  پر می‌شود، این امر منجر به گسیل پرتو  $x$  مشخصه یا الکترون اوزه<sup>۲</sup> بوسیله اتم می‌گردد. از سوی دیگر اگر الکترون‌های لایه بیرونی‌تر در برهمکنش فوتوالکتریک درگیر شوند، اتم پراحتی یونیده می‌شود. لذا اثر فوتوالکتریک با یک فرآیند ثانوی اشعه  $x$  همراه است. در هر ماده متراکم، تابش ثانوی به نوبه خود با احتمال زیاد جذب می‌شود. احتمال برهمکنش فوتوالکتریک با یک اتم، شدیداً به دو عامل بستگی دارد:

(۱) انرژی فوتون  $(h\nu)$ ،

(۲) عدد اتمی اتم درگیر در برهمکنش  $(Z)$ .

بطوری که احتمال برهمکنش فوتوالکتریک متناسب با  $z^4(h\nu)^{-2}$  است. با این وجود استثناهایی برای این قانون وجود دارد. هر وقت که انرژی فوتون با انرژی بستگی الکترون‌ها در لایه‌های مختلف برابر باشد، احتمال برهمکنش فوتوالکتریک به شدت افزایش می‌یابد. به همین دلیل است که با آن که به نظر می‌رسد که از لحاظ تئوری احتمال برهمکنش فوتوالکتریک برای فوتون‌های  $45 keV$  با اتم سرب، ۴ برابر بزرگتر از فوتون‌های  $90 keV$  است. با این وجود و با توجه به این که انرژی بستگی الکترون در لایه  $K$  اتم سرب  $88 keV$  است، احتمال برهمکنش فوتوالکتریک برای فوتون‌های  $90 keV$  تقریباً برابر با فوتون‌های  $45 keV$  است.

ناحیه‌ای که در آن  $z^4(h\nu)^{-2}$  صدق نمی‌کند، لبه‌های جذب نامیده می‌شود و پیدایش آن به عدد اتمی  $(Z)$  ماده هدف که فوتون با آن برهمکنش می‌کند بستگی دارد. یعنی افزایش ناگهانی ضریب تضعیف، لبه‌های جذب نامیده می‌شود.

احتمال رخداد برهمکنش را سطح مقطع فوتوالکتریک یا ضریب فوتوالکتریک می‌نامند. محاسبه این احتمال خارج از محدوده کار ما می‌باشد، اما بحث وابستگی این ضرایب به پارامترهای مثل  $E_h$  و  $Z$  و  $A$  حائز اهمیت

<sup>۲</sup> Auger Electron (فوتون تابش شده از سقوط الکترون از تراز بالا به پایین، ممکن است آنقدر انرژی داشته باشد که باعث کنده شدن الکترون دیگری از اتم گردد که این الکترون کنده شده را الکترون اوزه می‌نامند.)

است. معادله‌ای که  $\tau$  را می‌دهد بصورت زیر است :

$$\tau(m^{-1}) = \frac{z^n}{E_\gamma^m} Na(1 - e(Z)). \quad (2.1)$$

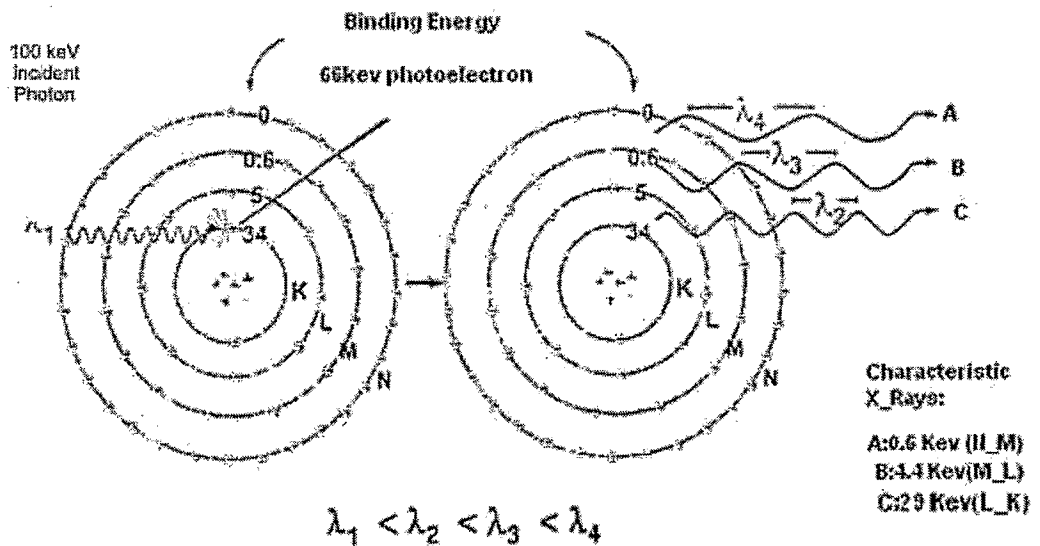
$\tau$  احتمال رخداد اثر فوتوالکتریک بر واحد راهی که فوتون پیموده است،  
 a یک ضریب ثابت، مستقل از  $E_\gamma$  و  $Z$ .

توجه به نکات زیر در برهمکنش فوتوالکتریک از اهمیت بالایی برخوردار است:

(۱) این برهمکنش فقط در الکترون‌های پیوندی اتفاق می‌افتد، چون اصل پایستگی تکانه باید حفظ شود.

(۲) هنگامی که انرژی فوتون ورودی با انرژی الکترون مداری بیشتر باشد، احتمال فوتوالکتریک و پرتاب الکترون افزایش می‌یابد.

(۳) احتمال برهمکنش فوتوالکتریک مستقیماً با  $Z^5 \approx Z^4$  و بطور معکوس با  $(h\nu)^2$  متناسب است. که در شکل زیر شمایی از اثر فوتوالکتریک آمده است.



شکل ۱-۱ (جذب فوتوالکتریک)

در شکل (۱-۱) در سمت چپ برهمکنش فوتوالکتریک میان یک فوتون  $100\text{keV}$  و یک اتم ید می‌باشد.



الکترون لایه  $K$  با انرژی  $66\text{keV}$  که برابر با اختلاف بین انرژی فوتون برخوردی و انرژی پیوندی لایه  $K$  ( $34\text{keV}$ ) می‌باشد، پرتاب می‌شود. اما در سمت راست، خلاء ایجاد شده در لایه  $K$  توسط الکترون لایه  $L$  پر می‌شود. در نتیجه اختلاف میان انرژی پیوندی این دو لایه ( $34 - 5 = 29\text{keV}$ ) اشعه ایکس مشخصه  $K_\alpha$  با انرژی  $29\text{keV}$  ایجاد می‌شود. این عمل ادامه پیدا می‌کند و اشعه‌های ایکس مشخصه دیگری با انرژی کمتر ایجاد می‌کند. توجه به این نکته مهم است که مجموع انرژی اشعه‌های ایکس مشخصه، برابر با فوتوالکترون می‌باشد. اگر چه در این شکل نشان داده نشده، ولی به جای اشعه‌های ایکس مشخصه می‌توانند الکترون‌های اوژه با انرژی‌های متفاوت ساطع شود.

## ۲.۱ پراکندگی کامپتون

پراکندگی کامپتون<sup>۳</sup> برخوردی است بین یک فوتون و یک الکترون آزاد. البته در شرایط متعارفی تمام الکترون‌های موجود در یک محیط آزاد نیستند بلکه مقیدند. با این همه اگر انرژی فوتون از مرتبه  $\text{keV}$  و یا بیشتر باشد، در حالی که انرژی بستگی الکترون از مرتبه  $\text{eV}$  است، می‌توان الکترون را آزاد در نظر گرفت. در این پراکندگی راستای حرکت و انرژی فوتون تغییر می‌کند و مقداری انرژی به الکترون پس زده شده منتقل می‌شود.  $h\nu$  و  $\frac{h}{\lambda}$  به ترتیب انرژی و اندازه حرکت فوتون فرودی،  $h\nu'$  و  $\frac{h}{\lambda'}$  انرژی و اندازه حرکت فوتون پراکنده شده می‌باشند.  $E$  و  $P$  به ترتیب انرژی و اندازه حرکت الکترون پس زده می‌باشد. و با توجه به اینکه سرعت در حدود  $C$  می‌باشد از روابط نسبیتی استفاده می‌کنیم. با توجه به روابط پایستگی داریم:

$$T = h\nu - h\nu', \quad (۳.۱)$$

از آنجا که اندازه حرکت پایسته می‌ماند، بنابراین داریم:

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \varphi + P \cos \theta, \quad (۴.۱)$$

همچنین با توجه به شکل (۲-۱) داریم :

$$\frac{h}{\lambda'} \sin \varphi = P \sin \theta \quad C = \nu\lambda = \nu'\lambda', \quad (5.1)$$

از ترکیب روابط بالا و همچنین حذف  $\varphi$  و همچنین رابطه نسبیتی بین تکانه و انرژی جنبشی داریم:

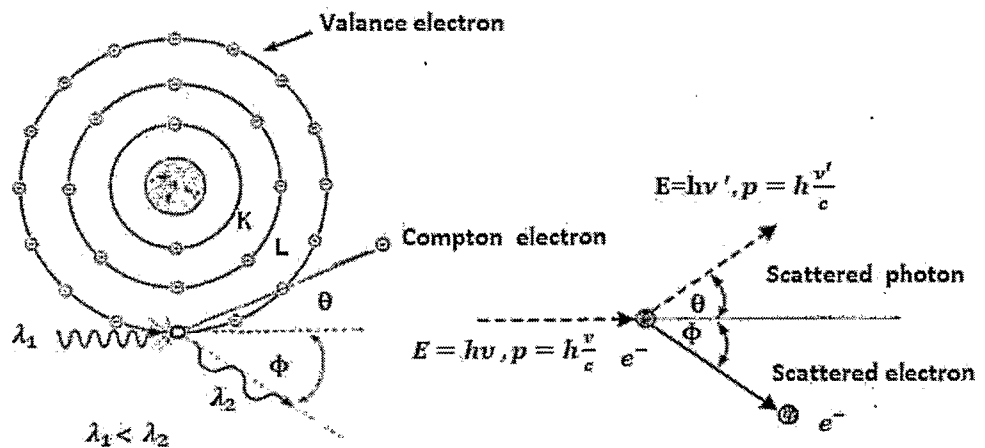
$$T^2 + 2TmC^2 = P^2C^2, \quad (6.1)$$

$$\delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mC}(1 - \cos\theta). \quad (7.1)$$

این فرمول طول موج پراکنده شده را به زاویه پراکندگی فوتون ربط می دهد.

$$\lambda_c = \frac{h}{mC} \approx 0.024 \times 10^{-8} \text{ cm}. \quad (8.1)$$

کمیت بالا طول موج کامپتون نامیده می شود. بیشینه جابجایی برای پراکندگی رو به عقب ( $\theta = 180$ ) رخ می دهد که برای آن  $\delta\lambda = 2\lambda_c$  انرژی بیشینه الکترون متناسب با کمینه انرژی فوتون پراکنده شده است و اینکه انرژی فوتون پراکنده شده در ( $\theta = 0$ ) به بیشینه می رسد به این معناست که برخورد رخ نداده است.



شکل ۱-۲ (پدیده کامپتون)

احتمال پراکندگی کامپتون را ضریب کامپتون یا سطح مقطع کامپتون می نامند. این ضریب تابع پیچیده‌ای از

انرژی فوتون است، اما می‌توان آن را بصورت زیر نوشت:

$$\sigma(m^{-1}) = NZf(E_\lambda), \quad (9.1)$$

که در آن  $\sigma$  احتمال رخداد بر همکنش کامپتونی بر واحد راه پیموده شده است. اگر چگالی اتم را وارد کنیم:

$$\sigma \approx \rho \frac{NA}{A} Zf(E_\gamma) \approx \rho \frac{NA}{A} \frac{Af(E_\gamma)}{2} \approx \rho \frac{f(E_\gamma)NA}{2}. \quad (10.1)$$

در بدست آوردن معادله بالا از این واقعیت استفاده شده که برای اکثر مواد بجز هیدروژن،  $A \approx 2.6Z$  تا  $A \approx 2Z$  است. بنابراین احتمال رخداد پراکندگی، تقریباً مستقل از عدد اتمی است. نکات زیر در مورد پراکندگی کامپتون مهم هستند:

(۱) برهمکنش کامپتون میان فوتون و الکترون آزاد می‌باشد که یک الکترون پس زده و یک فوتون پراکنده می‌شود.

(۲) انرژی جنبشی عبوری بطور مستقیم متناسب با زاویه پراکندگی فوتون است و بطور متوسط با انرژی فوتون افزایش می‌یابد.

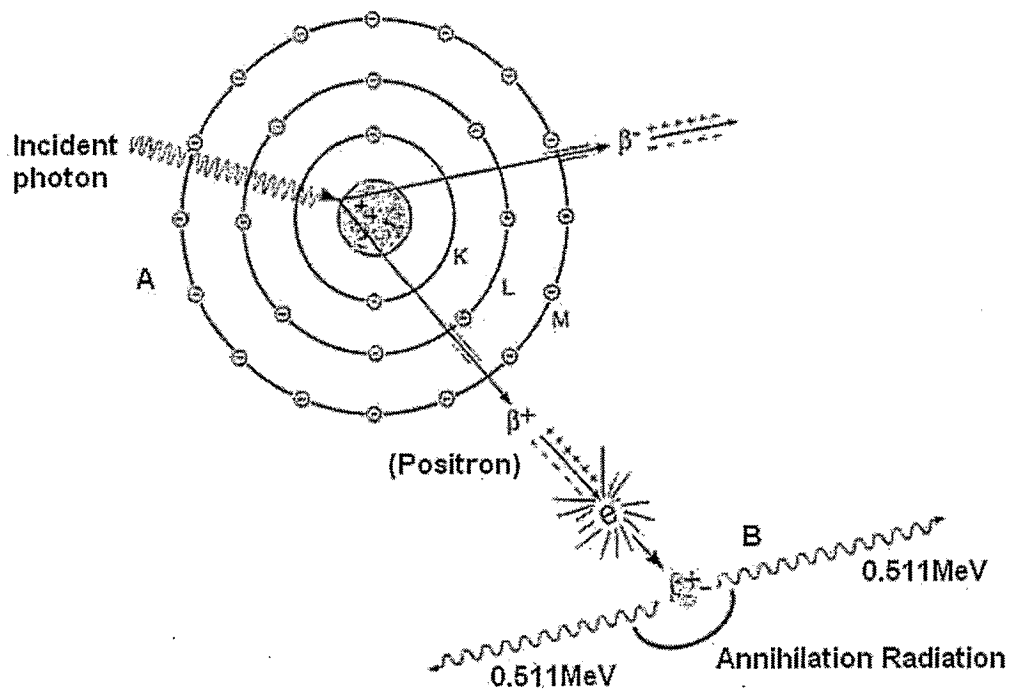
(۳) با افزایش انرژی احتمال بر همکنش کامپتون کاهش می‌یابد و تقریباً مستقل از عدد اتمی است.

### ۳.۱ تولید زوج

هنگامی که انرژی فوتون فرودی بیشتر از  $1.022 \text{ (MeV)}$  باشد، امکان دارد فوتون جذب شود و زوج الکترون - پوزیترون تشکیل شود. که این پدیده را تولید جفت<sup>۴</sup> می‌نامند. یعنی در حقیقت تولید زوج بر همکنشی است بین فوتون و یک هسته. که مثالی از تبدیل انرژی به ماده است هر چند که بر اثر این بر همکنش هسته دستخوش هیچ تغییری نمی‌شود ولی حضور آن برای وقوع تولید زوج ضروری است. در فضای تهی ناپدید شدن یک پرتو  $\gamma$ ، یک زوج الکترون - پوزیترون تولید نمی‌شود. احتمال تولید زوج در انرژی‌های کمتر از  $1.022 \text{ (MeV)}$  صفر است اما در انرژی‌های بالای  $1.022 \text{ (MeV)}$  این احتمال با افزایش انرژی  $h\nu$  افزایش می‌یابد و در ورای  $(\text{MeV})$  10 به مُد غالب بر همکنش تبدیل می‌شود. احتمال تولید جفت یون برای اتمی معین مستقیماً بصورت  $Z^2$

<sup>۴</sup> Pair Production

تغییر می‌کند. انرژی باقی‌مانده پس از تولید به صورت انرژی جنبشی در  $e^-$  و  $e^+$  ظاهر می‌گردد. که در شکل (۳-۱) پدیده تولید زوج نشان داده شده است.



شکل ۳-۱ (دیاگرام A تولید جفت، دیاگرام B نابودی جفت)

بنابراین از روی شکل داریم:

$$1.022(\text{MeV}) + T_e^+ + T_e^- = E_\gamma \quad (11.1)$$

انرژی جنبشی حاصل برابر انرژی فوتون‌ها، منهای  $1.022(\text{MeV})$  است که برای تولید دو جرم سکون مورد نیاز است، که تمامی انرژی حاصل را به تساوی بین الکترون و پوزیترون تقسیم می‌کند.

$$T_e^+ = T_e^- = \frac{1}{2}(E_\gamma - 1.022(\text{MeV})). \quad (12.1)$$

احتمال تولید رخداد تولید زوج به نام ضریب تولید زوج یا سطح مقطع تولید زوج، تابع پیچیده‌ای از  $Z$  و  $E_\gamma$