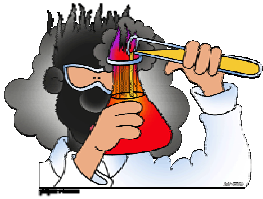
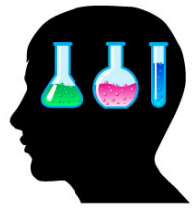
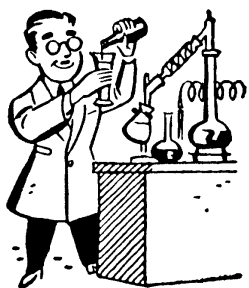
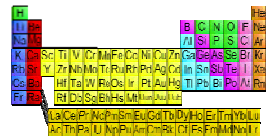
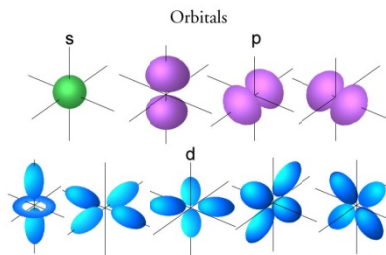
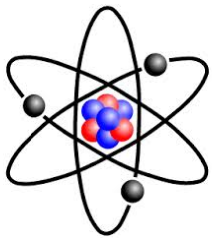
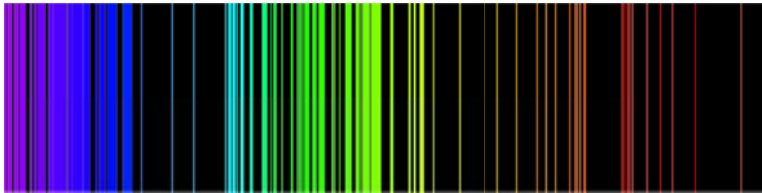
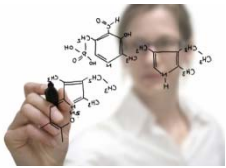




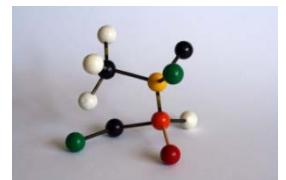
جزوه



«ساختار اتم +A»



مؤلف: مهندس شاهی



## پیش گفتار

جزوه ای که در پیش رو دارید، بخشی از جزوات آموزشی مربوط به شیمی و المپیاد شیمی است. در این جزوه تلاش شده است مطالب مورد نیاز دانش آموزان دبیرستانی در مورد ساختار اتم ارائه شود. جزوه شامل توضیح مفاهیم فیزیکی مورد نیاز، تاریخچه کشف ذرات ریز اتمی و خواص آنها، مدل‌های اتمی، جدول تناوبی، خواص اتمی و تناوبی و توضیح آنها بر مبنای مدل‌های اتمی می باشد. سعی شده است توضیحات شفاف و گویا به همراه مثال‌های فراوان باشند تا به خواننده دید روشنی نسبت به موضوع بدهند. همچنین در آخر جزوه تعداد زیادی تمرین بدون حل گنجانده شده است تا خواننده بتواند درک خود از موضوع را محک بزند. لازم بذکر است جزوه ساختار اتم به دو صورت جزوه  $A$  و جزوه حاضر یا جزوه  $A+$  (150 صفحه ای) آماده شده است که جزوه  $A+$  جزوه  $A$  را در خود دارد و در واقع جزوه  $A$  مطالب پایه ای تر و مهمتر جزوه  $A+$  است. دانش آموزان سال اول دبیرستان که می خواهند خود را برای مرحله اول المپیاد شیمی آماده کنند و مدت زمان کمی برای مطالعه دارند، بهتر است جزوه ساختار اتم  $A$  را برای قبل از مرحله اول در سال اول دبیرستان در نظر بگیرند و مطالعه جزوه  $A+$  را به بعد از مرحله اول موکول کنند. همچنین دانش آموزانی که علاقه مند هستند بصورت پلکانی (از آسان و خلاصه به سخت و مفصل!) مطالب را کار کنند، بهتر است اول جزوه ساختار اتم  $A$  و بعدا جزوه  $A+$  را مطالعه کنند. دانش آموزانی که قبلا مطالعاتی در زمینه ساختار اتم داشته اند یا حوصله تکرار مطالب جزوه  $A$  در جزوه  $A+$  را ندارند!!، می توانند یکراست به سراغ جزوه  $A+$  بروند. مطالعه جزوه ساختار اتم  $A+$  برای مرحله دوم المپیاد شیمی بشدت توصیه می شود. امید است این جزوه و جزوات دیگر برای دانش آموزان و دانشجویان علاقه مند به شیمی مفید واقع شود و به پیشرفت آنان در زمینه یادگیری علم شیمی کمک شایانی بنماید.

مهندس شاهی

## فهرست

شماره صفحه

عنوان

## بخش اول: مقدمه و آشنایی مقدماتی با نیرو و انرژی پتانسیل

- ❖ مقدمه ..... 1
- ❖ آشنایی با نیرو و انرژی پتانسیل (الکتریکی) ..... 1
- نیرو ..... 1
- میدان ..... 4
- کار ..... 5
- نیروهای پایستار و ناپایستار ..... 6
- انرژی پتانسیل ..... 7

## بخش دوم: شناسایی و خواص ذرات زیر اتمی

- ❖ پرتو کاتی ..... 14
- ❖ آزمایش قطره روغن ..... 17
- ❖ پرتو آندی ..... 19
- ❖ دستگاه طیف سنج جرمی ..... 19
- ❖ کشف پروتون ..... 20
- ❖ کشف نوترون ..... 21
- ❖ مدل استاندارد ذرات ..... 21

## بخش سوم: مدل‌های اتمی (قبل از بور)

- ❖ مدل اتمی دالتون ..... 24
- ❖ مدل اتمی تامسون ..... 25
- ❖ آزمایش صفحه طلا و مدل اتمی رادرفورد ..... 26

❖ کمیت های کوانتیده (گسسته) و پیوسته ..... 29

#### بخش چهارم: امواج

❖ امواج ..... 30

❖ اصل برهم نهی امواج ..... 36

❖ امواج ایستا ..... 38

❖ امواج الکترومغناطیسی ..... 41

#### بخش پنجم: مدل اتمی بور و طیف های اتمی

❖ مدل اتمی بور ..... 49

❖ سطح انرژی و شعاع لایه ها در سیستم های تک الکترونی بنا بر مدل اتمی بور ..... 52

❖ طیف های اتمی ..... 58

#### بخش ششم: مدل اوربیتالی اتم

❖ خصلت موجی مواد ..... 68

❖ عدم قطعیت ..... 69

❖ اصل عدم قطعیت هایزنبرگ ..... 71

❖ مدل اوربیتالی اتم ..... 75

❖ اعداد و قیدهای کوانتومی ..... 80

❖ انواع زیرلایه ها و اوربیتالها ..... 81

❖ عدد کوانتومی مغناطیسی اسپینی ..... 87

❖ اصل طرد پاولی ..... 88

❖ اثر پوششی و بار موثر هسته ..... 89

❖ قاعده حداکثر چندگانگی هوند ..... 96

❖ اصل بناگذاری آفا و آرایش الکترونی عناصر ..... 96



❖ آرایش الکترونی یونها ..... 99

بخش هفتم: جدول تناوبی و خواص اتمی و تناوبی

❖ جدول تناوبی ..... 103

❖ بار موثر هسته ..... 114

❖ انرژی یونش ..... 115

• تغییرات انرژیهای یونش متوالی یک عنصر ..... 115

• تغییرات نخستین انرژی یونش در عناصر مختلف ..... 120

❖ انرژی الکترونیخواهی ..... 124

❖ شعاع های اتمی و یونی ..... 127

❖ رابطه قطری ..... 131

❖ اثر  $d$  و  $f$  یا انقباض اسکاندیدی و لانتانیدی ..... 132

❖ آزمایش اشترن-گرلاخ ..... 134

❖ خصلت مغناطیسی مواد ..... 135

بخش هشتم: تمارین

❖ تمارین بخش مقدمه و آشنایی مقدماتی با نیرو و انرژی پتانسیل ..... 138

❖ تمارین بخش شناسایی و خواص ذرات زیر اتمی ..... 140

❖ تمارین بخش مدل های اتمی قبل از بور ..... 141

❖ تمارین بخش امواج ..... 141

❖ تمارین بخش مدل اتمی بور و طیف های اتمی ..... 142

❖ تمارین بخش مدل اوربیتالی اتم ..... 144

❖ تمارین بخش جدول تناوبی و خواص اتمی و تناوبی ..... 147

## مقدمه

در سده های هفدهم و هجدهم نگرش دانشمندان به علمی مثل شیمی شروع به تغییرات اساسی نمود و منجر به پیشرفت های شگرفی در این علوم شد. ساختار مواد نیز از این امر مستثنی نبود. توجه دانشمندان به ماده و ذرات تشکیل دهنده آن و انجام آزمایشهای گوناگون منجر به توسعه شناخت ما از ماهیت ساختار مواد و پیدایش تئوریهای گوناگون در این زمینه بخصوص در سده های نوزدهم و بیستم شد. این افزایش شناخت بر توسعه تکنولوژی و دیگر علوم تاثیر فراوانی گذاشت و خود نیز از توسعه آنها برای تکامل بهره جست. امروزه شناخت ما از ساختار اتم و مواد شاید گرچه کاملا بدون نقص نباشد، اما قطعا بحدی تکامل یافته است که درک روشنی از بسیاری از پدیده های طبیعی به ما می دهد و بعنوان یک ابزار بسیار قدرتمند و تاثیر گذار در علوم، تکنولوژی و صنعت روز بکار می رود. در این راستا آگاهی از ساختار اتم و قوانین و تئوریهای مربوط برای علمی مثل شیمی یک امر حیاتی و واجب است. در ادامه با مطالب پایه ای در مورد ساختار اتم آشنا خواهیم شد. از آنجائیکه آشنایی با مطالب فیزیکی مرتبط مثل نیرو و انرژی پتانسیل و همچنین تاریخچه آزمایشها و تئوریهای مربوطه برای درک درست و مفهومی قوانین و تئوریهایی که امروزه بکار می روند، ضروری است، در ابتدا مطالب فیزیکی مورد نیاز و تاریخچه شرح داده شده است و سپس تئوریهای بروز و کاربرد آنها بیان شده اند.

## آشنایی با نیرو و انرژی پتانسیل (الکتریکی)

از آنجائیکه درک مفهومی و علمی تئوریها و مدلهای اتمی و خواص و رفتار اتمها نیازمند داشتن آشنایی مقدماتی با مبحث نیرو و انرژی پتانسیل الکتریکی است، در ابتدا با نیروهای الکتریکی و برخی خواص آنها و انرژی پتانسیل به صورت مقدماتی آشنا می شویم.

## نیرو

در فیزیک، یک نیرو (*Force*) هر گونه تاثیری است که باعث شود برای یک شی تغییر خاصی در حرکت، جهت یا هندسه رخ دهد. بعبارت دیگر، یک نیرو می تواند باعث شود یک شی جرم دار تغییر سرعت بدهد (که شامل شروع به حرکت از حال سکون نیز می شود) یا می تواند باعث شود یک شی انعطاف پذیر تغییر شکل بدهد یا می تواند منجر به هر دو شود. بطور شهودی نیرو می تواند کشش یا هل بین دو شی در نظر گرفته شود. نیرو یک کمیت برداری است و هم اندازه و هم جهت برای توصیف کامل یک نیرو بایستی مشخص شوند. نیرو در سیستم *SI* با واحد نیوتن (*N*) اندازه گیری می شود و معمولا با سمبل *F* نشان داده می شود. در ضمن بایستی توجه داشت که بنابر قانون سوم نیوتن ما همواره با یک جفت نیرو بصورت عمل و عکس العمل سر و کار داریم. بعبارتی اگر جسم 1 به جسم 2 نیرویی برابر *F* اعمال کند، جسم 2 هم به جسم 1 نیرویی دقیقا برابر *F* در جهت خلاف اعمال خواهد کرد. بعنوان مثال موقع ضربه زدن به توپ با پا، باندازه همان نیرویی که از طرف پا به توپ وارد می شود، از طرف توپ به پا نیرو در جهت معکوس وارد می شود.

نیروهای موجود در طبیعت به 4 دسته ی: نیروهای الکتریکی و مغناطیسی (الکترومغناطیس)، نیروهای گرانشی، برهم کنش های هسته ای قوی و برهم کنش های هسته ای ضعیف طبقه بندی می شوند.

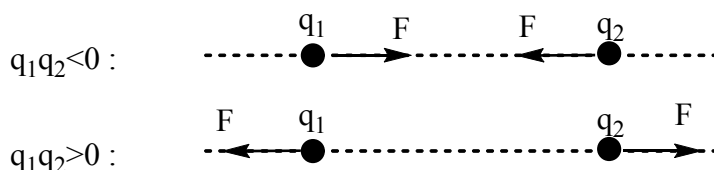
برهم کنش های هسته ای قوی و ضعیف، برهم کنش های مربوط به داخل هسته بوده و در تحلیل ساختار هسته و واکنش های هسته ای حائز اهمیت هستند. این برهم کنش ها در تعیین آرایش الکترونی اتم ها یا ساختار مولکول ها و مواد نقش ندارند.

نیروی گرانشی نیرویی است که دو ذره یا جسم به علت داشتن جرم به همدیگر وارد می کنند. اندازه نیروی گرانشی تنها زمانی قابل توجه و دارای اهمیت است که اجسام یا ذرات دارای جرم فوق العاده زیادی باشند. در دنیای اتم ها و مولکول ها به علت ناچیز بودن جرم ذرات نیروی گرانشی ناچیز است و این نیرو نیز تقریباً نقشی در تعیین آرایش الکترونی اتم ها، ساختار مولکول ها و مواد ندارد.

تمام نیروهای اطراف ما در زندگی روزمره به استثنای نیروی وزنمان از جنس نیروهای الکتریکی و مغناطیسی هستند. مثلاً نیروی اصطکاک، نیروی عمود بر سطح، نیروی کشش نخ، نیروی کشسانی همه از جنس نیروهای الکتریکی و مغناطیسی هستند. این نیروها مهم ترین نیروها در تعیین ساختار اتم ها، مولکول ها و مواد هستند.

به طور خیلی ساده نیروهای الکتریکی نیروهایی هستند که اجسام یا ذرات باردار به خاطر داشتن بار به هم وارد می کنند و نیروهای مغناطیسی نیروهایی هستند که آهن رباها یا قطب های مغناطیسی به هم وارد می کنند. در فیزیک نیروهای الکتریکی و مغناطیسی دو روی یک سکه هستند و با معادلات یکسانی ( روابط ماکسول ) رفتار آنها در مبحثی از فیزیک به نام الکتروستاتیک بررسی می شود. الکتروستاتیک ساکن که حالت خاصی از الکتروستاتیک است، بطور خلاصه به بررسی اجسام باردار و تاثیرات آنها بر روی هم در حالت سکون می پردازد. در سطح ساده می توان از روابط و معادلاتی که در الکتروستاتیک ساکن برای توصیف این نیروها استفاده می شود، برای درک بهتر نحوه ی تعیین ساختار اتم ها، مولکول ها و مواد توسط این نیروها استفاده کرد.

در مبحث الکتروستاتیک یا الکتروستاتیک ساکن مطرح می شود که دو ذره باردار ساکن با اندازه بارهای  $q_1$  و  $q_2$  به فاصله  $r$  از هم به هم نیروهای الکتریکی وارد می کنند که راستای این نیروها در راستای خط واصل دو ذره باردار قرار دارند و جهت آنها اگر بارها ناهمنام ( $q_1q_2 < 0$ ) معادل با یک بار مثبت و یک بار منفی باشند، به صورت جاذبه و اگر بارها همنام ( $q_1q_2 > 0$ ) معادل با دو بار مثبت یا دو بار منفی باشند، به صورت دافعه است:



اندازه آنها نیز از رابطه زیر محاسبه می شود :

$$F = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \times \frac{q_1 \times q_2}{r^2} = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$F$ : اندازه نیروی الکتریکی بر حسب نیوتن (N)

قدر مطلق اندازه بارها بر حسب کولن (C) :  $q_1$  و  $q_2$

$r$ : فاصله مراکز ذرات باردار از هم بر حسب متر (m)

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{m^2 \cdot N} \text{ (ثابت جهانی )}$$

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \simeq 9 \times 10^9 \frac{m^2 \cdot N}{C^2}$$

مثال: در پایدار ترین حالت اتم هیدروژن می توان به طور تقریبی فرض کرد که الکترون در فاصله میانگین  $0.529 \text{ \AA}$  از هسته قرار دارد. نیروی الکتریکی بین الکترون و هسته را برای اتم هیدروژن بر حسب نیوتن به دست آورید.

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} \text{ و } q_e = -1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \text{ و } q_p = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

حل:

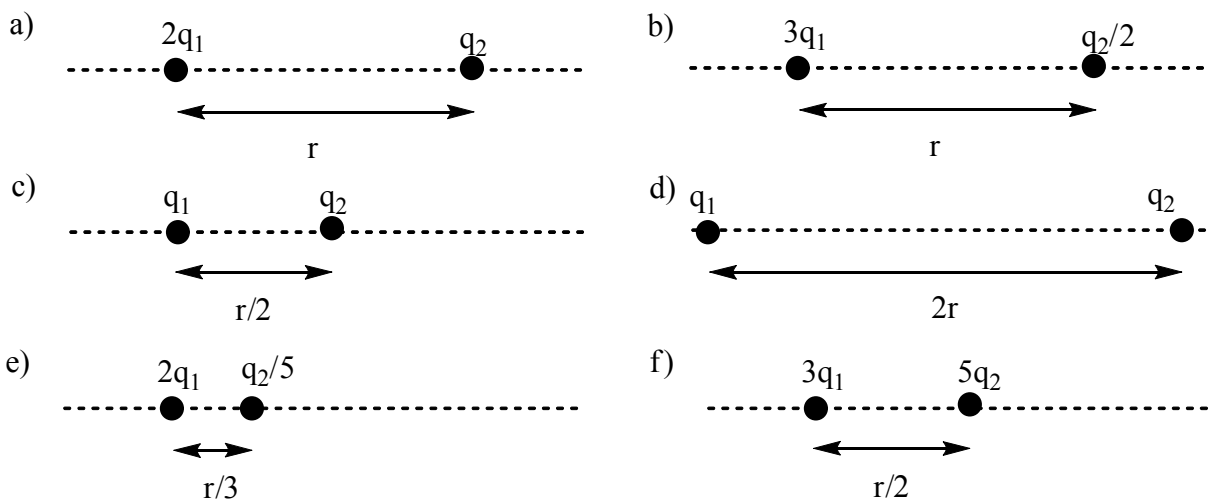
$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19}) \times (1.6 \times 10^{-19})}{(0.529 \times 10^{-10})^2} = 8.233 \times 10^{-8} \text{ N}$$

مقدار این نیرو برای ما ناچیز است، اما برای ذره ای به کوچکی الکترون فوق العاده زیاد است. میتوان ادعا نمود که برای تعیین تاثیر نیرو نسبت اندازه نیرو به جرم معیار بهتری در مقایسه با فقط اندازه نیرو است. در اینصورت تاثیر یک چنین نیرویی برای الکترون با توجه به جرمش ( $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ) معادل تاثیر یک نیروی  $4.5 \times 10^{24}$  نیوتنی بر روی یک انسان با جرم 50 کیلوگرم است.

\*\*\*\*\*

با توجه به فرمول قبلی، اندازه نیروی الکتریکی متناسب با حاصل ضرب اندازه بارهاست و با مجذور فاصله بین آنها رابطه عکس دارد ( $F \propto q_1 q_2 / r^2$ ). مثال زیر از این نکته استفاده می کند.

مثال: دو بار ذره ای  $q_1$  و  $q_2$  به فاصله  $r$  از هم به هم نیروی  $F$  را وارد می کنند. برای هریک از حالات زیر مقدار نیرو را بر حسب  $F$  به دست آورید:



حل:

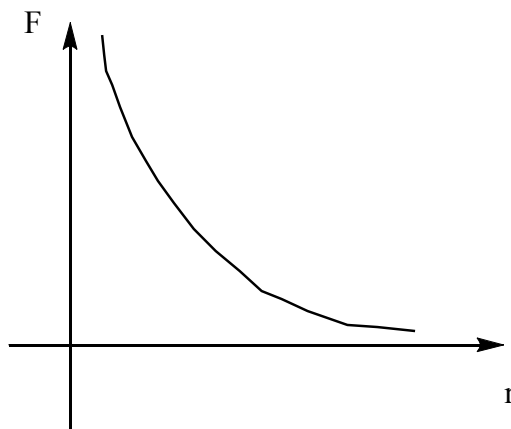
a)  $2F$    b)  $1.5F$    c)  $4F$    d)  $0.25F$    e)  $18F/5$    f)  $60F$

\*\*\*\*\*

مثال: فرض کنید دو بار  $q_1$  و  $q_2$  با اندازه بار ثابت به فاصله  $r$  از هم قرار دارند. در یک نمودار به طور تقریبی اندازه نیروی الکتریکی را بر حسب فاصله آنها از هم رسم کنید.

حل:

با توجه به اینکه اندازه نیروی الکتریکی ( $F$ ) با فاصله ( $r$ ) رابطه عکس دارد، با کاهش فاصله اندازه نیرو افزایش می یابد و بالعکس با افزایش فاصله اندازه نیرو کاهش می یابد. بنابراین نمودار به طور تقریبی به صورت زیر خواهد بود:



\*\*\*\*\*

### میدان

در فیزیک، میدان یک کمیت فیزیکی است که برای هر نقطه از فضا و زمان دارای مقدار است. میدانها می توانند برای توصیف کیفی و کمی تاثیرات الکتریکی و مغناطیسی بکار روند. ذرات و اجسام باردار و آهنرباهای متغیر با زمان روی ذرات باردار (چه در حال حرکت و چه در حالت سکون) تاثیرات الکتریکی دارند و به آنها نیروهای الکتریکی وارد می کنند. تاثیرات الکتریکی ذرات و اجسام باردار و آهنرباهای متغیر با زمان می توانند با میدان الکتریکی مربوطه توصیف شوند. میدان الکتریکی یک شی در هر نقطه از فضا و زمان نیروی الکتریکی است که آن شی به یک ذره باردار مثبت ساکن با بار واحد (برابر یک) در آن نقطه از فضا و زمان وارد می کند. بعنوان مثال از آنجائیکه یک ذره باردار با اندازه بار برابر  $q$  با توجه به رابطه  $F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$  به یک ذره مثبت یک کولنی به فاصله  $r$  نیروی الکتریکی برابر  $F = K \frac{q}{r^2}$  وارد می کند، میدان الکتریکی یک ذره باردار با اندازه بار برابر  $q$  در فاصله  $r$  برابر  $K \frac{q}{r^2}$  خواهد بود. دقت داشته باشید که برای حضور میدان الکتریکی در یک نقطه به حضور ذره باردار مثبت ساکن با بار واحد در آن نقطه نیازی نیست. بعبارت دیگر در صورت حضور ذرات و اجسام باردار و آهنرباهای متغیر با زمان، میدان های الکتریکی آنها حضور خواهند داشت بدون آنکه نیازی به حضور ذرات باردار دیگر برای مشاهده تاثیرات الکتریکی آنها باشد. در صورت حضور ذرات باردار در میدان الکتریکی یک شی، وجود میدان می تواند اثر خود را مثلا با وارد کردن نیروی الکتریکی به آنها نشان دهد.

با توجه به تعریف میدان واضح است که اشیا با میدانهای الکتریکی قویتر تاثیرات الکتریکی بیشتری دارند ( مثلا نیروهای الکتریکی بزرگتری به اجسام باردار دیگر وارد می کنند) و بالعکس. همچنین یک شی که میدان الکتریکی ایجاد می کند، در نقاطی که میدان الکتریکی قویتری ایجاد می کند، تاثیرات الکتریکی بیشتری دارد و بالعکس. بعنوان مثال برای ذرات باردار با اندازه بار برابر  $q$ ، ذراتی که  $q$  بزرگتری دارند، میدان قویتری دارند و برای یک ذره باردار بخصوص قدرت میدان در نقاط نزدیکتر به ذره باردار بیشتر است. بنابراین برای یک ذره باردار با افزایش  $q$  و کاهش فاصله تاثیرات الکتریکی روی ذرات باردار دیگر افزایش می یابد.

تمرین: درک شما از معنی و مفهوم جمله « با افزایش بار هسته فرار الکترون از میدان هسته سخت تر می شود » چیست؟

\*\*\*\*\*

آهنرباها و جریان های الکتریکی ( بارهای در حال حرکت) روی آهنرباهای دیگر تاثیرات مغناطیسی دارند و به آنها نیروهای مغناطیسی وارد می کنند. مشابه میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی برای توصیف تاثیرات مغناطیسی آهنرباها و جریان های الکتریکی می تواند بکار گرفته شود.

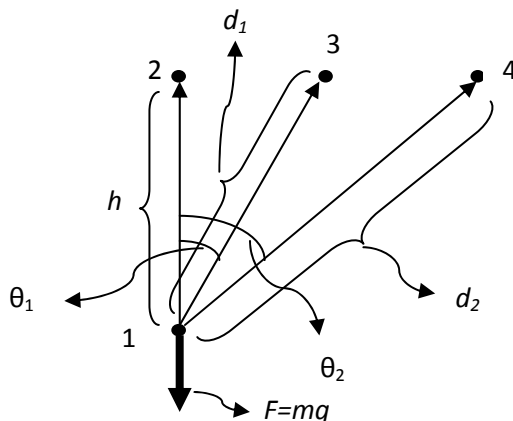
## کار

کار به صورت حاصل ضرب نیرو در جابه جایی در راستای نیرو یا به صورت جابه جایی در نیرو در راستای جابجایی تعریف می شود. کار یک کمیت نرده ای است و معمولاً با  $W$  ( حرف اول کلمه انگلیسی  $Work$  به معنای کار) نشان داده می شود و دارای واحد انرژی مثل ژول یا کالری است. در صورتیکه یک جسم تحت تاثیر یک نیروی ثابت با اندازه برابر  $F$  جابجایی در راستای یک خط با اندازه برابر  $d$  داشته باشد، مقدار کار انجام شده بر روی جسم از رابطه زیر می تواند محاسبه شود:

$$W = Fd \cos \theta$$

در رابطه بالا  $\theta$  زاویه بین بردار نیرو و بردار جابجایی است.

مثال: کار نیروی وزن را موقع جابجایی جسم با وزن  $mg$  از نقطه  $1$  به نقاط  $2$  و  $3$  و  $4$  با توجه به شکل زیر بدست آورید.



حل:

$$1 \rightarrow 2 : W = Fd \cos \theta = mgh \times \cos 180 = -mgh$$

$$1 \rightarrow 3 : W = Fd \cos \theta = mgd_1 \times \cos (\pi - \theta_1) = -mgd_1 \cos \theta_1 = -mgh$$

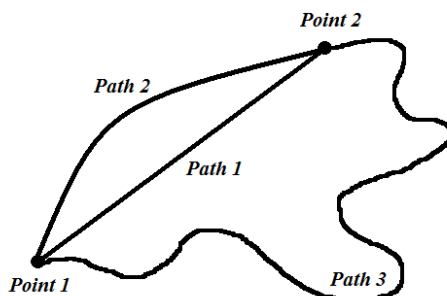
$$1 \rightarrow 4 : W = Fd \cos \theta = mgd_2 \cos (\pi - \theta_2) = -mgd_2 \cos \theta_2 = -mgh$$

\*\*\*\*\*

با توجه به فرمول  $W = Fd \cos(\theta)$  در صورتیکه نیرو و جابجایی هم جهت ( $90^\circ > \theta \geq 0^\circ$ ) باشند  $W > 0$ ، در صورتیکه نیرو و جابجایی غیر هم جهت ( $180^\circ \geq \theta > 90^\circ$ ) باشند  $W < 0$  و در صورتیکه نیرو و جابجایی بر هم عمود ( $\theta = 90^\circ$ ) باشند  $W = 0$  خواهد بود.

## نیروهای پایستار و ناپایستار

نیروها به دو دسته ی نیروهای پایستار و غیر پایستار تقسیم می شوند. نیروهای پایستار نیروهایی هستند که کار حاصل از آنها تنها تابعی از موقعیت مکانی نقاط اولیه و نهایی جابجایی است و مستقل از مسیر پیموده شده است. نیروهای ناپایستار نیروهایی هستند که کار حاصل از آنها به مسیر پیموده شده نیز بستگی دارد. از نیروهای پایستار می توان به نیروی گرانشی، الکتریکی، مغناطیسی و ... اشاره کرد. از نیروهای ناپایستار می توان اصطکاک را نام برد. بعنوان مثال شکل زیر را در نظر بگیرید. فرض کنید جسمی می تواند از طریق هر سه مسیر یک، دو و سه از نقطه یک به نقطه دو برود.

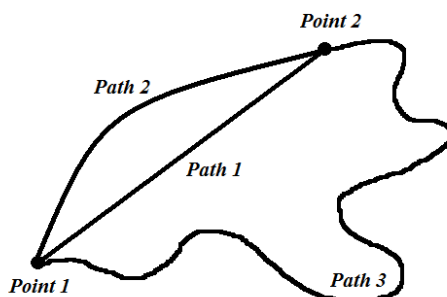


$W_{1 \rightarrow 2I}$  را کار نیرو موقع جابجایی جسم از نقطه یک به نقطه دو از طریق مسیر یک،  $W_{1 \rightarrow 2II}$  را کار نیرو موقع جابجایی جسم از نقطه یک به نقطه دو از طریق مسیر دو و  $W_{1 \rightarrow 2III}$  را کار نیرو موقع جابجایی جسم از نقطه یک به نقطه دو از طریق مسیر سه در نظر می گیریم. برای نیروی پایستار مقدار این سه کار با هم برابر است، در حالیکه برای نیروی ناپایستار مقدار این سه کار لزوماً با هم برابر نیست. بعبارتی داریم:

$$W_{1 \rightarrow 2I} = W_{1 \rightarrow 2II} = W_{1 \rightarrow 2III} \quad \text{برای نیروی پایستار}$$

$$W_{1 \rightarrow 2I} \neq W_{1 \rightarrow 2II} \neq W_{1 \rightarrow 2III} \quad \text{برای نیروی ناپایستار}$$

مثال : جابجایی گچ از نقطه 1 تخته به نقطه 2 تخته طبق سه مسیر مختلف نشان داده شده را در نظر بگیرید (مطابق شکل زیر). یکبار نیروی وزن گچ و یکبار نیروی اصطکاک بین گچ و تخته را در نظر بگیرید. برای هر نیرو، مقدار کار برای سه مسیر مختلف را با هم مقایسه کنید.



حل:

$$\Rightarrow W_{1 \rightarrow 2I} = W_{1 \rightarrow 2II} = W_{1 \rightarrow 2III} = -mgh$$

مسافت مسیر پیموده شده  $\propto$  کار نیروی اصطکاک

$$\Rightarrow W_{1 \rightarrow 2I} \neq W_{1 \rightarrow 2II} \neq W_{1 \rightarrow 2III}$$

\*\*\*\*\*

### انرژی پتانسیل

برای ذرات، اجسام یا سیستم‌هایی که تحت تاثیر نیروهای پایستار هستند، می توان انرژی پتانسیل تعریف کرد و با توجه به موقعیت ذره، جسم یا سیستم به انرژی پتانسیل مقدار نسبت داد. اختلاف انرژی پتانسیل بین دو نقطه برابر منفی کاریست که آن نیروی پایستار هنگام جابجایی بین آن دو نقطه انجام می دهد. مثلا اگر به یک جسم در نقطه یک انرژی پتانسیلی برابر  $U_1$  مقدار انرژی پتانسیل در نقطه  $I$  و در نقطه دو انرژی پتانسیلی برابر  $U_2$  مقدار انرژی پتانسیل در نقطه  $2$  نسبت دهیم، داریم:

$$U_2 - U_1 = -W_{1 \rightarrow 2}$$

$W_{1 \rightarrow 2}$  کاریست که نیروی متناظر با آن انرژی پتانسیل موقع جابجایی از نقطه  $I$  به نقطه  $2$  انجام می دهد.

مثال: یک جسم جرم دار ( با جرم  $m$ ) در نزدیکی سطح زمین در نظر بگیرد. بعلت وجود نیروی گرانشی با زمین ( که یک نیروی پایستار است) برای این جسم می توان انرژی پتانسیل گرانشی در نظر گرفت. اختلاف انرژی پتانسیل گرانشی نسبت داده شده به این جسم بین دو نقطه یک و دو با اختلاف ارتفاع برابر  $h$  را بر حسب  $m, h$  و هر پارامتر دیگر مورد نیاز بدست آورید.

حل:

مقدار کار نیروی گرانشی برای جابجایی بین دو نقطه یک و دو در نزدیکی سطح زمین با اختلاف ارتفاع برابر  $h$  با توجه به مثالهای قبلی برابر است با:  $W_{1 \rightarrow 2} = -mgh$ . بنابراین داریم:

$$U_2 - U_1 = -W_{1 \rightarrow 2}, W_{1 \rightarrow 2} = -mgh \Rightarrow U_2 - U_1 = mgh$$

\*\*\*\*\*

دقت داشته باشید زمانی در نظر گرفتن انرژی پتانسیل و نسبت دادن مقدار به آن معنی خواهد داشت که اختلاف انرژی پتانسیل بین دو نقطه ثابت باشد. با توجه به رابطه اختلاف انرژی پتانسیل و کار می توان نتیجه گرفت که کار نیرو بین دو نقطه بایستی ثابت و مستقل از مسیر باشد. این مطلب برای نیروهای پایستار صادق است و بنابراین تنها برای نیروهای پایستار می توان انرژی پتانسیل تعریف کرد. مثلا برای نیروی گرانشی می توان انرژی پتانسیل تعریف کرد، اما برای نیروی اصطکاک نمی توان انرژی پتانسیل تعریف کرد. نیروی الکتریکی نیز نیرویی پایستار است و می توان برای آن انرژی پتانسیل در نظر گرفت که انرژی پتانسیل الکتریکی نامیده می شود.

با توجه به اینکه مقدار کار با حاصلضرب اندازه نیرو و مقدار جابجایی در راستای هم رابطه مستقیم دارد و اختلاف انرژی پتانسیل بین دو نقطه برابر منفی کار نیرو بین آن دو نقطه است، می توان نتیجه گرفت که اندازه تغییرات انرژی پتانسیل بین دو نقطه با حاصلضرب اندازه نیرو و مقدار جابجایی در راستای هم رابطه مستقیم دارد و با افزایش مقدار نیرو بازای یک مقدار جابجایی مشخص یا با افزایش مقدار جابجایی بازای یک مقدار نیرو مشخص، تغییرات انرژی پتانسیل افزایش می یابد.



مثال: یک الکترون در فاصله  $r$  از یک هسته تنها قرار دارد. این الکترون را باندازه یک پیکومتر به هسته نزدیک می کنیم. برای کدام  $r$ :  $r=10pm$  یا  $r=100pm$  تغییرات انرژی پتانسیل بیشتر است؟ چرا؟  
حل:

برای دو حالت یاد شده جابجایی یکسان اما مقدار نیروها متفاوت است. تغییرات انرژی پتانسیل برای حالتی که نیرو بزرگتر است، بیشتر است. چون با کاهش فاصله اندازه نیروهای الکتریکی بیشتر می شود، برای  $r=10pm$  تغییرات انرژی پتانسیل بیشتر است.

\*\*\*\*\*

مثال: در کدام مورد اندازه تغییرات انرژی پتانسیل بیشتر است؟

الف) بالا بردن یک جسم باندازه یک متر یا بالا بردن همان جسم باندازه ده متر  
ب) بالا بردن یک جسم یک کیلوئی باندازه یک متر یا بالا بردن جسم ده کیلوئی باندازه همان یک متر  
حل:

با توجه به مطالب یاد شده داریم: الف) بالا بردن باندازه ده متر      ب) بالا بردن جسم ده کیلوئی

\*\*\*\*\*

انرژی پتانسیل تابعی از موقعیت جسم است و با تغییر موقعیت تغییر می کند. انرژی پتانسیل می تواند به صورت انرژی نهفته شده در جسم تعبیر شود که تغییر موقعیت مقدار آن را تغییر دهد. افزایش انرژی پتانسیل بیانگر افزایش انرژی نهفته شده در جسم است و با توجه به پایستگی انرژی نیازمند گرفته شدن انرژی توسط جسم از محیط اطراف یا تبدیل و کاهش دیگر صورت های انرژی موجود در جسم مثل انرژی جنبشی است. کاهش انرژی پتانسیل بیانگر کاهش انرژی نهفته شده در جسم است و با توجه به پایستگی انرژی همراه با آزاد کردن انرژی توسط جسم به محیط اطراف یا تبدیل و افزایش دیگر صورت های انرژی در جسم مثل انرژی جنبشی خواهد بود.  
با توجه به فرمول

$$U_2 - U_1 = -W_{1 \rightarrow 2} \Rightarrow U_2 - U_1 = -(Fd \cos\theta)_{1 \rightarrow 2}$$

می توان نتیجه گیری های زیر را انجام داد :

\* نزدیک شدن تحت اثر جاذبه: نیرو و جابجایی هم جهت هستند، پس:

$$(\cos\theta > 0) \Rightarrow W_{1 \rightarrow 2} > 0 \Rightarrow U_2 - U_1 < 0$$

پس همراه با آزاد کردن انرژی و کاهش انرژی پتانسیل خواهد بود.

\* دور شدن تحت اثر جاذبه: نیرو و جابجایی غیرهم جهت هستند، پس:

$$(\cos\theta < 0) \Rightarrow W_{1 \rightarrow 2} < 0 \Rightarrow U_2 - U_1 > 0$$

پس همراه با گرفتن انرژی و افزایش انرژی پتانسیل خواهد بود.

\* نزدیک شدن تحت اثر دافعه: نیرو و جابجایی غیرهم جهت هستند، پس:

$$(\cos\theta < 0) \Rightarrow W_{1 \rightarrow 2} < 0 \Rightarrow U_2 - U_1 > 0$$

پس همراه با گرفتن انرژی و افزایش انرژی پتانسیل خواهد بود.

\* دور شدن تحت اثر دافعه: نیرو و جابجایی هم جهت هستند، پس:

$$(\cos\theta > 0) \Rightarrow W_{1 \rightarrow 2} > 0 \Rightarrow U_2 - U_1 < 0$$

پس همراه با آزاد کردن انرژی و کاهش انرژی پتانسیل خواهد بود.  
مثال: چرا فرآیندهای یونش اتم ها همواره نیازمند صرف انرژی است؟  
حل:

در فرآیند یونش اتم ها الکترون را از اتم با وجود جاذبه ای که بین آن دو وجود دارد، دور می کنیم. بنابراین دور شدن تحت اثر جاذبه را داریم که همراه با گرفتن انرژی و افزایش انرژی پتانسیل خواهد بود.

\*\*\*\*\*

مثال: چرا اضافه کردن الکترون به یک اتم خنثی در فاز گازی شکل (فرآیند الکترونخواهی اول) برای برخی اتمها همراه با آزاد کردن انرژی و برای برخی دیگر همراه با صرف کردن انرژی است؟  
حل:

الکترون جدید اضافه شده با هسته جاذبه الکتریکی و با سایر الکترونها دافعه های الکتریکی برقرار خواهد کرد. در صورتیکه جاذبه ها مهمتر (قویتر) از دافعه ها باشند، بصورت خالص نزدیک شدن تحت اثر جاذبه خواهیم داشت که همراه با آزاد کردن انرژی و کاهش انرژی پتانسیل خواهد بود. در صورتیکه دافعه ها مهمتر (قویتر) از جاذبه ها باشند، بصورت خالص نزدیک شدن تحت اثر دافعه خواهیم داشت که همراه با گرفتن انرژی و افزایش انرژی پتانسیل خواهد بود. بنابراین واکنش الکترون خواهی هم ممکن است انرژی آزاد کند و هم ممکن است انرژی مصرف کند. آزاد شدن انرژی بیانگر اهمیت بیشتر جاذبه الکترون جدید با هسته است در حالیکه صرف کردن انرژی بیانگر اهمیت بیشتر دافعه الکترون جدید با دیگر الکترونهاست.

\*\*\*\*\*

مثال: یک چرخه آب به صورت زیر در نظر بگیرید:

الف) تبخیر آب از سطح دریا (دور شدن مولکولهای آب از هم با وجود جاذبه های بین مولکولی)  
ب) صعود بخار آب به طبقات بالای جو (دور شدن مولکولهای آب از زمین با وجود جاذبه های گرانشی)  
ج) میعان آب در طبقات بالای جو و تشکیل قطرات باران (نزدیک شدن مولکولهای آب بهم هم با وجود جاذبه های بین مولکولی)  
د) سقوط قطرات باران به سطح دریا (نزدیک شدن مولکولهای آب به زمین با وجود جاذبه های گرانشی)  
مشخص کنید در هر مرحله انرژی پتانسیل مولکولهای آب افزایش می یابد یا کاهش؟ همچنین مشخص کنید هر مرحله همراه با آزاد کردن یا گرفتن انرژی است؟  
حل:

با توجه به مطالب یاد شده داریم:

الف) افزایش - گرفتن (ب) افزایش - گرفتن (ج) کاهش - آزاد شدن (د) کاهش - آزاد شدن

\*\*\*\*\*

فرآیندهای همراه با کاهش انرژی پتانسیل معمولا براحتی به خودی خود رخ می دهند در حالیکه فرآیندهای همراه با افزایش انرژی پتانسیل معمولا نیازمند عامل خارجی برای تامین انرژی مورد نیاز هستند و بنابراین معمولا به خودی خود رخ نمی دهند. بنابراین در صورت بالا بودن سطح انرژی پتانسیل معمولا فرآیندهای خودبخودی فراوانی برای تغییر موقعیت یا حالت و کاهش انرژی پتانسیل وجود خواهد داشت و جسم یا سیستم با سطح انرژی پتانسیل بالا براحتی تغییر موقعیت یا حالت خواهد داد و در

حالت با سطح انرژی پتانسیل بالا دوام نخواهد آورد. بطور بالعکس در صورت پایین بودن سطح انرژی پتانسیل معمولاً امکان تغییر موقعیت یا حالت و افزایش انرژی پتانسیل وجود نخواهد داشت و جسم یا سیستم با سطح انرژی پتانسیل پایین براحتی تغییر موقعیت یا حالت نخواهد داد و در حالت با سطح انرژی پتانسیل پایین دوام خواهد آورد. عبارتی می توان گفت که پایداری با سطح انرژی پتانسیل رابطه عکس دارد و با افزایش سطح انرژی پتانسیل پایداری کاهش می یابد و بالعکس.

مثال: پایداری الکترون اتم هیدروژن در مدار اول بیشتر است یا در مدار دوم؟

حل:

در مدار اول الکترون در فاصله نزدیک تری نسبت به هسته قرار دارد و بنابراین الکترون در مدار اول سطح انرژی پتانسیل کمتر و پایداری بیشتری دارد.

\*\*\*\*\*

متداول است که یک نقطه یا سطح به عنوان نقطه یا سطح مرجع در نظر گرفته شود و انرژی پتانسیل نقطه یا سطح مرجع صفر فرض شود. در این صورت می توان برای مابقی نقاط با مقایسه نسبت به مرجع و در نظر گرفتن فرمول بالا مقدار عددی برای انرژی پتانسیل بدست آورد. مثلاً برای انرژی پتانسیل گرانشی اجسام در نزدیکی سطح زمین متداول است که سطح دریاهای آزاد یا سطح زمین آن منطقه به خصوص به عنوان مرجع در نظر گرفته شود و انرژی پتانسیل برابر صفر بدان نسبت داده شود. در اینصورت با توجه به فرمولهای قبلی با فرض اینکه  $h$  اختلاف ارتفاع یک نقطه با سطح دریاهای آزاد یا سطح زمین است، برای مقدار انرژی پتانسیل گرانشی اجسام در نزدیکی سطح زمین خواهیم داشت:

$$U_2 - U_1 = mgh, \quad U_1 = 0 \rightarrow U = U_2 = mgh$$

نیروی الکتریکی نیز نیرویی پایستار است و می توان برای آن انرژی پتانسیل در نظر گرفت که انرژی پتانسیل الکتریکی نامیده می شود. متداول است هنگامی که فاصله ذرات باردار از هم بی نهایت است، انرژی پتانسیل آنها صفر در نظر گرفته شود.

مثال: نحوه تغییرات انرژی پتانسیل بر حسب فاصله ( $r$ ) را برای دو بار الکتریکی:

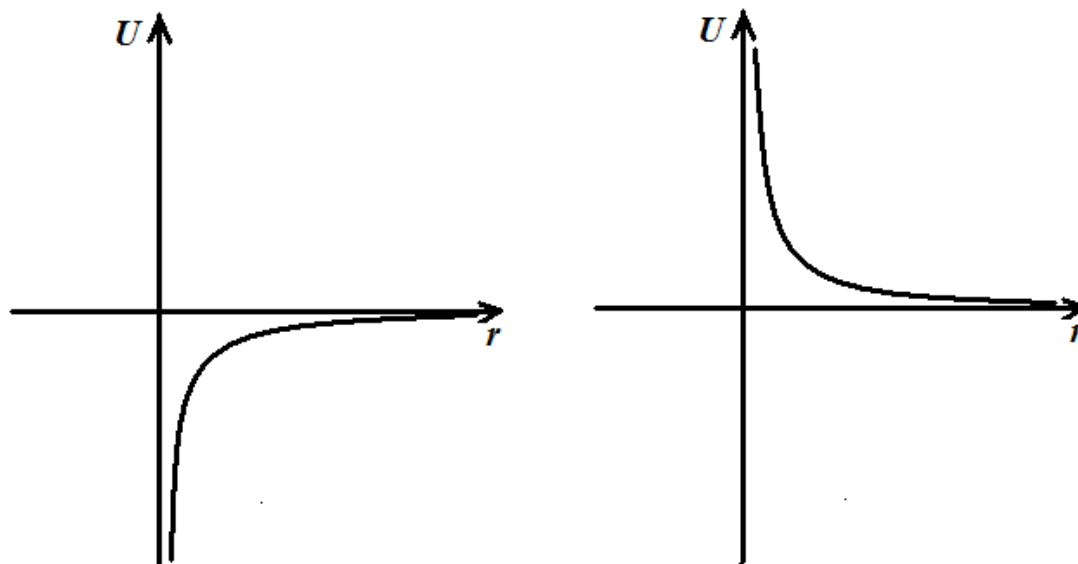
$$\text{الف) } q_1 \times q_2 > 0 \quad \text{ب) } q_1 \times q_2 < 0$$

در نمودار به طور تقریبی نمایش دهید.

حل:

در هر دو حالت، در فاصله بینهایت سطح انرژی پتانسیل برابر صفر در نظر گرفته می شود. در حالت (الف) موقع نزدیک کردن بهم، نیرو و جابجایی غیر هم جهت هستند (نزدیک شدن تحت اثر دافعه) و بنابراین سطح انرژی پتانسیل افزایش می یابد و نزدیک کردن نیازمند صرف انرژی است. در حالت (ب) موقع نزدیک کردن بهم، نیرو و جابجایی هم جهت هستند (نزدیک شدن تحت اثر جاذبه) و بنابراین سطح انرژی پتانسیل کاهش می یابد و نزدیک کردن همراه با آزاد شدن انرژی است.

در هر دو حالت، موقع نزدیک شدن اندازه نیروها افزایش می یابد. در نتیجه مقدار کار نیرو و تغییرات انرژی پتانسیل بازای یک مقدار جابجایی مشخص افزایش می یابد. بهمین علت در هر دو حالت با کاهش  $r$  سرعت تغییرات انرژی پتانسیل نسبت به تغییرات فاصله افزایش می یابد (بازای یک مقدار جابجایی مشخص، مقدار تغییرات انرژی پتانسیل در فواصل کمتر بیشتر است). بنابراین نمودارها به طور تقریبی به صورت در ادامه آمده خواهند بود:

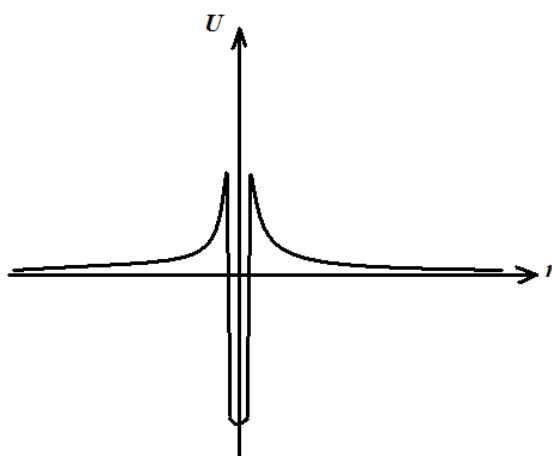


توضیح شکل: نحوه تغییرات انرژی پتانسیل بر حسب فاصله برای دو بار الکتریکی در دو حالت همنام (سمت راست) و ناهمنام

(سمت چپ)

\*\*\*\*\*

مثال: تصور کنید که هسته ی یک اتم در مبدأ مختصات قرار دارد و یک ذره  $\alpha$  ( هسته هلیوم که شامل دو  $p$  و دو  $n$  است ) روی محور  $x$  از فواصل خیلی دور به سمت آن نزدیک می شود. در کلیه ی فواصل نیروهای الکتریکی عمل می کنند و تأثیر گذارند. هنگامی که ذره ی  $\alpha$  وارد هسته شود، برهم کنش های هسته ای قوی به صورت جاذبه به وجود می آیند. اما در خارج هسته، ذره ی  $\alpha$  هیچ برهم کنش هسته ای قوی احساس نمی کند. تحت این شرایط نحوه ی تغییرات انرژی پتانسیل ذره ی  $\alpha$  به صورت زیر است:



الف) نحوه ی تغییرات انرژی پتانسیل برحسب فاصله را توجیه کنید.

ب) برمبنای اطلاعات مسئله ابعاد تقریبی هسته را در نمودار بالا نمایش دهید.

ج) نمودار مشابه نمودار داده شده را در ورقه خود رسم کنید و نحوه ی تغییرات انرژی پتانسیل یک پروتون برحسب فاصله از همان هسته را به طور تقریبی روی همان نمودار رسم کنید و نحوه ی تغییرات انرژی پتانسیل پروتون و ذره ی  $\alpha$  را با همدیگر مقایسه کنید و توضیح دهید. (برهم کنش های هسته ای قوی چه برای نوترون و چه برای پروتون در داخل هسته شدیداً به صورت جاذبه هستند و قدرت آنها متناسب با تعداد ذرات برهم کنش کننده هست).

د) در یک نمودار مستقل نحوه ی تغییرات انرژی پتانسیل یک نوترون برحسب فاصله از هسته را رسم کنید و به طور خلاصه توضیح دهید.

حل:

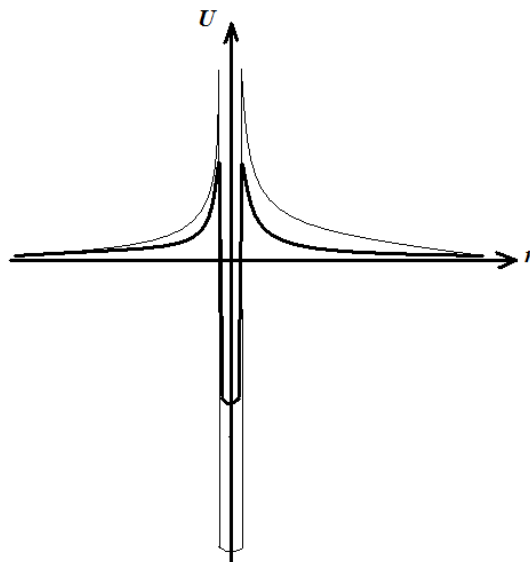
الف) تا زمانیکه ذره  $\alpha$  در خارج هسته قرار دارد، تنها نیروهای الکتریکی به صورت دافعه (بعلت همانم بودن بار ذره  $\alpha$  و بار هسته) را تجربه می کند. نزدیک شدن تحت اثر دافعه، نیازمند صرف انرژی است که انرژی صرف شده به صورت انرژی نهفته یا انرژی پتانسیل در ذره  $\alpha$  ذخیره می شود و باعث افزایش انرژی پتانسیل سیستم حاوی ذره  $\alpha$  و هسته می شود. نزدیک تر کردن بیشتر باعث افزایش بیشتر انرژی پتانسیل می شود. همچنین با نزدیک تر کردن بیشتر، نیروهای دافعه بعلت کاهش فاصله سریعاً رشد می کنند و به همین جهت آهنگ تغییرات انرژی پتانسیل سریعتر می شود.

با ورود ذره  $\alpha$  به هسته برهم کنش های هسته ای قوی به صورت جاذبه بوجود می آیند و باعث کاهش سطح انرژی پتانسیل و آزاد شدن انرژی می شوند. با توجه به نمودار داده شده، این برهم کنش ها و کاهش سطح انرژی پتانسیل بخاطر آنها به مراتب مهمتر از برهم کنش های کولنی (الکتریکی) و افزایش سطح انرژی پتانسیل بخاطر آنها هستند و هنگام ورود به هسته در کل سطح انرژی پتانسیل شدیداً کم می شود.

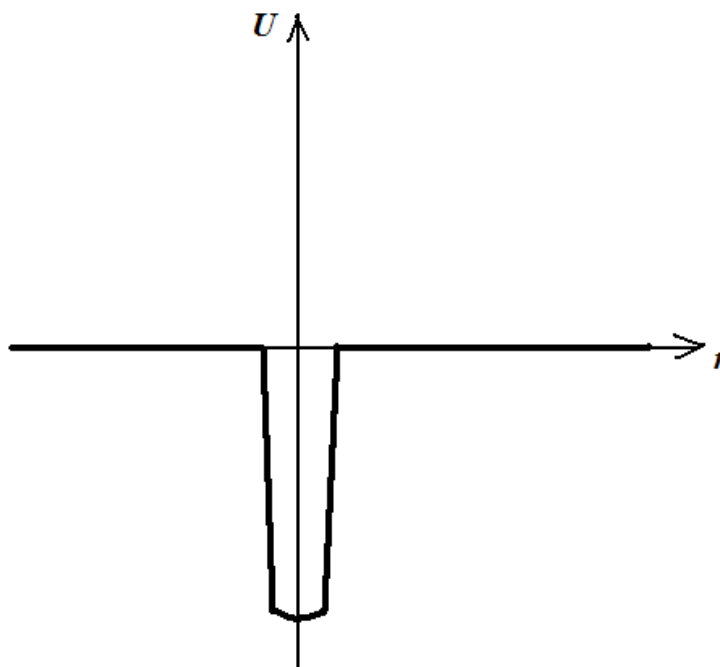
ب) با توجه به بحث (الف)، ابعاد تقریبی هسته فاصله ای است که انرژی پتانسیل ناگهان کم شده است.

ج) بار پروتون کمتر از بار ذره  $\alpha$  است، پس دافعه های الکتریکی آن نیز کمتر خواهند بود و افزایش سطح انرژی پتانسیل کمتری را هنگام نزدیک شدن به هسته تجربه خواهند کرد.

تعداد ذرات در ذره پروتون کمتر از تعداد ذرات در ذره  $\alpha$  است، پس برهم کنش های هسته ای قوی پروتون با هسته ضعیف تر از همان برهم کنش ها برای ذره  $\alpha$  خواهند بود و بنابراین کاهش انرژی پتانسیل آنها در هسته نیز کمتر خواهد بود. پس می توان نمودار بعدی را نتیجه گرفت. در نمودار بعدی خط نازک برای ذره  $\alpha$  و خط کلفت برای پروتون است.



د) نوترون بعلت خنثی بودن فاقد برهم‌کنش‌های کولنی (الکتریکی) است و تنها هنگام ورود به هسته برهم‌کنش‌های هسته‌ای قوی و کاهش سطح انرژی پتانسیل ناشی از آنها حائز اهمیت هستند.



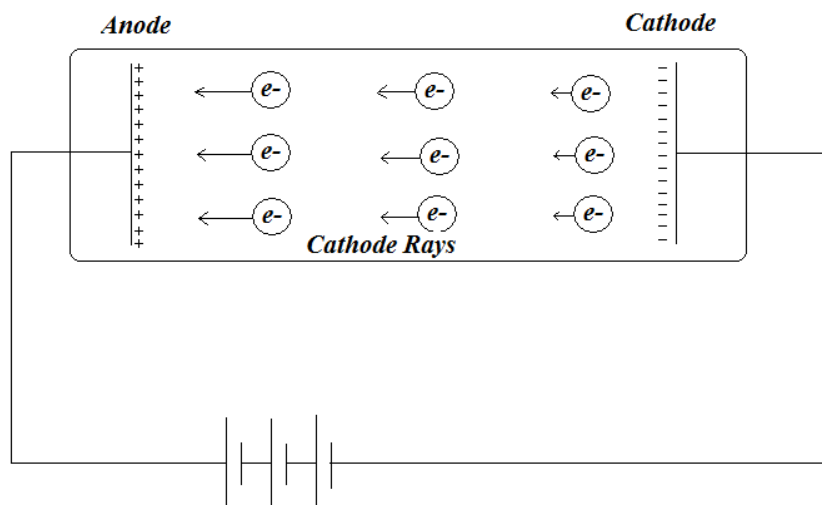
\*\*\*\*\*

## شناسایی و خواص ذرات زیر اتمی

در فیزیک یا شیمی ذرات زیر اتمی (*Subatomic Particles*) ذرات کوچکتر از یک اتم هستند. الکترون، پروتون و نوترون جز اولین ذرات زیراتمی بودند که کشف و مطالعه شدند. در ادامه با نحوه کشف و تعیین خواص آنها آشنا می شویم. چندین دانشمند مانند *William Prout* و *Norman Lockyer* پیشنهاد نموده بودند که اتمها از ذرات سازنده کوچکتر و بنیادی تری تشکیل شده اند، اما به اشتباه تصور می کردند که این ذرات سازنده به اندازه کوچکترین اتم یعنی اتم هیدروژن هستند. این موضوع توسط تامسون (*J. J. Thomson*) رد شد. مطالعه پرتو کاتدی توسط تامسون منجر به کشف الکترون بعنوان اولین ذره زیراتمی شناخته شده و تعیین نسبت بار به جرم آن شد.

### پرتوکاتدی

پرتوهای کاتدی در ابتدا در سال 1869 توسط *Johann Hittorf* مشاهده شدند و بعدا در سال 1876 توسط *Eugen Goldstein* به نام پرتو کاتدی خوانده شدند. در آزمایش پرتوکاتدی دو صفحه فلزی درون یک حباب شیشه ای که درونش از هوا تخلیه شده بود، قرار داده شدند و به اختلاف ولتاژ زیادی متصل شدند. بخاطر اختلاف ولتاژ بالا یک صفحه به شدت فزونی الکترون پیدا می کند و منفی میشود، در حالیکه یک صفحه به شدت کمبود الکترون پیدا می کند و مثبت میشود. صفحه منفی کاتد و صفحه مثبت آنند نامیده می شود. الکترون ها به دلیل وجود دافعه شدید با صفحه فلزی منفی و جاذبه شدید با صفحه فلزی مثبت از صفحه فلزی منفی کنده می شوند و به دلیل برقراری خلاء به راحتی به سمت صفحه مثبت حرکت می کنند. به چنین جریانی از الکترون ها که در فضای آزاد از صفحه منفی به سمت صفحه مثبت حرکت می کنند و از کاتد نشأت گرفته اند، پرتو کاتدی گفته می شود. به علت وجود جاذبه با صفحه فلزی مثبت الکترون ها به سمت این صفحه شتاب و سرعت می گیرند و در نهایت با سرعت به این صفحه برخورد می کنند و جذب آن می شوند. در صورتی که صفحه ی فلزی پرحفره باشد ممکن است برخی از الکترون ها برحسب اتفاق از حفره های آن عبور کنند و در آن سمت صفحه به صورت آزاد و پر سرعت در دسترس باشند. به عبارتی می توان با استفاده از پرتو کاتدی یک شلیک کننده الکترون یا یک تفنگ الکترونی داشت. این تفنگ الکترونی در ترکیب با یک وسیله برای دادن سرعت به الکترون ها و منحرف کردن آنها و یک صفحه آشکارساز محل برخورد الکترون های شلیک شده تیوب پرتو کاتدی (*Cathode Ray Tube* بطور مخفف *CRT*) نامیده می شود که برای نمایش تصاویر در تلویزیونهای سیاه و سفید قدیم، رادارها و ... بکار می رفت. شکل بعدی یک نمایش شماتیک برای پرتو کاتدی است.



توضیح شکل: نمایش شماتیک برای پرتو کاتدی

در ابتدا دانشمندان از ماهیت واقعی پرتو کاتدی خبری نداشتند و دو تئوری اشتباه در مورد آن وجود داشت. *Crookes* و *Artur Shuster* تصور می کردند پرتو کاتدی متشکل از اتمهای باردار شده به صورت الکتریکی هستند. دانشمندان آلمانی *Eilhard Wiedemann*، *Heinrich Hertz* و *Goldstein* تصور می کردند پرتو کاتدی موجی (*Aether Waves*) است که نوع جدیدی از تابشهای الکترومغناطیسی مانند نور است و متفاوت از چیزی است که جریان الکتریکی را در حباب شیشه ای انتقال می دهد.

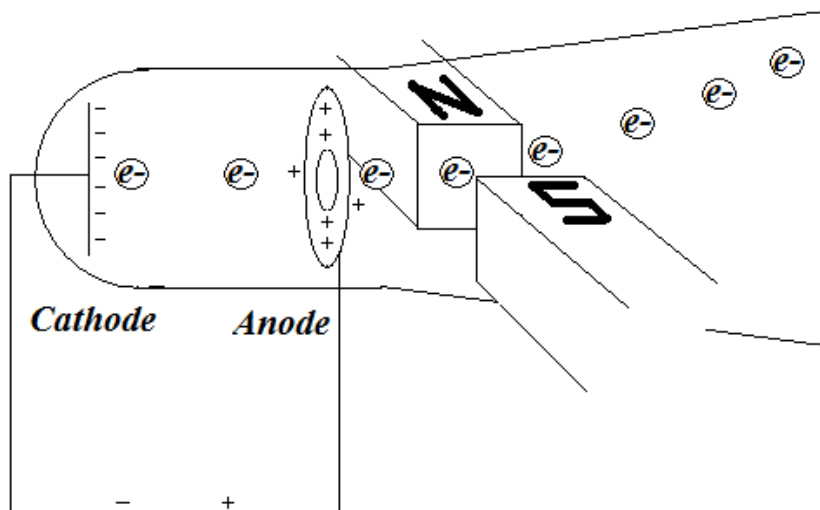
ماهیت پرتو کاتدی با اندازه گیری جرم پرتو کاتدی به روش حرارتی توسط تامسون در سال 1897 معلوم شد. تامسون دریافت که پرتو کاتدی جرم دارد و بنابراین متشکل از ذرات و نه امواج است. همچنین او جرم این ذرات را 1800 برابر سبکتر از جرم اتم هیدروژن بدست آورد. بنابراین تامسون نتیجه گرفت که این ذرات اتم نیستند بلکه اولین ذره زیر اتمی کشف شده هستند. او آنها را *Corpuscle* نامید، اما بعداً آنها الکترون نامیده شدند. بزودی دانشمندان فهمیدند که الکترونها ذراتی هستند که جریان الکتریکی را در سیمها انتقال می دهند و بار منفی در اتمها بخاطر حضور آنهاست. بعداً تامسون با مطالعه پرتو کاتدی تحت اثر میدانهای الکتریکی و مغناطیسی نسبت بار به جرم الکترون را به شیوه دیگری بدست آورد و اندازه گیری قبلی خود را تایید نمود. با شیوه دوم تامسون برای اندازه گیری نسبت بار به جرم الکترون در ادامه آشنا میشویم. تامسون جایزه نوبل فیزیک در سال 1906 را بخاطر همین کارها از آن خود کرد.

میدان های الکتریکی ( مثلاً ناشی از صفحات باردار) به ذرات باردار ساکن یا در حال حرکت نیرو وارد می کنند و مقدار نیرو متناسب با قدرت میدان ( مثلاً اندازه بار صفحات باردار) و اندازه بار ذره باردار است. میدان های مغناطیسی ( مثلاً ناشی از آهن ربا) به ذرات باردار در حال حرکت نیرو وارد می کنند که مقدار این نیرو متناسب با قدرت میدان مغناطیسی، اندازه بار ذره، اندازه سرعت ذره و عامل جهت است و نیروی مغناطیسی وارده عمود بر جهت حرکت ذره می باشد. تامسون از این نکات در آزمایش

خود برای تعیین نسبت  $\frac{\text{بار}}{\text{جرم}}$  الکترون استفاده کرد.

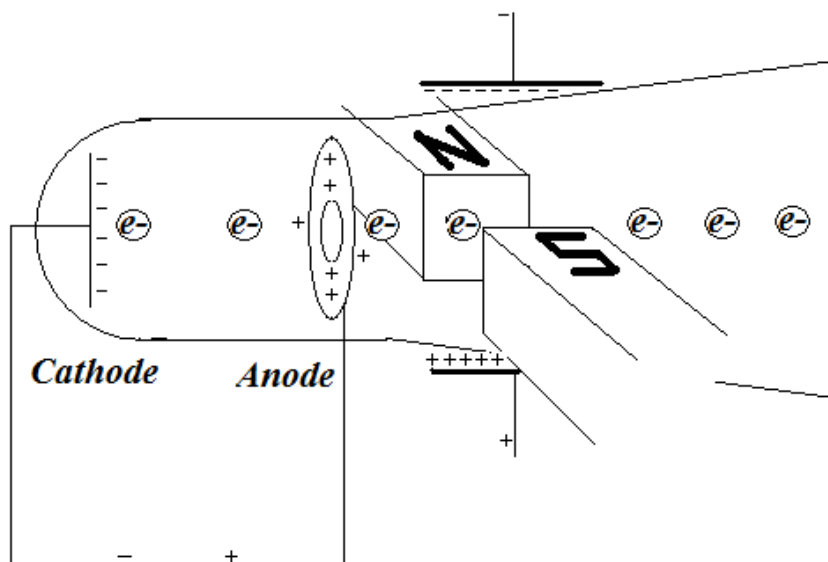


تامسون آزمایش خود را در دو حالت انجام داد. در حالت اول پرتو کاتدی از میان قطب های یک آهنربا عبور داده شد و مقدار انحراف ذرات مشاهده و اندازه گیری شد. شکل بعدی این مطلب را نمایش می دهد.



توضیح شکل: انحراف پرتو کاتدی موقع عبور از میان قطب های یک آهنربا، دقت داشته باشید که آند برای عبور پرتو کاتدی سوراخ شده است.

در حالت دوم تامسون صفحات باردار را به آزمایش در حالت اول اضافه کرد و اختلاف پتانسیل میان صفحات یا به عبارتی مقدار بار صفحات یا به عبارتی قدرت میدان الکتریکی آنها را به گونه ای تنظیم کرد که نیروهای الکتریکی وارده بر روی پرتوهای کاتدی با نیروهای مغناطیسی وارده بر آنها همدیگر را خنثی کنند و پرتو کاتدی بدون انحراف باشد. شکل بعدی این مطلب را نمایش می دهد.



توضیح شکل: عبور بدون انحراف پرتو کاتدی از میان قطب های یک آهنربا بعلاوه اثر خنثی کنندگی میدان الکتریکی اضافه شده

تامسون براساس آزمایش در حالت دوم و روابط فیزیکی موجود سرعت پرتوهای کاتدی را بدست آورد و با در دست داشتن سرعت پرتوهای کاتدی و مقدار انحراف از آزمایش در حالت اول نسبت بار به جرم الکترون را بدست آورد.



جوزف جان تامسون (18 December 1856- 30 August 1940)

بعد از تعیین نسبت  $\frac{\text{بار}}{\text{جرم}}$  الکترون بر مبنای آزمایش تامسون، بارالکتریکی الکترون بر مبنای آزمایش قطره روغن بدست آمد.

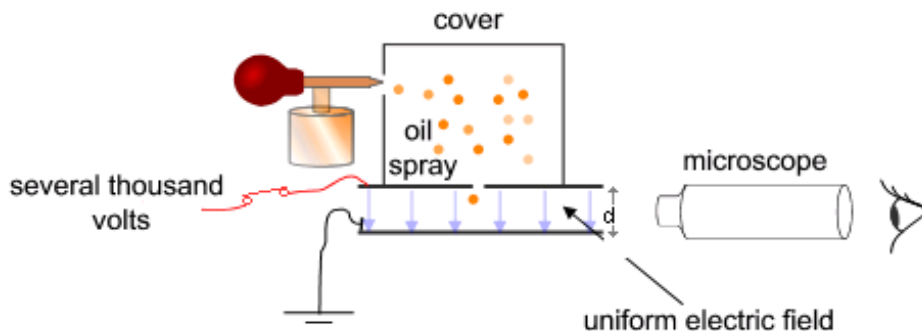
### آزمایش قطره روغن

آزمایش قطره روغن آزمایشی بود که توسط رابرت میلیکان (Robert Milikan) و هاروی فلتچر (Harvey Fletcher) در سال 1909 برای اندازه گیری بار الکترون انجام شد. میلیکان و فلتچر آزمایش خود را در دو حالت انجام دادند. در حالت اول قطره روغن باردار بدون هیچ عامل خارجی تنها تحت اثر وزن خودش و اصطکاک با هوا سقوط می کرد تا به یک سرعت ثابت (سرعت حد) برسد. در این حالت با مشاهده قطره میتوان سرعت آن را اندازه گیری نمود و با استفاده از روابط فیزیکی می توان خواص شکل (شعاع قطره روغن) و در نهایت جرم قطره را بدست آورد.

در حالت دوم صفحات باردار روشن می شدند و بار آنها به گونه ای تنظیم می شد که نیروی الکتریکی به سمت بالا وارده از طرف صفحات باردار به قطره روغن باردار با نیروی وزن قطره روغن برابر شود و در نتیجه قطره در فضای بین دو صفحه باردار به حالت تعلیق درآید. تحت این شرایط با استفاده از برابری نیروی الکتریکی و نیروی وزن قطره ( که از حالت اول بدست آمده است) می توان نیروی الکتریکی را بدست آورد. رابطه اندازه نیروی الکتریکی با اندازه بار صفحات ( اختلاف پتانسیل صفحات) و بار قطره روغن معلوم است، پس با در دست داشتن اندازه نیروی الکتریکی و بار صفحات می توان بار هر قطره روغن را بدست آورد.



توضیح شکل: دستگاه استفاده شده در آزمایش قطره روغن میلیکان (منبع: Wikipedia)



توضیح شکل: شماتیک ساده شده آزمایش قطره روغن میلیکان (منبع: Wikipedia)

از آن جایی که هر قطره روغن یک یا چند الکترون گرفته بار هر قطره روغن مضربی از بار یک الکترون است. با تکرار آزمایش و بدست آوردن بار قطرات مختلف و تعیین اینکه آنها مضربی از چه عددی هستند، می توان بار الکترون را بدست آورد. مثلا اگر بار چند قطره روغن برابر با  $6.4 \times 10^{-19} C$ ,  $8 \times 10^{-19} C$ ,  $4.8 \times 10^{-19} C$ ,  $3.2 \times 10^{-19} C$ , ... باشد، همگی مضربی از  $1.6 \times 10^{-19} C$  خواهند بود و بار الکترون می تواند برابر  $1.6 \times 10^{-19} C$  فرض شود. میلیکان بار الکترون را برابر  $1.5924 \times 10^{-19} C$  بدست آورد که اختلاف کمی با مقدار پذیرفته شده کنونی برابر با  $1.602176487 \times 10^{-19} C$  دارد.

از آزمایش تامسون نسبت بار به جرم الکترون و از آزمایش میلیکان بار الکترون بدست آمد. با ترکیب این دو جرم الکترون بدست آمد.

از قدمهای بعدی در کشف ذرات ریز اتمی کشف و مطالعه اشعه آندی بود. در سال *Eugen Goldstein 1886* اشعه آندی یا کانالی را کشف کرد و نشان داد که پرتوهای آندی متشکل از ذرات باردار مثبت هستند که از گازها تولید می شوند. در ادامه با پرتو آندی، دستگاه طیف سنج جرمی و کشف پروتون و نوترون آشنا می شویم.

### پرتو آندی

در آزمایش پرتو آندی دو صفحه فلزی درون یک حباب شیشه ای که درونش محتوی یک گاز بود، قرار داده شدند و به اختلاف ولتاژ زیادی متصل شدند. در نتیجه دو صفحه فلزی به شدت باردار شدند و میدان الکتریکی قوی در درون حباب شیشه ای تولید کردند. درون گاز بخاطر برخی پدیده های طبیعی مثل رادیو اکتیویته حاوی یون است. تحت اثر نیروهای الکتریکی (جاذبه و دافعه با صفحات فلزی باردار) این یون ها سرعت می گیرند و انرژی جنبشی آنها زیاد می شود. این یون های پرانرژی با اتم های گازی شکل موجود برخورد خواهند کرد و در اثر برخورد ممکن است الکترون از اتم های گازی شکل تولید شده و یون های مثبت تولید شود. بعد از چنین برخوردهایی الکترون های تولید شده به سمت صفحه مثبت و یون های مثبت تولید شده به سمت صفحه منفی حرکت خواهند کرد و سرعت خواهند گرفت و ممکن است مجددا در اثر برخورد باز هم یون تولید کنند. اگر صفحه منفی سوراخ دار باشد یون های مثبت می توانند از آن عبور کنند و در آن سوی صفحه جریانی از یون های مثبت یا پرتو آندی خواهیم داشت. در صورتی که فضای بین دو صفحه حاوی اتم های هیدروژن باشد، پرتو آندی به صورت جریانی از پروتون ها خواهد بود و برای مطالعه خواص آنها می تواند به کار رود.

با یافتن نسبت بار به جرم این ذرات مثبت با روشی مشابه روش تامسون دانشمندان دریافتند که برخلاف پرتو کاتدی، پرتو آندی متشکل از تنها یک نوع ذره نیست و جنس ذرات سازنده آن با تغییر جنس گاز درون حباب تغییر می کند.

در سال *1912* تامسون و همکارش آستون (*F. W. Aston*) در پی تحقیقاتشان برای تعیین جنس پرتو آندی، جریانی از اتمهای نئون یونیزه شده را از میان میدانهای الکتریکی و مغناطیسی عبور دادند و متوجه شدند که جریان اتمهای نئون یونیزه شده به دو دسته شکافته شدند. آنها این مطلب را بوجود ایزوتوپها نسبت دادند (این اولین شناسایی ایزوتوپ های یک عنصر پایدار بود، قبلا *Frederick Soddy* وجود ایزوتوپ ها را برای توجیه واپاشی برخی عناصر رادیواکتیو بخصوص پیشنهاد داده بود). کار تامسون در مورد جداسازی ایزوتوپ های نئون اولین مورد از طیف سنج جرمی بود که طیف سنج جرمی بعدا توسط آستون و دمپستر (*A. J. Dempster*) به یک روش کارآمدتر و عمومی تر توسعه داده شد. در ادامه با طیف سنج جرمی بیشتر آشنا می شویم.

### دستگاه طیف سنج جرمی

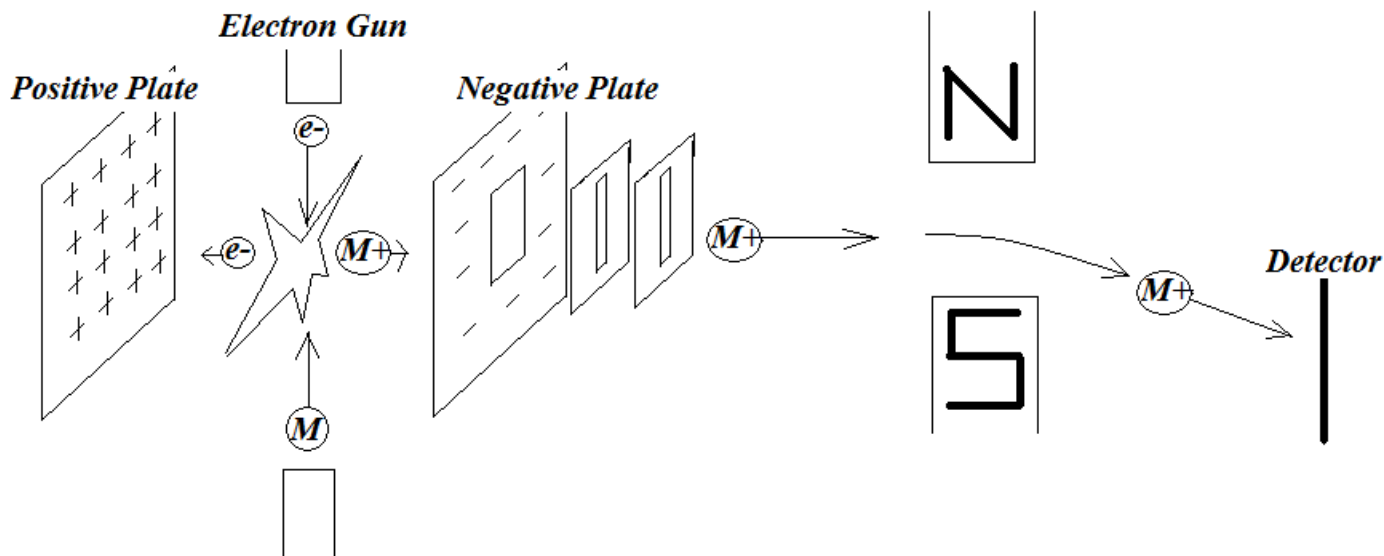
دستگاه طیف سنج جرمی می تواند برای اندازه گیری جرم اتم ها یا مولکول ها و شناسایی مواد براساس جرم آنها یا جرم قطعات حاصل از آنها به کار رود. روش کار بطور خلاصه شامل یونیزه کردن نمونه مورد آزمایش (مثلا توسط بمباران با الکترونهای پرانرژی که ممکن است منجر به قطعه قطعه شدن مولکولها نیز بشود) و سپس سرعت بخشیدن به حرکت یونهای حاصل و عبور آنها از یک میدان مغناطیسی است. همانطور که قبلا گفتیم قطب های مغناطیسی ( آهن رباها) به ذرات باردار در حال حرکت نیروی مغناطیسی وارد می کنند که مقدار نیرو با بار ذره در حال حرکت متناسب است. این نیرو عمود بر مسیر حرکت ذره ی باردار است و باعث انحراف آن می شود. مقدار انحراف با مقدار نیرو رابطه مستقیم و با اینرسی یا جرم ذره رابطه معکوس دارد. عبارتی داریم:

$$\alpha \propto \frac{\text{مقدار نیرو}}{\text{جرم}}$$

مقدار انحراف

چون نیرو با بار ذره متناسب است، پس در نهایت می توان بیان کرد که مقدار انحراف متناسب با نسبت بار به جرم ذره خواهد بود و اندازه گیری مقدار انحراف در ترکیب با روابط فیزیکی مربوطه می تواند نسبت بار به جرم ذره را بدست دهد.

شرط وارد شدن نیروی مغناطیسی به ذره و منحرف کردن آن باردار بودن ذره و در حال حرکت بودن آن است. برای باردار کردن ذره یا تولید ذرات باردار یک روش می تواند بدین صورت باشد که ابتدا ماده را به حالت بخار در می آوریم و سپس توسط بمباران با  $e^-$  های پراثری از ذرات بخار الکترون بکنیم. برای حرکت کردن آنها ذرات باردار را تحت تاثیر صفحات الکتریکی قرار می دهیم تا تحت اثر نیروی الکتریکی در راستای مسیر حرکت ذره سرعت آنها افزایش یابد. در نهایت آنها را از یک آهنربا عبور می دهیم و انحراف آنها را اندازه گیری می کنیم. از آنجایی که در بمباران معمولاً یک الکترون کنده می شود، بار ذره به اندازه ی بار یک پروتون یا الکترون و معلوم خواهد بود. بنابراین با معلوم بودن بار و بدست آوردن نسبت بار به جرم از روی مقدار انحراف و روابط فیزیکی مربوطه می توان در نهایت جرم ذره را بدست آورد. شکل بعدی نحوه عملکرد یک دستگاه طیف سنج جرمی نمونه را بصورت شماتیک نشان میدهد.



توضیح شکل: نحوه عملکرد یک دستگاه طیف سنج جرمی نمونه

### کشف پروتون

مفهوم وجود یک ذره بنیادی هیدروژن مانند بعنوان یکی از ذرات سازنده سایر اتمها در مدت زمان بلندمدتی شکل گرفته است. در سال 1815 ویلیام پراوت (*William Prout*) بر این اساس که جرم های اتمی اولیه مضربی از جرم اتم هیدروژن بودند، پیشنهاد نمود که تمامی اتمها از اتمهای هیدروژن (که او آنها *Protyles* می نامید) تشکیل شده اند. اساس پیشنهاد ویلیام پراوت با یافتن جرمهای اتمی دقیقتر رد شد.

در سال 1917 ارنست رادرفورد (*Ernest Rutherford*) اثبات کرد که هسته اتم هیدروژن در دیگر هسته ها وجود دارد. نتیجه ای که معمولاً بعنوان کشف پروتون در نظر گرفته می شود. رادرفورد هسته اتمهای هیدروژن را در اثر برخورد ذرات آلفا با گاز هیدروژن بدست آورده بود و با خواص آنها آشنا شده بود. بعداً رادرفورد متوجه شد که در اثر برخورد ذرات آلفا با هوا و بطور

اختصاصی تر با گاز نیتروژن ذراتی با همان خصوصیات هسته اتمهای هیدروژن تولید می شوند. بنابراین او نتیجه گرفت که هسته اتمهای هیدروژن در اتمهای دیگر نیز حضور دارند و تحت تاثیر نظریه پراوت هسته اتمهای هیدروژن را جز ذرات بنیادی سازنده اتمها در نظر گرفت. رادرفورد در ابتدا همان نام در نظر گرفته شده توسط پراوت یعنی *Protyles* را بعنوان نام این ذرات پیشنهاد داد، اما به منظور جلوگیری از اشتباه اتمهای هیدروژن خنثی با هسته های اتمهای هیدروژن، در نهایت نام پروتون را برای آنها در نظر گرفت که مورد قبول جامعه بین المللی نیز واقع شد.

### کشف نوترون

بعد از کشف هسته اتمها توسط ارنست رادرفورد در سال 1911، *Antonius van den Broek* پیشنهاد داد که جای هر عنصر در جدول تناوبی برابر بارهسته آن عنصر است. این مطلب بعدا در سال 1913 توسط هنری موزلی (*Henry Moseley*) بر اساس تحلیل طیف اشعه ایکس (*X-ray Spectra*) تایید شد.

اختلاف بین عدد اتمی و عدد جرمی دانشمندان را مجبور به در نظر گرفتن ذرات خنثی در هسته اتم نمود. در سال 1920 ارنست رادرفورد پیشنهاد وجود نوترون در هسته را داد، اما او به اشتباه نوترون را یک الکترون در حال گردش به دور پروتون فرض می کرد. در دهه 1920s این مدل به اشتباه در بین فیزیکدانها مورد قبول بود و مثلا هسته  ${}^7_3\text{Li}$  شامل هفت پروتون و چهار الکترون فرض می شد.

در سال 1930 *Viktor Ambartsumian* و *Dmitri Ivanenko* از شوروی سابق دریافتند که بر خلاف باور عمومی زمانه شان، هسته نمی تواند شامل الکترونها و پروتونها باشد و اثبات نمودند که ذراتی خنثی بایستی به همراه پروتونها در هسته باشند. در سال 1931 *Walther Bothe* و *Herbert Becker* از آلمان دریافتند هنگامیکه ذرات پر انرژی آلفا ساطع شده از پلونیوم به عناصر سبک معینی بخصوص بریلیم، بور و لیتیم تابیده می شوند، یک تابش به شدت نفوذ کننده تولید می کنند. این تابش به اشتباه اشعه گاما در نظر گرفته شد. در سال 1932 *Irène Joliot-Curie* و *Frédéric Joliot* از پاریس نشان دادند که هنگامیکه تابش جدید بر پارافین یا هر ترکیب محتوی هیدروژن تابانده شود، پروتونهایی با انرژی بالا تولید می کند. محاسبات کمی مربوطه برای این آزمایش با فرض اشعه گاما ناسازگار بودند. در سال 1932 جیمز چادویک در دانشگاه کمبریج آزمایشهایی انجام داد که نشان دادند فرض اشعه گاما برای این تابش نادرست است. او پیشنهاد داد که این تابش از ذرات بدون باری تقریبا هم جرم با پروتون تشکیل شده است و آزمایشهایی برای اثبات ادعای خود انجام داد. این ذرات بدون بار نوترون نامیده شدند.

### مدل استاندارد ذرات

داستان کشف ذرات زیر اتمی بعد از کشف نوترون ادامه پیدا کرد و ذرات زیر اتمی بسیار دیگری نیز کشف شدند، بطوریکه با توجه به تنوع زیاد آنها شبیه گونه های زیاد موجود در یک باغ وحش، لقب باغ وحش ذرات (*Zoo Particle*) به آنان داده شد. ذرات زیر اتمی کشف شده به دو دسته ذرات بنیادی (*Elementary Particles*) و ذرات کامپوزیت یا غیر بنیادی یا ترکیبی (*Composite Particles*) طبقه بندی می شوند. ذرات بنیادی ذراتی هستند که از ذرات دیگر یا ریزتری تشکیل نشدند و ذرات کامپوزیت ذراتی هستند که از دو یا تعداد بیشتری ذره بنیادی تشکیل شدند. مدلهای مختلفی برای دسته بندی ذرات وجود دارد. مدل استاندارد (*Standard Model*) یکی از این مدلهاست که مورد قبول عموم می باشد. در ادامه با این مدل آشنا خواهیم شد، اما قبل از آن بایستی با ضد ماده، بار رنگی (*Charge Color*) و ذرات حامل نیرو آشنا شویم.

هر ذره موجود در جهان دارای ضد ذره متناظر است. بعنوان مثال اگر پروتون داریم، ضد پروتون هم داریم یا اگر الکترون داریم، ضد الکترون هم داریم. بطور ساده ضد ذره هر ذره جرمی برابر آن ذره و باری برابر اما مخالف آن دارد. بعنوان مثال ضد پروتون هم جرم پروتون است، اما مثل الکترون منفی است یا ضد الکترون ( که پوزیترون نامیده می شود) هم جرم الکترون است، اما بار مثبتی باندازه قرینه بار الکترون دارد. در مورد ذرات خنثی ممکن است ضد ذره با خود ذره یکسان باشد، ممکن هم است یکسان نباشد. بعنوان مثال نوترون و ضد نوترون هر دو خنثی هستند، اما ذرات یکسانی نیستند. از طرفی دیگر فوتونها که بعدا با آنها آشنا می شویم، با ضد فوتونها یکسان هستند یا در واقع برای آنها ضد ذره بعنوان یک ذره متفاوت و جدید نداریم. تفاوت نوترون و ضد نوترون بعنوان یک مثال نشان می دهد که در واقع ذره و ضد ذره بیشتر مربوط به تفاوت در ماهیت است تا تفاوت در بار. ذره و ضد ذره ماهیتی متضاد هم دارند و از این رو است که در کنار هم دوام نمی آورند و در صورت برخورد بهم از بین می روند و به انرژی معادل جرم از بین رفته تبدیل می شوند. جهان ما جهان ذرات است، بدین معنی که جهان ما از ذرات و نه ضد ذرات تشکیل شده است. ضد ذرات در جهان ما دوام نمی آورند و در اثر برخورد به ذرات سازنده جهان ما از بین می روند و به انرژی تبدیل می شوند. با این وجود در جهان ما ضد ذرات در واکنشهای هسته ای مثلا در ستارگان یا در آزمایشگاههای هسته ای بوجود می آیند، اگرچه بعلت برخورد با ذرات و نابود شدن عمر کوتاهی خواهند داشت.

قبلا دیدیم که نیروهای موجود در طبیعت به چهار دسته نیروهای الکتریکی و مغناطیسی، گرانشی، هسته ای ضعیف و هسته ای قوی طبقه بندی می شوند. می دانیم که ذرات با بار الکترومغناطیسی یا بطور ساده تر ذرات با بار الکتریکی بهمدیگر نیروهای الکتریکی و مغناطیسی وارد می کنند و در واقع نیروهای الکتریکی و مغناطیسی بخاطر بار الکتریکی مواد است. بطور کاملا مشابه نیروهای هسته ای قوی نیز بخاطر باردار بودن ذرات برهمکنش کننده مربوطه است، اما باری که منجر به برهمکنش های هسته ای قوی میشود، بار الکتریکی نیست و نوع منحصر بفردی است. بار الکتریکی دارای یک نوع بصورت یک زوج قرینه است که همان مثبت و منفی است که قبلا هم دیدیم و می دانیم در صورت برابر بودن بار مثبت و منفی بار الکتریکی ذره صفر یا خنثی خواهد بود و ذره خنثی نیروهای الکتریکی و مغناطیسی وارد یا احساس نخواهد کرد. اما بار مسبب نیروهای هسته ای قوی دارای سه نوع بهمراه قرینه شان یا متضادشان است که در صورت حضور همزمان هر سه نوع بار یا حضور همزمان یک نوع بار همراه قرینه اش بار صفر یا خنثی نتیجه خواهد شد و ذره خنثی نیروهای هسته ای قوی وارد یا احساس نخواهد کرد. از این بابت بار مسبب نیروهای هسته ای قوی شبیه رنگهای قرمز، آبی و سبز است که سه نوع هستند و ترکیب آنها بدون رنگ است. از این رو است که بار مسبب نیروهای هسته ای قوی بار رنگی (*Charge Color*) نامیده می شود و شامل انواع قرمز، ضد قرمز ( قرینه قرمز)، آبی، ضد آبی ( قرینه آبی)، سبز و ضد سبز ( قرینه سبز) است. بنابراین اگر به دو یا چند ذره بارهای رنگی غیر خنثی متفاوتی مثلا یک ذره قرمز و یک ذره آبی نسبت داده شود، آنها بهمدیگر نیروهای هسته ای قوی وارد خواهند کرد. اگر دو یا چند ذره بار رنگی نداشته باشند یا ذرات تشکیل دهنده آنها بار رنگی همدیگر را خنثی کنند، آنها بهمدیگر نیروهای هسته ای قوی وارد نخواهند کرد.

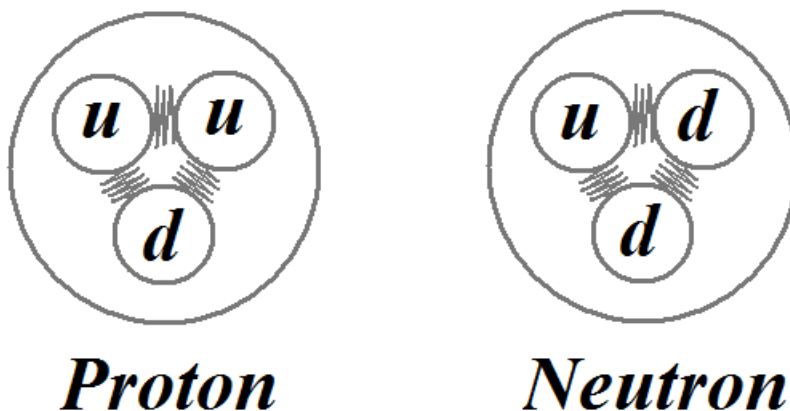
ذرات حامل نیرو در واقع بسته های انرژی هستند که تغییرات انرژی مربوط به یک نیرو را انتقال می دهند. بعنوان مثال فوتون یک ذره حامل نیرو برای نیروی الکتریکی و مغناطیسی است و تغییرات انرژی مربوط به نیروی الکتریکی و مغناطیسی توسط آن انتقال می یابد. مثلا اگر سطح انرژی پتانسیل یک سیستم حاوی برهم کنشهای الکتریکی و مغناطیسی کاهش یابد و سیستم انرژی آزاد کند، انرژی آزاد شده بصورت تولید یک بسته انرژی خواهد بود و بالعکس اگر سطح انرژی پتانسیل یک سیستم حاوی



برهم کنشهای الکتریکی و مغناطیسی افزایش یابد و سیستم نیازمند جذب انرژی باشد، انرژی جذب شده بصورت جذب یک بسته انرژی خواهد بود که در هر دو صورت بسته انرژی مبادله شده فوتون نامیده می شود. پس مثلا تغییر سطح انرژی ذره ای مثل الکترون در اتم که تحت تاثیر برهم کنشهای الکتریکی و مغناطیسی است، همراه با تولید یا جذب فوتون خواهد بود.

مدل استاندارد (Standard Model) ذرات بنیادی را شامل شش کوارک (*up, down, bottom, top, strange and charm*) و ضد آنها که بار رنگی دارند، شش لپتون (*electron, electron neutrino, muon, muon neutrino, tau, tau neutrino*) و ضد آنها که هیچکدام بار رنگی ندارند، دوازده حامل نیرو (فوتون برای الکترومغناطیس،  $W^+$  و  $W^-$  و  $Z$  برای برهمکنش هسته ای ضعیف و هشت گلوئون برای برهمکنش هسته ای قوی) و بوزون هیگز در نظری می گیرد. مدل‌های دیگری نیز وجود دارند که ممکن است ذرات بنیادی دیگری مثل ذره گراویتون بعنوان ذره حامل نیرو برای نیروی گرانشی در نظر بگیرند، اما مدل استاندارد پذیرفته شده تر است. شش کوارک و شش لپتون در سه نسل قرار می گیرند. نسل اول شامل کوارک های *up* و *down* و لپتون های الکترون و نوترینوی الکترون است. نسل دوم شامل کوارک های *charm* و *strange* و لپتون های موئون و نوترینوی موئون است. نسل سوم شامل کوارک های *top* و *bottom* و لپتون های تائو و نوترینوی تائو است. بطور کلی با افزایش مرتبه نسل ذرات سنگین تر و ناپایدارتر می شوند. ذرات نسل اول واپاشی انجام نمی دهند و پایدارند. ذرات نسل دوم و سوم جز نوترینوی موئون و نوترینوی تائو سریعا واپاشی انجام می دهند و ناپایدارند و تنها در محیط ها با سطوح انرژی فوق العاده بالا مشاهده می شوند.

کوارکها به تنهایی نمی توانند وجود داشته باشند. کوارکها با هم ترکیب می شوند تا ذرات مرکب (غیر بنیادی) بدون بار رنگی به نام هاردون ها را بوجود آورند. هاردون ها به دو دسته باریونها که ترکیب سه کوارک با بارهای رنگی قرمز، آبی و سبز هستند و مزون ها که ترکیب ناپایدار یک کوارک و یک ضد کوارک با بارهای رنگی قرینه هستند، طبقه بندی می شوند. من جمله باریونها پروتونها و نوترونها هستند. هر پروتون از دو کوارک *up* و یک کوارک *down* تشکیل شده است. هر نوترون از دو کوارک *down* و یک کوارک *up* تشکیل شده است. شکل بعدی این مطلب را نمایش می دهد. علاوه بر پروتونها و نوترونها ذرات غیر بنیادی بسیار دیگری نیز وجود دارند. با توجه به اینکه در جهان ما اتمها از الکترون، پروتون و نوترون تشکیل شده اند، میتوان نتیجه گرفت سه ذره بنیادی الکترون و کوارکهای *up* و *down* ذرات سازنده مواد عادی دنیای ما هستند.





## مدل های اتمی (قبل از بور)

تئوری اتمی (*Atomic Theory*) در شیمی و فیزیک، یک تئوری علمی در مورد ماهیت ماده است که بیان می کند ماده از ذرات گسسته ای به نام اتم ساخته شده است. با تغییر و تحولات تئوری اتمی در طول تاریخ در ادامه آشنا می شویم. در ابتدا تصور می شد که ماده تا بی نهایت تقسیم پذیر است. در یونان باستان دموکریتوس جزو اولین کسانی بود که در نظر گرفت ماده تا بی نهایت تقسیم پذیر نیست و ماده از اجزا بسیار ریز تقسیم ناپذیری به نام اتم تشکیل شده است. این نظریه توسط برخی دانشمندان و فیلسوفان زمان مثل ارسطو رد شد. در اوایل سال های 1800 تشکیل شدن ماده از ذرات تجزیه ناپذیر به نام اتم مجدداً توسط دالتون مطرح شد.

## مدل اتمی دالتون

پنج نکته اصلی تئوری اتمی دالتون به صورت زیر است:

1. عناصر از ذرات فوق العاده کوچکی به نام اتم تشکیل شدند.
  2. اتمهای یک عنصر از نظر اندازه، جرم و خواص دیگر یکسان هستند؛ اتمهای عناصر مختلف از نظر اندازه، جرم و خواص دیگر متفاوت هستند.
  3. نمی توان اتمها را تجزیه، تولید یا نابود کرد.
  4. اتمهای عناصر مختلف به نسبت اعداد کامل ساده با هم ترکیب می شوند تا ترکیبات مرکب تولید کنند.
  5. در واکنشهای شیمیائی اتمها با هم ترکیب می شوند، از هم جدا می شوند یا با هم جابجا می شوند.
- بسیاری از پدیده ها و قوانین شیمی من جمله قانون بقای جرم در واکنشهای شیمیائی و قانون نسبت های ساده که قبلاً کشف شده بودند اما توضیحی برایشان وجود نداشت، براحتی توسط تئوری اتمی دالتون توضیح داده شدند.
- قانون بقای جرم در واکنشهای شیمیائی همانطور که از نامش نیز پیداست، بیان می کند که در طول یک واکنش شیمیائی جرم پایسته است یا تغییر نمی کند. بعبارتی جرم محصولات تولید شده برابر جرم مواد اولیه مصرف شده است. تئوری اتمی دالتون قانون بقای جرم را بدین صورت توضیح می دهد که جرم مواد بخاطر جرم اتمهای آنهاست و از آنجائیکه در واکنشهای شیمیائی اتمها تولید یا نابود نمی شوند، جرم آنها و در نتیجه جرم مواد نیز در واکنشهای شیمیائی عوض نمی شود و جرم مواد اولیه با جرم محصولات برابر است.

قانون نسبت های جرمی معین بیان می کند که عناصر سازنده یک ماده مرکب همواره با یک نسبت جرمی ثابت و معین برای تولید آن ماده مرکب با هم ترکیب می شوند. تئوری اتمی دالتون قانون نسبت های جرمی معین را بدین صورت توضیح می دهد که مستقل از اینکه تعداد اتمهای ترکیب شونده چقدر است یا در چه زمان یا مکانی با هم ترکیب می شوند، هر ماده مرکب از اتمهای عناصر سازنده به نسبت اعداد کامل ساده که ثابت و معین است بوجود می آید و از آنجائیکه جرم همه اتمهای یک عنصر با هم برابر، ثابت و معین است، نسبت جرم عناصر سازنده یک ماده مرکب که همان نسبت جرم اتمهای سازنده آنها است، ثابت و معین خواهد بود.

کشف ذراتی مثل الکترون ها تجزیه ناپذیر بودن اتم در مدل اتمی دالتون را زیر سؤال برد و نیاز به مدل اتمی بود که وجود الکترون ها در ساختار اتم را نیز در نظر بگیرد. همچنین بعدها اثبات شد که در واکنشهای هسته ای و نه شیمیائی اتمها ممکن

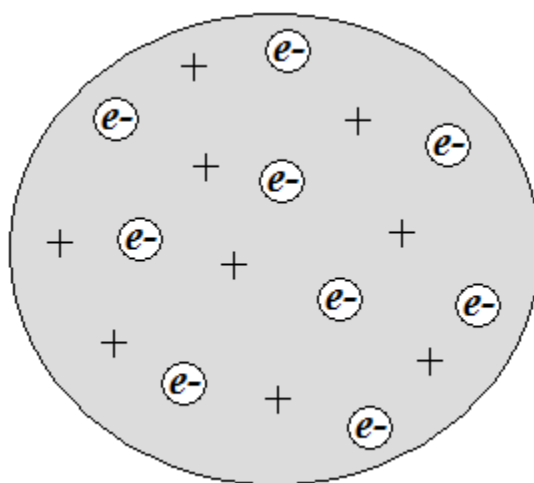
است تولید و نابود شوند. علاوه بر این یکسان بودن تمام اتمهای یک عنصر از نظر تئوری اتمی دالتون نیز بعدا با کشف ایزوتوپ ها زیر سوال رفت.



جان دالتون (6 September 1766- 27 July 1844)

### مدل اتمی تامسون (مدل کیک کشمش یا هندوانه ای)

مدل اتمی تامسون که مدل کیک کشمش یا مدل هندوانه ای هم نامیده می شود، جزو اولین مدل هایی بود که وجود الکترون در ساختار اتم را در نظر می گرفت. در این مدل که در سال 1904 پیشنهاد شد، فرض می شود که اتم از یک ماده زمینه با بار مثبت پخش شده تشکیل شده است که الکترون ها به طور تصادفی به صورت واحدهای مجزا از هم در این ماده زمینه پخش شده اند. از این بابت اتم تامسون شبیه کیک کشمش یا هندوانه است. عبارتی همانطوری که در کیک کشمش (یا هندوانه) دانه های کشمش (یا هندوانه) در ماده زمینه کشمش (یا هندوانه) پخش شده اند، در اتم تامسون الکترونها در یک ماده زمینه با بار مثبت پخش شده اند. شکل بعدی نمایشی از اتم تامسون است.

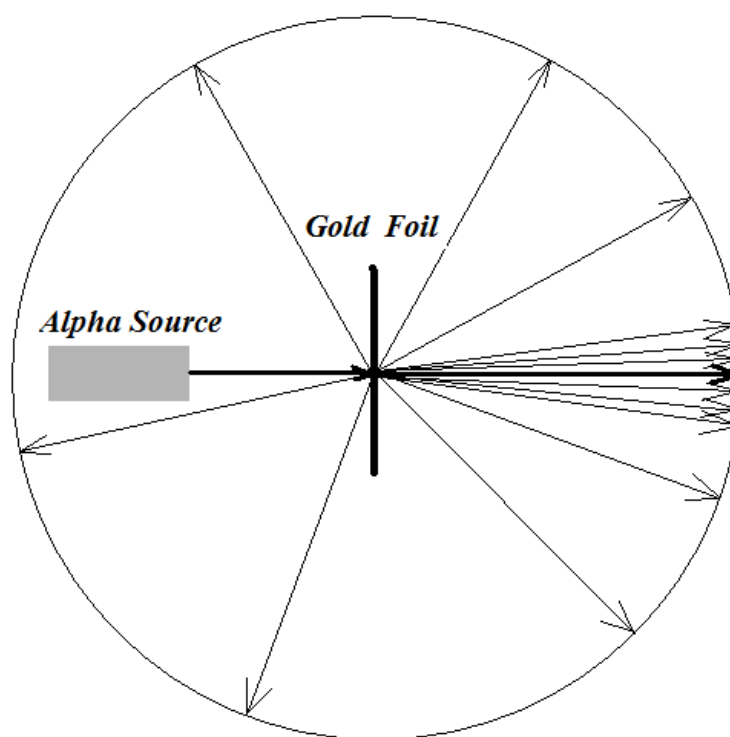


توضیح شکل: مدل اتمی تامسون

مدل اتمی تامسون قادر به توجیه آزمایش صفحه طلای رادرفورد نبود و به همین جهت کنار گذاشته شد و به جای آن مدل اتمی رادرفورد پیشنهاد شد.

## آزمایش صفحه طلا و مدل اتمی رادرفورد

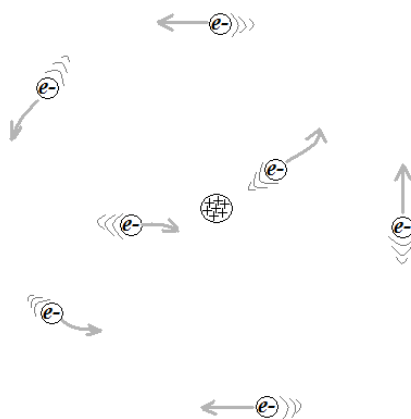
آزمایش رادرفورد که آزمایش فویل طلا یا آزمایش گیگر-مارسدن نیز نامیده می شود، آزمایشی بود که توسط هانس گیگر (*Hans Geiger*) و ارنست مارسدن (*Ernest Marsden*) در سال 1909 تحت نظر ارنست رادرفورد انجام شد. در آزمایش صفحه طلای رادرفورد ذرات باردار و سنگین  $\alpha$  که همان هسته های هلیوم هستند به سمت یک صفحه ی طلای نازک شلیک شدند و مشاهده شد که تعداد زیادی از ذرات  $\alpha$  بدون انحراف یا با انحراف ناچیز از صفحه طلا عبور کردند. اما ذرات آلفایی نیز بودند که منحرف می شدند و گاهی اوقات زاویه انحراف ( زاویه مسیر ورودی با مسیر خروجی) حتی به  $180^\circ$  نیز می رسید. همچنین مشاهده شد که با افزایش زاویه انحراف تعداد ذرات آلفای متناظر به شدت کاهش می یابد. شکل بعدی نمایشی برای آزمایش صفحه طلای رادرفورد است.



توضیح شکل: آزمایش صفحه طلای رادرفورد

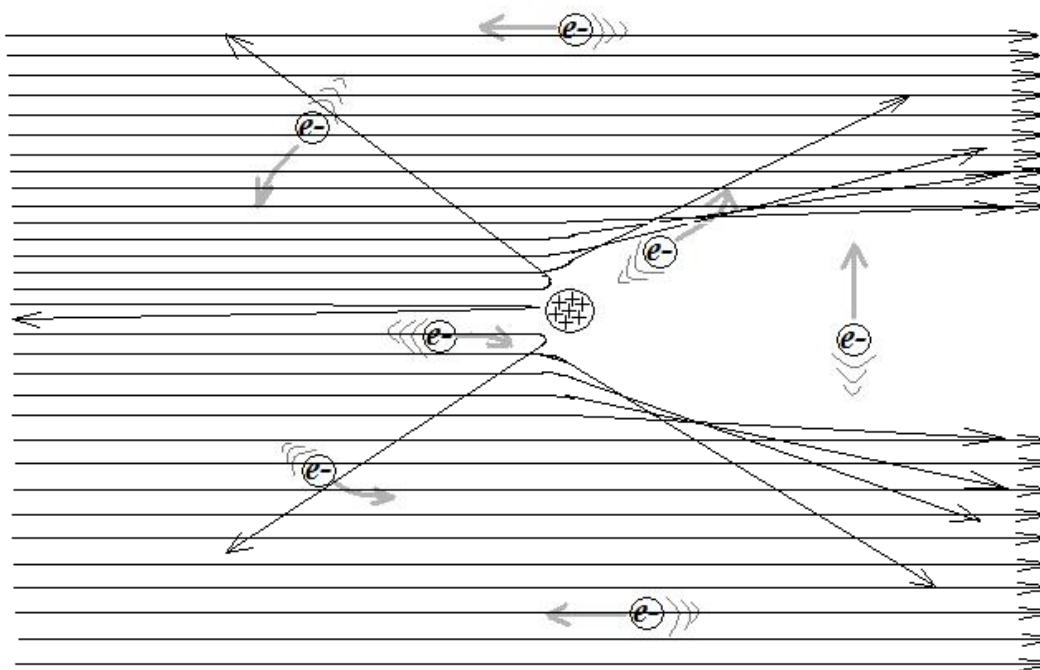
مدل اتمی تامسون با آزمایش صفحه طلای رادرفورد سازگار نیست، چرا که در مدل اتمی تامسون شی ایء در اتم وجود ندارد که بتواند ذره  $\alpha$  سنگین و باردار را به چنین شکلی منحرف کند یا به عبارتی به علت پخش شدن بارهای مثبت و منفی در کنار هم در اتم تامسون ذره آلفا تقریباً در کلیه ی فواصل از مرکز اتم تامسون، اتم تامسون را به صورت یک ذره خنثی مشاهده می کند و بنابراین به همدیگر نیروی الکتریکی قابل توجهی وارد نخواهند کرد.

برای توجیه مشاهدات در آزمایش صفحه طلا مدل اتمی رادرفورد پیشنهاد شد که در آن فرض می شود کل بار مثبت اتم در فضای خیلی کوچکی در مقایسه با اندازه اتم به نام هسته قرار دارند و الکترون ها به دور هسته در حال چرخش اند. در این مدل فرض می شود قسمت عمده ای از فضای اتم فضای خالی است. شکل بعدی نمایشی برای اتم رادرفورد است.

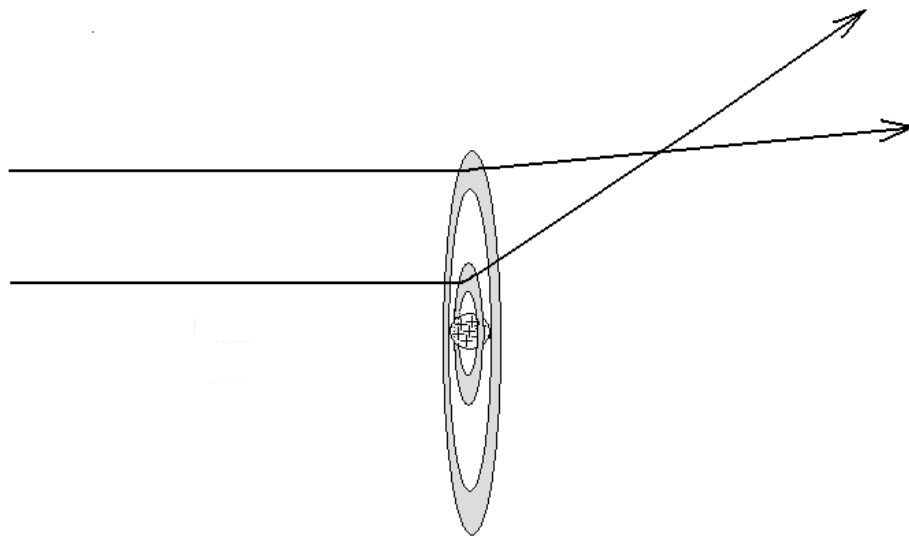


توضیح شکل: مدل اتمی رادرفورد

بر مبنای مدل اتمی رادرفورد بیشتر ذرات آلفا از فضای خالی بین اتم ها یا داخل اتم ها که دور از هسته قرار دارد عبور می کنند و به علت دور بودن از هسته از طرف هسته نیروی خاصی احساس نمی کنند. الکترون ها نیز به علت پخش بودن به این ذرات آلفا نیروی خاصی وارد نمی کنند و در نتیجه بیشتر ذرات آلفا بدون انحراف یا با انحراف ناچیز از صفحه طلا عبور می کنند. به تبع وجود دارند ذرات آلفایی که از فاصله های نزدیک به هسته های اتم های طلا عبور کنند. تحت این شرایط به علت هم نام بودن بار ذرات  $\alpha$  و هسته های طلا نیروی دافعه ای به ذرات آلفا وارد می شود که منجر به انحراف آنها می شود. هر چه یک ذره  $\alpha$  از فاصله ی نزدیک تری نسبت به هسته عبور کند، نیرو و انحراف بیشتری را تجربه خواهند کرد. ذرات آلفایی که به صورت رودررو به هسته نزدیک شوند در ابتدا کند، سپس متوقف و در نهایت روی مسیر آمده باز می گردند و زاویه انحراف  $180^\circ$  تجربه می کنند. بنابراین مدل اتمی رادرفورد عبور بدون انحراف اغلب ذرات آلفا از ورقه طلا و امکان وجود زاویه انحراف تا  $180^\circ$  را می توانست توجیه کند. شکل بعدی نحوه عبور ذرات آلفا از اتم رادرفورد را نشان می دهد.



در صورتی که فرض کنیم تعداد ذرات  $\alpha$  عبوری در واحد سطح ثابت است، تعداد ذرات  $\alpha$  ی گذرنده از یک فاصله ی دورتر نسبت به هسته برای گذر به علت مساحت بیشتر ممکن ( چون شعاع بیشتر است) بیشتر از تعداد ذرات  $\alpha$  ی گذرنده از یک فاصله ی نزدیکتر به هسته است. پس تعداد ذرات  $\alpha$  ی متناظر با فواصل نزدیکتر که منجر به انحراف های بیشتر می شود، کمتر از تعداد ذرات  $\alpha$  ی متناظر با فواصل دورتر و انحراف های کمتر خواهد بود. بنابراین مدل اتمی رادرفورد کاهش تعداد ذرات آلفا با افزایش زاویه انحراف را توجیه می کرد. شکل بعدی را در نظر بگیرید.



توضیح شکل: یک مقایسه نمونه بین سطح امکان پذیر برای گذر با یک زاویه انحراف بزرگتر با سطح امکان پذیر برای گذر با یک زاویه انحراف کوچکتر

بنابر فیزیک کلاسیک الکترون که در مدل اتمی رادرفورد یک ذره شتابدار است باید انرژی از دست بدهد و به تدریج به سمت هسته نزدیک شود تا نهایتاً به داخل هسته بیفتد. بنابراین اتم رادرفورد باید ناپایدار باشد، که این با واقعیت مشاهده شده در مورد پایداری اتم ها در دنیای طبیعی ما متناقض است. همچنین مدل اتمی رادرفورد قادر به توجیه طیف های اتمی که بعدها خواهیم دید، نبود. به همین علت مدل اتمی رادرفورد نیز رد شد و به جای آن مدل اتمی بور پیشنهاد شد. قبل از بررسی مدل اتمی بور بایستی با ویژگی کوانتیده یا پیوسته بودن برای کمیت ها و همچنین امواج به ویژه امواج الکترومغناطیس آشنا شویم.

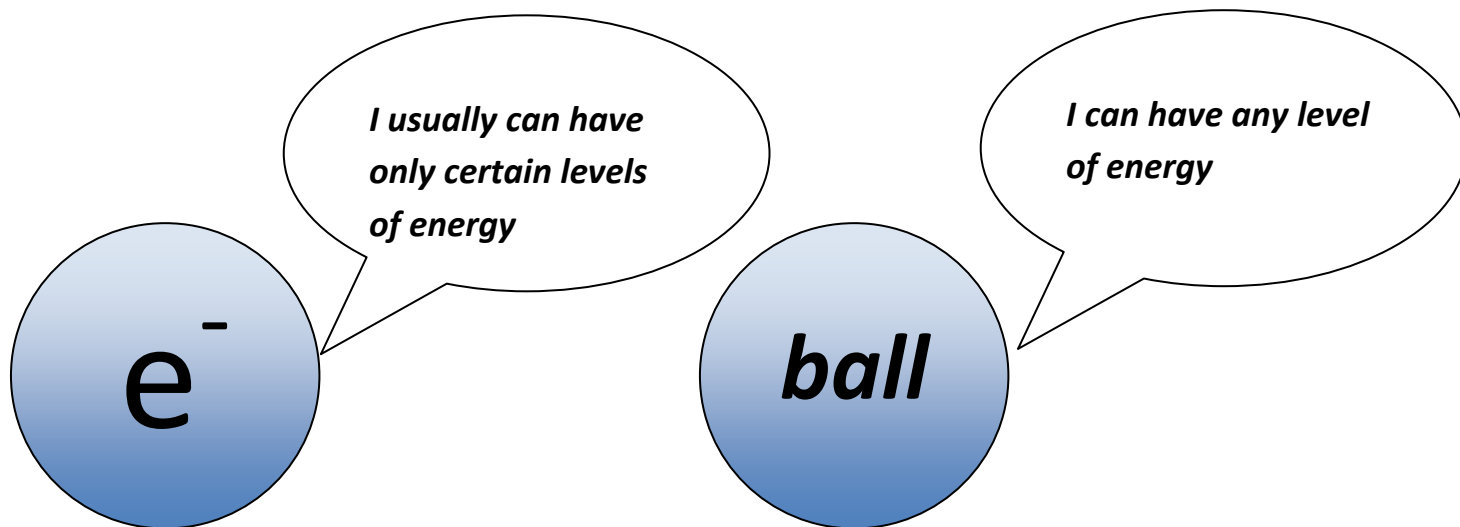


ارنست رادرفورد (30 August 1871- 19 October 1937)

## کمیت های کوانتیده ( گسسته ) و پیوسته

کمیت ها را می توان به دو دسته کمیت های گسسته و کمیت های پیوسته تقسیم کرد. کمیت های پیوسته کمیت هایی هستند که می توانند هر مقدار دلخواهی داشته باشند. کمیت های گسسته کمیت هایی هستند که تنها می توانند مقادیر مشخص و مجزایی داشته باشند و نمی توانند مقداری ما بین دو مقدار مجاز متوالی داشته باشند. بعنوان مثال پر کردن یک مخزن آب را یکبار با آب شیلنگ و یکبار هم با بطریهای آب یک لیتری کاملا پر در نظر بگیرید. در صورتیکه از شیلنگ آب استفاده کنیم، می توانیم آب بطور پیوسته وارد مخزن کنیم و حجم آب داخل مخزن را روی هر عدد دلخواهی با رعایت ظرفیت مخزن تنظیم کنیم. بعنوان مثال می توانیم هم 34 لیتر آب و هم 35 لیتر آب و هم هر عدد دلخواهی بین 34 و 35 مثل 34.7 لیتر آب درون مخزن داشته باشیم. اما در صورتیکه از بطریهای آب یک لیتری کاملا پر استفاده کنیم، فقط می توانیم یک لیتر آب به مخزن اضافه کنیم و بنابراین حجم آب داخل مخزن را در اینجا فقط می توانیم روی اعداد طبیعی تنظیم کنیم. بعنوان مثال در اینجا حجم آب درون مخزن می تواند هم 34 لیتر آب و هم 35 لیتر باشد، اما نمی تواند عددی بین 34 و 35 مثل 34.7 لیتر باشد. در حالت اول حجم آب درون مخزن که می تواند هر مقدار دلخواهی داشته باشد، یک کمیت پیوسته است. در حالیکه در حالت دوم حجم آب درون مخزن که تنها می تواند مقادیر مشخص و مجزایی داشته باشند و نمی تواند مقداری ما بین دو مقدار مجاز متوالی داشته باشد، یک کمیت گسسته است. بعنوان مثال دیگر می توان ارتفاع یک سگ را یکبار در هنگام حرکت بر روی یک سطح شیبدار و یکبار هم هنگام حرکت بر روی یک سطح پله دار در نظر گرفت. در حالت اول ارتفاع سگ یک کمیت پیوسته است، در حالیکه در حالت دوم یک کمیت گسسته است.

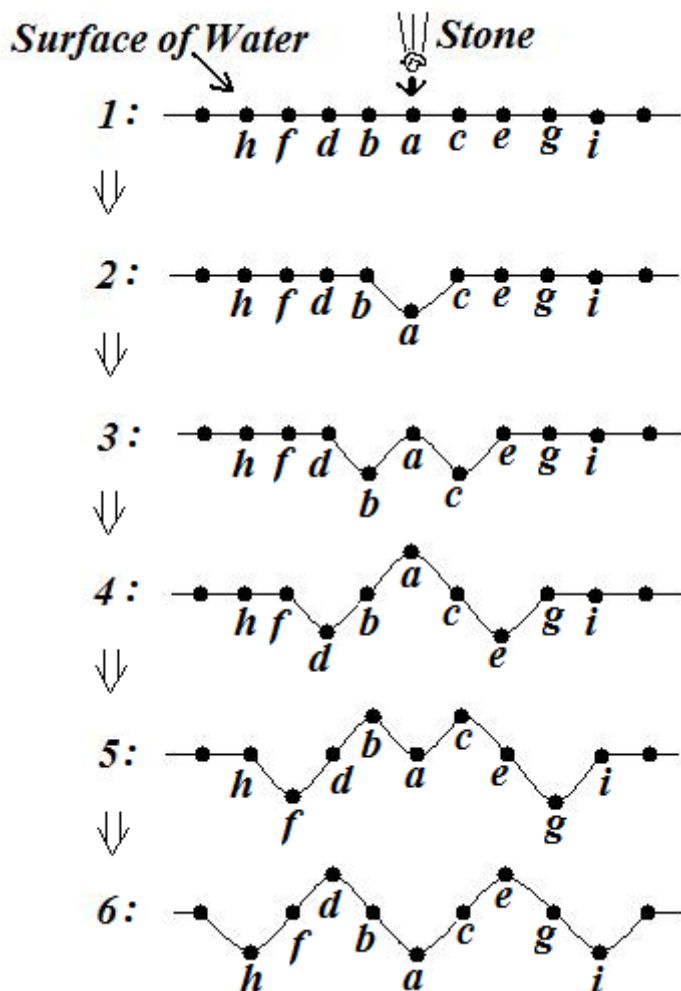
در حد اندازه های اتمی یا خیلی کوچک کمیت هایی از قبیل انرژی، فاصله و ... از نوع کمیت های گسسته هستند که در فیزیک کوانتومی بررسی می شوند. بعبارتی دیگر فیزیک کوانتومی مطالعه رفتار ماده و انرژی در سطوح و ابعاد مولکولی، اتمی و حتی کوچکتر است. رفتار ماده و انرژی در چنین ابعاد کوچکی با رفتار آنها در ابعاد ماکروسکوپی و معمولی زندگی روزمره ما تفاوت های قابل توجهی دارد، من جمله اینکه کمیت هایی مثل انرژی، فاصله و ... در ابعاد معمولی بصورت پیوسته هستند، در حالیکه همین کمیت ها در ابعاد اتمی بصورت گسسته هستند. مدل اتمی بور جز اولین تئوریهایی بود که کوانتیده بودن کمیت ها در دنیای اتمها را در نظر می گرفت.



## امواج

در فیزیک، یک موج آشوب یا نوسانی است که در فضا یا ماده حرکت می کند و انرژی را انتقال می دهد. امواج ساده معمولا به صورت حرکت تناوبی یا پریودیک هستند (البته هر حرکت تناوبی یا پریودیک لزوما یک موج نیست). حرکت تناوبی یا پریودیک حرکتی است که در آن یک ذره، یک جسم یا یک کمیت فیزیکی بعد از طی یک مسیر یا یک سری مقادیر مجدداً به حالت اولیه یا مقدار اولیه باز می گردد و از نو حرکت را تکرار می کند (بعبارتی رفت و برگشت دور یک حالت یا مقدار مرجع دارد). دو دسته اصلی از امواج، امواج مکانیکی و امواج الکترومغناطیسی هستند. امواج مکانیکی در محیط مادی منتشر می شوند و ذرات سازنده آن محیط مادی را به نوسان و تغییر وا می دارند (بعبارتی نوسان و تغییر ذرات سازنده آن محیط مادی موج مکانیکی محسوب می شود و موج مکانیکی نمی تواند در خلا وجود داشته باشد). از امواج مکانیکی می توان به موج آب روی سطح آب برکه و موج صدا در هوا اشاره کرد. امواج الکترومغناطیسی نوسانات پریودیک میدان های الکتریکی و مغناطیسی هستند و هم در محیط مادی و هم در خلا می توانند وجود داشته باشند. امواج الکترومغناطیسی شامل امواج رادیویی، میکرو موج ها، تابش های فرسرخ، نور مرئی، تابش های فرابنفش، اشعه های ایکس و گاما می باشند.

به منظور آشنایی بیشتر با امواج و درک ساز و کار و مکانیزم ایجاد و گسترش آنها بعنوان مثال موج آب ایجاد شده روی سطح آب برکه یا استخر را بر اثر برخورد سنگ در نظر می گیریم. شکل بعدی ایجاد و گسترش موج روی سطح آب را در شش نمایش متوالی از سطح آب نشان می دهد. در این شکل از حروف کوچک انگلیسی برای مشخص کردن بعضی از مناطق روی سطح آب استفاده کردیم. هر حرف دسته ای از مولکول های آب مجاور هم را نشان می دهد. در ابتدا سطح آب ساکن و بدون موج است (نمایش 1). در اثر برخورد سنگ، مولکولهای منطقه  $a$  همراه سنگ به پایین کشیده می شوند (نمایش 2). زمانیکه مولکولهای منطقه  $a$  به سمت پایین کشیده می شوند، بعلت وجود نیروهای جاذبه بین مولکولی به مولکولهای مجاور خود یعنی مولکولهای مناطق  $b$  و  $c$  نیرویی به سمت پایین وارد می کنند و آنها را هم پایین می کشند. در عکس العمل مولکولهای مناطق  $b$  و  $c$  نیرویی به سمت بالا به مولکولهای منطقه  $a$  وارد می کنند. در نتیجه مولکولهای مناطق  $b$  و  $c$  پایین می روند، در حالیکه مولکولهای منطقه  $a$  بالا کشیده می شوند و به حالت اولیه خود برمیگردند (نمایش 3). مولکولهای مناطق  $b$  و  $c$  موقع پایین رفتن به مولکولهای مجاور خود یعنی مولکولهای مناطق  $d$  و  $e$  نیرویی به سمت پایین وارد می کنند و آنها را هم پایین می کشند، مولکولهای مناطق  $d$  و  $e$  هم در عکس العمل مولکولهای مناطق  $b$  و  $c$  را بالا می کشند. از طرفی مولکولهای منطقه  $a$  که قبلا بالا کشیده می شدند، بعلت سرعت و اینرسی که در حرکت به سمت بالا دارند، بعد از برگشتن به سطح اولیه آب به حرکت خود به سمت بالا ادامه می دهند. در نتیجه مولکولهای منطقه  $a$  به موقعیت های بالاتر از سطح اولیه آب می روند، در حالیکه مولکولهای مناطق  $b$  و  $c$  به حالت اولیه خود برمیگردند و مولکولهای مناطق  $d$  و  $e$  پایین می روند (نمایش 4). ساز و کار یاد شده ادامه می یابد و منجر به گسترش موج و نوسانات به مناطق دیگر مثل  $f, g, h, i$  می شود (نمایش 5 و 6).

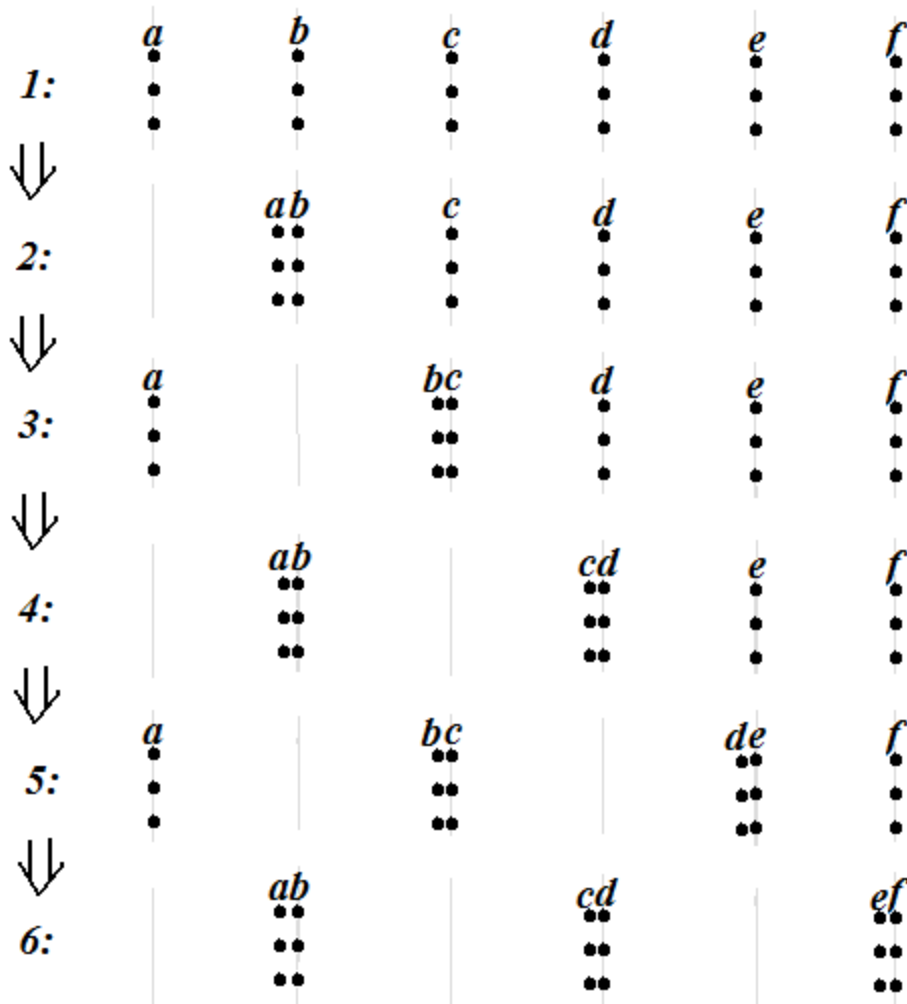


توضیح شکل: ایجاد و گسترش موج روی سطح آب بر اثر برخورد سنگ

بعنوان مثال دیگر برای درک ساز و کار و مکانیزم ایجاد و گسترش امواج موج صدا در هوا را در نظر می گیریم. شکل بعدی ایجاد و گسترش موج صدا در هوا را در شش نمایش متوالی نشان می دهد. در این شکل از حروف کوچک انگلیسی برای مشخص کردن بعضی از مناطق هوا استفاده کردیم. هر حرف دسته ای از مولکول های هوا مجاور هم در یک ستون را نشان می دهد. در ابتدا هوا بدون موج است (نمایش 1). در اثر نوسانات یک جسم مثل دیپازون، تارهای صوتی حنجره یا پرده بلندگو و برخورد آن به مولکولهای  $a$  مولکولهای ستون  $a$  به سمت مولکولهای ستون  $b$  هل داده می شوند (نمایش 2). زمانی که مولکولهای ستون  $a$  به مولکولهای ستون  $b$  برخورد می کنند، مولکولهای ستون  $b$  را به سمت مولکولهای ستون  $c$  هل می دهند و خود به جای اولیه شان برگشت داده می شوند (نمایش 3). مولکولهای ستون  $a$  بعد از برگشت به جای اولیه مجددا در اثر برخورد با عامل ایجاد موج یا مولکولهای دیگر هوا به سمت مولکولهای ستون  $b$  هل داده می شوند. از طرفی مولکولهای ستون  $b$  در اثر برخورد با مولکولهای ستون  $c$  آنها را به سمت مولکولهای ستون  $d$  هل می دهند و خود به جای اولیه شان برگشت داده می شوند (نمایش 4). ساز و کار یاد شده ادامه می یابد و منجر به گسترش موج و نوسانات به مناطق دیگر مثل  $e, f$  می شود (نمایش 5 و 6). در نواحی که مولکولها بهم نزدیک می شوند، افزایش تراکم مولکولها و افزایش فشار را داریم. بالعکس در نواحی که مولکولها از هم



دور می شوند، کاهش تراکم مولکولها و کاهش فشار را داریم. هر ناحیه بطور متوالی افزایش و کاهش فشار را تجربه می کند و در واقع موج صدا بصورت نواحی پر فشار و کم فشار پشت سرهم هست. لازم بذکر است که ساز و کار و مکانیزم ایجاد و گسترش موج صدا در دیگر محیط ها مثل جامدات مشابه مکانیزم یاد شده است. همچنین نمایش توصیف شده یک نمایش تقریبی و نه دقیق است.



توضیح شکل: ایجاد و گسترش موج صدا در هوا در اثر نوسانات یک جسم مثل پرده بلندگو و برخورد آن به مولکولهای هوا همانطور که دو مثال قبلی نیز نشان می دهند، در امواج مکانیکی نوسان ذرات سازنده محیط را داریم اما لزوما ذرات سازنده محیط جابجایی خالص ندارند. مثلا برای موج روی سطح آب نقاط روی سطح آب تغییر ارتفاع می دهند و دارای حرکت نوسانی بالا-پایین هستند، اما در سطح آب جابجا نمی شوند. همچنین به نظر می آید که موج در سطح آب حرکت می کند یا انتشار می یابد، اما هیچ ذره ای به طور خالص جابجا نمی شود. به طور مشابه با انتشار موج صدا در هوا هر مولکول هوا در مکان خودش حرکت نوسانی انجام می دهد، اما جابجایی خالص ندارد (برخلاف باد).

امواج می توانند عرضی یا طولی باشند. امواجی که در آنها راستای انتشار موج عمود بر راستای نوسان ذرات است امواج عرضی و امواجی که راستای انتشار موج در راستای نوسانات ذرات است امواج طولی نامیده می شوند. مثلاً موج روی سطح آب بر که یک موج عرضی است، در حالیکه صدا یک موج طولی است.

در مورد امواج و هنگام مطالعه آنها بایستی با کمیت های زیر آشنا باشیم:

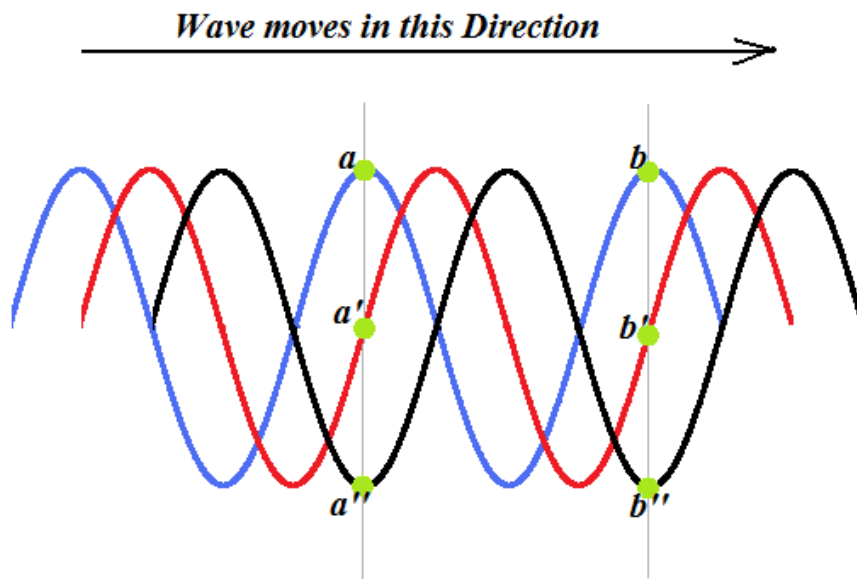
**دوره تناوب ( $T$ )** : دوره تناوب مدت زمانی است که طول می کشد تا یک ذره ی نوسانی یک نوسان کامل انجام دهد. واحد آن ثانیه ( $s$ ) است. بعد از گذشت یک یا چند دوره تناوب ذره به موقعیت نوسانی اولیه خود بر می گردد، بنابراین یک نقطه یا ذره نوسانی در زمان های  $t, t + T, t + 2T, \dots, t + nT$  در شرایط نوسانی کاملاً یکسان قرار دارد.

**فرکانس ( $f$  یا  $\nu$  (نو))** : فرکانس ( $frequency$ ) تعداد نوسانات کامل در یک ثانیه است، واحد آن هرتز ( $Hz$ ) یا  $\frac{1}{s}$  ( $\frac{Cycle}{s}$ ) است.

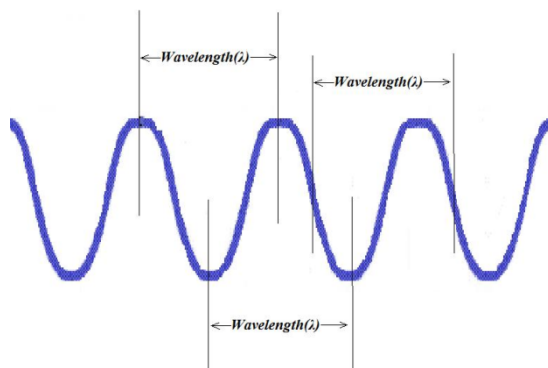
با توجه به تعاریف دوره تناوب و فرکانس رابطه زیر را بین آنها می توان در نظر گرفت:

$$f = \frac{1}{T}$$

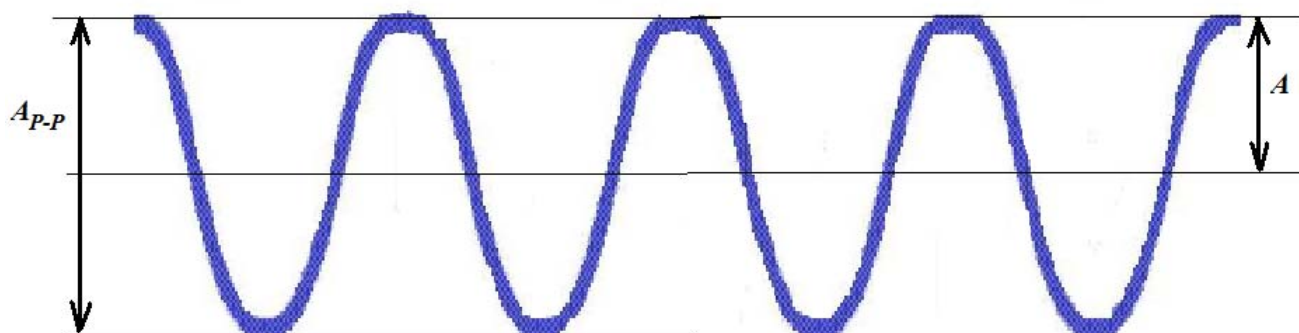
**طول موج ( $\lambda$ )** : کمترین فاصله مکانی بین دو نقطه تحت شرایط نوسانی کاملاً یکسان یا کمترین فاصله مکانی نقاط همفاز طول موج ( $wavelength$ ) نامیده می شوند. دو نقطه (ذره) نوسانی تحت شرایط نوسانی کاملاً یکسان قرار دارند یا همفاز هستند، اگر موقعیت، جهت و سرعت حرکت نوسانی آنها کاملاً یکسان باشد. بعنوان مثال در شکل بعد سه وضعیت از موقعیت نوسان نقاط موجی که به سمت راست حرکت می کند، نشان داده شده است. با گذشت زمان  $a$  به  $a'$  و سپس  $a''$  می رود.  $b$  با گذشت زمان به  $b'$  و سپس  $b''$  می رود. همانطور که در شکل دیده می شود، نقاط  $a$  و  $b$  همواره در وضعیت نوسانی یکسانی قرار دارند (مثلاً وقتی  $a$  بالاست،  $b$  هم بالاست یا وقتی  $a$  پایین است،  $b$  هم پایین است). بنابراین نقاط  $a$  و  $b$  همفاز هستند. از آنجائیکه بین آنها نقطه همفاز دیگری نداریم، فاصله بین آنها کمترین فاصله مکانی بین نقاط همفاز یا همان طول موج است.



طول موج را می توان فاصله ی دو قله یا دو دره ی متوالی نیز در نظر گرفت. شکل بعدی را در نظر بگیرید. با توجه به تعریف طول موج، نقاط یا ذرات نوسانی در فواصل مکانی  $\lambda$ ،  $2\lambda$ ،  $3\lambda$  و... از هم در شرایط نوسانی کاملاً یکسان قرار دارند یا همفازند.



**دامنه موج:** دامنه یک متغیر پریودیک سنجشی از تغییرات آن در طول یک نوسان کامل است. تعاریف مختلفی برای دامنه (*Amplitude*) وجود دارد که همگی تابعی از بزرگی اختلاف بین مقادیر اکستریم کمیت هستند. در ادامه با دو مورد متداول برای تعریف دامنه آشنا می شویم. دامنه پیک تو پیک (*Peak-to-Peak Amplitude*) که با  $A_{p-p}$  نشان داده می شود اختلاف مقادیر اوج و حضیض یک کمیت در طول یک نوسان کامل است. نیمه دامنه (*Semi Amplitude*) که معمولاً دامنه خوانده می شود و با  $A$  نشان داده می شود، بصورت نصف دامنه پیک تو پیک تعریف می شود. شکل بعدی را در نظر بگیرید:



در فیزیک کلاسیک انرژی امواج با مجذور دامنه رابطه مستقیم دارد. بعنوان مثال از نظر فیزیک کلاسیک با دو برابر شدن دامنه موج انرژی آن چهار برابر می شود.

**سرعت انتشار موج ( $V$ ):** سرعت پیشروی یا انتشار موج در فضا را سرعت انتشار موج می گویند. با توجه به اینکه یک موج در مدت زمان یک دوره تناوب به اندازه یک طول موج پیشرفت می کند، رابطه سرعت انتشار موج با دوره تناوب و طول موج به صورت زیر است:

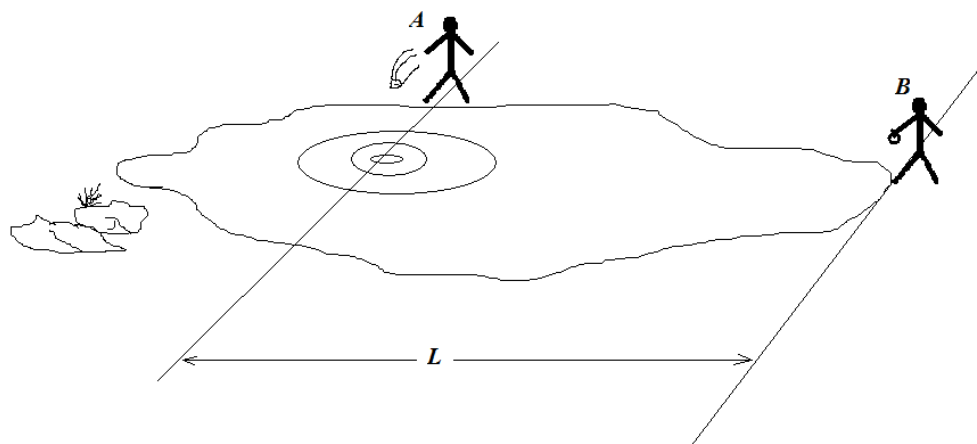
$$V = \lambda / T$$

با توجه به رابطه دوره تناوب و فرکانس، رابطه قبل به صورت زیر نیز می تواند نوشته شود:

$$V = \lambda f = v\lambda$$

مثال: مطابق شکل زیر دو شخص  $A$  و  $B$  به فاصله  $L$  از هم در کنار برکه آبی قرار دارند. شخص  $A$  در دست یک سنگ برای ایجاد موج و شخص  $B$  در دست یک کرومومتر برای سنجش زمان دارد. شخص  $A$  سنگ را در جلوی پای خود به داخل برکه می

اندازد. شخص  $B$ ،  $t_1$  ثانیه بعد از برخورد سنگ به آب اولین قله موج آب و  $t_2$  ثانیه بعد از برخورد سنگ به آب دومین قله موج آب را در زیر پای خود می بیند. طول موج، فرکانس، دوره تناوب و سرعت انتشار موج آب روی سطح برکه را بر حسب کمیت های داده شده بدست آورید.



حل:

اولین قله موج در لحظه برخورد سنگ به آب ایجاد شده است و بعد از طی فاصله بین دو شخص  $A$  و  $B$  یعنی مسافت  $L$  در مدت زمان  $t_1$  به زیر پای شخص  $B$  رسیده است. عبارتی موج در مدت زمان  $t_1$  فاصله  $L$  را طی کرده است، پس برای سرعت انتشار موج که نسبت مسافت پیموده شده به مدت زمان طی مسافت است، داریم:

$$V = \frac{L}{t_1}$$

$t_1$  ثانیه بعد از برخورد سنگ به برکه، آب زیر پای شخص  $B$  در حالت قله قرار دارد.  $t_2$  ثانیه بعد از برخورد سنگ به برکه، آب زیر پای شخص  $B$  مجدداً در حالت قله قرار می گیرد. این بدین معنی است که در بازه زمانی  $t_2 - t_1$  آب زیر پای شخص  $B$  یک نوسان کامل انجام داده است. پس برای دوره تناوب که مدت زمان لازم برای یک نوسان کامل است، داریم:

$$T = t_2 - t_1$$

با در دست داشتن دوره تناوب و سرعت انتشار موج بر حسب پارامترهای مسئله می توانیم بصورت زیر فرکانس و طول موج را هم بر حسب پارامترهای مسئله بدست آوریم:

$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = \frac{1}{t_2 - t_1}$$

$$V = \frac{\lambda}{T} \Rightarrow \lambda = VT = \frac{L}{t_1} \times t_2 - t_1$$

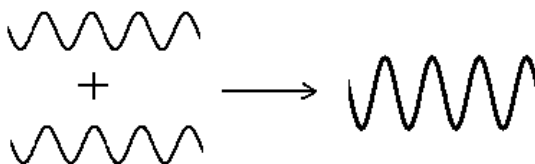
\*\*\*\*\*

### اصل برهم نهی امواج

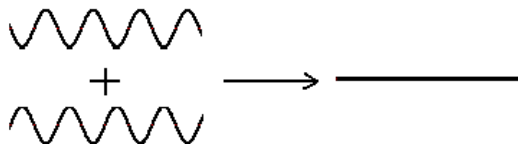
دو یا چند ذره نمی توانند به طور همزمان در یک نقطه از فضا حضور داشته باشند. برخلاف ذرات دو یا چند موج به طور همزمان بدون آنکه بر روی همدیگر اثر داشته باشند، می توانند در یک نقطه از فضا وجود داشته باشند. این از تفاوت های مهم امواج و ذرات یا رفتار موجی و ذره ای است.

اصل برهم نهی می تواند برای بدست آوردن اثر حضور همزمان امواج به کار رود. بنابر این اصل در صورتی که چند موج به طور همزمان در یک نقطه از فضا حضور داشته باشند، اثر چند موج در آن نقطه از فضا از برهم نهی یا مجموع اثرات هریک از امواج بدست می آید. بعنوان مثال اگر نوسان یک نقطه مشخص در سطح آب بخاطر موج  $A$  در یک لحظه مشخص باندازه  $5\text{cm}$  رو به بالا و نوسان همان نقطه مشخص در سطح آب بخاطر موج  $B$  در همان لحظه مشخص باندازه  $2\text{cm}$  رو به بالا باشد، نوسان مشاهده شده برای آن نقطه در آن لحظه مشخص مجموع این دو نوسان یعنی  $7\text{cm}$  رو به بالا خواهد بود. بعنوان مثال دیگر اگر نوسان یک نقطه مشخص در سطح آب بخاطر موج  $A$  در یک لحظه مشخص باندازه  $5\text{cm}$  رو به بالا و نوسان همان نقطه مشخص در سطح آب بخاطر موج  $B$  در همان لحظه مشخص باندازه  $2\text{cm}$  رو به پایین باشد، نوسان مشاهده شده برای آن نقطه در آن لحظه مشخص مجموع این دو نوسان یعنی  $3\text{cm}$  رو به بالا خواهد بود. همانطوری که این دو مثال نشان می دهند، گاهی اوقات امواج اثر همدیگر را تقویت می کنند و منجر به نوسانات بزرگتر می شوند (مثل مثال اول). گاهی اوقات هم امواج اثر همدیگر را تضعیف می کنند و منجر به نوسانات کوچکتر یا حتی از بین رفتن همدیگر می شوند (مثل مثال دوم). حالت اول تداخل یا برهم نهی سازنده (*Constructive Interference*) و حالت دوم تداخل یا برهم نهی ویرانگر (*Destructive Interference*) نامیده می شود. شکل بعدی تداخل یا برهم نهی سازنده و ویرانگر را برای دو موج با دامنه یکسان نشان می دهد.

#### *Constructive Interference*



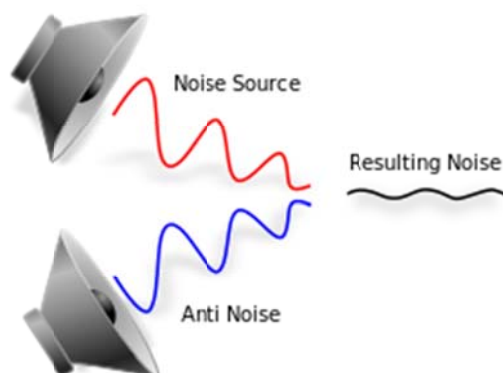
#### *Destructive Interference*



دقت کنید که در این شکل در بالا قله های موجها بهم و دره های آنها بهم رسیده اند و بیشترین تداخل سازنده ممکن رخ داده است و در پایین قله های یک موج به دره های موج دیگر رسیده است و بیشترین تداخل ویرانگر ممکن رخ داده است که منجر به حذف کامل هر دو موج شده است.

در ادامه دو مثال از کاربردهای جالب اصل برهم نهی را می بینیم. بر مبنای اصل برهم نهی می توان دستگاههایی برای حذف نویز یا صداهای مزاحم ساخت. روش کار آنها بدین صورت خواهد بود که نویز یا صدای مزاحم در محیط را شناسایی کرده و موجی

قرینه آن تولید کنند تا بخاطر تداخل ویرانگر این دو موج نویز یا صدای مزاحم حذف شود. شکل بعدی این موضوع را نشان می دهد.



حذف صداهای مزاحم بر مبنای اصل برهم نهی

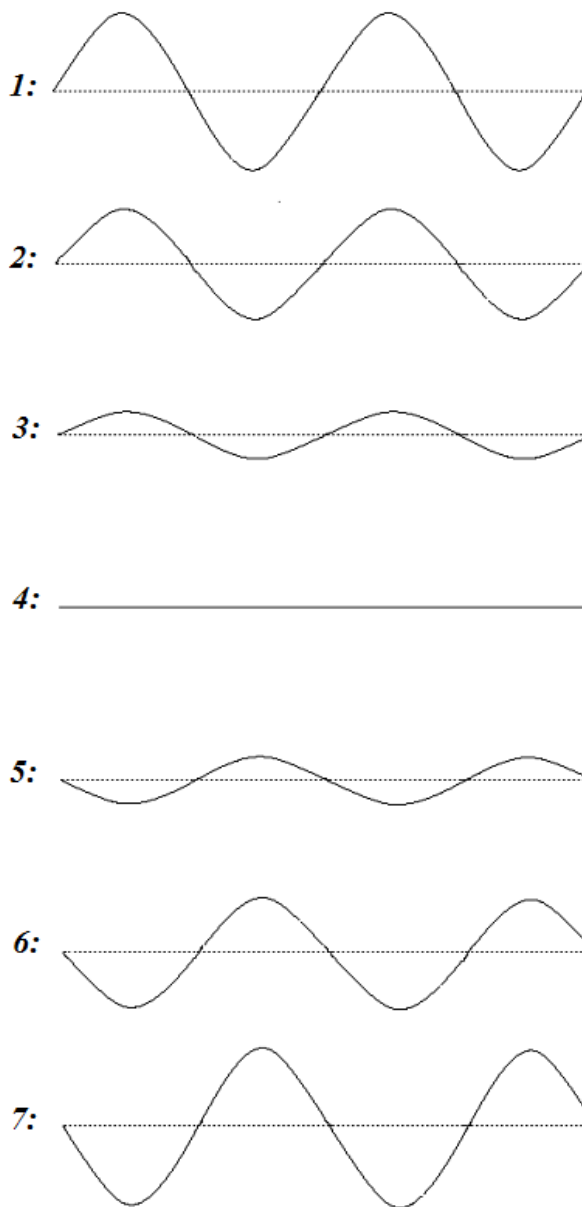
همچنین اصل برهم نهی می تواند برای ترکیب امواج به منظور تولید امواج با ویژگیهای خاص مد نظر بکار رود. بعنوان مثال می توان یک موج با شکل دلخواه مثل شکل یک حرف را روی آب با استفاده از ترکیب و برهم نهی امواج مناسب ایجاد کرد. شکل بعدی حرف K را روی سطح آب نشان می دهد که بهمین شیوه ایجاد شده است.



بعدها خواهیم دید که باتوجه به خصلت موجی الکترون در اتم، اصل برهم نهی می تواند در بررسی و مدلسازی اتمها، مولکولها و مواد توسط دانشمندان مفید واقع شود. بعنوان مثال موقع پیوند خوردن اتمها با هم، الکترونها بعنوان امواج در نواحی مشترکی از فضا قرار می گیرند و بعنوان امواج با هم تداخل میکنند و اصل برهم نهی می تواند در بررسی و مدلسازی این تداخلات بکار رود.

## امواج ایستا

امواج ایستا امواجی هستند که موقعیت ثابتی دارند و حرکت نمی کنند. بعنوان مثال شکل بعدی نحوه نوسانات سطح آب را در صورت حضور یک موج ایستای نمونه نشان می دهد. همانطور که در شکل نیز می توان دید، در امواج ایستا قله ها و دره ها یا نقاط بدون نوسان جایجا نمی شوند یا حرکت نمی کنند.

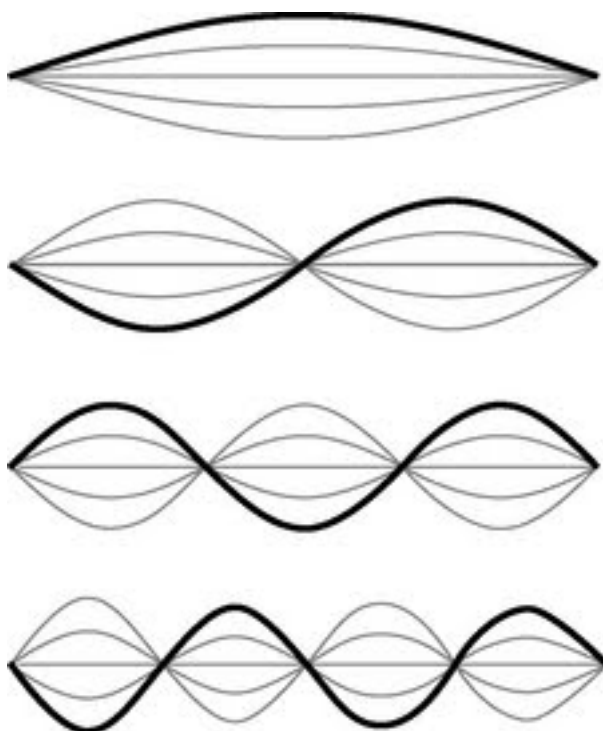


توضیح شکل: یک مثال برای موج ایستا، نوسانات بصورت نمایش داده شده از  $I$  تا  $7$  و سپس از  $7$  تا  $I$  انجام می شود و مجدداً تکرار می شود. نقطه چین حالت عادی یا بدون نوسان است.

همانور که در شکل قبلی نیز می توان تحقیق نمود، در امواج ایستا نقاط با فرکانس یکسانی نوسان می کنند و در زمان یکسانی به موقعیت بدون نوسان می رسند. امواج ایستا دارای انرژی هستند، اما انتقال خالص انرژی ندارند. در یک موج ایستا هر نقطه می تواند دامنه نوسان مخصوص خودش را متفاوت با بقیه نقاط داشته باشد. در شکل قبلی نیز می توان دید که برخی از نقاط به

شدت نوسان می کنند و دامنه نوسان بالایی دارند، در حالیکه برخی دیگر نوسانات کم و دامنه نوسان پایینی دارند. در امواج ایستا به نقاطی که کمترین دامنه نوسان را دارند یا اصلاً نوسان نمی کنند، گره (*node*) و به نقاطی که بیشترین دامنه نوسان را دارند، ضد گره (*anti-node*) می گویند.

نوسانات یا امواج موجود در سیستم‌های طبیعی مثل نخ، پوسته طبل، پل، ساختمان و ... می تواند به صورت مجموع امواج ایستایی که مختص آن سیستم هستند، بیان شود. عبارتی هر سیستم طبیعی امواج ایستایی مخصوص خود دارد که ترکیب آنها می تواند موجهای قابل تولید در آن سیستم را نتیجه دهد. بعنوان مثال شکل بعدی امواج ایستای متداول یک نخ را که محکم بین دو نقطه ثابت کشیده شده است، را نشان می دهد.



توضیح شکل: امواج ایستای متداول یک نخ که محکم بین دو نقطه ثابت کشیده شده است،

هر موج ایستا بصورت ترکیبی از پنج حالت نوسانی نمایش داده شده است که یکی از دو حالت نوسانی که نقاط در آن دو حالت ماکزیمم نوسان و جابجایی از حالت بدون نوسان را دارند، بصورت پر رنگ نمایش داده شده است.

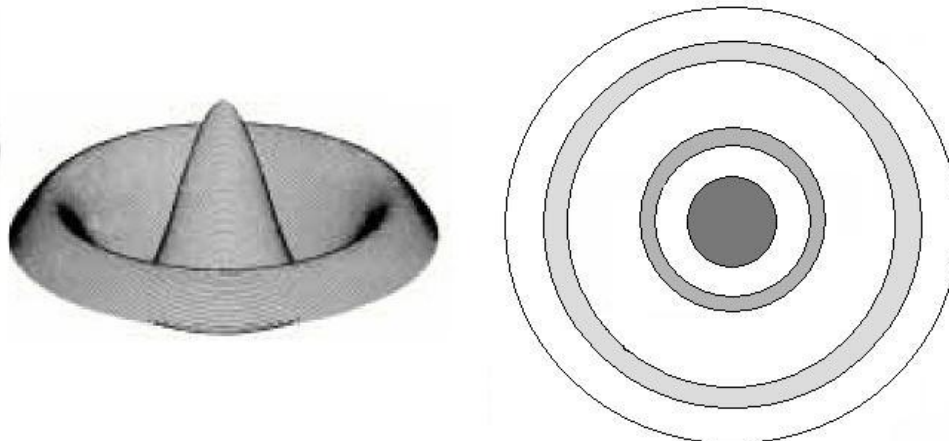
برای نمایش امواج ایستا روشهای مختلفی می توان در نظر گرفت. یک روش می تواند نمایش نوسان مربوطه در یک فیلم یا انیمیشن یا در عکس های متوالی بصورت مجزا یا ترکیبی (مثل دو شکل قبل) باشد. روش دیگر می تواند بیان ریاضی تابع دامنه موج باشد، تابعی که مقدار دامنه موج در هر نقطه را بعنوان خروجی بر حسب مختصات یا موقعیت آن نقطه بعنوان ورودی نتیجه می دهد. همچنین می توان بجای بیان ریاضی تابع دامنه موج، آن را در یک نمودار به نمایش کشید. عبارتی در یک نمودار دامنه نوسانات هر نقطه را مشخص کنیم. در اینصورت بایستی به این نقطه توجه کرد که هنگامی که برخی نقاط نوسانات رو به بالا دارند، برخی دیگر ممکن است در آن لحظات نوسان رو به پایین داشته باشند و بالعکس. برای نمایش این مطلب در نمودار می توان دامنه را بصوت مثبت و منفی نمایش داد که مثبت بودن دامنه در یک سری نقاط و منفی بودن آن در یک سری نقاط



دیگر به معنی نوسانات خلاف جهت هم در هر لحظه است. بعنوان مثال برای این نحوه نمایش خطوط پر رنگ شکل قبلی را می توان در نظر گرفت. بعنوان مثال دیگر می توان نمایش سه موج ایستای متداولتر یک پوسته نازک دایروی یک طبل در شکل بعدی را در نظر گرفت. همانگونه که در شکل بعدی هم مشهود است، در این نحوه نمایش ممکن است مقدار دامنه نوسانات نقاط در مقایسه با ابعاد جسم بطور اغراق آمیزی نمایش داده شوند.



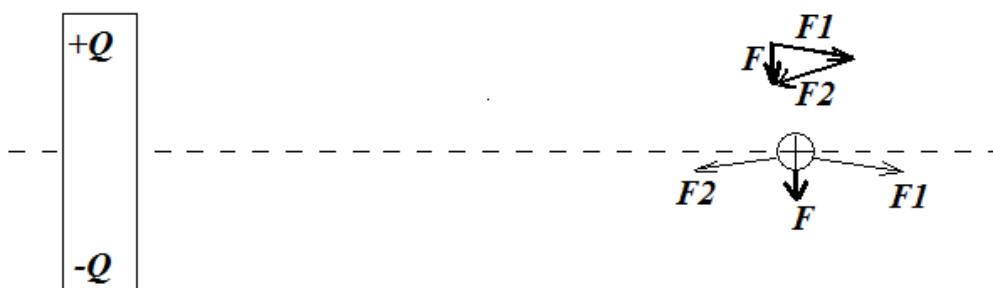
همانطور که قبلا هم گفتیم، امواج ایستا با وجود اینکه انرژی انتقال نمی دهند، اما انرژی دارند و بنابر فیزیک کلاسیک انرژی آنها در هر نقطه متناسب با مجذور دامنه آن نقطه است. بنابراین مجموعه نقاطی که دامنه بزرگتری دارند، قسمت بیشتر انرژی موج را بخود اختصاص می دهند و بیشتر انرژی موج مربوط به آنهاست. مشخص کردن این نقاط و نواحی پرنرژی نیز می تواند نمایشی دیگر از یک موج ایستا باشد. بعنوان مثال شکل بعدی یک موج ایستای یک پوسته نازک دایروی یک طبل را به همراه نواحی پرنرژی مربوطه روی پوسته (نواحی هاشور خورده) نمایش می دهد.



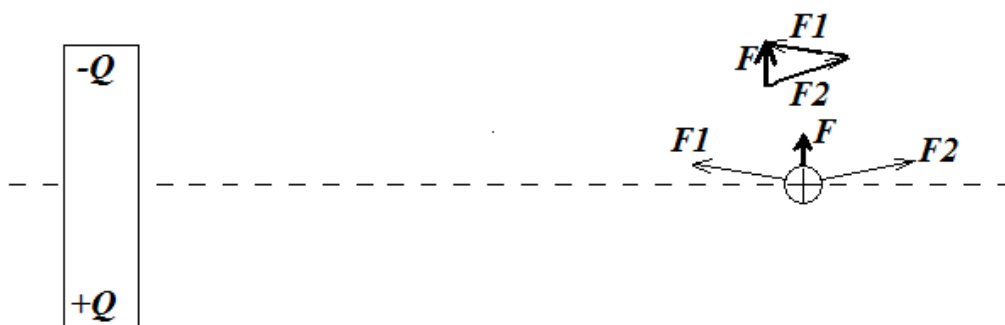
بعدها خواهیم دید که در مدل‌های اتمی که امروزه بصورت گسترده توسط دانشمندان بکار رفته می‌شوند، الکترون‌ها در حقیقت امواج ایستایی هستند که شکل‌های بخصوصی می‌توانند داشته باشند و خواص و رفتار هر الکترون با توجه به ویژگی‌های شکل بخصوص موج ایستای مربوط به آن الکترون تعیین می‌شود.

### امواج الکترومغناطیسی

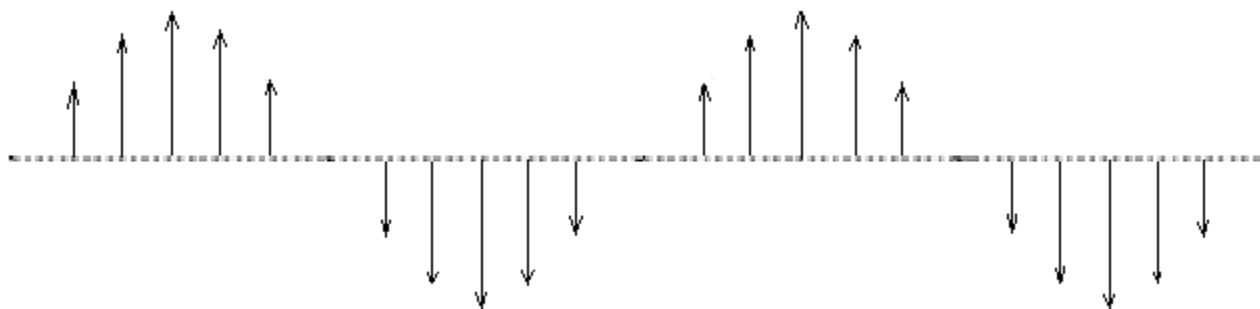
همانطور که قبلاً هم گفتیم، امواج الکترومغناطیسی دسته مهمی از امواج هستند و متفاوت و مستقل از امواجی مثل صدا، موج روی سطح آب و ... که امواج مکانیکی محسوب می‌شوند، هستند. در زندگی روزمره همان نوری که ما می‌توانیم ببینیم، جز امواج الکترومغناطیسی است. بطور خلاصه، امواج الکترومغناطیسی نوسانات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی عمود برهم هستند که در فضا به صورت امواج عرضی انتشار پیدا می‌کنند. برای آنکه ببینیم چگونه ممکن است امواج الکترومغناطیسی یا همان نوسانات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بوجود بیایند، مثال بعدی را در نظر می‌گیریم. فرض کنید مطابق شکل بعدی یک میله فلزی باردار داشته باشیم که سر بالای آن بار  $+Q$  و سر پایین آن بار  $-Q$  داشته باشد. با توجه به مطالب بحث شده در بخش نیروی الکتریکی، به یک بار مثبت واحد (بار آزمون) واقع بر روی عمود منصف میله توسط سر بالای میله نیرویی مثل نیروی  $F_1$  و توسط سر پایین میله نیرویی مثل نیروی  $F_2$  که راستا و جهت آنها در شکل نمایش داده شده است، وارد خواهد شد. نیروی خالص وارده بر بار آزمون از جمع برداری نیروهای  $F_1$  و  $F_2$  بصورت نیروی  $F$  نتیجه خواهد شد که با توجه به مطالب بحث شده در بخش میدان، نیروی  $F$  همان میدان الکتریکی حاصل از میله در محل بار آزمون است.



حال در صورتیکه فرض کنیم، جای بارهای  $+Q$  و  $-Q$  عوض شود، نیروی  $F$  یا همان میدان الکتریکی حاصل از میله در محل بار آزمون یاد شده بصورت زیر خواهد بود:

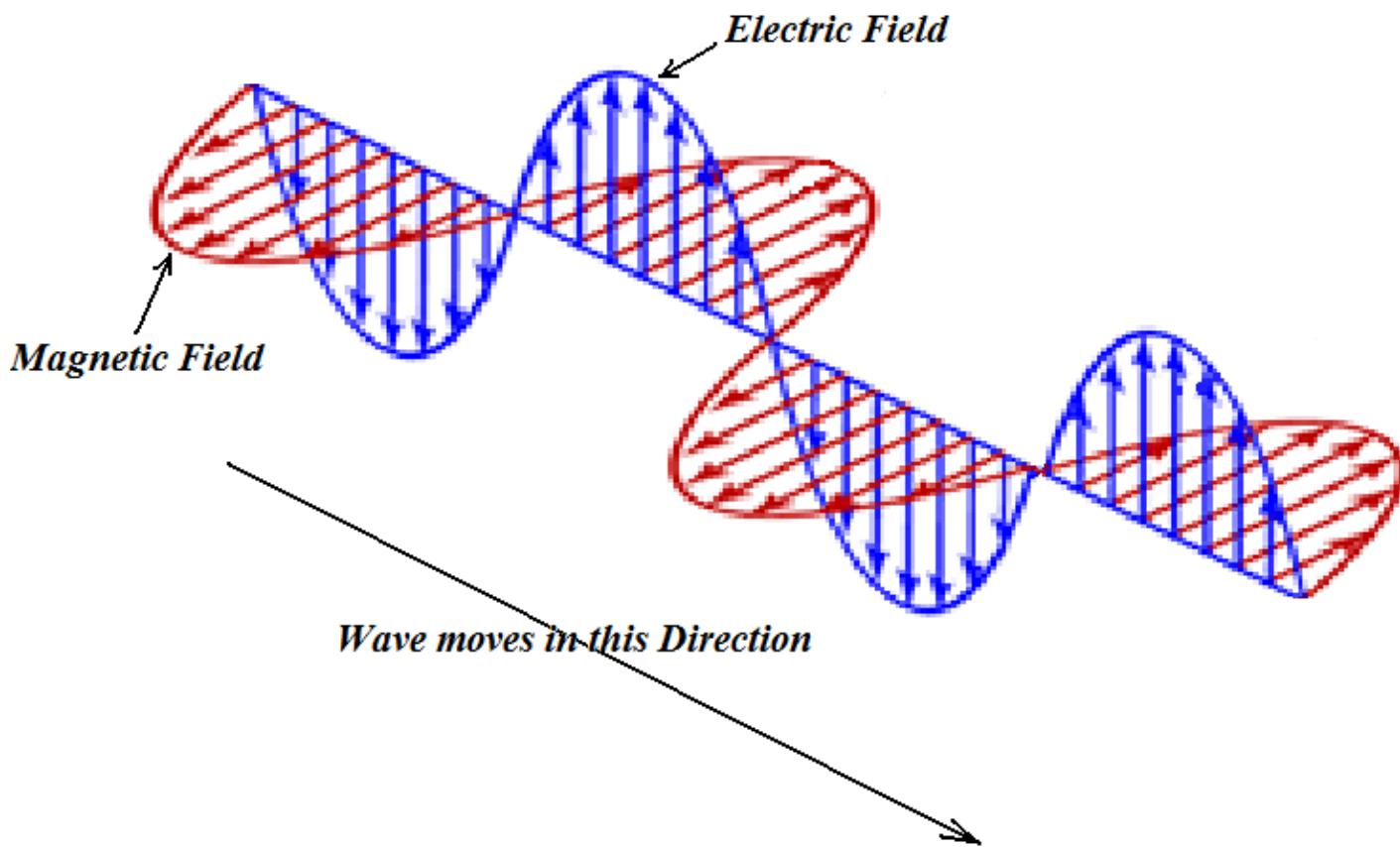


همانطور که دو شکل قبلی نشان می دهند، در صورت جابجا شدن سرهای مثبت و منفی میله میدان الکتریکی میله در محل بار آزمون یاد شده معکوس می شود. با بررسی می توان نشان داد که این مطلب علاوه بر محل بار آزمون یاد شده برای تمامی نقاط فضا صادق است. در صورتیکه این جابجایی سرهای مثبت و منفی میله بتدریج باشد (بعبارتی بتدریج بار مثبت یا منفی در یک سر کاهش یابد، به صفر برسد، بار مخالف در آن سر شروع به افزایش کند، به ماکزیمم خود برسد و دوباره روند کاهش و معکوس شدن را طی کند)، بایستی معکوس شدن میدان در هر نقطه از فضا هم بتدریج صورت گیرد و مطابق شکل بعدی باشد. بعبارتی با جابجایی سرهای مثبت و منفی میله، میدان الکتریکی در هر نقطه بین دو ماکزیمم در دو جهت کاملاً مخالف نوسان می کند.



توضیح شکل: نوسانات میدان الکتریکی هر نقطه از فضا بعلاوه جابجایی سرهای مثبت و منفی میله. شکل میدان الکتریکی یک نقطه از فضا را در زمانهای متوالی بصورت پشت سر هم نشان می دهد.

در فیزیک بحث می شود که میدان الکتریکی متغیر با زمان، میدان مغناطیسی متغیر با زمان ایجاد می کند. بعبارتی نوسانات میدان الکتریکی، نوسانات میدان مغناطیسی ایجاد می کند. بنابراین در مثال قبلی هر نقطه از فضا علاوه بر نوسانات میدان الکتریکی، نوسانات میدان مغناطیسی را هم خواهد داشت. این نوسانات عمود بر هم خواهند بود و بصورت موج در فضا در جهت عمود بر نوسانات شروع به انتشار خواهند کرد. شکل بعدی نمایشی برای این مطلب است.



در مثال قبلی تولید امواج الکترومغناطیسی را بخاطر جابجا شدن سرهای مثبت و منفی یک میله باردار را دیدیم. بطور کلی حرکت شتابدار ذرات باردار امواج الکترومغناطیسی تولید و نشر می کند. در این راستا الکترونها که ذرات باردار سبکی هستند، براحتی تحت تاثیر عوامل مختلف با مکانیزمهای متفاوت حرکات شتابدار انجام می دهند و امواج الکترومغناطیسی تولید و نشر می کنند. بعنوان مثال اتمها و مولکولها که از ذرات باردار مثل الکترونها تشکیل شده اند و در دماهای بالاتر از صفر کلون حرکات انتقالی، دورانی و ارتعاشی شتابدار می توانند انجام دهند، از خود امواج الکترومغناطیسی نشر می کنند که مقدار نشر آنها با افزایش دما و افزایش سرعت و شتاب حرکات آنها افزایش می یابد. از این رو است که فلزی مثل آهن در دماهای بالا شروع به تابش و درخشش می کند.

همانطور که بحث کردیم، امواج الکترومغناطیسی به خاطر ذرات با قابلیت برهم کنش های الکترومغناطیسی بوجود می آیند ( مثلاً حرکت یک ذره باردار به صورت شتابدار)، از طرفی امواج الکترومغناطیسی مواد با قابلیت برهم کنش الکترومغناطیسی را می توانند تحت تاثیر قرار دهند. به طور خلاصه امواج الکترومغناطیسی حامل انرژی برای برهم کنش های الکترومغناطیسی هستند. برای تغییر سطح انرژی پتانسیل ذرات مربوط به نیروهای الکتریکی و مغناطیسی ( جاذبه و دافعه های برهم کنش های الکترومغناطیسی) باید با آنها انرژی مبادله کنیم. این انرژی می تواند توسط امواج الکترومغناطیسی انتقال داده می شود. تمام امواج الکترومغناطیسی در خلاء با سرعت یکسان، سرعت نور ( $c = 299792458 \text{ m/s}$  یا بطور خلاصه  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) منتشر می شوند. در محیط های مادی سرعت امواج الکترومغناطیسی کمتر از سرعت حرکت آنها در خلاء است. با توجه به اینکه

حاصل ضرب فرکانس و طول موج برای امواج برابر سرعت انتشار موج است و برای تمام امواج الکترومغناطیس در خلا سرعت انتشار برابر سرعت نور است، رابطه طول موج و فرکانس تمام این امواج با هم در خلا بصورت زیر خواهد بود:

$$V = \lambda f = \lambda v \Rightarrow v = \frac{c}{\lambda} \text{ یا } \lambda = \frac{c}{f}$$

مثال: امواج الکترومغناطیس با فرکانس  $90 \text{ kHz}$  را در نظر بگیرید.

الف) طول موج این امواج را بدست آورید.

ب) تعداد نوسانات کامل میدانهای الکتریکی و مغناطیسی هر نقطه از فضا که تحت تأثیر این امواج قرار دارد، را در مدت یک ساعت بدست آورید.

ج) تعداد موجهای کامل این امواج الکترومغناطیس را در فاصله ای به طول  $50 \text{ km}$  بطور تقریبی بدست آورید.  
حل:

الف) برای محاسبه طول موج بصورت زیر عمل می کنیم:

$$\lambda = \frac{c}{v} \Rightarrow \lambda = \frac{3 \times 10^8}{9 \times 10^4} \Rightarrow \lambda = 3.33 \times 10^3 \text{ m}$$

ب) هر نقطه در مدت زمان یک دوره تناوب یک نوسان کامل انجام می دهد. دوره تناوب هم برابر معکوس فرکانس است، پس برای محاسبه تعداد نوسانات کامل در مدت زمان یاد شده بصورت زیر عمل می کنیم:

$$T = \frac{1}{v} \Rightarrow T = \frac{1}{9 \times 10^4} \Rightarrow T = 1.11 \times 10^{-5} \text{ s}$$

$$\text{Number of Fluctuations} = \frac{t}{T} = \frac{1 \times 3600}{1.11 \times 10^{-5}} = 3.24 \times 10^8 \text{ Cycle}$$

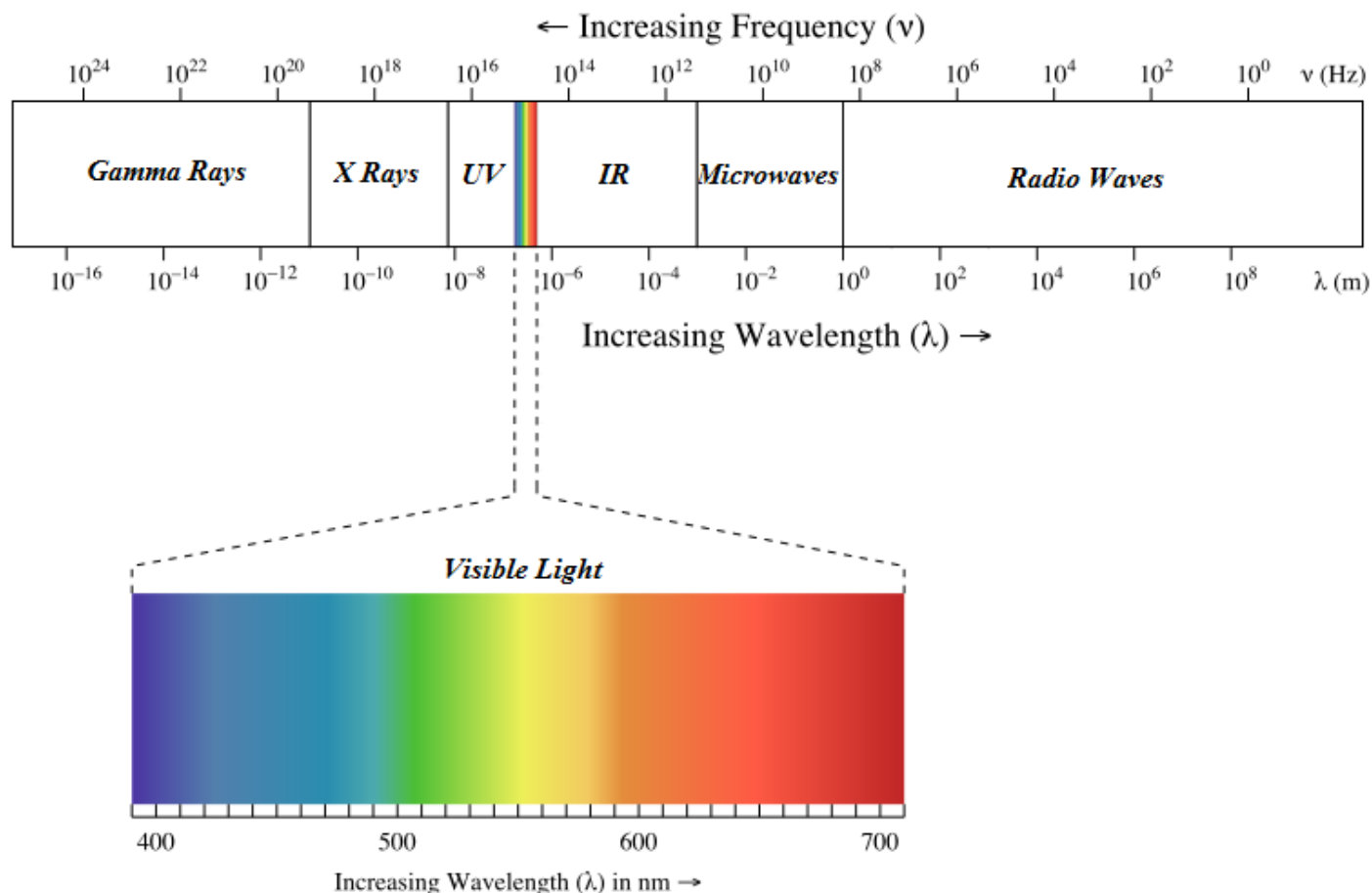
ج) طول هر موج کامل برابر یک طول موج است، پس برای محاسبه تعداد موجهای کامل در فاصله یاد شده داریم:

$$\text{Number of waves} = \frac{l}{\lambda} = \frac{50 \times 1000}{3.33 \times 10^3} = 15$$

\*\*\*\*\*

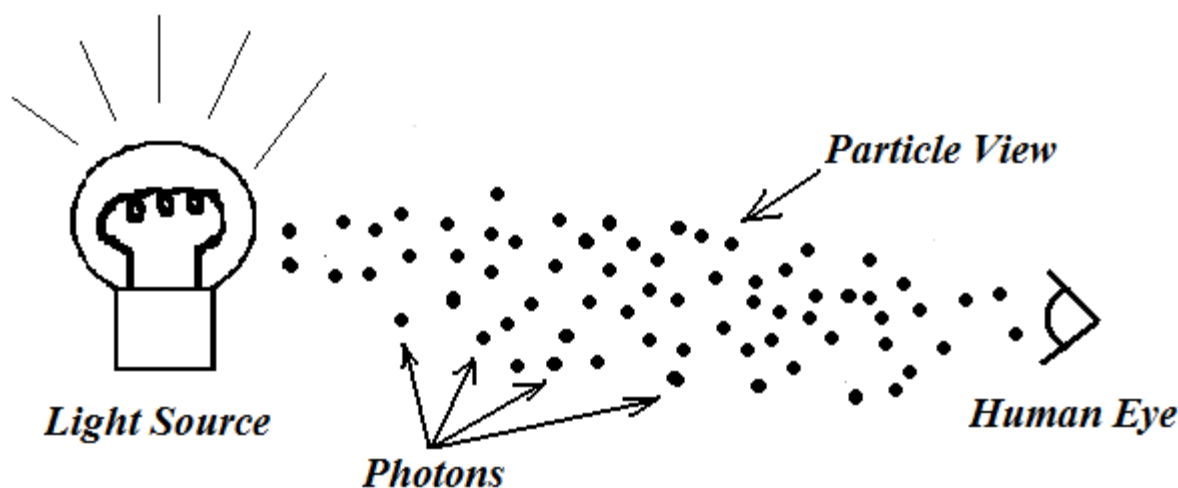
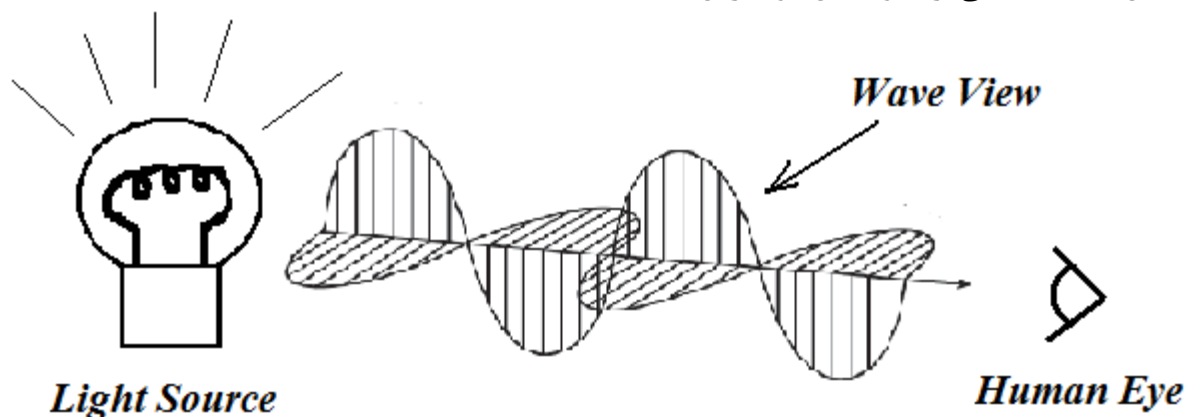
با توجه به یکسان بودن سرعت انتشار تمام امواج الکترومغناطیس در خلاء طول موج و فرکانس این امواج با هم رابطه معکوس دارند و با افزایش فرکانس، طول موج حتما کاهش می یابد و بالعکس. بعبارت دیگر امواج الکترومغناطیسی که فرکانس بیشتری دارند، طول موج کمتری دارند و بالعکس. براساس مقادیر طول موج و فرکانس می توان امواج الکترومغناطیس را طبقه بندی نمود. به ترتیب کاهش طول موج امواج الکترومغناطیس به امواج رادیویی (*Radio Waves*)، میکروویو (*Microwaves*)، تابش مادون قرمز یا فرو سرخ (*Infrared Radiation or IR*)، نور مرئی (*Visible Light*)، تابش فرابنفش (*Ultraviolet Radiation or UV*)، اشعه های  $X$  (*X-Rays*) و اشعه های گاما ( $\gamma$  Rays) طبقه بندی می شوند. شکل بعدی این طیف امواج الکترومغناطیس را بهمراه محدوده تقریبی فرکانس و طول موج هر دسته نشان می دهد. همانطور که در شکل نیز دیده می شود، ناحیه نور مرئی یا امواج الکترومغناطیسی که توسط چشم انسان قبل تشخیص هستند، طول موجی در محدوده  $400 \text{ nm}$  تا  $700 \text{ nm}$  دارد. البته منابع گوناگون محدوده طول موج نور مرئی را بصورت محدودتر ( $420 \text{ nm}$ - $680 \text{ nm}$ ) یا بصورت وسیعتر ( $380 \text{ nm}$ - $800 \text{ nm}$ ) نیز گزارش کرده اند. در ضمن محدوده های یاد شده محدوده هایی هستند که بیشتر مردم در شرایط

مختلف بطور راحت می توانند ببینند. مگر نه در شرایط ایده آل مردم می توانند تا طول موجهای حداقل  $1050\text{nm}$  ببینند. همچنین کودکان و جوانان می توانند طول موجهای پایین تری تا  $310\text{nm}$  ببینند.



چشم انسان در محدوده نور مرئی می تواند تعداد رنگهای زیادی (از مرتبه صد) تشخیص دهد. برخی از این رنگها مربوط به یک طول موج هستند (مثل قرمز)، در حالیکه برخی دیگر از ترکیب طول موجهای کمابیش متفاوت نتیجه می شوند (مثل صورتی). رنگهای مربوط به یک طول موج در طیف مرئی حضور دارند و رنگهای طیفی خالص (مثل قرمز و بنفش) نامیده می شوند. رنگهای ترکیبی در طیف مرئی حضور ندارند، اما مربوط به ترکیب رنگهای حاضر در طیف مرئی هستند، مثلا رنگ صورتی از ترکیب قرمز و بنفش بدست می آید. رنگهای حاضر در طیف مرئی بصورت پیوسته تغییر می کنند و مرز دقیقی برای هر رنگ وجود ندارد. نیوتن طیف مرئی را شامل هفت رنگ قرمز (*Red*)، نارنجی (*Orange*)، زرد (*Yellow*)، سبز (*Green*)، آبی (*Blue*)، نیلی (*Indigo*) و بنفش (*Violet*) در نظر گرفت (که این رنگ ها در رنگین کمان یا نور عبور داده شده از منشور براحتی قابل مشاهده هستند)، با این وجود در مورد در نظر گرفتن نیلی بعنوان رنگ طیفی خالص جداگانه بعلت شباهت با آبی بحث وجود دارد و معمولا در طیف مرئی در نظر گرفته نمی شود. محدوده های تقریبی طول موج برای شش رنگ باقیمانده می تواند بصورت قرمز:  $620-750\text{nm}$ ، نارنجی:  $590-620\text{nm}$ ، زرد:  $570-590\text{nm}$ ، سبز:  $495-570\text{nm}$ ، آبی:  $450-495\text{nm}$  و بنفش:  $380-450\text{nm}$  در نظر گرفته شود.

به نور می توان هم نگرش موجی و هم نگرش ذره ای داشت. به عبارتی برای نور می توان هم خصلت موجی و هم خصلت ذره ای در نظر گرفت. در خصلت موجی نور فرض می شود نور نوسانات میدان های الکتریکی و مغناطیسی است که با این نگرش در بحث های قبلی آشنا شدیم. برای توجیه پاره ای از ویژگیهای نور یا امواج الکترومغناطیسی دانشمندان مجبور شدند آنها را متشکل از ذرات در نظر بگیرند. در ابتدا ماکس پلانک (*Max Planck*) نور یا امواج الکترومغناطیسی را متشکل از بسته های انرژی گسسته و مجزا از هم در نظر گرفت. بعدها آلبرت اینشتین مطرح کرد که با این بسته های انرژی بایستی بعنوان ذرات حقیقی برخورد شود. این بسته های انرژی یا ذرات حقیقی که نور یا امواج الکترومغناطیسی از آنها تشکیل شده است، بعدها فوتون (*Photon*) نامیده شدند. شکل بعدی نمایشی از تفاوت این دو نگرش است.



بر مبنای نگرش ذره ای به نور انرژی هر فوتون از رابطه ی زیر حساب می شود:

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

$h =$  ثابت پلانک  $= 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

در صورتیکه  $n$  فوتون یکسان داشته باشیم، انرژی کل  $n$  فوتون از حاصلضرب  $n$  و انرژی هر فوتون بدست خواهد آمد:

$$E = nhv = \text{انرژی کل}$$



ماکس پلانک (Max Karl Ernst Ludwig Planck (April 23, 1858 – October 4, 1947))

مثال: فرکانس و انرژی هر فوتون با طول موج 500 نانومتر را بدست آورید.

حل:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{500 \times 10^{-9}} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$E = h\nu \Rightarrow E = 6.63 \times 10^{-34} \times 6 \times 10^{14} = 3.98 \times 10^{-19} \text{ J}$$

\*\*\*\*\*

مثال: برای گرم کردن 15 گرم آب از دمای 22 درجه سانتیگراد تا 40 درجه سانتیگراد نیازمند چند فوتون با طول موج 200 میکرومتر هستیم؟ ظرفیت گرمایی ویژه آب برابر یک کالری بر گرم بر درجه سانتیگراد است.

حل:

$$E = Q = mc\Delta\theta = 15 \times 1 \times 4.2 \times (40 - 22) = 1134 \text{ J}$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{200 \times 10^{-6}} = 1.5 \times 10^{12} \text{ Hz}$$

$$E = nh\nu \Rightarrow n = \frac{E}{h\nu} = \frac{1134}{6.63 \times 10^{-34} \times 1.5 \times 10^{12}} = 1.14 \times 10^{24} \text{ photons}$$

\*\*\*\*\*

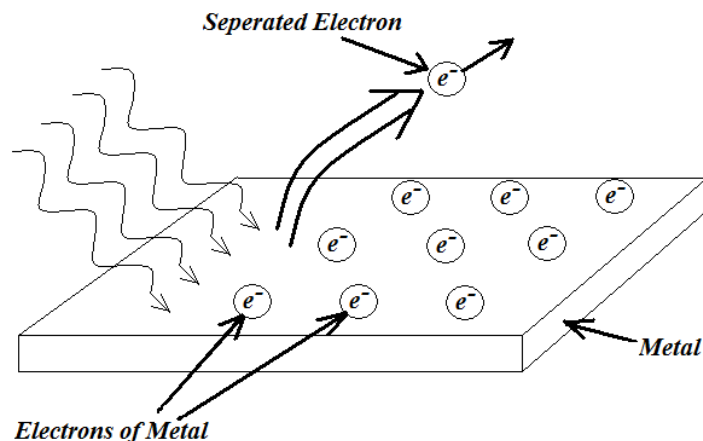
مثال: در پدیده فوتوالکتریک نور به سطح فلز تابانیده می شود و انرژی تابشی صرف جدا کردن سست ترین الکترون های فلز میشود. مقدار حداقل انرژی لازم برای جدا کردن الکترون از سطح هر فلز تابع کار آن فلز نامیده می شود. در صورتیکه انرژی فوتون تابانیده شده به سطح فلز برابر یا بیشتر از تابع کار فلز باشد، فوتون تابانیده شده جذب الکترونی که بدان برخورد کرده می شود و قسمتی از انرژی فوتون برابر با تابع کار فلز صرف کندن الکترون از سطح فلز میشود و مازاد انرژی فوتون صرف افزایش انرژی جنبشی الکترونها می شود. بر این اساس به سوال های زیر پاسخ دهید:



الف) در صورتیکه تابع کار یک فلز برابر  $15$  الکترون ولت باشد، حداکثر طول موج و حداقل فرکانس مورد نیاز برای کندن الکترون از سطح فلز را بدست آورید.

ب) اگر از موج با طول موج  $1nm$  استفاده شود، انرژی جنبشی  $e$  های کنده شده را حساب کنید.

$$1ev = 1.6 \times 10^{-19} J$$



حل:

الف) حداکثر طول موج و حداقل فرکانس مورد نیاز برای کندن الکترون از سطح فلز، طول موج و فرکانس فوتونی است که کندن الکترون از سطح فلز را با کمترین انرژی ممکن انجام می دهد. با توجه به توضیحات مسئله انرژی این فوتون برابر تابع کار فلز است. پس برای محاسبه حداکثر طول موج و حداقل فرکانس به صورت زیر عمل می کنیم:

$$E = h\nu \Rightarrow 15 \times 1.6 \times 10^{-19} = 6.63 \times 10^{-34} \times \nu \Rightarrow \nu = 3.62 \times 10^{15} Hz$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \Rightarrow \lambda = \frac{3 \times 10^8}{3.62 \times 10^{15}} \Rightarrow \lambda = 8.3 \times 10^{-8} m = 83 nm$$

ب) با توجه به توضیحات مسئله اختلاف انرژی فوتون پراثرژی و تابع کار فلز به صورت انرژی جنبشی  $e$  های کنده شده در می آید، پس داریم:

$$K = \frac{hc}{\lambda} - 15ev \Rightarrow K = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1 \times 10^{-9}} - 15 \times 1.6 \times 10^{-19} \Rightarrow K = 1.96 \times 10^{-16} J$$

\*\*\*\*\*

## مدل اتمی بور

مدل اتمی بور برای اولین بار کوانتیده بودن فواصل و سطح های انرژی در اتم ها را مطرح کرد و قادر به توجیه طیف اتمی اتم هیدروژن بود که در ادامه با آن آشنا می شویم.

در مدل اتمی بور الکترون ها در اتم تنها می توانند در فواصل مشخصی (یا بخصوصی) به دور هسته در حال گردش باشند و  $e$  اجازه ندارد در فاصله ای مابین دو فاصله ی مجاز متوالی قرار بگیرد. هر فاصله ی مشخص متناظر با یک سطح انرژی معین است، بطوریکه فاصله های نزدیکتر به هسته متناظر با سطوح انرژی کمتر هستند یا در واقع با کاهش فاصله از هسته سطح انرژی هم کاهش می یابد. هر فاصله یا سطح انرژی مشخص یک لایه یا مدار یا سطح انرژی نامیده می شود. لایه ها به ترتیب نزدیکی آنها به هسته با حروف ( $K, L, M, N, \dots$ ) یا با شماره ها ( $n=1, n=2, n=3, \dots$ ) مشخص می شوند.

در مدل اتمی بور الکترون می تواند بین لایه ها با گرفتن یا از دست دادن انرژی دقیقاً برابر اختلاف سطح انرژی لایه ها جابجا شود. الکترون با گرفتن انرژی از لایه ی پایین تر (نزدیکتر به هسته با سطح انرژی کمتر) به لایه ی بالاتر (دورتر از هسته با سطح انرژی بیشتر) جابجا می شود و با از دست دادن انرژی می تواند از لایه ی دورتر یا با سطح انرژی بالاتر به لایه ی نزدیک تر یا با سطح انرژی کمتر جابجا شود. گرفتن یا از دست دادن انرژی می تواند به صورت مبادله ی انرژی نورانی صورت بگیرد، مثلاً الکترون می تواند با از دست دادن فوتونی با انرژی دقیقاً برابر اختلاف انرژی دو لایه از لایه ی دورتر به لایه ی نزدیک تر و با سطح انرژی کمتر جابجا شود. همچنین الکترون می تواند با جذب فوتون با انرژی دقیقاً برابر اختلاف انرژی دو لایه از لایه ی پایین تر به لایه ی بالاتر جابجا شود.

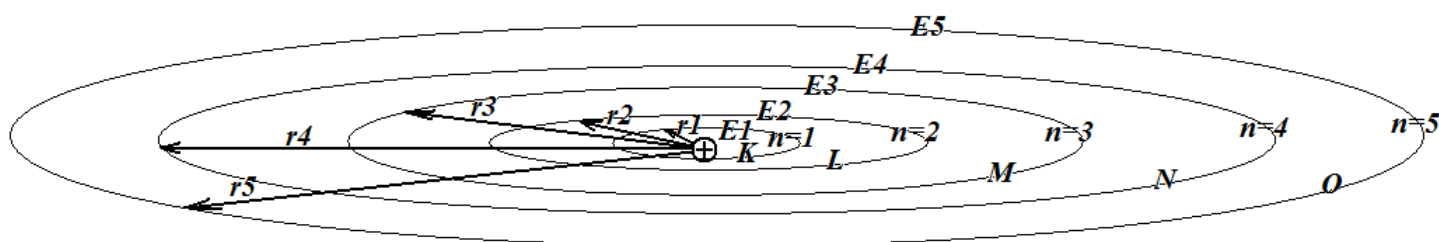
با توجه به قوانین فیزیک طبیعی است که الکترون ها تمایل داشته باشند که در نزدیک ترین فاصله ها نسبت به هسته یا در لایه ها با کمترین سطوح انرژی قرار بگیرند. اگر تمام الکترون های یک اتم در حد امکان در نزدیک ترین لایه ها به هسته قرار داشته باشند، آرایش مربوطه پایدارترین حالت ممکن یا پایدارترین آرایش الکترونی برای اتم است و حالت پایه ( $Ground State$ ) نامیده می شود. به آرایش های الکترونی به غیر از حالت پایه که با فرستادن الکترون ها به سطوح انرژی بالاتر یا لایه های دورتر بدست می آیند، حالت برانگیخته ( $Excited State$ ) گفته می شود. اتم در حالت برانگیخته تمایل دارد با از دست دادن انرژی مثلاً به صورت تولید فوتون به حالت پایه برگردد. بالعکس با دادن انرژی به اتم در حالت پایه می توان اتم را به حالت برانگیخته برد.

بعبارت دیگر مدل اتمی بور کوانتیده (گسسته) بودن فاصله و سطح انرژی الکترون در اتم را مطرح می کند و حالت های مجاز با فواصل و سطوح انرژی مشخص را لایه ها یا مدارها می نامد. مدل اتمی بور امکان جابجایی الکترون بین حالت ها (لایه ها) ی مجاز را امکان پذیر می داند، به شرط آنکه مبادله ی انرژی دقیقاً برابر اختلاف انرژی دو لایه ای که الکترون بین آنها جابجا می شود، صورت گیرد. در مدل اتمی بور این تبادل انرژی بصورت انرژی نورانی صورت می گیرد. در این مدل حالت با پایین ترین سطح انرژی که از قرار گرفتن الکترونها ی اتم در نزدیکترین فواصل امکان پذیر نسبت به هسته بدست می آید، بعنوان بهترین حالت در نظر گرفته می شود و حالت پایه است، در حالیکه مابقی حالت ها بعنوان حالت برانگیخته نامطلوب در نظر گرفته می شوند و تمایل دارند با از دست دادن انرژی و برگرداندن الکترون به لایه های پایین تر به حالت پایه تبدیل شوند.

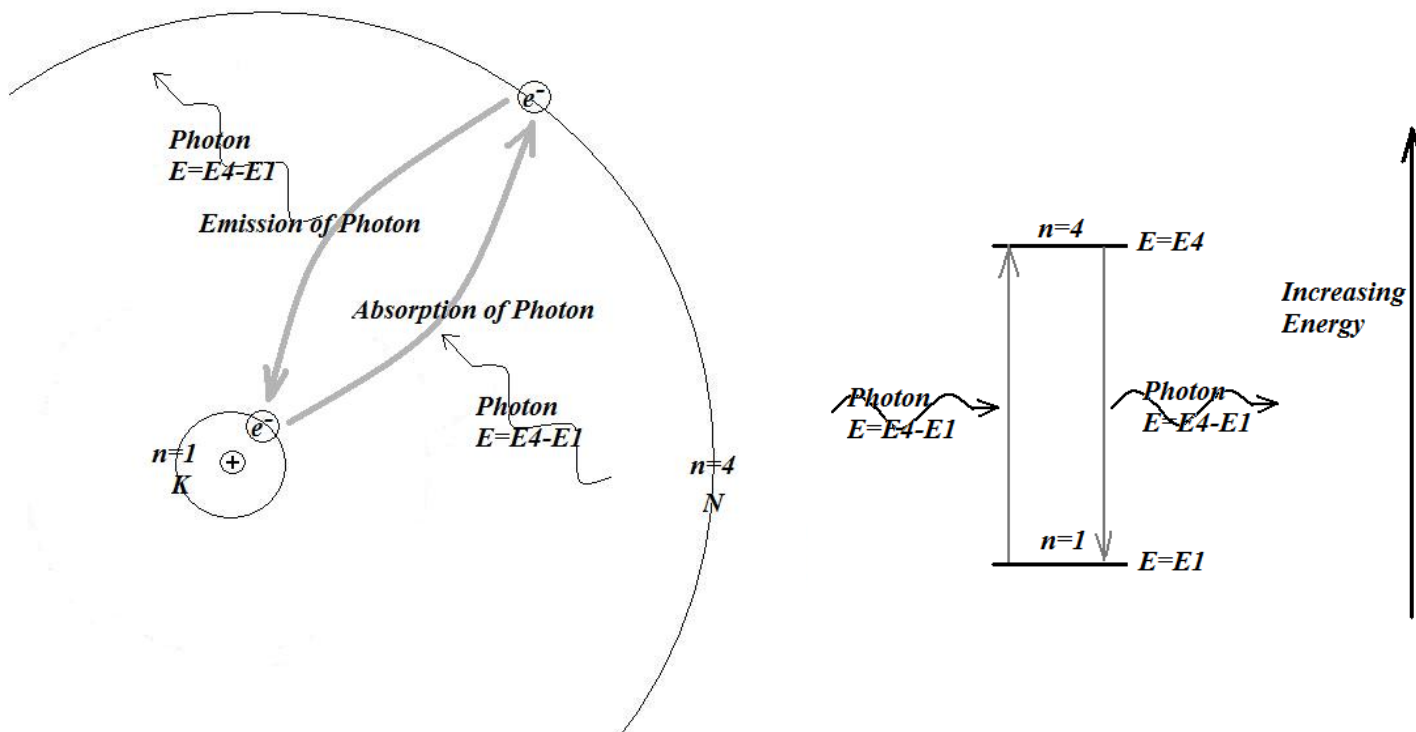


نیلز بور (7 October 1885- 18 November 1962)

شکل بعدی یک اتم نمونه مثل اتم هیدروژن را بر مبنای مدل اتمی بور نشان می دهد. در این شکل پنج مدار اول یا پنج لایه اول اتم هیدروژن نمایش داده شده اند. هر لایه با شماره یا حرف بخصوص خود مشخص شده است و فاصله ( شعاع ) و سطح انرژی مخصوص خود را دارد. مثلاً لایه اول با  $n=1$  یا با حرف  $K$  مشخص می شود و فاصله الکترون از هسته و سطح انرژی الکترون در این لایه به ترتیب  $r_1$  و  $E_1$  است، یا بعنوان مثال دیگر لایه چهارم با  $n=4$  یا با حرف  $N$  مشخص می شود و فاصله الکترون از هسته و سطح انرژی الکترون در صورت قرارگیری در این لایه به ترتیب  $r_4$  و  $E_4$  است.



بنابر مدل اتمی بور الکترون اتم هیدروژن می تواند در فاصله های  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  و ... از هسته ( متناظر با لایه های  $n=1, n=2, n=3, n=4, n=5$  و ...) قرار گیرد، اما نمی تواند در فاصله ای بغیر از اینها مثلاً در فاصله ای مابین  $r_1$  و  $r_2$  یا کمتر از  $r_1$  ( نزدیکترین فاصله مجاز) قرار گیرد. همچنین بنابر مدل اتمی بور الکترون در اتم هیدروژن می تواند سطح انرژیایی برابر  $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$  و ... ( در صورت قرارگیری در لایه های به ترتیب  $n=1, n=2, n=3, n=4, n=5$  و ...) داشته باشد، اما نمی تواند سطح انرژی ای بغیر از اینها مثلاً سطح انرژی بین  $E_1$  و  $E_2$  یا کمتر از  $E_1$  ( کمترین سطح انرژی ممکن) داشته باشد. بنابر مدل اتمی بور الکترون اتم هیدروژن می تواند بین این لایه ها به شرط مبادله انرژی مناسب به صورت فوتون جابجا شود. مقدار مناسب انرژی همان اختلاف سطح انرژی دو لایه مبدا و مقصد است و اگر لایه مقصد سطح انرژی بالاتری داشته باشد، بایستی فوتون با این انرژی جذب شود و اگر لایه مقصد سطح انرژی پایین تری داشته باشد، بایستی فوتون با این انرژی تولید شود. بعنوان مثال الکترون می تواند از لایه اول ( $n=1$ ) به لایه چهارم ( $n=4$ ) با جذب یک فوتون با انرژی برابر  $E_4-E_1$  برود و برعکس با تولید یک فوتون با انرژی برابر  $E_4-E_1$  می تواند از لایه چهارم ( $n=4$ ) به لایه اول ( $n=1$ ) بیاید. این مطلب در شکل بعدی نمایش داده شده است.



توضیح شکل: نمایش انتقال الکترون از لایه  $n=1$  به لایه  $n=4$  و بالعکس در اتم هیدروژن و جذب و نشر فوتون مربوطه در شکل سمت چپ مدارها در اتم هیدروژن نمایش داده شده اند، در حالیکه در شکل سمت راست فقط سطوح انرژی مدارها در دیاگرام انرژی نمایش داده شده اند.

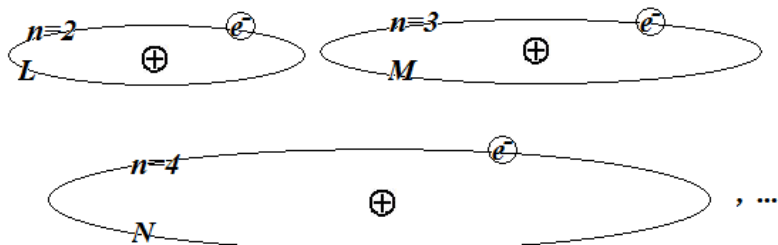
بهترین حالت برای الکترون اتم هیدروژن قرارگیری آن در کمترین سطح انرژی که متناظر با نزدیکترین فاصله نسبت به هسته و لایه  $n=1$  است، می باشد که این حالت، حالت پایه اتم هیدروژن خواهد بود. حالت‌های دیگر که سطح انرژی های بالاتری دارند، حالت‌های برانگیخته و نامطلوب محسوب می شوند. شکل بعدی نمایشی برای این مطلب است.

**Ground State of Hydrogen Atom**



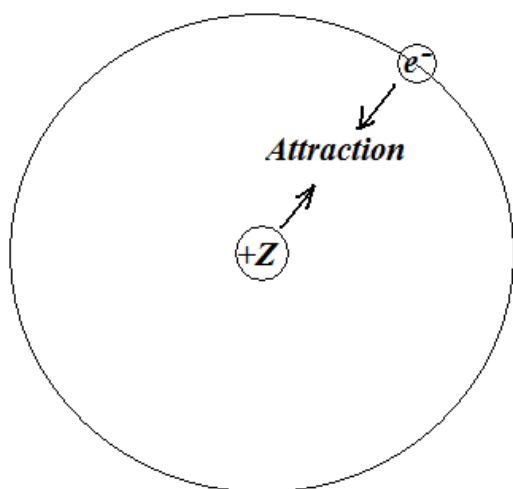
vs.

**Excited States of Hydrogen Atom**

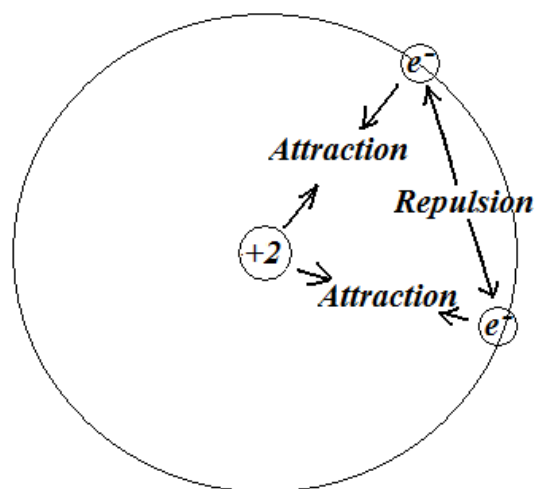


## سطح انرژی و شعاع لایه ها در سیستم های تک الکترونی بنابر مدل اتمی بور

اتمها و یونهای تک اتمی را می توان به دو دسته سیستم های تک الکترونی و سیستم های چند الکترونی طبقه بندی نمود. سیستم های تک الکترونی یا سیستم های هیدروژن مانند به سیستم هایی گفته می شود که مثل اتم هیدروژن فقط یک الکترون دارند و تنها برهم کنش، جاذبه ی هسته با هر تعداد پروتون با آن تک الکترون است. از سیستم های تک الکترونی می توان به  $H, He^+, {}_3Li^{2+}, \dots, {}_{11}Na^{10+}, \dots$  اشاره کرد. عبارتی علاوه بر اتم هیدروژن، هر اتم دیگری که تمام الکترونهاش بجز یکی را از دست داده باشد یک سیستم تک الکترونی است. در مقابل سیستم های تک الکترونی سیستم های چند الکترونی یا سیستم های غیر هیدروژن مانند را داریم که حاوی بیش از یک الکترون هستند و علاوه بر جاذبه هسته با هر یک از الکترون ها برهم کنش های دافعه نیز دو به دو بین الکترون ها وجود دارد. از سیستم های چند الکترونی می توان به  $He, H^-, Li, \dots$  اشاره کرد. شکل بعدی را بعنوان نمایش و مقایسه ای از سیستم های تک الکترونی در حالت کلی و اتم هلیم بعنوان یکی از ساده ترین سیستم های چند الکترونی در نظر بگیرید.



Single Electron Systems Like Hydrogen Atom



Helium Atom, an Example of Multiple Electron Systems unlike Hydrogen Atom

بور توانست انرژی و شعاع لایه ها را در سیستم های تک الکترونی بر حسب عدد اتمی و شماره ی لایه محاسبه کند. سیستم های چند الکترونی بسیار پیچیده تر از سیستم های تک الکترونی هستند و انرژی لایه ها در آنها به راحتی قابل محاسبه نیست. بور برای بدست آوردن سطح انرژی و شعاع لایه ها در سیستم های تک الکترونی از دو رابطه زیر استفاده کرد:

$$K \frac{q_e q_N}{r_n^2} = \frac{m_e V_{e_n}^2}{r_n}$$

$$m_e V_{e_n} r_n = \frac{nh}{2\pi}$$

در روابط بالا  $m_e$  و  $q_e$  بیانگر به ترتیب جرم و قدر مطلق بار الکترون،  $V_{e_n}$  و  $r_n$  بیانگر به ترتیب سرعت و شعاع مدار الکترون در مدار  $n$  ام هستند.  $q_N$  بیانگر بار هسته است که برای هسته اتم با عدد اتمی  $Z$ ، برابر  $Zq_e$  خواهد بود. رابطه اول بیانگر تساوی نیروی گریز از مرکز و نیروی الکتریکی وارده بر الکترون است که این تساوی برای عدم خروج الکترون از مدارش بایستی برقرار

باشد. رابطه دوم حاصلضرب جرم، سرعت و شعاع مدار الکترون را کوانتیده در نظر می گیرد و به این حاصلضرب اجازه می دهد فقط مقادیری که مضربی از  $\frac{h}{2\pi}$  هستند، را اختیار کند. در نظر گرفتن همین رابطه دوم سطح انرژی و شعاع لایه ها را در مدل اتمی بور بصورت کوانتیده نتیجه می دهد. رابطه دوم که یک قانون برای کوانتیده بودن است، قانون کوانتومی (Quantum Rule) مدل بور است. از رابطه اول  $V_{en}$  را بر حسب  $r_n$  بدست آوریم و در رابطه دوم جایگذاری می کنیم. خواهیم داشت:

$$K \frac{q_e q_N}{r_n^2} = \frac{m_e V_{en}^2}{r_n} \Rightarrow V_{en} = \sqrt{\frac{K q_e q_N}{m_e r_n}}$$

$$m_e V_{en} r_n = \frac{nh}{2\pi} \Rightarrow m_e \times \sqrt{\frac{K q_e q_N}{m_e r_n}} \times r_n = \frac{nh}{2\pi} \Rightarrow \sqrt{m_e K q_e q_N r_n} = \frac{nh}{2\pi} \Rightarrow m_e K q_e q_N r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2}$$

$$\Rightarrow r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e K q_e q_N} \Rightarrow r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e K Z q_e^2}$$

در رابطه بالا  $\pi$ ،  $m_e$ ،  $K$ ،  $q_e$  و  $h$  ثابت هستند و مقادیر آنها معلوم است. با جایگذاری مقادیر آنها خواهیم داشت:

$$r_n = 5.29 \times 10^{-11} \times \frac{n^2}{Z} \text{ m} = 0.529 \times \frac{n^2}{Z} \text{ \AA}$$

در رابطه بالا  $\text{\AA}$  بیانگر واحد آنگستروم (angstrom) برای طول است که برابر  $10^{-10} \text{ m}$  است.

با جایگذاری  $r_n$  در یکی از دو رابطه اولیه به رابطه زیر برای سرعت الکترون در مدار  $n$  ام می رسیم:

$$V_{en} = \frac{2\pi K Z q_e^2}{nh}$$

انرژی کل الکترون در مدار  $n$  ام یا همان سطح انرژی الکترون در مدار  $n$  ام که با  $E_n$  نشان داده می شود، بصورت زیر از مجموع انرژی پتانسیل الکتریکی و انرژی جنبشی بدست می آید:

$$E_n = -\frac{KZq_e^2}{r_n} + \frac{1}{2} m_e V_{en}^2$$

با استفاده از رابطه تساوی نیروی گریز از مرکز و نیروی الکتریکی، رابطه بالا بصورت زیر ساده می شود:

$$E_n = -\frac{1}{2} \frac{KZq_e^2}{r_n}$$

با جایگذاری رابطه بدست آمده برای  $r_n$  در رابطه بالا خواهیم داشت:

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m_e K^2 Z^2 q_e^4}{n^2 h^2}$$

با جایگذاری مقادیر ثابت خواهیم داشت:

$$E_n = -2.18 \times 10^{-18} \times \frac{Z^2}{n^2} \text{ J} = -13.6 \times \frac{Z^2}{n^2} \text{ eV}$$

در رابطه بالا  $\text{eV}$  بیانگر واحد الکترون ولت برای انرژی است که برابر  $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$  است.

بنابراین روابط بدست آمده توسط بور برای سطح انرژی و شعاع لایه ها در سیستم های تک الکترونی بر حسب عدد اتمی و شماره ی لایه بصورت در ادامه آمده بودند:

$$r_n = 5.29 \times 10^{-11} \times \frac{n^2}{Z} \text{ m} = 0.529 \times \frac{n^2}{Z} \text{ \AA}$$

$$E_n = -2.18 \times 10^{-18} \times \frac{Z^2}{n^2} \text{ J} = -13.6 \times \frac{Z^2}{n^2} \text{ ev}$$

به  $0.529 \text{ \AA}$  که شعاع بدست آمده توسط بور برای مدار اول ( $n=1$ ) سیستم تک الکترونی با  $Z=1$  یا در واقع شعاع مدار اول اتم هیدروژن است، شعاع بور (*Bohr Radius*) گفته می شود و با  $a_0$  نمایش داده می شود. پس رابطه  $r_n$  بصورت زیر نیز می تواند نوشته شود:

$$r_n = \frac{n^2 a_0}{Z}$$

در ضمن برای لایه  $n=\infty$ ،  $r_{n=\infty}$  (فاصله بینهایت از هسته) و  $E_{n=\infty}$  (سطح انرژی صفر) بدست می آید. از این رو لایه  $n=\infty$  معادل الکترون فاقد انرژی جنبشی و پتانسیل کنده شده از اتم است و انتقال الکترون به لایه  $n=\infty$  معادل کندن الکترون از اتم است. با توجه به مثبت بودن جمله  $\frac{Z^2}{n^2}$  مقادیر  $E_n$  مابقی لایه ها منفی خواهد بود. این مطلب در کنار صفر بودن سطح انرژی الکترون کنده شده از اتم بیانگر اینست که قدر مطلق  $E_n$  برای هر لایه نشان میدهد که سطح انرژی الکترون در آن لایه چقدر با سطح انرژی الکترون کنده شده از اتم متفاوت است و دقیقتر بگوئیم نشان میدهد چقدر از آن پایین تر و پایدارتر است. با توجه به روابط بدست آمده در سیستم های تک الکترونی انرژی لایه ها متناسب با  $Z^2$  است و رابطه معکوس با  $n^2$  دارد  $(E_n \propto \frac{Z^2}{n^2})$ . از طرف دیگر شعاع لایه ها متناسب با  $n^2$  است و رابطه معکوس با  $Z$  دارد  $(r_n \propto \frac{n^2}{Z})$ . مثال: سطح انرژی و شعاع لایه ها در اتم هیدروژن را با توجه به فرمولهای مدل اتمی بور بدست آورید و در مورد روند تغییرات آنها بحث کنید.

حل:

$$H \text{ اتم } : Z = 1, E_n = -13.6 \text{ ev} \times \frac{1^2}{n^2}$$

$$n = 1 \rightarrow E_1 = -13.6 \times \frac{1^2}{1^2} = -13.6 \text{ ev}$$

$$n = 2 \rightarrow E_2 = -13.6 \times \frac{1^2}{2^2} = -3.4 \text{ ev}$$

$$n = 3 \rightarrow E_3 = -13.6 \text{ ev} \times \frac{1^2}{3^2} = -1.51 \text{ ev}$$

$$n = 4 \rightarrow E_4 = -13.6 \times \frac{1^2}{4^2} = -0.85 \text{ ev}$$

$$n = 5 \rightarrow E_5 = -13.6 \times \frac{1^2}{5^2} = -0.54 \text{ ev}$$

$$n = \infty \rightarrow E_{\infty} = -13.6 \times \frac{1^2}{\infty^2} = 0$$

همانطور که مشاهده می شود با افزایش  $n$  یا دور شدن از هسته شاهد افزایش سطح انرژی لایه ها هستیم. همچنین با افزایش  $n$  اختلاف سطح انرژی لایه ها کاهش می یابد.

$$H_{\text{تم}} : Z=1, r_n = 0.529 A^\circ \times \frac{n^2}{Z}$$

$$n = 1 \rightarrow r_1 = 0.529 A^\circ \times \frac{1^2}{1} = 0.529 \text{ \AA}$$

$$n = 2 \rightarrow r_2 = 0.529 A^\circ \times \frac{2^2}{1} = 2.116 \text{ \AA}$$

$$n = 3 \rightarrow r_3 = 0.529 A^\circ \times \frac{3^2}{1} = 4.761 \text{ \AA}$$

$$n = 4 \rightarrow r_4 = 0.529 A^\circ \times \frac{4^2}{1} = 8.464 \text{ \AA}$$

$$n = 5 \rightarrow r_5 = 0.529 A^\circ \times \frac{5^2}{1} = 13.225 \text{ \AA}$$

همانطور که مشاهده می شود با افزایش  $n$  شاهد افزایش فاصله الکترون از هسته هستیم. مقادیر شماره لایه ها، اختلاف شعاع لایه ها و درصد اختلاف شعاع لایه ها برای لایه های متوالی با شماره لایه کمتر از شش به ترتیب در زیر آمده است:

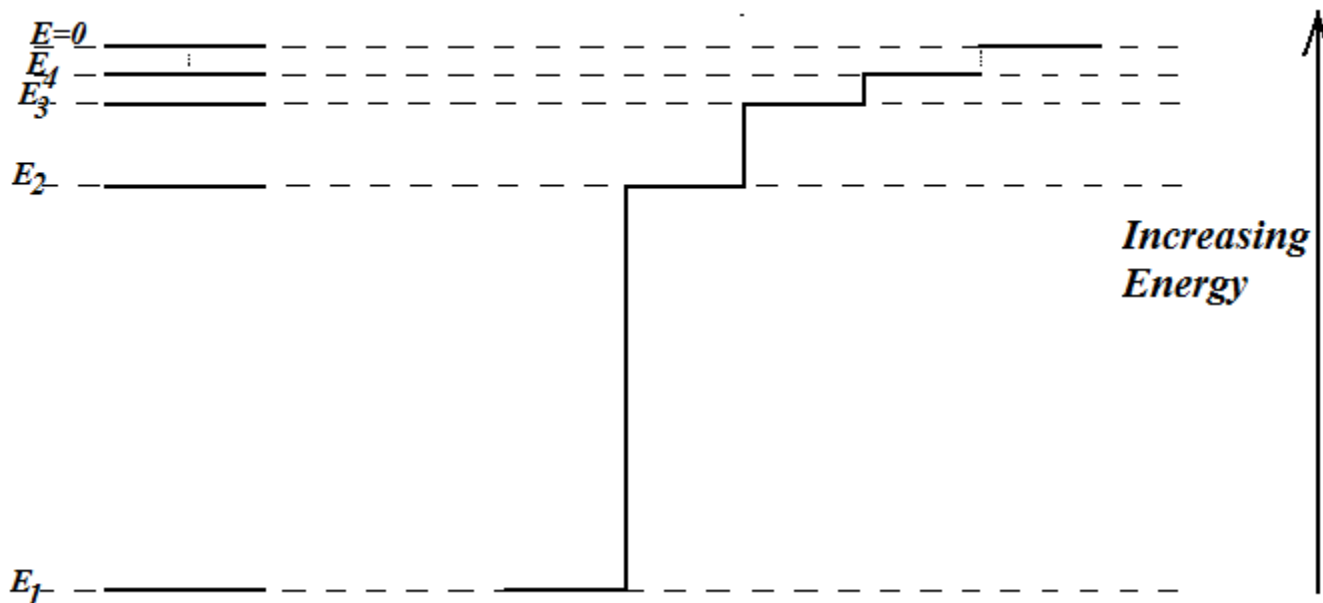
شماره لایه ها	اختلاف شعاع لایه ها ( $r_{n+1}-r_n$ )	درصد اختلاف شعاع لایه ها ( $100(r_{n+1}-r_n)/r_n$ )
1 و 2	1.587 \AA	300%
2 و 3	2.645 \AA	125%
3 و 4	3.703 \AA	125%
4 و 5	4.761 \AA	56.25%

همانطور که مشاهده می شود با افزایش  $n$ ، شعاع لایه ها و اختلاف شعاع لایه ها افزایش می یابد اما درصد افزایش شعاع از یک لایه به لایه بعدی کاهش می یابد.

\*\*\*\*\*

همانطور که مثال قبل نیز نشان می دهد، در سیستم های تک الکترونی با افزایش  $n$  یا دور شدن از هسته شاهد افزایش سطح انرژی لایه ها هستیم و همچنین با افزایش  $n$  اختلاف سطح انرژی لایه ها کاهش می یابد. در شکل بعدی که سطح انرژی لایه ها یکبار بصورت پاره خط و یکبار هم بصورت پلکانی نشان داده شده است، این نکات مشهود است.





مثال : شعاع و سطح انرژی تراز اول را برای  $He^+$  و  $Li^{2+}$  بدست آورید. آنها را باهم مقایسه کنید و تعیین کنید چه مقدار انرژی برای کندن آخرین الکترون اتم لیتیم مورد نیاز است ؟  
حل:

با توجه به اینکه  $He^+$  و  $Li^{2+}$  جز سیستمهای تک الکترونی هستند، می توانیم از فرمولهای بور برای شعاع و سطح انرژی ترازها به صورت زیر استفاده کنیم:

$$E_{He^+} = -13.6 \times \frac{Z^2}{n^2} = -13.6 \times \frac{2^2}{1^2} = -52.4 \text{ eV}$$

$$r_{He^+} = 0.529 \text{ \AA} \times \frac{n^2}{Z} = 0.529 \times \frac{1}{2} = 0.2645 \text{ \AA}$$

$$E_{Li^{2+}} = -13.6 \times \frac{3^2}{1^2} = -122.4 \text{ eV}$$

$$r_{Li^{2+}} = 0.529 \text{ \AA} \times \frac{1^2}{3} = 0.1763 \text{ \AA}$$

بعلت تعدا پروتون های بیشتر هسته لیتیم در مقایسه با هسته هلیوم، جاذبه الکترون در  $Li^{2+}$  با هسته بیشتر است و به هسته نزدیک تر می شود. به علت بار هسته بیشتر  $Li^{2+}$  و نزدیک تر بودن الکترون به هسته سطح انرژی الکترون در تراز اول  $Li^{2+}$  کمتر یا پایدارتر از سطح انرژی الکترون در تراز اول  $He^+$  است.

مقدار انرژی مورد نیاز برای کندن الکترون  $Li^{2+}$  در حالت پایه برابر انرژی مورد نیاز برای فرستادن الکترون از لایه اول به لایه با شماره بینهایت است که آنهم برابر اختلاف سطح انرژی این دو لایه است. بنابراین انرژی مورد نیاز برای کندن الکترون هر  $Li^{2+}$  در حالت پایه برابراست با:

$$\Delta E = E_{n=\infty} - E_{n=1} = 0 - (-122.4) = 122.4 \text{ eV}$$

\*\*\*\*\*

مثال : الکترون اتم هیدروژن در حالت پایه را در نظر بگیرید.

الف ) سطح انرژی الکترون در لایه سوم را برحسب  $eV$  بدست آورید.

- ب) اگر بخواهیم الکترون در حالت پایه را به تراز انرژی  $n=2$  ببریم چقدر انرژی بر حسب  $ev$  بایستی صرف کنیم؟  
 ج) اگر بخواهیم الکترون در حالت پایه ی اتم هیدروژن را بکنیم، چقدر انرژی بر حسب  $ev$  باید صرف شود؟  
 د) انرژی قسمت ج را بر حسب  $\frac{kJ}{mol}$  بدست آورید.  
 ه) فرکانس و طول موج فوتون های مورد نیاز برای انتقالات الکترونی یاد شده در قسمت های ب و ج را بدست آورید.  
 حل:  
 الف)

$$E_{H_{n=3}} = -13.6 \times \frac{Z^2}{n^2} = -13.6 \times \frac{1^2}{9} = -1.51 \text{ ev}$$

(ب)

$$E_1 = -13.6 \text{ ev} \quad E_2 = -13.6 \times \frac{1}{4} = -3.4 \text{ ev}$$

$$\text{انرژی صرف شده} = E_{n=2} - E_{n=1} = -3.6 + 13.6 = 10.2 \text{ ev}$$

(ج)

$$\Delta E = E_{\infty} - E_1 = 0 - (-13.6) = 13.6 \text{ ev}$$

(د)

$$13.6 \text{ ev} \times 1.6 \times 10^{-19} = 2.176 \times 10^{-18} \text{ J} = 2.176 \times 10^{-21} \text{ KJ}$$

$$2.176 \times 10^{-21} \times 6.022 \times 10^{23} = 1310.34 \text{ KJ/mol}$$

همچنین می توانیم از روش ضریب تبدیل زیر استفاده کنیم:

$$13.6 \frac{\text{ev}}{\text{atom}} \times \frac{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ ev}} \times \frac{1 \text{ KJ}}{1000 \text{ J}} \times \frac{6.022 \times 10^{23} \text{ atom}}{1 \text{ mol}} = 1310.4 \text{ KJ/mol}$$

(ه)

برای بدست آوردن فرکانس و طول موج فوتون های مورد نیاز برای انتقالات الکترونی یاد شده در قسمت های ب و ج اختلاف سطح انرژی دو تراز را برابر انرژی فوتون ( $E = hv$ ) قرار می دهیم.  
 برای قسمت ب داریم:

$$10.2 \times 1.6 \times 10^{19} \text{ J} = 6.63 \times 10^{-34} \times \nu \Rightarrow \nu = 2.461 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8}{2.461 \times 10^{15}} = 1.21 \times 10^{-7} \text{ m} = 121 \text{ nm}$$

برای قسمت ج داریم:

$$2.176 \times 10^{-18} = 6.63 \times 10^{-34} \nu \Rightarrow \nu = 3.28 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8}{3.28 \times 10^{15}} = 9.14 \times 10^{-8} \text{ m} = 91.4 \text{ nm}$$

\*\*\*\*\*

مثال: الکترون در اتم هیدروژن سطح انرژی برابر  $-13.6$  الکترون ولت دارد و فاصله آن از هسته  $a_0$  است. اگر با صرف انرژی این الکترون به سطح انرژی برابر  $-1.51 \text{ ev}$  برود، فاصله آن از هسته چقدر می شود؟

حل:

$$\begin{aligned}
 & \text{الف) } a_0 \qquad \text{ب) } 4 a_0 \qquad \text{ج) } 3 a_0 \qquad \text{د) } 9 a_0 \\
 E_n \propto \frac{Z^2}{n^2} & \Rightarrow E_{n_1} = K \times \frac{Z^2}{n_1^2}, \quad E_{n_2} = K \times \frac{Z^2}{n_2^2} \\
 \Rightarrow \frac{E_{n=n_1}}{E_{n=n_2}} = \frac{n_2^2}{n_1^2} \rightarrow \frac{-13.6}{-1.51} = \frac{n_2^2}{n_1^2} \rightarrow \frac{n_2}{n_1} = 3 \\
 r_n \propto \frac{n^2}{Z} & \Rightarrow r_{n_1} = K' \times \frac{n_1^2}{Z}, \quad r_{n_2} = K' \times \frac{n_2^2}{Z} \\
 \Rightarrow \frac{r_{n=n_1}}{r_{n=n_2}} = \frac{n_1^2}{n_2^2} \rightarrow \frac{r_{n=n_2}}{r_{n=n_1}} = \left(\frac{3}{1}\right)^2 = 9 \\
 \rightarrow (r_{n=n_2}) = 9 \times (r_{n=n_1}) = 9 a_0
 \end{aligned}$$

بنابراین پاسخ صحیح گزینه (د) است.

\*\*\*\*\*

### طیف های اتمی

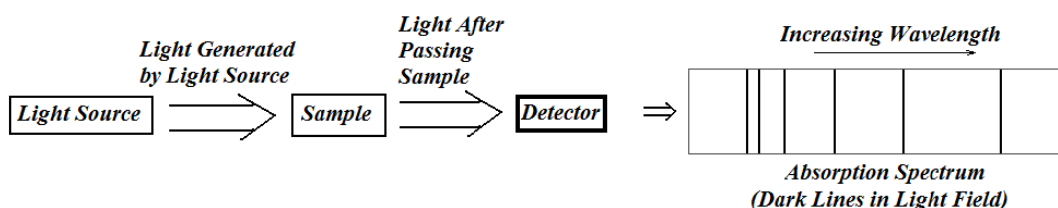
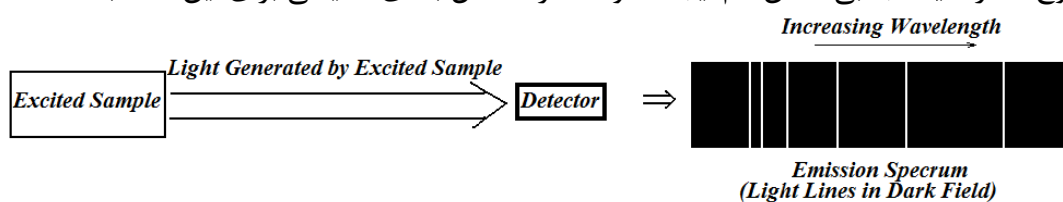
هنگامی که به اتم ها مثلاً با حرارت دادن انرژی بدهیم، الکترون های اتم با گرفتن انرژی از ترازهای پایین به ترازهای بالا می روند و اتم در حالت برانگیخته قرار می گیرد. اتم در حالت برانگیخته تمایل دارد با از دست دادن انرژی به اتم در حالت پایه تبدیل شود. اتم می تواند با تولید فوتونی با انرژی دقیقاً برابر اختلاف سطح انرژی دو تراز الکترونی اش الکترونش را از تراز بالاتر به تراز پایین تر جابجا کند. هر اتمی با توجه به سطح انرژی لایه هایش توانایی تولید فوتون های خاصی با طول موجها و فرکانس های معینی دارد. به مجموعه فوتون ها، طول موجها و فرکانس هایی که یک اتم می تواند در اثر انتقال الکترونهاش از ترازهای بالاتر به پایین تر تولید کند طیف نشری آن اتم (*Emission Spectrum*) می گوئیم.

همچنین می توانیم نور با تمام فرکانس ها و طول موج های امکان پذیر را به اتم بتابانیم، در اینصورت اتم تنها فوتون هایی را جذب می کند که انرژی آنها دقیقاً برابر اختلاف انرژی دو لایه در اتم باشد و در نتیجه بتوانند الکترون اتم را از ترازهای پایین تر به بالاتر انتقال دهند. این فوتون ها و فرکانس ها و طول موج های مربوط به آنها از نور تابیده شده حذف می شوند و در صورت آشکارسازی جای آنها غایب است. به مجموعه فوتون ها، فرکانس ها و طول موج هایی که یک اتم می تواند در اثر انتقال الکترونهاش از ترازهای پایین تر به بالاتر جذب کند طیف جذبی آن اتم (*Absorption Spectrum*) گفته می شود.

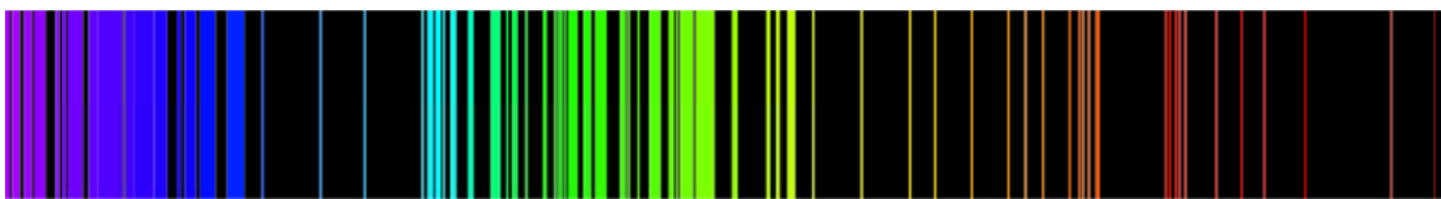
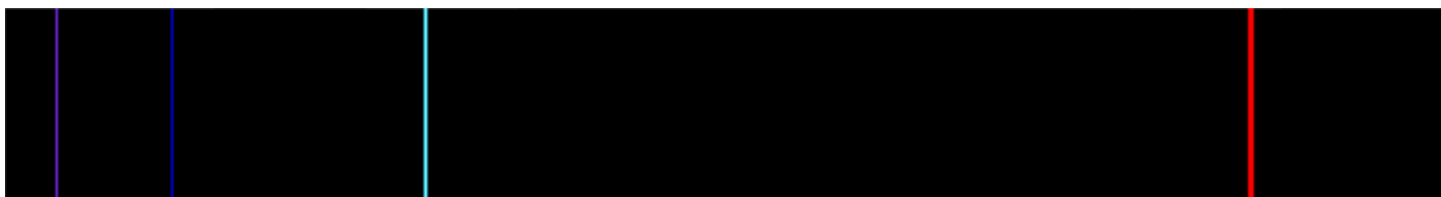
لازم بذکر است که میتوان طیف ها را به دو دسته گسسته (*Discrete Spectrum*) و پیوسته (*Continuous Spectrum*) طبقه بندی نمود. طیف های پیوسته مثل نور خورشید تمامی طول موج ها را در یک بازه شامل می شوند و بین مقادیر آنها فاصله وجود ندارد. در حالیکه طیف های گسسته مثل طیف نشری یا جذبی اتمها فقط یک سری طول موج های خاص را شامل می شوند بطوریکه بین مقادیر آنها فاصله وجود دارد. در طیف های گسسته خطوط طیفی (*Spectral Lines*) که ممکن است سیاه یا روشن باشند، بیانگر طول موج های خاص گسسته از هم طیف هستند.

با توجه به بحث بالا طبیعی است که طیف نشری شامل خطوط روشن در زمینه سیاه باشد که خطوط روشن همان فوتون های تولید شده توسط اتم هستند. در حالیکه طیف جذبی بایستی شامل خطوط سیاه در زمینه روشن باشد که خطوط تاریک همان

فوتون های جذب شده توسط اتم هستند و زمینه روشن مابقی نور تابیده شده است که جذب نشده است. طیف جذبی و نشری مکمل یکدیگرند، چراکه اگر انتقال الکترون از تراز بالاتر  $a$  به تراز پایین تر  $b$  بعلت تولید یک فوتون یک خط روشن در طول موج  $x$  در طیف نشری یک اتم ایجاد بنماید، بالطبع انتقال الکترون از تراز پایین تر  $b$  به تراز بالاتر  $a$  بعلت جذب همان فوتون یک خط تاریک در طول موج  $x$  در طیف جذبی همان اتم ایجاد خواهد کرد. شکل بعدی نمایشی برای این مطالب است.



طیف های اتمی و مجموعه ی فرکانس ها و طول موج های نشر یا جذب شده منعکس کننده ی سطوح انرژی اتم هستند و از آنجایی که سطوح انرژی هر اتم ویژه آن اتم است طیف های نشری و جذبی هر عنصری ویژه آن عنصر است. بنابراین طیف های نشری و جذبی همانند اثر انگشت می توانند برای شناسایی عناصر به کار روند. بعنوان مثال دو شکل بعدی طیف های نشری به ترتیب اتم های هیدروژن و آهن و تفاوت آنها را نمایش می دهند.

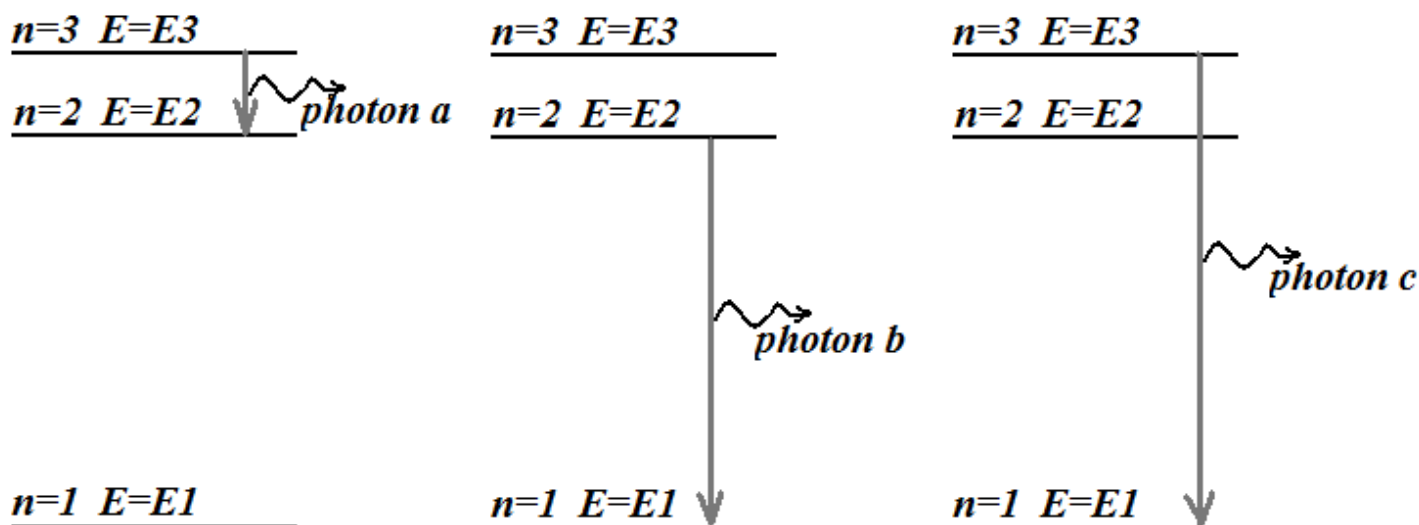


توضیح شکل: طیف نشری اتم هیدروژن (بالا) و اتم آهن (پایین) در محدوده نور مرئی

مثال: الکترونی در تراز  $n=3$  اتم هیدروژن قرار دارد. در برگشت به حالت پایه این الکترون چند خط طیفی می تواند تولید کند؟ رابطه ی فرکانس فوتون های تولید شده با انرژی لایه ها را بنویسید.

حل:

الکترون اتم هیدروژن در تراز سوم در برگشت به حالت پایه می تواند سه نوع انتقال الکترونی از  $n=3$  به  $n=2$  همراه با تولید فوتون  $a$ ، از  $n=2$  به  $n=1$  همراه با تولید فوتون  $b$  و از  $n=3$  به  $n=1$  همراه با تولید فوتون  $c$  داشته باشد. انتقالات الکترونی یاد شده در شکل بعدی نمایش داده شده اند.



هر انتقال الکترونی با اختلاف انرژی بخصوص بین لایه های مبدا و مقصد معادل یک خط طیفی است. بنابراین سه خط طیفی خواهیم داشت. با توجه به اینکه اختلاف انرژی لایه های مبدا و مقصد برابر انرژی فوتون است، رابطه ی فرکانس فوتون های تولید شده با انرژی لایه ها بصورت زیر خواهد بود:

$$\text{for photon a: } E_a = h\nu_a = E_3 - E_2 \Rightarrow \nu_a = \frac{E_3 - E_2}{h}$$

$$\text{for photon b: } E_b = h\nu_b = E_2 - E_1 \Rightarrow \nu_b = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

$$\text{for photon c: } E_c = h\nu_c = E_3 - E_1 \Rightarrow \nu_c = \frac{E_3 - E_1}{h}$$

\*\*\*\*\*

مثال : اگر فوتون در تراز  $n = 5$  اتم هیدروژن قرار داشته باشد و به حالت پایه برود، چند خط طیفی می تواند ایجاد کند؟ کدام انتقال الکترونی بیشترین انرژی و فرکانس را دارد؟ کدام انتقال الکترونی همراه با تولید فوتون با کمترین انرژی و بیشترین طول موج است؟

حل:

الکترون اتم هیدروژن در تراز پنجم در برگشت به حالت پایه می تواند انتقالات الکترونی زیر را داشته باشد:

$$n = 5 \rightarrow n = 4, n = 5 \rightarrow n = 3, n = 5 \rightarrow n = 2, n = 5 \rightarrow n = 1$$

$$n = 4 \rightarrow n = 3, n = 4 \rightarrow n = 2, n = 4 \rightarrow n = 1$$

$$n = 3 \rightarrow n = 2, n = 3 \rightarrow n = 1$$

$$n = 2 \rightarrow n = 1$$

بنابراین 10 انتقال الکترونی متمایز با انرژیهای تولیدی متفاوت خواهیم داشت و در نتیجه 10 خط طیفی می توانیم داشته باشیم. تعداد خطوط طیفی را همچنین می توانستیم بدین صورت محاسبه کنیم که تعداد خطوط طیفی برابر تعداد انتقالات الکترونی ( البته با انرژیهای متفاوت) است و با توجه به اینکه هر انتقال الکترونی بین دو لایه است، تعداد حالت‌های انتخاب دو لایه از پنج لایه در اینجا بیانگر همان تعداد خطوط طیفی خواهد بود. برای تعداد حالت‌های انتخاب دو از پنج داریم:

$$\binom{5}{2} = \frac{5!}{2! \times 3!} = \frac{5 \times 4}{2} = 10$$

هر چه اختلاف سطح انرژی لایه هایی که الکترون بین آنها جابجا می شود، بیشتر باشد، انتقال الکترونی مربوطه انرژی و فرکانس بیشتر و طول موج کمتری خواهد داشت و بالعکس. از این رو است که در اینجا انتقال از لایه  $n = 5$  به لایه  $n = 1$  بیشترین انرژی و فرکانس را دارد. چون هر چه بالاتر می رویم سطح انرژی لایه ها بهم نزدیکتر می شود پس اختلاف انرژی در لایه های بالاتر کمتر است و در نتیجه در اینجا انتقال از لایه  $n = 5$  به لایه  $n = 4$  کمترین انرژی و فرکانس و بیشترین طول موج را دارد.

\*\*\*\*\*

مثال : یک سیستم کوانتومی خاص دارای 3 تراز انرژی  $a$ ,  $b$ ,  $c$  است. هنگامی که الکترون از تراز  $a$  به تراز  $b$  می رود فوتونی با طول موج  $400 \text{ nm}$  تولید می کند. هنگامی که الکترون از تراز  $c$  به تراز  $b$  می رود فوتونی با طول موج  $1000 \text{ nm}$  تولید می کند.

الف) ترتیب سطح انرژی ترازهای  $a$ ,  $b$ ,  $c$  را در یک نمودار به طور تقریبی نمایش دهید.

ب) اختلاف سطح انرژی تراز  $a$  با  $b$  و  $c$  با  $b$  چقدر است؟

ج) اگر الکترون از تراز انرژی  $a$  به  $c$  برود فوتون جذب می کند یا تولید؟ با چه طول موجی؟

(حل)

الف) از آنجائیکه هنگام رفتن الکترون از تراز  $a$  به تراز  $b$  فوتون تولید می شود بایستی نتیجه بگیریم که سطح انرژی تراز  $a$  ( $E_a$ ) از سطح انرژی تراز  $b$  ( $E_b$ ) بالاتر است ( $E_a > E_b$ ). بطور مشابه نتیجه می گیریم که:  $E_c > E_b$ . از آنجائیکه فوتون تولید شده بر اثر انتقال الکترون از تراز  $a$  به تراز  $b$  طول موج کمتر و در نتیجه انرژی بیشتری در مقایسه با فوتون تولید شده بر اثر انتقال الکترون از تراز  $c$  به تراز  $b$  دارد، نتیجه می گیریم که:  $E_a > E_c$ . پس نمودار تقریبی زیر را می توان در نظر گرفت:

$$a \text{ ————— } E = E_a$$

$$c \text{ ————— } E = E_c$$

$$b \text{ ————— } E = E_b$$

(ب)

$$E_a - E_b = \text{Energy of Photon from } a \text{ to } b = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.989 \times 10^{-25}}{4 \times 10^{-7} \text{m}} = 4.97 \times 10^{-19} \text{J}$$

$$E_c - E_b = \text{Energy of Photon from } c \text{ to } b = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.989 \times 10^{-25}}{10^{-9} \times 1000} = 1.99 \times 10^{-19} \text{J}$$

(ج)

از آنجائیکه سطح انرژی تراز  $a$  از سطح انرژی تراز  $c$  بالاتر است، انتقال الکترون از تراز انرژی  $a$  به  $c$  همراه با تولید فوتون خواهد بود. برای محاسبه طول موج فوتون تولید شده از یکی از دو راه حل زیر می توانیم استفاده کنیم:

راه حل اول:

$$E_a - E_b = 3.978 \times 10^{-19}, E_c - E_b = 1.989 \times 10^{-19} \Rightarrow E_a - E_c = (E_a - E_b) + (E_b - E_c)$$

$$\Rightarrow E_a - E_c = 4.97 \times 10^{-19} - 1.99 \times 10^{-19} = 2.98 \times 10^{-19} \text{J} \Rightarrow$$

$$\frac{hc}{\lambda} = 2.98 \times 10^{-19} \Rightarrow \lambda = 667 \text{nm}$$

راه حل دوم:

$$E_a - E_b = (E_a - E_c) + (E_c - E_b) \Rightarrow \frac{hc}{\lambda_{a \rightarrow b}} = \frac{hc}{\lambda_{a \rightarrow c}} + \frac{hc}{\lambda_{c \rightarrow b}} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{\lambda_{a \rightarrow b}} = \frac{1}{\lambda_{a \rightarrow c}} + \frac{1}{\lambda_{c \rightarrow b}} \rightarrow \frac{1}{400} = \frac{1}{\lambda_{a \rightarrow c}} + \frac{1}{1000} \rightarrow \lambda_{a \rightarrow c} = 667 \text{ nm}$$

\*\*\*\*\*

مطالعه طیف نشری اتم هیدروژن در پیدایش و توسعه فیزیک کوانتومی و افزایش درک ما از ساختار اتمها تاثیر قابل توجهی داشته است. هر مجموعه از خطوط طیفی طیف نشری اتم هیدروژن با لایه مقصد یکسان یک سری نامیده می شود و نام سری به نام شخصی است که بر روی خطوط طیفی مربوطه مطالعه کرده است. سریهای نامگذاری شده و مهمتر طیف نشری اتم هیدروژن که در مابقی سیستم های تک الکترونی نیز بکار می روند، به صورت زیر هستند:

سری لیمان (*Lyman Series*): مجموعه خطوط طیفی در طیف نشری اتم  $H$  که ناشی از انتقال الکترون از هر تراز بالاتر از تراز  $n=1$  به تراز  $n=1$  است.

سری بالمر (*Balmer Series*): مجموعه خطوط طیفی در طیف نشری اتم  $H$  که ناشی از انتقال الکترون از هر تراز بالاتر از تراز  $n=2$  به تراز  $n=2$  است.

سری پاشن (*Paschen Series*): مجموعه خطوط طیفی در طیف نشری اتم  $H$  که ناشی از انتقال الکترون از هر تراز بالاتر از تراز  $n=3$  به تراز  $n=3$  است.

سری براکت (*Brackett Series*): مجموعه خطوط طیفی در طیف نشری اتم  $H$  که ناشی از انتقال الکترون از هر تراز بالاتر از تراز  $n=4$  به تراز  $n=4$  است.

سری پفوند (*Pfund Series*): مجموعه خطوط طیفی در طیف نشری اتم  $H$  که ناشی از انتقال الکترون از هر تراز بالاتر از تراز  $n=5$  به تراز  $n=5$  است.

سری هامفری (*Humphreys Series*): مجموعه خطوط طیفی در طیف نشری اتم  $H$  که ناشی از انتقال الکترون از هر تراز بالاتر از تراز  $n=6$  به تراز  $n=6$  است.



Theodore Lyman  
(November 23, 1874 -  
October 11, 1954)



Johann Jakob Balmer  
(May 1, 1825 – March 12,  
1898)

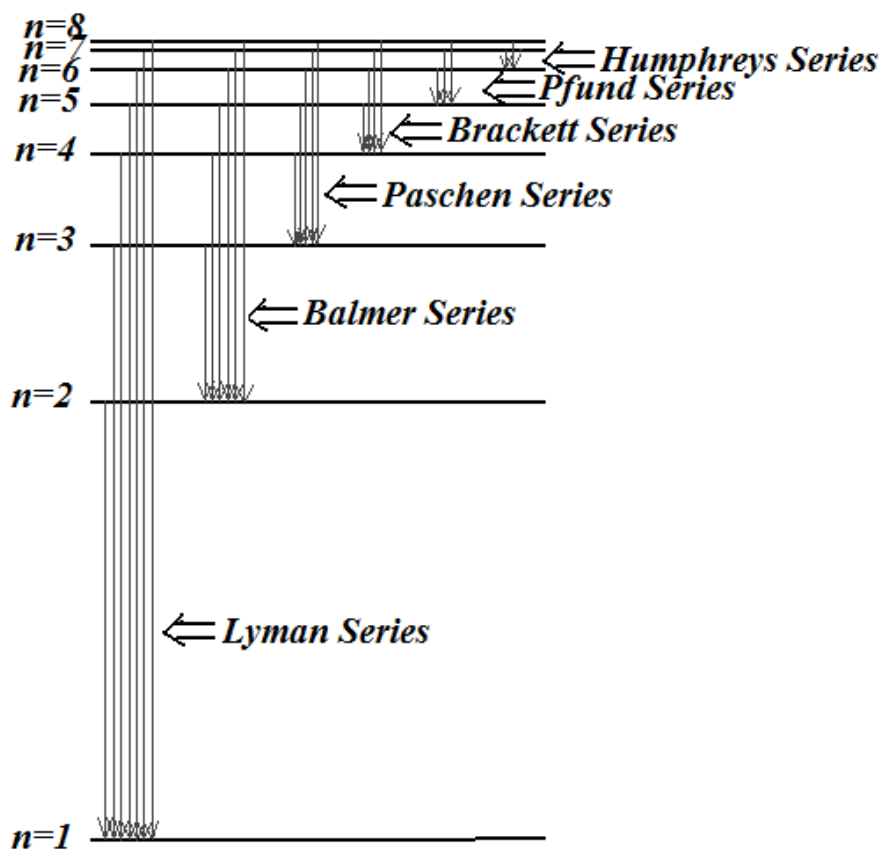


Louis Karl Heinrich  
Friedrich Paschen (22  
January 1865 - 25  
February 1947)



Frederick Sumner  
Brackett (August 1, 1896  
– January 28, 1988)

شکل بعدی نمایشی از انتقالات الکترونی سریهای یاد شده است:





مثال: پر انرژی ترین و کم انرژی ترین خطوط طیفی در سری پاشن اتم هیدروژن مربوط به کدام انتقالات الکترونی هستند؟  
حل:

پر انرژی ترین مربوط به انتقال الکترونی بین لایه ها با بیشترین اختلاف سطح انرژی و کم انرژی ترین مربوط به انتقال الکترونی بین لایه ها با کمترین اختلاف سطح انرژی است. برای سری پاشن پر انرژی ترین مربوط به انتقال الکترون از  $n=\infty$  به  $n=3$  و کم انرژی ترین مربوط به انتقال الکترون از  $n=4$  به  $n=3$  خواهد بود.

\*\*\*\*\*

مثال: در سری براکت اتم هیدروژن بیشترین طول موج مربوط به کدام انتقال الکترونی است؟  
حل:

بیشترین طول موج مربوط به انتقال الکترونی با کمترین انرژی است. برای سری براکت بیشترین طول موج مربوط به انتقال الکترون از  $n=5$  به  $n=4$  خواهد بود.

\*\*\*\*\*

مثال: بیشترین طول موج سریهای لیمان، بالمر و پاشن را از نظر بزرگی چگونه مقایسه می کنید؟  
حل:

بیشترین طول موج مربوط به انتقال الکترونی با کمترین انرژی است. برای هر سری طیفی بیشترین طول موج مربوط به انتقال الکترون از  $n=a+1$  به  $n=a$  خواهد بود که  $a$  شماره تراز مقصد در آن سری طیفی است. چون هر چه بالاتر می رویم سطح انرژی لایه ها بهم نزدیکتر می شود پس اختلاف انرژی در لایه های بالاتر کمتر و طول موج خطوط طیفی متناظر بیشتر است. بنابراین بیشترین طول موج سری پاشن از سری بالمر و آنهم از سری لیمان بیشتر است. این مطلب در مورد خطوط طیفی متناظر تمام سریها نیز برقرار است. بعنوان مثال طول موج خط پنجم سری (طول موج مربوط به انتقال الکترون از  $n=a+5$  به  $n=a$  خواهد بود که  $a$  شماره تراز مقصد در آن سری طیفی است) با افزایش شماره تراز مقصد سری افزایش می یابد و کمترین طول موج متعلق به سری لیمان است.

\*\*\*\*\*

در سال 1885 بالمر متوجه شد که خطوط طیفی سری بالمر اتم هیدروژن در رابطه زیر که رابطه بالمر نامیده می شود، صدق می کنند:

$$\lambda = B \left( \frac{n^2}{n^2 - 4} \right)$$

در رابطه بالا  $\lambda$  طول موج خط طیفی،  $n$  ( $n \geq 3$ ) شماره تراز که الکترون از آن به تراز  $n=2$  می رود و  $B$  یک ثابت برابر  $364.5 \text{ nm}$  است.

مثال: با استفاده از رابطه بالمر طول موج خط طیفی اول سری بالمر را بر حسب نانومتر بدست آورید.

حل:

خط طیفی اول سری بالمر مربوط به انتقال الکترون از تراز  $n=3$  به تراز  $n=2$  است. برای طول موج آن از رابطه بالمر داریم:

$$\lambda = B \left( \frac{n^2}{n^2 - 4} \right) \Rightarrow \lambda = 364.5 \times \left( \frac{3^2}{3^2 - 4} \right) \Rightarrow \lambda = 656nm$$

\*\*\*\*\*

در سال 1888 ریذبرگ فرمول کلی تری برای محاسبه طول موج خطوط طیفی ارائه داد. در مورد اتم هیدروژن رابطه ریذبرگ ( که رابطه بالمر را نیز در خود دارد) بصورت زیر می تواند نوشته شود:

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

در رابطه بالا  $\lambda$  طول موج خط طیفی،  $n_L$  و  $n_H$  به ترتیب شماره تراز پایین تر و شماره تراز بالاتر که انتقال الکترون بین آنها صورت می گیرد و  $R_H$  ثابت ریذبرگ برای اتم هیدروژن است که برابر  $1.097 \times 10^7 m^{-1}$  است. در ضمن لازم بذکر است که به عکس طول موج  $\left(\frac{1}{\lambda}\right)$  عدد موج گفته می شود که معادل تعداد موجهای کامل در واحد طول است. دوره تناوب و فرکانس در بعد زمان معادل طول موج و عدد موج در بعد مکان هستند.

مثال: با استفاده از رابطه ریذبرگ طول موج خط طیفی اول سری بالمر را بر حسب نانومتر بدست آورید.

حل:

خط طیفی اول سری بالمر مربوط به انتقال الکترون از تراز  $n=3$  به تراز  $n=2$  است. برای طول موج آن از رابطه ریذبرگ داریم:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_H^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \times \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = 1.52 \times 10^6 m^{-1} \Rightarrow \lambda = 658nm$$

\*\*\*\*\*

فرمول ریذبرگ بصورت زیر می تواند برای مابقی سیستمهای تک الکترونی نیز بکار رود:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H Z^2 \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_H^2} \right)$$

در رابطه بالا کمیت ها مشابه قبل تعریف می شوند و  $Z$  بیانگر عدد اتمی سیستم تک الکترونی مدنظر است. دقت کنید که در صورتیکه عدد اتمی اتم هیدروژن ( $Z=1$ ) را در نظر بگیریم، به رابطه قبلی می رسیم. در رابطه بالا  $R_H Z^2$  ثابت ریذبرگ سیستم تک الکترونی مدنظر نیز نامیده می شود.

مثال: یون  $Li^{2+}$  را که یک سیستم تک الکترونی است، در نظر بگیرید. ( $R_H = 1.097 \times 10^7 m^{-1}$ )

الف) ثابت ریذبرگ آن را بر حسب  $m^{-1}$  بدست آورید.

ب) ثابت ریذبرگ آن را بر حسب  $cm^{-1}$  بدست آورید.

ج) طول موج مربوط به انتقال الکترون از تراز  $n=5$  به تراز  $n=2$  در آن را بدست آورید.

حل:

الف)

$$R_{Li} = R_H Z^2 = 1.097 \times 10^7 m^{-1} \times 3^2 \Rightarrow R_{Li} = 9.9 \times 10^7 m^{-1}$$

ب)

$$R_{Li} = 9.9 \times 10^7 m^{-1} \times \frac{1m}{100cm} = 9.9 \times 10^5 cm^{-1}$$

(ج)

$$\frac{1}{\lambda} = R_{Li} \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_H^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = 9.9 \times 10^7 \times \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = 2.1 \times 10^7 m^{-1} \Rightarrow \lambda = 48.1 nm$$

\*\*\*\*\*

با استفاده از مدل اتمی بور می توان رابطه ریذبرگ را بدست آورد. هنگامی که الکترون از تراز پایین تر  $n = n_L$  با سطح انرژی  $E_{n_H} - E_{n_L}$  به تراز بالاتر  $n = n_H$  با سطح انرژی  $E_{n_H} = \frac{-13.6Z^2}{n_H^2}$  می رود، اختلاف انرژی دو تراز یعنی  $E_{n_H} - E_{n_L} = \frac{-13.6Z^2}{n_H^2} - \frac{-13.6Z^2}{n_L^2}$  به صورت انرژی فوتون در می آید. پس برای فرکانس و طول موج فوتون داریم:

$$hv = E_{n_H} - E_{n_L} \Rightarrow 6.63 \times 10^{-34} \times \nu = \left[ \left( \frac{-13.6Z^2}{n_H^2} \right) - \left( \frac{-13.6Z^2}{n_L^2} \right) \right] \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$\Rightarrow \nu = 3.282 \times 10^{15} Hz \times Z^2 \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_H^2} \right)$$

$$\Rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda} = 3.282 \times 10^{15} Z^2 \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_H^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = 1.094 \times 10^7 Z^2 \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_H^2} \right) m^{-1}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \underbrace{1.094 \times 10^7 Z^2 \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_H^2} \right)}_{R_H Z^2 \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_H^2} \right)} cm^{-1} \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = R_H Z^2 \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_H^2} \right) \text{ (معادله ریذبرگ)}$$

همانطور که قبلا نیز دیدیم، با استفاده از روابط  $\left( \frac{1}{\lambda} = R_H Z^2 \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{n_H^2} \right) \right)$ ، ثابت ریذبرگ اتم هیدروژن  $R_H$  را محاسبه کرد. براحتی می توان طول موج و فرکانس انتقالات الکترونی در سیستم های تک الکترونی را محاسبه کرد.

مثال: پر انرژی ترین و کم انرژی ترین فوتون در سری لیمان مربوط به چه انتقالات الکترونی است؟ طول موج آن ها را حساب کنید و بگویید در چه ناحیه ای از طیف امواج الکترومغناطیسی قرار دارند.  
حل:

کم انرژی ترین:  $2 \rightarrow 1$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.094 \times 10^7 \left( \frac{1}{1} - \frac{1}{4} \right) \Rightarrow \lambda = 121.9 nm \quad \text{فرابنفش}$$

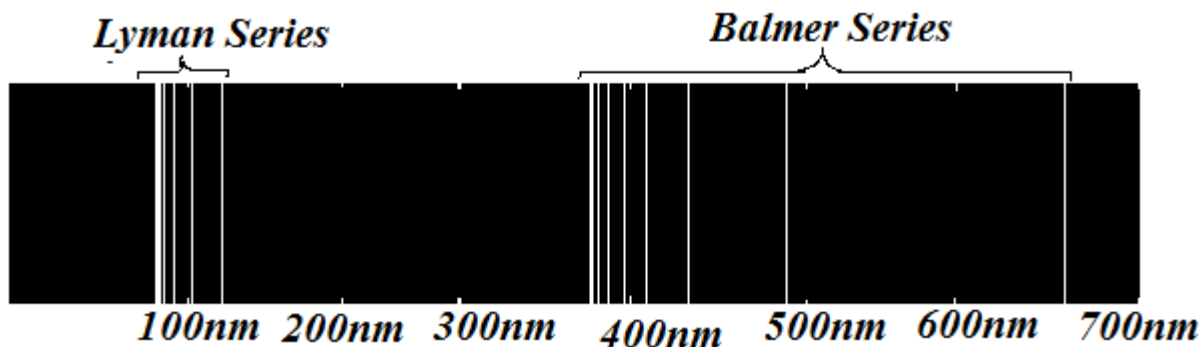
پر انرژی ترین:  $\infty \rightarrow 1$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.094 \times 10^7 \left( \frac{1}{1} - \frac{1}{\infty} \right) \Rightarrow \lambda = 91.4 nm \quad \text{فرابنفش}$$

\*\*\*\*\*

درطیف نشری خطی اتم هیدروژن سری لیمان در محدوده فرابنفش، 4 خط اول سری بالمر در ناحیه مرئی و مابقی خطوط سری بالمر در محدوده فرابنفش و مابقی سری ها در ناحیه فروسرخ قرار دارند. برای هر سری طیفی خطوط طیفی در انرژی های بالا یا طول موج های کم بهمديگر نزدیک می شوند یا در واقع همگرا می شوند (به سمت یک عدد ثابت که همان حد سری است و مربوط به انتقال الکترون از تراز  $n = \infty$  به تراز مقصد آن سری است نزدیک و نزدیکتر می شوند). این مطلب بدین خاطر است که

طول موج با عکس اختلاف سطح انرژی لایه ها رابطه دارد و با افزایش  $n$  سطح انرژی لایه ها بهمديگر نزديکتر می شود. بعنوان مثال سری لیمان و بالمر اتم هیدروژن را در نظر بگیرید:



همانطور که در شکل هم بوضوح قابل مشاهده است، خطوط طیفی سری لیمان و بالمر با کاهش طول موج بهمديگر نزديکتر می شوند و به سمت یک عدد ثابت میل می کنند. بعنوان مثال برای سری بالمر فاصله خط اول ( $\lambda = 656nm$ ) با خط دوم ( $\lambda = 486nm$ ) بیشتر از فاصله خط دوم ( $\lambda = 486nm$ ) با خط سوم ( $\lambda = 434nm$ ) و آنهم بیشتر از فاصله خط سوم ( $\lambda = 434nm$ ) با خط چهارم ( $\lambda = 410nm$ ) و الی آخر است و در نهایت خطوط طیفی سری بالمر به سمت  $\lambda = 365nm$  که مربوط به انتقال الکترون از  $n=\infty$  به  $n=2$  است، میل می کنند.

مثال: برای هیدروژن در کدام سری:

الف) خط طیفی با بیشترین انرژی طول موجی برابر  $2279 nm$  دارد؟

ب) خط طیفی با کمترین انرژی طول موجی برابر  $1875 nm$  دارد؟

حل:

الف)

$$n = \infty \rightarrow n = n_1$$

$$\frac{1}{2279 \times 10^{-9}} = 1.094 \times 10^7 \times \frac{1}{n_L^2} \Rightarrow n_L = 5$$

پس سری پفوند پاسخ صحیح مسئله است.

ب)

$$n = n_L + 1 \rightarrow n = n_L$$

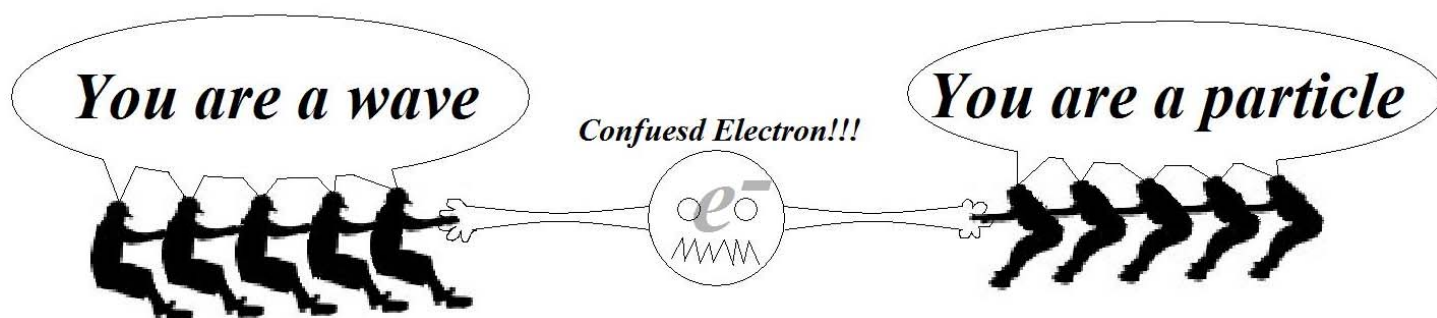
$$\frac{1}{1875 \times 10^{-9}} = 1.094 \times 10^7 \left( \frac{1}{n_L^2} - \frac{1}{(n_L+1)^2} \right) \Rightarrow n_L = 3$$

پس سری پاشن پاسخ صحیح مسئله است.

\*\*\*\*\*

## خصلت موجی مواد

همانطور که نور هم دارای خصلت موجی و هم دارای خصلت ذره ای است ماده نیز طبیعتی دوگانه دارد، یعنی با ماده نیز می توان هم به صورت موج و هم به صورت ذره برخورد کرد یا معادلا ماده از خود هم رفتار ذره ای و هم رفتار موجی نشان می دهد. این خصوصیت مواد در تئوری دوگانگی موج- ذره (*Wave- Particle Duality*) بیان می شود. آزمایشهای مربوطه را بعدا در بخش رفتار موجی ماده از درس شیمی معدنی و عمومی خواهیم دید. درک و تحلیل کامل رفتار موجی ماده نیازمند معلومات فیزیکی و ریاضی سطح بالا است و ما به یک بحث و اشاره ابتدایی بسنده می کنیم. یکی از ساده ترین روابط برای بیان خواص موجی ماده رابطه دوبروی است که در ادامه با آن آشنا می شویم.



خصلت موجی ماده برای اولین بار در سال 1924 توسط دوبروی پیشنهاد شد. بر مبنای رابطه دوبروی ماده با جرم  $m$  که با سرعت  $V$  در حال حرکت است، رفتار موجی دارد و دارای طول موج است که به صورت زیر از رابطه ی دوبروی بدست می آید:

رابطه دوبروی:  $\lambda = h / (mV)$



دوبروی (Louis-Victor-Pierre-Raymond, 7th duc de Broglie (15 August 1892 – 19 March 1987))

مثال : طول موج الکترون در مدار اول اتم هیدروژن را بر مبنای سرعت بدست آمده از مدل اتمی بور و با استفاده از رابطه دوبروی

$$m_e \times V_n \times r_n = \frac{nh}{2\pi}$$

حساب کنید. در مدل اتمی بور برای سرعت الکترون داریم:

حل:

$$r_n = 0.529 \text{ \AA} \times \frac{10^{-10} m}{1^{\circ} A} = 5.29 \times 10^{-11} m$$

$$mV \times 5.29 \times 10^{-11} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{6.28} \Rightarrow mV = 2 \times 10^{-24} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{mV} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{2 \times 10^{-24}}$$

$$\Rightarrow \lambda = 3.32 \times 10^{-10} m = 0.33 nm$$

\*\*\*\*\*

با توجه به رابطه ی دوبروی طول موج و جرم ماده باهم رابطه ی معکوس دارند. برای اشیا معمولی با جرم های معمولی طول موج به حدی کوچک است که از خصلت موجی مواد با اندازه معمولی می توان صرف نظر کرد. برای اشیایی به کوچکی الکترون با جرم ناچیز طول موج نسبت داده شده خیلی کوچک نیست و خصلت موجی در تحلیل اشیایی به کوچکی الکترون مهم است. به عبارتی نباید به اشیایی به کوچکی الکترون تنها به عنوان یک ذره نگاه شود، بلکه بایستی در نظر گرفت که خصلت موجی نیز دارند.

جرم و انرژی بهمديگر قابل تبدیل هستند و پدیده های فراوانی مثل واکنشهای هسته ای در ستارگان داریم که در آنها جرم به انرژی یا بالعکس انرژی به جرم تبدیل می شود ( فرمول معروف اینشتین  $E=mc^2$  را بخاطر می آورید؟). از این رو می توانیم جرم و ماده را صورتی از انرژی در نظر بگیریم. به عبارتی می توان ماده را انرژی محبوس شده در یک مکان مشخص در نظر گرفت. حال در صورتیکه این مکان بطور نسبی کوچک باشد، ماده را بصورت متمرکز و ذره مانند خواهیم دید، در حالیکه اگر مکان محبوس کننده انرژی بطور نسبی بزرگ باشد، ماده را بصورت پخش و موج مانند خواهیم دید. طول موج بدست آمده از رابطه دوبروی را می توان معیاری برای بزرگی و کوچکی این مکان در نظر گرفت. در مورد الکترون در اتم مکان مذکور برای الکترون در حد ابعاد اتم است و بنابراین الکترون در اتم بصورت پخش و موج مانند در نظر گرفته می شود.

### عدم قطعیت

هنگام اندازه گیری تجربی هر کمیت فیزیکی بسته به دقت دستگاه اندازه گیری مقداری خطا یا عدم قطعیت در تعیین مقدار آن کمیت فیزیکی وجود دارد. بطور مشابه تعیین مقدار یک کمیت فیزیکی با استفاده از یک تئوری خاص و روابط مربوطه ممکن است همراه با خطا باشد. تعیین مقدار خطا در بدست آوردن مقدار هر کمیت فیزیکی می تواند به صورت خطای مطلق و خطای نسبی اندازه گیری شود. اختلاف مقدار در نظر گرفته شده برای کمیت (حاصل از یک تئوری خاص یا یک اندازه گیری تجربی) با مقدار واقعی آن کمیت به عنوان خطای مطلق تعریف می شود. خطا همچنین می تواند به صورت خطای نسبی تعریف شود. خطای نسبی به صورت نسبت خطای مطلق و مقدار واقعی کمیت در نظر گرفته می شود. داریم:

مقدار واقعی کمیت - مقدار در نظر گرفته شده = خطای مطلق

$$\text{خطای نسبی} = \frac{\text{مقدار واقعی کمیت} - \text{مقدار در نظر گرفته شده}}{\text{مقدار واقعی کمیت}}$$

$$100 \times \text{خطای نسبی} = \text{درصد خطای نسبی}$$

مثال: طول واقعی یک جسم  $80\text{cm}$  است. مقدار گزارش شده دانش آموز 1 برابر  $85\text{cm}$  و مقدار گزارش شده دانش آموز 2 برابر  $70\text{cm}$  است. خطای مطلق و درصد خطای نسبی مقادیر گزارش شده توسط دانش آموزان را بدست آورید.  
حل:

$$\left. \begin{array}{l} 80\text{cm} = \text{طول واقعی جسم} \\ 85\text{cm} = \text{مقدار گزارش شده : دانش آموز 1} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{خطای مطلق} = 5\text{cm} \\ \text{درصد خطای نسبی} = 6.25\% \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} 70\text{cm} = \text{مقدار گزارش شده : دانش آموز 2} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{خطای مطلق} = -10\text{cm} \\ \text{درصد خطای نسبی} = 12.5\% \end{array}$$

\*\*\*\*\*

در بیشتر موارد امکان تعیین مقدار واقعی کمیت وجود ندارد و بایستی تنها با استفاده از مقدار اندازه گیری شده ی کمیت و دقت ابزار اندازه گیری در مورد مقدار واقعی کمیت صحبت کرد. در این راستا مقدار اندازه گیری شده کمیت به همراه دقت ابزار اندازه گیری به صورت عدم قطعیت (*Uncertainty*) به عنوان مقدار واقعی کمیت گزارش می شود. مقدار اندازه گیری شده کمیت به همراه عدم قطعیت آن بازه ای را بیان می کنند که مقدار واقعی کمیت را شامل می شود. معمولاً مقدار اندازه گیری شده و عدم قطعیت آن بصورت زیر نمایش داده می شوند:

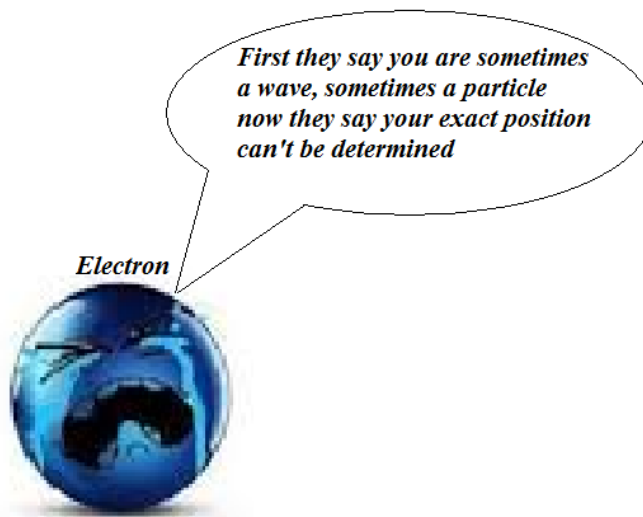
(عدم قطعیت) مقدار اندازه گیری شده یا عدم قطعیت  $\pm$  مقدار اندازه گیری شده و منظور از آن اینست که مقدار واقعی کمیت در بازه از (عدم قطعیت- مقدار اندازه گیری شده) تا (عدم قطعیت+ مقدار اندازه گیری شده) قرار دارد. اگر یک کمیت را با  $A$  نشان دهیم، عدم قطعیت در مقدار آن کمیت را معمولاً با  $\Delta A$  نمایش می دهیم. به عنوان مثال فرض کنید یک طول دلخواه را با خط کش معمولی که درجه بندی آن در حد میلی متر است اندازه گیری کنیم. چشم انسان قابلیت تشخیص این نکته که لبه جسم مورد اندازه گیری به کدامیک از درجات اندازه گیری نزدیک تر است را دارد و بر این مبنا دقت اندازه گیری برای خط کش با درجات در حد میلی متر به اندازه ی نیم میلی متر خواهد بود که این در کنار عدد اندازه گیری شده به عنوان طول واقعی کمیت ذکر می شود. در عمل بهتر است با توجه به خطا داشتن درجه بندی خط کش مربوطه عدم قطعیت به مقدار  $1$  میلیمتر گزارش شود. در نتیجه در صورتیکه با استفاده از این خط کش ما مقدار طولی را برابر  $42.8$  سانتیمتر بدست آوریم ( یا در واقع نزدیکترین درجه بندی برای طول برابر  $42.8$  سانتیمتر باشد)، بایستی مقدار طول را  $42.8 \pm 0.1\text{cm}$  گزارش کنیم و منظور از آن این خواهد بود که مقدار واقعی طول در بازه از  $42.7\text{cm}$  تا  $42.9\text{cm}$  قرار دارد.

## اصل عدم قطعیت هایزنبرگ

در سال 1927 ورنر هایزنبرگ بیان نمود که با افزایش دقت در تعیین موقعیت یک ذره، دقت در تعیین اندازه حرکت ( حاصلضرب جرم و سرعت) آن ذره کاهش خواهد یافت که از آن بعنوان اصل عدم قطعیت هایزنبرگ ( *Heisenberg Uncertainty Principle*) یاد می شود. بعداً در همان سال کنارد ( *Earle Hesse Kennard*) نشان داد که عدم قطعیت ها در تعیین موقعیت و اندازه حرکت ذره بایستی در نامساوی زیر که در سال 1928 توسط هرمان ویل ( *Hermann Weyl*) نیز بدست آمد، صدق کنند :

$$\Delta x \times \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} = \frac{\hbar}{2}$$

در رابطه بالا  $x$  و  $p$  بترتیب موقعیت و اندازه حرکت ذره،  $\Delta x$  و  $\Delta p$  بترتیب عدم قطعیت در تعیین موقعیت و اندازه حرکت ذره هستند. اندازه حرکت ( $p$ ) یا تکانه خطی یا مومنتوم خطی برابر حاصلضرب جرم ( $m$ ) و سرعت ( $V$ ) ذره است. نامساوی بالا در واقع بیان ریاضی اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است و نشان می دهد که در تعیین موقعیت و اندازه حرکت اجسام همواره خطا وجود دارد ( $\Delta x = 0$  و  $\Delta p = 0$  در نامساوی صدق نمی کنند) و امکان ندارد که بتوان موقعیت و اندازه حرکت اجسام را به طور همزمان کاملاً دقیق و بدون خطا تعیین کرد. همچنین با توجه به نامساوی کاهش عدم قطعیت در اندازه گیری یکی از این دو کمیت همراه با افزایش عدم قطعیت در تعیین کمیت دیگر خواهد بود. در بحث اصل عدم قطعیت هایزنبرگ عدم قطعیت ها ذاتی هستند و هیچ ربطی به ابزارهای اندازه گیری ندارند.



در صورتیکه جرم جسم ثابت باشد، داریم:

$$\Delta p = \Delta (mv) = m\Delta V \rightarrow \Delta x \times m\Delta V \geq \frac{h}{4\pi} \Rightarrow$$

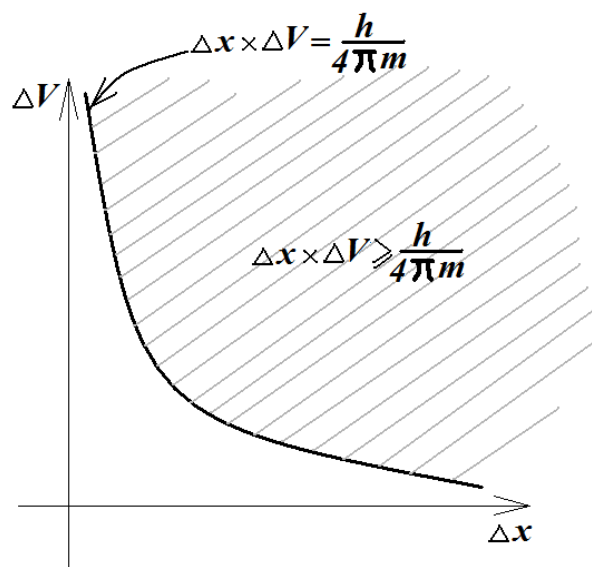
$$\Delta x \times \Delta V \geq \frac{h}{4\pi m}$$

بیان ریاضی اصل عدم قطعیت به شرط ثابت بودن جرم جسم

می توان عدم قطعیت های مجاز در تعیین موقعیت و سرعت را به صورت بخش هاشور خورده نمودار بعدی نیز نشان داد:

$$\underbrace{\Delta x}_x \times \underbrace{\Delta V}_y \geq \frac{h}{4\pi m}$$





دقت داشته باشید که  $\Delta x = 0$  و  $\Delta p = 0$  یا  $\Delta x$  و  $\Delta p$  همزمان خیلی نزدیک صفر در ناحیه مجاز قرار ندارند.



ورنر هایزنبرگ (Werner Karl Heisenberg (5 December 1901 – 1 February 1976))

مثال : فرض کنید عدم قطعیت در تعیین موقعیت  $0.1$  نانومتر باشد. عدم قطعیت در سرعت را برای موارد زیر بدست آورید:

الف) یک توپ صد گرمی

ب) یک الکترون

حل:

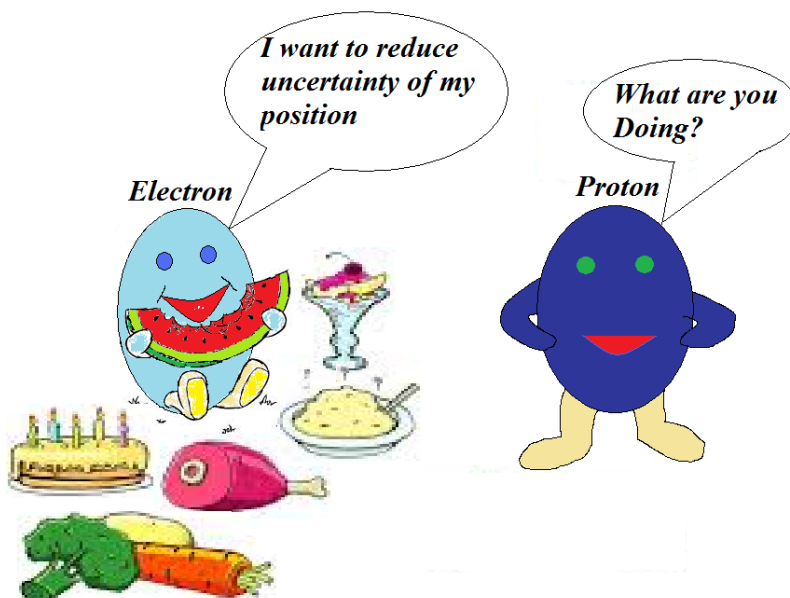
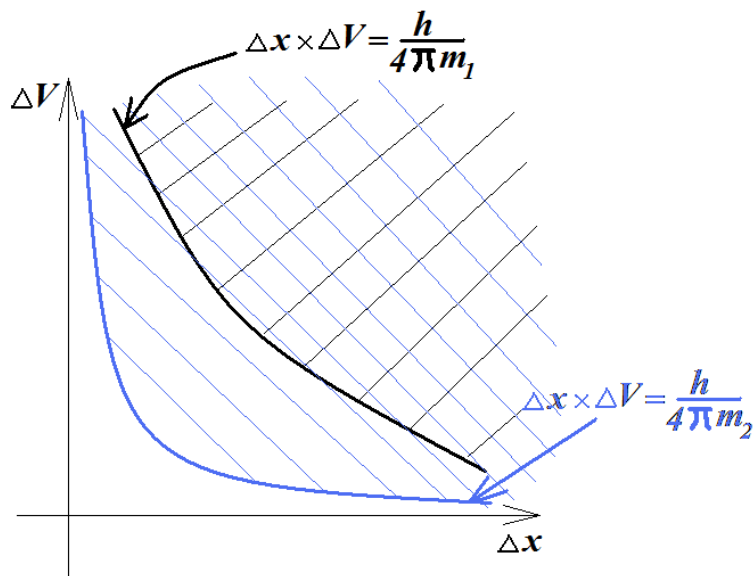
$$\text{الف) } \Delta x \times \Delta V \geq \frac{h}{4\pi m} \Rightarrow 10^{-10} \times \Delta V \geq \frac{6.63 \times 10^{-34}}{1.256} \Rightarrow \Delta V \geq 5.2 \times 10^{-24}$$

$$\text{ب) } \Delta x \times \Delta V \geq \frac{h}{4\pi m} \Rightarrow 10^{-10} \times \Delta V \geq \frac{6.63 \times 10^{-34}}{1.14 \times 10^{-29}} \Rightarrow \Delta V \geq 5.8 \times 10^5 \text{ m/s}$$

\*\*\*\*\*

در مثال قبل عدم قطعیت در تعیین سرعت الکترون به مراتب بزرگتر از عدم قطعیت در تعیین سرعت توپ است که این مطلب از ناچیز بودن جرم الکترون ناشی می شود. بطور کلی با توجه به اینکه در نامساوی  $\Delta x \times \Delta V \geq \frac{h}{4\pi m}$  جرم در مخرج کسر مشخص کننده حداقل حاصلضرب عدم قطعیت ها قرار دارد، با افزایش جرم حداقل حاصلضرب عدم قطعیت ها و در نتیجه خود

عدم قطعیت ها می توانند کاهش بیابند. شکل بعدی نیز این مطلب را نشان می دهد. در شکل بعدی محدوده مجاز عدم قطعیت ها برای ذره با جرم  $m_2$  در مقایسه با ذره با جرم  $m_1$  که  $m_2 > m_1$  است، به مبدا مختصات نزدیکتر است و بنابراین ذره سنگین تر می تواند عدم قطعیت های کمتری تجربه کند.



بطور کلی نتیجه گیری زیر را بر اساس رابطه قبلی می توان ارائه داد:

- \* اشیای معمولی ← جرم قابل توجه ← عدم قطعیت خیلی کم ← تعیین نسبتاً دقیق همزمان موقعیت و سرعت امکان پذیر است.
- \* اشیای ریز اتمی ← جرم ناچیز ← عدم قطعیت قابل توجه ← تعیین نسبتاً دقیق همزمان موقعیت و سرعت امکان پذیر نیست.

بنابراین می توان از در نظر گرفتن اصل عدم قطعیت هایزنبرگ برای اشیاء معمولی صرف نظر کرد. در همین راستا اصل عدم قطعیت هایزنبرگ گاهی اوقات بدین صورت بیان می شود که برای اشیایی به کوچکی الکترون تعیین دقیق و همزمان موقعیت و سرعت امکان پذیر نیست.

لازم بذکر است که در فیزیک کوانتومی اصل عدم قطعیت (*Uncertainty Principle*) گسترده تر از اصل عدم قطعیت هایزنبرگ است و آن را هم شامل می شود. در فیزیک کوانتومی اصل عدم قطعیت هر کدام از انواع نامساویهای ریاضی است که یک محدودیت ذاتی در تعیین دقیق همزمان دو کمیت مکمل (*Complementary Variables*) مثل موقعیت و اندازه در نظر می گیرد. بعنوان مثالی دیگر برای اصل عدم قطعیت، می توان نامساوی زیر را برای اصل عدم قطعیت کمیت های انرژی و زمان در نظر گرفت:

$$\Delta E \times \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$$

یکی از تعبیرهای امکان پذیر برای این رابطه این است که هر نقطه از فضا می تواند انرژی به مقدار  $\Delta E$  را قرض بگیرد به شرطی که آن را در مدت زمان  $\Delta t$  پس بدهد. در اینصورت هر نقطه از فضا می تواند برای مدت کوتاهی انرژی زیادی قرض بگیرد، آن را به دو ذره و ضد ذره تبدیل کند و پس از مدت کوتاهی با برخورد ذره و ضد ذره با هم و تبدیل آنها به انرژی، انرژی قرض گرفته را برگرداند. در اینصورت هر نقطه از فضا می تواند برای لحظاتی شامل ماده و انرژی باشد و یکی از نتایج آن این خواهد بود که نمی توانیم خلاء مطلق داشته باشیم.

مدل اتمی بور که موقعیت و سرعت الکترون در هر لایه را به طور دقیق و همزمان به دست می دهد با اصل عدم قطعیت هایزنبرگ در تناقض است و بنابراین نیازمند مدلی هستیم که این مشکل را نداشته باشد. مدل اوربیتالی شرودینگر برای اتم با خصلت موجی الکترون و اصل عدم قطعیت هایزنبرگ سازگار است و در ادامه به آن می پردازیم.

## مدل اوربیتالی اتم

شرویدینگر با در نظر گرفتن خصلت موجی برای الکترون معادله ی شرویدینگر را برای توصیف و توجیه رفتار الکترون ها در اتم پیشنهاد کرد. در واقع الکترونها در اتمها و مولکولها بصورت امواج ایستا هستند که ویژگیهای این امواج ایستا از حل معادله شرویدینگر برای اتم یا مولکول مربوطه می تواند بدست آید. از حل معادله ی شرویدینگر برای هر سیستم یا اتم دلخواه یک سری توابع موجی ( که آنها را معمولا با  $\Psi$  یا  $\psi$  (  $psi$  یا پسی یا سای) نشان می دهیم) بدست می آیند. توابع موجی با گرفتن موقعیت مکانی یک نقطه دلخواه در فضا و زمان بعنوان ورودی، دامنه موج نسبت داده شده به الکترون را در آن نقطه از فضا و آن لحظه از زمان بعنوان خروجی نتیجه میدهند. شاید مفهوم فیزیکی خود تابع موجی چندان ملموس نباشد، اما برای مجذور آن یعنی  $\Psi^2$  اینگونه نیست. مجذور تابع موجی یعنی  $\Psi^2$  بیانگر احتمال حضور الکترون است، به طوریکه با دادن مختصات الکترون مثل فاصله و جهت آن نسبت به هسته به عنوان ورودی به تابع  $\Psi^2$  این تابع احتمال حضور الکترون در آن مختصات را به عنوان خروجی به دست می دهد. بدین مطلب می توان بدین صورت نگاه کرد که در اینجا الکترون موج فرض می شود و مثل یک موج حالت پخش شدگی دارد ( در یک نقطه متمرکز نیست). از آنجائیکه برای امواج انرژی موج متناسب با مجذور دامنه است، نقاطی از فضا که در آنها مجذور دامنه بزرگتر است، قسمت بیشتری از انرژی موج یا در واقع خود موج را شامل می شوند. بنابراین مجذور تابع موجی در یک نقطه معیاری از مقدار حضور الکترون در آن نقطه یا احتمال حضور الکترون در آن مختصات است. برای کمک به درک بهتر به تشابه در ادامه آمده توجه کنید. فرض کنید مقداری آب مایع درون یک لیوان داشته باشیم و با دادن انرژی آن را به صورت بخار یا یک ابر در آوریم. ابر حاصل شکل های متفاوتی می تواند داشته باشد و هر نقطه از ابر می تواند غلظت متفاوتی از بخار آب داشته باشد. در ابتدا (آب مایع درون لیوان) آب را به صورت متمرکز داریم، در حالیکه بعد از تبخیر آن را به صورت پخش که پخش شدگی شکل های متفاوتی می تواند داشته باشد، داریم. مشابه الکترون در اتم نیز می تواند بصورت یک ابر ( یک ابر الکترونی) در نظر گرفته شود که آن ابر شکل های متفاوتی می تواند داشته باشد و هر نقطه از ابر می تواند غلظت متفاوتی داشته باشد. شکل این ابر الکترونی و غلظت الکترون در هر نقطه از آن از روی تابع موجی مربوطه که از حل معادله شرویدینگر نتیجه می شود، بدست می آید.

بطور کاربردی، هر تابع موجی یا هر سای معادل یک نحوه ی خاص اشغال اطراف هسته توسط الکترون است و به همین علت متناظر با یک سطح انرژی خاص و مشخص برای الکترونی ست که ادعا می شود رفتار آن با آن تابع موجی توصیف می شود. هر تابع موجی یک اوربیتال نامیده می شود. به عبارتی اوربیتال توصیف کننده رفتار موجی الکترون است و متناظر با یک نحوه ی خاص اشغال اطراف هسته توسط الکترون و یک سطح انرژی خاص برای الکترونی ست که ادعا می شود در آن اوربیتال قرار دارد. کمیت های فیزیکی مورد علاقه از قبیل احتمال حضور الکترون در هر نقطه، مختصات نقاط با احتمال حضور الکترون بالاتر، فاصله میانگین الکترون از هسته، سطح انرژی الکترون و ... برای هر الکترون با در دست داشتن تابع موجی الکترون مربوطه بدست می آیند و برای هر تابع موجی چنین کمیت هایی مقادیر بخصوص خودشان را خواهند داشت.

با وجود داشتن خصلت موجی در این مدل، برخی خصوصیات ذره مانند نیز همچنان پا بر جا هستند. مثلا مجموع ابرهای الکترونی معادل تعداد صحیحی از الکترون ها هستند یا در واقع هر ابر الکترونی می تواند فقط معادل یک الکترون و نه مثلا یک و نیم الکترون باشد. بار منفی هر ابر الکترونی نیز همان بار منفی یک الکترون و نه کمتر و نه بیشتر خواهد بود. الکترون می تواند

از حالت مربوط به یک ابر الکترونی یا اوربیتال به حالت یک ابر الکترونی یا اوربیتال دیگر تغییر حالت دهد و این انتقالات الکترونی ذره مانند خواهند بود، مثلا با جذب یا نشر یک فوتون انتقال یک الکترون را خواهیم داشت.



اروین شرودینگر (12 August 1887- 4 January 1961)

بعنوان مثال یکی از جواب های معادله شرودینگر برای اتم  $H$ ،  $\Psi_{1s}$  یا اوربیتال  $1s$  است که کمترین سطح انرژی را مابین مابقی اوربیتال ها دارد. بطور معادل میتوان گفت که الکترون اتم  $H$  در حالت پایه از  $\Psi_{1s}$  تبعیت می کند یا به عبارتی در اوربیتال  $1s$  قرار دارد یا  $\Psi_{1s}$  توصیف کننده رفتار الکترون اتم  $H$  در حالت پایه است. در ادامه با این اوربیتال و خواصش بعنوان نمونه بیشتر آشنا می شویم.

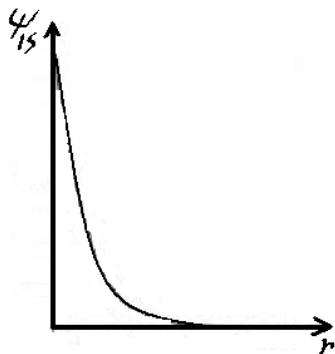
از حل معادله شرودینگر  $\Psi_{1s}$  برای اتم هیدروژن تابعی به شکل زیر بدست می آید:

$$\psi_{1s} = 2 \left( \frac{1}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{a_0} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{r}{a_0}}$$

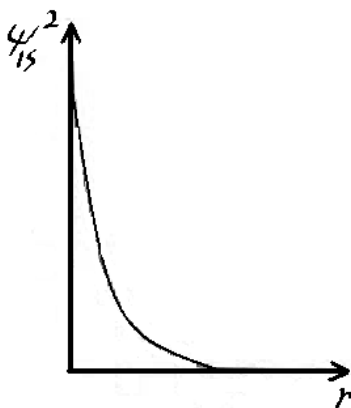
در رابطه بالا  $a_0$  شعاع بور است. همانطور که دیده می شود،  $\Psi_{1s}$  تابعی از  $r$  (فاصله الکترون از هسته) است. در حالت کلی علاوه بر فاصله جهت (زوایا) نیز معمولا مهم هستند و  $\Psi$  مختصات نقاط فضا شامل فاصله و جهت را بعنوان ورودی می گیرد. خروجی  $\Psi$  دامنه موج الکترون در آن نقطه از فضا است. خروجی  $\Psi^2$  احتمال حضور الکترون در آن نقطه از فضا است و واحد آن در سیستم  $SI$  الکترون بر متر مکعب خواهد بود. همانگونه که مولاریته بایستی در حجم ضرب شود تا مقدار مول ماده در آن حجم را نتیجه دهد،  $\Psi^2$  نیز بایستی در حجم ضرب شود تا مقدار الکترون یا احتمال حضور الکترون در آن حجم را نتیجه دهد. بعنوان مثال بر اساس رابطه بالا احتمال حضور الکترون در واحد حجم برای یک نقطه با فاصله  $r = a_0 = 0.53\text{\AA}$  از هسته برابر  $2.9 \times 10^{29}$  الکترون بر مترمکعب است و بنابراین احتمال حضور الکترون در یک حجم به مقدار  $3.53 \times 10^{-32}$  متر مکعب در اطراف این نقطه برابر  $0.01$  خواهد بود، یعنی  $0.01$  الکترون اوربیتال  $1s$  در حجم به مقدار  $3.53 \times 10^{-32}$  متر مکعب در اطراف یک نقطه به فاصله  $r = a_0 = 0.53\text{\AA}$  از هسته است. دقت داشته باشید که در اینجا فرم ریاضی تابع یا مقادیر یاد شده مهم نیستند (نیازی به حفظ آنها نیست)، بلکه تاکید بر روی استفاده های ممکن از فرم ریاضی تابع موجی است.

بجای بیان فرم ریاضی تابع موجی، می توانیم آن را در یک نمودار نمایش دهیم تا تغییرات آن یا همان تغییرات دامنه موج نسبت داده شده به الکترون با تغییر موقعیت نسبت به هسته را راحت تر ببینیم. مثلا نمودار زیر  $\Psi_{1s}$  را بر حسب  $r$  (فاصله الکترون از

هسته) نشان می دهد و از روی آن مثلا می توان فهمید که برای الکترون واقع در اوربیتال  $1s$  با افزایش فاصله الکترون از هسته دامنه موج نسبت داده شده به الکترون کاهش می یابد.

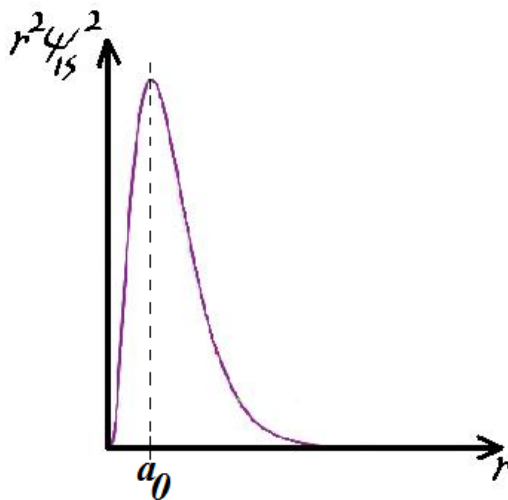


می توانیم در یک نمودار مجذور تابع موجی یا  $\Psi^2$  را بر حسب موقعیت نمایش دهیم تا تغییرات آن یا همان تغییرات احتمال حضور الکترون در واحد حجم با تغییر موقعیت نسبت به هسته را راحت تر ببینیم. از آنجائیکه معمولا برای ما نحوه تغییرات احتمال حضور الکترون با تغییر موقعیت نسبت به هسته مهمتر است، ما معمولا نمودار  $\Psi^2$  را بجای نمودار خود تابع موجی در نظر می گیریم. مثلا نمودار زیر  $\Psi_{1s}^2$  را بر حسب  $r$  (فاصله الکترون از هسته) نشان می دهد و از روی آن مثلا می توان فهمید که برای الکترون واقع در اوربیتال  $1s$  با افزایش فاصله الکترون از هسته احتمال حضور الکترون در واحد حجم کاهش می یابد یا معادلا در یک نقطه نزدیکتر به هسته در مقایسه با یک نقطه دورتر از هسته احتمال حضور الکترون بیشتر است.



$\Psi^2$  احتمال حضور الکترون در واحد حجم است و هنوز بایستی در حجم ضرب شود تا خود احتمال حضور الکترون را نتیجه دهد. بنابراین اندازه حجم نیز در تعیین بزرگی احتمال حضور الکترون موثر است، در حالیکه  $\Psi^2$  فاکتور اندازه حجم در تعیین مقدار احتمال حضور الکترون را در نظر نمی گیرد. بعبارت دیگر یک منطقه از فضا ممکن است  $\Psi^2$  نسبتا کوچکی داشته باشد، اما بعلاوه حجم بزرگتر و تاثیر بیشتر آن احتمال حضور الکترون بالایی در کل آن منطقه وجود داشته باشد. با افزایش فاصله نسبت به هسته، فضای امکان پذیر برای الکترون افزایش می یابد و برای بررسی احتمال حضور الکترون در یک فاصله بخصوص از هسته علاوه بر احتمال حضور الکترون در هر نقطه از آن فاصله، بایستی تعداد نقاط در آن فاصله نیز در نظر گرفته شود. نقاط با یک فاصله مشخص از هسته در واقع نقاط روی یک پوسته کروی یا سطح یک کره با مرکزیت هسته و با شعاع برابر همان فاصله نقاط از هسته هستند که بزرگی مساحت سطح کره یعنی  $4\pi r^2$  بیانگر بزرگی تعداد نقاط روی پوسته کروی خواهد بود. بنابراین بزرگی

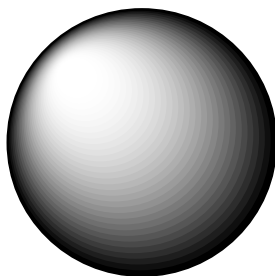
$r^2\Psi^2$  بیانگر بزرگی احتمال حضور الکترون بر روی پوسته های کروی خواهد بود و نمودار آن بر حسب  $r$  (فاصله الکترون از هسته) نحوه تغییراتش بر حسب فاصله نسبت به هسته را نمایش خواهد داد. این نمودار برای تعیین موقعیت نواحی غلیظ یا پر الکترون ابر الکترونی بعلت دخالت دادن اثر بزرگی حجم بهتر از نمودار مجذور تابع موجی است. مثلا نمودار زیر  $r^2\Psi_{1s}^2$  را بر حسب  $r$  (فاصله الکترون از هسته) نشان می دهد و از روی آن مثلا می توان فهمید که برای الکترون واقع در اوربیتال  $1s$  با شروع از هسته و افزایش فاصله نسبت به هسته، احتمال حضور الکترون بر روی پوسته های کروی در ابتدا افزایش می یابد و بعد از رسیدن به یک ماکزیمم در  $r = a_0 = 0.53\text{\AA}$  شروع به کاهش می کند یا معادلا در پوسته های کروی با شعاع نزدیک  $a_0$  احتمال حضور الکترون بیشتر است. بنابراین بیشتر ابر الکترونی اوربیتال  $1s$  اتم هیدروژن در فضای نزدیک فاصله  $r = a_0$  از هسته قرار دارد. دقت داشته باشید که در اینجا برای اوربیتال  $1s$  با وجود آنکه نقاط خیلی نزدیک هسته  $\Psi^2$  بزرگی دارند، اما بعلت کوچک بودن تعداد آنها یا کوچک بودن پوسته های کروی حاوی آنها احتمال حضور الکترون در فضای خیلی نزدیک هسته کم است. از طرفی تعداد نقاط خیلی دور از هسته و بزرگی پوسته های کروی حاوی آنها زیاد است، اما بعلت  $\Psi^2$  خیلی کم همچنان احتمال حضور الکترون در فضای خیلی دور از هسته کم است. تنها در یک سری فواصل بخصوص (در اینجا فواصل نزدیک  $r = a_0$ ) یا در واقع در فواصل نه خیلی دور و نه خیلی نزدیک از هسته است که هم تعداد نقاط و هم احتمال حضور الکترون در هر نقطه اندازه مناسبی دارند و قسمت بیشتر ابر الکترونی در آن فواصل قرار می گیرد.



در اینجا مقایسه مدل اتمی بور و مدل اوربیتال اتمی برای الکترون اتم هیدروژن در حالت پایه می تواند تفاوت این دو مدل را نمایش دهد. دقت داشته باشید که در مدل اتمی بور مکان الکترون در هر لایه بطور دقیق معلوم بود، در حالیکه در مدل اوربیتال اتمی اینگونه نیست. در مدل اتمی بور الکترون اتم هیدروژن در حالت پایه تنها در فاصله  $r = a_0$  از هسته قرار دارد، در حالیکه در مدل اوربیتال اتمی این الکترون همه جا می تواند شانس حضور داشته باشد، اما در فواصل نزدیک  $r = a_0$  شانس حضور خیلی بیشتری دارد.

در نهایت ممکن است علاقه مند باشیم خود را درگیر توابع ریاضی پیچیده و نمودارهای مربوطه نکنیم و به یک نمایش ساده اکتفا کنیم. در اینصورت نمودارهای سطح مرزی می توانند بکار آیند. در نمودار سطح مرزی هر اوربیتال بهینه ترین سطحی که درون و روی آن سطح مجموعا مقدار بالایی (مثلا 90%) از احتمال حضور الکترون را شامل می شود، نمایش داده می شود.

بعبارت دیگر در نمودار سطح مرزی اوربیتال فضایی که بیشتر (مثلا 90%) ابر الکترونی را شامل می شود، نمایش داده می شود. بعنوان مثال برای اوربیتال  $1s$  اتم هیدروژن نمودار سطح مرزی به صورت یک کره با شعاع در حدود  $3a_0$  است که نواحی غلیظ ابر الکترونی در فواصل نزدیک  $r = a_0$  را شامل می شود و به احتمال 90% ما الکترون اوربیتال  $1s$  اتم هیدروژن را در درون این کره خواهیم یافت. نمودار سطح مرزی هر اوربیتال بعنوان شکل ابر الکترونی هر اوربیتال یا بطور خلاصه شکل هر اوربیتال نیز در نظر گرفته می شود.



$1s$

نمودار سطح مرزی اوربیتال  $1s$

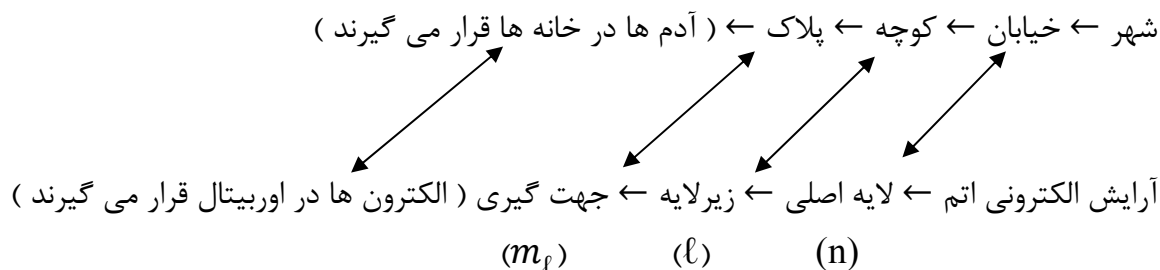
معادله شرودینگر برای اتم هیدروژن یا بطور کلی تر سیستم های تک الکترونی حل شده است و توابع موجی مربوطه بطور دقیق بدست آمده اند، بنابراین اوربیتالهای سیستم های تک الکترونی و کلیه ویژگیهایشان کاملا بطور دقیق معلوم هستند. متأسفانه حل معادله شرودینگر برای سیستم های چند الکترونی بر خلاف سیستم های تک الکترونی براحتی مقدور نیست و برای اغلب سیستم های چند الکترونی حل دقیق معادله شرودینگر با توجه به روشهای ریاضی موجود و توان محاسباتی کامپیوترها مقدور نیست. از این رو تعیین دقیق اوربیتالهای سیستم های چند الکترونی و ویژگیهایشان بطور نظری امکان پذیر نیست. خوشبختانه مشاهدات تجربی دال بر اینست که اوربیتالهای سیستم های چند الکترونی کمابیش مشابه اوربیتالهای بدست آمده برای سیستم های تک الکترونی هستند و از این رو اوربیتالهای سیستم های تک الکترونی مثل اتم هیدروژن برای مابقی اتمها نیز می توانند بکار گرفته شوند. بهر حال بایستی در نظر داشت که در سیستم های چند الکترونی، حضور الکترونها دیگر تابع موجی بدست آمده برای هر الکترون یا همان ابر الکترونی هر الکترون را تحت تاثیر قرار می دهند و ممکن است در برخی موارد (مثل اتمهای با عدد اتمی بالا) این تاثیرات بحدی زیاد باشند که اوربیتالهای سیستم های چند الکترونی تفاوتی قابل توجه و غیر قابل صرف نظر کردنی با اوربیتالهای سیستم های تک الکترونی داشته باشند.



## اعداد و قیدهای کوانتومی

برای دسته بندی و نام گذاری اوربیتال ها یا توابع موجی به دست آمده از حل معادله شرودینگر از اعداد کوانتومی استفاده می کنیم. در اتم هر اوربیتال با سه عدد کوانتومی: عدد کوانتومی اصلی ( $n$ )، عدد کوانتومی فرعی ( $\ell$ ) و عدد کوانتومی مغناطیسی اوربیتال ( $m_\ell$ ) مشخص می شود.

می توان گفت که ساختار الکترونی اتم متشکل از لایه ها، لایه ها متشکل از زیر لایه ها و زیر لایه ها متشکل از اوربیتال ها با جهت گیری های مختلف در نظر گرفته می شود. لایه ها با شماره لایه ها یا همان عدد کوانتومی اصلی ( $n$ ) به صورت  $n=1,2,3,\dots$  مشخص می شوند. زیر لایه ها با عدد کوانتومی فرعی به صورت  $l=0,1,2,\dots$  یا  $s,p,d,f,g,\dots$  مشخص می شوند (در بخش انواع زیر لایه ها با زیر لایه ها بیشتر آشنا می شویم). در هر زیر لایه اوربیتال های با جهت گیری های مختلف با عدد کوانتومی مغناطیسی اوربیتال به صورت اعداد  $m_\ell=0,\pm 1,\pm 2,\dots$  یا حروف  $x,y,z,xy,xz,yz,x^2-y^2,\dots$  مشخص می شوند. می توان قرارگیری الکترون ها در اوربیتال های یک اتم را مشابه قرارگیری آدمها در خانه های یک شهر فرض کرد و تشابه هایی به صورت زیر را در نظر گرفت:



به خاطر داشته باشید که در تشابه بالا تفاوت هایی نیز وجود دارد. من جمله اینکه خانه ها فضاهای ساخته شده از ماده هستند، در حالیکه اوربیتال های مختلف متناظر با رفتارهای متفاوت الکترونها هستند. اعداد کوانتومی مقید به تبعیت از قیدهایی هستند که در ادامه با آنها آشنا می شویم. برای لایه اصلی  $n$ ،  $\ell$  می تواند از صفر تا  $n-1$  تغییر کند:

$$\ell = 0, 1, 2, \dots, (n-1)$$

بنابراین هر لایه اصلی  $n$  تا زیر لایه دارد.

برای هر زیر لایه  $\ell$ ،  $m_\ell$  می تواند از  $-\ell$  تا  $+\ell$  تغییر کند:

$$m_\ell = -\ell, -(\ell-1), \dots, -1, 0, +1, \dots, +\ell$$

بنابراین هر زیر لایه  $\ell$ ،  $2\ell+1$  مقدار برای  $m_\ell$  یا  $2\ell+1$  اوربیتال با جهت گیری های مختلف دارد.

بر اساس مطالب قبلی می توان نتیجه گیری نمود که لایه اصلی  $n$  اوربیتال دارد. اثبات زیر را در نظر بگیرید.

$$(n-1) \text{ و } (n-2) \text{ و } \dots \text{ و } 2 \text{ و } 1 \text{ و } 0 = \ell \rightarrow \text{لایه اصلی } n: \text{ اثبات}$$

$$\rightarrow \text{تعداد اوربیتال ها} \quad 1 + 3 + 5 + \dots + (2n-3) + (2n-1) = n^2$$

مثال: لایه اصلی سوم ( $n=3$ ) را در نظر بگیرید:

الف) چند زیر لایه دارد؟ مقادیر  $l$  زیر لایه ها کدامند؟

ب) برای هر زیر لایه از زیر لایه های آن مقادیر  $m_l$  امکان پذیر کدامند؟ هر زیر لایه از زیر لایه های آن چند اوربیتال دارد؟

ج) لایه اصلی سوم در کل چند اوربیتال دارد؟

حل:

الف) 3 زیر لایه:  $l=0$ ،  $l=1$  و  $l=2$

ب) برای زیر لایه با  $l=0$ ،  $m_l$  می تواند 0، برای زیر لایه با  $l=1$ ،  $m_l$  می تواند  $0, 1, -1$  و برای زیر لایه با  $l=2$ ،  $m_l$  می تواند  $0, 1, -1, 2, -2$  باشد. تعداد مقادیر مختلف  $m_l$  هر زیر لایه بیانگر تعداد اوربیتالهای آن زیر لایه است، پس زیر لایه با  $l=0$  یک اوربیتال، زیر لایه با  $l=2$  سه اوربیتال و زیر لایه با  $l=2$  پنج اوربیتال دارد.

ج) تعداد اوربیتالهای لایه اصلی سوم از مجموع تعداد اوربیتالهای زیر لایه های آن برابر 9 بدست می آید (می توانستیم از فرمول  $n^2$  که  $n$  اینجا برابر سه است، نیز استفاده کنیم).

\*\*\*\*\*

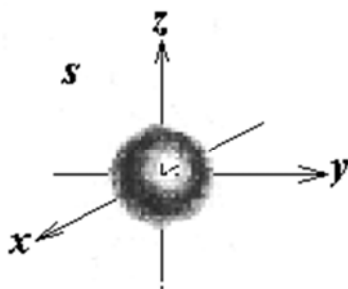
در ادامه با انواع زیر لایه ها و انواع اوربیتالها بیشتر آشنا می شویم.

### انواع زیر لایه ها و اوربیتالها

چهار زیر لایه اول که اشغال آنها متداولتر نیز است، به صورت در ادامه آمده هستند. دقت داشته باشید که در تمام شکل های بعدی هسته در مبدا مختصات قرار دارد.

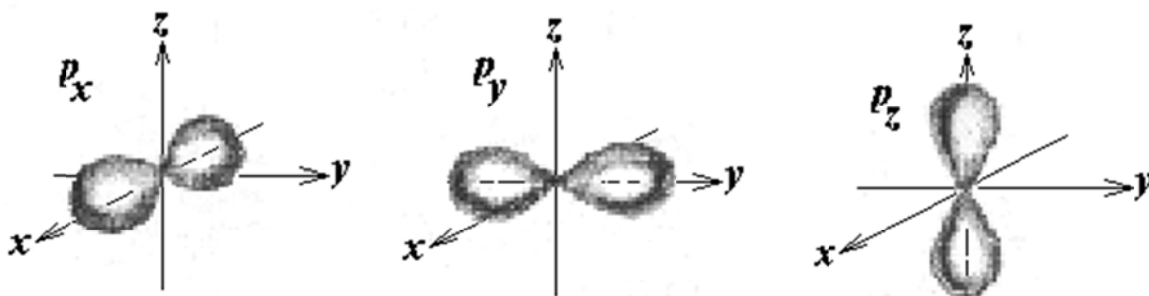
1) زیر لایه  $s$  یا  $l = 0$ :

متشکل از یک اوربیتال کروی شکل یا تک لپی است که با  $s$  یا  $m_l = 0$  مشخص می شود. شکل زیر را در نظر بگیرید.



2) زیر لایه  $p$  یا  $l = 1$ :

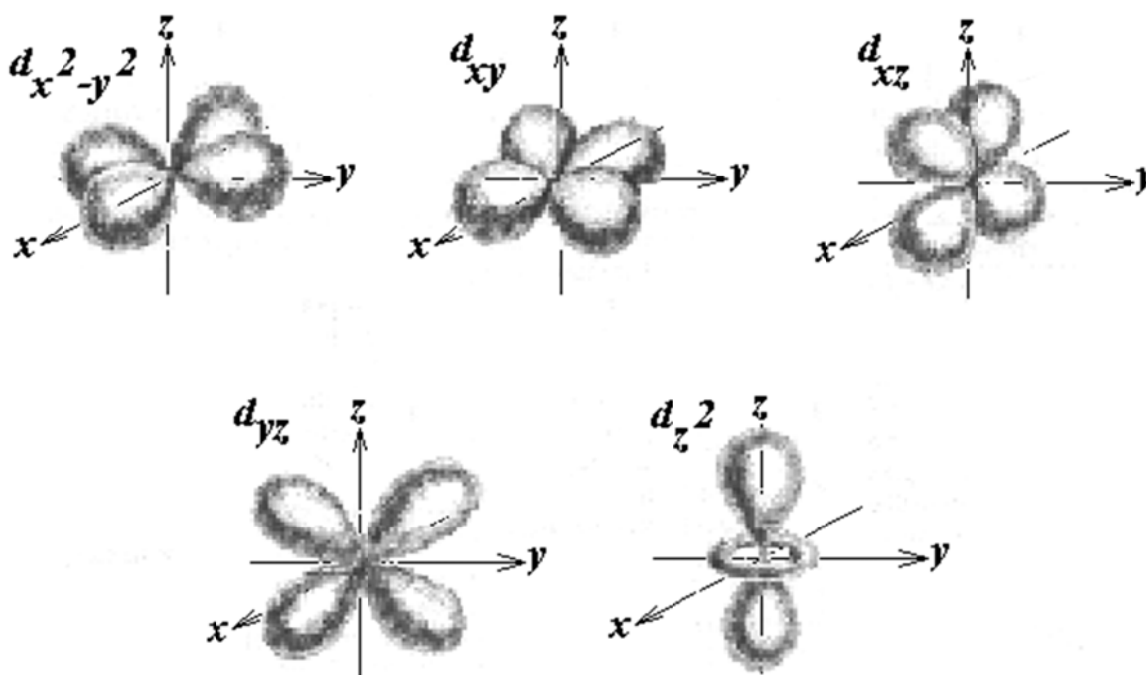
متشکل از 3 اوربیتال دمبلی شکل یا دو لپی است که هر 3 اوربیتال دو به دو برهم عمود هستند و با  $p_x, p_y, p_z$  یا  $m_l = -1, 0, +1$  مشخص می شوند. شکل بعدی را در نظر بگیرید.



همانطور که در شکل هم قابل مشاهده است، اوربیتال  $p_x$  بر روی محور  $x$ ، اوربیتال  $p_y$  بر روی محور  $y$  و اوربیتال  $p_z$  بر روی محور  $z$  قرار دارد.

(3) زیر لایه  $d$  یا  $\ell = 2$ :

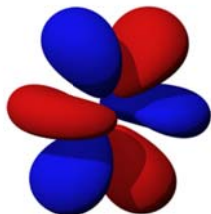
مشکل از 5 اوربیتال  $d$  است که عموماً 4 لپی هستند. 5 اوربیتال  $d$  شامل  $d_{x^2-y^2}$ ،  $d_{xy}$ ،  $d_{xz}$ ،  $d_{yz}$  و  $d_{z^2}$  هستند. شکل بعدی این اوربیتالها را نمایش می دهد.



همانطور که در شکل هم قابل مشاهده است، اوربیتال  $d_{x^2-y^2}$  به صورت یک چهارلپی بر روی محورهای  $x$  و  $y$ ، اوربیتال  $d_{xy}$  به صورت یک چهارلپی بر روی نیمسازهای صفحه  $xz$ ، اوربیتال  $d_{xz}$  به صورت یک چهارلپی بر روی نیمسازهای صفحه  $xy$ ، اوربیتال  $d_{yz}$  به صورت یک چهارلپی بر روی نیمسازهای صفحه  $yz$  و اوربیتال  $d_{z^2}$  به صورت یک دولپی بر روی محور  $z$  بعلاوه یک حلقه در صفحه  $xy$  است.

(4) زیر لایه  $f$  یا  $\ell = 3$ : مشکل از 7 اوربیتال  $f$  است. شکل بعدی را در نظر بگیرید. دقت داشته باشید که نیازی به بخاطر سپردن شکل اوربیتالهای  $f$  نیست.

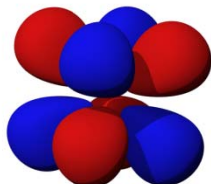
$$f_{xz^2}$$



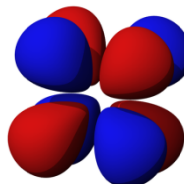
$$f_{yz^2}$$



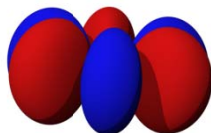
$$f_{xyz}$$



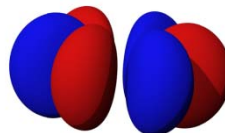
$$f_{z(x^2-y^2)}$$



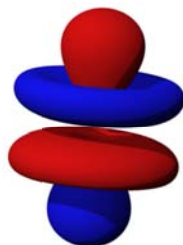
$$f_{x(x^2-3y^2)}$$



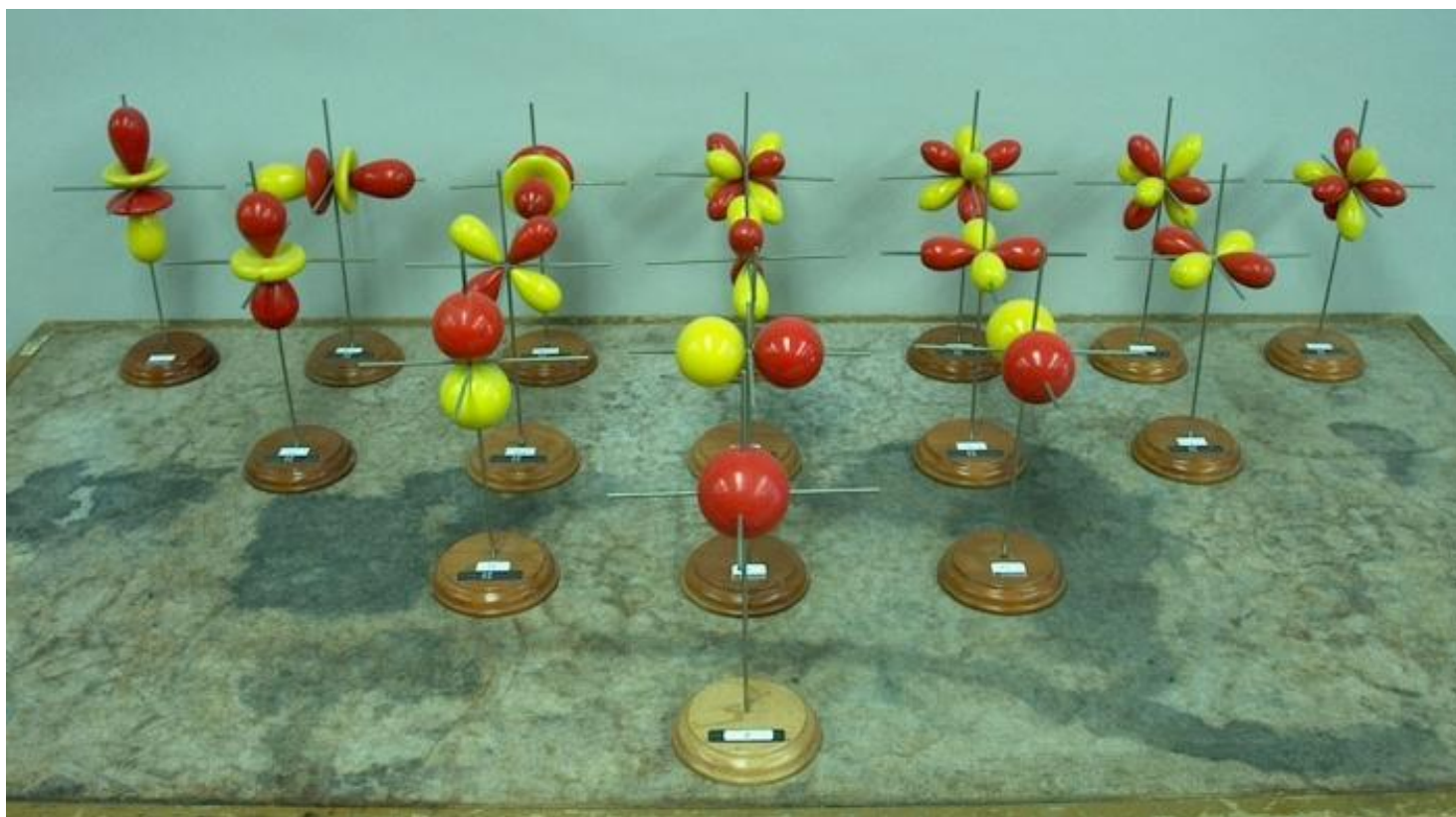
$$f_{y(3x^2-y^2)}$$



$$f_{z^3}$$



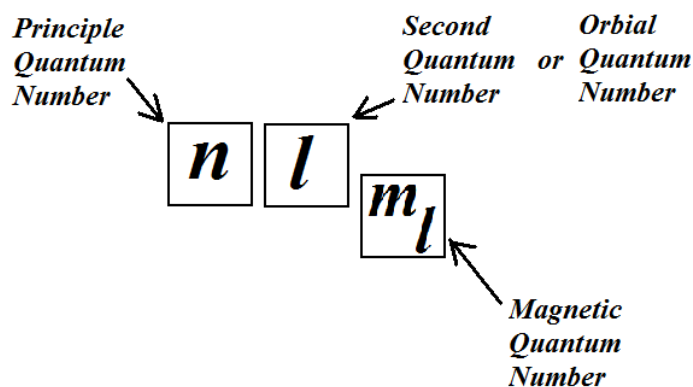
شکل بعدی مدل سه بعدی اوربیتالهای  $d, p, s$  و  $f$  را نشان می دهد.



زیرلایه های بعدی به صورت زیرلایه  $g$  با  $9$  اوربیتال  $g$ ، زیرلایه  $h$  با  $11$  اوربیتال  $h$  و ... خواهد بود که در حالت پایه اتمها پر نمی شوند و تنها در حالت های برانگیخته مشاهده می شوند. از این رو متداول نیستند و چندان بحث و بررسی نمی شوند. زیر لایه ها بصورت  $nl$  مشخص می شوند. بر اساس قیدهای کوانتومی زیرلایه های هفت لایه اصلی اول به صورت زیر خواهند بود:

$n=1$	$1s$							
$n=2$	$2s$	$2p$						
$n=3$	$3s$	$3p$	$3d$					
$n=4$	$4s$	$4p$	$4d$	$4f$				
$n=5$	$5s$	$5p$	$5d$	$5f$	$5g$			
$n=6$	$6s$	$6p$	$6d$	$6f$	$6g$	$6h$		
$n=7$	$7s$	$7p$	$7d$	$7f$	$7g$	$7h$	$7i$	

حال که با انواع زیر لایه های متداول آشنا شدیم، می توانیم در مورد انواع اوربیتالها بحث کنیم. هر اوربیتال با سه عدد کوانتومی  $n$ ،  $l$ ،  $m_l$  به صورت زیر مشخص می شود:

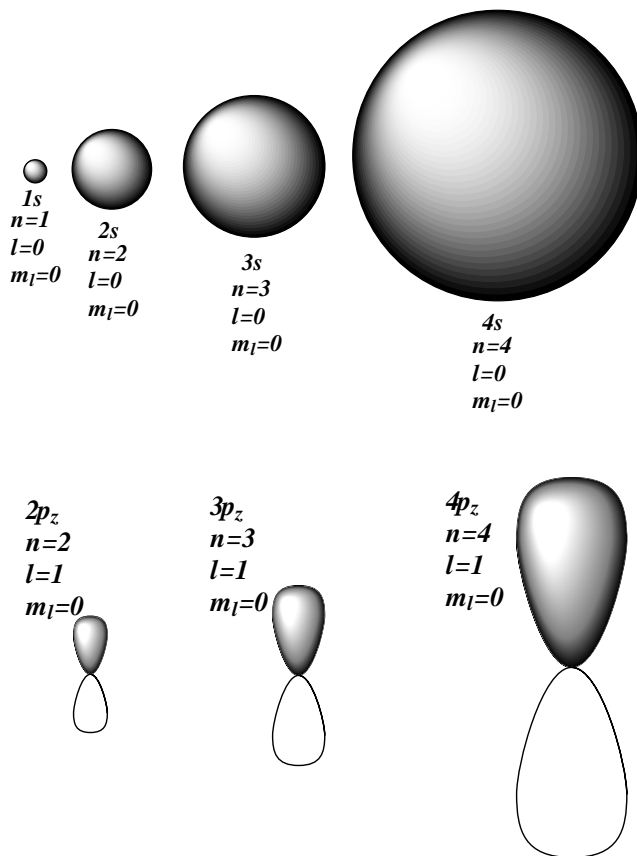


در نمایش بالا برای اوربیتالهای  $s$  که فقط یک  $m_l$  مشخص دارند، معمولا  $m_l$  نوشته نمی شود. برای نمایش زیر لایه ای که اوربیتال بدان تعلق دارد، همانطور که قبلا نیز گفتیم، از همان نمایش بالا بدون آوردن  $m_l$  استفاده می کنیم. بعنوان مثال می توان اوربیتالهای  $1s, 2p_z, 3d_{z^2}, 4d_{xy}, 5f_{xyz}, 7p_x$  و ... را که متعلق به زیر لایه های  $1s, 2p, 3d, 4d, 5f, 7p$  و ... هستند، در نظر گرفت. براساس قیدهای کوانتومی انواع زیرلایه ها به همراه تعداد و نماد اوربیتالهای هر زیر لایه برای چهار لایه اصلی اول در جدول زیر آمده است:

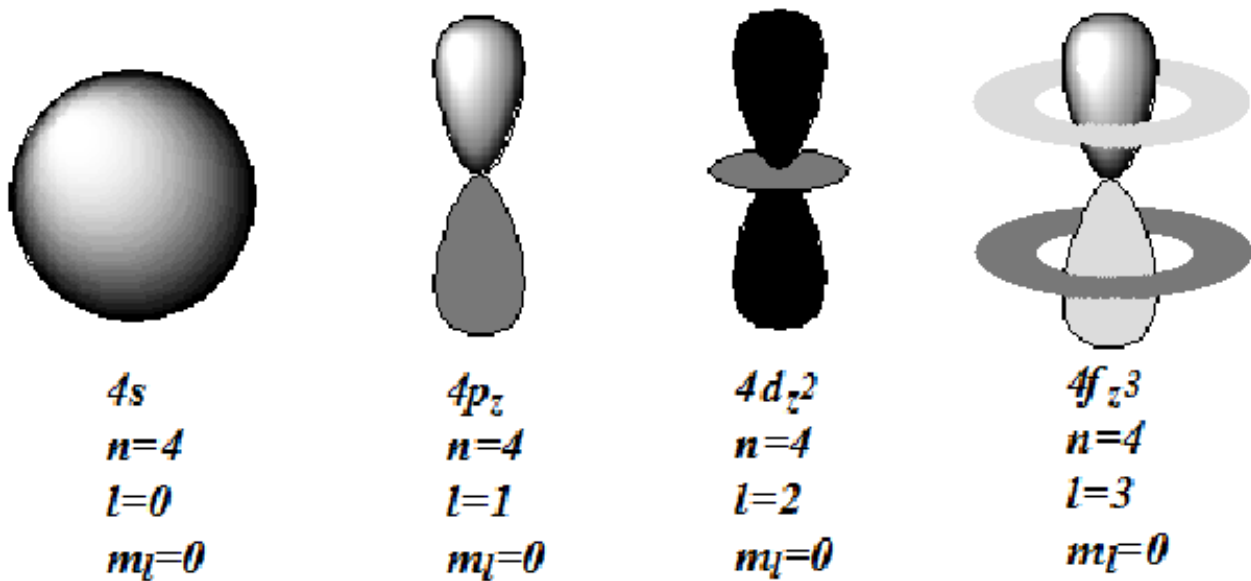
شماره لایه اصلی	زیرلایه ها	نماد زیرلایه	تعداد اوربیتال	نماد اوربیتالها
$n=1$	$l=0$ or $s$	$1s$	1	$1s$
$n=2$	$l=0$ or $s$	$2s$	1	$2s$
	$l=1$ or $p$	$2p$	3	$2p_x, 2p_y, 2p_z$
$n=3$	$l=0$ or $s$	$3s$	1	$3s$
	$l=1$ or $p$	$3p$	3	$3p_x, 3p_y, 3p_z$
	$l=2$ or $d$	$3d$	5	$3d_{x^2-y^2}, 3d_{xy}, 3d_{xz}, 3d_{yz}, 3d_{z^2}$
$n=4$	$l=0$ or $s$	$4s$	1	$4s$
	$l=1$ or $p$	$4p$	3	$4p_x, 4p_y, 4p_z$
	$l=2$ or $d$	$4d$	5	$4d_{x^2-y^2}, 4d_{xy}, 4d_{xz}, 4d_{yz}, 4d_{z^2}$
	$l=3$ or $f$	$4f$	7	$4f_{z^3}, 4f_{xz^2}, 4f_{yz^2}, 4f_{xyz}, 4f_{z(x^2-y^2)}, 4f_{x(x^2-3y^2)}, 4f_{y(3x^2-y^2)}$

تعداد الکترونهاي حاضر در يك اوربیتال یا زیرلایه بصورت توان در نماد آن اوربیتال یا زیرلایه نمایش داده می شود. مثلا منظور از  $2p^4$  زیرلایه  $2p$  با 4 الکترون است. بعدا خواهیم دید که هر اوربیتال حداکثر دو الکترون در خود جای می دهد. اوربیتال ها از نظر اندازه، شکل یا جهت گیری در فضا با هم متفاوتند که در ادامه این مطلب را بیشتر بررسی می کنیم.

اوربیتالهایی که  $n$  متفاوت اما  $m_l$  و  $l$  یکسان دارند، اندازه و فاصله میانگین الکترون از هسته متفاوت اما شکل و جهت گیری یکسانی دارند. بعنوان مثال داریم:

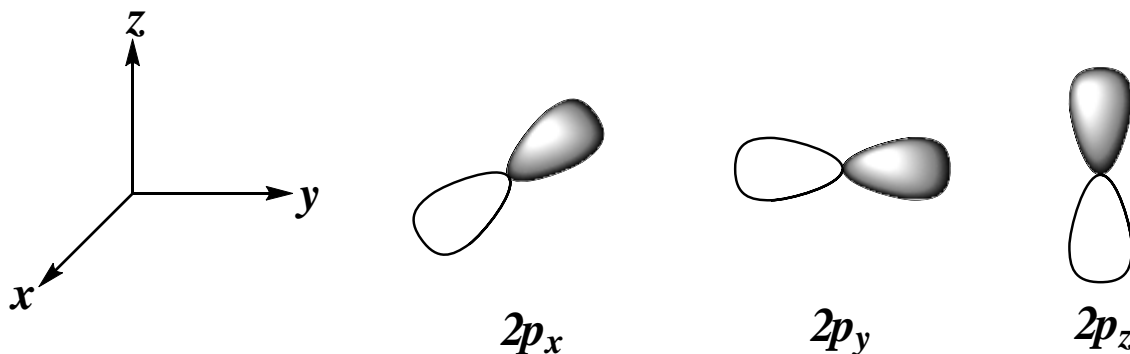


برای اوربیتالهایی که  $l$  متفاوت، اما  $n$  یکسان است، اندازه و فاصله میانگین الکترون از هسته تقریباً یکسان اما شکل متفاوت است. بعنوان مثال داریم:





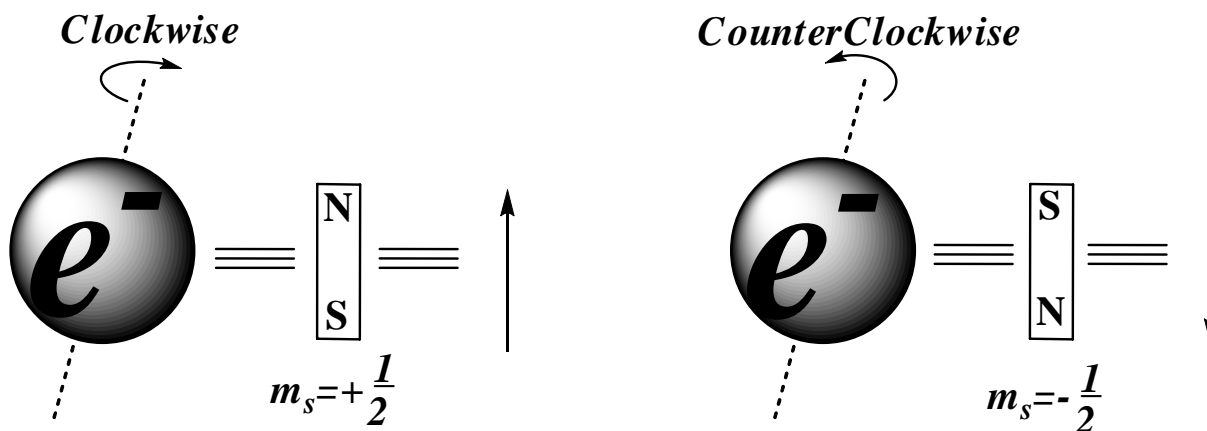
اوربیتالهایی که  $m_l$  متفاوت، اما  $n$  و  $l$  یکسان دارند، جهت گیری متفاوت اما اندازه یکسانی دارند و شکل آنها نیز معمولاً یکسان است. بعنوان مثال اوربیتالهای  $2p_x$ ،  $2p_y$  و  $2p_z$  را می توان در نظر گرفت که برای هر سه  $n=2$  و  $l=1$  است، اما در  $m_l$  با هم تفاوت دارند:



با توجه به بحث و مثالهای قبلی می توان دید که عدد کوانتومی اصلی ( $n$ ) اندازه اوربیتال، عدد کوانتومی فرعی ( $l$ ) شکل اوربیتال (گاهی اوقات در ترکیب با  $m_l$ ) و عدد کوانتومی مغناطیسی اوربیتال ( $m_l$ ) جهت گیری اوربیتال را مشخص می کند.

### عدد کوانتومی مغناطیسی اسپینی ( $m_s$ )

هر بار الکتریکی متحرک یا جریان الکتریکی به دور خود میدان مغناطیسی ایجاد می کند و مشابه یک آهنربا عمل می کند. الکترون ها دارای حرکت چرخشی به دور خود (که حرکت اسپینی نیز نامیده می شود) هستند که این چرخش به دور خود می تواند به صورت ساعتگرد (*Clockwise*) و یا پاد ساعتگرد (*Counterclockwise*) باشد. بعلاوه همین چرخش به دور خود الکترون ها دارای خاصیت مغناطیسی هستند و مثل یک آهنربا عمل می کنند. عدد کوانتومی مغناطیسی اسپینی ( $m_s$ ) که برای الکترون می تواند دو مقدار  $+\frac{1}{2}$  و  $-\frac{1}{2}$  داشته باشد بیانگر جهت چرخش الکترون به دور خود است و منعکس کننده ی جهت خصلت مغناطیسی آن یا جهت آهنربای متناظر با آن است. شکل زیر را در نظر بگیرید.





همانطور که در شکل نیز می توان دید، جهت چرخش ساعتگرد برای الکترون متناظر با الکترون بعنوان یک آهنربا با قطب شمال در بالا است، در حالیکه جهت چرخش پاد ساعتگرد متناظر با الکترون بعنوان یک آهنربا با قطب شمال در پایین است. از آنجائیکه جهت آهنربا را با یک فلش یکطرفه از قطب جنوب به قطب شمال نمایش می دهیم، چرخش ساعتگرد متناظر با فلش رو به بالا و چرخش پاد ساعتگرد متناظر با فلش رو به پایین خواهد بود. از این رو چرخش ساعتگرد اسپین رو به بالا و چرخش پاد ساعتگرد اسپین رو به پایین نیز در نظر گرفته می شود. چرخش ساعتگرد و اسپین رو به بالا با  $m_s = +\frac{1}{2}$  و چرخش پاد ساعتگرد و اسپین رو به پایین با  $m_s = -\frac{1}{2}$  مشخص می شود.

هر الکترون در اتم با 4 عدد کوانتومی  $n, l, m_l, m_s$  مشخص می شود که  $n, l$  و  $m_l$  مشخص کننده ی اوربیتالی هستند که الکترون در آن جای دارد و  $m_s$  بیانگر جهت چرخش الکترون به دور خود است. دقت داشته باشید که الکترون در اتم به خاطر هم چرخش به دور خود و هم چرخش به دور هسته میدان مغناطیسی یا خصلت آهن ربایی ایجاد می کند.

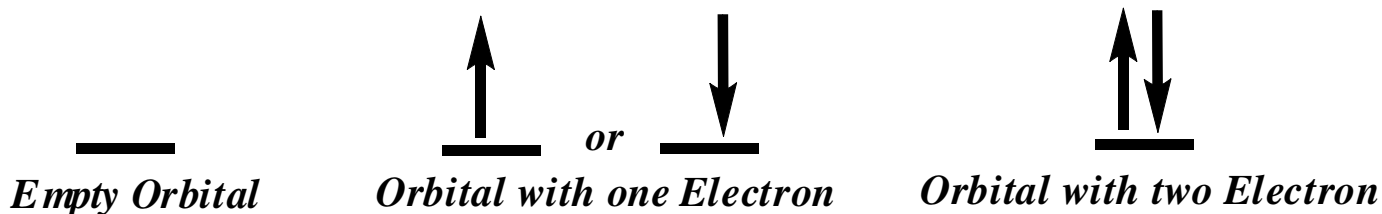
همچنین خوب است بدانیم که از نقطه نظر اسپین ذرات به دو دسته فرمیونها و بوزونها تقسیم می شوند. به ذرات با اسپین نیمه صحیح مثل الکترون، پروتون، نوترون و ..... فرمیون و به ذرات با اسپین صحیح ( $0, +1, -1, \dots$ ) بوزون (*Boson*) گفته می شود که بحث دقیق در مورد آنها خارج از حوصله این بحث است.

همچنین جالب است بدانیم که نوترون با وجود اینکه در کل بی بار است، اما مثل الکترون و پروتون خصلت آهنربایی دارد. نوترون از کوراک ها تشکیل شده که باردار و آهنربا هستند، بارشان همدیگر را بطور کامل خنثی می کنند اما میدان مغناطیسی شان همدیگر را بطور کامل خنثی نمی کنند و مقدار کمی خاصیت مغناطیسی برای نوترون میماند.

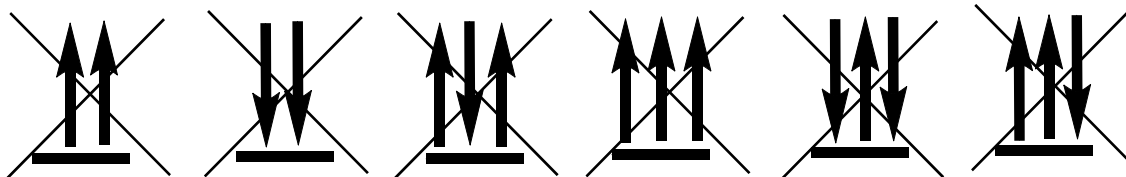
### اصل طرد پاولی

اصل طرد پاولی بیان می کند که امکان ندارد در یک سیستم کوانتومی 2 فرمیون از بابت تمامی خواص کاملاً یکسان باشند یا به عبارتی امکان ندارد دو فرمیون در تمام اعداد کوانتومی باهم برابر باشند. هنگامی که فرمیون ها در یک اوربیتال یا تراز انرژی بخصوص قرار داشته باشند، در تمام اعداد کوانتومی مشخص کننده ی آن تراز یکسان هستند، بنابراین برای رعایت اصل طرد پاولی مجبورند در  $m_s$  متفاوت باشند. براین اساس ماکزیمم فرمیون هایی که در یک اوربیتال یا تراز بخصوص می توانند قرار بگیرند، به تعداد حالات  $m_s$  آن فرمیون هاست.

پس بنابر اصل طرد پاولی دو الکترون در یک اتم نمی توانند در چهار عدد کوانتومی یکسان باشند و بایستی حداقل در یک عدد کوانتومی باهم متفاوت باشند. از آنجائیکه  $m_s$  الکترون دو مقدار متفاوت می تواند داشته باشد، معادلاً هر اوربیتال اتم حداکثر می تواند 2 الکترون با  $m_s$  های متفاوت در خود جای دهد. در صورتیکه یک اوربیتال را با یک پاره خط و الکترونها را قرار گرفته درون آن را با فلش نمایش دهیم، که جهت فلش جهت اسپین الکترون است و فلش رو به بالا بیانگر  $m_s = +\frac{1}{2}$  و فلش رو به پایین بیانگر  $m_s = -\frac{1}{2}$  می باشد، حالت های زیر از نظر اصل طرد پاولی تنها حالت های مجازند:



در حالیکه حالت‌های دیگر مثل حالت‌های زیر مجاز نیستند و رد می‌شوند:



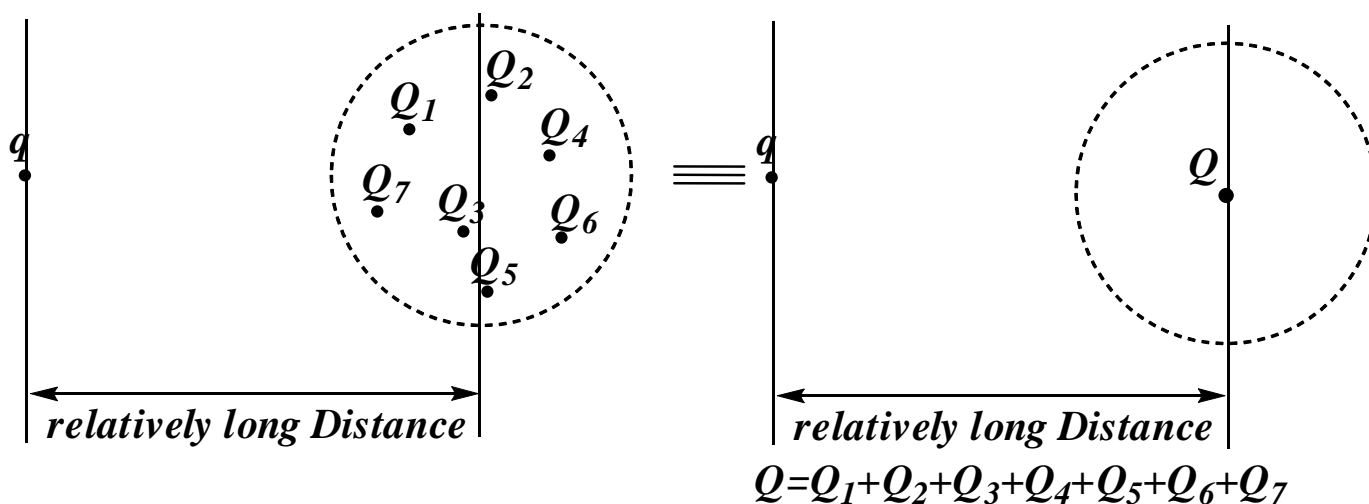
دو الکترونی که در یک اوربیتال با اسپین‌های ناهمسو قرار گرفته‌اند، الکترون‌های جفت شده در نظر گرفته می‌شوند، در حالیکه الکترون تنها در یک اوربیتال الکترون جفت نشده محسوب می‌شود.

از آنجاییکه هر لایه اصلی  $n^2$  اوربیتال دارد، با توجه به بحث بالا ظرفیت هر لایه اصلی برابر  $2n^2$  خواهد بود.

### اثر پوششی و بار مؤثر هسته

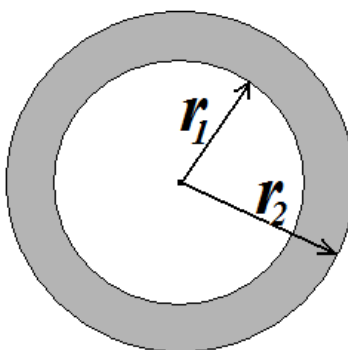
در یک سیستم چندالکترونی الکترون‌ها با هم دافعه دارند. در نظر گرفتن مطالب در ادامه آمده در تحلیل این دافعه‌ها و اثر الکترون‌ها بر روی همدیگر می‌تواند مفید واقع شود.

هنگامی که یک بار در فاصله‌ی نسبتاً دوری از یک کره حاوی بارهای مختلف قرار داشته باشد، نیروی کولنی که احساس می‌کند تقریباً مساوی نیروی کولنی است که احساس می‌کند اگر تمام بار کره به صورت یک بار خالص در مرکز کره قرار می‌گرفت. بعنوان مثال شکل زیر را در نظر بگیرید:



بار  $q$  در فاصله نسبتاً دوری از یک کره حاوی بارهای  $Q_1$  تا  $Q_7$  قرار دارد. برای بار  $q$  مجموع نیروهای الکتریکی وارده از طرف بارهای  $Q_1$  تا  $Q_7$  تقریباً معادل نیروی الکتریکی وارده از طرف یک بار تنها با اندازه بار  $Q$  در مرکز کره است که  $Q$  برابر مجموع اندازه بارهای  $Q_1$  تا  $Q_7$  است.

برای نیروهایی که بر حسب فاصله به صورت  $\frac{1}{r^2}$  تغییر می کنند (مثل نیروی گرانشی و نیروی الکتریکی)، یک پوسته کروی با توزیع پیوسته و یکنواخت از عامل ایجاد نیرو به ذره ی داخل پوسته به طور خالص هیچ نیرویی وارد نمی کند. بعنوان مثال، در شکل زیر جرم به طور یکسان یا همگن در فاصله  $r_1 < r < r_2$  توزیع شده است. این پوسته کروی به ذرات جرم دار داخل پوسته ( $r < r_1$ ) به طور خالص هیچ نیروی گرانشی وارد نمی کند:



مثال: اوربیتال های  $1s$  و  $4s$  را در نظر بگیرید. اثر الکترون  $1s$  روی  $4s$  و اثر الکترون  $4s$  روی  $1s$  را بر اساس نکات بالا شرح دهید.

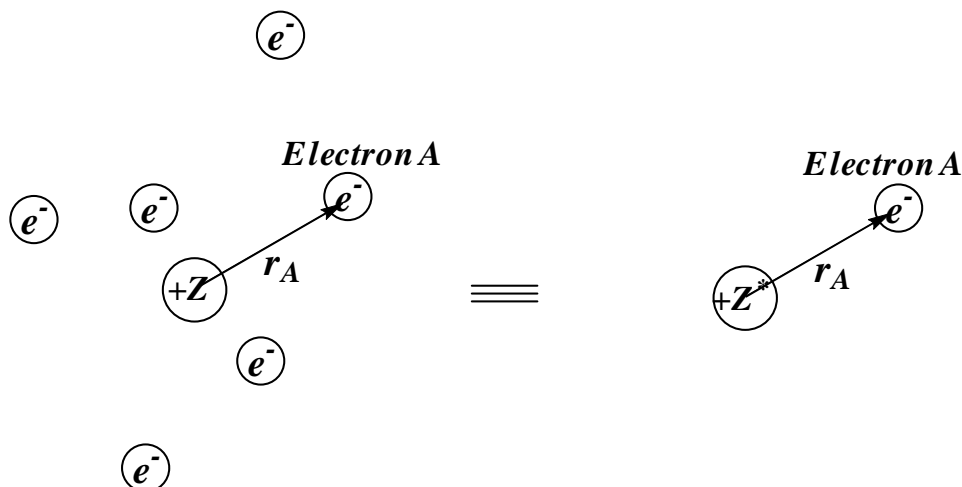
حل:

اوربیتال های  $1s$  و  $4s$  بصورت کره هستند که اوربیتال  $4s$  از اوربیتال  $1s$  بزرگتر است یا در واقع اوربیتال  $1s$  درون اوربیتال  $4s$  قرار دارد. از این رو می توان گفت که هر قسمت از ابر الکترونی اوربیتال  $4s$  تقریباً در فاصله دوری از یک کره مجازی که در برگرفته هسته و اوربیتال  $1s$  است، قرار دارد. بنابراین با توجه به نکته اول هر الکترون  $1s$  تقریباً یک بار از بار هسته احساس شده توسط الکترون های  $4s$  را کم می کند. از طرفی اوربیتال  $4s$  یک پوسته کروی از الکترون است که با توجه به نکته دوم به ذرات باردار داخل پوسته تقریباً نیرویی وارد نمی کند، بنابراین الکترون های  $4s$  تقریباً هیچ اثر دافعه ای روی الکترون های  $1s$  ( که داخل کره هستند ) ندارند.

\*\*\*\*\*

همانطور که مثال قبلی نیز نشان می دهد، الکترون هایی که در لایه های درونی یک اتم قرار دارند، معمولاً دافعه قابل توجهی از طرف الکترون های لایه های خارجی تر احساس نمی کنند ( دقت داشته باشید که در بالا برای یک اوربیتال خارجی کروی شکل بحث شد، اما در حالت کلی دیگر اوربیتال های خارجی نیز اثر دافعه قابل توجهی روی الکترونها ی اوربیتال های داخلی تر ندارند). از طرف دیگر، الکترون هایی که در لایه ی خارجی یک اتم قرار دارند، هم بار مثبت و جاذبه ناشی از هسته و هم بار منفی و دافعه ناشی از الکترون های لایه های درونی تر را احساس می کنند. به علت وجود الکترون های لایه های درونی و دافعه آن ها، بار

خالصی که الکترون های لایه های خارجی احساس می کنند کمتر از بار واقعی هسته است. به اصطلاح می گوئیم که الکترون های درونی تر جاذبه یا بار هسته را از الکترون های خارجی تر پوشش (حایل) می دهند و به این اثر، اثر حایل یا پوششی می گوئیم. به بار مثبتی که یک الکترون از طرف هسته با در نظر گرفتن اثر پوششی الکترون های دیگر احساس می کند بار مؤثر هسته (*Effective Nuclear Charge*) گفته می شود و با  $Z^*$  یا  $Z_{eff}$  نشان داده می شود. می توان گفت  $Z^*$  همان بار هسته دیده شده توسط یک الکترون است به شرطی که الکترونهاى دیگر نباشند. شکل بعدی نمایشی برای این مطلب است:

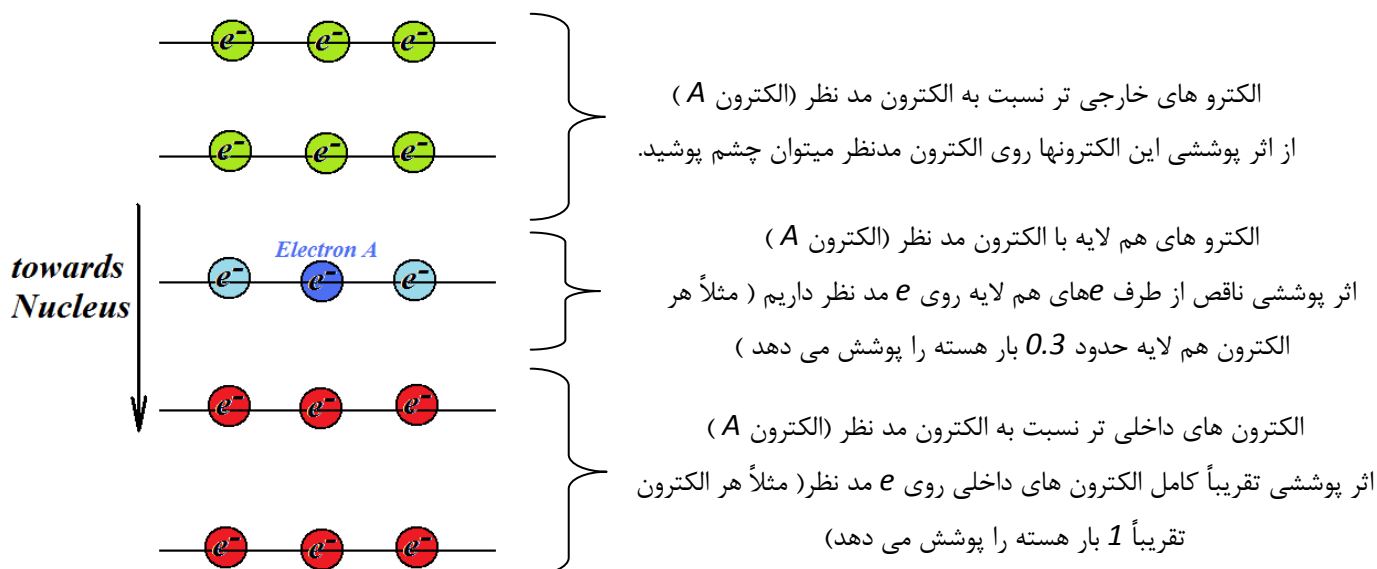


همانطور که شکل نیز نمایش می دهد، برای الکترون  $A$  فرقی نمی کند که در فاصله  $r_A$  از یک هسته با بار مثبت برابر  $+Z$  در کنار حضور الکترونهاى دیگر قرار گیرد یا از طرف دیگر در همان فاصله  $r_A$  از یک هسته با بار مثبت برابر  $+Z^*$  بدون حضور الکترونهاى دیگر قرار گیرد.

در صورتیکه اثر پوششی الکترون های دیگر را با  $S$  نمایش دهیم، رابطه زیر را برای  $Z^*$  خواهیم داشت:

$$Z_{eff} = Z^* = Z - S$$

برای یک الکترون در درجه ی اول اثر پوششی الکترون های زیرین و در درجه دوم اثر پوششی کمتر الکترون های هم لایه مهم است. برای یک الکترون از اثر پوششی الکترون های لایه خارجی می توان صرف نظر کرد. شکل بعدی را در نظر بگیرید.



اثر پوششی که یک الکترون می تواند داشته باشد تابعی از شماره لایه و نوع زیرلایه آن است. هرچه یک الکترون شماره لایه کمتری داشته باشد، فاصله میانگین کمتری از هسته خواهد داشت و در نتیجه نسبت به الکترون های مدنظر درونی تر خواهد بود و روی الکترون های مدنظر اثر پوششی بیشتری اعمال خواهد کرد. از طرف دیگر، زیر لایه ها با  $l$  کمتر توزیع احتمال حضور الکترونها به صورتی ست که الکترون بیشتر می تواند به فواصل خیلی نزدیک به هسته برود و در نتیجه الکترون های متعلق به زیرلایه ها با  $l$  کمتر اثر پوششی بیشتری اعمال کنند.

مثال: اثر پوششی  $1s, 2s, 3s$  را با هم و  $4s, 4p, 4d, 4f$  را با هم مقایسه نمایید.

حل:

با توجه به مطالب یاد شده داریم:

$$1s > 2s > 3s \text{ اثر پوششی}$$

$$4s > 4p > 4d > 4f \text{ اثر پوششی}$$

\*\*\*\*\*

بار مؤثر هسته ای که یک الکترون احساس می کند نیز تابعی از شماره لایه و نوع زیر لایه آن است. هر چه یک الکترون شماره لایه ی کمتری داشته باشد، دارای الکترون های هم لایه و داخلی کمتری خواهد بود در نتیجه اثر پوششی کمتر و بار مؤثر هسته بیشتری احساس خواهد کرد. الکترون در زیر لایه ها با  $l$  کمتر قدرت نفوذ بیشتری به فواصل نزدیک هسته دارد در نتیجه بیشتر می تواند خودش را از اثر پوششی دیگر الکترون ها رهایی بدهد و به همین علت بار مؤثر هسته ی بیشتری احساس می کند.

مثال: بار مؤثر هسته  $1s, 2s, 3s$  را با هم و  $4s, 4p, 4d, 4f$  را با هم مقایسه نمایید.

حل:

با توجه به مطالب یاد شده داریم:

$$1s > 2s > 3s \text{ و } 4s > 4p > 4d > 4f$$

\*\*\*\*\*

سطح انرژی اوربیتال ها تابعی از  $n$  و  $l$  اوربیتال هاست. هرچه  $n$  کمتر باشد فاصله میانگین الکترون از هسته کمتر و بار مؤثر احساس شده بیشتر خواهد بود. در نتیجه جاذبه الکترون در آن اوربیتال با هسته بیشتر خواهد بود و الکترون پایدار تر یا با سطح انرژی کمتر خواهد بود. داریم:

$$F \propto \frac{Z^*}{r^2}, \quad n \downarrow \Rightarrow Z^* \uparrow, r \downarrow \Rightarrow F \uparrow \Rightarrow U \downarrow$$

هرچه  $l$  کمتر باشد قدرت نفوذ اوربیتال بیشتر خواهد بود و الکترون جاذبه بیشتر یا بار مؤثر هسته بیشتر احساس خواهد کرد، در نتیجه اوربیتال پایدارتر خواهد بود. داریم:

$$F \propto \frac{Z^*}{r^2}, \quad l \downarrow \Rightarrow Z^* \uparrow \Rightarrow F \uparrow \Rightarrow U \downarrow$$

به طور کلی هرچه مجموع  $n + l$  کمتر باشد اوربیتال پایدارتر یا با سطح انرژی کمتر خواهد بود. در صورتی که  $n + l$  یکسان باشد اوربیتالی پایدارتر خواهد بود که  $n$  کمتری داشته باشد.

مثال: سطح انرژی و پایداری اوربیتالهای  $4s, 3d$  و  $4p$  را با هم مقایسه کنید.

حل:

جدول زیر را در نظر بگیرید:

	$3d$	$4s$	$4p$
$n$	3	4	4
$l$	2	0	1
$n+l$	5	4	5

چون مجموع  $n + l$  برای اوربیتال  $4s$  از اوربیتالهای  $3d$  و  $4p$  کمتر است، بین این سه اوربیتال  $4s$  سطح انرژی کمتری دارد و پایدارتر است. بین اوربیتالهای  $3d$  و  $4p$  که مجموع  $n + l$  یکسانی دارند، اوربیتال  $3d$  که  $n$  کمتری دارد، پایدارتر است. پس داریم:

ترتیب سطح انرژی :  $4p > 3d > 4s$

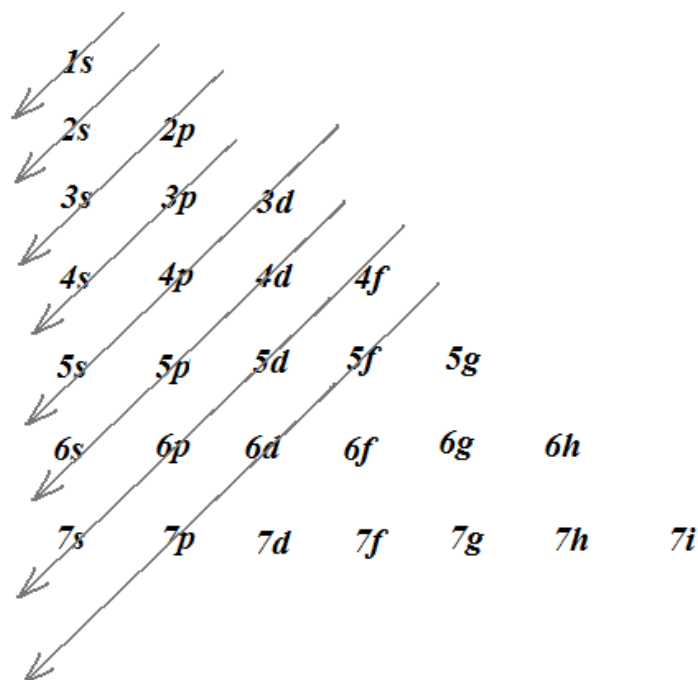
ترتیب پایداری :  $4s > 3d > 4p$

\*\*\*\*\*

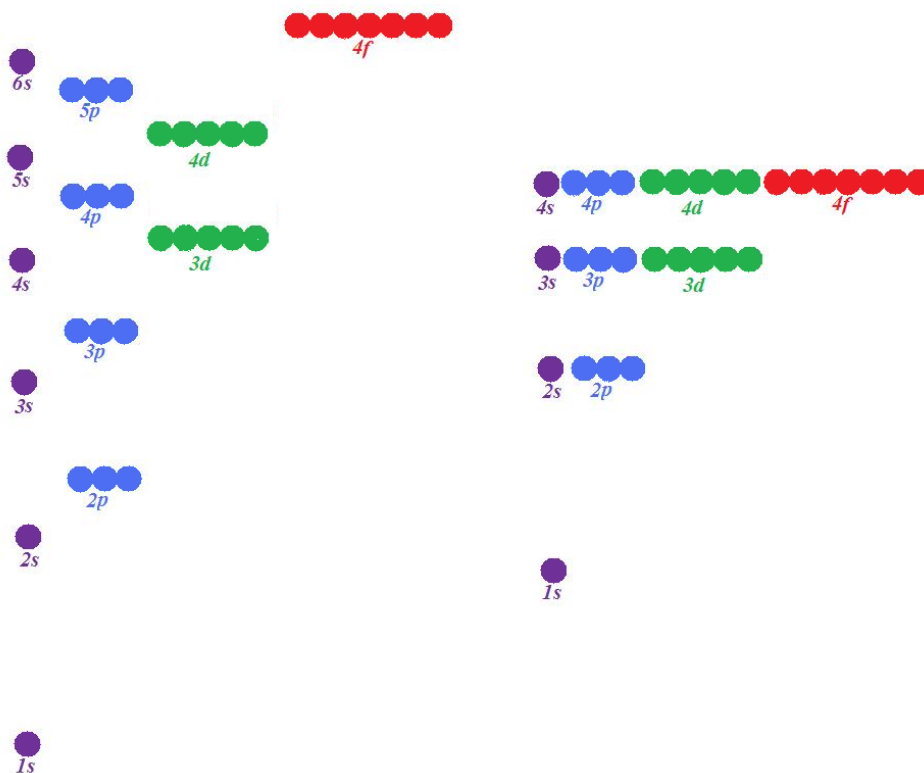
با توجه به قواعد یاد شده ترتیب سطح انرژی اوربیتالها با شروع از اوربیتال  $1s$  که کمترین سطح انرژی و بیشترین پایداری را دارد، بصورت زیر است:

$1s < 2s < 2p < 3s < 3p < 4s < 3d < 4p < 5s < 4d < 5p < 6s < 4f < 5d < 6p < 7s < 5f < 6d < 7p \dots \dots$

شاید بخاطر سپردن ترتیب سطح انرژی اوربیتالها به کمک شکل زیر راحت تر باشد، بهر حال بعد از آشنایی با جدول تناوبی روش بهتری برای پیدا کردن ترتیب سطح انرژی اوربیتالها خواهیم دید. در شکل از فلش های بالاتر به پایین تر و روی هر فلش از بالا به پایین سطح انرژی اوربیتالها افزایش می یابد.



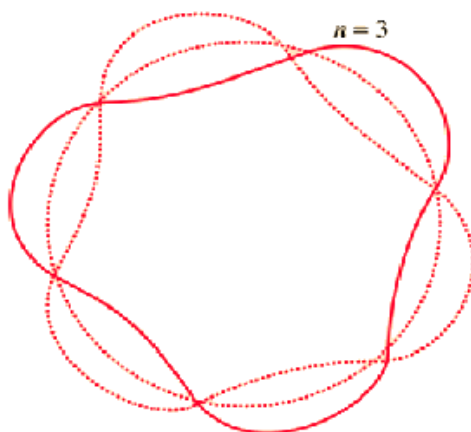
در سیستم های تک الکترونی مثل اتم هیدروژن بحث اثر پوششی مطرح نیست و تنها عامل برای تعیین سطح انرژی اوربیتال ها فاصله میانگین الکترون از هسته یا همان  $n$  هست. بنابراین هرچه  $n$  کمتر باشد اوربیتال پایدارتر است و اوربیتال های با  $n$  یکسان مثلاً  $3s$  و  $3p$  و  $3d$  سطح انرژی یکسانی دارند. در شکل زیر ترتیب سطح انرژی اوربیتال ها در سیستم های تک الکترونی ( سمت راست) و چند الکترونی ( سمت چپ) با هم مقایسه شده است:



جالب توجه است که سطح انرژی محاسبه شده برای اوربیتال ها با استفاده از معادله شرودینگر با سطح انرژی بدست آمده برای ترازها با استفاده از مدل اتمی بور برای اتم هیدروژن یا مابقی سیستم های تک الکترونی کاملاً یکسان هستند. معادله شرودینگر بر مبنای خصلت موجی الکترون است و با رابطه ی دو بروی سازگار است. مدل اتمی بور نیز با رابطه ی دو بروی سازگار است.

$$mvr = \frac{nh}{2\pi} \rightarrow \frac{2\pi r}{n} = \frac{h}{mv} = \lambda$$

به عبارتی این فرض بور برای  $n=3$  در لایه  $n$  ام طول موجی برابر  $\frac{2\pi r}{n}$  در نظر می گیرد و این از نظر موجی بعنوان یک موج ایستا می تواند قابل قبول باشد. بعنوان مثال برای لایه  $n=3$  می توان شکل زیر را در نظر گرفت:



به اوربیتال هایی که سطح انرژی یکسانی داشته باشند اوربیتال های همتراز گفته می شود. مثلاً اوربیتال های  $n$  یکسان در سیستم های تک الکترونی و اوربیتال های  $n$  و  $l$  یکسان در سیستم های چند الکترونی در غیاب میدان مغناطیسی خارجی اوربیتال های همتراز هستند. مثلاً اوربیتالهای  $3p_x$ ,  $3p_y$ ,  $3p_z$  در غیاب میدان مغناطیسی خارجی اوربیتال های همتراز هستند، چراکه در غیاب میدان مغناطیسی خارجی داریم:

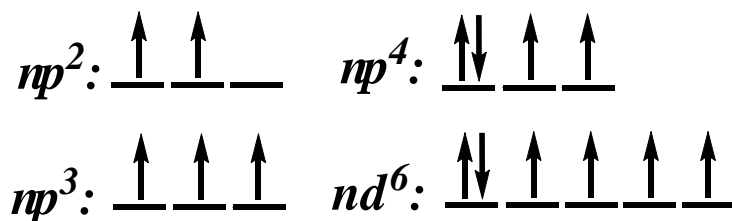
$$E_{3p_x} = E_{3p_y} = E_{3p_z}$$

اوربیتالهای  $n$  و  $l$  یکسان اما  $m_l$  متفاوت بعلا داشتن جهت گیری فضایی متفاوت جهت های مختلفی برای آهنربای مربوط به گردش الکترون به دور هسته نتیجه میدهند. در نتیجه با یک میدان مغناطیسی خارجی بطور متفاوتی برهمکنش می کنند و در حضور میدان مغناطیسی خارجی اوربیتالهای  $n$  و  $l$  یکسان اما  $m_l$  متفاوت سطح انرژی های متفاوتی پیدا می کنند و همتراز نخواهند بود.



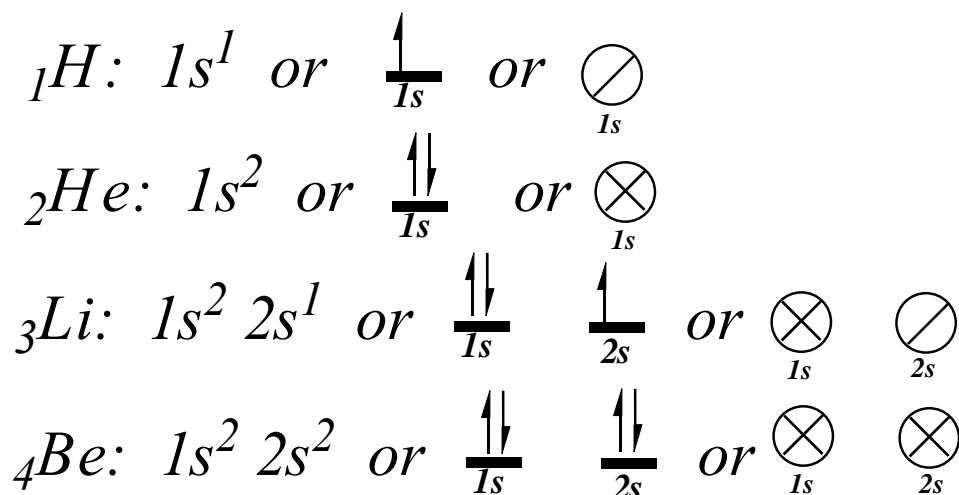
## قاعده حداکثر چندگانگی هوند

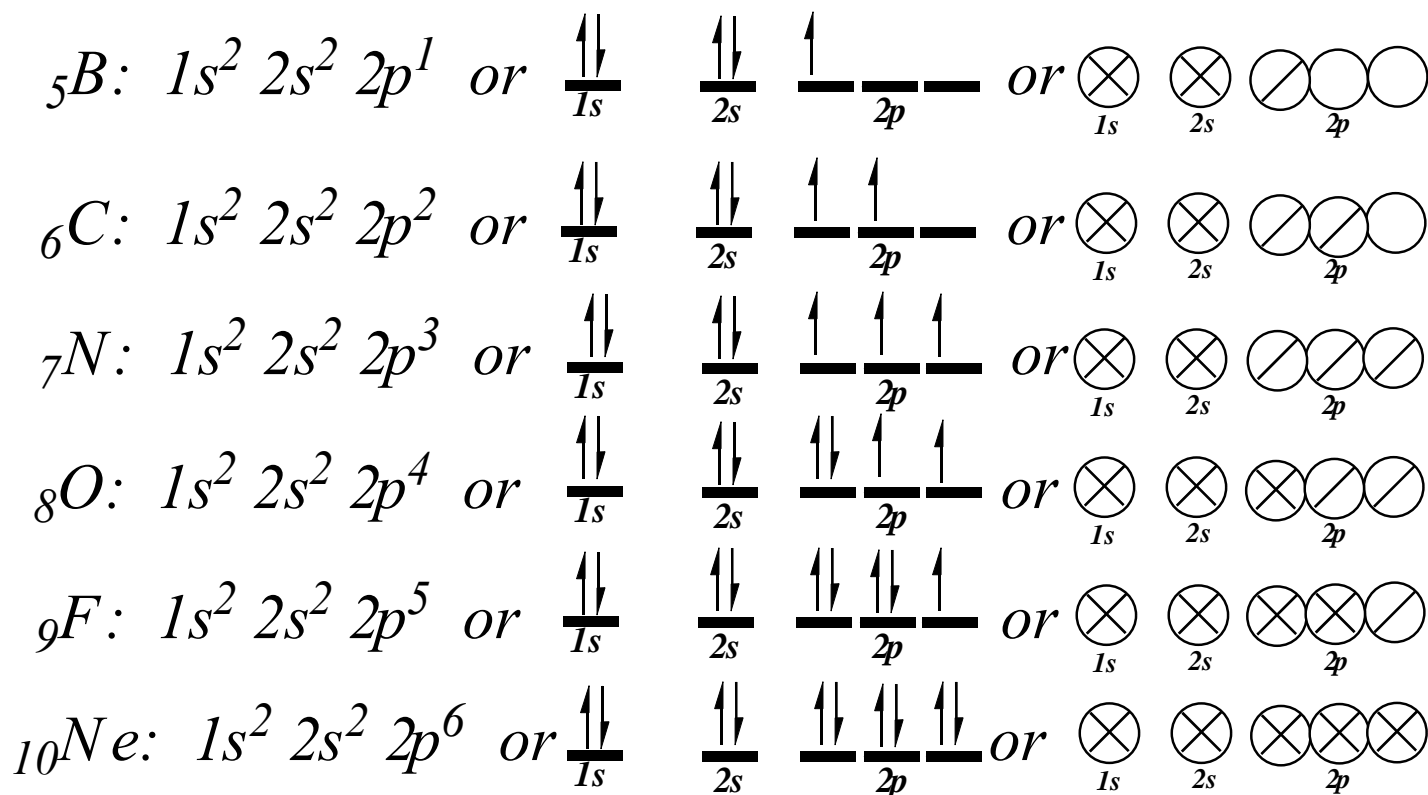
این قاعده بیان می کند که پایدارترین حالت هنگام اشغال اوربیتال های همتراز زمانی به دست می آید که تعداد الکترون ها با اسپین همسو ماکزیمم شود. بعنوان مثال پایدارترین حالت آرایشهای  $np^4, np^3, np^2$  و  $nd^6$  بر اساس قاعده هوند بصورت زیر هستند:



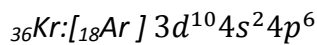
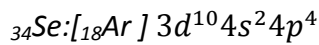
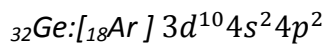
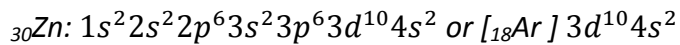
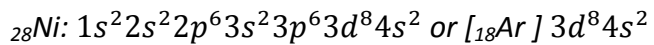
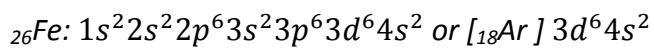
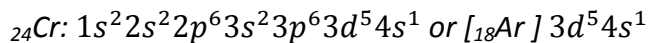
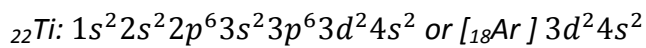
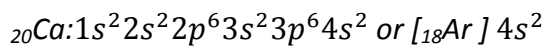
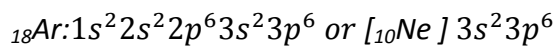
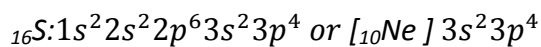
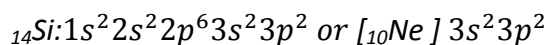
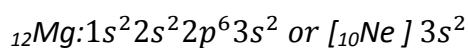
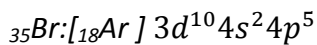
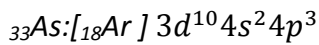
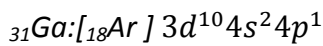
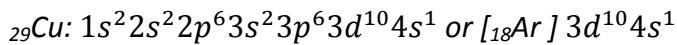
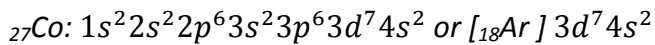
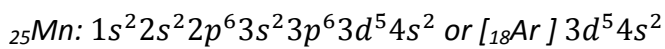
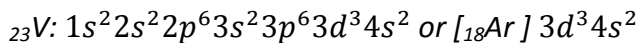
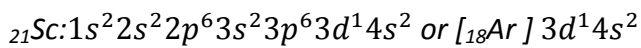
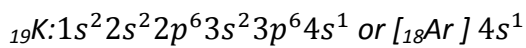
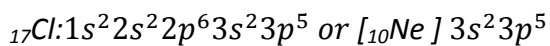
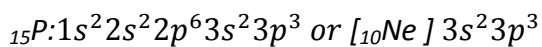
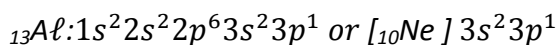
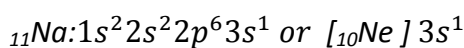
## اصل بناگذاری آفبا و آرایش الکترونی عناصر

آرایش الکترونی یک عنصر نحوه ی اشغال شدن اوربیتال ها توسط الکترون های آن عنصر را مشخص می کند. برای بدست آوردن آرایش الکترونی عناصر در حالت پایه الکترون ها را در اوربیتال ها به ترتیب سطح انرژی اوربیتال ها با رعایت ظرفیت آنها، اصل طرد پاولی و قاعده هوند قرار می دهند. در اینصورت در واقع از اصل بناگذاری آفبا استفاده کرده ایم. اصل بناگذاری آفبا که به کلمه آلمانی *Aufbauprinzip* (به معنای *Building-up Principle* یا اصل بناگذاری) مربوط می شود، توسط نیلز بور و ولفگانگ پاولی در اوایل دهه 1920s ارائه شد و بیان می کند که در ابتدا اوربیتالها با سطح انرژی کمتر پر می شوند و بعد از آن پرشدن اوربیتالها با سطح انرژی بالاتر شروع می شود. این اصل اتمها را با تک تک اضافه کردن الکترونها به گونه ای که پایدارترین حالت ممکن بوجود آید، بنا می نهد. در این راستا، به الکترونی که باعث تفاوت آرایش الکترونی دو عنصر متوالی می شود الکترون متمایز کننده می گویند. بعنوان مثال برای آرایش الکترونی عناصر با اعداد اتمی یک تا ده داریم:





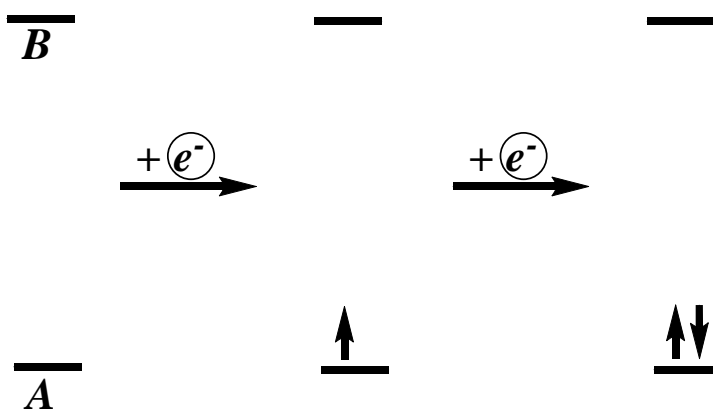
متداول است که برای ساده نویسی آرایش الکترونی هر عنصر به صورت ترکیب آرایش الکترونی گاز نجیب ماقبل آن عنصر و الکترون های باقی مانده نوشته شود. گازهای نجیب عبارتند از: هلیم ( ${}^2He$ )، نئون ( ${}_{10}Ne$ )، آرگون ( ${}_{18}Ar$ )، کریپتون ( ${}_{36}Kr$ )، زنون ( ${}_{54}Xe$ ) و رادون ( ${}_{86}Rn$ ). بعنوان مثال برای آرایش الکترونی عناصر با اعداد اتمی 11 تا 36 داریم:



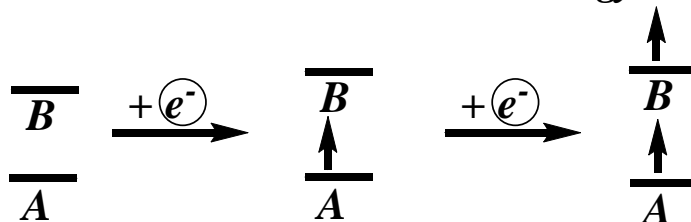
با دقت در آرایش الکترونی های بالا درمی یابیم آرایش کروم و مس به ترتیب به جای  $3d^9 4s^2$  و  $3d^4 4s^2$  مورد انتظار به صورت  $3d^{10} 4s^1$  و  $3d^5 4s^1$  می باشد. برای درک علت این موضوع بایستی مطالب زیر را در نظر بگیریم.

اگر اختلاف سطح انرژی اوربیتال ها زیاد باشد پایدارترین آرایش الکترونی حتماً با پر شدن اوربیتال پایدارتر بدست می آید. اما اگر سطح انرژی اوربیتال ها به هم نزدیک باشد ممکن است اثرات دیگری نیز مهم شوند و هم ترتیب سطح انرژی اوربیتال ها و هم آرایش الکترونی حالت پایه را تحت تأثیر قرار دهند. بنابراین ممکن است پایدارترین آرایش الکترونی لزوماً آرایشی نباشد که از پر شدن به ترتیب اوربیتال های در شروع پایدارتر بدست می آید. بعنوان مثال دو اوربیتال  $A$  و  $B$  را در نظر بگیرید که اوربیتال  $A$  پایدارتر از اوربیتال  $B$  است. الکترون اول قطعاً وارد اوربیتال پایدارتر یعنی اوربیتال  $A$  خواهد شد. برای الکترون دوم اوربیتال  $A$  دارای این مزیت خواهد بود که قبل از ورود الکترون دوم سطح انرژی پایین تری از اوربیتال  $B$  خواهد داشت، اما در عوض دارای این عیب هم خواهد بود که قرارگرفتن همزمان دو الکترون در یک اوربیتال و ناحیه مشترک از فضا و دافعه کولنی آنها با هم منجر به افزایش سطح انرژی هر دو الکترون خواهد شد و نیازمند صرف انرژی خواهد بود. به انرژی لازم برای غلبه بر دافعه کولنی بین دو الکترون برای قرارگیری همزمان در یک اوربیتال و جفت شدن یا بطور معادل به افزایش سطح انرژی ناشی از دافعه کولنی بین دو الکترون در یک اوربیتال انرژی جفت شدن می گویند. در صورتیکه اختلاف سطح انرژی دو اوربیتال  $A$  و  $B$  یا به اصطلاح شکافتگی انرژی بین آنها از انرژی جفت شدن بیشتر باشد، از نظر سطح انرژی بهتر خواهد بود که الکترون دوم بجای قبول اوربیتال ناپایدارتر  $B$ ، دافعه کولنی با الکترون اول را بپذیرد و وارد اوربیتال  $A$  شود. در صورتیکه اختلاف سطح انرژی دو اوربیتال  $A$  و  $B$  از انرژی جفت شدن کمتر باشد، از نظر سطح انرژی بهتر خواهد بود که الکترون دوم بجای قبول دافعه کولنی با الکترون اول در اوربیتال  $A$ ، وارد اوربیتال ناپایدارتر  $B$  شود. شکل زیر را در نظر بگیرید.

### Orbitals A & B with High Energy Gap



### Orbitals A & B with Low Energy Gap



در اتمها معمولاً اختلاف سطح انرژی زیرلایه های مختلف زیاد است، از این رو اغلب اوقات عوامل دیگر مثل انرژی جفت شدن مهم یا تاثیرگذار نیستند و تا زمانیکه اوربیتالهای زیرلایه ها با سطح انرژی کمتر بطور کامل پر نشده باشند، پر شدن اوربیتالهای زیرلایه ها با سطح انرژی بالاتر شروع نمی شود. با این وجود سطح انرژی اوربیتال های  $ns$ ،  $(n-2)f$  و  $(n-1)d$  ( در صورت وجود) به هم نزدیک است، به همین علت موقع پر شدن آنها ممکن است اثرات دیگری علاوه بر ترتیب سطح انرژی اوربیتال ها مطلوب ترین آرایش الکترونی برای اتم را تحت تأثیر قرار دهند.

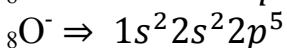
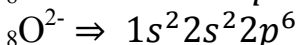
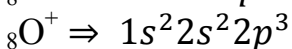
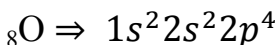
از اثرات دیگر می توان به انرژی تعویضی مربوط به الکترون های با اسپین همسو با هم اشاره کرد. بحث می شود اگر 2 یا چند الکترون با اسپین همسو در اوربیتال های همتراز وجود داشته باشند بین آنها جاذبه های مغناطیسی برقرار می شود و انرژی به نام انرژی تعویضی آزاد می شود. انرژی تعویضی متناسب با تعداد جفت الکترون هایی است که می تواند از بین آن الکترون های با اسپین همسو انتخاب شود. از این رو مقدار انرژی تعویضی و پایداری حاصله با افزایش تعداد الکترونها با اسپین همسو در اوربیتال های همتراز به سرعت افزایش می یابد. بیشترین انرژی تعویضی و پایداری ناشی از همسو بودن اسپین الکترون ها به طور کلی در آرایش نیمه پر یا پر برای یک زیر لایه مشاهده می شود که به پایداری نیمه پر و پر معروف است. بعنوان مثال آرایش های  $f^4, f^7, d^{10}, d^5, p^6, p^3$  پایداری نیمه پر یا پر دارند.

مثلاً به همین علت پایدار بودن آرایش نیمه پر و پر در ترکیب با نزدیک بودن ترازهای انرژی  $3d$  و  $4s$  است که آرایش کروم و مس به ترتیب به جای  $3d^4 4s^2$  و  $3d^9 4s^2$  به صورت  $3d^5 4s^1$  و  $3d^{10} 4s^1$  می باشد.

به طور کلی بایستی در نظر داشت که پایدارترین آرایش الکترونی متناظر با پایدارترین آرایش با در نظر گرفتن کلیه ی ذرات است و گاهی اوقات ممکن است پایدارترین موقعیت برای یک الکترون یا الکترون متمایز کننده متناظر با پایدارترین آرایش برای کل اتم نباشد. تحت این شرایط ممکن است الکترون به ظاهر آرایش ناپایدار قبول کند.

### آرایش الکترونی یون ها

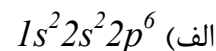
آرایش الکترونی یون ها مشابه آرایش الکترونی اتم ها بدست می آید. آرایش الکترونی آنیون ها با اضافه کردن الکترون به پایدارترین اوربیتال خالی و آرایش الکترونی کاتیون ها با کندن الکترون از ناپایدارترین اوربیتال پر بدست می آید. بعنوان مثال داریم:

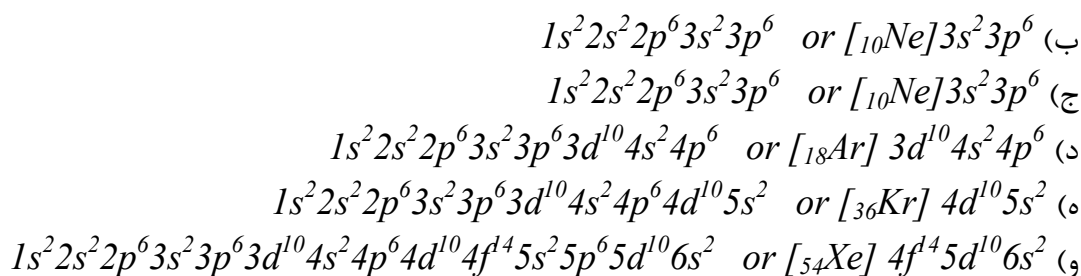


مثال: آرایش الکترونی یونهای زیر را بنویسید.



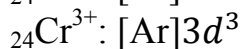
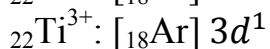
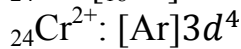
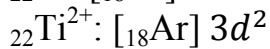
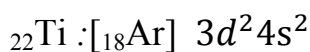
حل:





\*\*\*\*\*

برای نوشتن آرایش الکترونی اتمها و کاتیونهای فلزات واسطه خارجی باید این مطلب را در نظر گرفت که در هنگام پر کردن ابتدا اوربیتال های  $ns$  و سپس  $(n-1)d$  پر می شوند. اما در هنگام کندن ابتدا الکترون های  $ns$  و سپس  $(n-1)d$  کنده می شوند. بعنوان مثال داریم:



بر اساس آرایش الکترونی های یادشده می توان چنین نتیجه گیری نمود که در اتم فلزات واسطه خارجی بطور معمول اوربیتال های  $ns$  پایدارتر از اوربیتال های  $(n-1)d$  هستند و بهمین جهت الویت پر شدن با اوربیتال های  $ns$  است. در حالیکه در کاتیونهای فلزات واسطه خارجی اوربیتال های  $(n-1)d$  پایدارتر از اوربیتال های  $ns$  هستند و بهمین جهت الویت پر شدن با اوربیتال های  $(n-1)d$  است. با در نظر گرفتن یک سری نکات که در ادامه به آنها میپردازیم، میتوان این مطلب را توجیه نمود. سطح انرژی اوربیتال ها با افزایش عدد اتمی کاهش می یابد. مثلاً اوربیتال  $1s$  در اتم لیتیم پایدارتر از اوربیتال  $1s$  در اتم هیدروژن است. این مطلب را می توان بدین صورت توجیه کرد که برای یک اوربیتال مشخص با افزایش عدد اتمی، معمولاً  $S$  (اثر پوششی مابقی الکترونها) تغییر چندانی ندارد، در حالی که  $Z$  (عدد اتمی) و در نتیجه بار موثر هسته ( $Z-S=Z^*$ ) افزایش می یابد. هرچه  $n$  یک اوربیتال کمتر باشد، کاهش سطح انرژی آن با افزایش عدد اتمی سریعتر خواهد بود. مثلاً کاهش سطح انرژی اوربیتال  $1s$  بیشتر از کاهش سطح انرژی اوربیتال  $2s$  موقع تغییر اتم از سدیم به پتاسیم است. برای توجیه روابط زیر را در نظر بگیرید:

$$E_n = -13.6 \frac{Z^2}{n^2} \text{ eV} = \text{ سطح انرژی اوربیتال ها در سیستم های تک الکترونی}$$

$$E_n = -13.6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ eV} = \text{ سطح انرژی اوربیتال ها در سیستم های چند الکترونی}$$

رابطه اول همان سطح انرژی لایه ها در سیستمهای تک الکترونی بر مبنای مدل اتمی بور است که توسط مدل اوربیتال اتمی نیز مورد تایید و قابل حصول است. رابطه دوم سطح انرژی لایه ها و اوربیتالها در سیستمهای چند الکترونی است که بر اساس تشابه با سیستمهای تک الکترونی و با در نظر گرفتن اثر دافعه الکترونها بر روی هم به صورت تغییر عدد اتمی به بار موثر هسته نوشته شده است (میتوان تعریف بار موثر هسته را بر اساس این رابطه فرض کرد یا معادلاً میتوان فرض نمود بار موثر هسته به گونه ای تعریف شده که این رابطه صادق باشد). بر اساس این روابط میتوان نتیجه گیری نمود که اگر  $n$  کمتر باشد با افزایش مشابه در  $Z^*$  کاهش سطح انرژی اوربیتال بیشتر خواهد بود. مثال بعدی این مطلب را نشان می دهد.

مثال: اختلاف سطح انرژی اوربیتالها را برای بار موثر هسته برابر یک و دو در دو حالت  $n=2$  و  $n=1$  بدست آورید و با هم مقایسه کنید.

حل:

در ابتدا از روی رابطه  $E_n = -13.6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ev}$  سطح انرژی اوربیتالها در شرایط یادشده را می یابیم:

$$n = 1, Z^* = 1 \Rightarrow E_n = -13.6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ev} = -13.6 \times \frac{1^2}{1^2} \text{ev} = -13.6 \text{ev}$$

$$n = 1, Z^* = 2 \Rightarrow E_n = -13.6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ev} = -13.6 \times \frac{2^2}{1^2} \text{ev} = -54.4 \text{ev}$$

$$n = 2, Z^* = 1 \Rightarrow E_n = -13.6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ev} = -13.6 \times \frac{1^2}{2^2} \text{ev} = -3.4 \text{ev}$$

$$n = 2, Z^* = 2 \Rightarrow E_n = -13.6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ev} = -13.6 \times \frac{2^2}{2^2} \text{ev} = -13.6 \text{ev}$$

پس اختلاف سطح انرژی اوربیتالها برای بار موثر هسته یکبار برابر یک و یکبار برابر دو در حالت  $n=1$  برابر خواهد بود با:

$$\Delta E = -13.6 - (-54.4) = 40.8 \text{ev}$$

در حالیکه اختلاف سطح انرژی اوربیتالها برای بار موثر هسته یکبار برابر یک و یکبار برابر دو در حالت  $n=2$  برابر خواهد بود با:

$$\Delta E = -3.4 - (-13.6) = 10.2 \text{ev}$$

بنابراین با افزایش بار موثر هسته در هر دو حالت  $n=2$  و  $n=1$  سطح انرژی اوربیتالها کاهش می یابد، اما مقدار کاهش سطح انرژی برای اوربیتالها با  $n$  کمتر، بیشتر است.

\*\*\*\*\*

با افزایش عدد اتمی اختلاف سطح انرژی اوربیتال های با  $n$  یکسان به صورت نسبی کاهش می یابد. مثلاً اختلاف سطح انرژی اوربیتال های  $2p$  و  $2s$  به صورت نسبی در اتم سرب ( $82Pb$ ) کمتر از اتم سدیم ( $23Na$ ) است. این مطلب را می توان بدین صورت توجیه کرد که در اتم سرب تفاوت قدرت نفوذ  $2p$  و  $2s$  تفاوت در احساس کردن یا احساس نکردن عمدتاً اثر پوششی دو الکترون داخلی است که معادل تفاوت در احساس کردن یا احساس نکردن جاذبه حداکثر دو پروتون در  $82$  پروتون کل است. در حالی که در اتم سدیم بنابه این بحث تفاوت  $2p$  و  $2s$  معادل حداکثر دو پروتون در یازده پروتون کل است که اهمیت آن بیشتر است و منجر به تفاوت نسبی بیشتر  $2p$  و  $2s$  در اتم سدیم نسبت به اتم سرب می شود. یعنی داریم:

$$\left| \frac{E_{2p Pb} - E_{2s Pb}}{E_{2p Pb}} \right| < \left| \frac{E_{2p Na} - E_{2s Na}}{E_{2p Na}} \right|$$

با در نظر گرفتن نکات یاد شده می توانیم تغییر پایداری اوربیتال های  $ns$  و  $(n-1)d$  مثل  $4s$  و  $3d$  را با تغییر عدد اتمی بررسی کنیم. اوربیتال  $4s$  به علت قدرت نفوذ بیشتر و احساس بار مؤثر هسته بیشتر در ابتدا یا در اعداد اتمی پایین تر پایدارتر از اوربیتال های  $3d$  است. اما با افزایش عدد اتمی کاهش سطح انرژی اوربیتال های  $3d$  به علت  $n$  کمتر سریع تر از اوربیتال  $4s$  است و در اعداد اتمی به حد کافی بالا اوربیتال های  $3d$  مشابه اوربیتال های  $3s, 3p$  پایدارتر از  $4s$  هستند. هنگام پر شدن اوربیتال ها، اوربیتال  $4s$  پایدارتر از  $3d$  است و بنابراین در هنگام پر شدن اول  $4s$  پر می شود. هنگام خالی شدن یا کندن الکترون اثر کندن الکترون و حذف دافعه های بین الکترون ها معادل اثر افزایش بار مؤثر هسته یا بار هسته است که در اثر این

افزایش، کاهش سطح انرژی اوربیتال های  $3d$  بیشتر از  $4s$  است و سطح انرژی  $3d$  پایین تر از  $4s$  قرار می گیرد. عبارتی در کاتیون فلزات واسطه خارجی،  $3d$  پایدارتر از  $4s$  است و آرایش الکترونی کاتیون در مقایسه با اتم خنثی به صورتی ست که گویا الکترون های  $4s$  از اتم کنده شده اند.

## جدول تناوبی

تمامی عناصر با اعداد اتمی  $Z=1$  تا  $Z=118$  تاکنون کشف شده اند یا در آزمایشگاههای هسته ای بصورت مصنوعی ساخته شده اند. البته تهیه عناصر با اعداد اتمی  $113, 115, 117$  و  $118$  بصورت قطعی تأیید نشده است. 98 عنصر اول ( اعداد اتمی از 1 تا 98) بصورت طبیعی وجود دارند، گرچه مقادیر برخی از آنها در طبیعت فوق العاده ناچیز است و بعضی از آنها قبل از کشف در طبیعت بصورت مصنوعی در آزمایشگاهها ساخته شده بودند. عناصر با اعداد اتمی  $Z=99$  تا  $Z=118$  تنها بصورت مصنوعی در آزمایشگاههای هسته ای تهیه شده اند. با در نظرگرفتن ایزوتوپ ها در حدود 340 نوع هسته یا اتم بصورت طبیعی در زمین وجود دارند که می توان آنها را به دو دسته کهن یا پرایموردیل (*Primordial Nuclides*) و غیرکهن یا غیرپرایموردیل (*Non-Primordial Nuclides*) طبقه بندی نمود. پرایموردیل ها آنهایی هستند که به همان شکل کنونی قبل از پیدایش زمین وجود داشتند و بر اثر انفجار بزرگ (*The Big Bang*)، تابش های کیهانی و انفجارهای سوپرنوا قبل از پیدایش منظومه شمسی بوجود آمده اند. 288 پرایموردیل می توان در نظر گرفت که 254 تای آنها پایدار هستند و 34 تای آنها باوجود رادیواکتیویته بودن بعلاوه نیمه عمر فوق العاده زیاد از پیدایش زمین تاکنون دوام آورده اند. غیرپرایموردیل ها که در حدود 51 تا هستند، آنهایی هستند که حضور آنها در زمین بعلاوه تولید پیوسته آنها بر اثر تابش کیهانی ( مثل  $^{14}C$  و  $^3H$  )، تجزیه مواد رادیواکتیو ( مثل رادون، پولونیم و رادیم در سنگ های محتوی اورانیوم بر اثر واپاشی اورانیوم ) و ... است. علاوه بر هسته های حاضر در زمین، در حدود 3000 هسته نیز بصورت مصنوعی تهیه شده اند که 556 تای آنها نیمه عمری بیش از یکساعت دارند.

جدول تناوبی یک طبقه بندی جدولی از عناصر شیمیایی بر اساس عدد اتمی (تعداد پروتونهای هسته)، آرایش الکترونی و خواص شیمیایی مشابه است. قبل از آنکه با جدول تناوبی ای که امروزه بطور گسترده بکار گرفته می شود، بیشتر آشنا شویم، اشاره ای به تاریخچه پیدایش این جدول می کنیم. تمایل به در نظرگرفتن عناصر بعنوان اجزا سازنده تمام موجودات و اشیا و دسته بندی و نامگذاری آنها از زمانهای خیلی قدیم وجود داشته است. در یونان باستان پنج عنصر زمین، آب، هوا، آتش و اتر (*Aether*) در نظر می گرفتند که کمابیش بطور مشابه در دیگر تمدن ها نیز بکار می رفت و تا قرون وسطی و رونسانس فرهنگ و اندیشه در اروپا را تحت تاثیر خود قرار داده بود.

در سال 1789 آنتوان لاوزیه (*Antoine Lavoisier*) لیستی از 33 عنصر شیمیایی را که به گروههای گازها، فلزات، نافلزات و زمینی ها طبقه بندی شده بودند، منتشر کرد. در سال 1829، ولفگانگ دوبرینر (*Johan Wolfgang Dobereiner*) مشاهده نمود که برخی از عناصر مثل لیتیم، سدیم و پتاسیم خواص مشابهی مانند نرم بودن و واکنش پذیر بودن دارند و هنگامیکه بر اساس جرم اتمی مرتب می شوند، جرم اتمی وسطی بطور تقریبی میانگین جرم اتمی اولی و سومی است و بر این اساس قانون سه تایی ها (*Law of Triads*) را ارائه نمود. بر این اساس دانشمند آلمانی ژلمین (*Leopold Gmelin*) در سال 1843، 10 سه تایی بصورت سه گروه چهار عضوی و یک گروه پنج عضوی ارائه نمود. در سال 1857، دوماس (*Jean Baptiste Dumas*) روابط بین گروههای مختلف فلزات را توصیف کرد. با وجوداینکه شیمیدانهای زیادی روابط گوناگونی بین دسته های کوچکی از عناصر تشخیص داده بودند، همچنان یک طرح کلی برای در برگرفتن تمام عناصر وجود نداشت.

در سال 1858، اگوست ککوله (*August Kekule*) مشاهده نمود که کربن در ترکیبات خود مثل متان ( $CH_4$ ) معمولا به چهار اتم دیگر پیوند می خورد و بر اساس آن بتدریج مفهوم ظرفیت که عناصر مختلف با تعداد اتمهای مختلفی ترکیب می شوند، شکل



گرفت و در بررسی شباهت خواص شیمیایی و گروه بندی عناصر بعنوان یک فاکتور مهم در نظر گرفته شد. در سال 1862، زمینشناسی به نام چانکور توپس (*Alexandre-Emile Beguyer de Chancourtois*) نشان داد که هنگامیکه عناصر در یک مارپیچ بر روی یک استوانه بر اساس افزایش جرمهای اتمیشان مرتب می شوند، عناصر با خواص شیمیایی مشابه در فاصله های منظمی تکرار می شوند. او از اصطلاحات زمینشناسی بجای اصطلاحات شیمی استفاده کرده بود و کارش فاقد شکل یا نمودار بود، از این رو توجه کمی به کار او شد. در سال 1864، ژولیوس میر (*Julius Lothar Meyer*) جدولی از 44 عنصر که براساس ظرفیتشان مرتب شده بود، ارائه داد. جدول نشان می داد که عناصر با خواص مشابه معمولاً ظرفیت یکسانی نیز دارند. بطور همزمان ویلیام ادلینگ (*William Odling*) طبقه بندی از 57 عنصر ارائه داد که براساس جرمهای اتمیشان مرتب شده بودند. باوجود برخی بی نظمی ها و جاهای خالی، او متوجه یک تناوب در جرمهای اتمی شد که موافق با عناصری که معمولاً بعلت خواص مشابه در یک گروه قرار داده می شدند، بود. ادلینگ به قانون تناوبی اشاره کرد، اما آن را پیگیری نکرد. در سالهای 1863 تا 1866، جان نیولندز (*John Newlands*) مقالاتی ارائه داد و اشاره کرد که هنگامیکه عناصر بر اساس افزایش جرمهای اتمیشان مرتب می شوند، خواص شیمیایی و فیزیکی یکسان در فاصله های هشتایی تکرار می شود و آن را به تناوب اکتاواها در موزیک ارتباط داد و از این رو مورد استقبال قرار نگرفت. بهر حال نیولندز جدولی از عناصر ارائه داد و از آن برای حدس زدن وجود عناصر گم شده ای مثل ژرمانیم استفاده کرد. در سال 1867، گوستاوس هنریش (*Gustavus Hinrichs*) یک سیستم تناوبی مارپیچی بر اساس طیف ها و جرمهای اتمی و تشابه خواص ارائه داد، اما کار او هم مورد استقبال قرار نگرفت. دیمیتری مندلیف (*Dmitri Mendeleev*) در سال 1869 و میر در سال 1870 (که توسعه یافته کار ارائه شده اش در سال 1864 بود) بطور جداگانه جداول تناوبی خود را ارائه دادند که هر دو عناصر را در سطرها یا ستون ها به ترتیب جرمهای اتمیشان لیست کرده بودند و هنگامیکه خواص عناصر تکرار می شد، یک سطر یا ستون جدید آغاز می شد. مورد قبول واقع شدن و مشهور شدن جدول تناوبی مندلیف از آنجا ناشی شد که او در جدول خود جاهای خالی برای عناصری که براساس شباهت در خواص به نظر کشف نشده بودند، در نظر گرفت. البته او اولین کسی نبود که اینکار را انجام می داد، اما بعنوان اولین کسی شناخته شد که بر اساس خواص تناوبی در جدول خود، خواص آن عناصر کشف نشده مثل گالیم و ژرمانیم را حدس زد. همچنین او در برخی موارد ترتیب جرمهای اتمی را در نظر نمی گرفت و برخی عناصر مجاور هم مثل تلوریم و ید را برخلاف ترتیب جرمهای اتمیشان جابجا می کرد تا گروه بندی بهتری بر اساس خواص شیمیایی ارائه دهد. در سال 1871، مندلیف فرم دیگری از جدول خود را ارائه داد که در آن گروهها با عناصر مشابه در هشت ستون از I تا VIII قرار گرفته بودند. با توسعه تئوری های اتمی معلوم شد که مندلیف ناخودآگاه عناصر را در جدول خود بر اساس اعداد اتمی یا بار هسته شان مرتب کرده است و مرتب سازی عناصر بر حسب افزایش عدد اتمی با در نظر گرفتن آرایش الکترونی ها روش مناسبی برای طبقه بندی آنهاست.

با کشف عناصر بیشتر و توسعه تئوریهها جدول تناوبی پیشنهاد شده توسط مندلیف به مرور عوض شد. طرح جدول تناوبی استاندارد یا معمول کنونی به جدول ارائه شده توسط دمینگ (*Horace Groves Deming*) در سال 1923 برمیگردد که بطور گسترده منتشر شد. البته در جدول دمینگ اکتینیدها به اشتباه بعنوان سطر چهارم بلوک *d* محسوب می شدند که در سال 1945، سیرگ (*Glenn Seaborg*) پیشنهاد کرد که اکتینیدها مانند لانتانیدها در حال پر کردن زیرلایه *f* هستند و معلوم شد که حق با اوست.

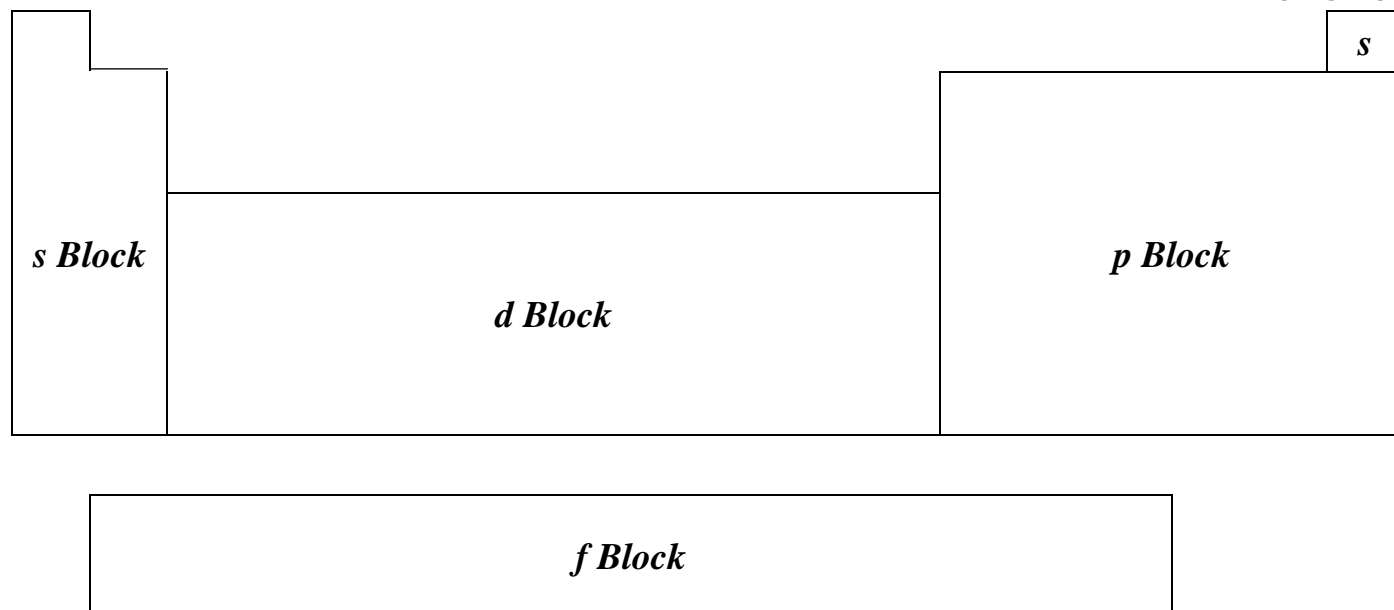


1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18  
 IA IIA IIIB IVB VB VIB VIIB VIIIB IB IIB IIIA IVA VA VIA VIIA VIIIA

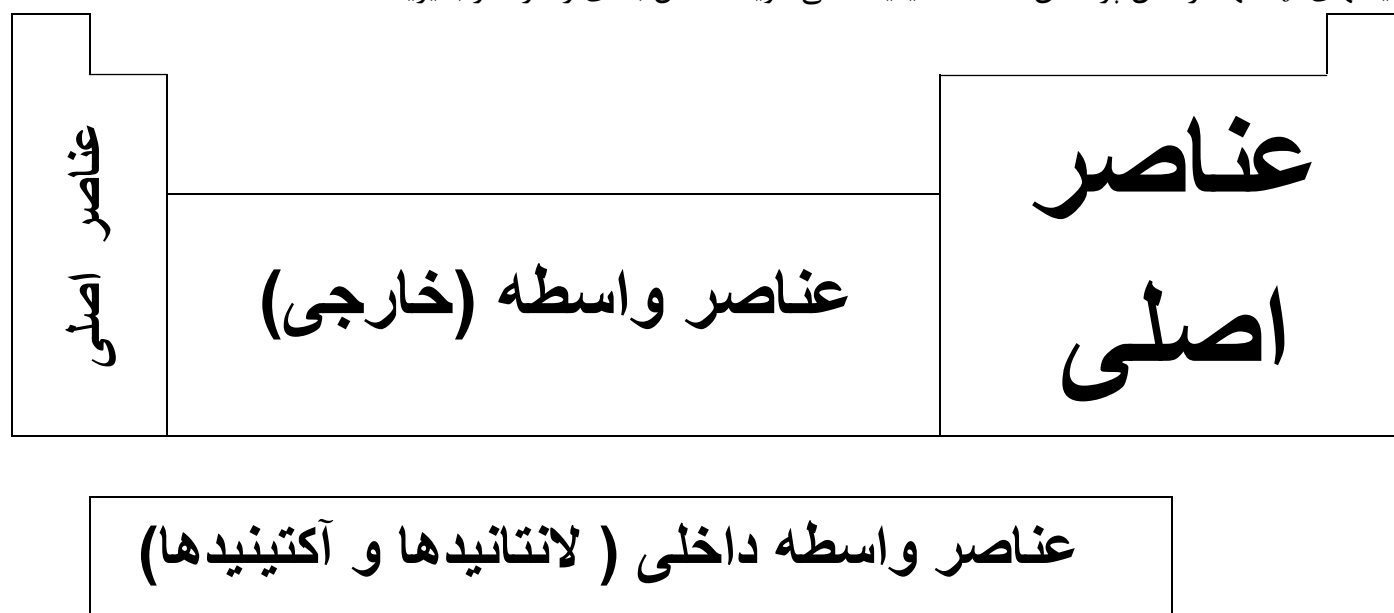
${}_1H$																	${}_2He$
${}_3Li$	${}_4Be$											${}_5B$	${}_6C$	${}_7N$	${}_8O$	${}_9F$	${}_{10}Ne$
${}_{11}Na$	${}_{12}Mg$											${}_{13}Al$	${}_{14}Si$	${}_{15}P$	${}_{16}S$	${}_{17}Cl$	${}_{18}Ar$
${}_{19}K$	${}_{20}Ca$	${}_{21}Sc$	${}_{22}Ti$	${}_{23}V$	${}_{24}Cr$	${}_{25}Mn$	${}_{26}Fe$	${}_{27}Co$	${}_{28}Ni$	${}_{29}Cu$	${}_{30}Zn$	${}_{31}Ga$	${}_{32}Ge$	${}_{33}As$	${}_{34}Se$	${}_{35}Br$	${}_{36}Kr$
${}_{37}Rb$	${}_{38}Sr$	${}_{39}Y$	${}_{40}Zr$	${}_{41}Nb$	${}_{42}Mo$	${}_{43}Tc$	${}_{44}Ru$	${}_{45}Rh$	${}_{46}Pd$	${}_{47}Ag$	${}_{48}Cd$	${}_{49}In$	${}_{50}Sn$	${}_{51}Sb$	${}_{52}Te$	${}_{53}I$	${}_{54}Xe$
${}_{55}Cs$	${}_{56}Ba$	${}_{57}La$	${}_{72}Hf$	${}_{73}Ta$	${}_{74}W$	${}_{75}Re$	${}_{76}Os$	${}_{77}Ir$	${}_{78}Pt$	${}_{79}Au$	${}_{80}Hg$	${}_{81}Tl$	${}_{82}Pb$	${}_{83}Bi$	${}_{84}Po$	${}_{85}At$	${}_{86}Rn$
${}_{87}Fr$	${}_{88}Ra$	${}_{89}Ac$	${}_{104}Rf$	${}_{105}Db$	${}_{106}Sg$	${}_{107}Bh$	${}_{108}Hs$	${}_{109}Mt$	${}_{110}Ds$	${}_{111}Rg$	${}_{112}Cn$	${}_{113}Uut$	${}_{114}Fl$	${}_{115}Uup$	${}_{116}Lv$	${}_{117}Uus$	${}_{118}Uuo$

${}_{58}Ce$	${}_{59}Pr$	${}_{60}Nd$	${}_{61}Pm$	${}_{62}Sm$	${}_{63}Eu$	${}_{64}Gd$	${}_{65}Tb$	${}_{66}Dy$	${}_{67}Ho$	${}_{68}Er$	${}_{69}Tm$	${}_{70}Yb$	${}_{71}Lu$
${}_{90}Th$	${}_{91}Pa$	${}_{92}U$	${}_{93}Np$	${}_{94}Pu$	${}_{95}Am$	${}_{96}Cm$	${}_{97}Bk$	${}_{98}Cf$	${}_{99}Es$	${}_{100}Fm$	${}_{101}Md$	${}_{102}No$	${}_{103}Lr$

جدول تناوبی به چهار بلوک  $s$ ،  $p$ ،  $d$  و  $f$  می تواند تقسیم شود که در هر بلوک، زیرلایه مربوطه در حال پر شدن است. شکل بعدی را در نظر بگیرید.



در جدول تناوبی، به عناصری که اوربیتالهای  $s$  و  $p$  آنها در حال پر شدن است (یا در واقع در بلوک  $s$  یا  $p$  قرار دارند) عناصر گروه اصلی (*Main Group Elements*) یا بطور ساده تر عناصر اصلی، به عناصری که اوربیتالهای  $d$  آنها در حال پر شدن است (یا در واقع در بلوک  $d$  قرار دارند) فلزات واسطه خارجی یا بطور ساده تر فلزات واسطه (*Transition Metals*) و به عناصری که اوربیتالهای  $f$  آنها در حال پر شدن است (یا در واقع در بلوک  $f$  قرار دارند) فلزات واسطه داخلی (*Inner Transition Metals*) گفته می شود. به فلزات واسطه داخلی که اوربیتالهای  $4f$  آنها در حال پر شدن است، لانتانیدها و به فلزات واسطه داخلی که اوربیتالهای  $5f$  آنها در حال پر شدن است، آکتینیدها می گویند. شکل بعدی را در نظر بگیرید.



همانطور که گفتیم، گروهها با شماره گروه از یک تا هیجده مشخص می شوند. در قدیم که امروزه نیز استفاده می شود، گروههای عناصر اصلی با IA تا VIIIA (معادل 1، 2 و 13 تا 18) و گروههای عناصر واسطه با IB تا VIIIB (معادل 3 تا 12) مشخص می شدند. شماره گذاری گروههای عناصر واسطه بر اساس شباهت آنها با گروههای عناصر اصلی از لحاظ ظرفیت بوده است. همچنین هر گروه معمولا به نام عنصر بالایی یا همان سردسته گروه که عنصر گروه با کمترین عدد اتمی است، خوانده می شود. مثلا گروه آهن را می توان در نظر گرفت که شامل آهن، روتنیم، اسمیم و هاسیم است. برخی گروهها نیز نامهای مخصوص خودشان را دارند که در جدول زیر به همراه علت نامگذاری ذکر شده است.

شماره گروه	نام اختصاصی	دلیل نامگذاری
گروه 1 یا IA	گروه فلزات قلیایی (Alkali Metals)	بوجود آوردن قلیا (باز) موقع واکنش فلزات گروه با آب
گروه 2 یا IIA	گروه فلزات قلیایی خاکی (Alkaline Earth Metals)	بوجود آوردن قلیا (باز) موقع واکنش اکسید فلزات گروه با آب که اکسید فلزات گروه زمانی در طبقه بندی خاکهها یا زمینی ها ( ترکیبات غیرفلز نامحلول در آب و مقاوم در برابر حرارت) قرار می گرفتند.
گروه 5 یا VA	گروه نیکتوژنها (Pnictogens)	ویژگی سرفه آوردگی یا خفه کنندگی نیتروژن در غیاب اکسیژن
گروه 6 یا VIA	گروه کالکوژنها (Chalcogens)	حضور در ترکیبات اغلب سنگ های معدنی
گروه 7 یا VIIA	گروه هالوژنها (Halogens)	بوجود آوردن نمکها مثل نمک دریا
گروه 8 یا VIIIA	گروه گازهای نجیب یا بی اثر (Noble or Inert Gases)	عدم واکنش پذیری یا واکنش پذیری خیلی کم

عناصر واقع در گروههای یکسان معمولا در آرایش الکترونی بعد از گاز نجیب ماقبل خود مشابهند. بعنوان مثال آرایش الکترونی برای عناصر گروه تیتانیوم یعنی  $72\text{Hf}$  و  $40\text{Zr}$ ،  $22\text{Ti}$  و  $104\text{Rf}$  به ترتیب بصورت  $[\text{Ar}]4s^23d^2$ ،  $[\text{Kr}]5s^24d^2$ ،  $[\text{Xe}]6s^24f^45d^2$  و  $[\text{Rn}]7s^25f^46d^2$  است که همگی به  $(n-1)d^2ns^2$  (بعلاوه  $(n-2)f^4$  در صورت وجود) ختم می شوند. البته گاهی اوقات نیز آرایش الکترونی عناصر همگروه بطور جزئی با هم متفاوت است. بعنوان مثال آرایش الکترونی برای عناصر گروه نیکل یعنی  $46\text{Pd}$ ،  $28\text{Ni}$  و  $78\text{Pt}$  به ترتیب بصورت  $[\text{Ar}]4s^23d^8$ ،  $[\text{Kr}]4d^{10}$  و  $[\text{Xe}]6s^15f^45d^9$  است. عناصر واقع در گروههای اصلی یکسان حتما در آرایش الکترونی لایه اصلی آخر که لایه والانس نیز نامیده می شود، یکسانند. جدول بعدی این مطلب را نشان می دهد.

گروه	آرایش الکترونی لایه آخر
IA(1) (فلزات قلیایی)	$ns^1$
IIA(2) (فلزات قلیایی خاکی)	$ns^2$
IIIA(13) (گروه بور)	$ns^2np^1$
IVA(14) (گروه کربن)	$ns^2np^2$
VA(15) (گروه نیتروژن)	$ns^2np^3$
VIA(16) (گروه اکسیژن)	$ns^2np^4$
VIIA(17) (گروه هالوژن ها)	$ns^2np^5$
VIIIA(18) (گروه گازهای نجیب)	$ns^2np^6$

عناصر واقع در گروه‌های یکسان معمولاً خواص شیمیایی کمابیش یکسانی نشان می‌دهند، البته با افزایش فاصله آنها در یک گروه ممکن است تغییرات قابل توجهی از بابت خواص وجود داشته باشد. گاهی اوقات عناصر واقع در دوره های یکسان نیز خواص مشابهی دارند، مثلاً لانتانیدها در دوره ششم و آکتینیدها در دوره هفتم یا به مقدار کمتر فلزات واسطه خارجی همدوره را می‌توان در نظر گرفت. همچنین ممکن است برای برخی عناصر که در یک یا چند ویژگی بخصوص مشترکند، دسته بندی های مخصوصی در نظر گرفته شود. بعنوان مثال می‌توان فلزات گرانبها (*Precious Metals*) را در نظر گرفت که در طبیعت کمیابند، گرانبها هستند و شامل طلا، نقره، پلاتین، پالادیم، روتنیم، رودیم، اسمیم و ایریدیم می‌شوند.

عناصر را می‌توان به فلزات (*Metals*)، نافلزات (*Nonmetals*) و شبه فلزات (*Metalloids*) طبقه بندی کرد. بطور معمول اتمهای فلزات براحتی الکترون از دست می‌دهند و کاتیون بوجود می‌آورند، در حالیکه اتمهای نافلزات براحتی الکترون می‌گیرند و آنیون بوجود می‌آورند. شبه فلزات هم از نظر خواص مابین فلزات و نافلزات هستند. بعدها با خواص فلزات، نافلزات و شبه فلزات بیشتر و دقیقتر آشنا خواهیم شد. در حدود 91 عنصر از 118 عنصر جدول تناوبی فلز هستند. شکل بعدی موقعیت فلزات، نافلزات و شبه فلزات را در جدول تناوبی نشان می‌دهد که فلزات با رنگ طوسی، نافلزات با رنگ آبی و شبه فلزات با رنگ سبز نمایش داده شده‌اند. در جدول بعدی عناصری که خواص شیمیائیشان بطور دقیق معلوم نیست، بدون رنگ هستند.

$1H$																	$2He$
$3Li$	$4Be$											$5B$	$6C$	$7N$	$8O$	$9F$	$10Ne$
$11Na$	$12Mg$											$13Al$	$14Si$	$15P$	$16S$	$17Cl$	$18Ar$
$19K$	$20Ca$	$21Sc$	$22Ti$	$23V$	$24Cr$	$25Mn$	$26Fe$	$27Co$	$28Ni$	$29Cu$	$30Zn$	$31Ga$	$32Ge$	$33As$	$34Se$	$35Br$	$36Kr$
$37Rb$	$38Sr$	$39Y$	$40Zr$	$41Nb$	$42Mo$	$43Tc$	$44Ru$	$45Rh$	$46Pd$	$47Ag$	$48Cd$	$49In$	$50Sn$	$51Sb$	$52Te$	$53I$	$54Xe$
$55Cs$	$56Ba$	$57La$	$72Hf$	$73Ta$	$74W$	$75Re$	$76Os$	$77Ir$	$78Pt$	$79Au$	$80Hg$	$81Tl$	$82Pb$	$83Bi$	$84Po$	$85At$	$86Rn$
$87Fr$	$88Ra$	$89Ac$	$104Rf$	$105Db$	$106Sg$	$107Bh$	$108Hs$	$109Mt$	$110Ds$	$111Rg$	$112Cn$	$113Uut$	$114Fl$	$115Uup$	$116Lv$	$117Uus$	$118Uuo$

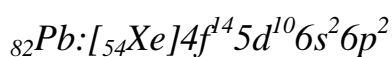
$58Ce$	$59Pr$	$60Nd$	$61Pm$	$62Sm$	$63Eu$	$64Gd$	$65Tb$	$66Dy$	$67Ho$	$68Er$	$69Tm$	$70Yb$	$71Lu$
$90Th$	$91Pa$	$92U$	$93Np$	$94Pu$	$95Am$	$96Cm$	$97Bk$	$98Cf$	$99Es$	$100Fm$	$101Md$	$102No$	$103Lr$

خوب است که عناصر گروه های اصلی را بصورت گروه به گروه بعلاوه سطر اول عناصر واسطه بخاطر بسپاریم. این امر در حل سوالهای مربوط به جدول تناوبی می تواند مفید واقع شود. بخاطر سپردن گازهای نجیب به همراه اعداد اتمیشان نیز می تواند در بدست آوردن آرایش الکترونی عناصر مفید باشد. مثالهای بعدی را در نظر بگیرید.

مثال: آرایش الکترونی سرب ( $82Pb$ ) را در حالت پایه بنویسید.

حل:

عدد اتمی سرب بین اعداد اتمی گازهای نجیب زنون ( $54Xe$ ) و رادون ( $86Rn$ ) است. بنابراین آرایش الکترونی سرب به صورت ترکیب آرایش الکترونی زنون با 54 الکترون و آرایش الکترونی  $82-54=28$  الکترون باقیمانده خواهد بود. از آنجائیکه زنون گاز نجیب دوره پنجم است، 28 الکترون باقیمانده در زیرلایه های مربوط به تناوب بعدی یعنی تناوب ششم که عبارتند از  $5d, 4f, 6s$  و  $6p$  به ترتیب قرار خواهند گرفت و در نهایت آرایش الکترونی سرب به صورت زیر خواهد بود:



\*\*\*\*\*

مثال: در آرایش الکترونی ایندیم ( $49In$ ) در حالت پایه چند اوربیتال با  $m_l = -2$  بصورت پر شده هستند؟

حل:

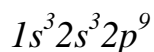
هر زیرلایه  $d$  یا  $f$  پر شده یک اوربیتال با  $m_l = -2$  بصورت پر شده دارد. بنابراین برای تعیین تعداد اوربیتالها با  $m_l = -2$  بصورت پر شده در ایندیم بایستی تعداد زیرلایه های  $d$  یا  $f$  پر شده آن را بدست آوریم. ایندیم در گروه بور که شامل بور، آلومینیوم، گالیم، ایندیم و تالیوم است، قرار دارد. بنابراین ایندیم در سه تناوب بعد از بور قرار دارد و از آنجائیکه بور در تناوب دوم است، ایندیم در تناوب پنجم خواهد بود. در تناوب های اول، دوم و سوم پر شدن زیرلایه  $d$  یا  $f$  را نداریم. در تناوب چهارم زیرلایه  $3d$  پر می شود و در تناوب پنجم قبل از ایندیم زیرلایه  $4d$  پر می شود. پس در آرایش الکترونی ایندیم در حالت پایه دو زیرلایه  $d$  پر و دو اوربیتال با  $m_l = -2$  بصورت پر شده خواهیم داشت.

\*\*\*\*\*

مثال: فرض کنید عدد کوانتومی مغناطیسی اسپینی ( $m_s$ ) بجای دو مقدار می توانست سه مقدار داشته باشد. در اینصورت آرایش الکترونی گاز نجیب دوره دوم متعلق به جدول تناوبی جدید به چه صورت می شد؟

حل:

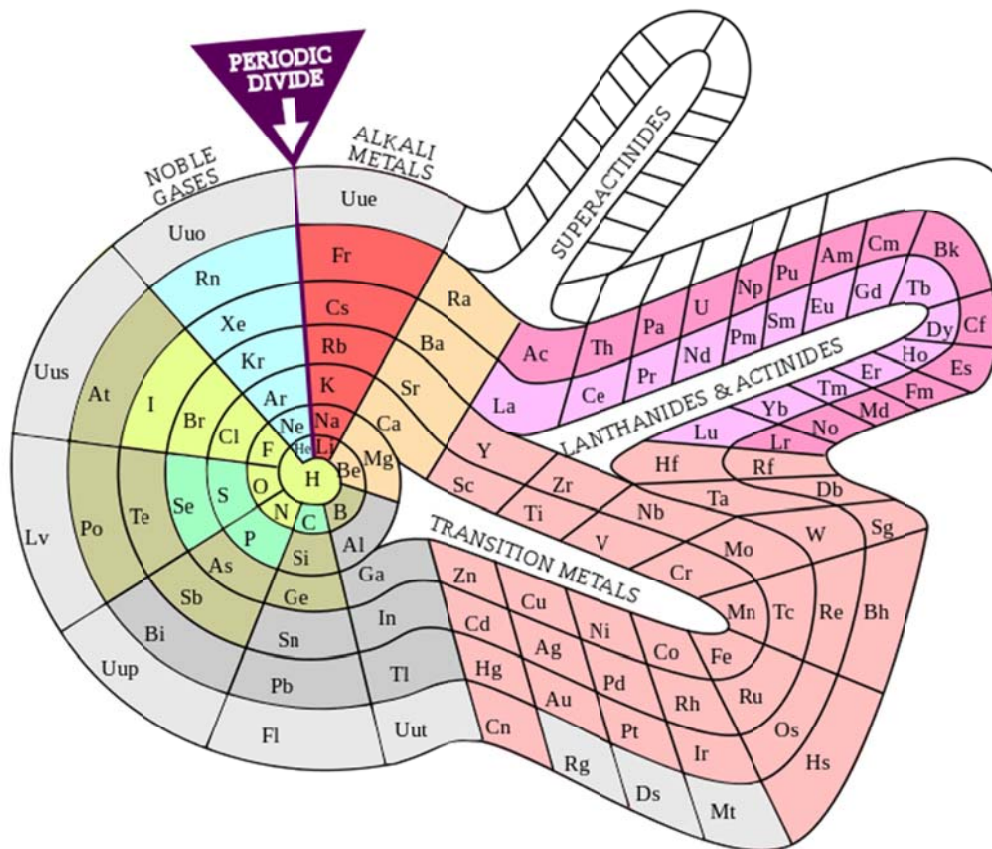
اگر  $m_s$  می توانست سه مقدار داشته باشد، ظرفیت هر اوربیتال بجای دو الکترون برابر سه الکترون می شد. در اینصورت آرایش الکترونی گاز نجیب دوره دوم که در آن اوربیتال ها و زیر لایه های مربوط به تناوب اول و دوم یعنی  $1s, 2s, 2p$  و  $2p$  کاملاً پر هستند، به صورت زیر می شد:



\*\*\*\*\*

علاوه بر فرم استاندارد جدول تناوبی، طرحهای بسیار دیگری نیز برای آن وجود دارند. بعد از ارائه جدول تناوبی مندلیف در حدود 700 طرح گوناگون برای جدول تناوبی منتشر شده است. بعنوان مثال می توان طرح تئودور بنفی (*Theodor Benfey*) مربوط به سال 1960 را که بصورت مارپیچ است و در شکل بعدی نمایش داده شده است، در نظر گرفت.





جدول تناوبی تئودور بنفی (Theodor Benfey)

گاهی اوقات موقع نمایش جدول تناوبی ممکن است اطلاعاتی از قبیل حالت ( گاز، مایع یا جامد بودن) عنصر در دما و فشار اتاق، دمای ذوب و جوش، شعاع اتمی و ... نیز با استفاده از رنگ، عدد، شکل یا نوشته بر روی جدول تناوبی نمایش داده شوند. بعنوان مثال اشکال بعدی را در نظر بگیرید.

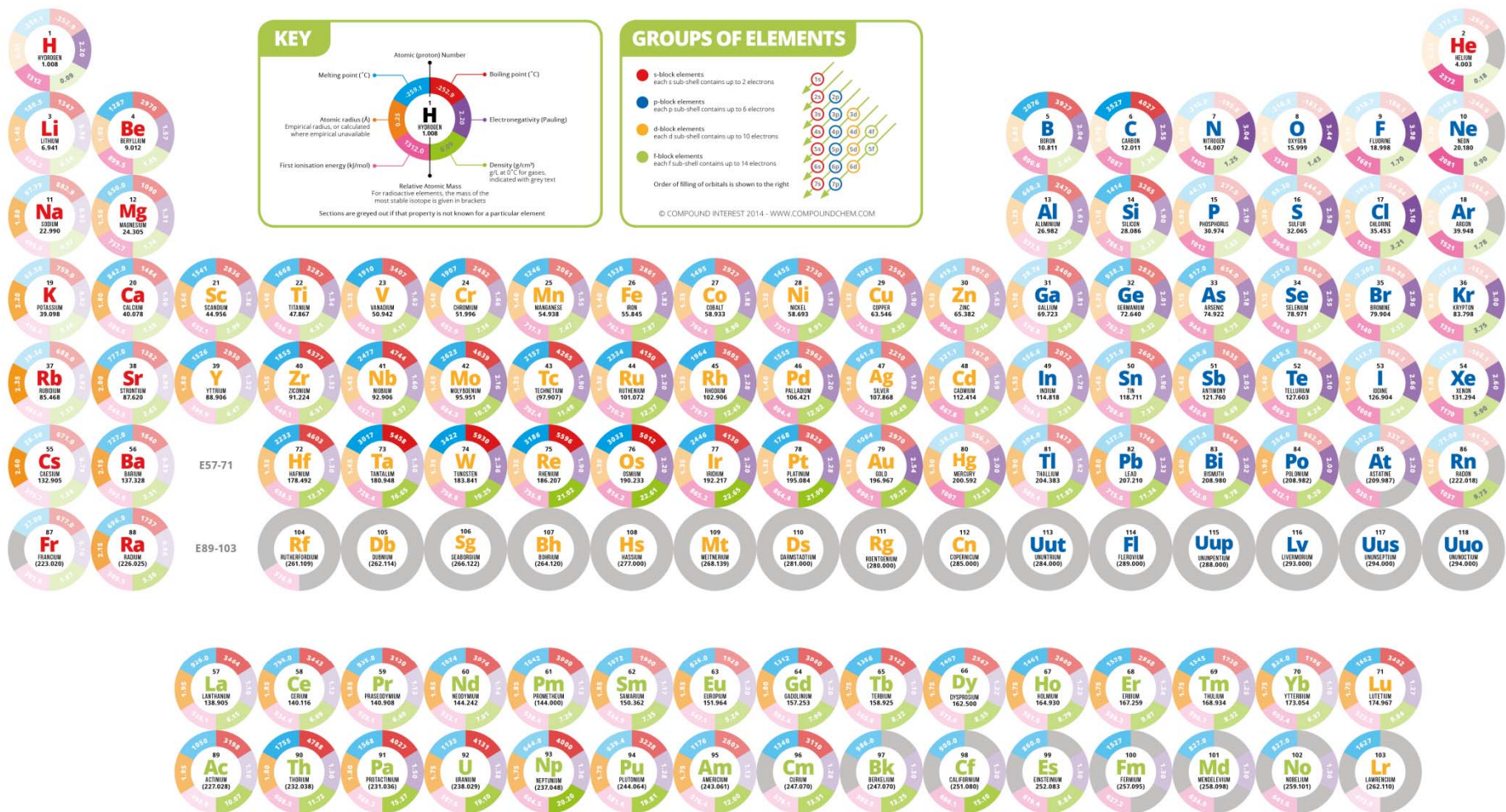
Elements & Country of Discovery																					
1 H	UK 23, Sweden 19, Germany 19, U.S.A. 17, France 17, Russia 6, Austria 2																2 He				
3 Li	4 Be	Denmark 2, Spain 2, Swit. 2, Finland 1, Italy 1, Romania 1														5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	Known to ancients														13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf				
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Lv	116 Uu	117 Uue	118 Uuo				
101 Pa	102 U	103 Np	104 Pu	105 Am	106 Cm	107 Bk	108 Cf	109 Es	110 Fm	111 Md	112 No	113 Lr	114 Rn	115 Ac	116 Th	117 Pa	118 U				

Credit given to both where joint or independently discovered. IUPAC recognised only. Collated by Jamie Gallagher, @jamielgall



# THE PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18



NOTES: For elements with more than one allotrope, the properties of the most common allotrope are given. Different allotropes may have differing melting points, boiling points, and densities. The discoveries of elements 113, 115, 117 & 119 have yet to be confirmed, and as such their names and symbols are only placeholders until official names are designated.



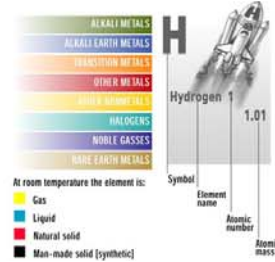
PRODUCED BY THE FOUNDATION FOR EDUCATION, SCIENCE AND TECHNOLOGY FOR NATIONAL SET WEEK 2003

# PERIODIC TABLE of the ELEMENTS



DEPARTMENT OF  
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Proudly sponsored by the  
**SHUTTLEWORTH  
FOUNDATION**  
(Supporting good education)  
Tel: 011 26198011 Fax: 011 26198100 www.shuttleworth.org



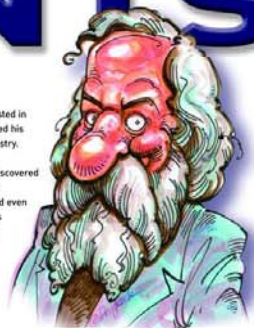
## DMITRI MENDELEYEV (1834 - 1907)

The Russian chemist, Dmitri Mendeleev, was the first to observe that if elements were listed in order of atomic mass, they showed regular (periodical) repeating properties. He formulated his discovery in a periodic table of elements, now regarded as the backbone of modern chemistry.

The crowning achievement of Mendeleev's periodic table lay in his prophecy of then, undiscovered elements. In 1869, the year he published his periodic classification, the elements gallium, germanium and scandium were unknown. Mendeleev left spaces for them in his table and even predicted their atomic masses and other chemical properties. Six years later, gallium was discovered and his predictions were found to be accurate. Other discoveries followed and their chemical behaviour matched that predicted by Mendeleev.

This remarkable man, the youngest in a family of 17 children, has left the scientific community with a classification system so powerful that it became the cornerstone in chemistry teaching and the prediction of new elements ever since.

In 1955, element 101 was named after him: Md, Mendelievium.



IA 1 <b>H</b> Hydrogen 1 1.01	IIA 2 <b>Li</b> Lithium 3 6.94	<b>Be</b> Beryllium 4 9.01											VIIA 17 <b>F</b> Fluorine 9 19.00	VIIIA 18 <b>He</b> Helium 2 4.00									
<b>Na</b> Sodium 11 22.99	<b>Mg</b> Magnesium 12 24.31											<b>N</b> Nitrogen 7 14.01	<b>O</b> Oxygen 8 16.00	<b>Ne</b> Neon 10 20.18									
<b>K</b> Potassium 19 39.10	<b>Ca</b> Calcium 20 40.08	<b>Sc</b> Scandium 21 44.96	<b>Ti</b> Titanium 22 47.88	<b>V</b> Vanadium 23 50.94	<b>Cr</b> Chromium 24 52.00	<b>Mn</b> Manganese 25 54.94	<b>Fe</b> Iron 26 55.85	<b>Co</b> Cobalt 27 58.93	<b>Ni</b> Nickel 28 58.69	<b>Cu</b> Copper 29 63.55	<b>Zn</b> Zinc 30 65.39	<b>Ga</b> Gallium 31 69.72	<b>Ge</b> Germanium 32 72.61	<b>As</b> Arsenic 33 74.92	<b>Se</b> Selenium 34 78.96	<b>Br</b> Bromine 35 79.90	<b>Kr</b> Krypton 36 83.80						
<b>Rb</b> Rubidium 37 85.47	<b>Sr</b> Strontium 38 87.62	<b>Y</b> Yttrium 39 88.91	<b>Zr</b> Zirconium 40 91.22	<b>Nb</b> Niobium 41 92.91	<b>Mo</b> Molybdenum 42 95.94	<b>Tc</b> Technetium 43 (98)	<b>Ru</b> Ruthenium 44 101.07	<b>Rh</b> Rhodium 45 102.91	<b>Pd</b> Palladium 46 106.42	<b>Ag</b> Silver 47 107.87	<b>Cd</b> Cadmium 48 112.41	<b>In</b> Indium 49 114.82	<b>Sn</b> Tin 50 118.71	<b>Sb</b> Antimony 51 121.76	<b>Te</b> Tellurium 52 127.60	<b>I</b> Iodine 53 126.90	<b>Xe</b> Xenon 54 131.29						
<b>Cs</b> Caesium 55 132.91	<b>Ba</b> Barium 56 137.33	Lanthanide Series	<b>Hf</b> Hafnium 72 178.49	<b>Ta</b> Tantalum 73 180.95	<b>W</b> Tungsten 74 183.85	<b>Re</b> Rhenium 75 186.21	<b>Os</b> Osmium 76 190.23	<b>Ir</b> Iridium 77 192.22	<b>Pt</b> Platinum 78 195.08	<b>Au</b> Gold 79 196.97	<b>Hg</b> Mercury 80 200.59	<b>Tl</b> Thallium 81 204.38	<b>Pb</b> Lead 82 207.20	<b>Bi</b> Bismuth 83 208.98	<b>Po</b> Polonium 84 (209)	<b>At</b> Astatine 85 (210)	<b>Rn</b> Radon 86 (222)						
<b>Fr</b> Francium 87 (223)	<b>Ra</b> Radium 88 (226)	Actinide Series	<b>Rf</b> Rutherfordium 104 (261)	<b>Db</b> Dubnium 105 (262)	<b>Sg</b> Seaborgium 106 (263)	<b>Bh</b> Bohrium 107 (264)	<b>Hs</b> Hassium 108 (265)	<b>Mt</b> Meitnerium 109 (266)	<b>La</b> Lanthanum 57 138.91	<b>Ce</b> Cerium 58 140.12	<b>Pr</b> Praseodymium 59 140.91	<b>Nd</b> Neodymium 60 144.24	<b>Pm</b> Promethium 61 (145)	<b>Sm</b> Samarium 62 150.36	<b>Eu</b> Europium 63 151.96	<b>Gd</b> Gadolinium 64 157.25	<b>Tb</b> Terbium 65 158.93	<b>Dy</b> Dysprosium 66 162.50	<b>Ho</b> Holmium 67 164.93	<b>Er</b> Erbium 68 167.26	<b>Tm</b> Thulium 69 168.93	<b>Yb</b> Ytterbium 70 173.05	<b>Lu</b> Lutetium 71 174.96
									<b>Ac</b> Actinium 89 227.03	<b>Th</b> Thorium 90 232.04	<b>Pa</b> Protactinium 91 231.04	<b>U</b> Uranium 92 238.03	<b>Np</b> Neptunium 93 (237)	<b>Pu</b> Plutonium 94 (244)	<b>Am</b> Americium 95 (243)	<b>Cm</b> Curium 96 (247)	<b>Bk</b> Berkelium 97 (247)	<b>Cf</b> Californium 98 (251)	<b>Es</b> Einsteinium 99 (252)	<b>Fm</b> Fermium 100 (257)	<b>Md</b> Mendelevium 101 (258)	<b>No</b> Nobelium 102 (259)	<b>Lr</b> Lawrencium 103 (260)



Foundation for Education,  
Science & Technology

## برخی خواص اتمی و تناوبی

بسیاری از خواص اتمها در جدول تناوبی روندهای تکراری و تناوبی نشان می دهد که در ادامه با برخی از آنها آشنا می شویم.

### بار مؤثر هسته (Effective Nuclear Charge)

خارجی ترین الکترونها یک اتم ( الکترونها لایه والانس) مهمترین نقش را در تعیین خواص شیمیائی آن اتم و عنصر بازی می کنند. از این رو مقدار بار مؤثر هسته روی آنها نیز در تعیین و مقایسه خواص اتمها و عناصر حائز اهمیت است.

در یک دوره از جدول تناوبی از چپ به راست به تدریج یک پروتون به هسته و یک الکترون به آخرین لایه اضافه می شود. از آن جایی که الکترون های یک لایه اثر پوششی ناقصی بر روی هم دارند، نتیجه ی خالص افزایش پروتون ها و الکترون ها در یک دوره افزایش بار مؤثر هسته برای کل الکترون ها من جمله خارجی ترین الکترونهاست.

در یک گروه از بالا به پایین از هر عنصر به عنصر پایینی تعداد پروتونها و تعداد الکترونها به یک مقدار افزایش می یابد، اما از آنجا که از بالا به پایین تعداد الکترونها هم لایه با اثر پوششی ناقص یا تعداد الکترونها واقع در یک لایه اصلی ماقبل با اثر پوششی نزدیک کامل اما غیر کامل افزایش می یابد، افزایش تعداد الکترونها بطور کامل افزایش تعداد پروتونها را جبران نمی کند و در یک گروه از بالا به پایین بار مؤثر هسته برای کل الکترون ها من جمله خارجی ترین الکترونها افزایش می یابد.

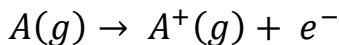
برای محاسبه بارمؤثر هسته روشهای گوناگونی مثل روش اسلیتر (Slater) و روش کلمانتی-ریموندی (Clementi-Raimondi) وجود دارد که معمولاً در شیمی معدنی بحث و بررسی می شوند. جدول بعدی بار مؤثر هسته محاسبه شده بروش کلمانتی-ریموندی را برای خارجی ترین الکترون هر اتم که الکترون  $ns$  یا  $np$  است ( باستثنای پالایم که آرایش الکترونی آن بصورت  $[Kr]4d^{10}$  و خارجی ترین الکترون آن الکترون  $4d$  است)، نشان می دهد.

$1H$ 1																	$2He$ 1.7
$3Li$ 1.3	$4Be$ 1.9											$5B$ 2.4	$6C$ 3.1	$7N$ 3.8	$8O$ 4.5	$9F$ 5.1	$10Ne$ 5.8
$11Na$ 2.5	$12Mg$ 3.3											$13Al$ 4.1	$14Si$ 4.3	$15P$ 4.9	$16S$ 5.5	$17Cl$ 6.1	$18Ar$ 6.8
$19K$ 3.5	$20Ca$ 4.4	$21Sc$ 4.6	$22Ti$ 4.8	$23V$ 5.0	$24Cr$ 5.1	$25Mn$ 5.3	$26Fe$ 5.4	$27Co$ 5.6	$28Ni$ 5.7	$29Cu$ 5.8	$30Zn$ 6.0	$31Ga$ 6.2	$32Ge$ 6.8	$33As$ 7.4	$34Se$ 8.3	$35Br$ 9.0	$36Kr$ 9.8
$37Rb$ 5.0	$38Sr$ 6.1	$39Y$ 6.3	$40Zr$ 6.4	$41Nb$ 5.9	$42Mo$ 6.1	$43Tc$ 7.2	$44Ru$ 6.5	$45Rh$ 6.6	$46Pd$ (13.6)	$47Ag$ 6.8	$48Cd$ 8.2	$49In$ 8.5	$50Sn$ 9.1	$51Sb$ 10.0	$52Te$ 10.8	$53I$ 11.6	$54Xe$ 12.4
$55Cs$ 6.4	$56Ba$ 7.6	$57La$ 9.3	$72Hf$ 9.2	$73Ta$ 9.5	$74W$ 9.9	$75Re$ 10.1	$76Os$ 10.3	$77Ir$ 10.6	$78Pt$ 10.8	$79Au$ 10.9	$80Hg$ 11.2	$81Tl$ 12.3	$82Pb$ 12.4	$83Bi$ 13.3	$84Po$ 14.2	$85At$ 15.2	$86Rn$ 16.1
$87Fr$ -	$88Ra$ -	$89Ac$ -	$104Rf$ -	$105Db$ -	$106Sg$ -	$107Bh$ -	$108Hs$ -	$109Mt$ -	$110Ds$ -	$111Rg$ -	$112Cn$ -	$113Uut$ -	$114Fl$ -	$115Uup$ -	$116Lv$ -	$117Uus$ -	$118Uuo$ -

$58Ce$ 10.8	$59Pr$ 7.7	$60Nd$ 9.3	$61Pm$ 9.4	$62Sm$ 8.0	$63Eu$ 8.1	$64Gd$ 8.2	$65Tb$ 8.3	$66Dy$ 8.3	$67Ho$ 8.4	$68Er$ 8.5	$69Tm$ 8.6	$70Yb$ 8.6	$71Lu$ 8.8
$90Th$ -	$91Pa$ -	$92U$ -	$93Np$ -	$94Pu$ -	$95Am$ -	$96Cm$ -	$97Bk$ -	$98Cf$ -	$99Es$ -	$100Fm$ -	$101Md$ -	$102No$ -	$103Lr$ -

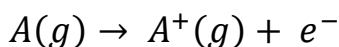
## انرژی یونش (IE or Ionization Energy)

به حداقل مقدار انرژی لازم برای کندن الکترون از یک اتم، مولکول یا یون در حالت گازی شکل انرژی یونش می گویند. بعنوان مثال انرژی یونش  $A$ ، حداقل مقدار انرژی لازم برای انجام واکنش زیر است:

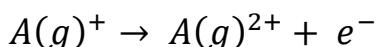


انرژی یونش معمولاً با واحد الکترون ولت بازای هر اتم، مولکول یا یون یا واحد کیلوژول بر مول گزارش می شود.

برای هر گونه بتعداد الکترونهاش می توان انرژی یونش تعریف کرد. انرژی های یونش یک گونه بصورت انرژی یونش اول یا نخستین انرژی یونش ( $IE_1$ )، انرژی یونش دوم یا دومین انرژی یونش ( $IE_2$ )، انرژی یونش سوم یا سومین انرژی یونش ( $IE_3$ ) و ... مشخص می شوند که در آنها اولین، دومین، سومین و ... بیانگر مرتبه یونش است و شماره الکترونی که کنده می شود، را نشان می دهد. در هر یونش الکترون با بیشترین سطح انرژی کنده می شود یا عبارتی اولویت با ناپایدارترین است. بعنوان مثال داریم:



$$IE_1 = \text{نخستین انرژی یونش } A = \text{انرژی یونش اتم } A$$



$$IE_2 = \text{دومین انرژی یونش } A = \text{انرژی یونش یون } A^+$$

.

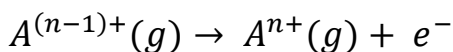
.

.

.

.

.

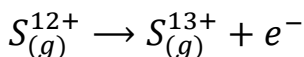


$$IE_n = n \text{مین انرژی یونش } A = \text{انرژی یونش یون } A^{(n-1)+}$$

مثال: سیزدهمین انرژی یونش گوگرد ( $I_{16}S$ ) مربوط به کدام واکنش است؟ آرایش الکترونی گونه های دخیل را بنویسید.

حل:

مربوط به واکنش زیر است:



که در آن آرایش الکترونی  $S_{(g)}^{12+}$  و  $S_{(g)}^{13+}$  بترتیب بصورت  $1s^2 2s^2$  و  $1s^2 2s^1$  است.

\*\*\*\*\*

## تغییرات انرژی های یونش متوالی یک عنصر

انرژی های یونش متوالی یک عنصر با افزایش مرتبه یونش، افزایش می یابد. با افزایش مرتبه یونش، جداکردن الکترون به علت افزایش بار مثبت یونی که الکترون از آن جدا می شود و در نتیجه افزایش جاذبه ها و کاهش دافعه ها، سخت تر می شود و انرژی مورد نیاز افزایش می یابد. در تغییرات انرژی های یونش متوالی یک عنصر دو نوع جهش (افزایش ناگهانی یا شدیدتر در مقایسه با روند افزایشی کلی معمول) مشاهده می شود: جهش های کوچک به خاطر معمولاً تغییر زیر لایه ها و بهم خوردن آرایش نیمه

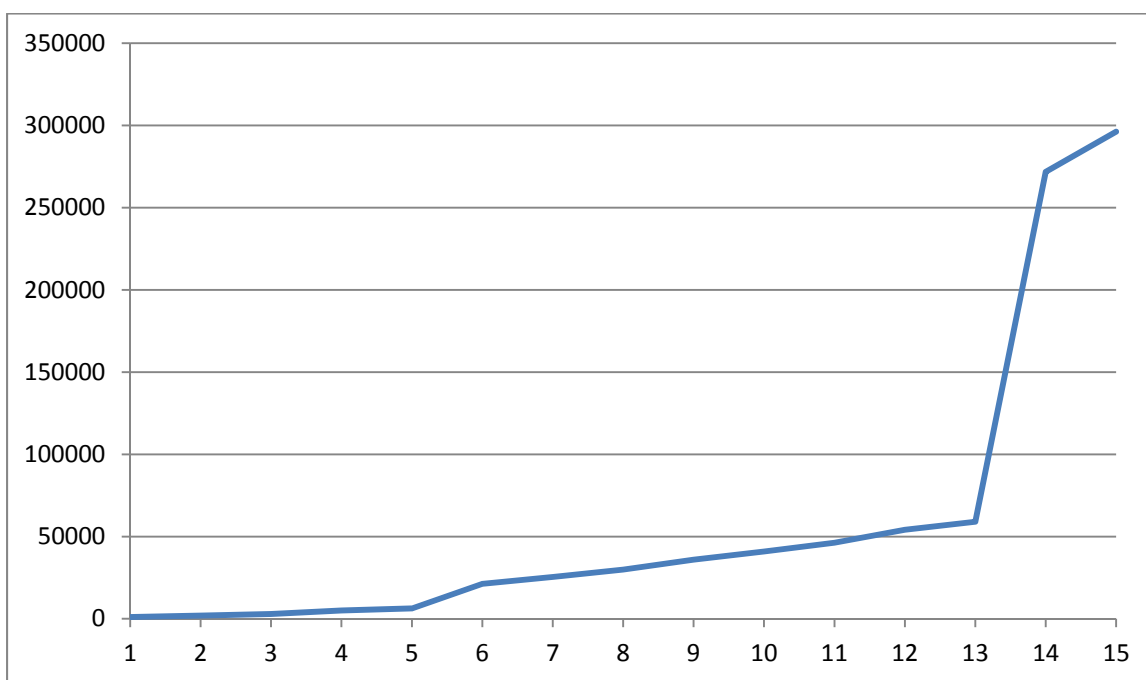


پر ( که اولی معمولا اهمیت بیشتری دارد) و جهش های بزرگ به خاطر تغییر لایه ها. جهش های کوچک و بزرگ منعکس کننده ی وجود زیرلایه ها و لایه ها هستند.

بعنوان مثال جدول و نمودار انرژی های یونش متوالی عنصر فسفر را که در ادامه آمده است، در نظر بگیرید. آرایش الکترونی فسفر به صورت  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$  و از  $IE_1$  تا  $IE_{15}$  بترتیب زیرلایه های  $2s, 2p, 3s, 3p$  و در نهایت  $1s$  الکترون از دست می دهند.

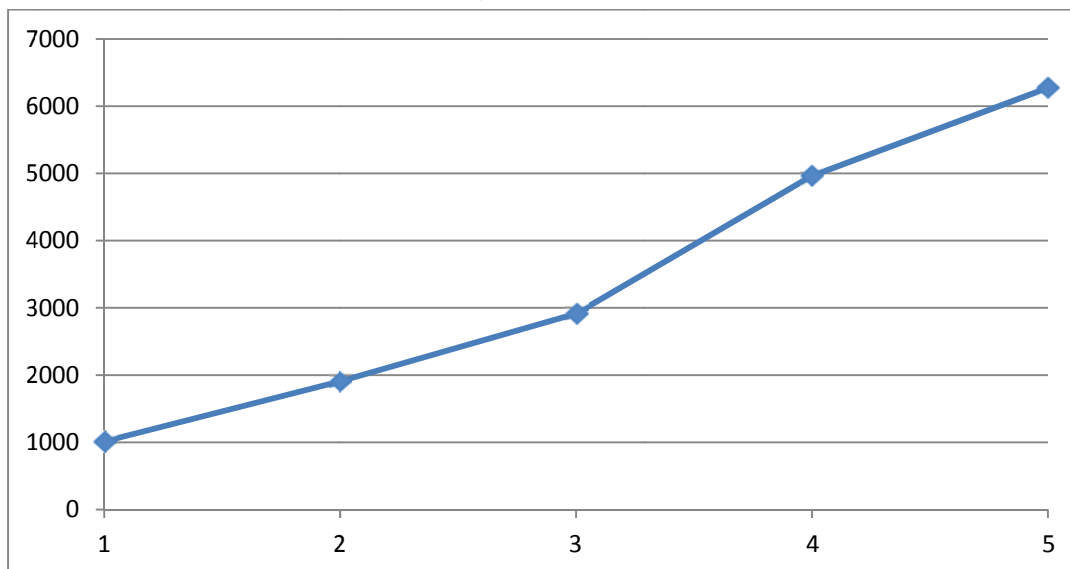
$IE_1$	1011.8
$IE_2$	1907
$IE_3$	2914.1
$IE_4$	4963.6
$IE_5$	6273.9
$IE_6$	21267
$IE_7$	25431
$IE_8$	29872
$IE_9$	35905
$IE_{10}$	40950
$IE_{11}$	46261
$IE_{12}$	54110
$IE_{13}$	59024
$IE_{14}$	271790
$IE_{15}$	296194

جدول انرژیهای یونش متوالی فسفر بر حسب کیلوژول بر مول

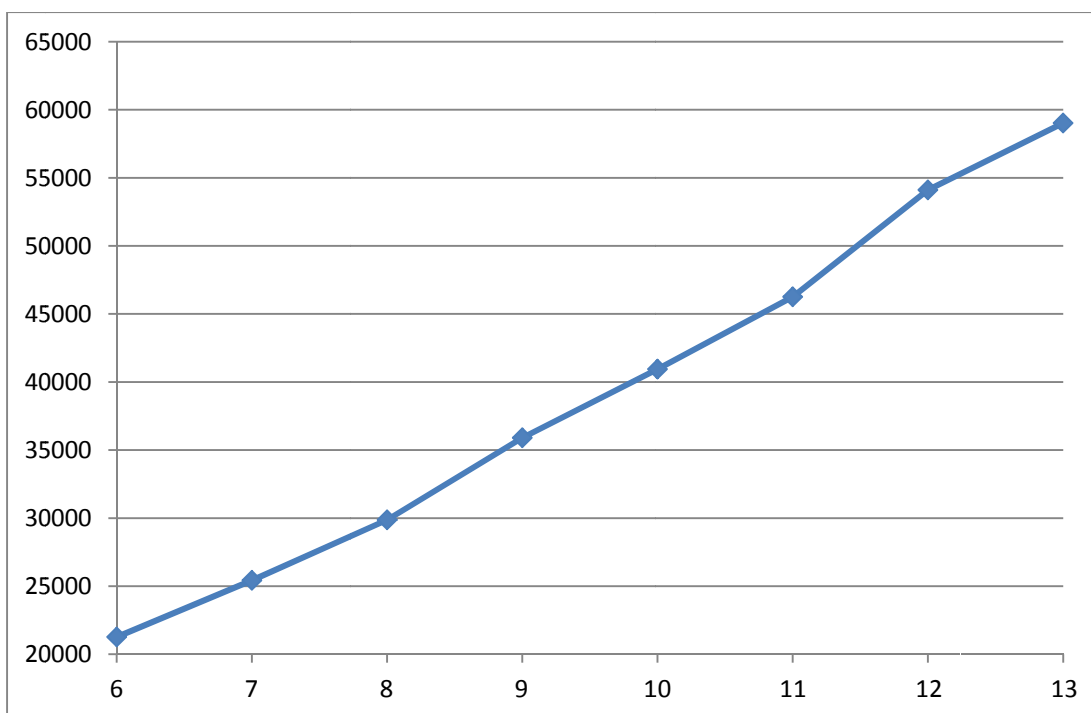


نمودار انرژیهای یونش متوالی فسفر بر حسب کیلوژول بر مول

با توجه به اعداد جدول و همچنین از روی نمودار می توان دید که از  $IE_5$  به  $IE_6$  بعلت تغییر لایه اصلی از  $n=3$  به  $n=2$  و از  $IE_{13}$  به  $IE_{14}$  بعلت تغییر لایه اصلی از  $n=2$  به  $n=1$  جهش بزرگ داریم. از طرفی با توجه به اعداد جدول از  $IE_3$  به  $IE_4$  بعلت تغییر زیرلایه از  $3p$  به  $3s$  و از  $IE_{11}$  به  $IE_{12}$  بعلت تغییر زیرلایه از  $2p$  به  $2s$  جهش کوچک داریم که در نمودارهای زیر بطور محسوس تری قابل مشاهده هستند. همچنین از  $IE_8$  به  $IE_9$  بعلت بهم خوردن آرایش نیمه پر جهش ریزی مشاهده می شود.



نمودار انرژیهای یونش  $IE_1$  تا  $IE_5$  فسفر بر حسب کیلوژول بر مول



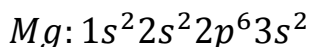
نمودار انرژیهای یونش  $IE_6$  تا  $IE_{13}$  فسفر بر حسب کیلوژول بر مول

نکته دیگری که در مورد انرژیهای یونش متوالی می توان در نظر گرفت اینست که در صورت عدم وجود جهش، نسبت انرژی یونش  $n$ ام به انرژی یونش ماقبل ( $\frac{IE_n}{IE_{n-1}}$ ) با افزایش  $n$  کاهش می یابد. این مطلب از آنجا ناشی می شود که در یونش  $n$ ام الکترون از یون با بار  $(n-1)+$  کنده می شود و در واقع از یون با بار  $n+$  دور می شود که هرچه  $n$  بزرگتر باشد، دور کردن الکترون و انرژی یونش مورد نیاز بیشتر می شود. از آنجائیکه با افزایش  $n$ ، از یک یونش به یونش بعدی مقدار افزایش نسبی بار یون یا نسبت بار یونهایی که الکترون از آنها دور می شود ( یعنی  $\frac{n}{n-1}$  )، کاهش می یابد، نسبت انرژی یونش بعدی به ماقبل هم کمتر می شود. در این راستا بیشترین افزایش نسبی بار یون از یک یونش به یونش بعدی در یونش اول به دوم صورت می گیرد و از این رو در صورت عدم وجود جهش، بیشترین نسبت دو انرژی یونش متوالی برای انرژی یونش دوم به اول مشاهده می شود. بعنوان مثال نسبت  $\frac{IE_2}{IE_1}$  برای اتم فسفر که در هر دوی آنها الکترون از زیرلایه  $3p$  کنده می شود، برابر  $1.88$  است، در حالیکه نسبت  $\frac{IE_{15}}{IE_{14}}$  برای اتم فسفر که در هر دوی آنها الکترون از زیرلایه  $1s$  کنده می شود، برابر  $1.09$  است. بعنوان مثال دیگر نسبت انرژی لازم برای کندن دو الکترون زیرلایه  $1s$  در اتم فلئور که نسبت  $\frac{IE_9}{IE_8}$  است، برابر  $1.16$  می باشد، در حالیکه در اتم مس که نسبت  $\frac{IE_{29}}{IE_{28}}$  است، برابر  $1.05$  می باشد.

همانطور که مثال انرژیهای یونش متوالی اتم فسفر نیز نمایش می دهد، تشخیص جهش های بزرگ به مراتب ساده تر از تشخیص جهش های کوچک است. در جهشهای بزرگ تغییرات انرژی یونش بسیار قابل توجه است ( گاهی اوقات حتی چهار تا پنج برابر می شود)، در حالیکه در حالت عادی ( بدون جهش بزرگ حتی با وجود جهش کوچک)  $IE_n$  بیشتر از  $IE_{n-1}$  اما معمولا کمتر از دو برابر  $IE_{n-1}$  است. از تعداد و محل رخداد جهش های بزرگ می توان برای تشخیص موقعیت عنصر در جدول تناوبی و شناسایی عنصر استفاده کرد. بطور کلی برای عناصر اصلی اگر در کل  $n$  جهش بزرگ داشته باشیم، عنصر متعلق به دوره  $(n+1)$  در جدول تناوبی است و اگر اولین جهش بزرگ از  $IE_m$  به  $IE_{m+1}$  باشد، عنصر متعلق به گروه  $mA$  است.

مثال: در کل انرژی های یونش متوالی یک عنصر، دو جهش بزرگ مشاهده می شود و اولین جهش بزرگ آن از انرژی یونش دوم به سوم رخ می دهد. این عنصر را با نام و نماد مشخص کرده و آرایش الکترونی آن را بنویسید.  
حل:

با توجه به مطالب بحث شده بایستی متعلق به گروه دوم تناوب سوم جدول تناوبی باشد و بنابراین منیزیم است که برای نماد و آرایش الکترونی آن داریم:



\*\*\*\*\*

مثال: نه انرژی یونش اول سه عنصر از عناصر اصلی به صورت زیر است، شماره گروه هر عنصر را تعیین کنید.

$IE_1$	$IE_2$	$IE_3$	$IE_4$	$IE_5$	$IE_6$	$IE_7$	$IE_8$	$IE_9$	
401	805	1446	2009	2633	3623	4271	21997	25437	(الف)
118	1091	1651	2281	3192	3969	4808	6092	6913	(ب)
136	434	655	2765	3544	4391	5567	6558	7614	(ج)

حل:

(الف) گروه هفت اصلی (VIIA)

(ب) گروه یک اصلی (IA)

(ج) گروه سه اصلی (IIIA)

\*\*\*\*\*

لازم بذکر است که بعلت نزدیکی سطح انرژی اوربیتالهای  $(n-1)d$  و  $(n-2)f$ ، موقع تغییر لایه اصلی بین  $ns$  و  $(n-1)d$  و  $(n-2)f$  جهش چندان بزرگی مشاهده نمی شود. بعنوان مثال جدول بعدی نسبت انرژی لازم برای کندن اولین الکترون زیرلایه  $3d$  به انرژی لازم برای کندن آخرین الکترون زیرلایه  $4s$  را برای چند عنصر نشان می دهد. دقت داشته باشید که در عناصر سری عناصر واسطه مربوط به دوره چهارم (اسکاندیم تا روی) با وجود خیلی نزدیک بودن سطح انرژی اوربیتالهای  $4s$  و  $3d$ ، نسبت انرژی یونش  $3d$  به  $4s$  بعلت نسبتا کم بودن  $n$  در  $\frac{IE_n}{IE_{n-1}}$  با توجه به بحث های قبلی نسبتا بالاست. از طرفی در عناصر با اعداد اتمی بالاتر مثل مولیبدن ( $42Mo$ ) با وجود نسبتا بالا بودن  $n$  در  $\frac{IE_n}{IE_{n-1}}$ ، نسبت انرژی یونش  $3d$  به  $4s$  همچنان بالاست که بعلت افزایش اختلاف سطح انرژی اوربیتالهای  $4s$  و  $3d$  است که آنهم از کاهش سریعتر سطح انرژی اوربیتالهای  $3d$  با افزایش عدد اتمی بعلت عدد کوانتومی اصلی کمتر ناشی می شود.

عنصر	انرژی یونش آخرین الکترون $4s$ ( بر حسب $kJ/mol$ )	انرژی یونش اولین الکترون $3d$ ( بر حسب $kJ/mol$ )	نسبت انرژی یونش $3d$ به $4s$
$_{21}Sc$	$IE_2=1235$	$IE_3=2388.6$	1.93
$_{22}Ti$	$IE_2=1309.8$	$IE_3=2652.5$	2.03
$_{23}V$	$IE_2=1414$	$IE_3=2830$	2.00
$_{24}Cr$	$IE_1=652.9$	$IE_2=1590.6$	2.44
$_{25}Mn$	$IE_2=1509$	$IE_3=3248$	2.15
$_{26}Fe$	$IE_2=1561.9$	$IE_3=2957$	1.89
$_{27}Co$	$IE_2=1648$	$IE_3=3232$	1.96
$_{28}Ni$	$IE_2=1753$	$IE_3=3395$	1.94
$_{29}Cu$	$IE_1=745.5$	$IE_2=1957.9$	2.63
$_{30}Zn$	$IE_2=1733.3$	$IE_3=3833$	2.21
$_{31}Ga$	$IE_3=2963$	$IE_4=6180$	2.09
$_{36}Kr$	$IE_8=12138$	$IE_9=22274$	1.84
$_{37}Rb$	$IE_9=14500$	$IE_{10}=26740$	1.84
$_{39}Y$	$IE_{11}=19900$	$IE_{12}=36090$	1.81
$_{42}Mo$	$IE_{14}=29196$	$IE_{15}=52490$	1.80

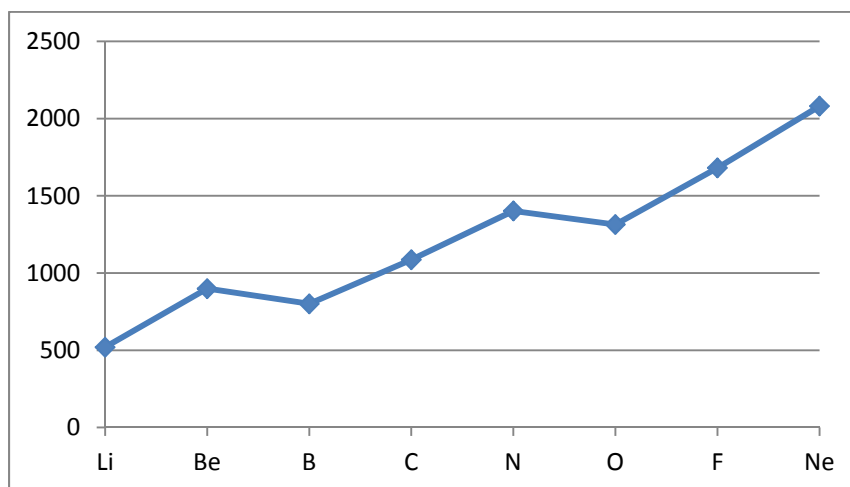


از آنجائیکه در ابتدا اختلاف سطح انرژی  $nd$  و  $np$  زیاد است، موقع تغییر زیر لایه از  $nd$  به  $np$  یک جهش قویتر ( در حد یک جهش بزرگ) از جهش های کوچک معمولی ( مثلاً بخاطر تغییر زیر لایه از  $np$  به  $ns$ ) مشاهده می شود، اما با افزایش عدد اتمی بعلت کاهش اختلاف نسبی سطح انرژی  $nd$  و  $np$  ( و به مقدار کمتر افزایش  $n$  در  $\frac{IE_n}{IE_{n-1}}$ ) این جهش ضعیف می شود و به یک جهش کوچک معمولی تبدیل می شود. بعنوان مثال جدول بعدی نسبت انرژی یونش  $3p$  به  $3d$  را برای چند عنصر نشان می دهد.

نسبت انرژی یونش $3p$ به $3d$	انرژی یونش اولین الکترون $3p$ ( بر حسب $kJ/mol$ )	انرژی یونش آخرین الکترون $3d$ ( بر حسب $kJ/mol$ )	عنصر
2.97	$IE_4=7090.6$	$IE_3=2388.6$	$_{21}Sc$
2.30	$IE_5=9581$	$IE_4=4174.6$	$_{22}Ti$
1.96	$IE_6=12363$	$IE_5=6298.7$	$_{23}V$
1.77	$IE_7=15455$	$IE_6=8744.9$	$_{24}Cr$
1.63	$IE_8=18770$	$IE_7=11500$	$_{25}Mn$
1.55	$IE_9=22540$	$IE_8=14580$	$_{26}Fe$
1.48	$IE_{10}=26570$	$IE_9=17959$	$_{27}Co$
1.43	$IE_{11}=30970$	$IE_{10}=21670$	$_{28}Ni$
1.39	$IE_{12}=35600$	$IE_{11}=25600$	$_{29}Cu$
1.35	$IE_{13}=40490$	$IE_{12}=29990$	$_{30}Zn$
1.23	$IE_{19}=75800$	$IE_{18}=61800$	$_{36}Kr$
1.17	$IE_{25}=121900$	$IE_{24}=104400$	$_{42}Mo$

### تغییرات نخستین انرژی یونش در عناصر مختلف

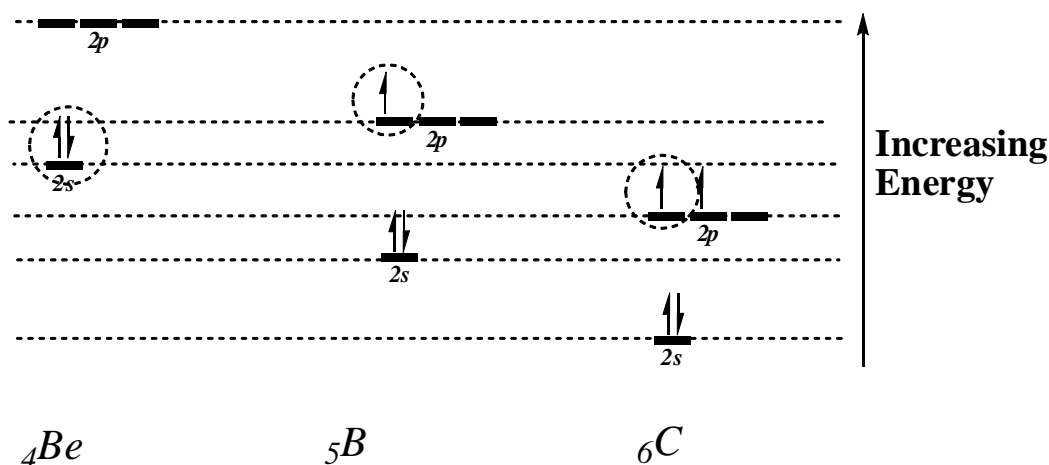
در نخستین انرژی یونش عناصر یک دوره الکترون از لایه ی یکسانی کنده می شود اما از چپ به راست بعلت افزایش بار مؤثر هسته، جدا کردن الکترون سخت تر می شود و نخستین انرژی یونش افزایش می یابد. نمودار بعدی نخستین انرژی یونش عناصر تناوب دوم را نشان می دهد و می توان بوضوح دید که روند کلی افزایش نخستین انرژی یونش از لیتیم به نئون است.



نخستین انرژی یونش عناصر تناوب دوم

همانطور که در نمودار دیده می شود، روند کلی یاد شده (افزایش نخستین انرژی یونش از چپ به راست در یک دوره) از گروه دو اصلی به سه اصلی و از گروه پنج اصلی به شش اصلی در دوره دوم جدول تناوبی صادق نیست. برای توجیه آنها می توان به صورت در ادامه آمده استدلال کرد.

علیرغم اینکه بار مؤثر هسته در بور بیشتر از بریلیم است، نخستین انرژی یونش بریلیم بیشتر از بور است. در بریلیم الکترون اول از  $2s$  کنده می شود، در حالیکه در بور از  $2p$  کنده می شود. زیرلایه  $2s$  از  $2p$  پایدارتر است و افزایش بار مؤثر هسته از بریلیم به بور هم نمی تواند سطح انرژی زیرلایه  $2p$  بور را کمتر از سطح انرژی زیرلایه  $2s$  بریلیم قرار دهد. پس در بریلیم در مقایسه با بور الکترون اول از زیرلایه پایدارتری کنده می شود و از این رو نخستین انرژی یونش بریلیم بیشتر از بور است. در حالیکه افزایش بار مؤثر هسته از بریلیم به کربن می تواند سطح انرژی زیرلایه  $2p$  کربن را کمتر از سطح انرژی زیرلایه  $2s$  بریلیم قرار دهد و از این رو نخستین انرژی یونش کربن بیشتر از بریلیم است. شکل زیر این مطالب را نشان می دهد:



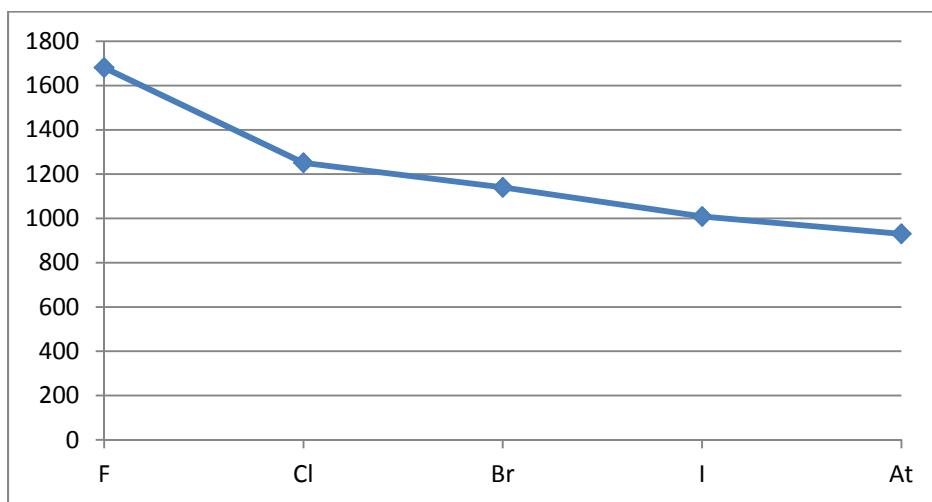
مقایسه سطح انرژی و پایداری  $2s$  و  $2p$  در اتم های  $Be$ ،  $B$  و  $C$ ، دقت داشته باشید که در هر مورد اوربیتالی که در یونش اول الکترون از دست می دهد، با دایره مشخص شده است.

لازم بذکر است که کاهش نخستین انرژی یونش از گروه دو اصلی به سه اصلی علاوه بر تناوب دوم، در تناوب های سوم ( از منیزیم به آلومینیوم) و چهارم ( از کلسیم به گالیم) نیز مشاهده می شود، اما در تناوب های پنجم ( از استرانسیم به ایندیم) و ششم ( از باریوم به تالیوم) بجای کاهش، مطابق روند کلی افزایش داریم که بیانگر اینست که در آنها اهمیت افزایش بار موثر هسته از اهمیت تغییر زیرلایه دهنده الکترون بیشتر است.

در مورد کاهش نخستین انرژی یونش از اتم نیتروژن به اتم اکسیژن می توان گفت که علیرغم بار مؤثر هسته بیشتر اتم اکسیژن نخستین انرژی یونش اتم نیتروژن به علت پایداری ناشی از آرایش نیمه پر بیشتر است. بعبارت دیگر موقع کندن اولین الکترون از اتم نیتروژن آرایش نیمه پر و پایداری ناشی از آرایش نیمه پر از دست می رود، در حالیکه موقع کندن اولین الکترون از اتم اکسیژن آرایش نیمه پر و پایداری ناشی از آرایش نیمه پر به دست می آید. پس پایداری ناشی از آرایش نیمه پر به نخستین انرژی یونش اتم نیتروژن می افزاید، در حالیکه از نخستین انرژی یونش اتم اکسیژن می کاهد و از این رو نخستین انرژی یونش اتم نیتروژن بیشتر از اتم اکسیژن می شود.

لازم بذکر است که کاهش نخستین انرژی یونش از گروه پنج اصلی به شش اصلی علاوه بر تناوب دوم، در تناوب های سوم ( از فسفر به گوگرد) و چهارم ( از آرسنیک به سلنیم) نیز مشاهده می شود، اما در تناوب های پنجم ( از آنتیموان به تلوریم) و ششم ( از بیسموت به پلونیوم) بجای کاهش، مطابق روند کلی افزایش داریم که بیانگر اینست که در آنها اهمیت افزایش بار موثر هسته و افزایش پایداری ناشی از آن از اهمیت پایداری ناشی از آرایش نیمه پر بیشتر است. این مطلب از آنجا ناشی می شود که از بالا به پایین پایداری ناشی از آرایش نیمه پر بعلاوه افزایش فاصله الکترونیهای واقع در اوربیتالهای همتراز با اسپین همسو از هم و در نتیجه کاهش جاذبه های مغناطیسی مربوطه، کاهش می یابد.

در یک گروه از جدول تناوبی از بالا به پایین تعداد لایه ها افزایش می یابد که معمولا همراه با افزایش فاصله الکترونیهای خارجی از هسته نیز است. این افزایش فاصله از هسته از بالا به پایین در یک گروه معمولا مهمتر از افزایش بار مؤثر هسته است. از این رو معمولا جاذبه الکترون های خارجی با هسته از بالا به پایین در یک گروه کم می شود و نخستین انرژی یونش کاهش می یابد. بعنوان مثال نمودار بعدی نخستین انرژی یونش عناصر گروه هفت اصلی ( هالوژنها) را نمایش می دهد.

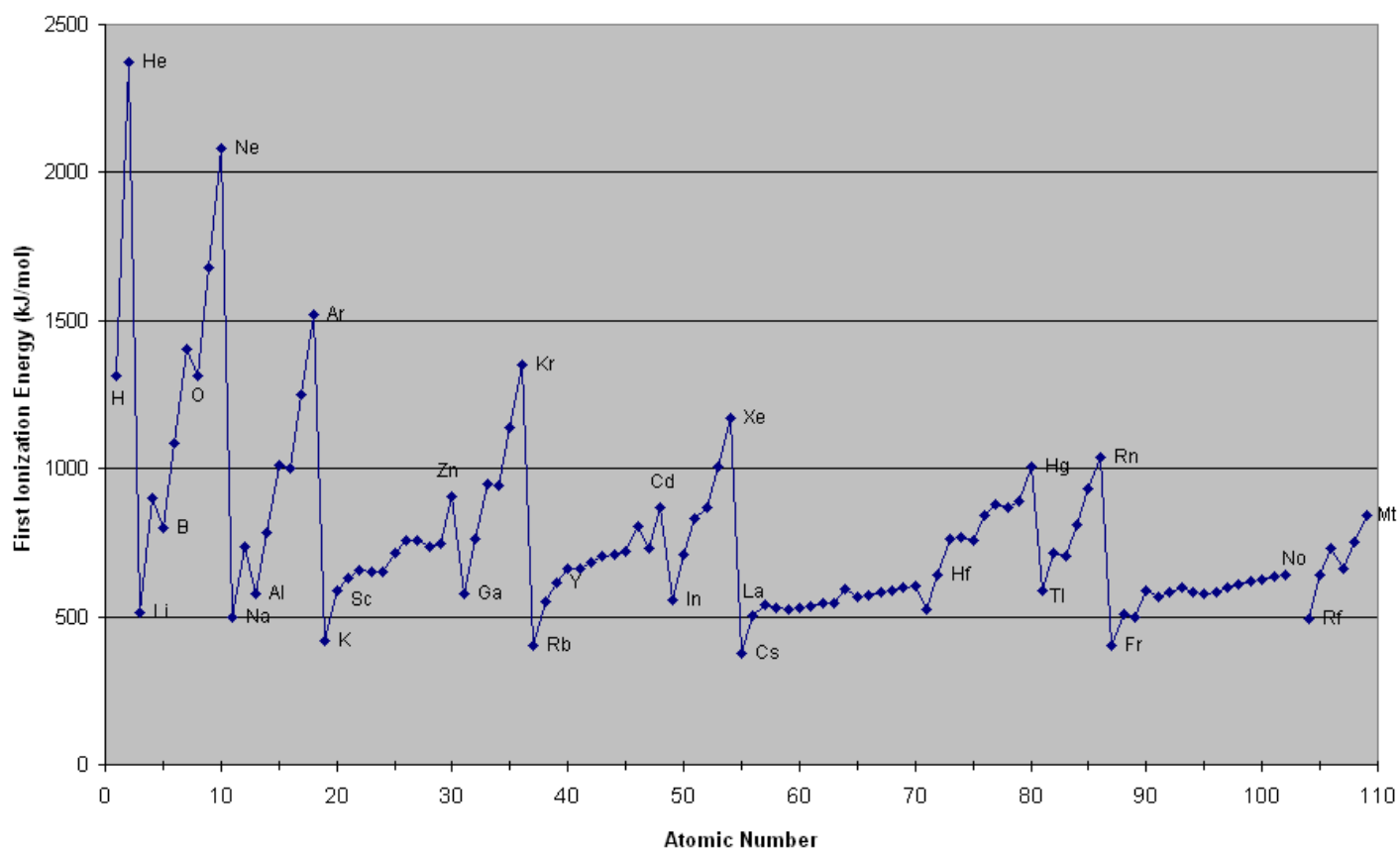


نمودار نخستین انرژی یونش هالوژنها

البته گاهی اوقات اهمیت افزایش بار موثر هسته بیشتر از اهمیت افزایش تعداد لایه هاست و انرژی نخستین یونش از عنصر بالاتر به عنصر همگروه پایین تر بجای کاهش، افزایش می یابد. در عناصر اصلی این مطلب برای آلومینیوم به گالیم، از ایندیم به تالیوم، از قلع به سرب، از سزیم به فرانسیم و از باریوم به رادیم صادق است.

در نهایت می توان نخستین انرژی یونش تمام عناصر را بر حسب عدد اتمی آنها در یک نمودار نمایش داد و با هم مقایسه کرد که این امر در نمودار بعدی صورت گرفته است. همانطور که در نمودار نیز می توان دید، بطور معمول فلزات انرژی یونش کمی دارند، در حالیکه نافلزات انرژی یونش زیادی دارند.

### Periodic Trends in First Ionization Energy



### نخستین انرژی یونش عناصر بر حسب عدد اتمی

برای مقایسه انرژی های یونش مرتبه بالاتر عناصر یا انرژی نخستین یونش کاتیون ها با بار دلخواه اما برابر می توان اتم های خنثی هم الکترون با یون هایی که قرار است در آن یونش الکترون از دست بدهند، را بدست آورد و برای این اتم های خنثی مقایسه ی نخستین انرژی های یونش را انجام داد و سپس همین مقایسه را به کاتیون ها با بار دلخواه یا انرژی های یونش مرتبه بالاتر تعمیم داد. مثال در ادامه آمده را در نظر بگیرید.

مثال: انرژی یونش سوم عناصر سدیم ( $_{11}\text{Na}$ )، منیزیم ( $_{12}\text{Mg}$ ) و آلومینیوم ( $_{13}\text{Al}$ ) را با هم مقایسه کنید.

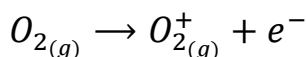
حل:

در یونش سوم سدیم، منیزیم و آلومینیوم از کاتیونهای  $Na^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$  و  $Al^{3+}$  الکترون می‌کنیم که به ترتیب با  $F$ ،  $Ne$  و  $10Ne$  هم الکترون هستند. از آنجائیکه ترتیب انرژی یونش اول فلئور، نئون و سدیم بصورت  $Ne > F > Na$  است، ترتیب انرژی یونش اول  $Na^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$  و  $Al^{3+}$  که همان ترتیب انرژی یونش سوم سدیم، منیزیم و آلومینیوم است، بصورت زیر خواهد بود:

$$IE_{3Mg} > IE_{3Na} > IE_{3Al}$$

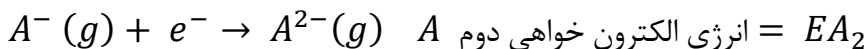
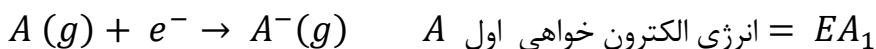
\*\*\*\*\*

بایستی توجه داشت که با افزایش مرتبه یونش استثناهای گروه پنج اصلی به شش اصلی و گروه دو اصلی به سه اصلی برای یونش اول، برای یونش های مرتبه بالاتر از بین می‌رود که این مطلب برای استثناهای گروه پنج اصلی به شش اصلی بعلت اهمیت کمتر پایداری نیمه پر در مقابل اختلاف پایداری زیرلایه‌ها زودتر رخ می‌دهد. بعنوان مثال در یونش دوم اکسیژن و فلئور (که به ترتیب با نیتروژن و اکسیژن هم الکترون هستند)، یونش دوم اکسیژن  $(3388.3kJ/mol)$  از فلئور  $(3374.2kJ/mol)$  بیشتر است، اما در یونش سوم فلئور و نئون (که به ترتیب مجدداً با نیتروژن و اکسیژن هم الکترون هستند)، یونش سوم نئون  $(6122kJ/mol)$  از فلئور  $(6050.4kJ/mol)$  بیشتر است. بعنوان مثال دیگر در یونش دوم گوگرد و کلر (که به ترتیب با فسفر و گوگرد هم الکترون هستند)، یونش دوم کلر  $(2298kJ/mol)$  از گوگرد  $(2252kJ/mol)$  بعلت بار موثر هسته بیشتر در کلر بیشتر است، علیرغم آنکه در این یونش پایداری نیمه پر گوگرد از بین می‌رود. بعنوان مثال دیگر استثنای یونش اول از بریلیم  $(IE_1=899.5)$  به بور  $(IE_1=800.6)$ ، در یونش دوم از بور  $(IE_2=2427.1)$  به کربن  $(IE_2=2352.6)$ ، در یونش سوم از کربن  $(IE_3=4620.5)$  به نیتروژن  $(IE_3=4578.1)$  و در یونش چهارم از نیتروژن  $(IE_4=7475)$  به اکسیژن  $(IE_4=7469.2)$  مشاهده می‌شود، اما در یونش پنجم از اکسیژن  $(IE_5=10989.5)$  به فلئور  $(IE_5=11022.7)$  و به بعد مشاهده نمی‌شود. در نهایت خوب است بدانیم همانگونه که برای اتمها انرژی یونش در نظر می‌گیریم، می‌توانیم بطور مشابه برای مولکولها هم انرژی یونش در نظر بگیریم که مقدار انرژی لازم برای کندن الکترون از مولکول در فاز گاز خواهد بود. بعنوان مثال انرژی یونش مولکول  $O_2$  انرژی لازم برای انجام واکنش زیر است:



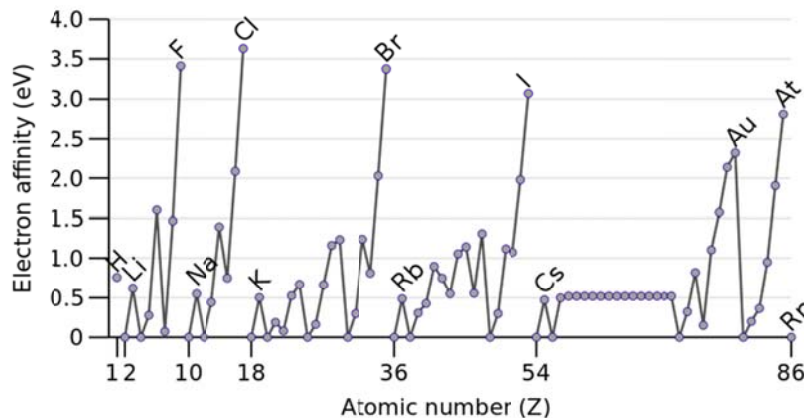
### انرژی الکترون خواهی (EA or Electron Afficiency)

به انرژی آزاد شده هنگام افزودن الکترون به اتم یا یون های گازی شکل انرژی الکترون خواهی گفته می‌شود و با  $EA$  نشان داده می‌شود. انرژی الکترون خواهی  $n$ ام برای یک گونه که با  $EA_n$  نشان داده می‌شود، بیانگر انرژی آزاد شده هنگام افزودن  $n$ مین الکترون به آن گونه در فاز گاز است. بعنوان مثال داریم:



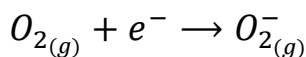
الکترون خواهی معمولاً با واحد الکترون ولت بازای هر اتم، مولکول یا یون یا واحد کیلوژول بر مول گزارش می‌شود. علامت انرژی الکترون خواهی معمولاً برعکس آنچه در گرمادینامیک و ترمودینامیک است، در نظر گرفته می‌شود. در گرمادینامیک و ترمودینامیک





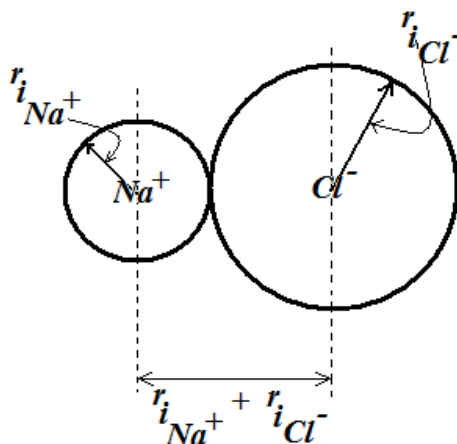
با افزایش تمایل اتم به گرفتن الکترون در واکنش الکترون خواهی انرژی بیشتری آزاد می شود. نافلزات که تمایل بیشتری برای الکترون دارند در واکنش الکترون خواهی معمولاً انرژی بیشتری در مقایسه با فلزات آزاد می کنند. به طور کلی با افزایش بار مؤثر هسته و کاهش شعاع اتم مقدار انرژی آزاد شده در واکنش الکترون خواهی اول افزایش می یابد. عبارتی روند کلی، افزایش انرژی آزاد شده در واکنش الکترون خواهی اول از چپ به راست در یک دوره و از پایین به بالا در یک گروه است. دقت در مقادیر انرژی الکترون خواهی اول گزارش شده در جدول قبلی نشان می دهد که روند کلی یاد شده برای الکترون خواهی اول بخصوص در گروهها پر از استثناست. بعنوان مثال باوجود اینکه بار مؤثر هسته و انرژی یونش گازهای نجیب در یک دوره بیشترین است، دادن الکترون به آنها نیازمند صرف انرژی است. این مطلب از آنجا ناشی می شود که لایه ی آخر آنها پر است و الکترون جدید مجبور است به لایه ی دورتر برود که در آن هم بار مؤثر هسته خیلی کمتر است (تمام الکترونها برای الکترون جدید الکترون داخلی با اثر پوششی کامل یا تقریباً کامل محسوب می شوند) و هم فاصله از هسته بیشتر است. بعنوان مثال دیگر می توان اتم نیتروژن را در نظر گرفت که بار مؤثر هسته خوب و شعاع کوچکی دارد، با این وجود بعلت بهم خوردن آرایش نیمه پر پایدار نیتروژن در واکنش الکترون خواهی اول، آنیون پایدار نمی دهد و الکترون خواهی اول اتم نیتروژن در برخی منابع در حد صفر گزارش شده است و در برخی منابع دیگر بعلت ناپایدار بودن آنیون حاصل برای اتم نیتروژن الکترون خواهی اول گزارش نشده است. مثال دیگر مقایسه انرژی الکترون خواهی اول فلئور و کلر است. فلئور و کلر هر دو دارای بار مؤثر هسته زیاد هستند و از نظر آن چندان اختلاف ندارند ( بار مؤثر هسته برای آخرین الکترون فلئور و کلر به ترتیب برابر  $5.1$  و  $6.1$  است)، اما فلئور کوچکتر از کلر است ( شعاع اتمی فلئور و کلر بر حسب آنگستروم به ترتیب برابر  $0.64$  و  $0.99$  است)، بنابراین الکترون خواهی اول بزرگتری برای فلئور انتظار می رود. با این وجود انرژی الکترون خواهی اول برای فلئور و کلر به ترتیب برابر  $328$  و  $349$  کیلوژول بر مول است که نشان می دهد الکترون خواهی اول کلر بزرگتر است و کلر انرژی بیشتری در مقایسه با فلئور آزاد می کند. این مطلب بدین صورت توجیه می شود که فلئور در ابتدا بعلت اندازه کوچکتر تمایل بیشتری برای الکترون دارد و موقع افزایش جزیبی یا ناقص الکترون فلئور بیشتر از کلر انرژی آزاد میکند، اما بعلت اندازه کوچک فلئور زودتر از الکترون اشباع می شود و افزودن کامل یک الکترون دافعه ی بین الکترون ها را در فلئور کوچک بطور چشمگیری افزایش می دهد و بعلت همین دافعه و ناپایداری ناشی از آن فلئور در الکترون خواهی اول انرژی کمتری در مقایسه با کلر آزاد می کند. با توجه به مطالب بالا میتوان توجیه نمود که چرا اتم کلر در الکترون خواهی اول بیشترین انرژی را در بین سایر عناصر آزاد می کند.

همانگونه که برای اتمها انرژی الکترون خواهی در نظر می گیریم، می توانیم بطور مشابه برای مولکولها هم انرژی الکترون خواهی در نظر بگیریم که مقدار انرژی آزاد شده موقع اضافه کردن الکترون به مولکول در فاز گاز خواهد بود. بعنوان مثال انرژی الکترون خواهی اول مولکول  $O_2$  انرژی آزاد شده در واکنش زیر است:



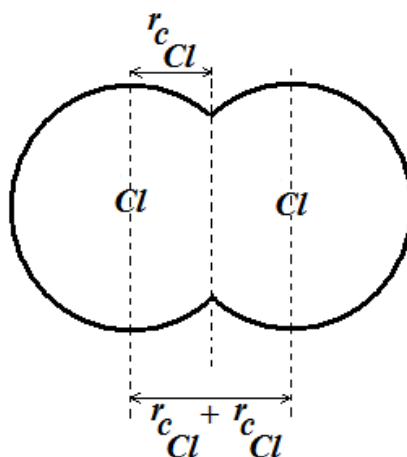
### شعاع های اتمی و یونی

شعاع های اتمی و یونی برای مشخص شناختن حد و مرز اتم ها و یون ها به کار می روند. با توجه به مدل اوربیتال اتمی برای یک اتم یا یون جدا و تنها نمی توان حد و مرز قائل شد، اما در ساختار بلوری مواد جامد که اتم ها و یون ها در کنار هم قرار می گیرند می توان حد و مرز آنها را مشخص کرد و با فرض آنها بصورت کره های صلب به آنها شعاع های یونی ( *Ionic Radius* ) که می تواند با  $r_i$  نشان داده شود، کووالانسی ( *Covalent Radius* ) که می تواند با  $r_c$  نشان داده شود) و واندروالسی ( *Van der waals Radius* ) که می تواند با  $r_v$  نشان داده شود) نسبت داد. بطور خلاصه و ساده فاصله مراکز هسته های دو یون مماس بر هم برابر مجموع شعاعهای یونی آن دو یون، فاصله مراکز هسته های دو اتم تشکیل دهنده پیوند کووالانسی با هم برابر مجموع شعاعهای کووالانسی آن دو اتم و فاصله مراکز هسته های دو اتم مماس بر هم برابر مجموع شعاعهای واندروالسی آن دو اتم در نظر گرفته می شود. بعنوان مثال برای شعاع یونی، فاصله یونهای سدیم و کلرید مماس بر هم در بلور سدیم کلرید می تواند برابر مجموع شعاعهای یونی یونهای سدیم و کلرید ( $r_{iNa^+} + r_{iCl^-}$ ) در نظر گرفته شود. شکل بعدی را در نظر بگیرید:

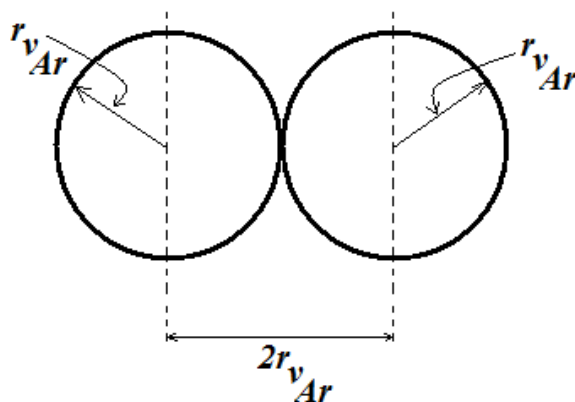


بعنوان مثال برای شعاع کووالانسی، فاصله اتمهای کلر در مولکول کلر می تواند برابر مجموع شعاعهای کووالانسی دو اتم کلر ( $2r_{cCl}$ ) در نظر گرفته شود. شکل بعدی را در نظر بگیرید:

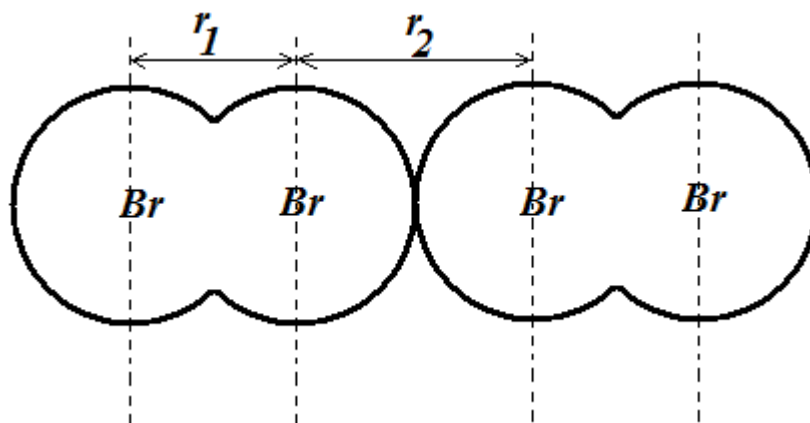




بعنوان مثال برای شعاع واندروالسی، فاصله اتمهای آرگون در بلور آرگون می تواند برابر مجموع شعاعهای واندروالسی دو اتم آرگون ( $2r_{vAr}$ ) در نظر گرفته شود. شکل بعدی را در نظر بگیرید:



تمرین: دو مولکول برم مماس بر هم در شکل زیر نمایش داده شده اند. شعاع های کووالانسی و واندروالسی اتم برم را در شکل زیر مشخص نمائید و ارتباط فواصل  $r_1$  و  $r_2$  با آنها را بنویسید.



\*\*\*\*\*

برای فلزات علاوه بر شعاع های یونی، کووالانسی و واندروالسی می توان شعاع فلزی نیز در نظر گرفت. نزدیکترین فاصله مراکز هسته های دو اتم فلز مشارکت کننده در پیوند فلزی در بلور فلز برابر مجموع شعاعهای فلزی آن دو اتم در نظر گرفته می شود. گاهی اوقات از اصطلاح شعاع اتمی استفاده می شود که ابهام دارد و در منابع مختلف گاهی بجای شعاع های کووالانسی، گاهی بجای شعاع های واندروالسی و گاهی بجای شعاع های فلزی اما نه یونی بکار رفته است. در اینجا هر وقت صحبت از شعاع اتمی است، بدین معنی است که مطلب ارائه شده برای هر سه نوع شعاع یعنی کووالانسی، واندروالسی و فلزی صادق است.

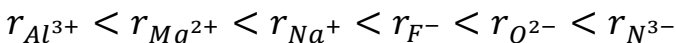
در یک گروه از جدول تناوبی معمولاً شعاع اتم ها از بالا به پایین بعلت افزایش تعداد لایه ها، افزایش می یابد. بعنوان مثال شعاع واندروالسی اتمهای فلزات قلیائی خاکی یعنی  $Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra$  به ترتیب برابر  $153, 173, 231, 249, 268$  و  $283$  پیکومتر هستند که از بریلیم به بارییم یا از بالا به پایین در گروه افزایش نشان می دهد. گاهی اوقات از بالا به پایین در برخی گروه ها افزایش قابل توجه نداریم یا حتی کاهش داریم که در بحث اثر  $d$  و  $f$  در بخش بعدی بدان خواهیم پرداخت.

در یک دوره از جدول تناوبی شعاع اتمی از چپ به راست بعلت افزایش بار مؤثر هسته کاهش می یابد. بعنوان مثال شعاع کووالانسی اتمهای عناصر تناوب سوم جدول تناوبی یعنی  $Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar$  را می توان در نظر گرفت که بترتیب برابر  $1.54, 1.30, 1.18, 1.11, 1.06, 1.02, 0.99$  و  $0.97$  آنگستروم هستند که از سدیم به آرگون یا از چپ به راست در دوره کاهش نشان می دهد. گاهی اوقات از چپ به راست در برخی دوره ها بجای کاهش شعاع افزایش داریم که دلایل مختص خودشان را دارند. بعنوان مثال شعاع فلزی در اواخر سری عناصر واسطه (از گروه  $VIII B$  به گروه  $IIB$ ) از چپ به راست بجای کاهش افزایش می یابد که می تواند به کاهش قدرت پیوند فلزی، ضعیف تر شدن جاذبه ها برای غلبه بر دافعه ها و کمتر نزدیک شدن اتمها بهم نسبت داده شود.

با کندن الکترون و حذف دافعه های بین الکترونی بار مؤثر هسته و قدرت کنترل هسته بر روی الکترون ها افزایش می یابد و در نتیجه شعاع کاهش می یابد. بطور بالعکس با افزودن الکترون شعاع افزایش می یابد. بعنوان مثال داریم:



برای یون های هم الکترون (ایزوالکترون) با افزایش تعداد پروتون های هسته، جاذبه هسته با الکترونها افزایش می یابد و شعاع کم می شود. بعنوان مثال داریم:



با توجه به نکات بالا می توان دید که در مقایسه شعاع یونها در حالت کلی بایستی هم به تعداد لایه ها و هم به بار یون توجه نمود. همانطور که بحث کردیم تعداد لایه های کمتر و بار مثبت تر منجر به شعاع کمتر برای یون می شود و بالعکس. بعنوان مثال شعاع یونی  $O^{2-}, Rb^+, Sr^{2+}$  بترتیب  $152, 140$  و  $118$  پیکومتر است. کمتر بودن شعاع یونی  $O^{2-}$  از  $Rb^+$  می تواند به اهمیت بیشتر کم بودن تعداد لایه ها در  $O^{2-}$  نسبت داده شود، در حالیکه بیشتر بودن شعاع یونی  $O^{2-}$  از  $Sr^{2+}$  می تواند به اهمیت بیشتر مثبت تر بودن  $Sr^{2+}$  و بار مؤثر هسته بیشترش نسبت داده شود.

در یونها، افزایش بار یون (چه مثبت و چه منفی) منجر به افزایش جاذبه یونها با هم و در نتیجه نزدیکتر شدن آنها بهم و کاهش شعاع یونها می شود. این مطلب افزایش شعاع آنیون بعلت منفی تر شدن را تعدیل (کم) می کند، در حالیکه کاهش شعاع کاتیون بعلت مثبت تر شدن را تشدید (زیاد) می کند. از این رو است که افزایش شعاع آنیون بعلت منفی تر شدن بطور قابل ملاحظه ای کمتر از کاهش شعاع کاتیون بعلت مثبت تر شدن است. بعنوان مثال از  $S^{2-}$  به  $Cl^-$  شعاع یونی  $1.6\%$  کاهش می یابد، در حالیکه

از  $K^+$  به  $Ca^{2+}$  شعاع یونی  $25.6\%$  کاهش می یابد. باز از این رو است که یونهای دو منفی کالکوژنها از یونهای یک منفی هالوژنهای همدوره به مقدار خیلی جزئی بزرگترند و می توانند تقریباً هم اندازه محسوب شوند.

از آنجائیکه از بالا به پایین در گروهها بار موثر هسته افزایش می یابد، اهمیت افزایش بار موثر هسته با مثبت تر شدن یون بصورت نسبی کاهش می یابد و تغییرات شعاع یونها بعلت تغییرات بار یون هم بصورت نسبی و درصدی کاهش می یابد. بعنوان مثال شعاع یونی از  $Li^+$  به  $Be^{2+}$  که در بالای گروههایشان هستند،  $54\%$  کاهش نشان می دهد، در حالیکه از  $Cs^+$  به  $Ba^{2+}$  که در پایین گروههایشان هستند،  $19.2\%$  کاهش نشان می دهد. بعنوان مثال دیگر شعاع یونی از  $O^{2-}$  به  $F^-$  که در بالای گروههایشان هستند،  $5\%$  کاهش نشان می دهد، در حالیکه از  $Te^{2-}$  به  $I^-$  که در پایین گروههایشان هستند،  $0.4\%$  کاهش نشان می دهد.

مثال: کدام گزینه براساس افزایش شعاع از چپ به راست مرتب شده است؟

- الف)  $Na, Mg, Al, Si$   
 ب)  $O^{2-}, O^-, O, O^+$   
 ج)  $Li^+, Na^+, K^+, Rb^+, Cs^+$   
 د)  $S^{2-}, Cl^-, Al^{3+}, K^+$

حل:

در گزینه (الف) از چپ به راست یعنی از سدیم به سیلیسیم حرکت در دوره سوم از چپ به راست را داریم که بعلت افزایش بار موثر هسته بایستی کاهش شعاع داشته باشیم. در گزینه (ب) از چپ به راست یعنی از  $O^{2-}$  به  $O^+$  کاهش تعداد الکترونها و افزایش بار موثر هسته را داریم، پس بایستی کاهش شعاع داشته باشیم. در گزینه (ج) از چپ به راست یعنی از  $Li^+$  به  $Cs^+$  حرکت در گروه فلزات قلیائی از بالا به پایین را داریم که بعلت افزایش تعداد لایه ها بایستی افزایش شعاع داشته باشیم. در گزینه (د) از چپ به راست یعنی از  $S^{2-}$  به  $K^+$  افزایش عدد اتمی در یونهای هم الکترون را داریم، پس بایستی کاهش شعاع داشته باشیم. بنابراین گزینه (ج) پاسخ صحیح است.

\*\*\*\*\*

مثال: انتظار دارید بین تفاوت شعاع  $Na$  و  $Na^+$  و تفاوت شعاع  $Mg$  و  $Mg^+$  کدامیک بیشتر باشد؟ چرا؟  
 حل:

تفاوت شعاع  $Na$  و  $Na^+$ ، چونکه موقع یونش اتم سدیم یک لایه اصلی از بین می رود، اما موقع یونش اول اتم منیزیم تغییر تعداد لایه اصلی نداریم.

\*\*\*\*\*

مثال: فاصله بین  $Na^+$  و  $F^-$  به صورت مماس برهم در جامد یونی  $NaF$  برابر  $231 pm$  در نظر گرفته شود. قاعده ای بیان می کند که برای یون های هم الکترون نسبت شعاع های یونی برابر عکس نسبت بار مؤثر هسته های آنهاست. اگر بار مؤثر هسته ی یون فلوئورید تقریباً 5 در نظر گرفته شود، شعاع یون های  $Na^+$  و  $F^-$  را بدست آورید.  
 حل:

دو معادله و دو مجهول بصورت زیر می توانیم تشکیل دهیم:

$$\begin{cases} r_{Na^+} + r_{F^-} = 231pm \\ \frac{r_{Na^+}}{r_{F^-}} = \frac{Z_{F^-}^*}{Z_{Na^+}^*} \end{cases}$$

در روابط بالا به  $Z^*$  یون سدیم نیاز داریم. برای تعیین آن بدین صورت می توانیم عمل کنیم که یونهای سدیم و فلوئورید هم الکترون هستند، پس تعداد الکترونها، آرایش الکترونی و نحوه قرار گرفتن الکترونها نسبت بهم در آنها یکسان است و بنابراین بایستی اثر پوششی الکترونها روی هم ( $S$ ) در آنها یکسان باشد. در اینصورت با استفاده از رابطه  $Z^* = Z - S$  می توان نتیجه گیری کرد که چون عدد اتمی یون سدیم دو واحد از عدد اتمی یون فلوئورید بیشتر است، بار موثر هسته آن هم دو واحد بیشتر از یون فلوئورید است و برابر 7 است. سپس با جایگذاری  $Z^*$  یون سدیم در دو معادله و دو مجهول بالا می توانیم شعاع یون های  $Na^+$  و  $F^-$  را بصورت زیر بدست آوریم:

$$r_{Na^+} = 96.25pm, r_{F^-} = 134.75pm$$

\*\*\*\*\*

مثال: اتم هیدروژن از اتم فلوئور کوچکتر است، اما یون هیدرید ( $H^-$ ) از یون فلوئورید ( $F^-$ ) بزرگتر است. چگونه توجیه می کنید؟  
حل:

کوچکتر بودن اتم هیدروژن از اتم فلوئور می تواند به تعداد لایه های الکترونی کمتر آن نسبت داده شود که با وجود بار موثر هسته بیشتر در اتم فلوئور منجر به شعاع کمتر اتم هیدروژن در مقایسه با اتم فلوئور می شود. از اتم هیدروژن به یون هیدرید یا از اتم فلوئور به یون فلوئورید کاهش بار موثر هسته باعث افزایش تعداد الکترونها را داریم، اما بعلاوه بار موثر هسته کمتر اتم هیدروژن این کاهش برای هیدروژن بصورت نسبی بیشتر است و از این رو افزایش شعاع از اتم هیدروژن به یون هیدرید در مقایسه با افزایش شعاع از اتم فلوئور به یون فلوئورید بیشتر است و منجر به بزرگتر شدن یون هیدرید ( $H^-$ ) از یون فلوئورید ( $F^-$ ) می شود. بعبارت دیگر بار مؤثر هسته در یون هیدرید بسیار کمتر از یون های نافلزات مثل فلوئورید است و بعلاوه بار مؤثر هسته ی کم در یون هیدرید و پایین بودن قدرت کنترل هسته بر روی  $e^-$  ها دافعه ی بین دو الکترون در این یون سبب انبساط ابرالکترونی و افزایش شعاع یونی آن می شود. در یون های نافلزات مثل فلوئورید بعلاوه واقع شدن اتم های آنها در انتهای دوره ها و افزایش بار مؤثر هسته در طول هر دوره، بار مؤثر هسته در مقایسه با بار مؤثر هسته ی یون هیدرید بیشتر است.

\*\*\*\*\*

### رابطه ی قطری

روند تغییرات اغلب خواص اتمی مثل بار مؤثر هسته، انرژی یونش، شعاع های اتمی و یونی و ... از چپ به راست و از بالا به پایین در جدول تناوبی متضاد هم است. به همین علت برای هر عنصر، عنصر واقع در یک گروه و یک تناوب بعد از لحاظ خواص اتمی شباهت خواهد داشت. این تشابه رابطه ی قطری نامیده می شود. رابطه ی قطری معمولاً برای لیتیم با منیزیم و برلییم با آلومینیوم در نظر گرفته می شود.

تمرین: در جدول تناوبی شبه فلزات تقریباً بر روی یک قطر قرار دارند. چگونه توجیه می کنید؟

\*\*\*\*\*

### اثر $d$ و اثر $f$ یا انقباض اسکاندیدی و لانتانیدی (*Scandide & Lanthanide Contraction*)

الکترون های زیر لایه ی  $d$  و  $f$  اثر حایل یا پوششی کمی دارند و به همین در هنگام پر شدن این زیر لایه ها بار مؤثر هسته بطور چشم گیری افزایش پیدا می کند. افزایش چشم گیر بار مؤثر هسته منجر به بروز بی قاعدگی هایی در روند تغییرات خواص تناوبی در عناصر بلافاصله بعد از پر شدن این زیر لایه ها برای اولین بار می شود. بعنوان مثال نخستین انرژی یونش، مجموع سه انرژی یونش اول و شعاعهای اتمی و یونی عناصر گروه بور را در نظر بگیرید:

IIIA	$IE_1(kJ/mol)$	$IE_1+IE_2+IE_3(kJ/mol)$	شعاع اتمی (Å)	شعاع یون $+3$ (Å)
B	800.6	6887.4	0.88	0.23
Al	577.6	5139	1.43	0.51
Ga	578.8	5521.1	1.22	0.62
In	558.3	5083	1.63	0.81
Tl	589.3	5438.4	1.70	0.95

با وجود اینکه در گروه IIIA عنصر Ga پایین تر از عنصر Al قرار دارد، انرژی یونش اول، مجموع سه انرژی یونش اول و شعاع اتمی Ga برخلاف روند کلی ( کاهش انرژی یونش و افزایش شعاع از بالا به پایین در گروهها) به ترتیب بیشتر، بیشتر و کمتر از همانها برای Al است. این مطلب به پر شدن زیر لایه ی  $d$  و افزایش بار مؤثر هسته ناشی از آن برای اولین بار که اثر  $d$  یا انقباض اسکاندیدی (*d-block Contraction or Scandide Contraction*) نامیده می شود، نسبت داده می شود. بعبارتی گالیوم که بعد از پر شدن زیر لایه ی  $d$  برای اولین بار قرار دارد، افزایش بار مؤثر هسته ناشی از آن را تجربه می کند، درحالیکه قبل از همگروه بالای آن ( یعنی آلومینیوم) پر شدن زیر لایه ی  $d$  و افزایش بار مؤثر هسته ناشی از آن وجود ندارد. از این رو گالیوم در مقایسه با آلومینیوم بار مؤثر هسته بیشتری دارد که منجر به انرژی یونش بیشتر و شعاع اتمی کمتر گالیوم می شود.

اثر  $d$  عمدتاً برای مقایسه ی خواص Al و Ga کاربرد دارد و در جاهای دیگر اهمیت آن کمتر است. بعنوان مثال انرژی یونش اول، مجموع چهار انرژی یونش اول و شعاعهای اتمی و یونی عناصر گروه کربن را که در جدول بعدی گزارش شده است، در نظر بگیرید. از سیلیسیم ( که قبل آن پر شدن زیر لایه ی  $d$  را نداریم) به ژرمانیم ( که قبل آن پر شدن زیر لایه ی  $d$  را برای اولین بار داریم) بجز مجموع چهار انرژی یونش اول مابقی خواص اتمی یاد شده مطابق روند کلی تغییر می کنند، اما مجموع چهار انرژی یونش اول برای ژرمانیم به مقدار کمی بیشتر از سیلیسیم است و اثر  $d$  را نشان می دهد. البته همچنان می توان ادعا نمود که کاهش انرژی یونش اول یا افزایش شعاع اتمی از سیلیسیم به ژرمانیم بخاطر اثر  $d$  کم است.

IVA	$IE_1(kJ/mol)$	$IE_1+IE_2+IE_3+IE_4(kJ/mol)$	شعاع اتمی (Å)	شعاع یون $+4$ (Å)
C	1086.4	14282	0.77	0.15
Si	786.4	9950.7	1.17	0.42
Ge	762.2	10012.6	1.22	0.53
Sn	708.6	8993.7	1.40	0.71
Pb	715.5	9330.6	1.75	0.84

اثر  $d$  را میتوان در عناصر واسطه خارجی بخصوص گروههای واقع در ابتدای دوره نیز مشاهده کرد. بعنوان مثال در گروه  $IVB$  انرژی یونش اول زیرکونیم ( $IE_1=660\text{kJ/mol}$ ) واقع در ابتدای دوره پنجم از عنصر همگروه بالایی خود یعنی تیتانیم ( $IE_1=658\text{kJ/mol}$ ) واقع در ابتدای دوره چهارم بیشتر است.

بطور مشابه اثر  $f$  یا انقباض لانتانیدی (*Lanthanide Contraction*) که مربوط به پر شدن زیر لایه  $f$  و افزایش بار موثر هسته ناشی از آن برای اولین بار است، وجود دارد. اثر  $f$  از آن جهت انقباض لانتانیدی نیز نامیده می شود که پر شدن زیر لایه  $f$  و افزایش بار موثر هسته ناشی از آن برای اولین بار در طول سری لانتانیدها صورت می گیرد و همراه با کاهش شعاع در طول سری است که در عناصر بعد از سری یعنی عناصر بلوک  $5d$  خودش را نشان می دهد. عناصر بلوک  $5d$  تقریباً هم اندازه با عناصر بلوک  $4d$  هستند، با وجود آنکه یک لایه اصلی نسبت به آنها اضافه تر دارند. تاثیر این اثر را می توان علاوه بر مقایسه شعاعهای اتمی عناصر بلوک  $5d$  و  $4d$  در مقایسه انرژی های یونش، شعاع های یونی و دیگر خواص اتمی آنها هم مشاهده کرد. علاوه بر این در مقایسه خواص اتمی برخی عناصر اصلی بخصوص ایندیم و قلع ( که قبل از آنها پر شدن زیر لایه  $f$  را نداریم) با تالیم و سرب ( که قبل از آنها پر شدن زیر لایه  $f$  را برای اولین بار داریم) نیز حائز اهمیت است ( به داده های جداول قبلی رجوع کنید).

در مقایسه اهمیت اثر  $d$  و اثر  $f$  میتوان گفت که اثر  $f$  از  $d$  مهمتر است، چون در اثر  $f$  تعداد الکترون های بیشتری با اثر پوششی کمتر اضافه می شود. لازم بذکر است که اثر  $p$  هم میتوان در نظر گرفت، ولی مهم نیست.

تمرین: مقادیر انرژی یونش اول عناصر گروه وانادیم ( گروه  $VB$  ) بصورت زیر است:

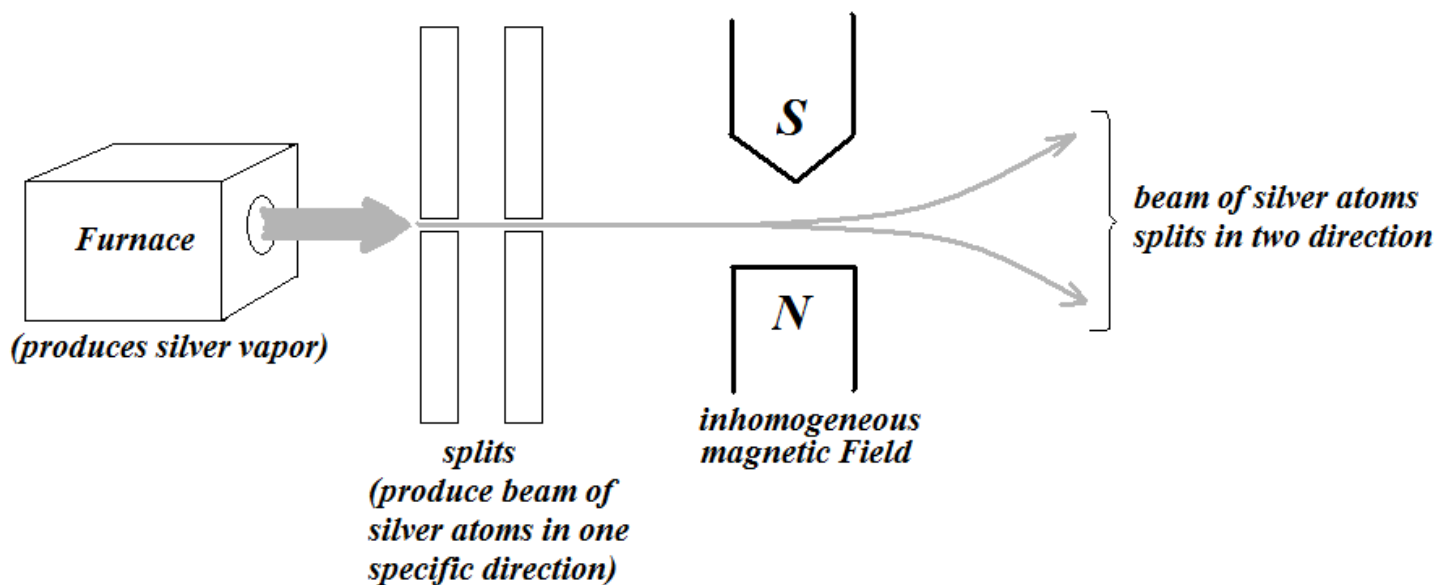
$$IE_{1V} = 650 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}, IE_{1Nb} = 664 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}, IE_{1Ta} = 761 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

با توجه به مقادیر انرژی یونش اول عناصر این گروه می توان دید که انرژی یونش اول از بالا به پایین بجای کاهش، افزایش می یابد. علاوه بر این افزایش انرژی یونش اول از نیوبیم به تانتال بیشتر از افزایش انرژی یونش اول از وانادیم به نیوبیم است. چگونه توجیه می کنید؟

\*\*\*\*\*

## آزمایش اشترن – گرلاخ (Stern-Gerlach Experiment)

اوتو اشترن (Otto Stern) و والتر گرلاخ (Walther Gerlach) این آزمایش را در سال 1922 انجام دادند. در این آزمایش بخار اتم های نقره از یک میدان مغناطیسی غیر یکنواخت عبور داده شد و مشاهده شد که بخار اتم های نقره به دو نیمه شکافته شدند و در دو جهت مختلف شروع به حرکت کردند. شکل بعدی این موضوع را نشان می دهد.

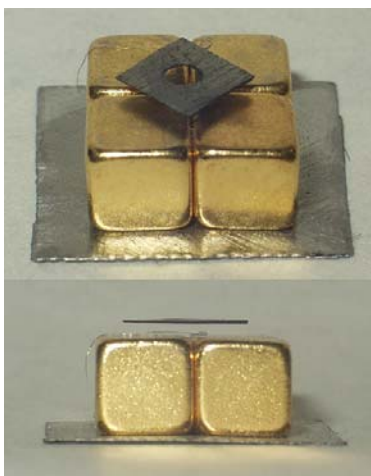


شکافته شدن بخار اتم های نقره به دو نیمه از وجود خصلت مغناطیسی ذاتی الکترون نشات می گیرد. آرایش الکترونی اتم نقره در حالت پایه بصورت  $[36Kr]4d^{10}5s^1$  است. از آنجائیکه الکترون  $5s$  اتم نقره می تواند هم اسپین رو به بالا و هم اسپین رو به پایین داشته باشد، متناظراً اتمهای نقره هم خصلت مغناطیسی در دو جهت مخالف خواهند داشت و در میدان مغناطیسی غیر یکنواخت نیمی از آنها به یک سمت و نیم دیگر به سمت مخالف جابجا خواهند شد (لازم بذکر است که در فیزیک کوانتومی بحث میشود که در صورتی که چند حالت سطح انرژی دقیقاً یکسانی داشته باشند، توسط اتم ها با تعداد یکسان اشغال می شوند). اشترن و گرلاخ در اصل این آزمایش را برای تست کوانتیده بودن گشتاور زاویه ای در مدل اتمی بور ( $mvr = \frac{nh}{2\pi}$ ) که خصلت مغناطیسی کوانتیده برای اتم ( ناشی از چرخش الکترون بدور هسته در مدارهای مشخص) نتیجه می دهد، انجام داده بودند و بعدها معلوم شد که وجود خصلت مغناطیسی ذاتی الکترون دلیل پدیده مشاهده شده در آزمایش آنهاست.



## خصلت مغناطیسی مواد

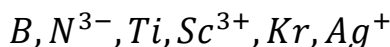
از نظر خصلت مغناطیسی مواد معمولاً در یکی از دسته های پارامغناطیس (*Paramagnetism*)، دیامغناطیس (*Diamagnetism*) و فرومغناطیس (*Ferromagnetism*) قرار می گیرند. موقع قرار گرفتن در میدان مغناطیسی (مثلاً ناشی از یک آهنربای خارجی)، در مواد دیامغناطیس خصلت آهنربایی بصورت مخالف با آهنربای خارجی القا می شود و بنابراین توسط میدان مغناطیسی خارجی دفع می شوند، درحالیکه در مواد پارامغناطیس و فرومغناطیس خصلت آهنربایی بصورت موافق با آهنربای خارجی القا می شود و توسط میدان مغناطیسی خارجی جذب می شوند. بعد از حذف میدان مغناطیسی خارجی مواد پارامغناطیس خصلت آهنربایی القا شده را از دست می دهند، درحالیکه مواد فرومغناطیس می توانند خصلت آهنربایی خود را حفظ کنند.



شناور شدن کربن پیرولیتیک (*Pyrolytic Carbon*) دیامغناطیس بر روی آهنربای دائمی خارجی

وجود الکترون های جفت نشده در یک ماده باعث جذب آن ماده توسط میدان مغناطیسی خارجی می شود. این جذب شدن به خاطر همسوس شدن اسپین الکترون با آهنربای خارجی و برقراری جاذبه های مغناطیسی بین الکترون بعنوان یک آهنربای کوچک با میدان مغناطیسی خارجی است. وجود جفت الکترون جفت شده باهم باعث دفع یک ماده توسط میدان مغناطیسی می شود. جذب به خاطر الکترون های جفت نشده خیلی بیشتر از دفع به خاطر الکترون های جفت شده است به همین علت اگر یک ماده حتی یک الکترون جفت نشده در حضور تعداد زیادی الکترون جفت شده داشته باشد، معمولاً توسط میدان مغناطیسی جذب می شود. بنابراین موادی که الکترون جفت نشده دارند، معمولاً بصورت پارامغناطیس یا فرومغناطیس هستند و موادی که الکترون جفت نشده ندارند، دیامغناطیس هستند. با افزایش تعداد  $e$  های جفت نشده خصلت پارامغناطیسی و جاذبه با میدان مغناطیسی خارجی افزایش می یابد. دقت داشته باشید بسیاری از اتمهایی که در آرایش الکترونی خود در حالت پایه الکترون جفت نشده دارند، موقع ترکیب شدن باهم بعلت جفت شدن الکترونها با هم و از بین رفتن الکترونها جفت نشده خصلت پارامغناطیسی خود را از دست می دهند. بعنوان مثال اتمهای هیدروژن مجزا از هم پارامغناطیس هستند، در حالیکه اتمهای هیدروژن ترکیب شده با هم یا مولکولهای هیدروژن دیامغناطیس هستند.

مثال: انتظار دارید کدامیک از اتمها یا یونهای زیر بصورت مجزا پارامغناطیس و کدامیک دیامغناطیس باشند؟

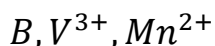


حل:

اتمها یا یونهایی بصورت مجزا پارامغناطیس خواهند بود که در آرایش الکترونی خود الکترون جفت نشده داشته باشند، در غیر اینصورت دیامغناطیس خواهند بود. بنابراین انتظار می رود  $B, Ti$  پارامغناطیس و  $N^{3-}, Sc^{3+}, Kr, Ag^+$  دیامغناطیس باشند.

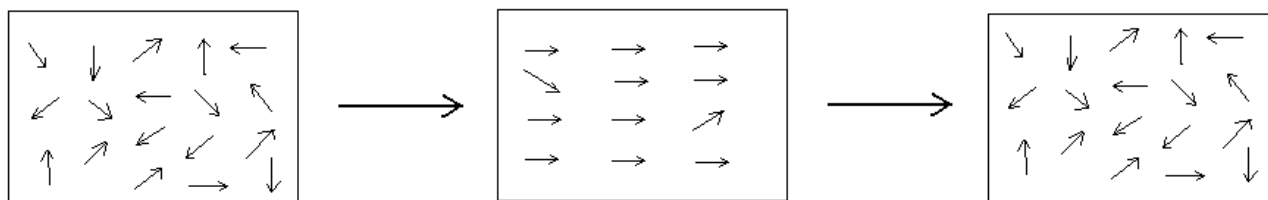
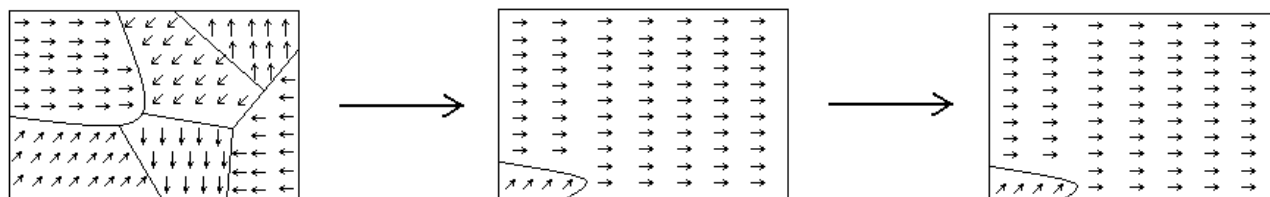
\*\*\*\*\*

تمرین: انتظار دارید کدامیک از اتمها یا یونهای زیر بصورت مجزا خصلت پارامغناطیسی قویتری از خود نشان دهد؟ چرا؟



\*\*\*\*\*

در حالت عادی خصلت مغناطیسی ذرات و آهنرباهای متناظر تمایل دارند هم جهت شوند و باهم جاذبه برقرار کنند و از طرف دیگر یک آهنربای بزرگتر بوجود آورند. در مواد پارامغناطیس بعلت جنب و جوش های گرمایی این هم جهت شدن مگر تحت تاثیر یک آهنربای خارجی رخ نمی دهد و در صورت عدم حضور آهنربای خارجی بعلت توزیع تصادفی جهت آهنربایی ذرات تشکیل دهنده که همدیگر را خنثی می کنند، مواد پارامغناطیس فاقد خصلت آهنربایی در مقیاس ماکروسکوپی هستند. در صورت حضور آهنربای خارجی مواد پارامغناطیس بعلت هم جهت شدن جهت آهنربایی ذرات تشکیل دهنده با جهت آهنربای خارجی که منجر می شود دیگر بطور کامل همدیگر را خنثی نکنند، دارای خصلت آهنربایی در مقیاس ماکروسکوپی می شوند که مقدار خصلت آهنربایی آنها با افزایش قدرت میدان مغناطیسی آهنربای خارجی بعلت هم جهت تر شدن تعداد بیشتری از ذرات افزایش می یابد. با حذف میدان بعلت بهم خوردن آرایش همسوی ذرات بر اثر جنب و جوش های گرمایی و برقراری مجدد توزیع تصادفی جهت خصلت مغناطیسی آنها خصلت مغناطیسی مواد پارامغناطیس از بین می رود. در مواد فرومغناطیس اسپین الکترون های جفت نشده اتم ها یا بطور کلی خصلت مغناطیسی ذرات تشکیل دهنده ( که هر ذره معادل یک آهنربای کوچک است) تمایل دارند هم جهت شوند و در مقیاس ماکروسکوپی حوزه هایی با خصلت مغناطیسی همسو تشکیل دهند. در مواد فرو مغناطیس در میدان مغناطیسی خارجی حوزه های همسو با میدان رشد می کنند و ماده فرومغناطیس حتی پس از حذف میدان به طور خالص در جهت میدان اعمال شده قبلی ویژگی آهنربا بودن نشان می دهد. شکل بعدی را در نظر بگیرید.

**Paramagnetism****Ferromagnetism**

(a)

(b)

(c)

(a) حالت اولیه بدون خصلت مغناطیسی (b) در حضور میدان مغناطیسی خارجی (c) بعد از حذف میدان مغناطیسی خارجی

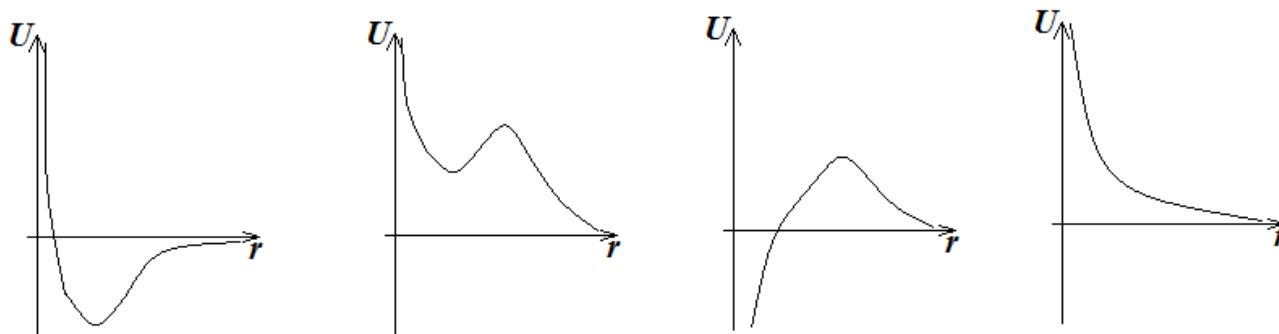
مواد فرو مغناطیس به دو دسته نرم و سخت می توانند تقسیم شوند. مواد فرو مغناطیس نرم براحتی آهنربا می شوند و براحتی هم خصلت آهنربایی خود را از دست می دهند، در حالیکه مواد فرومغناطیس سخت (مثل آلیاژهای بکاررفته در آهنربا) بسختی آهنربا می شوند و بسختی هم خصلت آهنربایی خود را از دست می دهند.

## تمارین

## تمارین بخش مقدمه و آشنایی مقدماتی با نیرو و انرژی پتانسیل

- 1- نیروی الکتریکی بین دو بار ذره‌ای تابعی از چه عواملی است؟ هر عامل چگونه مقدار نیرو را تحت تأثیر قرار می دهد؟
- 2- فاصله تک الکترون یون  $B^{4+}$  از هسته اش یک پنجم ( $1/5$ ) فاصله تک الکترون اتم  $H$  از هسته اش است. نیروی الکتریکی وارده از طرف هسته بر الکترون در یون  $B^{4+}$  چند برابر همان در اتم  $H$  است؟
- 3- نزدیک کردن کدامیک از ذرات زیر به یک هسته نیازمند صرف انرژی نیست؟ ( یکی از گزینه های (الف) تا (د) را انتخاب کنید).
- الف) پروتون      ب) نوترون      ج) ذره  $\alpha$  ( $2p+2n$ )      د) همه موارد
- 4- موقع نزدیک شدن یک یون  $Na^+$  ( یون سدیم) و یک یون  $Cl^-$  ( یون کلرید) در فاز گاز و تشکیل زوج یون  $NaCl$  ( یون  $Na^+$  و یون  $Cl^-$  چسبیده بهم): ( یکی از گزینه های (الف) تا (د) را انتخاب کنید).
- الف) سطح انرژی پتانسیل افزایش می یابد و انرژی آزاد می شود.  
 ب) سطح انرژی پتانسیل افزایش می یابد و انرژی گرفته می شود.  
 ج) سطح انرژی پتانسیل کاهش می یابد و انرژی آزاد می شود.  
 د) سطح انرژی پتانسیل کاهش می یابد و انرژی گرفته می شود.
- 5- موقع نزدیک شدن دو یون  $O^+$  از فاصله خیلی دور بهم در فاز گاز، در ابتدا برهم کنش خالصی بصورت دافعه بین دو یون داریم. در فواصل متوسط برهمکنش خالص بین دو یون بصورت جاذبه در می آید و در فواصل خیلی نزدیک مجدداً بین دو یون دافعه خواهیم داشت. بر این اساس کدام نمودار سطح انرژی پتانسیل بر حسب فاصله برای این دو یون قابل قبول است؟ ( یکی از گزینه های (الف) تا (د) را انتخاب کنید).

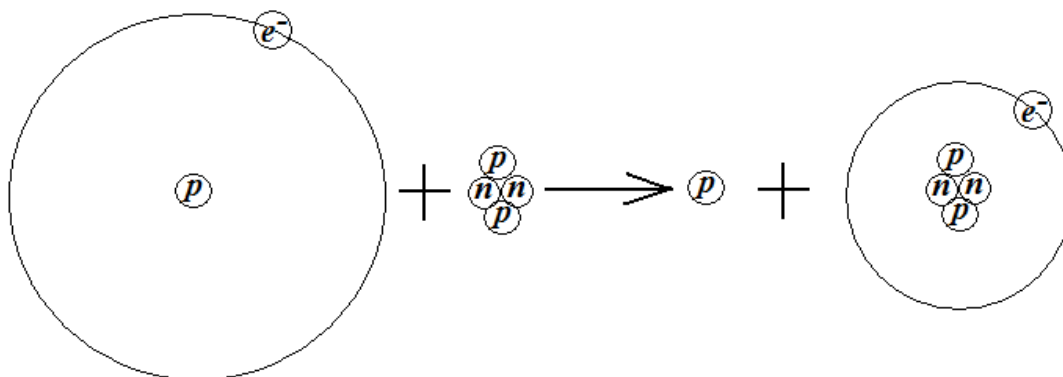
الف)      ب)      ج)      د)



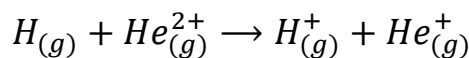
6- اندازه نیروی الکتریکی بین الکترون و هسته را در یون  $O^{7+}$  بر حسب نیوتن ( $N$ ) بدست آورید. فاصله الکترون و هسته را برابر  $6.6$  پیکومتر در نظر بگیرید.

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}, K = 9 \times 10^9, q_e = -1.6 \times 10^{-19} C, q_p = +1.6 \times 10^{-19} C, 1 \text{ pm} = 10^{-12} m$$

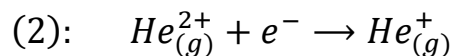
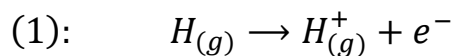
7- انتقال الکترون زیر را در نظر بگیرید:



در واقع شکل بالا نمایشی برای این واکنش است:



واکنش بالا را به صورت جمع دو واکنش زیر می توانیم در نظر بگیریم:



در واکنشهای بالا فاصله الکترون از هسته در اتم  $H$  برابر  $0.53 \text{ \AA}$  و در یون  $He^{+}$  برابر  $0.26 \text{ \AA}$  است.

الف) انتظار دارید واکنش (1) همراه با گرفتن انرژی باشد یا همراه با آزاد کردن انرژی؟ چرا؟

ب) انتظار دارید واکنش (2) همراه با گرفتن انرژی باشد یا همراه با آزاد کردن انرژی؟ چرا؟

ج) انتظار دارید واکنش اصلی (واکنش مجموع) همراه با گرفتن انرژی باشد یا همراه با آزاد کردن انرژی؟ چرا؟

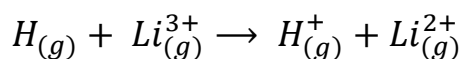
8- بین دو ذره در فواصل دور تقریباً بر همکنش نداریم. در فواصل متوسط بین آنها بر همکنش خالصی به صورت جاذبه

داریم و در فواصل نزدیک بین آنها بر همکنش خالصی به صورت دافعه بوجود می آید.

الف) سطح انرژی پتانسیل را بر حسب فاصله برای این دو ذره در یک نمودار نمایش دهید.

ب) کدام فاصله برای این دو یون متناظر با پایدارترین حالت است؟ چرا؟

9- واکنش زیر را در نظر بگیرید:



الکترون اتم  $H$  در پایدارترین حالت آن در فاصله  $0.529^{\circ}A$  از هسته قرار دارد و الکترون یون  $Li^{2+}$  در پایدارترین حالت آن در فاصله  $0.176^{\circ}A$  از هسته قرار دارد.

در واکنش بالا کلیه مواد اولیه و محصولات در پایدارترین حالت خود قرار دارند.

الف) در یک نمودار، نحوه تغییرات انرژی پتانسیل یک الکترون برحسب فاصله از هسته را هم برای هسته اتم  $H$  و هم برای هسته لیتیم رسم کنید.

ب) انرژی پتانسیل و پایداری الکترون در حالت پایدار اتم  $H$  و  $Li^{2+}$  را با دلیل با هم مقایسه کنید.

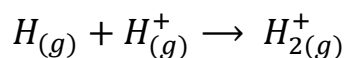
ج) بطور خلاصه بیان کنید در واکنش بالا چه اتفاقی رخ داده است؟

د) واکنش یاد شده همراه با تولید یا مصرف انرژی خواهد بود؟ چرا؟

ه) در یک واکنش دیگر، یک الکترون دیگر به یون  $Li^{2+}$  اضافه می‌کنیم. انرژی پتانسیل و پایداری الکترون جدید و الکترون قدیم در طول واکنش چگونه تغییر می‌کنند؟ چرا؟

و) در واکنش قسمت (ه) انرژی آزاد یا مصرف می‌شود؟ چرا؟

10- واکنش زیر را در نظر بگیرید:



الف) سطح انرژی الکترون و پروتون اتم هیدروژن ( $H$ ) با اضافه شدن یون  $H^+$  (یک پروتون چگونه تغییر می‌کند؟ چرا؟

ب) در صورتیکه واکنش ذکر شده همراه با آزاد کردن انرژی باشد، کدامیک از برهم کنش‌های مورد (الف) مهمتر و تعیین کننده تر است؟ چرا؟

ج) با توجه به مورد (ج) کندن الکترون از اتم  $H$  نیازمند صرف انرژی بیشتری است یا از یون  $H_2^+$ ؟

د) چه روش تهیه دیگری برای یون  $H_2^+$  می‌توانید پیشنهاد بدهید؟

### تمارین بخش شناسایی و خواص ذرات زیراتمی

11- لامپ پرتو کاندی را در نظر بگیرید. سطح انرژی پتانسیل الکترون در قطب منفی یا کاتد را  $U_1$  و سطح انرژی پتانسیل الکترون در قطب مثبت یا آند را  $U_2$  می‌نامیم.  $U_1$  یا  $U_2$ ، کدامیک بیشتر است؟ چرا؟

12- بطور خلاصه آزمایش رابرت میلیکان برای تعیین بار الکترون را شرح دهید.

13- در آزمایش رابرت میلیکان برای اندازه‌گیری بار الکترون، نیازی به اندازه‌گیری کدامیک از موارد زیر نبود؟ (یکی از گزینه‌های (الف) تا (د) را انتخاب کنید).

الف) سرعت قطره روغن ب) جرم الکترون ج) بار قطرات روغن د) هرسه مورد باید اندازه‌گیری می‌شدند

14- بطور خلاصه نحوه عملکرد دستگاه طیف سنج جرمی را توضیح دهید.

15- مقدار انحراف ذرات  ${}^1_1D^+$ ،  ${}^3_3Li^+$ ،  ${}^9_4Be_2^+$  و  ${}^{15}_6C^+$  و  ${}^{14}_7N^+$  را در خروجی دستگاه طیف سنج جرمی با دلیل با هم مقایسه نمائید.

16- بنابر مدل استاندارد، کدام ذرات بنیادی در اطراف ما فراوانند و حتی خود ما نیز از آنها ساخته شدیم؟

### تمارین بخش مدل‌های اتمی قبل از بور

17- بطور خلاصه آزمایش صفحه طلای رادرفورد و مشاهدات آن را توضیح دهید. مدل اتمی رادرفورد را شرح دهید و با استفاده از آن مشاهدات آزمایش صفحه طلای رادرفورد را توجیه کنید.

18- در صورتیکه در آزمایش صفحه طلای رادرفورد، بجای ذرات  $\alpha$ ، پروتون با همان سرعت به سمت صفحه طلا شلیک می‌شد، مقدار نیروی احساس شده توسط پروتون و مقدار انحراف آن را چگونه با ذرات  $\alpha$  مقایسه می‌کردید؟

19- در صورتیکه در آزمایش صفحه طلای رادرفورد، بجای شلیک هسته‌های هلیم ( ${}^4_2He^{2+}$ )، هسته‌های لیتیم ( ${}^7_3Li^{3+}$ ) به سمت ورقه نازک طلا شلیک می‌شدند، مقدار نیروی وارده بر هسته‌های شلیک شده و اندازه زاویه انحراف آنها چه تغییری می‌کرد؟ پاسخ خود را با ذکر دلیل توضیح دهید.

20- در صورتیکه در آزمایش صفحه طلای رادرفورد، بجای ورقه نازک طلا از ورقه نازک مس ( ${}_{29}Cu$ ) استفاده می‌شد، آیا در کلیت نتیجه آزمایش تغییری حاصل می‌شد؟ چرا؟ نتیجه آزمایش با مس از چه جهاتی با صفحه طلا متفاوت خواهد بود؟

21- کدام مدل اتمی به عنوان اولین مدل، وجود هسته در ساختار اتم را در نظر گرفت؟ به چه علت این مدل کنار مدل گذاشته شده است؟

### تمارین بخش امواج

22- شخصی در برابر کوهی به فاصله  $1\text{ km}$  ایستاده است و با فرکانس  $1000\text{ Hz}$  فریاد می‌زند، سرعت صوت در هوا را  $330$  متر بر ثانیه فرض نمایید.

الف) چند ثانیه طول می‌کشد تا بعد از فریاد زدن شخص، شخص برگشت صدای خود را بشنود؟  
ب) طول موج صدای شخص را بدست آورید.

23- فرکانس و انرژی فوتونی با طول موج  $500\text{ nm}$  را حساب کنید.

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} : h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s}, c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

24- فوتون با طول موج  $628\text{ nm}$  را در نظر بگیرید.

الف) طول موج را برحسب متر به صورت نماد علمی بیان کنید.  
ب) انرژی هر فوتون را برحسب الکترون ولت ( $ev$ ) محاسبه کنید.



- 25- برای داشتن 1 ژول انرژی تابشی، نیازمند چه تعداد فوتون با طول موج  $1\mu m$  هستیم؟
- 26- فرض کنید نیازمند فوتونهایی با انرژی در محدوده  $1MeV - 2MeV$  (یک تا دو مگا الکترون ولت) هستیم. محدوده فرکانس و طول موج فوتونهای مورد نیاز را حساب کنید.
- 27- فوتون هایی با طول موج هایی در محدوده  $50\text{ nm}$  تا  $100\text{ nm}$  در دسترس داریم.
- الف) این فوتون ها به کدام ناحیه از طیف امواج الکترومغناطیسی تعلق دارند؟ (مرئی، فروسرخ و ...)
- ب) حداقل و حداکثر انرژی فوتون ها در این محدوده را بر حسب ژول و الکترون ولت به دست آورید.
- پ) کم انرژی ترین فوتون این محدوده و پرانرژی ترین فوتون نور مرئی را در نظر گرفته و نسبت انرژی آنها را به دست آورید.

### تمارین بخش مدل اتمی بور و طیف های اتمی

- 28- اندازه نیروی الکتریکی بین الکترون و هسته یون  $B^{4+}$  در حالت پایه اش را بر حسب نیوتن بدست آورید.

$$F = \frac{Kq_1 \times q_2}{r^2}, K = 9 \times 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2},$$

$$r_n = 0.529\text{Å} \times \frac{n^2}{Z}, 1\text{Å} = 10^{-8}\text{cm}$$

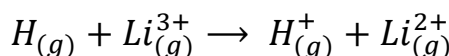
- 29- یک الکترون ولت بازای هر اتم معادل چند کیلوژول بازای یک مول است؟
- عدد آووگادرو  $= 6.022 \times 10^{23}$ ,  $1\text{ev} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$
- 30- در سیستم های تک الکترونی، چند درصد انرژی لازم برای کندن الکترون اتم در حالت پایه صرف بردن الکترون از لایه اول به لایه دوم می شود؟

$$E_n = \frac{-13.6 Z^2}{n^2} \text{ev}$$

- 31- انرژی لازم برای کندن آخرین الکترون  $54Xe$  در حالت پایه را بر حسب الکترون ولت بازای هر اتم و کیلوژول بر مول بدست آورید. فرکانس و طول موج فوتون مورد نیاز را نیز محاسبه کنید.

$$E_n = \frac{-13.6 Z^2}{n^2} \text{ev}, 1\text{ev} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$$

- 32- واکنش زیر را در نظر بگیرید:



الف) انرژی الکترون در حالت پایه اتم هیدروژن و یون  $Li(g)^{2+}$  را بر حسب  $ev$  محاسبه کنید.

ب) انرژی واکنش بالا را بر حسب الکترون ولت بر اتم و  $\frac{kJ}{mol}$  محاسبه کنید.

33- در کدام مدار بور برای اتم هیدروژن الکترون دارای بیشترین سرعت است؟ سرعت آن را در این مدار به صورت درصدی از سرعت نور بیان کنید.

$$m_e V_n r_n = \frac{nh}{2\pi}, r_n = 0.529 \text{Å} \times \frac{n^2}{Z}, m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}, 1 \text{Å} = 10^{-10} \text{m}$$

34- الکترون اتم هیدروژن در تراز  $n = 6$  را در نظر بگیرید.

الف) این الکترون در برگشت به حالت پایه چند خط طیفی می تواند تولید کند؟

ب) از خطوط طیفی تولید شده توسط این الکترون چه تعداد متعلق به سری لیمان هستند؟ چه تعداد به سری پاشن تعلق دارند؟

ج) از بین خطوط طیفی این الکترون که متعلق به سری پاشن هستند، آنکه پراورزی ترین است، دارای چه طول موج و فرکانسی است؟

د) کم انرژی ترین خط طیفی این الکترون دارای چه طول موج و فرکانسی است؟

ه) یک انتقال الکترونی از انتقالات الکترونی این الکترون را در نظر بگیرید که یک خط طیفی در محدوده نور مرئی تولید می کند. ترازهای مبداء و مقصد انتقال الکترونی در نظر گرفته شده را به همراه طول موج فوتون تولید شده بر اثر آن بدست آورید.

رابطه محاسبه طول موج انتقالات الکترونی در سیستم های تک الکترونی

$$\frac{1}{\lambda} = 1.09 \times 10^7 \times Z^2 \times \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) m^{-1}$$

35- طول موج مربوط به کم انرژی ترین و پر انرژی ترین خط طیفی مربوط به سری هامفری در اتم هیدروژن را بدست آورید. سری هامفری شامل مجموعه خطوط طیفی ناشی از انتقال الکترون به تراز  $n = 6$  است.

36- طول موج خط اول سری های لیمان، بالمر، پاشن و براکت را برای  $He^+$  بدست آورید و تعیین کنید که خط طیفی مربوطه متعلق به کدام دسته از امواج الکترومغناطیس است؟

37- الکترونی در تراز  $n = 8$   $Li^{2+}$  قرار دارد. سه تا از بلندترین طول موجهایی را بیابید که هنگام گذار الکترون از تراز  $n = 8$  به ترازهای پایینتر گسیل می شوند، بطوری که لزومی ندارد تراز مبداء حتماً تراز  $n = 8$  باشد.

38- یک سیستم کوانتومی بطور تقریبی می تواند شامل 4 تراز انرژی با سطح انرژی های برابر  $5ev, 10ev, 20ev$  و  $30ev$  فرض شود. بر این اساس به سؤالات زیر پاسخ دهید.

الف) در طیف نشری این سیستم چند خط طیفی کاملاً متمایز از هم می توان مشاهده نمود؟

ب) طول موج و فرکانس خط طیفی با بیشترین انرژی را بدست آورید.

ج) برای انتقال الکترون بین ترازها که متناظر با کمترین اختلاف انرژی است. انرژی لازم برای انتقال الکترون از تراز پایدارتر به تراز ناپایدارتر را برحسب  $kJ$  بازای یک مول انتقال بدست آورید.

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s, c = 3 \times 10^8 m/s$$

$$1ev = 1.6 \times 10^{-19} J, 1 kJ = 1000 J$$

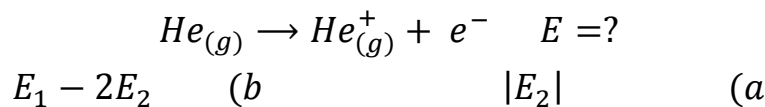
39- یون  $He^+$  و اتم  $He$  را در نظر بگیرید.

الف) سطح انرژی الکترون در حالت پایه یون  $He^+$  را برحسب  $ev$  محاسبه کنید و آن را  $E_1$  بنامید.

ب) طول موج فوتون مورد نیاز و انرژی مورد نیاز (برحسب  $\frac{kJ}{mol}$ ) را برای کندن الکترون در حالت پایه یون  $He^+$  محاسبه کنید.

ج) انرژی الکترون در حالت پایه اتم  $He$  را بر مبنای  $Z^* = 1.7$  که  $Z^*$  را مؤثر هسته برای هر الکترون است، محاسبه کنید. (برحسب  $ev$ ) و آن را  $E_2$  بنامید.

د) با استدلال بحث کنید که انرژی لازم برای کندن یکی از الکترونها ی اتم  $He$  در حالت پایه کدامیک از دو مورد زیر (  $a$  یا  $b$  ) است؟



الکترون ولت  $E_n = -13.6 \frac{Z^2}{n^2}$ : انرژی لایه  $n$  ام در سیستم های تک الکترونی

الکترون ولت  $E_n = -13.6 \frac{Z^{*2}}{n^2}$ : انرژی لایه  $n$  ام در سیستم های چند الکترونی

### تمارین بخش مدل اوربیتالی اتم

40- فرض کنید یک الکترون با انرژی جنبشی برابر  $10 ev$  داریم. طول موج نسبت داده شده به این الکترون را بر مبنای رابطه دو بروی بدست آورید.

$$\lambda = \frac{h}{m\nu}, h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s, m_e = 9.1 \times 10^{-31} kg$$

$$K = \frac{1}{2} m\nu^2, \quad 1ev = 1.6 \times 10^{-19} J$$

41- می دانیم انرژی الکترونها در اتم در گستره چند الکترون ولت است. نشان دهید که اصل عدم قطعیت محدود شدن الکترونها با این انرژی را در ناحیه های به ابعاد یک اتم ( $0.1 nm$ ) مجاز می دارد. (از فیزیک جدید کنت اس کرین)

42- پایه و اساس معادله شرودینگر یا تفاوت عمده مدل اوربیتالی اتم با مدل های قبلی چیست؟

- 43- یک تفاوت و یک تشابه برای مدل های اتمی بور و مدل اوربیتالی اتم بنویسید.
- 44- اوربیتال چگونه بدست می آید؟ بیانگر چیست؟ چگونه نمایش داده می شود؟
- 45-  $n, l, m_l$  مشخص کننده چیستند (نام آنها)؟ چه اطلاعاتی در مورد موقعیت یک اوربیتال در ساختار الکترونی اتم بدست می دهند؟ چه اطلاعاتی در مورد ویژگی های هندسی اوربیتال بدست می دهند؟
- 46- اوربیتالهای مختلف لایه اصلی  $n = 5$  را بدست آورید. تعداد و نماد هر نوع اوربیتال را مشخص کنید.
- 47- الف) مقادیر ممکن  $l$  برای  $n = 6$  کدامند؟  
ب) مقادیر ممکن  $m_l$  به ازای  $l = 6$  کدام است؟  
ج) کوچک ترین مقدار ممکن  $n$  که به ازای آن  $l$  بتواند 4 باشد، چیست؟  
د) کوچکترین  $l$  ممکن که مجموع  $m_s$  کلیه الکترونهاي آن (تعداد الکترون دلخواه) بتواند به  $+2$  برسد، چند است؟
- 48- توضیح دهید که چرا هر کدام از مجموعه عدد کوانتومی زیر  $(m_s, l, n)$  برای الکترون در اتمها مجاز نیست؟  
الف)  $(-1/2, +1, -1, 2)$   
ب)  $(+1/2, +3, 2, 3)$   
ج)  $(+3/2, +1, 2, 4)$   
د)  $(+1/2, -2, 3, 3)$
- 49- نمودار سطح مرزی تقریبی را برای اوربیتالهای  $2s, 1s$  و  $2p_y$  بصورت کیفی وار رسم کنید. اندازه نمودارها متناسب با اندازه اوربیتالها در مقایسه با هم باشد.
- 50- در صورتی که هر الکترون می توانست دارای سه مقدار برای  $m_s$  باشد (مثلاً  $m_s = -1, 0, +1$ ) ظرفیت هر اوربیتال و ظرفیت لایه اصلی  $n$  ام برابر چه می شدند؟
- 51- ماکزیمم  $n + l + m_l$  برای یک مقدار  $n$  مشخص را بر حسب  $n$  بدست آورید.
- 52- برای یک الکترون در زیر لایه  $3d$  هر یک از اعداد کوانتومی  $m_l, l, n$  و  $m_s$  چه مقدار یا مقادیری می توانند داشته باشند؟
- 53- در یک دنیای تخیلی، عدد کوانتومی مغناطیسی اوربیتال ( $m_l$ ) می تواند مقداری صحیح از 0 تا  $(l + 2)$  که  $l$  عدد کوانتومی فرعی است، بگیرد. با فرض آنکه مابقی قیدهای کوانتومی و همچنین زیرلایه هایی که در هر دوره از جدول تناوبی پر می شوند، تغییر نکنند، به سؤالات زیر پاسخ دهید.

الف) انواع زیرلایه ها و تعداد اوربیتالهای هر زیرلایه را برای لایه اصلی سوم ( $n = 4$ ) در این دنیای تخیلی بدست آورید.

ب) آرایش الکترونی فلز قلیائی دوره دوم جدول تناوبی دنیای تخیلی را بدست آورید.

ج) آرایش الکترونی گاز نجیب دوره پنجم جدول تناوبی دنیای ما را در دنیای تخیلی بدست آورید و مشخص کنید که به کدام دوره از جدول تناوبی دنیای تخیلی یاد شده تعلق دارد؟

54- فرض کنید مقادیر  $\ell$  برای هر لایه اصلی  $n$ ، می توانست از 0 تا  $n + 2$  تغییر کند. در اینصورت تعداد زیرلایه ها و تعداد اوربیتالهای هر لایه اصلی  $n$  را برحسب  $n$  بدست آورید. فرض کنید مابقی قیدهای کوانتومی تغییر نمی کنند.

55- با کاهش ( $n + \ell$ ) برای یک اوربیتال سطح انرژی اوربیتال کاهش می یابد یا افزایش؟ اوربیتال پایدارتر می شود یا ناپایدارتر؟ علت آن را براساس جاذبه ها و دافعه های موجود شرح دهید.

56- اتم سدیم ( $11Na$ ) را در نظر بگیرید.

الف) آرایش الکترونی این عنصر را بنویسید.

ب) کدام الکترونی بیشترین اثر پوششی را از طرف سایر الکترونها احساس می کند؟

ج) کدام الکترونی کمترین اثر پوششی را از طرف سایر الکترونها احساس می کند؟

د) چند الکترون با عدد کوانتومی  $m_\ell = -1$  در این اتم وجود دارند؟

ه) دو آرایش الکترونی برای سدیم در حالت برانگیخته پیشنهاد دهید.

57- آرایش الکترونی اتمها یا یونهای زیر را در حالت پایه بنویسید.

الف) $6C$	ب) $21Sc$	ج) $22Ti^{2+}$	د) $8O^{2-}$	ه) $11Na^+$	و) $35Br$
ز) $39Y^{3+}$	ح) $52Te^{2-}$	ط) $55Cs$	ی) $81Tl$	ک) $29Cu^+$	ل) $24Cr$

58- آرایش الکترونی  $3s^2 3p^2$  را در نظر بگیرید.

الف) اصل طرد پاولی چند حالت مختلف برای این آرایش الکترونی را رد می کند؟

ب) سه حالت مختلف مثال بزنید که با اصل طرد پاولی سازگارند، ولی از قاعده هوند تبعیت نمی کنند؟

59- به این مطالب توجه کنید:

"چنانچه هسته اتم را با خورشید مقایسه کنیم خواهیم دید زمانی که ابر جلوی خورشید را می گیرد روشنایی آن بطور کامل به زمین نمی رسد. در اینجا هرچه ابر غلیظتر باشد، شدت نوری که به زمین می رسد کمتر است. در مورد هسته نیز چنین است، یعنی هرچه چگالی ابر الکترونی بیشتر باشد، جاذبه هسته به الکترونهای مدار خارجی کمتر می رسد، بطور کلی هرچه اثر پوششی بیشتر باشد، بار مؤثر هسته یعنی باری که واقعاً باعث جذب الکترونهای مدار خارجی می شود، کمتر خواهد شد."

به تشابه هسته اتم با خورشید و اثرپوشی الکترونیهای دیگر با ابر جلوی خورشید چه ایرادهایی می تواند گرفته شود؟ مثلاً می توانید به شرح مواردی بپردازید که این تشابه از توجیه آنها عاجز است!

### تمارین بخش جدول تناوبی و خواص اتمی و تناوبی

- 60- در دوره ششم جدول تناوبی کدام زیرلایه ها پر می شوند؟
- 61- زیرلایه های  $d, p, s$  و  $f$  بترتیب برای اولین بار در کدام دوره از جدول تناوبی پر می شوند؟
- 62- در دوره چهارم جدول تناوبی کدام اتمها در آرایش الکترونی خود در حالت پایه دو الکترون جفت نشده دارند؟
- 63- فرض کنید عناصر تا عدد اتمی 200 پایدار و موجود باشند.
- الف) آرایش الکترونی عنصر با عدد اتمی 200 را بر اساس بناگذاری آفبا بنویسید.
- ب) جدول تناوبی جدید چند دوره خواهد داشت؟ در هر دوره چه زیرلایه هایی پر خواهند شد؟
- ج) عنصر با عدد اتمی 170 به کدام دوره و گروه از جدول تناوبی جدید تعلق خواهد داشت؟
- د) عنصر با عدد اتمی 176 به کدام بلوک از جدول تناوبی جدید تعلق خواهد داشت؟
- 64- اتم سلنیم ( $34Se$ ) را در نظر بگیرید.
- الف) آرایش الکترونی آن را بنویسید.
- ب) آرایش الکترونی پایدارترین یون حاصل از آن را بنویسید.
- ج) در این اتم، چند الکترون با  $m_l = +2$  وجود دارد؟
- د) کدام الکترون یا الکترونها بیشترین بار مؤثر هسته را احساس می کنند؟
- ه) شعاع و نخستین انرژی یونش آن را با اتمهای هم دوره مجاور ( $33As$  و  $35Br$ ) مقایسه کنید و برای مقایسه خود دلیل یا دلایل مناسبی ارائه دهید.
- و) چرا علیرغم قدرت نفوذ بیشتر برای زیرلایه  $4p$  در مقایسه با  $3d$ ، اوربیتالهای زیرلایه  $3d$  پر هستند درحالیکه زیرلایه  $4p$  در حال پر شدن است؟
- 65- در هریک از موارد زیر اتمها یا یونها را به ترتیب افزایش کمیت یاد شده از راست به چپ مرتب کنید.
- الف) نخستین انرژی یونش:  $Cs, Rb, K, Na, Li, H$
- ب) شعاع اتمی:  $Kr, Xe, Ar, Ne, He$
- ج) دومین انرژی یونش:  $Ne, F, O, N, C, B, Be, Li$
- د) اندازه:  $Ne, F, O, N, C, B, Be, Li$
- 66- هریک از موارد زیر را چگونه توجیه می کنید.

الف) با وجود اینکه اتم نیتروژن از اتم اکسیژن بزرگتر است، نخستین انرژی یونش نیتروژن از اکسیژن بیشتر است.

ب) دومین الکترونخواهی تمام عناصر انرژی گیر است.

ج)  $IE_1$  اتم فلئور از اتم کلر بیشتر است، اما الکترونخواهی اتم فلئور از اتم کلر کمتر گرمایست.

د) علیرغم اینکه  $Mg$  و  $Li$  در یک گروه قرار ندارند، دارای خواص مشابهی هستند.

ه) الکترون  $4s$  اتم پتاسیم در حالت پایه کمترین بار مؤثر هسته را در مقایسه با سایر الکترونها از طرف هسته احساس می نماید.

و) با وجود اینکه بار مؤثر هسته در اتم گوگرد ( $S$ ) از اتم فسفر ( $P$ ) برای خارجی ترین الکترون بیشتر است، نخستین انرژی یونش اتم فسفر از اتم گوگرد بزرگتر است.

ز) در گروه گازهای نجیب، بیشترین نخستین انرژی یونش متعلق به اتم هلیم است.

ح) در دوره سوم جدول تناوبی، بیشترین نخستین انرژی یونش متعلق به اتم آرگون ( $Ar$ ) است.

ط) اوربیتال  $1s$  اورانیوم ( $U$ ) از اوربیتال  $1s$  ( $Li$ ) پایدارتر است.

ی) اوربیتال  $2s$  اتم کربن از اوربیتال  $2p$  آن پایدارتر است.

ک) اوربیتال  $2s$  اتم سدیم از اوربیتال  $3s$  آن پایدارتر است.

ل) در اتم پتاسیم ( $K$ ) اوربیتال  $4s$  پایدارتر از  $3d$  است، اما در اتم اورانیوم ( $U$ ) اوربیتال  $3d$  پایدارتر از  $4s$  است.

م) آرایش اتم مس بجای  $[Ar] 3d^9 4s^2$  بصورت  $[Ar] 3d^{10} 4s^1$  است.

67- انرژی یونش چهارم  $Be$  را بر حسب  $ev$  بازای هر اتم و  $kJ/mol$  حساب کنید.

68- ده انرژی یونش اول یک عنصر اصلی بر حسب کیلوژول بر مول بصورت زیر است؟

786.5, 1577.1, 3231.6, 4355.5, 16091, 19805, 23780, 29287, 33878, 38726

الف) این عنصر به کدام گروه از جدول تناوبی تعلق دارد؟ چرا؟

ب) در صورتیکه این عنصر متعلق به دوره سوم جدول تناوبی باشد، آخرین جهش بزرگ آن بین کدام انرژی های یونش رخ می دهد؟

69- پارامغناطیس (حاوی الکترون جفت نشده) و دیا مغناطیس (تمامی الکترونها به صورت جفت شده) بودن را برای گونه های زیر تعیین کنید.

الف)  $O$  (ب)  $Cr$  (ج)  $Zn$  (د)  $N$  (ه)  $CS$  (ه)

در صورتی که خصلت پارامغناطیسی متناسب با تعداد الکترونهای جفت نشده باشد، کدام گونه بیشترین خصلت پارامغناطیسی را دارد؟