



فیزیک جدید ۲

محمود جنوبی

بسم الله الرحمن الرحيم

پیشگفتار ناشر

کتاب‌های دانشگاه پیام نور حسب مورد و با توجه به شرایط مختلف یک درس در یک یا چند رشته دانشگاهی، به صورت کتاب درسی، متن آزمایشگاهی، فرادرسی، و کمک‌درسی چاپ می‌شوند.

کتاب درسی ثمره کوشش‌های علمی صاحب اثر است که براساس نیازهای درسی دانشجویان و سرفصل‌های مصوب تهیه و پس از داوری علمی، طراحی آموزشی، و ویرایش علمی در گروه‌های علمی و آموزشی، به چاپ می‌رسد. پس از چاپ ویرایش اول اثر، با نظرخواهی‌ها و داوری علمی مجدد و با دریافت نظرهای اصلاحی و متناسب با پیشرفت علوم و فناوری، صاحب اثر در کتاب تجدیدنظر می‌کند و ویرایش جدید کتاب با اعمال ویرایش زبانی و صوری جدید چاپ می‌شود.

متن آزمایشگاهی (م) راهنمایی است که دانشجویان با استفاده از آن و کمک استاد، کارهای عملی و آزمایشگاهی را انجام می‌دهند.

کتاب‌های فرادرسی (ف) و **کمک‌درسی** (ک) به منظور غنی‌تر کردن منابع درسی دانشگاهی تهیه و بر روی لوح فشرده تکثیر می‌شوند و یا در وبگاه دانشگاه قرار می‌گیرند.

مدیریت تولید محتوا و تجهیزات آموزشی

فهرست

پیشگفتار	یازده
فصل اول: اتم‌های چند الکترونی	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ اصل طرد پاولی	۴
۳-۱ آرایش الکترونی اتم‌های چند الکترونی	۶
۴-۱ قاعده هوند	۸
۵-۱ جدول تناوبی عناصر	۱۰
۶-۱ شعاع اتمی عناصر	۱۷
۷-۱ انرژی یونش	۱۷
۸-۱ مقاومت ویژه‌ی الکتریکی	۱۹
۹-۱ جفت‌شدگی اسپین - مدار	۲۰
۱۰-۱ تکانه زاویه‌ای کل	۲۳
۱۱-۱. جفت‌شدگی LS	۲۷
۱۲-۱ جمع کردن تکانه‌های زاویه‌ای	۳۰
۱۳-۱ طیف اتمی	۳۲
۱۴-۱ اتم هیدروژن	۳۲
۱۵-۱ سدیم	۳۳
۱۶-۱ هلیوم	۳۵
۱۷-۱ طیف پرتوهای X	۳۷
۱۸-۱ اثر اوژه، خودیونش	۴۲
۱۹-۱ لیزرها	۴۲
۱۹-۱-۱ گسیل خودبه‌خودی و القایی تابش	۴۲
۲۰-۱ پاسخ خودآزمایی‌های فصل اوّل	۴۸
۲۱-۱ مسائل	۵۰

۵۳	فصل دوم: مکانیک آماری
۵۴	۱-۲ مقدمه
۵۴	۲-۲ دستگاه‌های میکروسکوپی و ماکروسکوپی
۵۷	۳-۲ توابع توزیع آماری
۵۹	۴-۲ توزیع آماری ماکسول - بولتزمن
۶۰	۵-۲ توزیع انرژی‌های ملکولی در یک گاز ایده‌آل
۶۶	۶-۲ همپاری انرژی
۶۷	۷-۲ آمار ماکسول - بولتزمن
۷۰	۸-۲ مکانیک آمار کوانتومی
۷۲	۹-۲ توابع توزیع بور- انیشتین و فرمی - دیراک
۷۵	۱۰-۲ کاربردهای آمار بور - انیشتین
۷۹	۱۱-۲ قانون تابش پلانک
۸۲	۱۲-۲ قانون جابجایی وین
۸۳	۱۳-۲ قانون استفان بولتزمن
۸۴	۱۴-۲ ظرفیت گرمایی جامدات
۸۶	۱۵-۲ فرمول انیشتین
۸۷	۱۶-۲ کاربرد آمار فرمی - دیراک
۸۹	۱۷-۲ انرژی فرمی
۹۰	۱۸-۲ تابع توزیع انرژی الکترون
۹۳	۱۹-۲ خودآزمایی نهایی فصل دوم
۹۳	۲۰-۲ پاسخ خودآزمایی‌های فصل دوم
۹۵	۲۱-۲ پاسخ خودآزمایی نهایی فصل دوم
۹۹	۲۲-۲ مسائل
۱۰۳	فصل سوم: ملکول‌ها
۱۰۴	۱-۳ مقدمه
۱۰۵	۲-۳ پیوند ملکولی
۱۰۸	۳-۳ اشتراک الکترون
۱۱۰	۴-۳ یون ملکول هیدروژن H_2^+
۱۱۱	۵-۳ انرژی سیستم
۱۱۵	۶-۳ ملکول هیدروژن
۱۱۷	۷-۳ ملکول‌های مرکب
۱۱۹	۸-۳ پیوندهای ملکولی
۱۲۳	۹-۳ هیبرید شدن (آمیختن) اوربیتالی
۱۲۴	۱-۹-۳ اوربیتال هیبرید sp
۱۲۵	۲-۹-۳ اوربیتال‌های هیبریدی

۱۲۷	۳-۹-۳ اوربیتال‌های هیبریدی sp^2, dp
۱۲۹	۳-۱۰ طیف‌های ملکولی
۱۳۲	۳-۱۱ ترازهای انرژی چرخشی
۱۳۴	۳-۱۲ طیف چرخشی
۱۳۵	۳-۱۳ ترازهای انرژی ارتعاشی
۱۳۹	۳-۱۴ طیف‌های ارتعاشی - چرخشی
۱۴۱	۳-۱۵ طیف الکترونی ملکول‌ها
۱۴۳	۳-۱۶ فلئوئورسانی و فسفرسانی
۱۴۵	۳-۱۷ فسفرسانی
۱۴۶	۳-۱۸ پاسخ خودآزمایی‌های فصل سوم
۱۵۰	۳-۱۹ مسائل

فصل چهارم: فیزیک حالت جامد

۱۵۳	۴-۱ مقدمه
۱۵۴	۴-۲ جامدات بلوری و بی‌شکل
۱۵۵	۴-۳ ناراستی و نقص بلور
۱۵۷	۴-۴ بلورهای یونی
۱۶۰	۴-۵ بلورهای کووالانسی
۱۶۶	۴-۶ باکی‌بال‌ها و نانولوله‌ها
۱۶۸	۴-۷ پیوندهای واندروالس
۱۶۹	۴-۸ پیوندهای هیدروژنی
۱۷۲	۴-۹ پیوند فلزی
۱۷۴	۴-۱۰ قانون اهم
۱۷۷	۴-۱۱ ابررساناها
۱۸۲	۴-۱۲ جفت الکترون‌های مقید
۱۸۶	۴-۱۳ نظریه نواری جامدات
۱۹۲	۴-۱۴ تحلیل نظری نوارهای انرژی
۱۹۳	۴-۱۵ رساناها
۲۰۰	۴-۱۶ عایق‌ها
۲۰۳	۴-۱۷ نیم‌رساناهای ذاتی
۲۰۵	۴-۱۸ نیم‌رسانای دارای ناخالصی
۲۰۷	۴-۱۹ نیم‌رسانای نوع p
۲۰۹	۴-۲۰ وسایل نیم‌رسانا
۲۱۲	۴-۲۱ پیوندگاه فلز - نیم‌رسانا
۲۱۳	۴-۲۲ پیوندگاه p-n
۲۱۷	بایاس مستقیم
۲۱۹	

۲۱۹	بایاس معکوس
۲۲۲	۲۳-۴ ترازهای انرژی p-n
۲۲۴	۲۴-۲ پاسخ خودآزمایی‌های فصل چهارم
۲۲۹	۲۵-۴ مسائل
۲۳۳	فصل پنجم: ساختار هسته
۲۳۳	۵-۱ مقدمه
۲۳۴	۵-۲ ترکیب هسته
۲۳۷	۵-۳ جرم اتمی
۲۳۸	۵-۴ چندخاصیت هسته‌ای
۲۴۲	۵-۵ گشتاور مغناطیسی هسته
۲۴۵	۵-۶ تشدید مغناطیس هسته‌ای (NMR)
۲۴۵	۵-۷ واپاشی هسته‌ای
۲۴۶	۵-۷-۱ واپاشی آلفا
۲۴۶	۵-۵-۲ گسیل پوزیترون
۲۴۷	۵-۸ انرژی پیوند یا بستگی
۲۵۰	۵-۹ واکنش‌های هسته‌ای
۲۵۲	۵-۱۰ نیروی هسته‌ای قوی
۲۵۳	۵-۱۱ مدل قطره مایع
۲۵۹	۵-۱۲ اصلاح فرمول
۲۶۳	۵-۱۳ مدل پوسته‌ای
۲۶۷	۵-۱۴ پاسخ خودآزمایی‌های فصل پنجم
۲۶۷	۵-۱۵ مسائل
۲۷۱	فصل ششم: واپاشی هسته‌ای و واکنش‌های هسته‌ای
۲۷۲	۶-۱ مقدمه
۲۷۳	۶-۲ واپاشی رادیواکتیو
۲۷۶	۶-۳ هسته‌های پایدار و ناپایدار
۲۷۸	۶-۴ قانون واپاشی رادیواکتیو
۲۷۹	۶-۴-۱ نیمه عمر
۲۸۳	۶-۴-۲ عمریابی
۲۸۶	۶-۴-۳ روش‌های ردیابی
۲۸۶	۶-۵ فروپاشی زنجیره‌ای
۲۸۸	۶-۶ واپاشی آلفا
۲۹۲	۶-۷ واپاشی بتا
۲۹۴	۶-۸ واپاشی گاما

۲۹۶	۶-۹ سطح مقطع
۳۰۱	۶-۱۰ آهنگ واکنش
۳۰۳	۶-۱۱ واکنش‌های هسته‌ای
۳۰۷	۶-۱۲ تولید ایزوتوپ در واکنش‌های هسته‌ای
۳۰۹	۶-۱۳ دستگاه مختصات مرکز جرم
۳۱۲	۶-۱۴ شکافت
۳۲۰	۶-۱۵ راکتورهای آب جوشان .
۳۲۱	۶-۱۶ هم‌جوشی در ستارگان
۳۲۵	۶-۱۷ راکتورهای هم‌جوشی
۳۲۹	۶-۱۸ پاسخ خودآزمایی‌های فصل ششم
۳۲۹	۶-۱۹ مسائل

فصل هفتم: ذرات بنیادی

۳۳۹	۷-۱ پیشگفتار
۳۴۰	۷-۲ ذرات آشنا
۳۴۳	۷-۳ فوتون
۳۴۳	۷-۴ الکترون
۳۴۴	۷-۵ پروتون
۳۴۵	۷-۶ نوترون
۳۴۵	۷-۷ قوانین پایستگی و اصول ناوردایی
۳۴۶	۷-۸ برهم‌کنش‌ها و ذرات
۳۴۸	۷-۸-۱ برهم‌کنش گرانشی
۳۴۹	۷-۸-۲ برهم‌کنش الکترومغناطیس
۳۵۱	۷-۸-۳ نیروهای هسته‌ای قوی
۳۵۲	۷-۹ نظریه مزون در باره نیروهای هسته‌ای
۳۵۷	۷-۱۰ برهم‌کنش ضعیف
۳۶۱	۷-۱۱ نمودار فاینمن
۳۶۲	۷-۱۲ کشف پادالکترون، میون و پیون
۳۶۶	۷-۱۳ شتاب‌دهنده‌ها آشکارسازها
۳۶۸	۷-۱۴ لپتون‌ها، باریون‌ها و مزون‌ها
۳۷۲	الف) لپتون‌ها
۳۷۲	ب) هادرون‌ها
۳۷۳	۷-۱۵ قوانین بقاء: کمیت‌های پایسته
۳۷۵	۷-۱۶ قانون بقای بار الکتریکی
۳۷۸	۷-۱۶-۱ قانون بقای عدد باریون
۳۷۸	۷-۱۶-۲ قانون بقای عدد لپتون

۳۸۰	۷-۱۷ منشأ قوانین بقای دقیق
۳۸۰	۷-۱۸ ایزواسپین
۳۸۲	۷-۱۹ شگفتی، ذرات شگفت
۳۸۶	۷-۲۰ پاریته
۳۸۸	۷-۲۱ ذرات تشدید
۴۰۱	۷-۲۲ پاسخ خودآزمایی‌های فصل هفتم
۴۰۴	۷-۲۳ مسائل
۴۰۹	پیوست ۱. رویدادهای مهم در تاریخ فیزیک جدید
۴۱۵	پیوست ۲. جداول
۴۲۰	پیوست ۳. مروری بر ریاضیات
۴۲۵	پیوست ۴.
۴۳۵	منابع

پیشگفتار

فیزیک جدید به بررسی نظریه‌های مرتبط با نسبیت و کوانتوم و کاربرد آن‌ها در اتم، هسته‌ای اتم و ذرات تشکیل دهنده‌ی آن، آرایش اتم‌ها در ملکول‌ها و جامدات و در مقیاس کیهانی با منشاء و تحول عالم می‌پردازد.

فیزیک کلاسیک از قرن هفدهم، با آزمایش‌های گالیله، محاسبات کپلر در مورد مدار سیاره‌ها و فرضیه‌های نیوتن و قوانین ریاضی حرکت شروع می‌شود. در دو قرن بعد از آن دستگاه نیوتنی مکانیک به همراه نظریه‌ی آن در مورد گرانش، دستاوردهای پیش‌بینی نشده‌ای به همراه داشت. مهم‌ترین آن کشف سیاره‌ی نیوتن بود. محاسبات بر پایه مکانیک نشان می‌داد که اختلال‌های اندکی که در مدار سیاره‌ی اورانوس مشاهده می‌شود مربوط به سیاره‌ی دیگری در منظومه شمسی است که در آن زمان، ۱۸۶۴، ناشناخته بوده است. این سیاره دقیقاً در همان مکانی که محاسبات نشان می‌داد کشف شد.

در اواسط قرن نوزدهم، راز قدیمی ماهیت حرارت به وسیله نظریه جنبشی ماده و ترمودینامیک حل شد. فیزیک کلاسیک در نیمه دوم قرن نوزدهم با چاپ نظریه‌ی ماکسول در مورد الکترومغناطیس و کشف امواج الکترومغناطیس به اوج خود رسید این نظریه الکتریسته و مغناطیس را به هم پیوند می‌داد.

در اواخر قرن نوزدهم پدیده‌های فیزیکی مهمی ظاهر شدند که فیزیک کلاسیک قادر به تبیین آن‌ها نبود. به فاصله چند سال الکترون، پرتو ایکس و رادیواکتیویته کشف شدند که فیزیک کلاسیک توضیحی برای آن‌ها نداشت و از طرفی نتایج برخی از

آزمایش‌ها مانند سرعت نسبی نور و گسیل و درآشامی تابش حرارتی به‌وسیله قوانین فیزیک کلاسیک قابل توجیه نبود.

معلوم شد که علی‌رغم دستاوردهای بزرگ فیزیک کلاسیک، اصول بنیادی نهفته‌ی آن نادرست است و به نظریه‌های جدیدی برای تبیین این پدیده‌ها نیاز بود. در آغاز قرن بیستم فرضیه‌های جدیدی سیمای فیزیک را تغییر داد که عبارت بودند از:

- نظریه‌ی نسبیت
- نظریه‌ی کوانتومی
- مدل هسته‌ای اتم

این سه نظریه بنیاد فیزیک جدید را تشکیل می‌دهد که مورد بحث فیزیک جدید است. بخشی از این پدیده‌ها را در فیزیک جدید ۱ بررسی کردیم و دنباله آن را در فیزیک جدید ۲ مورد بحث قرار می‌دهیم.

این کتاب به‌عنوان یک درس سه واحدی از واحدهای اختیاری دوره‌ی کارشناسی دانشگاه پیام‌نور در نظر گرفته شده است و دانشجویانی که قبلاً واحد فیزیک جدید ۱ و دروس پایه و ریاضیات را گذرانده‌اند می‌توانند آن را انتخاب کنند. نسبیت و نظریه‌های کوانتومی چارچوبی برای فهم فیزیک اتمی و هسته‌ای است. در این کتاب نظریه اتمی بر پایه مفاهیم مکانیک کوانتومی بررسی می‌شود و به خواص جمعی اتم‌ها می‌پردازیم و از جمله نگاهی به مکانیک آماری و حالت جامد می‌اندازیم. و سرانجام فیزیک هسته‌ای و ذرات بنیادی را مرور می‌کنیم.

در این کتاب بیشتر نظریه‌های فیزیک جدید را مد نظر قرار داده‌ایم این مفاهیم نظری دانشجویان را برای ادامه راه آماده می‌کند. در ضمن اگر نظریه دانشمندی را ارائه داده‌ایم سعی کرده‌ایم شرح مختصری از زندگی او را نیز بازگو کنیم تا دانشجو با کارهای که بزرگان دانش انجام داده‌اند و چشم‌اندازی که به فیزیک داشته‌اند آشنا شوند. در طول کتاب با آوردن مثال‌ها و خودآزمایی‌های متعدد سعی کرده‌ایم آمادگی بیشتری برای آموزش عملی آن فراهم کنیم.

کتاب شامل هفت فصل است. در فصل اول اتم‌های چند الکترونی از جمله آرایش الکترونی اتم‌ها، آرایش اتم‌ها و عناصر در جدول تناوبی مندلیف، طیف اتمی عناصر و طیف پرتوایکس و لیزر را مورد بحث قرار داده‌ایم.

در فصل دوم مکانیک آماری و توابع توزیع آماری و کاربردهای آنها و قضیه همپاری انرژی و بعضی از قوانین مرتبط را بررسی کرده‌ایم.

در فصل سوم ملکول‌ها و پیوند بین اتم‌ها، اوربیتال‌ها و آمیختن آنها و نیز طیف چرخشی و ارتعاشی ملکول‌ها و پدیده‌های فلورسانسی و فسفرسانی را بحث کرده‌ایم.

در فصل چهارم فیزیک حالت جامد را به‌طور مختصر مطالعه کرده و به پیوندهای یونی، فلزی و واندروالس، نظریه‌ی نواری جامدات، رساناها، عایق‌ها و نیم‌رساناها و ابرساناها پرداخته‌ایم.

در فصل پنجم ساختار هسته و مدل‌های هسته‌ای، تشدید مغناطیسی و خواص مهم هسته‌ای و انرژی بستگی در واکنش‌های هسته‌ای را مطالعه کرده‌ایم.

در فصل ششم واپاشی هسته‌ای و واکنش‌های هسته‌ای، انواع واپاشی هسته‌ای و واپاشی‌های رادیو اکتیو، واپاشی آلفا، بتا و گاما و پدیده کداخت و همجوشی و راکتورهای آب‌جوشان و همجوشی را مورد بحث و مطالعه قرار داده‌ایم.

در فصل هفتم به ذرات بنیادی پرداخته‌ایم قوانین پایستگی در مورد ذرات بنیادی، انواع برهم‌کنش‌ها، نظریه مزون یوکاوا، نمودارهای فاینمن، کوارک‌ها و خواص آنها را بررسی کرده‌ایم.

سعی وافر شده است که مطالب خودآموز و درخور دانشجویان پیام نور باشد. امید واثق وجود دارد که از نظرات خود مرا آگاه فرمائید.

محمود جنوبی

دی ماه ۱۳۹۲

فصل ۱

اتم‌های چند الکترونی

هدف‌های یادگیری

پس از مطالعه و یادگیری این فصل باید بتوانید:

- اصل طرد پاولی را بیان کنید.
- آرایش الکترونی اتم‌های چند الکترونی را تبیین کنید.
- چگونه پرشدن پوسته‌ها و زیرپوسته‌های الکترونی را بیان کنید.
- قاعده‌ی هوند را توضیح دهید.
- ترتیب پرشدن ترازهای انرژی را بر پایه قاعده‌ی هوند توضیح دهید.
- جدول تناوبی عناصر، ستون‌ها و ردیف‌های آن را تبیین کنید.
- تغییرات شعاع اتمی عناصر در جدول تناوبی را برحسب عدد اتمی توضیح دهید.
- انرژی یونش را تعریف کرده و تغییرات آن را برحسب عدد اتمی بیان کنید.
- روش آفبا را توضیح دهید.
- تغییرات مقاومت الکتریکی عناصر در جدول تناوبی را بیان کنید.
- جفت شدگی اسپین-مدار را بیان کنید و توضیح دهید که چگونه تکانه‌های زاویه‌ای به‌طور مغناطیسی جفت می‌شوند.
- تکانه زاویه‌ای کل را حساب کنید.
- جفت شدگی LS را توضیح دهید.
- بتوانید تکانه‌های زاویه‌ای را جمع کنید.

- طیف اتمی عناصر را در مورد اتم هیدروژن، سدیم و هلیوم تبیین کنید.
- طیف پرتوهای ایکس و منشأ آن را بیان کنید.
- اثر اوژه را بیان کنید.
- لیزر و اصول کار آن را توضیح دهید.
- به خودآزمایی‌ها و مسائل پاسخ دهید.

۱-۱ مقدمه

در این فصل برای ساخت مدلی تلاش می‌کنیم که به ما کمک کند تا ویژگی‌ها و ساختار اتم‌های بیش از یک الکترون را درک کنیم. قبلاً دیدیم که نظریه‌ی بور با وجود اینکه در سال‌های ۱۹۱۳ و ۱۹۲۴ میلادی با موفقیت‌های چشمگیری روبه‌رو شد لیکن مسائلی هم به وجود آمد که نمی‌توانست آن‌ها را توضیح دهد. مثلاً طول موج خطوط طیف اتم هیدروژن را با دقت محاسبه می‌کرد لیکن نمی‌توانست طول موج خطوط طیف خطی اتم‌های چند الکترونی را پیش‌بینی کند و یا خواص شیمیایی و پیوندپذیری اتم‌ها را توضیح دهد و پیشگویی‌های آن با نتایج تجربی منطبق نبود.

در سال ۱۹۲۶ شرودینگر فیزیک‌دان اتریشی با تلفیق معادله‌ی موجی و معادله‌ی کلاسیک مربوط به موج که تغییرات جابه‌جایی نقاط مختلف موج را در زمان و مکان مشخص می‌کرد و نیز در نظر گرفتن معادله دوبروی یک معادله‌ی مستقل از زمان برای حرکت موجی ذرات به دست آورد که بنام او مشهور است.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \psi + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi + \frac{\pi^2 m}{h^2} (E - V) \psi = 0 \quad (1-1)$$

حل این معادله برای اتم هیدروژن دقیقاً به همان نتایجی منجر شد که نظریه بور به آن رسید با این تفاوت که از به کار بردن روش‌ها و اصولی که امروزه بی‌اعتبار می‌نماید پرهیز می‌شود. از حل این معادله دو کمیت مقادیر مجاز انرژی، ϵ و تابع موج، ψ به دست آمد که تابع موج برای یک الکترون معیاری برای اندازه‌گیری احتمال وجود الکترون در نقاط مختلف فضای اطراف هسته است و این احتمال متناسب با ψ^2 است در نقاطی که مقدار آن زیاد است احتمال وجود الکترون نیز زیاد است. ψ تابعی از x, y, z است این مختصات نسبت به

مرکز هسته هیدروژن است. با رسم این توابع تصاویری به دست می‌آید که آن‌ها را اربیتال می‌نامند و اربیتال‌ها مکان هندسی نقاطی از فضا هستند که در آن‌ها احتمال وجود الکترون بسیار زیاد است (بیش از ۹۵٪) و اربیتال را می‌توان مانند ابری تجسم کرد که غلظت آن در اطراف هسته متفاوت است. محاسبه احتمال وجود الکترون در نقاط مختلف اطراف هسته با استفاده از اصول مکانیک موجی امکان‌پذیر است ولی برای اتم‌هایی که چند الکترون دارند جواب‌های دقیق از معادله شرودینگر به دست نمی‌آید. برای اتم دوالکترونی به جواب‌های عددی که دقیق هستند می‌توان اتکا کرد اما با افزایش تعداد الکترون‌ها به دست آوردن جواب‌ها دشوارتر می‌شود.

بنابراین برای اتمی با دوالکترون یا بیشتر، مثلاً، Z الکترون، محاسبه تابع موج و ویژه مقادیرها از معادله‌ی شرودینگر به مسئله ریاضی بسیار پیچیده‌ای تبدیل می‌شود. این پیچیدگی ناشی از برهم‌کنش کولنی میان الکترون‌ها با هسته و بین خودشان است زیرا الکترون نه تنها تحت تأثیر میدان کولنی هسته قرار می‌گیرد بلکه میدان کولنی میانگین $Z-1$ الکترون دیگر نیز بر آن تأثیر می‌گذارد که اگر توزیع بار میانگین را با تقارن کروی حاصل از این $Z-1$ الکترون در نظر بگیریم و مسئله را حل کنیم ویژه حالت‌های انرژی الکترون متحرک در چنین ابر الکترونی تا اندازه‌ای به ویژه حالت‌های اتم هیدروژن شبیه است. و آن‌ها را می‌توان با اعداد کوانتومی m_l, l, n و m_s (متناظر با حرکت شعاعی، اندازه‌ی تکانه زاویه‌ای مداری، مؤلفه‌ی Z این تکانه زاویه‌ای و مؤلفه‌ی Z اسپین الکترون) مشخص کرد. برای به دست آوردن جواب دقیق‌تر باید انحراف میان میدان کولنی میانگین و حقیقی، برهم‌کنش بین اسپین الکترون‌ها و تکانه‌های زاویه‌ای مداری (جفت‌شدگی $L-S$) را نیز در نظر گرفت که کاری پیچیده است.

بنابراین با افزایش عدد Z به دست آوردن این جواب‌ها دشوارتر می‌شود.

در این فصل سعی می‌کنیم با ارائه یک مدل، مجموعه‌ای تقریبی از ترازهای انرژی اتم‌های چند الکترونی را در نظر بگیریم و سعی کنیم بعضی از خواص شیمیایی اتم‌ها مانند خواص شیمیایی، الکتریکی، مغناطیسی، نوری و نظایر آن را بر مبنای این ترازها توضیح دهیم.

۱-۲ اصل طرد پاولی

برای هر الکترون در اتم، مجموعه اعداد کوانتومی متفاوتی وجود دارد.

در اتم هیدروژن، الکترون در حالت کوانتومی با پایین‌ترین انرژی قرار دارد. الکترون‌ها در اتم چند الکترونی چگونه ترازهای انرژی را اشغال می‌کنند؟

آیا ۹۲ الکترون در اتم اورانیوم در یک حالت کوانتومی قرار دارند و همگی در مدار اول بور قرار دارند؟ در غیر این صورت ترتیب قرار گرفتن الکترون‌ها، که به آن آرایش الکترونی می‌گوییم در اتم‌های چند الکترونی چگونه است؟ شواهد بسیار قرار گرفتن الکترون‌ها در یک حالت کوانتومی را رد می‌کنند. یکی از این شواهد این است که عناصری با ۹ و ۱۰ و ۱۱ که به ترتیب گاز فلور، گاز خنثی نئون و فلز سدیم است دارای خواص شیمیایی کاملاً متفاوتی هستند خواص شیمیایی اتم‌ها به تعداد الکترون‌های آن‌ها مربوط است و اگر فرض کنیم که کلیه الکترون‌های یک اتم در یک حالت کوانتوم هستند تفسیر و تبیین خواص شیمیایی عناصر بسیار مشکل است.

در سال ۱۹۲۵ ولفگانگ پاولی^۱ یک اصل بنیادی را کشف کرد آرایش الکترونی



۱. ولفگانگ پاولی: (Wolfgang Pauli, ۱۹۰۰-۱۹۵۸) - دروین اتریش متولد شد و در سن نوزده سالگی شرح مبسوطی بر نسبیت خاص و عام نوشت و انیشتین را تحت تأثیر قرار داد. و سال‌ها جزو کارهای برجسته در این زمینه بود. پاولی در سال ۱۹۲۲ درجه دکتری خود را از دانشگاه مونیخ دریافت کرد و قبل از اینکه استاد دانشگاه فیزیک انستیتوی زوریخ سوئیس در سال ۱۹۲۸ شود مدتی را در گوتینگن، کپنهاک و هامبورگ گذراند. در سال ۱۹۲۵ این نظریه که چهار عدد کوانتوم (یکی از آن‌ها در آن زمان ناشناخته بود) برای بیان مشخصه هر الکترون مورد نیاز است و هیچ دو الکترونی در یک اتم نمی‌توانند اعداد کوانتوم یکسان داشته باشند را عرضه کرد. این اصل که به اصل طرد پاولی مشهور شد حلقه گمشده‌ای در فهم آرایش الکترون‌ها در اتم بود.

در اواخر سال ۱۹۲۵ دو دانشمند هلندی بنام‌های گوداشمیت و النبک نشان دادند که الکترون دارای تکانه زاویه‌ای ذاتی بنام اسپین است. عدد کوانتوم چهارم الکترون جهت اسپین الکترون را بیان می‌کرد. دانشمند آمریکایی فیزیک بنام رالف کرونیگ اسپین الکترون را چند زودتر کشف کرده بود و در مورد آن با پاولی صحبت کرده بود. ولی از آنجائی که پاولی این نظریه کرونیگ را به تمسخر گرفته بود این کار پژوهشی را چاپ نکرده بود.

در سال ۱۹۳۱ مسئله مربوط به ظاهراً انرژی گمشده در واپاشی بتای هسته با این پیشنهاد که یک ذره بدون جرم و خنثی از هسته به همراه الکترون گسیلیده می‌شود را کشف کرد. دو سال بعد فرمی نظریه واپاشی بتا به کمک این ذره (امروزه معتقدند که این ذره جرم کوچکی دارد) که آن را نوترینو نامید (به معنای یک جسم خنثی کوچک) توضیح داد. پاولی سال‌های جنگ را در ایالات متحده گذراند و در سال ۱۹۴۵ جایزه نوبل فیزیک را دریافت کرد.

اتم‌های چند الکترونی را مشخص می‌کرد و طبق این اصل:

هیچ دو الکترونی در یک اتم نمی‌توانند حالت کوانتوم یکسان داشته باشند. هر

الکترون باید مجموعه اعداد کوانتوم متفاوت m_l, l, n و m_s داشته باشد.

پاولی با مطالعه خطوط طیفی اتم‌های چند الکترونی مختلف پی برد که هر الکترون در اتم دارای اعداد کوانتوم m_s, m_l, l, n مشخص و مختص به خود دارد. از روی خطوط طیف اتم‌ها می‌توان به حالت اتم و به اعداد کوانتوم مربوط به آن‌ها پی برد. در طیف اتم‌های مختلف خطوطی که مربوط به پرش الکترون بین دو حالت مشابه باشد دیده نشده است. بنابراین در اتم هلیوم هیچ‌گونه پرشی به تراز پایه یا از آن به حالت‌های دیگر وقتی که اسپین هر دو الکترون هم جهت باشد دیده نمی‌شود. درحالی‌که پرش‌هایی به تراز پایه یا از آن به ترازهایی دیگر که اسپین الکترون‌ها در جهت خلاف باشد و اسپین برآیند برابر با صفر شود دیده می‌شود. که در این حالت m_s برای یکی از الکترون‌ها $\frac{1}{4}$ و برای دیگری $-\frac{1}{4}$ است.

پاولی نشان داد که علت عدم وجود خطوط طیفی بین بعضی از ترازها این است که این ترازها اعداد کوانتوم مشابهی دارند و اصل طرد پاولی بیان‌کننده‌ای برای تبیین این مسئله بود.

مثال ۱-۱: عملکرد اصل پاولی را در مورد اتم لیتیم ($z=3$) و بریلیم ($z=4$) به کار برید.

پاسخ: مانند اتم هلیوم دو الکترون اول دارای اعداد کوانتوم

$$(n, l, m_l, m_s) = (1, 0, 0, +\frac{1}{4}) , (1, 0, 0, -\frac{1}{4})$$

است الکترون سوم طبق اصل طرد پاولی نمی‌تواند همین مجموعه از اعداد کوانتومی را داشته باشد بنابراین نمی‌تواند در تراز $n=1$ (در تراز انرژی n تعداد الکترون‌ها برابر با $2n^2$) قرار بگیرد. بنابراین الکترون سوم باید در یکی از ترازهای $n=2$ برود این ترازها $2s$ و $2p$ هستند لذا الکترون سوم باید در تراز $2s$ و دارای اعداد کوانتومی $(2, 0, 0, -\frac{1}{4})$ یا $(2, 0, 0, +\frac{1}{4})$ باشد و الکترون چهارم در بریلیم دارای سه عدد کوانتوم

n, l, m_l یکسان ولی عدد کوانتوم m_s متفاوت با الکترون سوم است.

۳-۱ آرایش الکترونی اتم‌های چندالکترونی

پوسته‌ها و زیرپوسته‌های الکترونی

ساختار اتمی و آرایش الکترونی اتم‌های چند الکترونی را با روشی که روش آفبا (aufbau)، از کلمه یونانی به معنی بناکردن است، مشخص می‌کنیم. این روش با سه اصل بنا شده است که با توجه به آن‌ها ترتیب پرشدن ترازهای انرژی را مشخص می‌کنیم. این اصول عبارتند از:

انرژی ترازها، اصل طرد پاولی و قاعده هوند.

از طرفی دو اصل اساسی ساختار اتم‌هایی با بیش از یک الکترون را مشخص می‌کنند:

۱. یک دستگاه از ذرات وقتی پایدار است که انرژی کل آن کمینه باشد

۲. فقط یک الکترون می‌تواند در هر حالت کوانتومی ویژه قرار بگیرد.

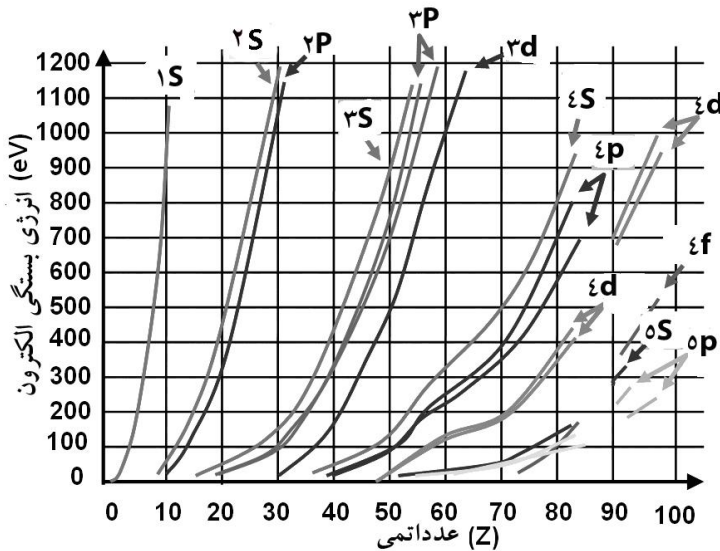
قبل از به‌کار بردن این قواعد در مورد اتم‌های واقعی تغییرات انرژی الکترون را با حالت کوانتومی بررسی می‌کنیم. در یک اتم الکترون‌ها بر همدیگر اثر متقابل دارند ولی به‌طور تقریب می‌توان فرض کرد که الکترون‌ها در یک میدان میانگین ثابت قرار دارند. در مورد یک الکترون در میدان مؤثر تقریباً میدان ناشی از بار هسته (Ze) منهای اثر سپری الکترون‌هایی که نزدیک‌تر به هسته قرار دارند می‌باشد (شکل ۱-۷). با توجه به اینکه کلیه الکترون‌هایی که یک عدد کوانتوم n دارند عموماً (و نه همیشه) در یک فاصله از هسته قرار دارند بنابراین با میدان الکتریکی یکسانی برهم‌کنش داشته و انرژی آن‌ها برابر است. در اصطلاح، این الکترون‌ها یک پوسته را اشغال می‌کنند. این پوسته‌ها را به ترتیب با حروف زیر مشخص می‌کنیم:

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

$$K \quad L \quad M \quad N \quad O$$

انرژی هر الکترون در یک پوسته تا حد معینی به عدد کوانتوم مدار l نیز بستگی دارد در یک اتم میران تأثیر بستگی به طرز توزیع چگالی احتمال الکترون‌های پوسته‌ها دارد یک الکترون با l کوچک بسیار محتمل است که مجاور هسته باشد و اثر سپری دیگر الکترون‌ها کمتر از الکترونی با l بزرگ‌تر است. پس این الکترون انرژی

کلی پایین‌تری داشته (یعنی، انرژی پیوندی آن زیادتر است). انرژی الکترون‌ها در هر پوسته با افزایش l افزایش می‌یابد این اثر را در شکل (۱-۱) که منحنی انرژی‌های بستگی الکترون‌های مختلف به صورت تابعی از عدد اتمی است برای الکترون‌های سبک‌تر مشاهده می‌کنید.



شکل ۱-۱. انرژی بستگی (برحسب واحد ریذبرگ (انرژی تراز پایه اتم هیدروژن) $1 \text{ Ry} = 13.6 \text{ eV}$) الکترون‌های اتمی برحسب عدد اتمی

انرژی الکترون‌های یک پوسته با افزایش l افزایش می‌یابد. این اثر در شکل (۱-۱) که منحنی انرژی بستگی الکترون‌های اتمی مختلف برحسب تابعی از عدد اتمی است نشان داده شده است. در یک پوسته الکترون‌هایی که l برابر دارند می‌گوییم که یک زیرپوسته را اشغال کرده‌اند تمام الکترون‌های یک زیرپوسته تقریباً انرژی مساوی دارند زیرا بستگی انرژی به اعداد کوانتوم m_l ، m_s تقریباً ناچیز است.

مرسوم است که حالت‌های تکانه زاویه‌ای الکترون را با حروف زیر مشخص کنیم:

$$l = 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad \dots$$

$$s \quad p \quad d \quad f \quad g \quad h \quad i \quad \dots$$

برای مشخص کردن تعداد الکترون‌ها و زیرپوسته‌هایی که الکترون در آن قرار می‌گیرد از علامت nx^y استفاده می‌کنیم که n مشخص کننده پوسته اصلی و x و y زیرپوسته و تعداد الکترون‌ها است. مانند

$$1s^2, 2p^4, \dots$$

بنابراین اتم سدیم را می‌توان به صورت $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$ نشان داد.

۴-۱ قاعده هوند

این قاعده نحوه پرشدن زیرپوسته‌های هم‌انرژی را معین می‌کند. طبق این قاعده زیرپوسته‌هایی که عدد کوانتوم اصلی و مداری ℓ و n یکسان دارند (مانند زیرپوسته‌های p) ابتدا منفرداً پر می‌شوند. یعنی زیرپوسته‌ها جفت نشده و اسپین‌های موازی دارند. وقتی این زیرپوسته‌ها با یک الکترون پر شدند الکترون‌های بعدی با الکترون‌های قبلی می‌توانند جفت شوند. مثلاً به آرایش الکترونی اتم از $Z=5$ تا $Z=10$ توجه کنید:

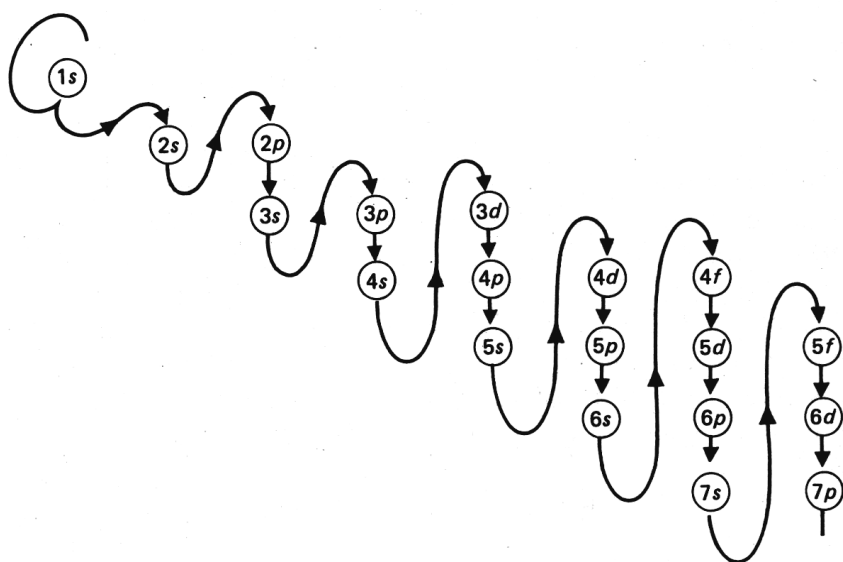
جدول ۱-۱. آرایش الکترونی چند عنصر

عنصر	عددهای	آرایش الکترونی	p_z	p_y	p_x
بورن	۵	$1s^2 2s^2 2p^1$			↑
کربن	۶	$1s^2 2s^2 2p^2$		↑	↑
ازت	۷	$1s^2 2s^2 2p^3$	↑	↑	↑
اکسیژن	۸	$1s^2 2s^2 2p^4$	↑	↑	↑↓
فلوئور	۹	$1s^2 2s^2 2p^5$	↑	↑↓	↑↓
نئون	۱۰	$1s^2 2s^2 2p^6$	↑↓	↑↓	↑↓

با مطالعه جدول (۱-۱) متوجه می‌شویم که برخی از عناصر ظاهراً از روش آفبا پیروی نمی‌کنند مثلاً در اتم کروم ۶ الکترون منفرد و جفت نشده وجود دارد و یکی از الکترون‌های جفت شده $4s$ ، پوسته $3d$ را اشغال می‌کند و به این دلیل است که زیرپوسته‌های هم‌انرژی که همگی به صورت منفرد یا جفت شده پر شده‌اند از سایر

آرایش‌ها پایدارترند. این گفته در مورد آرایش الکترونی مس نیز صادق است. در شکل (۲-۱) ترتیب پرشدن ترازهای انرژی را براساس قاعده‌ی هوند مشاهده می‌کنید.

معلوم شده است که معمولاً از بین دو زیرپوسته، آنکه مجموع اعداد کوانتومی n و l آن کمتر است از نظر انرژی در تراز پایین‌تر و در نتیجه از زیرپوسته دیگر پایدارتر است و همچنین در زیرپوسته‌هایی که مقدار $n+1$ آن‌ها یکی است آنکه عدد کوانتومی اصلی‌اش کوچک‌تر است دارای انرژی کمتری است.



شکل ۲-۱. ترتیب پرشدن ترازهای انرژی براساس قاعده‌ی هوند.

خودآزمایی ۱-۱

اگر به آرایش الکترونی آرگون ($Z=18$) یک الکترون اضافه کنیم با توجه به آرایش الکترونی آن این الکترون به زیرپوسته $4s$ یا $3d$ می‌رود؟

خودآزمایی ۲-۱

چهار عدد کوانتومی مربوط به تک الکترون اتم هیدروژن و جفت الکترون اتم هلیوم را در تراز پایه بنویسید.

خودآزمایی ۳-۱

نشان دهید که تعداد حالت‌های باعدد کوانتومی یکسان n برابر با $2n^2$ است.

۵-۱ جدول تناوبی عناصر

چگونه ساختار الکترونی اتم‌ها رفتار شیمیایی آن‌ها را مشخص می‌کند؟

اگر عناصر را برحسب اعداد اتمی مرتب کنیم ملاحظه خواهیم کرد که عناصر با خواص فیزیکی و شیمیایی مشابه و در فواصل منظم نسبت به همدیگر قرار می‌گیرند. این نتیجه تجربی که به اصل تناوب عناصر موسوم است در حدود یک قرن پیش به‌وسیله مندلیف^۱ کشف شد. جدولی که در آن عناصر به‌گونه‌ای مرتب شوند تا خواص تناوبی در آن‌ها مشهود گردد جدول تناوبی عناصر یا جدول مندلیف نامیده می‌شود.

عناصر با خواص مشابه گروهی را تشکیل می‌دهند که ستون‌های جدول (۱-۲) را تشکیل می‌دهند. گروه اول که در ستون اول نوشته شده‌اند شامل هیدروژن و فلزات قلیایی هستند و از لحاظ شیمیایی فوق‌العاده فعال بوده و دارای والانس $+1$ هستند. گروه هفت این جدول را هالوژن‌ها تشکیل می‌دهند که فوق‌العاده فرار بوده و از نظر شیمیایی فعال هستند. ظرفیت این دسته که تماماً شبه فلز هستند -1 است و در حالت گازی ملکول‌های دواتمی تشکیل می‌دهند. در گروه هشت این جدول گازهای نادر که کاملاً غیرفعال بوده و ترکیب شیمیایی تشکیل نمی‌دهند قرار دارند. یک ردیف از این جدول را دوره تناوب می‌نامند در یک دوره تناوب با یک فلز فعال برخورد می‌کنیم و هرچه پیش برویم از فعالیت شیمیایی کاسته شده و سرانجام به یک شبه‌فلز کم‌فعال می‌رسیم. سپس فعالیت شیمیایی شبه‌فلز رفته‌رفته زیاد شده تا در ستون هفت به حداکثر می‌رسد و در



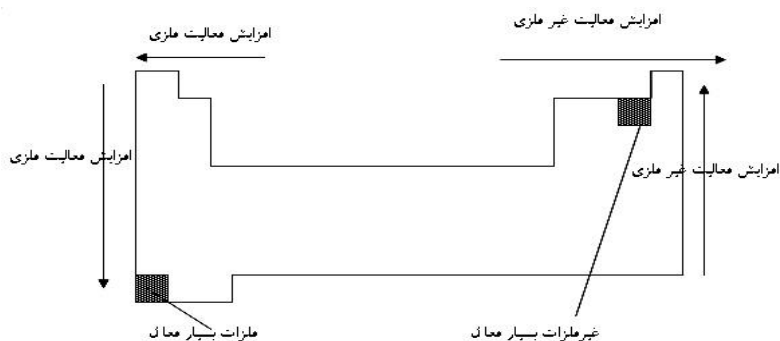
۱. دیمتری مندلیف (Dmitri Mendeleev, 1834–1907)

در سبیری متولد شد و در همان‌جا بزرگ شد به مسکو رفت و سپس عازم فرانسه و آلمان گردید و به مطالعه شیمی پرداخت. در سال ۱۸۶۶ استاد دانشگاه سنت پترزبورگ شد و سه سال بعد اولین پژوهش خود در مورد جدول تناوبی را منتشر کرد. مفهوم عدد اتمی تا آن زمان ناشناخته بود و او جدول را برحسب جرم‌های اتمی منظم کرد و جاهایی را خالی گذاشت که تصور می‌شد مربوط به عناصر کشف نشده است. (در آن زمان فقط ۶۳ عنصر کشف شده بود) مندلیف به خاطر این کار مشهور شد. پیروزی بیشتر جدول تناوبی در اواخر قرن نوزدهم مدیون کشف گازهای نادر بودشش عنصر که مندلیف از وجود آن‌ها خبر نداشت و آن‌ها گروهی جدیدی در جدول مندلیف تشکیل دادند عنصر ۱۰۱ جدول به افتخار او مندلیوفیم (mendelevium) نامیده شده است.

ستون هشتم به یک گاز نادر برخورد می‌کنیم در ستون‌های قائم نیز کم‌ویش بعضی از خواص تناوبی دیده می‌شود ولی مانند ردیف‌های افقی چشمگیر نیست. به‌عنوان مثال در مورد فلزات قلیایی زیاد شدن عدد اتمی باعث زیاد شدن فعالیت شیمیایی می‌شود و این در هالوژن‌ها برعکس است. بعد از ردیف سوم در هر دوره تناوب یک سری عناصر واسطه (Transition elements) بین ستون‌های دوم و سوم پیدا می‌شود این عناصر فلزاتی هستند که از لحاظ شیمیایی شبیه هم هستند و تقریباً از نظر خواص شیمیایی از یکدیگر غیرقابل تمیزند و به لانتانیدها (Lanthanide) یا عناصر نادر خاکی مشهورند. در ردیف هفتم نیز یک گروه فلزات که بی‌اندازه به هم نزدیکند یافت می‌شود که آکتینید (Actinide) نامیده می‌شوند.

می‌دانیم که اصل طرد تعداد الکترون‌های هر زیرپوسته را محدود می‌کند و هر زیرپوسته به‌وسیله عدد کوانتوم اصلی n و عدد کوانتوم مداری ℓ مشخص می‌شود و همواره $n > \ell$ است. به ازاء l ، $2\ell + 1$ مقدار برای m_ℓ و به ازای هر مقدار m_ℓ دو مقدار $(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})$ به ازای m_s وجود دارد. پس در هر زیرپوسته حداکثر $2(2\ell + 1)$ الکترون قرار می‌گیرد و در هر پوسته حداکثر $2n^2$ الکترون قرار می‌گیرد. هر زیرپوسته پر شده را زیرپوسته بسته می‌گوییم. زیرپوسته بسته s دوالکترون، p شش الکترون و d ده الکترون دارد.

تکانه زاویه‌ای اسپینی و مداری کل الکترون‌ها در یک زیرپوسته بسته صفر است و توزیع بار مؤثر کاملاً متقارن است. الکترون‌ها در پوسته بسته یا تکمیل شده کاملاً در قید هسته هستند زیرا بار مثبت هسته در مقایسه با بار الکتریکی دیگر الکترون‌های سپر بین هسته و این الکترون بزرگ است (شکل ۱-۶).



شکل ۱-۳. تغییر فعالیت شیمیایی در جدول تناوبی

جدول ۱-۲. جدول تناوبی عناصر

1 IA	2 IIA	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA
1 H 1.00794	2 He 4.0026	3 Li 6.941	4 Be 9.0122	5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984	10 Ne 20.1798	11 Na 22.9898	12 Mg 24.305	13 Al 26.9815	14 Si 28.0855	15 P 30.9738	16 S 32.067	17 Cl 35.4528	18 Ar 39.948
19 K 39.0983	20 Ca 40.078	21 Sc 44.9559	22 Ti 47.867	23 V 50.9415	24 Cr 51.9962	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.9332	28 Ni 58.6934	29 Cu 63.546	30 Zn 65.409	31 Ga 69.723	32 Ge 72.61	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798
37 Rb 85.4678	38 Sr 87.62	39 Y 88.906	40 Zr 91.224	41 Nb 92.9064	42 Mo 95.94	43 Tc (98)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.9055	46 Pd 106.42	47 Ag 107.8682	48 Cd 112.412	49 In 114.818	50 Sn 118.711	51 Sb 121.760	52 Te 127.60	53 I 126.9045	54 Xe 131.29
55 Cs 132.9054	56 Ba 137.328	57 La 138.9055	58 Ce 140.115	59 Pr 140.908	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.966	64 Gd 157.25	65 Tb 158.9253	66 Dy 162.500	67 Ho 164.9303	68 Er 167.26	69 Tm 168.9342	70 Yb 173.04	71 Lu 174.967	72 Hf 178.49
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	90 Th 232.0381	91 Pa 231.036	92 U 238.0289	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)	104 Rf (261)
101 Db (262)	102 Sg (266)	103 Bh (264)	104 Hs (277)	105 Mt (271)	106 Ds (271)	107 Rg (272)	108 Uub (277)	109 Uut (284)	110 Uuq (285)	111 Uup (289)	112 Uuh (292)	113 Uus (294)	114 Uuq (294)	115 Uup (294)	116 Uuh (294)	117 Uus (294)	118 Uuo (294)

اعداد داخل پرانتز جرم اتمی ایزوتوپ های بسیار پایدار هستند

لانتانیدها

اکتینیدها