

## شرحی از روند پیدایش کشف‌ها و نظریه‌های علمی

واحد تحقیقات شرکت شیشه‌ی قزوین  
برگردان: مهندس علیرضا آقایی میبیدی

اندیشه‌های فلسفی پیشینیان:

مفهوم اتم و ساختمان آن پیشینه‌ای دراز دارد. واژه‌ی یونانی *atomos* که واژه‌ی انگلیسی *atom* هم از آن مشتق شده است، به معنی غیرقابل تقسیم و بنابراین بدون ساختار (*Structureless*) است. کسب آگاهی از اتم و ساختمان آن در نتیجه‌ی پیشرفت روزافزون رشته‌های مختلف دانش‌های فیزیک و شیمی افزون‌تر شده است. به هر صورت هرگونه پژوهشی در زمینه‌های تاریخی تکامل مفهوم اتم به تقریب به تاریخ فشرده‌ای از تحول‌های علوم فیزیکی، گرهی ناگسستگی خورده است.

در پنج سده‌ی پیش از میلاد یک فیلسوف یونانی به نام لئوسیپوس (*Leucippus*) که متاسفانه از جزئیات زندگی او هیچ نمی‌دانیم و تنها بارقه‌ی کم‌سویی از پژوهش‌های علمی او به جای مانده است، برای نخستین بار فرضیه‌ی اتمی را مطرح ساخت. اندیشه‌ها و تأملات او توسط شاگردان و پیروانش به ویژه فیلسوف یونانی سده‌ی پنجم پیش از میلاد دموکریتوس (*Democritus*) بسط و گسترش یافت. این نظریه‌ها علاوه بر اتمیسم شامل یک جبرگرایی مکانیکی صلب و غیرقابل انعطاف هم بودند ولی از همان زمان اصول بعدی بقای ماده و انرژی را در اندرون وجود خویش پنهان داشتند.

نظریه‌های بیان شده توسط دیمقراطیس توسط فیلسوفان سده‌ی چهارم پیش از میلاد هم چون ایبکور و پیروانش که رویکردی ماده‌گرایانه به فلسفه‌ی پیدایش حیات داشتند، تحول و تکامل یافتند. کامل‌ترین توصیف جاندار این فلسفه به وسیله‌ی فیلسوف سده‌ی اول پیش از میلاد *Lucretius* در کتابش به نام (*de rerum natura*) درباره‌ی طبیعت اشیاء آمده است. ویژگی‌های اصلی این فلسفه عبارت بودند از:

۱- همه‌ی مواد از اجزای نهایی و تقسیم‌ناپذیری به نام اتم ساخته شده‌اند و همه‌ی تغییرها و تبدیل‌ها در مواد تنها و تنها گروه‌بندی و آرایش اتم‌ها را شامل می‌شود.

۲- گونه‌های مختلفی از اتم با اندازه‌ها و شکل‌های متفاوت وجود دارند و ویژگی‌های هر ماده‌ای به ماهیت اتم‌های سازنده‌ی آن ارتباط پیدا می‌کند. بنابراین برای نمونه رنگ سفید می‌تواند نشانه‌ای از وجود اتم‌های صاف بر روی سطح باشد و طعم گِرش نشانه‌ای از اتم‌های سوزنی شکل و....

۳- نیروها منحصر است به نیروهای ناشی از برخورد اتم‌ها و تنها سبب ساز انجام هر واکنشی نیروهای اتمی است.

۴- قطع نظر از اتم‌ها تنها واقعیت موجود، فضای خلاء بیکرانی است که اتم‌ها در آن حرکت می‌کنند.

۵- یک اتم در سقوط ابدی خود از فضا ممکن است به صورت تصادفی مقداری از مسیر خود انحراف پیدا کند. این انحراف سبب توانمندی اتم در برخورد با اتم‌های دیگر و در نهایت کسب موفقیت در پیدایش عنصرهای مادی جدید می‌شود. اصول سه‌گانه‌ی اول، سوم و پنجم هنوز با اندکی افزودن و کاست‌ها به‌عنوان بنیان‌های اصلی اتمیسم مورد استفاده است.

در سده‌های میانه مخالفت‌هایی در برابر روش جبرگرایی نگره‌ی اتمیسم به‌عمل می‌آمد که در نهایت این طرز تفکر در انحطاط اندیشه‌ی علمی در دنیای غرب سهم عمده‌ای ایفا کرد. شوق هم‌که پیشرفت‌های چشمگیر و قابل ملاحظه‌ای در زمینه‌ی شیمی و دانش اُپتیک به‌دست آورده بود و دانشمندان و ریاضی‌دانانش تلاش‌های درخشنده‌ای در زمینه‌ی ریاضیات و عبارت‌پردازی ریاضی کرده بودند، توجه شایانی به این تفکر نشان ندادند.

## سرآغاز دانش‌های نوین

به‌تقریب از حیات گالیله (در پایان سده‌ی شانزدهم میلادی) تا زمان اسحاق نیوتن که یک سده بعد می‌زیست شاهد یک انقلاب و خیزش واقعی در دانش‌های روز هستیم. این دوره با پیدایی جنبش‌های تازه‌ای در زمینه‌ی مشاهده‌ی کمی، دقیق، ارتقای کیفی تجزیه و تحلیل‌های علمی، ساخت دستگاه‌های آزمون‌گر قابل کنترل و سرانجام روش‌های تعمیم نتیجه‌ی علوم تجربی همراه بود. افزون بر این موضوع‌ها، دو دستاورد مهم این دوره در روشن کردن مفهوم‌های اتمی تأثیر عمیق و قابل ملاحظه‌ای داشتند یکی دانش پیشرفته‌ی مکانیک و به‌ویژه تأکیدی که این علم بر جرم یک جسم به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های آن جسم در تعیین رفتار (در مقابل یک نیروی خارجی) اجسام دارد و دیگری منازعه‌ای بر سر این موضوع که آیا نور از موج تشکیل شده است یا جریانی از ذره‌های خیلی ریز؟ این منازعه که به‌طور موقت در زمان حیات نیوتن به‌دلیل شخصیت تأثیرگذار او به‌نفع ذره‌گرایان پایان یافت بود یک سده‌ی بعد به‌نفع

نظریه‌ی موجی بودن نور که در عمل اثبات شد، تغییر موضع داد و جانی تازه گرفت. پیشرفت دیگری که در زمینه‌ی دانش اُبتیک حاصل شد، کشف نیوتن درباره‌ی پخش و پراکنش نور سفید در یک جسم بازتابان همچون منشور بود. این کشف به سهم خود در پیدایش دانش اسپکتروسکوپی تأثیر نهاد و این علم جدید هم دانش آدمی را از ساختارِ درونی اتم افزونی بخشید. به نظر می‌رسد تمام دستاوردهای علمی سده‌ی هفدهم میلادی بیش و کم مرهونِ تئوری اتمیست‌ها، نه تنها گالیله و نیوتن بلکه دانشمندان انگلیسی رابرت بویل و رابرت هوک و فیزیکدانِ آلمانی کریستیان هویگنس بوده است. رابرت هوک نظریه‌ی خاصی وضع کرد که در آن ویژگی‌های مواد از جمله گازها براساس پارامترهای حرکت و برخورد اتم‌ها قابل فهم بودند. این نظریه بعدها به نظریه‌ی سینتیک جای سپرد. اندیشه‌ی علمی هوک به طرز بی‌سابقه‌ای فراتر از زمانش بود ولی متأسفانه به دلیل آن‌که به اندازه‌ی کافی در مساله‌های ریاضی چیرگی نداشت، قادر به اثباتِ حقانیت اندیشه‌های خود نبود. تا حدی شگفت‌آور است که نخستین فرضیه‌ای که نه تنها اتم‌ها را به‌عنوان چیزهای سخت خیلی ریز بلکه مراکز نیرو تصور می‌کرد تا میانه‌های سده‌ی هیجدهم میلادی امکان ظهور و بروز پیدا نکرد. این کار توسط روگرو بوسکوویچ در وین انجام شد ولی در ونیز انتشار یافت. بوسکوویچ مردی دانشمند، شاعر و دیپلمات بود که در جایی که امروز مجموعه‌ی کشورهای یوگسلاوی خوانده می‌شود، زاده شد و در رُم درس خواند

### خاستگاهِ نظریه‌ی اتمی در شیمی:

پیشرفت و تکامل دانش شیمی مدرن بعد از فیزیک مدرن صورت گرفت. اگرچه بویل در سال ۱۶۶۱ میلادی تعریف کارآمد و دقیقی از یک عنصر به دست داد، ولی پیشرفت واقعی زمانی به دست آمد که تحت تأثیر مطالعات نیوتن و تأییدی که او بر اهمیت جرم داشت مطالعات و آزمون‌های شیمیایی کمی‌تر شدند. در همین اثنا روش‌های جداسازی گازها که تکامل یافته بود، طیف گسترده‌تری از انجام پژوهش‌ها را میسر ساخت و سبب‌ساز وضع قانون نسبت‌های معین شد. بیان صریح این قانون آن است که فارغ از نحوه‌ی تشکیل یک ترکیب شیمیایی خاص همیشه آن ترکیب از نسبت‌های وزنی ثابت و یکسانی به وجود می‌آید. این قانون به نوبه‌ی خود به جدول‌بندی اوزان معادل (equivalent weights) منجر شد که برطبق آن معادل‌های وزنی عنصرها یا جایگزین وزن واحد عنصر مرجع (برای نمونه هیدروژن) می‌توانند با یکدیگر ترکیب شوند.

در این مرحله نخستین تلاش برای مرتبط ساختن اتم‌ها با دانش شیمی آغاز شد. در سال ۱۸۰۸ میلادی سازوکار نوینی از پینش شیمیایی توسط شیمیدان انگلیسی ژان دالتون انتشار یافت. دالتون بر این باور بود که فرضیه‌ی اتمی به سبب خطایی که دربارهی مخلوط‌گازهای با چگالی‌های مختلف بروز می‌دهد، متزلزل و غیرقابل اتکا است. او البته قانون نسبت‌های معین را می‌دانست و حتا خودش قانون نسبت‌های چندتایی ساده را وضع کرده بود. این قانون بیان می‌کند موقعی که دو عنصر با بیشتر از یک نسبت وزنی ترکیب می‌شوند بیش از یک ترکیب و آمیزه تشکیل می‌دهند. برای نمونه، ازت و اکسیژن پنج آمیزه‌ی مختلف به نسبت‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ و ۵ (اکسیژن) به دست می‌دهند. دالتون از این‌جا به این اصل‌ها رهنمون شد:

۱- همه‌ی اتم‌های یک عنصر مشخص، یکسان و مشابه‌اند و با اتم‌های عنصرهای دیگر متفاوت هستند.

۲- واکنش‌های شیمیایی تنها یک تجدید آرایش اتمی محسوب می‌شوند.

۳- تشکیل یک ترکیب یا آمیزه با تشکیل اتم‌های ترکیبی آغاز می‌شود و سپس عنصرهای ترکیبی به دست می‌آیند و سرانجام ترکیب اصلی حاصل می‌شود.

این اصل‌ها به تنهایی واجد اهمیت ویژه و مهمی نبودند و حتا خیلی مدرن و نو هم نبودند. یک ساده‌انگاری بی‌مورد که به منظور ساده کردن کار از او سر زده‌ا و را به حدسی اشتباه رهنمون شد:

۴- اگر عنصرهای A و B تنها یک آمیزه با هم تشکیل دهند این آمیزه بی‌تردید از ترکیب یک اتم عنصر A با یک اتم عنصر B تشکیل شده است. دالتون چنین می‌پنداشت که اتم ترکیبی آب از یک اتم هیدروژن و یک اتم اکسیژن درست شده است.

### قانون مخلوط کردن حجمی گازها

با این فرض اضافی نتیجه‌ی ویژه‌ای حاصل شد و جدول‌های اوزان اتمی نسبی را منتشر کردند. غفلت و اشتباهی که ناشی از قانون بیش‌ترین ساده کردن‌ها بود به مقداری سردرگمی منتهی شد. در همین موضوع فرض ضمنی دایر بر این‌که ذره‌های نهایی هر عنصری اتم‌های منفردی هستند، پیش آمد. حل این اشکال زیرساخت قانونی شد که در سال ۱۸۰۸ میلادی یک دانشمند فرانسوی به نام ژوزف لوئیس گیلوساک آن را وضع کرد. وقتی گازها به طریق شیمیایی مخلوط می‌شوند، نسبت‌های حجمی مخلوط شونده نسبت‌هایی از عددهای ساده هستند. از

جمله هیدروژن و اکسیژن برای تشکیل مولکول آب به نسبت ۲ حجم هیدروژن و یک حجم اکسیژن مخلوط می‌شوند و مونواکسید کربن و اکسیژن برای تشکیل دی‌اکسید کربن به نسبت ۲ حجم مونواکسید کربن و یک حجم اکسیژن با هم مخلوط می‌شوند که البته ۲ حجم دی‌اکسید کربن هم تولید خواهد شد.

### فرضیه‌ی آووگادرو

این نتیجه، یک شیمیدان ایتالیایی به نام آمه‌دئو آووگادرو را بر آن داشت که در سال ۱۸۱۱ میلادی یک فرضیه‌ی دوبخشی پیشنهاد کند. اول آن‌که ذره‌های نهایی (در اصطلاح‌شناسی دالتون) گازهایی که عنصرهایشان جفت است (even element gases) در اساس به صورت اتم‌ها نیستند، بلکه ممکن است گروه‌هایی از اتم‌های متصل شده به هم جهت تشکیل مولکول باشند و دوم آن‌که حجم‌های معادل از گازها شامل تعداد مولکول‌های برابر هستند. با وجود این‌که این فرضیه به پیدایش یک طرح همخوان منجر شده بود ولی به علت آن‌که در برابر فرض‌های مسلم شیمی دانان آن دوره قد علم کرده بود، توجه خیلی کمی را به خود جلب کرد. این فرضیه تا سال ۱۸۵۸ میلادی به طرز عجیبی به فراموشی سپرده شد تا این‌که در این سال یک شیمی‌دان دیگر ایتالیایی به نام Stanislao Cannizzaro این فرضیه را با دلیل موجه‌تری در کنفرانسی که در کارلسروهه آلمان برگزار شده بود، مطرح کرد. با این‌که این فرضیه در این کنفرانس قبول عام یافت ولی تا اوایل سده‌ی بیستم میلادی هنوز مقاومت‌ها و مخالفت‌های قابل ملاحظه‌ای در برابر آن دیده می‌شد.

شعبه‌ی شیمی و مطالعات فیزیکی

### الکتروشیمی

در رشته‌ای متفاوت، پیشرفت‌های سریعی که در دانش الکتروسیته حاصل شد (به‌ویژه تکامل پیل ولتا در سال ۱۸۰۰ میلادی توسط یک فیزیکدان ایتالیایی به نام الساندرو ولتا پیدایش دانشی را که امروزه به آن الکتروشیمی می‌گوییم، ممکن ساخت. البته چنین مطالعه‌هایی را یک دانشمند انگلیسی به نام مایکل فارادی انجام داده است. کار او در این زمینه بسیار به یادماندنی است زیرا قانون‌های کمی الکترولیز توسط او وضع شد. باید خاطر نشان کرد که چنین مطالعاتی او را راهنمایی کردند که دریابد که نیروهای نگهدارنده‌ی اتم‌ها در کنار یکدیگر در ترکیبات شیمیایی متشاکت‌ریکی دارند و فوق‌العاده هم قوی هستند.

## جدول تناوبی عنصرها

پیشرفت دیگری که در دانش شیمی روی داد و حایز اهمیت فراوان بود، پیدایش جدول تناوبی عنصرها بود که نه تنها به ارتقای آگاهی‌های ما از ساختار اتم کمک کرد، بلکه سبب فراهم آمدن دانسته‌هایی اساسی شد که برپایه‌ی آن یک نظریه‌ی اتمی رضایت‌بخش و اقتناع‌کننده می‌توانست پایه‌گذاری شود. وجود گروه‌هایی از عنصرهای با ویژگی‌های مشابه مانند لیتیم، سدیم، پتاسیم، ریبیدیوم و سزیوم یا گروه آهن، کبالت و نیکل از زمان‌های دور شناخته شده بود. موقعی که اوزان اتمی عنصرها با درستی و دقت منطقی به دست آمدند، مشابهت‌های معینی در اوزان اتمی اعضای چنین گروه‌هایی ظاهر شد. اغلب یک گروه از سه عنصر تشکیل می‌شود که در بسیاری حالت‌ها، اوزان اتمی آن عنصرها نزدیک به هم است. از جمله وزن اتمی عنصر آهن ۵۶ و وزن اتمی عنصرهای کبالت و نیکل هر دو ۵۹ است و عنصری هم شناخته نشده است که عدد اتمی حد وسط این دو را داشته باشد. یا اگر عنصرهای هر گروه اوزان اتمی فاصله‌داری داشته باشند. به تقریب فضای معادلی اشغال می‌کنند. از جمله ۳۹ برای پتاسیم، ۸۵/۴ برای ریبیدیوم و ۱۳۳ برای عنصر سزیوم.

در سال ۱۸۶۹ میلادی شیمی‌دان روسی دیمتری مندلیف دریافت که اگر عنصرهای شیمیایی به ترتیب افزایش اوزان اتمی در جدولی مرتب شوند این گونه گروه‌بندی که نشانگر نظم و ترتیبی جامع و قابل توجه خواهد بود، شامل رخ نمودن به تقریب تناوبی ردیف مشابهی از عنصرهای شیمیایی می‌شود. بنابراین اگر هیدروژن که تا اندازه‌ای ناهنجاری از خود نشان می‌دهد، نادیده گرفته شود و اگر هلیوم که در آن زمان گازهای نادر هم خانواده‌اش هنوز شناخته نشده بود، مورد انصراف قرار گیرد، آنگاه ردیف عنصرهای لیتیم، بریلیوم، بور، کربن، نیتروژن، اکسیژن و فلورنور حاصل می‌شود. این ردیف از عنصری شروع می‌شود که فعال و واکنش‌زا است (لیتیوم) و تشکیل یون‌های مثبت هم می‌دهد تا می‌رسیم به کربن که عنصری به نسبت خنثا است سرانجام در انتهای ردیف به فلورنور می‌رسیم که عنصری به شدت فعال است و تشکیل یون‌های منفی می‌دهد.

عنصرهای هفت‌گانه‌ی بعدی عبارتند از سدیم، منیزیوم، آلومینیوم، سیلیکون، فسفر، گوگرد و کلر. این ردیف هم نه تنها همان تغییر ویژگی‌ها را از خود نشان می‌دهد بلکه هر عضوی از این ردیف از نظر شیمیایی با عنصر متناظر خود در ردیف بالاتر مشابهت و یکسانی دارد. البته جدول تناوبی آن زمان به تکمیلی جدول‌های امروزی نبود. چون برای نمونه تعدادی از گازهای خنثا در آن زمان هنوز کشف نشده بود مساله‌های دیگری هم از این حقیقت متأثر بود که برخی

از اوزان اتمی در آن زمان صحیح محاسبه نشده بودند (قابل اشاره است که مندلیف عدد اتمی ۱۱۸ را برای اورانیوم و عدد اتمی ۷۵ را برای ایندیوم به کار برده بود که البته هر دو اشتباه بودند). در حقیقت ناقص بودن جدول تناوبی مندلیف یک مزیت و حسن محسوب می شد. مندلیف به طرز موفقیت آمیزی در اصلاح نقصان های این طرح همت گماشت و وجود چندین عنصر ویژگی های تقریبی آنها را پیش بینی کرد. گالیوم، اسکاندیوم، ژرمانیوم، این عناصرها به ترتیب در سال های ۱۸۷۵، ۱۸۷۹ و ۱۸۸۶ کشف شدند و اکتشاف آنها شکی باقی نگذاشت که اندیشه ی علمی مندلیف تا چه پایه استوار، ارزشمند و پراعتبار بوده است.

### کشف الکترون

در سال ۱۸۵۸ میلادی شکل خاصی از تابش در حال صدور از کاتود یا صفحه ای دارای بار الکتریکی منفی کشف شد این کار در لوله ای که تخلیه ای الکتریکی از طریق یک گاز در آن صورت گرفته بود، انجام شد. تابش مذکور هنگام برخورد با دیوارهای شیشه ای لوله باعث پدیده ی فلوروسانس شد و موقعیت نقاط فلوروسانسی توسط یک میدان مغناطیسی مجاور آن آشکار شد. این تابش و تشعشع که اشعه ی کاتودی خوانده شد، بررسی های بیشتری را به خود جلب کرد. در سال ۱۸۷۹ میلادی یک فیزیکدان انگلیسی به نام ویلیام کروکس نشان داد که اشعه ی کاتودی از ذرات باردار دارای بار منفی تشکیل گردیده است. این مطلب در سال ۱۸۹۷ توسط فیزیکدان انگلیسی دیگری به نام سر تامسون مورد تصدیق قرار گرفت و نامبرده نسبت جرم (m) به بار الکتریکی (e) این ذره ها را محاسبه کرد و مقدار آن را حدود  $10^{-7}$  گرم به ازای واحد بار الکترومغناطیسی در آورد. این مقدار به حدود  $1000$  مرتبه از مقداری که پیش تر در مورد نسبت های این دو به دست آمده بود، کوچک تر بود. تامسون نتیجه گرفت آن چه کشف شده یک ذره ی مستقل است که نام آن را corpuscle گذاشت ولی خیلی زود نام الکترون روی آن گذاشته شد. او هم چنین پیشنهاد کرد که الکترون ها جزئی از اجزای هر نوع اتمی هستند که معنی این حرف آن بود که اتم باید قابل تقسیم و تجزیه باشد. در سال ۱۸۸۸ میلادی پژوهشگران چندی به طور مستقل پدیده ی فتوالکتریک را کشف کردند. معنی این پدیده آن است که نور تابانده شده بر روی سطح فلزی، ذره های باردار دارای بار منفی از سطح فلز ساطع می کند (البته اگر نور شامل طول موج هایی کوتاه تر از مقدار بحرانی فلز مورد استفاده باشد). همان گونه که اشاره کردیم تامسون این ذره ها را به عنوان الکترون مشخص کرد. در سال ۱۹۰۵ میلادی آلبرت اینشتین نشان داد که بر اساس فرضیه ی کوانتایی پلانک که هر پیمانه از انرژی  $h\nu$  تنها با یک

الکترون اندر کنش می دهد مقدار انرژی  $h\nu$  لازم است که الکترون را از سطح فلز آزاد کند و باقیمانده ی این دو مقدار یعنی  $h\nu - h\nu'$  به عنوان انرژی حرکت در الکترون باقی می ماند. در سال ۱۹۱۴ میلادی فیزیکدان آمریکایی، رابرت میلیکان به طور تجربی این نظریه ی اینشتین را مورد تایید قرار داد و این واقعیت را اثبات کرد که تشعشع برخی ویژگی هایی را عرضه می دارد که به طور طبیعی ذاتی وجود ذره ها است.

### کشف اشعه ی ایکس و رادیواکتیویته

در سال ۱۸۹۵ فیزیکدان آلمانی ویلهلم رونتگن اشعه ی ایکس را کشف کرد. اگرچه برخی رفتارهای موج گونه ی آن در اوایل سال ۱۹۰۴ اثبات شد ولی ماهیت این اشعه به مدت بیست سال در پرده ی فراموشی ماند. در همان سال ها یک فیزیکدان انگلیسی به نام چارلز گلوور بارکلا، نشان داد که هر عنصری را می توان وادار به صدور یک یا چند گروه مشخص از اشعه ی ایکس کرد. این گروه ها بر حسب کاهش قدرت نفوذ کنندگی به  $K$ ،  $L$ ،  $M$  تقسیم شدند. هرچه وزن اتمی افزایش می یافت هر گروه به کیفیت نفوذ کنندگی بیش تری انتقال می یافت. بارکلا هم چنین اثبات کرد که تعداد الکترون های موجود در هر اتمی به تقریب نصف وزن اتمی است. در سال ۱۹۱۳ میلادی اثبات شد که اشعه ی ایکس در حقیقت موج هایی الکترومغناطیسی هستند که می توانند توسط بُردارهایی دارای نظم طبیعی در کریستال ها خطوط تداخل یا شکست را برجای بگذارند. این ویژگی در سال ۱۹۱۳ میلادی توسط یک بلورشناس انگلیسی به نام سر ویلیام براگ و پسرش در یک روش مناسب برای اندازه گیری طول موج پرتوهای ایکس مورد استفاده قرار گرفت.

در سال ۱۸۹۶ میلادی (تنها چند ماهی پس از کشف اشعه ی ایکس در آلمان) رادیواکتیویته توسط یک فیزیکدان فرانسوی به نام هنری بکرل کشف شد. این واقعیت که لوله های اشعه ی ایکس فلونورسانس مریی را نشان دادند (یعنی انرژی را به صورت نور تاباندند) در وهله ی اول بکرل را به این فرض رهنمون کرد که برخی ارتباط های نزدیک بین فلونورسانس در شکل نور مریی و صدور اشعه ی ایکس وجود دارد. چون برخی از نمک های اورانیوم فلونورسانت بودند، بکرل بررسی های خودش را بر روی اورانیوم متمرکز کرد. در یک روز ابری در پاریس او صفحه ی عکسبرداری پوشیده از لفافی را در تاریکی نزدیک اورانیوم قرار داد ولی وقتی آن را ظاهر کرد دید که سیاه شده است. این آزمون و تجربه های مکرر دیگری به او فهماند که اورانیوم به طور پیوسته تابش های با قدرت زیادی مانند اشعه ی ایکس از خود صادر می کند و این صدور



اشعه فارغ از شکل شیمیایی و منابع انرژی خارجی همواره استمرار خواهد داشت.

### کشف ایزوتوپ‌ها

نخستین مدرکی که نشان داد که دو ماده‌ای که ترکیب شیمیایی مشابه دارند، لزومی ندارد که از نظر فیزیکی هم یکسان و مشابه باشند از مطالعه‌ی پدیده‌ی رادیواکتیویته در عنصرهای سنگین حاصل شد. در سال ۱۹۰۶ میلادی نشان داده شد اگر یونیوم و رادیوتوریوم با توریوم مخلوط شوند به وسیله‌ی هیچ روش شیمیایی نمی‌توان آن‌ها را از هم جدا کرد. دو ماده به هر صورت ویژگی‌های رادیواکتیوی متفاوتی از توریوم دارند و وزن‌های اتمی آن‌ها هم چند واحد با وزن اتمی توریوم تفاوت دارد. برای توجیه چنین حالت‌هایی بود که Saddy اصلاح ایزوتوپ را معرفی کرد. بلافاصله بعد از قبول موجودیت ایزوتوپ‌ها در مورد عنصرهای رادیواکتیو سنگین شواهدی یافته شد که ایزوتوپ‌ها می‌توانند در میان عنصرهای پایدار جدول تناوبی عناصرها هم پیدا شوند. در سال ۱۹۱۳ میلادی، در جریان بررسی‌های رفتار یون‌های باردار (دارای بار الکتریکی مثبت) در میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، ژول تامسون دریافت در حالی که خیلی از مواد وقتی یونیزه می‌شوند، آن‌چنان رفتار می‌کنند که گویی از مولکول‌های مشخصی ساخته شده‌اند، عنصر نئون چنان‌شان داد که شامل گونه‌های اتمی ویژه‌ای بود که در حدود ۱۰ درصد آن نسبت به جزو اصلی سنگین‌تر بود. در سال ۱۹۱۹ میلادی شاگرد تامسون به نام فرانسیس ویلیام آستون بعد از این‌که یکی از اولین اسپکتروگراف‌های جرمی را تکمیل کرد (این دستگاه اتم‌ها و مولکول‌ها را برحسب جرم‌هایشان دسته‌بندی و جدا می‌کند)، امکان یافت نشان دهد که گاز نادر و کمیاب نئون در حقیقت از دو نوع اتم تشکیل شده است که جرم اتمی یکی خیلی نزدیک به  $20 \text{amu}$  و جرم اتمی دیگری خیلی نزدیک به  $22 \text{amu}$  است. فراوانی نسبی این دو نوع اتم چنان بود که می‌توانست وزن اتمی مشاهده شده‌ی آن یعنی  $20/25$  را به خوبی توضیح دهد. موفقیت حاصله درباره‌ی عنصر نئون فتح بایی بود در کشف‌های دیگری از جمله این‌که عنصر کلر هم دو ایزوتوپ دارد که جرم‌های اتمی خیلی نزدیک  $35 \text{amu}$  و  $37 \text{amu}$  دارند. به زودی روشن شد که بسیاری از عنصرهای شیمیایی از مخلوطی از ایزوتوپ‌ها تشکیل شده‌اند که این ایزوتوپ‌ها جرم اتمی نزدیکی در حوزه‌ی جرم اتمی اصلی دارند.