



إنّ أنبوبَ التفريغ (النيون) هو أنبوبٌ زجاجيٌّ رقيقٌ مملوءٌ بغاز النيون (أو غاز آخر) يتوهج بلون معيّن كلّما مرّ خلاله تيارٌ ذو فولتية عالية. ينبعث ضوءٌ (فوتونات). تكون أطواله الموجية (ألوانه) مميزة لنوع ذرات الغاز المهيجة (المثارة) إلى مستويات طاقة مرتفعة. عندما تفقد جزءاً من طاقتها لتعود إلى مستويات الطاقة المنخفضة في هذا الفصل، سندرس ما تفيدنا به الميكانيكا الكمية عن الذرات، ومستويات الطاقة، وتأثير مبدأ الاستبعاد.

28 الفصل

الميكانيكا الذرية للذرات

مَنَحنا نموذج بور للذرة صورة أولية (على الرغم من كونها غير دقيقة) لما هي عليه. واقترح تفسيرات لأسباب انبعاث الضوء وامتصاصه بواسطة الذرات عند أطوال أمواج محدّدة. إنّ أطوال أمواج الأطياف الخطية وطاقة التأيّن للهيدروجين (والأيونات أحادية الإلكترون) في توافق تامّ مع النتائج العملية. ومع هذا، فقد أخفقت نظرية بور في تفسير بعض الظواهر المهمة. فلم تكن قادرة مثلاً على التنبؤ بالأطياف الخطية للذرات المعقدة – ولا حتى لذرة الهيليوم المتعادلة التي تمتلك إلكترونين فقط. كما لم تكن قادرة أيضاً على تفسير خطوط الانبعاث التي عند النظر إليها بدقة كبيرة، يكتشف أنها تتكون من خطّين أو أكثر من الخطوط القريبة جداً من بعضها (والمشار إليها بالتركيب الدقيق). ولم تفسّر نظرية بور أيضاً السبب وراء كون بعض الأطياف الضوئية أكثر لمعانا من غيرها. إضافة إلى عدم استطاعتها تفسير ترابط الذرات في الجزيئات أو المواد الصلبة والسائلة.

ومن وجهة النظر الافتراضية، كذلك، فلم تكن نظرية بور مرضية؛ لأنها كانت دمجا غريبا بين الأفكار التقليدية والكمية. زدّ على ذلك، أنّ طبيعة الضوء المزدوجة الموجة – الجسم لم خُلّ فعلياً. لقد ذكرنا قصور نظرية بور هنا ليس استخفافاً بها- فهي علامة فاصلة في تاريخ العلم-. ولكننا نفعل ذلك لنبيّن لماذا أصبحت الحاجة ملحة وأكثر وضوحاً في بداية عشرينيات القرن العشرين (1920s) إلى نظرية جديدة، أكثر شمولية.



الشكل 28 - 2 ورنهائزنبيرغ (وسط) على بحيرة كومو مع وولفجانج باولي (يمين) و إنريكو فيرمي (يسار).



الشكل 28 - 1 إروين شرودينجر مع لايز ما يتر (انظر الفصل 31).

ولم يمض زمنٌ طويلٌ حتى ظهرت نظرية جديدة. فبعد أقل من عامين من إفصح دي برولي عن فرضيته المادة - الموجة. طوّر إروين شرودينجر (1887 - 1961، الشكل 28 - 1) وفارنرهيذنبوج (1901 - 1976، الشكل 28 - 2) نظرية جديدة وشاملة بشكلٍ مستقلّ.

1-28 الميكانيكا الكمية - نظرية جديدة

إنّ النظرية الجديدة التي تعرف بميكانيكا الكم ناجحة إلى درجة هائلة. وهي توحدُ ازدواجية الموجة - والجسيم في نظرية متماسكة وحيدة تعاملت بطريقة ناجحة مع الأطياف المنبعثة من الذرات المعقدة، وحتى لأدق التفاصيل. وفُسّرت البريق النسبي للأطياف الخطية، وكيفية تشكل الذرات والجزيئات. وتعدّ أيضاً نظرية شاملة تغطي الظواهر الكمية جميعها من إشعاع الجسم الأسود إلى الذرات والجزيئات. كما أنها فسّرت مدى واسعا من الظواهر الطبيعية، ونتج من تنبؤاتها أجهزة عملية كثيرة جديدة. وبالفعل، ونتيجة لنجاحها الباهر، فهي مقبولة في يومنا هذا تقريبا من الفيزيائيين جميعهم على أنها النظرية الأساس وراء العمليات الفيزيائية جميعها. تتعامل الميكانيكا الكمية بصورة رئيسة مع العالم الجاهري للذرات والضوء. ولكن عندما تطبق هذه النظرية الجديدة على الظواهر دون المجهرية، فمن المفترض أن تكون قادرة على تحقيق القوانين التقليدية القديمة. وهذا هو مبدأ التوافق (ذكر سابقا في البند 27 - 12)، الذي تحقّق وبشكل كامل بواسطة الميكانيكا الكمية.

مبدأ التوافق

وهذا لا يعني الاستغناء تماماً عن النظريات التقليدية كقوانين نيوتن. وفي عالمنا اليومي، من الأسهل تطبيق النظريات التقليدية التي تعطي أوصافا دقيقة إلى درجة كافية. ولكن عندما نتعامل مع سرعات عالية قريبة من سرعة الضوء، فيجب أن نستخدم نظرية النسبية. ولكن عندما نتعامل مع العالم الضئيل للذرة، فعلى استخدام الميكانيكا الكمية. وعلى الرغم من أننا لن نخوض في التفاصيل الرياضية للميكانيكا الكمية، إلا أننا سنناقش أفكارها الرئيسية، وكيفية توظيفها لخصائص المادة الموجية والجسيمية لتفسير التركيب الذري والتطبيقات الأخرى.

2-28 الدالة الموجية وتفسيرها. تجربة الشقّ المزدوج

إنّ الخصائص المهمة لأيّ موجة هي الطول الموجي، والتردد، والاتساع. ولموجة كهرومغناطيسية، يحدد التردد (أو الطول الموجي) ما إذا كان الضوء في منطقة الطيف المرئي أم لا. وإذا كان كذلك، فما لونه؟ وكذلك رأينا أنّ التردد هو مقياس طاقة الفوتون المعني ($E = hf$). واتساع الموجة الكهرومغناطيسية أو إزاحتها عند أيّ نقطة هو شدة المجال الكهربائي (أو المغناطيسي) عند تلك النقطة، وهو مرتبط بشدة الموجة (بريق الضوء).

وللجسيمات المادية كالألكترونات، تربط الميكانيكا الكمية الطول الموجي بالزخم حسب صيغة دي برولي، $\lambda = h/p$ (المعادلة 27 - 8). ولكن، ما الذي يناظر اتساع الموجة المادية أو إزاحتها؟ يمثّل اتساع موجة كهرومغناطيسية بالمجالين الكهربائي والمغناطيسي؛ E و B . وفي الميكانيكا الكمية، تؤدي الدالة الموجية هذا الدور، والذي أعطي الرمز Ψ (الحرف اليوناني الكبير بساي والذي يلفظ "ساي"). وبذلك تمثل Ψ الإزاحة الموجية، كدالة في الزمن والموضع، لنوع مجال جديد والذي قد نسميه مجالاً "مادياً" أو موجة مادية.

ولنفهم كيف نفسّر الدالة الموجي Ψ ؛ نعمل مناظرة مع الضوء، ونستخدم ازدواجية الضوء - الجسيم.

ورأينا في (الفصل 11) أنّ الشدة I لأيّ موجة تتناسب مع مربع الاتساع. ويبقى هذا صحيحاً للأمواج الضوئية أيضاً، كما رأينا في (الفصل 22). أيّ أنّ

$$I \propto E^2$$

حيث تمثل E شدة المجال الكهربائي، ومن وجهة نظر الجسيم، تتناسب شدة شعاع الضوء (بالتردد المعطى) مع عدد الفوتونات، N ، التي تمر خلال مساحة معينة لكلّ وحدة زمن. وكلما ازداد عدد الفوتونات، ازدادت الشدة. لذا، فإنّ

$$I \propto E^2 \propto N$$

ويمكن لهذا التناسب أن يُنظر إليه من الاتجاه الآخر، فنحصل على

$$N \propto E^2$$

أيّ أنّ عدد الفوتونات (ولنقل المصطدمة بصفحة في هذا الكتاب) يتناسب مع مربع شدة المجال الكهربائي. وإذا كان الشعاع الضوئي ضعيفاً، يكون عدد الفوتونات المشاركة قليلاً. وبالفعل، من الممكن "بناء" صورة في آلة تصوير ما باستخدام ضوء ضعيف جداً لِيُشَاهَدَ أثرُ كلِّ فوتون على حدة. وإذا كنا نتعامل مع فوتون وحيد، يصبح تفسير العلاقة السابقة ($N \propto E^2$) بطريقة مختلفة قليلاً. وعند أيّ نقطة، يكون مربع شدة المجال الكهربائي، E^2 ، هو مقياس احتمالية وجود الفوتون عند ذلك الموقع. وعند النقاط حيث تكون E^2 كبيرة، هناك احتمالية كبيرة أن يكون الفوتون في ذلك الموقع. ولكن عندما تكون E^2 صغيرة، فإنّ الاحتمالية أيضاً صغيرة.

ونستطيع تفسير أمواج المادة بالطريقة نفسها، كما اقترحها بدايةً ماكس بورن (1882 - 1970) في عام 1927. ويمكن أن يختلف الدالة الموجية Ψ في القيمة من نقطة إلى أخرى في المكان والزمان. وإذا كانت Ψ تصف جمّةً من الإلكترونات الكثيرة، فعندئذ ستتناسب Ψ^2 عند أيّ نقطة مع عدد الإلكترونات المتوقع وجودها عند تلك النقطة. ولكن عند التعامل مع أعداد قليلة من الإلكترونات، فلا يمكننا التنبؤ بدقة عالية، وعليه، فإنّ Ψ^2 تأخذ الخصائص الاحتمالية. وإذا مثلت Ψ التي تعتمد على الزمان والمكان إلكترونًا وحيداً (ولنقل في ذرة ما)، فعندها نفسّر Ψ^2 كالتالي: تمثل Ψ^2 عند نقطة معينة في الفضاء والزمان احتمالية العثور على الإلكترون عند المكان والزمن المحددين.

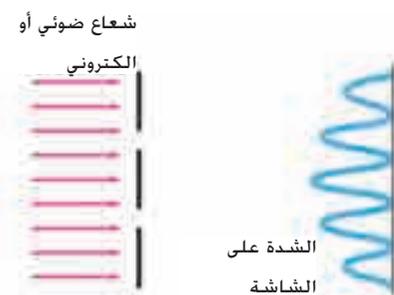
احتمالية $\Psi^2 \propto$

تجربة تداخل الشقّ - المزدوج للإلكترونات

لفهم هذا بصورة أفضل؛ نأخذ كتجربة فكرية تجربة الشقّ المزدوج المألوفة، ونستعرضها لكلّ من الضوء والإلكترونات.

وسنأخذ بالحسبان شقين حجمهما والمسافة الفاصلة بينهما بمستوى الطول الموجي نفسه لأيّ شيء نوجهه إليهما، سواء كان شعاعاً أو إلكترونات (الشكل 28 - 3). ونحن على اطلاع جيد بما قد يحدث في هذه الحالة مع الضوء، على اعتبار أنّ هذه هي تجربة الشقّ المزدوج ليونغ (البند 24 - 3): يمكن أن يشاهد نمط التداخل على شاشة خلفية. وإذا استعصنا عن الضوء بالإلكترونات (نذكر الشكل 27 - 12). وفي حالة الضوء، سيكون النمط مرئياً للعين المجردة مع إمكانية تسجيله على شريط سينمائي. أمّا للإلكترونات، فيمكن استخدام شاشة متألّثة (لتتوهج عند موضع اصطدام الإلكترونات بها).

الشكل 28 - 3 شعاع ضوئي أو إلكتروني متواز يسقط على شقين حجمهما يقترب من الطول الموجي، ويلاحظ نمط تداخل.





الشكل 28 - 4 تجربة الشق المزدوج ليونج مطبقة باستخدام الإلكترونات. لاحظ أن النمط غير ظاهر بوجود عدد قليل فقط من الإلكترونات (الصور العلوية)، ولكن مع عدد أكثر وأكثر من الإلكترونات (الصورتان الثانية والثالثة)، يظهر نمط تداخل الشق المزدوج المؤلف (الفصل 24).

وإذا خفضنا انسياب الإلكترونات (أو الفوتونات) إلى الدرجة التي يمرّ بها إلكترون (أو فوتون) واحد تلو الآخر فقط من خلال الشقين، فسنرى عندئذٍ وميضاً في كل مرة يصطدم بها أحد هذه الإلكترونات (أو الفوتونات) بالشاشة. وفي البداية، ستبدو الومضات وكأنها عشوائية. وبالفعل، ليست هناك أيّ طريقة للتنبؤ بمكان اصطدام أيّ إلكترون بالشاشة. وإذا أجرينا التجربة لفترة زمنية طويلة، وتبعنا أماكن اصطدام الإلكترونات بالشاشة، فسنرى خلال فترة قصيرة نمطاً يتشكل؛ إنّه نمط التداخل الذي تنبأت به النظرية الموجية (انظر الشكل 28 - 4). لذلك، وعلى الرغم من عدم قدرتنا على التنبؤ بموضع اصطدام الإلكترون بالشاشة، إلا أننا نستطيع التنبؤ بالاحتمالات. (ويمكن أن يقال الشيء نفسه عن الفوتونات). الاحتمالية، كما ذكرت من قبل، تتناسب مع Ψ^2 . وأينما تكون قيمة Ψ^2 صفرًا، فسنحصل على قيمة صغرى في نمط التداخل. وأينما تكون قيمة Ψ^2 عظمى، فسنحصل على قمة في نمط التداخل. وعندها، سيحدث نمط التداخل حتى وإن مرّت الإلكترونات (أو الفوتونات) خلال الشقين واحداً تلو الآخر. وعليه، فإنّ نمط التداخل لن ينجم عن تماس أيّ إلكترون مع أيّ إلكترون آخر. ولكن كأنه ناتج من مرور إلكترون واحد من خلال الشقين في اللحظة نفسها ومن ثمّ تداخله مع نفسه. وهذا الاحتمال ممكن؛ لأنّ الإلكترون ليس جسيماً بالتحديد. وهو موجة بقدر ما هو جسيم. ويمكن للموجة أن تنتقل خلال شقين في اللحظة نفسها. ولكن ماذا سيحدث لو أننا أغلقنا أحد الشقين لتأكيد من مرور الإلكترون من الشقّ الآخر، ثم بعد ذلك بقليل أغلقنا الشقّ الثاني لتأكيد من مرور الإلكترون بداية من الشقّ الأول؟ ستكون النتيجة أننا لن نرى أيّ تداخل. وبدلاً من ذلك، سنرى منطقتين برّاقتين (أو أماط حيود) على الشاشة خلف الشقين. وهذا يؤكد فكرتنا. لو أنّ الشقين كانا مفتوحين، فإنّ الشاشة ستظهر نمط تداخل كما لو أنّ كلّ إلكترون قد مرّ من الشقين، مثل موجة ما. ومع هذا، فإنّ كلّ إلكترون سيحدث نقطة صغيرة على الشاشة كما لو أنه جسيم.

إنّ الهدف الأساس من هذا النقاش هو أنّه إذا تعاملنا مع الإلكترونات (أو الجسيمات الأخرى) كما لو أنها موجات، عندها ستمثّل Ψ اتساع الموجة. وإذا تعاملنا معها على أنها جسيمات، فيجب أن نتعامل بناءً على قاعدة I احتمالية. مربع دالة موجية Ψ^2 ، يعطي احتمالية إيجاد إلكترون عند نقطة محددة. ولا نستطيع التنبؤ بدقة (أو حتى تتبع) Ψ بمسار إلكترون وحيد خلال المكان والزمان.

3-28 مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ

عندما جرى قياسات معملية، فهناك شيء من عدم اليقين. فعلى سبيل المثال، لا يمكنك أن تقيس طول طاولة بدقة مطلقة. وحتى باستخدام مسطرة أصغر تدرج فيها 1 mm، فسيكون هناك عدم دقة ربما يصل إلى 1/2 mm أو ما إلى ذلك. ولكن الآلات التي تمتاز بدقة كبيرة ستنتج أقيسة أكثر دقة. ومع ذلك سيكون هناك دائماً عدم يقين مرتبط بالقياسات المعملية. بغض النظر عن مدى جودة أداة القياس. ونتوقع باستخدامنا للآلات الأكثر دقة أن نجعل عدم اليقين في هذه الأقيسة صغيراً لدرجة كبيرة جداً.

ولكن حسب الميكانيكا الكمية، هناك فعلياً حدود لدقة بعض القياسات. وهذه الحدود ليست محددة بمدى جودة صناعة الآلات، ولكنه متأصل بالطبيعة، وهو ناتج من عاملين هما: ازدواجية طبيعة الموجة والجسيم؛ التفاعل الذي لا يمكن تجنبه بين الشيء الملاحظ والآلة الملاحظة. والآن، دعنا ننظر إلى هذا بتفصيل أكبر.

من غير الممكن إجراء قياس على جسم ما دون إزعاجه، ولو قليلاً. خذ بالحسيان محاولتك تحديد موضع كرة تنس طاولة في غرفة معتمة تماماً. ستبدأ بالتمسك حولك محاولاً إيجاد موضعها. وفي اللحظة التي تلمسها بأصابعك ترتد الكرة مبتعدة. وفي أيّ وقت نقيس موضع أي جسم، سواء كان كرة أو إلكترون، نقوم بلمسه دائماً بشيء آخر ليمنحنا المعلومات عن موضعه. لتحديد موضع كرة تنس طاولة في غرفة معتمة، يمكن أن تحسس حولك باستخدام يدك أو عصا مثلاً، أو يمكنك أن تسلط ضوءاً وتقيس الضوء المنعكس عن الكرة. وعندما تبحث بيدك أو بالعصا، فإنك ستجد موضع الكرة عندما تلمسها. ولكن عندما تلمس الكرة، فإنك تصطدم بها بصورة لا يمكن تجنبها، فتمنحها بعض الزخم.

ولذلك لن تعلم موقعها المستقبلي. وبالمثل. ستكون ملاحظتك صحيحة لكرة تنس الطاولة باستخدام الضوء. ولكن بدرجة أقل. ولكي "نرى" الكرة. يجب أن يُستطاع فوتون واحد على الأقل منها. ويجب أن يدخل الفوتون المنعكس إلى داخل عينيك أو في أي أداة كاشفة أخرى. وعندما يصطدم فوتون بجسم عادي الحجم. فلن يغير من حركة الجسم أو موقعه بصورة ملموسة. ولكن عندما يصطدم فوتون ما بجسيم صغير جدًا مثل الإلكترون. فهو قادر على نقل زخم لهذا الجسيم. وفي هذه الحالة. يغير من حركته وموضعه بصورة ملموسة وبطريقة لا يمكن التنبؤ بها. والعمل المحض لقياس موضع جسم ما في وقت ما يجعل معرفتنا لموضعه المستقبلي غير دقيق. والآن. سنتناول طريقة عمل ازدواجية الموجة - الجسيم. تخيل تجربة ذهنية نحاول من خلالها قياس موضع جسيم ما. ولنقل إلكترون ما. باستخدام الفوتونات (الشكل 28 - 5). (سيكون النقاش هو ذاته لو استعملنا مجهرًا إلكترونيًا بدلًا من ذلك). وكما رأينا في (الفصل 25). يمكن رؤية الأجسام بدقة تصل في أحسن الأحوال إلى حوالي طول موجة الأشعة المستخدمة. وإذا أردنا قياسًا دقيقًا للموقع. فيجب أن نستخدم طولًا موجيًا قصيرًا. ولكن الطول الموجي القصير يرتبط بتردد عالٍ وزخم كبير ($p = h/\lambda$). وكلما ازداد الزخم الذي تمتلكه الفوتونات. ازداد الزخم القادرة على إعطائه للجسيم عند اصطدامها به. وإذا استخدمنا فوتونات ذات أطوال موجية أكبر. وبالتالي زخم أقل. فلن تتأثر حركة الجسيم كثيرًا عند اصطدام الفوتونات بها. ولكن الطول الموجي الطويل يعني قدرة تحليلية أقل. وعليه. فإن موضع الجسم سيحدد بدقة أقل. وبذلك. فإن عملية ملاحظة موضع الجسم تولد عدم يقين (عدم تحديد) في موضع الإلكترون وزخمه. وهذا جوهر مبدأ عدم اليقين الذي أعلنه في البداية هايزنبرغ عام 1927.

كميًا. نستطيع القيام بحسابات تقريبية لقيمة هذا التأثير. وإذا استخدمنا ضوءًا ذا طول موجي λ . فعندها يمكننا قياس الموضع بدقة تصل في أحسن الأحوال إلى λ تقريبًا. أي أنّ عدم اليقين في قياس الموضع. Δx . تقريبًا هو:

$$\Delta x \approx \lambda$$

ولنفترض أنّ الجسيم يمكن كشفه بواسطة فوتون وحيد. وزخم الفوتون $p_x = h/\lambda$. وعندما يصطدم الفوتون بالجسيم. فإنه سيعطي جزءًا من زخمه (أو كلّه) لهذا الجسيم (الشكل 28 - 5). ونتيجة لذلك. فإن مقدار عدم اليقين في الزخم النهائي لهذا الجسيم هو

$$\Delta p_x \approx \frac{h}{\lambda}$$

بسبب عدم قدرتنا على تحديد مقدار الزخم المنتقل مسبقًا. وحاصل ضرب حدّي عدم اليقين

$$(\Delta x)(\Delta p_x) \approx h$$

ويمكن حدّي عدم اليقين أن يكونا أسوأ من هذا. اعتمادًا على الجهاز. وعدد الفوتونات اللازمة للكشف. وتظهر الحسابات المتأنية أنّ حاصل ضرب الحدين هو تقريبًا في أحسن الأحوال.

$$(1-28) \quad (\Delta x)(\Delta p_x) \gtrsim \frac{h}{2\pi}$$

وهذه العبارة الرياضية هي مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ. أو كما تدعى في بعض الأوقات مبدأ عدم التحديد الذي يخبرنا بأننا لا نستطيع قياس كل من الموضع والزخم لجسم ما بدقة في آن معا

وكلما حاولنا قياس الموضع بدقة أكبر. لتكون Δx صغيرة. كلما كان الشك في الزخم أكبر. Δp_x . وإذا حاولنا قياس الزخم بدقة عالية. فعندئذ يصبح عدم اليقين في الموضع كبيرًا.



الشكل 28 - 5 تجربة فكرية لملاحظة إلكترون باستخدام مجهر ضوئي قوي. وعلى الأقل يجب أن يستطاع فوتون واحد من الإلكترون (لينتقل بعض الزخم إليه) ويدخل المجهر.

مبدأ عدم اليقين (Δp و Δx)

ولا يحول مبدأ عدم اليقين دون إجراء القياسات الدقيقة المنفصلة (مستقلة). فعلى سبيل المثال، يمكن أن نقيس مبدئيًا موضع الجسم بالتحديد. ولكن حينها سيكون الزخم غير معروف تمامًا. لذلك، وعلى الرغم من احتمال معرفتنا لموضع الجسم بدقة عالية جدا في لحظة ما، إلا أننا لن نملك أي فكرة عن موضعه في اللحظة التالية. وعدم اليقين المعبر عنه هنا هو صفة متأصلة في الطبيعة. وتنعكس أفضل دقة يمكن الحصول عليها نظريًا، حتى بوجود أفضل الأجهزة. وهناك شكل آخر مفيد لمبدأ عدم اليقين يربط الطاقة بالزمن. ونستطيع اختباره كما يلي: الجسم الذي نرغب في كشفه يملك عدم يقين في موضعه بمقدار $\Delta x \approx \lambda$. والفوتون الذي يكشفه يتحرك بسرعة c ، ويستغرق زمنًا $\Delta t \approx \Delta x/c \approx \lambda/c$ ليتمر خلال مسافة عدم اليقين. وبذلك، يكون عدم اليقين في الزمن المقيس، عندما يكون الجسم في موضع ما حوالي

$$\Delta t \approx \frac{\lambda}{c}$$

وبما أن الفوتون يستطيع نقل بعض طاقته أو كلّها ($hf = hc/\lambda$) للجسيم، فإن شكل طاقة الجسيم نتيجة لذلك هو

$$\Delta E \approx \frac{hc}{\lambda}$$

وحاصل ضرب كميتي عدم اليقين هاتين هو

$$(\Delta E)(\Delta t) \approx h$$

وتعطي الحسابات المتأنية أكثر

(2 – 28)

$$(\Delta E)(\Delta t) \gtrsim \frac{h}{2\pi}$$

مبدأ عدم اليقين (ΔE و Δt)

ويخبرنا هذا الشكل من مبدأ عدم اليقين أن طاقة جسيم ما يمكن أن تكون غير مؤكدة (أو يمكن تفسيرها على أنها غير محفوظة لوهلة) بمقدار ΔE خلال زمن ما $\Delta t \approx h/(2\pi \Delta E)$. أعطيت الكمية ($h/2\pi$) التي تظهر كثيرا في الميكانيكا الكمية الرمز \hbar ($h/2\pi$). أي أن

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{2\pi} = 1.055 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}.$$

وباستخدام هذا الترميز، يمكن كتابة (المعادلتين 28 – 1 و 28 – 2) لمبدأ عدم اليقين

$$(\Delta E)(\Delta t) \gtrsim \hbar \text{ و } (\Delta x)(\Delta p_x) \gtrsim \hbar$$

لقد ناقشنا موقع الإلكترون وسرعته كما لو أنه جسيم. إلا أنه ليس كذلك. وبالفعل، فإن وجود مبدأ عدم اليقين هو نتيجة لامتلاك الإلكترون - والمادة بشكل عام - خصائص موجية إضافة إلى خصائص جسمية. وما يخبرنا به مبدأ عدم اليقين حقيقة، أنه لو صممنا على أن الإلكترون جسيم، فإن هناك بعض المحددات على هذا المنظر المبسط - وهي: أن الموضع والسرعة لا يمكن تحديدهما بدقة في آن واحد. ومع هذا، فلن يمتلك الإلكترون موضعًا وزخمًا دقيقين في الوقت نفسه (لأنه ببساطة ليس جسيمًا). وبالمثل، يمكن أن تمتلك الطاقة مقدارًا من عدم اليقين ΔE خلال فترة زمنية $\Delta t \approx \hbar/\Delta E$.

ولأن ثابت بلانك، h ، صغير جدًا، فإن الشك المعبر عنه في مبدأ عدم اليقين عادة يكون مهملاً على المستوى الجاهري. ولكن على مستوى الأحجام الذرية، فإن عدم اليقين هائل. ولأننا نسلّم بأن الأجسام العادية مكونة من ذرات تحتوي على أنوية وإلكترونات، فإن مبدأ عدم اليقين علاقة مع فهمنا للطبيعة مجملها. ويُعبّر مبدأ عدم اليقين، وربما بوضوح كبير، عن الطبيعة الاحتمالية للميكانيكا الكمية. ولذلك، فإنه يستخدم عادة في النقاشات الفلسفية.

المثال 1-28**عدم اليقين في موضع الإلكترون.**

يتحرك إلكترون في خط مستقيم بسرعة ثابتة $v = 1.10 \times 10^6$ m/s مقيسة بدقة 0.10%. ما أعلى دقة يمكن أن يقاس بها موضعه في الوقت نفسه؟
النَّهَج: الزخم $p = mv$ وعدم اليقين في p يساوي $\Delta p = 0.0010p$. ويعطينا مبدأ عدم اليقين (المعادلة 28 - 1) أقلّ Δx باستخدام إشارتي المساواة.

الحل: يعطى زخم الإلكترون كالتالي:

$$p = mv = (9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}) \cdot (1.10 \times 10^6 \text{ m/s}) = 1.00 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

عدم اليقين في الزخم 0.10% من هذا. أو $\Delta p = 1.0 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$. ومن مبدأ عدم اليقين. فإنّ أفضل قياس متزامن للموضع سيمتلك عدم يقين مقداره

$$\Delta x \approx \frac{\hbar}{\Delta p} = \frac{1.06 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{1.0 \times 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m/s}} = 1.1 \times 10^{-7} \text{ m}$$

أو 110 nm.

ملحوظة: هذا حوالي 1000 مرة ضعف قطر الذرة.

التمرين أ: تمّ قياس موضع إلكترون بدقة مقدارها 0.50×10^{-10} m. أوجد أقلّ عدم يقين في زخمه وسرعته

المثال 2-28**عدم اليقين في موضع كرة بيسبول (كرة القاعدة)**

ما هو عدم اليقين في موضع كرة بيسبول. كما فرض بواسطة مبدأ عدم اليقين. إذا كانت كتلتها 150-g وألقيت بسرعة $(42 \pm 1) \text{ m/s} = (93 \pm 2) \text{ mph}$ ؟
النَّهَج: عدم اليقين في السرعة يساوي $\Delta v = 1 \text{ m/s}$. نضرب Δv في الكتلة m للحصول على Δp . ومن ثمّ نستخدم مبدأ عدم اليقين لإيجاد Δx .

الحل: عدم اليقين في الزخم هو

$$\Delta p = m \Delta v = (0.150 \text{ kg})(1 \text{ m/s}) = 0.15 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

ولذلك. فإنّ عدم اليقين في قياس الموضع يمكن أن يكون صغيرًا لدرجة

$$\Delta x = \frac{\hbar}{\Delta p} = \frac{1.06 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{0.15 \text{ kg} \cdot \text{m/s}} = 7 \times 10^{-34} \text{ m}$$

ملحوظة: هذه المسافة أصغر بكثير ممّا يمكن قياسها وتصورها. وهي أصغر بمقدار بليون بليون مرة من الذرة. وبالفعل. فإنّ مبدأ عدم اليقين لا يضع أيّ حد للأقيسة على المستوى الجاهري للأجسام

*** 4-28 الفلسفات الضمنية؛ الاحتمالية مقابل الحتمية**

إنّ النظرة التقليدية النيوتونية للعالم نظرة حتمية (انظر البند 5 - 9). وأحد أفكارها الأساسية أنه في حالة تحديد موضع جسم ما وسرعته عند زمن معين. فإنّنا نستطيع التنبؤ بموضعه المستقبلي عند معرفة القوة المؤثرة فيه. على سبيل المثال. إذا قذف حجرًا عدة مرات بالسرعة والزوايا الابتدائيتين نفسيهما. وبقيت القوة المؤثرة فيه هي ذاتها. فإنّ مسار المقذوف سيبقى دائمًا هو نفسه. وإذا عرفت القوى (الجاذبية وأيّ مقاومة للهواء). فيمكن التنبؤ بمسار الحجر بدقة. وهذا التصور الحتمي يوحي بأنّ المستقبل المكتشف للكون. والذي افترض أنّه يتكون من أجسام دقيقة. يُعدّ محددًا تمامًا.

إنّ هذه النظرة التقليدية الحتمية للعالم الفيزيائي قد تمّ تغييرها جذرياً بواسطة الميكانيكا الكمية. وكما رأينا في تحليل تجربة الشقّ المزدوج (البند 28 - 2)، فإنّ الإلكترونات المُحرّرة جميعها بالطريقة نفسها لن تنتهي جميعها في الموضع نفسه. وحسب الميكانيكا الكمية، فإنّ هناك احتمالات معينة قائمة بأنّ الإلكترون سيصل إلى عدة نقاط. وهذا مخالفٌ تماماً للنظرة التقليدية، والتي يكون فيها مسار الجسم متوقفاً بدقة بدلالة سرعته وموضعه الابتدائيين والقوى المؤثرة فيه. وحسب الميكانيكا الكمية، فإنّ موضع الجسيم وسرعته لا يمكن تحديدهما معا بدقة في الوقت نفسه. وهذا ما عبّر عنه في مبدأ يدعى عدم اليقين. والذي نتج بسبب الكيانات الأساسية، مثل الإلكترونات التي لا يمكن اعتبارها ببساطة جسيمات؛ لأنّ لها خصائص موجية أيضاً. تسمح الميكانيكا الكمية لنا فقط بحساب الاحتمالية*، ولنقل بأنّ إلكتروننا (عند التفكير به كجسيم) ستتمّ ملاحظته عند أماكن مختلفة. والميكانيكا الكمية تقول بأنّ هناك قليلاً من عدم اليقين المتأصل في الطبيعة. وهذا مختلف تماماً عن النظرة الحتمية للميكانيكا التقليدية. ولأنّ المادة مكونة من ذرات، فمن المتوقع أن تحكم الاحتمالية الأجسام ذات الحجم العادية بدلا من الحتمية الصارمة. وعلى سبيل المثال، تنبأ الميكانيكا الكمية باحتمالية ذات قيمة (ولكنها صغيرة ومهملة) بأنك عندما ترمي حجرا، فإنّ مساره قد ينحني فجأة إلى الأعلى بدلا من اتباع المسار المنحني-إلى الأسفل والاعتاد لحركة مقذوف طبيعي. وتنبأ الميكانيكا الكمية باحتمالية عالية جداً بأنّ الأجسام العادية ستنتصرف وفقاً لقوانين الفيزياء التقليدية. وتعدّ هذه التنبؤات ذات احتمالية عالية جداً، ولكنها ليست حتمية مطلقة. ويعزى السبب في تصرف الأجسام الجاهرية حسب القوانين التقليدية مع احتمالية عالية إلى ارتفاع عدد الجزئيات ذات العلاقة؛ عند وجود عدد كبير من الأجسام في وضع إحصائي ما، تقترب الانحرافات عن المتوسط (أو الأكثر احتمالاً) من الصفر. إنّ التوزيع المتوسط لأعداد الجزئيات الكبيرة التي تتبع ما يُسمّى قوانين الفيزياء التقليدية الثابتة باحتمالية عالية، يعزّز "الحتمية" الظاهرية. لقد لوحظت الانحرافات عن القوانين التقليدية عند التعامل مع أعداد قليلة من الجزئيات. ونستطيع القول عندئذٍ: على الرغم من عدم وجود قوانين حتمية في الميكانيكا الكمية، إلّا أنّ هناك قوانين تعتمد على الاحتمالية.

ومن المهم ملاحظة أنّ هناك اختلافاً بين الاحتمالية المفروضة بواسطة الميكانيكا الكمية وتلك التي استخدمت في القرن التاسع عشر لفهم الديناميكا الحرارية، وتصرفات الغازات بدلالة الجزئيات (الفصلان 13 و 15). وفي الديناميكا الحرارية، استخدمت الاحتمالية بسبب وجود عدد كبير من الأجسام الواجب تتبعها. ومع هذا، فلا يزال يعدّ تحرك الجزئيات وتفاعلها بطريقة حتمية تابعاً لقوانين نيوتن. أما الاحتمالية في الميكانيكا الكمية فهي مختلفة تماماً؛ فهي متأصلة في الطبيعة، وليست محددة لقدراتنا على الحساب أو القياس.

تفسير كوبنهاجن

النظرة المقدمة هنا هي المقبولة بشكل عام. وهي تفسير كوبنهاجن للميكانيكا الكمية التي سمّيت بهذا تكريماً لموطن نيلز بور، لأنها طوّرت بشكل كبير هناك خلال المناقشات بين بور وفيزيائيين مرموقين آخرين.

ولأنّ الإلكترونات ليست ببساطة جسيمات، فلا يمكن التفكير بها على أنّها تتبع مسارات معينة في الفضاء والزمان.

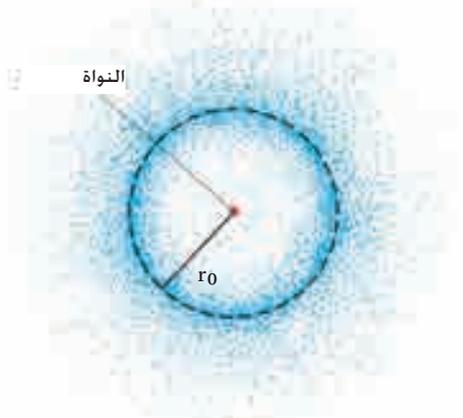
وهذا يقترح أنّ وصف المادة في الفضاء والزمان قد لا يكون صحيحاً تماماً. وهذا الاستنتاج العميق البعيد المنال كان موضوع نقاش حيوي بين الفلاسفة. وربما كان بور أكثر فيلسوف أهمية وتأثيراً في الميكانيكا الكمية. فقد جادل بأنّ وصف الفضاء والزمان للذرات والإلكترونات الفعلية غير ممكن. ومع هذا، فإنّ وصف التجارب على الذرات أو الإلكترونات يجب أن يعطى بدلالة الفضاء والزمن، والمبادئ الأخرى المألوفة وفقاً للخبرات العادية، كالأمواف والأجسام. ويجب ألاّ يقودنا وصفنا للتجارب إلى الاعتقاد بأنّ الذرات أو الإلكترونات هي نفسها تتحرك في الفضاء والزمان كأبيّ جسيمات تقليدية.

* لاحظ أنّ هذه الاحتمالات يمكن حسابها بدقة، تماماً كالتنبؤات المحددة للاحتمالات في النرد أو في لعب الورق. ومع هذا، فهي ليست كالتنبؤات والاحتمالات في الأحداث الرياضية، أو الكوارث التي تحدث في الطبيعة، أو تلك التي يحدثها الإنسان: إنّها تقديرات فقط.

5-28 نظرة الميكانيكا الكمية للذرات

في بداية هذا الفصل. ناقشنا محدودية نظرية بور في التركيب الذري. والآن. سنختبر نظرية الميكانيكا الكمية للذرات التي هي أكثر تعقيدا من نظرية بور القديمة. وعلى الرغم من أن نظرية بور قد تم الاستغناء عنها كوصف دقيق للطبيعة. إلا أن الميكانيكا الكمية أعادت التأكيد على بعض نواحي النظرية القديمة. كوجود الإلكترونات في الذرة في حالات منفصلة فقط ذات طاقات محددة. وأن الفوتون الضوئي ينبعث (أو يمتص) فقط عند انتقال إلكترون ما من حالة إلى أخرى. ومع هذا. فالميكانيكا الكمية هي نظرية أعمق من ذلك بكثير. حيث قامت بتزويدنا بنظرة مختلفة كثيرا عن الذرة. وطبقا للميكانيكا الكمية. فإن الإلكترونات لا توجد في أفلاك دائرية معرفة بإتقان كما في نظرية بور. وبدلاً من ذلك. فإن الإلكترون (بسبب طبيعته الموجية) يمكن تصويره على أنه منتشر في الفضاء مثل "السحابة". ويمكن حساب حجم السحابة الإلكترونية وشكلها لحالة معينة في ذرة ما. وللحالة الأرضية في ذرة الهيدروجين. فإن هذه السحابة الإلكترونية متماثلة كروياً. كما هو مبين في (الشكل 28 - 6). وتوحي السحابة الإلكترونية بصورة غير دقيقة "بحجم" الذرة. ولكن كالسحابة التي قد لا تملك حدوداً واضحة. فإن الذرات لا تملك حدوداً دقيقة أو حجماً معرّفاً بدقة. وأن هذه السحابات الإلكترونية لا تملك جميعها حجماً كروياً. كما سنرى لاحقاً في هذا الفصل.

يمكن أن تفسر السحابة الإلكترونية من وجهة نظر جسيمية أو موجية. وتذكر أن ما نعنيه بالجسم شيئاً مثيراً في الفضاء؛ أي أن له موضعاً محدداً عند لحظة معينة. وعلى النقيض من ذلك. فإن الموجة منتشرة في الفضاء. إن السحابة الإلكترونية المنتشرة في الفضاء كما في (الشكل 28 - 6). ناجمة من الطبيعة الموجية للإلكترونات. ويمكن أن تفسر السحابات الإلكترونية أيضاً كتوزيعات احتمالية للجسم. وإذا كان عليك قياس موضع إلكترون في ذرة هيدروجين 500 مرة مختلفة. فإن غالبية النتائج ستظهر الإلكترون في نقاط حيث الاحتمالية عالية (المنطقة المظلمة في الشكل 28 - 6). وأحياناً فقط يمكن إيجاد الإلكترون حيث الاحتمالية منخفضة.



الشكل 28 - 6 سحابة إلكترونية أو "توزيع احتمالي" للحالة الأرضية لذرة الهيدروجين. تمثل الدائرة الممتدعة نصف قطر بور. (هذه شريحة ثنائية الأبعاد خلال الذرة وتحتوي على النواة).

توزيعات احتمالية

6-28 الميكانيكا الكمية لذرة الهيدروجين، الأعداد الكمية

سننظر الآن بإمعان أكثر إلى ما تخبرنا به الميكانيكا الكمية حول ذرة الهيدروجين. وكثيراً ما نقوله هنا ينطبق أيضاً على الذرات الأكثر تعقيداً التي نوقشت في البند التالي. تعدّ الميكانيكا الكمية نظرية أكثر تعقيداً ونجاحاً بكثير من نظرية بور. ومع هذا. فالنظريتان تتوافقان في بعض التفاصيل. تتنبأ الميكانيكا الكمية بمستويات الطاقة الأساسية نفسها (الشكل 27 - 27) لذرة الهيدروجين تماماً مثل نظرية بور. أي أن

$$E_n = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

ويمثل n عدداً صحيحاً. وفي نظرية بور البسيطة. كان هناك عدد كمي واحد فقط. n . أما في الميكانيكا الكمية. فقد ظهر أنه لا بد من وجود أربعة أعداد كميّة مختلفة لتحديد كل حالة في الذرة.

(1) **وُجِدَ العدد الكميّ n .** من نظرية بور أيضاً في الميكانيكا الكميّة. ويُدعى **العدد الكميّ الرئيسي**. ويمكن أن تكون قيمته أي عدد صحيح من 1 إلى ∞ . وتعتمد الطاقة الكلية لحالة ما في ذرة الهيدروجين على n . كما رأينا سابقاً.

(2) **العدد الكميّ الفلكي l .** ويرتبط بقيمة الزخم الزاوي للإلكترون. l يمكن أن يأخذ قيماً صحيحة من 0 إلى $(n - 1)$. وللحالة الأرضية $n = 1$. يمكن لـ l أن يكون صفراً فقط.* وعندما $n = 3$ يمكن لـ l أن يكون 0, 1, أو 2.

* ميزها عن نظرية بور. حيث $l = 1$ بالنسبة للحالة الأرضية. (المعادلة 27 - 11).

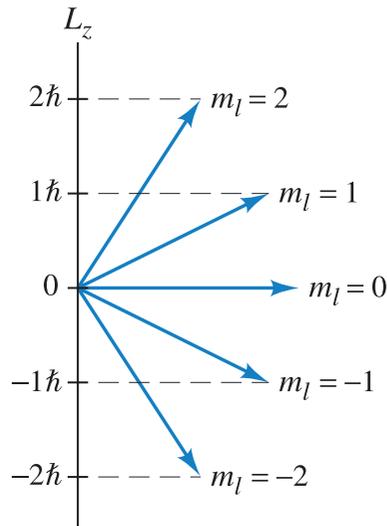
العدد الكميّ الرئيسي، n

العدد الذري الفلكي، l
 $0 \leq l \leq n - 1$

القيمة الفعلية للزخم الزاوي L ترتبط بالعدد الكمي l بواسطة.

$$(3-28) \quad L = \sqrt{l(l+1)} \hbar$$

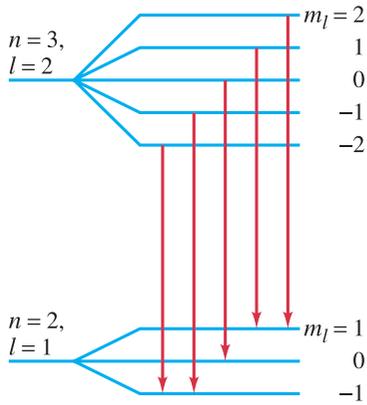
العدد الكمي المغناطيسي m_l
 $-l \leq m_l < l$



الشكل 28 - 7 كمية اتجاه الزخم الزاوي ل $l=2$.

العدد الكمي المغزلي، m_s
 $m_s = +\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$

الشكل 28 - 8 عند تطبيق مجال مغناطيسي، ينشطر مستوى طاقة ترتبط بخمس قيم ل $l = 2$ و $n = 3$ إلى خمسة مستويات. وينشطر المستوى $n = 2$, $l = 1$ إلى ثلاث مستويات ($m_l = 1, 0, -1$). وتحدث الانتقالات بين مستويات (ليست جميعها معروفة)، مع انبعاث فوتونات بترددات عديدة مختلفة قليلاً (تأثير زيمان).



(وهنا أيضا $\hbar = h/2\pi$). وعلى نحو تقريبي، لا يوجد لقيمة l تأثير في الطاقة الكلية في ذرة الهيدروجين. وإنما تؤثر فيها قيمة n إلى حد ملموس فقط (ولكن انظر إلى التركيب الدقيق بالأسفل). وفي الذرات ذات الإلكترونين أو أكثر، فإنّ الطاقة تعتمد فعلياً على l إضافة إلى n كما سنرى.

(3) يرتبط العدد الكمي المغناطيسي، m_l باتجاه زخم الإلكترون الزاوي: ويمكن أن يأخذ قيم أرقام صحيحة تمتد من $-l$ إلى $+l$. وعلى سبيل المثال، إذا كانت $l = 2$ يمكن أن تكون قيم m_l $2, 1, 0, -1, -2$. وبما أنّ الزخم الزاوي متجه، فليس من المستغرب أن يكون كلاً من قيمته واتجاهه مكمّلاً. ول $l = 2$ الاتجاهات الخمسة المسموحة يمكن تمثيلها بمخطط كما في (الشكل 28 - 7). وهذا التحديد على اتجاه لا يُدعى عادة تكمية الفضاء. وفي الميكانيكا الكمية، يحدد اتجاه الزخم الزاوي عادة بإعطاء مركبته على امتداد محور L_z (هذا الخيار عشوائي). وعندها تكون L_z مرتبطة ب m_l بواسطة المعادلة

$$L_z = m_l \hbar$$

إلا أنّ قيم L_x و L_y غير محددة. إنّ الاسم m_l غير مشتق من النظرية (والتي تربطه ب L_z) ولكنّه مشتق من التجربة. ولقد وُجد أنه عند وضع أنبوب تفرغ غازي في مجال مغناطيسي، فإنّ الأطياف الخطية تنشطر إلى خطوط عديدة قريبة جداً من بعضها. وهذا الانشطار، المعروف بتأثير زيمان، يوحي بأنّ مستويات الطاقة يجب أن تكون منشطرة (الشكل 28 - 8). ولذلك، فإنّ طاقة المستوى لن تعتمد على n فقط، ولكنها ستعتمد أيضاً على m_l عند تطبيق مجال مغناطيسي؛ وعليه، يدعى "العدد الكمي المغناطيسي".

(4) وأخيراً، هناك العدد الكمي المغزلي، m_s ، ويمكن لأيّ إلكترون يغزل أن يأخذ قيمتين فقط، هما: $m_s = +\frac{1}{2}$ و $m_s = -\frac{1}{2}$. ووجود العدد الكمي هذا لم يأت من معادلة شرودينجر الأصلية، مثل كل من n, l, m_l . وبدلاً من ذلك، فسّر ديراك (1902 - 1984) وجوده كتأثير نسبيّ في تعديل لاحق. وأوّل تلميح على ضرورة وجود m_s - بالرغم من ذلك - جاء من التجربة. لقد أظهرت الدراسة المتأنية لأطياف الهيدروجين الخطية أنّ كلا منها يتكون فعلياً من خطين (أو أكثر) قريبين جداً من بعضهما بعضاً، حتى عند غياب المجال المغناطيسي الخارجي. وتمّ الافتراض في البداية أنّ هذا الانشطار في مستويات الطاقة - المسمّى التركيب الدقيق - ناتج من الزخم الزاوي المرتبط بغزل الإلكترون. أي، يمكن للإلكترون أن يغزل (يبرم) حول محوره إضافة لدورانه حول النواة، تماماً مثلما تبرم الأرض حول محورها وهي تدور حول الشمس. ويمكن للتيار الضئيل للإلكترون الغزول (البرّام) لاحقاً أن يتفاعل مع المجال المغناطيسي الناتج من الشحنة الدوارة مسبباً التركيب الدقيق الملاحظ في مستويات الطاقة. (وعندئذٍ ستعتمد الطاقة قليلاً على m_l و m_s). وحالياً، لا تعدّ هذه الصورة من غزل الإلكترون مسموحة. ولا نستطيع حتى تخيل الإلكترون كجسم مركزيّ، ولا لدرجة أقلّ كجسم غزول (برّام). والشّيء المهم هو أنّ الإلكترون يمكن أن يمتلك حالتين مختلفتين نتيجة بعض الخصائص الضمنية التي تتصرف كالزخم الزاويّ، ولا زلنا ندعو هذه الصفة "غزلاً". والقيمتان الممكنتان ل m_s ($+\frac{1}{2}$ و $-\frac{1}{2}$) عادة تدعيان "غزلاً علويّاً" و "غزلاً سفليّاً". نسبة إلى الاتجاهين الممكنين للغزل الكميّ الزاويّ.

القيم الممكنة للأعداد الكمية الأربعة للإلكترون في ذرة الهيدروجين ملخصة في (الجدول 28 - 1).

الجدول 28 - 1 الأعداد الكمية للإلكترون		
الاسم	الرمز	القيم الممكنة
رئيسي	n	$1, 2, 3, \dots, \infty$
فلكي (مداري)	l	لأجل n معطاة: يمكن أن تكون: $0, 1, 2, \dots, n - 1$
مغناطيسيّ	m_l	لأجل n و l معطاتان: يمكن m_l أن يكون: $-l, \dots, 0, \dots, l$
غزليّ	m_s	لكل مجموعة من n و l و m_l : يمكن أن تكون $+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$

المثال المفاهيمي 3-28 الحالات المحتملة لـ $n = 3$

كم عدد الحالات المختلفة الممكنة لإلكترون عدده الكمي الأساس $n = 3$ ؟
 الإجابة عندما $n = 3$ ، تستطيع l أن تأخذ القيم $l = 2, 1, 0$. وعندما $l = 2$ ، تستطيع m_l أن تكون $-2, -1, 0, 1, 2$ وهي خمسة احتمالات مختلفة. ولكل منها، تستطيع m_s أن تكون إلى الأعلى أو إلى الأسفل ($+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$). ولذلك، عندما $l = 2$ ، هناك $2 \times 5 = 10$ حالات. وعند $l = 1$ ، تستطيع m_l أن تكون $-1, 0, 1$. وبما أن m_s يمكن أن تكون $+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$ لكل منها، فإن هناك 6 حالات ممكنة أخرى. وأخيراً، عندما $l = 0$ ، فإن m_l تستطيع أن تكون 0 فقط. وهناك فقط مستويان يعودان إلى $m_s = +\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$. والعدد الكلي للحالات يساوي $18 = 10 + 6 + 2$. كما هو مبين في الجدول التالي:

n	l	m_l	m_s	n	l	m_l	m_s
3	2	2	$\frac{1}{2}$	3	1	1	$\frac{1}{2}$
3	2	2	$-\frac{1}{2}$	3	1	1	$-\frac{1}{2}$
3	2	1	$\frac{1}{2}$	3	1	0	$\frac{1}{2}$
3	2	1	$-\frac{1}{2}$	3	1	0	$-\frac{1}{2}$
3	2	0	$\frac{1}{2}$	3	1	-1	$\frac{1}{2}$
3	2	0	$-\frac{1}{2}$	3	1	-1	$-\frac{1}{2}$
3	2	-1	$\frac{1}{2}$	3	0	0	$\frac{1}{2}$
3	2	-1	$-\frac{1}{2}$	3	0	0	$-\frac{1}{2}$
3	2	-2	$\frac{1}{2}$				
3	2	-2	$-\frac{1}{2}$				

التمرين ب: إلكترون له القيم $l = 2$ ، $n = 4$. أي من قيم m_l التالية ممكنة: $4, 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3, -4$ ؟

المثال 4-28 E و L عند $n = 3$

حدّد كلا من: (أ) الطاقة. (ب) الزخم الزاوي الفلكي لإلكترون في كل من أفلاك ذرة الهيدروجين في (المثال 3-28).

النهج: (أ) تعتمد طاقة الحالة على n فقط، باستثناء ما للتعديل البسيط المذكور في الأعلى، والذي سنهمله. وحسب الطاقة كما في نظرية بور، $E_n = -13.6 \text{ eV}/n^2$. ونستخدم للزخم الزاوي (المعادلة 3-28).

الحل: بما أن $n = 3$ لهذه الحالات جميعها، فهي جميعها تمتلك الطاقة ذاتها:

$$E_3 = -\frac{13.6 \text{ eV}}{(3)^2} = -1.51 \text{ eV}$$

(ب) عند $l = 0$ ، تعطي (المعادلة 3-28)

$$L = \sqrt{l(l+1)} \hbar = 0$$

وعند $l = 1$ ،

$$L = \sqrt{1(1+1)} \hbar = \sqrt{2} \hbar = 1.49 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

وعند $l=2$ ،

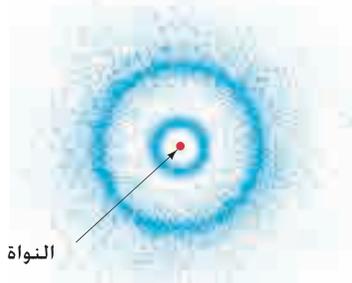
$$L = \sqrt{2(2+1)} \hbar = \sqrt{6} \hbar$$

ملحوظة: الزخم الزاوي الذري يعطى بشكل عام كمضاعفات \hbar (في هذه الحالة $\sqrt{2} \hbar$ أو $\sqrt{6} \hbar$) بدلاً منه بوحدة SI.

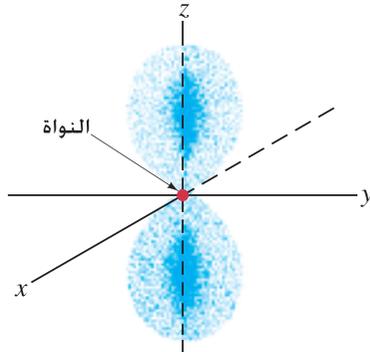
التمرين ج: ما الطاقة والزخم الزاوي للإلكترون في ذرة هيدروجين ذات $l = 4$ ، $n = 6$ ؟

وعلى الرغم من أن l و m_l لا يؤثران بشكل كبير في مستويات الطاقة في الهيدروجين، إلا أنهما يؤثران في التوزيع الاحتمالي للإلكترون في الفضاء. وعندما $n = 1$ ، يستطيع كل من l و m_l فقط أن يكون صفراً، والتوزيع الإلكتروني كما هو مبين في (الشكل 6-28).

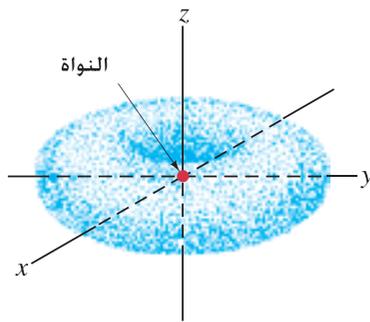
وعندما $n = 2$ ، تستطيع l أن تكون 0 أو 1. ويبدو التوزيع لـ $n = 2$ و $l = 0$ كما هو مبين في (الشكل 28 - 9 أ) مختلفا عن توزيع الحالة الأرضية (الشكل 28 - 6). بالرغم من أنه لا يزال كرويًا منظمًا. وعندما $n = 2$ و $l = 1$ ، فإنّ التوزيعات ليست كروية متماثلة كما هو مبين في الشكلين (28 - 9 ب) و (28 - 9 ج) ($m_l = 0$) و ($m_l = +1$ أو -1).



$$n = 2, l = 0, m_l = 0 \text{ (أ)}$$



$$n = 2, l = 1, m_l = 0 \text{ (ب)}$$



$$n = 2, l = 1, m_l = \pm 1 \text{ (ج)}$$

الشكل 28 - 9 سحابة إلكترونية، أو توزيع احتمالي، للحالات $n = 2$ في الهيدروجين.

مبدأ باولي للاستبعاد

وبالرغم من أنّ التوزيعات الفضائية للإلكترون يمكن حسابها لمختلف الحالات. إلاّ أنّه من الصعب قياسها عمليًا. ومعظم المعلومات العملية حول الذرة أتت من فحصٍ متأنٍّ لأطياف الانبعاث تحت الظروف المختلفة.

*قواعد الانتقاء : الانتقالات المسموحة والممنوعة

هناك تنبؤ آخرٌ للميكانيكا الكمية هو أنه عند انبعاث ضوء (فوتون) أو امتصاصه. فإنّ الانتقالات يمكن أن تحدث فقط بين حالات تختلف قيم l بينها بمقدار وحدة واحدة تمامًا :

$$\Delta l = \pm 1$$

وطبقًا لقاعدة الانتقاء هذه. فإنّ إلكتروننا في حالة $l = 2$ يستطيع القفز فقط إلى حالة أخرى ذات $l = 1$ أو $l = 3$. ولا يستطيع القفز إلى حالة ذات $l = 0$ أو $l = 2$. ويُدعى القفز من $l = 2$ إلى $l = 0$ انتقالًا ممنوعًا. وفي الحقيقة. فإنّ انتقالًا من هذا النوع غير ممنوع تمامًا. بل يمكن حدوثه. ولكن احتمال ذلك صغيرٌ جدًا مقارنة مع الانتقالات المسموحة. تلك التي تحقق قاعدة الانتقاء $\Delta l = \pm 1$ وبما أنّ الزخم الزاويّ الفلكيّ (المداري) لذرة H يجب أن يتغير بوحدة واحدة عندما ينبعث منها فوتون. فإنّ حفظ الزخم يفيد بأنّ الفوتون يجب أن يحمل زخمًا زاويًا. وبالفعل. هناك أنواعٌ كثيرةٌ من الأدلة العملية تظهر إمكانية إعطاء الفوتون زخمًا زاويًا مغزليًا مقداره $1\hbar$.

7-28 ذرات غير بسيطة؛ مبدأ الاستبعاد

لقد ناقشنا ذرة الهيدروجين بالتفصيل لأنّها أبسط ما يمكن التعامل معه. وسنناقش الآن باختصار الذرات الأكثر تعقيدًا. أي الذرات التي تحتوي على أكثر من إلكترون. والتي يمكن تحديد مستويات طاقتها عمليًا من تحليل أطياف الانبعاث. إنّ مستويات الطاقة ليست مشابهة لتلك التي في ذرة H؛ لأنّ الإلكترونات تتفاعل مع بعضها بعضًا بالإضافة إلى تفاعلها مع النواة. ولا يزال كلّ إلكترون في الذرة المعقدة يشغل مستوى خاصًا متميزًا بأعداد الكمية الأربعة n, l, m_l و m_s . وتعتمد مستويات الطاقة في الذرات التي تمتلك أكثر من إلكترون على كلّ من n و l . إنّ عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة يسمى العدد الذري Z . وهو يمثّل أيضًا عدد الشحنات الموجبة (البروتونات) في النواة. كما يحدّد نوع الذرة. أي أنّ Z يحدّد معظم الخصائص التي تفرق بين ذرة وأخرى.

أثبتت الميكانيكا الكمية في سنوات ما بعد 1925 نجاحها أيضًا في التعامل مع الذرات المعقدة. وأصبحت الرياضيات صعبة جدًا رغم ذلك. بسبب عدم الجذاب كلّ إلكترون على حدة إلى النواة فقط في الذرات المحتوية على إلكترونات عديدة. بل أيضًا طرده بواسطة الإلكترونات الأخرى. ولفهم ترتيبات الإلكترونات المحتملة في الذرة؛ كانت هناك حاجة لمبدأ جديد. تم تقديمه من قبل وولفجانج باولي (1900 - 1958). الشكل (28 - 2) حيث دُعِيَ مبدأ باولي للاستبعاد. وينصّ هذا المبدأ على مايلي:

لا يستطيع إلكترونان في أيّ ذرة أن يحتلّا الحالة والكميّة ذاتيهما.

وبذلك. فلا يستطيع أيّ إلكترونين في أيّ ذرة أن يمتلكا مجموعة الأعداد الكمية نفسها n, l, m_l و m_s . ويشكّل مبدأ الاستبعاد لباولي* القاعدة لفهم الجزيئات والروابط. والظواهر الأخرى. وليس لفهم الذرات المعقدة فقط.

* يطبق مبدأ الاستبعاد على الأجسام المتشابهة بما فيها الإلكترونات. والبروتونات. والنيوترونات ذات العدد الكميّ المغزلي المساوي لنصف عدد صحيح ($\frac{1}{2}$ أو $\frac{3}{2}$ ، وهكذا دواليك). وتدعى هذه الأجسام فيرميونات (نسبة لأنريكو فيرمي الذي اشتق نظرية إحصائية لوصفها). ولا ينطبق مبدأ الاستبعاد على الأجسام ذات الغزل المساوي لعدد صحيح (0, 1, 2) وهكذا دواليك). مثل الفوتون و π ميزون. والتي يشار إليها جميعًا على أنها بوزونات (نسبة لساتيندرانات بوز الذي اشتق لها نظرية إحصائية خاصة بها).

والآن. لننظر إلى تركيب بعض الذرات البسيطة عندما تكون في الحالة الأرضية. وبعد الهيدروجين. فإن ثاني أبسط ذرة هي الهيليوم ذات الإلكترونين. ويمكن لكلا الإلكترونين أن يمتلكا $n = 1$: لأن غزل أحدهما يمكن أن يكون إلى الأعلى ($m_s = +\frac{1}{2}$). في حين يكون غزل الآخر إلى الأسفل ($m_s = -\frac{1}{2}$). وبذلك يحققان مبدأ الاستبعاد. وبما أن $n = 1$ فإن l و m_l يجب أن يكونا صفرًا (الجدول 28 - 1). وعليه. فإنّ الإلكترونين سيمتلكان الأعداد الكمية المبينة في الجدول الذي في الهامش. أمّا الليثيوم. فيمتلك ثلاثة إلكترونات. ويمكن لإلكترونين منها أن يمتلكا $n = 1$. ولكن الإلكترون الثالث لا يمكنه ذلك دون أن يخالف مبدأ الاستبعاد. لذا. فإنّ هذا الإلكترون يجب أن يمتلك $n = 2$. ومن المصادف أنّ المستوى $n = 2$ و $l = 0$ له طاقة أقلّ من $n = 2$ و $l = 1$. ولهذا. فإنّ الإلكترونات في الحالة الأرضية لها الأعداد الكمية المعروضة في الجدول الذي في الهامش. الأعداد الكمية للإلكترون الثالث يمكن أن تكون $(n, l, m_l, m_s) = (3, 1, -1, \frac{1}{2})$. ولكن الذرة في هذه الحالة ستكون في حالة مهيبة لأنها ستمتلك طاقة أكبر. ولن يمرّ وقت طويل قبل أن تقفز إلى الحالة الأرضية مصحوبة بانبعثات فوتوني. وعند درجة حرارة الغرفة. فإنّ الأغلبية العظمى للذرات ستكون في هذه الحالة الأرضية. إلا إذا زوّدت بطاقة إضافية (كما في أنبوب التفريغ). ونستطيع أن نستمر في هذه الطريقة لوصف الأعداد الكمية لكلّ إلكترون في الحالة الأرضية للذرات الأكبر والأكبر. والأعداد الكمية للصوديوم. مع إلكتروناته الأحد عشر. مبينة في الجدول الذي في الهامش. يظهر (الشكل 28 - 10) مخطّط مستوى طاقة بسيط حيث الحالات المأهولة مبينة به كأسهم. مشيرة إلى الأعلى أو إلى الأسفل ($m_s = +\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$) أمّا الحالات الممكنة الفارغة. فمبينة كدائرة صغيرة.

	$n=3, l=0$	
	$n=2, l=1$	
	$n=2, l=0$	
$n=1, l=0$	$n=1, l=0$	$n=1, l=0$
هيليوم ($Z=2$)	ليثيوم ($Z=3$)	صوديوم ($Z=11$)

هيليوم $Z = 2$			
n	l	m_l	m_s
1	0	0	$\frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
ليثيوم $Z = 3$			
n	l	m_l	m_s
1	0	0	$\frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$\frac{1}{2}$
صوديوم $Z = 11$			
n	l	m_l	m_s
1	0	0	$\frac{1}{2}$
1	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	0	0	$\frac{1}{2}$
2	0	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	1	$\frac{1}{2}$
2	1	1	$-\frac{1}{2}$
2	1	0	$\frac{1}{2}$
2	1	0	$-\frac{1}{2}$
2	1	-1	$\frac{1}{2}$
2	1	-1	$-\frac{1}{2}$
3	0	0	$\frac{1}{2}$

الشكل 28 - 10 مخطّط مستوى طاقة يظهر الحالات المأهولة (أسهم) والحالات غير المأهولة ($^{\circ}$) لكلّ من He, Li و Na. لاحظ أننا بيّنا مستوى $n = 2, l = 1$ لعنصر الليثيوم على الرغم من أنه فارغ.

8-28 الجدول الدوري للعناصر

قبل أكثر من قرن. رتب ديمتري مندليف (1834 - 1907) العناصر المعروفة (في حينه) في ما نطلق عليه حاليًا **الجدول الدوري للعناصر**. ورُتبت الذرات حسب تزايد الكتلة. مع مراعاة أن تقع العناصر ذات الخصائص الكيميائية المتشابهة في العمود نفسه. والنسخة الحالية مبينة داخل الغلاف الخلفي لهذا الكتاب. يحتوي كلّ مربع على العدد الذري Z . ورمز العنصر. والكتلة الذرية (بدلالة وحدات الكتل الذرية). وفي النهاية. تظهر الزاوية السفلية اليسرى ترتيب الحالة الأرضية للذرة. وهذا يتطلب بعض التفسير. يشار إلى الإلكترونات التي لها قيمة n نفسها على أنها موجودة في **القشرة نفسها**; فالإلكترونات ذات $n = 1$ تكون في القشرة نفسها (**القشرة K**). أما الإلكترونات ذات $n = 2$ فتكون في **القشرة الثانية** (**القشرة L**). في حين تكون الإلكترونات ذات $n = 3$ في القشرة (**M**) الثالثة. وهكذا دواليك. والإلكترونات التي لها قيم n و l نفسها يُشار إلى أنّها موجودة في **القشرة الفرعية نفسها**. وتستخدم الحروف عادة لتحديد قيمة l كما هو مبين في (الجدول 28 - 2). أي أنّ $l = 0$ هي القشرة الفرعية s . و $l = 1$ هي القشرة الفرعية p . و $l = 2$ هي القشرة الفرعية d . وابتداءً من $l = 3$ فإنّ الأحرف تتبع f, g, h, i . وهكذا دواليك. (في البداية. كانت الأحرف الأولى: d, p, s و f اختصارات لحدود تجريبية تشير إلى الأطياف الآتية: "حادّة". و "رئيسي". و "منتشر". و "أساسي").

الجدول 28 - 2 قيمة l		
قيمة l	الرمز الحرفي	أكبر عدد للإلكترونات في القشرة الفرعية
0	s	2
1	p	6
2	d	10
3	f	14
4	g	18
5	h	22
:	:	:

يُحدّد مبدأ باولي للاستبعاد عدد الإلكترونات الممكنة في كلّ قشرة وقشرة فرعية. ولأيّ قيمة لـ l هناك $2l + 1$ قيم ممكنة لـ m_l (يمكن لـ m_l أن تأخذ أيّ عدد صحيح من 1 إلى l ، ومن -1 إلى $-l$ أو صفر). إضافة إلى القيمتين الممكنتين لـ m_s . ولذلك، يمكن أن يتوافر $2(2l + 1)$ إلكترونات على الأكثر في أيّ قشرة فرعية 1. وعلى سبيل المثال، عندما $l = 2$ ، هناك خمس قيم لـ m_l ممكنة $(-2, -1, 0, 1, 2)$ ، ولكلّ من هذه، يمكن لـ m_s أن تكون $+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$ ليكون المجموع $2(5) = 10$ حالات. وبين (الجدول 28 - 2) أكبر عدد من الإلكترونات التي يمكن أن تملأ كلّ قشرة فرعية.

وبما أنّ مستويات الطاقة تعتمد بشكل كليّ على القيمتين n و l تقريباً، فقد جرت العادة أن يُحدّد التركيب (الترتيب) الإلكتروني ببساطة بإعطاء قيمة n والحرف المناسب لـ l مع إعطاء عدد الإلكترونات في كلّ قشرة فرعية كرمز علويّ. يكتب تركيب الحالة الأرضية للصدويوم، على سبيل المثال، كالتالي: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$. وتمّ تبسيط هذا في الجدول الدوري بتحديد ترتيب الإلكترونات الخارجية الأبعد فقط وأيّ قشرة فرعية أخرى غير مملوءة (انظر الجدول 28 - 3 هنا، والجدول الدوّريّ داخل الغلاف الخلفي).

المثال المفاهيمي 5-28 تركيبات إلكترونية

أيّ من التركيبات التالية ممكن، وأيّ منها غير ممكن:

(أ) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^3$ (ب) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5 4s^2$ (ج) $1s^2 2s^2 2p^6 2d^1$ ؛

الإجابة: (أ) هذا التركيب غير ممكن؛ بسبب عدد الإلكترونات الكبير (3) المبين في القشرة الفرعية S من القشرة M ($n = 3$) للقشرة الفرعية S المحتوية على خانتين فقط. لإلكترونات " الغزل العلوي " و" الغزل السفلي ".

(ب) هذا التركيب ممكن، ولكنه حالة مهيجة. قفز أحد الإلكترونات من القشرة الفرعية $3p$ إلى الأعلى إلى القشرة الفرعية $4s$. وبما أنّ هناك 19 إلكترونات، فإنّ العنصر هو البوتاسيوم.

(ج) هذا التركيب غير ممكن؛ لعدم وجود قشرة فرعية ($l = 2$) d داخل القشرة $n = 2$ (الجدول 28 - 1). يجب أن يكون الإلكترون الخارجي الأبعد (على الأقل) داخل القشرة $n = 3$.

التمرين د: اكتب تركيب الحالة الأرضية كاملاً للجاليوم بإلكتروناته الواحد والثلاثين.

إنّ وضع الذرات في مجموعات الجدول الدوري يتمّ حسب ازدياد العدد الذري، Z . وهناك أيضاً تنظيم قويّ حسب الخصائص الكيميائية. وبالرغم من معالجة هذا في كتب الكيمياء، إلا أننا نناقشه هنا بشكل سريع لأنّه أحد نتائج الميكانيكا الكمية. انظر الجدول الدوري داخل الغلاف الخلفي. تمتلك الغازات النبيلة، (في العمود VIII من الجدول الدوري) جميعها قشوراً أو قشوراً فرعية مملوءة. أي أنّ قشرتها الخارجية الأبعد مملوءة تماماً، والتوزيع الإلكتروني دائري متماثل. ومع هذا التماثل الكروي التام، فإنّ الإلكترونات الأخرى لن تنجذب، ولن تفقد الإلكترونات من تلقاء نفسها (طاقة التأين مرتفعة). وبعدّ هذا السبب الرئيس وراء كون الغازات النبيلة غير نشطة (سنتناول المزيد عند مناقشة الجزيئات والروابط في الفصل 29). يحتوي العمود VII على الهالوجينات، وهي تقلّ بمقدار إلكترون واحد عما تحتويه القشرة المملوءة. وبسبب أشكال المدارات (انظر البند 29 - 1)، يمكن قبول إلكترون إضافي من ذرة أخرى. لذا، تعد هذه العناصر نشطة تماماً. وتكافؤها -1 . وهذا يعني أنه عند اكتساب إلكترون إضافي، فإنّ الأيون الناتج سيملك شحنة صافية مقدارها $-1e$. يحتوي العمود I من الجدول الدوري على الفلزّات القلوية، وكلّ منها يمتلك إلكترون S وحيداً خارجياً. ويمضي هذا الإلكترون معظم وقته خارج القشور والقشور الفرعية المغلقة الداخلية التي تمنع عنه تأثير معظم الشحنة النووية. وبالفعل، فإنّه بعيد نسبياً عن النواة، وينجذب إليها بواسطة شحنة صافية مقدارها $+1e$ تقريباً. بسبب أثر الحجب من الإلكترونات الأخرى. لذا، فإنّ من السهل إبعاد إلكترون الفلك الخارجي هذا، والذي يستطيع أن يقضي معظم وقته حول ذرة أخرى، مكوّناً جزيئاً. وهذا هو السبب في أنّ الفلزّات القلوية نشطة جداً ولها تكافؤ $+1$. ويمكن أن تعامل الأعمدة الأخرى في الجدول الدوري بالمثل.

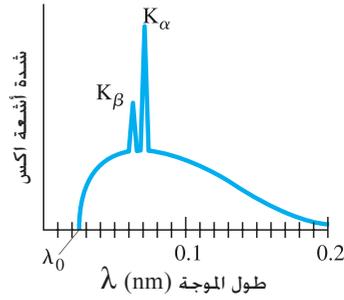
الجدول 28 - 3 التركيب الإلكتروني لبعض العناصر		
عدد	* العنصر	توزيع الحالة (الإلكترونات) (Z)
1	H	$1s^1$
2	He	$1s^2$
3	Li	$2s^1$
4	Be	$2s^2$
5	B	$2s^2 2p^1$
6	C	$2s^2 2p^2$
7	N	$2s^2 2p^3$
8	O	$2s^2 2p^4$
9	F	$2s^2 2p^5$
10	Ne	$2s^2 2p^6$
11	Na	$3s^1$
12	Mg	$3s^2$
13	Al	$3s^2 3p^1$
14	Si	$3s^2 3p^2$
15	P	$3s^2 3p^3$
16	S	$3s^2 3p^4$
17	Cl	$3s^2 3p^5$
18	Ar	$3s^2 3p^6$
19	K	$4s^1$
20	Ca	$4s^2$
21	Sc	$3d^1 4s^2$
22	Ti	$3d^2 4s^2$
23	V	$3d^3 4s^2$
24	Cr	$3d^5 4s^1$
25	Mn	$3d^5 4s^2$
26	Fe	$3d^6 4s^2$

* يمكن أن تجد أسماء العناصر في الفهرس ب.

إن وجود العناصر الانتقالية في مركز الجدول. إضافةً إلى اللانثانات (عناصر الأرض النادرة) والأكتينيدات بالأسفل ناتج من القشور الداخلية غير المكتملة. وللعناصر ذات أخفض Z . فإن القشور الفرعية تملأ بتتابع بسيط كالآتي: أولاً $1s$. ثم $2s$. ثم $2p$. ثم $3s$. ثم $3p$. ويمكن أن تتوقع أن يملأ بعد ذلك $3d$ ($n = 3, l = 2$). ولكن ليس هذا ما يحدث. وبدلاً من ذلك، فإن المستوى $4s$ يمتلك فعلياً طاقة أقل بقليل من $3d$ (نتيجة تفاعل الإلكترونات مع بعضها بعضاً). فتمتلئ أولاً (K و Ca). وعند ذلك فقط. تبدأ القشرة $3d$ بالامتلاء. بداية مع Sc . كما في (الجدول 28 - 3). ولأن المستويين $4s$ و $3d$ قريبان من بعضهما. فإن بعض العناصر تمتلك إلكترون $4s$ واحداً فقط. مثل Cr). ومعظم الخصائص الكيميائية لهذه العناصر الانتقالية محكومة بالإلكترونات $4s$ ضعيفة التقييد نسبياً. لذا، فهي تمتلك عادة تكافؤ $+1$ أو $+2$. وهناك أثر مائل مسؤول عن اللانثانات والأكتينيدات. المبينة أسفل الجدول الدوري للسهولة. وجميعها ذات خصائص كيميائية متشابهة. حُدثت بواسطة إلكتروناتها الخارجي $6s$ أو $7s$. في حين يبقى أثر أعداد الإلكترونات في القشور الداخلية غير المملوءة ضئيلاً.

* 9-28 أطيف أشعة إكس والعدد الذري

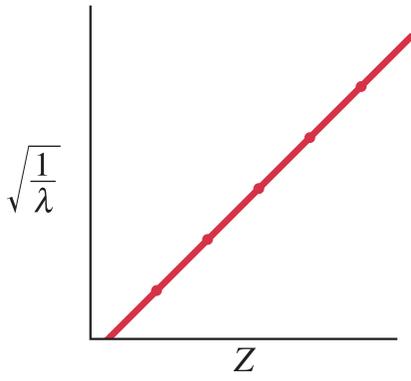
إن الأطيف الخطية للذرات في مناطق الضوء المرئي. وفوق البنفسجية (UV). وحت الحمراء (IR) من الطيف الكهرومغناطيسي EM ناتجة بشكل رئيس عن انتقال بين لحالات للإلكترونات المدارات الخارجية. وقد تمّ تحسين غالبية شحنة النواة من هذه الإلكترونات بواسطة الشحنة السالبة على الإلكترونات الداخلية. ولكن الإلكترونات الداخلية العميقة في القشرة $n = 1$ "تري" الشحنة الكلية للنواة. وبما أنّ طاقة أيّ مستوى تناسب مع Z^2 (انظر المعادلة 27 - 15). فإننا نتوقع لذرة ذات $Z = 50$ أطوال أمواج تقارب $50^2 = 2500$ ضعفاً أقصر من تلك التي وجدت في سلسلة لايمان للهيدروجين (حول 100 nm). أو 10^{-2} إلى 10^{-1} nm . وأطوال موجية قصيرة كهذه تقع في منطقة أشعة إكس من الطيف.



الشكل 28 - 11 طيف أشعة إكس المنبعثة من هدف الموليبدنيوم في أنبوب أشعة إكس المُفَعَّل عند 50 kV

تُنتج أشعة إكس عند اصطدام الإلكترونات المُسرَّعة بواسطة جهد عالٍ بهدف فلزي داخل أنبوب أشعة إكس (البند 25 - 11). وعندما ننظر إلى طيف أطوال الأمواج المنبعثة من أنبوب أشعة إكس. نرى أنّ الطيف يتكوّن من جزأين: طيف مستمر ذي قطع عند λ_0 ما والتي تعتمد فقط على الفولتية خلال الأنبوب. وسلسلة من القمم المركبة عليه. وهناك مثالٌ عاديٌّ مبيّن في (الشكل 28 - 11). المنحنى الأملس وطول موجة القطع λ_0 يتحركان نحو اليسار كلما ازدادت الفولتية خلال الأنبوب. وعلى الرغم من ذلك، تبقى الخطوط أو القمم الدقيقة ($K\alpha$ و $K\beta$) في (الشكل 28 - 11). عند الطول الموجي نفسه عند تغير الفولتية. رغم أنّه سيتمّ إيجادها عند أطوال أمواج مختلفة إذا ما استخدمت أهداف مادية مختلفة. وتقتصر هذه الملاحظة التمييز في قمم المواد المستخدمة. وبالفعل. نستطيع تفسير ذلك عن طريق التّخيل بأنّ الإلكترونات المُسرَّعة بواسطة الجهد العالي للأنبوب تستطيع أن تصل إلى طاقات كافية لجعلها قادرة في حالة تصادمها مع ذرات الهدف على طرد أحد الإلكترونات الداخلية المقيدة بإحكام نحو الخارج. وعندئذٍ نفسّر أشعة إكس المميزة هذه (القمم في الشكل 28 - 11) كفوتونات منبعثة عندما يسقط إلكترون إلى الأسفل من حالة علوية ليملاً حالة سفلية خاوية. تنتج خطوط K من انتقالات إلى القشرة ($n = 1$). ويتكوّن خطّ $K\alpha$ من فوتونات منبعثة نتيجة انتقال ينشأ من القشرة (L) $n = 2$ لتسقط إلى القشرة (K) $n = 1$. أمّا خطّ $K\beta$ فيعكس انتقالاً من القشرة (M) $n = 3$ سقوطاً إلى القشرة K . في حين ينتج خط L من انتقال إلى القشرة L . وهكذا دواليك.

أشعة إكس المميزة.



الشكل 28 - 12 مخطط $\sqrt{1/\lambda}$ مقابل Z لخطوط أشعة إكس K_α .

لقد سمح قياس أطراف أشعة إكس المميزة بتحديد مستويات الطاقة الداخلية للذرات. كما سمح أيضًا بتحديد قيم Z لذرات عديدة؛ لأنّ الطول الموجي (كما رأينا) لأفصر أشعة إكس منبعثة سيتناسب عكسيًا مع Z^2 . وفعليًا، الطول الموجي للإلكترون - لنقل يقفز من مستوى $n = 2$ إلى $n = 1$ يتناسب عكسيًا مع $(Z - 1)^2$ بسبب حجب الإلكترون الوحيد الباقي في المستوى $1s$ للنواة. وفي 1914، وجد موسيلي (1887 - 1915) أنّ مخطط $\sqrt{1/\lambda}$ مقابل Z قد أنتج خطًا مستقيمًا (الشكل 28 - 12). وحُدثت قيم Z لعدد من العناصر بمواءمتهم على مخطط موسيلي هذا. وقد استند مفهوم العدد الذري لموسيلي إلى قاعدة عملية متينة.

المثال 6-28 طول موجة أشعة إكس

قُدِّر الطول الموجي للانتقال من $n = 2$ إلى $n = 1$ في الموليبدينوم ($Z = 42$). ما طاقة فوتون من هذا النوع؟

النّهج: نستخدم صيغة بور (المعادلة 27 - 16) لـ $1/\lambda$ ، ونعوّض عن Z^2 بما يلي:

$$(Z - 1)^2 = (41)^2$$

الحل: نعطي (المعادلة 27 - 16)

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{2\pi^2 e^4 m k^2}{h^3 c} \right) (Z - 1)^2 \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

مع $n = 2$ و $n' = 1$. ونعوّض بالقيم:

$$\frac{1}{\lambda} = (1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1})(41)^2 \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{4} \right)$$

$$= 1.38 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$$

لذلك فإنّ $\lambda = 0.072 \text{ nm}$. وهذا قريب من القيمة المقیسة (الشكل 28 - 11) ومقدارها 0.071 nm . وكلّ من هذه الفوتونات ستمتلك طاقة بدلالة eV :

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.00 \times 10^8 \text{ m/s})}{(7.2 \times 10^{-11} \text{ m})(1.60 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 17 \text{ keV}$$

إنّ النّاتج هو التحويل بين جول والفتولت

مثال 7-28 تحديد العدد الذري

استُخدمت فوتونات ذات طاقة عالية لذف مادة مجهولة. فُوجد أنّ طاقة أعلى قمة في أشعة إكس المنبعثة هي 66 keV . حدّد هذه المادة.

النّهج: أعلى شدة لأشعة إكس هي غالبًا لخط K_α (انظر الشكل 28 - 11) والتي تحدث عندما تطرد الفوتونات إلكترونات من القشرة K نحو الخارج (الفلك الداخلي العميق، $n = 1$) ولتشغل المواقع بعد ذلك بواسطة إلكترونات من القشرة L ($n = 2$). نستخدم نموذج بور، ونفترض أنّ الإلكترونات "ترى" شحنة نووية مقدارها $Z = 1$ (غطيت بواسطة إلكترون واحد) بدلا من $Z = 1$.

الحل: إنّ انتقال الهيدروجين من $n = 2$ إلى $n = 1$ قد يزوّد بحوالي 10.2 eV (انظر الشكل 27 - 27 أو المثال 27 - 12). تتناسب الطاقة E مع Z^2 (المعادلة 27 - 15). أو بدلا من ذلك $(Z - 1)^2$ بسبب حجب النواة بواسطة إلكترون واحد في الحالة $1s$ (انظر إلى الأعلى). ولهذا، نستطيع استخدام النسب:

$$\frac{(Z - 1)^2}{1^2} = \frac{66 \times 10^3 \text{ eV}}{10.2 \text{ eV}} = 6.5 \times 10^3$$

إذن، $Z - 1 = \sqrt{6500} = 81$ و $Z = 82$. وبذلك فإنّ المادة هي الرصاص.

وسنحلل الآن - باختصار- الجزء المستمر من طيف أشعة إكس (الشكل 28 - 11) بناءً على نظرية الضوء الفوتونية. عندما تصدم الإلكترونات الهدف، فهي تصطدم بذرات المادة لتعطي معظم طاقتها على هيئة حرارة (حوالي 99%). ولهذا، يجب أن تبرد أنابيب أشعة إكس). وتستطيع الإلكترونات أيضاً الاستغناء عن طاقة بانبعث فوتون ضوئي منها: يبعث إلكترون بطيء بتماسه مع ذرات المادة (الشكل 28 - 13) إشعاعات بسبب هذا التباطؤ (الفصل 22). ويُدعى في هذه الحالة رمزاً شترالنج (الكلمة الألمانية "إيقاف الإشعاعات"). ولأنّ الطاقة محفوظة، فإنّ طاقة الإلكترون المنبعث، hf ، يجب أن تساوي الخسارة في طاقة الإلكترون الحركية، $\Delta KE = KE - KE'$ ، ولذلك

$$hf = \Delta KE$$

ويمكن للإلكترون أن يخسر طاقته كلّها أو جزءاً منها في تصادم كهذا. ويُفسّر طيف أشعة إكس المستمر (الشكل 28 - 11) كنتيجة لتصادمات بمرشترالنج هذه، والتي يفقد خلالها كميات مختلفة من طاقة الإلكترونات. ومن المؤكد أنّ أقصر طول موجي لشعاع إكس (أعلى تردد) هو نتيجة لفقدان الإلكترون طاقته الحركية كلّها لإنتاج فوتون واحد في تصادم وحيد. وبما أنّ طاقة الإلكترون الأولية الحركية تساوي الطاقة التي أعطيت له بواسطة الفولتية المُسرّعة V ، فإنّ $KE = eV$. وفي التصادم الوحيد الذي نتج منه إيقاف الإلكترون ($KE' = 0$)، وبذلك $\Delta KE = eV$ و

$$hf_0 = eV$$

ونضع $f_0 = c/\lambda_0$ حيث λ_0 طول موجة القطع (الشكل 28 - 11) ونجد

$$(4-28) \quad \lambda_0 = \frac{hc}{eV}$$

ويرتبط هذا التنبؤ في λ_0 حديدًا مع ما تمّ ملاحظته عمليًا. وهذه النتيجة دليل إضافي على أنّ أشعة إكس هي شكل من الإشعاعات الكهرومغناطيسية (ضوء) وأنّ نظرية الضوء الفوتونية صحيحة.

المثال 8-28 طول موجة القطع

ما أقصر طول موجة لفوتون أشعة إكس منبعث من أنبوب هذه الأشعة الذي يعمل على 50 kV؟
النّهج: ستمتلك الإلكترونات المصطدمة بالهدف طاقة حركية KE مقدارها 50 keV. وأقصر طول موجي للفوتونات ينجم عن تصادمات تعطي خلالها طاقة الإلكترونات الحركية KE جميعها إلى الفوتون فيكون

$$KE = eV = hf_0$$

الحل: من (المعادلة 28 - 4)،

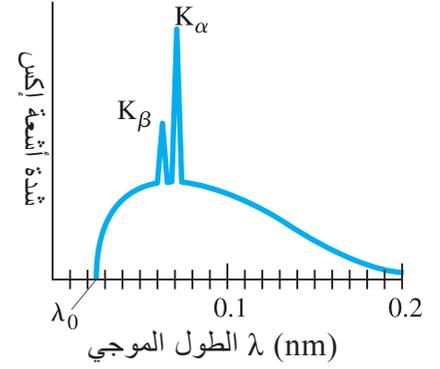
$$\lambda_0 = \frac{hc}{eV} = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})}{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(5.0 \times 10^4 \text{ V})} = 2.5 \times 10^{-11} \text{ m}$$

أو 0.025 nm.

ملحوظة: هذه النتيجة متوافقة جدا مع النتائج العملية (الشكل 28 - 11).

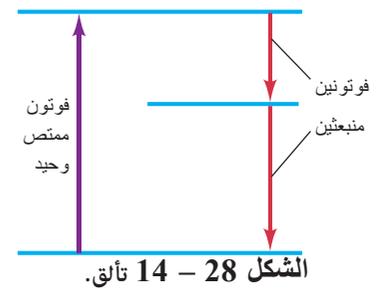
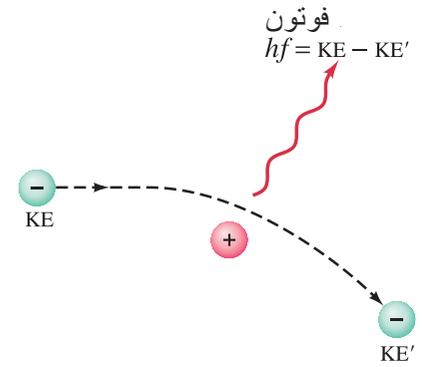
10-28 التآلق والتفسفر *

عندما تهيج ذرة من حالة طاقة إلى حالة أعلى بواسطة امتصاص فوتون، فمن الممكن أن تعود إلى الحالة الأخفض في سلسلة من خطوتين (أو أكثر) إذا كان هناك مستوى طاقة بينهما (الشكل 28 - 14). ستمتلك الفوتونات المنبعثة نتيجة لذلك طاقة وترددا أخفض من التي للفوتون الممتص. وعندما يكون الفوتون الممتص في المنطقة فوق البنفسجية، وتكون الفوتونات المنبعثة في المنطقة المرئية من الطيف، فإنّ هذه الظاهرة تدعى **التآلق** (الشكل 28 - 15).



الشكل 28 - 11 (معادة) طيف أشعة إكس المنبعثة من هدف موليبدنيوم في أنبوب أشعة إكس المشغل عند 50 kV.

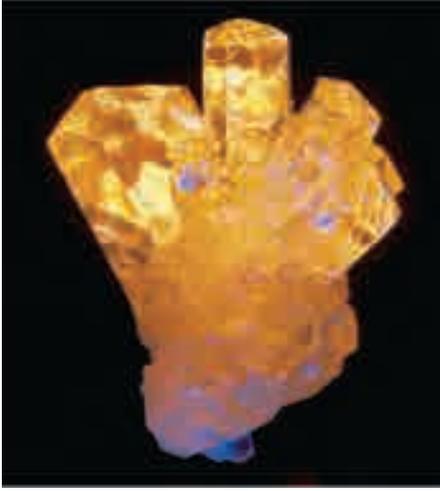
الشكل 28 - 13 فوتون بمرشترالنج نتج من تباطؤ إلكترون بسبب تفاعله مع ذرة الهدف.



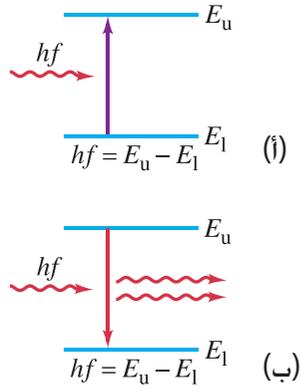
الشكل 28 - 14 تآلق.

تطبيق الفيزياء

تحليل التآلق ومصابيح ضوئية متألقة.



الشكل 28 - 15 عندما يسقط ضوء فوق بنفسجي على هذه الصخور، فإنها ستألق في المنطقة المرئية من الطيف.



الشكل 28 - 16 (أ) امتصاص فوتون. (ب) انبعاث محفز. تشير E_2 و E_1 إلى طاقة حالات "علوية" و "سفلية" على الترتيب.

انبعاث مُحفز.

الشكل 28 - 17 مستويًا طاقة لتجمع ذرات. كل نقطة تمثل طاقة حالة لذرة واحدة. (أ) وضع طبيعي. (ب) تعداد مقلوب.



يعتمد الطول الموجي الذي سيحدث عنده التألق على مستويات الطاقة للذرات المعنية. وبسبب اختلاف الترددات للمواد المختلفة، وبسبب الاستعداد الطبيعي لبعض المواد للتألق أيضًا، فإن التألق يُعدّ أداة قوية للتعرف إلى المواد. كما تستخدم أيضًا للمعايرة - تحديد مقدار وجود مادة ما - ولتابعة المواد على امتداد مساراتها الحيوية الطبيعية في النباتات أو الحيوانات. وللكشف عن مركب ما، يجب أن يكون الضوء المُحفز أحادي الموجة. ويجب ألا تتألق المذيبات أو المواد الأخرى الموجودة في المنطقة نفسها من الطيف. وفي بعض الأحيان، تكون الملاحظة المباشرة للضوء المتألق المنبعث كافية لكشف مركب ما. وفي حالات أخرى، تستخدم أجهزة قياس الأطياف لقياس أطوال الأمواج وشدة الضوء المنبعث.

وتعمل المصابيح الضوئية المتألقة من خلال خطوتين: يسارع الجهد المطبق للإلكترونات التي تصدم ذرات الغاز في الأنبوب لتتهيجه. وعندما تقفز الذرات إلى الأسفل إلى مستوياتها الطبيعية، تبعث فوتونات فوق بنفسجية فتصطمم بالطلاء المتألق على الجدران الداخلية للأنبوب. والضوء الذي نراه نأج من تألق هذه المادة جُأوبا لاصطدام الضوء فوق البنفسجي بها.

تُدعى المواد كترك المستخدمة في أفراس الساعات المضيفة بأنها متفسفرة. وعندما تُرفع ذرة ما إلى حالة مهيجة (مثارَة) طبيعية، فإنها تسقط عائدة إلى الأسفل خلال حوالي 10^{-8} ثانية. وفي المواد المتفسفرة، تستطيع الذرات أن تثار عن طريق الامتصاص الفوتوني إلى مستويات طاقة تُدعى شبه مستقرة، وهي حالات تستمر أطول كثيرًا - حتى إلى عدة ثوانٍ أو أطول. وفي جمع لتلك الذرات، فإن كثيرًا منها سيهبط إلى الحالة الأخفض سريعًا، ولكن هناك الكثير منها أيضًا سيبقى في الحالة المهيجة لمدة تزيد على الساعة.

* 11-28 ليزرات

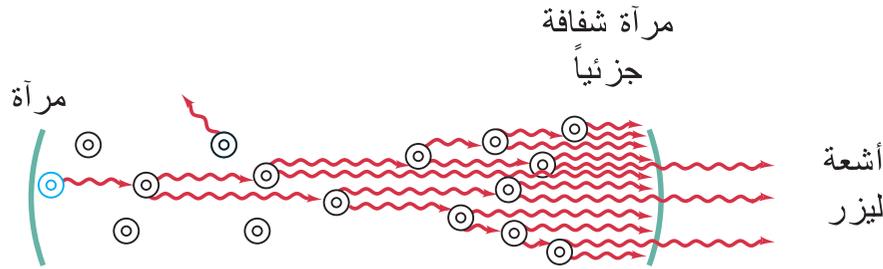
الليزر: جهاز يستطيع أن يبعث شعاعًا ضوئيًا رقيقًا (حادًا) جدًا مرتفع الشدة، أحادي طول الموجة ومترابطًا. (ونقصد هنا بالترابط، أن أجزاء الشعاع جميعها خلال أي مقطع عرضي منه لها الطور نفسه). ويُعدّ الشعاع المنبعث موجة مستوية مثالية تقريبًا. وعلى الوجه الآخر، فإن مصدرًا ضوئيًا عاديًا يبعث الضوء في الاتجاهات جميعها (لذلك، فإن الشدة تتناقص بسرعة مع المسافة). والضوء المنبعث غير مترابط (الأجزاء المختلفة من الشعاع ليس لها الطور نفسه مقارنة ببعضها بعضًا). وتعمل الذرات المهيجة التي تبعث الضوء من مصباح ضوئي اعتيادي باستقلالية. لذا، يمكن اعتبار كل فوتون منبعث قطارًا موجيًا قصيرًا، طوله 30 سم في العادة، ويدوم 10^{-8} ثانية. ولا ترتبط القطارات الموجية هذه بأي علاقة طورية مع بعضها بعضًا. والعكس صحيح تمامًا بالنسبة إلى الليزر.

يعتمد عمل الليزر على النظرية الكمية. ولقد رأينا إمكانية امتصاص ذرة لفوتون إذا (وإذا فقط) كانت طاقته hf تساوي فرق الطاقة بين مستوى طاقة ذرة مأهول من جهة وحالة مهيجة متوافرة من جهة أخرى (الشكل 28 - 16). وإذا كانت الذرة في الحالة المهيجة، فمن الممكن أن تقفز تلقائيًا (دون حفيز) إلى الحالة الأخفض مع انبعاث فوتون. ورغم ذلك، إذا صدم فوتون بهذه الطاقة نفسها بالذرة المهيجة، فيمكن له أن يحفز الذرة على القيام بانتقال أبكر إلى الحالة الأخفض (الشكل 28 - 16). وتدعى هذه الظاهرة الانبعاث المُحفز. ليس فقط أن الفوتون الأصلي لا يزال موجودًا، بل أيضًا لوجود فوتون آخر له التردد نفسه نتج من انتقال الذرة. وهذان الفوتونان لهما الطور نفسه تمامًا، ويتحركان في الاتجاه نفسه كذلك. وهذه هي الطريقة التي ينتج بها الضوء المترابط في الليزر. ولذلك، فإن المصطلح ليزر نأج من جميع الأحرف الأولى من الكلمات المشيرة باللغة الإنجليزية إلى تكبير الضوء بواسطة الانبعاث المُحفز للإشعاع.

ومن الطبيعي أن تكون معظم الذرات في الحالة الأخفض، وبذلك سيتم امتصاص غالبية الفوتونات الساقطة. وللحصول على الضوء المترابط من الانبعاث المُحفز، يجب أن يتحقق شرطان هما: 1- يجب أن تثار الذرات إلى الحالة الأعلى لكي يُنتج تعدادًا مقلوب. ذلك الذي يكون عنده عدد الذرات في الحالة الأعلى أكبر من عددها في الحالة الأخفض (الشكل 28 - 17). وعندها، سيطغى انبعاث الفوتونات على الامتصاص. 2- يجب أن تكون الحالة الأعلى شبه مستقرة، أي تبقى عندها الإلكترونات لفترة زمنية أطول من المعتاد* ليحدث نتيجة ذلك الانتقال إلى الحالة الأخفض بواسطة الانبعاث المُحفز بدلًا من التلقائية.

* يمكن لذرة مهيجة أن تهبط إلى حالة كذلك، ويمكنها أن تقفز إلى حالة أخفض فقط عن طريق ما يُسمى الانتقال المنوع (نوقش في البند 28 - 6). ويفسر هذا السبب وراء ديمومتها فترة أطول من الوضع الطبيعي.

الشكل 28 - 18 رسم ليزري، يظهر ذرات مهيجة محفزة لتبعث ضوءًا.



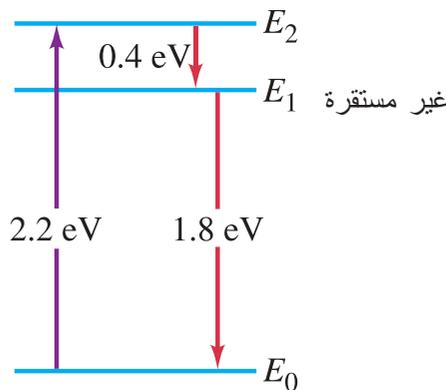
(الشكل 28 - 18) رسم تخطيطي لليزر: وُضعت المادة "الليزرية" في أنبوب طويل رفيع يحتوي على مرأتين عند نهايته، إحداهما شفافة جزئياً (تسمح بمرور 1 أو 2% فقط من الضوء الساقط عليها). تهبط بعض الذرات المهيجة إلى الأسفل بسرعة نوعاً ما بعد تهيجها. واحدة منها هي الذرة الزرقاء المبينة في أقصى يسار (الشكل 28 - 18). وإذا اصطدم الفوتون المنبعث بذرة أخرى في الحالة المهيجة، فسيعمل ذلك على تحفيزها فتبعث فوتوناً متوافقاً معه في الطور، وله التردد نفسه، ويتحرك في الاتجاه نفسه. وليتحرك بعد ذلك الفوتونان فيصدمان ذرات أخرى ويتسبباً بانبعث محفز إضافي. ومع استمرار العملية، يتضاعف عدد الفوتونات. وعند اصطدام الفوتونات بالمرأتين الطرفيتين، ينعكس معظمها عائداً، وبينما تتحرك الفوتونات جيئةً وذهاباً بين المرأتين، تمر نسبة صغيرة منها خلال المرآة جزئية الشفافية عند أحد الطرفين. وتكوّن هذه الفوتونات شعاع الليزر الخارجي المتطابق الرفيع*. وفي الليزر المصمم جيداً، فإن انتشار الشعاع لا يحصره إلا الجيوب. ولهذا، فإن الانتشار الزاوي هو $\lambda/D \approx$ (انظر المعادلة 24 - 3 أو 25 - 7) حيث D هي قطر المرآة الطرفية. ويمكن للانتشار الجبودي أن يكون صغيراً بصورة هائلة. وتوجّه طاقة الضوء في شعاع رفيع كقلم رصاص بدلاً من انتشارها في الفضاء كما تفعل مصادر الضوء العادية.

*تصميم تعداد مقلوب

يمكن تحقيق إثارة الذرات في الليزر بطرق عدة لإنتاج التعداد المقلوب الضروري. وفي الليزر الياقوتي، تتكون المادة الليزرية من عمود ياقوتي يتكون من Al_2O_3 مضافاً إليها نسبة صغيرة من ذرات كروم (Cr) التي تحل محل ذرات من (Al): ذرات Cr هي صاحبة العلاقة بعمل الليزر. وفي عملية تدعى الضخ البصري، تهيج الذرات بواسطة ومضات قوية من ضوء ذي طول موجة 550 nm. وطاقة فوتونية مقدارها 2.2 eV. وكما هو مبين في (الشكل 28 - 19)، أثيرت الذرات من الحالة E_0 إلى الحالة E_2 . وتسقط الذرات بسرعة عائدة إلى E_0 أو إلى الحالة المتوسطة E_1 . وهي شبه مستقرة، وذات عمر يقارب 3×10^{-3} s (بالمقارنة مع 10^{-8} s للمستويات العادية). ومع عملية الضخ الشديد، يمكن العثور على ذرات إضافية في الحالة E_1 أكثر من الحالة E_0 . وعندها نكون قد حصلنا على التعداد المقلوب والمطلوب لعمل الليزر. وفي اللحظة التي تقفز عندها ذرات قليلة من الحالة E_1 إلى E_0 ، ينبعث منها فوتونات تنتج انبعاثاً محفزاً من الذرات الأخرى، لبدأً عندئذ عمل الليزر. وبذلك ينبعث من الليزر الياقوتي شعاع طاقة فوتوناته 1.8 eV، وطوله الموجي 694.3 nm (أو ضوء "ياقوتي - أحمر").

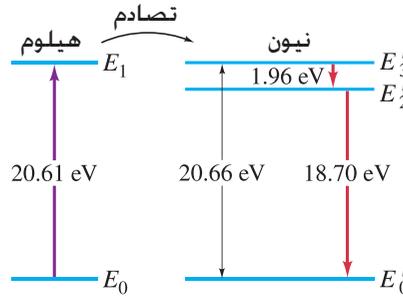
ليزر ياقوتي

* داخل الأنبوب، بعض الفوتونات المنبعثة تلقائياً ستنبعث بزوايا ما بالنسبة إلى المحور، وستخرج هذه الفوتونات دون شك من جانب الأنبوب، ولن تؤثر في مدى رفع الشعاع الرئيس.



الشكل 28 - 19 مستويات طاقة الكروم في بلورة ياقوت. فوتونات طاقتها 2.2 eV "تدفع" الذرات من E_0 إلى E_2 والتي "تضمحل" تهوي بعد ذلك إلى الحالة غير المستقرة E_1 . ويحدث عمل الليزر بانبعث فوتوني محفز بالانتقال من E_1 إلى E_0 .

يستخدم الغاز كمادة ليزر في ليزر الهيليوم - نيون (He-Ne). وهي خليط من حوالي 85% He و 15% Ne. وتهيج الذرات بتطبيق جهد عال على الأنبوب ليحدث تفريغ كهربائي خلال الغاز. وفي هذه العملية، ترقى بعض ذرات He إلى الحالة شبه المستقرة E_1 (الشكل 28 - 20). والتي تعود إلى قفزة بمقدار 20.61 eV. وتساوي تقريباً حالة مثارة في النيون. ولا تعود ذرات He بسرعة إلى الحالة الأرضية بانبعاث تلقائي. وبدلاً من ذلك، تعطي طاقتها الفائضة إلى ذرة Ne عند تصادمها عادة (انظر الشكل 28 - 20). وفي تصادم كهذا، تسقط ذرة He إلى الحالة الأرضية، وتهيج ذرة Ne إلى الحالة E_3' (تشير الفتحة المائلة إلى حالات النيون). والاختلاف البسيط في الطاقة (0.05 eV) أضيف بواسطة الطاقة الحركية للذرات المتحركة. وبهذه الطريقة، تصبح الحالة E_3' في النيون - وهي شبه مستقرة - مأهولة أكثر من المستوى E_2' . إنَّ التعداد المقلوب بين E_2' و E_3' هو المطلوب لعمل الليزر.



(الشكل 28 - 20) مستويات طاقة He و Ne. أثر He في التفريغ الكهربائي إلى الحالة E_1 . ونقلت هذه الطاقة إلى مستوى E_3' من النيون بالتصادم. E_3' شبه مستقرة وتضمحل إلى E_2' بالانبعاث المحفز.

أمثلة ليزر أخرى:
كيميائية
أصباغ
 CO_2
أشباه الموصلات
(تقاطع pn)

تنضمّن أنواع الليزر الأخرى ما يلي: الليزر الكيميائية التي تحصل على طاقتها المدخلة من التفاعل الكيميائي للغازات نشطة التفاعل، والصبغات الليزرية التي يمكن التحكم بتردها، وليزر غاز CO_2 التي تستطيع إنتاج قدرة عالية في المنطقة تحت الحمراء، وليزر الحالة الصلبة من عناصر الأرض النادرة مثل ليزر Nd:YAG العالي القدرة، والليزر الصمام الثنائي شبه الموصل، والذي يُدعى أيضاً الليزر الوصل pn الذي يحدث الانتقال خلاله بين أسفل حزمة الإيصال وأعلى جزء في حزمة التكافؤ (البند 29 - 6). ويستخدم هذا النوع (شبه الموصل) لقراءة الأقراص المضغوطة (CD)، والأقراص الرقمية (DVD) (انظر إلى الأسفل).

ويمكن تهيج الذرات في الليزر بطريقة مستمرة أو على شكل نبضات. ففي الليزر النبضي، تهيج الذرات بواسطة طاقة يتم إدخالها دورياً. أمّا في الليزر المستمر فتكون الطاقة المدخلة مستمرة. وعند تحفيز الذرات لتقفز إلى المستوى الأخفض، يتم إثارتها بسرعة لتعود إلى المستوى الأعلى لكي يكون الناتج شعاعاً ليزرياً مستمراً. إنَّ الليزر لا يُعدّ مصدرًا للطاقة. لذا، يجب إدخال الطاقة كي يعمل الليزر على تحويل جزء منها إلى شعاعٍ ناخٍ رفيع عالي الشدة.

* تطبيقات

بسبب الخصائص المميزة لضوء الليزر، كشعاع رفيع مترابط (متناسك). فقد وجد له تطبيقات عديدة؛ فهو أداة جراحية مفيدة. يمكن استخدامها لتدمير أغشية في مناطق موضعية، أو لتفتيت حصى الصفراوية وحصى الكلى. وبسبب الحرارة المنتجة، يمكن استخدام شعاع الليزر للألم الأغشية المتقطعة ووصلها، مثل شبكية العين المنفصلة. ويمكن حمل الشعاع الليزري بواسطة ليف بصري (البند 23 - 6) إلى النقطة الجراحية. وفي بعض الأحيان كمسار ليف بصري إضافي على المنظار الداخلي (الشكل 28 - 21 انظر أيضاً البند 23 - 6) لإزالة الترسبات المسببة لانسداد الشرايين البشرية على سبيل المثال، وتدمير أجزاء عضوية ضئيلة داخل خلايا حية باستخدام الليزر بواسطة باحثين يدرسون تأثير اختفاء هذه الأجزاء في تصرفات الخلايا. وتستخدم أشعة الليزر كذلك لتدمير الخلايا السرطانية وقبل السرطانية، وتُؤمّن الحرارة الأوعية الشعرية واللمفاوية، لتكوي الجراح وتمنع انتشار المرض.

تستخدم الحرارة الشديدة المنتجة في مساحة صغيرة بالليزر للحام الفلزات وتصنيعها، ولحفر ثقوب ضئيلة في المواد القاسية. ولأنّ شعاع الليزر مترابط، وأحادي الطول الموجي، ورفيع، ومتماثل بشكل أساسي، فيمكن استخدام العدسات لتركيز الضوء على مساحات صغيرة أصغر من ذلك بكثير. ومن الجدير بالذكر أنّ دقة الامتداد الطولي لليزر جعلته مفيداً للمساحين، في ترتيب الآلات بإتقان خصوصاً في المناطق التي يصعب الوصول إليها.

⚠ تنويه!

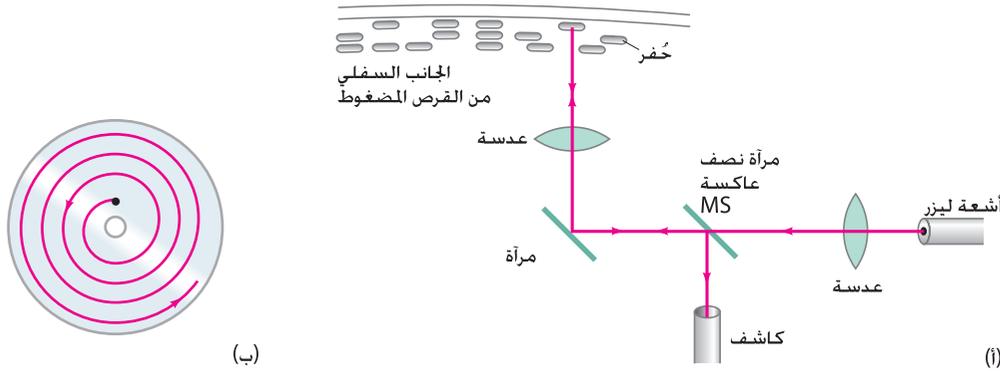
الليزر ليس مصدرًا للطاقة.

🧪 تطبيق الفيزياء

استعمالات الليزر الطبية وغيرها

الشكل 28 - 21 ليزر يتم استخدامه في جراحة العيون.





الشكل 28 - 22 (أ) قراءة قرص مضغوط (أو قرص الفيديو الرقمي). الشعاع الدقيق لليزر، المركز أكثر بواسطة العدسات، موجه إلى السطح السفلي لقرص مضغوط دوار. وينعكس الشعاع مرتدًا من المناطق بين الحفر وينعكس بدرجة أقل بكثير من الحفر. والضوء المنعكس يقاس كما هو مبين، منعكسًا من مرآة نصف عاكسة MS. ومثل الانعكاس القوي والضعيف المرتبطان بالأصفر (0s) والأحادي (1s) من الشفرة الثانية إشارة صوتية أو صوتية. (ب) يتبع الليزر مسار CD الذي يبدأ قرب المركز ويتحرك بصورة لولبية نحو الخارج.

وفي الحياة اليومية، تستخدم الليزر لقراءة شفرات الترميز bar-code (أو الدفع). وفي الأقراص المضغوطة (CD)، وأقراص الفيديو الرقمية (DVD). وينعكس شعاع الليزر عن الحزرات والفراغات لشفرة العمود. وعن صفر CD أو DVD كما هو مبين في (الشكل 28 - 22). والمعلومات المسجلة على CD أو DVD هي سلسلة من الحفر والفراغات الممتدة لـ 0s و 1s (أو "مغلق" و"مفتوح") لشفرة رقمية بشفرة إلكترونيًا قبل إرسالها إلى النظام الصوتي المرئي. ويبدأ ليزر قارئ القرص المضغوط CD بقراءة القرص من الداخل، حيث يبدأ بالدوران بسرعة 500 rpm. ومع دوران القرص، يتبع الليزر المسار اللولبي (الشكل 28 - 22 ب). ومع حركته نحو الخارج، تقل سرعة القرص لأن كل محيط جديد ($C = 2\pi r$) يعدّ أطول بقليل من سابقه نتيجة ازدياد r . ويدور القرص قرب الحافة الخارجية بمعدل 200 rpm. إن طول مسار القرص المضغوط CD الذي مدته ساعة واحدة هي 5 km تقريبًا، في حين يكون عرض مساره ($1.6 \mu m = 1600 \text{ nm}$) تقريبًا. أما المسافة بين الحفر فهي حوالي 800 nm. وتحتوي أقراص DVD على معلومات أكثر من ذلك بكثير. وهي تعتمد على تقنية حديثة جدًا، ويمكن لها أن تستخدم مسارات أرفع ($0.7 \mu m$) وطولًا أقصر (400 nm). وهذه الأرقام هي لأقراص DVD معيارية). والنسخ الحديثة تستخدم الليزر الأزرق بأطوال أمواج أقصر (405 nm) وشعاع أرفع. فتسمح بمسارات أرفع ($0.3 \mu m$) لتستطيع تخزين بيانات أكثر بكثير من أجل الحصول على تعريف عالٍ. ويمكن لأقراص DVD أن تحتوي على طبقتين. واحدة تحت الأخرى. وعندما يركز الليزر على الطبقة الثانية، فإن الضوء يمرّ خلال الطبقة السطحية شبه الشفافة. ومن الممكن أن تتمّ قراءة الطبقة الثانية من الحافة الخارجية بدلًا من الداخلية. ويمكن لأقراص DVD أيضًا أن تضم طبقة أو طبقتين على سطحي القرص.

12-28 التصوير التجسيمي

يعدّ إنتاج صور ثلاثية الأبعاد - الصور المجسّمة - (انظر الشكل 28 - 23) أحد أكثر تطبيقات ضوء الليزر إثارة. وفي الصورة العادية، يسجل الفيلم ببساطة شدة الضوء الواصل إليه عند كلّ نقطة. وعندما يشاهد الرسم الصوري أو الشفاف، فإنّ الضوء المنعكس عنه أو المارّ خلاله يمنحنا صورة ثنائية الأبعاد. أما في التصوير التجسيمي، فتبنى الصور بالتداخل دون عدسات. وعند تشكل الصورة المجسّمة الليزرية على غشاء، فإنّ شعاعًا ليزريًا موسعًا يكون قد انشطر إلى جزأين بواسطة مرآة نصف فضية (الشكل 28 - 23). فيذهب جزء منه إلى الغشاء مباشرة، في حين يمرّ الباقي إلى الجسم المراد تصويره، لينعكس عنه بعد ذلك إلى الغشاء. يصل الضوء الصادر من النقاط جميعها على الجسم إلى كلّ نقطة على الغشاء، ويسمح تداخل الشعاعين تسجيل كلّ من الشدة والطور النسبي للضوء عند كلّ نقطة. ومن الضروري أن يكون الضوء متوافقًا - أي أنّ له الطور نفسه عند النقاط جميعها - ولهذا السبب تمّ استخدام الليزر.

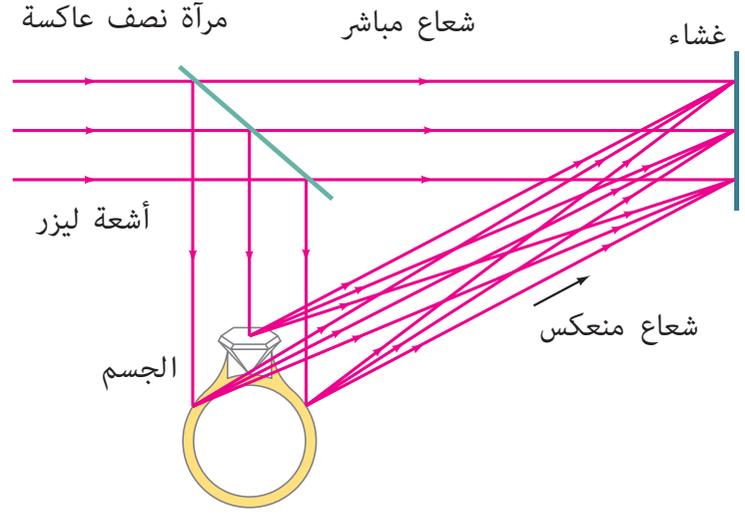
تطبيق الفيزياء

قارئ CD و DVD، شفرات عمودية

تطبيق الفيزياء
تصوير تجسيمي



(ب)



(أ)

الشكل 28 – 23 (أ) صناعة الصور المجسمة. يتداخل الضوء المنعكس من النقاط المختلفة على الجسم (عند الغشاء) مع الضوء من الشعاع المباشر. (ب) ولد ينظر إلى الصورة المجسمة لسيدتين تتكلمان بهاتفين.

صور مجسمة ذات ضوء أبيض

وبعد تطوير الغشاء، يوضع مرّة أخرى في شعاع ليزري لتصنع للجسم صورة ثلاثية الأبعاد. وتستطيع أن تمشي حول صورة من هذا النوع، وتراها من جوانب مختلفة كما لو أنّها الجسم الأصلي (الشكل 28 – 23ب). ومع هذا، فلو حاولت أن تلمسها بيدك، فلن تجد أيّ مادة هناك. إنّ الصور المجسمة الحجمية أو ذات الضوء الأبيض لا تحتاج إلى ليزر لرؤيتها، ولكن يمكن رؤيتها باستخدام ضوء أبيض عادي (وبفضل الأقرب لمصدر نقطي، مثل الشمس أو مصباح نظيف ذي فتيلة صغيرة براق). وعلى الرغم من هذا، يجب أن تكون الصورة المجسمة كذلك باستخدام ليزر. وهي لا تخضع على غشاء رقيق، ولكن على مستحلب سميك. إنّ نمط التداخل في الغشاء المستحلب يمكن التفكير به كمجموعة مرتبة من الحزم أو الأشرطة حيث يمكن للتداخل البناء أن يحدث. المجموعة المرتبة هذه، وعملية إعادة بناء الصورة، يمكن مقارنتها مع استطرارة براغ لأشعة إكس من الذرات في البلورة (انظر البند 25 – 11). ويستطيع الضوء الأبيض إعادة بناء الصورة لأنّ شرط براغ ($m\lambda = 2d \sin \theta$) يختار الطول الموجي الوحيد المناسب. وإذا كانت الصورة المجسمة قد تمّ تحضيرها في الأصل من ليزرات تنبعث منها الألوان الثلاثة الأولية التجميعية (الأحمر، والأخضر، والأزرق)، فعندئذٍ يمكن رؤية الصورة ثلاثية الأبعاد بالألوان الكاملة عند مراقبتها باللون الأبيض.

ملخص

$$(28 - 2) \quad (\Delta E)(\Delta t) \approx \hbar$$

وحسب الميكانيكا الكمية، فإنّ حالة إلكترون ما في ذرة ما تحدّد بأربعة أعداد كميّة هي: m_l, l, n, m_s :

(1) العدد الكميّ الأساس: يمكن أن يأخذ قيمة أيّ عدد صحيح

(1, 2, 3, ...) ويتماثل مع العدد الكميّ في نظرية بور القديمة:

(2) العدد الكميّ الفلكي (المداري): يمكن أن يأخذ قيما بين 0 و $n - 1$

(3) العدد الكميّ المغناطيسي: يمكن أن يأخذ قيم أعداد صحيحة من $-l$ إلى $+l$:

(4) العدد الكميّ المغزلي: يمكن أن يكون $+\frac{1}{2}$ أو $-\frac{1}{2}$.

وضع شرودنجر وهايزنبرغ كل على حدة نظرية جديدة اسمها النظرية الكميّة في عام 1925، وهي تُعدّ حاليّاً النظرية الأساس على المستوى الذري. كما أنّها نظرية إحصائية احتمالية أكثر منها حتمية. هناك جانب مهمّ من الميكانيكا الكمية يُدعى مبدأ عدم اليقين لهايزنبرغ، وهو ناتج من ازدواجية الموجة - الجسيم، والتفاعل غير الممكن تلافيه بين الجسيم الملاحظ والملاحظ (المراقب).

ينصّ أحد أشكال مبدأ الاحتمالية على عدم إمكانية قياس موضع جسم ما x وزخمه p_x بدقة في الوقت نفسه. وأنّ حاصل ضرب حدّي عدم اليقين $(\Delta x)(\Delta p_x)$ لا يمكن أن يكون أقل من \hbar ($\hbar = h/2\pi$):

$$(28 - 1) \quad (\Delta p_x)(\Delta x) \approx \hbar$$

كما أنّ هناك شكلاً لمبدأ عدم اليقين ينصّ على إمكانية أن يكون مقدار عدم اليقين في الطاقة هو ΔE لفترة زمنية Δt ، أي

الجدول الدوري: تُرتب العناصر في صفوف أفقية حسب ازدياد العدد الذري (عدد الإلكترونات في الذرة المتعادلة). وتركيب القشرة يترتب عليه دورية في خصائص العناصر. ليستطيع كل عمود رأسي أن يحتوي على عناصر لها الخصائص الكيميائية نفسها.

يتم إنتاج أشعة إكس التي هي نوع من الإشعاع الكهرومغناطيسي طوله الموجي قصير جداً. عندما تصطدم إلكترونات عالية السرعة بهدف ما. و يتكون طيف أشعة إكس المنتج بهذه الطريقة من جزأين هما: 1- طيف مستمر يتم إنتاجه نتيجة لتباطؤ الإلكترونات بواسطة ذرات الهدف. 2- قمم تمثل الفوتونات المنبعثة من ذرات الهدف بعد إثارتها بالتصادمات مع الإلكترونات عالية السرعة. وتسمح أقيسة هذه القمم بتحديد مستويات الطاقة الداخلية للذرات وتحديد Z .

[* **التألق:** يحدث عندما يتبع امتصاص الفوتونات فوق البنفسجية انبعاث ضوء مرئي ناتج من الترتيب الخاص لمستويات طاقة المادة. والمواد المتفسفرة لها حالات شبه مستقرة (تعيش طويلاً) ينبعث منها الضوء بعد ثوان أو دقائق من امتصاص الضوء].

[* **تنج الليزر:** شعاعاً رفيعاً من ضوء أحادي طول الموجة ومتوافق (أمواج ضوء لها الطور نفسه). الصور المجسمة هي صور ذات نوعية ثلاثية الأبعاد. تتشكل نتيجة تداخل ضوء الليزر].

تعتمد مستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين على n . في حين تعتمد في الذرات الأخرى على n و l . وعند تطبيق مجال مغناطيسي خارجي. تنشطر الأطياف الخطية (تأثير زيمان) مشيرة إلى اعتماد الطاقة على m_l في هذه الحالة أيضاً.

وحتى عند غياب المجال المغناطيسي. فإن الأقيسة الدقيقة للأطياف الخطية تظهر انشطاراً ضئيلاً في الخطوط يُدعى **التركيب الدقيق**. الذي يعني أن الطاقة تعتمد بشكل قليل جداً على m_l و m_s .

[* **الانتقالات** بين الحالات التي تتبع قاعدة الانتقال $\Delta l = \pm 1$ هي ذات احتمالية أعلى بكثير من تلك المسماة بالانتقالات "المنوعة"].

إن ترتيب الإلكترونات في الذرات متعددة – الإلكترونات يحكمه مبدأ باولي للاستبعاد. وهذا المبدأ ينص على عدم قدرة أي إلكترونين على احتلال الحالة الكمية نفسها: أي أنهما لا يمكن أن يمتلكا مجموعة الأعداد الذرية نفسها: n, l, m_l و m_s .

وفي النتيجة. جمع الإلكترونات في الذرات عديدة الإلكترونات في قشور (مستويات الطاقة) (حسب قيمة n) وقشور فرعية (مستويات طاقة فرعية) (حسب l).

حدد التركيبات الإلكترونية باستخدام القيم العددية ل n . وباستخدام أحرف f, d, p, s, l : إلخ. عندما تكون قيم $l = 0, 1, 2, 3$ وهكذا دواليك. إضافة إلى رمز علوي لعدد الإلكترونات في القشرة الفرعية. ولهذا. فالحالة الأرضية للهيدروجين هي $1s^1$. أمّا للأكسجين فهي $1s^2 2s^2 2p^4$.

أسئلة

12. تتغير أحجام الذرات ثلاث مرات تقريباً من الأكبر إلى الأصغر. ومع هذا فعدد الإلكترونات يتغير من واحد إلى أكثر من مئة. فسّر.

13. ذرتا هيدروجين وهيليوم مهيجتان تشعان ضوءاً عندما تفرزان إلى الأسفل إلى الحالة $n = 1, l = 0, m_l = 0$. ومع هذا فالعنصران لهما طيفا انبعاث مختلفان تماماً. لماذا؟

14. كيف كان سيبدو الجدول الدوري لو كانت الميكانيكا الكمية لا تزال صحيحة بالرغم من عدم وجود غزل إلكتروني؟ خذ بالحسبان أول عشرين عنصراً أو أكثر.

15. أيّ من التراكيب الإلكترونية التالية غير مسموحة:
(أ) $1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 4p^2$ (ب) $1s^2 2s^2 2p^8 3s^1$ (ج) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5 4s^2 4d^5 4f^1$
إذا كانت غير مسموحة. ففسّر السبب.

16. أعط التركيب الإلكتروني الكامل لذرة يورانيوم (اقرأ الجدول الدوري على الغلاف الخلفي الداخلي بدقة لمساعدتك).

17. في أيّ عمود من الجدول الدوري يمكن أن تتوقع أن تجد الذرة المرتبطة بكلّ من التراكيب الإلكترونية التالية:
(أ) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$ (ب) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$ (ج) $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$
(د) $1s^2 2s^2 2p^5$ ؟

18. لماذا يظهر كلّ من الكلور واليود خصائص متشابهة؟

19. فسّر لماذا يظهر البوتاسيوم والصوديوم خصائص متشابهة؟

20. طاقة التأين للنيون ($Z = 10$) هي 21.6 eV . وتلك للصوديوم ($Z = 11$) هي 5.1 eV . فسّر الفرق الكبير.

* 21. لماذا يوحى طول موجة القطع في (الشكل 28 – 11) بالطبيعة الفوتونية للضوء؟

* 22. لماذا لا نتوقع توافقاً مثاليّاً بين القيم المقيسة لأطوال الأمواج الخطية لأشعة إكس وتلك المحسوبة باستخدام نظرية بور. كما في (المثال 28 – 6)؟

* 23. كيف يمكن أن تستخلص أيّ الخطوط في طيف أشعة أكس يرتبط بانتقالات K_α, K_β, L إلخ؟

1. قارن موجة مادية Ψ مع: (أ) موجة على حبل. (ب) موجة كهرومغناطيسية EM. ناقش التشابهات والاختلافات.

2. فسّر سبب عدم توافق نظرية بور للذرة مع الميكانيكا الكمية. خصوصاً مبدأ الاستبعاد.

3. فسّر لماذا كلما زادت كتلة الجسم. أصبح من السهل أكثر التنبؤ بموضعه المستقبلي.

4. من وجهة نظر مبدأ عدم اليقين. لماذا يبدو موضع كرة البيسبول وسرعتها معرفين جيّداً. في حين لا يكون كذلك للإلكترون؟

5. هل من الممكن بأيّ شكل توازن إبرة حادة جداً على رأسها تماماً؟ فسّر.

6. وُضع ميزان حرارة بارد في وعاء حساء ساخن. هل ستبقى قراءة درجة حرارة ميزان الحرارة كدرجة حرارة الحساء نفسها قبل أخذ القراءة؟ فسّر.

7. هل يضع مبدأ عدم اليقين حدّاً لمدى جودة أخذك لأيّ قياس منفرد للموضع؟

8. إذا علمت موضع جسم بالتحديد. بلا أيّ عدم يقين. فما هي دقة معرفتك لزمخه؟

9. عند تفحصك لضغط عجل حافلة. هل من الممكن أن يتلاشى هروب الهواء؟ هل تستطيع منع تسرب الهواء خلال أخذ القراءة؟ ما علاقة هذا بمبدأ عدم اليقين؟

10. لقد قيل بأنّ طاقة الحالة الأرضية في ذرة الهيدروجين يمكن معرفتها بالتحديد. ولكن الحالات المهيجة يرتبط بقيمها بعض عدم اليقين ("اتساع الطاقة"). هل هذا متطابق مع مبدأ عدم اليقين في شكل طاقتها؟ فسّر.

11. أيّ النموذجين لذرة الهيدروجين الذي يتنبأ بأنّ الإلكترون يقضي وقتاً أطول بالقرب من النواة: نموذج بور أم النموذج الميكانيكي الكمي؟

- *27. فسّر كيف يمكن أن يبدو شعاع ليزريّ بقدرة 0.0005 W . تمّ تصويره عن بعد. أكثر قوة من مصباح شارع قدرته 1000 W عند المسافة نفسها.
*28. هل تناقص شدة ضوء الليزر مع التربيع العكسي للمسافة؟ فسّر.

24. لماذا نتوقع من الانتقالات العميقة داخل ذرة ما أن تنتج أطوال أمواج أقصر مقارنة مع انتقالات الإلكترونات الخارجية؟
*25. قارن بين الانبعاثين: التلقائي والمحفز.
*26. كيف يختلف الضوء الليزريّ عن الضوء العادي؟ وكيف يتشابهان؟

مسائل

28-2 دالة موجي. شقّ مزدوج

1. (II) النيوترونات في شعاع متواز. الطاقة الحركية لكلّ منها $\frac{1}{40} \text{ eV}$. وُجّهت خلال شقين مزدوجين يفصل بينهما 0.50 nm كم ستبتعد قمم النداخل عن بعضها على شاشة بعيدة 1.0 m ؟ [مساعدة: أوجد أولاً الطول الموجي للنيوترون].
2. (II) رصاصات. كتلة كلّ منها 3.0 g . أطلقت في مسارات متوازية بسرعات 220 m/s خلال ثقب قطره 3.0 mm . ما هو البعد عن الثقب الذي يجب أن تكون عنده لتقيس قطر انتشار شعاع الرصاصات 1.0 cm ؟

28-3 مبدأ عدم اليقين

3. (I) يسير بروتون بسرعة $(6.560 \pm 0.012) \times 10^5 \text{ m/s}$. ما أعلى دقة ممكنة في حساب موقعه؟ [مساعدة: $\Delta p = m \Delta v$].
4. (I) إذا كان بالإمكان قياس موضع إلكترون لدقة $2.0 \times 10^{-8} \text{ m}$. فإلى أيّ دقة يمكن معرفة سرعته؟
5. (I) يبقى إلكترون في الحالة المهيجة لذرة ما لمدة 10^{-8} s . ما أقلّ عدم يقين في طاقة هذه الحالة (بدلالة eV)؟
6. (I) البوزون Z^0 . المكتشف في 1985. هو الوسيط للقوة النووية الضعيفة. ومن الطبيعي أن يضمحل بسرعة كبيرة. ومتوسط طاقته السكونية هي 91.19 GeV . ولكن قصر عمره يظهر كعرض ضمني مقداره 2.5 GeV (عدم يقين في الطاقة السكونية). ما عمر هذا الجسيم؟
7. (II) ما عدم اليقين في كتلة ميون ($m = 105.7 \text{ MeV}$) معرفة بدلالة eV/c^2 . إذا كان عمره المعطى هو $2.20 \mu\text{s}$ ؟ [مساعدة: $\Delta E \approx \hbar/\Delta t$].
8. (II) نيوترون حرّ ($m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$) عمره النصفى 900 ثانية. ما عدم اليقين في كتلته (بالكيلو غرام)؟
9. (II) إلكترون وكرة بيسبول (كتلتها 140 kg) يسيران بسرعة 150 m/s قياساً بدقة 0.055% . احسب وقارن عدم اليقين في موقع كلّ منهما.
10. (III) قدر أدنى طاقة ممكنة لنيوترون موجود في نواة عادية نصف قطرها $1.0 \times 10^{-15} \text{ m}$. [مساعدة: يستطيع الجسيم أن يمتلك طاقة مساوية. على الأقل. لعدم اليقين في قيمتها].
11. (III) استخدم مبدأ عدم اليقين لتظهر أنه إذا وُجد إلكترون في النواة ($r \approx 10^{-15} \text{ m}$) فإنّ طاقته الحركية (استخدم النسبية) ستكون مئات من MeV . (وبما أنّ إلكترونات كهذا لم يلاحظ. فإننا نستنتج بأنّ الإلكترونات لا تكون في النواة). [مساعدة: يستطيع الجسيم أن يمتلك طاقةً مساوية. على الأقل. لعدم اليقين في قيمتها].
12. (III) ما الدقة التي يمكن أن يُقاس بها موضع إلكترون جهده 3.00 keV مفترضاً أن طاقته معروفة إلى 1.00% ؟

28-6 إلى 28-8 الأعداد النووية. مبدأ الاستبعاد

13. (I) ما قيم l الممكنة عند $n=6$ ؟
14. (I) ما قيم m_l و m_s الممكنة عند $n=5$ و $l=3$ ؟
15. (I) كم عدد الإلكترونات الممكنة في $n=6$ و $l=3$ ؟
16. (I) كم عدد الحالات المختلفة الممكن وجودها في القشرة الفرعية لإلكترون عدده الكميّ الرئيسي هو $n=4$ ؟ اكتب الأعداد الكمية لكلّ حالة.
17. (I) اذكر الأعداد الكمية لكلّ إلكترون في الحالة الأرضية لـ: (أ) الكربون ($Z=6$). (ب) الماغنيسيوم ($Z=12$).
18. (I) اذكر الأعداد الكمية لكلّ إلكترون في الحالة الأرضية للنيوتروجين ($Z=7$).
19. (I) إذا كانت $l=4$ لذرة هيدروجين معينة. فما القيم الممكنة لـ n و m_l و m_s ؟
20. (I) احسب قيمة الزخم الزاوي لإلكترون في الحالة $n=4$ و $l=3$ للهيدروجين.
21. (II) إذا كانت $m_l = -3$ لذرة هيدروجين. فما القيم الممكنة لـ n و l و m_s ؟
22. (II) أثبت إمكانية وجود 18 إلكترونات في القشرة الفرعية "g".
23. (II) ما التركيب الإلكتروني الكامل للعناصر التالية في الحالة الأرضية عندما تكون Z مساوية لـ: (أ) 27؟ (ب) 36؟ (ج) 38؟ [مساعدة: انظر الجدول الدوري داخل الغلاف الخلفي].
24. (II) ما التركيب الإلكتروني الكلي لـ: (أ) سيلينيوم (Se)؟ (ب) الذهب (Au)؟ (ج) الراديوم (Ra)؟ [مساعدة: انظر الجدول الدوري داخل الغلاف الخلفي].
25. (II) ذرات هيدروجين في الحالة $6s$. حدّد كلاً من: (أ) العدد الكميّ الرئيسي. (ب) طاقة الحالة. (ج) الزخم الزاوي الفلكي وعدده الكميّ l . (د) القيم الممكنة للعدد الكميّ المغناطيسي.
26. (II) قدر طاقة الترابط للإلكترون الثالث في الليثيوم باستخدام نظرية بور. [مساعدة: $n=2$ لهذا الإلكترون و "يرى" شحنة صافية تعادل تقريباً $+1e$]. القيمة المقيسة هي 5.36 eV .
27. (II) اثبت أنّ الزخم الزاوي الكلي للقشرة الفرعية المملوءة يساوي صفراً.
*28. (II) لكلّ من الانتقالات الذرية التالية. اذكر ما إذا كان الانتقال مسموحاً أو ممنوعاً. وإذا كان ممنوعاً. فما القاعدة التي تمّت مخالفتها: (أ) $4p \rightarrow 3p$. (ب) $2p \rightarrow 1s$. (ج) $3d \rightarrow 2d$. (د) $4d \rightarrow 3s$. (هـ) $4s \rightarrow 2p$.

*36. قذِفْ خليطاً من الحديد ومادة مجهولة بالإلكترونات. إذا كان الطول الموجي لخطوط K_{α} للحديد هو 194 pm وللمادة المجهولة 229 pm. فما المادة المجهولة؟

*28- II الليزر

*37. (II) الليزر المستخدم للحام قرنية مفصولة يرسل نبضات طولها 28 ms من ضوء 640 nm بقدرة مخرجة قدرها 0.68 W خلال النبضة. ما مقدار الطاقة الممكن ترسيبها لكل نبضة. وكم عدد الفوتونات المحتواة في كل نبضة؟ [مساعدة: انظر المثال 27 - 5].

*38. (II) ليزر منخفض القدرة. مستخدم في مختبر فيزياء. ومن الممكن أن يمتلك $0.50 mW$ وقطر شعاع قدره 3.0 mm. احسب: (أ) متوسط شدة ضوء شعاع الليزر. (ب) قارن هذا بشدة مصباح ضوئي ينتج ضوء $40 W$ كما يشاهد من 2.0 m.

*39. (II) قَدِّر الانتشار الزاوي لشعاع ليزر والناتج من الحيود إذا خرج الشعاع من خلال مرآة قطرها 3.0 mm. افرض أن $\lambda = 694 nm$. كم سيكون قطر هذا الشعاع إذا اصطدم ب: (أ) قمر صناعي على ارتفاع 300 km فوق الأرض. (ب) القمر؟ [مساعدة: انظر البند 25 - 7].

*40. (II) ما الطول الموجي لليزر He - Ne؟

*29. (II) ذرة هيدروجين مهيجة موجودة في الحالة 6d. (أ) اذكر الحالات جميعها (n, l) مع انبعاث فوتوني و"المسموح" للذرة أن تقفز إليها. (ب) كم عدد أطوال الأمواج المختلفة لتلك الحالات (بإهمال التركيب الدقيق)؟

*28- 9 أشعة إكس

*30. (I) ما أقصر أطوال أمواج أشعة إكس المنبعثة بواسطة الإلكترونات المصدمة بواجهة أنبوب صور تلافاز جهده 33.5 kV؟ وما أطوالها؟

*31. (I) أثبت أن أقصر طول موجي لبريمزشرانج أشعة إكس المنبعثة من أنبوب أشعة إكس يساوي $\lambda = 0.030 nm$. كم تبلغ الفولتية خلال الأنبوب؟

*32. (I) أثبت أن طول موجة الانقطاع λ_0 تعطى كالتالي:

$$\lambda_0 = \frac{1240 nm}{V}$$

حيث V هي فولتية أنبوب أشعة إكس بالفولت.

*33. (II) استخدم النتيجة من (المثال 28 - 6) لتقدر طول موجة أشعة إكس المنبعثة عند قفز ذرة Co ($Z = 27$) من $n = 2$ إلى $n = 1$.

*34. (II) قَدِّر الطول الموجي للانتقال من $n = 2$ إلى $n = 1$ للحديد ($Z = 26$).

*35. (II) استخدم نظرية بور لتقدِّر الطول الموجي للانتقال في الموليبدنيوم ($Z = 42$) من $n = 3$ إلى $n = 1$. القيمة المقيسة هي 0.063 nm. لماذا لا نتوقع توافقاً تاماً؟

مسائل عامة

47. يعمل أنبوب أشعة إكس عند 95 kV مع تيار 25 mA وتتحول معظم طاقة الإلكترونات تقريباً إلى حرارة. إذا كانت الحرارة النوعية للوح كتلته 0.085 kg هي 0.11 kcal/kg.°C، فما ارتفاع درجة الحرارة لكل دقيقة إذا لم يستخدم ماء للتبريد؟

48. طاقة التآين (الترايط) للإلكترون الخارجي الأبعد في البورون هي 8.26 eV. (أ) استخدم نموذج بور لتقدِّر "الشحنة الفاعلة" Z_{eff} التي يراها هذا الإلكترون. (ب) قَدِّر متوسط نصف القطر الفلكي.

49. استخدم نظرية بور (خصوصاً المعادلة 27 - 16) لتثبت أن مخطط موسيلي (الشكل 28 - 12) يمكن كتابته كالتالي:

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = a(Z - b)$$

حيث $b \approx 1$ ، وأوجد قيم a .

50. (أ) أثبت أن عدد الحالات المختلفة لقيمة معطاة ل l تعادل $(2l + 1)$. (ب) ما هو الرقم ل $l = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ؟

51. أثبت أن عدد حالات الإلكترون المختلفة الممكنة لقيمة معطاة ل n هي $2n^2$. (انظر السؤال 50).

52. أطلق شعاعاً من الإلكترونات بطاقة حركية 45 keV خلال شقين رفيعين في حاجز. الشقان يبعدان $2.0 \times 10^{-6} m$ عن بعضهما بعضاً. إذا وُضعت شاشة على بعد 35.0 cm خلف الحاجز. فاحسب البعد بين هدبين "منيرين" لنمط التداخل المنتج على الشاشة.

41. استخدم مبدأ عدم اليقين لتقدر عدم اليقين في موضع إلكترون في الحالة الأرضية لذرة هيدروجين. [مساعدة: حدّد الزخم باستخدام نموذج بور من (البند 27 - 12)]. وافرض أن الزخم يمكن أن يأخذ القيم الواقعة جميعها بين هذه القيمة والصفر. كيف تقارن هذه النتيجة مع نصف قطر بور؟

42. إلكترون في الحالة $n = 2$ للهيدروجين يبقى هناك بالمتوسط حوالي $10^{-8} s$ قبل أن يقفز إلى الحالة $n = 1$. (أ) قَدِّر عدم اليقين في الطاقة للحالة $n = 2$. (ب) ما نسبة طاقة الانتقال هذه؟ (ج) ما الطول الموجي والعرض (بالنانومتر) لهذا الخط في طيف الهيدروجين؟

43. ما أكبر وأصغر قيمتين للزخم الزاوي L للإلكترون في القشرة $n = 5$ ؟

44. قَدِّر: (أ) العدد الكمي L للزخم الزاوي الفلكي للأرض حول الشمس. (ب) عدد الاتجاهات الممكنة لسطح الفلك الأرضي.

45. تغادر رصاصة (12 g) بندقية بسرعة 180 m/s. (أ) ما الطول الموجي لهذه الرصاصة؟ (ب) إذا عُرِف موضع الرصاصة بدقة 0.60 cm (نصف قطر الأسطوانة). فما أقل عدم يقين في زخمها؟

46. باستخدام صيغة بور لنصف قطر فلك إلكترون. قَدِّر متوسط المسافة من النواة لإلكترون في الفلك الداخلي العميق ($n = 1$) لذرة يورانيوم ($Z = 92$). تقريباً. ما مقدار الطاقة الضرورية لإزالة إلكترون الداخل العميق هذا؟

53. الزخم الزاوي في ذرة الهيدروجين يعطى بنموذج بور والميكانيكا الكمية. قارن النتائج لـ $n = 2$.
54. سيارة كتلتها 1100-kg تسير بسرعة (22 ± 0.22) m/s. ما أعلى دقة ممكنة لتحديد موضعها؟
55. يحتوي طيف ذري على خط طوله الموجي مركز عند 488 nm. وإن تمت أقيسة دقيقة، فستظهر أنّ الخط ينتشر فعلياً بين 487 nm و 489 nm. قدّر عمر الحالة المهيجة التي انتجت هذا الخطّ.
56. سُرعّت بروتونات من السكون بواسطة فرق جهد 550 V. ثمّ وُجّهت إلى شقين يفصل بينهما 0.70 mm. كم تبعد قمم التداخل عن بعضها على شاشة تبعد 28 m؟
57. إلكترون وبروتون، كلّ منهما ساكن في البداية، سرّعا بتأثير الفولتية نفسها. افرض أنّ عدم اليقين في موقعهما قد أعطي بدلالة طول موجة دي برولي لكلّ منهما. أوجد نسبة عدم اليقين في زخمهما.
58. إذا كان العدد الكميّ الرئيس n محدداً بالمدى من 1 إلى 6، فكم عدد العناصر التي يمكن أن تجدها في الطبيعة؟
59. إذا كان طول موجتك حسب دي برولي 0.50 m، فما سرعة حركتك إذا كانت كتلتك 75.0 kg؟ هل تلاحظ آثار الحيود عند مرورك من باب ما؟ وعلى نحو تقريبيّ، كم سيستغرقك المشي خلال الباب؟
60. افرض أنّ الطيف لعنصر مجهول يظهر سلسلة خطوط مع واحد من كلّ أربعة خطوط تتطابق مع خط من سلسلة لامان للهيدروجين. على افتراض أنّ العنصر المجهول هو أيون ما ذو Z بروتونات وإلكترون واحد، حدّد Z والعنصر المعني.
- 61* فوتونات أطوالها الموجية 0.154 nm انبعثت من سطح فلز معين عندما أطلقت عليه إشعاعات ذات طاقة مرتفعة. إذا كان طول موجة الفوتون هذا يرتبط بـ K_α ، فما هو هذا العنصر؟
- 62* أثبت أنّ انتشار الحيود لشعاع ليزري $\lambda/D \approx$ كما وُصّف في (البند 28 – 11)، هو تماماً كما يمكن أن تتوقع من مبدأ عدم اليقين. [مساعدة: بما أنّ عرض الشعاع مقيد بأبعاد الشقّ D ، فإنّ مركبة زخم الضوء العمودية على محور الليزر غير محددة].

إجابات التمارين

- أ : 2.1×10^{-24} kg·m/s, 2.3×10^6 m/s
 ب : 2, 1, 0, -1, -2
 ج : $-\sqrt{20} \hbar$, -0.38 eV
 د : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^1$