وزارة التربيـــة والتعليـــم والتعليـــم العالـــي
Ministry of Education and Higher Education
State of Qatar • دولـــة قطـــر

الفيزياء

كتاب الطالب

المستوى الثاني عشر

PHYSICS
STUDENT BOOK

GRADE 12

الفصل الدراسي الثاني
SECOND SEMESTER

طبعة - (2025-1447)

وزارة التربيـــة والتعليـــم والتعليـــم العالـــي
Ministry of Education and Higher Education
State of Qatar • دولـــة قطـــر

© وزارة التربية والتعليم والتعليم العالي في دولة قطر

يخضـع هـذا الكتـاب لقانـون حقـوق الطباعـة والنشـر، ويخضـع للاسـتثناء التشـريعي المسـموح بـه قانونًـا ولأحـكام التراخيـص ذات الصلـة.

لا يجـوز نسـخ أي جـزء مـن هـذا الكتـاب مـن دون الحصـول علـى الإذن المكتـوب مـن وزارة التربيـة والتعليـم والتعليـم العالـي فـي دولـة قطـر.

تمّ إعداد الكتاب بالتّعاون مع شركة تكنولاب.

التأليـف: فريـق مـن الخبـراء بقيـادة الدكتـور تـوم سـو وبالتّعـاون مـع شـركة باسـكو العلميّـة.

التّرجمة: مطبعة جامعة كامبريدج.

النشيد الوطني

قَسَـمًا بِمَـنْ رَفَـعَ السَّـمَاءْ قَسَـمًا بِمَـنْ نَشَـرَ الضِّـيَاءْ
قَطَـرٌ سَتَبْـقَى حُـرَّةً تَسْمُـو بِـرُوحِ الأَوْفِـيَـاءْ
سِـيرُوا عَـلَى نَـهْـجِ الأُلَـى وَعَـلَى ضِيَـاءِ الأَنْبِـيَاءْ
قَطَـرٌ بِقَـلْـبِي سِـيرَةٌ عِـزٌّ وَأَمْجَـادُ الإِبَـاءْ
قَطَـرُ الرِّجَـالِ الأَوَّلِـين حُمَـاتُنَـا يَـوْمَ النِّـدَاءْ
وَحَمَـائِـمٌ يَـوْمَ السَّـلاَمْ جَـوَارِحٌ يَـوْمَ الفِـدَاءْ

وزارة التربيـــة والتعليـــم والتعليـــم العالـــي
Ministry of Education and Higher Education
State of Qatar • دولـــة قطـــر

المراجعة والتّدقيق العلميّ والتّربويّ

إدارة المناهج الدّراسيّة ومصادر التّعلّم

إدارة التقييم

إدارة التوجيه التربوي

خبرات تربويّة وأكاديميّة من المدارس

الإشراف العلميّ والتربويّ

إدارة المناهج الدّراسيّة ومصادر التّعلّم

يعدّ كتاب الطّالب مصدرًا مثيرًا لاهتمام الطلّاب من ضمن سلسلة كتب العلوم لدولة قطر، فهو يستهدف جميع المعارف والمهارات الّتي يحتاجها الطلّاب للنّجاح في تنمية المهارات الحياتيّة وبعض المهارات في الموادّ الأخرى.

وبما أنّنا نهدف إلى أن يكون طلّابنا مميّزين، نودّ منهم أن يتّسموا بما يأتي:

- البراعة في العمل ضمن فريق.
- امتلاك الفضول العلميّ عن العالم من حولهم، والقدرة على البحث عن المعلومات وتوثيق مصادرها.
- القدرة على التّفكير بشكلٍ ناقدٍ وبنّاء.
- الثّقة بقدرتهم على اتّباع طريقة الاستقصاء العلميّ، عبر جمع البيانات وتحليلها، وكتابة التّقارير، وإنتاج الرّسوم البيانيّة، واستخلاص الاستنتاجات، ومناقشة مراجعات الزّملاء.
- الوضوح في تواصلهم مع الآخرين لعرض نتائجهم وأفكارهم.
- التّمرّس في التّفكير الإبداعيّ.
- التّمسّك باحترام المبادئ الأخلاقيّة والقيم الإنسانيّة.

يتجسّد في المنهج الجديد العديد من التّوجّهات مثل:

- تطوير المنهج لجميع المستويات الدّراسيّة بطريقة متكاملة، وذلك لتشكيل مجموعة شاملة من المفاهيم العلميّة الّتي تتوافق مع أعمار الطّلاب، والّتي تسهم في إظهار تقدّمهم بوضوح.
- مواءمة محتوى المصادر الدّراسيّة لتتوافق مع الإطار العامّ للمنهج الوطنيّ القطريّ بغية ضمان حصول الطّلّاب على المعارف والمهارات العلميّة وتطوير المواقف (وهو يُعرف بالكفايات) ما يجعل أداء الطّلاب يصل إلى الحدّ الأقصى.
- الانطلاق من نقطة محوريّة جديدة قوامها مهارات الاستقصاء العلميّ، ما أسّس للتّنوّع في الأنشطة والمشاريع في كتاب الطّالب.
- توزّع المعرفة والأفكار العلميّة المخصّصة لكلّ عام دراسيٍّ ضمن وحدات بطريقة متسلسلة مصمّمة لتحقيق التّنوّع والتّطوّر.

- تعدّد الدّروس في كلّ وحدة، بحيث يعالج كلّ درس موضوعًا جديدًا، منطلقًا ممّا تمّ اكتسابه في الدّروس السّابقة.
- إتاحة الفرصة للطّلّاب، في كلِّ درسٍ، للتّحقّق الذّاتيّ من معارفهم ولممارسة قدرتهم على حلّ المشكلات.
- احتواء كلّ وحدة على تقويم للدّرس وتقويم للوحدة، وهو ما يمكّن الطّلّاب والأهل والمدرّسين من تتبّع التّعلّم والأداء.

العلوم مجموعة من المعارف الّتي تشمل الحقائق والأشكال والنّظريّات والأفكار. ولكنَّ العالِم الجيّد يفهم أنّ «طريقة العمل» في العلوم أكثر أهمّيّة من المعرفة الّتي تحتويها.

سوف يساعد هذا الكتاب الطُّلّاب على تقدير جميع هذه الأبعاد واعتمادها ليصبحوا علماء ناجحين وليواجهوا مجموعة واسعة من التّحدّيات في حياتهم المهنيّة المستقبليّة.

مفتاح كفايات الإطار العام للمنهج التّعليمي الوطني لدولة قطر

- الاستقصاء والبحث
- التّعاون والمشاركة
- التّواصل
- التّفكير الإبداعيّ والناقد
- حلّ المشكلات
- الكفاية العددية
- الكفاية اللغويّة

الفيزياء

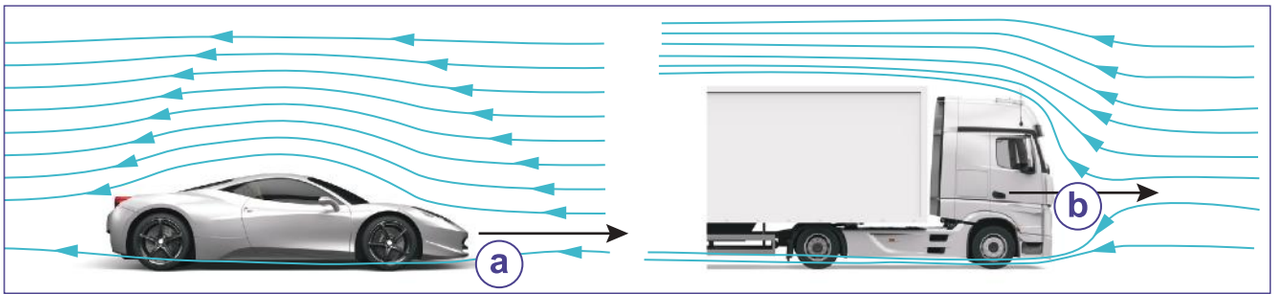
ماذا ستتعلّم من هذا الكتاب

يؤدي الدّلك إلى انتقال الشُحنات السالبة إلى البالون.

تتناول الوحدة الثالثة من الفصل الدراسي الثاني المجال الكهربائي والجهد الكهربائي. سوف ندرس قانون كولوم التي لحساب القوّة الكهروستاتيكيّة بين أي جسمين مشحونين بشحنة كهربائيّة. سوف نعرّف بعدها الجهد الكهربائي لشحنة نقطيّة ونقرأ خطوط تساوي الجهد لنحدّد خصائصه.

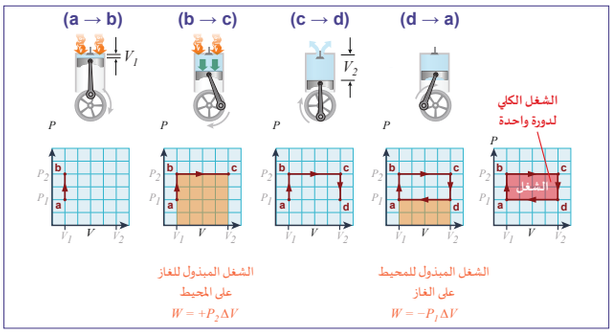
أخيرًا، سوف نتعرّف أسباب تشكّل المجال الكهربائي المنتظم وتأثيره في الأجسام المشحونة وسوف نقارن المجال الكهربائي بمجال الجاذبيّة.

تركّز الوحدة الرابعة من هذا الفصل على تأثير تغيّرات الضغط في كثير من خصائص الموائع مثل معدّل التّدفّق والكثافة. سوف نتعرّف فيها معادلة برنولي التي تربط بين الضغط والكثافة والسرعة ونرسم خطوط تدفّق المائع المتحرّك على العديد من الأجسام مثل الطائرات والسيّارات. سوف ندرس أيضًا قانون الغاز المثالي مع بعض تطبيقاته في الحياة اليوميّة.



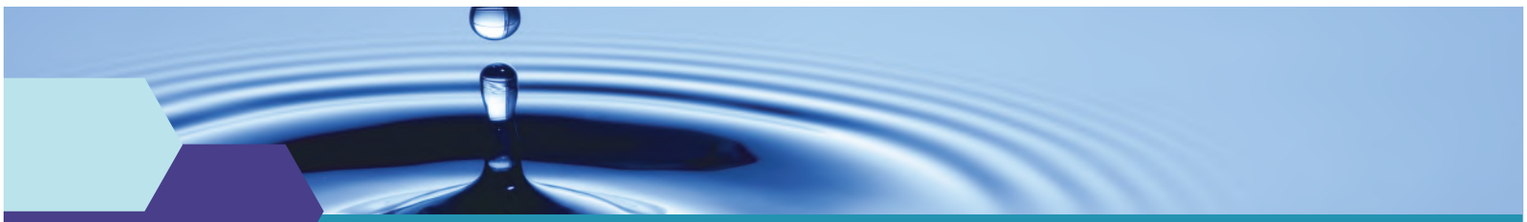
خطوط انسياب الهواء حول سيارة (a) وحول شاحنة (b).

تتناول الوحدة الخامسة موضوع الديناميكا الحرارية. تدرس الديناميكا الحرارية انتقال الطاقة الحرارية وتَغيّر المادة. يعمل محرك سيارتك وفق قوانين الديناميكا الحرارية، حيث يتمدد الغاز الساخن ويدفع الصمامات إلى أعلى وإلى أسفل لبذل شغل مفيد.



حساب الشغل المبذول في دورة ديناميكية حرارية.

تركّز الوحدة السادسة من هذا الفصل على التجارب والظواهر التي أدت اكتشاف البنية الداخليّة للذرة مثل ظاهرتي أطياف الانبعاث والامتصاص والتأثير الكهروضوئي ، وكذلك على الاكتشافات التي أدت إلى نظرية الكم الحديثة وفي الأخير نتطرق إلى تطبيقات الأشعة السينية.



بعض أقسام هذا الكتاب

الرّسوم التّوضيحيّة

مفاهيم مهمّة وبيانات وأمثلة على كل فكرة جديدة معروضة من خلال الإيضاحات المُفصَّلة والشروحات

أسئلة للمناقشة

صف كيف يتم تبادل كل من الطاقة والمادة مع المحيط في الشكل a3-5

عندما تغلي الماء في وعاء على موقد، فإن درجة حرارته تصل إلى 100°C بشكل أسرع عندما يكون الوعاء مزوّد بغطاء. اشرح سبب ذلك.

أسئلة المناقشة تزوّد طلّاب الصفّ بفرصة مناقشة المفاهيم والمعلومات.

شريط الأفكار المهمّة

التغيير في الطاقة الداخلية للنظام هو الحرارة المضافة أو المفقودة من النظام، بالإضافة إلى الشغل المبذول على النظام أو بوساطته.

تحديد النقاط الرّئيسة وتذكُّرها.

العلاقات والمعادلات

مُثلِّت علاقات الكمّيات الفيزيائيّة من خلال المُتغيّرات ووحدات قياسها بشكل واضح.

8-5 القانون الأول للديناميكا الحرارية

$$\Delta U = Q - P\Delta V$$

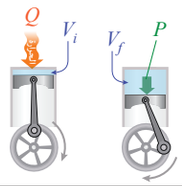
U	الطاقة الداخلية للنظام (J)	
Q	الحرارة المفقودة أو المكتسبة (J)	
P	الضغط (Pa)	
V	الحجم (m^3)	

الأمثلة

تُظهر الأمثلة جميع خطوات الحلّ والتفسير للحصول على حسابات صحيحة.

مثال 7

تُضاف كمية حرارة Q إلى غاز مثالي في أسطوانة مساحة مقطعها A. يرتفع المكبس للحفاظ على ضغط ثابت. اكتب معادلة التغيّر في الطاقة الداخلية ΔU بدلالة الضغط P والتغيّر في الحجم $\Delta V = V_f - V_i$



العلاقات:

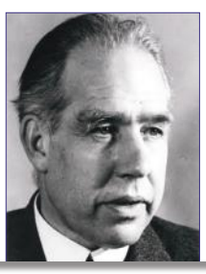
$$\Delta U = Q - P\Delta V, \quad PV = nRT, \quad U = \frac{3}{2}nRT$$

العلم والعلماء

تمّ تطوير معارفنا العلميّة على مدى أكثر من ثلاثة آلاف عام. تُطلعُنا هذه المقالات على إلهام الإنسان وتبصُّرِه في التعامُل مع العلم والتكنولوجيا.

ضوء على العلماء

نيلز بور: 1885-1962



كان نيلز بور فيزيائيًا هولنديًا فاز بجائزة نوبل في العام 1922 تقديرًا لأبحاثه في بنية الذرة. كان لبور الفضل الأساس في التأسيس لما نفهمه عن الذرات ونظرية الكم اليوم. ولد نيلز بور في كوبنهاجن، الدنمارك في أكتوبر 1885. كان والد بور أستاذًا مشهورًا في علم وظائف الأعضاء.

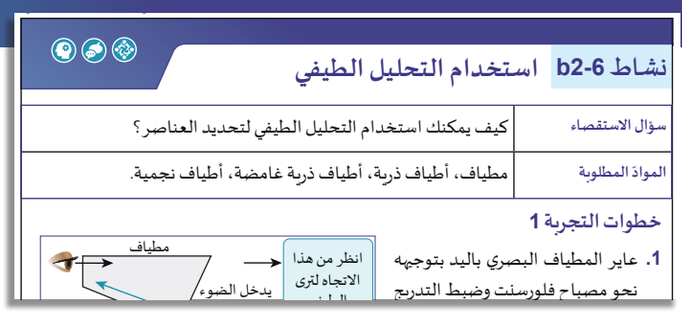
على الرغم من أن عائلة بور أعطت الأولوية للتعليم، إلا أنها كانت متحمّسة لكرة القدم. لعب بور وشقيقه الأصغر

الفيزياء

الأنشطة والمراجعة والتّقويم

الأنشطة

التدرُّب العملي من خلال المُختبر والمشاريع البحثيّة وسواهما من الأنشطة التي تُرسّخ معاني الأفكار الجديدة وتطوُّر العمل المخبري.



نشاط b2-6 استخدام التحليل الطيفي

سؤال الاستقصاء	كيف يمكنك استخدام التحليل الطيفي لتحديد العناصر؟
الموادّ المطلوبة	مطياف، أطياف ذرية، أطياف ذرية غامضة، أطياف نجمية.

خطوات التجربة 1

1. عاير المطياف البصري باليد بتوجيهه نحو مصباح فلورسنت وضبط التدريج

تقويم الدّرس

يتميّز كل درس بعرض يحتوي على الأسئلة التي تُغطّي جميع المفاهيم والمعلومات في هذا الدرس.

الدرس 5-2: قوانين الديناميكا الحرارية

تقويم الدرس 5-2

1. يريد طالب أن يصنع آلة لها عجلة لا تتوقّف عن الدوران. هو يدّعي أنها ستنجح لأن الطاقة محفوظة. هل هو على صواب؟ استخدم القانون الأول للديناميكا الحرارية للتوضيح.
2. a. الطاقة الداخلية الابتدائية لغاز هي 200 J. عند إضافة 80 J من الحرارة إلى الغاز، يقوم الغاز ببذل 70 J من الشغل. احسب الطاقة الداخلية النهائية للغاز.
   b. أترتفع درجة حرارة النظام أم تنخفض؟ اشرح إجابتك.

مراجعة الوحدة

ملخّص قصير عند نهاية كل وحدة، وهو مرجع سريع للأفكار والمُصطلحات الرئيسية.

الوحدة 5

مراجعة الوحدة

الدرس 5-1: خصائص النظام الديناميكي الحراري

- من المهم تحديد حدود **النظام الديناميكي الحراري** قبل حلّ االسؤال.
- عندما لا تُضاف حرارة إلى النظام أو تتسرَّب منه، فإن المحتوى سيصل إلى **اتزان حراري**.

تقويم الوحدة

زوّدت كل وحدة بمجموعة من الأسئلة اختيار من متعدد كعينة تحضّر الطالب لاختبار نموذجي.

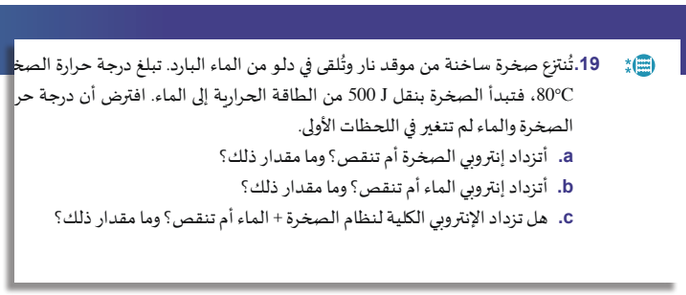
تقويم الوحدة

اختيار من مُتعدِّد

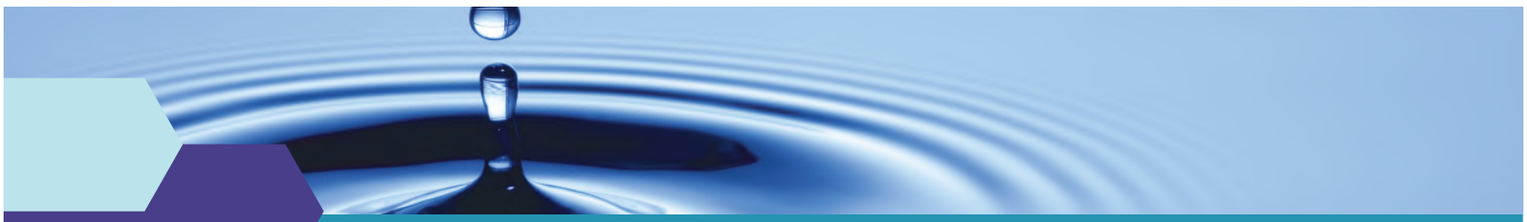
1. شحنتان كهربائيتان وضعتا في الفراغ على مسافة معينة من بعضهما. كيف تتغير إذا مُلئ الفراغ بينهما بمادة ذات سماحية كهربائية أعلى؟
   a. القوة تزداد

تقويم الوحدة

أسئلة الإجابة القصيرة وأسئلة الإجابة المطوّلة بُنيتا على مُستويات ثلاثة من الصعوبة في نهاية كل وحدة.



19. تُنتزع صخرة ساخنة من موقد نار وتُلقى في دلو من الماء البارد. تبلغ درجة حرارة الصخ 80°C، فتبدأ الصخرة بنقل 500 J من الطاقة الحرارية إلى الماء. افترض أن درجة حر الصخرة والماء لم تتغير في اللحظات الأولى.
   a. أتزداد إنتروبي الصخرة أم تنقص؟ وما مقدار ذلك؟
   b. أتزداد إنتروبي الماء أم تنقص؟ وما مقدار ذلك؟
   c. هل تزداد الإنتروبي الكلية لنظام الصخرة + الماء أم تنقص؟ وما مقدار ذلك؟



مخطّط المادّة

الوحدة 3 المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

يلتصق البالون المدلوك بقطعة من القماش على الحائط. يلتصق شعرك أيضاً إذا سرّحته في يومٍ جاف وتشعر ب" الصعقة" عندما تلمس مقبض باب بعد المشي على السجادة حافي القدمين.لماذا؟ هذه كلها أمثلة على الكهروستاتيكية (الكهرباء الساكنة).

للمجالات الكهربائيّة تطبيقات عديدة سمحت لنا بتطوير عدد كبير من الأجهزة المفيدة، مثل طابعات الليزر و طابعات الحبر النفاث ومرسّبات الدّخان في مجال الطبّ أيضاً يمكن أن يساعد تطبيق مجال كهربائي على موقع جرح في شفائه كما يتم استخدام المجالات الكهربائية لتحفيز العضلات وتخفيف الألم العضلي.

الوحدة 4 سلوك الموائع

عندما تغلق جزءًا من فوهة خرطوم ماء بالإبهام، فإن الماء يخرج من الجزء المفتوح بشكل أسرع ويؤدي إغلاق فوهة الخرطوم جزئيًا إلى زيادة الضغط في الخرطوم. يحدث التأثير المماثل لهذا في الجسم عندما يضخّ القلب الدّم. يسمح الضغط الناتج عن عمليّة الضخّ بدفع الدّم من الشرايين (المساحة الأكبر) إلى الشعيرات الدمويّة (المساحة الأصغر) ليستطيع المرور عبرها.

تعمل القوى في الموائع من خلال الضغط. سنرى في هذه الوحدة أن قوانين حفظ الطاقة وقوانين نيوتن لها أشكال جديدة في الموائع.

الوحدة 5 أساسيات الديناميكا الحرارية

الديناميكا الحرارية هي دراسة الحرارة والشغل وكيفية تحول كل منهما من وإلى أنواع أخرى من الطاقة. يدل التعبير "حراري" على درجة الحرارة والتعبير "ديناميكا" على الحركة. يتغير كل من درجة حرارة وضغط وحجم النظام الديناميكي الحراري مع مرور الزمن. وأحد الأمثلة الجيدة على ذلك هو محرك الاحتراق الداخلي في السيارة. يتطلب تصميم محرك ذي كفاءة أفضل فهمًا شاملاً للديناميكا الحرارية.

الوحدة 6 فيزياء الكم

لقد كان اكتشاف البنية الداخليّة للذرة نتيجة رائعة لسلسلة من التجارب الذكية والتفكير الدقيق. أتت بعض الأدلة لإيضاح هذا الغموض من ظاهرتي أطياف الانبعاث و الامتصاص والتأثير الكهروضوئي. تتابع هذه الوحدة التجارب الهامة والاكتشافات التي أدت إلى نظرية الكم الحديثة. تُختتم الوحدة بنظرة عامة على علوم وتكنولوجيا الأشعة السينية.

جدول المحتويات

الوحدة 3
المجال الكهربائي والجهد الكهربائي 2
الدرس 3-1 قانون كولوم 4
الدرس 3-2 المجال الكهربائي والجهد الكهربائي 14
الدرس 3-3 المجال الكهربائي المنتظم 32

الوحدة 4
سلوك الموائع 48
الدرس4-1 ديناميكا الموائع 50
الدرس 4-2 الغاز المثالي 64

الوحدة 5
أساسيات الديناميكا الحرارية 92
الدرس 5-1 خصائص النظام الديناميكي الحراري 94
الدرس 5-2 قوانين الديناميكا الحرارية 110
الدرس 5-3 المُحرّكات الحراريّة 123

الوحدة 6
فيزياء الكم 142
الدرس 6-1 نظرية الكم والطبيعة المزدوجة للضوء 144
الدرس 6-2 مستويات الطاقة والأطياف الذرية 160
الدرس 6-3 الأشعة السينية وطيف الأشعة السينية 184

الوحدة 3

المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

Electric Field and Electric Potential

في هذه الوحدة

الدرس 3-1: قانون كولوم

الدرس 3-2: المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

الدرس 3-3: المجال الكهربائي المنتظم

P1205
P1206

الوحدة 3

مقدّمة الوحدة

عندما يوضع بالون مدلوك بقطعة من القماش على حائط، فإنه سيلتصق بالحائط. عندما تسرّح شعرك بمشط في يوم جاف، فإن شعرك سيلتصق بالمشط. اذا كنت تمشى على سجّادة ولمست المقبض المعدني للباب، فقد تحس بصدمة كهربائية. هذه كلها أمثلة على الكهروستاتيكية (الكهرباء الساكنة)، والتي تنتج عن تراكم الشحنات الكهربائية على الجسم.

تولّد الأجسام المشحونة مجالًا كهربائيًا ينتشر حولها ويؤثر بقوة في الجسيمات المشحونة الأخرى وفي الأجسام المشحونة القريبة. سمحت لنا دراسة الجسيمات المشحونة والمجالات الكهربائية بتطوير عدد كبير من الأجهزة المفيدة، مثل مرسّبات الدخان، و طابعات الليزر وطابعات الحبر النفاث. تطبّق المجالات الكهربائية في تخصصات عديدة مثل الأحياء والطب، حيث يمكن أن يساعد تطبيق مجال كهربائي على موقع جرح في شفائه. يتم استخدام المجالات الكهربائية أيضًا لتحفيز العضلات وتخفيف الألم العضلي.

الأنشطة والتجارب

1-3 الكهرباء الساكنة على شريط شفاف

2-3 رسم خريطة لمجال كهربائي

الدرس 3-1
قانون كولوم
Coulomb's Law

الشكل 3-1 كرة بلازما.

ميزة رائعة في متحف بوسطن للعلوم بولاية ماساتشوستس الامريكية، تمنح المشاهدين نظرة فاحصة على الطاقة أثناء عملها. ينتصب عمودان بارتفاع 13 m تعلوهما قبة ضخمة من الألومنيوم المجوف تومض وهجًا مخيفًا، يصاحبه صوت أزيز الشرارات الذي يشبه أعمدة البرق في الطبيعة.

هذه الآلة الضخمة هي أكبر مولد فان دي جراف Van de Graff في العالم، معزول بالهواء. يولد الكهرباء الساكنة، باستخدام ملفات تسلا، وأحزمة داخلية تنقل الشحنة المتولدة بفعل الاحتكاك إلى أعلى البرج حتى يبلغ متوسط جهده الكهربائي حوالي مليوني فولت. يكفي هذا الجهد إلى إحداث البرق أو تسريع الجسيمات.

أسس هذا الصرح العلمي العملاق أستاذ الكهرباء في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، الدكتور روبرت فان دي جراف Dr. Robert J. Van de Graff. عندما بنى هذا المولد في ثلاثينيات القرن الماضي لمساعدة العقول الشابة من طلاب العلم لدراسة الفيزياء، كالأشعة السينية عالية الطاقة، وتحطيم الذرة، وتسريع الجسيمات الذرية المشحونة. إضافة إلى المتعة العلمية لزوار المتحف.

مخرجات التّعلُّم

P1206.1 يذكر نص قانون كولوم المتعلق بالقوة (القوى) بين جسمين نقطيين مشحونين أو أكثر في الهواء ويطبقه، ويستخدم المعادلة:

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

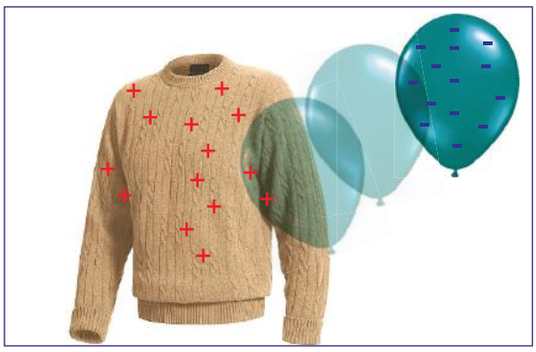
المفردات

Electrostatics	كهرباء ساكنة
Electric charge	شحنة كهربائية
Electrically neutral	متعادل كهربائيًا
Electric force	قوة كهربائية
Electrostatic induction	حث كهربائي ساكن
Electroscope	كشّاف كهربائي
Coulomb's Law	قانون كولوم

الكهرباء الساكنة

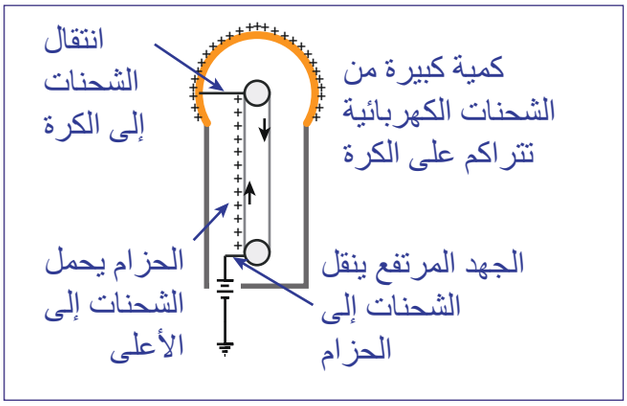
عندما تقوم بدلك بالون بسترة صوفية، فسوف يجذب البالون شعرك اذا قربته من رأسك. أثناء الدلك بالسترة تنقل بعض الشحنات السالبة من السترة الصوفية إلى البالون. البالون لديه الآن كمية زائدة من الشحنة السالبة والسترة لديها كمية زائدة من الشحنة الموجبة والشحنتان متساويتان في المقدار (**الشكل 3-2**).

كمية الشحنات الكهربائية التي يمكنك جمعها على البالون تكون قليلة نسبيًا. لإنتاج شحنة ساكنة كبيرة، يمكن استخدام مولّد فان دي جراف. يؤدي وضع مصدر طاقة عالي الجهد داخل مولد فان دي جراف إلى توليد شحنة كهربائية على حزام عازل متحرك (**الشكل 3-3**). عندما يصل الحزام إلى القمة، يتم نقل الشحنة بواسطة موصل إلى السطح الخارجي لكرة معدنية موصلة. يمكن لجهد كرة فان دي جراف أن يصل إلى ملايين الفولتات. إلا أن الصدمة الكهربائية للجهد العالي لمولّد فان دي جراف لا تملك تيارًا كهربائيًا يكفي ليسبّب الأذى لمن يلمسه.



الشكل 3-2 يؤدي الدّلك إلى انتقال الشحنات السالبة من الصوف إلى البالون.

تشعر بـ"الصعقة" عندما تلمس مقبض باب بعد المشي على السجادة حافي القدمين. لماذا؟

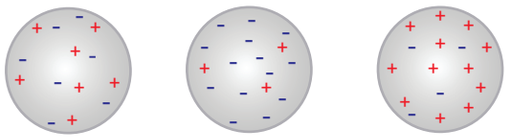


الشكل 3-3 كيفية عمل مولد فان دي جراف.

مراجعة حول الشحنات الكهربائية

لدينا نوعان من **الشحنات الكهربائية Electric charges**: الأولى تُسمّى الشحنة الموجبة (+) والثانية تُسمّى الشحنة السالبة (-). وحدة قياس الشحنات هي الكولوم (C). ذرات كل المواد تحتوي على شحنات لأنها جزء مهمّ من مكونات الذرة. الإلكترونات تملك شحنة سالبة أمّا البروتونات فتملك شحنة موجبة ولها المقدار نفسه. تُعدّ معظم المواد **متعادلة كهربائيًّا Electrically neutral** لأن شحنتها الكهربائية الكلية تساوي صفر، لأن عدد الإلكترونات في الذرة يساوي عدد البروتونات.

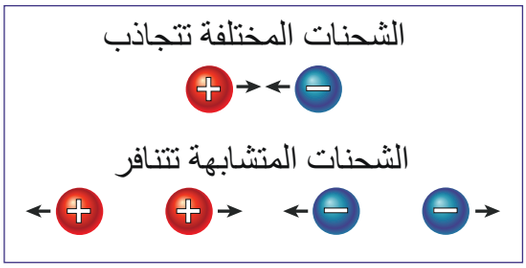
	الشحنة	الكتلة
بروتون	$+1.602\times10^{-19}\,C$	$1.673\times10^{-27}\,kg$
نيوترون	0	$1.675\times10^{-27}\,kg$
إلكترون	$-1.602\times10^{-19}\,C$	$9.11\times10^{-31}\,kg$



الشكل 3-4 بعض خصائص مكونات الذرة.

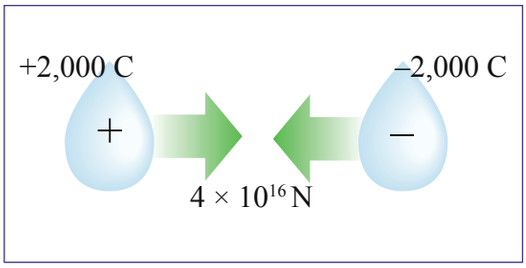
الشحنة الكهربائية الكلية للمادة تساوي الفرق بين الشحنة الموجبة والشحنة السالبة، **الشكل 3-4** يوضح الشحنة الكلية السالبة والموجبة والمتعادلة كهربائيًا.

الشحنة الموجبة تتنافر مع الشحنة الموجبة وتتجاذب مع الشحنة السالبة، أمّا الشحنة السالبة فتتنافر مع الشحنة السالبة وتتجاذب مع الشحنة الموجبة. الجسم المتعادل كهربائيًا لا يتأثر بقوى كهربائية مع الشحنات الموجبة والسالبة (**الشكل 3-5**).



الشكل 3-5 تجاذب الشحنات وتنافرها.

- **القوة الكهربائية Electric force** بين الشحنات قوية للغاية.
- القوة الكهربائية تجعل الذرات والجزيئات متماسكة.
- تبلغ القوى الكهربائية من الشّدة ما يجعل فصل الشحنات السالبة عن الموجبة خارج الذرة أمرًا نادرًا. لذلك يصعب قياس هذه القوى بشكل مباشر.



الشكل 3-6 القوة بين الشحنات في قطرة ماء.

تخيل لو أننا تمكنا من تجميع كمية من الإلكترونات معًا بحجم قطرة الماء، فتصبح شحنتها (-2000 C)، وتجميع كمية مماثلة من البروتونات معًا، بالحجم نفسه فتصبح شحنتها (+2000 C)، ثم وضعنا الكميتين على مسافة (1m) من بعضهما، كما في **الشكل (3-6)**. لنشأت بينهما قوة تجاذب كهربائي هائلة مقدارها (4×10^{16} N).

قانون كولوم

توجد قوة كهروستاتيكية بين أي جسمين مشحونين بشحنة كهربائية. الوصف الكمي للقوة الكهروستاتيكية يُسمّى **قانون كولوم Coulomb's Law** وهو الذي يُعطى في **المعادلة 3-1**. ينص قانون كولوم على أن القوّة الكهروستاتيكية بين شحنتين كهربائيّتين نقطيتين تتناسب طرديًا مع حاصل ضرب مقدار الشحنتين وعكسيًا مع مربع المسافة بينهما. في الفراغ يكون ثابت كولوم:

$$k = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$$

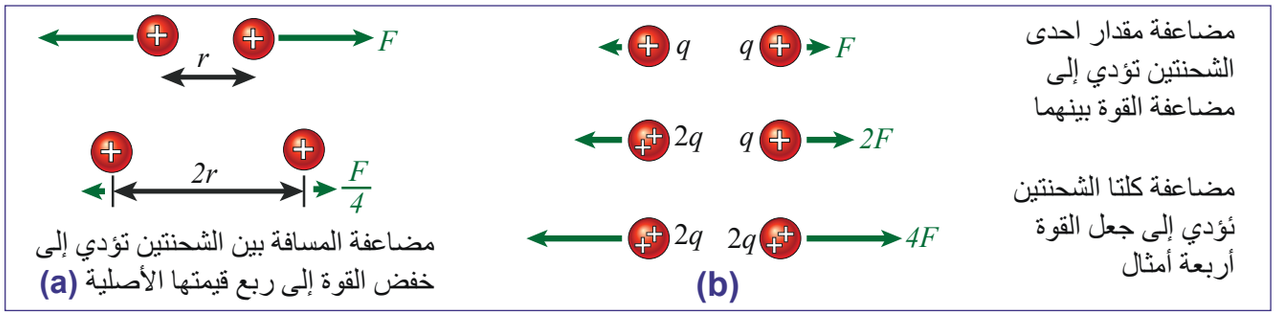
1-3 قانون كولوم

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

F	القوة الكهروستاتيكية (N)
k	ثابت كولوم 9×10^9 (Nm^2/C^2)
q_1	شحنة الجسم 1 (C)
q_2	شحنة الجسم 2 (C)
r	المسافة بين الجسمين (m)

القوة الكهروستاتيكية تعرف أيضًا بالقوة الكهربائية.

تخضع القوة الكهربائية لقانون التربيع العكسي، مثل قوة الجاذبية. إذا تمت زيادة المسافة بين جسمين مشحونين إلى ضعف قيمتها الأصلية، فإنَّ القوة الكهربائية تنخفض إلى ربع قيمتها الأصلية. (**الشكل3-7 (a)**).



الشكل 3-7 تأثير الشحنة (b) والمسافة (a).

تعتمد القوة الكهربائية بين جسمين مشحونين على حاصل ضرب مقدار الشحنتين. إذا تضاعفت الشحنة q_1، تتضاعف القوة الكهربائية. وإذا تضاعفت الشحنة q_2 أيضًا، فإن القوة تتضاعف مرة أخرى وتصبح أربعة أمثال قيمتها الأولى (**الشكل3-7 (b)**). إذا كانت شحنة أحد الجسمين صفرًا، فإنَّ q_1 أو q_2 تكون صفرًا، وتكون القوة في **المعادلة (3-1)** صفرًا.

2-3 ثابت كولوم

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon}$$

k	ثابت كولوم (Nm^2/C^2)
ε	السماحية الكهربائية (F/m) أو (C^2/Nm^2)

ثابت كولوم k في **المعادلة 3-1** يعتمد على خصائص المادة التي تمر بها القوى. تحدد خصائص المواد بالسماحية الكهربائية ε والتي تختلف بين مادة وأخرى (**المعادلة 2-3**).

ابحث واشرح سبب اختلاف السماحية الكهربائية بين مادة وأخرى.

السماحية الكهربائية

السماحية الكهربائية لوسط معيّن تُعرّف بأنها قياس لمدى قدرة المادة أو الوسط على تركيز خطوط المجال الكهروستاتيكي. وهي تساوي حاصل ضرب السماحية النسبية للوسط بسماحية (الفراغ) وقيمتها $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m . السماحية النسبية تسمى أيضًا بثابت عزل الوسط. يشتمل **الجدول 3-1** على ثابت العزل لبعض المواد .

3-3	السماحية النسبية		
	$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$	ε	السماحية الكهربائية (F/m)
		ε_r	السماحية النسبية
		ε_0	سماحية الفراغ (8.85×10^{-12} F/m)

الجدول 3-1 السماحية النسبية (ثابت العزل) لبعض المواد.

الفراغ	$\varepsilon_r = 1.000$
الهواء الجاف	$\varepsilon_r = 1.006$
الورق	$\varepsilon_r = 2.5\text{-}3.5$
التفلون	$\varepsilon_r = 2.0$
الجرافيت	$\varepsilon_r = 12$
الماء	$\varepsilon_r = \sim 80$

مثال 1

شحنتان $+1\ \mu C$ و $-1\ \mu C$ المسافة بينهما 1 cm في الفراغ. ما قيمة القوة بينهما؟ وما نوعها؟

المطلوب: القوة F

المُعطيات: $r = 1$ cm $\quad q_1 = -1\ \mu C \quad q_2 = +1\ \mu C$

العلاقات: $$F = \frac{k q_1 q_2}{r^2}$$

الحل:

المسافة بين الشحنتين

$1\ \text{cm} = 0.01\ \text{m}$

باستخدام قانون كولوم، نحصل على:

$$F = \frac{k q_1 q_2}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9)(1 \times 10^{-6})(1 \times 10^{-6})}{(0.01)^2} = \boxed{90\ \text{N}}$$

القوة بين الشحنتين هي قوة تجاذب.

مثال 2

كرتان مشحونتان، تقع إحداهما على مسافة r من الأخرى في الفراغ، وتتأثر كلتاهما بقوة تنافر مقدارها 90 N. كم يجب أن تكون المسافة بينهما بحيث تنخفض قوة التنافر إلى 10 N؟

المطلوب: المسافة بين الكرتين r

المُعطيات: $F_1 = 90\ \text{N};$

$F_2 = 10\ \text{N};$

العلاقات: $F \alpha \frac{1}{r^2}$

الحل: تتناسب قوة التنافر تناسبًا عكسيًا مع مربع المسافة بين الشحنتين. القوة ستتناقص بمعدل $\frac{1}{9}$:

$$F_2 = 10\ \text{N} \propto \frac{1}{r_2^2} \quad \text{و} \quad F_1 = 90\ \text{N} \propto \frac{1}{r_1^2}$$

$$\text{ما يعني أن:} \quad \frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{90}{10} = 9 \longrightarrow \frac{r_2}{r_1} = 3$$

لكي تنخفض القوة إلى $\frac{1}{9}$ قيمتها الأصلية فإنَّ المسافة بين الشحنتين يجب أن تزداد الى ثلاثة أمثال قيمتها الأصلية.

مثال 3

مقدار القوة الكهربائية في الفراغ بين شحنتين كهربائيتين 10 N. كم سيصبح مقدار هذه القوة إذا وضعت الشحنتان في مادة الجرافيت وتضاعفت المسافة بينهما؟ علمًا بأن السماحية النسبية للجرافيت هي 12.

المطلوب: مقدار القوة F_2 بين الشحنتين.

المُعطيات: مقدار القوة بين الشحنتين في الفراغ $F_1 = 10\ \text{N}$

السماحية الكهربائية للجرافيت $12\ \varepsilon_o$

المسافة بين الشحنتين $r_2 = 2r$

العلاقات: $F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$

الحل: نعلم أن مقدار القوة بين الشحنتين هو 10 N

$$F_1 = \frac{kq_1q_2}{r^2} = 10\ \text{N}$$

ولحساب مقدار القوة في الجرافيت:

$$F_2 = \frac{1}{12}\frac{kq_1q_2}{(2r)^2} = \frac{1}{12\times 4}\frac{kq_1q_2}{r^2} = \frac{1}{48}\frac{kq_1q_2}{r^2} = \frac{1}{48} \times F_1 = \frac{10}{48}$$

$$F_2 = 0.208\ \text{N}$$

مثال 4

وضعت شحنتان كهربائيتان موجبتان $q_1 = 2\ \mu C$ و $q_2 = 8\ \mu C$ على خط مستقيم وعلى مسافة 3 cm بينهما. ووضعت شحنة كهربائية ثالثة q على الخط نفسه بينهما بحيث تكون محصلة القوة الكهربائية عليها صفرًا. احسب المسافة بين q و q_1.

المطلوب: المسافة بين q و q_1، $x = ?$

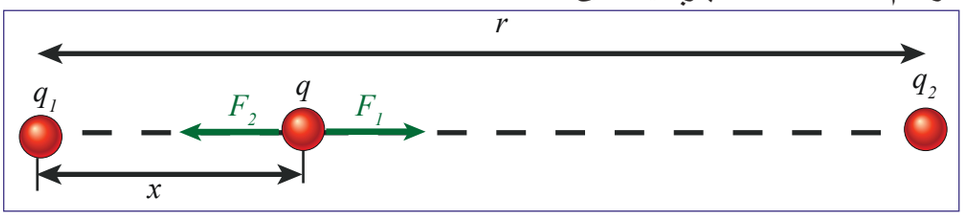
المُعطيات: الشحنة $q_1 = 2\ \mu C$;

الشحنة $q_2 = 8\ \mu C$;

المسافة بين الشحنتين q_1 و q_2: $r = 3\ cm$

العلاقات:
$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

الحل: نرسم الشحنات الكهربائية على الخط.



نسمي المسافة بين الشحنتين q_1 و q، x

القوة التي تتأثر بها الشحنة q نتيجة للشحنة q_1
$$F_1 = \frac{kqq_1}{x^2}$$
القوة التي تتأثر بها الشحنة q نتيجة للشحنة q_2
$$F_2 = \frac{kqq_2}{(r-x)^2}$$
تكون محصلة القوة على q صفرًا عندما تكون $F_1 = F_2$

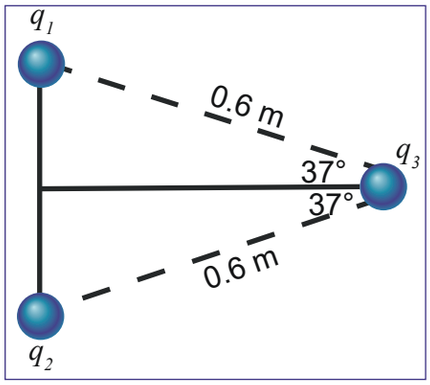
$$F_1 = F_2 \Rightarrow \frac{kqq_1}{x^2} = \frac{kqq_2}{(r-x)^2} \Rightarrow \frac{2}{x^2} = \frac{8}{(r-x)^2}$$

$$2(r-x)^2 = 8x^2 \Rightarrow \sqrt{(r-x)^2} = \sqrt{4x^2}$$

$$r - x = 2x \Rightarrow x = \frac{r}{3} = 1\ cm$$

مثال 5

توضع ثلاث شحنات كهربائية كما في **الشكل 3-8** وقِيَمُها $q_1 = -3.5\ \mu C$ و $q_2 = -3.5\ \mu C$ و $q_3 = -5\ \mu C$. احسب مقدار القوة الكهربائية التي تؤثر في الشحنة q_3.



الشكل 3-8 ترتيب الشحنات.

المطلوب: مقدار القوة الكهربائية على الشحنة q_3.

المُعطيات:

مقدار الشحنة $q_1 = -3.5\ \mu C$;

مقدار الشحنة $q_2 = -3.5\ \mu C$;

مقدار الشحنة $q_3 = -5\ \mu C$;

المسافة بين الشحنتين q_1 و q_3: $r = 0.6\ m$

المسافة بين الشحنتين q_2 و q_3: $r = 0.6\ m$

العلاقات:

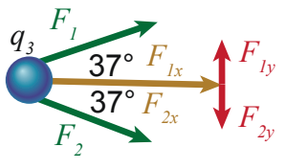
$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

الحل:

نحسب أولًا مقدار القوة التي تؤثر في q_3 نتيجة للشحنة q_1. وبما أن q_1 و q_2 لهما المقدار نفسه، فإن مقدار القوتين F_1 و F_2 على الشحنة q_3 لهما المقدار نفسه.

$$F_1 = \frac{kq_1q_3}{r^2} = \frac{(9\times10^9)(3.5\times10^{-6})(5\times10^{-6})}{(0.6)^2} = F_2 = 0.438\ N$$

لاحظ أننا لم نستخدم الإشارات السالبة للشحنات لأننا حسبنا مقدار كل من القوتين. الإشارتان السالبتان لأي شحنتين تدل على أن القوة بينهما قوة تنافر. يمكن رسم اتجاه محصلة القوتين المؤثرتين في الشحنة q_3 كما هو موضح في الشكل المجاور. للحصول على المحصلة، علينا معرفة مركبتيها x و y ثم جمعهما.



$$F_x = F_{1x} + F_{2x},\ Fy = F_{1y} - F_{2y}$$

F_{1y} و F_{2y} متساويتان في المقدار ومتعاكستان في الاتجاه، فيكون جمعهما صفرًا. F_{1x} و F_{2x} متساويتن أيضا في المقدار ولكن لهما الاتجاه نفسه. فيكون مقدار المحصلة:

$$F = 2F_{1x} = 2(0.438)\cos 37° = \boxed{0.7\ N}$$

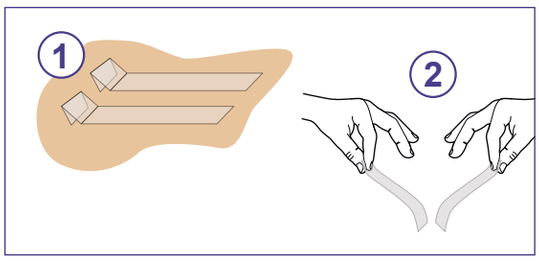
نشاط 3-1 الكهرباء الساكنة على شريط شفّاف

سؤال الاستقصاء	كيف يمكنك أن تتحقّق من وجود نوعين من الشحنات؟
الموادّ المطلوبة	شريط لاصق شفّاف.

خطوات التجربة

الجزء 1: شحن الشريط

1. خذ قطعتين من شريط لاصق شفّاف طول كل منهما 4 cm تقريبًا. اطوِ طرف واحد من كل من القطعتين لكي تمسك بهما كمقبض، كما في **الشكل 3-9**.



الشكل 3-9 ترتيب الشريطين.

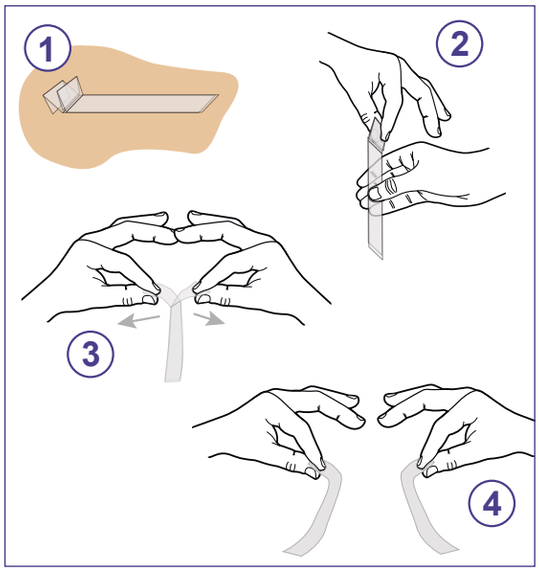
2. الصق قطعتي الشريط جنبًا إلى جنب على طاولة من دون أن تلمس إحداهما الأخرى. امسك بمقبضي الشريطين وارفعهما معًا بسرعة إلى الأعلى.
3. قرّب الشريطين أحدهما من الآخَر من دون أن تدعهما يتلامسان.

الأسئلة

a. ماذا يحدث عندما تقرّب أحد الشريطين من الآخَر (من دون أن يتلامسا)؟
b. ما الذي يمكنك استنتاجه عن أوجه التشابه أو الاختلاف بين الشحنات الكهربائية على الشريطين؟

الجزء 2: شحن الشريط بطريقة أخرى

1. خذ قطعتين من الشريط اللاصق الشفّاف. هذه المرة، الصق أحد الشريطين على الطاولة، ثم الصق الشريط الآخر فوقه. كما هو مبين في **الشكل 3-10**.



الشكل 3-10 (الجزء الثاني).

2. استخدم المقبض لسحب الشريطين معًا من على الطاولة. أدلك الشريط بأصابعك لإزالة أية شحنة موجودة.
3. افصل أحد الشريطين عن الآخر بواسطة المقبضين.

الأسئلة

ماذا يحدث عندما تقرّب أحد الشريطين من الآخر (من دون أن يتلامسا)؟

تقويم الدرس 3-1

1. ما أوجه التشابه و أوجه الاختلاف بين قانون كولوم و قانون الجاذبية لنيوتن؟

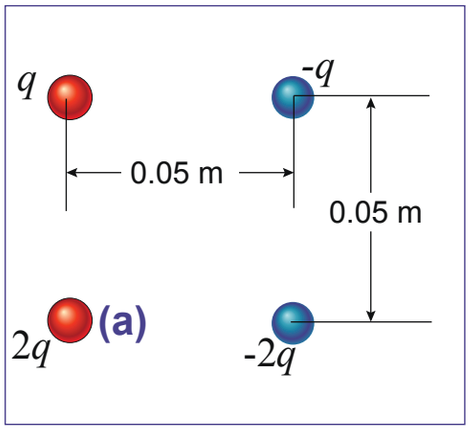
2. يوجد جسمان مشحونان يفصل بينهما متر واحد. احسب مقدار القوة الكهربائية بينهما واتجاهها إذا كانت قيم شحنة الجسمين كما يلي:
   a. +1 C و +1 C
   b. +1 C و -1 C
   c. -1 C و -1 C

3. إذا كانت المسافة بين شحنتين كهربائيتين متماثلتين 1 m وقوة التنافر الكهربائية بينهما 1 N، فكم يكون مقدار كل من الشحنتين؟

4. شحنتان، إحداهما موجبة والأخرى سالبة تفصل بينهما مسافة 25 cm وتتأثر كل منهما بقوة جذب مقدارها 5 N. ما مقدار القوة الكهربائية واتجاهها التي تؤثر في كل منهما عندما تصبح المسافة بينهما 50 cm؟

5. إذا كانت المسافة بين شحنتين كهربائيتين $q_1 = 3.5\ \mu C$ و $q_2 = -1.5\ \mu C$ في الفراغ هي 0.12 m، فكم يكون مقدار القوة الكهربائية بينهما؟

6. وُضِعَت أربع شحنات عند رؤوس مربع طول ضلعه 0.05 m كما في الشكل حيث $q = 1 \times 10^{-7}\ C$. احسب محصلة القوى الكهربائية على الشحنة $2q$ عند رأس المربع (a) السفلي إلى اليسار.



7. وُضِعَت شحنتان $1 \times 10^{-7}\ C$ و $+3 \times 10^{-7}\ C$ في مادة التفلون البلاستيكي، على مسافة 0.1 m من بعضهما البعض. احسب القوة الكهربائية بين الشحنتين (ملاحظة: استخدم الجدول 3-1)

8. تمت زيادة المسافة بين شحنتين كهربائيتين $+q$ و $-q$ من r إلى $3r$. بأي معامل يجب تغيير قيمة كل من الشحنتين معًا بحيث تبقى القوة الكهربائية بينهما هي ذاتها؟

الدرس 3-2

المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

Electric Field and Electric Potential

المفردات

مجال كهربائي	Electric field
خطوط المجال الكهربائي	Electric field lines
طاقة وضع كهربائية	Electric potential energy
جهد كهربائي	Electric potential
فرق جهد كهربائي	Electric potential difference
إلكترون فولت	Electron Volt
خطوط تساوي الجهد	Equipotential lines

إذا كنت في سيارة أثناء عاصفة رعدية، فما الذي يجب أن تفعله؟ على افتراض أن للسيارة جسمًا معدنيًا، فإن أكثر الأماكن أمنًا هو داخل السيارة السبب الذي جعل داخل السيارة المعدنية مكانًا آمنًا هو طبيعة المجالات الكهربائية والموصلات. جسم السيارة المعدني يُعدّ موصلًا جيّدًا للكهرباء يحمي مَن بِداخِلِها من المجالات الكهربائية الخارجية، بما في ذلك المجالات التي يسبّبها البرق.

الشكل 3-11 أكثر الأماكن أمنًا أثناء العاصفة الرعدية هو داخل السيارة.

مخرجات التّعلُّم

P1205.2 يعرّف الإلكترون فولت بأنه الشغل المبذول على إلكترون عند تسريعه بواسطة فرق جهد مقداره 1 فولت. ويتذكر أن: $1\ eV = 1.6 \times 10^{-19}\ J$

P1205.3 يحل مسائل حسابية تتعلق بطاقة الوضع الكهربائية وفرق الجهد الكهربائي.

P1206.2 يعرّف شدة المجال الكهربائي الناتج من جسيمات مشحونة كقوة كهروستاتيكية لكل وحدة شحنة، ويستخدم المعادلة: $E = \frac{kq}{r^2}$

P1206.3 يعرّف الجهد الكهربائي عند نقطة والناتج من جسيمات مشحونة من خلال المعادلة:

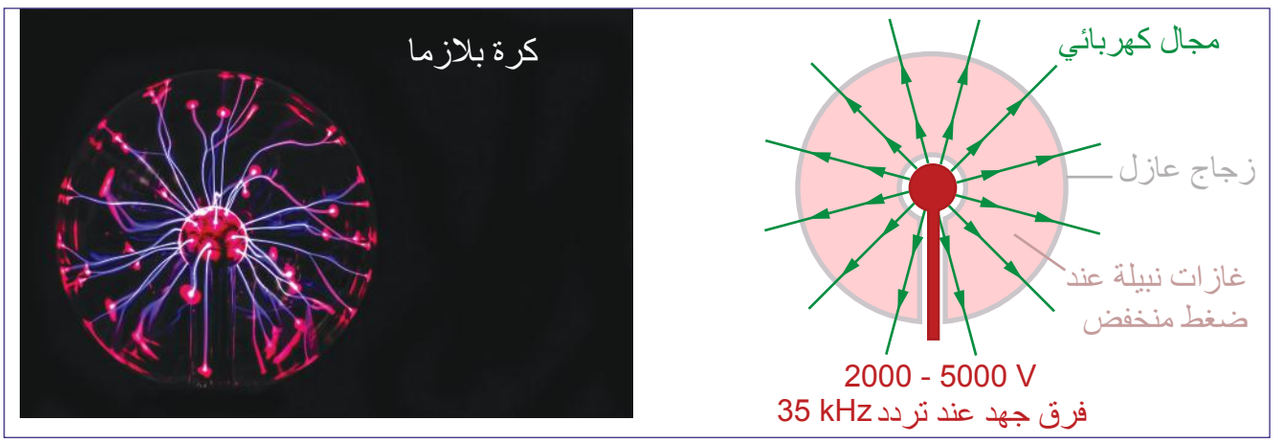
$$V = \frac{kq}{r}$$

تصور الكهرباء

كيف يمكننا ملاحظة الكمّيات غير المرئية، مثل المجال الكهربائي؟

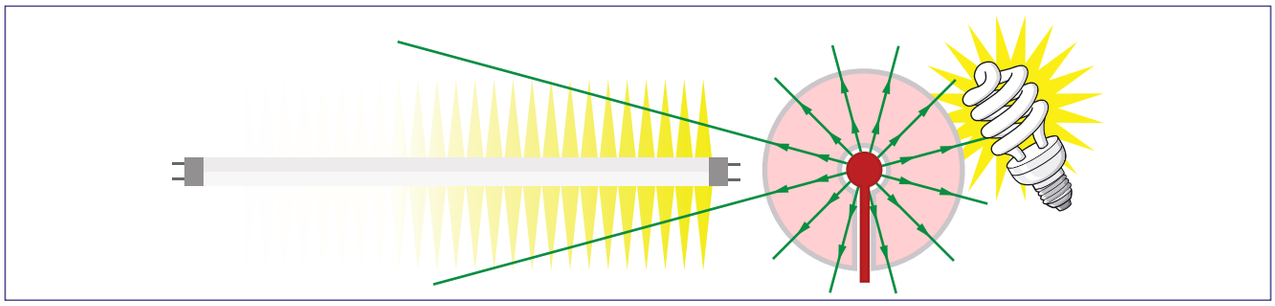
يمكن لبعض الحيوانات، مثل الأسماك الكهربائية وأسماك القرش استشعار الكهرباء مباشرة.

لا يستطيع البشر «رؤية» الكهرباء مباشرة. لذا، يجب استخدام وسائل و أجهزة معينة لجعل الكهرباء مرئية. كرة البلازما هي أداة ممتازة لرؤية المجالات الكهربائية. تُصنع كرة البلازما من زجاج عازل، وتحتوي على مزيج من الغازات النبيلة، مثل النيون والأرجون عند ضغط منخفض (**الشكل 3-12**).



الشكل 3-12 مُكوّنات كرة البلازما.

يوجد ملف كهربائي عالي الجهد في مركز كرة البلازما ينتج فرق جهد متردد يتراوح بين 2,000 V و 5,000 V تردده 35 kHz. يُنتِجُ ذلك مجالًا كهربائيًا يتجه شعاعيًا من المركز إلى الخارج. تتردد دورات المجال من الموجب إلى السالب 35,000 مرة في الثانية. تتأيَّن بعض الذرات في كل دورة وينطلق الضوء منها عندما تصطدم الإلكترونات بذرات الآرجون وتتسبّب في إصدار إلكترونات ضوئية. مقارنة بالجهد العالي داخل الكرة، فإن الهواء الموجود خارج كرة البلازما يتصل بالأرض. لذلك، تشكل البلازما شرارات ضوئية من المركز إلى الحافة. يؤدّي لمس كرة البلازما إلى اتصال أفضل بالأرض فتنتقل الشرارات إلى موضع إصبعك.



الشكل 3-13 المجال الكهربائي المنطلق إلى خارج زجاج كرة البلازما.

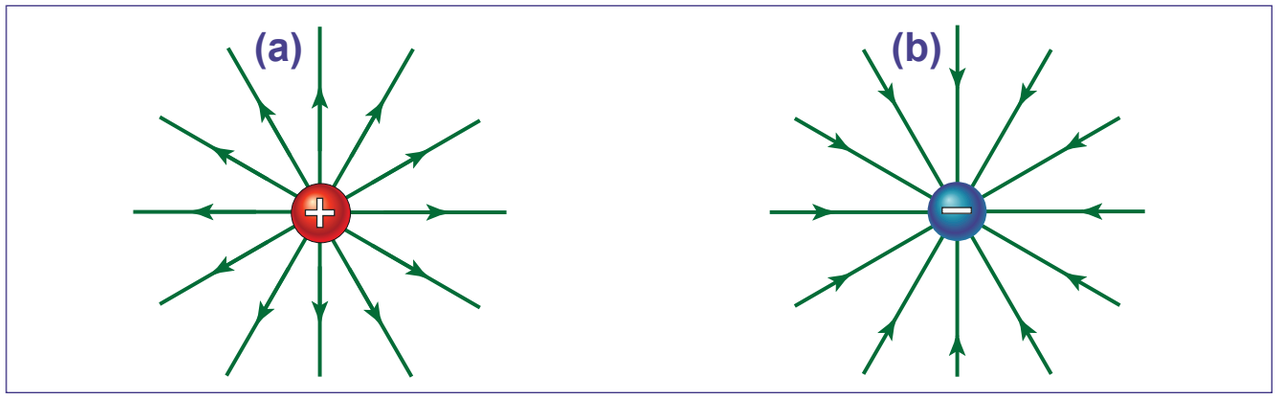
يتجه المجال الكهربائي الناتج عن كرة البلازما إلى ما هو أبعد من الزجاج الذي يحتوي على النيون والأرجون. إذا وضعت مصباح الفلورسنت المدمج بالقرب من كرة البلازما فإن المصباح سوف يضيء. ويضيء أيضًا أنبوب الفلورسنت الطولي عند طرفه الأقرب إلى كرة البلازما. أمّا الضوء الموجود عند أجزاء الأنبوب الأبعد عن الكرة فيضيء بشكل خافت لأن المجال الكهربائي يكون أضعف.

المجال الكهربائي

تنشئ كل شحنة مجالًا كهربائيًا حولها في الفراغ. يُعَرَّف **المجال الكهربائي Electric field** بأنّه خاصية كهربائية للمنطقة المحيطة بالشحنة الكهربائية والتي يظهر فيها تأثير القوة الكهربائية لهذه الشحنة في غيرها من الشحنات الأخرى. يمكنك أن تتصوَّر أن المجال الكهربائي يعمل كمنَظِّم للطاقة الكهربائية التي توزّع القوى الكهربائية بين الشحنات.

يمكن تمثيل المجال الكهربائي بمخططات تشبه تلك المستخدمة للمجال المغناطيسي. **خطوط المجال الكهربائي Electric field lines** تمثل القوى المؤثرة في وحدة شحنة موجبة اختبارية في كل الاتجاهات.

- يتجه المجال الكهربائي بعيدًا عن الشحنات الموجبة (**الشكل 3-14 (a)**).
- يتجه المجال الكهربائي نحو الشحنات السالبة (**الشكل 3-14 (b)**).
- تكون خطوط المجال الكهربائي متقاربة عندما يكون المجال أقوى ومتباعدة عندما يكون المجال أضعف.



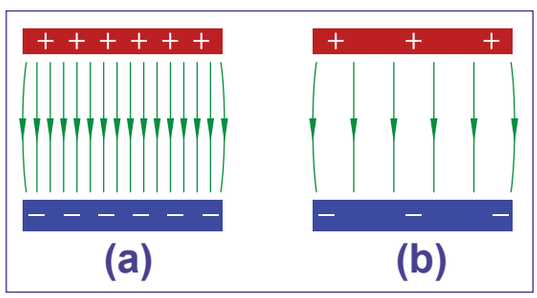
الشكل 3-14 اتجاه المجال الكهربائي يكون بعيدًا عن شحنة موجبة كما في (a) ونحو شحنة سالبة كما في (b).

اتجاه خطوط المجال الكهربائي هو اتجاه القوة المؤثرة في شحنة اختبار.

شحنة الاختبار هي شحنة موجبة وهمية نستخدمها لوصف القوة عند نقطة معينة. وعند رسم خطوط المجال الكهربائي لشحنة نقطية نفترض وجود شحنة اختبار موجبة في منطقة مجال الشحنة النقطية ونرسم مسار حركتها.

اتجاه المجال الكهربائي يكون نحو الشحنة السالبة وبعيدًا عن الشحنة الموجبة .

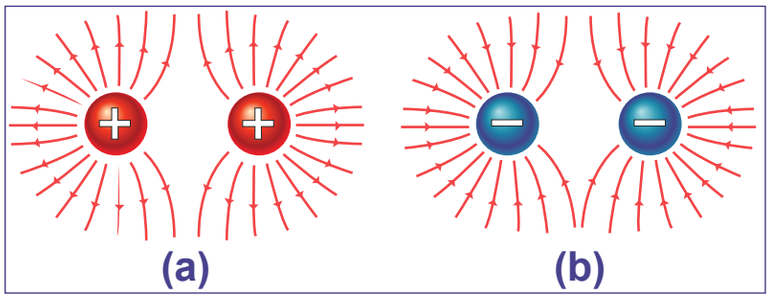
عندما نرسم خطوط المجال الكهربائي، فإن المسافة بين الخطوط تدل على مدى قوة هذا المجال. يظهر **الشكل 3-15 (a)** مثالًا على خطوط مجال كهربائي منتظم قوي، أمّا **الشكل 3-15 (b)** فيظهر مثالًا على خطوط مجال كهربائي منتظم ضعيف.



الشكل 3-15 مجال كهربائي قوي (a) وضعيف (b).

المجال الكهربائي بين شحنتين متشابهتين

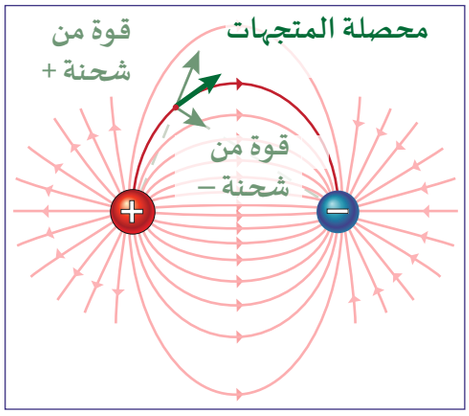
نتصوَّر المجال الكهربائي حول شحنتين نقطيتين، فنلاحظ أن شدة المجال الكهربائي E الناتج عند أي موقع من الفراغ هو القوة المؤثرة في شحنة اختبار موجبة افتراضية موجودة عند هذا الموقع. سيحدث التنافر بين شحنة الاختبار الموجبة وكلتا الشحنتين إذا كانتا موجبتين، وتتحرك الشحنة الاختبارية متبعة خطوط المجال.



الشكل 3-16 خطوط المجال الكهربائي لشحنتين موجبتين (a) ولشحنتين سالبتين (b).

التنافر بين الشحنات الموجبة يجعل خطوط المجال الكهربائي تتجه بعيدًا عن الشحنة كما في **الشكل 3-16 (a)**. الشحنة الموجبة الاختبارية تنجذب إلى كلتا الشحنتين السالبتين، فيكون اتجاه خطوط المجال الكهربائي نحو الشحنتين السالبتين كما في **الشكل 3-16 (b)**.

المجال الكهربائي لشحنة موجبة وشحنة سالبة

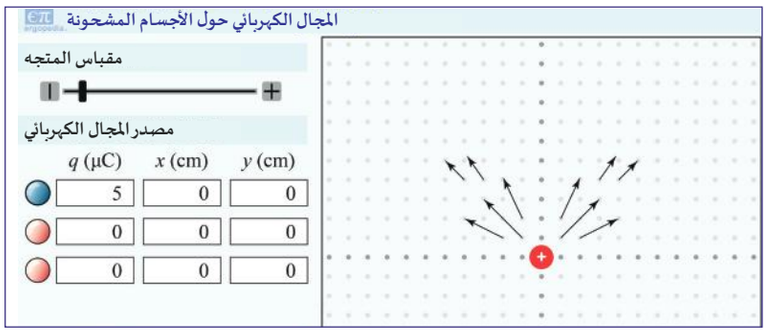


الشكل 3-17 المجال الكهربائي لشحنتين، إحداهما موجبة والأخرى سالبة.

محصلة القوى المؤثرة في شحنة اختبار موجبة عند أي موقع هو المجموع الاتجاهي لمحصلة القوى الفردية الناتجة عن كل شحنة في النظام. يكون اتجاه خطوط المجال بين شحنة موجبة وشحنة سالبة، من الشحنة الموجبة إلى الشحنة السالبة. وتكون محصلة المجال الكهربائي عند أية نقطة من الفراغ هي حاصل جمع متجهَيْ مجالَي الشحنتين السالبة والموجبة كما هو موضَّح في **الشكل 3-17**.

المجال الكهربائي حول الاجسام المشحونة

باستخدام المحاكاة، كيف يتغيّر المجال الكهربائي عندما تتضاعف المسافة بين الشحنتين؟ وكيف يتغيّر هذا المجال إذا أصبحت المسافة ثلاثة أمثال قيمتها الأصلية؟ (**الشكل 3-18**)



الشكل 3-18 المجال الكهربائي حول الأجسام المشحونة.

حساب شدّة المجال الكهربائي

شدة المجال الكهربائي هو كمية متجهة تحدد مقدار القوة الكهربائية المؤثرة في أية شحنة في الفراغ ويحدد اتجاهها. يتم الحصول على شدة المجال الكهربائي من خلال **المعادلة 4-3**.

4-3	شدة المجال الكهربائي		
$E = \frac{F}{q}$		E	شدّة المجال الكهربائي (N/C)
		F	القوة الكهربائية (N)
		q	الشحنة الكهربائية المتأثرة بالمجال (C)

تنص **المعادلة 4-3** على أن شدة المجال الكهربائي، E، عند نقطة في الفراغ هي القوة الكهربائية التي تؤثر في وحدة الشحنات الموجبة وتُحسب بقسمة القوة الكهربائية F على الشحنة q. عند تلك النقطة. وحدة قياس المجال الكهربائي E هي نيوتن لكل كولوم (N/C). هذا يعني أنه، إذا كانت شدة المجال الكهربائي عند نقطة معينة في الفراغ تساوي 1 N/C، فإنَّ شحنة 1 C موضوعة عند هذه النقطة ستتعرّض لقوة مقدارها 1 N. أما الشحنة التي يبلغ مقدارها 0.5 C فتتعرض لقوة مقدارها 0.5 N.

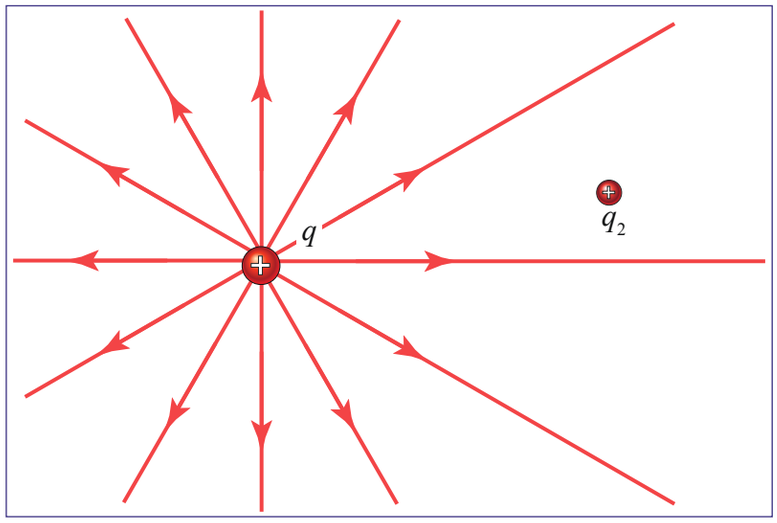
إستنتاج شدّة المجال الكهربائي لشحنة نقطية

كيف يمكننا حساب شدّة المجال الكهربائي عند نقطة بالقرب من شحنة نقطية q (**الشكل 3-19**)؟ افترض أن لدينا شحنة اختبارية افتراضية q_2 تقع على مسافة r. وفقًا لقانون كولوم، فإنَّ القوة الكهروستاتيكية بين الشحنتين ستكون: $F = \frac{k q q_2}{r^2}$

وحيث إنَّ المجال الكهربائي $E = \frac{F}{q_2}$ فإن

$$E = \frac{F}{q_2} \Rightarrow \frac{\frac{k q q_2}{r^2}}{q_2}$$

وبذلك، يمكن أن نستنتج المعادلة التالية **5-3**



الشكل 3-19 ما مقدار المجال الكهربائي عند موقع الشحنة الاختبارية q_2؟

5-3	شدة المجال الكهربائي لشحنة نقطية		
$E = \frac{k q}{r^2}$		E	شدّة المجال الكهربائي (N/C)
		k	ثابت كولوم $9 \square 10^9$ (Nm^2/C^2)
		q	الشحنة الكهربائية (مصدر المجال) (C)
		r	المسافة بين الشحنة والنقطة (m)

مثال 6

a. احسب شدة المجال الكهربائي E واتجاهه عند نقطة تبعد 4 mm من شحنة نقطية 2 nC.

b. ما القوة الكهربائية الناتجة على شحنة 0.025μc- موجودة عند النقطة المذكورة في الفرع (a).

المطلوب: **a.** شدة المجال الكهربائي E

b. القوة الكهربائية F

المُعطيات:

$$q_1 = 2 \text{ nC};$$
$$q_2 = -0.025\ \mu\text{C};$$
$$r = 4 \text{ mm};$$

العلاقات:

$$E = \frac{kq}{r^2}$$

$$E = \frac{F}{q_2}$$

الحل:

a. $2 \text{ nC} = 2 \times 10^{-9} \text{ C},$

$4 \text{ mm} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$

$$E = \frac{k\,q_1}{r^2} = \frac{\left(9\times10^{9}\right)\left(2\times10^{-9}\right)}{\left(4\times10^{-3}\right)^2} = \boxed{11.25\times10^{5}\ \text{N/C}}$$

وحيث إنَّ الشحنة موجبة، فإن المجال الكهربائي يتجه بعيدًا عنها.

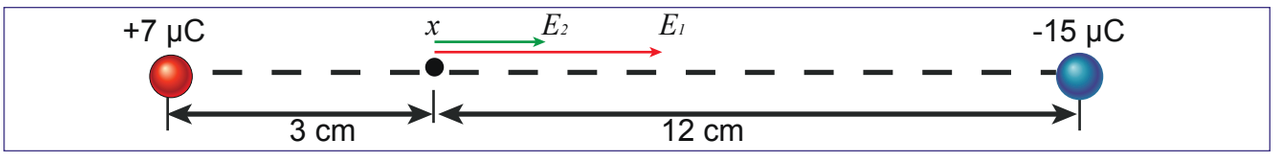
b. $-0.025\ \mu\text{C} = -0.025 \times 10^{-6} \text{ C},$

$$F = Eq_2 = \left(11.25\times10^{5}\right)\left(0.025\times10^{-6}\right) = \boxed{0.0281 \text{ N}}$$

وحيث أنَّ q_2 هي شحنة سالبة، فإن اتجاه القوة المؤثرة فيها يكون بعكس اتجاه المجال الكهربائي الناتج من q_1.

مثال 7

إذا كانت المسافة بين شحنة موجبة وأخرى سالبة 15 cm كما في **الشكل 3-20**، احسب شدة المجال الكهربائي عند النقطة x نتيجة للشحنتين.



الشكل 3-20 احسب المجال الكهربائي عند النقطة x.

المطلوب: شدّة المجال الكهربائي E

المُعطيات:

$q_1 = +7\ \mu C$

$q_2 = -15\ \mu C$

$r_1 = 3\ cm$

$r_2 = 12\ cm$

العلاقات:

$$E = \frac{kq}{r^2}$$

الحل:

علينا أوّلًا حساب شدّة المجال الكهربائي عند النقطة x لكل من q_1 و q_2 على انفراد، وبعدها نحسب محصلة المجالين. المجال الكهربائي الناتج عن الشحنة q_1 يتجه نحو اليمين، بعيدًا عن الشحنة لأنها موجبة.

$$E_1 = \frac{kq_1}{r^2} = \frac{(9\times10^9)(7\times10^{-6})}{(0.03)^2} = 7\times10^7\ N/C$$

كذلك، فإن شدّة المجال الكهربائي عند النقطة x والناتج عن الشحنة q_2 يتجه نحو اليمين لأنها شحنة سالبة، ومقداره:

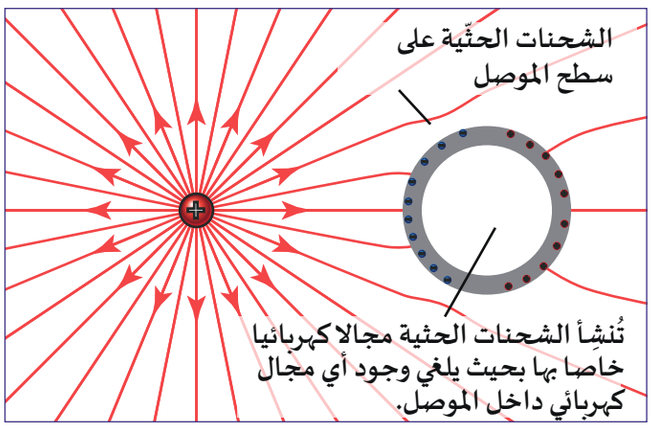
$$E_2 = \frac{kq_2}{r^2} = \frac{(9\times10^9)(15\times10^{-6})}{(0.12)^2} = 9.4\times10^6\ N/C$$

ولأن المجالين لهما الاتجاه نفسه، فتكون المحصلة جمعهما.

$E_T = E_1 + E_2 =$ $\boxed{7.9\times10^7\ N/C}$ الاتجاه نحو اليمين

قفص فارادي كدرعٍ فلزي

تتواجد المجالات الكهربائية ذات الشدة القليلة من حولنا. عند مرور التيار الكهربائي في الأسلاك في المنزل ينشأ عنها مجالات كهربائية تؤثر في الأجهزة الكهربائية اللاسلكية و أجهزة الراديو. مكالمات الهاتف الجوال والكهرباء الساكنة تَنتُجُ جُزئِيًّا من مجالات كهربائية ظرفية. الموصل الكهربائي، كالمواد الفلزية هو مادة تشتمل على شحنات حرة تتحرك بسهولة. افترض مادة موصلة موضوعة في مجال كهربائي كالذي في **الشكل 3-21**. تتأثر الشحنات الحرة بسرعة بالمجال الكهربائي وتعيد ترتيب أماكنها بحيث يصبح المجال الكهربائي داخل الموصل الكروي صفرًا.



الشكل 3-21 استخدام الموصل كدرع للمجال الكهربائي.

يصبح المجال الكهربائي داخل الموصل صفرا لأن الشحنات الحرة فيه تتوقف عن الحركة فقط عندما ينعدم وجود أي قوة كهربائية تؤثر فيها.

عندما تصبح القوة الكهربائية داخل المادة الموصلة صفرا، تكون شحناتها التي أعادت ترتيب مواقعها قد أنشأت مجالا كهربائيا يعاكس ويعادل المجال الكهربائي الخارجي، وهو ما يسمى التدريع (الحماية) الكهربائي.

المجال الكهربائي داخل الموصلات الكهربائية يكون صفرًا.

في حالة استثنائية، لا يكون المجال الكهربائي داخل المادة الموصلة صفرا، وذلك عند مرور تيار كهربائي بداخلها، ولا يكون الموصل في هذه الحالة درعًا كهربائيًا.

وقاية أسلاك الحاسوب

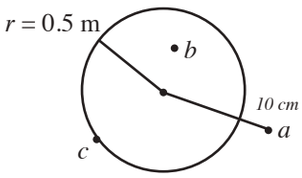
يمكن لإشارات شبكات الحاسوب أن تتأثر سلبيًّا بالمجالات الكهربائية. لمنع ذلك، تُغلَّف كافة أسلاك الحواسيب بمادة فلزية موصلة من الخارج لحماية الأسلاك الداخلية. تعمل هذه المادة كدرع ضد تأثيرات المجالات الكهربائية الخارجية (**الشكل 3-22**)

اخترع مايكل فارادي قفص فارادي في العام 1836. صُنِعَ قفص فارادي من مادة موصلة تستخدم لحماية كل ما بداخل القفص من أي تأثير للكهرباء أو المجالات الكهربائية الخارجية. فعند تعرض قفص فارادي للبرق، يبقى أي إنسان بداخله بمأمن من أي خطر.

الشكل 3-22 حماية سلك الحاسوب باستخدام درع فلزي.

مثال 8

كرة موصلة موضوعة في الهواء مشحونة بشحنة كهربائية 2 C ونصف قطرها 0.5 m، احسب شدة المجال الكهربائي عند النقاط الآتية:



a. نقطة خارج الكرة وتبعد 10 cm عن سطحها.

b. نقطة تقع داخل الكرة.

c. نقطة تقع خارج الكرة وقريبة جدًا من سطحها.

المطلوب: شدة المجال الكهربائي.

المُعطيات: $r = 0.5\ \text{m}$ ، $+2\ \text{C}$

العلاقات: $$E = \frac{kq}{r^2}$$

الحل:

a. لأن الكرة موصلة سوف تتوزع الشحنة الكهربائية على سطحها الخارجي بسبب تنافرها، وبذلك فإن المجال عند أي نقطة خارج الكرة مثل النقطة (a) يساوي المجال الناتج عن شحنة نقطية تساوي شحنة الكرة وموجودة عند مركزها، أي أن:

$$E_1 = \frac{kq}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9)(2)}{(0.6)^2} = 5 \times 10^{10}\ \text{N/C}$$

b. المجال الكهربائي عند أي نقطة داخل الكرة الموصلة المشحونة يساوي صفرًا، لأنه ناتج عن الجمع الاتجاهي للمجالات الفرعية الناتجة عن كل شحنة صغيرة على سطح الكرة.

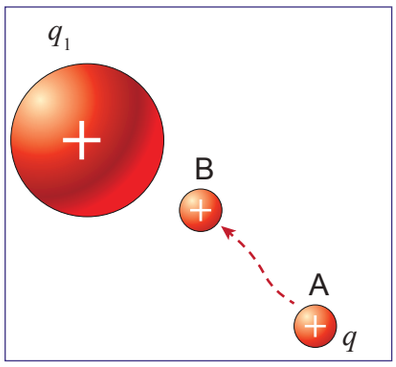
c. خارج الكرة وبالقرب من سطحها سوف نعتبر أن المسافة بين النقطة (c) ومركز الكرة تساوي تقريبًا (0.5 m).

$$E_1 = \frac{kq_1}{r^2} = \frac{(9 \times 10^9)(2)}{(0.5)^2} = 7.2 \times 10^{10}\ \text{N/C}$$

علمًا أن المجال الكهربائي على سطح الجسم الموصل المشحون هو كمية غير معرفة.

طاقة الوضع الكهربائية

لنفرض أن شحنة q تتحرك من النقطة A إلى B بالقرب من شحنة أخرى q_1 (**الشكل 3-23**). ستتعرض الشحنة q لقوة تنافر من الشحنة q_1 بافتراض أنهما موجبتان. لنقل الشحنة q من الموقع A إلى الموقع B يجب التغلب على قوة التنافر الكهربائية بالتأثير بقوة خارجية، تبذل شغلاً، حيث يخزن هذا الشغل على شكل **طاقة وضع كهربائية Electric potential energy** داخل الشحنة q بسبب وجودها بالقرب من الشحنة الأخرى.



الشكل 3-23 تحريك شحنة من النقطة A إلى النقطة B.

الجهد الكهربائي

الجهد الكهربائي هو طاقة الوضع الكهربائية لكل وحدة شحنات. يوصف الجهد الكهربائي **بالمعادلة 6-3**.

6-3	الجهد الكهربائي		
$V = \frac{E_P}{q}$	V	الجهد الكهربائي (J/C أو V)	
	E_p	طاقة الوضع الكهربائية (J)	
	q	الشحنة الكهربائية (C)	

فرق الجهد الكهربائي

تحتوي المسائل الحقيقية في الغالب على تغيرات في الطاقة وفرق الجهد الكهربائي. عندما تتحرك شحنة من النقطة A إلى B (كما هو موضح في **الشكل 3-23**) ، يتغير الجهد الكهربائي للشحنة لأن طاقة الوضع الكهربائية للشحنة تتغير. يُسمّى الاختلاف في الجهد الكهربائي من النقطة A إلى B «فرق الجهد الكهربائي»، ويمكن كتابته ΔV

$$\Delta V = V_B - V_A = \frac{\Delta E_P}{q}$$

الإلكترون فولت هي وحدة لقياس الطاقة

وحدة قياس الجهد الكهربائي هي جول لكل كولوم (J/C) ، وهي الفولت لأن كل 1 فولت يساوي 1 جول لكل كولوم (1 V = 1 J/C).

عند مناقشة طاقة الوضع الكهربائية للجسيمات الذرية، فإن الجول يُعدّ وحدة كبيرة جدًا. والوحدة الأكثر ملاءمة لتمثيل طاقة الجسيمات الصغيرة هي الإلكترون فولت (eV). الإلكترون فولت الواحد هو الطاقة التي يكتسبها أو يفقدها إلكترون واحد عندما يتحرك خلال فرق جهد قدره 1 V، فيكون

$$E_P = qV$$

$$1 \text{ eV} = (1.6 \square 10^{-19} \text{ C}) \square (1 \text{ V})$$

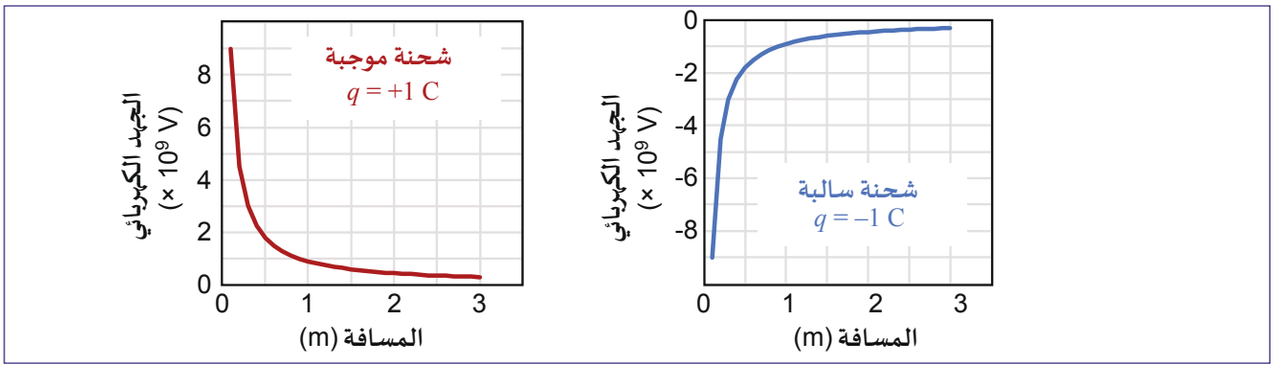
$$1 \text{ eV} = 1.6 \square 10^{-19} \text{ J}$$

الجهد الكهربائي لشحنة نقطية

الجهد الكهربائي لشحنة نقطية موجبة يتناقص مع ازدياد المسافة عن الشحنة وفقًا **للمعادلة 7-3**

7-3	الجهد الكهربائي لشحنة نقطية	V	جهد كهربائي (V)
	$V = \frac{kq}{r}$	k	ثابت كولوم $9 \square 10^9$ (Nm^2/C^2)
		q	الشحنة الكهربائية (C)
		r	المسافة بين الشحنة والنقطة (m)

يكون الجهد الكهربائي موجبًا بالقرب من شحنة موجبة وسالبًا بالقرب من شحنة سالبة، لأن القوة الكهربائية تكون موجبة أو سالبة بناءً على كون الشحنات متشابهة أو متعاكسة. يوضّح **الشكل 24-3** جهد نقطتين كهربائيتين 1C+ و 1C- بدلالة المسافة. نلاحظ أنَّ الجهد للشحنة الموجبة ينخفض بشكل سريع مع ازدياد المسافة بينما يزداد الجهد للشحنة السالبة بشكل سريع مع ازدياد المسافة.



الشكل 24-3 الجهد الكهربائي لشحنتين 1 C+ و 1 C-.

مثال 9

احسب الجهد الكهربائي عند نقطة تبعد 1m عن شحنة 1 C. قارن إجابتك مع جهد بطارية 9 V.

المطلوب: الجهد الكهربائي V

المُعطيات: المسافة $r = 1$ m الشحنة $q = 1$ C

العلاقات: $V = \frac{kq}{r}$

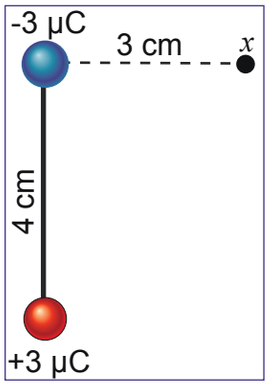
الحل:

$$V = \frac{kq}{r} = \frac{(9 \times 10^9)(1)}{1} = \boxed{9 \times 10^9 \text{ V}}$$

نلاحظ أن 9 مليار فولت أكثر بكثير من 9 V، لأن الشحنة 1 C كبيرة جدًّا.

مثال 10

احسب الجهد الكهربائي عند النقطة x الناتج عن الشحنتين الموضحتين في الشكل 3-25.



الشكل 3-25

المطلوب: الجهد الكهربائي V

المُعطيات: $q_1 = -3\mu C$ ، $q_2 = +3\mu C$

العلاقات: $V = \dfrac{kq}{r}$

الحل:

تذكّر، عند حساب الجهد الكهربائي، بأنه كمية قياسية، ويكون. الجهد الكهربائي الناتج عن مجموعة من الشحنات هو جمع الجهود المنفردة لكل منها على حدة. فالجهد عند النقطة x، والناتج عن q_1 هو:

$$V_1 = \frac{kq_1}{r} = \frac{(9\times10^9)(-3\times10^{-6})}{0.03} = -9\times10^5 \text{ V}$$

ولحساب الجهد الكهربائي عند النقطة x والناتج عن الشحنة q_2، علينا حساب المسافة بين x و q_2. باستخدام نظرية فيثاغورث نحصل على:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{(0.03)^2 + (0.04)^2} = 0.05 \text{ m}$$

الجهد الكهربائي عند x ، والناتج عن q_2 هو:

$$V_2 = \frac{kq_2}{r} = \frac{(9\times10^9)(3\times10^{-6})}{0.05} = 5.4\times10^5 \text{ V}$$

فيكون الجهد الكهربائي الكلي حاصل جمع الجهدين الكهربائيين:

$$V_T = V_1 + V_2 = -9\times10^5 + 5.4\times10^5 = \boxed{-3.6\times10^5 \text{ V}}$$

التغير في طاقة الوضع الكهربائية

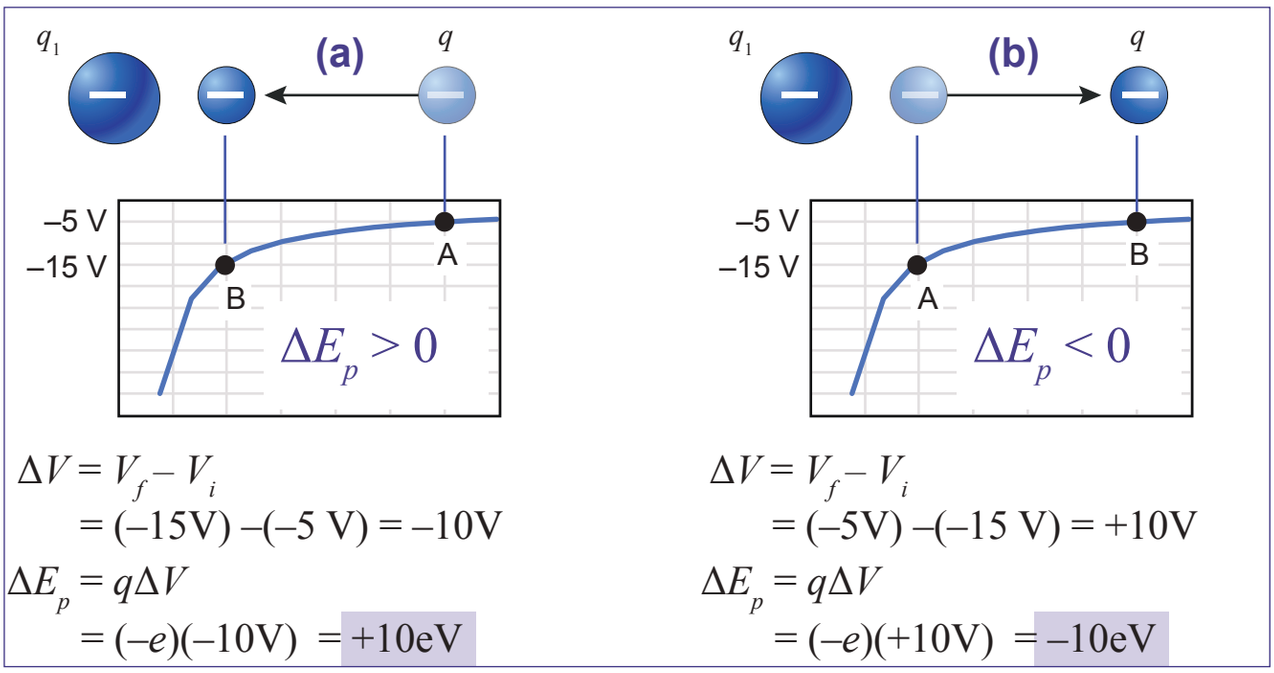
يمكننا استخدام **المعادلة 3-6** لحساب التغير في طاقة الوضع الكهربائية (ΔE_P) لشحنة تتحرك في مجال كهربائي حيث يكون التغير في الجهد الكهربائي (ΔV) **المعادلة 3-8**.

8-3	تغير طاقة الوضع الكهربائية		
	$\Delta E_P = q\Delta V$	ΔE_P	التغير في طاقة الوضع الكهربائية (J)
		ΔV	التغير في الجهد الكهربائي (V)
		q	الشحنة الكهربائية (C)

يتناول عدد من مسائل الفيزياء التغيرات في الجهد الكهربائي بوحدة (V) والتغييرات الناتجة في طاقة الوضع الكهربائية بوحدة (J).

a. تكون ΔE_P موجبة عندما تكتسب الشحنة المتحركة طاقة وضع كهربائية. على سبيل المثال، عندما يتحرك إلكترون باتجاه شحنة سالبة، فإنه يكتسب طاقة وضع كهربائية لأنه يفقد الطاقة الحركية بالتباطؤ (**الشكل 3-26 a**).

b. تكون ΔE_P سالبة عندما يتم تحويل طاقة الوضع الكهربائية إلى أشكال أخرى من الطاقة عندما تتحرك الشحنة. على سبيل المثال ، يفقد الإلكترون ذو الشحنة السالبة من طاقة وضعه الكهربائية ويكتسب طاقة حركية عندما يبتعد عن شحنة أخرى سالبة ويتسارع (**الشكل 3-26 b**).



الشكل 3-26 التغير الموجب والتغيّر السالب لطاقة الوضع الكهربائية.

كما هو الحال بالنسبة إلى طاقة الوضع التجاذبية، فإنّ الجهد الكهربائي يكون صفرًا عند اللانهاية. ولأننا نهتم فعليًا بفرق الجهد الكهربائي، فإنَّ بإمكاننا اختيار الجهد الصفري في أي موقع مناسب آخر، مثل الطرف السالب للبطارية، أو "الأرض" وهو الجهد الكهربائي المرجعي لسطح الأرض.

مثال 11

تحتاج المصابيح الأمامية للسيارة ذات القدرة 30 W إلى بطارية جهدها 12 V. احسب عدد الإلكترونات التي تمر عبر المصابيح الأمامية في كل ثانية.

المطلوب: عدد الإلكترونات n

المُعطيات: القدرة $P = 30$ W الجهد الكهربائي $V = 12$ V

العلاقات:
$$V = \frac{E_P}{q}$$

الحل: إنَّ 30 W من القدرة تعني أن المصباح يستهلك 30 J من الطاقة كل ثانية. ولأن البطارية تفقد الطاقة، فإن طاقة الوضع الكهربائية هي 30 J–. لحساب عدد من الإلكترونات، فإنَّ علينا أولًا حساب الشحنة. باستخدام العلاقة الآتية:

$$V = \frac{E_P}{q} \Rightarrow q = \frac{E_P}{V}$$

$$q = \frac{-30}{12} = -2.5 \text{ C}$$

ولحساب عدد الإلكترونات نقسم الشحنة q على شحنة الإلكترون الواحد

$$n = \frac{-2.5}{-1.6 \times 10^{-19}} = \boxed{1.56 \times 10^{19} \text{ electrons}}$$

مثال 12

احسب الجهد الكهربائي على بعد 0.5×10^{-10} m من بروتون. شحنة البروتون هي 1.6×10^{-19} C

المطلوب: الجهد الكهربائي V

المُعطيات: المسافة $r = 0.5 \times 10^{-10}$ m

الشحنة $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C

العلاقات:
$$V = \frac{kq}{r}$$

الحل: لحساب الجهد الكهربائي نستخدم المعادلة الأتية.

$$V = \frac{kq}{r} = \frac{\left(9 \times 10^{9}\right)\left(1.6 \times 10^{-19}\right)}{0.5 \times 10^{-10}} = \boxed{28.8 \text{ V}}$$

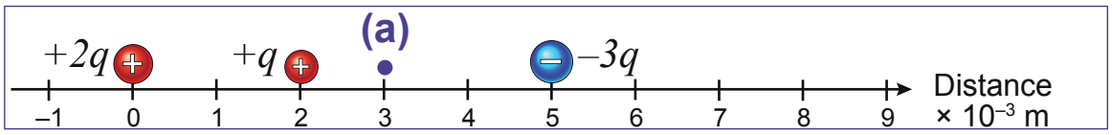
خصائص الجهد الكهربائي

الجهد الكهربائي كمية قياسية لها الخاصيتين التاليتين:

1. الجهد الكهربائي الناتج عن مجموعة من الشحنات هو الجمع الجبري لجهود الشحنات، كل على حدة.
2. فرق الجهد الكهربائي بين نقطة وأخرى لا يعتمد على المسار المتّبع بين هاتين النقطتين.

مثال 13

احسب الجهد الكهربائي عند النقطة (a) إذا كانت $q = 5 \square 10^{-10}$ C.



المطلوب: الجهد الكهربائي V

المُعطيات: المواقع 0, 2, 5 mm والشحنات $q = 5 \times 10^{-10}$ C , +2q , -3q

العلاقات:

$$V = \frac{kq}{r}$$

الحل:

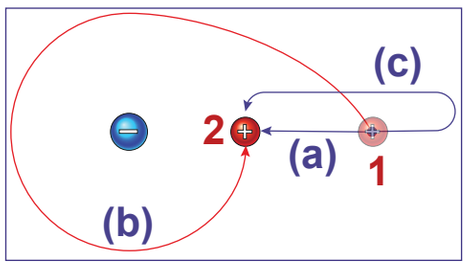
$$q_2 = 5 \times 10^{-10}\ \text{C}$$
$$q_1 = 1 \times 10^{-10}\ \text{C}$$
$$q_3 = -1.5 \times 10^{-10}\ \text{C}$$

$$V = k\left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3}\right)$$

$$= 9 \times 10^{9}\left(\frac{1 \times 10^{-9}}{0.003} + \frac{5 \times 10^{-10}}{0.001} + \frac{-1.5 \times 10^{-9}}{0.002}\right) = 750\text{V}$$

مثال 14

يمكن لشحنة موجبة أن تسلك ثلاثة مسارات مختلفة بين الموقعين 1 و 2. أي المسارات (c ,b ,a) يحقق أكبر فرق في طاقة الوضع الكهربائية بين الموقعين؟ وأيها يحقق أقل فرق؟



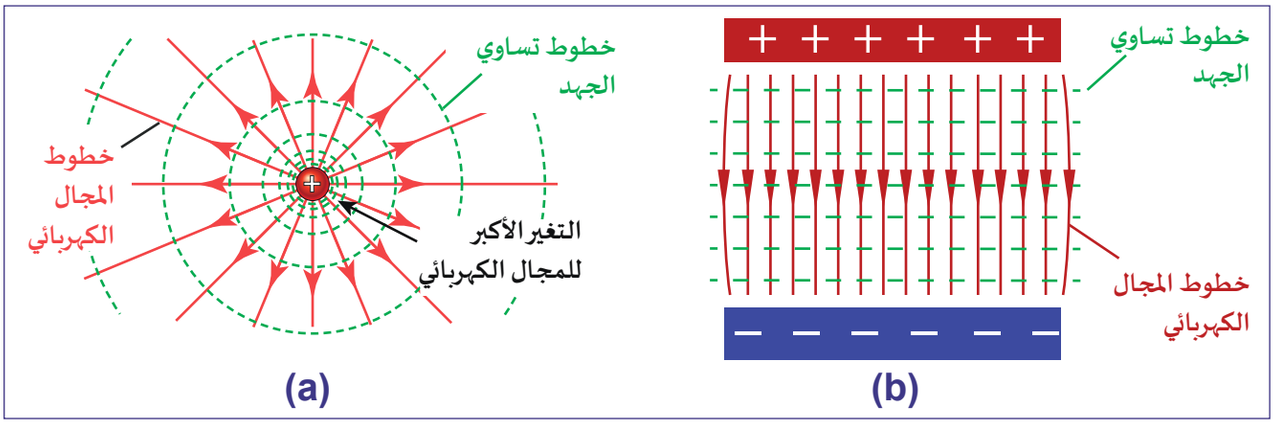
الحل:

الفرق في طاقة الوضع الكهربائية على المسارات الثلاثة هو ذاته، فهو لا يعتمد على المسار المُتّبَع بين أي نقطتين، بل يعتمد على جهد نقطة البداية وجهد نقطة النهاية

خطوط تساوي الجهد

خط تساوي الجهد هو الخط الذي يكون الجهد الكهربائي ثابتا عند جميع النقاط الواقعة عليه. الجهد في حالة الشحنة النقطية تنخفض قيمة الجهد الناتج عنها مع ازدياد المسافة عنها، أي إنّ الجهد يتناسب طرديًا مع $\frac{1}{r}$. ولذلك تكون الخطوط ذات الجهد المتساوي عبارة عن دوائر متحدة المركز كما هو موضَّح في **الشكل 3-27a**.

لاحظ، أنه بالرغم من اختلاف اتجاه المجال الكهربائي حول الشحنة النقطية فإنَّ اتجاهه عند أية نقطة يكون دائمًا متعامدًا مع دوائر خطوط تساوي الجهد.

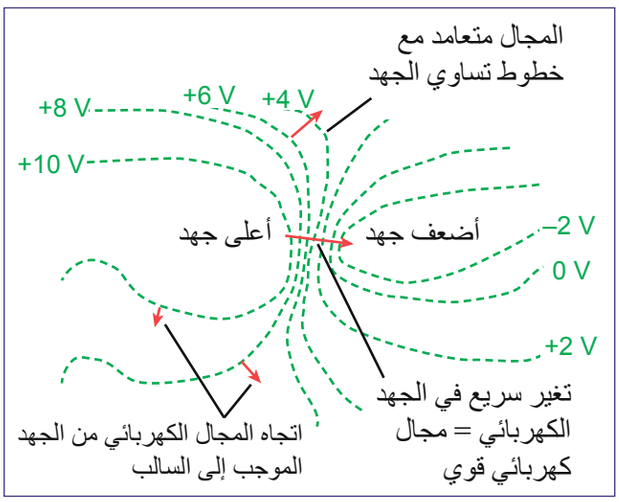


الشكل 3-27 خطوط تساوي الجهد لشحنة نقطية (a) ، وخطوط تساوي الجهد لمجال كهربائي منتظم (b).

الشكل 3-27 (b) يوضح أن خطوط تساوي الجهد لمجال كهربائي منتظم تكون متوازية ولها التباعد ذاته فيما بينها. و تكون متعامدة على خطوط المجال

قراءة خطوط تساوي الجهد

إذا أُعطيت رسمًا تخطيطيًّا لخطوط تساوي الجهد (**الشكل 3-28**)، يمكنك استنتاج خصائص الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي باستخدام بعض القواعد البسيطة:



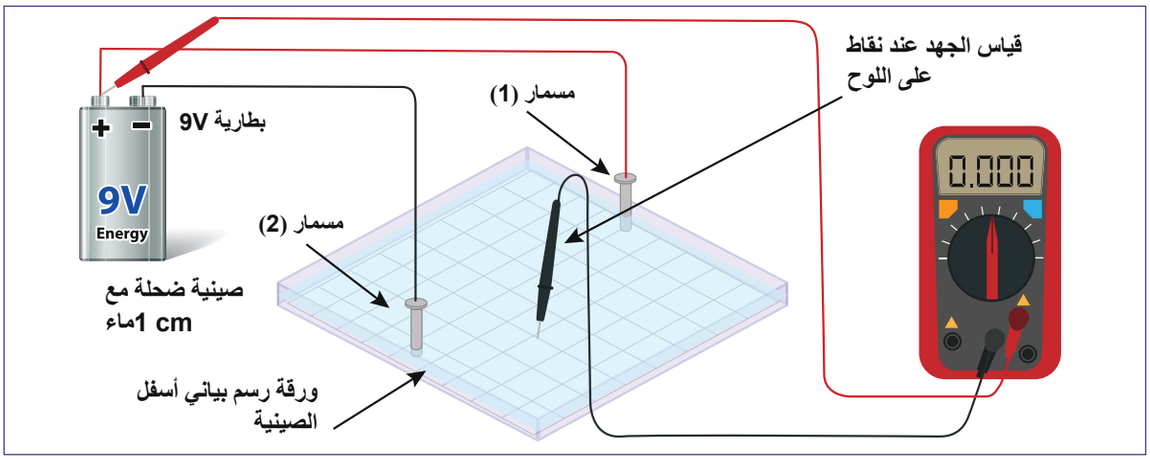
الشكل 3-28 خطوط تساوي الجهد.

- اتجاه المجال الكهربائي يكون دائمًا عموديًا على خطوط تساوي الجهد.
- يكون اتجاه خطوط المجال الكهربائي من الجهد الكهربائي الموجب ونحو الجهد الكهربائي السالب.
- المواقع التي تكون فيها خطوط تساوي الجهد "كثيفة" تمثل منطقة مجال كهربائي قوي.

نشاط 3-2 رسم خريطة لمجال كهربائي

سؤال الاستقصاء	كيف يبدو المجال الكهربائي حول مسمار مشحون؟
الموادّ المطلوبة	مسماران، ملقط تمساح عدد 2، بطارية 9 V، ورقتان للرسم البياني، صينية بلاستيكية شفافة، فولتميتر

خطوات التجربة

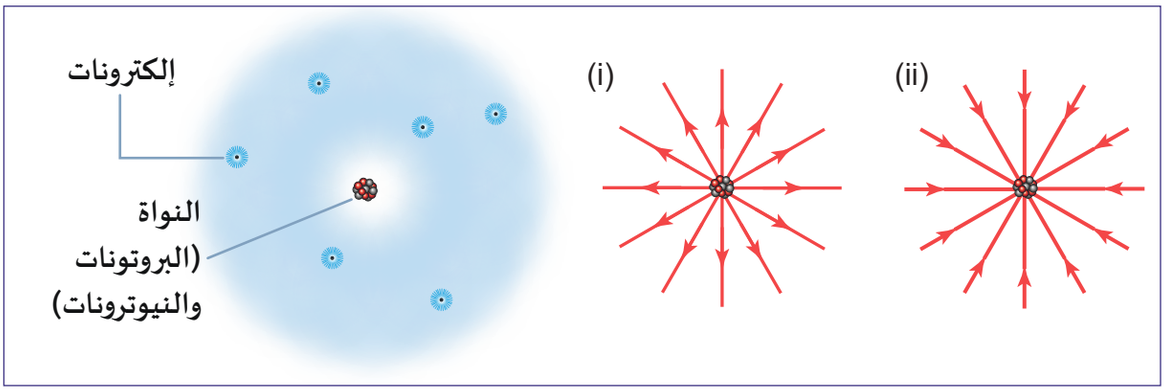


1. املأ صينية بلاستيكية شفّافة بالماء بعمق 1 cm.
2. ضع ورقة رسم بياني أسفل الصينية وورقة ثانية بجوار الصينية.
3. ضع مسمارين عند طرفي الصينية وثبّتها بشريط لاصق.
4. قم بتوصيل بطارية 9 V بالمسمارين باستخدام أسلاك توصيل فم التمساح.
5. قم بتوصيل الطرف الموجب للفولتميتر بالطرف الموجب للبطارية.
6. دع الطرف السالب للفولتميتر يلمس مواقع محدّدة من الماء في الصينية. ستجد أن أربع مناطق متجاورة من الماء أو أكثر لها الجهد نفسه، 1 V مثلًا.
7. ضع علامة عند موقع جميع المواقع التي لها الجهد نفسه على ورقة الرسم البياني الثانية الموجودة إلى جانب الصينية.
8. كرر الخطوة 6 لقيم أخرى للجهد 2 V ، 3 V ، ... 8 V.
9. قم بتوصيل العلامات المرسومة للحصول على الخطوط ذات الجهد المتساوي.

الأسئلة

a. خطوط المجال الكهربائي متعامدة مع الخطوط ذات الجهد المتساوي. ارسم خطوط المجال الكهربائي.
b. أين تكون خطوط المجال الكهربائي أكثر كثافة؟ ما الأهمية التي تكتسبها كثافة خطوط المجال الكهربائي؟

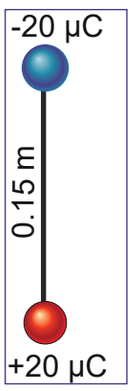
تقويم الدرس 3-2



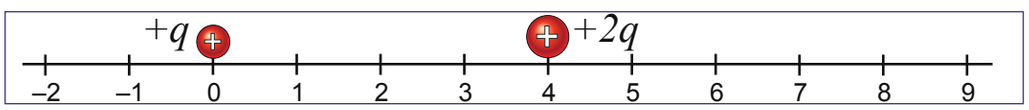
1. تتألف الذرة من نواة تحتوي على شحنات موجبة (البروتونات) محاطة بسحابة من الإلكترونات ذات الشحنة السالبة.
   a. أيٌّ من الرسمين (i) أم (ii) يمثل المجال الكهربائي للنواة؟
   b. أي من الرسمين (i) أم (ii) يمثل اتجاه القوة المؤثرة في الإلكترونات؟
   c. هل اخترت الرسم ذاته في السؤالين الماضيين؟ لماذا؟

2. نفخ طالب بالونًا مطّاطيًّا وربطه بخيط وعلّقه بسقف الغرفة، ثم دلكه بسترة صوفية. لنفرض أن تريليون إلكترون ($10^{12}\ e^-$) انتقل من السترة إلى البالون؛ ولنفرض أيضًا أن هذه الإلكترونات تمركزت في مركز البالون. احسب المجال الكهربائي للبالون على بعد متر واحد من مركزه.

3. المسافة بين الشحنتين في الشكل المجاور 0.15 m.
   a. احسب شدة المجال الكهربائي وحدد اتجاهه عند منتصف المسافة بين الشحنتين.
   b. احسب مقدار واتجاه القوة الكهربائية التي تؤثر في إلكترون وُضِع عند منتصف المسافة بين الشحنتين.



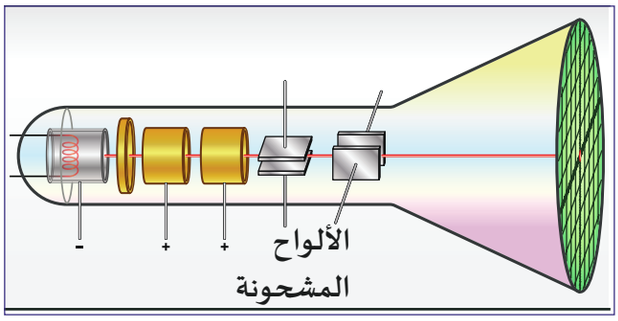
4. وُضِعت شحنتان كهربائيتان على مسافة 0.4 m من بعضهما كما في الشكل أدناه.



   a. عند أي نقطة تكون محصلة المجال الكهربائي للشحنتين صفرًا؟
   b. إذا تم استبدال الشحنة 2q+ بشحنة أخرى 2q– ، فعند أي نقطة يصبح المجال الكهربائي صفرًا؟
   c. احسب الجهد الكهربائي في الحالتين a و b.

الدرس 3-3
المجال الكهربائي المنتظم
Uniform Electric Field

أنبوبة أشعة المهبط (الكاثود) (CRT) هي أنبوبة مفرّغة من الهواء تحتوي على قاذف إلكترونات. تُسرَّع الإلكترونات في الأنبوبة وتُوجَّه باستخدام ألواح مشحونة (**الشكل 3-29**). تُوجَّه هذه الإلكترونات نحو الشاشة الفلورسنتية حيث تنشأ الصُّوَر نتيجة ذلك، ويحدِّد لونُ الفوسفور اللونَ الساقط على الشاشة.



الشكل 3-29 أنبوبة أشعة المهبط (الكاثود) (CRT).

أستُخدمت أنبوبة أشعة المهبط على نطاق واسع في أجهزة التلفاز والشاشات وأجهزة راسم الذبذبات. وبالرغم من عدم استخدام أيٍّ من التطبيقات المذكورة سابقًا لأنابيب أشعة المهبط الآن، إلا أنها لا تزال تُستخدم في الإضاءة وأنابيب الأشعة السينية والتسخين التجاري والصناعي.

مخرجات التّعلُّم

P1205.1 يتذكر ويطبق العلاقة ($E=\frac{V}{d}$) لحساب شدة المجال الكهربائي المنتظم بين لوحين متوازيين ومشحونين، ويحسب القوى المؤثرة في شحنات موضوعة في مجال كهربائي منتظم، ويصف تأثير المجال الكهربائي المنتظم في حركة جسيمات مشحونة.

P1206.4 يذكر أوجه التشابه والاختلاف بين المجال الكهربائي ومجال الجاذبية.

المفردات

مجال كهربائي منتظم	Uniform electric field

الجسيمات في مجال كهربائي منتظم

تخيّل جُسَيْمًا سالب الشحنة كالإلكترون يتحرك في مجال كهربائي منتظم. الإلكترون ينحرف نحو اللوح ذي الشحنة الموجبة.

يسبب المجال الكهربائي الأقوى زيادة في الانحراف، لأن القوة الكهروستاتيكية تتناسب طرديًّا مع المجال الكهربائي.

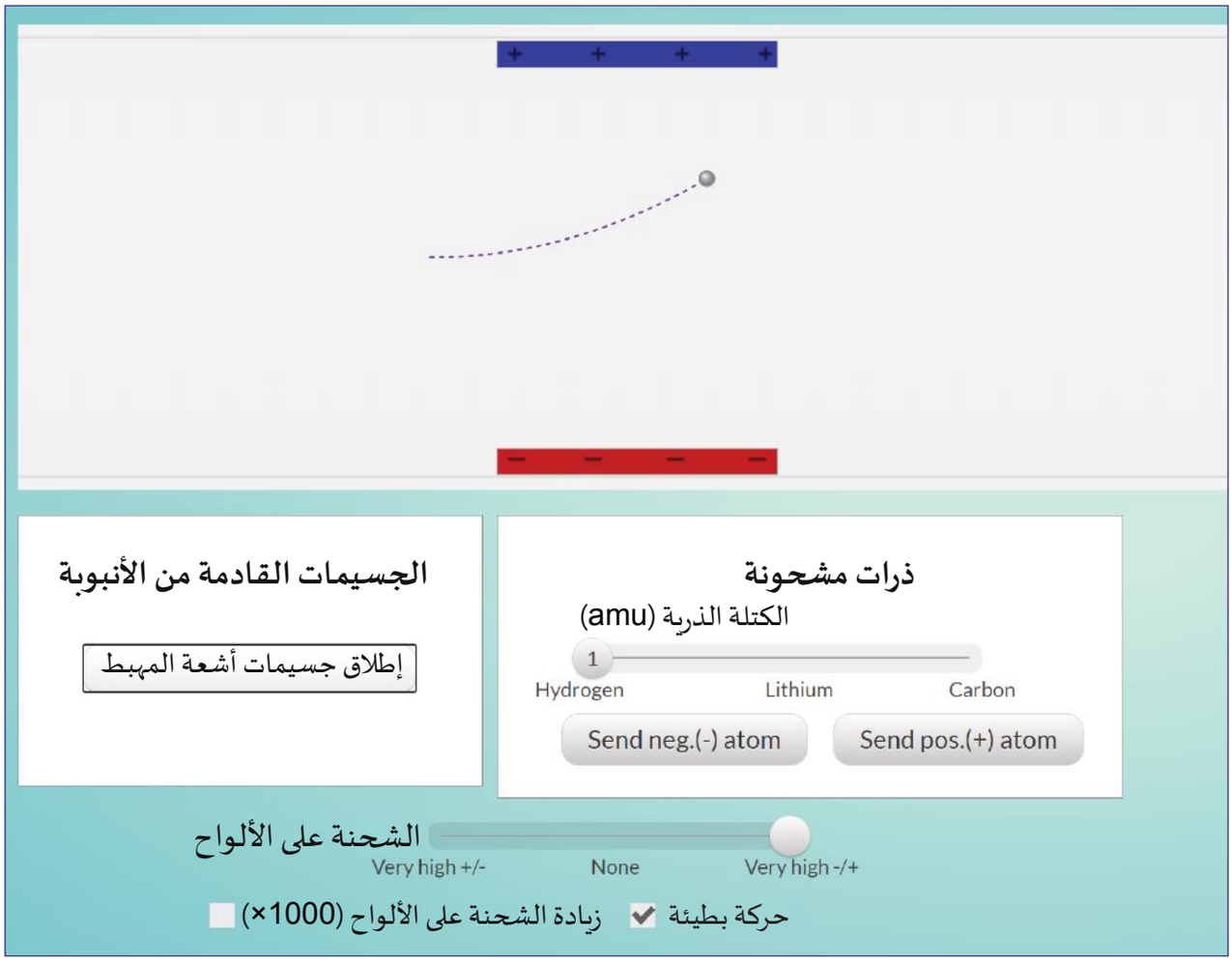
$$F = Eq$$

تتناسب القوة الكهروستاتيكية طرديًّا مع شحنة الجسيمات أيضًا. استخدم المحاكاة وأجب عن الأسئلة المعطاة.

لماذا لا تنحرف الذرات المشحونة عند عدم وجود شحنات على اللوحين؟

لماذا تسبب زيادة الشحنة على اللوحين المزيد من انحراف الذرات المشحونة؟

أية ذرة تنحرف أكثر؟ ولماذا؟

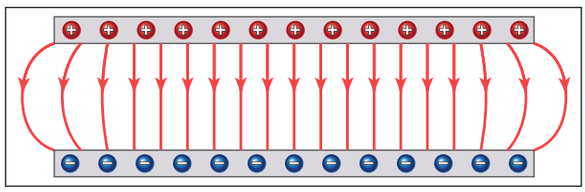


الشكل 3-30 محاكاة لاستكشاف الجسيمات المشحونة في مجال كهربائي منتظم.

المجال الكهربائي المنتظم

تكون خطوط المجال الكهربائي لشحنة نقطية في الاتجاه الشعاعي، وتتناقص شدّته بزيادة نصف القطر. ولأن شدة المجال تتغير، فإنَّ المجال الكهربائي لشحنة نقطية يكون غير منتظم.

يتشكّل **المجال الكهربائي المنتظم Uniform electric field** ذو الشدة والإتجاه الثابتين في الفراغ الناشىء بين لوحين متوازيين وكبيرين ومشحونين بشحنتين مختلفتين (**الشكل 3-31**). لا تختلف شدة المجال الكهربائي في الوسط بين اللوحين، وتكون خطوط المجال:



الشكل 3-31 المجال الكهربائي بين لوحين فلزّيين مشحونين.

- متوازية.
- على مسافات متساوية من بعضها.

وإذا كانت المسافة بين اللوحين صغيرة مقارنة بأبعادهما، فإن المجال الكهربائي يكون منتظمًا تقريبًا في منطقة الوسط بينهما. يُستخدم اللوحان المتوازيان المشحونان لإنشاء مجالات كهربائية منتظمة كما هو الحال عند تركيز حزمة الإلكترونات في أنبوبة أشعة المهبط.

إذا كانت المسافة الفاصلة بين اللوحين d ، وفرق الجهد الكهربائي بينهما V ، فإن شدة المجال الكهربائي يمكن حسابها باستخدام **المعادلة 3-9**.

9-3	شدة المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين		
$E = \frac{\Delta V}{d}$		E	شدّة المجال الكهربائي (N/C) أو (V/m)
		ΔV	فرق الجهد الكهربائي بين اللوحين (V أو J/C)
		d	المسافة بين اللوحين (m)

مثال 15

احسب شدة المجال الكهربائي الناتج بين لوحين مشحونين تفصل بينهما مسافة 6 mm، وفرق الجهد بينهما يساوي 300 V.

المطلوب: شدة المجال الكهربائي E

المُعطيات: فرق الجهد بين اللوحين $V = 300$ V؛ المسافة الفاصلة بين اللوحين $d = 6$ mm

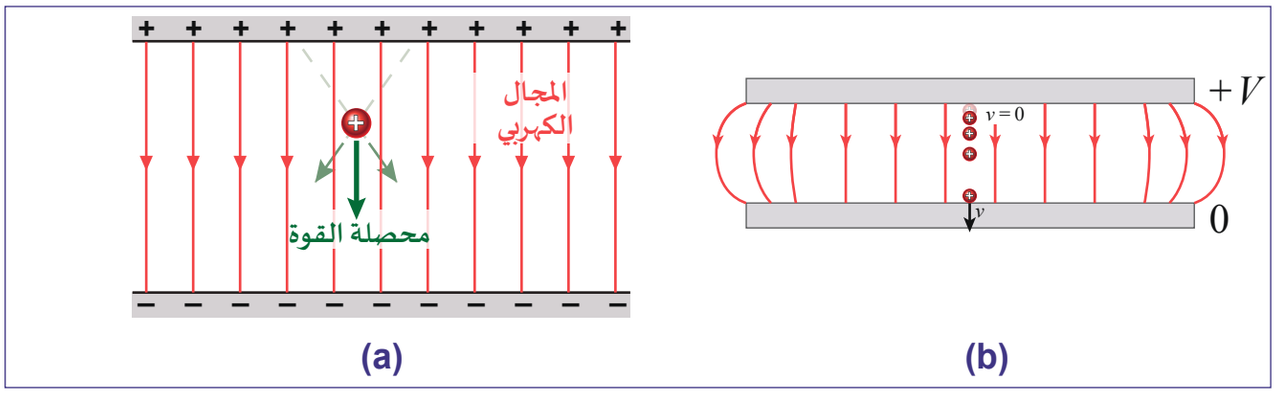
العلاقات: $E = \frac{\Delta V}{d}$

الحل: لحساب شدة المجال الكهربائي، نستخدم المعادلة:

$$E = \frac{\Delta V}{d} = \frac{300}{6 \times 10^{-3}} = \boxed{50{,}000 \text{ V/m}}$$

القوة المؤثرة في جسيم مشحون في مجال كهربائي منتظم

تتأثر الجسيمات المشحونة بقوة عندما تكون في مجال كهربائي. ولا توجد أيَّة مركبات أفقية لهذه القوة في الفراغ بين اللوحين المتوازيين اللانهائيين كما في (**الشكل 3-32a**)، فتكون محصلة القوة رأسية فقط، لأن المجال الكهربائي بين اللوحين المتوازيين رأسيّ أيضًا ويتجه من اللوح الموجب إلى اللوح السالب، ويكون المجال الكهربائي ثابت الشدة في الفراغ بين اللوحين.



الشكل 3-32 (a) المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين مشحونين. (b) سرعة الجسيم المشحون بين لوحين متوازيين.

القوة الكهروستاتيكية التي تتأثر بها الشحنة تساوي $F = Eq$. ولأن المجال الكهربائي ثابت، فإنَّ القوة تكون ثابتة أيضًا.

نعلم من القانون الثاني لنيوتن للحركة أن القوة الثابتة تسبب تسارعًا ثابتًا، فإذا أُطلق جسيم موجب الشحنة بالقرب من اللوح ذي الشحنة الموجبة، فكم تبلغ سرعته عندما يصل إلى اللوح ذي الشحنة السالبة (**الشكل 3-32 (b)**)؟

يمكن استخدام مبدأ حفظ الطاقة لإيجاد السرعة النهائية للجسيم المشحون: في البداية يكون للجسيم المشحون طاقة وضع كهربائية موجبة $E_p = qV$، ولكنه لا يملك طاقة حركية (لأنه بدأ الحركة من السكون). في نهاية حركته، سيكون له طاقة حركية $E_k = \frac{1}{2}mv^2$، ولا يمتلك طاقة وضع كهربائية (لأنَّنا اخترنا أن يكون الجهد المرجعي عند اللوح السالب صفرًا). وبمساواة معادلة الطاقتين الابتدائية والنهائية نحصل على السرعة النهائية للجسيم المشحون.

الطاقة الابتدائية: $E_k = 0 \quad E_p = qV$

الطاقة النهائية: $E_p = 0 \quad E_k = \frac{1}{2}mv^2$

من مبدأ حفظ الطاقة: $E_{tot} = qV = \frac{1}{2}mv^2$

$$qV = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$$

لماذا اخترنا أن يكون الجهد المرجعيّ صفرًا؟

ما أهمية الجهد المرجعيّ؟

مثال 16

وُضع لوحان متوازيان مشحونان بشحنتين مختلفتين تفصل بينهما مسافة 5 cm. فنشأ مجال كهربائي منتظم بين اللوحين المتوازيين، شدته 4.5×10^5 N/C.

a. احسب محصلة القوة التي يتعرض لها إلكترون موضوع داخل المجال الكهربائي المنتظم.

b. ما السرعة النهائية والطاقة الحركية للإلكترون؟

المطلوب:

a. محصلة القوة F

b. السرعة النهائية بين اللوحين v؛ الطاقة الحركية الكلية $E_k = ?$

المُعطيات:

شدة المجال الكهربائي $E = 4.5 \times 10^5$ N/C

المسافة بين اللوحين $d = 5$ cm

العلاقات:

$$F = Eq$$

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \; ; \; E_k = \frac{1}{2}mv^2 \; ; \; E = \frac{V}{d} \; ;$$

الحل:

a. لحساب محصلة القوة، سنستخدم المعادلة الأولى السابقة. فالإلكترون موجود داخل المجال الكهربائي، وشحنة الإلكترون هي -1.6×10^{-19} C.

$$F = Eq = (4.5 \times 10^5) \times (1.6 \times 10^{-19}) = 7.2 \times 10^{-14} \text{ N}$$

بما أن شحنة الإلكترون سالبة فيكون اتجاه القوة عكس اتجاه المجال الكهربائي.

b. لحساب السرعة النهائية، نحتاج إلى حساب فرق الجهد بين اللوحين أولًا، ويمكن أن يتم ذلك باستخدام العلاقة:

$$V = Ed = (4.5 \times 10^5) \times (5 \times 10^{-2}) = 22{,}500 \text{ V}.$$

$$v = \sqrt{\frac{2qV}{m}} = \sqrt{\frac{2\left(1.6 \times 10^{-19}\right)\left(22{,}500\right)}{9.1 \times 10^{-31}}} = \boxed{8.9 \times 10^7 \text{ m/s}}$$

وحساب الطاقة الحركية يعطينا:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\left(9.1 \times 10^{-31}\right)\left(8.9 \times 10^7 \text{ m/s}\right)^2 = \boxed{3.6 \times 10^{-15} \text{ J}}$$

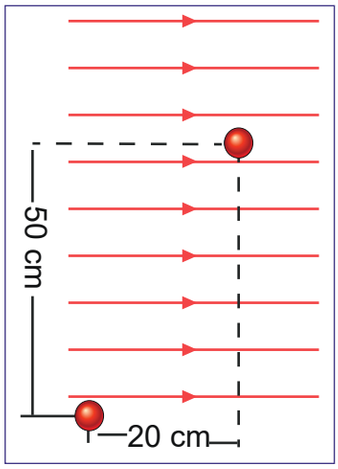
مثال 17

شدة المجال الكهربائي المنتظم في **الشكل 3-33** تبلغ 250 V/m.

تتحرك شحنة كهربائية مقدارها 12 μC مسافة 20 cm في اتجاه المجال ومسافة 50 cm باتجاه عمودي على خطوط المجال..

a. احسب التغير الناتج في طاقة الوضع الكهربائية للشحنة.

b. احسب التغير في الجهد الكهربائي بين النقطتين.



الشكل 3-33

المطلوب:

a. التغير في طاقة الوضع الكهربائية ΔE_P.

b. التغير في الجهد الكهربائي ΔV.

المُعطيات:

شدة المجال الكهربائي: 250 V/m

الشحنة الكهربائية $q = 12\ \mu C$

المسافة الأفقية: $d_1 = 20\ cm$

المسافة الرأسية إلى أعلى: $d_2 = 50\ cm$

العلاقات:

$$\Delta E_P = Eq\Delta d$$

$$\Delta V = \frac{\Delta E_P}{q}$$

الحل:

a. التغير في الجهد الكهربائي يعتمد فقط على المسافة المقطوعة بشكل موازٍ لاتجاه المجال الكهربائي. فالمسافة المقطوعة بشكل عمودي للمجال ليس لها أي تأثير في هذه الحالة. تَذَكّر أن التغير في طاقة الوضع الكهربائية يساوي سالب الشغل المبذول بواسطة القوة.

$W = Fd$ و $F = Eq$

لذلك:

$$\Delta E_P = -Eq\Delta d = -(250)(12\square 10^{-6})(0.2) = \boxed{-6\ \square 10^{-4}\ J.}$$

b. حساب فرق الجهد:

$$\Delta V = \frac{\Delta E_P}{q} = \frac{-6\times10^{-4}}{12\times10^{-6}} = \boxed{-50\ V}$$

مقارنة المجال الكهربائي بمجال الجاذبية

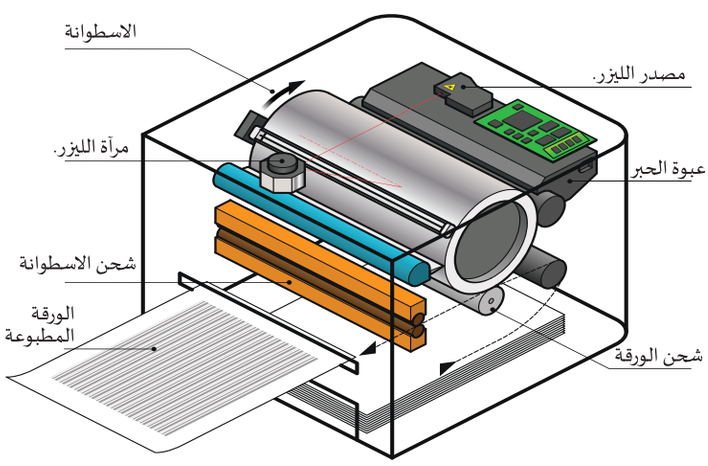
درس العلماء أوجه التشابه بين الجاذبية والكهرباء لما يقرب من 300 سنة. وعند المقارنة بين قانون نيوتن للجاذبية وقانون كولوم، أمكن ملاحظة كثير من أوجه التشابه بين القانونين.

ومع ذلك، فإنَّنا نلاحظ بعض الاختلافات بينهما أيضًا. تلخص القائمة أدناه أوجه التشابه والاختلاف بين المجال الكهربائي ومجال الجاذبية.

المجال الكهربائي	مجال الجاذبية
أوجه التشابه: • تخضع القوة في كلا المجالين لقانون التربيع العكسي. • كلا المجالين كمية فيزيائية متجهة. • الطاقة المختزنة في النظام الناتج عن وجود (شحنة أو كتلة) في المجال تتناسب عكسيًا مع المسافة. • الجهد الكهربائي وجهد الجاذبية كلاهما كميات عددية.	
أوجه الاختلاف:	
• القوة التي يؤثر بها تنتج عن الشحنة.	• القوة التي يؤثر بها تنتج عن الكتلة.
• ثابت التناسب يختلف من وسط لآخر.	• ثابت التناسب هو نفسه لجميع الأوساط (ثابت كوني).
• اتجاه القوة قد يكون تجاذب أو تنافر حسب نوع الشحنات.	• اتجاه القوة دائمًا يكون تجاذب.
• الجهد الكهربائي يكون موجب أو سالب حسب نوع الشحنة.	• جهد الجاذبية يكون دائمًا سالب.

طابعة الليزر

تَستخدِم طابعات الليزر مبدأ الكهروستاتيكية في عملها (**الشكل 3-34**). تُزَوّدُ الأسطوانه داخل الطابعة بشحنة موجبة. تبدا الأسطوانة بالدوران وتقوم حزمة من أشعة الليزر بتفريغ الأجزاء المطلوب طباعتها. يتم رش الحبر المشحون بشحنة موجبة على الأسطوانة حيث يلتصق بالأجزاء ذات الشحنة السالبة فقط، فينشأ مجال كهربائي عمودي على الورقة. تدور الورقة المشحونة بشحنة سالبة تحت الأسطوانة وتجذب مسحوق الحبر المشحون بالشحنة الموجبة.

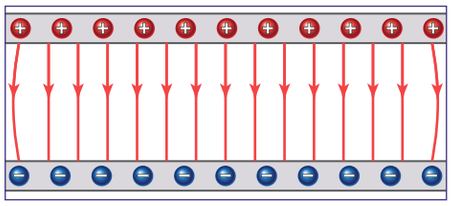


الشكل 3-34 طابعة الليزر.

تقويم الدرس 3-3

1. كيف يمكن تعريف شدة المجال الكهربائي بين لوحين متوازيين ومشحونين بشحنتين مختلفتين؟
   - **a.** له القيمة نفسها في أيّ مكان بين اللوحين.
   - **b.** يتناقص من اللوح الموجب إلى اللوح السالب.
   - **c.** يكون عند الأطراف أكبر من الوسط.
   - **d.** يكون عند الأطراف أصغر من الوسط.

2. يبين الشكل المجاور مكثفًا كهربائيًا ذا لوحين مشحونين ومتوازيين، ارسم عدة خطوط تساوي الجهد في المنطقة بين اللوحين على طول المجال الكهربائي بينهما. أشر إلى الخط الذي له أعلى جهد كهربائي.



3. لإنشاء مجال كهربائي منتظم بين لوحين متوازيين يحملان شحنتين متساويتي المقدار ومتعاكستين، افترض أن فرق الجهد بين اللوحين 6 V. فكم يجب أن تكون المسافة الفاصلة بينهما للحصول على مجال كهربائي شدته 50 N/C؟ (علمًا بأن الوسط بين اللوحين هو الفراغ).

4. احسب شدة المجال الكهربائي بين لوحين موصلين ومتوازيين تفصل بينهما مسافة 1.5 cm، وفرق الجهد بينهما يساوي $1.5 \square 10^4$ V.

5. تفصل بين لوحين موصلين ومتوازيين مسافة 4 cm، وشدة المجال الكهربائي بين اللوحين $7.5 \square 10^4$ V/m.
   - **a.** احسب فرق الجهد بين اللوحين.
   - **b.** إذا افترضنا أن جهد اللوح ذي الجهد المنخفض هو 0 V، فما جهد نقطة تبعد 1 cm عن هذا اللوح و 3 cm عن اللوح الآخر؟

6. جد سرعة إلكترون، طاقته الحركية 100 eV علمًا أن كتلة الالكترون تساوي 9.1×10^{-31} kg

ضوء على العلماء

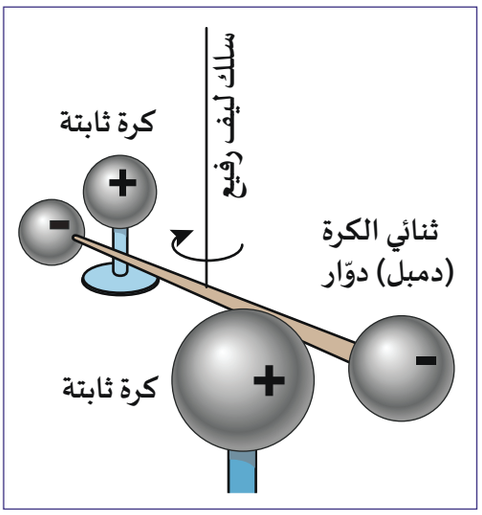
شارل أوجستين دي كولوم: 1736-1806

الشكل 3-35 شارل أوجستين دي كولوم.

صيغ قانون كولوم بقلم عالم الفيزياء الفرنسي شارل أوجستين دي كولوم. وُلد كولوم في أنجوليم بفرنسا في العام 1736، وانتقلت عائلته إلى باريس عندما كان صغيرًا. هناك دخل Collège des Quatre-Nations (كلية الأمم الأربعة) ودرس فيها الرياضيات.

التحق شارل دي كولوم بالمدرسة العسكرية، وهي مدرسة الهندسة الملكية بميزير وتخرّج فيها في العام 1761. وبصفة مهندس عسكري، خدم كولوم في جزر الهند الغربية لمدة 9 سنوات، عاد بعدها إلى فرنسا في العام 1773، لكنه استمر في عمله الرسمي حتى بداية الثورة الفرنسية.

بعد عودته إلى فرنسا، بدأ كولوم في البحث، وقدّم أول ورقة بحثية له بعنوان «المشكلات الإحصائية المطبقة على الهندسة المعمارية» إلى أكاديمية العلوم. واستخدم في الورقة حساب التفاضل والتكامل لحل المشكلات الهندسية. ومن الإسهامات الرئيسة الأخرى التي قدمها كولوم «نظرية الآلات البسيطة» في العام 1781.



الشكل 3-36 تجربة كولوم لقياس القوة الكهربائية.

في الفترة الزمنية التي امتدت بين العامين 1785 و1791، كتب كولوم سبع نشرات علمية عن الكهرباء والمغناطيسية، واستخدم ميزان الّلي لقياس القوة الكهربائية بين الشحنات (**الشكل 3-36**) وصاغ النظرية المعروفة باسم «قانون كولوم». وتكريمًا لإسهاماته في مجال القوى الكهربائية بين الشحنات، فقد سُمّيت وحدة الشحنة الكهربائية كولوم (C) على اسم شارل دي كولوم. توفي كولوم في العام 1806 في باريس.

الوحدة 3

مراجعة الوحدة

الدرس 3-1: قانون كولوم

- يكتسب الجسم **شحنة كهربائية** بسبب عدم تساوي عدد الالكترونات مع عدد البروتونات.
- تكون الأجسام **متعادلة كهربائيًا** لأنها تحتوي على عدد متساوٍ من الإلكترونات والبروتونات.
- توجد **قوة كهربائية** بين الجسيمات المشحونة، فالشحنات المتشابهة تتنافر، والشحنات المختلفة تتجاذب.
- يُمكّننا **قانون كولوم** من حساب القوة الكهروستاتيكية بين جسيمين مشحونين.
- تتغير السماحية الكهربائية بين مادة وأخرى، وهي تصف كيفية تأثير نوع المادة في شدّة المجال الكهربائي.

الدرس 3-2: المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

- عندما يُوضع جسيم مشحون داخل **مجال كهربائي**، فإنه يتعرض لقوة كهروستاتيكية. ويمكن تمثيل المجال الكهربائي **بخطوط المجال الكهربائي** التي تتجه بعيدًا عن الشحنات الموجبة وباتجاه الشحنات السالبة.
- تُحدِّد **طاقة الوضع الكهربائية** مقدار الشغل اللازم لتحريك شحنة من نقطة إلى أخرى في مجال كهربائي.
- يعتمد **الجهد الكهربائي** على موقع النقطة داخل المجال الكهربائي فقط وليس على مقدار الشحنة عند تلك النقطة.
- عندما تنتقل شحنة من النقطة A إلى النقطة B ، تتغير طاقة وضعها الكهربائية. ويمكن حساب هذا التغير في الطاقة بمعرفة **فرق الجهد الكهربائي** بين النقطتين.
- يمكن أن يكون الجول كمية كبيرة إلى حد ما عند حساب طاقة الوضع الكهربائية. و لذلك تُستخدم وحدة **الإلكترون فولت** في مثل هذه الحالات.
- تُستخدم **خطوط تساوي الجهد** لربط النقاط التي لها الجهد الكهربائي نفسه.

الدرس 3-3: المجال الكهربائي المنتظم

- ينتج **مجال كهربائي** منتظم بين لوحين مشحونين، وتتعرض الجسيمات المشحونة الموضوعة داخل المجال للتسارع.

تقويم الوحدة

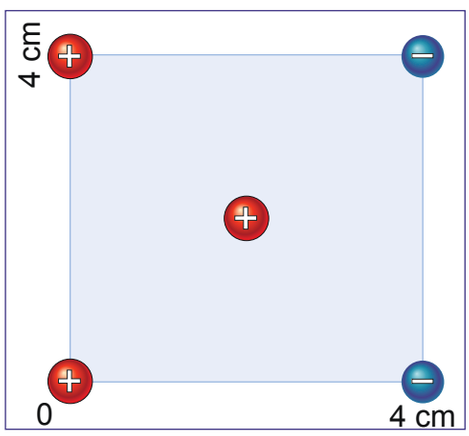
اختيار من مُتعدِّد

1. شحنتان كهربائيتان وضعتا في الفراغ على مسافة معينة من بعضهما. كيف تتغير القوة بين الشحنتين إذا مُلئ الفراغ بينهما بمادة ذات سماحية كهربائية أعلى؟
   a. تزداد القوة .
   b. تنخفض القوة .
   c. تبقى القوة كما كانت.
   d. ينعكس اتجاه القوة.

2. يدلك طالب ساقين من اللافلزات، كل منهما من مادة مختلفة، بقطعتين مختلفتين من القماش. وجد الطالب أن كلاً من الساقين تجذب الأخرى، فما هو التفسير الأكثر احتمالًا؟
   a. يؤدي دلك الساقين بالقطعتين إلى وجود شحنات موجبة على ساق وشحنات سالبة على الساق الأخرى.
   b. يؤدي دلك الساقين بالقطعتين إلى وجود شحنات موجبة على كل من الساقين.
   c. يؤدي دلك الساقين بالقطعتين إلى وجود شحنات سالبة على كل من الساقين.
   d. كل من الساقين متعادلة كهربائيًا.

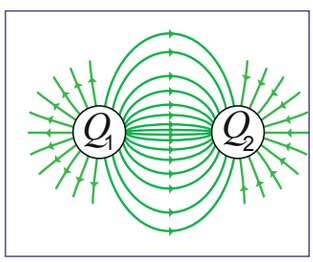
3. ما مقدار القوة الكهربائية بين شحنتين، مقدار كل منهما $+1\ \mu C$ ، وتفصل بينهما مسافة $1\ cm$؟
   a. $0.009\ N$
   b. $90\ N$
   c. $9 \times 10^{9}\ N$
   d. $9 \times 10^{25}\ N$

4. وُضعت أربع شحنات متساوية على زوايا مربع كما هو مبيّن في الشكل المجاور، فماذا سيحدث لشحنة موجبة إذا وُضعت في مركز المربّع بالضبط؟



   a. ستتحرك نحو الأعلى.
   b. لن تتحرك.
   c. ستتحرك قطريًا نحو الركن السفلي الأيمن.
   d. ستتحرك نحو اليمين

5. ما نوع كل من الشحنتين Q_1 و Q_2 على التوالي في الشكل المجاور؟



   a. موجبة، موجبة
   b. موجبة، سالبة
   c. سالبة، موجبة
   d. سالبة، سالبة

تقويم الوحدة

6. إذا تضاعفت المسافة بين شحنتين موجبتين، فماذا سيحدث للقوة الكهربائية بينهما؟

a. لا تتغير.

b. تنخفض إلى نصف قيمتها.

c. تزداد إلى أربعة أمثالها.

d. تنخفض إلى ربع قيمتها.

7. حُرّكت شحنة نقطية مقدارها 2.0 µC من النقطة X إلى النقطة Y. النقطة X جهدها 6.0 V + والنقطة Y جهدها 9.0 V+.

ما طاقة الوضع التي تكتسبها الشحنة النقطية؟

a. 0.02 µJ

b. 1.5 µJ

c. 6.0 µJ

d. 30 µJ

8. حُرّكت شحنة نقطية موجبة مقدارها 3.0 nC بسرعة ثابتة من نقطة إلى أخرى. كان الشغل المبذول على الشحنة النقطية 12 nJ ما فرق الجهد بين النقطتين؟

a. 0 V

b. 0.25 V

c. 4 V

d. 36 V

9. تم تعجيل إلكترون من السكون عبر فرق جهد $2 \square 10^{3}$ V. أيٍّ المقادير الآتية يساوي الطاقة الحركية للإلكترون بعد التسريع؟

a. $8 \square 10^{-23}$ J

b. $3.2 \square 10^{-16}$ eV

c. $2 \square 10^{3}$ eV

d. $2 \square 10^{3}$ J

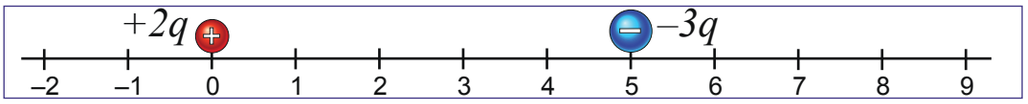
تقويم الوحدة

الدرس 3-1: قانون كولوم

10. أذكر ثلاثة أمثلة على القوة الكهربائية في الحياة اليومية.

11. تزداد السماحية النسبية في مادة تحتوي على شحنتين كهربائيتين من 1 إلى 2. كيف تتغير القوة الكهربائية بينهما نتيجة لذلك؟

12. شحنتان كهربائيتان $+2q$ و $-3q$ وضعتا على خط كما هو موضح.



أثبت أنه لا يوجد نقطة على الخط بين الشحنتين تكون عندها القوة على شحنة اختبار تساوي صفر.

13. ما القوة الكهربائية التي تؤثر في جسيم مشحون بشحنة سالبة مقدارها $q_1 = -10\ \mu C$ بواسطة جسيم آخر يحمل شحنة موجبة مقدارها $q_2 = 20\ \mu C$، ويبعد عنه مسافة $r = 10\ cm$؟

14. يفصل بين شحنتين q_1 مقدارها $2.0\ \mu C$ و q_2 مقدارها $4.0\ \mu C$ مسافة $r = 4.0\ cm$.

a. احسب القوة بين الشحنتين.

b. اذا كانت القوة المحسوبة في (a) هي F، كم تصبح القوة في الحالات التالية بدلالة F، ومن دون حساب:

- إذا تضاعفت r؟
- إذا تضاعفت كل من q_1 و r؟
- إذا تضاعفت كل من q_1 و q_2 و r؟

15. يفصل بين جسمين، كتلة كل منهما $10\ g$ وشحنتاهما $+5\ \mu C$ و $-10\ \mu C$ مسافة $1\ cm$.

a. ما اتجاه القوة الكهربائية بينهما؟

b. ما مقدار القوة بينهما؟

c. ما تسارع الشحنة الموجبة عند لحظة بداية تأثرها بالقوة؟

d. ما تسارع الشحنة السالبة عند لحظة بداية تأثرها بالقوة؟

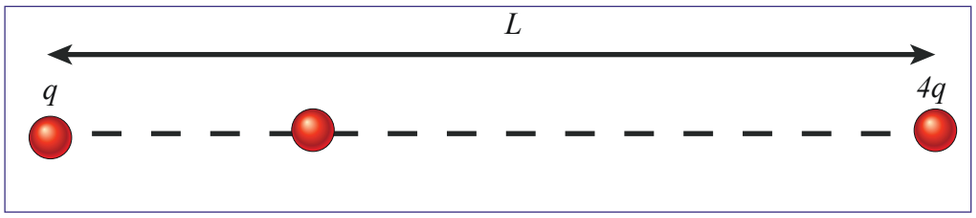
16. جسمان مشحونان بشحنتين $+20\ \mu C$ و $-20\ \mu C$، ويفصل بينهما مسافة $5\ cm$.

a. ما مقدار القوة الكهربائية بينهما؟

b. ما مقدار الكتلة التي تتعرّض لقوّة مكافئة للقوة الكهربائية، ولكن بسبب الجاذبية بالقرب من سطح الأرض؟

17. وُضع جسيم شحنته 100 µC- في منتصف المسافة بين جسيمين آخرين. يقع أحد الجسيمين عند النقطة $x = -5$ cm وشحنته 50 µC- ؛ ويقع الآخر عند النقطة $x = +5$ cm وشحنته 50 µC+. ما اتجاه القوة المؤثرة في الجسيم الأوسط؟ وما هو مقدارها؟

18. وُضِعت شحنتان كهربائيتان q و $4q$ كما هو موضح أدناه. إذا وضعت شحنة ثالثة بينهما بحيث تكون محصلة القوة على أي من الشحنات الثلاث صفرًا، فكم يكون مقدار هذه الشحنة الثالثة؟



الدرس 3-2: المجال الكهربائي والجهد الكهربائي

19. تُنشىء كرة موجبة الشحنة ومعزولة، مجالًا كهربائيًا في الفضاء المحيط بها، ويكون مقداره E_1 على بعد 1 m من الشحنة.

a. إذا تضاعفت المسافة إلى 2 m، فما معامل تغيّر E؟

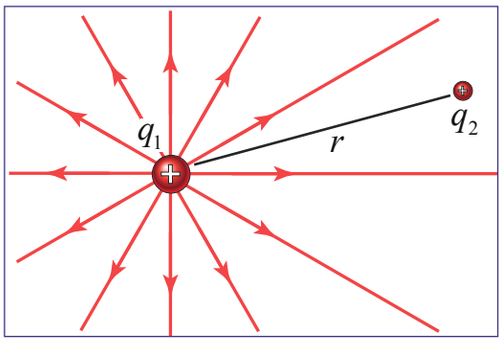
b. إذا تضاعفت المسافة ثلاث مرات إلى 3 m، فما معامل تغيّر E؟

c. ما البعد عن الشحنة الذي يكون المجال عنده صفرًا؟

20. ارسم مخططًا للمجال الكهربائي حول جسيمين مشحونين بشحنتين موجبين متماثلتين وتفصل بينهما مسافة قصيرة.

21. ارسم مخططًا للمجال الكهربائي حول جسيمين مشحونين بشحنتين سالبتين متماثلتين وتفصل بينهما مسافة قصيرة.

22. ينتج عن شحنة q_1 المجال الكهربائي الموضح. وضعت شحنة أخرى q_2 على مسافة r من q_1 كيف سيتأثّر الجهد الكهربائي إذا:



a. تضاعفت q_1؟

b. تضاعفت q_2؟

c. تضاعفت الشحنتان؟

d. تضاعفت المسافة بين الشحنتين؟

23. بيّن أن وحدتَيْ شدة المجال الكهربائي V/m و N/C متكافئتان.

24. تتعرض شحنة مقدارها +5 μC موضوعة في نقطة في الفراغ لقوة كهربائية مقدارها 3×10^{-5} N. احسب شدة المجال الكهربائي عند تلك النقطة.

25. كرة موصلة، نصف قطرها 15 cm، مشحونة بشحنة موجبة مقدارها 4 μC، موزعة على سطحها. ما شدة المجال الكهربائي الناتج عن تلك الشحنة عند الأبعاد الآتية من مركز الكرة:

a. 0 cm

b. 5 cm

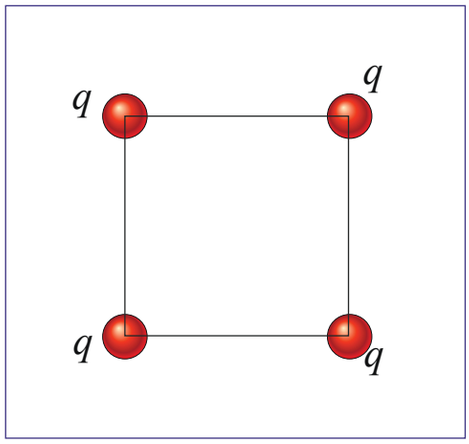
c. 15 cm خارج الكرة وعلى مقربة من سطحها.

d. 20 cm

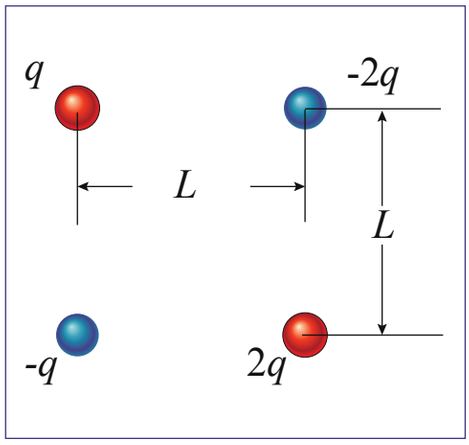
26. كتلة الإلكترون 9.1×10^{-31} kg وشحنته -1.6×10^{-19} C. افترض أنك تستطيع عزل إلكترون واحد في فراغ تام، ثم أنشأت مجالًا كهربائيًا لشدّ الإلكترون نحو الأعلى. ما شدة المجال الكهربائي اللازم لمعادلة وزن الإلكترون؟ (بمعنى آخر، وضع الإلكترون في حالة اتزان قوى)

27. ثلاثة جسيمات مشحونة، شحناتها موجبة ومتساوية، وضعت عند رؤوس مثلث متساوي الأضلاع. ارسم مخططًا للمجال الكهربائي الناتج عنها.

28. وضعت أربع شحنات كهربائية متماثلة كل منها q عند زوايا مربع كما هو موضح. ما شدة المجال الكهربائي عند مركز المربع؟



29. وضعت أربع شحنات كهربائية عند زوايا مربع طول ضلعه L كما هو موضح. احسب شدة المجال الكهربائي عند مركز المربع.



الدرس 3-3: المجال الكهربائي المنتظم

30. ما الفرق بين المجال الكهربائي المنتظم والمجال الكهربائي غير المنتظم؟

31. لماذا ينحني المجال الكهربائي بين اللوحين المتوازيين المشحونين بالقرب من أطرافه؟

32. صف الفرق بين القوة الكهربائية وقوة الجاذبية.

* **33.** قارن بين القوة الكهربائية التي تؤثر في إلكترون في ذرة هيدروجين وقوة الجاذبية التي تؤثر فيه.

* **34.** لوحان متوازيان وأفقيّان تفصل بينهما مسافة 15 cm. وُصل اللوح السفلي مع جهد 250 V- ووُصل اللوح العلوي مع جهد 250 V+. ووُضعت شحنة مقدارها 2- µC عند نقطة بين اللوحين وتبعد عن اللوح السفلي 3 cm.

a. ما طاقة الوضع الكهربائية للشحنة؟

b. ما طاقة الوضع الكهربائية للشحنة إذا تحركت الشحنة رأسيًا إلى أعلى إلى أن وصلت إلى نقطة تبعد 3 cm من اللوح العلوي؟

c. ما مقدار الشغل المبذول على الشحنة؟

* **35.** ما البعد بين لوحين موصلين، شدة المجال الكهربائي بينهما $4.5 \square 10^3$ N/C، وفرق الجهد بينهما 15 kV؟

* **36.** يتعرّض إلكترون لتسارعٍ في مجال كهربائي منتظم، شدته 2×10^6 V/m.

a. ما الطاقة بوحدة keV التي تُعطى للإلكترون إذا تسارع خلال مسافة 4 cm؟

b. ما البعد الذي يجب أن يُسَرَّع إليه الإلكترون لزيادة طاقته بمقدار 50 GeV؟

مسألة للبحث

يحمل البرق طاقة كهربائية هائلة. ما الخصائص الكهربائية لصواعق البرق؟ وكيف تتشكّل؟ استخدم عمليات البحث المتقدمة لجمع المعلومات من مصادر متعددة موثوقة. ادمج هذه المعلومات في مقالة علمية مترابطة. وضمِّنها تقييمًا لنقاط القوة والضعف الخاصة بكل مصدر.

الوحدة 4

سلوك الموائع

Fluid Behavior

في هذه الوحدة

الدرس 4-1: ديناميكا الموائع

الدرس 4-2: الغاز المثالي

P1207
P1208

4 الوحدة

مقدّمة الوحدة

عندما تُغلق جزءًا من فوهة خرطوم ماء بالإبهام، فإن الماء يخرج من الجزء المفتوح بشكل أسرع. يؤدي إغلاق فوهة الخرطوم جزئيًا إلى زيادة الضغط في الخرطوم، ويمثّل الضغط المتزايد مزيدًا من الطاقة. التأثير المماثل لهذا يحدث أثناء تدفّق الدم في جسمك، حيث تقل المساحة مع تدفّق الدم من الشرايين (الأكبر) إلى الشعيرات الدموية (الأصغر). نحتاج إلى المزيد من الضغط لدفع الدم من خلال الشعيرات الدموية. وينشأ هذا الضغط نتيجة لضخ الدم من القلب.

تعمل القوى في الموائع من خلال الضغط. وحدة قياس الضغط هي باسكال (N/m^2). يمكن أن تؤثر تغيّرات الضغط في كثير من خصائص المائع، مثل معدّل التدفّق والكثافة. يُنشىء الوزن ضغطًا هيدروستاتيكيًا داخل الغلاف الجوي وتحت سطح الماء.

سنرى في هذه الوحدة أن قوانين حفظ الطاقة وقوانين نيوتن لها أشكال جديدة في الموائع. تربط معادلة برنولي بين الضغط والكثافة والسرعة، ويربط قانون الغاز المثالي بين ضغط الغاز وحجمه ودرجة حرارته.

الأنشطة والتجارب

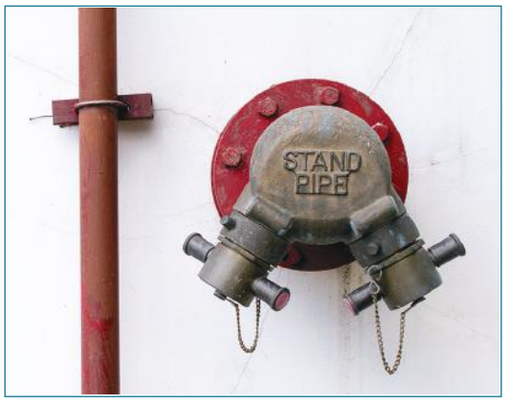
4-1 أمثلة على تأثير برنولي

4-2 الغاز المثالي

الدرس 1-4

ديناميكا الموائع
Fluid Dynamics

لن يؤدي توصيل خرطوم مياه بصنبور إطفاء إلى رشّ الماء لإطفاء حريق في أعلى مبنى يتألف من عدة طوابق. يكمن السبب في معادلة برنولي التي تنص على أنه، كلما ازداد الارتفاع الذي يجب أن يصل إليه المائع، فإن ضغطه ينخفض. لذا، فإن رشّ الماء بسرعة كبيرة على مستوى سطح الأرض، يتطلّب ضغط ماء 1034 kPa. أمّا سرعة ضخ الماء نفسها في الطابق 30 من مبنى، فتتطلّب ضغطًا يصل إلى 2068 kPa. يتراوح الضغط العادي للماء في الأنابيب التي تصل إلى منزلك وإلى صنبور الإطفاء أيضًا، بين 345 kPa و517 kPa. وللحصول على مزيد من الضغط، تستخدم شاحنات الإطفاء مضخات، مع الإشارة إلى أن المباني العالية تحتوي على أنابيب إطفاء رأسيّة ثابتة.



الشكل 1-4 نظام أنابيب الإطفاء الرأسية.

نظام أنابيب الإطفاء الرأسية هو امتداد لنظام صنبور الإطفاء الذي يتكون من سلسلة من الأنابيب تصل إلى أجزاء المبنى المختلفة. ويتصل هذا النظام بمضخة تزيد ضغط الماء وفقًا لارتفاع المبنى. وهناك تقنية أخرى تُستخدم في مكافحة الحرائق في المباني الشاهقة، وهي استخدام فوهات أصغر تُثبّت على الخراطيم، حيث تنتج الفوهات الأصغر سرعة تدفّق أكبر للماء.

مخرجات التّعلُّم

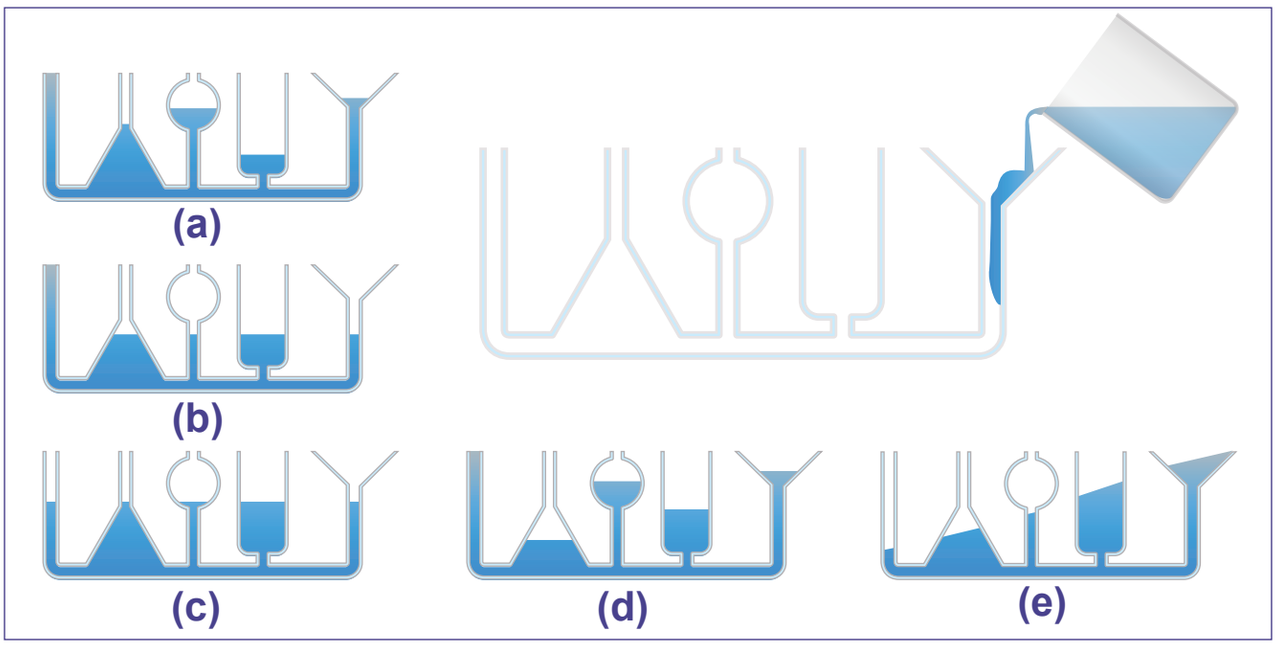
P1207.1 يناقش كيف تنطبق معادلة الاستمرارية ومبدأ برنولي على تدفق الموائع ويذكر أمثلة عملية.

المفردات

Fluid	مائع
Compressible fluid	مائع قابل للانضغاط
Incompressible fluid	مائع غير قابل للانضغاط
Flow rate	معدّل التدفّق
Equation of continuity	معادلة الاستمرارية
Bernoulli's equation	معادلة برنولي
Streamline	خط الانسياب

تدفّق المائع

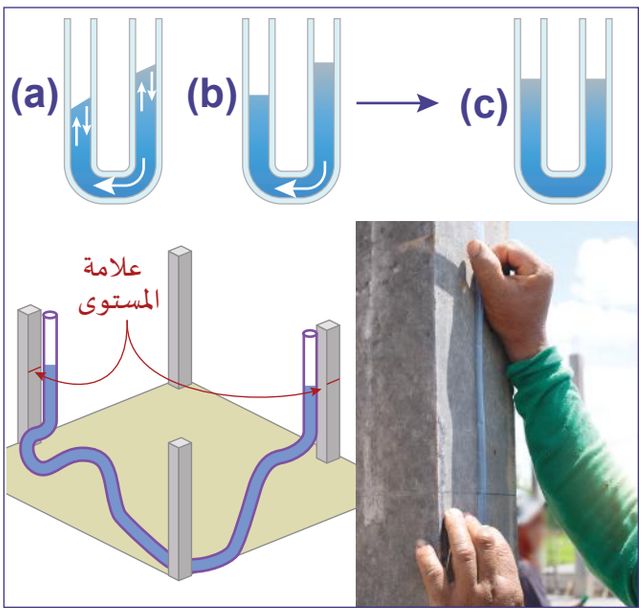
تخيّل أنك تملأ الأوعية المبيّنة في **الشكل 4-2**. أيٌّ من الرسوم التخطيطية الخمسة يبيّن بالضبط المستويات الموجودة في الوعاء بعد الاستقرار التام للمائع؟ ولماذا؟



الشكل 4-2 عرض لاتّزان المائع.

من أهم خصائص المائع قدرته على تغيير شكله تحت تأثير أية قوة، وإن كانت صغيرة جدًا. **الشكل 4-2** (c) فقط يشير إلى المائع وهو في حالة اتزان. ستستمر مستويات الموائع في الرسوم التخطيطية الأخرى في التغيّر مع تدفّق المائع إلى أن تتساوى جميع مستوياته.

يبيّن (**الشكل 4-3**) كيف يتدفّق المائع إلى أن تتساوى جميع مستوياته. يستخدم البناؤون هذا التأثير لجعل بناء الجدار مستويًا تمامًا على امتداد مسافة طويلة. وُصف الميزان المائي لأول مرة من قبل الرياضي والفيزيائي هيرون الإسكندري في القرن الأول قبل الميلاد.

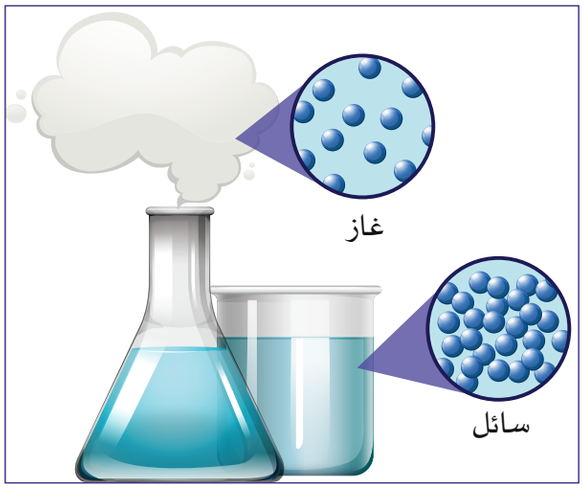


الشكل 4-3 تسبّب الاختلافات في مستوى المائع تدفّقه إلى أن تتساوى جميع مستوياته. وهذا هو مبدأ الميزان المائي الذي لايزال البناؤون يستخدمونه في هذه الأيام.

الميزان المائي هو خرطوم شفاف طويل مملوء بالماء جزئيًا، ويكون طرفاه مغلقين مبدئيًا. يوضع أحد طرفي الخرطوم عند نقطة مرجعية والطرف الآخر في المكان الذي يجب أن يكون في مستوى النقطة المرجعية. يفتح البنَّاء غطائَي الخرطوم ويضبط طرفيه بطريقة تجعل مستوى الماء في كلتا النقطتين متساويًا.

تعريف المائع

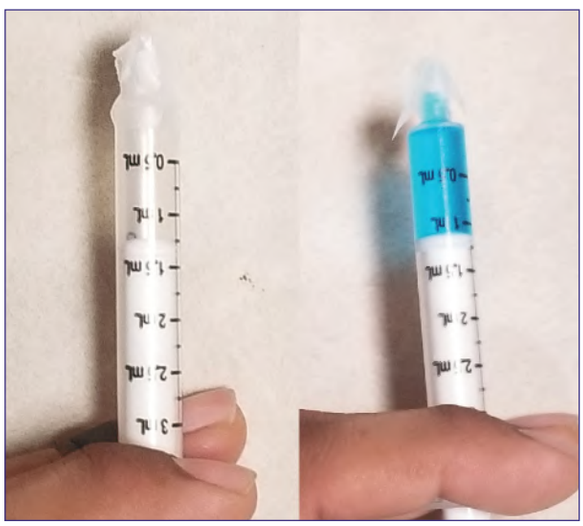
المائع Fluid هو شكل من أشكال المادة التي تتدفّق بسهولة وتغيّر شكلها استجابة لأية قوة تؤثر فيها. السوائل والغازات هي موائع (**الشكل 4-4**). تتخذ الموائع شكل الوعاء الذي يحتويها تحت تأثير قوة الجاذبية. حركة الموائع مهمة في جميع مجالات العلوم، بما في ذلك تدفّق الماء والهواء في البيئة والديناميكا الهوائية وتدفّق الدم داخل الجسم.



الشكل 4-4 السوائل والغازات موائع.

الموائع القابلة للانضغاط والموائع غير القابلة للانضغاط

يمكن أن تكون الموائع قابلة للانضغاط أو غير قابلة للانضغاط. حيث تتأثر كثافة **المائع القابل للانضغاط Compressible fluid** عندما يحدث تغيّر في الضغط، فالغازات هي موائع قابلة للانضغاط. افترض أن كمية من غاز وُضعت في محقن ذي نهاية محكمة الإغلاق (**الشكل 4-5a**): إذا أثرت بقوة في مكبس المحقن، فإن المكبس سيندفع أكثر داخل أسطوانة المحقن، وسيتّخذ الغاز حجمًا أقل، ما يؤدي إلى زيادة كثافة الغاز. وإذا سُمح للمكبس بالتمدّد، فإن الغاز سيشغل حجمًا أكبر من حجم الأسطوانة.



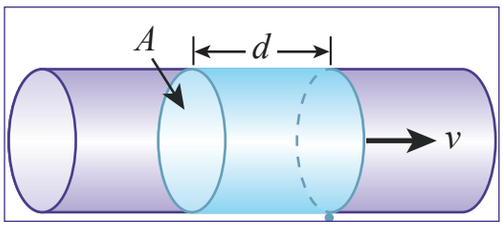
الشكل 4-5 (a) محقن مملوء بالهواء ومحكم الإغلاق؛ (b) محقن مملوء بالماء الملوّن ومحكم الإغلاق.

المائع غير القابل للانضغاط Incompressible fluid كثافته ثابتة، بغض النظر عن الضغط المحيط به، فالسوائل هي موائع غير قابلة للانضغاط. خذ محقنًا مملوءًا بسائل ومحكم الإغلاق (**الشكل 4-5b**). ما دام المحقن مغلقًا، فلا يمكنك أن تدفع المكبس إلى داخل الأسطوانة. تبقى كثافة السائل وحجمه ثابتين. وبالمثل، فإذا تركت فراغًا بين المكبس والسائل، فلن يتمدّد السائل ليملأ الفراغ.

يكون التغيّر في حجم السوائل نتيجة تغير الضغط أو درجة الحرارة قليل جدًا مقارنة بالغازات، لذلك نهمل هذا التغير.

معدل التدفق الحجمي

يُعرَّف **معدّل التدفق الحجمي VOLUMETRIC FLOW RATE** Q لمائع بأنه حجم المائع V الذي يعبر مساحة بشكل عموديّ عليها في زمن t. يكون الحجم في أنبوبة أسطوانية حاصل ضرب مساحة المقطع A بالمسافة d التي يقطعها المائع في وحدة الزمن كما في **الشكل 4-6**.



الشكل 4-6 أنبوبة فيها مائع غير قابل للانضغاط يتحرك بسرعة v.

1-4	معدل التدفق الحجمي		
	$Q = \frac{V}{t}$	Q	معدل التدفق الحجمي (m^3/s)
		V	الحجم (m^3)
		t	الزمن (s)

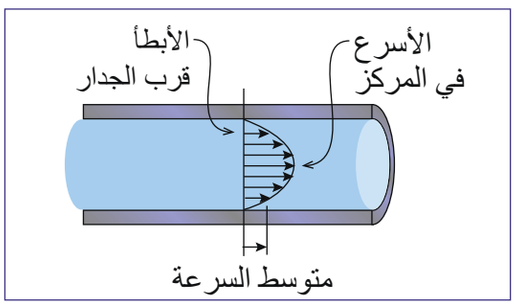
يمكن كتابة المسافة d التي يقطعها المائع على الشكل $d = vt$ حيث v هي السرعة المتوسطة لانسياب المائع. تعطي **المعادلة 4-2** معدّل التدفق الحجمي بدلالة السرعة المتوسطة v ومساحة المقطع العرضي للأسطوانة A.

2-4	معدل التدفق الحجمي		
	$Q = Av$	Q	معدل التدفق الحجمي (m^3/s)
		A	مساحة المقطع العرضي (m^2)
		v	السرعة المتوسطة للمائع (m/s)

عند حساب معدّل التدفق الحجمي في الأنبوبة، ستكون مساحة المقطع العرضي πr^2، لأن الأنابيب أسطوانية الشكل، فتصبح معادلة معدّل التدفق الحجمي.

3-4	معدل التدفق الحجمي		
	$Q = \pi r^2 v$	Q	معدل التدفق الحجمي (m^3/s)
		r	نصف القطر الداخليّ للأنبوبة (m)
		v	السرعة المتوسطة للمائع (m/s)

تستخدم معادلتا معدّل التدفق الحجمي 4-2 و 4-3 السرعة المتوسطة للمائع في الأنبوبة. هذه السرعة المتوسطة هي متوسط سرعات كافة نقاط المائع التي تتحرك بشكل عمودي على مساحة مقطع الأسطوانة، وهي المُعرّفة في العلاقة 4-1. وحدة معدّل التدفق الحجمي في نظام SI هي m^3/s . ويمكن استخدام وحدات أخرى في بعض التطبيقات مثل L/min. تختلف سرعة المائع الفعلية من نقطة إلى أخرى داخل الأنبوبة، فيؤدي الاحتكاك بجدران الأنبوبة إلى تثبيت المائع المتصل بجدران الأنبوبة. وتُسمّى الطبقة الثابتة هذه «الطبقة الحديّة» وتكون سرعة تدفق المائع عندها صفرًا. ويبدو تدرج السرعة أثناء التدفّق عبر الأنبوبة كاملًا كما في **الشكل 4-7**.



الشكل 4-7 صورة جانبية لسرعة المائع في أنبوبة.

مثال 1

معدل التدفّق الحجمي لمائع $6\ m^3/s$. احسب حجم السائل الذي سيتدفّق في دقيقة واحدة.

المطلوب: الحجم V

المُعطيات: معدّل التدفق الحجمي $Q = 6\ m^3/s$، الزمن $t = 1\ min$

العلاقات: $$Q = \frac{V}{t}$$

الحل: الزمن في هذا السؤال هو 1 دقيقة، أي 60 s.

باستخدام العلاقة المعطاة:

$$Q = \frac{V}{t} \Rightarrow V = Qt = (6)(60) = \boxed{360\ m^3}$$

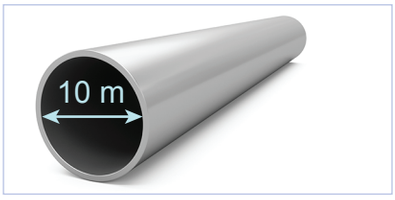
مثال 2

ما معدّل التدفق الحجمي للنفط في أنبوب قطره 10 m، إذا كانت سرعة تدفّق النفط 5 m/s؟

المطلوب: معدل التدفق الحجمي Q

المُعطيات: القطر $d = 10\ m$، السرعة $v = 5\ m/s$

العلاقات: $Q = Av$ أو $Q = \pi r^2 v$



الشكل 4-8 صورة أنبوبة قطرها 10 m.

الحل: قطر الأنبوب 10 m، فيكون نصف قطره 5 m

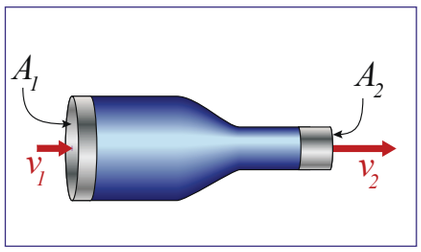
مساحة مقطع الأنبوب العرضي $A = \pi r^2 = \pi(5)^2 = 78.5\ m^2$

يمكن حساب معدل التدفق الحجمي على النحو الآتي:

$$Q = Av = 78.5\ (5) = \boxed{392.5\ m^3/s}$$

معدّل التدفق الحجمي في الأنابيب ذات الأقطار المختلفة

يبيّن (**الشكل 4-9**) أنبوب له مساحتي مقطع عرضي مختلفتين عند طرفيه. افترض مائع غير قابل للانضغاط، كالماء مثلا، يتدفق في الأنبوب. حجم المائع الذي يدخل الأنبوب عند A_1 في وحدة الزمن يجب أن يساوي حجم المائع الذي يخرج عند A_2.



الشكل 4-9 أنبوبة ذات مقطع عرضي متغير المساحة.

افترض أن الأنبوب في (**الشكل 4-9**) مملوء بالماء. إذا قمنا بضخ $1\ m^3$ من الماء في الأنبوب خلال ساعة واحدة، فإن $1\ m^3$ من الماء سيتدفّق خارجًا من الأنبوب خلال ساعة واحدة أيضًا. هذا يعني أن معدّل التدفّق عند مدخل الأنبوب يساوي معدّل التدفّق عند مخرجه، $Q_1 = Q_2$. سيكون معدّل التدفق الحجمي في الواقع هو نفسه في جميع أنحاء الأنبوب، Q = ثابت.

معدل التدفّق الحجمي للمائع غير القابل للانضغاط عند أي مساحة لمقطعين من الأنبوبة سيكون هو نفسه.

بما أن حجم المائع المتدفق في وحدة الزمن هو نفسه عند طرفي الأنبوبة، فإن معدل التدفق يجب أن يبقى ثابتًا أي $Q_1 = Q_2$. باستخدام العلاقة 4-1 يمكننا ربط السرعتين المتوسطتين v_1 و v_2 بمساحة المقطعين A_1 و A_2. ولأن $Q = \frac{V}{\Delta t} = \frac{A\,\Delta l}{\Delta t} = Av$

يكون معدل التدفق عند الطرفين هو نفسه: $Q_1 = Q_2$

فيكون: $A_1 v_1 = A_2 v_2$

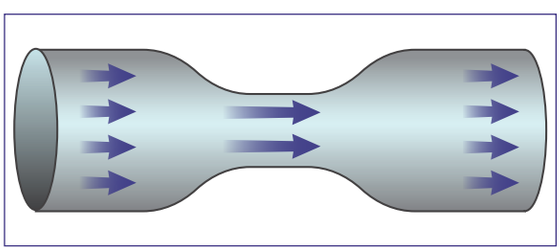
المعادلة 4-4 تُعرف **بمعادلة الاستمرارية Equation of continuity**، لأنها تصف معدّل التدفّق المستمر.

4-4	معادلة الاستمرارية		
$A_1 v_1 = A_2 v_2$		A_1	مساحة المقطع العرضي عند الموقع الأول (m^2)
		v_1	السرعة المتوسطة عند الموقع الأول (m/s)
		A_2	مساحة المقطع العرضي عند الموقع الثاني (m^2)
		v_2	السرعة المتوسطة عند الموقع الثاني (m/s)

توضّح معادلة الاستمرارية أنه، إذا كان المائع يتدفّق عبر مقطع أضيق من أنبوب، فإن سرعته ستزداد. أما إذا كان المائع يتدفّق عبر مقطع أوسع، فإن سرعته ستنخفض. تُلاحَظ هذه الظاهرة في كثير من الأماكن المختلفة، مثل خرطوم الحديقة المزوّد بفوهة ضيقة في نهايته لزيادة سرعة الماء المندفع.

أنبوبة فنتوري

تتكوّن أنبوبة فنتوري من أنبوب ذات ممرّ أضيق لحصر تدفّق المائع وزيادة سرعته (**الشكل 4-10**). تستخدم أنبوبة فنتوري في كثير من الأجهزة، مثل بخّاخات العطور ومضخّات الشفط ومازج الهواء (الكاربوريتر) في السيارات.



الشكل 4-10 أنبوبة فنتوري.

مثال 3

يبلغ قُطر خرطوم حديقة 1.8 cm، وهو مزوّد بفوهة قطرها 0.5 cm. احسب سرعة الماء في الخرطوم وفي فوهته إذا كان معدّل تدفّق الماء 0.5 L/s.

المطلوب: سرعة الماء عبر الخرطوم v_1،
سرعة الماء عبر فوهة الخرطوم v_2،

المُعطيات: قطر أنبوبة خرطوم الحديقة $d_1 = 1.8\ \text{cm}$،
قطر الفوهة $d_2 = 0.5\ \text{cm}$
معدّل التدفّق $Q = 0.5\ \text{L/s}$

العلاقات: $Q = Av$
$A_1 v_1 = A_2 v_2$

الحل: عبر الخرطوم: قطر الأنبوبة 1.8 cm. نصف قطر الأنبوبة سيكون $\frac{1.8}{2} = 0.9\ \text{cm}$.
وبالمتر، سيكون $9 \square 10^{-3}\ \text{m}$

مساحة مقطع الأنبوبة هي $A_1 = \pi r^2 = \pi(9 \times 10^{-3})^2 = 2.5 \square 10^{-4}\ \text{m}^2$.

معدّل التدفّق معطى بوحدة L/s. بتحويله إلى وحدات SI:

$$Q = \frac{0.5\ \text{L}}{1\ \text{s}} \times \frac{10^{-3}\ \text{m}^3}{1\ \text{L}} = 5 \times 10^{-4}\ \text{m}^3/\text{s}$$

يمكن حساب سرعة الماء في الخرطوم كما يأتي:

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{5 \times 10^{-4}}{2.5 \times 10^{-4}} = \boxed{2\ \text{m/s}}$$

فوهة الخرطوم:

قطر الفوهة 0.5 cm، ونصف قطرها $\frac{0.5}{2} = 0.25\ \text{cm}$. وبالمتر، سيكون $2.5 \square 10^{-3}\ \text{m}$.

لحساب سرعة الماء المتدفّق من الفوهة، يمكننا استخدام معادلة الاستمرارية.

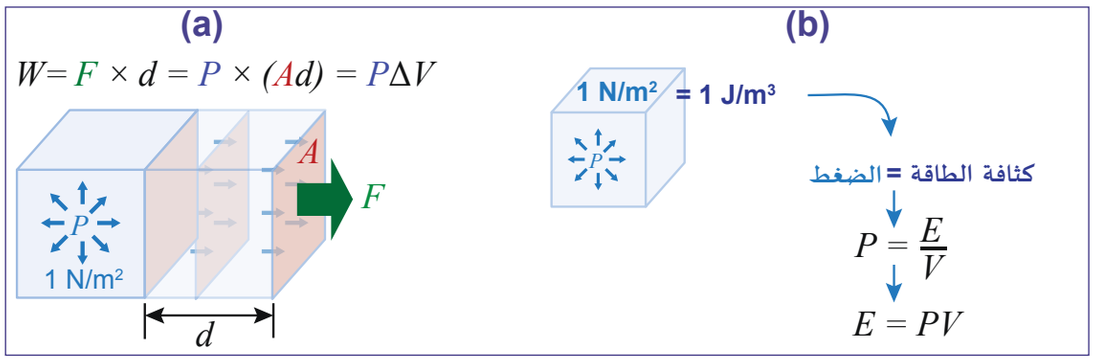
$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$\left(2.5 \times 10^{-4}\right)(2) = \left(\pi\left(2.5 \times 10^{-3}\right)^2\right) v_2$$

$$v_2 = \boxed{25.5\ \text{m/s}}$$

حفظ الطاقة في الموائع

الطاقة هي القدرة على بذل شغل. في الموائع، يجب علينا تركيز الاهتمام في الطاقة التي يسبّبها الضغط P. ترتبط الطاقة والضغط ارتباطًا وثيقًا لأن القوة هي حاصل ضرب الضغط في المساحة. فالشغل الذي يبذله الضغط، والذي يجعل الحجم يتمدّد مسافة d، يساوي $P\Delta V$ (**الشكل a11-4**).

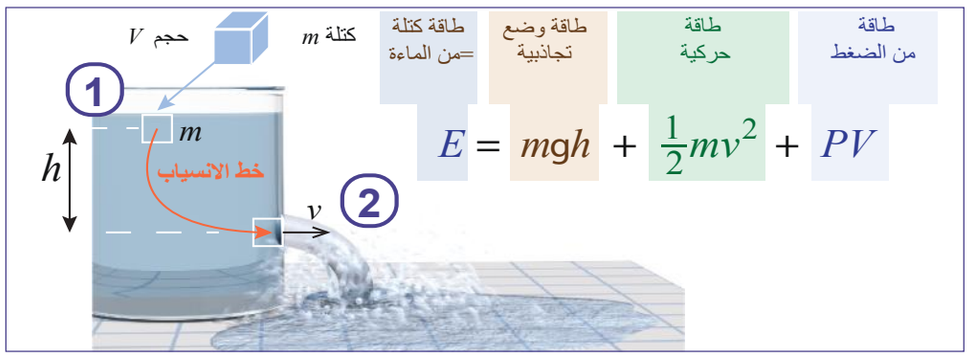


الشكل 4-11 الضغط والطاقة.

يمثّل الشغل المبذول تغيّرًا في الطاقة ΔE. فإذا كانت $\Delta E = P\Delta V$، فهذا يعني أن الطاقة الناتجة عن الضغط هي $E = PV$. يفيدنا ذلك في أن الضغط شكل من أشكال كثافة الطاقة (**الشكل b11-4**). كثافة الطاقة هي الطاقة في وحدة الحجوم.

لتوضيح حفظ الطاقة، تخيّل خزّانًا في أحد جوانبه ثقب، يخرج منه تيار من الماء. تتحوّل طاقة الضغط في داخل الخزّان إلى طاقة حركية عندما يخرج الماء.

1. يكون ارتفاع كتلة الماء في البداية h، ولكن من دون سرعة.
2. يفقد الماء ارتفاعه عند الثقب ويكتسب في المقابل طاقة حركية.



الشكل 4-12 حفظ الطاقة المطبّق على مائع بين نقطتين.

طاقة كتلة من الماء هي مجموع طاقة الوضع التجاذبية والطاقة الحركية وطاقة الوضع من الضغط. نفترض أن المستوى المرجعي لطاقة الوضع التجاذبية هو الخط الأفقي عند النقطة 2 حيث $h = 0$. فإذا جعلنا الطاقة الكلية عند النقطة (1) تساوي الطاقة الكلية عند النقطة (2)، فإن بإمكاننا حساب سرعة المائع.

الضغط عند النقطة a يساوي الضغط الجوي لانه عند السطح، والضغط عند b يساوي الضغط الجوي لأنه مكشوف للهواء.

$$mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV$$

(0) (same) (0) (same)

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

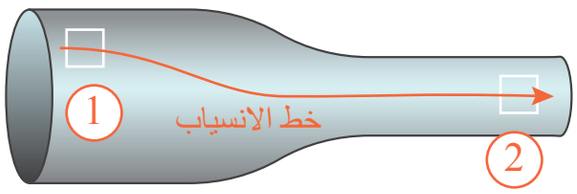
(same) (same)

$$gh = \frac{1}{2}v^2$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

معادلة برنولي

نطبّق قانون حفظ الطاقة في الموائع على كتلة المائع التي تتحرك على طول خط الانسياب. **خط الانسياب Streamline** هو خط وهمي يمثل مسار حركة جزء معين من المائع أثناء انسيابه. فإذا لم يكن هناك شغل متبادل مع كتلة المائع، فإن الطاقة تكون على طول خط الانسياب ثابتة.



$$E = mgh + \frac{1}{2}mv^2 + PV$$

الشكل 4-13 توضيح معادلة برنولي.

بمساواة الطاقة عند نقطتين من خط الانسياب نحصل على:

$$mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2 + P_1V_1 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2 + P_2V_2$$

نعيد كتابة معادلة الطاقة بالتعويض عن m بدلالة كثافة المائع ρ.

$$m = \rho V_1 = \rho V_2$$

$$\rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + P_1 = \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + P_2$$

وهي ما تسمى **بمعادلة برنولي Bernoulli's equation** (العلاقة 4-5)، وهي معادلة حفظ الطاقة عند تطبيقها لحركة مائع على خط انسياب.

5-4 معادلة برنولي

$$\text{ثابت} = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P$$

ρ	الكثافة (kg/m^3)
g	تسارع الجاذبية (m/s^2) أو (N/kg)
h	الارتفاع (m)
v	السرعة (m/s)
P	الضغط (N/m^2 أو Pa)

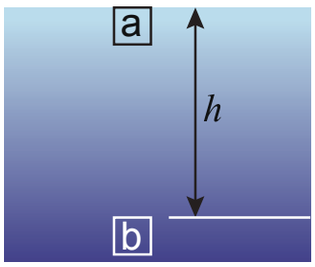
مثال 4

ما ضغط الماء عند عمق h تحت سطح المحيط؟

العلاقات:

$$\text{ثابت} = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P$$

الحل: نطبّق معادلة برنولي على السطح وعلى العمق h حيث $P = 0$ عند السطح لأن الضغط الجوي يتخذ كمرجع صفري في حساب الضغط النسبي. في كلتا الحالتين تكون السرعة صفرًا حيث أن الماء في حالة سكون.

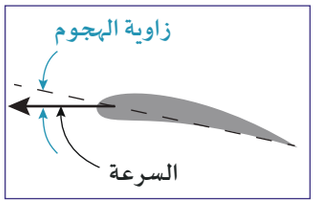


النقطة a النقطة b

$$\rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P = \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P$$

$$P = \rho gh$$

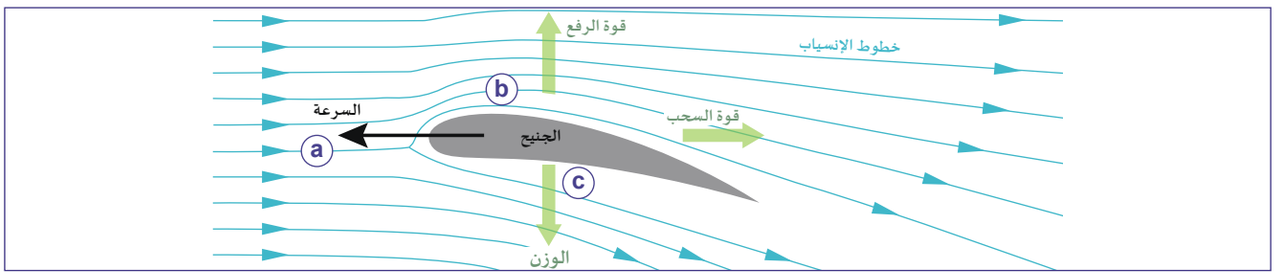
معادلة برنولي والطيران



الشكل 4-14 زاوية الهجوم.

لكي تتمكن الطائرة من الإقلاع، عليها أن تُولّد قوة رفع رأسية تساوي وزنها على الأقل. تنشأ قوة الرفع هذه من التحكم بحركة الهواء حول جناحي الطائرة (**الشكل 4-14**). المقطع العرضي للجناح له شكل جناح حامل (جنيح). يدفع محرك الطائرة الجناح للانطلاق في اتجاه معاكس لاتجاه قوة سحب الهواء. يدفع الجناح المتحرك الهواء المقابل له بسرعة عالية. وتؤدي طريقة انسياب الهواء إلى رفع الطائرة وإقلاعها.

يعمل الجناح على رفع الطائرة وفق الخطوات الآتية:



الشكل 4-15 خطوط الانسياب والقوى حول جنيح الطائرة خلال الاقلاع والطيران.

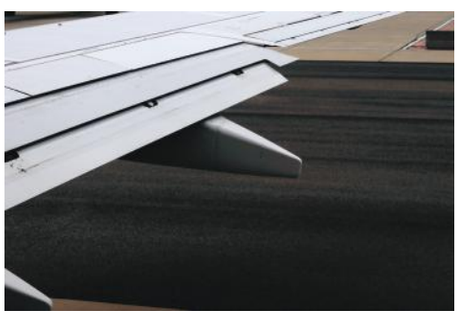
- يتقدم الجناح للأمام بسرعة فيشق الهواء عند النقطة (a) إلى مسارين؛ يتدفق أحدهما (b) فوق الجناح ويتدفق المسار الثاني (c) تحت الجناح.
- المسار العلوي (b) فوق الجناح تزداد فيه سرعة الهواء، بسبب نقصان المساحة الناتجة عن تقوس الجناح للأعلى.
- المسار السفلي (c) تقل فيه سرعة الهواء بسبب كبر المساحة تحت الجناح.

معادلة برنولي
بدلالة السرعة والضغط

$$\frac{1}{2}\rho v_a^2 + P_a = \frac{1}{2}\rho v_b^2 + P_b = \frac{1}{2}\rho v_c^2 + P_c$$

الشكل 4-16 معادلة برنولي لجنيح طائرة .

الطاقة الكلية عند النقاط a,b ,c تكون متساوية لان هذه النقاط جميعها تقع على خط انسياب واحد، لكن الذي يختلف هو توزيع الطاقة فإذا زادت طاقة الحركة تقل طاقة الضغط والعكس، بينما يبقى مجموعها ثابت.



الشكل 4-17 تقوّس جنيح الطائرة يؤدي إلى رفعها للأعلى.

يوضح (**الشكل 4-16**) لمعادلة برنولي أن الطاقة يجب أن تكون متساوية لكلا المسارين (b) و (c).

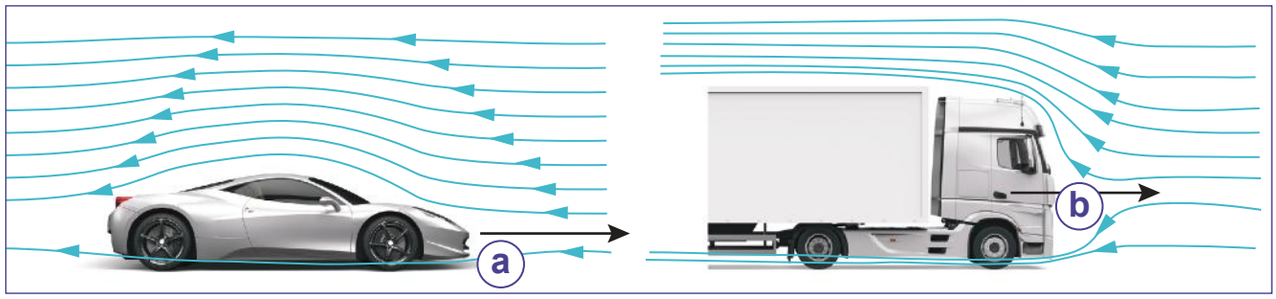
- تفيد السرعة العالية في المنطقة (b) بأن الضغط فوق الجناح يكون أقل، والسرعة المنخفضة في المنطقة (c) بأن الضغط تحت الجناح يكون أكبر.
- يوفر فرق الضغط جزءًا من قوة الرفع، فيندفع جناح الطائرة إلى الأعلى من منطقة الضغط المرتفع إلى منطقة الضغط المنخفض، رافعًا معه الطائرة.
- الجزء الآخر من قوة الرفع ينتج من أن الهواء يكتسب مركبة سرعة إلى الأسفل عندما يصطدم بالجناح، فيؤدي رد فعل هذه القوة إلى دفع الجناح للأعلى، ما يساهم في قوة الرفع.

معادلة برنولي وحركة السيارات

يتعيّن على محرك السيارة أن ينتج قوة كافية للتغلب على مقاومتين تؤثران في حركة السيارة:

1. الاحتكاك داخل أجزاء السيارة ومع الطريق.
2. الاحتكاك مع الهواء، والناتج عن دفع كتلة كبيرة من الهواء حول السيارة.

قوة الاحتكاك مع الهواء هي القوة التي تعترض حركة السيارة حيث يبدأ تأثيرها بالظهور عند 10 m/s (36 km/h). وعند بلوغ السيارة سرعة 27.8 m/s (100 Km / h)، فإن معظم طاقة المحرك تُستهلك لمقاومة الاحتكاك مع الهواء. يمكن التقليل من مقاومة الهواء بجعل خطوط سير الهواء حول السيارة أكثر انسيابية وذلك بتصميم هيكل السيارة ليكون انسيابي الشكل وتجنّب الانعطافات الحادة في جسم السيارة عند التصنيع.



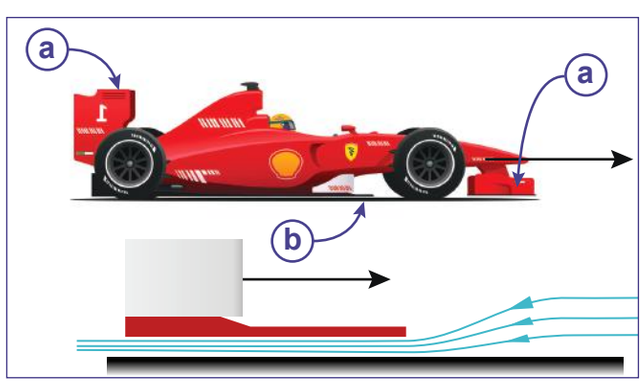
الشكل 4-18 خطوط انسياب الهواء حول سيارة (a) وحول شاحنة (b)

يظهر **الشكل 4-18** خطوط انسياب الهواء حول سيارة وشاحنة تتحركان بسرعة معينة. ينساب الهواء بسلاسة حول السيارة مع وجود مساحة صغيرة (a) فقط من مقدمة السيارة تفرض على الهواء الانحراف عن مساره بشكل سلس وانسيابي. أما الشاحنة فلها مساحة مقدمة كبيرة (b) تنخفض عندها سرعة الهواء عند تغير اتجاه سرعته حول الشاحنة وينساب الهواء بشكل حاد وِفقَ معادلة برنولي، يزداد ضغط الهواء عند (b) مع انخفاض سرعته. يدفع الضغط العالي الشاحنة إلى الخلف نتيجة للاحتكاك مع الهواء.

أما سيارات السباق فتستفيد من إنسياب الهواء للحصول على تأثير مختلف تمامًا. فسيارة السباق يجب أن تنطلق وتنعطف وتتوقف بسرعة. لذلك تُبذَل قوة كبيرة بين الإطارات وأرض الحلبة، لأن قوة الاحتكاك القليلة والناتجة عن وزن السيارة لا تؤدي إلى تماسك الإطارات بشكل جيد مع الطريق. لذلك تستخدم سيارات السباق تقنيات مختلفة لإنتاج قوة إضافية تدفع السيارة باتجاه الطريق وتكون أضعاف قوة وزن السيارة.

a. يؤدي استخدام أجنحة مقلوبة عند مقدمة السيارة ومؤخرتها للحصول على قوة رأسية إلى أسفل نتيجة لحركة الهواء.

b. يندفع الهواء في الممر الضيّق تحت السيارة فتزداد سرعته. يؤدي ازدياد سرعة الهواء إلى انخفاض ضغطه فيُنتِجُ قوة شفط تجعل السيارة متماسكة مع الأرض.



الشكل 4-19 إنتاج قوة رأسية إلى أسفل في سباق السيارات نتيجة لتدفق الهواء.

مثال 5

تزداد سرعة الماء في خرطوم حديقة من 2 m/s إلى 25.5 m/s عندما ينتقل الماء عبر فوهة الخرطوم. احسب الضغط في داخل خرطوم الحديقة إذا كان الضغط في الفوّهة $1 \square 10^5\ \text{N/m}^2$.

علمًا أن كثافة الماء 1000Kg/m^3

المطلوب: الضغط في خرطوم الحديقة P_1،

المُعطيات: سرعة الماء داخل خرطوم الحديقة $v_1 = 2\ \text{m/s}$،

سرعة الماء الخارج من الفوّهة $v_2 = 25.5\ \text{m/s}$،

الضغط في الفوّهة $P_2 = 1 \square 10^5\ \text{N/m}^2$،

كثافة الماء $\rho = 10^3\ \text{kg/m}^3$،

العلاقات: $\rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + P = \text{ثابت}$

الحل: عند حل السؤال المتعلق بمعادلة برنولي، يجب أن يؤخذ في الحسبان أن هذا السؤال يكون حول حفظ الطاقة. في هذا السؤال، ينتقل الماء من خرطوم الحديقة إلى الفوهة، فتتغير سرعة الماء. ويشير السؤال إلى أن الضغط يتغيّر أيضًا. هنا، يمكن تجاهل ارتفاع الماء لأن مستوى الماء لم يتغير في الحالتين . المجموع الكليّ للطاقات في موقع معيّن يساوي المجموع الكليّ للطاقات في موقع آخر. سرعة الماء في خرطوم الحديقة أصغر بكثير من سرعة الماء الخارج من الفوهة. وهذا يعني أن ضغط الماء في خرطوم الحديقة سيكون أكبر بكثير من ضغط الماء الذي يخرج من الفوهة. يمكننا وضع المعادلة على النحو الآتي:

$$\rho g\cancel{h_1}^{0} + \frac{1}{2}\rho v_1^{\,2} + P_1 = \rho g\cancel{h_2}^{0} + \frac{1}{2}\rho v_2^{\,2} + P_2$$

$$\frac{1}{2}\left(10^3\right)(2)^2 + P_1 = \frac{1}{2}\left(10^3\right)(25.5)^2 + \left(1\times10^5\right)$$

$$P_1 = \boxed{423{,}125\ \text{N/m}^2}$$

نشاط 4-1 أمثلة على تأثير برنولي

سؤال الاستقصاء	ملاحظة تأثير برنولي في أمثلة مختلفة.
الموادّ المطلوبة	ورق، ماصّات، علبتا مشروب غازي، قمع، كرة تنس طاولة (بينج بونج).

خطوات النشاط 1

اطوِ ورقة من المنتصف واجعلها مثل الخيمة، كما هو مبيّن في (**الشكل 4-20**).

1. استخدم الماصّة لتنفخ في الخيمة الورقية.
2. ماذا تلاحظ؟
3. اشرح كيف يظهر تأثير برنولي في هذه الملاحظة.

الشكل 4-20 ترتيب الورق والماصّة.

خطوات النشاط 2

1. خذ علبتَيْ مشروب غازي فارغتين وضع إحداهما بالقرب من الأخرى كما هو مبيّن في (**الشكل 4-21**).
2. استخدم ماصّة للنفخ بين العلبتين.
3. ماذا تلاحظ؟
4. اشرح كيف يظهر تأثير برنولي في هذه الملاحظة.

الشكل 4-21 ترتيب علبتَي المشروب الغازي.

خطوات النشاط 3

1. ضع كرة تنس الطاولة (بينج بونج) في داخل قمع كما في (**الشكل 4-22**).
2. انفخ في الجزء السفلي من القمع لرفع الكرة
3. ماذا تلاحظ؟
4. اقلب القمع والكرة داخله وثبتها بأصبعك، ثم أعد النفخ مرة أخرى وابعد أصبعك عن الكرة.
5. ماذا تلاحظ؟
6. اشرح كيف يظهر تأثير برنولي في هذا النشاط.

الشكل 4-22 ترتيب كرة البينج بونج والقمع.

تقويم الدرس 4-1

1. ما العلاقة بين معدّل التدفق الحجمي وسرعة المائع؟

2. a. ما الفرق بين مائع قابل للانضغاط ومائع غير قابل للانضغاط؟
   b. حدّد 3 مواد تُعدّ مثالًا على مائع غير قابل للانضغاط.

3. كيف يمكننا أن نولّد زيادة في سرعة التدفّق في أنبوب؟ هل يكون ذلك بتقليل نصف قطر الأنبوب أم بزيادته؟ وضّح اختيارك.

4. إذا تضاعفت مساحة المقطع العرضي لأنبوب يتدفق فيه ماء تسع مرات. كيف تتغير سرعة تدفّق الماء فيه؟

5. لماذا نتعرض للخطر إذا وقفنا بالقرب من خطوط السكك الحديدية عندما يمر عليها قطار سريع؟

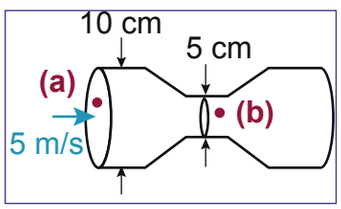
6. احسب الضغط على عمق 10 m في مائع كثافته $5000\ kg/m^3$.

7. يُخزن الماء في برج مبنى. وعندما ينتقل الماء من البرج إلى الشقق المختلفة، يتغير حجم الأنابيب، فينتقل الماء بسرعة 5 m/s في الأنبوب الذي قُطره 0.5 m. ويزداد قطر الأنبوب إلى 1.5 m. فما سرعة الماء في الأنبوب الذي قُطره 1.5 m إذا أهملنا الطاقة المهدورة؟

8. كوب ورقي مملوء بالماء وُضع على طاولة. أحدث طالب ثقبًا في الكوب على بعد 10 cm في أسفل حافته. ما سرعة الماء المتدفّق من الثقب؟

9. تستخدم مصفاة نفط الإيثانول كوقود، فيتدفّق الإيثانول عبر الأنبوب بسرعة ثابتة 1 m/s وضغط 101,300 Pa في أنبوب الوقود. فإذا أُريد زيادة ضغط الإيثانول في الأنبوب إلى 202,600 Pa، فما الفرق في ارتفاع الأنبوب؟ (كثافة الإيثانول $789\ kg/m^3$).

10. يتناقص قطر انبوب اسطواني أفقي من 10 cm إلى 5 cm، ثم يعود إلى 10 cm مرة أخرى. يدخل هواء كثافته $1\ kg/m^3$ الأنبوب بسرعة متوسطة 5 m/s عند النقطة (a) حيث الضغط 100 kPa. احسب الضغط عند النقطة (b).



الدرس 2-4

الغاز المثالي
Ideal Gas

المفردات

ضغط مطلق	Absolute pressure
قانون بويل	Boyle's Law
قانون شارل	Charles's law
قانون جاي لوساك	Gay-Lussac's law
غاز مثالي	Ideal gas
قانون الغاز المثالي	Ideal gas law
ثابت الغاز المثالي	Ideal gas constant
ثابت بولتزمان	Boltzmann constant

اكتسبت مناطيد الهواء الساخن مؤخرًا شعبية واسعة وشاع استخدامها في كثير من المراكز السياحية. كيف تطفو مناطيد الهواء الساخن؟ عند تسخين الهواء داخل المنطاد تتباعد جزيئاته فيزداد حجمه. الزيادة في الحجم تجعل الهواء داخل المنطاد أقل كثافة من كثافة الهواء خارج المنطاد، فيرتفع.

الشكل 4-23 منطاد هواء ساخن.

مخرجات التّعلُّم

P1208.1 يشتق ويستخدم قوانين الغازات ومعادلة الغاز المثالي: ($PV = nRT$).

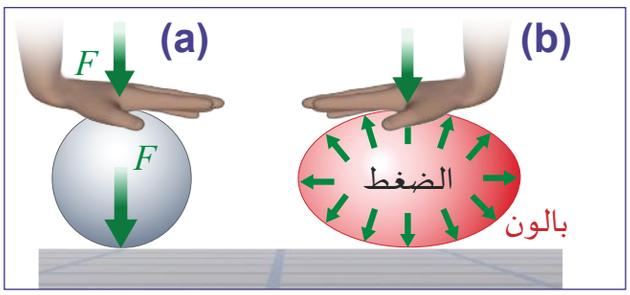
P1208.2 يوضح بطريقة تجريبية كيف تؤدّي معادلة الغاز المثالي إلى مفهوم الصفر المطلق لدرجة الحرارة.

P1208.3 يطبّق نموذج الحركة الجزيئية على الغاز المثالي، ويشرح من حيث الحجم الجزيئي والقوى بين الجزيئات، كيف ينحرف سلوك الغازات الحقيقية عن نموذج الغاز المثالي تحت الضغط المرتفع ودرجات الحرارة المنخفضة.

P1208.4 يوضح أن المعالجة النظرية للحركة الجزيئية وضغط الغاز يؤدّيان إلى العلاقة ($PV = \frac{1}{3}Nm(\overline{v})^2$) ومن خلال دمجها مع معادلة الغاز. ويدرك أن متوسط الطاقة الحركية للجزيء بسبب حركته يتناسب مع درجات حرارته المطلقة.

ضغط الغازات

مفهوم الضغط مهم لأن القوى في الموائع تعمل بشكل مختلف عن القوى في المواد الصلبة. يوضح **الشكل a24-4** كيفية تطبيق القوة على جسم صلب، مثل كرة البولينج، وكيفية انتقال هذه القوة داخل الكرة بشكل تقريبي.



الشكل 4-24 القوة على جسم صلب (a) وعلى هواء في بالون (b).

ينشئ الضغط قوى تتوزع على جميع الأسطح الملامسة للمائع. في **الشكل b24-4**، تُنشىء القوة المطبقة على بالون ضغطًا موزعًا يعمل على جميع الأسطح الملامسة للهواء في الداخل. عندما تضغط على بالون، يؤثر المائع (الهواء) بداخله بضغط منتظم نحو الخارج في كل الأنحاء داخل البالون. يزداد الضغط في البالون إلى أن يتّزن الضغط الذي تؤثر به مساحة يدك على البالون مع القوة المؤثرة نحو الأسفل.

الضغط المطلق

يبلغ متوسط ضغط الغلاف الجوي عند مستوى سطح البحر 101,325 Pa. تستخدم مقاييس الضغط لقياس ضغط الموائع داخل الأجسام، كما في الإطارات. ضغط الموائع هذا هو ضغط يُضاف إليه ضغط الغلاف الجوي.

الضغط المطلق Absolute pressure هو مجموع ضغط المقياس وضغط الغلاف الجوي. إذا كانت قراءة مقياس ضغط 36,542 Pa، فهذا يعني أن الضغط المطلق هو:

$$101{,}325 + 36{,}542 = 137{,}867 \text{ Pa}$$

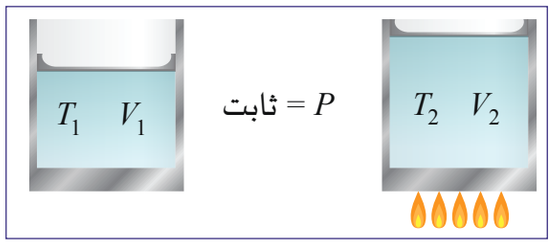
زيادة الضغط في مضخّة دراجة هوائيّة

- ضع شريطًا حراريًا على السطح الخارجي للمضخّة (**الشكل 4-25**).
- اسحب مقبض مضخّة الدراجة إلى أن تمتلئ بالهواء.
- سدّ طرف المضخّة لئلّا يتمكّن الهواء من التسرب.
- اضغط المضخّة.
- ماذا يحدث لدرجة الحرارة على الشريط الحراري؟
- هل كان التغيير فوريًا؟
- ما الذي يحدث لجزيئات الهواء داخل المضخّة؟

الشكل 4-25 مضخّة دراجة هوائيّة مع شريط حراري.

درجة الحرارة والحجم وقانون شارل

يتناسب حجم الغاز المحصور طرديا مع درجة الحرارة المطلقة (على مقياس كلفن)، عند ثبات ضغط الغاز، أي $V \propto T$. (**الشكل 4-26**) يسمى هذا القانون **بقانون شارل Charles's law** على اسم العالم الفرنسي جاك شارل

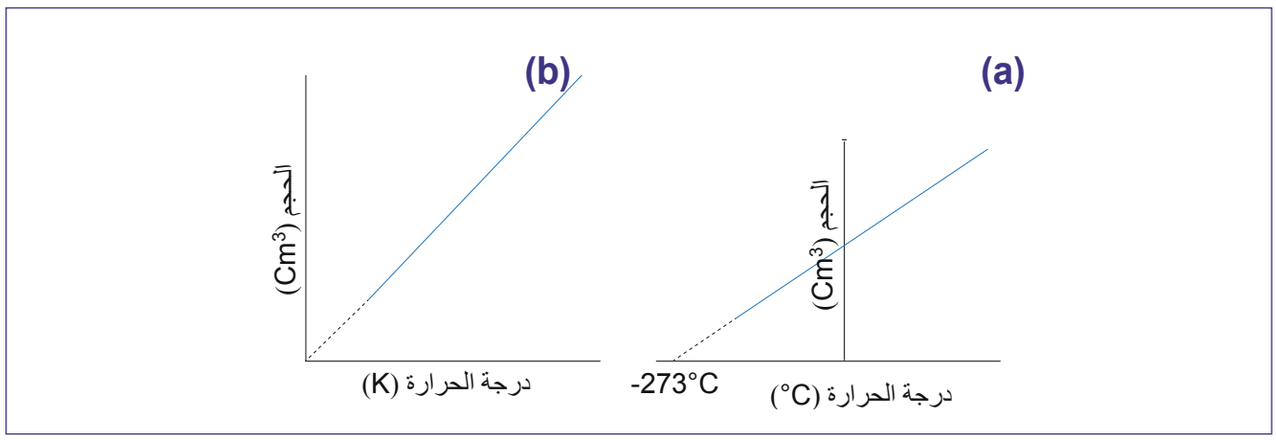


الشكل 4-26 قانون شارل: يتناسب الحجم طرديا مع درجة الحرارة المطلقة عند ضغط ثابت .

يوضح **الجدول 4-1** قيم درجة الحرارة السيليزية والحجم لغاز عند ضغط ثابت. نلاحظ أن العلاقة بين درجة الحرارة والحجم علاقة خطية كما في **الشكل 4-27**. وإذا أكملنا رسم الخط البياني إلى اليسار (حيث درجة الحرارة السالبة)، يكون الحجم صفرا عند درجة حرارة 273°C –. تسمى درجة الحرارة هذه **بالصفر المطلق Absolute zero**.

الجدول 4-1: العلاقة بين حجم غاز محصور ودرجة حرارته بثبات الضغط.

الحجم (cm^3)	20	21.8	23.7	25.4
درجة الحرارة (°C)	0	25	50	75



الشكل 4-27 (a) قانون شارل: تغير حجم الغاز مع درجة الحرارة (بوحدة °C) عند ضغط ثابت. (b) قانون شارل: تغير حجم الغاز مع درجة الحرارة (بوحدة K) عند ضغط ثابت.

الصفر المطلق هو أقل قيمة طبيعية لدرجة الحرارة. يبدأ **مقياس كلفن Temperature scale** لدرجة الحرارة عند الصفر المطلق والفرق بين درجاته يساوي الفرق بين درجات المقياس المئوي (السيليزي). يتجمّد الماء عند درجة حرارة 273 K ويغلي عند درجة حرارة 373 K. تقاس درجات حرارة المقياس المطلق بالكلفن (K) ولا يُشار إليها بـ °K. وباستخدام المقياس المطلق، تكون صيغة قانون شارل نسبة حجم الغاز إلى درجة حرارته المطلقة تساوي مقدارًا ثابتًا. (**المعادلة 4-6**)

6-4 قانون شارل

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

V_1	الحجم الابتدائي (m^3)
T_1	درجة الحرارة الابتدائية (K)
V_2	الحجم النهائي (m^3)
T_2	درجة الحرارة النهائية (K)

الصفر المطلق

تقيس درجة الحرارة الطاقة الحركية المتوسطة والعشوائية لجسيمات الغاز. فعند انخفاض درجة الحرارة، تتحرك الجسيمات بسرعة أبطأ. وعند درجة حرارة الصفر المطلق، تكون حركة الجسيمات عند أقل سرعة تسمح بها ميكانيكا الكم. لا يمكن لدرجة الحرارة أن تكون دون الصفر المطلق، وليس هناك قيم سالبة لدرجة الحرارة على مقياس كلفن.

- لتحويل درجة الحرارة من سيليزي إلى كلفن نُضيف 273 لدرجة الحرارة السيليزية. فمثلاً درجة الحرارة 10°C تساوي 283 K (المعادلة 4-7)
- لتحويل درجة الحرارة من كلفن إلى سيليزي نطرح 273 من درجة الحرارة المطلقة. فمثلًا درجة الحرارة 373 K تساوي 100°C (**المعادلة 4-7**)

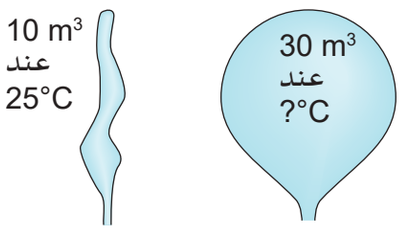
7-4	تحويل درجات الحرارة بين مقياسي كلفن وسيليزي		
T_K	$T_K = T_C + 273$	$T_C = T_K - 273$	درجة الحرارة المطلقة (K)
T_C			درجة الحرارة السيليزية (°C)

- يجب أن تكون درجة الحرارة وفق مقياس كلفن، أي المقياس المطلق.
- يجب أن يكون الضغط بقيمته المطلقة التي تشتمل على الضغط الجوي (100,000 Pa)

درجة الحرارة والضغط اللذين يظهران في معادلات الغاز المثالي هما درجة الحرارة المطلقة (K) والضغط المطلق (Pa).

مثال 6

يحتوي بالون هواء ساخن على كمية من الهواء حجمها $10\ m^3$ ودرجة حرارتها 25°C. إلى أي درجة حرارة يجب أن يُسخّن الهواء بحيث يصبح حجمه النهائي $30\ m^3$؟



المطلوب: درجة الحرارة النهائية T_2 بوحدة °C

المُعطيات: $V_2 = 30\ m^3$ ؛ $V_1 = 10\ m^3$ $T_1 = 25°C$

العلاقات:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

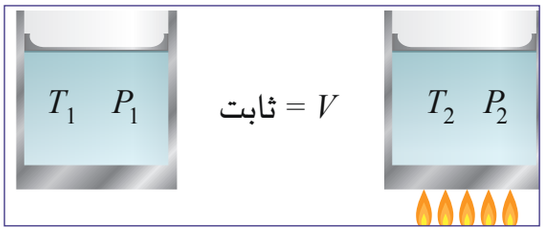
الحل: $T_1 = 25 + 273 = 298\ K$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \rightarrow T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 = \frac{(30\ m^3)}{(10\ m^3)}(298) = 894K$$

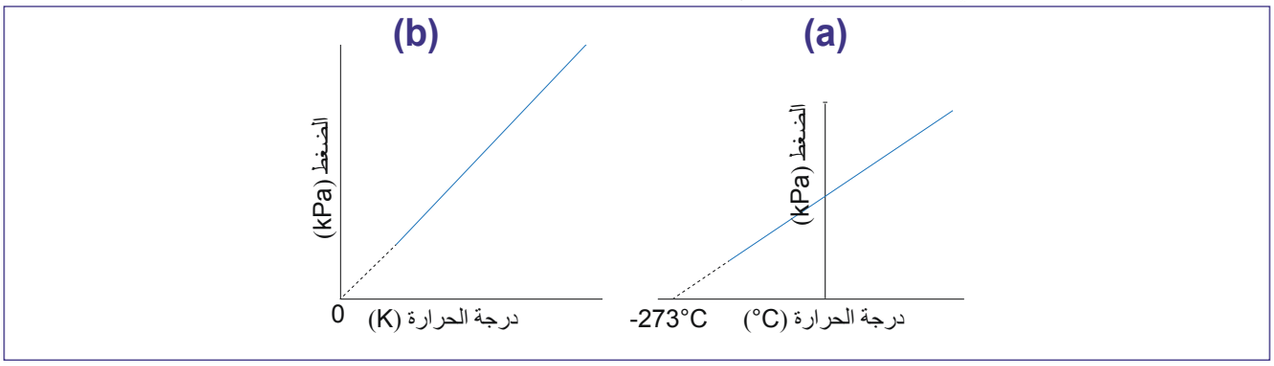
التحويل من كلفن إلى الدرجة المئوية: $T_2 = 894\text{-}273 =$ **621°C** $T_C = T_K - 273$

درجة حرارة الغازوضغطه، وقانون جاي لوساك

إذا بقي حجم الغاز ثابتًا، فإن ضغط الغاز يتناسب طرديًا مع ازدياد درجة حرارته على مقياس كلفن، أي $P \propto T$. فعند ثبوت الحجم، يزداد الضغط كلما ارتفعت درجة الحرارة(**الشكل 4-29**). تسمى هذه العلاقة بقانون **جاي-لوساك Gay-Laussac's law** تكريما للعالم الفرنسي جوزف جاي-لوساك الذي اكتشفه في العام 1809.



الشكل 4-28 عند حجم ثابت، يزداد الضغط بازدياد درجة الحرارة.



الشكل 4-29 (a) علاقة الضغط بدرجة الحرارة (بوحدة °C) عند حجم ثابت. (b) علاقة الضغط بدرجة الحرارة (بوحدة K) عند حجم ثابت.

يمكن صياغة قانون جاي-لوساك كما في **المعادلة 4-8**. نلاحظ أن درجة الحرارة المطلقة والضغط المطلق يتناسبان طرديًا، أي $P \propto T$.

8-4 قانون جاي لوساك

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

P_1	الضغط الابتدائي (Pa أو N/m^2)
T_1	درجة الحرارة الابتدائية (K)
P_2	الضغط النهائي (Pa أو N/m^2)
T_2	درجة الحرارة النهائية (K)

مثال 7

سُخِّنَت كمية من غاز عند حجم ثابت من درجة حرارة 25°C وضغط 100 kPa إلى درجة حرارة 1000°C. ما هو الضغط النهائي للغاز؟

المطلوب: $P_2=?$

المُعطيات: $P_1=100\ kPa$,$T_1=25°C$,$T_2=1000°C$

العلاقات:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

الحل:

$T_{K1}=T_{C1}+273=25+273=298$

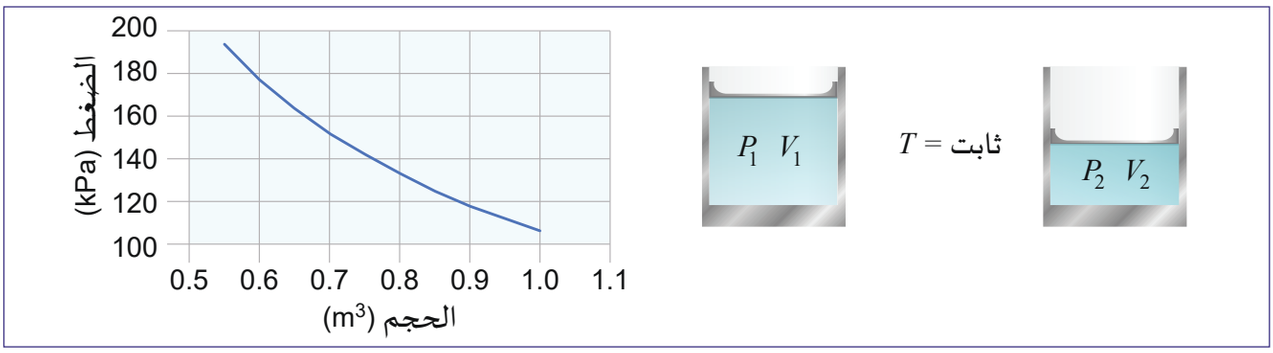
$T_{K2}=T_{C2}+273=1000+273=1273\ K$

$$\frac{P_1}{T_1}=\frac{P_2}{T_2} \rightarrow P_2=\frac{T_2}{T_1}P_1=\frac{(1273)}{(298)}\times(100000) \qquad P_2 = 427181\ Pa$$

ضغط الغاز وحجمه (قانون بويل)

افترض كمية من الغاز محصورة في اسطوانة مزودة بمكبس متحرك. عند تحريك المكبس صعودًا ونزولًا، تبقى كمية الغاز (كتلته) هي نفسها بينما يمكن لكل من درجة الحرارة والضغط والحجم أن يتغير.

إذا نقص حجم الغاز في الأسطوانة، فإن ضغطه سيزداد (**الشكل 4-30**) . يقدم **قانون بويل Boyle's law** الصياغة الرياضية لهذه العلاقة، وهي أن الضغط يتناسب عكسيا مع الحجم عند درجة حرارة ثابتة، أي $P \propto \frac{1}{V}$. والعكس صحيح أيضًا، فكلما ازداد حجم الغاز انخفض ضغطه.



الشكل 4-30 قانون بويل: يزداد ضغط الغاز مع نقصان حجمه.

يمكن التعبير عن قانون بويل **بالمعادلة 4-9**. التي تفيد أن الضغط يتناسب عكسيًا مع الحجم $P \propto \frac{1}{V}$.

4-9 قانون بويل

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

P_1	الضغط الابتدائي (Pa أو N/m^2)
V_1	الحجم الابتدائي (m^3)
P_2	الضغط النهائي (Pa أو N/m^2)
V_2	الحجم النهائي (m^3)

مثال 8

يبلغ حجم كمية من الغاز $9 \times 10^{-4}\ m^3$ وضغطها 200 kPa. إذا ازداد الضغط إلى 600 kPa عند ثبات درجة الحرارة، فما الحجم الجديد للغاز؟

المطلوب: الحجم النهائي للغاز V_2.

المُعطيات : الضغط الابتدائي $P_1 = 200\ kPa$،
الضغط النهائي $P_2 = 600\ kPa$،
الحجم الابتدائي $V_1 = 9 \times 10^{-4}\ m^3$،

العلاقات: $P_1V_1 = P_2V_2$،

الحل: استخدام قانون بويل $P_1V_1 = P_2V_2$

$$(200)(9\times10^{-4}) = (600)V_2$$

$$V_2 = \boxed{3\times10^{-4}\ m^3}$$

مثال 9

غاز، حجمه $0.002\ m^3$ عند درجة حرارة $22^\circ C$، سُخِّن عند ضغط ثابت فازداد حجمه إلى $0.004\ m^3$. ما درجة الحرارة النهائية؟

المطلوب: درجة الحرارة النهائية T_2،

المُعطيات: الحجم الابتدائي $V_1 = 0.002\ m^3$،
الحجم النهائي $V_2 = 0.004\ m^3$،
درجة الحرارة الابتدائية $T_1 = 22^\circ C$،

العلاقات: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ ،

الحل: نحوّل درجة الحرارة إلى الكلفن: $T_1 = 22 + 273 = 295\ K$

باستخدام قانون شارل: $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{0.002}{295} = \frac{0.004}{T_2}$

$T_2 = \boxed{590\ K}$

مثال 10

درجة الحرارة الابتدائية لغاز هي $37^\circ C$ وضغطه الابتدائي $300\ kPa$. يتم وضع الغاز داخل حاوية ذات حجم ثابت. كم سيبلغ ضغط الغاز، إذا ازدادت درجة حرارته إلى $87^\circ C$؟

المطلوب: الضغط النهائي P_2،

المُعطيات: درجة الحرارة الابتدائية $T_1 = 37^\circ C$،
درجة الحرارة النهائية $T_2 = 87^\circ C$،
الضغط الابتدائي $P_1 = 300\ kPa$،

العلاقات: $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$ ،

الحل: التحويل من الدرجة المئوية إلى الكلفن: $T_1 = 37 + 273 = 310\ K$

$T_2 = 87 + 273 = 360\ K$

تطبيق قانون جاي لوساك: $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \Rightarrow \frac{300}{310} = \frac{P_2}{360}$

$P_2 = \boxed{348\ kPa}$

الغاز المثالي

يعتمد فهمنا الحديث للغازات على الغاز المثالي. **الغاز المثالي Ideal gas** هو شكل تخيّلي للمادة يساعدنا على فهم السلوك الحقيقي للغازات. خصائص الغاز المثالي هي:

- يتكون من جسيمات صغيرة تتحرك بشكل عشوائي، ولها كتلة، وحجمها مهمل مقارنة بحجم الوعاء الموجودة فيه.
- تتفاعل هذه الجسيمات فقط من خلال التصادمات المرنة الكلية التي تتبادل فيها الطاقة وكمية الحركة فيما بينها، وبينها وبين الجدران التي تحصر الغاز.
- لا توجد قوى متبادلة بين جسيمات الغاز المثالي إلا أثناء التصادم.
- زمن التصادمات بين جسيمات الغاز المثالي صغير جدا بالمقارنة مع الفترات الزمنية بين التصادمات الميكانيكية. من الناحية العملية، ذرات الغاز صغيرة جدًا، ما يسمح للغازات الحقيقية أن تتصرّف مثل الغازات المثالية عند ضغوط منخفضة (مثل 1 ضغط جوي) وعند درجات حرارة أعلى بكثير من درجة غليان المادة.

قانون الغاز المثالي

تم التوصل إلى قانون بويل وقانون شارل وقانون جاي لوساك تجريبيًا. يصف كل من هذه القوانين العلاقات بين كميتين قابلتين للقياس من (الحجم ودرجة الحرارة والضغط)، مع ثبات الكمية الثالثة. إذا قمنا بدمج القوانين الثلاثة، فنتوصل إلى قانون الغاز المثالي. من الناحية الحسابية، يعطينا الجمع بين القوانين الثلاثة ما يأتي:

تجريبيًا، لوحظ أن الثابت في هذه الحالة يساوي حاصل ضرب عدد مولات الغاز n وثابت الغاز المثالي R ، أي $R \square n$.

ثابت الغاز المثالي هو ثابت عالمي قيمته: $R = 8.31\ \text{JK}^{-1}\,\text{mol}^{-1}$، بالتعويض عن الثابت، نحصل على **المعادلة 4-10**. كقانون الغاز المثالي: $\frac{PV}{T} = \text{ثابت}$

10-4	قانون الغاز المثالي		
$PV = nRT$		P	الضغط (Pa أو N/m^2)
		V	الحجم (m^3)
		n	عدد مولات الغاز
		R	ثابت الغاز ($8.31\ \text{JK}^{-1}\,\text{mol}^{-1}$)
		T	درجة الحرارة (K)

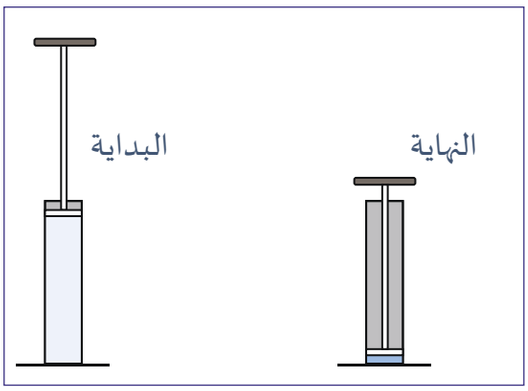
حل أسئلة قانون الغاز المثالي

عندما يتغيّر كل من الضغط والحجم ودرجة الحرارة، فإن قانون الغاز المثالي يمكن استخدامه وفق الصيغة:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

مثال 11

تحتوي مضخّة الدراجة الهوائية على $8 \square 10^{-4}\ m^3$ من الغاز. ضُغِطَ الغاز حتى وصل حجمه إلى $8 \square 10^{-5}\ m^3$ بعد أن ازداد الضغط من 101kPa إلى 1100 kPa. إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية 20°C، فما هي درجة الحرارة النهائية؟ وكم يبلغ عدد مولات الغاز الموجودة في المضخّة؟



الشكل 4-31 مضخة دراجة هوائيّة.

المطلوب: درجة الحرارة النهائية T_2، عدد المولات n

المُعطيات:
درجة الحرارة الابتدائية $T_1 = 20°C$،
الحجم الابتدائي $V_1 = 8 \times 10^{-4}\ m^3$،
الضغط الابتدائي $P_1 = 101\ kPa$،
الحجم النهائي $V_2 = 8 \times 10^{-5}\ m^3$،
الضغط النهائي $P_2 = 1{,}100\ kPa$،

العلاقات:
$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$ ،
$$PV = nRT$$،

الحل:
نُحوّل من الدرجة المئوية إلى الكلفن: $T_1 = 20 + 273 = 293\ K$
نستخدم قانون الغاز المثالي:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

$$\frac{(101\times10^3)(8\times10^{-4})}{293} = \frac{(1{,}100\times10^3)(8\times10^{-5})}{T_2}$$

$$T_2 = \boxed{319\ K}$$

لحساب عدد المولات: $PV = nRT$. نستخدم المعطيات في الحالة النهائية

$$(1{,}100\times10^3)(8\times10^{-5}) = n(8.31)(319)$$

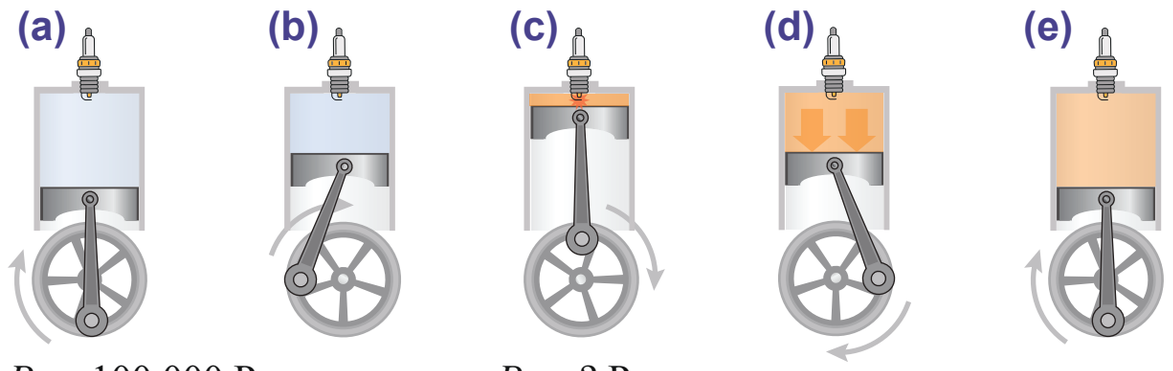
$$n = \boxed{0.033\ moles}$$

مثال 12

يُزوّد محرك السيارة بمكبس يضغط حجم الغاز في الأسطوانة كما في **الشكل 4-32 a**. عندما يصل المكبس المتحرك إلى أقصى ارتفاع، تقوم شمعة الإشعال بإحداث شرر يؤدي إلى إشعال الغاز الناتج من مزيج الهواء وبخار الوقود كما في **الشكل 4-32 c**. يؤدي ذلك إلى ارتفاع كبير ومفاجئ في درجة حرارة الخليط وضغطه. يؤدي الضغط الكبير إلى تمدد الغاز في الأسطوانة وينتج القوة المطلوبة من المحرّك (**الشكل 4-32 d**). يمكننا إهمال كمية الوقود القليلة واعتبار الغاز هو الهواء فقط.

a. إحسب أقصى قيمة لضغط الغاز خلال دورة المحرّك.

b. احسب ضغط الغاز في المرحلة (e) بافتراض أن درجة الحرارة تبقى ثابتة بين (c) و (e).



$P_1 = 100{,}000\ \text{Pa}$ $\quad$ $P_2 = ?\ \text{Pa}$

$V_1 = 5.0 \times 10^{-4}\ \text{m}^3$ $\quad$ $V_2 = 5.5 \times 10^{-5}\ \text{m}^3$

$T_1 = 30°\text{C}$ $\quad$ $T_2 = 2100°\text{C}$

الشكل 4-32 دورة محرك سيارة نموذجي .

المطلوب: أقصى ضغط عند النقطة c و الضغط النهائي عند e

المُعطيات: $T_1 = 30°C, V_1 = 5.0 \square 10^{-4}\ m^3, P_1 = 100\ kPa, Vc = 5.5 \square 10^{-5}\ m^3, T_2 = 2100C$

العلاقات: $\dfrac{P_1V_1}{T_1} = \dfrac{P_2V_2}{T_2}$

الحل: نُحوّل من الدرجة المئوية إلى الكلفن:

$T_1 = 30 + 273 = 303K, T_2 = 2100 + 273 = 2373K$

أقصى قيمة للضغط تكون في الوضع c

(a) $P_c = \dfrac{P_aV_aT_c}{T_aV_c} = \dfrac{(100{,}000)(5.0 \times 10^{-4})(2373)}{(303)(5.5 \times 10^{-5})} = 7{,}120{,}000\ \text{Pa} = 71.2\ \text{atm}$

(b) $P_e = \dfrac{P_cV_c}{V_e} = \dfrac{(7{,}120{,}000)(5.5 \times 10^{-5})}{(5.0 \times 10^{-4})} = 783\ 200\ \text{Pa} = 7.83\ \text{atm}$

كمية الغاز تبقى ثابتة

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$$

نشاط 4-2 الغاز المثالي

سؤال الاستقصاء	ما العلاقة التي تربط الضغط والحجم ودرجة حرارة الغاز؟
الموادّ المطلوبة	الوصول إلى محاكاة الكمبيوتر.

الخطوات

1. أدخل القيم في أي من مربعات النص لتشغيل المحاكاة. (**الشكل 4-33**)
2. درجة الحرارة والحجم والضغط محدّدة بخصائص واقعية للمواد.

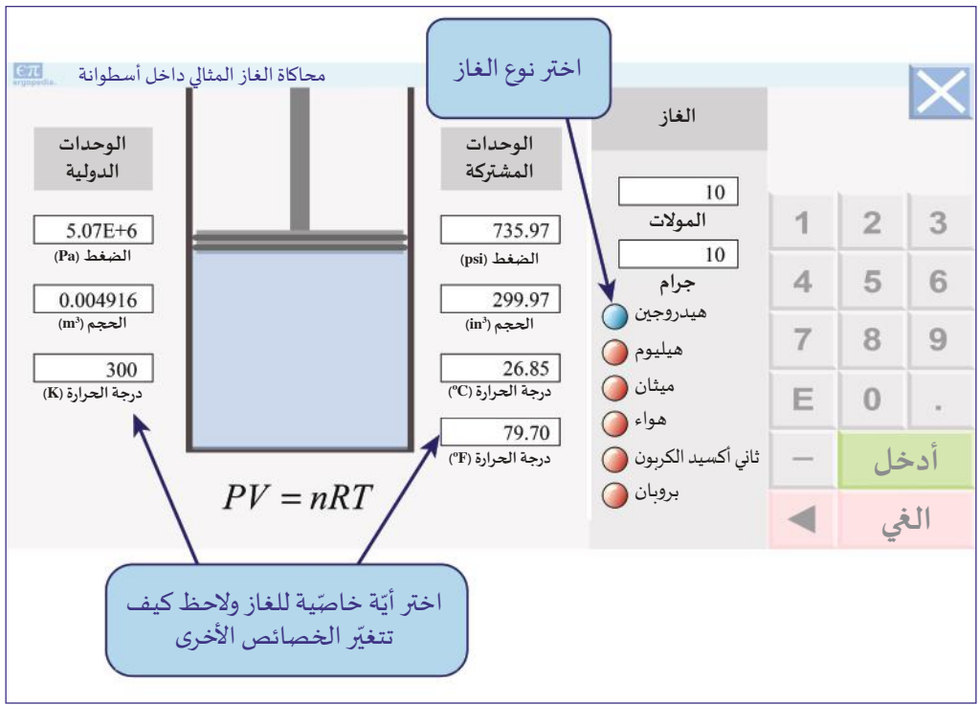
أسئلة

a. ما الحجم الذي يشغله 1 mole من الهواء عند 101.325 Pa و 0°C ؟ قارن بين هذا الحجم وحجم الغازات الأخرى عند الشروط ذاتها.

b. يتغير ضغط هواء الإطارات عندما تتغير درجة الحرارة. افترض أن ضغط الإطار قد ارتفع إلى 220,632 Pa عند 20°C. كم يصبح الضغط إذا انخفضت درجة الحرارة إلى -20°C؟

c. إذا استخدم الإطار نفسه في القيادة على الطريق الصحراوي ، فكيف يتغير الضغط؟ قدّر ضغط المقياس مع التعليل.

d. كيف يتغيّر الضغط إذا تمت مضاعفة كمية الغاز عند درجة حرارة وحجم ثابتين؟



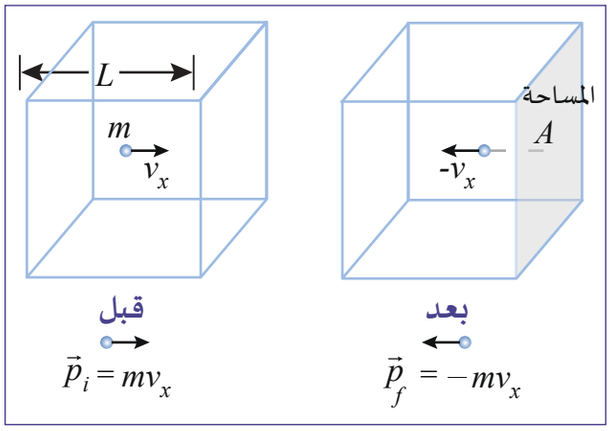
الشكل 4-33 محاكاة غاز مثالي.

النظرية الحركية وقانون الغاز المثالي

يمثل قانون الغاز المثالي الصلة بين الحركات المجهرية للجسيمات في الغاز وكمياتها التي يمكن معاينتها وقياسها في المختبر، مثل درجة الحرارة والضغط. لفهم كيفية الحصول بدقّة على معادلة الغاز المثالي، نحتاج إلى تحديد متوسط الضغط على جدران الوعاء والناتج عن تصادم جزيئات الغاز.

الضغط الناتج عن جزيء غاز واحد في وعاء

تخيّل جسيمًا يتحرك بسرعة متجهة v_x في الاتجاه x في صندوق طوله L كما في **الشكل 4-34**. سيصطدم الجسيم بالسطح الداخلي للصندوق ومساحته A، ويرتد بسرعة $-v_x$. الضغط هو القوة مقسومة على المساحة، أمّا القوة فهي معدل التغير في كمية الحركة $F=\frac{\Delta p}{\Delta t}$. بعد التصادم بالجدار، يكون التغير في كمية الحركة: $\Delta p = -mv_x - mv_x = -2mv_x$.



الشكل 4-34 كمية الحركة لجسيم في صندوق.

ينتقل الجسيم ذهابًا وإيابًا مسافة $2L$ بين تصادمين مع الجدار الأيمن. الزمن المستغرق لاجتياز المسافة $2L$ هو $\Delta t = \frac{2L}{v_x}$. لذلك، يكون متوسط القوة:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{-2mv_x}{\left(\frac{2L}{v_x}\right)} = -\frac{mv_x^2}{L}$$

الإشارة السالبة سببها أن القوة على الجسيم تغير اتجاه كمية حركته. ولحساب الضغط على الجدار نحتاج إلى أن تكون قوة رد الفعل موجبة على الجدار. معدل الضغط يأتي من هذه القوة الموجبة مقسومة على مساحة الجدار A:

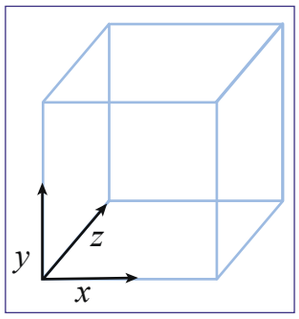
$$P = \frac{F}{A} = \frac{\left(\frac{mv_x^2}{L}\right)}{A} = \frac{mv_x^2}{A \times L} = \frac{mv_x^2}{V} \Rightarrow PV = mv_x^2$$

يمكن استخدام الحجم $V = A \square L$. نلاحظ أن PV تؤدي لحساب الطاقة الحركية للجزيء في الاتجاه x.

PV هي الطاقة الحركية لجسيم يتحرك في الاتجاه x.

الضغط الناتج من عدة جسيمات من الغاز

لقد حسبنا العلاقة $P \times V$ الناتجة عن جسيم غاز واحد فقط يتحرك في الاتجاه x. في الواقع، هناك جزيئات غاز متعددة في الوعاء، وهذه الجسيمات تتحرك في اتجاهات عشوائية.



الشكل 4-35 الاتجاهات x و y و z في صندوق.

نلاحظ الصندوق في **الشكل 4-35**. لا يوجد اتجاه يتميز عن آخر في هذا الصندوق. متوسط السرعات في اتجاهات x و y و z متساوية. ونعبّر عن ذلك رياضيًا بـ: $v_x^2 = v_y^2 = v_z^2$، فيكون مربع السرعة الكلية للجسيم:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

متوسط مركبات السرعة في جميع الاتجاهات متساوية، لذلك، يمكننا استخدام: $v^2 = 3v_x^2$.

لقد تم اشتقاق متوسط مربع السرعة لجسيم واحد من جسيمات الغاز. أما عند حساب متوسط مربع السرعة لعدد من الجسيمات فسنحصل على:

$$\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$$

أو

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3}\overline{v^2}$$

ولعدد N من الجسيمات، يعطى حاصل ضرب PV **بالمعادلة 4-11** وهو شكل آخر من قانون الغاز المثالي.

11-4 قانون الغاز المثالي

$$PV = \frac{1}{3}Nm\overline{v^2}$$

P	الضغط (Pa أو N/m^2)
V	الحجم (m^3)
N	عدد جسيمات الغاز
m	كتلة الجزيء (kg)
$\overline{v^2}$	متوسط مربع سرعة جزيء الغاز $(m/s)^2$

مثال 13

وُضعت كمية (10 mol) من غاز الهيدروجين في إناء حجمه ($0.05\ m^3$)، فكان ضغط الغاز (400 kPa). إذا علمت أن كتلة مول جزيئات الهيدروجين تساوي ($0.002\ kg$)، احسب متوسط مربع سرعات جزيئات غاز الهيدروجين في الإناء.

المطلوب: $\overline{(v^2)} = ?$

المُعطيات: $n = 10\ mol\ ,\ M = 2 \times 10^{-3}\ kg\ ,\ V = 0.05\ m^3,\ P = 4 \times 10^5\ Pa$

العلاقات: $N = nN_A\ ,\ m = \frac{M}{N_A}\ ,\ PV = \frac{1}{3}Nm\overline{v^2}$

الحل: بتطبيق العلاقة:

$$PV = \frac{1}{3}Nm\overline{v^2} = \frac{1}{3}nN_A\frac{M}{N_A}\overline{v^2} = \frac{1}{3}nM\,v^2$$

$$\overline{v^2} = \frac{3PV}{nM} = \frac{3(4\times10^5)(0.05)}{10(2\times10^{-3})} = 3\times10^6\ (m/s)^2$$

الهيليوم

الهيليوم هو الغاز الأقرب إلى الغاز المثالي. ليس للهيليوم جزيئات لأنه غاز أحادي الذرة. القوى الذرية بين ذرات الهيليوم صغيرة جدًا، ما يسمح له بالبقاء في الحالة الغازية حتى عند درجات حرارة منخفضة للغاية وعند ضغط مرتفع. المسافات الكبيرة بين ذرات الهيليوم هي التي تسمح للهيليوم بأن يكون أقل كثافة و مثاليا لملء المناطيد و البالونات (**الشكل 4-36**).

الشكل 4-36 المسافات الكبيرة بين ذرات الهيليوم تجعله أقل كثافة.

الطاقة الحركية للغاز المثالي

يمكن الحصول على متوسط الطاقة الحركية للغاز المثالي باستخدام قانون الغاز المثالي. شكلا قانون الغاز المثالي هما:

$$PV = \frac{1}{3}Nm\overline{v^2}$$

$$PV = nRT$$

المعادلتان تعطينا: $\frac{1}{3}Nm\overline{v^2} = nRT$

عدد المولات n يساوي عدد الجسيمات مقسومًا على عدد افوجادرو (6.022×10^{23} /mol)،

أي $n = \frac{N}{N_A}$. بتعويض n وضرب المعادلة السابقة بـ $\frac{3}{2}$ نحصل على:

$$\frac{3}{2}\left(\frac{1}{3}Nm\overline{v^2}\right) = \frac{3}{2}\frac{NRT}{N_A}$$

حيث R وN_A ثابتان. وحاصل القسمة $\frac{R}{N_A}$ يساوي 1.38×10^{-23} J/K ويعرف **بثابت بولتزمان** **Boltzmann constant** k_B. ويمكن تلخيص المعادلة السابقة لتصبح:

$$\frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}k_BT$$

$\frac{1}{2}m\overline{v^2}$ يساوي متوسط الطاقة الحركية لجزيء الغاز. يمكن أن نلاحظ أنه، مع زيادة درجة الحرارة المطلقة للغاز، فإن متوسط الطاقة الحركية للجزيئات تزداد. هذا هو السبب في أن متوسط الطاقة الحركية لجزيء الغاز يعرف أيضًا بالطاقة الحرارية للغاز، ويمكن كتابتها كما في **المعادلة 12-4**.

12-4	**متوسط الطاقة الحركية لجزيء الغاز**		
$E_K = \frac{3}{2}k_BT$		E_K	متوسط الطاقة الحركية لجزيء الغاز (J)
		k_B	ثابت بولتزمان = (1.38×10^{-23} J/K)
		T	درجة الحرارة المطلقة (K)

لا يعتمد متوسط الطاقة الحركية لجزيء الغاز على نوع الغاز، ولكن على درجة الحرارة المطلقة فقط. ومع ذلك، فإن السرعة المتوسطة للجسيم تعتمد على كتلة الجزيء. على سبيل المثال، عند 293 K يتساوى متوسط الطاقة الحركية لذرات الأرجون وذرات الهيليوم حيث كل منهما 6.00651×10^{-21} J. أمّا السرعة المتوسطة لذرة الأرجون عند 293 K فهي 427 m/s والسرعة المتوسطة لذرة الهيليوم عند 293 K هي 1351 m/s.

مثال 14

a. احسب الطاقة الحركية المتوسطة لذرة غاز عند 15°C.

b. ما السرعة المتوسطة لذرات الهيليوم عند درجة الحرارة هذه؟

المطلوب: **a.** الطاقة الحركية المتوسطة E_k،

b. السرعة المتوسّطة لذرّات الهيليوم v،

المُعطيات: درجة الحرارة $T = 15°C$،

العلاقات: $E_K = \frac{3}{2}k_BT = \frac{1}{2}m\overline{v^2}$،

الحل: **a.** نحوّل درجة الحرارة للكلفن: $T = 15 + 273 = 288\ K$

لحساب الطاقة الحركية:

$$E_K = \frac{3}{2}k_BT = \frac{3}{2}\left(1.38\times10^{-23}\right)(288)$$

$$= \boxed{5.96\times10^{-21}\ J}$$

b. لحساب السرعة المتوسطة لذرات الهيليوم، علينا حساب كتلة ذرة هيليوم واحدة.

باستخدام الجدول الدوري، يمكن ايجاد الكتلة الذرية للهيليوم وهي تساوي 4 amu = 4g وبالتالي تكون إيجاد كتلة مول واحد من الهيليوم وهي 0.004 kg. يمكن الحصول على كتلة ذرة واحدة بقسمة كتلة المول على عدد أفوجادرو N_A وهو عدد الذرات في المول الواحد.

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{0.004}{6.022\times10^{23}} = 6.64\times10^{-27}\ kg$$

ولحساب السرعة المتوسطة لذرة الهيليوم:

$$E_K = \frac{1}{2}m\overline{v^2}$$

$$5.96\times10^{-21}\ J = \frac{1}{2}\left(6.64\times10^{-27}\right)\overline{v^2}$$

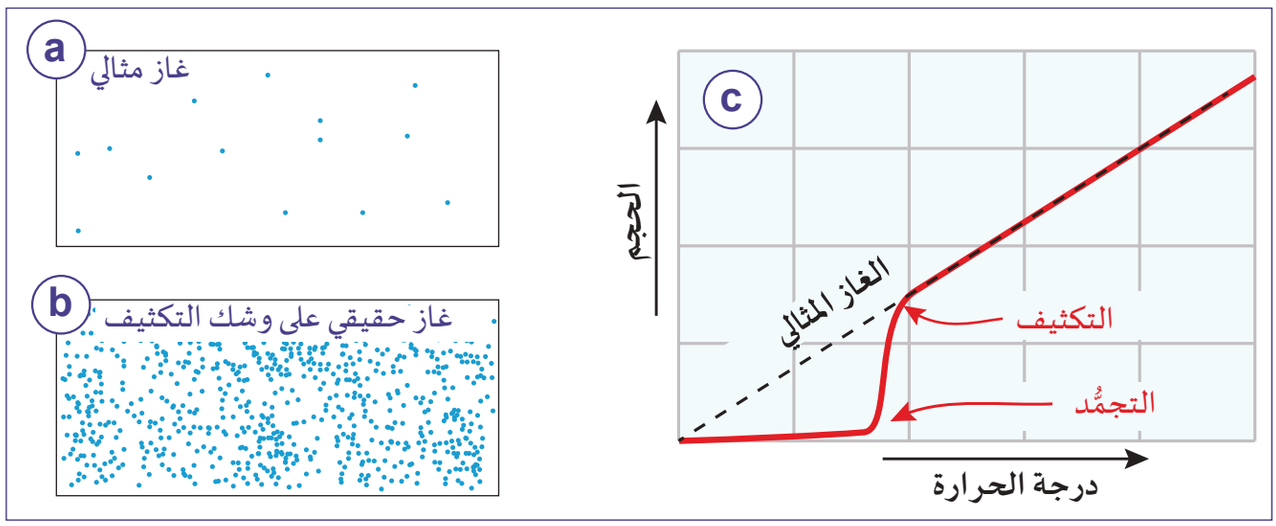
$$\overline{v^2} = 1{,}795{,}181$$

$$\boxed{v = 1{,}339\ m/s}$$

الغازات الحقيقية تتكثف وتتحول إلى سائل

تتبع الغازات المثالية قانون الغاز المثالي في جميع الحالات. يعني ذلك أن الغاز المثالي لايمكن أن يتكثف ويتحول إلى سائل. ولأن الغازات الحقيقية تتبع سلوك الغاز المثالي عند درجات الحرارة المرتفعة والضغط المنخفض، فإن قانون الغاز المثالي يصح عند درجات حرارة تفوق درجة حرارة الغليان بكثير.

الغازات الحقيقية، كالهواء عند درجة حرارة الغرفة، تتبع قانون الغاز المثالي أيضًا. ذلك لأن متوسط المسافة بين جزيئات الهواء يكون أكبر من حجم الذرة بمعامل يصل إلى 25 أو 30 مرّة (**الشكل 4-37 a**)



الشكل 4-37 التكثيف هو سلوك غير مثالي للغازات الحقيقية.

عندما تنخفض درجة الحرارة إلى ما دون درجة الغليان تتكثف جزئيات الغاز ويتحول إلى سائل. تكون الطاقة الحركية لجزيئات السائل منخفضة جدًا بحيث لا تستطيع التغلب على القوى التي تجذب الجزيئات معًا. تصبح الجزيئات قريبة من بعضها ليتكوّن السائل (**الشكل 4-37 b**). يوضح الرسم البياني في **الشكل 4-37 c** كيف يؤدي التكثيف إلى انحراف منحنى الغاز الحقيقي عن منحنى الغاز المثالي.

يُستخدم تكثيف الغازات في الكثير من التطبيقات التكنولوجية. يوضح **الشكل 4-38** النيتروجين السائل. تبلغ درجة حرارة غليان النيتروجين السائل 77 K (-196°C). تستخدم درجة الحرارة المنخفضة هذه لتبريد الأسماك الطازجة بسرعة، حيث تتجمّد على الفور. كما أنها تستخدم لسحب الطاقة الحرارية من المغناطيسات الكهربائية في أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي ومفاعلات الاندماج النووي.

الشكل 4-38 النيتروجين السائل.

سلوك الغازات عند ضغط مرتفع

يكون حجم الجسيمات في الغاز المثالي صفرا. يصح هذا التقريب عندما تكون جسيمات الغاز الحقيقي بعيدة جدًا عن بعضها بحيث يمكن إهمال حجمها. أما عند الضغط المرتفع فإن الجسيمات تنضغط وتصبح قريبة من بعضها ولا يخضع الغاز الحقيقي عندها لشروط الغاز المثالي. فالهواء عند درجة حرارة الغرفة يمكن أن يصبح سائلًا، وربما صلبًا، عند ضغط مرتفع جدًا. إذ أنه يمكن للأجسام الحقيقية أن تغير حالتها عند تغيّر درجة الحرارة والضغط.

التبريد

يصعب تخيّل الحياة في قطر من دون أجهزة تكييف. يظهر **الشكل 4-40** كيف يساهم تغير الحالة بين الغاز والسائل في عمل جهاز التكييف.

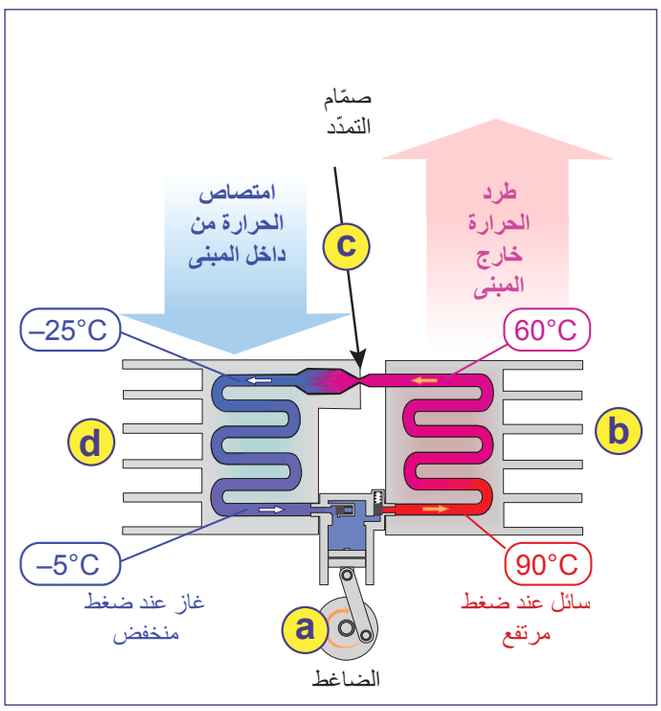
a. يرفع الضاغط ضغط الغاز البارد فيحوّله إلى سائل حار.

b. يبرد السائل الحار بعد أن يطرد الحرارة إلى الخارج.

c. يتمدد السائل في صمام التمدد فيتحول إلى غاز بارد عند درجة حرارة -25°C.

d. يمتص الغاز البارد الحرارة من المقصورة الداخلية ويعود إلى الضاغط.

وتعمل الثلاجة على تبريد الطعام وحفظه باردًا بنفس الطريقة التي يعمل بها جهاز التكييف.



الشكل 4-39 دورة عمل جهاز التكييف.

تقويم الدرس 4-2

1. الضغط المطلق لكمية معينة من الغاز يبلغ 250,000 Pa عند 20°C . كم يصبح الضغط إذا ارتفعت درجة الحرارة إلى 1000°C وبقي الحجم ثابتًا؟

2. افترض وجود كمية من غاز مثالي عند درجة حرارة 27°C
   a. إذا تم تسخين الغاز بمقدار 1 درجة مئوية عند ضغط ثابت، فما نسبة التغيّر في حجمه؟
   b. إذا بقي الحجم ثابتًا أثناء تبريد الغاز بمقدار 1 درجة مئوية بدءًا من 27°C، فما نسبة التغيّر في ضغطه؟
   c. إذا بقيت درجة حرارة الغاز ثابتة وقد تمدد حجمه بنسبة 1%، فبأي نسبة سيتغير ضغطه؟

3. يبلغ حجم إطار السيارة 10 L، ويتم نفخه ليصبح ضغطه المقاس 207,000 Pa عند 20°C. كم عدد مولات الهواء داخل الإطار؟

4. كم يبلغ عدد مولات الغاز الموجودة في حاوية محكمة حجمها $0.025\ m^3$، عند درجة حرارة 320 K وضغط 480,000 Pa؟

5. زيادة درجة الحرارة المطلقة للغاز تزيد من السرعة المتوسطة لجزيئاته. إذا تمت مضاعفة درجة الحرارة المطلقة، فما نسبة الزيادة في السرعة المتوسطة لجزيئات الغاز؟

6. وعاء يحتوي على 2 mole من النيتروجين عند درجة حرارة 0°C وضغط 100,000 Pa. احسب كتلة النيتروجين وحجمه في الوعاء. (الكتلة المولية للنيتروجين 28 g/mol).

7. اشرح، باستخدام الحجم الجزيئي والقوى بين الجزيئات، كيف ينحرف سلوك الغازات الحقيقية عن النموذج المثالي عند قيم ضغط عالية ودرجات حرارة منخفضة.

8. يبلغ حجم الهواء داخل إطار السيارة $0.015\ m^3$ عند 273 K وضغط 250,000 Pa.
   a. بعد قيادة السيارة ، ازداد ضغط الهواء داخل الإطار . اشرح سبب حدوث ذلك.
   b. ما الضغط الجديد للإطار إذا ارتفعت درجة الحرارة إلى 308 K وتمدد الحجم إلى $0.016\ m^3$ بعد قيادة السيارة لبعض الزمن.

ضوء على العلماء

روبرت بويل: 1627-1691

الشكل 4-40 روبرت بويل.

اشتهر العالم الإنجليزي-الأيرلندي روبرت بويل في مجالات الفلسفة والفيزياء والكيمياء. كان واحدًا من أوائل العلماء في منتصف القرن السابع عشر الذين نشروا علومهم ولم يتركوها مخفيّة، في وقت كان فيه معظم المكتشفين والعلماء يخفون علومهم واكتشافاتهم عن الناس. نهج بويل المختلف دفع علماء آخرين للتقدم في عملهم.

ولد روبرت بويل في إيرلندا في العام 1627 لأسرة بريطانية ثرية. انضم بويل إلى كلية إيتون المرموقة في سن الثامنة وتفوق في دراسته. ذهب في جولة أوروبية مع معلمه في العام 1639، وانتهى به الأمر إلى البقاء في سويسرا لمدة 5 سنوات. عاد بويل إلى إنجلترا في العام 1644 وبدأ بالكتابة في العام 1649، فاهتم في البداية بالعلوم التجريبية. سافر أيضًا إلى إيرلندا للاعتناء بأرضه الموروثة، حيث بدأ هناك في دراسة علم التشريح. وبحلول العام 1654، دُعي إلى أكسفورد حيث التقى بعدد من العلماء البارزين، وشكّل «نادي الفلسفة التجريبي» مع جون ويلكنز وكريستوفر ورين وجون لوك.

عمل روبرت بويل أيضًا مع روبرت هوك في أكسفورد وقام ببناء مضخّة هواء تم استخدامها في اكتشافات تتعلق بضغط الهواء والتفريغ. ما نعرفه الآن باسم «قانون بويل» تم اكتشافه أيضًا بمساعدة روبرت هوك. ساهم روبرت بويل في علوم الكيمياء أيضًا، وقد أصدر نشرات علمية حول تكوين المادة. وبسبب تأييده لاستخدام الكيمياء في الطب والعالم الطبيعي حصل على لقب «والد الكيمياء». أمضى بويل السنين الثلاث والعشرين الأخيرة من حياته في لندن مع أخته حيث أنشأ مختبرًا واستمر في العمل هناك ونشر الكثير من الكتب. كان روبرت بويل أحد العلماء القلائل المعروفين على نطاق واسع في عصره. توفي بويل في العام 1691 في لندن بعد فترة من المرض.

الوحدة 4

مراجعة الوحدة

الدرس 4-1: ديناميكيا الموائع

- **الموائع** هو الاسم الذي يطلق على حالات المادة التي تتدفق. وهذا يشمل السوائل والغازات والبلازما.
- **الغازات** هي موائع قابلة للانضغاط ، لأن ذرات الغاز أو جزيئاته تتقارب عند تعرّضها للضغط.
- **السوائل** هي موائع غير قابلة للانضغاط لأن تأثير الضغط في جزيئات السائل يكاد يكون معدومًا.
- عند مرور الموائع غير القابلة للانضغاط عبر مساحات مختلفة يبقى **معدل تدفقها** هو نفسه.
- **معادلة الاستمرارية** تسمح لنا بحساب سرعة الموائع غير القابلة للانضغاط أثناء مرورها عبر مساحات مختلفة.
- تُستخدم **معادلة برنولي** لشرح تأثير الموائع. وتتعلق المعادلة بالضغط والحجم والارتفاع في سائل متحرك.
- توضح **خطوط الانسياب** كيفية تدفق الموائع حول أسطح أشياء مثل المركبات والطائرات. يتم رسم هذه الخطوط بطريقة تجعلها متوازية مع تدفق المائع.

الدرس 4-2: الغاز المثالي

- لحساب **الضغط المطلق**، أضف مقدار الضغط الجوي إلى قراءة مقياس الضغط.
- يصف **قانون بويل** العلاقة بين ضغط الغاز المثالي وحجمه بأنها علاقة تناسب عكسي عندما تبقى درجة الحرارة ثابتة.
- يصف **قانون شارل** العلاقة بين حجم الغاز المثالي ودرجة حرارته بأنها علاقة تناسب طردي عند ثبات ضغط الغاز.
- يصف **قانون جاي لوساك** العلاقة بين ضغط الغاز المثالي ودرجة حرارته المطلقة بأنها علاقة تناسب طردي عند ثبات حجم الغاز.
- **الغاز المثالي** هو شكل افتراضي للمادة يتكون من جسيمات ذات كتلة تتحرك بشكل عشوائي ولكن حجمها يكون صفرًا.
- **قانون الغاز المثالي** يجمع العلاقات بين ضغط الغاز المثالي وحجمه ودرجة حرارته المطلقة.
- **ثابت الغاز المثالي** قيمته $R = 8.31\ \text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ ويستخدم لتحديد كميات الغاز المثالي.
- **ثابت بولتزمان** قيمته $k_B = 1.38 \square 10^{-23}\ \text{J/K}$ ويربط الطاقة الحركية المتوسطة لجسيم الغاز بدرجة الحرارة.

تقويم الوحدة

اختيار من مُتعدِّد

1. أيُّ من الكميات الآتية لا تكون ثابتة عند تدفق مائع غير قابل للانضغاط في أنبوب له مساحات مقطع مختلفة؟
   a. الكتلة
   b. الحجم
   c. السرعة
   d. معدل التدفق

2. ما الذي توضحه معادلة برنولي رياضيًا؟
   a. سبب ثبات الضغط في جميع أنحاء المائع.
   b. سبب عدم ارتباط الضغط بسرعة انسياب المائع.
   c. سبب انخفاض الضغط عند زيادة سرعة انسياب المائع.
   d. سبب ازدياد الضغط عند زيادة سرعة انسياب المائع.

3. وفقًا لمعادلة برنولي، أي مما يأتي يجب أن يحدث عندما تمر شاحنة كبيرة بجانب سيارة على الطريق السريع؟
   a. ينخفض الضغط بينهما، فتبتعد السيارة قليلًا عن الشاحنة.
   b. يزداد الضغط بينهما، فتبتعد السيارة قليلًا عن الشاحنة.
   c. ينخفض الضغط بينهما، فتقترب السيارة قليلًا من الشاحنة.
   d. يزداد الضغط بينهما، فتقترب السيارة قليلًا من الشاحنة.

4. يتدفق الماء عبر أنبوب قطره 7 m بسرعة 8 m/s، ويتدفق الزيت عبر أنبوب مربع المقطع تبلغ مساحته $1\ m^2$ بسرعة 5 m/s. في أي من الأنبوبين يكون معدل التدفق الحجمي أكبر؟
   a. أنبوب الزيت
   b. انبوب الماء
   c. كلا الأنبوبين لهما معدل التدفق نفسه.
   d. هناك حاجة إلى مزيد من المعلومات للإجابة على هذا السؤال.

5. يقوم طالب بتسخين وعاء صلب ثابت الحجم يحتوي على غاز مثالي، حيث رفع درجة حرارته من 50°C إلى 100°C. أية عبارة تصف تغيّر الضغط بدقة؟
   a. يتضاعف ضغط الغاز.
   b. ينخفض ضغط الغاز إلى النصف.
   c. يصبح ضغط الغاز أكثر من الضعفين.
   d. يزداد ضغط الغاز بعامل يقع بين 1 و 2.

6. ما الذي يحدث إذا ارتفعت درجة الحرارة في كمية ثابتة من الغاز عند حجم ثابت؟
   a. ينخفض ضغط الغاز.
   b. يرتفع ضغط الغاز.
   c. يتكثف الغاز على شكل سائل.
   d. تتفكك جزيئات الغاز إلى ذرات منفصلة.

7. عندما يتم خفض حجم الغاز عند درجة حرارة ثابتة يزداد الضغط الذي يبذله الغاز على جدران الوعاء. لماذا يحدث ذلك؟
   a. يتم ضغط جزيئات الغاز.
   b. تتنافر جزيئات الغاز بقوة أكبر.
   c. تزداد السرعة المتوسطة لتصادمات جزيئات الغاز بجدران الوعاء.
   d. تتقارب الجزيئات ويزداد عدد التصادمات بين جزيئات الغاز وجدران الوعاء.

8. يؤدي التغيير في حجم الغاز المثالي ودرجة حرارته إلى حدوث تغيير في ضغطه. أيٌّ من الحالات التالية ستؤدي دائمًا إلى زيادة الضغط؟
   a. زيادة الحجم وزيادة درجة الحرارة.
   b. زيادة الحجم وانخفاض درجة الحرارة.
   c. انخفاض الحجم وزيادة درجة الحرارة.
   d. انخفاض الحجم وانخفاض درجة الحرارة.

9. يحفظ غاز مثالي عند حجم ثابت ودرجة حرارة 300 K. كم تبلغ درجة حرارة الغاز إذا تضاعف ضغط الغاز وبقي حجمه ثابتًا؟
   a. 150 K
   b. 286.5 K
   c. 327 K
   d. 600 K

10. يتم ملء وعاءين متماثلين بـ 2 mole من الغاز لكل منهما. يحتوي الوعاء الأول على غاز CO_2 ويحتوي الوعاء الثاني على غاز H_2 عند درجة الحرارة الغرفة. ماذا يمكن أن نقول عن ضغط الغازين؟
   a. الضغط هو نفسه في الوعاءين.
   b. ضغط غاز ثاني أكسيد الكربون يكون أعلى من ضغط غاز الهيدروجين.
   c. ضغط غاز الهيدروجين يكون أعلى من ضغط غاز ثاني أكسيد الكربون.
   d. لا يمكن مقارنة ضغط الغازَيْن.

تقويم الوحدة

الدرس 4-1: ديناميكا الموائع

11. لماذا تكون سرعة المائع أكبر عندما تكون خطوط الانسياب متقاربة.

12. استنادًا إلى معادلة برنولي، صف الأشكال الثلاثة لطاقة المائع.

13. المراكب الشراعية لها دفّة في أسفلها كتلك الظاهرة في الشكل المجاور. ما الغرض من استخدامها بحسب معادلة برنولي؟

14. اثبت أن وحدة الضغط تساوي الطاقة لكل وحدة حجم.

15. يتدفق الماء عبر أنبوب تبلغ مساحة مقطعه العرضي $0.4\ m^2$، بسرعة $8\ m/s$. إذا انخفضت مساحة المقطع العرضي للأنبوب إلى $0.2\ m^2$ وازداد ارتفاع الأنبوب بمقدار $4\ m$، فاحسب السرعة الجديدة للمائع.

16. معدل تدفق الدم Q عبر أنبوب شعري نصف قطره $2 \times 10^{-6}\ m$ هو $3.8 \times 10^{-11}\ m^3/s$.

a. احسب سرعة تدفق الدم.

b. إذا كان الدم كله يمر عبر الشعيرات الدموية ، فكم عدد الشعيرات الدموية التي يجب أن تتوافر ليكون معدل التدفق الكلي $9.5 \times 10^{-5}\ m^3/s$؟

17.* مائع كثافته $1000\ kg/m^3$ يتدفق عبر أنبوب بسرعة $5\ m/s$ وضغط $100{,}000\ Pa$. تزداد سرعة المائع بعد ذلك إلى $10\ m/s$. احسب القيمة الجديدة لضغط المائع.

18.* يقوم طبيب بدراسة تدفق الدم عبر وعاء دموي يحتوي على جلطة دموية. هناك غازات مذابة في الدم مثل الأكسجين. هل سيرتفع الضغط الواقع على الأكسجين في الدم أم ينخفض عندما يتدفق أثناء حدوث الجلطة؟ اشرح إجابتك

19.* يبلغ ضغط الماء عند نقطة توصيل خرطوم إطفاء الحريق $400\ kPa$ ($400{,}000\ Pa$). ما أقصى سرعة لتدفق المياه من فوهة الخرطوم إذا كان الخرطوم أفقيًا؟ كثافة الماء $1000\ kg/m^3$.

20. يتدفق الماء عبر أنبوب أفقي بمعدل $5 \times 10^{-3}\ m^3/s$. تبلغ مساحة المقطع العرضي عند منتصف الأنبوب $2 \times 10^{-3}\ m^2$، وضغط الماء عنده $1.6 \square 10^5\ Pa$.

a. احسب سرعة تدفق الماء عند منتصف الأنبوب.

b. ينخفض الضغط قرب نهاية الأنبوب إلى $1.2 \square 10^5\ Pa$. ما سرعة الماء عند هذه النقطة؟

c. ما مساحة المقطع العرضي للأنبوب بالقرب من نهايته؟

21. احسب القوة المؤثرة في نافذة مساحتها $3\ m^2$ عندما تهب الرياح في الخارج باتجاه موازٍ للنافذة وبسرعة $20\ m/s$. لاحظ أن سرعة الرياح في الداخل هي $0\ m/s$. هل ترى أن هذا يشكل مشكلة لمهندسي البناء؟ لماذا؟ (افترض أن كثافة الهواء $1.29\ kg/m^3$).

الدرس 4-2: الغاز المثالي

22. تحت أية ظروف لا تنطبق معادلة الغاز المثالي، $PV = nRT$ على الغاز الحقيقي؟

23. وحدة قياس الضغط هي نيوتن لكل متر مربع (N/m^2) ووحدة قياس الحجم هي متر مكعب (m^3). ما وحدة قياس الضغط × الحجم؟ ما الكمية الفيزيائية التي لها وحدة القياس هذه؟

24. تم ملء وعاء ثابت الحجم بغاز عند درجة حرارة $37°C$ وضغط $300{,}000\ Pa$، ثم سُخِّنَ الغاز إلى أن وصلت درجة حرارته إلى $87°C$. ما مقدار الضغط النهائي عند درجة الحرارة النهائية؟

25. ما مقدار متوسط طاقة الحركة لكل ذرة من غاز الأرجون عند درجة حرارة $68°C$؟ هل من الضروري معرفة الكتلة الذرية للأرجون لحل هذا السؤال؟

26. بالون مملوء بـ $70\ kg$ من الهيليوم، حجمه $404\ m^3$ ودرجة حرارته $17°C$. كم يبلغ ضغط الغاز داخل هذا البالون؟

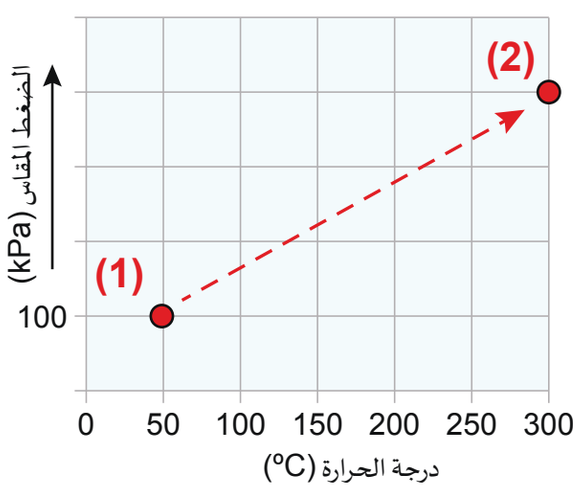
27. قارورة حجمها $7 \times 10^{-4}\ m^3$ مملوءة بغاز عند درجة حرارة $37°C$ وضغط $140{,}000\ Pa$.

a. كم يبلغ عدد مولات الغاز في القارورة؟

b. كم يبلغ عدد جزيئات الغاز في القارورة؟

c. احسب كتلة الغاز في القارورة إذا كانت الكتلة المولية $28\ g/mol$.

28. يظهر الشكل المجاور حالتين لكمية ثابتة من غاز مثالي عند حجم ثابت مقداره $1\ m^3$.



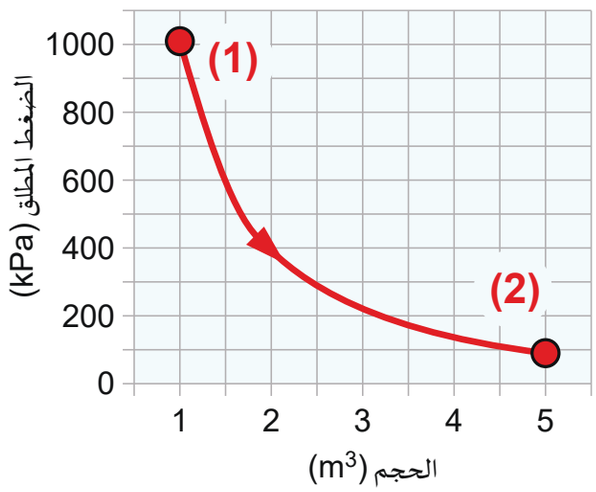
a. احسب درجة الحرارة المطلقة للغاز عند الحالة (1)

b. احسب عدد مولات الغاز.

c. ما الضغط المطلق للغاز عند الحالة (2)؟

d. ما القيمة التي يقرأها مقياس الضغط عند الحالة (2)؟

29. تتمدد كمية ثابتة من غاز مثالي بسرعة عند درجة حرارة 25°C وضغط 1000 kPa إلى الضغط الجوي العادي 100 kPa على المسار الموضح في الشكل المجاور. ما درجة الحرارة النهائية للغاز؟



30. ما تعريف درجة الحرارة والضغط المعياريين (STP)؟

31. أُعطي طالب السؤال التالي:

" يكون الضغط داخل إطار سيارة حسب مقياس الضغط 220 kPa. درجة حرارة الهواء داخل الإطار 30°C ، والحجم الداخلي للإطار $0.05\ m^3$. ما عدد مولات الهواء داخل الإطار؟"

وكانت إجابة الطالب كما يلي:

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(220{,}000)(0.05)}{(8.371)(30)} = 43.8\ \text{mol}$$

a. حدّد أخطاء الطالب.

b. ما الإجابة الصحيحة؟

32. يزداد ضغط غاز مثالي ثابت الكتلة بمعدل مرتين عندما ترتفع درجة حرارته من 30°C إلى 120°. ما نسبة التغير في حجم الغاز؟

33. يُحفظ غاز عند درجة حرارة 300 K. ما مقدار متوسط طاقة الحركة لجزيء الغاز؟

34. يُستخدَم ثاني أكسيد الكربون لملء خزان حجمه 12 L عند درجة حرارة 20°C وضغط 4 atm. ما كتلة ثاني أكسيد الكربون إذا كان الخزان ممتلئًا تمامًا. (سوف تحتاج إلى البحث عن الكتلة المولية لثاني أكسيد الكربون)

35. أثبت ان متوسط سرعة جزيء الغاز ذي الكتلة المولية M ودرجة الحرارة T هي:

$$v = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

36. احسب السرعة المتوسطة لذرات الأرجون الموجودة في المصباح الكهربائي إذا وصلت درجة حرارة المصباح إلى 2500 K.

37. ما السرعة المتوسطة لذرات الهيليوم عند درجة حرارة 850 K إذا كانت الكتلة المولية للهيليوم 4 g/mol.

38. يحتوي منطاد مراقبة متوسط الحجم ما يقرب من $200{,}000\ ft^3$ من غاز الهليوم عند ضغط تقريبي 1.1 atm. ($1\ ft^3 = 0.0283\ m^3$) و ($1\ atm = 1.01 \times 10^5\ N/m^2$).

a. افترض أن درجة حرارة المنطاد 12°C. ما عدد مولات الهيليوم التي يحتويها المنطاد؟

b. ما كتلة هذه الكمية من الهيليوم؟

c. ما السرعة المتوسطة لذرة الهيليوم عند 12°C؟

مسألة للبحث

تستخدم البخّاخات في كثير من عبوات الزجاج المختلفة، مثل زجاجات العطور ومواد التنظيف والطلاء وحقن الوقود. ابحث في عمل البخّاخة مستندًا في شرحك إلى مبدأ برنولي.

الوحدة 5

أساسيات الديناميكا الحرارية

Fundamentals of Thermodynamics

في هذه الوحدة

P1209
P1210

الدرس 5-1: خصائص النظام الديناميكي الحراري

الدرس 5-2: قوانين الديناميكا الحرارية

الدرس 5-3: المحرّكات الحرارية

الوحدة 5

مقدّمة الوحدة

الديناميكا الحرارية هي دراسة الحرارة والشغل وكيفية تحوُّل كل منهما من شكل إلى آخر من أشكال الطاقة، خاصة الطاقة الميكانيكية. يشير مصطلح «الحراري» إلى درجة الحرارة بينما يشير مصطلح «ديناميكي» إلى الحركة. يمثّل كلّ من الضغط ودرجة الحرارة وحجم النظام الديناميكي الحراري متغيّرات الحالة التي تتغيّر مع مرور الزمن. وخير مثال على ذلك محرّك الاحتراق الداخلي في السيارة. يتطلّب تصميم محرك سيارة ذو كفاءة عالية فهمًا شاملًا للديناميكا الحرارية.

تقدّم هذه الوحدة قوانين الديناميكا الحرارية. هذه القوانين تشرح عمل درجة الحرارة والشغل والطاقة والإنتروبي على المستوى العياني (الماكروسكوبي). وتتطرّق هذه الوحدة أيضًا إلى الاختلافات بين الأنظمة الديناميكية الحرارية المفتوحة والمعزولة.

الديناميكا الحرارية فرع عملي من فروع الفيزياء. لذلك، تمّ تطوير مبادئ الديناميكا الحرارية في سياق المحرّكات الحرارية الموجودة في جميع فروع التكنولوجيا، بدءًا من المحرّكات الصغيرة في السيارة إلى التوربينات العملاقة التي تنتج الكهرباء في محطات الطاقة.

الأنشطة والتجارب

a 1-5 دراسة العوازل الحرارية

b 1-5 ملاحظة التفاعلات الذرية

a 2-5 عرض مفهوم الانعكاسية

b 2-5 القانون الأول للديناميكا الحرارية

3-5 المحرّكات الحرارية

الدرس 1-5

خصائص النظام الديناميكي الحراري

Properties of a Thermodynamic System

تعمل الأوعية المعزولة بشكل جيد على منع انتقال الحرارة من الوعاء وإليه. ويسهم وجود الفراغ في عزل أفضل، كما في الوعاء المفرّغ في **الشكل 5-1**. توضع قارورة زجاجية داخل وعاء معدني أو بلاستيكي، حيث تُفَرّغ المنطقة بين القارورة والوعاء من الهواء.

الشكل 5-1 الوعاء المفرغ من الهواء.

يُعدّ الفراغ عازلًا جيّدًا للحرارة نظرًا لعدم وجود جزيئات في الفراغ، فإن الحرارة لا يمكن أن تنتقل بواسطة التوصيل أو الحمل الحراري. الطريقة الوحيدة لنقل الحرارة في الفراغ هي الإشعاع. يتم تقليل الإشعاع بطلاء الأسطح الداخلية بمادة فضية تجعلها شبيهة بالمرآة. يعكس ذلك الأشعة تحت الحمراء إلى الداخل. إلا أن الوعاء يحتاج عمليًا إلى غطاء وسدّادة، وهما المصدران الرئيسان لتسرُّب الحرارة من وعاء مفرّغ.

مخرجات التّعلُّم

P1209.1 يوضح المقصود بالنظام الديناميكي الحراري، ويصف مفاهيم الحرارة والشغل والطاقة الداخلية في حالة الغاز المثالي.

P1209.2 يذكر أن الطاقة الداخلية للغاز الحقيقي يتم تحديدها من خلال حالة النظام، وأنه يمكن تعريفها كمجموع الطاقات الحركية وطاقات الوضع المرتبطة بجزيئات النظام.

المفردات

Thermodynamic system	نظام ديناميكي حراري
Thermal equilibrium	اتزان حراري
Thermodynamic state	الحالة الديناميكية الحرارية
State variable	متغيّر الحالة
State functions	دوال الحالة
Van der Waals forces	قوى فاندرفال
Thermodynamic process	العمليات الديناميكية الحرارية
Isothermal process	العملية عند درجة حرارة ثابتة (الأيزوثيرمية)
Adiabatic process	العملية المكظومة (الأدياباتيكية)
Isochoric process	العملية عند حجم ثابت (الأيزوكورية)
Isobaric process	العملية عند ضغط ثابت (الأيزوبارية)

نشاط a1-5 دراسة العوازل الحرارية

سؤال الاستقصاء	كيف تصمم عازلًا حراريًا جيدًا؟
الموادّ المطلوبة	ورق، قطن، رقائق ألمنيوم، مناشف ورقية، ستايروفوم، مقاييس درجة حرارة رقمية، أوعية، علب معدنية، غلاية كهربائية.

خطوات التجربة

1. اعمل مع أفراد مجموعتك على تصميم نظام ترى أنه عازل جيد للحرارة.
2. ضع في الحسبان:
   a. أين يحدث فقدان الحرارة؟ كيف يمكن منعه؟
   b. ما أفضل طريقة لقياس درجة الحرارة دون التأثير في النظام؟
3. بعد القيام بتصميم جيد، استخدم وعاء زجاجيًا وضعه في نظامك المعزول.

الشكل 5-2 تصميم وعاء عازل باستخدام هذه المواد.

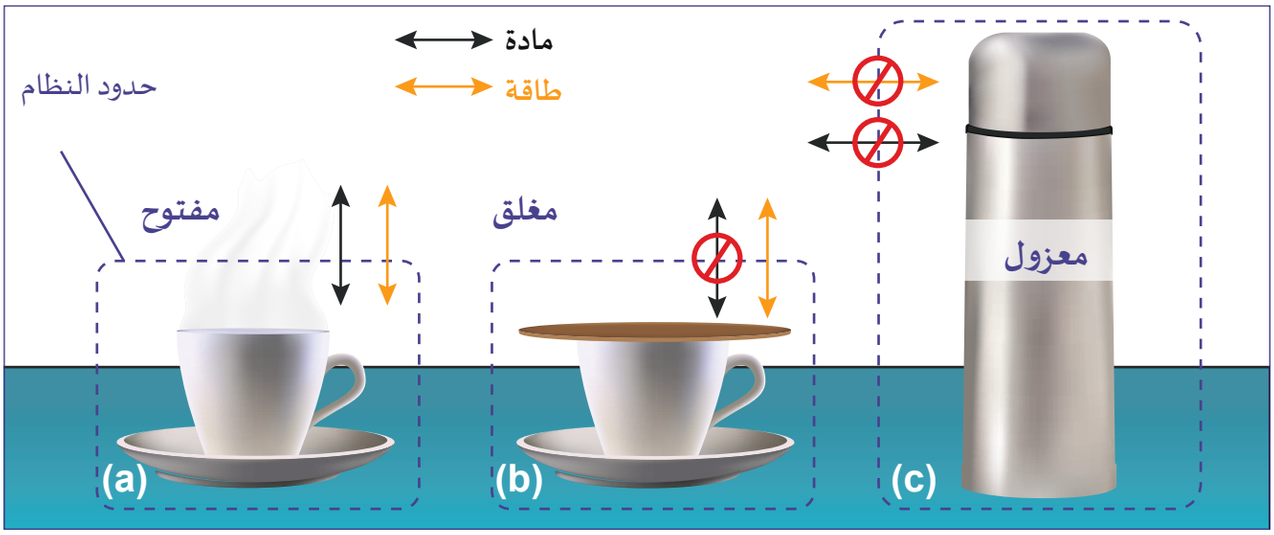
4. صُبّ الماء الساخن في الوعاء، ولاحظ التغيّر في درجة الحرارة خلال 5 دقائق.
5. املأ الجدول بالقيم التي حصلت عليها.

الأسئلة

a. هل احتفظ النظام الذي قمت بتصميمه بالحرارة؟
b. كيف يمكن تحسين العزل الحراري لهذا النظام؟
c. ما خاصية المادة التي تجعلها عازلة للحرارة؟
d. ارسم رسمًا بيانيًا يُبيّن تغير درجة الحرارة بدلالة الزمن باستخدام جدول البيانات.
e. قارن جدول بياناتك ورسمك البياني مع المجموعات الأخرى. أية مجموعة لديها النظام الأكثر كفاءة؟ ما الذي جعل نظام تلك المجموعة فعالًا؟

ما النظام الديناميكي الحراري؟

النظام الديناميكي الحراري Thermodynamic System مجموعة محدّدة من المادة والطاقة التي نُعرّفها لتحليل أية تغيّرات داخل النظام. يكون النظام محاطًا بسطح وهمي مغلق نسمّيه «حدود النظام». تُعدّ كل المواد والطاقة داخل النظام جزءًا من ذلك النظام. يتمّ تعريف المادة والطاقة خارج حدود النظام بأنها **محيطه Surroundings**. يوضح **الشكل 3-5** الأنواع الثلاثة المختلفة للأنظمة الديناميكية الحرارية.



الشكل 3-5 (a) نظام مفتوح (b) نظام مغلق (c) نظام معزول.

يسمح **النظام المفتوح Open system** بتبادل كل من المادة والطاقة بين النظام ومحيطه عبر حدود النظام. **الشكل a3-5** هو مثال على نظام مفتوح يمكن له تبادل الطاقة والمادة بين كوب القهوة ومحيطه. معظم الأنظمة الواقعية هي أنظمة مفتوحة.

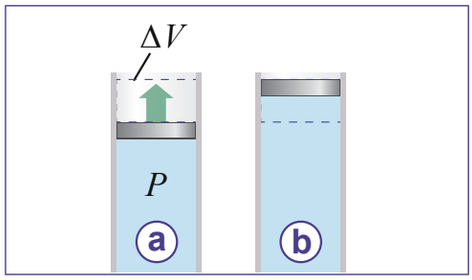
النظام المغلق Closed system. يمكن لهذا النظام تبادل الطاقة مع المحيط، ولكن لا يُمكن للمادة الانتقال عبر حدود النظام، فنجان القهوة مع الغطاء، كما هو موضح في **(الشكل 3-5 b)**.

أما **النظام المعزول Isolated system** فإنه لا يسمح بتبادل المادة ولاالطاقة عبر حدود النظام. على الرغم من عدم وجود أنظمة معزولة بالفعل، فإن الأوعية المعزولة ذات الغطاء المحكم، مثل القارورة العازلة (الثرموس) في **(الشكل c3-5)**، تُعدّ نموذجًا تقريبيا للنظام المعزول. نفترض دائما في المسائل الحسابية أن النظام معزول عن الوسط، مالم يُذكر غير ذلك.

عندما تغلي الماء في وعاء على موقد، فإن درجة حرارته تصل إلى 100°C في مدّة زمنية قليلة عندما يكون الوعاء مزوّد بغطاء. اشرح سبب ذلك.

الشغل المبذول بواسطة الغاز

يتضمّن العديد من تطبيقات الديناميكا الحرارية نظامًا يبذل شغلًا على محيطه من خلال تمدد الغاز. افترض أسطوانة مزودة بمكبس ومملوءة تماما بالغاز عند ضغط ثابت P. يُسمح للغاز بالتمدّد ودفع المكبس إلى أعلى كما هو موضح في **الشكل 4-5**. ما مقدار الشغل الذي يبذله الغاز أثناء تمدّده وارتفاع المكبس؟



الشكل 4-5 ضغط الغاز وحجمه خلال تمدده.

الشغل

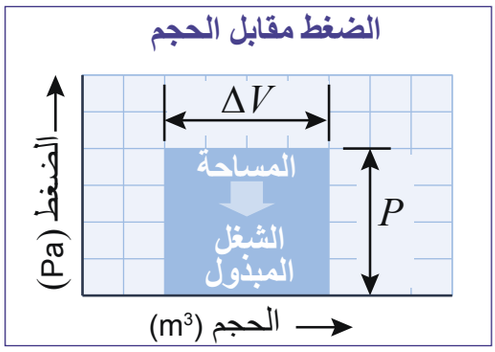
$$W = F\Delta d = (PA)(\Delta d) = \boxed{P\Delta V}$$

$F = PA$ A P $\Delta V = A\Delta d$ Δd

المعادلة 5-1 توضح الشغل الذي يبذله غاز عندما يتمدد عند ضغط ثابت.

5-1	الشغل المبذول بواسطة الغاز	W	الشغل المبذول (J)
$W = P\Delta V$		P	الضغط (Pa)
		ΔV	التغير في الحجم (m^3)

في الرسم البياني للضغط مقابل الحجم، والمسمى بالمخطّط P-V، يكون الضغط على المحور الرأسي والحجم على المحور الأفقي. تُمَثّل المساحة أسفل المنحنى على الرسم البياني P-V الشغل المبذول ولها وحدة قياس الشغل كما في **الشكل 5-5**. إذا كانت وحدة قياس الضغط نيوتن لكل متر مربع ووحدة قياس الحجم المتر المكعب، فإن الشغل يكون بوحدة الجول.



الشكل 5-5 التمثيل البياني P-V.

مثال 1

يؤثّر غاز محصور في أسطوانة ذات مكبس متحرك بضغطٍ قدره 1.6×10^5 Pa. إذا تمدّد الغاز من حجم ابتدائي $4m^3$ إلى ضعف هذه القيمة، فما الشغل الذي يبذله الغاز عند ثبات الضغط؟

المطلوب: الشغل $W = ?$

المُعطيات: الضغط $P = 1.6 \times 10^5$ Pa

$V_1 = 4\ m^3$ ، $V_2 = 2 \times 4\ m^3 = 8\ m^3$

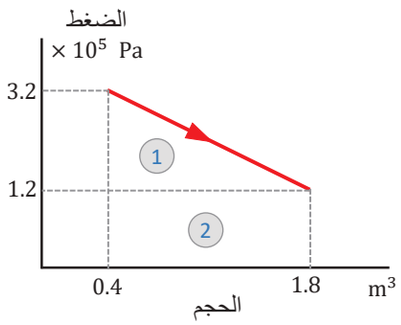
العلاقات: $W = P\Delta V$

الحل: لحساب الشغل المبذول

$$W = P\Delta V = P(V_2 - V_1) = 1.6 \times 10^5 (8-4) = 6.4 \times 10^5\ \text{J}.$$

مثال 2

غاز محصور في أسطوانة مزودة بمكبس، تحرك المكبس نحو الخارج مسافة معينة بفعل ضغط الغاز، فتغير كل من الحجم والضغط، مع ثبات درجة الحرارة، ومُثلت العلاقة بين الحجم والضغط بالرسم البياني المجاور، معتمدًا على الشكل احسب الشغل المبذول.



المطلوب: $W = ?$

المُعطيات: $P_1 = 3.2 \times 10^5$ Pa , $P_2 = 1.2 \times 10^5$ Pa , $V_1 = 0.4$ m^3, $V_2 = 1.8$ m^3

العلاقات: $W = P\Delta V$

الحل: الشغل يساوي المساحة المحصورة تحت المنحنى، وهي تتكون من جزأين، الأول مثلث والثاني مستطيل.

ارتفاع المثلث $(3.2 - 1.2 = 2)$ وقاعدته $(1.8 - 0.4 = 1.4)$.

$$W_1 = \frac{1}{2}(2 \times 10^5 \text{ Pa})(1.4 \text{ m}^3) = 1.4 \times 10^5 \text{ J}$$

ارتفاع المستطيل (1.2) وطوله $(1.8 - 0.4 = 1.4)$.

$$W_2 = (1.2 \times 10^5 \text{ Pa})(1.4 \text{ m}^3) = 1.68 \times 10^5 \text{ J}$$

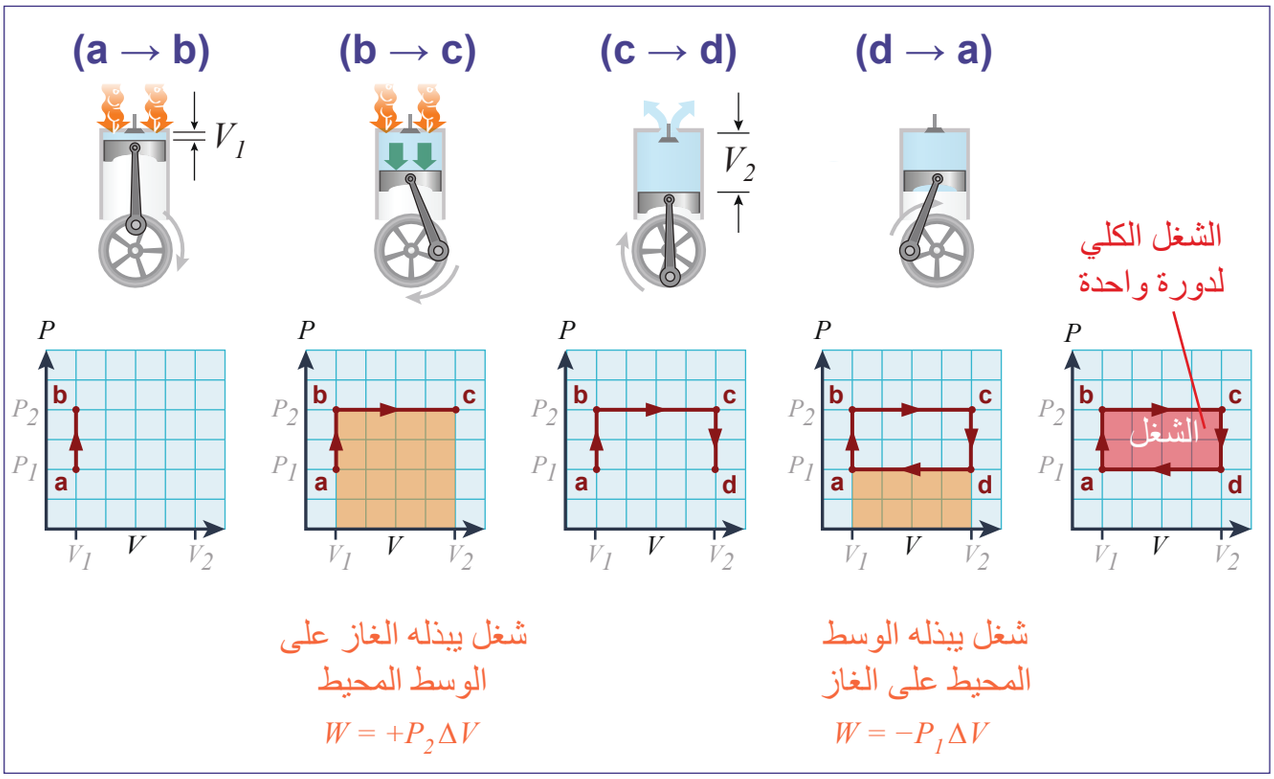
الشغل الكلي يساوي مجموع المساحتين:

$$W = W_1 + W_2 = 1.4 \times 10^5 \text{ J} + 1.68 \times 10^5 \text{ J} = 3.08 \times 10^5 \text{ J}$$

دورات الديناميكا الحرارية

عندما يتم بذل الشغل بواسطة نظام ديناميكي حراري، يعود النظام في الغالب إلى حالته الابتدائية، ويكرّر العملية. تُسمّى العملية الديناميكية الحرارية التي تتكرّر «الدورة الديناميكية الحرارية». يوضح **الشكل 5-6** كيف نستخدم الرسم التخطيطي P-V لتحليل الشغل المبذول في الدورة الديناميكية الحرارية.

تمثّل مساحة الدورة على المخطّط P-V الشغل المبذول بواسطة الغاز أو عليه.



الشكل 5-6 حساب الشغل المبذول في دورة ديناميكية حرارية.

- عند النقطة (a) يكون الحجم عند حده الأدنى. من (a) إلى (b) يُزوّد المحرّك بالحرارة ويرتفع ضغط الغاز.
- من (b) إلى (c) يتمدّد الغاز، ويبذل شغلًا على المكبس. في هذا الجزء، نواصل إضافة الحرارة للحفاظ على ضغط ثابت مع تغيّر الحجم، فيكون الشغل الذي يبذله الغاز: $W = P_2 \Delta V$.
- من (c) إلى (d) يفتح الصمّام وينخفض الضغط مرة أخرى إلى قيمته الابتدائية P_1.
- من (d) إلى (a) يتحرّك المكبس إلى أعلى لضغط الغاز مرة أخرى والبدء بدورة ثانية، يبذل الوسط المحيط شغلًا على النظام مقداره: $W = -P_1 \Delta V$.
- الشغل المبذول بواسطة الغاز المتمدّد في دورة واحدة يساوي مساحة المستطيل الواقع داخل المسار (abcd). يساوي هذا الشغل حسابيًا التغيّر في الضغط مضروبًا بالتغير في الحجم:

$$W=(P_2 - P_1)(V_2 - V_1)$$

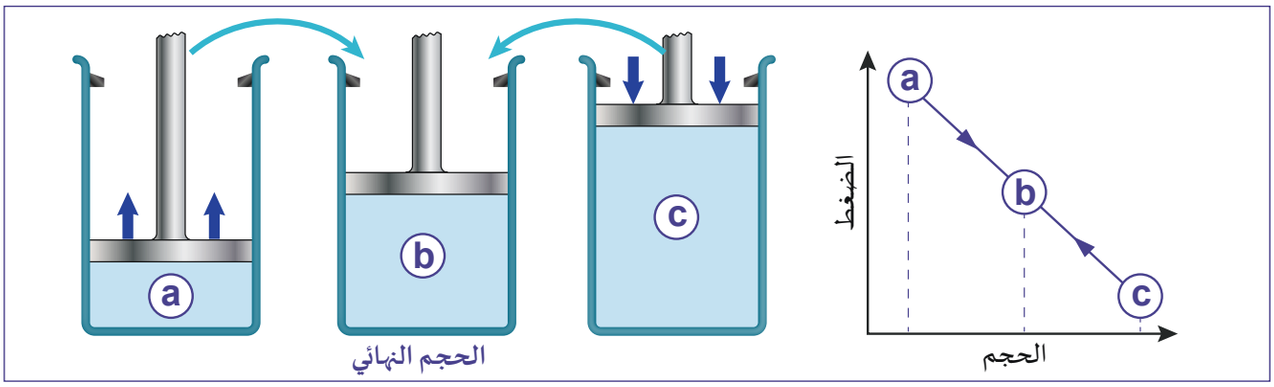
حالات الديناميكا الحرارية

يتم وصف النظام الديناميكي الحراري عند أية لحظة زمنية بكمّيات، مثل الحجم ودرجة الحرارة والضغط. الحالة الموصوفة بهذه المتغيّرات تُسمّى **الحالة الديناميكية الحرارية للنظام Thermodynamic state**. والمتغيّرات التي تستخدم لتعريف هذه الحالة تُسمّى **متغيّرات الحالة State variables**.

دوالّ الحالة ومتغيرات الحالة

الكميات التي تستخدم لوصف حالة النظام وتعتمد على حالة النظام فقط، ولا تعتمد على المسار الذي يسلكه النظام للوصول إلى هذه الحالة تُسمى **متغيرات الحالة state variables** ، مثل الضغط والحجم ودرجة الحرارة، فهي متغيرات حالة. **دالة الحالة State Function** كمية تعتمد على متغيرات الحالة. تُعدّ الطاقة الداخلية للنظام مثالاً على دالة الحالة، فهي تعتمد على متغيرات الحالة؛ الضغط والحجم ودرجة الحرارة (P, V, T).

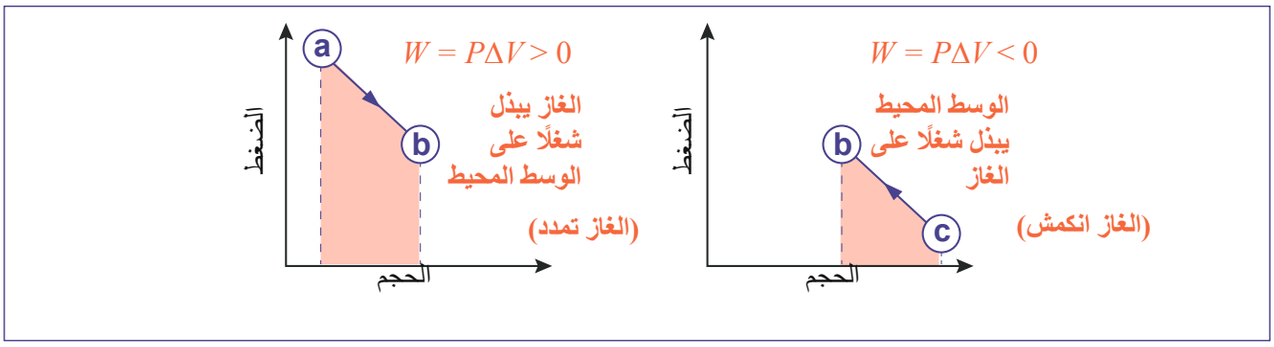
لفهم متغيرات الحالة، افترض وجود أسطوانة مليئة بالغاز مزوّدة بمكبس متحرّك يغيّر حجم الغاز. قيمة الحجم النهائي في **الشكل 5-7b** تعتمد فقط على الحالة النهائية، ولا تعتمد نهائيًا على كون الغاز قد تمدّد (**الشكل 5-7a**) أو ضُغِط (**الشكل 5-7c**) للوصول إلى الحالة النهائية.



الشكل 5-7 الحجم كمتغير حالة.

الكميات التي تعتمد على المسار

يُسمّى كل من الشغل والحرارة في النظام الديناميكي الحراري **دوال مسار Process functions** لأنها تعتمد على المسار المتبع بين حالة وأخرى. نعود مرة أخرى للأسطوانة والمكبس في **الشكل 5-7**. يختلف مقدار الشغل المبذول بواسطة الغاز أو عليه اختلافًا كبيرًا على المسار (a) → (b) مقارنة بالمسار (b) → (c) كما هو موضح في **الشكل 5-8**.

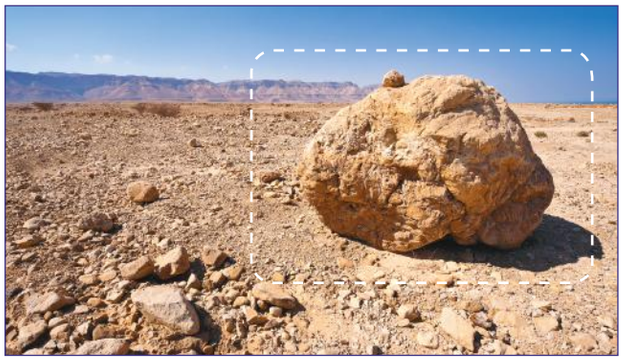


الشكل 5-8 اختلاف الشغل المبذول بين الحالتين.

الطاقة الداخلية

في الديناميكا الحرارية يجب الأخذ بالحسبان جميع أشكال الطاقة داخل النظام:

- الطاقة الحركية
- جميع أشكال طاقة الوضع
- الطاقة الكيميائية والطاقة النووية
- الطاقة الكهربائية
- الطاقة الداخلية الناتجة عن الحرارة أو أي متغيرات حالة أخرى.



الشكل 5-9 ما أنواع الطاقة في هذا النظام؟

ما الطاقة الكلية للصخرة الموضحة في **الشكل 5-9** في حالة السكون؟ الجواب ليس بسيطًا. هل نقوم مَثَلًا بتضمين الطاقة الحركية بسبب الحركة المدارية للأرض؟ تتعلق الديناميكا الحرارية بحسابات الطاقة أثناء التغيّرات داخل النظام. لذلك، قد نقصر اهتمامنا على أشكال الطاقة التي تتغيّر أثناء العملية التي ندرسها. إذا ظلت الطاقة الحركية للصخرة بسبب الحركة المدارية للأرض ثابتة أثناء العملية التي ندرسها، فقد نهمل هذه الطاقة بالمعنى الديناميكي الحراري.

تُعدّ الطاقة الحرارية المرتبطة بدرجة الحرارة أحد الأشكال المهمّة للطاقة الداخلية (**المعادلة 2-5**). تختلف السعة الحرارية النوعية باختلاف المواد، وهي تصف تغيّر الطاقة الحرارية لكل درجة من درجات الحرارة.

2-5	الطاقة الحرارية	Q	الطاقة الحرارية (J)
	$Q = mc\Delta T$	m	الكتلة (kg)
		c	السعة الحرارية النوعية ($J\,kg^{-1}\,°C^{-1}$)
		ΔT	التغير في درجة الحرارة (°C)

مثال 3

الصخرة في **الشكل 5-9** كتلتها 3500 kg وحرارتها النوعية $0.84\ Jkg^{-1}\,°C^{-1}$. ما التغيّر الكلي في الطاقة إذا انخفضت درجة حرارة الصخرة من 55° C الى 30°C؟

المطلوب: التغير الكلي في الطاقة Q

المُعطيات: $m = 3500\ kg, c = 0.84\ Jkg^{-1}\,°C^{-1}, T_2 = 30°C, T_1 = 55°\,C$

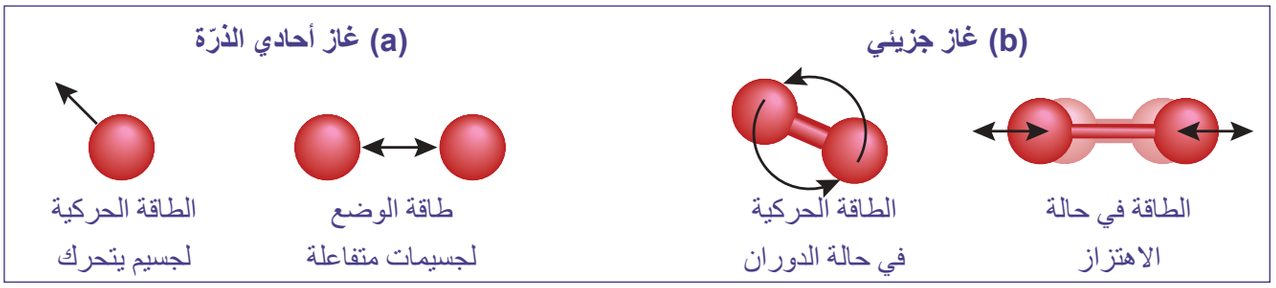
العلاقات: $Q = mc\,\Delta T$

الحل: التغير الكلي للطاقة يكون

$$Q = mc\,\Delta T = (3500\ kg)(0.84\ Jkg^{-1}°C^{-1})(30°C - 55°C) = \boxed{-73500\ J}.$$

الطاقة الداخلية للغاز

يتمّ وصف الطاقة الداخلية للسوائل والمواد الصلبة جيدًا في **المعادلة 5-2**. ومع ذلك، فإن الطاقة الداخلية للغاز أكثر تعقيدًا، لأن الغازات قابلة للانضغاط. هناك أيضًا اختلافات بين الغازات أحادية الذرة والغازات الجزيئية. بشكل عام، تشتمل الطاقة الداخلية للغاز على الطاقة الحركية وطاقة الوضع (**الشكل 5-10a**) والطاقة الإضافية المرتبطة بأنماط الدوران والاهتزاز في الغاز الجزيئي (**الشكل 5-10b**).



الشكل 5-10 أشكال الطاقة الداخلية في الغاز.

عدد الطرق التي يمكن للجسيمات من خلالها تخزين الطاقة يحدّد الحرارة النوعية للغاز. الغازات الجزيئية لها حرارة نوعية أعلى مقارنة بالغازات أحادية الذرة، وذلك بسبب وجود الحركتين الدورانية والاهتزازية للجزيئات، والتي تمتص الطاقة عند تسخين الغاز، فلا يكون الارتفاع في درجة حرارته كبيرًا مقارنة بالغازات أحادية الذرّة.

الطاقة الداخلية للغاز المثالي

يتكون الغاز المثالي من جسيمات ذات حجم صغير جدًا مقارنة بحجم كمية الغاز نفسه. هذه الجسيمات لا تتفاعل إلا من خلال التصادمات المرنة. ويكون لذلك ثلاث نتائج ديناميكية حرارية.

1. طاقة الوضع، والتي تشكل جزءًا من الطاقة الداخلية للنظام، تكون صفرًا في حالة الغاز المثالي.
2. لا تمتلك جسيمات الغاز المثالي نماذج دورانية أو اهتزازية لتخزين الطاقة.
3. الطاقة الداخلية للغاز المثالي تساوي مجموع الطاقة الحركية لكل جسيماته.

تعتمد الطاقة الحركية لجسيم الغاز المثالي على درجة حرارة الغاز فقط. والمعادلة (3-5) تُعطي الطاقة الداخلية لعدد (n) من مولات الغاز المثالي.

3-5	الطاقة الداخلية للغاز المثالي	U	الطاقة الداخلية للغاز المثالي (J)
$U = \frac{3}{2} nRT$		n	عدد مولات الغاز
		R	ثابت الغاز = ($8.31\ JK^{-1}mol^{-1}$)
		T	درجة الحرارة المطلقة (K)

معادلة الحالة

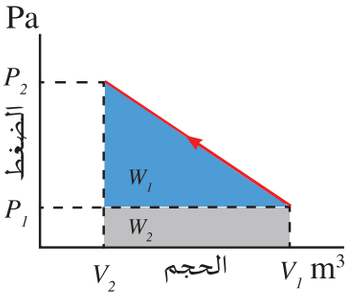
معادلة الحالة علاقة بين متغيّرات الحالة في النظام الديناميكي الحراري. قانون الغاز المثالي هو معادلة الحالة للغاز المثالي لأنه يربط بين متغيّرات الحالة، وهي: عدد الجسيمات ودرجة الحرارة والضغط والحجم (**المعادلة 4-5**).

4-5	معادلة الحالة للغاز المثالي	P	الضغط (N/m^2 أو Pa)
	$PV = nRT$	V	الحجم (m^3)
		n	عدد مولات الغاز
		R	ثابت الغاز = ($8.31\ JK^{-1}mol^{-1}$)
		T	درجة الحرارة المطلقة (K)

أما في حالة الغاز الحقيقي، فإن معادلته يجب أن تأخذ بالحسبان تأثيرات طاقة الوضع والحجم المحدّد لجسيماته. لا تنطبق قوانين الغاز المثالي على الغاز الحقيقي.

مثال 4

كمية من الغاز مقدارها (31.86 mol) محصورة في أسطوانة حجمها ($0.2\ m^3$) بضغط ($4\square10^5\ Pa$) ودرجة حرارة (300 K). تم زيادة الضغط الواقع عليه حتى أصبح حجمه ($0.02\ m^3$)، وارتفعت درجة حرارته إلى (360 K). احسب الضغط النهائي للغاز والشغل المبذول عليه.



المطلوب: $P_2=?\quad ,W=?$

المُعطيات: $n = 31.86\ mol\ ,\ V_1 = 0.2\ m^3\ ,\ P_1 = 4\square10^5\ Pa\ ,$

$T_1 = 300\ K\ ,\ V_2 = 0.02\ m^3\ ,$

$T_2 = 360\ K\ ,\qquad R = 8.31\ JK^{-1}\ mol^{-1}$

العلاقات: حيث أن الضغط متغير والحجم متغير، فإن

الشغل المبذول يساوي المساحة أسفل المنحنى

$$W_1 = \frac{1}{2}(P_2-P_1)(V_2-V_1),\qquad PV = nRT\qquad W_2=P_1(V_2-V_1)$$

الحل:

$$P_2\,V_2 = nRT_2 \rightarrow P_2 = \frac{nRT_2}{V_2} = \frac{32\square8.31\square360}{0.02} = 48\square10^5\ Pa$$

$$W = W_1 + W_2 = \frac{1}{2}(P_2-P_1)(V_2-V_1) + P_1(V_2-V_1)$$

$$W = \frac{1}{2}(48\square10^5-4\square10^5)(0.02-0.2) + [4\square10^5(0.02-0.2)]$$

$$W = \boxed{-4.68\square10^5\ J}$$

مثال 5

ينتشر كيلوجرام واحد من بخار الماء ليشغل حجمًا قدره $1\ m^3$ على مركبة فضائية عند درجة حرارة 200 K.

a. احسب الطاقة الداخلية لبخار الماء بافتراض أنه يتصرف كغاز مثالي.

b. استخدم معادلة الحالة للغاز المثالي لتحديد ضغط الغاز.

c. يضيف نظام دعم الحياة في المركبة الفضائية 11000 J من الطاقة إلى الغاز. احسب درجة الحرارة والضغط النهائيين. علمًا أن الكتلة المولية للماء تساوي (18.02g/mol).

المطلوب: $U = ?\ .\ P_2 = ?\ ,\ P_1 = ?\ ,\ T_2 = ?$

المُعطيات: $m = 1.0\ \text{kg},\ V = 1\ \text{m}^3,\ T_1 = 200\ \text{K}\ ,\ R = 8.31\ \text{JK}^{-1}\ \text{mol}^{-1}$

العلاقات: $PV = nRT \qquad U = \frac{3}{2}nRT$

الحل: الكتلة هي كيلوجرام واحد، والمادة هي بخار الماء. تتطلّب معادلات الطاقة الداخلية ومعادلة الحالة عدد المولات. الكتلة المولية للماء 18.02 g/mol.

$$n = 1000\ \text{g}\ \left(\frac{1\ \text{mol}}{18.02\ \text{g}}\right) = 55.49\ \text{moles}$$

a. نستخدم معادلة الطاقة الداخلية $U = \frac{3}{2}nRT$

$$U = (\tfrac{3}{2})(55.49\ \text{mol})(8.31\ \text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1})(200\text{K}) = \boxed{138337\ \text{J}}$$

b.

$$P_1V = nRT \longrightarrow \qquad P_1 = \frac{nRT}{V}$$

$$P_1 = \frac{(55.49\ \text{mol})(8.371\ \text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1})(200\text{K})}{1\ \text{m}^3} = \boxed{92901\ \text{Pa}}$$

c. نظرًا لأن الحجم ثابت، فإننا نفترض أن كل الطاقة المُضافة تتحول إلى طاقة داخلية. سيؤدي ذلك إلى رفع درجة الحرارة. نستخدم معادلة الحالة ودرجة الحرارة الجديدة لإيجاد الضغط.

$$U = \frac{3}{2}nRT \longrightarrow T = \frac{2U}{3nR} = \frac{2(139362 + 11000)}{3(55.49\ \text{mol})(8.371\ \text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1})}$$

$$T = 216\text{K}$$

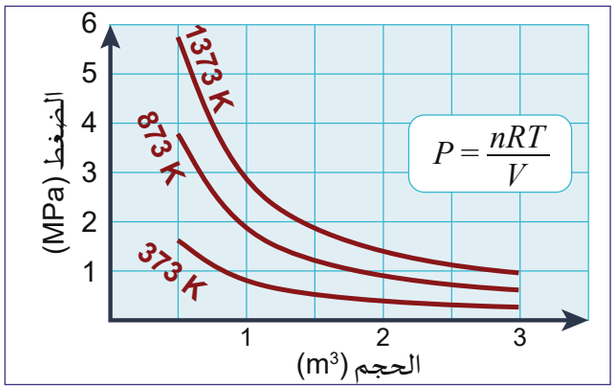
$$P_2 = \frac{nRT}{V}$$

$$P_2 = \frac{(55.49\ \text{mol})(8.371\ \text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1})(216\text{K})}{1\ \text{m}^3} = \boxed{100333\ \text{Pa}}$$

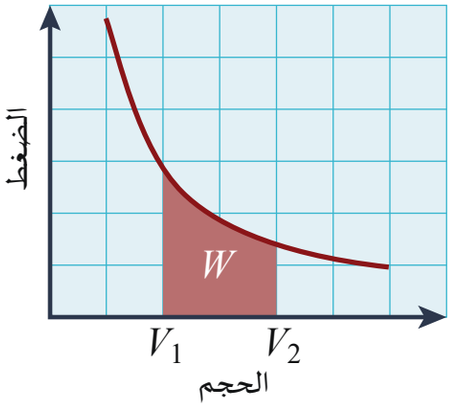
العمليات الديناميكية الحرارية

العملية الديناميكية الحرارية Thermodynamic process عملية تسبب تغييرا في متغيرات الحالة (P,V,T) لنظام ديناميكي حراري. سوف نطلع في هذا الدرس على أربع عمليات ديناميكية حرارية، هي:

أولاً: العمليات الأيزوثيرمية Isothermal process والتي يتغير فيها كل من الضغط والحجم عند درجة حرارة ثابتة. يتناسب الضغط عكسيا مع الحجم في العمليات الأيزوثرمية. تفيد علاقة التناسب العكسي أن ضغط الغاز ينخفض كلما ازداد حجمه والعكس صحيح. يوضح **الشكل 5-11** عمليات أيزوثرمية لغاز مثالي عند درجات حرارة مختلفة. تعطي **المعادلة 5-5** الشغل المبذول خلال عملية أيزوثرمية. حيث يكون للعملية الأيزوثرمية أقصى كفاءة نظرية ممكنة.



الشكل 5-11 العمليات الأيزوثرمية (عند درجات حرارة ثابتة).



5-5	الشغل المبذول في عملية أيزوثرمية
$W = nRT\ ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$	
W	الشغل (J)
V_1	الحجم الابتدائي (m^3)
V_2	الحجم النهائي (m^3)
n	عدد مولات الغاز
R	ثابت الغاز = ($8.31\ JK^{-1}mol^{-1}$)
T	درجة الحرارة المطلقة (K)

مثال 6

تتمدد كمية من الغاز عند درجة حرارة 298 K من حجم إبتدائي $1\ m^3$ وضغط جوي عادي 1 atm إلى حجم نهائي $2\ m^3$. ما الشغل المبذول بواسطة الغاز خلال عملية التمدد؟

المطلوب: $W = ?$

المُعطيات: $V_1 = 1\ m^3, V_2 = 2\ m^3, T = 298\ K, P_1 = 1\ atm$

العلاقات: $PV = nRT \qquad W = nRT\ ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$

الحل:

$P_1 = 1\ atm = 100000\ pa$

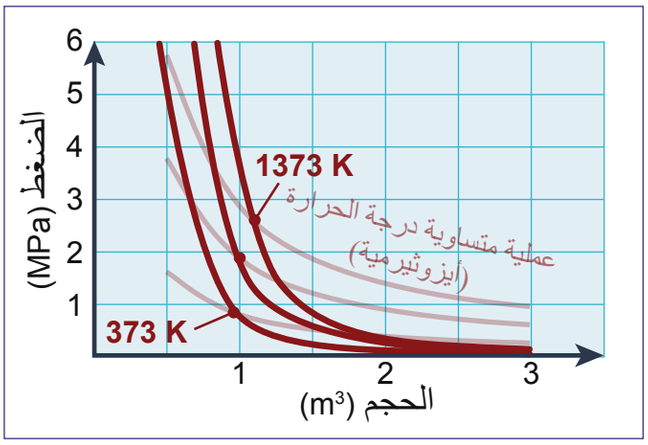
$P_1V_1 = nRT \qquad W = nRT\ ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$

$$W = P_1V_1\ ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = (100000\ Pa)(1\ m^3)ln(2) = \boxed{69315\ J}$$

ثانيًا: العمليات المكظومة (لأدياباتيكية)

العملية المكظومة (الأدياباتيكية) **Adiabatic process** هي عملية يتغير فيها كل من ضغط النظام وحجمه ودرجة حرارته، إلا أن النظام لا يتبادل الطاقة الحرارية في هذه العملية مع الوسط الخارجي.

العمليات التي تحصل بسرعة، كالتمدد السريع للغاز، تكون تقريبا عمليات أدياباتيكية لعدم وجود وقت كاف للطاقة الحرارية للتسرب من النظام أو إليه. العملية التي تحدث في وعاء معزول حراريًا بشكل كامل هي أيضًا عملية أدياباتيكية. تغيّر العملية الأدياباتيكية الضغط بسرعة أكبر من العملية الأيزوثرمية (**الشكل 5-12**).



الشكل 5-12 العمليات الأدياباتيكية.

المعادلة 6-5 تصف العلاقة بين ضغط غاز مثالي وحجمه خلال عملية أدياباتيكية. الأُس γ هي نسبة السعة الحرارية النوعية للغاز بثبات الضغط (C_P) إلى السعة الحرارية النوعية للغاز بثبات الحجم (C_v) وتساوي $\frac{C_P}{C_v}$ وقيمتها 1.4 للهواء.

6-5 علاقة الضغط بالحجم في العملية الأدياباتيكية

$$PV^{\gamma} = \text{ثابت}$$

P	الضغط (N/m^2 أو Pa)
V	الحجم (m^3)
γ	نسبة السعتين الحراريتين= (1.4 للهواء)

مثال 7

تضغط مضخّة كمية من الهواء في إطار دراجة من حجم ابتدائي $0.1\ m^3$ عند درجة حرارة 300 K وضغط 1 atm إلى حجم نهائي $0.01\ m^3$. افترض أن العملية تمت بسرعة بحيث لم يتم أي تبادل حراري مع الوسط الخارجي. ما درجة الحرارة النهائية والضغط النهائي للهواء المضغوط؟

المطلوب: $T_2 = ?\quad P_2 = ?$

المُعطيات: $V_1 = 0.1\ m^3\ ,\ T_1 = 300\ K\ ,\ P_1 = 1\ atm\ ,\ V_2 = 0.01\ m^3$

العلاقات: $PV = nRT \quad PV^{\gamma} = \text{ثابت}$

الحل: $P_1 = 1\ atm = 100000\ pa$

$$PV^{\gamma} = const \longrightarrow P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma} \longrightarrow P_2 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} P_1 = \left(\frac{0.1\ m^3}{0.01\ m^3}\right)^{1.4} (100\ kPa) = \boxed{2512\ kPa}$$

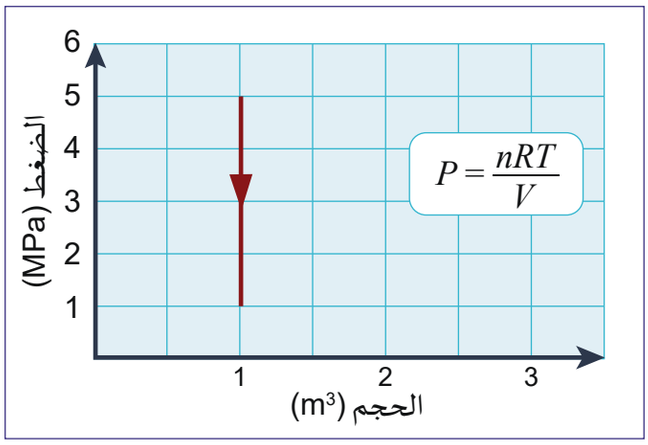
$$P_1V_1 = nRT_1 \quad , P_2V_2 = nRT_2$$

بقسمة العلاقة الثانية على الأولى نحصل على:

$$T_2 = \left(\frac{P_2V_2}{P_1V_1}\right) T_1 = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)\left(\frac{V_2}{V_1}\right) T_1 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma}\left(\frac{V_2}{V_1}\right) T_1 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} \frac{V_2^{-1}}{V_1^{-1}} T_1 = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma - 1} T_1$$

$$T_2 = \left(\frac{0.1}{0.01}\right)^{0.4} (300) = \boxed{754K}$$

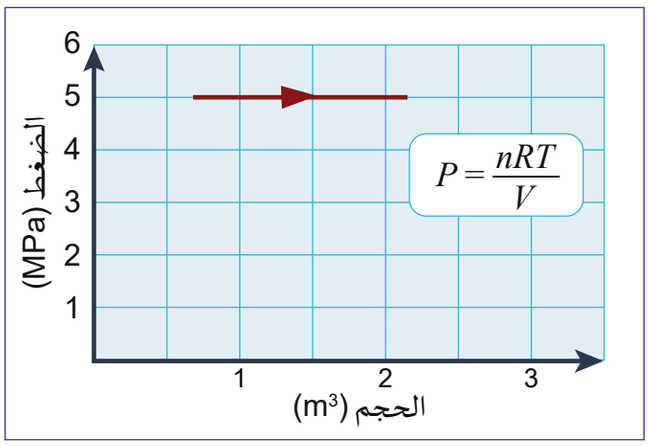
ثالثًا: العمليات الأيزوكورية



الشكل 5-13 العملية الأيزوكورية (تحت حجم ثابت).

العملية الأيزوكورية Isochoric process هي العملية التي يبقى فيها الحجم ثابتًا. ولأنّ الحجم لا يتغيَّر، فإنه لا يُبذل شغلاً لأن $W = P\Delta V$. يبيّن مُخطَّط P-V (**الشكل 5-13**) عملية تحت حجم ثابت، يمثلها خط مستقيم يبيّن التغيّر في الضغط فقط. يتناسب ضغط الغاز المثالي طرديًا مع درجة الحرارة. لذلك، وعلى الرغم من عدم بذل شغل، إلا أن الطاقة الداخلية تتغيّر مع تغيّر درجة الحرارة. تُعدّ عملية الاشتعال، والمعروفة بدورة أوتو (دورة ديناميكية حرارية تحوّل الحرارة إلى شغل ميكانيكي عن طريق آلة احتراق داخلي) أيضًا، مثالًا جيدًا على العملية تحت حجم ثابت.

رابعًا: العمليات عند ضغط ثابت(العملية الأيزوبارية)



الشكل 5-14 العملية الأيزوبارية (عند ضغط ثابت).

العملية الأيزوبارية Isobaric process هي عملية ديناميكية حرارية يبقى خلالها الضغط ثابتًا. يمكن تغيير الحجم في هذه العملية، ما يعني أن النظام يمكنه بذل شغل. مُخطَّط P-V للعملية تحت ضغط ثابت يمثله خط أفقي مستقيم (**الشكل 5-14**). في هذه العملية يتناسب حجم الغاز المثالي طرديًا مع درجة الحرارة، فإذا تغيّرت درجة الحرارة، يكون هناك تغيّر في المحتوى الحراري أيضًا. يمكن اعتبار كل من مرحلة التمدد في دورة المحرك الحراري وغلي الماء في وعاء مفتوح مثال على عملية أيزوبارية.

وضّح؟

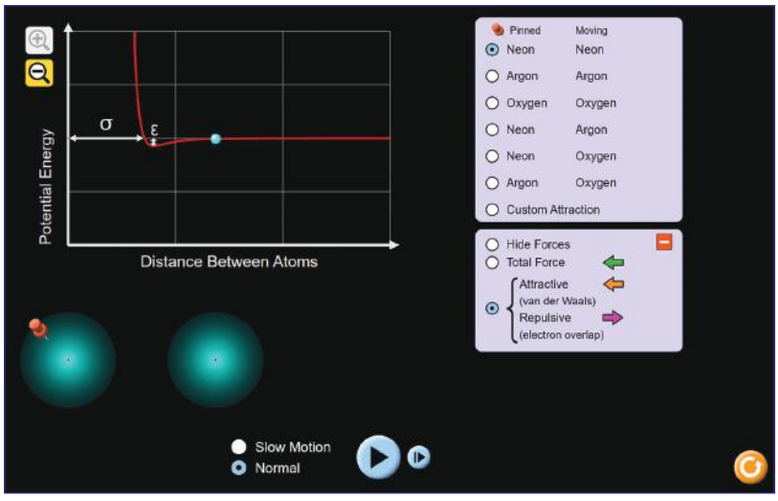
- يمكن أن تحدث العمليات الأدياباتيكية عندما تكون جُدران الوعاء معزولة حراريًا بشكل جيّد. لماذا؟
- هل تكون القوة المطبقة في العملية الأيزوبارية ثابتة؟ لماذا؟
- لماذا يكون الشغل المبذول في العملية الأيزوكورية صفرًا؟

نشاط b1-5 ملاحظة التفاعلات الذرية

سؤال الاستقصاء	ما الذي يمكننا ملاحظته في قوى التجاذب وقوى التنافر بين ذرات الغازات؟
الموادّ المطلوبة	برنامج المحاكاة

خطوات التجربة

1. حدّد الخيار الأول لذرّات النيون.
2. انقر فوق علامة تبويب القوى وحدّد خيار إظهار قوى التجاذب والتنافر.
3. انقل ذرة النيون غير المثبتة إلى أبعد مسافة ممكنة عن ذرة نيون أخرى، ولاحظ سلوكها.



الشكل 5-15 محاكاة تظهر التفاعل بين الذرات.

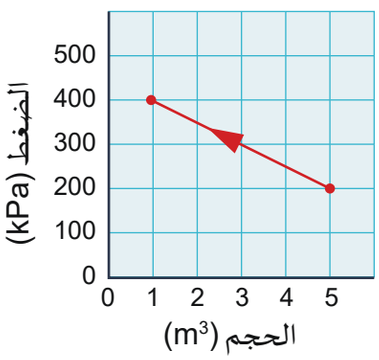
4. حرك ذرة النيون ببطء وإلى مسافة أقرب، وقم في كل مرة بتشغيل المحاكاة. لاحظ كيف تتغيّر حركة ذرة النيون مع اقترابها من ذرة النيون الأخرى.
5. كرر الإجراء نفسه للذرات الأخرى وأجب عن الأسئلة.

الأسئلة

a. كيف تتغيّر قوى التجاذب عندما تتقارب الذرات؟
b. كيف تتغيّر قوى التنافر مع تقارب الذرات؟
c. كيف يؤثّر قُطْر الذرة في قوّتي التجاذب والتنافر؟
d. ما الاستنتاج الذي يمكنك التوصل إليه في ما يتعلّق بطاقة وضع الذرات ذات الروابط القوية عندما تكون متقاربة؟
e. ما الاستنتاج الذي يمكنك التوصّل إليه في ما يتعلّق بِقُطْر الذرة إذا كانت قوة الرابطة ثابتة؟

تقويم الدرس 5-1

1. قارن بين النظام المفتوح و النظام المغلق و النظام المعزول من حيث:
   a. تبادل الطاقة.
   b. تبادل الكتلة.
   c. مثال لكل نوع.
2. صف ضرورة اختيار حدود بين النظام الديناميكي الحراري ومحيطه؟
3. تكون درجة حرارة الهواء في الغرفة الباردة 0°C. لماذا لا تكون الطاقة الداخلية صفرًا؟
4. هل يمكن تصميم نظام مغلق بدون أي عزل؟ اشرح إجابتك.
5. ما الفرق بين الطاقة الداخلية للغاز المثالي والطاقة الداخلية للغاز الحقيقي؟
6. هل الحجم متغير حالة؟ استخدم مثالًا لشرح إجابتك.
7. عندما يتمدّد الغاز في أسطوانة، أيهما يكون موجبًا؛ الشغل الذي يبذله الغاز على محيطه، أم الشغل الذي يبذله الوسط المحيط على الغاز؟
8. يوضح الرسم البياني P-V المجاور تغيّرًا في حالة الغاز المثالي.



   a. احسب الشغل المبذول بين نقطتَي البداية والنهاية.
   b. هل يبذل الشغل بواسطة الغاز على المحيط أو المحيط على الغاز؟ فسر ذلك.
9. إذا تمت مضاعفة كل من درجة الحرارة المطلقة والضغط لكمية ثابتة (عدد مولات ثابت) من غاز مثالي. استخدم معادلة الحالة لحساب التغير الناتج في حجم الغاز.
10. a. صف العملية الأديباتيكية لغاز معين.
    b. صف العملية الأيزوثرمية لغاز معين.
    c. صف العملية الأيزوبارية لغاز معين.
    d. صف العملية الأيزوكورية لغاز معين.

الدرس 2-5

قوانين الديناميكا الحرارية
Laws of Thermodynamics

المفردات

القانون الصفري للديناميكا الحرارية	Zeroth law of thermodynamics
القانون الأول للديناميكا الحرارية	First law of thermodynamics
القانون الثاني للديناميكا الحرارية	Second law of thermodynamics
الانعكاسية	Reversibility
الإنتروبي (العشوائية)	Entropy

الطاقة لا تفنى ولا تستحدث من العدم. وعلى الرغم من أننا نستخدم أنواعًا مختلفة من الطاقة، إلاّ أن مصدر كل أنواع الطاقة التي نستخدمها تقريبًا تنشأ من الاندماج النووي داخل الشمس. تنفصل أنوية الهيدروجين عن إلكتروناتها بسبب الضغط العالي ودرجة الحرارة المرتفعة داخل الشمس. ثم تندمج هذه الأنوية لتكوين ذرات الهيليوم، وتطلق طاقة اشعاعية تصل إلينا من مسافة $149.6 \square 10^6$ km. تبثّ الشمس ما يقرب من $3.86 \square 10^{26}$ W من القدرة. ويصل من هذه الكمية حوالي 1.74×10^{17} W تقريبًا إلى الأرض.

الشكل 5-16 الشمس مصدر الطاقة.

مخرجات التّعلُّم

P1210.1 يستخدم القانون الأول للديناميكا الحرارية المعبر عنه بدلالة التغير في الطاقة الداخلية والطاقة الحرارية المفقودة أو المكتسبة من النظام والشغل المبذول من أو على النظام، ويستخدم المعادلة: $\Delta U = Q - W$

P1210.2 يوضح لماذا يعتبر القانون الاول للديناميكا الحرارية صيغة أخرى لمبدأ حفظ الطاقة، ويصف القانون الثاني للديناميكا الحرارية في ضوء تغير الانتروبي (العشوائية).

P1210.3 يحسب الشغل المبذول بواسطة غاز يتمدد تحت ضغط خارجي ثابت باستخدام العلاقة: $W = P\Delta V$

نشاط a2-5 عرض مفهوم الانعكاسية

سؤال الاستقصاء	هل يمكن انعكاس عملية اختلاط السوائل الملونة؟
الموادّ المطلوبة	ماء، 3 أو 4 ألوان سائلة مختلفة، شراب ذرة، ماصة.

خطوات التجربة I

1. ضع ألوان الصبغة في وعاء فيه ماء، واخلطها باستخدام قضيب التحريك.
2. الآن، فكر في طريقة لفصل الألوان.

الشكل 5-17 وعاء فيه ألوان مختلفة.

تفسير

لا يمكن عكس هذه العملية، لأن الخطوات كانت عشوائية جدًا أو «غير منظّمة». اختلطت الأصباغ مع جزيئات الماء، ما يجعل القيام بعملية انعكاسية لفصل الألوان في منتهى الصعوبة.

خطوات التجربة II

1. ضع شراب الذرة في وعاء.
2. امزج الأصباغ المختلفة مع شراب الذرة أيضًا.
3. الآن، ضع اسطوانة زجاجية مقلوبة في الوعاء.
4. باستخدام الماصّة، ضع الصبغة بعناية في مواقع مختلفة على حافة الأسطوانة الزجاجية بطريقة تجعلها مغمورة في شراب الذرة.
5. أدر الأسطوانة الزجاجية ببطء في اتجاه عقارب الساعة دورة واحدة كاملة.
6. اعكس الدوران.
7. كرّر دوران الأسطوانة الزجاجية في اتجاه عقارب الساعة لدورتين.
8. اعكس الدوران.

الشكل 5-18 شراب الذرة مع ألوان مختلفة.

أسئلة

1. اقترح الأسباب التي تجعل العملية في الجزء 1 غير إنعكاسية، بينما العملية في الجزء 2 إنعكاسية.
2. صف كيف يمكن للنتيجة أن تتغير إذا قمت بتحريك الأسطوانة بسرعة في الإتجاهين في الجزء 2.

سلوك النظام الديناميكي الحراري

تُستَخدَم الديناميكا الحرارية لتتبع تدفق الطاقة خلال النظام عندما يخضع النظام لأي تغيّرات. درسنا فيما سبق قانون حفظ الطاقة عند تطبيقه على الأنظمة الميكانيكية. في الديناميكا الحرارية، نوسع مفاهيم حفظ الطاقة لتشمل سلوك الأنظمة التي تتغيّر فيها الطاقة الحرارية ودرجة الحرارة والحجم والضغط.

انتقال الحرارة والاتزان الحراري

عند وجود فرق في درجة الحرارة بين مادتين داخل النظام، تنتقل الطاقة الحرارية (على شكل حرارة) بين المادتين حتى تصبح كلتاهما عند درجة الحرارة نفسها. على سبيل المثال، يتم وضع مكعب كتلته 100 g من الحديد عند درجة حرارة 50°C في إناء يحتوي على 200 g من الماء عند 0°C. تتدفّق الطاقة على شكل حرارة من مكعب الحديد إلى الماء حتى يصل كلا الجسمين إلى درجة الحرارة نفسها والبالغة 2.5°C.

الشكل 5-19 انتقال الحرارة بين مادتين عند درجتَيْ حرارة مختلفتَين.

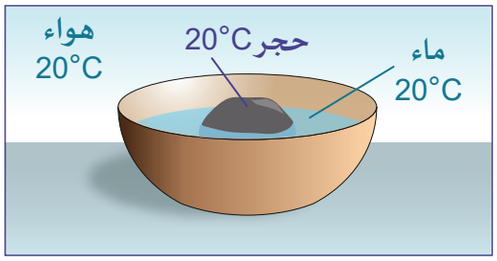
تستمرّ الحرارة في التدفّق إلى أن يصبح كل من الحديد والماء عند درجة الحرارة نفسها. بمجرد حدوث ذلك، لن تتبادل المادتان الطاقة الحرارية وهما في حالة **اتزان حراري** **Thermal equilibrium**. الاتزان الحراري هو الحالة التي تكون فيها درجة الحرارة متساوية في جميع أنحاء النظام.

قوانين الديناميكا الحرارية الأربعة

سيعيد أي نظام معزول توزيع الطاقة داخليًا من خلال انتقال الحرارة بين أجزائه، حيث ينتقل النظام بشكل طبيعي نحو الاتزان الحراري. في هذا الدرس سوف ندرس القوانين الأربعة للديناميكا الحرارية التي تحكم الانتقال نحو الاتزان الحراري.

القانون الصفري للديناميكا الحرارية

عندما يكون جسمان في حالة اتزان حراري مع جسم ثالث، فإنهما يكونان أيضًا في حالة اتزان حراري أحدهما مع الآخر. على سبيل المثال، افترض أن درجة حرارة الهواء تبلغ 20°C حول حجر موضوع بالقرب من وعاء فيه ماء. يصل كل من الحجر والماء في النهاية إلى اتزان حراري مع الهواء عند 20°C.



الشكل 5-20 القانون الصفري للديناميكا الحرارية.

إذا قمت الآن بإسقاط الحجر الذي درجة حرارته 20°C في وعاء الماء الذي درجة حرارته أيضًا 20°C (**الشكل 5-20**)، فلن تتدفق أية حرارة بينهما لأن كليهما عند درجة الحرارة نفسها. **ينص القانون الصفري للديناميكا الحرارية Zeroth law of thermodynamics** على أن الحرارة لا يمكن أن تتدفّق بشكل طبيعي بين أي جسمين لهما درجة الحرارة نفسها.

القانون الأول للديناميكا الحرارية

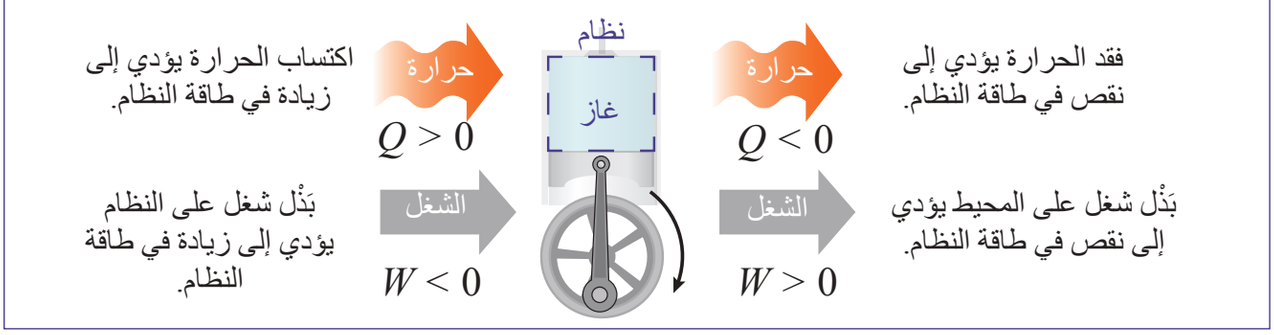
القانون الأول للديناميكا الحرارية هو قانون حفظ الطاقة المطبق على العمليات التي تشتمل على الطاقة الحرارية وشكل آخر على الأقل من أشكال الطاقة، مثل الشغل. **ينص القانون الأول للديناميكا الحرارية First law of thermodynamics** على أن التغير في الطاقة الداخلية لنظام يساوي الحرارة المكتسبة أو المفقودة، بالإضافة إلى الشغل المبذول على النظام أو بواسطة النظام (**المعادلة 5-7**).

7-5	القانون الأول للديناميكا الحرارية		
$\Delta U = Q - W$		U	الطاقة الداخلية للنظام (J)
		Q	الطاقة الحرارية المفقودة أو المكتسبة (J)
		W	الشغل المبذول بواسطة النظام أو عليه (J)

التغير في الطاقة الداخلية للنظام يساوي الحرارة المكتسبة أو المفقودة من النظام، بالإضافة إلى الشغل المبذول على النظام أو بواسطته.

تعتمد إشارة الحرارة Q والشغل W على ما إذا كانت الطاقة الداخلية للنظام تزيد أو تنقص (**الشكل 5-21**).

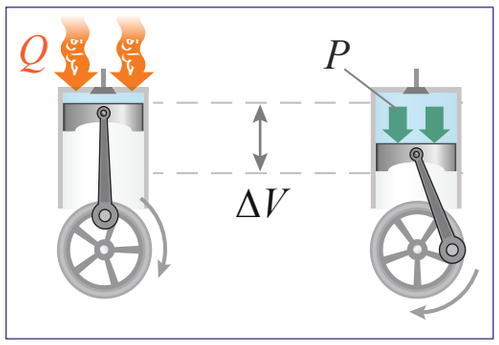
	Q	W
موجب	النظام يكتسب حرارة	النظام يُبذَل شغلًا على الوسط المحيط
سالب	النظام يفقد حرارة	الوسط المحيط يُبذَل شغلًا على النظام



الشكل 5-21 القانون الأول للديناميكا الحرارية.

القانون الأول للديناميكا الحرارية

عندما يُبذَل الشغل بواسطة نظام، فإن التغير في الطاقة الداخلية ΔU يساوي إجمالي الحرارة Q المضافة إلى النظام مطروحًا منه الشغل W الذي بذله النظام على الوسط المحيط (**الشكل 22-5**). نستخدم **المعادلة 8-5** عندما يكون الضغط ثابت، والحجم متغير في خطوات صغيرة للحصول على إجابة تقريبية بواسطة النظام.



الشكل 22-5 الشغل المبذول بواسطة النظام.

8-5	القانون الأول للديناميكا الحرارية		
		ΔU	الطاقة الداخلية للنظام (J)
		Q	الطاقة الحرارية المفقودة أو المكتسبة (J)
		P	الضغط (Pa)
		V	الحجم (m^3)

$$\Delta U = Q - P\Delta V$$

مثال 8

احسب التغيّر في الطاقة الداخلية عندما يُبذَل 60 J من الشغل على الغاز، ويفقد 150 J من الحرارة في محيطه.

المطلوب: التغيّر في الطاقة الداخلية ΔU

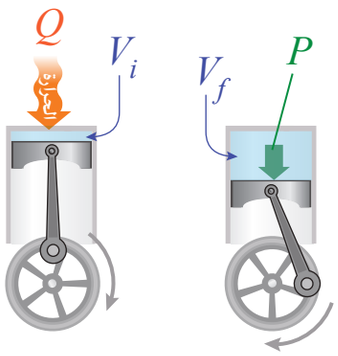
المُعطيات: الحرارة المفقودة من الغاز $Q = -150\ J$
الشغل المبذول على الغاز $W = -60\ J$

العلاقات: $\Delta U = Q - W$

الحل: التغيّر في الطاقة الداخلية $\Delta U = Q - W$، حيث Q هي الحرارة المضافة إلى الغاز. ولأن الغاز في هذا السؤال يفقد الحرارة إلى محيطه، فإنّ قيمة Q ستكون سالبة.

$$\Delta U = Q - W = -150\ J - (-60\ J) = -90\ J$$

مثال 9



أسطوانة محرك مساحة مقطعها ($0.008\ m^2$)، مملوءة بخليط من الهواء وبخار البنزين. في شوط الاشتعال تم تزويدها بكمية حرارة مقدارها (1400 J)، فازداد الحجم نتيجة حركة المكبس مسافة (0.12 m) عند ضغط ثابت يساوي ($9\square10^5\ Pa$). احسب التغير في الطاقة الداخلية لخليط الهواء وبخار البنزين.

المطلوب: $\Delta U = ?$

المُعطيات: $A = 0.008\ m^3\ ,\ d = 0.12\ m\ ,\ P = 9\square10^5\ Pa$

$Q = 1400\ J$

العلاقات: $\Delta U = Q - P\ \Delta V\ ,\quad \Delta V = dA$

الحل:

$$\Delta V = dA = (0.12\ m)\ (0.008\ m^3) = 96\square10^{-5}\ m^3$$

$$\Delta U = Q - P\ \Delta V = 1400 - (9\square10^5\square96\square10^{-5})$$

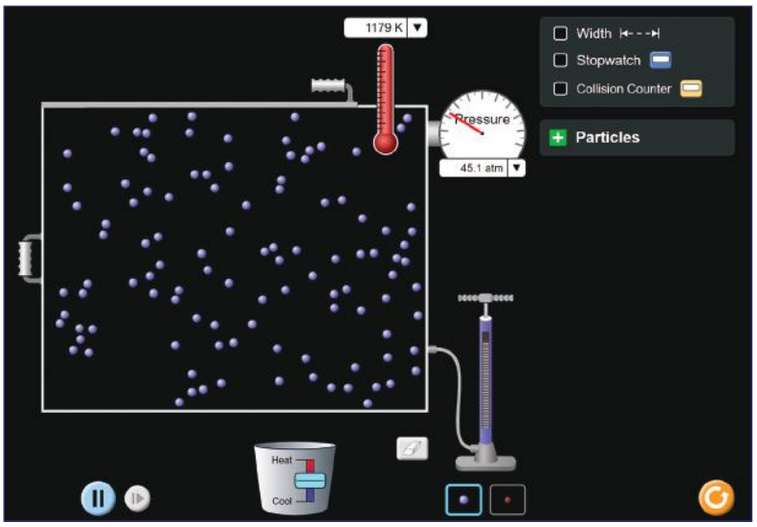
$$\Delta U = 1400 - (9\square96) = 1400 - 864 = 536\ J$$

نشاط b2-5 القانون الأول للديناميكا الحرارية

سؤال الاستقصاء	متى تزداد الطاقة الداخلية للنظام؟
الموادّ المطلوبة	المحاكاة

خطوات مخبرية

1. باستخدام المضخة في المحاكاة، أضف جزيئات الغاز إلى الغرفة.
2. دع جزيئات الغاز تملأ الحاوية مع استقرار الضغط ودرجة الحرارة.
3. لاحظ درجة الحرارة.
4. باستخدام الرافعة الموجودة إلى يمين الغرفة، قم بتقليل حجم الغرفة.
5. لاحظ درجة الحرارة الجديدة.
6. أضف كمية حرارة إلى الغرفة ولاحظ درجة الحرارة الجديدة.
7. الآن قم بتبريد الغرفة ودوّن درجة الحرارة الجديدة.
8. أعِدْ ضبط التجربة وكررها باستخدام جزيئات أصغر.



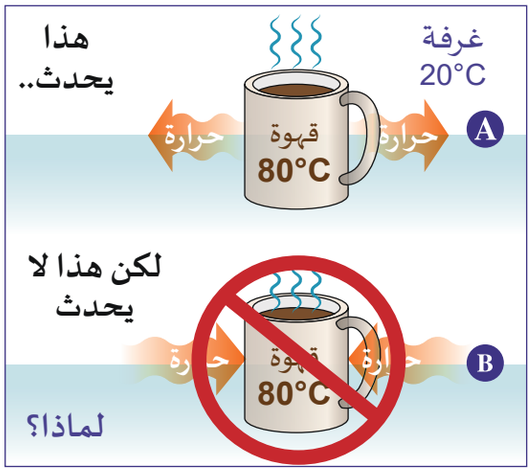
الشكل 5-23 المحاكاة.

الأسئلة

a. ما الذي تعتمد عليه الطاقة الداخلية للغاز؟
b. متى نقصت الطاقة الداخلية للغاز ومتى ازدادت؟ قم بإعداد جدول لعرض نتائجك. اشرح كيف تمكنت من الوصول إلى هذا الاستنتاج.
c. ما الفرق الناتج عند إعادة التجربة باستخدام جزيئات أصغر؟
d. ماذا سيحدث إذا كرّرت التجربة نفسها في غرفة أكبر؟

القانون الثاني للديناميكا الحرارية

من الملاحظ أن الحرارة تتدفّق بشكل طبيعي من درجة حرارة أعلى إلى درجة حرارة أقل وليس العكس. إذا ترك فنجان قهوة مثلًا عند 80°C في غرفة عند 20°C، فإن الحرارة تتدفق دائمًا من القهوة إلى الوسط المحيط (**الشكل 5-24a**). بينما لا تتدفق الحرارة أبدًا من الوسط المحيط البارد إلى القهوة الدافئة (**الشكل 5-24b**). وهذا ما يفسره القانون الثاني للديناميكا الحرارية. ينصّ **القانون الثاني للديناميكا الحرارية Second law of thermodynamics** على أن «الحرارة تتدفق بشكل تلقائي من درجة الحرارة الأعلى إلى درجة الحرارة الأقل فقط، ولا تتدفق في الاتجاه المعاكس.»



الشكل 5-24 تدفق الطاقة الممكن (a) والتدفق غير الممكن (b).

تُعدّ العملية تلقائية إذا حدثت بشكل طبيعي في ظروف معينة. على سبيل المثال، تدحرج الكرة نحو أسفل التل. العملية غير التلقائية هي عكس العملية التلقائية، إذ يتطلب حدوثها تزويد النظام بالطاقة. لن تعود الكرة إلى أعلى التل إلا إذا تم تزويدها بالطاقة الحركية.

الانعكاسية

تسمح قوانين نيوتن للحركة للأنظمة الميكانيكية بالتحرك إلى الأمام وإلى الخلف. القدرة على المضيّ الى الامام أو إلى الخلف بشكل متساوٍ يُسمّى **الانعكاسية Reversibility**. وعلى عكس الأنظمة الميكانيكية، نلاحظ أن الأنظمة الديناميكية الحرارية تكون بشكل عام **غير انعكاسية Irreversible**، وهذا يعني أنها لا تنتقل بشكل متساوٍ ذهابًا وإيابًا. تتدفّق الحرارة في اتجاه واحد فقط، من درجة حرارة أعلى إلى درجة حرارة أقل. على سبيل المثال، كلتا الحالتين التاليتين تحقّقان قانون حفظ الطاقة. ومع ذلك، تحدث بالفعل عملية واحدة فقط.

a. يحدث: فنجان قهوة عند درجة حرارة 80°C ينقل الحرارة إلى غرفة درجة حرارة الهواء فيها 20°C بحيث تصبح القهوة أكثر برودة ويصبح هواء الغرفة أكثر دفئًا. بعد زمن قصير، تصل القهوة والغرفة إلى درجة الحرارة نفسها.

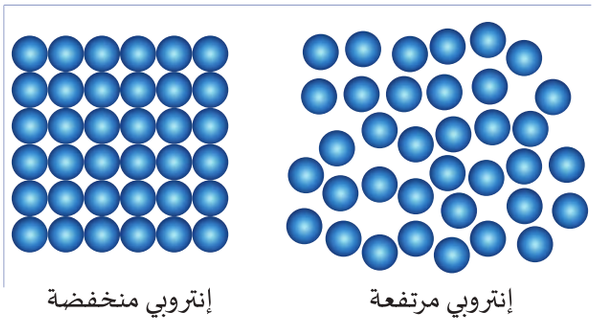
b. لا يحدث: أن يمتص فنجان القهوة عند درجة حرارة 80°C الحرارة من هواء الغرفة عند درجة حرارة 20°C، فتسخن القهوة ويصبح هواء الغرفة أكثر برودة.

وبذلك نلاحظ أن أية عملية تتدفق فيها الحرارة بشكل تلقائي وسريع تكون غير انعكاسية. هناك كثير من العمليات الأخرى غير انعكاسية. على سبيل المثال، الزجاج المكسور لا يعيد تجميع نفسه تلقائيًا. وإذا قمت بخلط الصبغة الملونة في الماء، فلن تنفصل الصبغة تلقائيًا مرة أخرى.

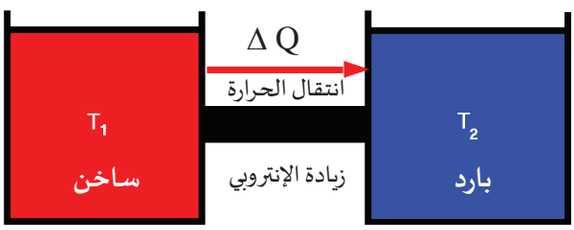
الإنتروبي (العشوائية)

يأتي القانون الثاني للديناميكا الحرارية نتيجة لصفة ديناميكية حرارية جديدة، تُسمى **الإنتروبي Entropy**. تتعلق بالحالة العيانيّة للنظام، وهي تعبّر عن مقدار الفوضى والعشوائية في النظام. إن لكل حالة عيانية (ماكروسكوبية) قيمة إنتروبي، علمًا أنّ الحالة العيانيّة (الماكروسكوبية) للنظام هي متوسط تأثير الجُسيمات المجهرية، ويوصف هذا التأثير باستخدام متغيّرات الحالة، وهي الحجم والضغط ودرجة الحرارة. وحيث أن هذه الجُسيمات يمكن ترتيبها بأكثر من طريقة، فإن الإنتروبي المتعلّقة بكل حالة عيانيّة تقيس عدد الطرائق المختلفة التي يمكن بها ترتيب الجُسيمات المجهرية ليكون لها التأثير نفسه. وكلما زاد انتظام الجسيمات في المادة نقصت العشوائية والإنتروبي.

يمكن توضيح صفة الإنتروبي للنظام عند حالة محدّدة، باستخدام مثال مكعب من الجليد عند درجة حرارة دون (0°C)، تكون الجزيئات في المكعب مترابطة معًا على شكل بلورة، وهذا الانتظام تكون فيه الإنتروبي منخفضة جدًا. عند انصهار مكعب الجليد تبدأ الجزيئات بالحركة، كما في الشكل (5-25). وتزداد احتمالات تغيير كل جزيء لأماكن وجوده، فيزداد عدد طرائق ترتيب هذه الجزيئات، أي أن الإنتروبي تزداد. ويتكرر ذلك مرة أخرى عند تحول الماء السائل إلى بخار. حيث تزداد الإنتروبي بارتفاع درجة الحرارة، وحسب القانون الثاني في الديناميكا الحرارية فإن النظام ينتقل بصورة تلقائية من حالة إلى أخرى إذا كان هذا الانتقال يسمح بزيادة الإنتروبي للنظام. كما في (الشكل 5-26).



الشكل 5-25 زيادة الإنتروبي عند التحول من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة.



الشكل 5-26 تنتقل الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد بصورة تلقائية لأنه يتيح زيادة الإنتروبي في النظام.

الإنتروبي والانعكاسية

في بخار الماء تتحرك الجزيئات في جميع الاتجاهات بحرية، وعند خفض درجة الحرارة تتقارب الجزيئات وتزداد قوى الترابط بينها، فيتحول البخار إلى سائل، ثم إلى جليد عندما تنخفض درجة الحرارة أكثر.

لكن هل يمكن لهذه العملية أن تنعكس تمامًا بحيث تعود كل جزيئة إلى مكانها الأصلي قبل التجمّد؟

هذا ما يُعرف بـ الانعكاسية، ولكن هذا لا يحدث تلقائيًا في الطبيعة، بل يتطلب ظروفًا دقيقة جدًا.

عمليًا، احتمال الانعكاسية ضعيف جدًا، لأن عدد الجزيئات في الجليد كثير جدًا، ويصعب أن تعود جميعها إلى ترتيبها السابق بدقة. ومع زيادة عدد الجزيئات، يقل احتمال حدوث الانعكاس حتى يقترب من الصفر. لذلك، في العمليات الطبيعية تزداد الإنتروبي (العشوائية) مع مرور الوقت، وتصبح العملية غير انعكاسية.

الإنتروبي والقانون الثاني للديناميكا الحرارية

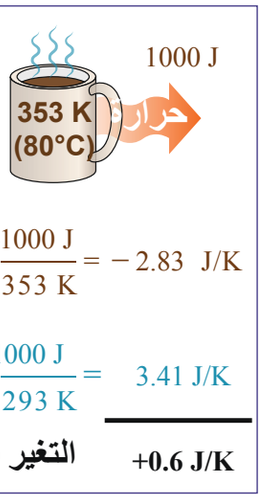
عند خلط مادتين معًا تزداد الإنتروبي للخليط عنها لكل مادة على حدة قبل الخلط، وسبب ذلك أن عدد الطرق التي يتم فيها ترتيب جزيئات المادتين معًا يزداد بشكل كبير، والخلط عملية تلقائية، تزيد من إنتروبي النظام. هذه النتيجة صحيحة بشكل عام. تزداد الإنتروبي دائمًا في أي عملية تلقائية. جميع العمليات التي تحدث بشكل تلقائي تزيد من الإنتروبي الكلية للنظام.

يجب أن تزداد الإنتروبي الكلية للنظام دائمًا في أية عملية تلقائية.

يتم حساب الإنتروبي في نظام عند درجة حرارة ثابتة باستخدام **المعادلة 5-9**. ووحدة قياس الإنتروبي هي وحدة الطاقة لكل درجة حرارة. Q هي مقدار الحرارة المفقودة أو المكتسبة بواسطة النظام و T هي درجة الحرارة بوحدة قياس كلفن.

9-5	التغير في الإنتروبي	ΔS	التغيّر في الإنتروبي (J/K)
$\Delta S = \frac{Q}{T}$		Q	الطاقة الحرارية المفقودة أو المكتسبة (J)
		T	درجة الحرارة (K)

القانون الثاني للديناميكا الحرارية هو نتيجة لازدياد الإنتروبي في أي عملية تلقائية. لنفترض أن كوبًا من القهوة فقد $Q = 1000\ J$ من الحرارة عند درجة حرارة $T = 80°C$ (**الشكل 5-27**). يفقد كوب القهوة 2.8 J/K من الإنتروبي. يكون هواء الغرفة عند 20°C ويكسب 1000 J من كوب القهوة. لذا، فإن هواء الغرفة يكسب 3.4 J/K. التغير الكلي لإنتروبي نظام الكوب والهواء هو +0.6 J/K ما يعني ازدياد في إجمالي إنتروبي النظام. إذا انعكس التدفق، فإن التغيّر الكلي في الإنتروبي سيكون -0.6 J/K لذا، فإن هذا الانعكاس لن يحدث تلقائيًا.



الشكل 5-27 تغير الإنتروبي في كوب قهوة.

يوضح القانون الثاني للديناميكا الحرارية أن الإنتروبي الكلية يمكن أن تزداد أو تبقى كما هي للعمليات التي تحدث بشكل طبيعي.

$$\Delta S \geq 0$$

تتدفق الحرارة فقط من درجات حرارة أعلى إلى درجات حرارة أقل لأن هذا هو اتجاه ازدياد الإنتروبي.

- تكون العملية قابلة للانعكاس فقط إذا بقيت الإنتروبي ثابتة، أي: $\Delta S = 0$
- الإنتروبي الكلية لنظام مغلق تزداد دائمًا إذا تم تبادل أي جزء من الطاقة على شكل حرارة ، أي $\Delta S > 0$:
- جميع العمليات التي تحدث بشكل طبيعي وتلقائي تسير فقط في الاتجاه الذي يزيد من الإنتروبي الكلية للنظام.

مثال 10

قطعة ساخنة من الحديد درجة حرارتها (207°C) وُضعت في وعاء مملوء بالماء عند درجة حرارة (27°C) بهدف تبريدها. فانتقلت كمية حرارة مقدارها (5400 J) من قطعة الحديد إلى الماء. احسب التغير في الإنتروبي لكل من قطعة الحديد والماء، وهل هذه العملية قابلة للانعكاس أم لا؟

المطلوب: $\Delta S_1 = ?\ ,\ \Delta S_2 = ?$

المُعطيات: $T_1 = 207°C\ ,T_2 = 27°C\ ,\ Q = 5400\ J$

العلاقات: $\Delta S = \frac{Q}{T}\ ,\ T_K = T_C + 273$

الحل: $T_1 = 207°C + 273 = 480\ K\ ,\ T_2 = 27°C + 273 = 300\ K$

تغير الإنتروبي لقطعة الحديد:

$$\Delta S_1 = \frac{Q}{T_1} = \frac{-5400}{480} = -11.25\ J/K$$

تغير الإنتروبي لكمية الماء:

$$\Delta S_2 = \frac{Q}{T_2} = \frac{5400}{300} = 18\ J/K$$

التغير الكلي في الإنتروبي للنظام المكون من قطعة الحديد والماء يساوي:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -11.25 + 18 = 6.75\ J/K$$

بما أن $(\Delta S > 0)$ فهذه العملية تحدث تلقائي.

مثال 11

احسب تغير الإنتروبي عندما ينصهر 1 kg من الجليد إلى الماء عند 0°C، علمًا بأن الحرارة الكامنة لانصهار الجليد هي 335 kJ/kg

المطلوب: التغير في الإنتروبي ΔS

المُعطيات: درجة الحرارة 0°C، الكتلة $m = 1\ kg$

العلاقات: $Q = ml_f$ ، $\Delta S = \frac{Q}{T}$

الحل: تعتمد الإنتروبي على الحرارة المُتبادلة. على الرغم من أن السؤال لا يخبرنا عن كمية الحرارة التي يمتصها الجليد، إلا أننا نعلم أن الحرارة التي يحتاج إليها الجليد لكي ينصهر يمكن حسابها بواسطة العلاقة: $Q = ml_f$

الحرارة الكامنة لانصهار الجليد هي 335 kJ/kg

الطاقة الحرارية التي يمتصّها الجليد هي : $Q = (1)\ (335 \times 10^3) = 335 \square 10^3\ J$

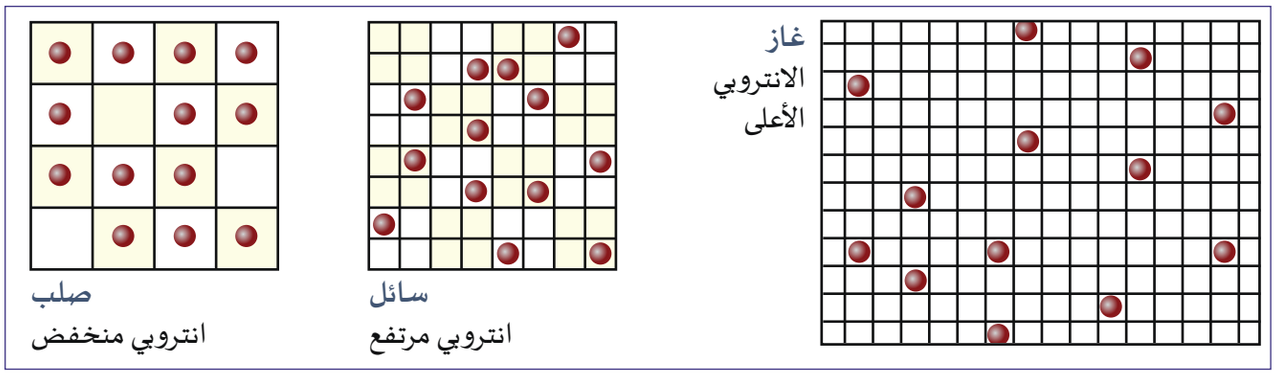
لحساب التغير في الإنتروبي، نحتاج إلى تحويل درجة الحرارة إلى K: $273 + 0 = 273\ K$

$$\Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{335 \times 10^3}{273} = \boxed{1227\ J/K}$$

القانون الثالث للديناميكا الحرارية

تزودنا الإنتروبي بالأساس النظري للصفر المطلق. في أي نظام توجد طريقة واحدة فقط لتنظيم جميع الذرات، بحيث يكون للنظام أقل طاقة ممكنة. ومثل هذا النظام الذي لذراته طريقة تنظيم واحدة فقط يُعدّ مثاليًا. يبين **القانون الثالث للديناميكا الحرارية Third law of thermodynamics** أن الصفر المطلق هو أدنى درجة حرارة ممكنة، لأنها الدرجة التي يكون عندها إنتروبي النظام صفرًا. النظام عند الصفر المطلق ليس لديه القدرة على نقل الحرارة إلى أي نظام آخر.

تزداد الإنتروبي بسرعة مع ارتفاع درجة الحرارة فوق الصفر المطلق. عند قيم الضغط المتساوية، تكون للمادة إنتروبي أقل في الحالة الصلبة، وإنتروبي أعلى في الحالة السائلة ، وزيادة أخرى في الإنتروبي في الحالة الغازية. تختلف قيم الإنتروبي لأن الجزيئات في المادة الصلبة لديها طاقة أقل وقدرة أقل على تبادل الأماكن مع الجُسَيمات الأخرى. متوسط تباعد جزيئات المادة في الحالة السائلة مشابه لمتوسّط تباعد جزيئات المادة في الحالة الصلبة، لكن الجزيئات في السائل لها طاقة حرارية أكبر. المزيد من الطاقة الحرارية يعني أن الجُسَيمات قد تتبادل الأماكن بسهولة. وهذا يعني أن هناك المزيد من الطرائق لترتيب الجُسَيمات مع الحفاظ على الحالة المتوسطة نفسها. في حالة الغاز، تنتشر الجزيئات وتتنوع سرعتها بشكل أكبر. يكون للمادة في حالتها الغازية أعلى قيمة إنتروبي من بين الحالات الثلاثة للمادة.



الشكل 5-28 الإنتروبي تزداد مع الانتقال من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة ثم إلى الغازية.

وبما أن التغير في الانتروبي يحدث عند تبادل الطاقة الحرارية، فإنّ تغير حالة المادة يعني تغير في حرارة النظام اي تغير في الانتروبي، حتى في حال بقاء درجة حرارة النظام ثابتة. على سبيل المثال، نحتاج إلى 334 J من الحرارة لتحويل 1 g من الثلج عند 0°C إلى 1 g من الماء السائل عند 0°C.

تقويم الدرس 5-2

1. يريد طالب أن يصنع آلة لها عجلة لا تتوقّف عن الدوران. هو يدّعي أنها ستنجح لأن الطاقة محفوظة. هل هو على صواب؟ استخدم القانون الأول للديناميكا الحرارية للتوضيح.

2. a. الطاقة الداخلية الابتدائية لغاز هي 200 J. عند إضافة 80 J من الحرارة إلى الغاز، يقوم الغاز ببذل 70 J من الشغل. احسب الطاقة الداخلية النهائية للغاز.
   b. هل ترتفع درجة حرارة الغاز أم تنخفض؟ اشرح إجابتك.

3. يقول طالب إنه يستطيع تحدي قانون الإنتروبي، حيث يمكنه فرز كيس الحلوى وفقًا للّون وفصل الألوان بعضها عن بعض. هل هذا يعني أنه خالف القانون الثاني للديناميكا الحرارية؟

4. صف كيفية ارتباط القانون الأول للديناميكا الحرارية بمفهوم حفظ الطاقة.

5. تبرد القهوة الساخنة في كوب من 80°C إلى درجة حرارة الغرفة خلال 15 دقيقة. وتبرد كمية مساوية من القهوة الساخنة عند 80°C أيضًا في كوب معزول، إلى درجة حرارة الغرفة، ولكن في مدّة 4 ساعات. في أيّ كوب تعرّضت القهوة لتغيّر أكبر في الإنتروبي ؟

6. تستلقي سحلية التنين الملتحي في شمس الصحراء نهارًا حيث تبلغ درجة حرارة جسمها 40°C. في الليل تصبح درجة حرارة الهواء 15°C، وتفقد السحلية 100 J من الحرارة أمّا درجة حرارة جسمها فتتزن مع درجة حرارة الهواء ليلًا. ما التغيّر الذي حدث في الإنتروبي؟

7. لماذا تنخفض درجة حرارة الغاز سريع التمدد؟ استخدم القانون الأول للديناميكا الحرارية لشرح إجابتك.

8. a. ما الغاز الأكثر انتظامًا، الغاز الذي يكون له درجة حرارة واحدة لكل أجزائه، أم الغاز الذي يشتمل على درجات حرارة مختلفة في أجزائه المختلفة؟
   b. أيٌّ من الغازين الأكثر انتروبي؟
   c. في أيّ من الغازين يمكن أن يؤدي نقل الحرارة إلى شغل مبذول من دون انتقاله كحرارة إلى نظام آخر؟

الدرس 3-5
المُحرّكات الحراريّة
Heat Engines

إذا تُركت الفاكهة والخضروات خارج الثلاجة عند درجة الحرارة المرتفعة، فإنَّ معظمها يتعفَّن قبل استهلاكه. لم تجعل الثلاجات تخزين المواد الغذائية ممكنًا فحسب، بل أتاحت استيراد أنواع مختلفة من الأطعمة أيضًا.

عند ضغط الغاز وتحويله إلى سائل ترتفع درجة حرارته، وعند إزالة ضغطه وتمدّده وتحوله إلى غاز تنخفض درجة حرارته. ولتشغيل الثلاجة يُستخدم محرك كهربائي لبذل شغل على المائع المحصور في دورة مغلقة من الأنابيب وتغيير ضغطه بما يؤدي إلى تغيير درجة حرارته.

الشكل 5-29 ثلاّجة حديثة.

تعمل الثلاجة ضمن دورة من مرحلتين؛ الأولى في داخل الثلاجة حيث يعمل المحرك الضاغط على ضخ مائع التبريد داخل أنابيب ضيقة ونتيجة لهذا الضغط المرتفع يكون المائع في الحالة السائلة. عند وصول المائع إلى صمّام خاص داخل الثلاجة، فإنه يتمدد بسرعة نتيجة انخفاض الضغط فيتحول إلى الحالة الغازية وتنخفض درجة حرارته إلى (-20°C) تقريبًا، فيمتص كمية من الحرارة من المخزون الغذائي. في المرحلة الثانية يتم ضغط الغاز بواسطة المحرك، فيتقلص ويتحول إلى سائل، ونتيجة ذلك ترتفع درجة حرارته، وتنتقل الحرارة منه إلى الوسط المحيط خارج الثلاجة. ثم يعيد الدورة من جديد.

مخرجات التّعلُّم

P1210.3 يحسب الشغل المبذول بواسطة غاز يتمدّد تحت ضغط خارجي ثابت باستخدام العلاقة $W = P\,\Delta V$.

P1210.4 يذكر نص القانون الثاني للديناميكا الحرارية بصيغة كلفن بلانك، ويبين كيف يؤدي إلى فرض حدود على كفاءة أي مُحرّك حراري مرتبط بدرجات حرارة مصادر الحرارة ومصارفها.

المفردات

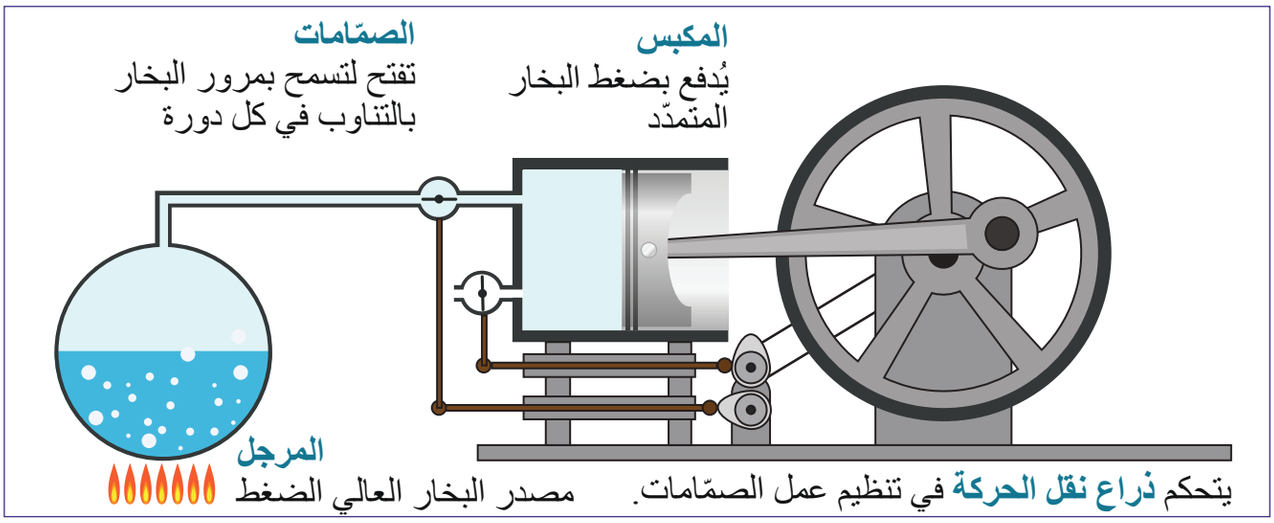
دورة كارنو	Carnot cycle

المُحرّكات الحرارية

المُحرّك الحراريّ هو نظام يحوّل الطاقة الحرارية (الحرارة) إلى أشكال أخرى من الطاقة، وتكون في أغلب الأحيان على شكل شغل ميكانيكي. ويشمل ذلك المحرّك البخاري ومُحرّك البنزين أو الديزل في السيارات الحديثة والتوربينات الضخمة التي تُشغّل المولّدات في كل محطات توليد الكهرباء التي تعمل بالطاقة النووية أو الغاز أو الفحم.

المُحرّك البخاري الأول

كان المُحرّك البخاري الذي اخترعه نيوكومن في العام 1712 أول مُحرّك حراريّ صناعي. كانت كفاءة هذا المُحرّك منخفضة للغاية لأنه كان يستهلك كثيرًا من الفحم. طُلب من صانع الآلات الأسكتلندي جيمس واط في العام 1763 إصلاح أحد مُحرّكات نيوكومن. وبدلًا من اصلاحه، ابتكر جيمس واط مُحرّكًا أعلى كفاءة. كانت التحسينات التي أدخلها واط على المُحرّك البخاري ناجحة جدًا فسمّيت وحدة القدرة (واط) باسمه. وقد اقترن اسم «جيمس واط» باسم «مخترع المُحرّك البخاري» حتى اليوم تقريبًا. تستخدم المُحرّكات الحرارية الحديثة، بما في ذلك المُحرّك الذي صمّمه واط، الضغط بدلاً من الفراغ لتوفير القوة الميكانيكية التي تحوّل الطاقة الحرارية إلى شغل.



الشكل 5-30 عمل المحرّك البخاري.

تكتسب جميع المُحرّكات الحرارية الطاقة عن طريق انتقال الحرارة من جسم درجة حرارته مرتفعة إلى جسم درجة حرارته منخفضة. تبدو هذه العملية بسيطة في الرسم التخطيطي (**الشكل 5-30**)، ولكنها معقدة للغاية من الناحية العملية، لأنّها تتضمن تحريك مكابس أو تدوير توربينات. في المُحرّكات الحرارية الحقيقية يجري تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية بواسطة التأثير في الضغط والحجم ودرجة الحرارة والحالة الفيزيائية لمائع التشغيل. في محرك السيارة يكون مائع التشغيل هو الهواء، أما الطاقة الحرارية اللازمة فتأتي من اشتعال مزيج البنزين والهواء وفي محطة توليد الكهرباء يكون مائع التشغيل هو البخار. وقد تنتج الطاقة الحرارية من التفاعلات النووية أو الغاز أو الفحم. تستخدم الحرارة لغلي الماء إلى أن يتحوَّل إلى بخار عند ضغط عالٍ، فيتمدَّد البخار، ما يؤدي إلى تدوير توربين يعمل على تشغيل المولّد الكهربائي.

تشغيل المُحرّك الحراري

يعمل مُحرّك السيارة والتوربينات البخارية في محطة توليد الكهرباء على تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكي من خلال تمدّد الغاز. يَستخدِم المُحرّك في معظم السيارات مكبسًا يتحرك داخل أسطوانة. ويكون الغاز المحصور داخل الأسطوانة هو مائع التشغيل. ويلخص **الشكل 5-31** الخطوات التي يتبعها المُحرّك الحراري في عمله.

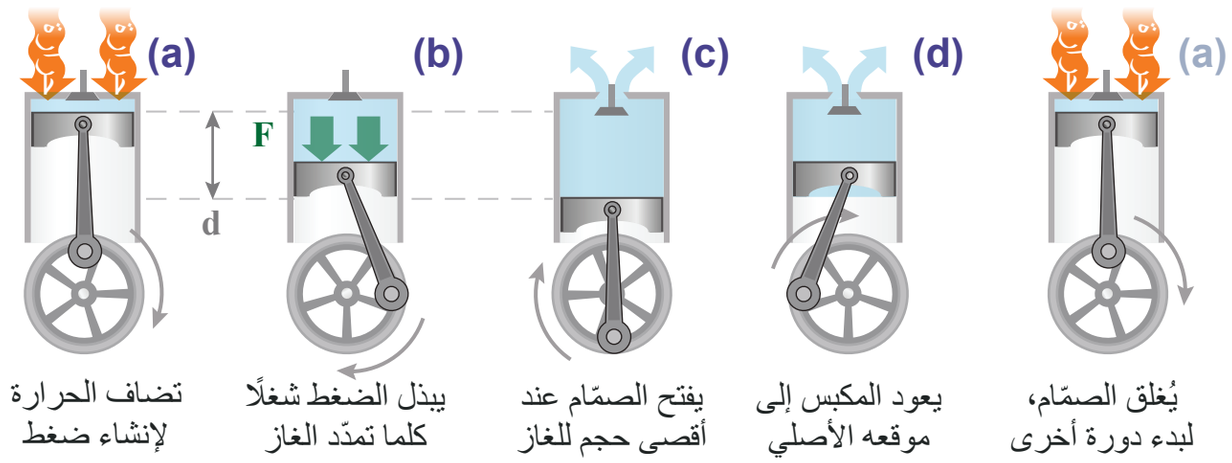
a. تُضاف الحرارة إلى الغاز، فتزداد درجة حرارته وضغطه.

b. تدفع الزيادة في الضغط المكبس فيبذل شغلًا على الوسط المحيط. وعندما يتمدّد الغاز يبرد أيضًا.

c. عندما يصل المكبس إلى نهاية شوطه عند أقصى حجم، يتحرّر عندها الضغط بفتح الصمام.

d. يعود المكبس إلى موقع البداية ليبدأ دورة جديدة كما في الخطوة (a).

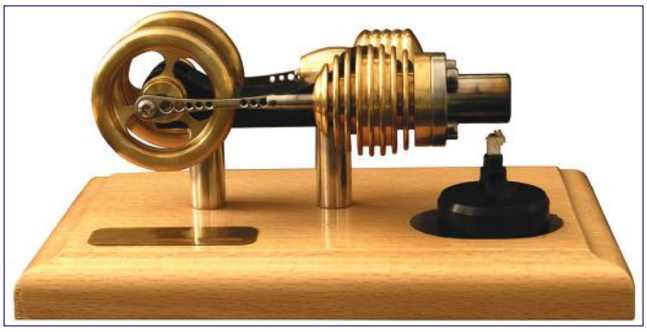
يتّصل المكبس بعجلة دوّارة تعمل على إعادة المكبس إلى نقطة البداية.



الشكل 5-31 دورة المُحرّك الحراري.

استكشف

يبيّن **الشكل 5-32** نموذجًا لمُحرّك ستيرلنج، وهو نوع من المُحرّكات الحرارية. يعمل مُحرّك ستيرلنج بتسخين الغاز الذي يتمدّد ويدفع المكبس إلى الوراء ويدوّر العجلة. يحل الهواء البارد من الجانب الآخر من المكبس محل الهواء الساخن، ما يؤدي إلى تمدد المكبس إلى الجانب الآخر... وهكذا.



الشكل 5-32 مُحرّك ستيرلينج.

تحليل مُخطَّطات الضغط – الحجم P-V

مُخطَّطات الضغط - الحجم مفيدة لفهم العمليات الديناميكية الحرارية، مثل دورة المُحرّك الحراري. يتطلَّب تفسير مُخطَّطات الضغط- الحجم عناية وممارسة. انظر أولًا إلى كيفية تغيّر الضغط والحجم لكل عملية من عمليات المُخطَّط. ثم استخدم معلومات إضافية، كثبات كمية الغاز أو الحرارة.

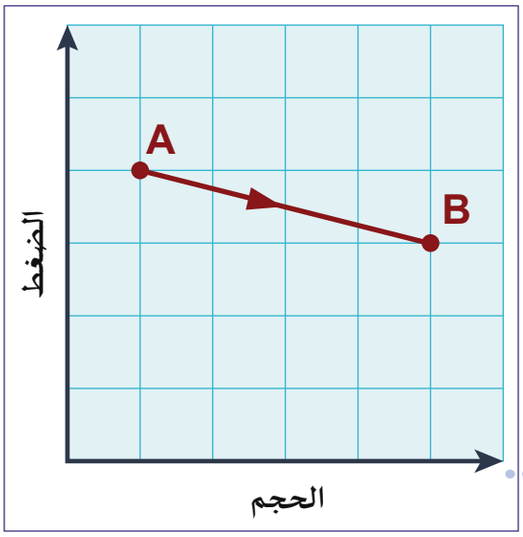
مثال 12

يبيّن **الشكل 5-33** عملية ينتقل فيها الغاز من الحالة A إلى الحالة B ولا توجد حرارة مضافة. أيٌّ مما يأتي يُعدّ صحيحًا؟ ولماذا؟

a. تبقى طاقة الغاز ثابتة.

b. يبذل الغاز شغلًا على الوسط المحيط ويفقد الغاز طاقة.

c. يبذل الوسط المحيط شغلًا على الغاز ويكتسب الغاز طاقة.



الشكل 5-33 مُخطَّط الضغط – الحجم P-V.

المطلوب: هل يكون الشغل المبذول موجبًا أم سالبًا أم صفرًا؟

المُعطيات: يبيّن مُخطَّط الضغط – الحجم تناقصًا في الضغط وزيادة في الحجم.

العلاقات: $\Delta U = Q - P\Delta V$

الحل: يلاحظ أن ΔV موجب، لأن المُخطَّط يبيّن أن الحجم عند B هو أكبر من الحجم عند A. والضغط موجب أيضًا ؛ لذلك، فإن $P\Delta V > 0$، والغاز يبذل شغلًا على الوسط المحيط. لذلك يجب أن تنخفض طاقة الغاز، لأننا لم نُضف حرارة إليه تعوّض عن الشغل المبذول. (أي أنَّ: $Q = 0$).

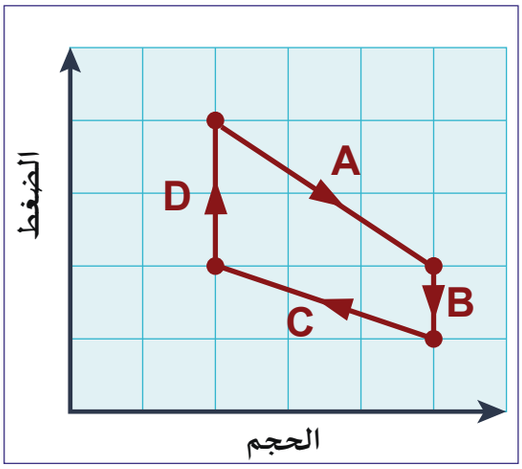
الخيار b صحيح. يبذل الغاز شغلًا على الوسط المحيط ويفقد الغاز طاقة.

مثال 13

يبيّن **الشكل 5-34** دورة من أربع مراحل يتغيّر فيها الضغط والحجم لكمية ثابتة من الغاز.

a. في أي مرحلة من العملية ينضغط الغاز؟ كيف عرفت؟

b. هل تمتصّ الدورة الكاملة طاقة حرارية أم إنّها تعطي طاقة حرارية؟ فسر ذلك؟



الشكل 5-34 مُخطَّط P-V.

المطلوب:

a. في أي جزء ينضغط الغاز؟

b. هل يكتسب النظام الحرارة أم يفقدها؟

المُعطيات: يبيّن مُخطَّط P-V تناقصًا في الضغط وزيادة في الحجم.

العلاقات: $\Delta U = Q - P\Delta V$

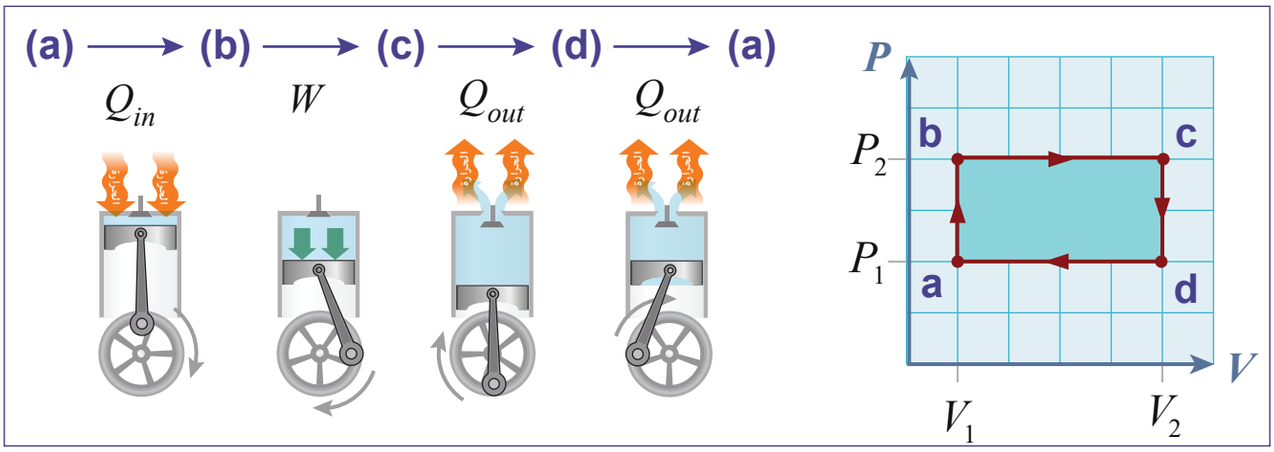
الحل:

a. الانضغاط هو تقليل الحجم. تبيّن العملية C فقط نقصًا في الحجم.

b. محصّلة التغيّر في الطاقة الداخلية للغاز في أي دورة كاملة يساوي صفرًا. فإذا كانت محصّلة التغيّر في الشغل موجبة، فإن الحرارة يجب أن تُضاف إلى الغاز. يتمدّد الغاز في المرحلة A، وبالتالي يبذل شغلًا على الوسط المحيط؛ لذلك $P\Delta V$ تكون موجبة. يُضغط الغاز في المرحلة C، وبالتالي يبذل الوسط المحيط شغلًا على الغاز، فتكون $P\Delta V$ سالبة. ولأن الضغط في المرحلة A أعلى منه في المرحلة C والتغيّر في الحجم هو نفسه، فإن محصّلة التغيّر في الشغل موجبة، ويجب إضافة الحرارة.

كفاءة المحرك الحراري

كفاءة المُحرّك الحراري هي نسبة الشغل الناتج مقسومًا على الحرارة الداخلة. ولكن المحركات الحرارية تطرد خلال دورتها جزءًا من الطاقة الحرارية إلى الوسط الخارجي. افترض الدورة النموذجية في **الشكل 5-35**.



الشكل 5-35 محرك حراري نموذجي.

a → b تدخل الحرارة Q_{in} إلى المحرك عند حجم ثابت

b → c يُبذل شغل W بواسطة المحرك الحراري عند تمدد الغاز عند ضغط ثابت

c → d تتسرب الحرارة Q_{out} من المحرك إلى الوسط المحيط عند انخفاض الضغط عند حجم ثابت

d → a تتسرب الحرارة Q_{out} من المحرك إلى الوسط المحيط لدى انخفاض الحجم عند ضغط ثابت.

أقصى مقدار من الشغل يمكن إنتاجه بواسطة المحرك هو الفرق بين الحرارة التي يكتسبها والحرارة التي يفقدها:

$$W = Q_{in} - Q_{out}$$

وتُعطى كفاءة المحرك في دورة كاملة **بالعلاقة 5-10**.

10-5	كفاءة المحرك الحراري		
	$\eta = \frac{W}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}}$	η	الكفاءة
		Q	الطاقة الحرارية (J)
		W	الشغل (J)

مثال 14

أسطوانة محرك مملوءة بالغاز يتم تزويدها بكمية من الحرارة (2400 J) خلال دورة واحدة، فيبذل الغاز شغلاً على الوسط المحيط، ويفقد خلال الدورة نفسها كمية من الحرارة (1860 J). احسب كفاءة المحرك.:

المطلوب: $\eta = ?$

المُعطيات: $Q_{in}=2400\ \text{J}\ ,\ Q_{out}=1860\ \text{J}$

العلاقات: $\eta = \dfrac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}}$

الحل:

$$\eta = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{2400\text{-}1860}{2400} = \frac{540}{2400} = 0.225 = 22.5\ \%$$

رسوم P-V البيانية الحقيقة

برأيك، ما مدى واقعية إضافة كمية حرارة لنظام ما عند حجم ثابت؟ قم ببحث حول المحركات الحرارية لترى ما إذا كان الرسم البياني P-V يبدو فعليا كشكل مستطيل كما في **الشكل 5-35**. لحسن الحظ، فإن الاستنتاجات التي نستخلصها من تحليل المحرك الحراري تبدو صحيحة حتى لو كان الرسم البياني P-V ليس مستطيلا تماما.

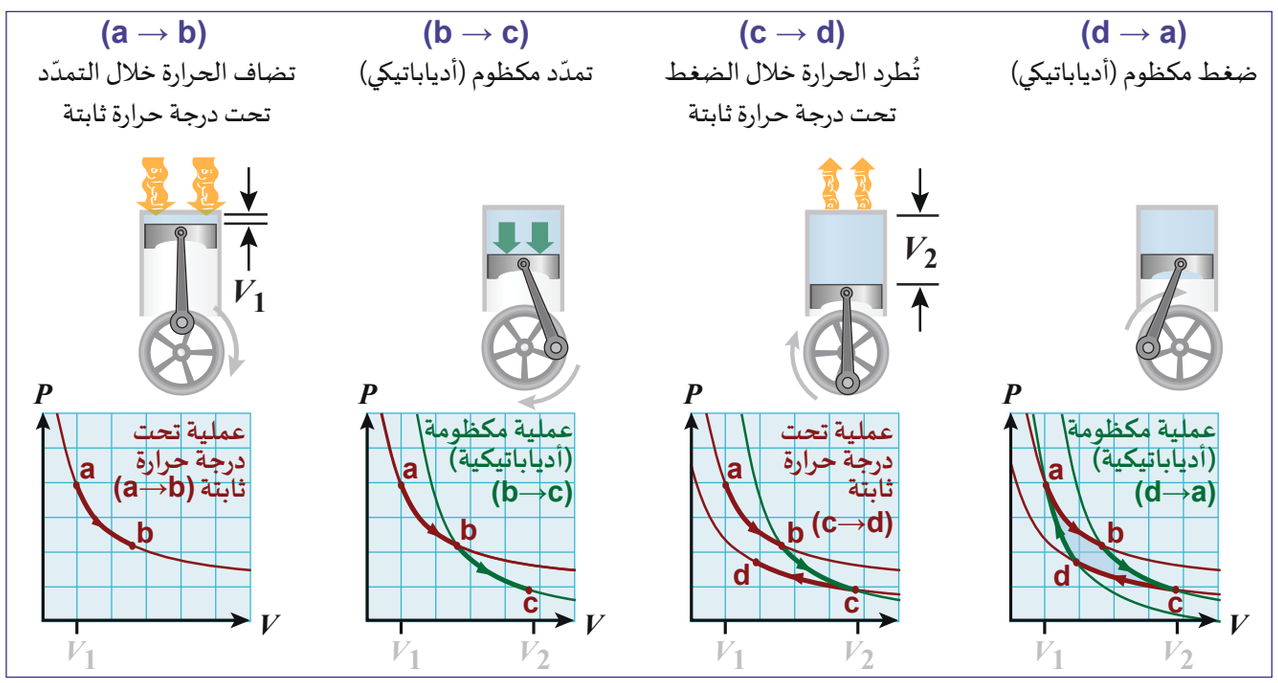
دورة كارنو

تنص صيغة كلفن - بلانك للقانون الثاني للديناميكا الحرارية على أنه من المستحيل وجود آلة تحوّل كل الطاقة الحرارية إلى شغل. وبالتالي، لا يمكن لأي مُحرّك حراري يعمل فوق الصفر المطلق أن يحوّل 100% من الحرارة إلى شغل ناتج. وهذا يعني أن آلات الديناميكا الحرارية لن تكون فعّالة بنسبة 100% أبدًا. اكتشف المهندس الفرنسي سعدي كارنو في العام 1824 دورة تتميز بأعلى كفاءة ممكنة نظريًا. تُسمّى هذه الدورة **دورة كارنو Carnot cycle**.

كيف تعمل دورة كارنو؟

افترض وجود مُحرّك حراري يستخدم الغاز المثاليّ وقد زُوّد بمكبس يبدأ من الموقع a (**الشكل 5-36**).

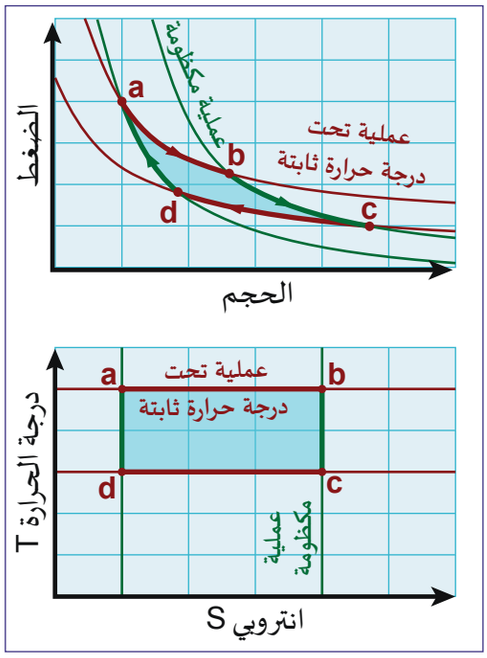
1. تُضاف الحرارة ويُسمح للغاز بالتمدّد وفق عملية أيزوثرمية بتحويل بعض الحرارة إلى شغل باتّباع المنحنى (a ⟶ b) الأيزوثيرمي، عند درجة حرارة ثابتة T.
2. يُسمح للغاز بعد ذلك بالتمدّد أكثر (b ⟶ c) وفق عملية أديباتيكية. يبذل الغاز المزيد من الشغل مع انخفاض درجة حرارته. وهذا يُعدّ عملية انعكاسية وغير احتكاكية ينتج عنها أكبر قدر ممكن من الشغل من الغاز المتمدّد.
3. عندما يصل المكبس إلى أدنى نقطة له (c)، يُضغط مرة أخرى، ولكن عند درجة حرارة ثابتة على طول منحنى العملة الأيزوثرمية. (c ⟶ d) تُنقل الحرارة الناتجة عن انضغاط الغاز إلى الوسط المحيط تحت درجة حرارة أدنى Tc.
4. الخطوة الأخيرة في الدورة هي إعادة ضغط الغاز إلى نقطة البداية بشكل أديباتيكي انعكاسي (d ⟶ a)، حيث Q = 0.



الشكل 5-36 مُخطّط الضغط - الحجم لدورة كارنو.

تحليل دورة كارنو

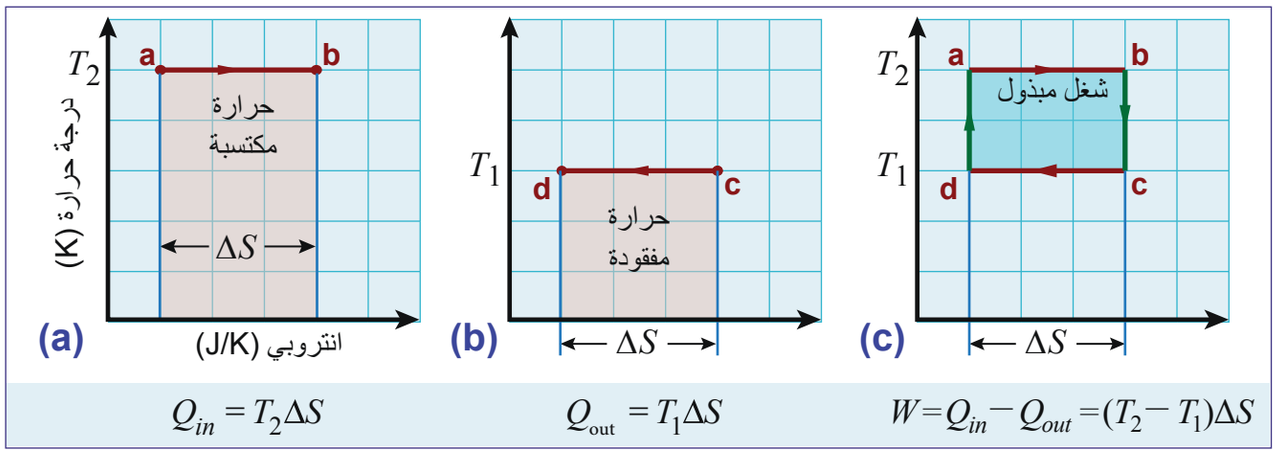
يصعب حساب الشغل المبذول خلال دورة كارنو نظراً لأن المساحة المظللة في مخطط الضغط–الحجم تأخذ شكلاً منحنيًا. لذلك استخدم كارنو مخطط درجة الحرارة الانتروبي T-S. تعبّر مساحة مُخطَّط درجة الحرارة–الإنتروبي عن الحرارة الناتجة. تُمَثَّل العملية الأيزوثرمية بخط أفقي (a ⟶ b). أما العملية (b ⟶ c) فهي عملية أدياباتية لا تتدفَّق فيها الحرارة ($Q = 0$)، ويُعَبّر عنها بخط عمودي لا تتغير فيه الإنتروبي. الدورة بأكملها مستطيلة الشكل على مُخطَّط درجة الحرارة–الإنتروبي وتحدّها العمليتان الأيزوثيرميتان (a ⟶ b) و (c ⟶ d) والعمليتان الأدياباتيكيتان (b ⟶ c) و (d ⟶ a).



الشكل 5-37 دورة كارنو (a) مُخطَّط الضغط - الحجم، (b) مُخطَّط درجة الحرارة- الإنتروبي.

كفاءة دورة كارنو

يسمح لنا مُخطَّط درجة الحرارة – الإنتروبي، بتحليل كفاءة دورة كارنو. افترض أن المُخطَّط في **الشكل 5-38** يبدأ من الصفر المطلق باعتباره الحد الأدنى لمحور درجة الحرارة. وباستخدام هذا التدريج، تكون الحرارة الداخلة إلى المُحرّك مساوية للمساحة المظلّلة باللون الوردي في **الشكل 5-38 (a)** والحرارة الخارجة من المُحرّك في **الشكل 5-38 (b)**. الحرارة التي تحوّلت إلى شغل هي المساحة المظلّلة باللون الأزرق في **الشكل 5-38 (c)**، وهي تقاطع المُخطَّطين الآخرين (**a** و **b**) والتي تمثل حاصل طرح المساحتين تحت الخطين ab و cd.



الشكل 5-38 (a) حرارة مكتسبة، (b) حرارة مفقودة (c) شغل مبذول.

الكفاءة هي الشغل الناتج مقسومًا على الحرارة المكتسبة. باستخدام المعادلات في **الشكل 5-38**، يمكن تلخيص **كفاءة دورة كارنو Carnot efficiency** في **المعادلة 5-11**، حيث يعمل مُحرّك كارنو بين درجتَي الحرارة T_1 و T_2.

11-5	كفاءة دورة كارنو		
		T_1	أدنى درجة حرارة (K)
الكفاءة $= \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \times 100\%$		T_2	أعلى درجة حرارة (K)

فهم كفاءة دورة كارنو

لا يمكن أن تكون كفاءة أيّ مُحرّك حراري يعمل فوق الصفر المطلق 100%، بما فيها دورة كارنو، لأن بعض الحرارة يُصرف للوسط المحيط على طول المسار c ⟶ d في الدورة الديناميكية الحرارية. تخبرنا المعادلة 5-11 أن أعلى كفاءة تكون عندما يعمل المُحرّك بين أكبر فرق في درجات الحرارة. يصل مُحرّك السيارة النموذجي إلى درجة حرارة احتراق قصوى تبلغ حوالي 2500 K بينما درجة حرارة العادم تبلغ 1100 K. كفاءة دورة كارنو للحصول على مُحرّك حراري مثالي يعمل بين درجَتَي الحرارة هاتين هو 56%. يتميز مُحرّك الاحتراق الداخلي الحديث بكفاءة حرارية تشغيلية تتراوح بين 20% لسيارة توزيع البضائع و 34% لمُحرّك سيارة سباق جيدة.

مثال 15

تبلغ درجة حرارة البخار ذي الضغط العالي في محطة توليد الطاقة الكهربائية بالفحم 400°C تقريبًا. وتبلغ درجة حرارة مياه خزان التبريد حوالي 20°C تقريبًا. احسب أعلى كفاءة ممكنة نظريًا (كفاءة دورة كارنو لمحطة توليد الكهرباء).

الشكل 5-39 محطّة توليد الطاقة الكهربائية بالفحم.

المطلوب: كفاءة دورة كارنو

المُعطيات:

$$T_1 = 20°C;$$
$$T_2 = 400°C;$$

العلاقات:

$$\text{الكفاءة} = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \times 100\%$$

الحل: لحساب الكفاءة ، يجب علينا تحويل درجات الحرارة إلى كلفن.

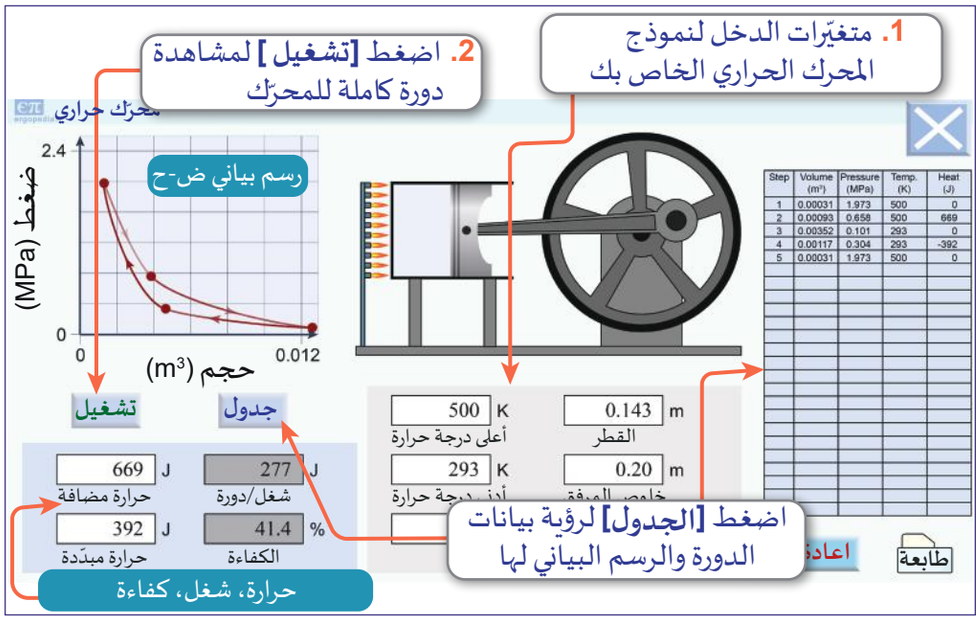
$$T_1 = 20 + 273 = 293\ \text{K}$$
$$T_2 = 400 + 273 = 673\ \text{K}$$
$$\text{الكفاءة} = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \times 100\%$$
$$\text{الكفاءة} = \left(1 - \frac{293}{673}\right) \times 100\% = \boxed{56\%}$$

نشاط 3-5 المُحرّكات الحرارية

سؤال الاستقصاء	كيف يعمل المُحرّك الحراري؟
الموادّ المطلوبة	محاكاة حاسوبية.

خطوات التجربة

1. اضبط درجتي حرارة التشغيل الابتدائية في المحاكاة على 550 K و 1293 K، اضبط قطر المكبس على 20 cm (0.2 m) والمرفق على 20 cm (0.2 m).
2. اضغط على [تشغيل] لمشاهدة دورة المُحرّك. استخدم جدول البيانات للنظر إلى بيانات الضغط والحجم.
3. بالمقابل، يمكنك ضبط الحرارة الداخلة وستحسب المحاكاة درجة الحرارة القصوى. اضبط الحرارة الداخلة على 1000 J وانظر إلى ما سيحدث.



الشكل 5-40 المحاكاة الحاسوبية.

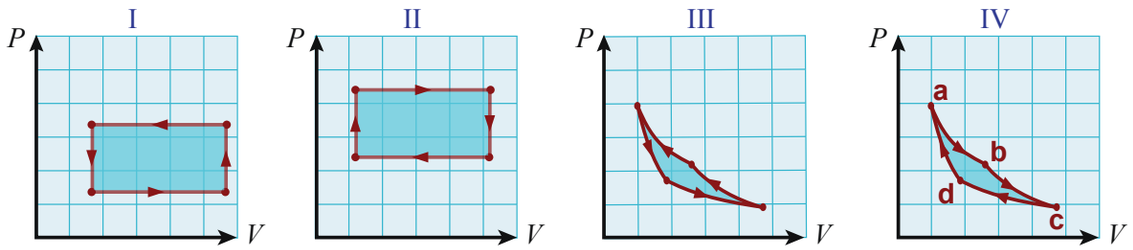
الأسئلة

a. ما كفاءة التشغيل عند المتغيرات المذكورة أعلاه؟
b. ما أعلى ضغط يصل إليه المُحرّك؟ وما أدنى ضغط؟
c. ما الذي يمكنك عمله لتحسين كفاءة المُحرّك؟ اقترح تغييرين ثم صمِّم تجربة لاختبار كل من التغييرين المقترحين. ما الاستنتاجات التي تستخلصها من تجاربك؟
d. ما أقصى كفاءة ممكنة نظريًا، إذا كانت أدنى درجة حرارة تشغيل 293 K وأعلى درجة حرارة تشغيل 6000 K؟ ماذا يمكن أن يحدث للمكبس عند درجة الحرارة المرتفعة هذه؟

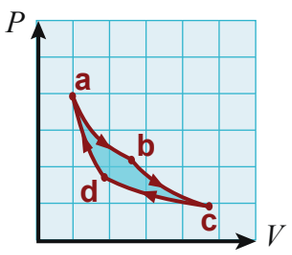
تقويم الدرس 5-3

1. تستخدم محركات الطائرات توربينات دوّارة بدلا من المكابس، لكن يبقى بالإمكان استخدام الدورات الديناميكية الحرارية. يتحمل السيراميك درجات حرارة أعلى من تلك التي يتحملها الحديد. كيف يمكن لقطع التوربينات المصنوعة من السيراميك أن تزيد من كفاءة محركات الطائرات؟

2. رُسمت أربعة مُخطَّطات الضغط - الحجم. (I-IV)
   a. في أيّ رسم (أو رسوم) يبذل الغاز شغلًا؟
   b. في أيّ رسم (أو رسوم) يبذل الوسط المحيط شغلاً على الغاز ؟
   c. ضع دائرة حول العملية الأيزوبارية.
   d. ضع دائرة حول العملية الأيزوكورية.



3. أجب عن الأسئلة الآتية حول الرسم التوضيحي الموجود إلى اليسار.



   a. أيّ جزء (أو أجزاء) من المنحنى يعبر عن العمليات الأدياباتيكية؟
   b. أيّ جزء (أو أجزاء) من المنحنى يعبر العمليات الأيزوثيرمية؟
   c. أيّ جزء (أو أجزاء) من المنحنى يتَّصف بالعمليات الانعكاسية.
   وضّح إجابتك.

4. يتمدّد الغاز داخل المكبس من حجم ابتدائي 25 mL إلى حجم أكبر 125 mL، تحت تأثير ضغط ثابت 100000 Pa. ما مقدار الشغل الذي يبذله الغاز على المكبس؟

5. وضع طالب نموذج عمل لشركةٍ ستبني مُحرّكات كارنو المثالية التي تحوّل 100 % من الحرارة الداخلة إلى طاقة ميكانيكية. هل تبدو الفكرة جيدة لكي تستثمر مُدَّخرات حياتك في شركته؟

6. محرك سيارة يتكون من أربعة أسطوانات تعمل جميعها ضمن أربعة مراحل، تزود الأسطوانات مجتمعة بكمية من الحرارة (1800 J) في كل دورة، وتفقد خلال الدورة كمية حرارة (1350 J). احسب ما يأتي:
   a. الشغل الذي يبذله المحرك على شكل طاقة حركية.
   b. كفاءة المحرك.

7. افترض وجود محرّك حراري يستخدم الغاز المثالي، ويعمل بين درجتي حرارة؛ العظمى (2327 K) والدنيا (1027 K). احسب كفاءة هذا المحرك.

نيكولاس ليونارد سعدي كارنو: 1796-1832

الشكل 5-41 نيكولاس كارنو. رسم لويس ليوبولد بويلي.

نيكولاس كارنو هو مهندس ميكانيك عسكري فرنسي وعالم فيزياء، وقد عُرف باسم «أبو الديناميكا الحرارية». وبالرغم من أن كارنو لم يُنسب إليه الفضل، وهو على قيد الحياة، في وضع إطار نظري ناجح للمحركات الحراريَّة، إلّا أنّ الحقيقة هي أن رودولف كلاوزيوس واللورد كلفن عرّفا الإنتروبي وصاغا القانون الثاني في الديناميكا الحرارية اعتمادًا على عمل كارنو.

وُلد نيكولاس كارنو في عائلة متعلمة جيدًا وبارزة في العلوم والسياسة. تأثر والد كارنو لازار كارنو بأعمال الشاعر الإيراني سعدي شيرازي. وهذا ما دفعه إلى إعطاء نيكولاس كارنو الاسم الثالث «سعدي»؛ وكان يُشار إلى كارنو في الغالب باسم «سعدي كارنو». قُبل كارنو، على خطى عائلته الفكرية، في مدرسة الفنون التطبيقية في سن السادسة عشرة، وهي جامعة خاصة في باريس. أصبح كارنو بعد التخرج ضابطًا في الجيش الفرنسي. وتابع بعد هزيمة نابليون محاضراته في الفيزياء والكيمياء. وبالرغم من أنه بقي في احتياط الخدمة العسكرية، إلا أنه ركّز اهتمامه على دراسة المُحرّكات البخارية.

كان كثير من المهندسين في ذلك الزمن يعملون على تحسين كفاءة المُحرّك البخاري. أثار هذا اهتمامَ كارنو، وأراد دراسة حدود عمل المُحرّك البخاري. أراد نيكولاس كارنو، في محاولته لتحسين الكفاءة، الإجابة عن سؤالين: «هل من الممكن أن يكون الشغل الناتج من مصدر حراري غير محدود؟ وهل يمكن تحسين المُحرّكات الحرارية باستخدام موائع التشغيل الأخرى أو الغاز بدلًا من البخار؟ هذان السؤالان أجاب عنهما في كتابه المُسمّى «تأملات في القوة الدافعة للنار». خلص نيكولاس كارنو في العام 1824 إلى أن كفاءة المُحرّك المثالي تعتمد فقط على درجتَي الحرارة العظمى والصغرى للمُحرّك البخاري، ومن دون أي اعتماد على مادة التشغيل. وقد اكتسب عمله هذا اعترافًا بعد وفاته ووثقّه الفيزيائي إميل كلابيرون. تعاون رودولف كلاوزيوس واللورد كلفن على استخدام عمل كارنو، وطورا القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

توفي نيكولاس ليونارد سعدي كارنو بسبب الكوليرا في العام 1832. وكان عمره عندئذٍ 36 عامًا فقط.

الوحدة 5

مراجعة الوحدة

الدرس 5-1: خصائص النظام الديناميكي الحراري

- من المهم تحديد حدود **النظام الديناميكي الحراري** عند تحليل الأنظمة الحرارية.
- عندما لا تُضاف حرارة إلى النظام أو تتسرَّب منه، فإن النظام سيصل إلى **اتزان حراري**.
- تُستخدم متغيّرات الحالة، مثل الضغط ودرجة الحرارة والحجم، لتحديد **الحالة الديناميكية الحرارية** للنظام.
- الكميات الديناميكية الحرارية نوعان: نوع يعتمد على المسار بين أي حالتين من حالات النظام كالشغل والحرارة، وكميات أخرى لا تعتمد على المسار وتسمّى دوال حالة، مثل الطاقة الداخلية والأنتروبي.

الدرس 5-2: قوانين الديناميكا الحرارية

- ينصّ **القانون الصفري للديناميكا الحرارية** على أنه إذا كان كل من جسمين في حالة اتزان حراري مع جسم ثالث، فإنهما يكونان في حالة اتزان حراري أحدهما مع الآخر.
- **القانون الأول First law** : صيغة عامة لحفظ الطاقة، بما في ذلك جميع المتغيّرات الديناميكية الحرارية.
- **القانون الثاني Second law** : القانون الذي يصف اتجاه التدفّق الطبيعي للطاقة الحرارية، ويُعَرّف كمّية جديدة تُسمّى «الانتروبي».
- **الإنتروبي (العشوائية)** في العملية الأدياباتيكية الانعكاسية تساوي صفرًا.

الدرس 5-3: المُحرّكات الحراريّة

- يُعرف الرسم البياني للضغط مقابل الحجم للنظام الديناميكي الحراري باسم **مُخطَّط P-V**.
- لا تتغير درجة الحرارة في **العملية الأيزوثيرمية**، والتي تحدث عند درجة حرارة ثابتة.
- لا تنتقل الحرارة في **العملية الأدياباتيكية**.
- لا يبذل النظام شغلًا في **العملية الأيزوكورية** عند حجم ثابت.
- يبقى الضغط ثابتًا في **العملية الأيزوبارية**.
- تشكل العمليتان الأيزوثيرميتان والعمليتان الأدياباتيكيتان **دورة كارنو** التي لها أعلى كفاءة نظرية.

اسئلة الاختيار من متعدد

1. أيٌّ مما يأتي ليس مثالًا على النظام المفتوح؟
   a. قدر الضغط.
   b. فنجان من القهوة الساخنة من دون غطاء
   c. قدر يغلي فيه الماء من دون غطاء
   d. شهيق الإنسان للأكسجين وزفيره لثاني أكسيد الكربون
2. أيٌّ مما يلي يُعدُّ مثالًا على الاتزان الحراري؟
   a. ملعقة في كوب من الشاي الساخن تمتصّ الطاقة الحرارية.
   b. عندما توضع مقلاة فوق موقد مشتعل، فإنها تصبح ساخنة أيضًا.
   c. ترتفع درجة حرارة الجليد عند صبّ عصير فوقه.
   d. درجة حرارة لوحين من الزجاج هي درجة الحرارة نفسها للهواء المحصور بينهما.
3. ما أفضل تعريف لدالة الحالة؟
   a. كمية لا تعتمد قيمتها على المسار المتبع بين أي حالتين من حالات النظام.
   b. كمية تعتمد قيمتها على المسار المتبع بين أي حالتين.
   c. كمية قيمتها تتطابق مع قيمة أية كمية أخرى موجودة في الحالة نفسها.
   d. كمية تعتمد قيمتها على حالة النظام.
4. أيٌّ من العمليات الآتية لا تحدث تلقائيًّا؟
   a. تدحرج كرة إلى أسفل تل
   b. تدفّق الحرارة من جسم ساخن إلى جسم بارد
   c. تحوّل معدن الحديد إلى صدأ في وجود الهواء والماء
   d. تفاعل البنزين مع الهواء لينتج الأكسجين وثاني أكسيد الكربون
5. ما الذي يمكن استنتاجه حول إنتروبي الكون استنادًا إلى القانون الثاني للديناميكا الحرارية؟
   a. تزداد
   b. تتناقص
   c. صفر.
   d. ثابتة ولكنها ليست صفرًا

تقويم الوحدة

6. يمكن أن يوجد غاز الهيليوم في بالون، ولكن يمكن أن يكون في حالات أخرى عند درجات حرارة منخفضة، في أيٍّ من حالات المادة الآتية سيكون الهيليوم عند أعلى إنتروبي؟
   a. الصلبة
   b. السائلة
   c. شبه السائلة
   d. الغازية

7. ما العبارة التي تصف بدقّة معادلة الديناميكا الحرارية الآتية؟

$$\Delta S \geq 0$$

   a. التغيّر في السرعة هو أكبر من صفر أو يساوي صفرًا دائمًا.
   b. الإنتروبي لا تتغير.
   c. التغيّر في الطاقة الساكنة لمُحرّك حراري أكبر من أو يساوي صفرًا.
   d. تزيد الإنتروبي الكلية أو تبقى ثابتة.

8. تخيّل أن 100 J من الطاقة الحرارية انتقلت تلقائيًا من هواء بارد (عند 20°C) لتدفئة كوب من الشاي (عند 60°C). أيٌّ من قوانين الديناميكا الحرارية، إن وجد، تناقضه هذه العملية؟
   a. القانون الأول للديناميكا الحرارية فقط
   b. القانون الثاني للديناميكا الحرارية فقط
   c. القانون الأول والثاني للديناميكا الحرارية
   d. لا شيء من قوانين الديناميكا الحرارية

9. ما العبارة التي تتوافق مع المعادلة الآتية لدورة كارنو؟

$$\text{الكفاءة} = \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) \times 100\%$$

   a. كفاءة مُحرّك كارنو تساوي نسبة درجتَي الحرارة التي يعمل فيها المُحرّك.
   b. لا يمكن أن تكون كفاءة مُحرّك كارنو 100% عند درجة حرارة T_1 أعلى من الصفر المطلق.
   c. عندما تكون درجتا الحرارة العليا والدنيا لمُحرّك كارنو متقاربتين، فإنّ كفاءة المُحرّك ستكون 100 % تقريبًا.
   d. يمكن تشغيل مُحرّك كارنو بكفاءة أكبر من 100 % بأن تُعكس درجتا حرارة التشغيل.

10. تخيّل أن الغاز الموجود داخل أسطوانة مزودة بمكبس يتمدّد، ويضغط إلى الخارج. أيٌّ من العبارات الآتية صحيحة؟

a. يبذل الغاز داخل المكبس شغلًا موجبًا على الوسط المحيط.

b. يبذل الغاز داخل المكبس شغلًا سالبًا على الوسط المحيط.

c. يبذل الوسط الخارجي شغلًا موجبًا على الغاز داخل المكبس.

d. يبذل الوسط الخارجي شغلًا سالبًا على الغاز داخل المكبس.

الدرس 5-1: خصائص النظام الديناميكي الحراري

11. لماذا يتعذَر إنشاء نظام ديناميكي حراري معزول بشكل مثالي؟

12. يحمل طالب مكعب ثلج في يده. وضّح من حيث الإتزان الحراري سبب انصهار مكعب الثلج.

13. استخدم مثال الغاز المثالي في الأسطوانة ذات المكبس المتحرك، ووضّح الفرق بين الغاز الذي يبذل شغلًا على الوسط المحيط، والوسط المحيط التي يبذل شغلًا على الغاز.

14. لماذا تعرّف درجة الحرارة على أنها متغيّر حالة؟

15. الضغط والحجم كلاهما متغيّر حالة. حاصل ضرب الضغط في الحجم هو شغل. لكن، لماذا لا يكون الشغل دالّة حالة؟

16.* تتعرض جزيئات الغاز الحقيقي المضغوط، فيما بينها لقوى تنافر قصيرة المدى . هل تزيد الطاقة الداخلية بعد الضغط أم تنقص؟ ولماذا؟

الدرس 5-2: قوانين الديناميكا الحرارية

17. ما الكمية المستخدمة في الفيزياء لقياس العشوائية؟

18. ماذا يحدث للطاقة الداخلية للنظام إذا كان يبذل شغلًا على المحيط؟

19. تقلّ الطاقة الداخلية للغاز بمقدار 150 J عندما يُبذَلُ عليه شغل مقداره 40 J على الغاز. احسب قيمة الحرارة المضافة إلى الغاز.

20. تُنتزع صخرة ساخنة من موقد نار وتُلقى في دلو من الماء البارد درجة جرارته 20°C. تبلغ درجة حرارة الصخرة 80°C، فتبدأ الصخرة بنقل 500 J من الطاقة الحرارية إلى الماء. افترض أن درجة حرارة الصخرة والماء لم تتغير في اللحظات الأولى.

a. هل تزداد إنتروبي الصخرة أم تنقص؟ وما مقدار ذلك؟

b. هل تزداد إنتروبي الماء أم تنقص؟ وما مقدار ذلك؟

c. هل تزداد الإنتروبي الكلية لنظام الصخرة + الماء أم تنقص؟ وما مقدار ذلك؟

الدرس 5-3: المُحرّكات الحراريّة

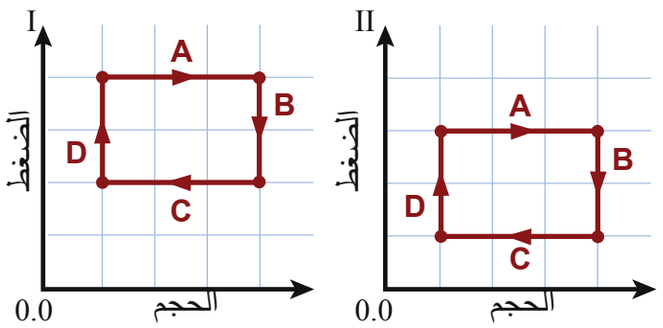
21. افترض أن مُحرّك الاحتراق الداخلي يعمل بين درجة حرارة داخلية 2000 K ودرجة حرارة عادم 1000 K ما أقصى كفاءة نظرية للمُحرّك يُعبّر عنها بنسبة مئوية؟

22. يصوّر مُخطَّطَا الضغط - الحجم أدناه دورة حرارية واحدة لمكبس يحتوي على غاز مثالي. المكبسان متطابقان ماديًّا تمامًا، لكن المكبس الأول يعمل تحت ضغط في المتوسط أعلى من المكبس الثاني. تمثّل الزاوية السفلى اليسرى لشبكة الإحداثيات نقطة الأصل (كل من الضغط والحجم عند نقطة الأصل يساوي صفرًا).

a. أيّ مكبس يبذل شغلًا (موجبًا) أكثر في أثناء مرحلة التمدّد I، أو II، أو هما متساويان)؟

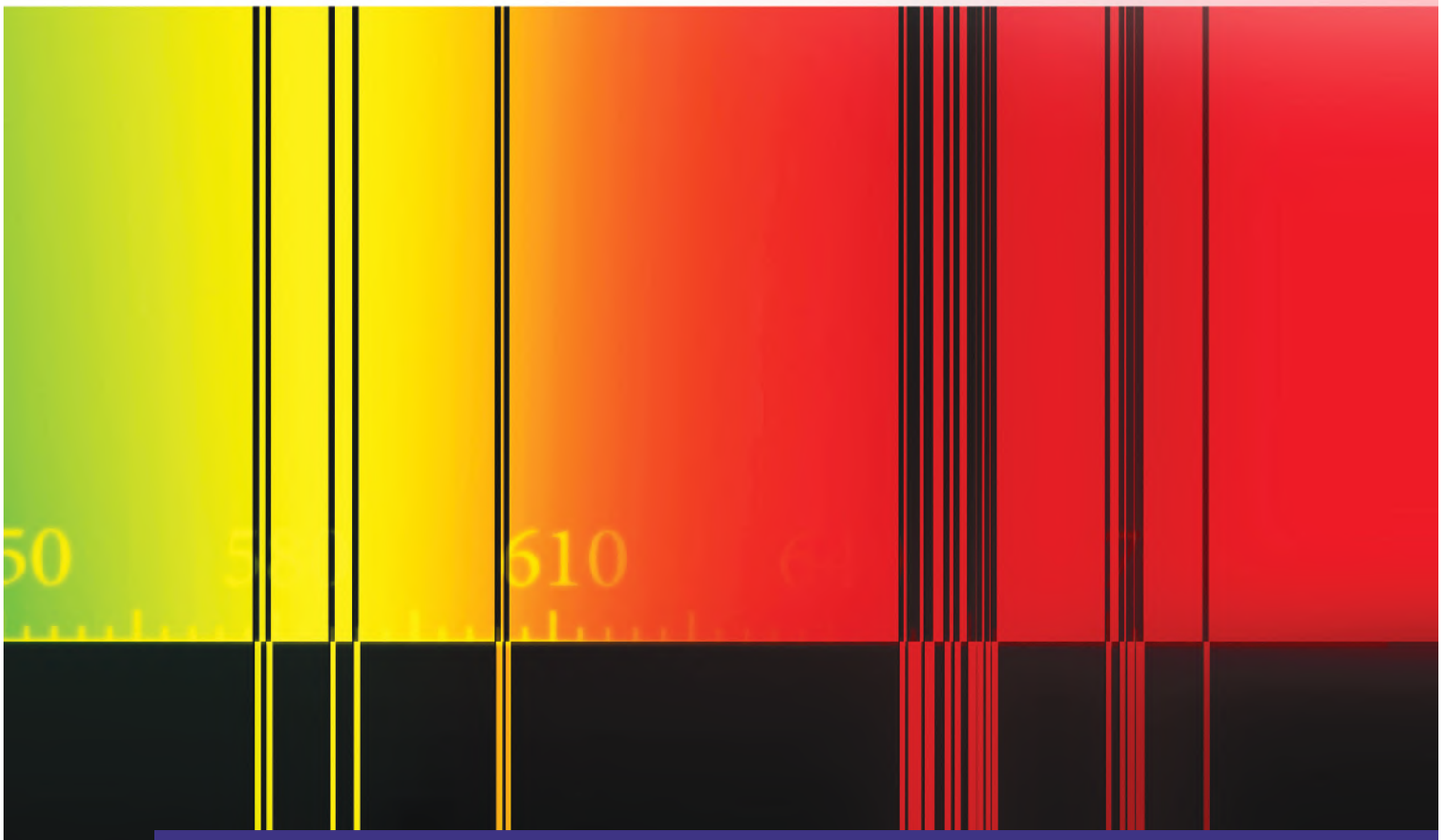
b. أيّ مكبس يبذل شغلًا (سالبًا) أكثر في أثناء مرحلة التقلّص I، أو II، أو هما متساويان)؟

c. أيّ مكبس يعمل شغلًا (موجبا) أكثر في دورة كاملة واحدة I، أو II، أو هما متساويان)؟



مسألة للبحث

ابحث في كيفية ارتباط الحدّ الأقصى من الكفاءة النظرية لمحطة الطاقة الكهربائية بالفرق بين درجة حرارة مصدر الحرارة ودرجة حرارة الغازات العادمة الخارجة من محطة الطاقة الكهربائية.



الوحدة 6

فيزياء الكم

Quantum Physics

في هذه الوحدة

P1211
P1212
P1213

الدرس 6-1: نظرية الكم والطبيعة المزدوجة للضوء

الدرس 6-2: مستويات الطاقة والأطياف الذرية

الدرس 6-3: الأشعة السينية وطيف الأشعة السينية

الوحدة 6

مقدّمة الوحدة

في الوحدة السادسة سنناقش فهمنا الحديث للذرة ونظرية الكم.

في بداية القرن العشرين، كان العلماء قد عرفوا أن في الكون عناصر تتكون من أنواع مختلفة من الذرات، لكنهم لم يتوصّلوا لِبُنيَة الذرة. في غضون عقود قليلة، تم اكتشاف الخصائص الرئيسة للذرة والجسيمات الأولية. وكان من أساسيات هذه الاكتشافات معرفة العلاقة بين المستويات المختلفة للطاقة الذرية وانبعاث الفوتونات من الذرة أو امتصاص الذرة للفوتونات.

أشارت هذه التطورات العلمية إلى وجود خصائص غريبة جدًا في «نظرية الكم» التي تحكم سلوك الذرة: الطبيعة الاحتمالية للذرة، والازدواجية الموجية والجسيمية للمادة، والجسيمات التي لها كمية حركة وليس لها كتلة. كانت هذه الأفكار غير متوقعة حتى أنّ ألبرت أينشتاين عارضها في البداية.

الأنشطة والتجارب

a1-6 طاقات الفوتونات

b1-6 التأثير الكهروضوئي

a2-6 مستويات طاقة ذرّة الهيدروجين

b2-6 استخدام التحليل الطيفي

3-6 شرح استخدام الأشعة السينية

الدرس 6-1

نظرية الكم والطبيعة المزدوجة للضوء

Quantum Theory and the Dual-Nature of Light

يعمل الكثير من الأجهزة على الظاهرة المعروفة بالتأثير الكهروضوئي. تشمل هذه الأجهزة، على سبيل المثال لا الحصر، بعض أجهزة كشف الدخان وأجهزة الرؤية الليلية والحساسات الضوئية. يمكن للتأثير الكهروضوئي أيضًا توليد الكهرباء. يسمح لنا ذلك بتزويد المنازل بالطاقة باستخدام الألواح الشمسية.

الشكل 6-1 الواح شمسية.

تتكوّن الألواح الشمسية من صفائح فلزية تحرّر الإلكترونات باستخدام الأشعة فوق البنفسجية القادمة من الشمس. عندما تتدفق الإلكترونات، فإنها تولّد التيار الكهربائي المستمر. يتم إرسال التيار إلى العاكس لتحويل التيار المستمر إلى تيار متردّد. ينتقل التيار المتردّد إلى أماكن الاستهلاك. ما الذي يحدث إذا تم توليد الكثير من الكهرباء؟ عندها يتم نقل التيار إلى شبكة كهربائية تمد المزيد من المنازل بالطاقة.

مخرجات التّعلُّم

P1211.1 يصف الطبيعة الجسيمية للإشعاع الكهرومغناطيسي؛ ويستخدم الصيغة $(E = hf)$ في الحسابات.

P1211.2 يوضح ظاهرة التأثير الكهروضوئي في ضوء الطبيعة الجسيمية للإشعاع الكهرومغناطيسي واستخدام المعادلة:

$$hf = E_{k(max)} + \Phi$$

المفردات

جسم أسود	Blackbody
إشعاع الجسم الأسود	Blackbody radiation
كارثة الأشعة فوق البنفسجية	Ultraviolet catastrophe
ثابت بلانك	Plank's constant
فوتون	Photon
فيزياء الكم	Quantum physics
تأثير كهروضوئي	Photoelectric effect
دالة الشغل	Work function
تردّد العتبة	Threshold frequency

الوميض الفسفوري

كيف يعمل البلاستيك المتوهّج في الظلام؟

هل تساءلت يومًا كيف تتوهّج بعض الألعاب أو الملصقات في الظلام بعد إطفاء الضوء؟

تُعرف هذه الظاهرة باسم الوميض الفسفوري. وهي تحدث عندما تمتص بعض المواد طاقة ضوئية من مصدر خارجي (مثل ضوء الشمس أو مصباح قوي)، ثم تُخزّن هذه الطاقة مؤقتًا داخل ذراتها. وبعد فترة، تُطلق المادة هذه الطاقة تدريجيًا على شكل ضوء مرئي يمكن رؤيته في الظلام.

الشكل 6-2 هل تستطيع تفسير هذه الصورة؟

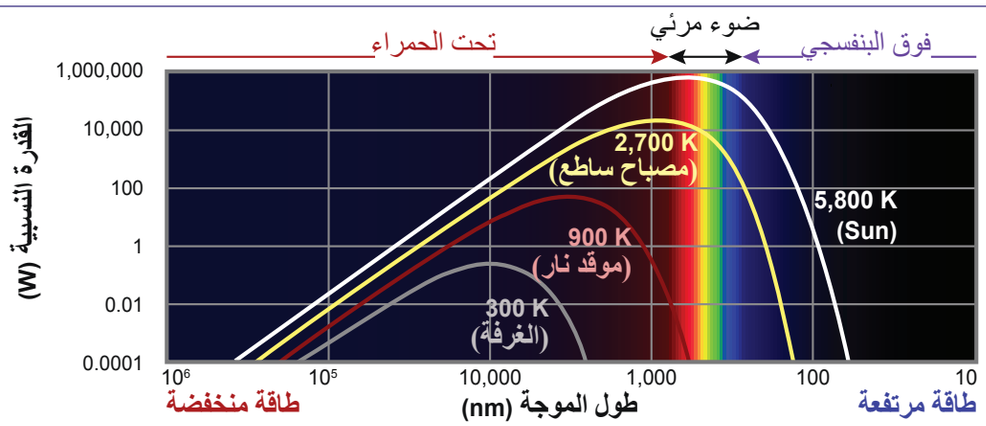
يشبه الوميض الفسفوري ظاهرة الفلورسنتية، لكن الفرق بينهما هو أن الفلورسنتية تختفي فور إزالة مصدر الضوء، بينما يستمر التوهّج الفسفوري لعدة دقائق أو حتى ساعات.

تُستخدم هذه الخاصية في تصنيع الملصقات والألعاب المضيئة، وكذلك في ساعات اليد التي تُرى في الظلام. وتعتمد ألوان الوميض الناتج على نوع المادة؛ فمثلًا، تعطي المواد التي تحتوي على عنصر الزنك ضوءًا أخضر مميزًا.

كما يستفيد العلماء من هذه الظاهرة في مجالات متنوعة، مثل الشاشات الإلكترونية والأجهزة الطبية التي تعتمد على تتبّع التفاعلات داخل الجسم باستخدام مواد فسفورية.

إشعاع الجسم الأسود

يُطلق مصطلح **الجسم الأسود Blackbody** على أي جسم أو مادة تكون مثالية تمامًا في امتصاصها أو إشعاعها للضوء. وضع الفيزيائي الألماني ماكس بلانك سنة 1895م نموذجًا يصف إشعاع الجسم الأسود طبقًا لقوانين الفيزياء الكلاسيكية. يوضح (**الشكل 6-3**) منحنيات تمثل طيف إشعاع الجسم الأسود **Blackbody radiation** عند درجات حرارة مختلفة. وقد اعتمد العلماء على إشعاع الجسم الأسود في تفسير سلوك الإشعاع الحراري. غير أن التفسير الكلاسيكي لم يكن دقيقًا في التنبؤ بشدة الإشعاع عند الأطوال الموجية القصيرة، إذ أظهرت النتائج أن شدة الإشعاع تتزايد إلى ما لا نهاية عند الأطوال الموجية القصيرة، وهو ما عُرف باسم كارثة الأشعة فوق البنفسجية.



الشكل 6-3 إشعاع الجسم الأسود.

كانت علاقة شدة الإشعاع بطول الموجة تصف سلوك الجسم المشع طبقًا لقوانين الفيزياء الكلاسيكية، حيث إن كل جسم يصدر إشعاعًا كهرومغناطيسيًا يتوقف على درجة حرارته. كلما زادت درجة الحرارة، زادت الطاقة الكلية المنبعثة، وانتقل الطيف نحو الأطوال الموجية الأقصر.

لكن هذا النموذج الكلاسيكي فشل في تفسير سلوك إشعاع الجسم الأسود عند الأطوال الموجية القصيرة، لأن الحسابات النظرية كانت تتنبأ بزيادة لا نهائية في شدة الإشعاع مع تناقص الطول الموجي، وهو ما لم تؤكده التجارب.

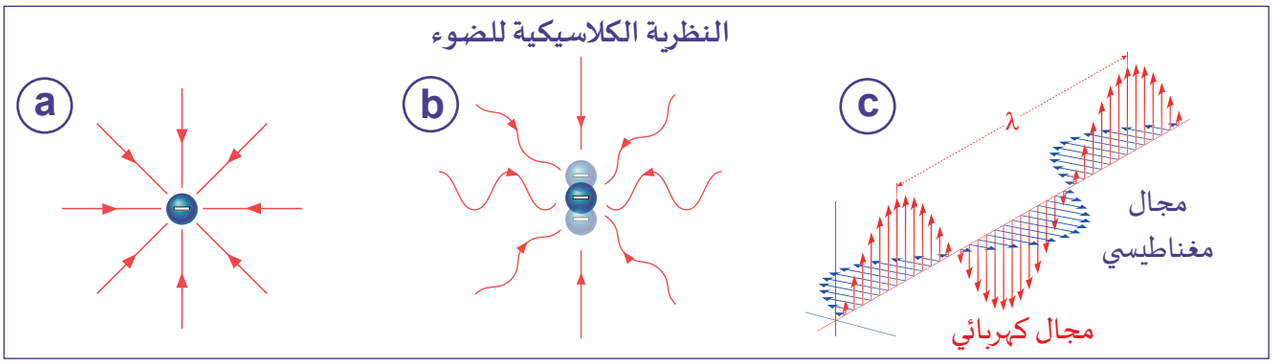
أوضح بلانك أن الطاقة لا تنبعث بصورة مستمرة كما افترضت الفيزياء الكلاسيكية، بل على شكل كمّات (حزم) من الطاقة المنفصلة، بحيث تتناسب طاقة كل كمّ مع تردده وفق العلاقة: $E = hf$

حيث h هو ثابت بلانك، و f هو تردد الإشعاع.

هذا الافتراض وضع الأساس لنشوء مفهوم ميكانيكا الكم، وساعد على تفسير إشعاع الجسم الأسود بدقة أكبر.

الطبيعة الفيزيائية للضوء

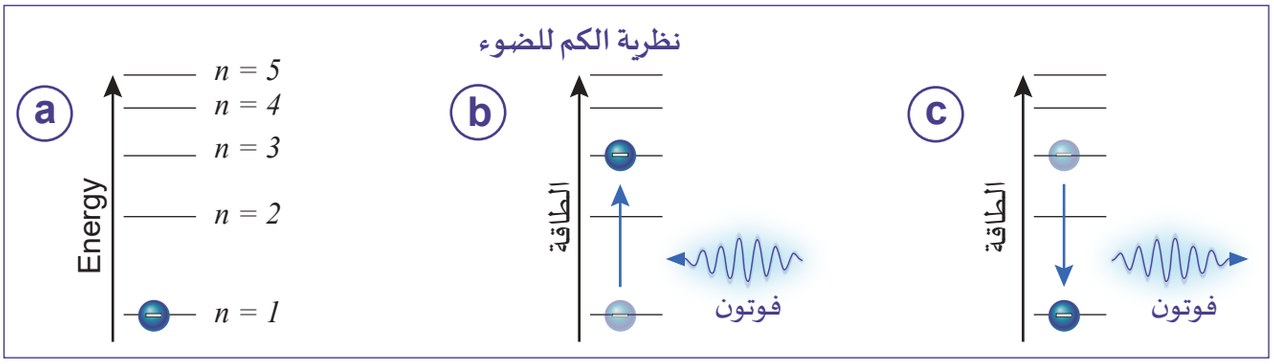
ينشأ عن الشحنات الكهربائية مجال كهربائي ساكن، فالإلكترون الساكن يولد مجالاً كهربائيًا، والإلكترون المتحرك يولد مجالاً كهربائيًا ومجالاً مغناطيسيًا. (**الشكل b4-6**). تُنشِيء حركة الشحنة اهتزازًا أو موجة من المجال الكهرومغناطيسي. وفق النظرية الكلاسيكية، قد تكون هذه الموجة ضوءًا ينبعث من الإلكترون بسرعة الضوء (**الشكل c4-6**). نرى الضوء لأن الإلكترونات الموجودة في جزيئات شبكية العين تستجيب للموجة الكهرومغناطيسية.



الشكل 6-4 (a) المجال الكهربائي الساكن، (b) المجال الكهربائي المهتز (c) الموجة الكهرومغناطيسية.

تتشارك كل من نظرية الكم والنظرية الكلاسيكية بخصائص التردد والطول الموجي للضوء. الفرق أنّه في نظرية الكم، يتم تكميم الطاقة في حزم منفصلة تسمى «فوتونات». و الفوتون هو أصغر كمية للضوء. ليس للفوتون كتلة لكنه يتمركز في الفضاء مثل الجسيم، وله كمية حركة.

في نظرية الكم، تمتص الذرات فوتونات منفردة وتُطلِقُها، أمّا الإلكترونات فتتحرّك بين مستويات الطاقة (**الشكل a5-6**). يمتص الكترون الذرة فوتونا لينتقل إلى مستوى طاقة أعلى (**الشكل b5-6**). هذا يضع الذرة في حالة من الإثارة. ونتيجة لعودة الالكترون لمستوى طاقة أدنى ينبعث فوتون (**الشكل c5-6**).



الشكل 6-5 (a) تشغل الإلكترونات مستويات طاقة ، (b) تمتصّ الذرات فوتونًا فينتقل إلكترون إلى مستوى طاقة أعلى و (c) تُصدِر الذرات فوتونات عندما تهبط إلكتروناتها إلى مستوى طاقة أدنى.

الطاقة والتردّد

الضوء وحيد اللون يتكون من فوتونات متماثلة، لها جميعها نفس التردد، وترتبط كمية الطاقة التي يحملها الفوتون مع التردّد بالعلاقة $E = hf$، وتُسَمّى علاقة بلانك بين الطاقة والتردد. يُسمّى ثابت التناسب «ثابت بلانك» وقيمته $6.63 \square 10^{-34}$ Js. لحساب طاقة الفوتون، نستخدم أي من صيغتي **المعادلة 6-1**.

1-6	قانون بلانك لطاقة الضوء		
	$E = hf \quad E = \frac{hc}{\lambda}$	E	طاقة الضوء (J)
		h	ثابت بلانك = $6.63 \square 10^{-34}$ Js
		f	التردد (Hz)
		λ	الطول الموجي (m)
		c	سرعة الضوء = $3 \square 10^{8}$ m/s.

تتناسب طاقة الفوتون طرديا مع تردده. التردد والطول الموجي يرتبطان بسرعة الضوء c. حسب العلاقة $c = \lambda f$، نلاحظ أن طاقة الفوتون تتناسب عكسيا مع طوله الموجي. أما إذا كان هناك عدد n من الفوتونات فإن طاقة الضوء تكون:

$$E = nhf \qquad E = \frac{nhc}{\lambda}$$

في النظرية الكلاسيكية، تتناسب شدّة الضوء مع سعة الموجة. بينما في نظرية الكم، تتناسب شدّة الضوء مع عدد الفوتونات. يحتوي الضوء الأحمر الساطع على عدد من الفوتونات الحمراء في الثانية أكثر من الضوء الأحمر الخافت (**الشكل 6-6**).

الشكل 6-6 المقارنة بين النظرية الكلاسيكية ونظرية الكم في تفسير شدّة الضوء.

الخاصية الجسيمية للفوتون لها تأثير مهم جدًا في التفاعل بين ذرّات المادة والضوء. يمكن للذرة فقط أن تعمل على انبعاث فوتون واحد كامل في أي تفاعل فردي ويمكن لها امتصاص مثل هذا الفوتون. هذا السلوك الكمي يوضح التحليل الطيفي والتأثير الكهروضوئي.

تتفاعل الذرة مع فوتون واحد في الوقت ذاته.

تربط معادلة بلانك بين المادة والطاقة، فعندما يتفاعل فوتون واحد من فوتونات الضوء المرئي مع ذرة واحدة من ذرات المادة، فإن رتبة ثابت بلانك (10^{-34}) تعطي مؤشرًا بأن طاقة الفوتون الواحد ضئيلة جدًا، وأن الذرة صغيرة.

مثال 1

ما عدد فوتونات الضوء المرئي ذات التردد $f = 6 \times 10^{14}$ Hz التي تشكل معًا حزمة طاقة إجمالية 1 J؟

المطلوب: عدد الفوتونات $n = ?$

المعُطيات: $E = 1$ J ، $f = 6 \times 10^{14}$ Hz

العلاقات: $E = nhf$

الحل: طاقة الفوتون الضوئي الواحد هي $E = hf = (6.63 \times 10^{-34})(6 \times 10^{14}) = 4 \times 10^{-19}$ J.

عدد الفوتونات في 1 J هو:

$$n = \frac{1}{4.0 \times 10^{-19}} = \boxed{2.5 \times 10^{18} \text{ photons}}$$

مثال 2

احسب الطاقة الكلية لخمس مولات من الفوتونات، إذا كان الطول الموجي لكل منها 250 nm .

المطلوب: الطاقة الكلّية $E = ?$

المعُطيات: عدد المولات = 5، الطول الموجي: $\lambda = 250$ nm

العلاقات: $E = nh\frac{c}{\lambda}$

الحل: هناك 5 مولات من الفوتونات.

عدد الفوتونات = عدد المولات × عدد الفوتونات في المول الواحد(عدد أفوجادرو)

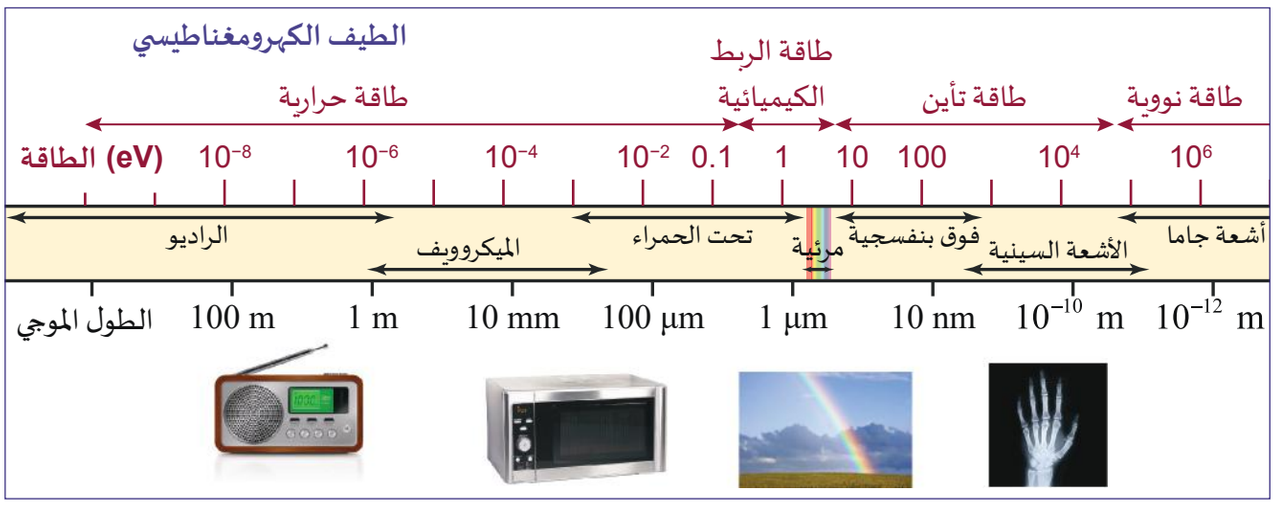
$$n = 5 \times 6.022 \times 10^{23} = 3.011 \times 10^{24}$$

$$E = nh\frac{c}{\lambda}$$

$$= (3.011 \times 10^{24})(6.63 \times 10^{-34})\left(\frac{3 \times 10^{8}}{250 \times 10^{-9}}\right) = \boxed{2.39 \times 10^{6} \text{ J}}$$

طاقة الفوتونات

كلما ازداد تردّد الإشعاع الكهرومغناطيسي ازدادت معه طاقة الفوتون الواحد والتي تعتبر أقل طاقة لأي إشعاع. من المفيد التفكير في الطيف الكهرومغناطيسي من حيث طاقة الفوتون بوحدة الإلكترون فولت (eV) كما هو موضح في **الشكل 6-7**. الإلكترون فولت الواحد يساوي $1.6 \square 10^{-19}$ J. طاقة الروابط الكيميائية تكون في أغلب الأحيان في حدود 1 eV. أدنى طاقة للفوتون تكون في منطقة موجات الراديو من الطيف الكهرومغناطيسي وتساوي (10^{-8} eV).



الشكل 6-7 طاقة الفوتونات في الطيف الكهرومغناطيسي.

تحدد طاقة الفوتون ما يحدث عندما يتفاعل الفوتون مع المادة. تحتوي فوتونات الميكروويف والأشعة تحت الحمراء على طاقة كافية لامتصاصها بواسطة الجزيئات وتحويلها إلى طاقة حرارية. هذه هي الطريقة التي يسخّن بها فرن الميكروويف الطعام.

طاقة الفوتون للضوء المرئي تقع بين 1.63 eV للضوء الأحمر و 3.26 eV للضوء البنفسجي، وهي طاقة كافية لاختراق الجزيء وإحداث تعديل في الروابط الذرية داخل الجزيء، لكنها في الأغلب غير كافية لكسر هذه الروابط، فلا تحدث تغييرات كيميائية، وهذه الطاقة مناسبة لحدوث تفاعل بين الضوء والخلايا المستقبلة في شبكية العين لحدوث عملية الإبصار.

عندما تكون طاقة الفوتون أكبر من 10 eV، فإنّ بإمكان الفوتون أن يؤين ذرة أو جزيئًا. هذا يعني أن الإلكترون في الذرة أو الجزيء سوف يحصل على طاقة كافية للتحرر. تعمل فوتونات هذه الطاقة على اضعاف الروابط الكيميائية وكسرها. يوضح **الشكل 6-7** طاقة الفوتونات ضمن نطاق يتراوح بين 10eV و بضعة مئات من eV في منطقة الأشعة فوق البنفسيجة من الطيف الكهرومغناطيسي.

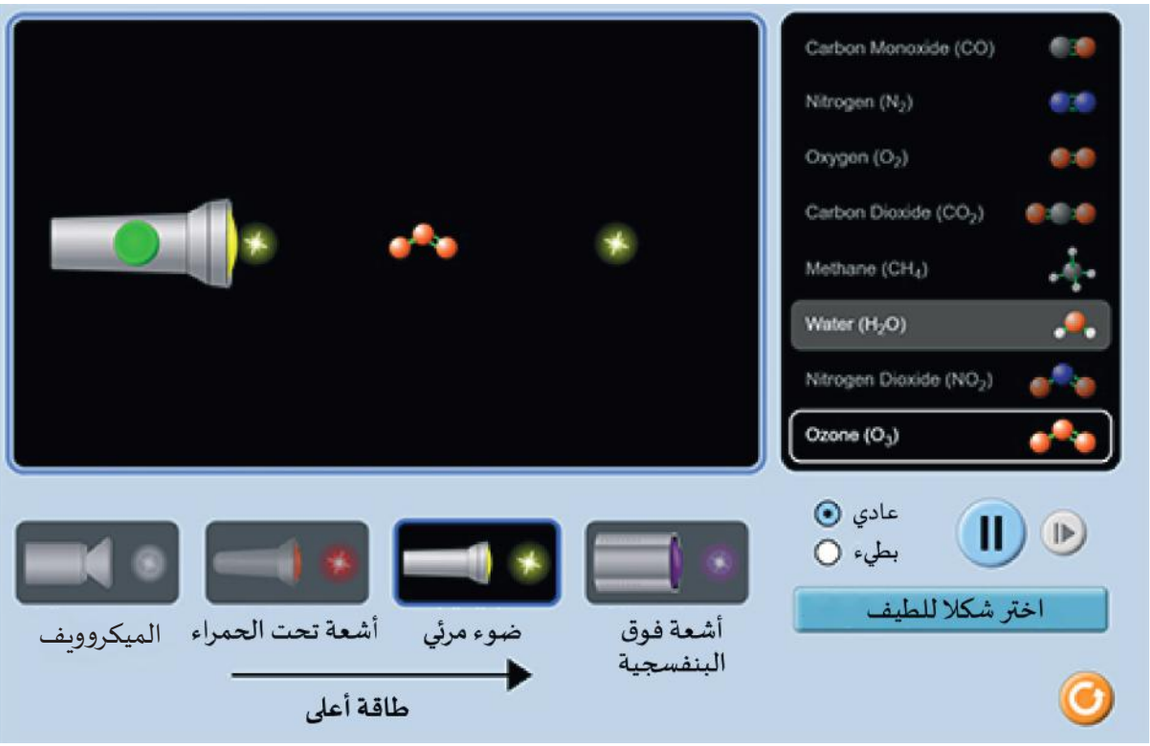
ويكون لفوتونات الأشعة السينية طاقة أعلى من 1 keV (1000 eV) تقريبًا. يمكن لهذه الطاقة إخراج إلكترونات من الغلاف الداخلي لذرات كبيرة نسبيًا، مثل الكالسيوم. هكذا تكشف الأشعة السينية الكالسيوم في العظام. تحتوي أشعة جاما على طاقة فوتون أكبر من 100 keV تقريبًا. هذه طاقة كافية لاختراق فوتون جاما للنواة والتأثير فيها. تنتج أشعة جاما في الغالب في التفاعلات النووية.

نشاط a1-6 طاقات الفوتونات

سؤال الاستقصاء	كيف تؤثر الفوتونات المختلفة في الجزيئات؟
الموادّ المطلوبة	برنامج محاكاة.

خطوات مخبرية

1. قم بتشغيل المحاكاة التفاعلية. حدّد مصدر «الميكروويف».
2. شغّل المصدر واختر الجزيئات المختلفة.
3. كرر العملية الآن باختيار الأشعة تحت الحمراء والضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية.
4. أجب عن الأسئلة.



الشكل 6-8 المحاكاة لمشاهدة تأثير الفوتونات على الجزيئات.

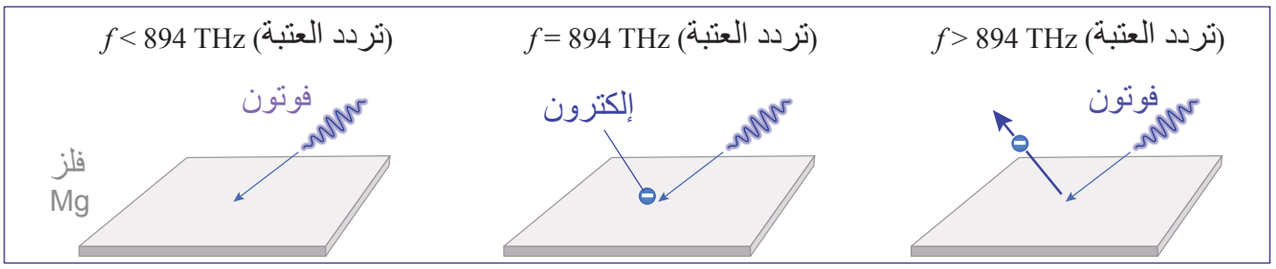
أسئلة

a. قم بإعداد جدول يشتمل على قائمة الجزيئات المتأثرة بكل فوتون.
b. كيف تؤثر موجات الميكروويف في الجزيئات؟
c. كيف تؤثر الأشعة تحت الحمراء في الجزيئات؟
d. كيف يؤثر الضوء المرئي في الجزيئات؟
e. كيف تؤثر الأشعة فوق البنفسجية في الجزيئات؟
f. كيف ترتبط طاقة الفوتون بالتأثير في الجزيئات؟

التأثير الكهروضوئي

يصف **التأثير الكهروضوئي Photoelectric effect** قابلية انبعاث إلكترونات من سطح فلزي عند تعرُّضِهِ لضوء تردده فوق تردد مُحدّد يُسمى تردد العتبة. **تردد العتبة Threshold frequency** هو أقل تردد لأشعة ساقطة تستطيع تحرير الإلكترونات من سطح فلزي.

فمثلا، يبلغ تردد العتبة لفلز المغنيسيوم $894 \square 10^{12}$ Hz = 894 THz وهو يساوي تردّد الأشعة فوق البنفسجية ذات الطول الموجي $\lambda = 335$ nm.



الشكل 9-6 توضيح أهمية تردّد العتبة..

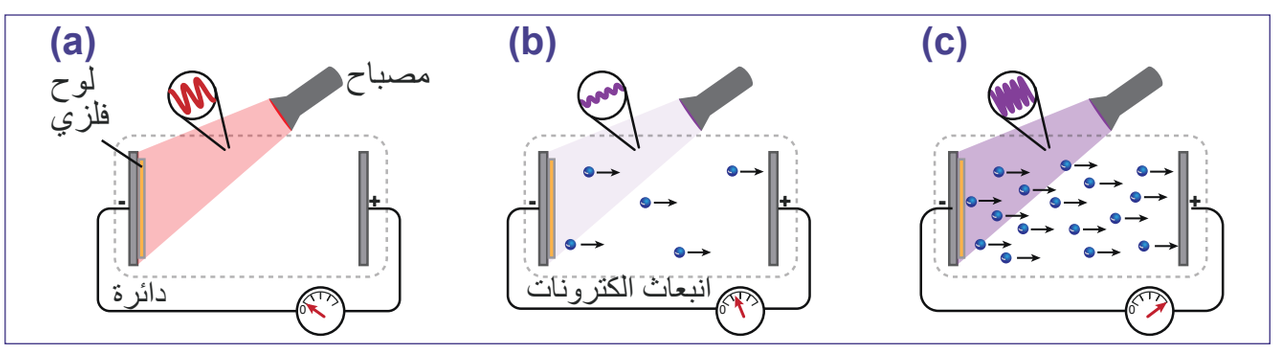
- عند الترددات الأقل من تردد العتبة 894 THz، لا تتحرر أي إلكترونات من السطح، حتى لو كانت شدة الضوء عالية.
- عندما يتساوى تردّد الضوء الساقط مع تردد العتبة 894 THz، يتحرر الإلكترون دون أي طاقة حركية إضافية، فيبقى مستقرا على سطح الفلز.
- عند الترددات الأكبر من تردد العتبة 894 THz، يستطيع الضوء، وإن كان خافتًا، أن يحرر الإلكترونات من السطح ويُكسِبُها طاقة حركية تزداد بازدياد تردد الضوء الساقط.

يوضح **الشكل 6-10** كيفية حصول التأثير الكهروضوئي.

a. في دائرة كهربائية متصلة بأميتر، يسلط ضوء عادي من مصباح ذي تردّد منخفض على لوح فلزي. لا تتحرر أية إلكترونات من سطح الفلز، ولا يسري التيار الكهربائي.

b. عندما يسقط ضوء منخفض الشدة وتردده أكبر من تردّد العتبة على اللوح الفلزي، يتم تحرير بعض الإلكترونات الضوئية، ويتم قياس تيار كهربائي صغير.

c. عندما يسقط ضوء عالي الشدة وتردده أكبر من تردّد العتبة على اللوح الفلزي، يتم تحرير الكثير من الالكترونات الضوئية، ويمر تيّار كهربائي عالي.



الشكل 6-10 (a) ضوء تردده أقل من تردد العتبة، (b) ضوء ذو شدة منخفضة، و تردد أكبر من تردد العتبة، (c) شدة عالية و تردد أكبر من تردد العتبة.

التأثير الكهروضوئي ودالة الشغل

في العام 1905، قدّم العالم ألبرت أينشتاين التفسيرات التالية للظاهرة الكهروضوئية:

1. افترض أينشتاين أن الضوء يتكون من فوتونات مكممة، أي أن لكل منها حزمة طاقة غير قابلة للتجزئة.
2. يتفاعل إلكترون الذرة مع فوتون واحد فقط.
3. تحتفظ ذرات الفلز بإلكتروناتها بطاقة ربط تُسمّى «دالّة الشغل». إذا كانت طاقة الفوتون الساقط على الفلز مساوية لدالّة الشغل، فإنه سوف يتحرّر إلكترون من سطح الفلز، دون إكسابه أي طاقة حركية.
4. إذا كانت طاقة الفوتون الساقط أكبر من دالة الشغل للفلز فإن جزءًا من طاقته يحرر الإلكترون من ذرّة الفلز. وما تبقى من طاقة الفوتون تتحول إلى طاقة حركية للإلكترون (**المعادلة 6-2**).

تسمى طاقة الفوتون اللازمة لتحرير الإلكترون دون إكسابه طاقة حركية «**دالّة الشغل**» Φ **Work function**. دالّة الشغل هي خاصية للفلز. الفلزات المختلفة لها قيم دالّة شغل مختلفة. كما في **الجدول 6-1**.

الجدول 6-1 دالة الشغل لبعض الفلزات.

الفلز	دالة الشغل (eV)
ليثيوم	2.95
كالسيوم	3.00
مغنيسيوم	3.70
نحاس	4.70
زنك	4.47

6-2 التأثير الكهروضوئي

$$hf = E_{k(max)} + \Phi$$
$$E = E_{k(max)} + \Phi$$

h	ثابت بلانك = 6.63×10^{-34} J s.
f	التردد (Hz)
$E_{k(\max)}$	الطاقة الحركية القصوى (J)
Φ	دالة الشغل للفلز (J)

تعتمد دالة الشغل على تردد العتبة لذا، فإن الحد الأدنى من الطاقة لدالّة الشغل يتوافق مع تردّد العتبة للإلكترونات المراد إخراجها. يتم تعريف هذه العلاقة في **المعادلة 6-3**، حيث f_0 هو تردد عتبة الفلز.

6-3 دالة الشغل

$$\Phi = hf_0$$

Φ	دالة الشغل (J)
h	ثابت بلانك = 6.63×10^{-34} J s.
f_0	تردّد العتبة (Hz)

عادة ما تكون دالة الشغل للمادة صغيرة جدًا، في حدود 10^{-19} J، لذلك من الملائم استخدام الإلكترون فولت للتعبير عن دالة الشغل حيث $1\ \text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}$ J.

مثال 3

a. أوجد تردّد العتبة لمعدن دالّة الشغل له 1.5eV.

b. احسب الطاقة الحركية القصوى والسرعة القصوى للإلكترونات المنبعثة عندما يسقط ضوء، تردّده 6.10×10^{14} Hz على سطح المعدن.

المطلوب:

a. تردّد العتبة ، f_0؛

b. الطاقة الحركية القصوى $E_{k(max)}$؛ سرعة الإلكترون v_{max}

المعُطيات:

دالة الشغل ;$\Phi = 1.5$ eV

التردد ;$f = 6.10 \times 10^{14}$ Hz

العلاقات:

a. $\Phi = hf_0$;

b. $hf = E_{k(max)} + \Phi$;

الحل:

a. نحوّل وحدة دالّة الشغل من eV إلى الجول بضربها في 1.6×10^{-19} J؛وباستخدام العلاقة نحسب تردد العتبة

$$\Phi = hf_0 \Rightarrow f_0 = \frac{\Phi}{h} = \frac{1.5 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.63 \times 10^{-34}} = 3.6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

b. لحساب الطاقة الحركية القصوى:

$$E_{k(\max)} = hf - hf_0 = h(f - f_0)$$
$$= 6.63 \times 10^{-34}(6.1 \times 10^{14} - 3.6 \times 10^{14}) = \boxed{1.64 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

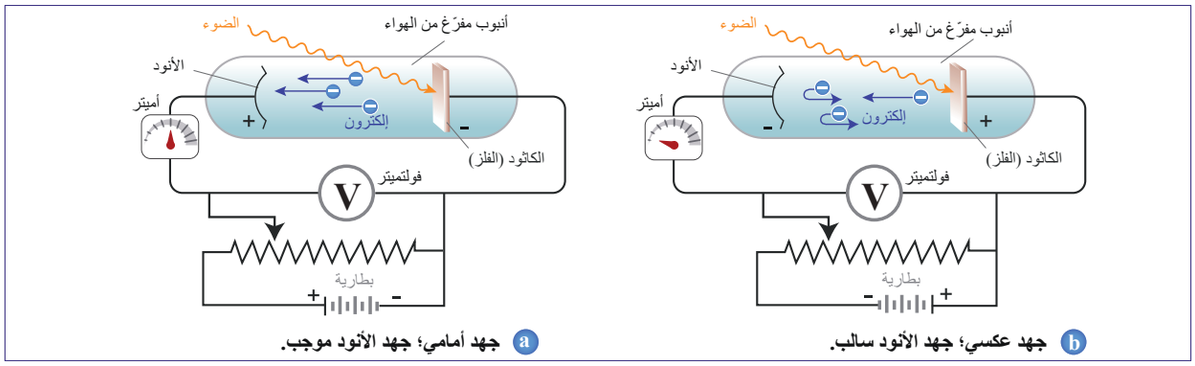
ولحساب سرعة الإلكترون نستخدم كتلته، وهي $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg

$$E_{k(max)} = \frac{1}{2} m v_{max}^2 \Rightarrow \quad v_{max} = \sqrt{\frac{2E_{k(\max)}}{m}}$$

$$= \sqrt{\frac{2(1.64 \times 10^{-19})}{9.1 \times 10^{-31}}} = \boxed{6 \times 10^5 \text{ m/s}}$$

ملاحظة التأثير الكهروضوئي

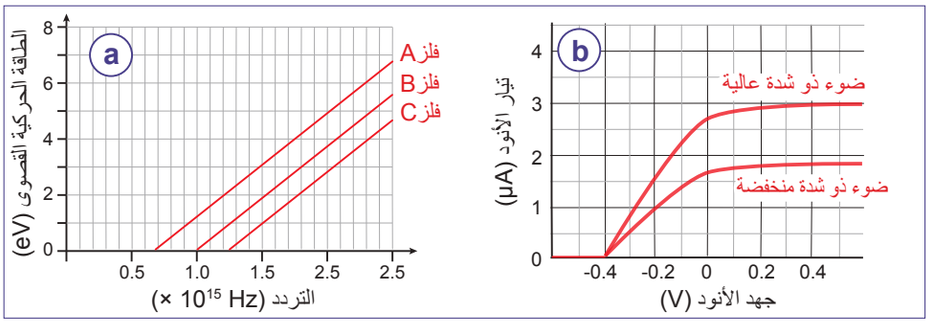
تقطع الإلكترونات مسافات قصيرة جدًا في الهواء قبل أن تمتصها ذرات الهواء. لذلك يجب إجراء تجارب ظاهرة التأثير الكهروضوئي في الفراغ. يوضح **الشكل 6-11 a** جهاز كهروضوئي نموذجي في أنبوب زجاجي مفرّغ من الهواء. تنطلق الإلكترونات الصادرة عن التأثير الكهروضوئي من الكاثود (المهبط) باتجاه الأنود الموجب (المصعد). توضح أي قراءة للأميتر إنبعاث الإلكترونات نتيجة غلق الدائرة الكهربائية.



الشكل 6-11 الجهاز الكهروضوئي: a الجهد الامامي. b الجهد العكسي.

عند سقوط ضوء تردده أعلى من تردد العتبة للفلز تنبعث الالكترونات من السطح و تكتسب طاقة حركية فتتحرك باتجاه المصعد و يتكون تيار كهروضوئي يتم رصده بواسطة الأميتر في الدائرة. يُستخدَم جهد الأنود لقياس الطاقة الحركية للإلكترونات. تخيّل ما سيحدث عندما تُصبح قطبية جهد الأنود سالبة قليلاً. تتباطأ الإلكترونات الضوئية القادمة عندما تقترب من الأنود بسبب التنافر، كما في **الشكل 6-11 b**. عندما يصبح جهد الأنود أكثر سالبية، ينخفض عدد الإلكترونات التي تصل إلى الأنود. وعندما يصبح جهد الأنود سالب بدرجة كافية، لا تصل أي إلكترونات إليه وينخفض التيار الكهروضوئي إلى الصفر. أقل جهد سالب تنعدم عنده شدة التيار الكهروضوئي يُسمّى **جهد الإيقاف stopping potential V_s**. يُفيدُنا جهد الإيقاف في استنتاج القيمة القصوى للطاقة الحركية الابتدائية للإلكترونات الضوئية $E_{K(max)}$:

4-6	الطاقة الحركية القصوى	$E_{k(max)}$	الطاقة الحركية القصوى (eV)
	$E_{k(max)} = eV_s$	e	شحنة الإلكترون (1.6×10^{-19} C)
		V_s	جهد الإيقاف (V)



الشكل 6-12 التأثير الكهروضوئي.

يوضح **الشكل 6-12a** رسمًا للطاقة الحركية القصوى لثلاثة فلزات بدلالة تردد الإشعاع الساقط. تكون قيمة تردد العتبة لكل فلز عند تقاطع الخط الخاص به مع المحور السيني. يُوضّح **الشكل 6-12b** رسمًا بيانيًّا لتيار الأنود بالنسبة إلى الجهد. ينخفض تيار الأنود إلى الصفر عند جهد إيقاف مقداره 0.4 V-. يعني ذلك أن جهد الإيقاف هو 0.4 V. يمكن ملاحظة أن جهد الإيقاف لا يعتمد على شدة الضوء، وتبقى قيمته ثابتة سواءً كانت شدة الضوء عالية أو منخفضة.

مثال 4

جهد الإيقاف لضوء أخضر طوله الموجي 496 nm يبلغ 0.4 V. ما مقدار دالة الشغل لسطح المعدن المستخدم في الخلية الكهروضوئية؟

المطلوب دالة الشغل $\Phi = ?$

المعُطيات جهد الإيقاف $V_s = 0.4\ \text{V}$

الطول الموجي $\lambda = 496\ \text{nm}$

العلاقات $E_{k(max)} = eV_s \qquad E_{photon} = \dfrac{hc}{\lambda} \qquad \Phi = E - E_{k(\max)}$

الحل

$$E = E_{k(\max)} + \Phi$$

$$E_{k(max)} = eV_s = (1.6 \times 10^{-19})(0.4) = 0.64 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

$$E_{photon} = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63 \times 10^{-34})(3 \times 10^{8})}{(496 \times 10^{-9})} = 4.01 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

$$\Phi = \frac{hc}{\lambda} - eV_s = 4.01 \times 10^{-19} - 0.64 \times 10^{-19} = \boxed{3.37 \times 10^{-19}\ \text{J}}$$

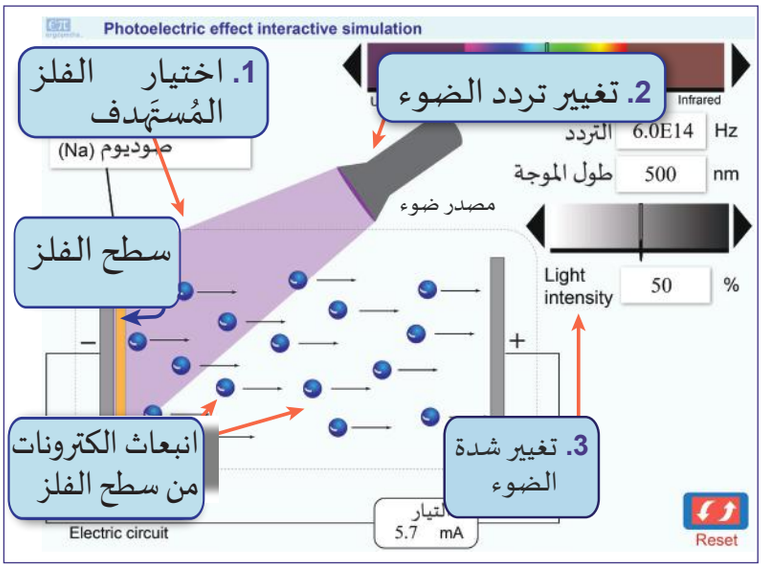
$$\Phi = \frac{(3.37 \times 10^{-19}\ \text{J})}{(1.6 \times 10^{-19}\ \text{J/eV})} = \boxed{2.10\ \text{eV}}$$

نشاط b1-6 التأثير الكهروضوئي

سؤال الاستقصاء	كيف يعتمد التأثير الكهروضوئي على تردد الضوء الساقط وشدته؟
الموادّ المطلوبة	برنامج محاكاة.

خطوات مخبرية I

1. قم بتشغيل المحاكاة التفاعلية. اختر «صوديوم».
2. اضبط لون الضوء على اللون البنفسجي باستخدام شريط تغيير التردد.
3. قم بزيادة شدة مصدر الضوء إلى حوالي 50% تقريبًا لتحرير الإلكترونات من سطح المعدن
4. اختر ضوءًا آخر بطول موجي مختلف، مثل الضوء الأحمر أو الأشعة فوق البنفسجية، ولاحظ التغييرات في الإلكترونات المنبعثة.
5. كرّر هذا الاختبار لثلاثة معادن أخرى.



الشكل 6-13 محاكاة التأثير الكهروضوئي.

أسئلة

a. هل يقوم ضوء الأشعة فوق البنفسجية بتحرير الإلكترونات؟ والضوء الأخضر؟ والضوء الأحمر؟
b. ما تردّد العتبة؟ هل تنبعث الإلكترونات بتردّدات أقلّ من هذه العتبة أم أعلى منها؟

خطوات مخبرية II

1. اضبط التردد فوق تردّد العتبة. راقب الإلكترونات المنبعثة أثناء تغيير شدّة الضوء.
2. اضبط التردد تحت تردّد العتبة. راقب الإلكترونات المنبعثة أثناء تغيير شدّة الضوء.

أسئلة

a. كيف يختلف عدد الإلكترونات المنبعثة مع شدّة الضوء فوق تردّد العتبة؟

تقويم الدرس 6-1

1. أي الكميات التالية تعتبر خاصية للفلز في ظاهرة التأثير الكهروضوئي؟
   a. تردد الفوتون.
   b. دالة الشغل.
   c. طول الموجة.
   d. الطاقة الحركية القصوى.

2. تحدث عملية الإبصار عند سقوط فوتونات محددة على شبكية العين، ما تأثير هذه الفوتونات في الشبكية؟
   a. اختراق النواة وإحداث تغيير فيها.
   b. كسر الروابط الذرية
   c. إحداث تغيير في الروابط الذرية
   d. تأيين الذرات

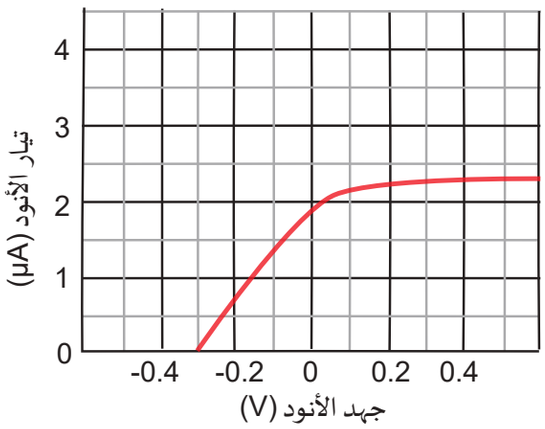
3. a. ما طاقة فوتون ضوئي، طوله الموجي $\lambda = 2\ \mu m$؟
   b. ما طاقة فوتون ضوئي، طوله الموجي $\lambda = 0.5\ \mu m$؟
   c. إلى أي جزء من الطيف الكهرومغناطيسي ينتمي كل فوتون في الفرعين السابقين؟

4. اشرح كيفية إيجاد أقصى طاقة حركية لإلكترون منبعث من مادة عبر التأثير الكهروضوئي

5. كان أحد الباحثين يصمّم تجربة لدراسة التأثير الكهروضوئي باستخدام فلز النيكل دالة الشغل له 5.15 eV. علمًا أن $1\ eV = 1.6 \square 10^{-19}\ J$.
   a. اشرح المقصود بدالّة الشغل.
   b. احسب تردّد العتبة لفلز النيكل. إلى أي منطقة من الطيف الكهرومغناطيسي ينتمي هذا التردّد؟
   c. هل سيؤدي ضوء طاقته 7.35 eV إلى تحرير إلكترونات ضوئية من النيكل؟ في أي منطقة من الطيف الكهرومغناطيسي يوجد هذا الضوء؟
   d. هل يحرر ضوء الأشعة تحت الحمراء بطول موجي 1 µm إلكترونًا ضوئيا؟
   e. هل يحرر الضوء البنفسجي (400 nm) إلكترونات ضوئية؟
   f. هل تحرّر الأشعة فوق البنفسجية عند 200 nm إلكترونات ضوئية؟

6. يصطدم فوتون طاقته 2 eV بلوح فلزي، ما يؤدي إلى تحريرالكترونات الضوئية. إذا تم تقليل الطول الموجي بنسبة 25%، فإن السرعة القصوى تتضاعف. احسب دالة الشغل للفلزّ.

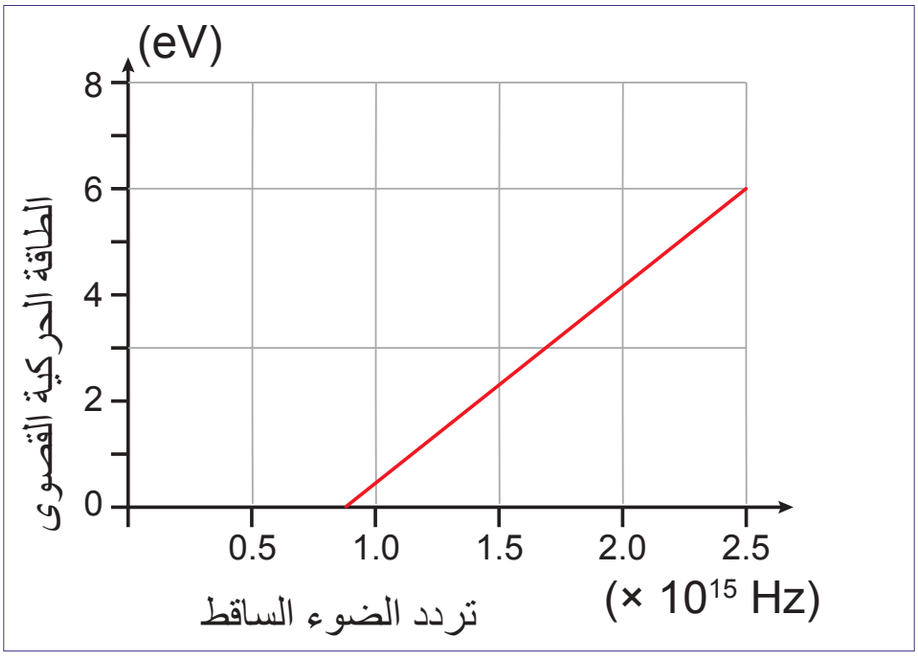
7. يظهر الشكل المجاور رسمًا بيانيًّا لجهد الضوء الأخضر بدلالة التيار الكهروضوئي. إذا كانت دالة الشغل للفلز تساوي 2.10 eV، فما مقدار الطول الموجي للضوء.



8. يبين الشكل المجاور العلاقة البيانية بين تردد الضوء الساقط على فلز، والطاقة الحركية القصوى التي تمتلكها الإلكترونات المتحررة من سطح الفلز.

a. ما مقدار دالة الشغل لهذا الفلز؟

b. ما مقدار الطول الموجي للفوتون الساقط والذي يزود الإلكترونات المتحررة بطاقة قصوى (0.6 eV)



الدرس 2-6

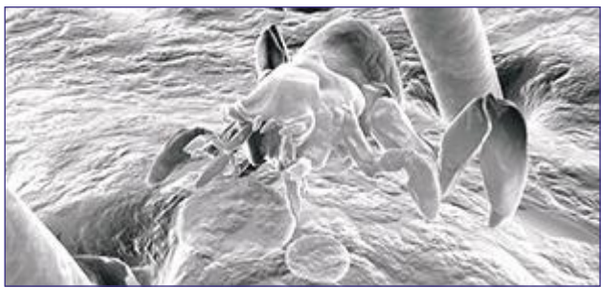
مستويات الطاقة والأطياف الذرية

Energy Levels and Atomic Spectra

المفردات

Bohr model	نموذج بور
Quantum number	العدد الكمي
Quantized	مكممة
Duality of matter	الطبيعة المزدوجة للمادة
Quantization of charge	تكميم الشحنة
Energy levels	مستويات الطاقة
Ground state	مستوى أرضي
Excited state	مستوى مثار
Scattering	تشتُّت
continuous spectrum	طيف مستمر
Line spectrum	طيف خطي
Spectral line	خط طيفي
Spectrometer	مطياف
Spectroscopy	تحليل طيفي

يمكن أن يكون الطول الموجي للإلكترون أصغر من الطول الموجي للضوء المرئي. يستخدم المجهر الإلكتروني موجات الإلكترونات بدلا من موجات الضوء للحصول على صور ذات تكبير عالٍ جدًا، مثل صورة عثة الغبار المختبئة في فرو الحيوانات (**الشكل 6-14**). لا تستطيع المجاهر الضوئية تصوير أي شيء أصغر من الطول الموجي للضوء المرئي.



الشكل 6-14 صورة بالمجهر الإلكتروني لعثّة على شعرة.

مخرجات التّعلُّم

P1212.1 يوضح الأطياف الذرية ومدارات الإلكترون المسموح بها بدلالة تكميم الزخم الزاويّ (كمّية الحركة الزاويّة) ونموذج بور.

P1212.2 يصف تكوّن أطياف الانبعاث والامتصاص (بما في ذلك حسابات مستوى الطاقة)، وكيف يمكن استخدامها لمعرفة معلومات عن العناصر الموجودة في الأجرام السماوية.

P1212.3 يوضح تكميم شحنة الإلكترون، من خلال تجربة ميليكان (Millikan).

P1213.1 يصف الطبيعة المزدوجة الموجية والجسيمية للإلكترونات، وكيف تستخدم في عمل أنبوب أشعة المهبط وأنبوب التلفزيون.

P1213.2 يحل مسائل حسابية باستخدام معادلة دي برولي للجسيمات والفوتونات: $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$

أضواء النيون

لماذا تتوهّج إعلانات النيون؟ ما الذي يولّد اللون؟

كيف يعمل مصباح النيون؟

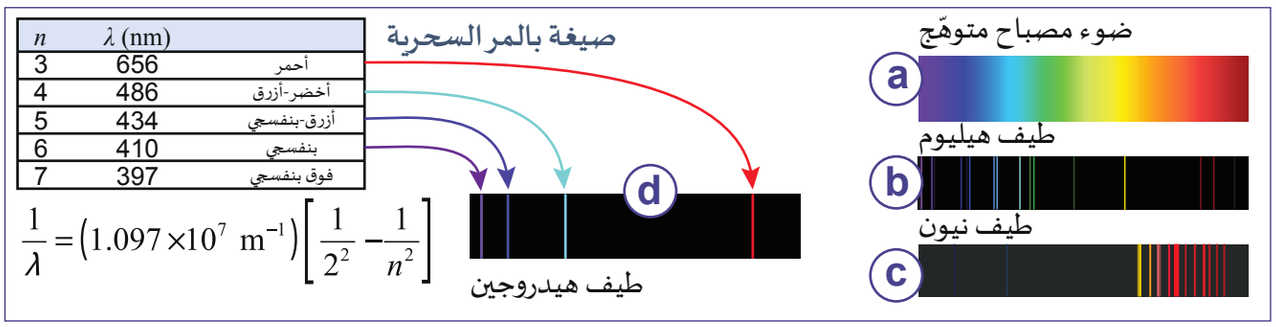
الشكل 6-15 لوحة إعلانية بضوء النيون.

عندما يمرّ تيّار كهربائي في غاز مصباح النيون منخفض الضغط، فإنَّ الغاز يتوهّج. ويمكن أن تكون الإعلانات الصادرة عن غاز النيون حمراء، خضراء، صفراء أو برتقالية. يختلف اللون وفقًا للضغط وفرق الجهد.

الشكل 6-16 جهاز المطياف الضوئي.

المطياف هو جهاز يحلّل الضوء إلى أطوال موجية مختلفة. إذا شاهدت الشمس أو مصباحًا متوهّجًا من خلال المطياف، فإنّك سترى قوس المطر وهذا يُوضّح أن الضوء الأبيض هو خليط من الألوان (**الشكل 6-17a**).

إذا نظرت بالمطياف إلى ضوء إعلان نيون، فسترى شيئًا مختلفًا تمامًا: يُظهر طيفُ الضوء من غاز عنصر نقي ألوانًا محدّدة فقط، (**الشكل 6-17b-c**). هذه الألوان تختلف من عنصر إلى آخر. كيف يمكن تفسير ذلك؟



n	λ (nm)	
3	656	أحمر
4	486	أخضر-أزرق
5	434	أزرق-بنفسجي
6	410	بنفسجي
7	397	فوق بنفسجي

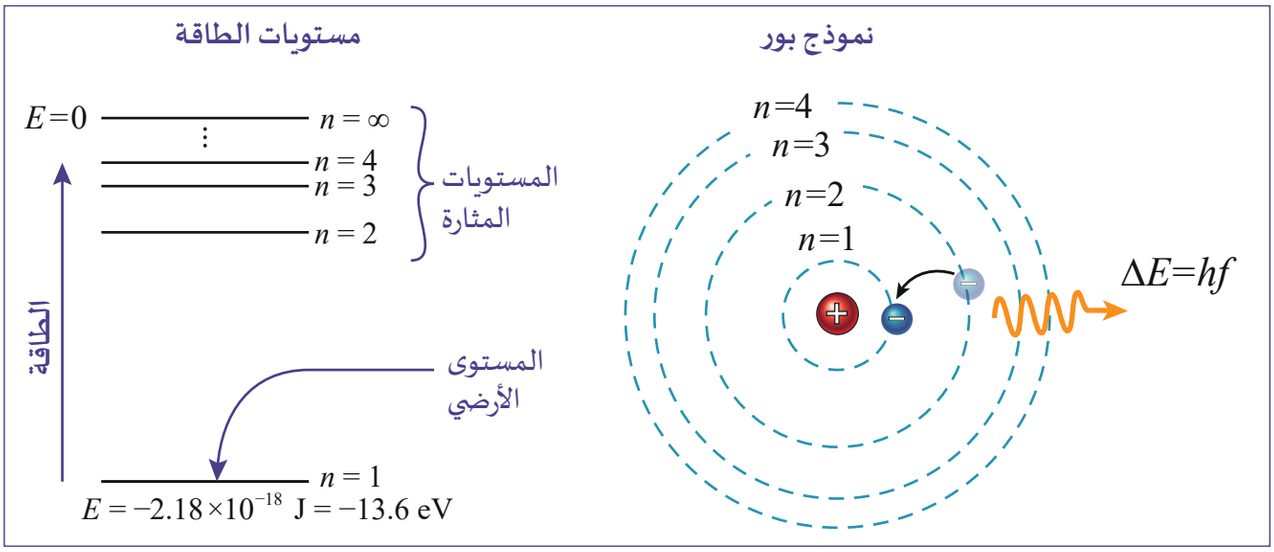
الشكل 6-17 كان غموض طيف الهيدروجين دليلًا مهمًا في اكتشاف نظرية الكم.

اكتشف معلّم مدرسة سويسري يُدعى يوهان بالمر في العام 1885 أن الأطوال الموجية للضوء في طيف الهيدروجين تخضع لعلاقة رياضية دقيقة تُعرف الآن باسم «معادلة بالمر».

وجد بالمر هذا النمط، لكنه لم يستطع تفسير سبب حدوثه. في معادلة بالمر n هو عدد صحيح، مثل 3 أو 4 أو 5: عندما تكون $n = 3$، تتوقّع الصيغة طولًا موجيًا مقداره 656 nm، وهو ما يتطابق تمامًا مع الطول الموجي للخط الأحمر في طيف الهيدروجين. ما تدل عليه صيغة بالمر هو وجود شيء ما في داخل ذرّات الهيدروجين يجعلها تبدو كسلسلة من المفاتيح. يمكن أن تتمثّل هذه المفاتيح الذرية بأي عدد صحيح، مثل 3 أو 4، ولكن ليس أي رقم بينهما، مثل 3.5.

مستويات الطاقة ونموذج بور

مستويات الطاقة Energy levels هي الطاقات المسموح بها للإلكترون داخل النظام الكمي، كما في الذرّة. يبيّن **الشكل 6-18** مستويات الطاقة لذرّة الهيدروجين. كل مستوى طاقة هو موجة إلكترون ذات رنين عند مسافة مختلفة من النواة.



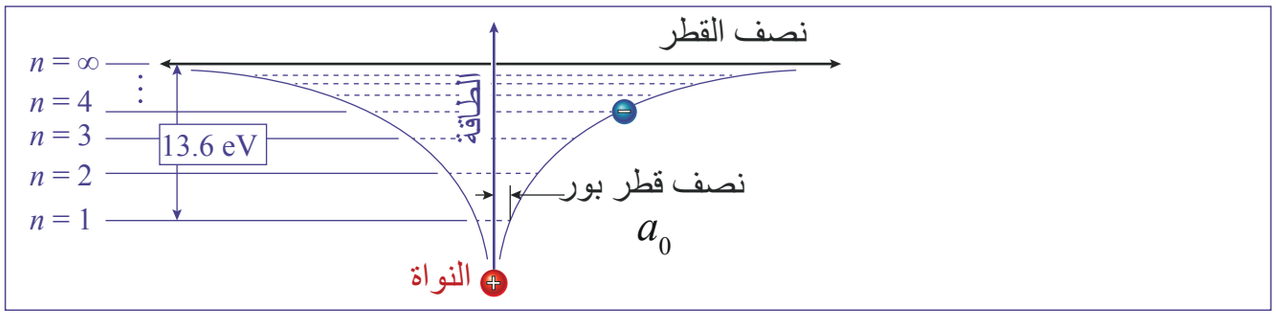
الشكل 6-18 مستويات الطاقة ونموذج بور.

يُصوّر **نموذج بور Bohr model** الإلكترونات على أنها تدور على مسافات مختلفة من النواة مثل الكواكب التي تدور حول الشمس. تُغيّر الذرّات طاقتها عندما تتحرك الإلكترونات إلى أعلى أو إلى أسفل بين مستويات الطاقة. تُعطى مستويات الطاقة المختلفة **أعداد كم quantum number** مختلفة، n. **الحالة الأرضية ground state** هي البنية الأقل طاقة، والتي ستكون عند $n = 1$ في المخطط البياني. أما **الحالة المثارة excited state**، فهي بنية الذرّة عندما يكون فيها الإلكترون في مستوى طاقة أعلى من الحالة الأرضية.

تزداد طاقة الذرّات الكلية أو تنقص فقط بقِيَم مكممة، وهي الفرق بين مستويات الطاقة. وعلى سبيل المثال، فإنَّ الإلكترون قد ينتقل من مستوى الطاقة $n = 2$ إلى المستوى $n = 1$. هنا تعطي الذرّة الفرق في الطاقة كفوتون. تتطابق طاقة الفوتون مع الفرق في الطاقة بين المستوى الابتدائي والمستوى النهائي للإلكترون.

مستويات الطاقة والعدد الكمي الأساسي *n*

تفيدنا النظرية الكمية أن أي جسيم محتبس في منطقة لها أبعاد مساوية لطوله الموجي، تكون له مستويات طاقة مكممة. المعنى الفيزيائي لكلمة "محتبس" هو أن طاقة الجسيم أقل من الطاقة المطلوبة للتغلب على قوة الربط التي تحصر الجسيم. في ذرة الهيدروجين، تنتج طاقة الربط من قوة كولوم التي تولّد "بئر جهد" يحبس الإلكترون بطاقة حركية أقل من 13.6 eV كما في **الشكل 6-19**.



الشكل 6-19 تُنتِج قوة كولوم بئر جهد يحبس الإلكترون حول النواة.

يفسّر النموذج الكمي للذرة قاعدة بالمر الواردة في **الشكل 6-19**. وعند التعويض عن قيم الثوابت الفيزيائية نحصل على قيم مستويات الطاقة E_n في **المعادلة 6-5** بدلالة العدد الكمي n وطاقة المستوى الأول E_1.

5-6 مستويات طاقة ذرة الهيدروجين

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} = \frac{-13.6}{n^2}\ \text{eV}$$

E_n	طاقة المستوى n (J)
E_1	طاقة المستوى 1 (J)
n	العدد الكمي الأساسي

مثال 5

احسب طاقة المستوى الخامس لذرة الهيدروجين (n = 5)

n

المطلوب $E_n = ?$

المعُطيات: مستوى الطاقة الخامس n = 5

العلاقات:

$$E_n = \frac{-13.6}{n^2}\ \text{eV}$$

الحل:

$$E_n = \frac{-13.6}{n^2}\ \text{eV} = \frac{-13.6}{(5)^2} = \boxed{-0.544\ \text{eV}}$$

طيف ذرّة الهيدروجين

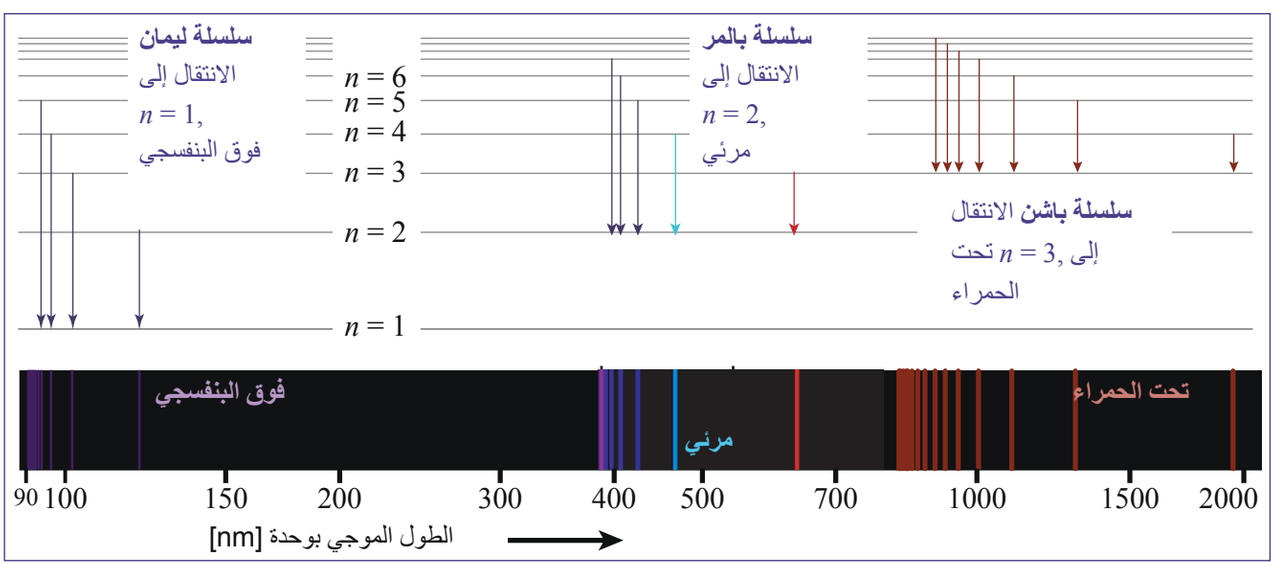
يقدّم نموذج بور تفسيرًا جيدًا للأطوال الموجية الملاحظة في طيف الهيدروجين، في الشكل (6-20) طاقة الفوتون تساوي فرق الطاقة بين مستويين من مستويات الطاقة. فإذا كانت مستويات الطاقة معروفة، فإن طاقة الفوتون تُعطى **بالمعادلة 6-6**، حيث E_i هي الطاقة في المستوى الابتدائي و E_f هي طاقة المستوى النهائي.

6-6	تغيّر طاقة الإلكترون		
	$\Delta E = hf = E_f - E_i$	E	الطاقة (J)
		E_i	الطاقة الابتدائية (J)
		E_f	الطاقة النهائية (J)

يمكن أن تتخطى الانتقالات بعض مستويات الطاقة. وعلى سبيل المثال، فإنَّ الإلكترون قد ينتقل من مستوى الطاقة الثالث إلى مستوى الطاقة الأول. تحافظ الذرّة على الطاقة عن طريق انبعاث فوتون بطاقة تساوي الفرق في الطاقة بين المستوى الثالث والمستوى الأول. يمكن أن ينتقل الإلكترون من $n = 1$ إلى $n = \infty$ أيضًا، وهذا يعني إزالة الإلكترون تمامًا من الذرّة. ما يعني تأيّن الذّرة.

يكون التغير في طاقة الإلكترون سالبًا عند انتقال الإلكترون من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أدنى. ويكون هذا التغير موجبًا عند انتقال الإلكترون من مستوى أدنى إلى مستوى أعلى.

يُصدِر الهيدروجين ثلاث سلاسل من الخطوط الطيفية عند الأطوال الموجية للأشعة فوق البنفسجية (UV) ، والأشعة المرئية، والأشعة تحت الحمراء (IR). تتوافق الانتقالات الذرية من مستوى الطاقة $n = 1$ وإليه مع الأطوال الموجية للضوء في الأشعة فوق البنفسجية وتُسمّى «سلسلة ليمان». تتوافق الانتقالات الذرية بين مستوى الطاقة $n = 2$ ومستويات n الأعلى مع الأطوال الموجية للضوء المرئي والأشعة فوق البنفسجية القريبة من الضوء المرئي، وتُسمّى «سلسلة بالمر». أمّا الانتقالات الذرية بين مستوى $n = 3$ والمستويات الكمّية الأعلى فتتوافق مع طاقات الفوتون في الأشعة تحت الحمراء و تسمى سلسلة باشن. الخطوط التي تنتمي إلى سلسلة ليمان لها أعلى طاقة، تليها خطوط سلسلة بالمر.



الشكل 6-20 طيف ذرّة الهيدروجين.

مثال 6

تمتلك ذرّة الهيدروجين إلكترونًا عند مستوى طاقة -3.4 eV. انتقل فجأة إلى مستوى الطاقة -13.6 eV.

a. هل أصدر الإلكترون فوتونًا أم إنه امتصّ هذا الفوتون؟

b. احسب طاقة الفوتون.

c. ما الطول الموجي للفوتون؟

d. أي جزء من الطيف الكهرومغناطيسي يتوافق مع هذا الطول الموجي؟

المطلوب:

a. هل أصدر الإلكترون فوتونًا أم إنه امتصّ هذا الفوتون؟

b. طاقة الفوتون

c. الطول الموجي للفوتون λ

d. منطقة الطيف الكهرومغناطيسي

المعُطيات:

الطاقة الابتدائية: $E_i = -3.4 \text{ eV}$;

الطاقة النهائية: $E_f = -13.6 \text{ eV}$;

العلاقات:

$E = hf$; $c = f\lambda$

الحل:

a. تبيّن قيم الطاقة أن الذرّة فقدت طاقة، وهذا يعني أنها بعثت فوتونًا.

b. طاقة الفوتون المنبعث تساوي الفرق بين طاقتي المستويين اللذين انتقل الالكترون بينهما، بعد التحويل إلى جول.

$$\Delta E = E_f - E_i = -13.6 - (-3.4)$$

$$= \boxed{-10.2 \text{ eV}}$$

طاقة الفوتون بوحدة الجول:

$$-10.2\text{eV} \times 1.6 \times 10^{-19} = -1.63 \times 10^{-18} \text{ J}$$

c. تعويض معادلة سرعة الضوء في معادلة بلانك:

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{\left(6.63 \times 10^{-34}\right)\left(3 \times 10^{8}\right)}{1.64 \times 10^{-18}} = 121.7 \text{ nm}$$

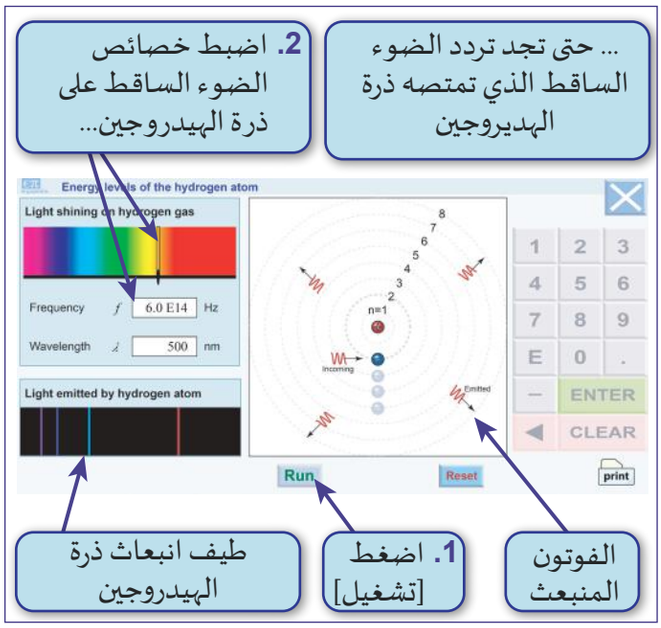
d. تبيّن القيمة 121.7 nm أن هذا الطول الموجي يقع في منطقة الأشعة فوق البنفسجية من الطيف الكهرومغناطيسي.

نشاط a2-6 مستويات طاقة ذرّة الهيدروجين

سؤال الاستقصاء	ما الأطوال الموجية للضوء التي تمتصّها ذرّة الهيدروجين أو تُصدرها؟
الموادّ المطلوبة	برنامج المحاكاة.

خطوات مخبرية

1. شغّل المحاكاة التفاعلية واضغط زر [تشغيل]
2. اضبط الطول الموجي أو تردد الضوء. فإذا كان للضوء طول موجي يتوافق مع مستوى طاقة الانتقال، فإنه سيُمتص، وستبعث ذرّة الهيدروجين بعد ذلك فوتونًا له الطول الموجي نفسه.
3. جد ثلاثة أطوال موجية على الأقل تمتصّها ذرّة الهيدروجين.



الشكل 6-21 ما عدد خطوط الانبعاث التي يمكنك إنتاجها من ذرّة الهيدروجين؟

الأسئلة

a. ماذا يحدث عندما تمتصّ ذرّة الهيدروجين فوتونًا؟ ماذا يحدث بعد ذلك؟

b. ما الأطوال الموجية للضوء التي يمكن أن تمتصّها ذرّة الهيدروجين؟ ما مستويات طاقة الانتقالات التي تتوافق مع هذه الأطوال الموجية؟

c. هل الأطوال الموجية موزعّة بالتساوي على طول الطيف؟ صف توزيعها كدالة للأطوال الموجية و/ أو اللون.

d. تنتقل جميع الفوتونات الساقطة في هذه المحاكاة باتجاه واحد. ما الاتجاه الذي تنتقل فيه الفوتونات المنبعثة؟ وضّح سبب حدوث ذلك.

الزخم الزاويّ

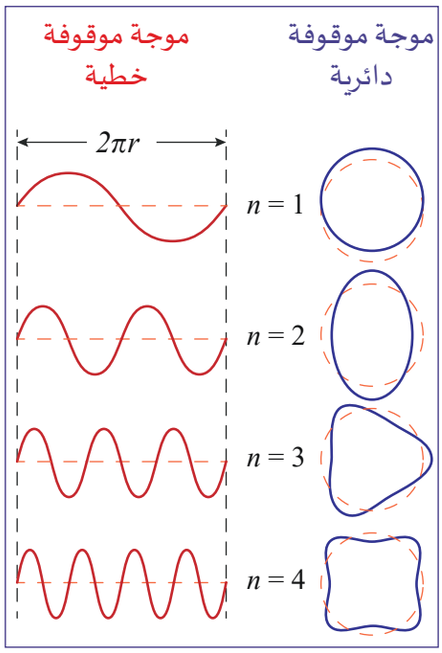
عندما يدور جسم حول محور، يكون له زخم زاوي، أي أن لديه قدرة على الاستمرار في الدوران ما لم تؤثر عليه قوة توقفه أو تغيّر اتجاهه.

يشبه ذلك الزخم الخطي الذي يجعل الأجسام تستمر في الحركة على خط مستقيم.

المعادلة L = rvm تستخدم لحساب الزخم الزاوي. حيث تعبر m عن الكتلة و v عن سرعة الجسم و r المسافة العمودية من محور الدوران.

تكميم الزخم الزاويّ

استنتج نيل بور أن كلًا من الطاقة والزخم الزاوي لإلكترون في ذرة يكون مكممًا. واقترح لذلك نموذجًا للذرة عبارة عن موجات موقوفة في مدار دائري (**الشكل 6-22**).



الشكل 6-22 موجة موقوفة دائرية.

يكون التداخل بنّاءً عندما يكون محيط المدار عبارة عن أعداد صحيحة من الأطوال الموجية للإلكترون. ويمكن التعبير عن ذلك بما يلي:

$$\text{محيط المدار} = 2\pi r = n\lambda = n\frac{h}{mv}$$

ويكون الزخم الزاوي المداري L للإلكترون. $L = mvr$ حيث m كتلة الإلكترون و v سرعتها و r نصف قطر المدار. ويمكننا إعادة ترتيب هذه المعادلة للحصول على الزخم الزاوي المداري للإلكترون كما في **المعادلة 6-7**.

7-6 الزخم الزاوي المداري

$$L = mvr = n\frac{h}{2\pi}$$

L	الزخم الزاوي (kgm^2s^{-1})		
h	ثابت بلانك = 6.63×10^{-34} J s		
r	نصف قطر المدار (m)	v	سرعة الإلكترون (m/s)
m	كتلة الإلكترون (kg)	n	عدد صحيح

توضح **المعادلة 6-7** أن الزخم الزاوي للإلكترون مكممًا أي أن يكون فقط مضاعفات أعداد صحيحة للكمية $\frac{h}{2\pi}$. للإلكترونات نوع آخر من الزخم الزاوي يسمى الزخم الزاوي المغزلي (البَرمي). الزخم الزاوي المغزلي يشبه إلى حد كبير دوران البلبل، ويمكن أن يكون موجبًا عند الدوران بعكس اتجاه عقارب الساعة، أو سالبًا عند الدوران مع اتجاه عقارب الساعة.

الشكل 6-23 الزخم الزاوي للبلبل الدّوّار.

مثال 7

a. احسب الزخم الزاوي لإلكترون في المدار الثاني لذرة الهيدروجين.

b. احسب سرعة الإلكترون في المدار الثاني، إذا كان نصف قطر هذا المدار $2 \square 10^{-10}$ m.

المطلوب: الزخم الزاوي L للإلكترون

سرعة الإلكترون v

المعطيات: نصف قطر المدار $r = 2 \square 10^{-10}$ m

العلاقات:

$$mvr = n\frac{h}{2\pi}$$

الحل:

a. يمكن إيجاد الزخم الزاوي باستخدام:

$$L = n\frac{h}{2\pi}$$

$$L = (2)\frac{6.63\times10^{-34}}{2\pi}$$

$$= \boxed{2.11\times10^{-34}\ \text{kgm}^2/\text{s}}$$

b. لحساب سرعة الإلكترون، نستخدم قيمة الزخم الزاوي التي حصلنا عليها من الفرع a. علما بأن كتلة الإلكترون $9.1 \square 10^{-31}$ kg

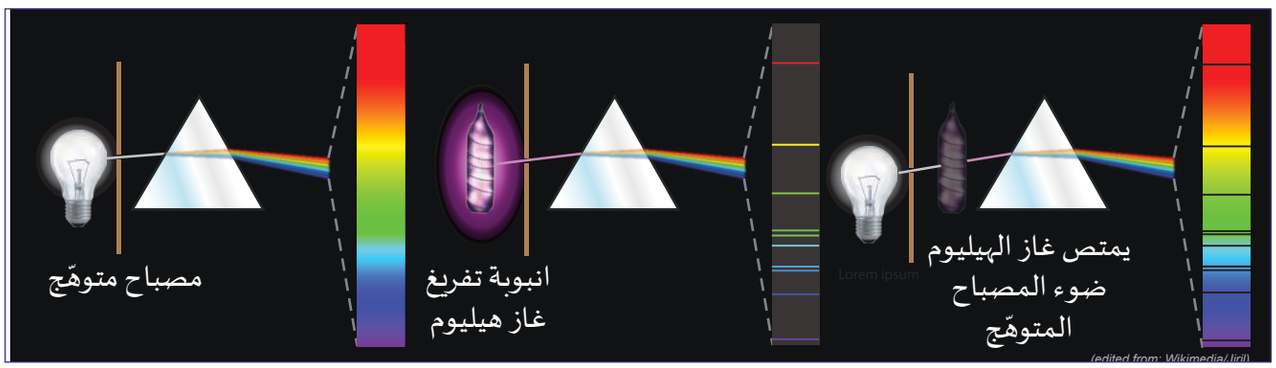
$$L = mvr \Rightarrow v = \frac{L}{mr}$$

$$v = \frac{2.11\times10^{-34}}{\left(9.1\times10^{-31}\right)\left(2\times10^{-10}\right)} = \boxed{1.16\times10^{6}\ \text{m/s}}$$

التحليل الطيفي

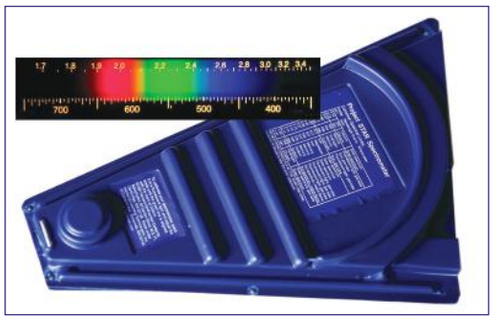
عندما يمرّ الضوء الأبيض من خلال منشور، فإنَّ الضوء يتحلّل إلى أطوال موجية مختلفة لتكوين طيف من الألوان. يتضمّن الضوء المنبعث من المصباح المتوهّج أو الشمس اختلافًا مُتدرّجًا في الألوان يسمى **الطيف المستمر Continuous spectrum** (**الشكل 6-a24**).

يتكوَّن الضوء الناتج عن الانتقال بين مستويات الطاقة في الذرّة من أطوال موجية مختلفة. يتوافق كل طول موجي فردي للضوء في **الطيف الخطي Line spectrum** مع انبعاث الضوء أو امتصاصه بواسطة الذرّة، وكل طول موجي يقابل خط واحد يُسمّى **الخط الطيفي Spectral line** (**الشكل 6-b24**). عندما تُصدر الذرّات الضوء، تظهر خطوط مضيئة في طيف الانبعاث هذا. يحتوي أنبوب التفريغ على غاز ينتج طيف انبعاث عند تطبيق فرق جهد عليه. أما عندما تكون ذرات الغاز الباردة على امتداد خط الرؤية باتجاه مصدر ضوء في الخلفية، فإن الذرّات تمتص الضوء لتكوين طيف امتصاص والذي يظهر كخطوط سوداء في طيف مستمر (**الشكل 6-c24**).



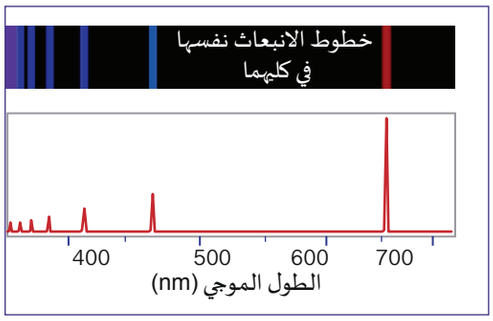
الشكل 6-24 (a) طيف مستمر، (b) طيف انبعاث خطي، (c) طيف امتصاص خطي.

تُسمّى الأداة التي تحلّل الضوء إلى الأطوال الموجية المكونّة له **المطياف Spectrometer**. وأبسط نوع مطياف هو المنشور. يبيّن **الشكل 6-25** مطياف غرفة الصف الذي يعمل بدقة مثل محزوز الحيود الدقيق.



الشكل 6-25 المطياف.

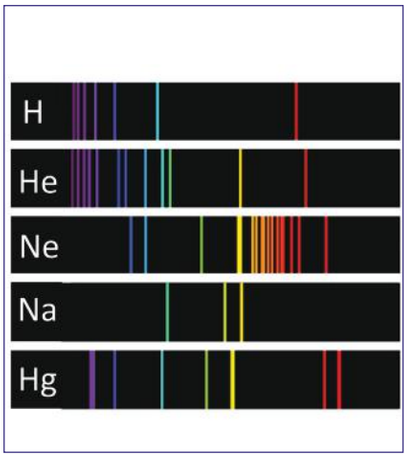
التحليل الطيفي Spectroscopy هو دراسة الأطياف التي تأخذ أشكالًا مختلفة. تجري معظم الأبحاث العلمية باستخدام الأطياف على شكل رسم بياني يبيّن شدة الطيف على أنه دالّة للطول الموجي. تُظهر كلتا الصورتين في **الشكل 6- 26** خطوط الانبعاث نفسها. يبيّن الرسم البياني البيانات الموجودة في الصورة نفسها ولكن بطريقة كمّية.



الشكل 6-26 الأطياف في نمطين.

أطياف الانبعاث والامتصاص

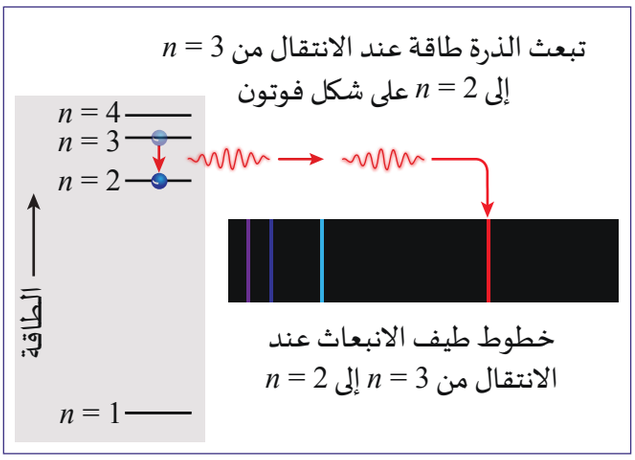
تنشأ مستويات الطاقة بسبب تجاذب الإلكترون مع النواة والتنافر مع الإلكترونات الأخرى. ونظرًا لاختلاف هذا التجاذب والتنافر بين عنصر وآخر، فإن مستويات الطاقة تختلف لكل عنصر. وهذا يعني أن طاقة الفوتونات التي قد تُمتصّ أو تنبعث تختلف أيضًا من عنصر لآخر. نلاحظ أن لكل عنصر طيفًا فريدًا يتوافق مع بنية مستويات طاقته الداخلية. يبيّن **الشكل 6-27** الطيف المرئي لخمسة عناصر مختلفة. ويمثّل الطيف بصمة خاصة لكل عنصر، فهو يميز العناصر عن بعضها.



الشكل 6-27 أطياف خمسة عناصر.

طيف الانبعاث

قد تدخل الذرّات في حالة الإثارة بسبب عدد من مصادر الطاقة المختلفة. عند درجات الحرارة المرتفعة، فإن عددا كبيرًا من ذرات المادة يمتص الطاقة، ثم يعود ليفقدها عند عودة الإلكترونات من جميع مستويات الطاقة الممكنة، على شكل طيف انبعاث. تبيّن **أطياف الانبعاث Emission spectra** الناتجة خصائص نمط خطوط ذلك العنصر كما هي مبيّنة في **الشكل 6-28**.

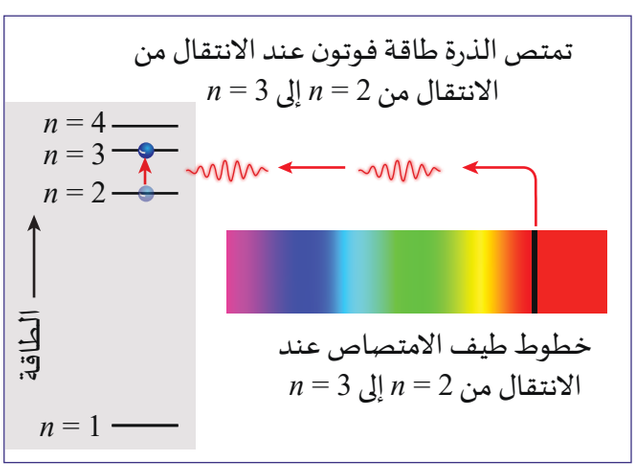


الشكل 6-28 تبيّن أطياف الانبعاث الخطوط المضيئة لكل انتقال.

على سبيل المثال: ذرّة الهيدروجين التي ينتقل فيها الإلكترون من مستوى طاقة $n = 3$ إلى $n = 2$، تعطي ضوءًا أحمر بطول موجي 656 nm، يختص بالضوء الأحمر في طيف الهيدروجين، كما هو مبيّن في **الشكل 6-28**.

طيف الامتصاص

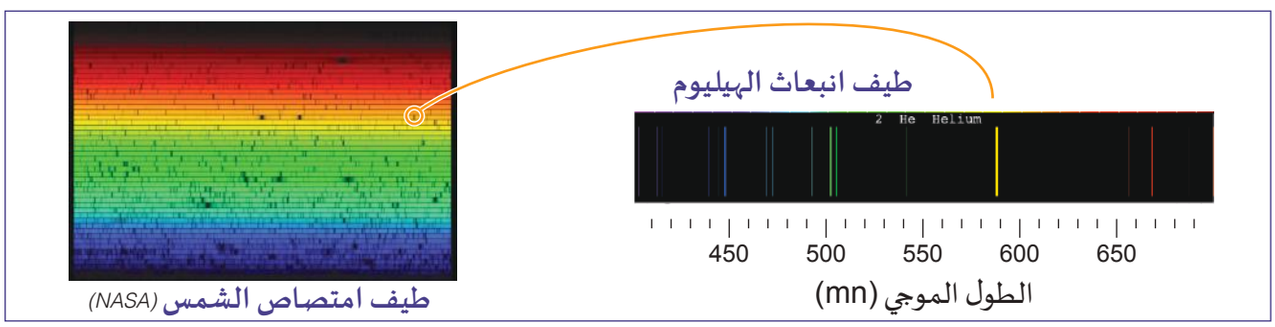
تمتص الذرّات الضوء الساقط عليها بشدة عندما تتساوى طاقة الفوتون مع الفرق في الطاقة بين أي مستويين من مستويات الطاقة فيها. فإذا تعرضّت الذرات لطيف ضوئي يضم مدى واسعًا من الأطوال الموجية، مثل الضوء القادم من نجم، فإن الامتصاص يسبب نطاقات مظلمة عند كل طاقة فوتون مرتبطة بالانتقال. يبيّن **طيف الامتصاص Absorption spectrum** نطاقات مظلمة عند الأطوال الموجية نفسها التي يُظهر فيها طيف الانبعاث نطاقات مضيئة (**الشكل 6-29**).



الشكل 6-29 تمثل الخطوط السوداء طيف الامتصاص.

رؤية الكون بالتحليل الطيفي

كيف نعرف أن المادة الموجودة في أرجاء الكون البعيدة هي المادة نفسها الموجودة على كوكب الأرض؟ الجواب هو أن التلسكوبات الكبيرة لا تلتقط الصور في الغالب، بل تستقبل الأطياف. نستخدم لتحديد العناصر البعيدة الحقيقة التي تؤكّد أن الذرّات تبعث الضوء وتمتصّه في أطياف ذات مميزات خاصة بالعناصر والمركبّات. يمكن لمطياف شديد الوضوح تحليل الضوء القادم من مجرة بعيدة، وتحديد العناصر التي تنتج هذا الضوء، وإجراء قياسات لنسبة توافر تلك العناصر والمركبات. لم يُكتشف عنصر الهيليوم في الواقع على الأرض، بل إنه أُكتشف عن طريق خطوطه الطيفية في ضوء الشمس التي يشكّل الهيليوم ما نسبته 25% منها تقريبًا (**الشكل 6-30**).



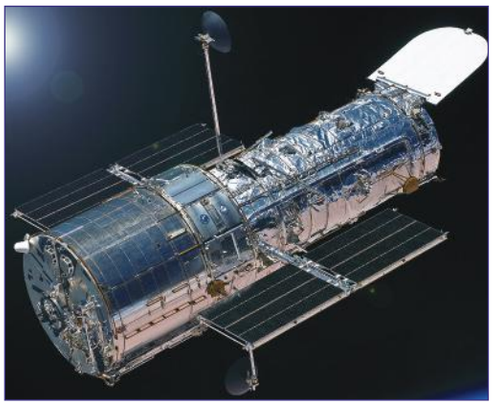
الشكل 6-30 أُكتشف الهيليوم في الشمس عن طريق التحليل الطيفي.

يمكن اكتشاف المركّبات الجزيئية والتفاعلات الكيميائية بواسطة التحليل الطيفي للأطوال الموجية المختلفة، مثل موجات الراديو والأشعة تحت الحمراء البعيدة (**الشكل 6-31**)

الشكل 6-31 التلسكوبات الراديوية وأطياف الأشعة تحت الحمراء البعيدة.

تلسكوب هابل

كشفت الأطياف التي التقطتها التلسكوبات، مثل تلسكوب هابل (**الشكل 6-32**) عن العناصر الموجودة في النجوم والسديم والغلاف الجوي للكواكب. بدأ العمل بتلسكوب هابل في العام 1990، ويتضمن مطياف التصوير بالتلسكوب الفضائي الذي يلتقط أطياف النجوم في الفضاء العميق.



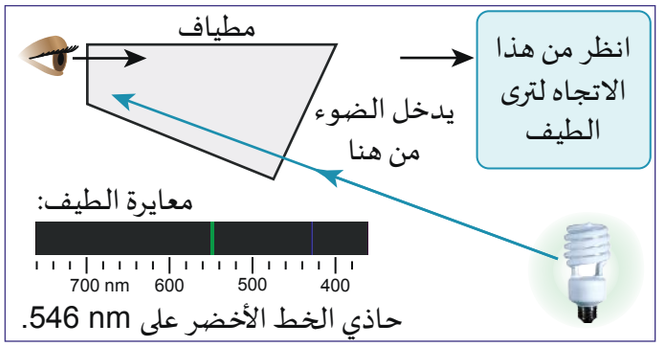
الشكل 6-32 تلسكوب هابل.

نشاط b2-6 استخدام التحليل الطيفي

سؤال الاستقصاء	كيف يمكنك استخدام التحليل الطيفي لتحديد العناصر؟
الموادّ المطلوبة	مطياف، أطياف ذرية، أطياف ذرية مجهولة، أطياف نجمية.

خطوات التجربة 1

1. عاير المطياف البصري باليد بتوجيهه نحو مصباح فلورسنت وضبط التدريج بمحاذاة الخط الأخضر على 546 nm.
2. شغّل مصابيح التفريغ.
3. وجّه المطياف نحو مصباح الفلورسنت ومصابيح التفريغ كما هو مُبيّن في **الشكل 6-33**.



الشكل 6-33 استخدام المطياف.

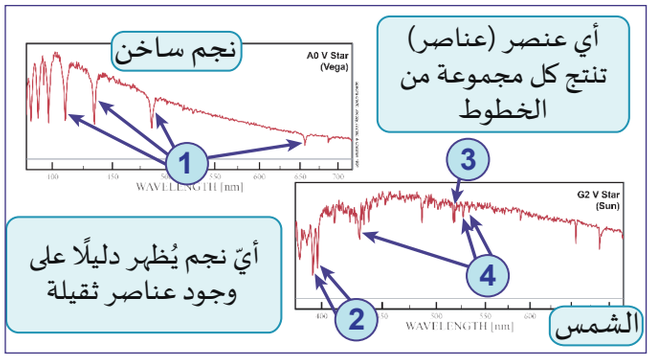
الأسئلة

a. ما العناصر التي يمكنك تحديدها في مصباح الفلورسنت أعلاه؟ لماذا؟

b. بعد ملاحظة الأطياف، أيٌّ من مصابيح التفريغ هو(Ar، أو H ، He، Ne)؟

خطوات التجربة 2

1. باستخدام الصُوَر الشفافة لخطوط أطياف الانبعاث المعروفة، حدِّد العناصر المجهولة المتوافرة، وذلك بتحريك الصور الشفافة فوق الأطياف الغامضة.
2. استخدم الأطياف الذرية لتحديد العناصر الموجودة في خطوط الامتصاص لنجوم مختلفة (**الشكل 6-34**).



الشكل 6-34 مطابقة أطياف الأجسام النجمية.

الأسئلة

a. فيمَ يختلف طيف الامتصاص الخطي عن طيف الانبعاث الخطي؟

b. ما النجم (النجوم) الذي يعطي دليلًا على وجود عناصر أثقل؟ ما سبب حدوث ذلك؟

طول موجة دي برولي

اقترح الفيزيائي الفرنسي لويس دي برولي في العام 1924 وجود تناظر بين الطاقة والمادة، مثل الفوتونات والإلكترونات. رأى دي برولي أن الإلكترونات المحصورة في حيّز صغير، يكون لها طول موجي مرتبط بطاقة، مثل الفوتونات. حدّد دي برولي رياضيًا الطول الموجي **بالمعادلة 6-8**.

8-6	طول موجة دي برولي	λ	الطول الموجي (m)
$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$		h	ثابت بلانك = 6.63×10^{-34} J s.
		P	كمية الحركة (الزخم الخطي) (kg.m/s)
		m	الكتلة (kg)
		v	السرعة (m/s)

إن **الطبيعة المزدوجة للمادة Duality of matter** تعني أن المادة لها خصائص موجية وجسيمية. الجسيمات التي لها كمّية حركة لها أيضًا طول موجي يشبه الطول الموجي للفوتون. نحن لا نلاحظ في الغالب موجات المادة لأن الأطوال الموجية للأجسام العادية صغيرة جدًا.

- طول موجة دي برولي لكرة قدم نموذجية تتحرك بسرعة 2 m/s هو 3×10^{-34} m. وهذا أصغر بكثير من قُطر ذرّة واحدة.
- طول موجة دي برولي لإلكترون في فلز يقارب 10 nm وهو مُماثل لقطر ذرّة تقريبًا.

مثال 8

طول موجة دي برولي لإلكترون 0.167 nm. جد سرعة الإلكترون وطاقته الحركية علما بأن كتلته 9.1×10^{-31} kg.

المطلوب $v = ?$ $E_k = ?$

المعُطيات: كتلة الإكترون $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg؛ الطول الموجي = 0.167 nm؛

العلاقات: $\lambda = \frac{h}{p}$ $E_k = \frac{1}{2}mv^2$

الحل:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \Rightarrow v = \frac{h}{\lambda m}$$

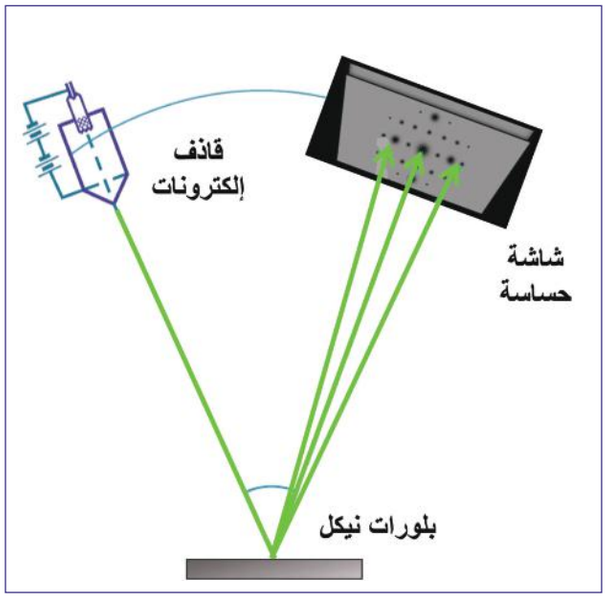
$$v = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{(0.167 \times 10^{-9})(9.1 \times 10^{-31})} = \boxed{4.36 \times 10^{6} \text{ m/s}}$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(9.1 \times 10^{-31})(4.36 \times 10^{6})^2 = \boxed{8.7 \times 10^{-18} \text{ J}}$$

تداخل الإلكترونات وحيودها

لقد تم الإثبات التجريبي للطبيعة الموجية للإلكترون بواسطة دافيسون وجيرمر عندما لاحظا تشتت الإلكترونات عن سطح النيكل.

- تشكل ذرات النيكل بلّورة بمسافات تباعد منتظمة، كما في محزوز الحيود.
- تظهر حزمة الإلكترونات المنعكسة نمطًا من التداخلات البنّاءة والهدّامة والناتجة عن تباعد ذرات النيكل كما في **الشكل 6-35**.



الشكل 6-35 بُنية تجربة دافيسون وجيرمر.

تعني الطبيعة المزدوجة للمادة أن للفوتونات خصائص جسيمية، كما أن للإلكترونات خصائص موجية. فالزخم الخطي للإلكترونات التي تسير بسرعة v هو mv. ومع أن كتلة الفوتونات هي صفر، إلا أن لها زخمًا يُعطى **بالمعادلة 6-9**.

9-6 الزخم الخطي للفوتون

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{c}$$

P	الزخم الخطي (كمية الحركة) (kg.m/s)
h	ثابت بلانك (6.63×10^{-34} J.s).
λ	الطول الموجي (m)
f	التردد (Hz)
c	سرعة الضوء (3×10^{8} m/s).

مثال 9

ما الطول الموجي لفوتون زخمه الخطي يساوي زخم إلكترون سرعته $v = 100$ m/s؟

المطلوب : $\lambda = ?$

المعطيات: سرعة الإلكترون $v = 100$ m/s ، كتلة الإلكترون $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg

العلاقات:

$$p = mv \qquad p = \frac{h}{\lambda}$$

الحل:

للفوتون $p = \frac{h}{\lambda}$

للإلكترون $p = mv$

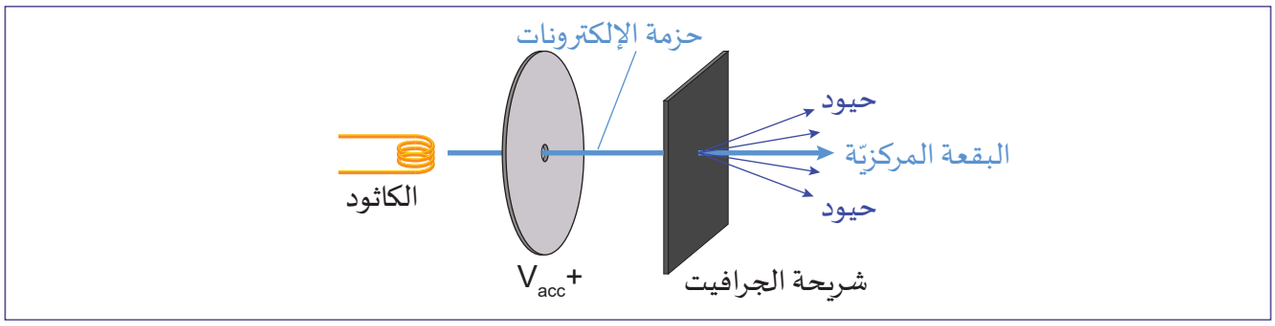
$$\frac{h}{\lambda} = mv \longrightarrow \lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{(9.1 \times 10^{-31})(100)}$$

$$= \boxed{7.29 \times 10^{-6}\ \text{m}}$$

أنبوب حيود الإلكترونات

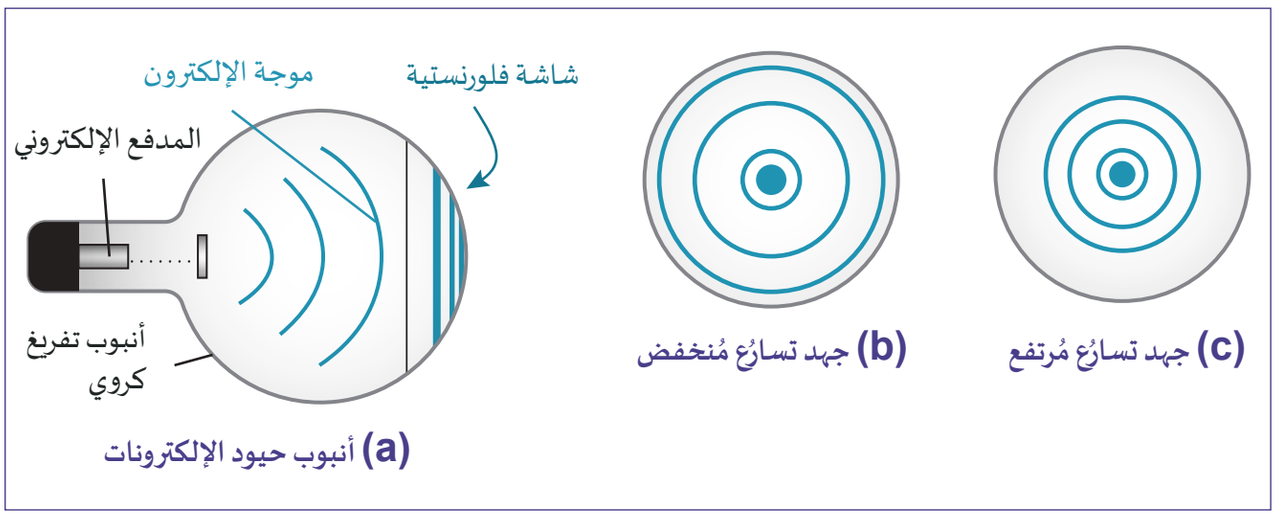
يمكن استخدام أنبوب حيود الإلكترونات لتوضيح أن الإلكترونات تُظهِر نمط حيود كالموجات.

- يُصدِر المدفع الإلكتروني إلكترونات من الكاثود تحمل طاقة يمكن تغييرها من خلال تغيير جهد التسارُع V_{acc} (**الشكل 6-36**).
- تمرّ حُزمة الإلكترونات عبر شريحة رقيقة من الجرافيت. فتقوم الفراغات الكائنة بين ذرّات الجرافيت بتشتيت الإلكترونات مُشكِّلةً نمط حيود.



الشكل 6-36 حيود حزمة الإلكترونات عند مرورها خلال شريحة جرافيت، يُعدّ دليلاً على الطبيعة الموجية للمادة..

- تصطدم الإلكترونات بسطح فلورسنتي مُقعّر، فينشأ نمط حيود.
- تُشكّل حُزمة الإلكترونات المارّة عبر الجرافيت بقعة مركزيّة. وتنتج الحلقات التي يكون مركزها تلك البقعة من التداخُل البنّاء والتداخُل الهدّام.



الشكل 6-37 (a) أنبوب حيود الإلكترونات، (b) نمط حيود بفرق جهد منخفض، (c) نمط حيود بفرق جهد مرتفع.

تؤدّي زيادة فرق جهد المدفع الإلكتروني إلى زيادة طاقة الإلكترونات، وإلى خفض طولها الموجي. يُوضّح **الشكل 6-37 b** نمط حيود بفرق جهد تسارُع أقلّ، بينما يُظهر **الشكل 6-37 c** نمطًا آخر بفرق جهد تسارُع أكبر.

الخصائص الكاينماتيكية (الحركيّة) للإلكترون

إحدى الخصائص الهامة للمدفع الإلكتروني هي استطاعته تغيير الطاقة الحركية والطول الموجي للإلكترون بسهولة. يجعل ذلك من حزمة الإلكترونات أداة فعالة لفحص التركيب الذري للمواد والبناء الهندسي للبلورات. تلخص **العلاقة 6-10** ثلاث علاقات كاينماتيكية (حركية) للإلكترونات.

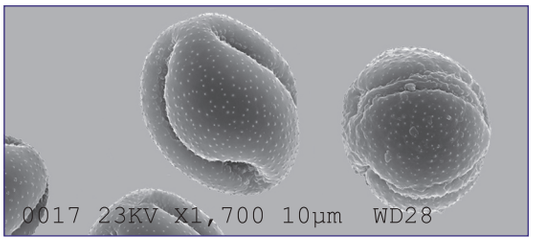
10-6 علاقات الطاقة الحركية للإلكترونات وسرعتها وطولها الموجي

$$E_k = eV \qquad v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m\,E_k}}$$

λ	الطول الموجي (m)
h	ثابت بلانك = 6.63×10^{-34} J.
E_k	الطاقة الحركية (J)
m	كتلة الإلكترون (9.1×10^{-31} kg).
v	السرعة (m/s).
V	فرق جهد التسريع (V).
e	الشحنة الأولية (1.6×10^{-19} C).

إن أصغر مقدار يمكن رؤيته بواسطة المجهر الضوئي يكون مساويًا تقريبًا لطول موجي واحد من الضوء المرئي. ولكن الطول الموجي للإلكترون أقلّ بكثير من الطول الموجي للضوء المرئي الذي له الطاقة نفسها، لذلك يمكن للمجهر الإلكتروني أن يزودنا بصورٍ لأجسامٍ صغيرة جدًا، مثل حبوب لقاح النباتات (**الشكل 6-38**).



الشكل 6-38 حبّة لقاح كما يرصدها مجهر إلكتروني.

مثال 10

يتطلب مجهر إلكتروني طولا موجيا مقداره 1 nm. ما مقدار طاقة الإلكترون وفرق جهد التسريع الذي يحتاجه المجهر لكي يعمل بشكل طبيعي؟

المطلوب $V = ?$ $E_k = ?$

المعُطيات: الطول الموجي للإلكترون 1 nm

العلاقات: $E_k = eV$ $\lambda = \dfrac{h}{\sqrt{2mE_k}}$

الحل: نحسب الطاقة أولاً، ثم فرق الجهد:

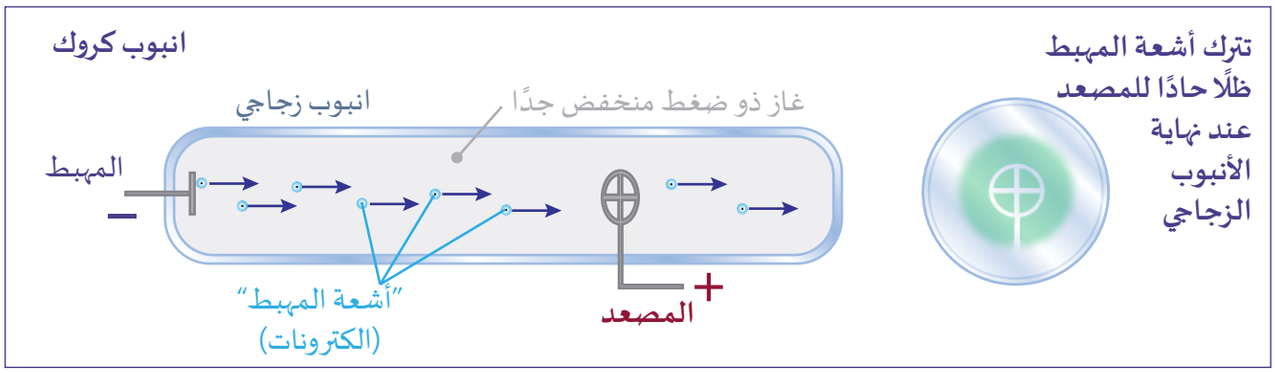
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}} \longrightarrow E_k = \frac{h^2}{2m\lambda^2} = \frac{(6.63 \times 10^{-34})^2}{2(9.1 \times 10^{-31})(1 \times 10^{-9})^2}$$

$$= \boxed{2.42 \times 10^{-19}\ \text{J}}$$

$$E_k = eV \longrightarrow V = \frac{E_k}{e} = \frac{2.42 \times 10^{-19}\ \text{J}}{1.6 \times 10^{-19}\ \text{C}} = \boxed{1.51\ \text{V}}$$

أشعة المهبط (الكاثود) واكتشاف الإلكترون

إكتُشِف في العام 1858 أن الجهد الكهربائي المطبق على أنبوب زجاجي مفرّغ ذي أقطاب فلزية يولّد أشعة غير مرئية يمكن أن تسبب توهجًا في بعض المواد. يبيّن **الشكل 6- 39** أنبوب كروك النموذجي.



الشكل 6-39 أنبوب أشعة مهبط بسيط.

سرعان ما اكتشف العلماء أن «أشعة المهبط» هذه يمكن أن تنحرف بواسطة المجال المغناطيسي. كما أن أشعة المهبط تنفذ خلال بعض المواد وليس جميعها. وتبين أن خصائص أشعة المهبط تبقى كما هي ولا تتغير بتغيّر الفلز المستخدم في المهبط.

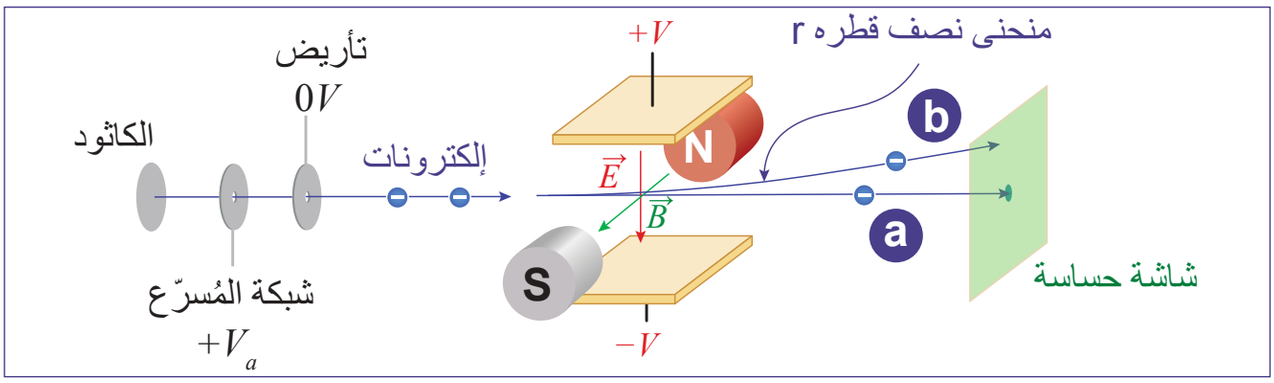
أجرى علماء مختلفون من 1857 إلى 1897 تجارب لتحليل أشعة المهبط. أثبتت تجربة ج.ج. طومسون أن أشعة المهبط تتكون من جسيمات سالبة الشحنة. جُمعت نتائج هذه التجارب في **الجدول 6-2**.

الجدول 6-2 ملخص التجارب التي أجراها العلماء في القرن التاسع عشر..

نتائج التجربة	هل هي خاصية موجية؟	هل هي خاصية جسيمية؟
تُسخّن أشعة المهبط الأجسام التي تصطدم بها.	نعم، تُسخّن الموجات الكهرومغناطيسية الأجسام التي تصادفها أيضًا.	نعم، تتحوّل الطاقة الحركية للجسيمات إلى طاقة حرارية عندما تتصادم.
تُدوّر أشعة المهبط العجلات الدوارة.	نعم، يمكن أن تدوّر الموجات الكهرومغناطيسية العجلات الدوارة إذا سخنتها أيضًا.	نعم، يمكن أن يتسبّب حفظ الزخم في الجسيمات في جعل العجلة تدور.
تنحرف أشعة المهبط بواسطة المجالات المغناطيسية.	لا، الموجات لا تنحرف	نعم، يمكن أن تنحرف الجسيمات ذات الشحنات الكهربائية بواسطة المجال المغناطيسي.
يمكن أن تمر أشعة المهبط من خلال الرقائق المعدنية.	نعم، يمكن أن تمر بعض الموجات الكهرومغناطيسية، مثل الأشعة السينية من خلال الرقائق المعدنية.	نعم، يعتمد ذلك على سرعة الجسيم وسماكة المعدن.

تجربة طومسون وحساب نسبة شحنة الالكترون لكتلته $\frac{e}{m}$

فرّغ ج. ج. طومسون في العام 1897 أكبر قدر ممكن من الغاز من أنبوبة أشعة المهبط، وأثبت أن الأشعة كانت في الواقع جسيمات ذات شحنة سالبة. وقد أطلق على هذه الجسيمات إسم "إلكترونات". واستطاع طومسون في تجاربه اللاحقة أن يستنتج نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته.



الشكل 6-40 قياس $\frac{e}{m}$: نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته .

قام طومسون بتغييرين في تجربته الموضحة في **الشكل 6-40**:

"المجالان الكهربائي والمغناطيسي في هذه التجربة متعامدان" عند ذلك تكون القوتان الكهربائية والمغناطيسية متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه."

$$F_m = qvB \qquad F_e = qE$$

عندما تكون $F_m = F_e$ و $qvB = qE \longrightarrow v = \frac{E}{B}$

"تمكن طومسون من حساب سرعة حزمة الإلكترونات بمعرفة شدة كل من المجالين الكهربائي والمغناطيسي. ولكن عند إيقاف تأثير المجال الكهربائي والإبقاء على المجال المغناطيسي فسوف ينحرف الإلكترون الواقع تحت تأثير مجال مغناطيسي في مسار دائري."

مسار دائري : $F = \frac{mv^2}{r}$ لذلك $qvB = \frac{mv^2}{r} \longrightarrow \frac{q}{m} = \frac{E}{rB^2}$

بالتعويض عن سرعة الإلكترون، استطاع طومسون حساب نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته ووجدها 10^{11} C/kg على الأقل، وهي أكبر بـ 1000 مرّة من نسبة شحنة أيون الهيدروجين إلى كتلته. كان ذلك دليلًا على أن كتلة الإلكترون أقل بكثير من كتلة الذرة ككل، وأن للذرات بنية داخلية محدّدة. وكان الاعتقاد قبل تجارب طومسون أن الذرة عبارة عن كرة من المادة ذات بنية داخلية معينة.

مثال 11

في تجربة طومسون إذا كانت شدة المجال الكهربائي تساوي (1.8×10^5 N/C)، وشدة المجال المغناطيسي تساوي (6×10^{-3} T)، فتحركت حزمة الإلكترونات دون انحراف. أحسب سرعة كل إلكترون في الحزمة.

المطلوب: $v = ?$

المعطيات: $E = 1.8 \times 10^5$ N/C, $B = 6 \times 10^{-3}$ T

العلاقات: $v = \dfrac{E}{B}$

الحل:

$$v = \frac{E}{B} = \frac{1.8 \times 10^5}{6 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^7 \text{ m/s}$$

مثال 12

أجريت تجربة مماثلة لما قام به طومسون، استخدمت فيها حزمة إلكترونات، فأدخلت مجالين؛ الكهربائي شدته (10.2×10^5 N/C) والمغناطيسي شدته (10^{-2} T)، فتحركت في خط مستقيم، وعند إيقاف المجال الكهربائي انحرفت الحزمة في مسار دائري نصف قطره (6 cm). أحسب نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته.

المطلوب: $\dfrac{e}{m} = ?$

المعطيات: $E = 10.2 \times 10^5$ N/C, $r = 6 \times 10^{-2}$ m , $B = 10^{-2}$ T

العلاقات: $\dfrac{e}{m} = \dfrac{E}{rB^2}$

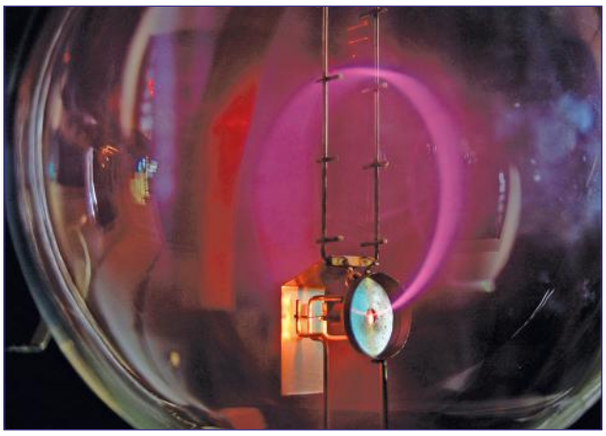
الحل:

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{rB^2} = \frac{10.2 \times 10^5}{(6 \times 10^{-2})(10^{-2})^2} = \frac{10.2 \times 10^5}{6 \times 10^{-6}}$$

$$\frac{e}{m} = 1.7 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$

قياس نسبة الشحنة إلى الكتلة في مختبر المدرسة

يمكننا اليوم قياس نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته باستخدام مجال ملفّين مغناطيسيين كما هو موضح في **الشكل 6-41**. يتم وضع أنبوب إلكترونات بين الملفين اللذين ينتجان بينهما مجالا مغناطيسيا منتظما ومعروف الشدة. تتسارع حزمة من الإلكترونات خلال فرق جهد معروف وتنحرف على مسار دائري. يتم قياس التيار في ملفي Helmholtz، وكذلك نصف قطر المسار الدائري، ما يسمح بحساب النسبة $\frac{e}{m}$.



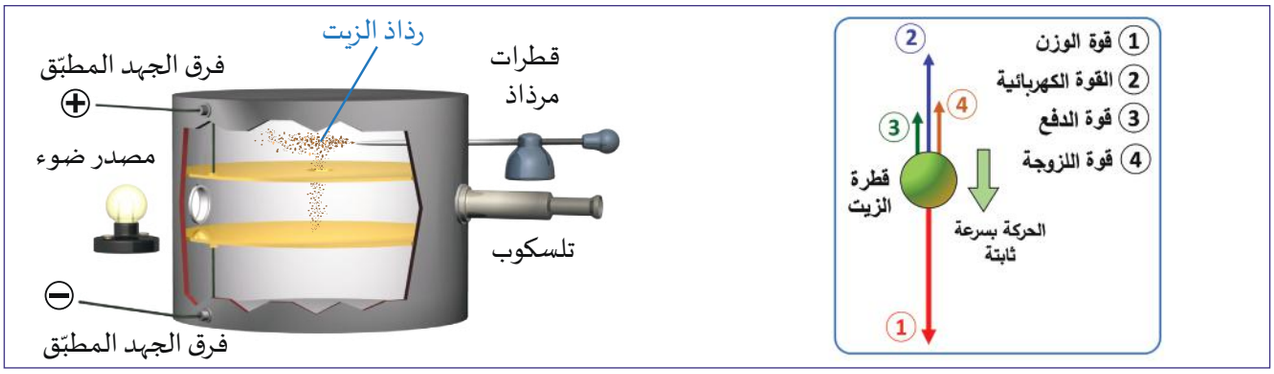
الشكل 6-41 جهاز لقياس نسبة شحنة الإلكترون إلى كتلته.

تجربة ميليكان وتكميم الشحنة

في كل المواقف التي تتطلب دراسة الذرة، سواء في الكيمياء أو الفيزياء، نجد أن الشحنة الكهربائية تكون مضاعفات صحيحة من كمية محددة. ينص مبدأ تكميم الشحنة على أن الشحنة الموجودة على أي جسم يمكن أن تكون فقط مضاعفات صحيحة لشحنة أولية e هي شحنة الإلكترون ومقدارها $1.6 \square 10^{-19}C$.

تم القيام بسلسلة من التجارب لقياس هذه الشحنة الأولية بواسطة روبرت ميليكان بين عامي 1908 و 1913. قام ميليكان بسلسلة من التجارب الدقيقة للغاية التي قادته إلى حساب شحنة الإلكترون، فوجدها $1.59 \square 10^{-19}C$، و بنسبة خطأ في حدود 0.6% من القيمة الحديثة.

سُمح في تجربة ميليكان لِرَذاذ قطرات الزيت الصغيرة جدًا بالسقوط بين لوحين معدنيين مشحونين كما في **الشكل 6-42**. يترك الاحتكاك بفوهة المرذاذ على كل قطرة شحنة ساكنة صغيرة. يُضبط المجال الكهربائي بين اللوحين إلى أن تَتّزن القطرة تحت تأثير وزنها مقابل القوة الكهربائية المؤثرة فيها.



الشكل 6-42 تجربة قطرة الزيت لميليكان.

$$F_e = F_w \Rightarrow qE = mg \quad , \quad E = \frac{\Delta V}{d}$$

حيث E شدة المجال الكهربائي، و ΔV فرق الجهد بين اللوحين و d المسافة الفاصلة بين اللوحين.

باستخدام التلسكوب، قام ميليكان بضبط فرق الجهد ليكون بالإمكان رؤية قطرة زيت واحدة فقط. تمكن ميليكان من خلال رفع الجهد وخفضه بعناية وقياس سرعة هبوط قطرة الزيت، من تحديد الشحنة على قطرة واحدة مقتربًا من القيمة الدقيقة للغاية. عند حركة قطرة الزيت المشحونة داخل المجال الكهربائي فإنها تتزن تحت تأثير عدّة قوى وتتحرك للأسفل بسرعة ثابتة، هذه القوى هي: القوة الكهربائية وقوة الاحتكاك مع الهواء (اللزوجة) وقوة الدفع داخل الهواء، ووزن القطرة. وبمعرفة العوامل المؤثرة في هذه القوى جميعها، تمكن ميليكان من حساب الشحنة.

وزن قطرة الزيت بدلالة الكثافة والحجم وتسارع الجاذبية الأرضية يُعطى بالعلاقة:

$$F_e = \rho \Delta V g = \frac{4\pi r^3}{3} \rho g$$

القوة الكهربائية المؤثرة في قطرة الزيت بدلالة شحنتها وفرق الجهد الكهربائي تُعطى بالعلاقة:

$$F_e = qE = \frac{ne\Delta V}{d}$$

عند الاتزان تتساوى القوة الكهربائية مع وزن القطرة (بإهمال اللزوجة وقوة الدفع):

$$F_W = F_e \rightarrow \frac{4\pi r^3 \rho g}{3} = \frac{ne\Delta V}{d} \rightarrow \Delta V = \frac{4\pi r^3 \rho g d}{3ne}$$

مثال 13

أجرى مجموعة طلبة تجربة مليكان، فاستخدموا صفيحتين مشحونتين، البعد بينهما 4 cm وفرق الجهد بينهما 390 V لكي تتزن قطرة زيت كتلتها تساوي 3.24×10^{-16} kg، احسب عدد الإلكترونات الفائضة التي تحملها قطرة الزيت.

المطلوب: $n = ?$

المعطيات: $\Delta V = 390 \text{ V}, \quad d = 4 \times 10^{-2} \text{ m}, \quad m = 3.24 \times 10^{-16} \text{ kg}$

العلاقات: $E = \dfrac{\Delta V}{d}, \quad qE = mg, \quad q = ne$

الحل:

$$E = \frac{\Delta V}{d} = \frac{390}{4 \times 10^{-2}} = 9.75 \times 10^{3} \text{ N/C}$$

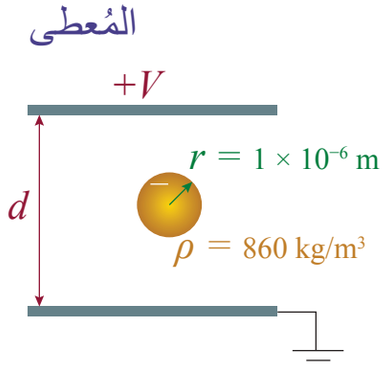
$$qE = mg$$

$$q = \frac{mg}{E} = \frac{3.24 \times 10^{-16} \times 9.8}{9.75 \times 10^{3}} = 3.25 \times 10^{-19} \text{ c}$$

$$n = \frac{q}{e} = \frac{3.25 \times 10^{-19}}{1.6 \times 10^{-19}} = 2.03 \approx 2$$

مثال 14

أجرى طالب تجربة ميليكان، فلاحظ أن قطرة الزيت التي نصف قُطرها 10^{-6} m تحمل عدداً فائضاً من الإلكترونات مقداره 5 إلكترونات. كم يجب أن يكون فرق الجهد الكهربائي المُطبّق بين طرفي لوحين تفصل بينهما مسافة 1 cm؟ علمًا أنّ كثافة الزيت هي 860 kg/m^3.



المطلوب: فرق الجهد الكهربائي ΔV

المعطيات: $N=5 \quad r = 1 \times 10^{-6} \text{m}, \rho = 860 \text{ kg/m}^3, d = 0.01 \text{ m}$

العلاقات: $\Delta V = \dfrac{4\pi r^3 \rho g d}{3ne}$

الحل:

$$\Delta V = \frac{4\pi}{3} \frac{(1 \times 10^{-6})^3 (860)(9.8)(0.01)}{(5)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})} = \boxed{441 \text{ V}}$$

تقويم الدرس 2-6

1. وفقًا لنموذج بور للذرّة، هل يجب أن يكون حجم ذرّة الهليوم أكبر من ذرّة الهيدروجين أم أصغر منها أم مساوٍ لها؟ ولماذا؟

2. تملك ذرّة الهيدروجين إلكترونًا في مستوى طاقتها $n = 1$، وتملك ذرّة أخرى إلكترونًا في مستوى طاقتها $n = 2$.
   a. أيُّهما يتطلب طاقة أكبر لنقل الإلكترون إلى مستوى $n = 3$؟ وضّح اختيارك.
   b. أيُّهما يتطلب طاقة أكبر لنقل الإلكترون إلى المستوى $n = \infty$ ؟ وضّح اختيارك.

3. ما خاصية الذرّات التي تنتج طيف انبعاث خطيًّا؟

4. تنتج ذرّة الهيدروجين ثلاث مجموعات متميزة من الخطوط الطيفية المعروفة باسم سلاسل: ليمان وبالمر وباشن.
   a. صف الاختلافات في الضوء المنبعث في هذه السلاسل الثلاث.
   b. اشرح كيف ترتبط هذه الاختلافات بمستوى انتقال الطاقة في الذرّة.

5. يغيّر إلكترون في ذرّة من مستوى طاقته؛ وفي هذه العملية يبعث فوتونًا بطول موجي 656.3 nm.
   a. هل يكون مستوى طاقة الإلكترون أعلى قبل أن يبعث الفوتون أم بعده؟
   b. ما الفرق في الطاقة بين مستويي الطاقة بالجول؟
   c. ما فرق الطاقة هذا بالإلكترون فولت؟

6. تمتصّ الذرّة فوتونًا من الضوء تردده 10^{14} Hz.
   a. ما طاقة هذا الفوتون؟
   b. ما الفرق في الطاقة بين مستوى طاقة الذرّة قبل أن تمتص الفوتون ومستوى طاقتها بعد أن امتصّت الفوتون؟
   c. إلى أي جزء من الطيف الكهرومغناطيسي ينتمي هذا الفوتون؟

7. في نموذج دي برولي لمدار الإلكترون يُعامل الإلكترون مثل الموجة. كيف يجيب ذلك عن السؤال الذي طرحه نموذج بور وهو: «لماذا تكون مدارات الإلكترون مكممة؟»

8. أجريت تجربة لحساب النسبة $\frac{e}{m}$ للإلكترون، فاستخدمت صفيحتان تبعدان عن بعضهما 1.2 cm وفرق الجهد بينهما 820V، وطبق مجال مغناطيسي شدته 2.4×10^{-3} T فانتقلت الإلكترونات دون انحراف. وعند إيقاف المجال الكهربائي انحرفت حزمة الإلكترونات في مسار دائري نصف قطره 7 cm. أحسب: سرعة الإلكترون، والنسبة $\frac{e}{m}$.

الدرس 3-6

الأشعة السينية وطيف الأشعة السينية

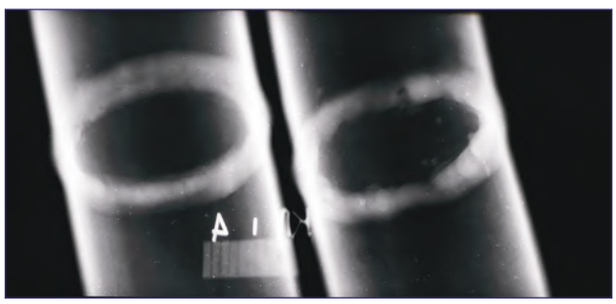
X-rays and the X-ray Spectrum

أصبحت الأشعة السينية تكنولوجيا طبية قياسية في التشخيص والعلاج. ومع ذلك، فإنَّ الأشعة السينية لا تُستخدَم في الصناعة الطبية فقط، بل إنَّ التصوير الإشعاعي الصناعي يؤدّي دورًا مهمًا في تصنيع منتجات عالية الجودة.

يُنتج التصوير الإشعاعي الصناعي صورًا للمنتجات باستخدام الأشعة السينية وأشعة جاما. ويمكن لهذه الصور الكشف عن الأضرار الصغيرة جدًا والتي لا يمكن رؤيتها بالعين المجردة. الفائدة الرئيسة من التصوير الإشعاعي هو أنه يمكن اختبار المنتج من دون إتلافه أو حتى استخدامه. وقد تكون المواد التي تُختبر في بعض الحالات صغيرة جدًا أو مختفية خلف أجسام أخرى.

يستخدم التصوير الإشعاعي الصناعي لاختبار:

- لحام المعادن
- السخّانات الحرارية
- أنابيب الغاز والنفط
- قطع غيار المَركَبات
- قطع غيار الطائرات



الشكل 6-43 صورة بالأشعة السينية للحام الأنابيب.

مخرجات التّعلُّم

P1212.4 يصف عملية إنتاج الأشعة السينية، ويوضّح طيفها و يناقش تطبيقها في الفيزياء الطبية.

المفردات

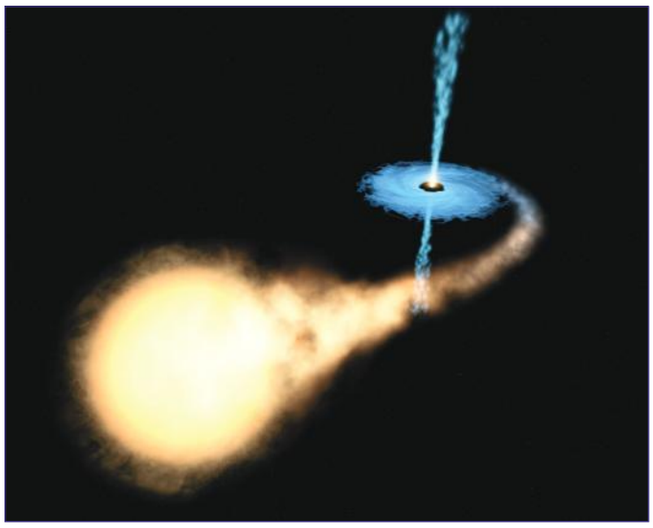
أشعة الفرملة السينية	Bremsstrahlung x-rays
الأشعة السينية المميّزة	Characteristic x-ray
العلاج الإشعاعي	Radiotherapy

نجوم تُصدر الأشعة السينية

أين تُوجد الأشعة السينية بشكل طبيعي؟
ما الآليات الطبيعية التي تُنتج الأشعة السينية؟

من الشائع ربط الأشعة السينية بالتصوير الطبي ، إلا أن الأشعة السينية ظاهرة طبيعية في علم الفلك أيضًا. فالغلاف الجوي للأرض يمتص الأشعة السينية. لم تكن التكنولوجيا متاحة حتى ستينيات القرن الماضي لمراقبة الأشعة السينية الفلكية والقيام بأبحاث حولها. بمجرد أن أصبح رصد الأشعة السينية ممكنًا، اكتشف العلماء العديد من النجوم التي تُطلِق الأشعة السينية. وقد أُطلِقت في سبعينيات القرن الماضي أقمارًا صناعية مخصصة للتصوير بالأشعة السينية. سمحت لنا هذه الأقمار الصناعية بمعرفة المزيد حول علم الفلك باستخدام تلك الأشعة.

معظم النجوم في مجرتنا هي ثنائيات الأشعة السينية. النجوم الثنائية شائعة، ويتكوّن كل منها من زوج من النجوم يدور كل منهما حول الآخر.



الشكل 6-44 ثنائي الأشعة السينية.

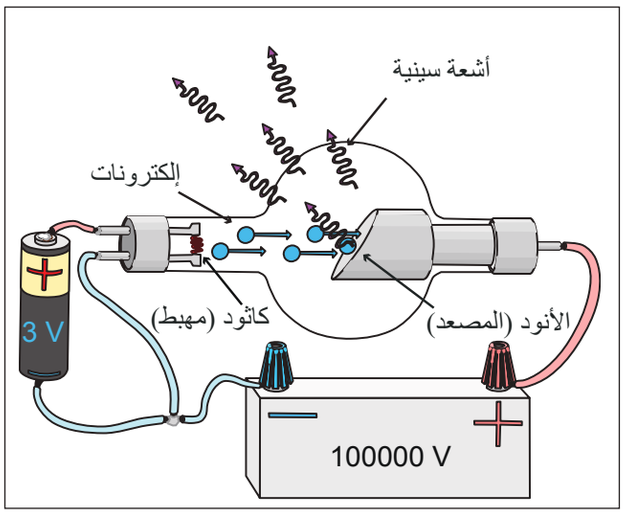
ثنائي الأشعة السينية هو نجم مزدوج يكون فيه أحد الزوجين ثقبًا أسود أو نجمًا نيوترونيا. وتكون الجاذبية قوية جدًا فتُنزع المادة من النجم المرافق الأكبر وتتسارع إلى الثقب الأسود أو النجم النيوتروني. يصبح التسارع كبيرًا إلى درجة تصبح فيها المادة الساقطة ساخنة تكفي لبعث أشعة سينية، تمامًا كسطح الشمس الذي تبلغ درجة حرارته 5500 K، والكافية لبعث الضوء المرئي (**الشكل 6-44**).

لا يمكن الكشف عن الأشعة السينية بواسطة التلسكوبات العادية والمقاييس الطيفية المتصلة بها. ابحث عن كيفية اكتشاف نجوم الأشعة السينية. ما نوع الأدوات التي استخدمها العلماء؟ كيف فسروا ما قاسوه على أنه نجم ثنائي؟

إنتاج الأشعة السينية

الأشعة السينية هي جزء من الطيف الكهرومغناطيسي، وهي ذات طول موجي بين 0.01 nm و 10 nm. تؤدّي الأشعة السينية دورًا مهمًا في تشخيص حالة المريض.

يُسرّع أنبوب الأشعة السينية المبين في **الشكل 6-45** حزمة من الإلكترونات تحت فرق جهد عالٍ جدًا. عندما تصطدم الإلكترونات بالأنود، تنبعث الأشعة السينية. كلما زاد فرق الجهد، كلما زادت طاقة الأشعة السينية الناتجة. الأشعة السينية "الضعيفة" تنتج من حزمة يتراوح جهدها بين 1 keV و 10 keV، بينما تستخدم الأشعة السينية "القوية" فرق جهد أكبر من 10 keV.



الشكل 6-45 أنبوب الأشعة السينية.

عندما تصطدم حزمة إلكترونية سريعة بقطب فلز ثقيل كالتنجستن أو الموليبدنم، يكون هناك نوعان من فوتونات الأشعة السينية الناتجة:

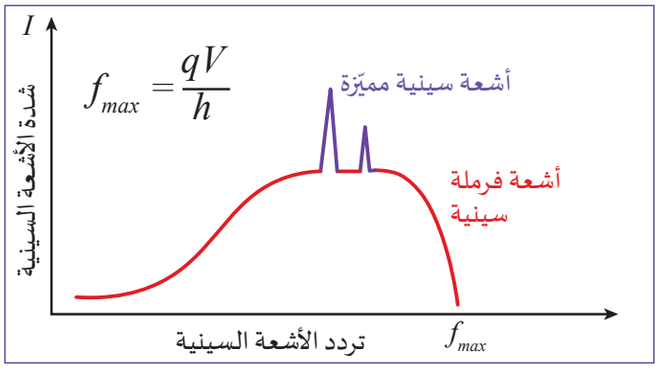
1. **أشعة الفرملة السينية Bremsstrahlung x-rays**، مفردة Bremsstrahlung تعني في اللغة الألمانية "اشعة الفرملة". تفقد الإلكترونات طاقتها إثر تباطئها نتيجة لتصادماتها المتعددة مع الأنوية الثقيلة. تتحول الطاقة المفقودة بعد كل تصادم إلى فوتون من الأشعة السينية. ولأن التصادمات تكون بمقادير مختلفة، فإن الطاقة المفقودة تنتج طيفا من الأشعة السينية يشتمل على نطاق واسع من الترددات.
2. **الأشعة السينية المميّزة Characteristic x-ray** عندما تمتص ذرة الهدف إلكترون مُتسارع ذو طاقة عالية، تتأين ذرة الهدف وتفقد إلكترونًا بشكل مؤقت. وعندما يسقط إلكترون آخر لملء المدار الداخلي الفارغ لهذه الذرّة، ينبعث فوتون من الأشعة السينية المميزة. العملية مماثلة لإنتاج خطوط الانبعاث في التحليل الطيفي إلا أن الإلكترونات الداخلية لها طاقة أعلى خاصة بالأشعة السينية. تعتمد شدة الأشعة السينية الناتجة على نوع الأنود المستخدم في أنبوبة الأشعة السينية.

كيف اكتُشِفَت الأشعة السينية؟

كان اكتشاف الأشعة السينية مصادفة: كان البروفيسور رونتجن يختبر إمكانية أن تمرّ أشعة المهبط في الزجاج. غطّى أنبوب المهبط بورق أسود سميك، فنفذ ضوء أخضر ساطع من الأنبوب وأنتج صورة على شاشة فلورسنتية. سُمّيت الأشعة "X" لأنها كانت غير معروفة. بعد إجراء بعض التجارب، لوحظ أن الأشعة السينية يمكن أن تمرّ في معظم الأجسام، ولكن ليس في العظام، ما يكوّن صورة ظلّ.

طيف الأشعة السينية

عندما تصطدم الإلكترونات المتسارعة بالقطب الموجب من أنبوب الأشعة السينية، يتم الحصول على طيف الأشعة السينية، كما هو مبيّن في **الشكل 6-46**. والذي يمثل منحنى الطيف المستمر (المتصل) لأشعة الفرملة السينية. وتمثّل القمم فوتونات طيف الأشعة السينية المميّزة.



الشكل 6-46 طيف الأشعة السينية.

يبيّن الطيف الموضّح النطاق الواسع للطاقة المنبعثة عندما تصطدم الإلكترونات بالقطب الموجب. يتم الحصول على الطاقة القصوى في طيف أشعة الفرملة السينية من الإلكترونات الساقطة التي تفقد كل طاقتها في تصادم واحد. ينتج ذلك فوتونات أشعة سينية ذات طاقة قصوى. وهذا يعني أن القيمة القصوى لطاقة الأشعة السينية التي يتم الحصول عليها تعتمد على فرق الجهد الذي يسبّب تسريع الإلكترونات الساقطة. يُعبّر عن هذه العلاقة **بالمعادلة 6-11**، والقيمة القصوى للطاقة يمكن قياسها بالجول أو الإلكترون فولت.

11-6	الطاقة القصوى للأشعة السينية	
	E_{max}	الطاقة القصوى (J أو eV)
	h	ثابت بلانك = 6.63×10^{-34} J s.
	f	التردد (Hz)
	q	شحنة الإلكترون = 1.6×10^{-19} C
	V	فرق جهد التسريع (V)

$$E_{max} = hf = qV$$

عندما يكون التردد عند حده الأقصى، يكون الطول الموجي عند حده الأدنى. يمكن استخدام العلاقة أعلاه لحساب أدنى قيمة للطول الموجي.

$$hf_{max} = qV \Rightarrow h\frac{c}{\lambda_{min}} = qV \Rightarrow \lambda_{min} = \frac{hc}{qV}$$

بما أن كل من h و c و q ثوابت، يمكن كتابة معادلة أدنى قيمة للطول الموجي بوحدة nm كما يلي:

$$\lambda_{min} = \frac{1240}{V}$$

تظهر هذه العلاقة بشكل واضح أن القيمة الدنيا للطول الموجي تعتمد على فرق جهد التسريع.

مثال 15

a. احسب الطاقة القصوى لفوتون الأشعة السينية الناتج عندما يكون أقصى فرق جهد التسريع لأنبوب الأشعة السينية 50 kV.

b. احسب أقل قيمة للطول الموجي الناتج.

المطلوب:

a. الطاقة القصوى E_{max}

b. أقل طول موجي λ_{min}

المعُطيات: فرق جهد التسريع: 50 kV

العلاقات:

a. $E_{max} = hf = qV$

b. $$\lambda_{min} = \frac{1240}{V}$$

الحل:

a. نحسب الطاقة القصوى:

$$E_{max} = (1.6 \square 10^{-19})(50{,}000) = 8 \square 10^{-15} \text{ J}$$

ونعلم أن: $1 \text{ eV} = 1.6 \square 10^{-19} \text{ J}$

$$E_{max} = \frac{1 \text{ eV}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J}} \times 8 \times 10^{-15} \text{ J} = \boxed{50{,}000 \text{ eV}}$$

b. لحساب أقل قيمة للطول الموجي:

$$\lambda_{min} = \frac{1240}{V} = \frac{1240}{50000} = \boxed{0.0248 \text{ nm}}$$

الاستخدامات الطبية للأشعة السينية

بالرغم من أن الأشعة السينية معروفة باستخداماتها الطبية في التشخيص على نطاق واسع، إلا أنها تُستخدم أيضًا في فحص الأمتعة واكتشاف الأعمال الفنية المزيفة والشروخ والشقوق في الطائرات. ومع ذلك، فإنّنا سنركز الاهتمام في هذا الدرس على بعض الاستخدامات الطبية.

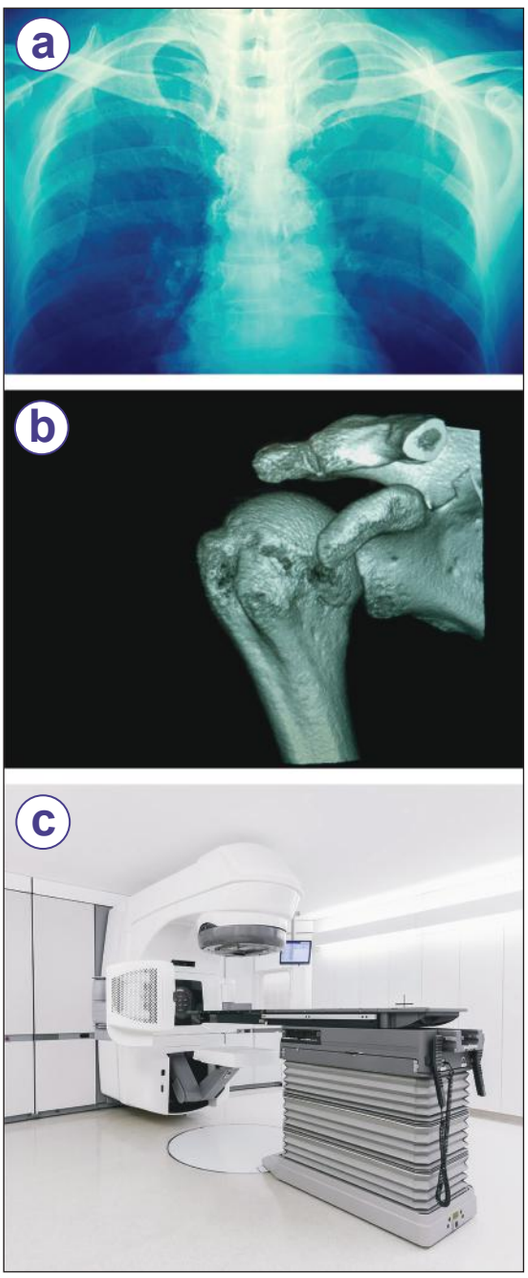
أولا : التشخيص

صور الأشعة السينية

تُستخدم صور الأشعة السينية ثنائية الأبعاد لتشخيص كسور العظام. ولأنّ الأشعة السينية تملك طاقات عالية، فإنَّ بإمكانها المرور بسهولة في أنسجة الجسم. ومع ذلك، فإن أطوال موجات معينة من الأشعة السينية تُمتصُّ بشدة بواسطة الكالسيوم في العظام. وهذا يسبّب ظلًّا (لونًا أبيض) في صورة الأشعة السينية. يمكن أن تمر الأشعة السينية في شروخ أو شقوق صغيرة جدًا. هذه الخاصّية تُساعد في الكشف عن كسور العظام. يظهر (**الشكل 6-47a**) صورة أشعة سينية.

ماسحات التصوير المقطعي المحوري CAT scans

ماسح التصوير المقطعي المحوري (CAT) يستخدم الأشعة السينية لإنتاج صورة ثلاثية الأبعاد، حيث يرسل ماسح CAT الأشعة السينية خلال جسم المريض وتلتقط أجهزة الكشف الصورة من الجهة الأخرى. ثم يدور الماسح ويكرّر العملية منتجًا صورة ثلاثية الأبعاد (**الشكل 6-47b**). قد يتحرك الماسح الضوئي إلى أجزاء مختلفة من الجسم لالتقاط صور متعدّدة.



الشكل 6-47 (a) صورة بالأشعة السينية ثنائية الأبعاد، (b) مسح CAT للكتف، (c) مسرّع خطي يستخدم في العلاج الإشعاعي

ثانيا: العلاج الإشعاعي

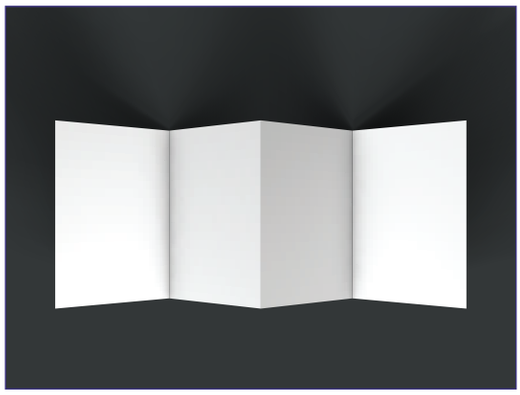
يُستخدم في **العلاج الإشعاعي Radiotherapy** أشعة سينية عالية الطاقة لقتل الخلايا السرطانية (**الشكل 6-47c**)، حيث تُوجّه حزم متعدّدة من الأشعة السينية من عدة مواقع مختلفة نحو منطقة الخلايا السرطانية. يؤثر الإشعاع في الحمض النووي DNA داخل الخلايا ما يجعلها تتوقّف عن النمو. وبالرغم من تأثر الخلايا السليمة المجاورة أيضًا، إلا أنها تتعافى بسهولة.

نشاط 6-3 شرح استخدام الأشعة السينية

سؤال الاستقصاء	أنشئ كتيّبًا تشرح فيه الاستخدامات الطبية المختلفة للأشعة السينية.
الموادّ المطلوبة	المواد البحثية مثل الكتب والإنترنت، ورق 4A، أقلام ملونة.

خطوات

1. ابحث في مجموعات ثنائية الاستخدامات الطبية المختلفة للأشعة السينية.
2. ما التطبيقات الطبية التي تستخدم فيها الأشعة السينية ذات الطاقة المنخفضة؟ وما التطبيقات التي تستخدم فيها الأشعة السينية ذات الطاقة العالية؟
3. أعِدَّ قائمة بإيجابيات كل تطبيق طبي وسلبياته.
4. ما احتياطات السلامة التي تُتخذ لإبقاء الطاقم الطبي والمرضى في مأمن من الإشعاع الزائد.



الشكل 6-48 كتيب من عدة أوراق مطوية

5. أُنشئ كتيّبا طبيًّا باستخدام المعلومات التي جمعتها، لتعريف المرضى بالأنواع المختلفة من الأشعة السينية المستخدمة في التشخيص والعلاج.
6. لإعداد الكتيّب المطوي، اثنِ ورقة A4 لتصبح على شكل 4 أجزاء، كما هو مبيّن في **الشكل 6-48**.
7. يجب أن يشعر القارئ عند اطلاعه على الكتيب بالارتياح لإجراءات السلامة.
8. ناقش أهمية استخدام الأشعة السينية في التشخيص والعلاج.
9. اذكر المخاطر التي ينطوي عليها استخدام الأشعة السينية، ثم وضح الطرائق التي يعتمدها الفريق الطبي لتجنّب المخاطر التي تنطوي عليها تلك الأشعة.

الأسئلة

a. ما الطرائق الأخرى التي يمكن استخدامها للكشف عن كسور العظام؟
b. ما بدائل العلاج الإشعاعي؟ ناقش إيجابيات كل طريقة وسلبياتها.
c. اذكر استخدامًا واحدًا للأشعة السينية في المجال الطبي لم يرد ذكره في الكتاب.
d. اذكر استخدامًا واحدًا للأشعة السينية في الصناعة.

تقويم الدرس 3-6

1. تتباطأ الإلكترونات ذات السرعة العالية في أنبوب الأشعة السينية لتصطدم بجسمٍ ما. ماذا يُسمّى هذا الجسم؟
   a. الفتيل
   b. المهبط
   c. المصعد
   d. الهدف

2. علام تعتمد سرعة الإلكترونات التي تصطدم بالهدف في أنبوب الأشعة السينية؟
   a. العدد الذري لمادة المهبط.
   b. العدد الذري لمادة الفتيل.
   c. العدد الذري لمادة المصعد.
   d. فرق الجهد بين المصعد والمهبط.

3. فرق الجهد عبر أنبوب الأشعة السينية يساوي 40 kV. ما أقصر طول موجي للأشعة السينية الناتجة؟
   a. 0.024 nm
   b. 0.031 nm
   c. 0.054 nm
   d. 0.097 nm

4. ما الفرق بين أشعة الفرملة السينية و الأشعة السينية المميّزة؟

5. ما الفرق بين التصوير بالأشعة السينية وماسح التصوير المقطعي المحوري؟

6. ما المصادر الطبيعية للأشعة السينية؟

7. ما النظرية التي يعمل العلاج الإشعاعي وفقها؟

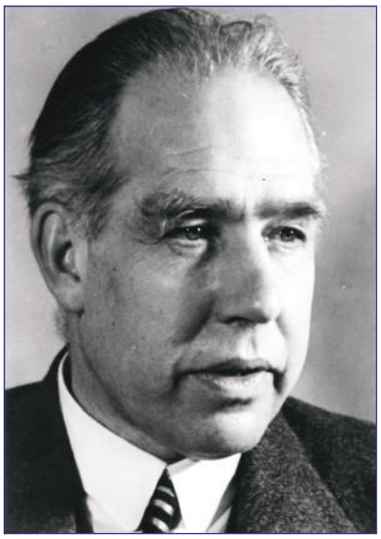
8. ينتج أنبوب الأشعة السينية أشعة بأقصر طول موجي مقداره 0.0103 nm، احسب فرق جهد التسارع في أنبوب الأشعة السينية.

9. وضح ما الذي تعنيه شدّة الأشعة السينية الصادرة عن المصعد. وهل تعتمد هذه الشدة على عدد الإلكترونات الساقطة أم على طاقة الإلكترون؟

10. هل هناك اختلاف في نوع الأشعة السينية المستخدمة في تشخيص المريض وعلاجه؟

ضوء على العلماء

نيلز بور: 1885-1962



الشكل 6-49 نيلز بور كما يبدو على طابع بريدي.

كان نيلز بور فيزيائيًا هولنديًا فاز بجائزة نوبل في العام 1922 تقديرًا لأبحاثه في بنية الذرة. كان لبور الفضل الأساس في التأسيس لما نفهمه عن الذرات ونظرية الكم اليوم. ولد نيلز بور في كوبنهاجن، الدنمارك في أكتوبر 1885. كان والد بور أستاذًا مشهورًا في علم وظائف الأعضاء.

على الرغم من أن عائلة بور أعطت الأولوية للتعليم، إلا أنها كانت متحمّسة لكرة القدم. لعب بور وشقيقه الأصغر مع الفريق المحلي في أيام الشباب. في عام 1903، التحق بور بجامعة كوبنهاجن للحصول على درجة البكالوريوس في الفيزياء. ودرس أيضًا علم الفلك والرياضيات. أثناء دراسته في الجامعة، شارك بور في مسابقة للبحث في طريقة لقياس التوتّر السطحي للسوائل اقترحها اللورد رايلي في العام 1879. صنع بور الأواني الزجاجية الخاصة به للتجربة، وفاز بالجائزة الأولى. تم نشر مقالته أيضًا في المعاملات الفلسفية للمجتمع الملكي. في العام 1910، حصل بور على درجة الماجستير في النظرية الإلكترونية للمعادن، ثم توسَّع في أطروحته وقدمها لنيل درجة الدكتوراه في الفلسفة في أبريل 1911. في سبتمبر 1911، سافر بور إلى إنجلترا للقيام بالمزيد من العمل على بنية الذرات والجزيئات. درس أشعة المهبط وشارك في محاضرات حول الكهرومغناطيسية. التقى بعلماء فيزيائيين مشهورين مثل جي جي طومسون، ارنيست رذرفورد، جورج دي هيفسي و تشارلز جالتون داروين. بدأ بور بعد ذلك في تدريس طلاب الطب وأنشأ نموذج بور للذرة. افترض أيضًا أن الإلكترونات يمكنها القفز من مدار طاقة أعلى إلى مدار منخفض وتنبعث منها طاقة. خلال الحرب العالمية الثانية، انتقل بور إلى السويد، ثم أمضى بعض الوقت في إنجلترا وأمريكا، حيث عمل في مشروع الطاقة الذرية. فيما بعد أمضى وقته في الترويج للتطبيقات السلمية للفيزياء الذرية. حصل على أول جائزة "الذرات للسلام" في العام 1957.

الوحدة 6

مراجعة الوحدة

الدرس 6-1: الطبيعة المزدوجة للضوء

- كانت دراسة **الأجسام السوداء** هي التي دفعت ماكس بلانك إلى أن يلاحظ أن كمية الطاقة التي يتم امتصاصها أو إطلاقها تكون مكممة.
- عندما ينبعث الإشعاع من جسم ساخن، يُعرف **بإشعاع الجسم الأسود**.
- توقعت الفيزياء الكلاسيكية أن طيف انبعاث الجسم الأسود يعطي طاقة لا نهائية عند الأطوال الموجية القصيرة، وعُرف هذا باسم **كارثة الأشعة فوق البنفسجية**.
- **ثابت بلانك** قيمته $6.63 \times 10^{-34}\ J\ s$ وهو ثابت التناسب الذي يصف العلاقة بين الطاقة المنبعثة من الموجة وتردّدها.
- يتكون الإشعاع الكهرومغناطيسي من **فوتونات** تسير بسرعة ثابتة.
- أدّى **التأثير الكهروضوئي** إلى فكرة تؤكد أن الضوء ليس مجرد موجة ولكنه يتكون من فوتونات.
- طاقة الفوتون هي مجموع الطاقة الحركية القصوى للإلكترون و**دالة الشغل**.
- يمكن حساب دالّة الشغل إذا كان **تردّد عتبة** الإلكترونات معروفًا.

الدرس 6-2: مستويات الطاقة والأطياف الذرية

- يصف نموذج بور الذرة بأنها تحتوي على نواة كثيفة مع إلكترونات تدور في مدار. طاقة الإلكترونات في هذه المدارات تكون **مكممة**.
- تغيّر الذرات طاقتها عندما تتحرّك الإلكترونات إلى أعلى أو إلى أسفل بين مستويات الطاقة. إذا كان للذرة أقلّ طاقة ممكنة، فهي في **حالة أرضية**، وإلا فإنها تكون في **حالة الإثارة**.
- يعطي المنشور **طيفًا مستمرًا** للضوء الأبيض، و**طيفًا خطّيًا** عند انتقال الإلكترونات بين مستويات الذرة الواحدة.
- يستخدم **المطياف** لإنشاء طيف لخطوط الانبعاث، حيث تمثّل **الخطوط الطيفية** الأطوال الموجية المنبعثة أو الممتصة.

الدرس 6-3: الأشعة السينيّة وأطياف الأشعة السينيّة

- ينتج أنبوب الأشعة السينيّة نوعين من الفوتونات، **أشعة الفرملة السينية** و**الأشعة السينيّة المميّزة**.
- يستخدم **العلاج الإشعاعي** أشعة سينيّة لعلاج السرطان.

تقويم الوحدة

اختيار من متعدد

1. وصف نموذج نيلز بور الذرة بأنها ذات "مواضع" ثابتة (ممثلة بمجموعة من الأرقام والحروف) لا يمكن أن يحتوي كل منها إلا على إلكترون واحد. ماذا تُسمّى هذه "المواضع"؟
   a. الحالات الكمية
   b. المدارات الكمية
   c. أيونات الكمّ
   d. المعادلات الكمية

2. ما طاقة الفوتون الذي يكون تردّده $6 \square 10^{14}\text{Hz}$؟
   a. $4.0 \square 10^{-19}\text{ J}$
   b. $5.0 \square 10^{-7}\text{ J}$
   c. $1.8 \square 10^{23}\text{ J}$
   d. $5.4 \square 10^{31}\text{ J}$

3. أيٌّ من الأدوات الآتية لا تعمل كمقياس طيف؟
   a. منشور زجاجي
   b. أنبوب تفريغ الغاز
   c. محزوز حيود ناقل
   d. مطياف بصري محمول باليد

4. ما الظاهرة التي تتطلّب تكميم الضوء لتفسيرها؟
   a. الإشعاع الكهرومغناطيسي
   b. تشتّت رذرفورد
   c. التأثير الكهروضوئي
   d. اضمحلال ألفا

5. تمتلك ذرةٌ طاقةً مقدارها 16 eV- في حالتها الأرضية، وتكون أول حالة مثارة لها عند 4 eV-. قذفت الذرة وهي في حالتها الارضية بفوتونات طاقتها 6 eV. ماذا سيحدث للذرة؟
   a. لن يحدث شيء لأن طاقة الفوتونات لا تكفي لذلك.
   b. يمتصّ إلكترون الذرة فوتونًا واحدًا وتنتقل الذرة إلى الحالة المثارة الأولى.
   c. يمتصّ إلكترون الذرة فوتونين وتنتقل الذرة إلى الحالة المثارة الأولى.
   d. يمتصّ إلكترون الذرة فوتونًا واحدًا وتعيد الذرة إصدار فوتون بالطاقة نفسها على الفور.

6. ينتقل إلكترون ذرة الهيدروجين من مستوى الطاقة $n = 1$ إلى المستوى $n = 2$. ما الذي يحدث للذرة؟

a. تُصدر الذرة فوتونًا له طاقة تساوي طاقة المستوى $n = 2$.

b. تمتص الذرة فوتونًا له طاقة تساوي طاقة المستوى $n = 1$.

c. تُصدر الذرة فوتونًا له طاقة تساوي الفرق بين مستويَي الطاقة.

d. تمتص الذرة فوتونًا له طاقة تساوي الفرق بين مستويَي الطاقة.

7. يضيء أحد الباحثين مصباحًا كهربائيًا متوهّجًا وأنبوب تفريغ غاز الهيدروجين، ويُمرّر ضوء كل منهما من خلال منشور. لوحظ المزيد من الألوان من المصباح المتوهج مقارنة بغاز الهيدروجين. لماذا؟

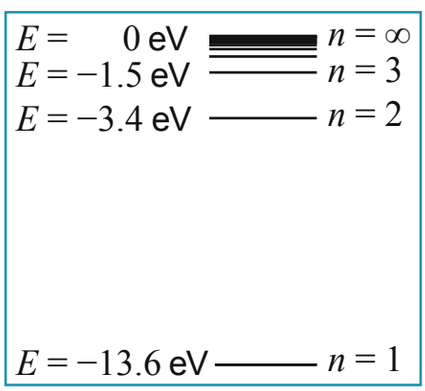
a. المصباح المتوهّج أكثر سخونة.

b. الغاز في المصباح المتوهّج متخلخل.

c. غاز الهيدروجين أكثر سخونة.

d. يمكن فقط إجراء انتقالات ذرية معيّنة بواسطة غاز الهيدروجين.

8. في مخطّط مستوى الطاقة المجاور، ما مقدار الطاقة التي تصدرها الذرة على شكل فوتون إذا سقط إلكترونها من مستوى الطاقة $n = 3$ إلى $n = 1$؟



a. -1.5 eV

b. -1.9 eV

c. -12.1 eV

d. -13.6 eV

9. أيٌّ ممّا يأتي يُعدّ كيانًا ماديًا غير مكمم؟

a. شحنة كهربائية على أيون.

b. طاقة الإلكترون.

c. كمية حركة الزاوي للإلكترون.

d. تردّد الموجة.

الدرس 6-1: النظرية الكمية والطبيعة المزدوجة للضوء

10. صف التأثير الكهروضوئي ومدى ارتباطه بالطبيعة المزدوجة للضوء.

11. كيف يرتبط تردّد اهتزاز الموجة الكهرومغناطيسية بطاقتها؟

12. احسب طاقة فوتون طوله الموجي 500 nm.

13. بناءً على التأثير الكهروضوئي رأى أحد الطلاب أن الضوء هو عبارة عن جسيم. اختبر طالب ثانٍ فرضية الطالب الأول من خلال إجراء تجربة الشق المزدوج، والتي أظهرت أن الضوء يتداخل كموجة. لذلك فقد رأى هذا الطالب أن الضوء هوعبارة عن موجة. من خلال تقويمك للتفسيرين العلميين والأدلة، أيّهما كان على حق؟

14. ما العدد التقريبي لفوتونات ضوء الأشعة تحت الحمراء ($\lambda = 6\ \mu m$) في 1eV من الطاقة؟

15.* واحد إلكترون فولت أو eV هو طاقة تساوي $1.6 \times 10^{-19} J$. يستخدم كيلو إلكترون فولت في الغالب (keV) للتعبير عن طاقة الفوتونات في منطقة معينة من الطيف الكهرومغناطيسي. باستخدام مخطط الطيف الكهرومغناطيسي، حدّد نوع الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي يكون مقدار طاقته في حدود 1 ke V.

16.* تبلغ دالّة شغل الكروميوم $7.2 \times 10^{-19}\ J$. ما تردد عتبة هذه المادة؟

17.* يطلق معدن الإلكترونات فقط بالتأثير الكهروضوئي عندما يسقط عليه ضوء بطول موجي 286 nm أو أقل. ما دالّة شغل الفلز؟

18.* توصف بعض أنواع الإشعاع الكهرومغناطيسي في الغالب باستخدام وحدات الطاقة، مثل الإلكترون فولت.

a. ما تردّد الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي تبلغ طاقته 2.0 keV؟

b. ما هذا النوع من الإشعاع الكهرومغناطيسي؟

19.** كم يبلغ عدد فوتونات الضوء البرتقالي ($\lambda = 600\ nm$) المطلوبة لإنتاج 1 J من الطاقة؟

الدرس 2-6: مستويات الطاقة والاطياف الذرية

20. كيف يمكن استخدام أطياف خطوط الانبعاث لتمييز العناصر المختلفة؟

21. ما الفرق بين الحالة الأرضية والحالة المثارة للذرة؟

22. كيف تتحرر الطاقة عندما ينتقل الإلكترون من مستوى طاقة أعلى إلى مستوى طاقة أقل؟

23. لماذا كان العلماء يتجادلون حول طبيعة أشعة المهبط (الكاثود)؟

24. كيف استطاع جي جي طومسون أن يستنتج أن شحنة أشعة الكاثود سالبة؟ لماذا لم يتوصل العلماء الآخرون قبل طومسون إلى النتيجة نفسها؟

25. إذا كان الإلكترون في ذرة الهيدروجين في مستوى الطاقة $n = 3$، أحسب التردد والطول الموجي لكل فوتون ممكن أن تُصدره الذرة في هذه الحالة.

26. في ذرة الهيدروجين، أي انتقال يصدر فوتونًا ضوئيًا بتردد أعلى، $n = 3$ إلى $n = 2$ أو $n = 4$ إلى $n = 2$؟

27.* طاقة الحالة الأرضية لذرة الهيدروجين تكون -13.6 eV. ما الطول الموجي للضوء (nm) المطلوب لتأيُّن ذرة الهيدروجين، أي إزالة الإلكترون من الحالة الأرضية إلى $n = \infty$؟

28. افترض ثلاثة مستويات مختلفة من الطاقة لذرة معينة: $E_1 = -10$ eV، $E_2 = -3$ eV، و $E_3 = -1$ eV. ضع قائمة بجميع الطاقات المختلفة الممكنة لانتقالات الإلكترون بين مستويات الطاقة الثلاثة هذه. ما هي انتقالات مستوى الطاقة الأخرى الموجودة، إذا قمت أيضًا بتضمين التحولات مع مستوى التأيّن $E_\infty = 0$ ؟

29.* تتأيّن ذرة الهيدروجين عندما يُمتَصُّ إلكترونها وهي في الحالة الأرضية عند -13.6 eV طاقةَ 15.0 eV. ما الطاقة الحركية للإلكترون المنبعث من الذرة؟

30.* طاقة الحالة $n = 2$ من ذرة الهيدروجين هي -3.4 eV. ما الطول الموجي للضوء (nm) المطلوب لتأيُّن ذرة الهيدروجين اذا كانت عند مستوى الطاقة $n = 2$ ؟

31.* تسخن أشعة الكاثود الجسم الذي تسقط عليه.

a. اشرح كيف تدعم هذه الملاحظة الرأي الذي يؤكّد أن أشعة الكاثود هي موجات.

b. اشرح كيف تدعم هذه الملاحظة الرأي الذي يؤكّد أن أشعة الكاثود تتكون من جسيمات.

32. أشعة الكاثود تنحرف تحت تأثير مجال مغناطيسي. فهل تثبت هذه الملاحظة أن أشعة الكاثود تتكون من جسيمات أو موجات؟ اشرح إجابتك.

33. الطول الموجي للضوء الأخضر $\lambda = 500\ nm\ (5.0 \times 10^{-7} m)$ في الفراغ.

a. ما طاقة فوتون واحد من الضوء الأخضر؟ عبّر عن ذلك بوحدة الجول ثم بالإلكترون فولت.

b. ما زخم الإلكترون الذي له الطول الموجي نفسه لفوتون الضوء الأخضر؟

c. اقسم إجابتك في الجزء (b) على كتلة الإلكترون $(m_e = 9.1 \times 10^{-31} kg)$. ماذا تمثل هذه النسبة؟

d. قارن إجابتك في الجزء (c) بسرعة الضوء في الفراغ $(c = 3 \times 10^{8} m/s)$

الدرس 6-3: الأشعة السينيّة وطيف الأشعة السينيّة

34. ما معنى رمز "X" في الأشعة السينيّة؟

35. ما الفرق بين أنبوب أشعة X وأنبوب أشعة الكاثود؟

36. يوضع أنبوب أشعة سينيّة تحت فرق جهد 50 kV.

a. احسب أقصر طول موجي لإشعاع الأشعة السينيّة الذي يمكن أن يتولّد في هذا الأنبوب.

b. ما طاقة الفوتون للأشعة السينيّة؟

c. صف العلاقة بين طاقة الفوتون والجهد المطبّق على أنبوب الأشعة السينيّة.

37. يستخدم أنبوب أشعة سينيّة تحت فرق جهد 100 kV.

a. احسب الطاقة القصوى لفوتون الأشعة السينيّة الذي يتم إنتاجه.

b. احسب طوله الموجي.

مسألة للبحث

يوصى بإبلاغ طبيبك بكل صور الأشعة السينيّة التي قد تكون أخذتها قبل الحصول على صور جديدة. لماذا؟ ما مقدار الإشعاع المقبول من الأشعة السينيّة في أثناء التصوير؟

الشكر والتقدير

جميع الرسوم الفنية الواردة في هذا العمل صمَّمتها شركة تطوير العلوم والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات (STEM) في الولايات المتحدة الأميركية. وهي وحدها تملك الحق القانوني لإجازة استخدام تلك الرسوم.

يشكر المؤلفون والناشرون المصادر الآتية على السماح لهم باستخدام ملكياتهم الفكرية كما أنهم ممتنون لهم لموافقتهم على نشر الصور.

Illustration: Muhammad Farouk/Shutterstock; Photo: DnD-Production/Shutterstock; 3D image: FXartist/Shutterstock; Illustration: Alexander Sergeevich/Shutterstock; Stamp art: spatuletail/Shutterstock; Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design Illustration: Designua/Shutterstock; Photo: Rabbitmindphoto/Shutterstcock; Illustration: Andrey Suslov/Shutterstock; Illustration: zffoto/Shutterstock; Photo: Ken Stocker/Shutterstock; Photo: Kobkit Chamchod/ Shutterstock 1218821710; Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design Photo: Nobuhiro Asada/Shutterstock; Photo: AjayTvm/Shutterstock; 3D Image: ktsdesign/Shutterstock; Photo: Abdelrahman Hassanein/Shutterstock; 3D image: KateStudio/Shutterstock; Photo illustration: adike/Shutterstock; 3D image: Giovanni Cancemi/Shutterstock; 3D Illustration: Axel_Kock/Shutterstock; Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design 3D Illustration: Image Craft/Shutterstock; Photo: ThePowerPlant/Shutterstock; Photo: pogonici/Shutterstock; Photo Ton Photographer 7824/Shutterstock; Illustration: elenabsl/Shutterstock; Photo: David Evison/Shutterstock; Photo: Augustine Bin Jumat/ Shutterstock; Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design Illustration: Muhammad Farouk/Shutterstock 1800616687, DnD-Production/Shutterstock 278922299, 3D image: VFXartist/Shutterstock 1483410965, illustration: Alexander Sergeevich/Shutterstock 1230374893, Stamp art: spatuletail/Shutterstock 1812900445, Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design, Illustration: Designua/Shutterstock 1472540423, photo: Rabbitmindphoto/ Shutterstcok 1487654072, Illustration: Andrey Suslov/Shutterstock 589410938, Illustration: zffoto/Shutterstock 389695105, Photo: Ken Stocker/Shutterstock 1082226821, Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design , Photo: Nobuhiro Asada/Shutterstock, 144455530, Photo: AjayTvm/Shutterstock 757231510, 3D Image: ktsdesign/ Shutterstock 430949605, Photo: Abdelrahman Hassanein/Shutterstock 1230989149, 3D image: KateStudio/ Shutterstock 1159868263, Photo illustration: adike/Shutterstock 1036533352, 3D image: Giovanni Cancemi/ Shutterstock 76423743, 3D Illustration: Axel_Kock/Shutterstock 1625661736, Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design, 3D Illustration: Image Craft/Shutterstock 1466789552, ThePowerPlant/Shutterstock 1652355403, Photo: pogonici/Shutterstock 262939175, Photo Ton Photographer 7824/Shutterstock 1074125777, Illustration: elenabsl/Shutterstock 1567621081, Photo: David Evison/Shutterstock 77061922, Photo: Augustine Bin Jumat/ Shutterstock71913914, Design: unit and lesson spreads: Jane Holland Design

Janaka Dharmasena / Shutterstock, Nasky/ Shutterstock, adike/ Shutterstock, Richard Peterson/ Shutterstock, stihii/ Shutterstock, NoPainNoGain/ Shutterstock, Teguh Mujiono/ Shutterstock, Improvisor/ Shutterstock, Jose Luis Calvo/ Shutterstock, Rattiya Thongdumhyu/ Shutterstock, Peter Hermes Furian/ Shutterstock, Sebastian Kaulitzki/ Shutterstock, VectorMine/ Shutterstock, bsd/ Shutterstock, Blamb/ Shutterstock, MikeMartin / Shutterstock, Photographee.eu/ Shutterstock, Jason Boyce/ Shutterstock, Maridav, Eugene Onischenko/ Shutterstock, CI Photos/ Shutterstock, Sergey Nivens, Vasyl Shulga/ Shutterstock, Sea Wave, Tanya Sid/ Shutterstock, belushi, / Shutterstock,Birger Olovson, Dionisvera/ Shutterstock

1.28 sportpoint / Shutterstock,ChrisVanLennepPhoto, Jacob Lund, sattahipbeach,/Shutterstock, Catalin Grigoriu/ Shutterstock, Designua/Shutterstock, LightField Studios/Shutterstock, lotan/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Pawel Graczyk/Shutterstock, Studio BKK/Shutterstock, Kateryna Kon/Shutterstock, GraphicsRF/Shutterstock, nayef hammouri/Shutterstock, adike/Shutterstock, Maridav/Shutterstock, Lukas Budinsky , Jacob Lund/Shutterstock, iPreech Studio/Shutterstock, ChiccoDodiFC/Shutterstock, Blazej Lyjak/Shutterstock, design36/Shutterstock, udaix/ Shutterstock, Animashka, electra/Shutterstock, Viktoria_P/Shutterstock, Thomas C. Altman/Altman Science, Emre Terim, Aksanaku/Shutterstock, Blamb/Shutterstock, Tefi/Shutterstock, icsnaps/Shutterstock, Artemida-psy/ Shutterstock, OLESHKO GANNA/ Shutterstock Aninna/Shutterstock, Public Domain/Shutterstock, Public domain/ Shutterstock, Juan Gaertner/Shutterstock, Andrey_Popov/Shutterstock, iambasic_Studio/Shutterstock, Sirirat/ Shutterstock, ibreakstock/Shutterstock, Belish, Arthur Didyk/Shutterstock, Yenyu Shih, Eugene Onischenko/ Shutterstock, Robert Przybysz/Shutterstock, matimix/Shutterstock, Alex Kravtsov/Shutterstock,Babka/Shutterstock, Makalex69/Shutterstock, illustrator graphic/Shutterstock, OSTILL is Franck Camhi, Eugene Onischenko, /Shutterstock, Sergey Nivens/Shutterstock, Alan Freed/Shutterstock, Microgen/Shutterstock,Alfredo Ottonello/Shutterstock, Dmitrydesign/Shutterstock, ZouZou (jumping/Shutterstock, alphaspirit/Shutterstock, George Rudy/Shutterstock, Kati Finell/Shutterstock, haeryung stock images/Shutterstock, sportpoint/Shutterstock, Gwoeli/Shutterstock, Fauad A. Saad/Shutterstock, Oksana Volina/Shutterstock, VectorMine/Shutterstock, sportoakimirka/Shutterstock, Sergii Chemov/ homydesign/ Ivan Sm/Shutterstock, vectorfusionart/Shutterstock, Inspiring/Shutterstock, courtyardpix/ Shutterstock, Designua/Shutterstock, Toa55/ Digital Storm/Shutterstock, David Prahi/ mezzotint/ brizmaker/ Shutterstock, Fauad A. Saad/Shutterstock, yanik88/ sportpoint/ Andrea Izzotti/Shutterstock, sezer66/ Thomas C. Altman sportpoint/Shutterstock, Mauricio Graiki/Shutterstock, Swapan Photography/ Shawn Hampel/ cloki/ Dan Thornberg/Shutterstock, Georgios Kollidas/Shutterstock, Lia Koltyrina/Shutterstock, matsabe/Shutterstock, Ksenia Raykova/Shutterstock, Bill McKelvie/Shutterstock, Andrey Burmakin/ kuruneko/ ZoranOrcik/Shutterstock, Imagesines/ Shutterstock, Diagram/Shutterstock, HelloRF Zcool/ Andrey Burmakin//Shutterstock, Alex Kravtsov/ sirtravelalot/ Suzanna Tucker/Shutterstock, Graph/Shutterstock, Gwoeii/Shutterstock, Graph/ Oleksii Sidorov/Shutterstock, sizov/ LUKinMEDIA/Shutterstock, BUY THIS/Shutterstock, Stock image/Shutterstock, TLaoPhotography/Shutterstock, TASER/Shutterstock, Roger costa morera/Shutterstock, Preto Perola/ HomeArt/Shutterstock, topimages/ NDT/ KKulikov/Shutterstock, OSTILL is Franck Camhi/ Wikipedia Ljupco Smokovski/ Alexander Kirch/ Stefan Schurr/ Jonah_H/Shutterstock, Brocreative/ Motion Arts/ Dan Thornberg/Shutterstock, Thomas C. Altman/Altman Science,

faboi/ TASER/ faboi/Shutterstock, Miriam Doerr Martin Frommherz/ Bjoern Wylezich/Shutterstock, Inna Bigun/ Shutterstock, Steven_Mol/Shutterstock, goffkein.pro/Shutterstock, EugenePut/ RomanVX/Shutterstock, fotoliza/ Shutterstock, IDKFA/Shutterstock, Yosanon Y/ VarnakovR/Shutterstock, Rost9/ Tyler Boyes/ Dimarion/Shutterstock, Maridav/Shutterstock, Dmitry Markov152/Shutterstock, Rudenkois/Shutterstock, Patthana Nirangkul/Shutterstock, KpixMining/ Moon Light PhotoStudio//Shutterstock, -V-/ koya979/ amfroey/ Andrey Armyagov/Shutterstock, Billion Photos/Shutterstock, Christopher Boswell/ DenisVolkov/Shutterstock, Hein Nouwens/ Dragance137/Shutterstock, Everett Collection/ BrunoRosa/ sportspoint/Shutterstock, Dennis van de Water/Shutterstock, Michael Rolands/ Shutterstock,Thomas C. Altman/Altman Science marekuliasz/ Melinda Nagy/Shutterstock, Brostock/ Digital Storm/ Shutterstock, D.Pimborough/ SolidMaks/ Stanislaw Mikulski/Shutterstock, Wikipedia, Dainis Derics/Shutterstock, Doug Lemke/Shutterstock, dotshock/Shutterstock, Dmitry Yashkin/Shutterstock, Jose L. Stephens/Shutterstock, PCHT/Shutterstock, Chokniti Khongchum/Shutterstock, BlueRingMedia/Shutterstock, Quick Shot/ J_K/ Vibrant ImageStudio/Shutterstock, Thomas C. Altman/Altman ScienceStudioMolekuul/Shutterstock, OlegD/Shutterstock, Rudmer Zwerver/Shutterstock, Fouad A. Saad/ dioch/Shutterstock, Magcom/ StudioMolekuul/Shutterstock, Trooper2000/Shutterstock, kwanchai.c/ inewsfoto/ Chamille White/Shutterstock, Fotokostic/Shutterstock, LuckyStep/ Shutterstock, Prill/Shutterstock, Shine Nucha/ Toa55/ Idambies/Shutterstock, Chokniti Khongchum/ Perception 7/ Shutterstock, AlexLMX/Shutterstock, Iricat/ petrroudny43/ Yuriy Seleznev/Shutterstock,

Shaijo/Shutterstock, Patrick Salsbury/ Altman Science, BalLi8Tic/Shutterstock, losmandarinas/Shutterstock, Wlad74/Shutterstock, Dudarev Mikhail/Shutterstock, VectorMine/Shutterstock, Michael Stifter/Shutterstock, Tom Wang/Shutterstock, Everett Historical/Shutterstock, PhotoHouse/Shutterstock, Callipso/Shutterstock, alice-photo/ Shutterstock, udaix/Shutterstock, Designua/Shutterstock, magnetix/Shutterstock, enzozo/Shutterstock, Designua/ Shutterstock, Vshivkova/Shutterstock, ktsdesign/Shutterstock, angellodeco/Shutterstock, Billion Photos/Shutterstock, Ody_Stocker/Shutterstock, kanyanat wongsa/Shutterstock, Zita/Shutterstock, Aha-Soft/Shutterstock, Gorodenkoff/ Shutterstock, Designua/Shutterstock, Katy Pack/ nevodka/Shutterstock, Rattiy Thongdumhyu/Shutterstock, Kateryna Kon/Shutterstock, Juan Gaertner/Shutterstock, Elena Pavlovich/ Shawn Hempel/Shutterstock, Spectral-Design/ Shutterstock, Katiekk/Shutterstock, Natali_Mis/Shutterstock, OSweetNature/Shutterstock, Soleil Nordic/Shutterstock, Dmitry Kalinovsky/ elenabsl/Shutterstock, Lorna Roberts/ THAIFINN/Shutterstock, DrimaFilm/Shutterstock, Mari-Leaf/Shutterstock, 3d_man/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Nathan Devery/Shutterstock, gritsalak karalak/ Shutterstock, Olga Rudyk/Shutterstock, petrroudny43/Shutterstock, Kapitosh/Shutterstock, Nate troyer/Shutterstock, machimorales/Shutterstock, acceptphoto/Shutterstock, Tomasz Klejdysz/Shutterstock, Kaentian Street/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Sawat Benyenngam/Shutterstock, JIANG HONGYAN/ Mvolodmyr/Shutterstock, Dr Morley Read/Shutterstock, symbiot/ sigit wiyono/ Linas T/Shutterstock, Thomas C. Altman/Altman Science, Fourleaflover/ Shutterstock, igorstevanovic/ HEDADZI PE/CHAN/nexusby/Shutterstock, Panchenko Vladimir/Shutterstock,

Peter Hermes Furian/Shutterstock, Everett Historical/Shutterstock, OSweetNature/Shutterstock, Triff/Shutterstock, Fouad A. Saad/Shutterstock, KanKhem/Shutterstock, Cq photo juy/Shutterstock, CandMe/Shutterstock, dani3315/ vrx/ /Shutterstock, Mishakov Valery/ sivVector/Shutterstock, Efman/Shutterstock, Art-Perfect/Shutterstock, Negro Elkha/Shutterstock, Designua/Shutterstock, Benson HE/ udaix/Shutterstock, Fouad A. Saad/Shutterstock, BetterPhoto/Shutterstock, Mega Pixel/Shutterstock, StudioMolekuul/ /Shutterstock, urfin/Shutterstock, kondr. konst/Shutterstock, suteelak phundang/ shltz/Shutterstock, Aonprom Photo/Shutterstock, Andrew Balcombe/ Don Mammoser/ Vladimir Gjorgiev/Shutterstock, Richard Whitcombe/Shutterstock, Chase Dekker/Shutterstock, paulynn/ Anna Hoychuk/ Dalibro/Shutterstock, Yana Gershanik/ Lalandrew/Shutterstock, Alaettin YILDIRIM/ Shutterstock, Matej Kastelic/Shutterstock, Poring Studio/Shutterstock, g_dasha/Shutterstock, Billion Photos/ Shutterstock, shtukicrew/Shutterstock, Amy Newton-McConnel/ Ongkan/Shutterstock, bonchan/Shutterstock, MITstudio/Shutterstock, 200dgr/Shutterstock, SpelaG91/ UlrikaArt/ Luis Echeverri Urrea/Shutterstock, Rich Carey/ Shutterstock, Davdeka/Shutterstock, Newman Studio/Shutterstock,

gstraub/Shutterstock; Jenny_Tr/Shutterstock; Fer Gregory/Shutterstock; Crystal-K/Shutterstock; 3Dsculptor/ Shutterstock; ibreakstock/Shutterstock; BeataGFX/Shutterstock; ZikG/Shutterstock; focal point/Shutterstock; u3d/ Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific Inc ;Tuba Rehman/Shutterstock; Arpon Pongkasetkam/Shutterstock; JPC-PROD/Shutterstock; Lutsenko_Oleksandr/Shutterstock; gstraub/Shutterstock; ggw/Shutterstock; Kim Christensen/Shutterstock; Blue Lemon Photo Shutterstock; StudioMolekuul/Shutterstock; botazsolti/Shutterstock; Kriengsak tarasri/Shutterstock; David Plo Caviedes/Shutterstock, Toltemara/Shutterstock; sasha2109/Shutterstock; LeysanI/Shutterstock; ggw/Shutterstock; Ajamal/Shutterstock; helfei/Shutterstock; Fablok/Shutterstock; gogoiso/ Shutterstock; HAFIZULLAHYATIM/Shutterstock; ninikas/Shutterstock; Monkey Business Images/Shutterstock; public domain , Surasak_Photo/Shutterstock; White_Fox/Shutterstock; chemistrygod/Shutterstock; SUWIT NGAOKAEW/ Shutterstock; Bob Morse/Morse Scientific, Inc.; StudioMolekuul/Shutterstock; Rabbitmindphoto/Shutterstock; petrroudny43/Shutterstock; kesipun/Shutterstock; wellphoto/Shutterstock; Toa55/Shutterstock; PNOIARSA/ Shutterstock; ggw/Shutterstock; Rattiya Thongdumhyu/Shutterstock; Satienpong P/Shutterstock; DariaRen/ Shutterstock; tanewpix168/Shutterstock;