الفيزياء

البكالوريا المصرية

الجـزء الثانـى

الصف
11

SPRIX

الفيزياء

البكالوريا المصرية

الصـــف الثـــاني

The International Baccalaureate™

has reviewed the pedagogical and assessment approaches underpinning this textbook.

© 2026 Ministry of Education and Technical Education

All rights reserved.

Copyrights and accountability for the content of this textbook remain with the Ministry of Education and Technical Education.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system,

or transmitted in any form or by any means - electronic, mechanical, photocopying, recording,

or otherwise - without the prior written permission of the copyright holders.

Ministry of Education and Technical Education

New Administrative Capital

Cairo, Egypt

مقدمة

تجسيدًا لرؤية نظام البكالوريا المصرية والتزامها بإعداد متعلمين قادرين على مواكبة متطلبات القرن الحادي والعشرين، يأتي تطوير كتاب الفيزياء للصف الثاني الثانوي ليقدم للطلاب تجربةً تعليمية رصينة، ممتعة، ومحفزة فكريًا. وقد صُمم هذا المنهج لترسيخ الفهم المفاهيمي العميق، وبناء الثقافة العلمية، مع تمكين المتعلمين من تطبيق المعارف والمهارات الفيزيائية في سياقات الحياة الواقعية.

تقوم فلسفة هذا الكتاب على التعلم القائم على الاستقصاء؛ حيث يبني الطلاب فهمهم ذاتيًا عبر الملاحظة، والتساؤل، والبحث، والتفكير المستند إلى الأدلة. وينطلق التعلم من ظواهر حيوية، ومواقف حقيقية، وخبرات استكشافية تستثير الفضول، وتدفع المتعلمين إلى البحث عن تفسيرات علمية للعمليات والأنشطة الفيزيائية في محيطهم. وعبر هذا النهج، يُوجَّه الطلاب لاستكشاف الأنماط، وصياغة التفسيرات، وبناء الاستيعاب العلمي قبل الخوض في المفاهيم والمبادئ والقوانين والنماذج الرسمية.

يعكس تنظيم كل درس تسلسلًا متناغمًا ينطلق من الاستكشاف وصولًا إلى بناء المفهوم وتطبيقه؛ متبعًا في ذلك استراتيجية (**التهيئة – الشرح – حلل – حاول – تمرين**)؛ حيث يُقدَّم للطلاب أولًا سياقات وظواهر ونماذج مختارة بعناية، لربط التعلم الجديد بالمعارف السابقة والخبرات اليومية. وتُشكّل هذه المقدمات الجاذبة حافزًا للاستقصاء، يُحفّز المتعلمين على تحليل الملاحظات، وتفسير الأدلة، وتحديد الأنماط، وصياغة تفسيرات أولية. وتأسيسًا على هذه المرحلة الاستكشافية، يتفاعل الطلاب مع المفاهيم، والمبادئ، والقوانين، والنماذج الفيزيائية الجوهرية التي تفسر تلك الظواهر وتمنحهم إطارًا منظمًا لفهم العالم الطبيعي. وقد نُظّم المحتوى هادفًا إلى ترسيخ **الفهم المفاهيمي العميق عوضًا عن الحفظ التلقيني**، مما يُمكّن المتعلمين من إدراك العلاقات بين المفاهيم، وإقامة روابط وثيقة بين الأفكار، وتطبيق معارفهم بثقة في سياقات جديدة ومبتكرة. وعبر محطتي (جرِّب) و(تمرين)، تُتاح للطلاب فرص حيوية لممارسة ما اكتسبوه وتطبيقه، وصولًا إلى بناء استيعابٍ رصين ومترابط ومتكامل لعلم الكيمياء.

ويتيح هذا الكتاب **مساراتٍ رحبة للتجريب، وحل المشكلات، والاستقصاء المستقل**؛ حيث يُحفَّز الطلاب على اختبار الأفكار، وجمع البيانات وتحليلها، وتقييم الأدلة، والتوصل إلى استنتاجات مدعومة بالأدلة. وعبر هذه الخبرات العملية، يكتسب المتعلمون ثقةً راسخة في توظيف التفكير العلمي، ليتحولوا إلى مشاركين فاعلين في بناء المعرفة، تجاوزًا لنمط التلقّي السلبي للمعلومات.

يتكامل التقييم في عملية التعلم بوصفه أداة للتعلم والتحسين المستمر معًا. وتتيح الدروس محطات متنوعة للتقييم التكويني والختامي، تُمكن الطلاب من رصد تقدمهم، وتحديد مجالات نموهم المعرفي، وإظهار عمق فهمهم. وقد صُممت مهام التقييم بعناية لتُحاكي نمط الأسئلة الاختبارية، مع التركيز على تحفيز مهارات التفكير العليا، والتحليل، وتطبيق المعارف في سياقات جديدة وغير مألوفة.

أُولي اهتمام خاص لإبراز طبيعة العلم بوصفها ركيزةً أساسية للثقافة العلمية؛ حيث تُتاح للطلاب فرص لفهم كيفية توليد المعرفة العلمية، والتحقق من صحتها وتنقيحها، ونقلها داخل الأوساط العلمية. كما يشجع المنهج على تقدير إسهامات العلماء والمبتكرين الذين شكَّلت اكتشافاتهم فهمنا للعالم الفيزيائي وأسهمت في تقدم الإنسانية.

يطوِّر الكتاب بصورة منهجية مهارات عمليات العلم، بدءًا من الملاحظة والقياس والتصنيف مرورًا بالاستدلال، والتنبؤ، والتجريب، وصولًا إلى تفسير البيانات والنمذجة والتواصل العلمي. وتتكامل هذه المهارات ضمن خبرات التعلم؛ لضمان ألّا يقتصر دور الطلاب على استيعاب المعرفة العلمية فحسب، بل يمتد إلى بناء الكفاءات اللازمة للتفكير والممارسة بأسلوب علمي.

وتناغمًا مع تطلعات التعليم المعاصر، يُرسِّخ المنهج أبعاد الوعي العالمي والانفتاح الدولي؛ عبر ربط مفاهيم الفيزياء بالممارسات العلمية العالمية، والابتكارات التقنية، فضلًا عن التحديات البيئية وأهداف التنمية المستدامة. كما يحفز الطلاب على استيعاب الطبيعة المترابطة للمعرفة العلمية، وإدراك الدور المحوري للفيزياء في معالجة القضايا المؤثرة في المجتمعات على المستويات المحلية، والوطنية، والعالمية.

علاوة على ذلك، يستهدف المنهج تنمية التفكير الناقد والإبداعي؛ عبر إشراك الطلاب في تحليل الأدلة، وتقييم التفسيرات البديلة، وابتكار حلول ريادية، وتطبيق المعرفة العلمية في مواجهة تحديات واقعية. كما يُحفِّز المتعلمون على مقاربة المشكلات بمنظور العلماء والفيزيائيين والمهندسين؛ مستندين إلى التفكير المنظومي وهندسة التصميم لاستقصاء الأسئلة وتطوير حلول عملية.

الدمج المتعمد بين مفاهيم الفيزياء وحياة الطلاب وخبراتهم إحدى السمات الجوهرية لهذا الكتاب؛ حيث تُطرح الأفكار العلمية عبر الفصول ضمن سياقات دلالية حيوية، مدعومةً بتطبيقات معاصرة مستمدة من الصناعة، والصحة، والتقنية، والطاقة، والاستدامة، والحياة اليومية. وتعمل هذه الروابط على ترسيخ أهمية الفيزياء في وجدان المتعلمين، بما يُمكِّنهم من تقدير دورها المحوري في فهم العالم من حولهم والارتقاء به.

ومن الأبعاد الجوهرية أيضًا التزام المنهج بتعزيز التعلم التأملي؛ إذ يُحفِّز الطلاب على الانخراط في التقييم الذاتي والتفكير ما وراء المعرفي، مما يُمكِّنهم من رصد مستويات فهمهم، وتقييم استراتيجياتهم الدراسية، وتحمّل مسئولية أكبر تجاه نموهم الأكاديمي. ومن خلال التأمل في محتوى تعلمهم وآلياته، يكتسب الطلاب عادات التعلم المستمر مدى الحياة، ليكونوا قادرين على التكيف مع مختلف التحديات والفرص المستجدة.

في نهاية المطاف، يهدف هذا الكتاب إلى بناء جيلٍ من المتعلمين المثقفين علميًّا، والمسئولين، والمبدعين؛ مزودين بالمعارف، والمهارات، والقيم، والاتجاهات الكفيلة بتحقيق نجاحهم في عالمٍ سريع التغير. ونأمل أن تُلهم هذه الرحلة التعليمية الطلاب لاستكشاف الفيزياء بشغف، والتفكير بمنهجية، والعمل بمسئولية؛ بما يضمن إسهامهم الفاعل في رقيّ المجتمع، ورسم مستقبلٍ مستدامٍ للإنسانية.

كيف تستخدم هذا الكتاب

يتّبع كل درس نفس التسلسل: الملاحظة، التوقّع (التنبؤ)، القِياس، التسمية.

١ **سؤال الدرس**
الفكرة الكبيرة المطلوب الإجابة عنها

٢ **ستتعلم أن**
أهداف واضحة لهذا الدرس

٣ **الظاهرة — توقّع (تنبأ) أولًا**
شاهدها، ثم اكتب توقعك

٤ **استكشف**
جرِّبها ولاحظ الأنماط

٥ **مثال محلول (لماذا؟)**
طريقة الحل الموضحة مع التعليل

٦ **جرِّب بنفسك**
طبِّق الفكرة بنفسك

٧ **تحقّق من فهمك**
اختبار ذاتي سريع

٨ **تطبيق سريع**
طبِّق الفكرة في سياق جديد

٩ **سؤال ربط**
اربط الأفكار عبر الدرس

١٠ **صندوق المعادلات**
مفتاح المعادلات في لمحة

١١ **طبيعة العلم**
تعرَّف كيف تتطور الأفكار العلمية

١٢ **بأسلوب الامتحان**
طبِّق ما تعلمته في سياق امتحاني

ما الذي يميز هذا الكتاب؟

- إنه لا يكتفي بسرد حقائق الفيزياء — بل يدرِّبك كفيزيائي.
- توقَّع قبل الشرح، ثم اختبر أفكارك في ضوء الأدلة.
- فهم لماذا تعمل كل طريقة، اكتشف المفاهيم الخاطئة، واربط الأفكار عبر الدرس.

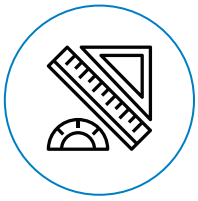
كيف يسير التعلّم هنا؟

١. الملاحظة

يحدث أمر واقعي
ويكسر ما كنت تتوقعه.

٢. التوقّع (التنبؤ)

سجّل توقعك
قبل أن تُكمل القراءة.



٣. القياس

نفّذ ذلك بيديك
واجمع البيانات.

٤. التسمِية

تعلَّم المصطلح (المفهوم)
العلمي بعد بناء الفكرة،
لا بأن تحفظه أولًا.

ابدأ بالظاهرة

دع الأدلة تبني التفسير (الشرح).

الأدوات

١ التقنيات التجريبية
٢ التكنولوجيا
٣ الرياضيات

الاستقصاء

١ الاستكشاف والتصميم
٢ جمع البيانات ومعالجتها
٣ الاستنتاج والتقييم

كيف تتم عملية التعلم هنا؟

اقرأ هذه الصفحة مرة واحدة، ثم عُد إليها كلما احتجت إليها؛ فهي تنطبق على كل درس في الكتاب.

يعتمد كل درس على مسار واحد من الإجراءات.

يلاحظ ← يتنبأ ← يقيس ← يسمى

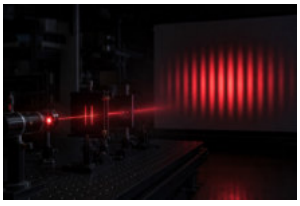
- يلاحظ – يحدث شيء حقيقي غير ما توقعته انت.
- يتنبأ — تقوم بالتخمين كتابيًا، قبل مواصلة القراءة.
- يقيس – يمكنك القيام بذلك بيديك وجمع الأرقام.
- يسمى – الآن فقط تصل إلى المصطلح ويكون مكتسب، ليس محفوظا.

دوّن توقعاتك كتابةً؛ فالتخمينات الخاصة بك تُعدّ بياناتٍ يبنى عليها، وليست مجرد زينة.

أين يقع هذا المصطلح في منهج الفيزياء

(جـ) الطبيعة الجسيمية للمادة هذا المصطلح • الغازات والحرارة

(د) المجالات هذا المصطلح • الكهرباء والمغناطيسية

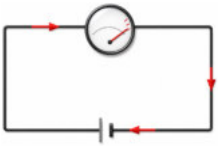


(هـ) الفيزياء النووية وفيزياء الكم هذا المصطلح • الكوانتم

الوحدات الخمس لهذا الفصل الدراسي.

الفصل الأول الغازات والحرارة الدروس (١-١) - (١-٦)

الفصل الثاني الكهرباء الساكنة الدروس (٢-١) - (٢-٦)



الفصل الثالث التيار الكهربي والدوائر الدروس (٣-١) - (٣-٢)

الفصل الرابع المغناطيسية والحث الكهرومغناطيسي الدروس (٤-١) - (٤-٥)

الفصل الخامس الطبيعة الكمية للضوء والمادة الدروس (٥-١) - (٥-٣)

بناءً على الفصل الدراسي الأول: (أ): الميكانيكا (القوى والحركة). (ب) الحركة الاهتزازية والموجات.

الأدوات:

١) التقنيات التجريبية ٢) التكنولوجيا ٣) الرياضيات.

دورة الاستقصاء: الاستكشاف والتصميم • الجمع والمعالجة • الاستنتاج والتقييم — ستواجه هذه المراحل في كل نشاط استكشافي.

الأمانة الأكاديمية: يجب أن تكون التوقعات نتاج عملك الخاص — احرص على ذكر المصادر، ولا تنسب لنفسك إلا ما أنجزته أنت.

المحتوى

الفصل الأول - الغازات والحرارة

١-١ قانون بويل–شارل ٢

١-٢ معادلة الحالة للغاز المثالي (قانون الغاز المثالي) (القانون العام للغازات) ٩

١-٣ حركة جزيئات الغاز ١٤

١-٤ الطاقة الداخلية للغاز ٢٢

١-٥ تغيرات حالة الغاز والحرارة والشغل ٣٠

١-٦ السعة الحرارية المولية ٣٧

الفصل الثانى - الكهرباء الساكنة

٢-١ قانون كولوم ٤٤

٢-٢ المجال الكهربى ٥٢

٢-٣ الجهد الكهربى ٥٩

٢-٤ المجال الكهربائي المنتظم وفرق الجهد ٦٦

٢-٥ حركة الشحنات تحت تأثير قوة كهروستاتيكية ٧٢

٢-٦ المكثف ٧٨

الفصل الثالث - التيار الكهربي والدوائر

٣-١ الأميتر والفولتميتر ٨٥

٣-٢ قانونا كيرشوف ٩٢

الفصل الرابع - المغناطيسية والحث الكهرومغناطيسي

٤-١ المجال المغناطيسي الناتج عن تيار كهربى ١٠١

٤-٢ القوة المؤثرة على تيار كهربى بواسطة مجال مغناطيسي ١٠٨

٤-٣ حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي ١١٥

٤-٤ الحث الكهرومغناطيسي ١٢٢

٤-٥ الحث الذاتي ١٢٩

الفصل الخامس - الطبيعة الكمية للضوء والمادة

٥-١ الطبيعة الجسيمية للضوء ١٣٧

٥-٢ الأشعة السينية ١٤٤

٥-٣ موجات المادة ١٥١

الفصل الأول

الغازات والحرارة

١-١ قانون بويل–شارل

١-٢ معادلة الحالة للغاز المثالي

١-٣ حركة جزيئات الغاز

١-٤ الطاقة الداخلية للغاز

١-٥ التغيرات في حالة الغاز والحرارة/الشغل

١-٦ السعة الحرارية المولية

الدرس ١-١ — قانون بويل-شارل

؟ سؤال الدرس:

ما العلاقة التي تربط كلًّا من الضغط والحجم ودرجة الحرارة المطلقة لكمية ثابتة من الغاز؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تحسب ضغط الغاز من القوة العمودية المؤثرة على وحدة المساحة باستخدام العلاقة $P = \frac{F}{A}$

*وحدة قياس الضغط: -الباسكال (Pa).

٢. تحدد ضغط غاز محبوس بواسطة مكبس من خلال تطبيق اتزان القوى المؤثرة على المكبس.

٣. تطبّق قانون بويل-شارل (ثابت = $\frac{PV}{T}$) لربط حالة كتلة ثابتة من الغاز المثالي قبل التغير وبعده.

حقيقة أساسية:

الضغط P — القوة العمودية التي تؤثر على وحدة المساحات، $P = \frac{F}{A}$ تُقاس بالباسكال (Pa)؛ $1\,Pa = 1\,N/m^2$.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تستمر

على متن طائرة أثناء التحليق على ارتفاع عالٍ، يكون ضغط الهواء داخل المقصورة مضبوطًا، لكنه أقل من الضغط الجوي عند سطح الأرض P_o.

لذلك، فإن كيسًا مغلقًا من رقائق البطاطس تم تعبئته وإغلاقه على سطح الأرض ينتفخ عند صعود الطائرة؛ لأن الغاز المحبوس بداخله يتمدد حتى يصل إلى اتزان ميكانيكي جديد.

إذا ظل الضغط الخارجي تقريبًا ثابتًا، فإن تسخين الغاز يؤدي إلى زيادة حجمه، بينما تبريد الغاز يؤدي إلى انخفاض حجمه.

وبالتالي، بالنسبة إلى كمية ثابتة من الغاز، فإن الحجم يعتمد على كلٍّ من الضغط ودرجة الحرارة المطلقة وتُقاس درجة الحرارة المطلقة بوحدة الكلفن $T[K] = T\,^oC + 273$

الشكل (1.1.1): ينتفخ كيس رقائق بطاطس محكم عند ارتفاع الطائرة؛ لأن الضغط داخل الكابينة أقل من الضغط الجوي عند سطح الأرض، فيتمدد الغاز المحبوس حتى يصل إلى اتزان ميكانيكي جديد.

تنبأ:

(أ) عندما تُضغط كمية ثابتة من الغاز عند درجة حرارة ثابتة، هل يرتفع ضغطها أم ينخفض أم يظل ثابتًا؟

(ب) عندما تُسخَّن كمية محبوسة من الغاز عند ضغط ثابت، هل يزداد حجمها أم يقل أم يظل ثابتًا؟

استكشف — اضغط الهواء المحكم

ما ستفعله: احبس كتلة ثابتة (معينة) من الهواء داخل محقن (سرنجة)، ثم غيّر كمية واحدة في كل مرة لتتعرف العلاقة بين الضغط والحجم ودرجة الحرارة المطلقة.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات):
- محقن كبير مزود بغطاء (مسدودة)
- مسطرة أو قدم ذات ورنية
- كتل مشقوقة
- ترمومتر
- حمام مائي

شكل (2.1.1)

الخطوات:

١ أغلق فوهة المحقن، ومن دون حمل اقرأ حجم الهواء المحبوس V على تدريج المحقن، واعتبر ضغطه P مساويًا للضغط الجوي.

٢ أضف الكتل المشقوقة إلى المكبس واحدة تلو الأخرى لزيادة الضغط P مع ثبوت درجة الحرارة وسجّل الحجم V بعد كل إضافة.

٣ احسب حاصل الضرب $P \times V$ في كل محاولة، وسجّله في العمود الأخير.

٤ أزل الأحمال، ثم ضع المحقن كاملًا في حمام مائي وسخنه. اقرأ الحجم V مقابل درجة الحرارة المطلقة T مع ثبوت الضغط.

الشكل (3.1.1): محقن مزود بغطاء محكم موضوع رأسيًا؛ يضغط حمل معلوم على المكبس، ويُقرأ حجم الهواء المحبوس V من تدريج الأسطوانة (السرنجة أو المحقن)، بينما تكون الفوهة مغلقة.

المحاولة	الحمل على المكبس	الضغط P (KPa)	الحجم V (mL)	$V \times P$ (mL.KPa)
١	دون حمل			
٢	كتلة واحدة			
٣	كتلتان			

تجربة التسخين (الخطوة 4) — ثبّت الحمل بحيث يظل الضغط ثابتًا، وسخّن الهواء المحبوس في الحمام المائي، ثم سجّل حجم الهواء عند درجات الحرارة المطلقة.

القراءة	T (K)	الحجم V (mL)	$V \times P$ (mL/KPa)
بارد			
دافئ			
ساخن			

حلّل ما جمعته:

(أ) مع زيادة الضغط P عند ثبوت درجة الحرارة، ماذا يحدث للحجم V؟ انظر إلى قيم العمود الأخير: ماذا تلاحظ في حاصل الضرب $P \times V$؟

(ب) في تجربة التسخين عند ضغط ثابت، تنبأ بشكل منحنى V مقابل درجة الحرارة المطلقة T، واذكر ما تتوقع حدوثه للنسبة V/T؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تنتقل إلى الجزء التالي.

من الملاحظة إلى النموذج:

الضغط قوة موزعة على مساحة:

يقيس الضغط مدى تركُّز قوة الدفع؛ فعندما تتوزع القوة نفسها على مساحة أكبر، فإنها تضغط بقوة أقل على كل جزء من السطح. لذلك نقسم القوة على المساحة التي تؤثر عليها: $P = \frac{F}{A}$

الشكل (4.1.1): الغاز المحبوس أسفل مكبس لا يحدد ضغطه بنفسه؛ فالمكبس يطفو في حالة اتزان، ولذلك يتحدد ضغط الغاز من خلال اتزان القوى المؤثرة على المكبس، كما هو موضح في المثال.

تتحول علاقتان تناسبيتان إلى قانون واحد:

ارجع إلى العمودين اللذين أكملتهما. في تجارب التحميل، ظل حاصل الضرب $P \times V$ ثابتًا تقريبًا، رغم أن الضغط والحجم تغيّرا بشكل كبير. أما في تجارب التسخين، فكانت النسبة $\frac{V}{T}$ هي التي ظلت ثابتة.

كل عمود يمثل نتيجة مهمة في حد ذاته، لكنه يظل صحيحًا فقط عندما تكون الكمية الثالثة ثابتة؛ بينما التغير الحقيقي يجعل كلًّا من P وT يتغيران معًا. لذلك، نقسم التغير إلى مرحلتين، ونستخدم كل علاقة في الحالة التي تنطبق عليها.

نبدأ بالحالة: (P_1, V_1, T_1)

أولًا: نغيّر الضغط إلى P_2 مع بقاء درجة الحرارة عند T_1. من علاقة التحميل: $P_1V_1 = P_2V$

حيث V هو الحجم الذي يصل إليه الغاز في هذه المرحلة الوسيطة.

ثم نسخّن الغاز حتى تصل درجة حرارته إلى T_2، مع تثبيت الضغط عند P_2. ومن علاقة التسخين: $\frac{V}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$

ومنها: $V = \frac{V_2 T_1}{T_2}$

نعوّض عن V' في المعادلة الأولى، فنجد أن V'—وهي الكمية التي تنتمي فقط إلى المرحلة الوسيطة—تُختصر، لنحصل على: $P_1V_1 = P_2V_2 \frac{T_1}{T_2}$

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

كانت المرحلة الوسيطة مجرد وسيلة للوصول إلى النتيجة؛ أما الكمية التي تبقى ثابتة قبل التغير وبعده فهي: $\frac{PV}{T}$

وهذا هو السبب في إمكانية استخدام قانون واحد بدلًا من قانونين.

ملاحظة القياس:

قِس قطر المكبس = d (حيث r نمثل نصف القطر) مرة واحدة، ثم احسب مساحة مقطعه من $(A = \pi r^2 = \pi \frac{d^2}{4})$ ويعطي كل حمل كتلته m ضغطًا مقداره $P = Po + mg/A$

اترك المكبس حتى يستقر قبل القراءة، وثبّت درجة الحرارة عند تغيير الحمل، واعتمد على نمط النتائج عبر المحاولات أكثر من اعتمادك على قراءة منفردة.

حقيقة أساسية

يُعرَّف الباسكال (Pa) بأنه:

$1\ Pa = 1\ N/m^2$

أي أن 1 باسكال = 1 نيوتن لكل متر مربع.

ويبلغ الضغط الجوي القياسي تقريبًا:

$1.0 \times 10^5\ Pa$

مصطلح:

الغاز المثالي (Ideal gas): هو نموذج مثالي مفيد. تتصرف الغازات الحقيقية بصورة قريبة جدًا من الغاز المثالي عند درجات الحرارة المعتادة والضغوط المتوسطة؛ لكن دقة هذا النموذج تقل عندما يكون الغاز شديد البرودة أو مضغوطًا بشدة، فتتقارب جزيئاته بدرجة تجعل حجمها والقوى المتبادلة بينها مؤثرين. الغاز المثالي هو غاز تُهمَل فيه أحجام الجزيئات وقوى التجاذب بينها، ويصدق عليه قانون بويل–شارل صدقًا تامًا.

نقطة

- عندما يؤثر غاز بقوة مقدارها F بوحدة النيوتن (N) على سطح مساحته المقطعية A بوحدة المتر المربع (m^2)، فإن ضغط الغاز P يُعطى بالعلاقة: $P = \frac{F}{A}$ وتُستخدم الباسكال (Pa) كوحدة لقياس الضغط.
- لإيجاد ضغط غاز محبوس داخل وعاء بواسطة مكبس، نستخدم اتزان القوى المؤثرة على المكبس.
- قانون بويل–شارل: بالنسبة إلى كمية ثابتة من الغاز، فإن الحجم V يتناسب عكسيًّا مع الضغط P، ويتناسب طرديًّا مع درجة الحرارة المطلقة T، ولذلك: ثابت = $\frac{PV}{T}$
- يُسمى الغاز الذي يمكن إهمال حجم جزيئاته والقوى بين جزيئاته غازًا مثاليًّا (Ideal gas). وفي الغاز المثالي، ينطبق قانون بويل–شارل بصورة دقيقة .

ملاحظة:

درجة الحرارة المطلقة T (K) = درجة الحرارة السيليزية T_c + 273.

يجب التحويل إلى الكلفن قبل استخدام PV/T.

صندوق المعادلات:

الكمية أو القانون	العلاقة
الضغط	$P = F/A$، (وحدة القياس $Pa = N/m^2$)
اتزان المكبس	$PA - PoA - mg = 0$ $P = Po + mg/A$
قانون بويل – شارل	$P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$ $PV/T = constant$ = ثابت

مثال محلول:

أعطِ كل إجابة لأقرب رقمين عشريين.

الموقف:

(أ) حُبس هواء في وعاء أسطواني بمكبس أملس الحركة مساحة مقطعه $4.9 \times 10^{-3}\ m^2$ وكتلته 10 kg. أوجد ضغط الهواء داخل الوعاء بوحدة Pa، إذا كان الضغط الجوي 1.0×10^5 Pa وعجلة الجاذبية $9.8\ m/sec^2$.

(ب) تغيرت حالة غاز مثالي من 19^oC و 9.6×10^5 Pa وحجم 3.5 L إلى ضغط 1.2×10^5 Pa وحجم 3.2 L . أوجد درجة حرارته النهائية بالدرجة السيليزية.

(جـ) سُخّن غاز حجمه $0.60\ m^3$ ودرجة حرارته 280 K إلى 420 K مع ثبوت الضغط. أوجد حجمه النهائي.

المعطيات والمطلوب:

(أ) $A = 4.9 \times 10^{-3}\ m^2$ ، و $m = 10$ kg، و 1.0×10^5 Pa، و $P_o =$ ، و $g = 9.8\ m/sec^2$؛ والمطلوب P.

(ب) الحالة الأولى: $T_1 = 19\ ^\circ C$ و $P_1 = 9.6 \times 10^5$ Pa، و $V_1 = 3.5$ L

الحالة الثانية: $P_2 = 1.2 \times 10^5$ Pa، و $V_2 = 3.2$ L؛ والمطلوب T_2 بالدرجة السيليزية.

(جـ) $V_1 = 0.60\ m^3$، و $T_1 = 280$ K، و $T_2 = 420$ K، والضغط ثابت؛ والمطلوب V_2.

التمثيل:	**يوضح الشكل 1-1-4 ترتيب المسألة** (ا) هواء محصور بمكبس أملس كتلته 10 kg، بينما يوضح الشكل 1-1-3 اتزان القوى على المكبس. وفي المسألتين .(ب) و(جـ) ارسم الغاز قبل تغير الحالة وبعده، ودوّن P وV وT في كل حالة.
الاستراتيجية:	نكتب معادلة اتزان القوى على المكبس لإيجاد الضغط. وعند تغير حالة الغاز نستخدم ثابت = PV/T قبل التغير وبعده، ونحوّل درجة الحرارة دائمًا إلى درجة الحرارة المطلقة.
الحل الموضح:	(ا) من اتزان القوى $PA - P_oA - mg = 0$، ومنه: $P = P_o + mg/A = (1.0 \times 10^5) + (10 \times 9.8)/(4.9 \times 10^{-3}) = 1.0 \times 10^5 + 2.0 \times 10^4 = 1.2 \times 10^5$ Pa. (ب) لتكن درجة الحرارة المطلوبة T بالكلفن. من قانون بويل–شارل، مع استخدام درجة الحرارة المطلقة: $T/(1.2 \times 10^5 \times 3.2) = (19 + 273)/(9.6 \times 10^5 \times 3.5)$ $T = [1.2 \times 10^5 \times 3.2 \times (19 + 273)]/[9.6 \times 10^5 \times 3.5] =$ $33.37K... \approx 33$ K $Tc = 33 - 273 = -240^\circ C$ (جـ) عند ثبوت الضغط: $P \times 0.60/280 = PV/420$، ومنه $V = (0.60/280) \times 420 = 0.90$ m³
منطقية الحل:	(ا) أضاف وزن المكبس 2×10^4 Pa، أي نحو خُمس الضغط الجوي، ولذلك تكون الزيادة البسيطة فوق 1.0×10^5 Pa معقولة. (ب) انخفض الضغط بشدة مع تغير صغير في الحجم، ولذلك يجب أن تنخفض درجة الحرارة إلى ما دون 0°C بكثير؛ فتناسب النتيجة السالبة الكبيرة المعطيات. (جـ) زادت درجة الحرارة من 280 K إلى 420 K بمعامل 1.5؛ لذا 0.60 $\times 1.5 = 0.90$ m³.
فسِّرها بنفسك:	اذكر في جملة واحدة لماذا ترفع كتلة المكبس ضغط الغاز فوق الضغط الجوي، ولماذا يجب استخدام الكلفن قبل التعويض.

حاول بنفسك: غاز مثالي عند درجة حرارة 27 °C وضغط 1.0×10^5 Pa وحجم 2.0 L، سُخّن عند ضغط ثابت إلى 87 °C. أوجد حجمه الجديد.

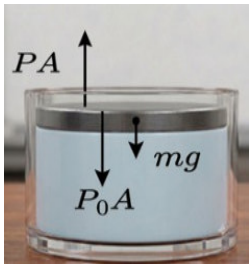
حاول:

١. أعطِ الإجابة لأقرب رقمين عشريين. حُبس هواء بمكبس أملس مساحة مقطعه 4.9×10^{-2} m² وكتلته 50 kg. أوجد ضغط الهواء بوحدة Pa، إذا كان الضغط الجوي 1.0×10^5 Pa وعجلة الجاذبية 9.8 m/s².

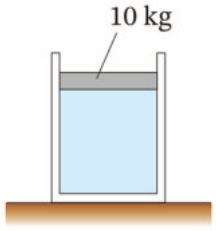
٢. تغير غاز مثالي من درجة حرارة 27 °C و ضغط 1.5×10^5 Pa وحجم 0.60 m³ إلى 127 °C وحجم 0.20 m³. أوجد ضغطه النهائي.

٣. غاز ضغطه 2.0×10^5 Pa وحجمه 0.44 m³ ضُغط إلى 2.2×10^5 Pa عند ثبوت درجة الحرارة. أوجد حجمه النهائي.

٤. غاز حجمه 1.0 m³ ودرجة حرارته 300 K سُخّن إلى 360 K عند ثبوت الضغط. أوجد حجمه النهائي.



شكل (5.1.1): مخطط جسم حر للمكبس؛ يدفع الغاز المكبس إلى أعلى بقوة PA، بينما يؤثر الضغط الجوي إلى أسفل بقوة P_0A ويؤثر وزن المكبس إلى أسفل بقوة mg. في الشكل كتلة المكبس 10 kg.

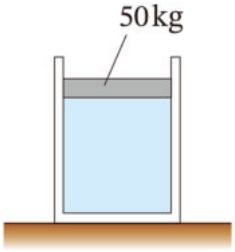


شكل (6.1.1): هواء محبوس داخل أسطوانة بمكبس أملس الحركة كتلته 10 kg.

قبل التغير (Before change)
الضغط بوحدة الباسكال — p [Pa]
الحجم — $V = 0.60$ m³
درجة الحرارة المطلقة — T = 280 K

↓

بعد التغير (After change)
الضغط بوحدة الباسكال — p [Pa]
الحجم — V [m³] *
درجة الحرارة المطلقة — T = 420 K
الشكل 6-1-1 — مثال محلول (c):
الغاز قبل وبعد تسخينه عند ضغط ثابت



هواء محبوس داخل أسطوانة بواسطة مكبس يتحرك بسلاسة، مساحة مقطعه العرضي: 4.9×10^{-2} وكتلته 50 كجم.

في سياق جديد

ينطلق منطاد أرصاد جوية (بالون الطقس) حاملًا كتلة ثابتة من الهيليوم. ومع ارتفاعه ينخفض ضغط الهواء الخارجي وتنخفض درجة حرارة الهواء، ومع ذلك يظل الغاز خاضعًا للعلاقة $PV/T = \text{constant}$. ولأن الضغط ينخفض أسرع كثيرًا من انخفاض درجة الحرارة، ينتفخ المنطاد حتى يصل قرب أقصى ارتفاع إلى أضعاف حجمه عند الإطلاق؛ وهذا هو السبب في أنه لا يُملأ إلا بشكل غير محكم عند السطح.

منطاد أرصاد جوية يظهر لحظة إطلاقه، صغيرًا ومنكمشًا، ثم يظهر مرة أخرى في طبقات الغلاف الجوي العلوي الذي يزداد ظلامًا، حيث يؤدي انخفاض الضغط الخارجي إلى تمدد الغاز المحبوس بداخله ليتحول إلى كرة كبيرة مشدودة، بينما تظل مجموعة الأجهزة المعلقة كما هي دون تغيير في الحجم.

دورك الآن: يحتوي منطاد قرب سطح الأرض على $5.0\ m^3$ من الغاز عند ضغط $1.0 \times 10^5\ Pa$ ودرجة حرارة $300\ K$ وعند ارتفاع كبير يصبح الضغط $2.5 \times 10^4\ Pa$ ودرجة الحرارة $250\ K$. **استخدم** $PV/T = \text{constant}$ لتقدير الحجم الجديد.

طبيعة العلم:

من الأصل: فقاعات تصعد من أعماق البحر وقانون بويل.

تكبر فقاعات الهواء التي يطلقها الغواص كلما صعدت نحو السطح. فمع انخفاض عمق الماء يقل الضغط المحيط، ولذلك يزداد حجم الغاز بنسبة عكسية مع الضغط. وهكذا يمكن وصف خواص الغاز غير المرئية بقانون فيزيائي.

يُصاغ قانون بويل–شارل للغاز المثالي الذي تُهمَل فيه أحجام الجزيئات وقوى التجاذب بينها.

وهذه المثالية نموذج علمي: فهي لا تتحقق تمامًا في أي غاز حقيقي، لكنها تتنبأ بسلوك الغاز الحقيقي بدقة كافية، كما تفشل في اتجاه معلوم عند الضغوط العالية جدًّا أو درجات الحرارة المنخفضة جدًّا. وتُقاس جودة النموذج بقدرته الصادقة على التنبؤ، لا بكونه مطابقًا للواقع في كل حالة.

دورك الآن: اقترح موقفًا يوميًّا لا يتبع فيه الغاز الحقيقي قانون الغاز المثالي بدقة، واذكر أي افتراض من افتراضات النموذج لا يتحقق.

شكل (7.1.1): تكبر فقاعات الهواء التي يطلقها الغواص في أثناء صعودها؛ لأن ضغط الماء المحيط يقل مع تناقص العمق.

سؤال الدرس، وإجابته:

ترتبط قيم الضغط والحجم ودرجة الحرارة المطلقة لكتلة ثابتة من الغاز المثالي بالعلاقة ثابت $= PV / T$؛ زيادة الضغط عند ثبوت درجة الحرارة يؤدي إلى تناقص الحجم، وزيادة درجة الحرارة المطلقة عند ثبوت الضغط تؤدي إلى زيادة الحجم. والضغط نفسه قوة موزعة على وحدة المساحة $P = F / A$، ولذلك يضيف وزن المكبس مقدار mg / A إلى الضغط الجوي المؤثر في الغاز المحبوس.

تمرين:

١. أعطِ الإجابة لأقرب رقمين عشريين. . حُبس هواء بمكبس أملس مساحة مقطعه $4.9 \times 10^{-3}\ m^2$ وكتلته 20 kg. أوجد ضغط الهواء داخل الوعاء إذا كان الضغط الجوي $1.0 \times 10^5\ Pa$ وعجلة الجاذبية $9.8\ m/s^2$.

٢. حُبس هواء في وعاء أسطواني بمكبس أملس مساحة مقطعه $1.0\ cm^2$. إذا دُفع المكبس بقوة 40 N، فأوجد ضغط الهواء داخل الوعاء، مع اعتبار الضغط الجوي $1.0 \times 10^5\ Pa$..

٣. تغير غاز مثالي من $27\ ^oC$ وضغط $2.0 \times 10^5\ Pa$ وحجم $3.0 \times 10^{-2}\ m^3$ إلى $87\ ^oC$ وضغط $1.0 \times 10^5\ Pa$. أوجد حجمه النهائي

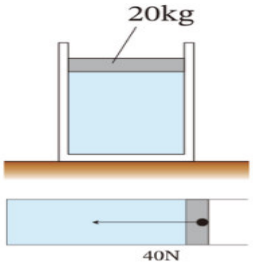
٤. تغير غاز مثالي من $77\ ^oC$ وضغط $3.0 \times 10^5\ Pa$ وحجم 500 mL إلى $47\ ^oC$ وحجم 2.0L أوجد ضغطه النهائي.

٥. غاز ضغطه $1.0 \times 10^5\ Pa$ وحجمه $0.80\ m^3$، تغير حجمه إلى $0.40\ m^3$ عند ثبوت درجة الحرارة. أوجد ضغطه النهائي.

٦. غاز ضغطه $2.0 \times 10^5\ Pa$ وحجمه $3.0 \times 10^{-2}\ m^3$، تغير ضغطه إلى $1.0 \times 10^5\ Pa$ عند ثبوت درجة الحرارة. أوجد حجمه النهائي.

٧. غاز حجمه $1.1 \times 10^{-2}\ m^3$ ودرجة حرارته 330 K، بُرّد إلى 300 K عند ثبوت الضغط. أوجد حجمه النهائي.

٨. غاز حجمه $3.0 \times 10^{-2}\ m^3$ ودرجة حرارته 300 K، بُرّد إلى 200 K عند ثبوت الضغط. أوجد حجمه النهائي.



شكل (8.1.1)

١ـ٢ — معادلة الحالة للغاز المثالي (قانون الغاز المثالي) (القانون العام للغازات)

؟ سؤال الدرس:

ما العلاقة التي تربط بين كل من ضغط الغاز وحجمه ودرجة حرارته وكمية مادته، أي عدد مولاته؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تذكر أن عدد أفوجادرو (N_A) يساوي 6.02×10^{23} جسيمًا يمثل مولًا واحدًا (mol)، ويستخدم عدد أفوجادرو للربط بين عدد المولات وعدد الجزيئات.

٢. تطبق معادلة الحالة للغاز المثالي (القانون العام للغازات) $PV = nRT$، (حيث R يمثل الثابت العام للغازات $\approx 8.3\ J/mol{\cdot}K$).

٣. تعوّض بالضغط بوحدة Pa، والحجم بوحدة m^3، ودرجة الحرارة المطلقة بوحدة K، لإيجاد أي مجهول من P وV وT وn.

الفكرة الرئيسية:

الغاز المثالي — هو الغاز الذي يخضع لمعادلة الحالة $PV = nRT$ بدقة تامة عند كل ضغط ودرجة حرارة.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

يمكن لأسطوانة هيليوم واحدة أن تملأ عددًا كبيرًا من بالونات الحفل قبل أن تنفد. فمن حجم الأسطوانة وضغط الغاز ودرجة حرارته يمكن حساب كمية الغاز المحبوسة داخلها، ومن ثم تقدير عدد البالونات المتبقية ؛ لأن الضغط والحجم ودرجة الحرارة وكمية المادة بالمولات ترتبط بعلاقة واحدة. ولا يتوقف ذلك على كون الغاز هيليوم ؛ فمول واحد من أي غاز مثالي يخضع لنفس العلاقة.

الفكرة الرئيسية:

كمية المادة n: هي كمية الغاز التي تقاس بالمولات (mol) وليس بالجرامات. كيف ترتبط كمية المادة n، بكل من الضغط P والحجم V ودرجة الحرارة T.

شكل (1.2.1): تملأ أسطوانة هيليوم واحدة عددًا كبيرًا من بالونات الحفل؛ لأن قيم الضغط والحجم ودرجة الحرارة تحدد كمية الغاز بالمولات داخلها.

تنبأ:

(أ) لملء ضعف الحجم عند نفس الضغط ودرجة الحرارة (ثبوت كل من الضغط ودرجة الحرارة)، هل نحتاج إلى كمية مادة أكبر أم أقل أم مساوية؟

(ب) في وعاء صلب (ثابت الحجم) عند درجة حرارة ثابتة، إذا كانت قراءة الضغط أعلى، فهل توجد داخله كمية مادة أكبر أم أقل أم مساوية؟

استكشف — قارن حركة عملتين

ما ستفعله: سخّن عينة ثابتة من الهواء المحبوس في دورق صلب، وتتبّع زيادة الضغط ودرجة الحرارة معًا، ثم اختبر ثبوت الكمية $\frac{PV}{T}$.

الزمن: 15 دقائق

ما تحتاجه (الأدوات): • دورق صلب محكم معلوم الحجم V [L] • مقياس ضغط (مانومتر) • ترمومتر • حمام مائي

الخطوات:

١ سجّل الحجم الداخلي الثابت للدورق V مرة واحدة بوحدة m^3؛ لأنه لا يتغير في جميع المحاولات.

٢ عند درجة حرارة الغرفة اقرأ الضغط P بواسطة مقياس الضغط (المانومتر) ودرجة الحرارة $T\ ^\circ C$، ثم احسب درجة الحرارة المطلقة بالكلفن.

$$T\ K = T\ ^\circ C + 273$$

٣ ضع الدورق في الحمام المائي وسخنه برفق، وسجّل قيمًا جديدة لكل من P وT في كل خطوة مع ثبوت الحجم.

٤ احسب PV/T لكل محاولة وسجّلها في العمود الأخير.

المحاولة	درجة الحرارة T (K)	الضغط P (KP_a)	PV/T (J/K)
١			
٢			
٣			

شكل (2.2.1): دورق صلب محكم ثابت الحجم، مزود بمقياس ضغط وترمومتر.

حلّل ما جمعته:

(أ) عند تسخين الغاز مع ثبوت الحجم، كيف يتغير الضغط P ودرجة الحرارة المطلقة T معًا؟ وماذا تلاحظ في قيم PV/T بين المحاولات؟

(ب) تساوي الكمية V/TP المقدار nR، والثابت العام للغازات R واحد لجميع الغازات. فماذا يدل ثبوت V/TP على كمية المادة n داخل الدورق؟ اقسم قيمة العمود على $R \approx 8.3\ J/mol{\cdot}K$ لتتنبأ بعدد المولات.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الجزء التالي.

ملاحظة القياس:
استخدم دورقًا صلبًا لضمان ثبوت الحجم، وانتظر استقرار مقياس الضغط والترمومتر قبل كل قراءة، وحوّل كل درجة حرارة إلى الكلفن باستخدام $T_K = T_C + 273$

من الملاحظة إلى النموذج

المول وعدد أفوجادرو، الجزيئات صغيرة جدًا وعددها كبير جدًا بحيث لا يمكننا عدّها واحدةً تلو الأخرى، لذلك نستخدم حزمًا (كميات) منها بدلًا من ذلك.

المول هو هذه الحزمة، وحجمها محدد بدقة. ويمكنك وزن عينة على ميزان عادي لمعرفة عدد المولات الموجودة فيها.

ثابت أفوجادرو N_A هو عامل التحويل بين المول وعدد الجزيئات؛ أي نضرب كمية المادة بالمولات في N_A للحصول على العدد الفعلي للجزيئات، ثم يمكننا القسمة عليه للعودة إلى عدد المولات.

ولهذا السبب تُكتب قوانين الغازات بوحدة المول؛ فهي الطريقة الوحيدة لتحويل عدد الجزيئات إلى عدد يمكن التعامل معه في المعادلات ويُعبَّر عن التجمعة التي تضم 6.02×10^{23} جسيمًا بمول واحد، ورمزه .mol. وتسمى الكمية المقاسة بالمول «كمية المادة». ويسمى العدد $6.02 \times 10^{23}\ mol^{-1}$ بعدد أفوجادرو (N_A). فالمول وحدة قياس لعدد هائل من الجزيئات في عينة الغاز.

الحالة القياسية ومعادلة الحالة

تسمى حالة الغاز عند 0 °C، أي 273K، وضغط 1 atm (يساوي الضغط الجوي) بالحالة القياسية. وفي هذه الحالة يشغل المول الواحد من أي غاز مثالي، بصرف النظر عن نوعه، حجمًا مقداره 22.4 L. الغاز المثالي الذي كمية مادته n [mol] وضغطه P [Pa] وحجمه V [m^3] ودرجة حرارته T [K] يخضع للعلاقة $PV = nRT$. وتسمى معادلة الحالة للغاز المثالي. و R هو الثابت العام للغازات، وقيمته التقريبية 8.3 J/(mol·K) لجميع الغازات.

شكل (3.2.1): يشغل مول واحد من أي غاز مثالي حجم 22.4 L في الحالة القياسية عند 0°C وضغط 1 atm.

حقيقة أساسية

المول الواحد يضم 6.02×10^{23} جسيمًا، وعدد أفوجادرو $N_A = 6.02 \times 10^{23}\ /mol$.

مصطلح

كمية المادة هي كمية العينة المقاسة بالمولات، وتعبّر عن عدد الجزيئات الموجودة.

ملاحظة

يوجد أكثر من حالة مرجعية مستخدمة؛ ففي الكيمياء غالبًا ما تُستخدم درجة حرارة 25°C بدلًا من 0°C، وكل حالة منهما تعطي حجمًا مولياً مختلفًا.

لذلك، تحقق من الحالة المرجعية المقصودة في السؤال قبل أن تستخدم القيمة 22.4 L.

نقطة

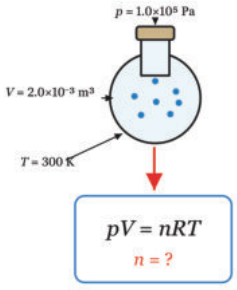
- يمثل 6.02×10^{23} جسيمًا مولًا واحدًا، ويسمى عدد الجسيمات في المول بعدد أفوجادرو (N_A).
- تُسمى حالة الغاز عند درجة حرارة 0°C (أي 273K) وضغط 1atm بالحالة القياسية (standard state).
- في الحالة القياسية، وبغض النظر عن نوع الغاز، فإن حجم الغاز لكل 1mol يساوي 22.4 L ويخضع الغاز المثالي لمعادلة الحالة $PV = nRT$ (حيث R يمثل الثابت العام لجميع الغازات $\approx$ 8.3 J/(mol·K)). ويجب التعويض بالضغط بوحدة Pa والحجم بوحدة m^3 ودرجة الحرارة المطلقة بالكلفن K.

صندوق المعادلات:

معادلة الحالة (القانون العام للغازات)	$PV = nRT$؛ P بوحدة Pa، وV بوحدة m^3، وT بوحدة K، وn بوحدة mol
الثابت العام للغازات	$R \approx 8.3\ J/mol{\cdot}K$ حيث يمثل الثابت العام لجميع الغازات
الحجم المولي القياسي درجة الحرارة	يشغل مول واحد من أي غاز مثالي حجم 22.4 L في الحالة القياسية عند 0°C وضغط 1 atm $T_K = 0\ C + 273$

مثال محلول:

الموقف:	أوجد كمية المادة بالمولات لغاز مثالي ضغطه 1.0×10^5 Pa وحرارته 27 °C وحجمه 2.0×10^{-3} m^3 لأقرب رقمين عشريين، علمًا بأن $R = 8.3$ J/(mol·K).
المعطيات والمطلوب:	$P = 1.0 \times 10^5$ Pa، و$T = 27 + 273 = 300$ K، و$V = 2.0 \times 10^{-3}$ m^3، و$R = 8.3$ J/(mol·K)؛ والمطلوب n.
التمثيل:	العينة في حالة واحدة تحددها القيم P وV وT. انظر الشكل 1-2-2 الدورق ومقياس الضغط والترمومتر التي توفر القراءات الثلاث
الاستراتيجية:	تطبيق معادلة الغاز المثالي (القانون العام للغازات)، نتحقق من وحدات قياس الضغط والحجم ودرجة الحرارة المطلقة وعدد المولات، ثم نعوّض في PV = nRT لإيجاد المجهول.
الحل الموضح:	$(1.0 \times 10^5) \times (2.0 \times 10^{-3}) = n \times 8.3 \times (27 + 273)$ $200 = n \times 8.3 \times 300 = n \times 2490$ $n = 200/2490 = 8.0 \times 10^{-2}$ mol.
منطقية الحل:	عند 0 °C و1 atm يشغل المول 22.4 L والحجم هنا 2.0 L فقط والضغط قريب من 1 atm؛ لذلك نتوقع كمية أقل كثيرًا من مول واحد، وتلائم النتيجة 8.0×10^{-2} mol هذا التوقع.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يجب تحويل درجة الحرارة السيليزية إلى الكلفن قبل التعويض في PV = nRT؟



وصف شكل (4.2.1): تُعوض القيم المعلومة P وV وT في المعادلة PV = nRT لإيجاد n.

حاول بنفسك:

أوجد كمية المادة لغاز مثالي ضغطه 1.0×10^5 Pa ودرجة حرارته 27 °C وحجمه 4.0×10^{-3} m^3 لأقرب رقمين عشريين، مع $R = 8.3$ J/(mol·K).

حاول:

١. حدد حجم غاز مثالي بوحدة m3 لأقرب رقمين عشريين إذا كان ضغطه 1.2×10^5 Pa ودرجة حرارته 373 K وكمية مادته 2.0 mol. استخدم $R = 8.3$ J/(mol·K).

٢. حدد كمية المادة بالمولات لغاز مثالي ضغطه 1.7×10^5 Pa ودرجة حرارته 27 °C وحجمه 6.0×10^{-3} m^3 لأقرب رقمين عشريين. استخدم $R = 8.3$ J/(mol·K).

في سياق جديد

يحتوي خزان غوص صلب من الفولاذ على عينة ثابتة من الهواء. ولأن الجدار المعدني يثبت الحجم، تتيح معادلة PV = nRT للغواص استخدام قراءة الضغط والحجم ودرجة الحرارة لحساب عدد مولات الهواء المتبقية، ومن ثم تقدير عدد الأنفاس. ومع فراغ الخزان تقل n؛ وعند ثبوت V وT ينخفض الضغط P بنسبة تناسب كمية الغاز المتبقية.

دورك الآن: خزان صلب حجمه 1.2×10^{-2} m^3 يحتوي غازًا عند ضغط 8.31×10^6 Pa ودرجة حرارة 300 K. استخدم PV = nRT و$R = 8.3$ J/(mol·K).

احسب كمية المادة داخل الخزان.

أسطوانة غوص فولاذية صلبة ذات حجم ثابت تحتوي جزيئات هواء متقاربة عند ضغط مرتفع، بينما تكبر فقاعات هواء الزفير مع صعودها لانخفاض الضغط المحيط

طبيعة العلم:

من الأصل: العدد الهائل «عدد أفوجادرو». تمثل كمية المادة بالمولات التي تظهر في معادلة الغاز المثالي هى وحدة قياس لعدد جزيئات الغاز. ويسمى عدد الجزيئات في مول واحد بعدد أفوجادرو، وهو نحو 6.02×10^{23}. ويشغل الغاز المثالي في الحالة القياسية 22.4 L، أي ما يقارب حجم إحدى عشرة زجاجة بلاستيكية كبيرة، بصرف النظر عن نوع الغاز ويحتوي بداخله هذا العدد الفلكي من الجزيئات التي تتحرك في كل اتجاه.

وصف الشكل (5.2.1): نحو إحدى عشرة زجاجة بلاستيكية كبيرة تشغل الحجم نفسه، 22.4 L، الذي يشغله مول واحد من الغاز ويضم قرابة 6.02×10^{23} جزيئًا.

الثابت العام للغازات R قيمة واحدة تنطبق على كل الغازات .حيث تم قياسه على تفسير سلوك الأكسجين والهيليوم والهواء على حد سواء، تُعد سمة مميزة للنموذج الفيزيائي الجيد: فهو يلخص العديد من الملاحظات المنفصلة في علاقة واحدة $PV = nRT$؛ إذ يجمع ملاحظات كثيرة في علاقة قابلة للاختبار بقياسات جديدة.

دورك: اقترح طريقة لقياس عدد أفوجادرو أو الثابت العام للغازات R باستخدام قراءات يمكن إجراؤها في معمل المدرسة.

سؤال الدرس، وإجابته:

بالنسبة للغاز المثالي، ترتبط كل من الضغط والحجم ودرجة الحرارة وكمية المادة بمعادلة حالة واحدة هي $PV = nRT$، حيث $R \approx 8.3\ J/(mol \cdot K)$ وهي ثابتة بالنسبة لكل غاز. وتُحسب كمية المادة n بالمول، حيث يبلغ عدد الجزيئات 6.02×10^{23} جزيء في المول الواحد، وتكون أي واحدة من الكميات الأربع ثابتة بمجرد تحديد الثلاثة الأخرى.

المشهد الذي بدأنا به.

تمرين:

١. لأقرب رقمين عشريين حدد حجم غاز مثالي بوحدة m^3 إذا كان ضغطه $1.2 \times 10^5\ Pa$ ودرجة حرارته 27 °C وكمية مادته 2.0 mol، مع استخدام $R = 8.3\ J/(mol \cdot K)$.

٢. لأقرب رقمين عشريين حدد درجة حرارة غاز مثالي بالدرجة السيليزية إذا كان ضغطه 4.0×10^4 Pa وكمية مادته 0.50 mol وحجمه $3.32 \times 10^{-2}\ m^3$ ، مع استخدام $R = 8.3\ J/(mol \cdot K)$.

٣. لأقرب رقمين عشريين حدد كمية المادة بالمولات لغاز مثالي ضغطه $3.0 \times 10^5\ Pa$ ودرجة حرارته 127 °C وحجمه $1.66 \times 10^{-2}\ m^3$، مع استخدام $R = 8.3\ J/(mol \cdot K)$.

الدرس ١-٣ — حركة جزيئات الغاز

؟ سؤال الدرس:
من المنظور المجهري (من المنظور الميكروسكوبي)، كيف تولّد حركة جزيئات الغاز ضغط الغاز؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** الدفع الذي يؤثر به جزيء واحد على الجدار في تصادم مرن واحد، ومقداره $2mv_x$، وتحسب عدد مرات اصطدامه بالجدار نفسه.

٢. **تنتقل** من جزيء واحد إلى N من الجزيئات لاشتقاق متوسط القوة F والضغط P المؤثرين على الجدار.

٣. **تشتق** علاقة النظرية الحركية للغازات $P = Nmv^2/3V$، وتفسر بها المنشأ المجهري للضغط.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تستمر

دع خيطًا رقيقًا من الدخان يدخل خلية زجاجية صغيرة، ثم راقبه بالمجهر. لا تستقر البقع المضيئة؛ بل تهتز وتندفع في مسارات عشوائية متقطعة، كأنها تُدفع من كل جانب. لا يلمسها شيء مرئي، وإنما تصدمها جزيئات الهواء المحيطة بها بصورة غير متساوية ومتواصلة. ونفس التأثير، حين يقع على جدار بدلًا من جسيم دخان، يتجمع ليكوّن الدفع المنتظم الذي نسميه الضغط.

شكل (1.3.1): جسيمات الدخان المرئية بالمجهر في حالة حركة مستمرة؛ فجزيئات الهواء تصطدم بها بشكل غير منتظم من كل جانب، وهذه التصادمات التي لا حصر لها، عندما تنتشر على جدار ما، تشكل الضغط.

تنبأ:

(أ) هل يؤثر جزيء واحد على الجدار طوال الوقت أم في لحظة التصادم فقط؟

(ب) إذا زادت عدد الجزيئات للضعف مع ثبوت سرعتها، فهل يتضاعف متوسط القوة على الجدار تقريبًا أم يقل للنصف أم يظل ثابتًا؟

الفكرة الرئيسية:

الدفع (Impulse):
هو التغير في كمية حركة الجسم الذي يكتسبه، ويُقاس بوحدة نيوتن·ثانية N.sec.
يحتوي غاز على N جزيئًا، كتلة كل منها m، وتتحرك بسرعة v داخل حجم V.
فما مقدار التأثير الذي تشعر به جدران الوعاء نتيجة اصطدام هذه الجزيئات بها؟
ضغط الغاز هو النتيجة التراكمية لكثرة التصادمات الجزيئية التي لا تحصى؛ حيث يُحدث كل تصادم مع الجدار دفعًا ضئيلًا، ويُشكل مجموعُها المنتظم القوةَ التي نقوم بقياسها.

استكشف — حبيبات في صندوق مهتز

ما ستفعله: فكّر في نموذج ميكانيكي للغاز يتكوّن من حبيبات خرز كثيرة تهتز داخل صندوق، وتصطدم بجدار خفيف حر الانزلاق، لتعرف كيف تتجمع التصادمات المنفصلة في دفع منتظم نسميه الضغط.

الزمن: 8 دقيقة

ما تحتاجه:

- صندوق صغير شفاف وصلب
- بطاقة خفيفة تنزلق بحرية لتكوّن أحد الجدران
- بضع عشرات من الحبيبات المتماثلة (خرز)
- مسطرة

مسطرة

بطاقة انزلاق

خرز

صندوق شفاف

الخطوات:

١ تصوّر N خرزة (حبيبة) متماثلة، كتلة كل منها m، تتحرك في الصندوق وتصطدم بالجدار المنزلق بسرعة v. في كل تصادم مرن تنعكس حركة الخرزة، فتنقل إلى الجدار كمية حركة تقارب 2mv.

٢ فكر في عدد المرات التي تعود فيها الخرزة الواحدة إلى الجدار نفسه: فكلما زادت سرعة الخرزة، زادت سرعة إكمالها لدورتها ذهابًا وإيابًا، وبالتالي يزداد عدد تصادماتها في الثانية مع زيادة v.

٣ في كل حالة من حالات النموذج اضرب كمية الحركة لكل تصادم في عدد التصادمات في الثانية للحصول على متوسط القوة المؤثرة على الجدار، وأدخله في العمود الأخير.

٤ اقرأ قيمة العمود الأخير من أعلى إلى أسفل وقارن بين الحالات لترى كيف تتغير القوة مع زيادة عدد الخرز و مع زيادة سرعتها.

الحالات	كمية الحركة في التصادم الواحد التي تتناسب مع mv (α mv)	وعدد التصادمات في الثانية الذي يتناسب مع v (α v)	ومتوسط القوة الذي يتناسب مع Nmv^2. (αNmv^2)
N خرزة بسرعة v	دون حمل		
2N خرزة بسرعة v	كتلة واحدة		
N خرزة بسرعة 2v	كتلتان		

حلّ ما جمعته:

(أ) بالنظر إلى عمود القوة المتوسطة، كيف يؤثر مضاعفة عدد الخرز في الدفع؟ وكيف تؤثر مضاعفة السرعة؟ أي التغيرين أشد؟ ولماذا تزداد قوة التصادمات وتكرارها مع السرعة؟

(ب) يتصرف جدار الغاز الحقيقي بالطريقة نفسها. تنبأ كيف أن ضغط الغاز يعتمد على عدد الجزيئات N وعلى السرعة، ثم قارن تنبؤك بالعلاقة $P = \frac{Nmv^2}{3V}$

اكتب تفسيرك في سطرين قبل قراءة الجزء التالي.

ملاحظة توضيحية:
تلامس كل خرزة الجدار لجزء من الثانية فقط، ومع ذلك فإن الضربات (التصادمات) تتوالى بوتيرة عالية لدرجة أن الجدار يجعل الدفع يبدو أملس وثابتًا. المسار الثاني. هناك عاملان لكل جدار — شدة كل ضربة (كمية الحركة الذي تنقله) وتواتر الضربات (عدد الضربات في الثانية) — وناتج ضربهما يساوي متوسط القوة.

حقيقة أساسية:
الدفع = التغير في كمية الحركة.
حيث يؤدي تصادم مرن واحد إلى عكس اتجاه vx، مما يؤثر على الجدار بدفع مقداره 2 mvx بوحدة N·s.

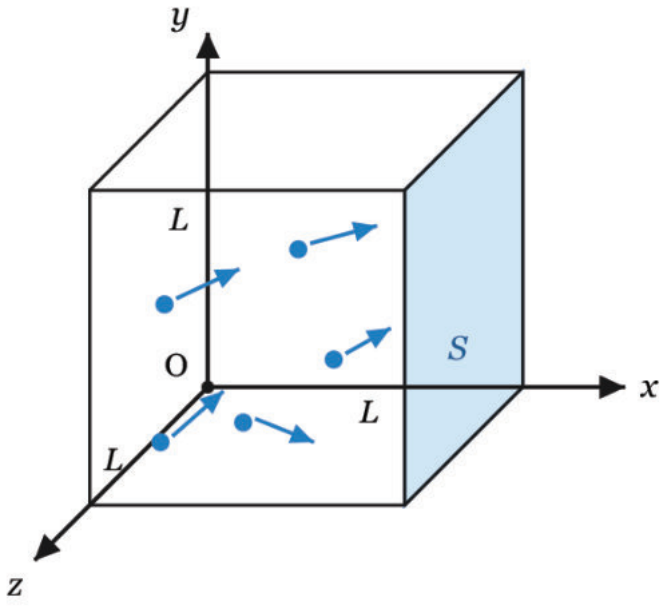
من الملاحظة إلى النموذج:

تصادم واحد يعطي دفعًا مقداره $2mv_x$:

لقد حددت تجاربك باستخدام حبات الخرز شكل الإجابة بالفعل: مضاعفة عدد حبات الخرز تضاعف الدفع، بينما مضاعفة السرعة تجعل الدفع أربعة أمثال قيمته؛ لأن الحبة الأسرع تصطدم بقوة أكبر وتعود في وقت أقصر.

ما ينقصنا الآن هو تحديد معامل التناسب، وهذا يتطلب متابعة حركة حبة واحدة خلال تصادم واحد.

نفترض غازًا مثاليًا عدد جزيئاته N جزيء، كتلة كل منها m، داخل وعاء مكعب طول ضلعه (m) L وحجمه $V^3 = L\,(m^3)$. انظر إلى السطح A العمودي على محور x. ونظرًا لأن التصادم مع الجدار مرن، فإن مركبة السرعة (v_x) العمودية على الجدار فقط هي التي ينعكس اتجاهها: بالنسبة للمركبة x تتغير السرعة من v_x إلى $-v_x$. ويكون التغير في كمية حركة الجزيء في اتجاه x هو ΔP_x $(- mv_x - mv_x = - 2\,mv_x)$ =، لذا فإن الجدار يؤثر على الجزيء بدفع مقداره $2\,mv_x$. وبموجب قانون الفعل ورد الفعل (قانون نيوتن الثالث)، يُؤثر الجزيء على الجدار بدفع مقداره $2\,mv_x$ بوحدة N·s.



شكل (2.3.1): وعاء مكعب حرفه L ومحاوره x وy وz، والوجه المظلل A عمودي على محور x، وتتحرك جزيئات الغاز في اتجاهات مختلفة.

تصادمات عديدة تعطي قوة وضغطًا ثابتين (متوسطة):

يتحرك الجزيء ذهابًا وإيابًا على محور x بسرعة ثابتة v_x، ويقطع بين تصادمين متتاليين بالسطح A مسافة L2، لذلك يصطدم به مرة كل $\frac{2L}{V_x}$ x ثانية. وفي زمن t يكون عدد التصادمات $\frac{v_x t}{2L}$، ويكون الدفع الكلي $\frac{mv_x^2 t}{L}$. وبالقسمة على t يكون متوسط القوة من جزيء واحد،

$$F_{\text{جزيء}} = \frac{mv_x^2}{L}$$

في حالة المجموع N من الجزيئات فإن ذلك يؤدي إلى استبدال v_x^2 بمتوسطها $\overline{v_x^2}$، لذا فإن القوة المؤثرة على السطح A هي

$$F = \frac{Nmv_x^2}{L}$$

حقيقة أساسية:

الدفع = التغير في كمية الحركة في تصادم مرن واحد، تنعكس مركبة السرعة v_x مما يجعل الجدار يكتسب دفعًا مقداره

؛ وحيث إن مساحة السطح هي $L2$، لذا فإن:

$$P = \frac{F}{L^2} = \frac{\frac{Nmv_x^2}{L}}{L^2} = \frac{Nmv_x^2}{L^3} = \frac{Nmv_x^2}{V}$$

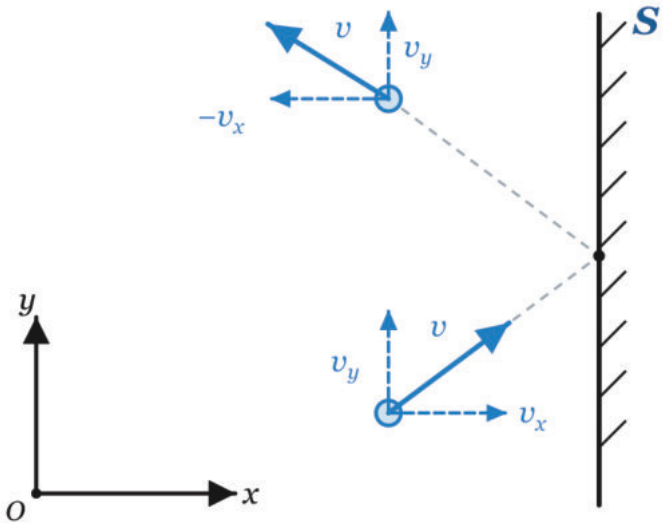
وحيث أن الحركة عشوائية (الجزيئات تتحرك في جميع الاتجاهات) فلا يوجد اتجاه مفضل، لذا فإن المحاور الثلاثة $(x، y، z)$ تحمل مساهمات متساوية، فإن متوسط مربع السرعة في الاتجاهات الثلاثة يكون متساويًا $\overline{V_x^2} = \overline{V_y^2} = \overline{V_z^2}$، وبما أن مربع السرعة اللحظية لجزيء واحد يساوي مجموع مربعات مركبات سرعته على المحاور الثلاثة (حسب نظرية فيثاغورث):

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$$

فإن نصيب كل محور مثل (x) يساوي ثلث السرعة الكلية:، $\overline{V_x^2} = \frac{\overline{V^2}}{3}$ وبالتعويض، نحصل على

$$P = \frac{Nmv_x^2}{3V}$$

من العلاقة السابقة نجد أن ضغط الغاز على سطح ما يعتمد على عدد الجزيئات الموجودة، وكتلة كل منها، ومربع متوسط سرعة حركتها، ولا شيء غير ذلك. لا يعتمد على مساحة الوجه الذي نظرنا إليه، ولا شكل الصندوق.



شكل (3.3.1): في التصادم المرن ينعكس v_x الذي يمثل المركبة العمودية على السطح A بينما تظل v_y المركبة الموازية للسطح A.

مصطلح

متوسط مربع السرعة V^2 (Mean square speed) هو متوسط مربعات سرعات الجزيئات، وجذره التربيعي $\sqrt{v^2}$ يسمى السرعة الجذرية المتوسطة التربيع.

ملاحظة:

الحركة العشوائية ليس لها اتجاه مفضل، ولذلك:

$$\overline{V_z^2} = \overline{V_y^2} = \overline{V_x^2}$$

وكذلك:

$$\overline{V^2} = 3\,\overline{V_x^2}$$

نقطة

الخطوات اللازمة لتحديد الضغط من حركة جزيئات الغاز:

- حدد الدفع الذي تمارسه جزيئة واحدة على الجدار في تصادم واحد.
- حدد الدفع الكلي الذي يمارسه جزيئ واحد على الجدار خلال الزمن t.
- حدد متوسط القوة التي يؤثر بها جزيء واحد على الجدار.
- حدد متوسط القوة الكلية التي تؤثر بها الجزيئات N على الجدار.
- حدد ضغط الغاز.

صندوق المعادلات:

التصادم الواحد	الدفع على الجدار $= 2mv_x$، ووحدته N·s.
جزيء واحد	عدد التصادمات في زمن $t = \frac{v_x t}{2L}$، ومنه $F_{\text{جزيء}} = \frac{mv_x^2}{L}$
N جزئيًّا	$F = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L}$ $P = \frac{F}{L^2} = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{V}$، $F = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L}$
الضغط الحركي	$\overline{v_x^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$ $P = \frac{Nm\overline{v^2}}{3V}$ ووحدته Pa
الضغط بدلالة الكثافة ρ $\rho = \frac{Nm}{V}$	$P = \frac{Nm\overline{v^2}}{3V} = \frac{\rho\,\overline{v^2}}{3}$

مثال محلول — اشتقاق العلاقة:

الموقف:

يملأ غاز مثالي مكوّن من N جزيء كتلة كل منها m وعاءً مكعبًا طول ضلعه L [m] وحجمه $V = L^3$ [m^3]

باستخدام محاور الإحداثيات x, y, z، لنأخذ بعين الاعتبار الضغط الواقع على السطح A العمودي على المحور x لا تتصادم الجزيئات مع بعضها البعض، بل تتحرك في خطوط مستقيمة بسرعة ثابتة حتى تصطدم بالجدران؛ وتكون التصادمات مع الجدران مرنة تمامًا، بحيث تظل السرعات دون تغيير. لنفرض أن لجزيء واحد سرعة v [m/s]، مركباتها v_x و v_y و v_z.

(أ) أوجد مقدار الدفع المؤثر على السطح «A» نتيجة تصادم واحد مع جزيء واحد.

(ب) أوجد مقدار الدفع المؤثر على السطح «A» من جزيء واحد خلال الفترة الزمنية [ثانية] «t».

(جـ) أوجد متوسط القوة F (N) التي يؤثر بها جزيء واحد على السطح «A»..

(د) أوجد متوسط القوة F (N) التي تؤثر على السطح A بواسطة N جزيئات، بافتراض أن متوسط v_x^2 يساوي $\overline{v_x^2}$.

(هـ) عبّر عن الضغط P (Pa) بدلالة V (m^3) ومتوسط مربع السرعات $\overline{v^2}$.

المعطيات والمطلوب:

المعطيات:

N، m، طول ضلع المكعب L، $V = L^3$، تصادمات مع جدران مرنة، مركبات السرعة v_x، v_y، v_z.

المطلوب:

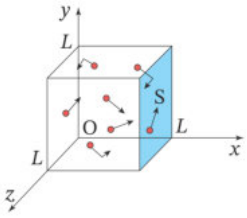
(أ) الدفع لكل تصادم على A.

(ب) الدفع على A خلال الزمن t.

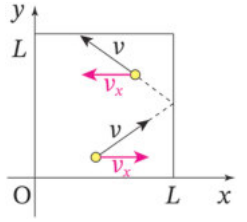
(جـ) F لجزيء واحد.

(د) F الكلية لـ N جزيء باستخدام $\overline{v_x^2}$.

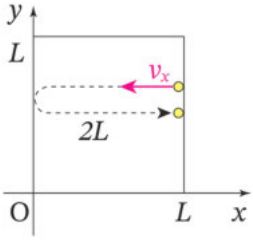
(هـ) P معبّرًا عنه بـ V و $\overline{v^2}$.



شكل (1.3.4) مثال محلول: تتحرك جزئيات في مكعب طول ضلعه L؛ كل تصادم الجدار المظلل S يعكس المركبة x لكمية حرمة الجزيء الجزيء.

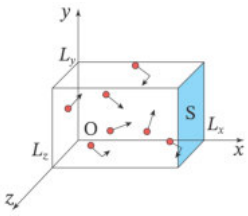


شكل (1.3.5) مثال محلول: يعبر جزيء صندوقًا طول ضلعه L ويرتد من الوجه عند L = x، بحيث تنعكس v_x، وتبقى السرعة v ثابتة.



شكل (1.3.6) مثال محلول: بين تصادمين على A يقطع الجزيء رحلة ذهاب وعودة مسافتها 2L، لذا فإنه يضرب A مرة واحدة كل $2L/v_x$.

التمثيل:	انظر الشكل 1-3-2 للاطلاع على المكعب والسطح A، والشكل 1-3-3 للاطلاع على انعكاس v_x عند الجدار، والشكل 1-3-4 للاطلاع على المسار ذهابًا وإيابًا بطول 2 L على طول المحور x.
الاستراتيجية	اتبع الخطوات الخمس لحل المسألة بالترتيب، ولاحظ ما يحتاجه كل منها: * النبضة تنتج عن التغير في كمية الحركة. * معدل حدوث التصادمات يُحسب من مسافة الرحلة ذهابًا وإيابًا 2L. * الخطوة الأخيرة من تساوي الخواص (Isotropy) — أي أنه لا يوجد اتجاه مميز — تعطينا: لذلك $\overline{v_x^2}=3\ \overline{v^2}$
الحل الموضح:	(أ) ينعكس v_x إلى $-v_x$، فيكون تغير كمية الحركة $-2mv_x$، وينقل الجزيء إلى A دفعًا موجب المقدار $2mv_x$ بوحدة قياس N·s (ب) الزمن بين تصادمين $2L/v_x$، وعدد التصادمات في زمن t يساوي $v_xt/(2L)$ الدفع الكلي $= 2m\,v_x \times v_xt/(2L) = mv_x^2t/L$ (جـ) الدفع = Ft، فإن جزيء F = mv_x^2/L (د) باستخدام متوسط $\overline{v_x^2}$ لذا فإن القوة المؤثرة على السطح A لجميع الجزيئات، هي كلية F = $\frac{Nm\overline{v_x^2}}{L}$ (هـ) $P = \frac{\text{كلية } F}{L^2} = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{L^3} = \frac{Nm\overline{v_x^2}}{V}$ وحيث أن الحركة عشوائية (الجزيئات تتحرك في جميع الاتجاهات) فلا يوجد اتجاه مفضل، لذا فإن المحاور الثلاثة (x ، y ، z) تحمل مساهمات متساوية، فإن متوسط مربع السرعة في الاتجاهات الثلاثة يكون متساويًا $\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$ فإن نصيب كل محور مثل (x) يساوي ثلث السرعة الكلية:، $\overline{v_x^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$ وبالتعويض، نحصل على $P = \frac{Nm\overline{v^2}}{3V}$
منطقية الحل:	وحدة $2m\,v_x$ هي N·s = kg·m/s. ووحدة Nmv^2/V هي $kg\cdot(m/s)^2/m^3$ Pa = N/m^2. ويزداد الضغط مع N ومع $\overline{v^2}$ ويقل مع زيادة V؛ وهو ما يتفق مع السلوك المتوقع.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يظهر العامل 1/3 في العلاقة $P = Nmv^2/(3V)$؟ أشر إلى الاتجاهات الثلاثة المتساوية.



شكل (7.3.1) محاولة 1: الاستنتاج ذاته في صندوق مستطيل ذي أضلاع L_x، L_y، L_z؛ مع الوجه A العمودي على المحور x.

حاول بنفسك: جزيء كتلته 5.0×10^{-26} kg ومركب سرعته في اتجاه محور(x) $v_x = 400$ m/s في داخل مكعب طول ضلعه 0.10 m.

أوجد:

(أ) الدفع الذي ينقله للسطح A في كل تصادم.

(ب) عدد المرات التي يصطدم فيها بالسطح A في الثانية.

(جـ) متوسط القوة التي تؤثر على السطح A.

حاول:

يملأ غاز مثالي مكوّن من N جزيء كتلة كل منها m صندوقًا مستطيلًا طول ضلعه $L_x\,[m]$، $L_y\,[m]$، $L_z\,[m]$ وحجمه $V = L_x \times L_y \times L_z\,[m^3]$ باستخدام محاور الإحداثيات x, y, z، لنأخذ بعين الاعتبار الضغط الواقع على السطح A العمودي على المحور x لا تتصادم الجزيئات مع بعضها البعض، بل تتحرك في خطوط مستقيمة بسرعة ثابتة حتى تصطدم بالجدران؛ وتكون التصادمات مع الجدران مرنة تمامًا، بحيث تظل السرعات دون تغيير. لنفرض أن لجزيء واحد سرعة v [m/s]، مركباتها v_x و v_y و v_z.

(أ) أوجد مقدار الدفع المؤثر على السطح «A» نتيجة تصادم واحد مع جزيء واحد.

(ب) أوجد مقدار الدفع المؤثر على السطح «A» من جزيء واحد خلال الفترة الزمنية [ثانية] «t».

(جـ) أوجد متوسط القوة F (N) التي يؤثر بها جزيء واحد على السطح «A».

(د) أوجد متوسط القوة F (N) التي تؤثر على السطح A بواسطة N جزيئات، بافتراض أن متوسط v_x^2 يساوي $\overline{v_x^2}$. (أ) أوجد مقدار الدفع المؤثر على السطح «A» نتيجة تصادم واحد مع جزيء واحد.

(هـ) عبّر عن الضغط P (Pa) بدلالة V (m^3) ومتوسط مربع السرعات $\overline{v^2}$.

في سياق جديد

الهواء الذي يبدو ساكنًا في غرفتك ليس ساكنًا على الإطلاق: فجزيئاته تندفع بسرعة تقارب سرعة رصاصة البندقية — ويكفي رقمان يمكن لأي شخص قياسهما لإثبات ذلك. قم بوزن حجم معروف من الهواء للحصول على كثافته، التي تبلغ حوالي $\rho = 1.3 kg/m^3$ عند درجة حرارة الغرفة، واقرأ الضغط من مقياس الضغط الجوي، الذي يبلغ حوالي $P = 1.0 \times 10^5 Pa$. وبتعبير النتيجة الحركية $P = \frac{Nmv^2}{3V}$ بدلالة تلك الكثافة، نحصل على $P = \frac{\rho\,\overline{v^2}}{3}$، لذا فإن هاتين القراءتين اليوميتين على نطاق واسع وحدهما تحددان سرعة الجسيمات الصغيرة جدًا بحيث لا يمكن رؤيتها.

دورك الآن: استخدم $P = \frac{1}{3}\rho V^2$ مع $\rho = 1.3\ kg/m^3$ و $P = 1.0 \times 10^5\ Pa$ **احسب** الجذر التربيعي لمربع متوسط السرعة.

شكل (5.3.1): تتحرك جزيئات الهواء كالرصاص بسرعة تقارب 500 m/s، وترتد مرتًا عن الجدار؛ وكل اصطدام يسهم في الضغط الكلي.

طبيعة العلم:

من الأصل: جزيئات الغاز تتحرك كالرصاص.

إن ضغط الهواء الذي نشعر به ناتج عن تصادم عدد لا يحصى من الجزيئات باستمرار بالجدران. في درجة حرارة الغرفة، تبلغ السرعة المتوسطة لجزيئات الهواء مثل النيتروجين والأكسجين حوالي 500 m/s وهي أسرع من سرعة الصوت وتضاهي سرعة رصاصة مسدس. التقدير أعلاه، $\times 4.8$ 102 m/s، هو الجذر التربيعي لمربع متوسط السرعة، وهي من نفس رتبة هذا المتوسط، حيث يتم استنتاجها من النموذج الحركي، وهو تطابق مذهل بين صورة مجهرية (ميكروسكوبية) وقياس ماكروسكوبي. ويشكل هذا الاستنتاج سلسلة من الافتراضات المثالية: جزيئات تشبه النقاط، وعدم وجود تصادمات بين الجزيئات، وجدران مرنة تمامًا، ومتوسط سلس يحل محل العديد من التصادمات المنفصلة. لا شيء من ذلك صحيح تمامًا، عملية حسابية مستحيلة لتريليونات من التصادمات إلى معادلة واحدة واضحة تتنبأ بالضغوط الحقيقية بشكل جيد.

هكذا تعمل النظرية الحركية — فهي تربط الحركة غير المرئية للجزيئات بكمية يمكننا قياسها بمقياس.

طرح دانيال برنولي هذا الاستنتاج (البرهان) بالذات في عام 1738 — الضغط باعتباره ارتطامًا لجزيئات لا حصر لها — وظلت هذه الفكرة دون تغيير تقريبًا لأكثر من قرن، حتى أعاد كلوسيوس في عام 1857 وماكسويل في عام 1860 بناءها وجعلوها قابلة للحساب. يمكن أن يكون النموذج صحيحًا ويظل ينتظر مائة عام للحصول على الدليل الذي يجعله جديرًا بالثقة.

دورك: اقترح قياسًا واحدًا يمكنك إجراؤه على غاز حقيقي لاختبار صحة تنبؤ النموذج $P = \frac{Nmv^2}{3V}$، واذكر الافتراض الذي من المرجح أن يفشل.

سؤال الدرس، وإجابته:

ينشأ ضغط الغاز عن الحركة المستمرة والخطية للجزيئات التي تصطدم بجدران الوعاء وترتد بشكل مرن. ويولد كل تصادم دفعة صغيرة تبلغ $2\,mv_x$، وتكون هذه التصادمات متكررة لدرجة أنها — عند حساب متوسطها على عدد N من الجزيئات وفي جميع الاتجاهات — تعمل كقوة ثابتة لكل وحدة مساحة: $P = \frac{Nmv^2}{3V}$. والضغط هو التعبير الكلي عن سرعة الجزيئات.

المشهد الذى بدأنا به

تمرين:

١. يُوضع مول واحد من جزيئات غازذات كتلة m (كجم) في وعاء مكعب طول ضلعه L (m) وحجمه $V = L3(m3)$. لا تصطدم الجزيئات ببعضها بعضًا، بل تصطدم بشكل مرن بالأسطح. مع تحديد المحاور x و y و z، انظر الضغط على السطح A العمودي على المحور x لنفترض أن مركبات السرعة لجزيء ما هي V_x، V_y، V_z. املأ كل فراغ بالتعبير المناسب

٢. في تصادم واحد مع السطح A، تكون الدفع الذي يعطيه هذا الجزيء للسطح A هو (a)، و عدد المرات التي يصطدم فيها بالسطح A في الثانية الواحدة هو. (b) إذن، فإن إجمالي الدفع الذي يعطيه للسطح A في الثانية الواحدة هو. (c) لنفترض أن عدد أفوجادرو هو N_A وأن متوسط V_x^2 يساوي $\overline{V_x^2}$. إذن فإن الدفع الكلي الذي تعطيه جميع الجزيئات لـ A في الثانية هو (d).

٣. إذا كانت F هي متوسط القوة المؤثرة على A من جميع الجزيئات، فإن (e) = F، وباستخدام $\overline{V_x^2} = \frac{\overline{V^2}}{3}$، فإن ضغط الغاز هو (f) = P.

الدرس ١ـ٤ — الطاقة الداخلية للغاز

؟ سؤال الدرس:

ما العوامل التي تحدد الطاقة الداخلية المختزنة في غاز؟

ستتعلم

١. **تحسب** كمية الطاقة فى غازمثالى (أحادي الذرة)، بالجول (J)، بالاعتماد فقط على كمية الغاز ودرجة حرارته المطلقة.

٢. **حدد** كيف تتغير تلك الكمية المخزنة عند تسخين العينة نفسها أو تبريدها بمقدار محدد من درجات الكلفن.

٣. **تنبأ** بدرجة الحرارة والضغط النهائيين عند فتح وعاءين معزولين على بعضهما واختلاط الغازات الموجودة فيهما.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

تحتوي قارورتان صلبتان معزولتان حراريًّا على كمية معينة من غاز أحادى الذرة وهو الهيليوم؛ إحداهما دافئة والأخرى باردة، وتصل بينهما وصلة بها محبس مغلق. لا يمكن لأي شيء أن يدخل أو يخرج، ولا تتسرب أي حرارة عبر العازل. وعندما يُفتح الصمام، يختلط الغازان وتكون درجة حرارتهما واحدة. لم يتم استخدام موقد ولا ثلج — فقط الغاز موجود في القارورتين فقط.

تنبأ:

(أ) بعد فتح الصمام، هل تكون درجة الحرارة النهائية أعلى من درجة حرارة الغاز الدافىء، أم أقل من درجة حرارة الغاز البارد، أم بينهما؟

(ب) هل تزداد الطاقة الداخلية الكلية للغاز الموجود في القارورتين، أم تقل، أم تظل كما هي؟

الفكرة الرئيسية:

الطاقة الداخلية Uهي مجموع طاقة الحركة لجميع جزيئات الغاز وطاقة الوضع بين القوى الناشئة بين جزيئات الغاز، وتُقاس بالجول (J)؛ وفي الغاز المثالي أحادي الذرة، تختفي هذه القوى، لذا الطاقة هى طاقة حركة.

استكشف — خلط الهواء الدافئ والبارد

ما ستفعله: اسمح للهواء الموجود في القارورتين المعزولتين عند درجتي حرارة مختلفتين بأن يختلط، ثم اختبر هل تساوي درجة الحرارة بعد الاتزان، واختبر ما إذا كانت درجة الحرارة النهائية هي متوسط درجتي الحرارة في البداية — وهو دليل على حفظ الطاقة الداخلية.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات):

- قارورتان صلبتان معزولتان ومتماثلتان في الحجم (A) و(B)
- ترمومتران
- حمام ماء دافئ
- أنبوبة توصيل مزودة بغطاء (أوقفل) ولفافة عازلة حول الجهاز.

حمام مائي

ترمومتر

زجاجة عازلة

الخطوات:

١ احبس كميتين متساويتين من الهواء في القارورتين الصلبتين المعزولتين، وثبّت ترمومترًا خلال سدادة كل قارورة، وسجّل قراءة درجة حرارة الغرفة في كل منهما.

٢ ضع القارورة A في حمام الماء الدافئ حتى تصبح قراءتها أعلى بوضوح من درجة حرارة الغرفة، واترك القارورة B باردة. سجّل درجتي الحرارة في البداية T_A و T_B

٣ لف القارورتين والأنبوب بالمادة العازلة، ثم افتح القفل وسجّل درجة الحرارة الواحدة T_{mix} التي تستقر عندها القارورتان. بعد ذلك احسب درجة حرارة المتوسط المتوقع $\frac{1}{2}(T_A + T_B)$

٤ كرر التجربة مع زيادة الفرق بين T_A و T_B

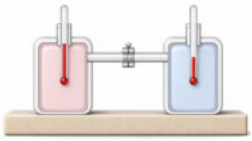
المحاولة	T_A °C دافئ	T_B °C بارد	T_{mix} °C بعد الاتزان	$\frac{1}{2}(T_A + T_B)$ °C
١				
٢				
٣				

حلّل ما جمعته:

(أ) من خلال المحاولات، كيف تقارن بين درجة الحرارة عند الاتزان Tmix ودرجة حرارة المتوسط المتوقع $\frac{1}{2}(T_A + T_B)$

(ب) القارورتان صلبتان (الغاز لا يبذل شغلًا)، معزولتان (فلا تخرج منهما حرارة)، ماذا تخبرك هذه المقارنة عن الطاقة الداخلية الكلية للغازين، وأين ذهبت الطاقة التي فقدها الغاز الدافئ؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.



وصف الشكل 1-4-2: قارورتان معزولتان من الهواء المحبوس، A دافئة وB باردة، وفي كل منهما ترمومتر. تصل بينهما وصلة مثبتة بقفل فوق قاعدة رغوية، ويؤدي فتح القفل إلى اختلاط الغازين.

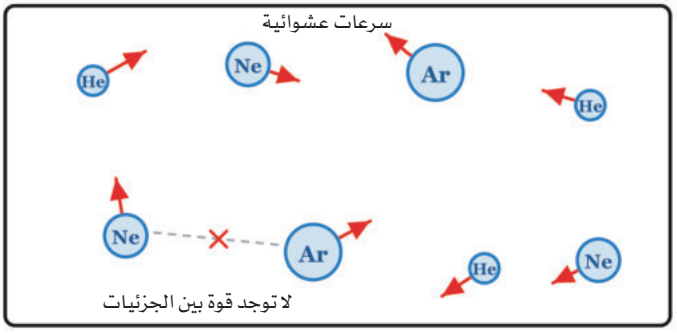
ملاحظة القياس:

اجعل مستودع كل ترمومتر معلقًا داخل الهواء المحبوس من دون أن يلامس الجدار الزجاجي، ولا تسجل القراءة إلا بعد توقفها عن التغير؛ فالقارورتان تصلان ببطء إلى قيمة ثابتة بسبب العزل.

من الملاحظة إلى النموذج:

أين يحتفظ الغاز بطاقته الداخلية

يمكن للغاز أن يخزن الطاقة في حالتين فقط. الأولى هي الحركة: فكل جزيء يتحرك بسرعة، وبالتالي يحمل طاقة حركة، وتزداد هذه الطاقة كلما ارتفعت درجة حرارة الغاز. والثانية هو الموضع: فالجزيئات تتجاذب عبر الفراغات الفاصلة بينها، ويؤدي تقريبها أو إبعادها عن بعضها إلى تغيير الطاقة المختزنة في هذا التجاذب، تمامًا كما يحدث عند إبعاد مغناطيس عن الحديد. وكلا الصورتين من الطاقة مرتبطة بالغاز ولا يمكن رؤية أي منهما من الخارج، ولهذا السبب يتم احتسابهما معًا ككمية حسابية واحدة. ويُعد الهيليوم والنيون والأرجون أبسط الحالات التي يمكن حسابها، لأن الذرة المنفردة لا تحتوي على روابط داخلية يمكن أن تتمدد، وفي الحالة المثالية، تكون الذرات المجاورة لها بعيدة جدًّا بحيث لا يمكن ملاحظة جاذبيتها.



وصف الشكل 1-4-3: ذرات منفردة من He وNe وAr تتحرك داخل صندوق في اتجاهات عشوائية وبسرعات عشوائية، ولا تؤثر بينها قوى بين جزيئية

استنتاج (2/3) — ولماذا لا يبقى أي شيء آخر

تتفق نتيجتان متوفرتان بالفعل. في الدرس 3-1، تم اشتقاق الضغط من التصادمات الجزيئية ،

$$P = \frac{Nm\overline{v^2}}{3V}$$

والتي يمكن إعادة ترتيبها لتصبح

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

أما معادلة الحالة (معادلة الغاز المثالي أو القانون العام للغازات) فتصف العينة نفسها من الخارج على أنها

$$PV = nRT$$

وبمساواة المعادلتين نحصل على

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

وبما أن طاقة الحركة الكلية للعينة تساوي

$$K.E = \frac{Nm\overline{v^2}}{2}$$

$$K.E = \frac{Nm\overline{v^2}}{3} = \frac{Nm\overline{v^2}}{3} \times \frac{3}{2} = \frac{3}{2}\,nRT = U$$

فالطاقة الداخلية لجزيئات الغاز لا تعتمد على الكتلة الجزيئية m ، والسرعة v، والحجم، والخصائص الكيميائية للغاز(نوع الغاز أحادي الذرة). لذا فإن قارورتين من غازات مثالية أحادية الذرة مختلفة بنفس الكمية ونفس درجة الحرارة تحتفظان بنفس الطاقة، وتسخين عينة بمقدار ΔT هي نفسها مهما كان نوع الغاز.

مصطلح:

حينما يتوقف نموذج الذرة الأحادية: حينما يتوقف نموذج الذرة الأحادية — فإن الجزيء المكون من ذرتين مثل O_2 يمكنه أيضًا أن يدور حول محوره ويهتز على طول رابطته، وكل طريقة من هذه الطرق الإضافية للحركة تستهلك نصيبها الخاص من الطاقة. لذا فإن الغاز ثنائي الذرة أو متعدد الذرات يخزن طاقة أكثر مما تخزنه ذرة واحدة عند نفس درجة الحرارة، والعامل (3/2) في هذا الدرس لم يعد مناسبًا له.

حيث يتوقف الحد المثالي — فالذرات الحقيقية تنجذب بعضها إلى بعض، لذا فإن نصيب الموضع لا يساوي صفرًا أبدًا. إذا ضغطت غازًا حقيقيًّا بقوة أو قمت بتبريده حتى يصبح سائلًا (عملية إسالة الغاز)، فإن الجزيئات تقضي وقتها قريبةً من بعضها: وعندئذٍ تعتمد الطاقة المختزنة على الحجم وكذلك على درجة الحرارة، ويكون الغاز في طريقه إلى التحول إلى سائل.

ماذا يحدث عندما لا يدخل أو يخرج أي شيء؟

ضع غازًا داخل جدران لا يمكن تحريكها ولا تسمح بمرور الحرارة — والجدار الذي لا يسمح بمرور الحرارة يُسمى جدارًا عازلًا للحرارة (أديباتيك)(adiabatic). لا يمكن لأي شيء أن يؤثر على هذا الحد الفاصل، لذا لا يوجد شغل مبذول ؛

ولا يمكن لأي شيء أن يتدفق عبر الجدار، لذا لا يسمح بمرور أي حرارة خلاله أيضًا. لا تصل الطاقة إلى الغاز المحبوس إلا في صورة حرارة أو شغل مبذول — وهذا ما يؤكده القانون الأول للديناميكا الحرارية، الموضح في الدرس 5-1 — لذا لم يعد هناك ما يُسجل في حساب طاقته. اربط بين وعائين من هذا النوع وستنطبق نفس الفكرة على كليهما في آن واحد: ما يفقده أحد الغازين يجب أن يكتسبه الآخر، لذا تُضاف الطاقتان ببساطة إلى القيمة التي كانتا عليها من قبل. وكتابة هذا المجموع مع وضع $3/2\,nRT$ أمام كل حد يسمح بشطب العامل المشترك، وتتضح أن درجة الحرارة النهائية هي متوسط درجتي الحرارة الابتدائيتين مرجحًا بعدد المولات التي جلبها كل وعاء — حيث تسحب العينة الأكبر النتيجة نحوها، وهو الحساب الذي تم إجراؤه في المثال المحلول.

نقطة

- تسمى الجزيئات المكوّنة من ذرة واحدة، مثل He وNe وAr، جزيئات أحادية الذرة.
- الطاقة الداخلية للغاز هي مجموع طاقات حركة الجزيئات وطاقة الوضع الناتجة عن القوى بين الجزيئات.
- في الغاز المثالي أحادي الذرة تنعدم القوى بين الجزيئات، ولذلك فإن الطاقة الداخلية للغاز هي ببساطة مجموع طاقاته الحركية.
- يعبر عن الطاقة الداخلية $U\,(J)$ لكمية $n\,(mol)$ من غاز مثالي أحادي الذرة عند درجة حرارة $T(K)$ بالمعادلة الآتية:

$$U=\frac{3}{2}\,nRT \quad \text{(حيث R تمثل الثابت العام للغازات)}$$

بالإضافة لذلك

- يعبر عن التغير في الطاقة الداخلية $\Delta U\,(J)$ عندما تتغير درجة حرارة كمية معينة الغاز بمقدار $\Delta T(K)$ بالصيغة التالية:

$$\Delta U=\frac{3}{2}\,nR\,\Delta T$$

- وفقًا للقانون الأول للديناميكا الحرارية، بالنسبة لغاز محبوس في وعاء بحجم ثابت، وعندما لا يحدث تبادل حراري مع الوسط المحيط، تُحفظ الطاقة الداخلية للغاز.

صندوق المعادلات:

الطاقة الداخلية لغاز مثالي أحادي الذرة	$U=\frac{3}{2}\,nRT$ (حيث R تمثل الثابت العام للغازات)
التغير في الطاقة الداخلية:	$\Delta U=\frac{3}{2}\,nR\Delta T$
معادلة الحالة	$PV=nRT$
حفظ الطاقة عند الخلط الأديباتي	$\frac{3}{2}\,n_A RT_A+\frac{3}{2}\,n_B RT_B=\frac{3}{2}\,(n_A+n_B)RT$
الثابت العام للغازات	$R\approx 8.3\ J/(mol.K)$

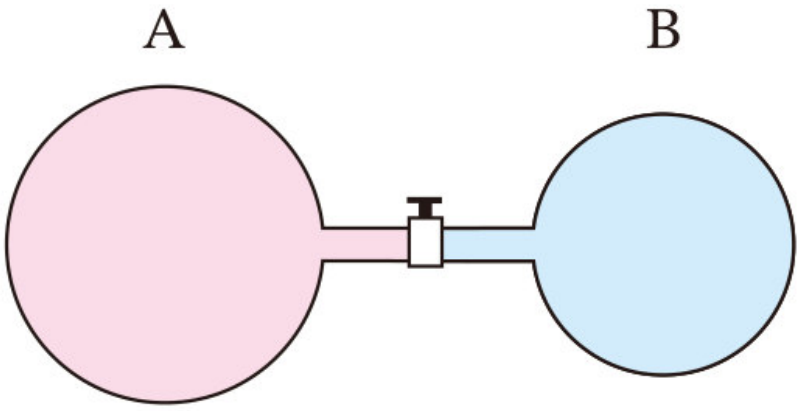
حقيقة أساسية:

القياس: كل مول واحد -عند درجة حرارة الغرفة (300 كلفن)- طاقةً مقدارها $(3/2)\times 1\times 8.3\times 300\approx 3.7\times 10^3$ جول؛ وهو ما يعادل تقريباً الطاقة اللازمة لرفع كتلة قدرها 5 كجم إلى ارتفاع 75 متراً. وإذا خفّضت قيمة درجة الحرارة (بالكلفن) إلى النصف، فإنك تخفّض هذا المخزون من الطاقة إلى النصف أيضًا.

ملاحظة:

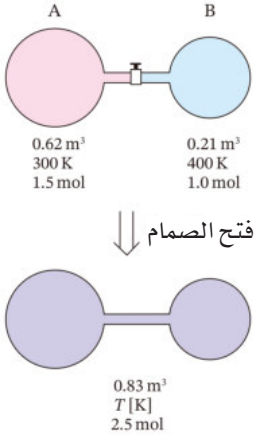
يمثل دائمًا الحرف $T(K)$، في معادلة الغاز المثالي درجة الحرارة المطلقة، لذا يجب تحويل القراءة بالدرجات المئوية (^oC) قبل إدخالها في المعادلة. الاستثناء الوحيد هو الفرق: فارتفاع بمقدار 10 درجات مئوية يمثل ارتفاعًا بمقدار 10 كلفن، لذا يمكن أخذ ΔT مباشرةً من التغير بالدرجات المئوية.

مثال محلول:



الشكل 4-4-1 – مثال توضيحي: الوعاءان الاديبايان A، B متصلان بأنبوبة رفيعة مزودة بصمام مغلق

الموقف:	الموقف وعاء أديباتي A حجمه $0.62\ m^3$ ووعاء أديباتي B حجمه $0.21\ m^3$، يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها صمام (محبس). والصمام مغلق، فيحتوي A على 1.5 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 300 K، ويحتوي B على 1.0 mol من نفس الغاز عند 400 K. أجب لأقرب رقمين عشريين عن الحالة بعد فتح الصمام ومرور زمن كافٍ: (أ) أوجد درجة الحرارة النهائية بالكلفن. (ب) أوجد الضغط النهائي بالباسكال. خذ $R = 8.3\ J/(mol{\cdot}K)$.
المعطيات والمطلوب:	الوعاء: A $V_A = 0.62\ m^3$، و$n_A = 1.5\ mol$، و$T_A = 300\ K$. الوعاء: B $V_B = 0.21\ m^3$، و$n_B = 1.0\ mol$، و$T_B = 400\ K$. وثابت الغاز $R = 8.3\ J/(mol{\cdot}K)$. المطلوب: T درجة الحرارة النهائية وP الضغط النهائي
التمثيل:	يوضح الشكل 4-4-1— الوعاءان A و B المتصلان بأنبوبة رفيعة بصمام مغلق — ويحتوي الشكل 4-4-1 على القيم التالية: الوعاء قبل الفتح، والغاز الخليط الذي يبلغ حجمه $0.83\ m^3$ ويحتوي على 2.5 mol عند درجة الحرارة T بعد الفتح.
الاستراتيجية:	الوعاءان أديباتيان وصلبان، ولذلك يختلط الغازان مع حفظ مجموع الطاقة الداخلية. نساوي الطاقة الداخلية قبل الخلط وبعده لإيجاد T، ثم نطبق $PV = nRT$ على الحجم الكلي وكمية المادة الكلية لإيجاد P.

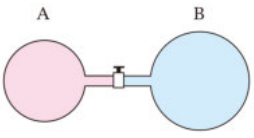


الشكل 1-4-5 – مثال توضيحي:
قبل فتح الصمام، كان الوعاءان $(0.62\ m^3، 300\ K، 1.5\ mol$ و$0.21\ m^3، 400\ K، 1.0\ mol)$
والغاز الخليط بعد ذلك $(0.83\ m^3، T، 2.5\ mol)$

الحل الموضح:	من حفظ الطاقة الداخلية $\frac{3}{2} \times 1.5 \times 8.3 \times 300 + (3/2) \times 1.0 \times 8.3 \times 400 =$ $\frac{3}{2} \times (1.5 + 1.0) \times 8.3 \times T.$ يُختصر العامل المشترك $8.3 \times (\frac{3}{2})$، فنحصل على: $(1.5 \times 300) + (1.0 \times 400) = 2.5 \times T.$ $850 = 2.5\ T \qquad T = 3.4 \times 10^2\ K = 340\ K.$ من معادلة الغاز المثالي: $PV = nRT$ $P \times (0.62 + 0.21) = 2.5 \times 8.3 \times (3.4 \times 10^2).$ $P = (2.5 \times 8.3 \times 340) \div 0.83 = 7055 \div 0.83 = 8.5 \times 10^3\ Pa.$
منطقية الحل:	تقع 340 K بين 300 K و400 K، وهي أقرب إلى 300 K لأن الوعاء A يحتوي على كمية أكبر من الغاز: 1.5 mol مقابل 1.0 mol للوعاء B، وهذا يطابق المتوسط الموزون بعدد المولات. ومع انتشار 2.5 mol في $0.83\ m^3$ عند 340 K يكون الضغط قرابة $8.5 \times 10^3\ Pa$، وهو أقل بكثير من الضغط الجوي، بما يلائم غازًا منخفض الكثافة في حجم كبير.
فسِّرها بنفسك:	اذكر في جملة واحدة لماذا تكون درجة الحرارة النهائية أقرب إلى 300 K منها إلى 400 K، ولماذا يمكن اختصار العامل $(\frac{3}{2})R$ من طرفي معادلة اتزان الطاقة الداخلية.

حاول بنفسك: يحتوي الوعاء الأديباتي (عازل للحرارة) A، حجمه $0.50\ m^3$، على 2.0 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 350 K، ويحتوي الوعاء الأديباتي (عازل للحرارة) B، حجمه $0.30\ m^3$، على 3.0 mol من الغاز نفسه عند 300 K. أوجد درجة الحرارة النهائية بعد فتح المحبس.

حاول:



الشكل 1-4-6 - مثال توضيحي: الوعاءان $(0.24\ m^3)$ و$(0.40\ m^3)$ يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها محبس

١) احسب الطاقة الداخلية بوحدة الجول لغاز مثالي أحادي الذرة عند $27^\circ C$ وكمية مادته 0.40 mol. خذ $R = 8.3\ J/(mol \cdot K)$، وأعط الإجابة لأقرب رقمين عشريين.

٢) حُبس 0.60 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 400 K في وعاء أديباتي، ثم تغيرت درجة حرارته إلى 300 K. عيّن التغير في الطاقة الداخلية بالجول لأقرب رقمين عشريين. خذ $R = 8.3\ J/(mol \cdot K)$..

٣) وعاء أديباتي A حجمه $0.24\ m^3$ ووعاء أديباتي B حجمه $0.40\ m^3$ يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها محبس. والمحبس مغلق، فيحتوي A على 2.0 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 320 K، بينما B مفرغ. بعد فتح المحبس ومرور زمن كافٍ، لأقرب رقمين عشريين:

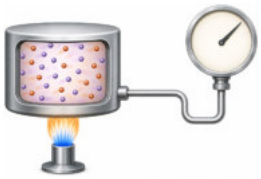
(أ) درجة حرارة الغاز بالكلفن.

(ب) ضغط الغاز بالباسكال. خذ $R = 8.3\ J/(mol \cdot K)$.

في سياق جديد — الهبوط عبر الرياح

لأن الطاقة الداخلية لغاز مثالي أحادي الذرة تعتمد فقط على درجة حرارته وكمية مادته، يعمل خزان صلب محكم يحتوي على هذا الغاز كمخزن للطاقة الحرارية. وإذا كان الخزان صلبًا فلا يبذل الغاز شغلًا عند تسخينه، وبحسب القانون الأول ترفع كل جول من الطاقة المزودة إليه طاقته الداخلية مباشرة: $\Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$. ولهذا يستجيب ترمومتر الغاز ثابت الحجم بصورة منتظمة؛ فالطاقة الداخلية المختزنة ترتبط وحدها بدرجة الحرارة المطلقة.

دورك الآن: يحتوي وعاء صلب معزول على 0.50 mol من غاز مثالي أحادي الذرة. زادت طاقته الداخلية بمقدار 1.5×10^3 J. استخدم: $\Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$ و $R = 8.3$ J/(mol·K) لتقدير الزيادة في درجة الحرارة ΔT



الشكل 1-4-7: في ترمومتر غازي ثابت الحجم يؤدي تسخين الخزان الصلب المحكم إلى زيادة سرعة الجزيئات وارتفاع الضغط المبين على المقياس.

طبيعة العلم

من الأصل - «الصفر المطلق»: أدنى درجة حرارة نهائية تتوقف عندها الحركة الحرارية. كلما انخفضت درجة حرارة الغاز الحركة الحرارية لجزيئاته أكثر هدوءًا وتناقصت الطاقة الداخلية. وإذا مددنا هذا الاتجاه بلا حد وصلنا إلى درجة حرارة يُفترض عندها أن تتوقف الحركة الحرارية للجزيئات تمامًا. وتسمى هذه الدرجة المنخفضة (النهائية) بالصفر المطلق، وتساوي $-273.15°C$ ويتخذ مقياس كلفن المطلق هذه النقطة مرجعًا له 0 K:

لاحظ أن الصفر المطلق يتم الوصول إليه من خلال توسيع نطاق النموذج، وليس عن طريق أي قياس: فلم تنجح أي تجربة على الإطلاق في تبريد المادة حتى الوصول إليه. وتشير العلاقة $U = (\frac{3}{2}) nRT$ إلى نفس الحد، لأنها تتنبأ بأن الطاقة الداخلية ستنخفض إلى الصفر عند $T = 0$. ويمكن للنموذج الفيزيائي القوي أن يحدد حدًا يقع خارج نطاق كل التجارب، ومع ذلك يظل ينظم ما يمكننا قياسه.

دورك الآن: اقترح سببًا واحدًا يمنع تبريد غاز حقيقي فعليًا حتى الصفر المطلق، واذكر افتراضًا واحدًا من افتراضات نموذج الغاز المثالي ينهار عند الاقتراب من هذا الحد.

سؤال الدرس، وإجابته:

الطاقة الداخلية المختزنة في الغاز هي الطاقة الكلية لجزيئاته: طاقة حركتها مضافًا إليها طاقة الوضع الناتجة عن القوى بين الجزيئية. وفي الغاز المثالي أحادي الذرة تنعدم القوى بين الجزيئات، ولذلك تتحدد الطاقة المختزنة بالكامل بكمية المادة ودرجة الحرارة المطلقة وفق $U = (\frac{3}{2}) nRT$. ويؤدي تغير درجة الحرارة إلى $\Delta U = (\frac{3}{2}) nR\Delta T$، وتُحفظ هذه الطاقة في وعاء صلب أديباتي (عازل للحرارة).

تمرين:

(أ) عيّن الطاقة الداخلية U بوحدة الجول لغاز مثالي أحادي الذرة عند درجة حرارة T_0 بوحدة الكلفن وكمية مادة n بوحدة المول، إذا كان الثابت العام للغازات R بوحدة $J/(mol \cdot K)$.

(ب) ما الطاقة الداخلية بوحدة الجول لغاز مثالي أحادي الذرة عند $27^{\circ}C$ وكمية مادته 0.60 mol؟ خذ $R = 8.3\ J/(mol \cdot K)$، وأعط الإجابة لأقرب رقمين عشريين.

(جـ) حُبس 0.20 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 100 K في وعاء أديباتي، ثم تغيرت درجة حرارته إلى 300 K. ما التغير في الطاقة الداخلية بوحدة الجول؟ خذ $R = 8.3\ J/(mol \cdot K)$، لأقرب رقمين عشريين.

(د) وعاء أديباتي A حجمه $0.62\ m^3$ ووعاء أديباتي B حجمه $0.21\ m^3$ يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها محبس مغلق. يحتوي A على 14 mol من غاز مثالي أحادي الذرة عند 300 K، ويحتوي B على 6.0 mol من الغاز عند 400 K. بعد فتح المحبس ومرور زمن طويل، أجب لأقرب رقمين عشريين:

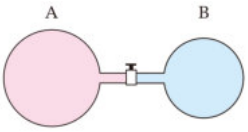
١) ما درجة حرارة الغاز بالكلفن؟

٢) ما ضغط الغاز بالباسكال؟ خذ $R = 8.3\ J/(mol \cdot K)$.

(د) وعاء أديباتي A حجمه V_1 بوحدة m^3 ووعاء أديباتي B حجمه V_2 بوحدة m^3. يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها محبس مغلق يحتوي A على n_1 [mol] من غاز مثالي أحادي الذرة عند T_1 K. إذا كان ثابت الغاز R بوحدة $J/(mol \cdot K)$، فعيّن درجة الحرارة T بالكلفن والضغط P بالباسكال بعد فتح المحبس ومرور زمن كافٍ في كل حالة.

١) كان الوعاء B مفرغًا قبل الفتح.

٢) كان الوعاء B يحتوي قبل الفتح على n_2 [mol] من غاز مثالي أحادي الذرة عند T_2[K].



الشكل 8-4-1 تمرين 4: الوعاءان $(0.62\ m^3)$ و $(0.21\ m^3)$ يصل بينهما أنبوبة رفيعة بها محبس

الدرس ١–٥ — تغيرات حالة الغاز والحرارة والشغل

؟ سؤال الدرس:

كيف تتغير حالة الغاز عندما تُزوَّد إليه حرارة أو يُضغط؟

ستتعلم

١. **تحسب** طاقة الغاز المحبوس، مع التحويل بين الكميات المرتبطة بالغاز وتلك المرتبطة بالوسط المحيط دون تغيير اى اشارة

٢. **تحدد** أي بند من بنود هذا الحساب يُستبعد بناءً على العناصر التي تحددها المسألة، والحصول على البند الميكانيكي من الحجم الذي يكتسحه المكبس.

٣. **توقع** التغير في درجة الحرارة لكمية غاز عند ضغط الغاز أو تمدده بينما تظل الحرارة دون فقد .

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

أغلق فوهة مضخة دراجة بإصبعك، وادفع المكبس إلى الداخل بقوة وسرعة. لا يلامس الهواء المحبوس أي لهب، ومع ذلك تسخن أسطوانة المضخة بوضوح قرب الطرف المغلق. لم تضف حرارة؛ بل بذلت شغلًا بضغط الهواء، فارتفعت درجة حرارته. يمكن أن يؤدي ضغط الغاز بسرعة وتسخينه إلى بقاءه في نفس الحالة الأكثر درجة حرارة .

الفكرة الرئيسية:

تصل الطاقة الداخلية إلى غاز محبوس في صورة حرارة Q_{in} [J] أو شغل مبذول W_{out} [J].

في أي اتجاه ينتقل مخزون الطاقة الداخلية U [J] في كل حالة؟

وصف الشكل 1-5-1: مضخة دراجة محكمة؛ يغلق إصبع الفوهة بينما يُدفع المكبس إلى الداخل، فينضغط الهواء المحبوس ويسخن.

تنبأ:

(أ) عند دفع المكبس سريعًا إلى الداخل والفوهة مغلقة، هل تزداد الطاقة الداخلية للهواء المحبوس أم تنقص أم تظل ثابتة؟

(ب) إذا سمحت بدلًا من ذلك للغاز بالتمدد من دون أن تدخل إليه حرارة أو تخرج منه، فهل ترتفع درجة حرارته أم تنخفض أم تظل ثابتة؟

استكشف — اضغط الهواء المحبوس واقرأ الحرارة

ما ستفعله: قِس تغير درجة حرارة كمية محكمة من الهواء عندما تبذل عليها شغلًا بضغطها من دون إضافة حرارة، لتلاحظ أن الشغل وحده يرفع طاقتها الداخلية.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات):

- مضخة دراجة
- إصبع أو غطاء لإحكام الفوهة
- شريط لقياس درجة الحرارة يُلصق على السطح
- مسطرة لتحديد مسافة دفع ثابتة.

مسطرة

شريطة قياس الحرارة

مضخة دراجة

الخطوات:

١ أغلق الفوهة بإصبعك، وثبّت شريط درجة الحرارة على الأسطوانة قرب الطرف المغلق، واقرأ درجة الحرارة الابتدائية قبل T.

٢ ادفع المكبس سريعًا خلال المسافة الثابتة المحددة، بحيث لا تتسرب حرارة تُذكر؛ (المحاولة 1). واقرأ درجة الحرارة النهائية بعد T فورًا.

٣ اترك الأسطوانة حتى تبرد وتعود إلى حالتها الأولى، ثم كرر الدفع ببطء خلال عدة ثوانٍ؛ (المحاولة 1). وبعد ذلك، مع بقاء الهواء مضغوطًا، حرر المكبس واترك الغاز يتمدد؛ (المحاولة 3)، ثم اقرأ درجة الحرارة مرة أخرى.

٤ احسب لكل محاولة قبل T – بعد T = ΔT وسجّل إشارتها في العمود الأخير.

المحاولة	الفعل	T قبل °C	T بعد °C	ΔT = T بعد + T قبل (°C)
١	ضغط سريع			
٢	ضغط بطيء			
٣	تمدد			

وصف الشكل 1-5-2: مضخة محكمة الغلق عند المخرج، وشريط حرارة مثبت قرب الطرف المحكم، ويد تدفع المكبس لتبذل شغلًا على الغاز المحبوس.

ملاحظة قياس:
اقرأ الشريط خلال ثانية واحدة من الدفع؛ فالأسطوانة الدافئة تبدأ فورًا في تسريب الحرارة إلى الغرفة، وقد تخفي القراءة البطيئة الارتفاع. واتركها تبرد تمامًا إلى درجة حرارة الغرفة قبل كل محاولة جديدة.

حلّل ما جمعته:

(أ) انظر إلى العمود الأخير: في أي المحاولات تكون ΔT موجبة، وفي أيها تكون سالبة؟ وكيف تقارن إشارة ΔT في الضغط السريع بإشارتها عند تحرير المكبس؟

(ب) لا يلامس الهواء اللهب، ولذلك ($Q_{in} = 0$) ماذا تخبرك ΔT الموجبة عن الشغل المبذول على الغاز وعن طاقته الداخلية؟ وتنبأ بإشارة ΔU عندما يتمدد الغاز ويدفع المكبس إلى الخارج.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

بوابتان، حساب واحد

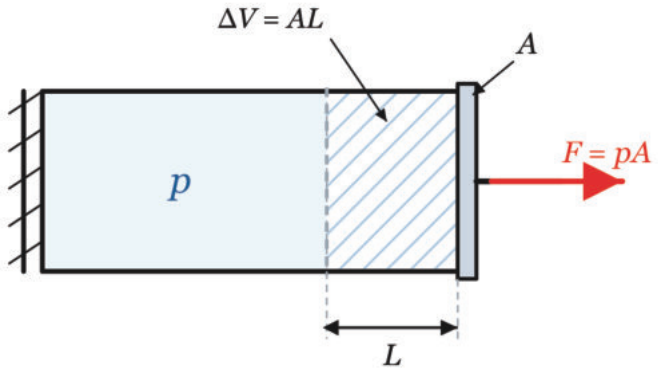
تصل الطاقة إلى الغاز المحبوس عبر طريقتين (فتحتين) بالضبط ولا غيرهما. إحداهما حرارية: حيث يكون الجدار أبرد أو أكثر سخونة من الغاز، فتتسرب الطاقة خلاله دون أي حركة. والأخرى ميكانيكية: شيء ما يدفع الحدود، أو يدفعها الغاز بدوره. وأي شيء يصل خلال أي من الفتحتين لا يجد مكانًا آخر يذهب إليه، لذلك ينتهي به المطاف في الطاقة المختزنة الذي قيس في الدرس السابق — وهذا هو كل ما يؤكده القانون الأول للديناميكا الحرارية.. إنها مسألة حسابية أكثر منها اكتشافًا يتعلق بالغازات، وستكون النتيجة نفسها بالنسبة لزنبرك أو بطارية.

ما يجعل الأمر يبدو أصعب مما هو عليه، هو أن كل فتحة يمكن وصفها من أي جانب من جانبي الجدار. فكل جول يمتصه الغاز هو جول يفقده اللهب؛ وكل جول يستهلكه الغاز لدفع المكبس هو جول يكتسبه المكبس. لذا فإن كل كمية في هذا الدرس تأتي في زوج متطابق يختلف عنصره الآخر بعلامة السالب ولا شيء غير ذلك.

حدد الغاز كنظام قبل أن تدون أي شيء، واربط كل رمز به، واعتبر الإجابة السالبة اتجاهًا — خروج الطاقة — بدلاً من اعتبارها خطأً.

أوقف تشغيل أحد المصطلحات، فيظهر تغييرٌ للمسمى.

كل تغيير من التغييرات الأربعة المسمى هو نفس الحساب مع إيقاف أحد المتغيرات، ويكمن الاهتمام في تحديد أي بند تم إيقافه ولماذا. ثبّت الحجم ولن يتغير الحد الفاصل أبدًا (العملية الايزوكورية isochoric)؛ فالقوة التي لا تحرك شيئًا لا تنقل شيئًا، لذا لا يوجد شغل ميكانيكي وتظهر كل الطاقة الحرارية على شكل ارتفاع في درجة الحرارة. ثبّت الضغط بدلاً من ذلك (العملية الايزوبارية isobaric)، ويمكن قراءة الشغل الميكانيكي من تغير الحجم وحده: يضغط الغاز على مكبسه ذي المساحة A بقوة PA ويدفعه لمسافة L، مما يعطي.



وصف الشكل 1-5-3: عند ضغط ثابت P، يدفع الغاز مكبسًا مساحته A مسافة L، ويؤدي بذلك شغل ميكانيكي

$$W = FL = PA \times L = P \times AL$$

«A.L» هي ببساطة الحجم الذي يتم إخراجه، لذا لا يؤثر شكل المكبس أو حجمه على النتيجة. إذا ثبتنا درجة الحرارة (العملية الايزوثرمية isothermal)، فإن الدرس 4-1 يقوم بالمهمة عنّا: يتم تحديد الطاقة الطاقة المختزنة للغاز المثالي بكمية المادة ودرجة الحرارة وحدهما، لذا فإن درجة

حقيقة أساسية:

القياس الشغل الميكانيكي: مكبس بمساحة $1.0 \times 10^{-3}\ m^3$ يتم دفعه مسافة 0.10 m مقابل ضغط يبلغ $1.0 \times 10^5\ Pa$ ينقل 10 J فقط — وهو مقدار ضئيل مقارنة بالحرارة التي يولدها الموقد في ثانية واحدة، ولهذا السبب فإن التمددات الطفيفة أقل أهمية بكثير في حساب الطاقة مقارنة بالتسخين القوي.

مصطلح:

ما مدى مثالية مصطلح «أدياباتيكي adiabatic»؟

— لا يوجد جدار يعزل الحرارة بشكل مثالي، لذا فإن هذا المصطلح هو في الحقيقة وصف للسرعة: يجب أن ينتهي التغير قبل أن يتسنى لكمية ملحوظة من الحرارة التسرب خلاله. نفس ضربة المضخة تكون شبه أدياباتيكية عندما تكون سريعة وشبه أيزوثرمية (درجة الحرارة ثابتة) عندما تكون بطيئة، وكل عملية حقيقية تقع في مكان ما بين هذين النموذجين المثاليين بدلاً من أن تكون في أي منهما.

الحرارة الثابتة تجمد الطاقة المختزنة، ويجب أن تخرج الحرارة التي تدخل مرة أخرى على شكل شغل مبذول في نفس اللحظة، جول مقابل جول، بينما يحافظ PV على قيمته. أما إذا أغلقت الغاز حراريًا بدلاً من ذلك (العملية الاديباتية adiabatic)، فلا يتبقى سوى الشغل الميكانيكي: كل ما يُفعل بالغاز يُضاف إلى الطاقة الطاقة المختزنة، ولهذا السبب يؤدي الضغط السريع إلى تسخين الغاز، بينما يؤدي التمدد السريع إلى تبريده مثل أسطوانة المضخة وعلبة الرذاذ (البخاخة) في يدك.

نقطة

- القانون الأول للديناميكا الحرارية يُعطى التغير في الطاقة الداخلية ΔU(J) للغاز بالصيغة التالية:

$$\Delta U = Q_{in} + W_{in}$$

حيث Q_{in}(J) هي كمية الحرارة التي يمتصها الغاز (المكتسبة) و W_{in} (J) هي الشغل المبذول على الغاز.

لنفترض أن كمية الحرارة المنبعثة من الغاز (المفقودة) هى Q_{out}(J)، فإن $Q_{out} = -Q_{in}$،

ولنفترض أن الشغل المبذول بواسطة الغاز هو W_{out} (J)، فإن $W_{out} = -W_{in}$

- التغير ثابت الحجم (التغير مع الحفاظ على حجم الغاز ثابتًا) (العملية الايزوكورية)، في التغير ثابت الحجم (لا يوجد شغل مبذول بواسطة الغاز) $W_{out} = 0$
- التغير ثابت الضغط (التغير مع الحفاظ على ضغط الغاز ثابتًا) (العملية الايزوبارية)، في التغير ثابت الضغط $W_{out} = P\,\Delta V$
- التغير ثابت درجة الحرارة (التغير مع الحفاظ على درجة حرارة الغاز ثابتة)) العملية الايزوثرمية)، في التغير ثابت درجة الحرارة ($\Delta U = 0$) لذا $W_{out} = Q_{in}$

في العملية الايزوثرمية (التغير ثابت درجة الحرارة) لمعادلة الغاز المثالى ثابت $= PV$

- العملية الاديباتيكية (العزل الحرارى) (لا يوجد انتقال للحرارة) (لا يفقد او يكتسب حرارة) لذا $W_{in} = Q_{in}$ ، $\Delta U = 0$

صندوق المعادلات:

القانون الأول	$\Delta U = Q_{in} + W_{in}$
العملية الايزوكورية (ثابت الحجم)	$W_{out} = 0 \Rightarrow \Delta U = Q_{in}$
العملية الايزوبارية (ثابت الضغط)	$W_{out} = P\Delta V$ $W = FL = PA \times L = P \times AL = P\Delta V$
العملية الايزوثرمية (ثابت درجة الحرارة)	$\Delta U = 0 \Rightarrow W_{out} = Q_{in}$
العملية الاديباتية (العازل حراريا)	$Q_{in} = o \Rightarrow W_{out} = \Delta U$

ملاحظة:

تُمنح الإشارات هنا ميزات كثيرة مقارنةً بالفيزياء. قبل إجراء أي تعويض، اكتب الكمية التي حددت لك المسألة — الحرارة الداخلة إلى الغاز (الحرارة التى يمتصها الغاز) أو الخارجة منه (الحرارة المنبعثة من الغاز)، أو الشغل المبذول على الغاز أو المبذول بواسطة الغاز — وقم بتحويلها إلى * القاعدة المتبعة أولاً. الغاز المتمدد يعطي دائمًا Win < 0، لذا فإن الانضغاط الذي يرفع درجة الحرارة والتمدد الذي يخفضها هما نفس المعادلة التي تُقرأ في اتجاهين مختلفين.

مثال محلول:

الموقف:	عيّن ما يأتي لأقرب رقمين عشريين (أ) لكل تغير، عيّن الشغل المبذول على الغاز W بالجول والتغير في الطاقة الداخلية ΔU بالجول ١- زُوّد غاز بـ 45 J من الحرارة عند حجم ثابت ٢- زُوّد غاز بـ 70 J من الحرارة عند ضغط ثابت 1.0×10^5 Pa، وتمدد حجمه بمقدار 3.0×10^{-4} m^3 ٣- زُوّد غاز مثالي بـ 75 J من الحرارة عند درجة حرارة ثابتة. (ب) يتمدد غاز داخل وعاء أديباتي (عازل للحرارة)؛ فإذا كان الشغل الذي بذله الغاز 45 J، فعيّن ΔU.
المعطيات والمطلوب:	نتخذ الغاز نظامًا. (أ) ١- $Q_{in} = 45$ J والحجم ثابت. ٢- $Q_{in} = 70$ J، و$P = 1.0 \times 10^5$ Pa، و$\Delta V = 3.0 \times 10^{-4}$ m^3. ٣- $Q_{in} = 75$ J ودرجة الحرارة ثابتة. (ب) $Q_{in} = 0$: لأن العملية أديباتية، و $W_{out} = 45$ J
التمثيل:	انظر الشكل 1-5-3 للاطلاع على الحالة الإيزوبارية (ii)، حيث يبذل الغاز شغلًا $P\Delta V$ على المكبس. في كل جزء، حدد أي من Q_{in} و W و ΔU يحدده نوع التغير قبل إجراء التعويض.
الاستراتيجية:	نحدد الحرارة المزودة إلى الغاز والشغل الذي يبذله على الوسط والتغير في طاقته الداخلية، مع الانتباه إلى الإشارات، ثم نعوض في $Q_{in} = \Delta U + W_{out}$، وهي مكافئة للعلاقة $\Delta U = Q_{in} + W_{out}$. والشغل المبذول على الغاز $W_{out} = -W_{out}$.
الحل الموضح:	(أ) ١- عند الحجم الثابت $\Delta U = Q_{in} + W = 45 + 0 = 45$ J. ثم $W = 0$ J، ولذلك $W_{out} = 0$ ٢- عند الضغط الثابت $W_{out} = P\Delta V = (1.0 \times 10^5) \times (3.0 \times 10^{-4}) = 30$ J ومن ثم يكون الشغل المبذول على الغاز $\Delta U = 70 - 30 = 40$ J ثم $W = W_{out} = -30$ J، ٣- في تغير متساوي الحرارة لغاز مثالي $\Delta U = 0$، ولذلك $W_{out} = Q_{in} = 75$ J، ومنه $W = -75$ J و $\Delta U = 0$ J (ب) الوعاء أديباتي، ولذلك $Q_{in} = 0$. والشغل الذي يبذله الغاز $W_{out} = 45$ J، ومن ثم $W = -45$ J، و $\Delta U = 0 + (-45) = -45$ J

منطقية الحل:	في (أ) ١- لا يُبذل شغل، فتتحول الحرارة كلها إلى طاقة داخلية ويسخن الغاز. ٢- يبذل الغاز J 30 في دفع حدوده، فلا يتبقى من J 70 لزيادة الطاقة الداخلية إلا J 40 ٣- لا تتغير الطاقة الداخلية عند ثبوت درجة الحرارة، فتخرج كل جول من الحرارة مرة أخرى في صورة شغل. (ب) لا تدخل حرارة، فلا يستطيع الغاز المتمدد دفع J 45 من الشغل إلا بفقد J 45 من طاقته الداخلية، ولذلك يبرد.
فسِّرها بنفسك:	لماذا تكون إشارة W، أي الشغل المبذول على الغاز، سالبة كلما تمدد الغاز؟ ولماذا يترك التغير متساوي الحرارة لغاز مثالي $\Delta U = 0$؟

حاول بنفسك: يمتص غاز عند ضغط ثابت 1.0×10^5 Pa مقدار J 60 من الحرارة، ويتمدد حجمه بمقدار 2.0×10^{-4} m^3. أوجد الشغل المبذول على الغاز W والتغير في الطاقة الداخلية ΔU.

حاول:

١- عيّن ما يأتي لأقرب رقمين عشريين لكل تغير، عيّن الشغل المبذول على الغاز W بالجول والتغير في الطاقة الداخلية ΔU بالجول

(i) عندما يزوَّد الغاز بـ J 30 من الحرارة عند حجم ثابت.

(ii) زُوّد غاز بـ J 75 من الحرارة عند ضغط ثابت 1.0×10^5 Pa، وتمدد حجمه بمقدار 3.0×10^{-4} m^3.

(iii) زُوّد غاز مثالي بـ J 60 من الحرارة عند درجة حرارة ثابتة.

٢- تمدد غاز في وعاء أديباتي. إذا كان الشغل الذي بذله الغاز J50 ، فعيّن التغير في طاقته الداخلية.

الشكل 1-5-4: عند نهاية شوط الانضغاط في محرك الديزل يُحصر الهواء في حيز صغير شديد السخونة، فتشتعل حزمة الوقود الدقيقة المرشوشة من الحاقن من دون شمعة إشعال.

في سياق جديد

لا تحتوي محركات الديزل على شمعة إشعال. ففي شوط الانضغاط يضغط المكبس الهواء داخل الأسطوانة بسرعة شديدة حتى لا تتسرب منه حرارة تُذكر؛ أي يحدث انضغاط أديباتي. ويتحول كل الشغل المبذول على الهواء إلى طاقة داخلية $\Delta U = W_{out}$، فترتفع درجة الحرارة إلى حد يكفي لاشتعال الوقود المرشوش في الهواء الساخن من تلقاء نفسه. والقانون الأول نفسه الذي يبرد الغاز المتمدد يسخن الغاز المضغوط.

دورك الآن: ضُغط الهواء أديباتيًّا داخل أسطوانة، وبُذل عليه شغل مقداره J 80. استخدم $Q_{in} = 0$ لإيجاد ΔU، واذكر هل يسخن الهواء أم يبرد.

وصف الشكل 1-5-5: مكبس نار؛ يؤدي دفع المكبس سريعًا إلى أسفل إلى ضغط الهواء المحبوس أديباتيًّا، فترتفع درجة حرارته إلى حد يشعل القطن بوميض

طبيعة العلم

من الأصل - «مكبس النار» الذي يشعل النار بضغط الهواء. ضع كمية صغيرة من القطن في أسطوانة شفافة مزودة بمكبس، ثم ادفع المكبس بقوة؛ فيشتعل القطن فجأة ويحترق. إن ضغط الغاز بسرعة عملية أديباتية يُبذل فيها شغل خارجي على الغاز، فتزداد طاقته الداخلية بشدة وترتفع درجة حرارته ارتفاعًا كبيرًا. وتستخدم محركات الديزل الآلية نفسها، إذ تحقن الوقود في هواء سخن بالانضغاط الأديباتي فيشتعل.

يمثل مكبس النار اختبارًا واضحًا لنموذج فيزيائي؛ فالقانون الأول يتنبأ بأنه عند انعدام انتقال الحرارة يجب أن يظهر كل الشغل المبذول على الغاز في صورة طاقة داخلية، ويجعل وميض القطن هذه الطاقة الخفية مرئية. وهكذا تستطيع تجربة واحدة قابلة للتكرار أن تحول معادلة مجردة إلى شيء يمكن رؤيته.

دورك الآن: اقترح جهازًا أو حدثًا يوميًّا يسخن غازًا أو يبرده أساسًا عن طريق بذل شغل عليه، لا بإضافة حرارة، وحدد هل العملية أقرب إلى الأديباتية أم إلى الايزوثرمية.

سؤال الدرس، وإجابته:

المشهد الذى بدأنا به

تتحدد حالة الغاز بطاقته الداخلية، ويوضح القانون الأول $\Delta U = Q_{in} + W_{in}$ طريقتين لتغييرها: تزويد الغاز بالحرارة، وبذل شغل عليه. وتتحدد الكميات المتغيرة بحسب ما يبقى ثابتًا: الحجم، حيث $W_{out} = 0$؛ أو الضغط، حيث $W_{out} = V\Delta P$ ؛

أو درجة الحرارة، حيث $\Delta U = 0$؛ أو تدفق الحرارة، ففي العملية الأديباتية $Q_{in} = 0$. ولذلك يمكن لضغط الغاز أن يسخنه مثلما يفعل تزويده بالحرارة.

تمرين:

(أ) عيّن ما يأتي لأقرب رقمين عشريين لكل تغير، عيّن الشغل المبذول على الغاز W بالجول والتغير في الطاقة الداخلية ΔU بالجول.

(i) عندما يزوَّد الغاز بـ 15 J من الحرارة عند حجم ثابت.

(ii) زُوّد غاز بـ 25 J من الحرارة عند ضغط ثابت 1.0×10^5 Pa، وتمدد حجمه بمقدار 4.5×10^{-4} m^3.

(iii) زُوّد غاز مثالي بـ 80 J من الحرارة عند درجة حرارة ثابتة.

(ب) زُوّد غاز بـ 35 J من الحرارة عند ضغط ثابت 1.0×10^5 Pa، وتمدد حجمه بمقدار 2.0×10^{-4} m^3. عيّن الشغل المبذول على الغاز W والتغير في الطاقة الداخلية ΔU.

(جـ) زُوّد غاز بـ 75 J من الحرارة عند حجم ثابت. عيّن الشغل المبذول على الغاز W والتغير في الطاقة الداخلية ΔU.

(د) تمدد غاز في وعاء أديباتي. إذا كان الشغل الذي بذله الغاز 35 J، فعيّن التغير في طاقته الداخلية.

الدرس ١-٦ — السعة الحرارية المولية

؟ سؤال الدرس:

ما مقدار الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة واحد مول من الغاز واحد درجة كلفنية ؟ ولماذا يختلف هذا المقدار عند ثبوت الحجم أو عند ثبوت الضغط؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. حدد -من خلال المسألة- الشرط اللازم تطبيقه أثناء تسخين الغاز، واختر السعة الحرارية المناسبة قبل التعويض بأي قيم عددية.

٢. حوّل بين السعتين الحراريتين للغاز نفسه باستخدام علاقة مايـر (Mayer's relation)، ووضّح -استناداً إلى حساب الطاقة- سبب اختلافهما بمقدار ثابت الغاز (R) تماماً.

٣. اذكر قيمتي السعة الحرارية لغاز أحادي الذرة بدلالة مضاعفات الثابت R، وبيّن ما يتغير عندما تتوقف الجزيئات عن كونها أحادية الذرة.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

ضع نفس مصدر الحرارة أسفل إناءين (قدرين). يحبس قدر الضغط المغلق (حلة الضغط) بخاره عند حجم يكاد يكون ثابتًا، فتؤدي الحرارة إلى ارتفاع سريع في الضغط ويمكن أن تتجاوز درجة حرارة الماء بداخله 100°C قبل أن يغلي. أما الإناء (القدر) المفتوح فيظل عند ضغط جوي ثابت؛ لذا تظل درجة حرارة الماء فيه عند 100°C وتخرج الحرارة الزائدة على شكل بخار؛ هذا الاختلاف اليومي يتعلق بالغليان — لكنه يستند إلى التمييز الذي يقوم عليه هذا الدرس. إذا حافظت على الغاز عند حجم ثابت، فإن كل جول يُزوَّد له يرفع درجة حرارته؛ أما إذا تركته يتمدد عند ضغط ثابت، ويدفع هواء الوسط المحيط فيستهلك جزءًا من تلك الحرارة في بذل هذا الشغل. أما إذا زودت كليهما بنفس مقدار الحرارة، فسيصبح أحدهما أكثر سخونة من الآخر (فلن يصلا إلى نفس درجة الحرارة).

شكل (1.6.1): مقدار كمية الحرارة نُزوّد قدر ضغط مغلقًا، حيث الحجم ثابت، وإناءً مفتوحًا، حيث الضغط ثابت. يسخن الغاز الذي لا يستطيع التمدد بدرجة أكبر

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) بعد تزويد العيّنتين بنفس لمقدار من كمية الحرارة، أيهما تصل إلى درجة حرارة أعلى: العينة ثابتة الحجم أم العينة ثابتة الضغط؟

(ب) في أي العيّنتين يبذل الغاز شغلًا على الوسط المحيط أثناء التسخين؟

حقيقة أساسية:

السعة الحرارية المولية (J/mol.K):

يحتاج رفع درجة حرارة واحد مول من الغاز بمقدار 1 K إلى مقدار مختلف من الحرارة عند ثبوت الحجم وعند ثبوت الضغط.

هل تتوافق قيم C_V (عند ثبات V) و C_p (عند ثبات P)؟

استكشف — مقدار الحرارة نفسه ووعاء ان

ما ستفعله: سخّن الغاز نفسه بمقدار الزيادة نفسه في درجة الحرارة داخل دورق ثابت الحجم وأسطوانة ذات مكبس حر الحركة، ثم قِس مقدار الحرارة الإضافية التي يحتاج إليها الجهاز ثابت الضغط.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات):

- دورق صلب ثابت الحجم
- أسطوانة مغلقة بمكبس حر الانزلاق ثابت الضغط
- سخان مزود بعداد للجول لتسخين عينة الغاز نفسها في كل جهاز
- ترمومتر لكل وعاء
- قيمة كمية الغاز n بالمول المحبوس في كل وعاء كما هي مدونة على الجهاز.

ترمومتر

سخان

أسطوانة مكبس

قارورة صلبة

الخطوات:

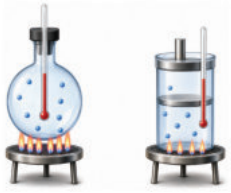
١ ضع الكمية نفسها n من الغاز نفسه في الدورق الصلب وفي أسطوانة المكبس، واجعل درجتي الحرارة الابتدائية متساويتين.

٢ سخّن كل عينة بالسخان المتماثل، واقرأ مقدار الحرارة المزودة حتى يرتفع الترمومتر بمقدار $T\Delta$ المختار. سجّل Q_V للدورق و Q_P للأسطوانة.

٣ احسب العمود المشتق $(Q_P - Q_V)/(n\Delta T)$، وهو مقدار الحرارة الإضافية لكل مول ولكل كلفن التي احتاج إليها الجهاز ثابت الضغط.

٤ كرر التجربة عند قيمة مختلفة لـ ΔT، وإذا أمكن عند قيمة مختلفة لـ n، ثم قارن العمود المشتق بين المحاولات.

المحاولة	Q_V (عند حجم ثابت) (J)	Q_P (عند ضغط ثابت) (J)	$(Q_P - Q_V) / (n\Delta T)$ [J/(mol.K)]
١			
٢			
٣			


الشكل (2.6.1): الغاز نفسه داخل دورق صلب ثابت الحجم وأسطوانة ذات مكبس ثابت الضغط، وفي كل منهما ترمومتر، ويُسخنان بسخانين متماثلين.

ملاحظة القياس:
استخدم قيمة n نفسها والزيادة المستهدفة ΔT نفسها في الوعاءين في كل محاولة، واترك المكبس يتحرك بحرية حتى يظل الضغط ثابتًا حقًا أثناء ارتفاعه.

حلّل ما جمعته:

(أ) في كل محاولة، أي الوعاءين احتاج إلى حرارة أكبر لتحقيق نفس $T\Delta$؟ وهل تظل قيمة $(Q_P - Q_V)/(n\Delta T)$ ثابتة عند تغيير $T\Delta$؟

(ب) تساوي هذه القيمة الثابتة ثابتًا معروفًا. ما هو؟ واستخدمه للتنبؤ بقيمة $C_P - C_V$ لأي غاز مثالي قبل دراسة علاقة ماير.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

إذا سألت عن مقدار الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة غاز بمقدار درجة واحدة، فإنك لم تطرح بعد سؤالًا صحيحًا: فالأمر يعتمد على ما يُسمح للغاز بفعله أثناء تسخينه. أما الكتلة المعدنية فلا يمكنها التحرك في أي اتجاه، لذا يكفي رقم واحد لوصفها. أما الغاز فيمكنه دفع حدوده إلى الخارج، وإذا فعل ذلك، فإن جزءًا من الطاقة التي تزوده بها يخرج مرة أخرى عبر

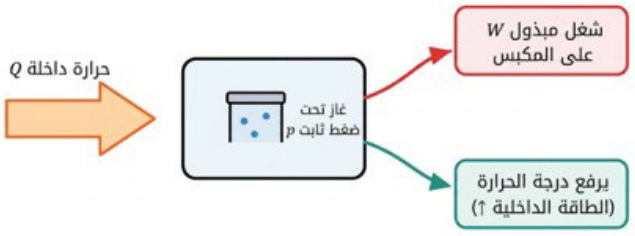
«الشغل الميكانيكي» الذي تعلمناه في الدرس السابق قبل أن يسجله مقياس الحرارة. ولذلك، فإن تجربتين دقيقتين على نفس الغاز بالذات تعطيان رقمين مختلفين — وكلاهما صحيح. تحتفظ الفيزياء بكليهما، وتربط كل رقم بالشرط الذي أدى إلى إنتاجه. إن ذكر مثل هذا الرقم لغاز ما دون تحديد ذلك الشرط يشبه ذكر طول دون وحدة قياس.

استنتاج الفرق بينهما

قم بإجراء التجربتين جنبًا إلى جنب على n مول ثم رفع درجة حرارتها بواسطة ΔT. مع تثبيت الحجم، لا يتحرك الحد الفاصل أبدًا، لذا فإن حساب الطاقة في الدرس 5-1 يحتوي على قيمة واحد، وكل جول يتم توفيره ينتهي به المطاف في المخزن: فالحرارة المطلوبة هي مجرد الزيادة في الطاقة الداخلية. أما عند تثبيت الضغط بدلاً من ذلك، فإن نفس الارتفاع في الطاقة المختزنة لا يزال مطلوبًا — بالنسبة للغاز المثالي، يتأثر الطاقة المختزنة بالحرارة وحدها، لذا لا يهم أي تجربة تجريها — لكن الغاز الآن يدفع مكبسه أيضًا ويبذل $P\Delta V$ في أثناء ذلك. اطرح إحدى التجربتين من الأخرى، وسيكون الفرق في الحرارة المزودة هو بالضبط هذا التعويض. ثم تحدد معادلة الحالة قيمته عند ضغط ثابت: $PV = nRT$

$$P\Delta V = nR\Delta T$$

لذا فإن الحرارة الزائدة لكل مول لكل كلفن تساوي R نفسها — ولا تبقى أي خاصية من خصائص الغاز المعين بعد القسمة، ولهذا السبب يُذكر هذا التناسب لكل غاز مثالي دفعة واحدة. تأتي القيمتان أحاديتا الذرة من نفس المصدر. حدد الدرس 4-1 الطاقة المختزنة الغاز المثالي أحادي الذرة من العلاقة $(\frac{3}{2}nRT)$، لذا فإن رفعه بمقدار ΔT يستلزم $(\frac{3}{2}nRT)$؛ عند الحجم الثابت، يمثل هذا الاجمالي، والقسمة على $n.\Delta T$ تعطي $(\frac{3}{2}R)$. وإضافة نصيب المكبس من العلاقة التي تم اشتقاقها للتو ترفعها بمقدار واحد إضافي، مما يعطي $(\frac{5}{2}R)$. وكلاهما مضاعفات خالصة لـ R دون أي أثر للهيليوم أو الأرجون فيهما — نتيجة الدرس 4-1 بشأن الطاقة المختزنة، تظهر هنا مرة أخرى تحت اسم مختلف.



الشكل شكل (3.6.1): عند الضغط الثابت، تنقسم الحرارة الداخلة Q إلى: جزء يرفع الطاقة الداخلية (درجة الحرارة)، وجزء آخر يبذل شغلًا على المكبس الصاعد.

نقطة

- الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مول واحد من الغاز بمقدار 1K هي سعته الحرارية المولية. عند ثبوت الحجم (**العملية الايزوكورية**) تسمى السعة الحرارية المولية عند ثبات الحجم CV، وفي عملية ثابتة الضغط (**الايزوبارية**) تسمى السعة الحرارية المولية عند ثبات الضغط CP، ووحدة كل منهما J/(mol·K)
- لذلك تكون الحرارة Q اللازمة لتغيير درجة حرارة n من مولات الغاز بمقدار ΔT هي $Q_V = n\,C_V\,\Delta T$ في العملية ثابتة الحجم، و $Q_P = n\,CP\,\Delta T$ في العملية ثابتة الضغط.
- السعة الحرارية المولية عند ثبات الحجم C_V و السعة الحرارية المولية عند ثبات الضغط C_P ترتبطان معا بعلاقة ماير

$$C_P = C_V + R$$

- السعة الحرارية المولية عند ثبات الحجم C_V J/(mol·K) و السعة الحرارية المولية عند ثبات الضغط C_P J/(mol·K) لغاز مثالي أحادي الذرة

$$C_V = \frac{3}{2}R$$

$$C_P = \frac{5}{2}R$$

حقيقة أساسية:
قيم هذه الأعداد: عند استخدام القيمة $R = 8.3\ J/mol.K$، نجد أن قيمة السعة الحرارية للغاز أحادي الذرة تبلغ حوالي $12\ J/mol.K$ عند ثبات الحجم، وحوالي $21\ J/mol.K$ عند ثبات الضغط. وعليه، فإن رفع درجة حرارة مول واحد من الهيليوم بمقدار كلفن واحد في ظل الضغط الجوي يتطلب قدراً من الطاقة يعادل تقريباً الطاقة اللازمة لرفع كتاب كتلته 2 كجم لمسافة متر واحد.

مصطلح (Term):
إلى أي مدى يصل العددان؟ القيمتان 5/2 R و 3/2 R تمثلان حالة الغاز أحادي الذرة فقط، ولا تعنيان أكثر من ذلك. يمكن للغاز ثنائي الذرة أيضًا أن يدور، ولذلك يخزن طاقة أكبر لكل كلفن، وتزداد قيمة سعته الحرارية عند ثبات الحجم تدريجيًا باتجاه: 5/2 R وعند درجات حرارة أعلى، تبدأ الرابطة بين الذرتين في الاهتزاز، فتزداد القيمة مرة أخرى. ومع ذلك، تظل علاقة ماير (Mayer's relation) صحيحة في كل هذه الحالات، لأن اشتقاقها يعتمد فقط على معادلة الحالة، بينما القيمتان الخاصتان بالغاز أحادي الذرة لا تظلان ثابتتين.

ملاحظة:
الخطأ الشائع هو اختيار السعة الحرارية غير الصحيحة. قبل التعويض في المعادلة، ابحث في السؤال عن الكلمات التي تحدد ظروف العملية:
من ناحية:
وعاء صلب
محكم الغلق
حجم ثابت
ومن ناحية أخرى:
مكبس حر الحركة
مفتوح على الغلاف الجوي
ضغط ثابت
وبعد تحديد الشرط المناسب فقط، اختر C_V أو C_P في العلاقة:
Q = nCΔT. للمعادلة Cp أو CV
حيث: عند ثبات الحجم نستخدم C_V.
عند ثبات الضغط نستخدم C_P.
وإذا أعطاك السؤال إحدى السعتين الحراريتين وطلب الأخرى، فلا تبدأ الحساب من جديد؛ استخدم علاقة ماير (Mayer's relation)

صندوق المعادلات:

الحرارة عند حجم ثابت	$Q_V = n\,C_V\,\Delta T \text{ J/(mol·K)}$
الحرارة عند ضغط ثابت	$Q_P = n\,C_P\,\Delta T \text{ J/(mol·K)}$
علاقة ماير	$C_P = C_V + R$
الغاز المثالي أحادي الذرة	$C_V = \frac{3}{2}R$ $C_P = \frac{5}{2}R$

مثال محلول:

الموقف:	إذا تم إمداد 0.80 mol من غاز مثالي عند حجم ثابت بمقدار 170 J من الحرارة، فارتفعت درجة حرارته بمقدار 10 K، فعيّن سعته الحرارية المولية عند ثبات الحجم بوحدة J/(mol·K) لأقرب رقمين عشريين
المعطيات والمطلوب:	$Q = 170\text{ J}$، و$n = 0.80\text{ mol}$، والعملية ثابتة الحجم، و$\Delta T = 10\text{ K}$. المطلوب C_v بوحدة J/(mol·K).
التمثيل:	كمية ثابتة من الغاز في وعاء صلب لا يستطيع تغيير حجمه، وتُسخن بحرارة مزودة Q، كما في الدورق الصلب في الشكل 1-6-2.
الاستراتيجية:	نحدد هل العملية ثابتة الحجم أم ثابتة الضغط، ثم نستخدم $Q = nC\Delta T$ مع السعة الملائمة. هنا الحجم ثابت، ولذلك نستخدم $Q_V = nC_V\Delta T$ ونحل لإيجاد C_V.
الحل الموضح:	في العملية ثابتة الحجم تمثل C_V الحرارة اللازمة لتغيير درجة حرارة مول واحد بمقدار 1 K، ولذلك $Q = nC_V\Delta T$. $170 = 0.80 \times C_V \times 10$. $C_V = 170 \div (0.80 \times 10) = 170 \div 8.0 = 21.25 \approx 21\text{ J/(mol·K)}$.
منطقية الحل:	نحو 21 J/(mol·K)، تساوي عدة أمثال ثابت الغاز $R \approx 8.3\text{ J/(mol·K)}$، وهي الرتبة الصحيحة لسعة حرارية مولية؛ ولذلك تعد الإجابة معقولة.
فسِّرها بنفسك:	اذكر في جملة لماذا يكون اختيار C_V بدلًا من C_P هو الخطوة الصحيحة عندما يكون الوعاء صلبًا.

حاول بنفسك: إذا تم إمداد 0.50 mol من غاز مثالي عند حجم ثابت بمقدار 250 J من الحرارة، فارتفعت درجة حرارته بمقدار 20 K، فعيّن سعته الحرارية المولية عند ثبات الحجم بوحدة J/(mol·K) ولأقرب رقمين عشريين

حاول:

إذا تم إمداد 1.50 mol من غاز مثالي عند ضغط ثابت بمقدار 63 J من الحرارة، فارتفعت درجة حرارته بمقدار 2.0 K فعين سعته الحرارية المولية عند ثبات الضغط CP، سعته الحرارية المولية عند ثبات الحجم CV على الترتيب بوحدة J/(mol·K) ولأقرب رقمين عشريين خذ R = 8.3 J/(mol·K).

في سياق جديد — الهبوط عبر الرياح

تتجاوز النسبة $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ إلى ما وراء تجربة التسخين؛ فهي تحدد سرعة الصوت في الغاز.

تضغط موجة الصوت الهواء وتمدده بسرعة أكبر من أن تتسرب الحرارة، ولذلك تتحدد مرونة الغاز التي تشعر بها الموجة بقيمة γ، وتصبح السرعة $\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$. حيث M (kg) هي كتلة مول واحد من الغاز. وبالتالي، فإن قياس الوقت الذي يستغرقه الصوت لعبور غرفة ما يقيس قيمة γ للهواء — ونظرًا لأن γ تبلغ حوالي 1.67 لغاز مكون من ذرة واحدة، ولكنها تبلغ حوالي 1.4 لغاز مكون من ذرتين، فإن هذا القياس البسيط يكشف أن الهواء يتكون من جزيئات مكونة من ذرتين، وليس من ذرات منفردة.

دورك الآن: باستخدام R = 8.3 J/(mol·K)، أوجد C_V و C_P لغاز مثالي أحادي الذرة لأقرب رقمين عشريين.

شكل (1.6.4): تُسخن عينتان متماثلتان من الغاز بالتساوي؛ يمنع المكبس المثبت في اليسار تغير الحجم، بينما يرتفع المكبس الحر في اليمين فوق موضعه الأصلي مع تمدد الغاز عند ضغط ثابت.

طبيعة العلم: من الأصل - لماذا يصعب رفع درجة الحرارة في عملية ثابتة الضغط؟

السعة الحرارية المولية هي الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة مول واحد من الغاز بمقدار 1K، لكن عند ثبوت الضغط تلزم حرارة أكبر منها عند ثبوت الحجم. فعندما يُسخن الغاز عند ضغط ثابت يتمدد ويدفع المكبس إلى أعلى، فيبذل شغلًا على الوسط الخارجي. ولأن جزءًا من الطاقة الحرارية المزودة يُستخدم في هذا الشغل، يجب تزويد الغاز بطاقة إضافية لرفع درجة حرارته بنفس المقدار. هذه صورة من صور حساب الطاقة؛ فقد فصل الفيزيائيون الحرارة الداخلة إلى جزء يرفع الطاقة الداخلية وجزء يخرج في صورة شغل. وهذا الانقسام لا يُرى مباشرة، بل يُستدل عليه من شرط حفظ الطاقة. وتمثل علاقة مايير $C_p = C_v + R$ الصياغة الكمية لهذا الاستدلال، وتؤكدها التجارب عندما يتساوى الفرق المقاس بين السعتين مع R.

وصف الشكل (1.6.5): عند تسخين الغاز تحت ضغط ثابت يتمدد ويدفع المكبس إلى أعلى من موضعه الابتدائي، فيبذل شغلًا على الوسط المحيط.

دورك: اقترح قياسًا يمكن إجراؤه على غاز حقيقي لاختبار هل $C_p - C_v$ يساوي R فعلًا، واذكر الكميات التي يجب تثبيتها.

سؤال الدرس، وإجابته:

لا توجد إجابة واحدة، وهذه هي الإجابة: للغاز سعتان حراريتان، واحدة لكل طريقة يمكنك أن تمسكه بها أثناء تسخينه، ولا يكتمل السؤال إلا عندما تحدد أيهما. وعندما يكون الغاز محبوسًا في وعاء صلب، فإن كل ما تزوده به يُخزن كطاقة داخلية. أما إذا تُرك الغاز حرًا لدفع مكبس، فإنه يبذل جزءًا من الطاقة المزودة على الوسط المحيط قبل أن يقرأ الترمومتر، لذا يجب تزويده بمزيد من الطاقة لتحقيق نفس الارتفاع — وحدد معادلة الحالة أن هذا الاجمالي يساوي بالضبط ثابت غاز واحد لكل مول لكل كلفن، أياً كان الغاز. بالنسبة للذرات المفردة، يخرج الرقمان بمقدار (1.5R) و (2.5 R)، مباشرة من الطاقة المختزنة المقاسة في الدرس 4-1؛ أما إذا أعطيت الجزيئات طريقة للدوران، فإن كلاهما يرتفع.

المشهد الذى بدأنا به

تمرين:

(أ) أجب لأقرب رقمين عشريين، مع افتراض .R = 8.3 J/(mol·K) إذا زُوّد 1.2 mol من غاز مثالي عند حجم ثابت بمقدار 240 J من الحرارة، فارتفعت درجة حرارته بمقدار 12 K، فعيّن السعة الحرارية المولية عند الضغط الثابت CP لهذا الغاز بوحدة J/(mol·K).

(ب) مع افتراض .R = 8.3 J/(mol·K) إذا تم إمداد (تزويد) 0.30 mol من غاز مثالي عند ضغط ثابت بمقدار 200 J من الحرارة، فارتفعت درجة حرارته بمقدار 25 K، فعيّن CP و CV على الترتيب بوحدة J/(mol·K).

الفصل الثانى

الكهرباء الساكنة

٢-١ — قانون كولوم

٢-٢ — المجال الكهربى

٢-٣ — الجهد الكهربى

٢-٤ — المجال الكهربى المنتظم وفرق الجهد

٢-٥ — حركة الشحنات تحت تأثير قوة

٢-٦ — المكثف

الدرس ٢-١ — قانون كولوم

؟ سؤال الدرس:
أدلك بالون ليجذب قصاصات ورق او يدفع بالونا أخر بعيدا عنه – ما الذى يحدد قوة قوة التجاذب أو التنافر بين جسمين مشحونين؟

سوف تتعلم أن

١. تعرّف الشحنة الكهربائية ووحدتها الكولوم C، وتصف تنافر الشحنات المتشابهة وتجاذب الشحنات المختلفة بفعل القوة الكهروستاتيكية.

٢. يحدد قانون كولوم $F=K\frac{|q_1 q_2|}{r^2}$ وعلاقة القوة بين نقطتين مشحونتين ومقدار كل شحنة والمسافة الفاصلة بينهما

٣. يطبق قانون كولوم مع اتزان القوى المؤثرة على كرة معلقة و مشحونة لإيجاد مقدار القوة الكهروستاتيكية أو مقدار الشحنة.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تتابع

- **ادلك** بالونًا منفوخًا بشعرك، ثم قرّبه من قصاصات ورق صغيرة؛ تقفز القصاصات نحوه وتلتصق به من دون تلامس سابق. **وادلك** بالونين بالطريقة نفسها، ثم علّق كلًّا منهما بخيط وقرّبهما؛ ستجدهما يبتعدان أحدهما عن الآخر. إذن قد يؤدي **الدلك** (الاحتكاك) إلى تجاذب أو تنافر بحسب ما **يقترب من البالون المشحون**.

فكرة أساسية:
الشحنات المتشابهة تتنافر، والشحنات المختلفة تتجاذب. وتقاس الشحنة بالكولوم C، وتخضع لمبدأ حفظ الشحنة.

وصف الشكل 2-1-1: يرفع البالون المدلوك قصاصات الورق (الشحنات المختلفة الناتجة تنجذب)، بينما يبتعد بالونان مشحونان بشحنتين متماثلتين (الشحنات المتشابهة تتنافر).

تنبأ:
(أ) عندما يجذب البالون الورق، هل تكون شحنة البالون والشحنة المستحثة في الورق متشابهتين أم مختلفتين؟
(ب) عندما يبتعد البالونان المدلوكان، هل يحملان شحنتين متشابهتين أم مختلفتين؟

استكشف — كيف تضعف قوة الدفع مع المسافة؟

ما ستفعله: علّق كرتين خفيفتين من الفوم تحملان شحنتين متساويتين، وقِس المسافة بينهما وزاوية الخيط عند مسافات مختلفة، ثم اختبر هل تعتمد قوة التنافر على المسافة.

الزمن: 15 دقيقة.

الأدوات:

- كرتان خفيفتان من الفوم معلقتان بخيطين عازلين .
- مسطرة ومنقلة .
- ميزان لتعيين كتلة كل كرة m.
- قضيب مشحون .
- قطعة من الصوف.

قضيب مشحون

مسطرة

كرة فوم مثبتة بخيط

الخطوات:

١ ادلك كرتي الفوم بنفس الطريقة بقطعة صوف حتى تتكون شحنتين متماثلتين عليهما، ثم علّقهما بحيث تكون متجاورتين بخيطين عازلين من حامل مشترك.

٢ اتركهما حتى تستقرا متباعدتين، ثم قِس بالمسطرة المسافة r بين مركزيهما، وقِس الزاوية θ التي يصنعها كل خيط مع الرأسي.

٣ غيّر طول الخيط أو المسافة بين نقطتي التعليق، وأعد شحن الكرتين بالتساوي، ثم سجّل r وθ مرة أخرى.

٤ احسب لكل محاولة قوة التنافر $F = mg \tan \theta$ ، ثم حاصل الضرب Fxr^2، وسجّل القيم في الجدول.

المحاولة	المسافة الفاصلة r	الزاوية θ	$F = mg \tan \theta$ القوة	$Fxr^2 (N.m^2)$
1				
2				
3				

جدول النتائج:

لكل محاولة من ١ إلى ٣ سجّل المسافة r بالمتر، والزاوية θ بالدرجة، والقوة $F = mg \tan \theta$ بالنيوتن، ثم Fxr^2 بوحدة $N \cdot m^2$؟

حلِّل ما جمعته:

(أ) من العمود الأخير: عند تغير r هل يظل المقدار $(F \times r^2)$ ثابتاً أم يتغير؟ وماذا يدل المقدار الثابت على توقف القوة F على المسافة الفاصلة r؟

(ب) أي طول حركان له الزمن الدوري الأقصر؟ ماذا يقترح هذا عن العلاقة بين الصلابة والكتلة والزمن الدوري؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل قراءة الجزء التالي.

وصف الشكل 2-1-2: كرتان من الفوم تحملان شحنتين متماثلتين، معلقتان بخيطين عازلين من قضيب، وتستقران متباعدتين، وتُستخدم مسطرة لقياس المسافة r بين مركزيهما.

ملاحظة القياس:

اترك الكرتين حتى تستقرا قبل القراءة، وقِس r من المركز إلى المركز، وأعد شحنهما بالتساوي في كل محاولة لأن الشحنة الساكنة تتسرب سريعًا في الهواء الرطب.

حقيقة أساسية استخراج قانون التربيع:

يُعد الكولوم وحدة ضخمة بالمقاييس المخبرية. فعند استخدام القيمة $k = 9.0 \times 10^9\ N \cdot m^2/C^2$ نجد أن شحنتين مقدارهما 1 كولوم وتفصل بينهما مسافة متر واحد ستدفع كل منهما الأخرى بقوة مقدارها 9.0×10^9 نيوتن؛ وبالتالي، فإن قوى المليونيوتن التي تُقاس باستخدام الكرات المعلقة تشير فوراً إلى أن الشحنات المعنية تمثل جزءاً ضئيلاً جداً من الكولوم.

من الملاحظة إلى النموذج:

لماذا تحتاج عملية الدلك كمية خاصة بها؟

لا تؤدي عملية الدلك إلى استحضار شيء من العدم؛ فهي تنقل مقداراً قابلاً للقياس من جسم إلى آخر، ويمكن أن يكون هذا المقدار المنقول كبيراً أو صغيراً – وهو بالضبط ما يوضحه بالونٌ دُلِكَ لفترة زمنية تبلغ ضعف المدة السابقة. ولا يمكن اختزال هذا "المقدار" في الكتلة أو الطول أو الزمن؛ إذ إنه يمثل كميةً من نوعٍ خاص، ولذا فهو يتطلب وحدة قياسٍ خاصة به قبل التمكن من صياغة أي قانون بشأنه. كما أن تحديد إشارته ليس أمراً ثانوياً أو لاحقاً؛ إذ لا بد من وجود احتمالين – واثنين فقط – لتفسير النتيجتين اللتين رأيناهما في مستهل هذا الدرس: بالونٍ يجذب قصاصات الورق، وبالونين مدلوكين يتنافران ويبتعد أحدهما عن الآخر.

استخراج قانون التربيع العكسي من الجدول

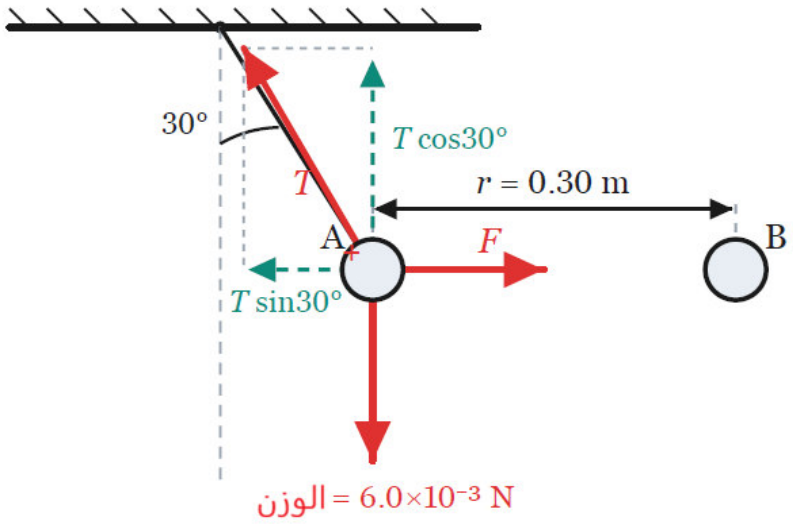
تُحدد بيانات التجارب التي تجريها شكل القانون قبل صياغة أي معادلة؛ إذ تُحوَّل زاوية الخيط أولاً إلى قوة باستخدام العلاقة $F = mg \tan \theta$، ثم يأتي دور العمود الأخير في حسم الأمر: فإذا ظلت قيمة $(F \times r^2)$ ثابتة تقريباً رغم تغير المسافة (r) من تجربة لأخرى، فلا يتبقى مجال لأي اعتماد آخر على المسافة؛ إذ لا بد أن تتناقص القوة وفقاً للعلاقة $\left(\frac{1}{r^2}\right)$ وتكشف تجربة ثانية عن الشق الآخر من العلاقة: فعند مضاعفة شحنة كل كرة، تتضاعف قوة الجذب، مما يعني أن الشحنتين تدخلان في العلاقة كحاصل ضرب وليس كمجموع. وبجمع هاتين النتيجتين معاً، تتحدد معالم القانون بالكامل باستثناء قيمة واحدة، وهي الثابت (k)، الذي يتعين قياس قيمته تجريبياً إذ لا يمكن استنتاجها نظرياً.

تحويل الانحراف الحادث إلى قوة

لا تشير الكرة المعلقة مباشرةً إلى قيمة القوة، بل تشير إلى زاوية معينة. وتعمل ثلاث قوى على تثبيت الكرة في مكانها، اثنتان منها فقط معروفتان مسبقاً: الوزن، واتجاه قوة الشد في الخيط (دون معرفة مقدارها). ومن خلال تحليل القوى في الاتجاهين الرأسي والأفقي، تتحول حالة الاتزان الواحدة إلى معادلتين؛ وبحذف قيمة الشد المجهولة من هاتين المعادلتين، نصل إلى الصيغة:

$$F = mg \tan \theta$$

لقد أتاحت لنا الهندسة استبدال كمية غير مرئية بأخرى يمكن قراءة قيمتها مباشرة باستخدام المنقلة (الشكل ٢-١-٣). وبمجرد تحديد قيمة القوة (F) بهذه الطريقة، تُستخدم العلاقة بالاتجاه المعاكس - أي الانتقال من القوة المقاسة إلى الشحنة المجهولة - وهي الطريقة التي استُخدمت في المثال المحلول لتحديد الشحنة الموجودة على الجسم (B).



الشكل 3-1-2 • مخطط الجسم الحر للكرة **A**: ينحرف الخيط بزاوية 30 درجة عن الخط الرأسي باتجاه الكرة **B** (التي تبعد مسافة 0.30 متر)، وبذلك تكون القوى المتوازنة هي: قوة الشد **T** (التي لها مركبتان: **T cos** 30° للأعلى و **T sin** 30° أفقياً)، والقوة الكهروستاتيكية **F** المتجهة نحو **B**، وقوة الوزن البالغة 6.0×10^{-3} نيوتن.

نقطة

- عندما يكتسب جسم ما شحنة كهربية، يُقال إنه مكهرب، ويُطلق على هذا الجسم اسم "الجسم المشحون". وتُسمى الكهرباء التي يحملها الجسم المشحون "شحنة"، بينما يُطلق على كمية هذه الكهرباء اسم "مقدار الشحنة". ووحدة قياس الشحنة هي الكولوم (ورمزها C)، ويُعبَّر عن الشحنات الموجبة والسالبة بالرمزين (+) و(-).
- تتنافر الشحنات المتشابهة وتتجاذب الشحنات المختلفة؛ وتُعرف هذه القوة باسم "القوة الكهروستاتيكية".
- تُسمى الشحنة التي يكون حجمها صغيراً لدرجة يمكن معها إهماله "شحنة نقطية".
- يتناسب مقدار القوة الكهروستاتيكية (F) [بوحدة نيوتن N] المؤثرة بين شحنتين نقطيتين طردياً مع مقدار كل من الشحنتين الكهربائيتين |q1| [بوحدة كولوم C] و |q2| [بوحدة كولوم C]، وعكسياً مع مربع المسافة (r) [بوحدة متر m] الفاصلة بين الشحنتين النقطيتين. ويُعبَّر عن ذلك بالمعادلة: $F = \frac{k|q1|\cdot|q2|}{r^2}$، وتُعرف هذه العلاقة باسم "قانون كولوم".

مصطلح:
حينما يتوقف النموذج - وضع القانون ليتعامل مع شحنات نقطية، وهو لا يكون موثوقاً إلا عندما تكون المسافة الفاصلة كبيرة مقارنةً بأحجام الأجسام. فإذا قُرِّبت كرتان مشحونتان بحيث تكادان تتلامسان، تقوم كل منهما بإعادة توزيع شحنة الأخرى على سطحها؛ وحينئذٍ، لا تعود المسافة المفردة (r) واصفةً لهذا التوزيع، وتختلف القوة المقاسة عن القيمة المتوقعة.

ملاحظة:
استخدم المقادير (القيم المطلقة) فقط، وليس القيم ذات الإشارة. دع الرسم التوضيحي يبيّن الاتجاه - أسهم تدفع الشحنات المتماثلة بعيداً عن بعضها، وتجذب الشحنات المختلفة نحو بعضها - وبهذا لن تُنتج لك الحسابات إشارة سالبة مضللة.

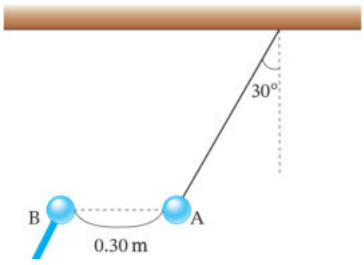
صندوق المعادلات:

قانون كولوم:	$F = k\|q_1\|\|q_2\|/r^2$، حيث F بوحدة N و $k = 9\times10^9\ Nm^2/C^2$.
اتزان كرة معلقة:	أفقيًا $\theta\ F = T\ sin$، ورأسيًا $\theta\ T\ cos = mg$، ومنه $\theta\ F = mg\ tan$

مثال محلول:

الموقف:

أُعطيت كرة صغيرة A معلقة بخيط خفيف شحنة مقدارها $2\times10^{-7}C$، ثم قُرّبت منها كرة صغيرة مشحونة B. استقرت الكرتان عند الارتفاع نفسه والمسافة بينهما m0.30، وانحرف الخيط 30^o عن الرأسي. وزن A يساوي $6.0\times10^{-3}N$، و $k = 9\times10^9 Nm^2/C^2$، و $\sqrt{3} = 1.7$.



الشكل 4-1-2 — مثال محلول:
تتدلى الكرة **A** من خيط خفيف يميل بزاوية $30°$ عن الاتجاه الرأسي، بينما تستقر الكرة المشحونة **B** على الارتفاع نفسه، وتبعد عن الكرة **A** مسافة **0.30 m**.

(أ) عيّن القوة الكهروستاتيكية F بين الكرتين.

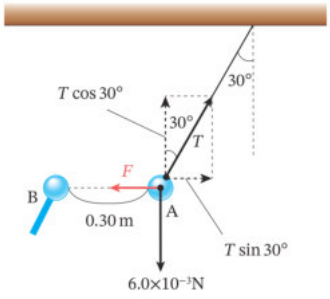
(ب) عيّن شحنة B.

المعطيات والمطلوب:

$q_A = 2\times10^{-7}C$، ووزن $A = 6.0\times10^{-3}N$، و $r = 0.30\ m$، و $\theta = 30^o$، و $k = 9\times10^9 Nm^2/C^2$، و $\sqrt{3} = 1.7$. المطلوب F ثم شحنة B.

التمثيل:

تتأثر الكرة A بثلاث قوى: القوة الكهروستاتيكية F أفقيًا نحو B، والوزن إلى أسفل، وشد الخيط T في اتجاه الخيط.



الشكل 5-1-2 • مثال محلول: تحليل القوى المؤثرة على الجسم **A** — قوة الشد **T** ومركّباتها **Tcos30°** و **Tsin30°**، والقوة الكهروستاتيكية **F**، والوزن **6.0×10⁻³ N**

الاستراتيجية:

نوجد F أولًا من اتزان الكرة A، ثم نستخدم قانون كولوم لإيجاد الشحنة المجهولة. ولتحديد اتجاه القوة نرسم قوة تنافر للشحنات المتشابهة وقوة تجاذب للشحنات المختلفة.

الحل الموضح:

أ) تتزن القوة الكهروستاتيكية F والوزن والشد T.

أفقيًا: $F - T\sin30° = 0$ ... (١).

ورأسيًا: $T\cos30^o - 6.0\times10^{-3} = 0$ ... (٢).

من (١)، $\sin30^o = ½$، فإن $T = 2F$.

وبالتعويض في (٢): $2F\cos30^o = 6.0\times10^{-3}$، أي $\sqrt{3F} = 6.0\times10^{-3}$.

إذن $F = 6.0\times10^{-3} / \sqrt{3} = 6.0\times10^{-3} / 1.7 = 3.4\times10^{-3}\ N$.

ب) من قانون كولوم: $F = kq_A|q|/r^2 = 9.0\times10^9\ |q| / (0.30)^2$.

معامل $|q|$ يساوي $9.0\times10^9 / (0.09) = 2.0\times10^4$.

ومن ثم $|q|\times2.0\times10^4 = 3.4\times10^{-3}$،

فنحصل على $|q| = 1.7\times10^{-7}\ C$.

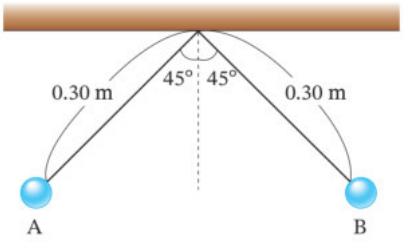
ولأن القوة بين A وB قوة تجاذب، فإن شحنتيهما مختلفتا الإشارة.

لذلك $q = -1.7\times10^{-7}\ C$.

منطقية الحل:	القوة الأفقية تساوي الوزن مضروبًا في $\tan 30^o$ ≈ 0.58، ولذلك تكون أقل قليلًا من 6.0×10^{-3} N؛ فتتفق النتيجة 3.4×10^{-3} N مع ذلك. كما أن شحنة B من رتبة 10^{-7} C وقريبة من شحنة A، وهذا يلائم قوة من رتبة المِلّينيوتن عند مسافة 0.30 m.
اشرح بنفسك:	لماذا يسمح انحراف الخيط بإيجاد القوة الكهروستاتيكية قبل معرفة شحنة B؟

الآن حاول:

تحمل الكرة A المعلقة بخيط خفيف شحنة 3.0×10^{-7} C، وقُرّبت منها B حتى استقرتا عند الارتفاع نفسه والمسافة بينهما 0.30 m، وميل الخيط 30^o عن الرأسي. وزن A يساوي 6.0×10^{-6} N و $\sqrt{3}$ = 1.7. أوجد F وشحنة B.



الشكل 6-1-2 المحاولة الأولى: كرتان كتلة كل منهما 0.50 كجم معلقتان من نقطة مشتركة بخيطين طول كل منهما 0.30 متر، وتتباعدان عند شحنهما بشحنة متماثلة.

حاول:

(١) كرتان صغيرتان A وB، كتلة كل منهما 0.50 kg، معلقتان بخيطين خفيفين طول كل منهما 0.30 m من نقطة مشتركة. عند إعطائهما مقدارًا متساويًا من الشحنة الموجبة استقرتا، بحيث يصنع كل خيط زاوية 45^o مع الرأسي. خذ $k = 9\times10^9$ Nm^2/C^2، و $g = 10$ m/s^2، و $\sqrt{2}$ = 1.4.

(أ) عيّن القوة الكهروستاتيكية F بينهما. (ب) عيّن شحنة الكرة A.

في سياق جديد

لأن قانون كولوم يتناقص مع مربع المسافة، فإن التغيرات الصغيرة في المسافة تغيّر القوة بشدة. إذا خُفضت المسافة بين كرتين مشحونتين إلى النصف، لا تتضاعف القوة فحسب، بل تصبح أربعة أمثالها لأن $1/r^2$ يزداد بمعامل أربعة.

وهذا الاعتماد الشديد يفسر لماذا لا يؤثر قضيب مشحون إلا قليلًا في قصاصة ورق بعيدة، بينما يجذب قصاصة قريبة بسرعة، ولماذا يتطلب إبقاء الشحنات المتشابهة متباعدة جهدًا أقل كلما اتسعت الفجوة.

دورك: تؤثر شحنتان نقطيتان إحداهما في الأخرى بقوة 0.10 N عندما تفصل بينهما مسافة 0.20 m. قدّر القوة عندما تصبح المسافة 0.10 m مع ثبات الشحنتين.

وصف الشكل 2-1-3: يرفع قضيب مشحون قصاصات الورق الواقعة تحته مباشرة، بينما تبقى القصاصات الأبعد ساكنة، موضحًا الانخفاض الحاد في قوة التجاذب الكهروستاتيكية مع المسافة.

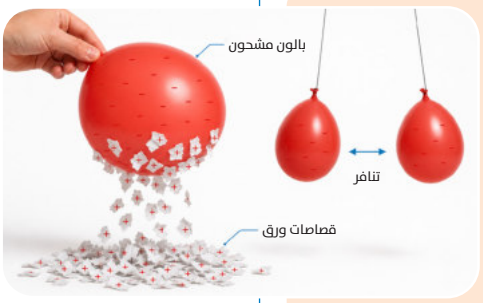
طبيعة العلم:

من الأصل – آلات التصوير والكهرباء الساكنة. تستخدم آلة التصوير القوة الكهروستاتيكية لطباعة الحروف والصور على الورق. يصنع ضوء الليزر نمطًا غير مرئي من الشحنات الساكنة على أسطوانة تسمى المستقبل الضوئي، فتنجذب إليه حبيبات الحبر المشحونة بشحنة مضادة وتلتصق به. ثم تُنقل الصورة إلى الورق وتثبت بالحرارة.

لاحظ أن القانون لا يذكر شيئاً عن المادة التي تتكون منها الأجسام، ولا عن الهواء الفاصل بينها، ولا عن الفترة الزمنية منذ دلكها. إنه يمثل نموذجاً مثالياً يُجرّد الظاهرة من كل التفاصيل التي يمكن للمُجرِّب تغييرها دون التأثير على النتيجة. تتقدم الفيزياء من خلال اكتشاف التفاصيل التي يمكن استبعادها؛ ومقياس نجاح هذا التجريد ليس كونه ينطبق حرفياً على أي كرة حقيقية في الواقع، بل قدرته على تقديم تنبؤات صحيحة باستمرار، أو الفشل في تقديمها ضمن نطاق محدد ومعروف.

لقد أثبت كولوم صحة هذا القانون تجريبياً عام 1785 باستخدام ميزان لَيٍّ له حساسيته عالية، حيث استُخدم التواءُ خيطٍ ما لقياس مقدار القوة. وكان كافنديش قد توصل إلى علاقة "قانون التربيع العكسي" نفسها في وقت سابق لكنه لم ينشر نتائجه، ولذا عرف القانون باسم كولوم؛ فما يُنشر – وما يمكن تكرار التحقق منه – هو ما يدخل في أساس العلم.

دورك الآن: اقترح حالةً لا يمكن فيها التعامل مع جسمين مشحونين باعتبارهما شحنتين نقطيتين، وبيّن أيَّ افتراضٍ هو الذي يختل في هذه الحالة.



المشهد الذي بدأنا به

إجابة سؤال الدرس:

تؤدي عملية الدلك إلى انتقال كمية قابلة للقياس، وتكفي الحالتان المحتملتان لشحنتها لتفسير كل من حالة البالون الذي يجذب الورق وحالة البالونين اللذين يتنافران ويبتعدان عن بعضهما. وتتحدد شدة قوة الدفع أو الجذب الناتجة بناءً على مقدار الشحنة المنتقلة إلى كل جسم، وبشكل أكثر تأثيراً بكثير، بناءً على المسافة الفاصلة بينهما؛ إذ إن تقليل المسافة إلى النصف يؤدي إلى مضاعفة القوة أربع مرات. وتصلح هذه العلاقة الواحدة للتطبيق في كلا الاتجاهين: سواء للانتقال من شحنات معلومة إلى قوة متوقعة، أو للانتقال من انحراف كرة معلقة رجوعاً إلى تحديد قيمة شحنة لم يسبق قياسها مباشرة.

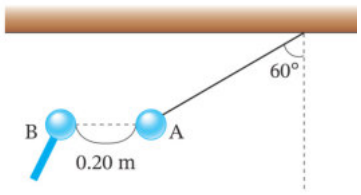
تمرين:

خذ $k = 9\times10^{9}\ \mathrm{Nm^2/C^2}$، و$g = 10\ \mathrm{m/s^2}$، و$\sqrt{2} = 1.4$، و $\sqrt{3} = 1.7$ حيث يلزم.

١) تحمل كرة صغيرة A معلقة بخيط خفيف شحنة $2.0\times10^{-7}\ \mathrm{C}$، وقُرّبت منها كرة مشحونة B. استقرتا عند الارتفاع نفسه والمسافة 0.20 m، وانحرف الخيط 60° عن الرأسي. وزن A يساوي $3.0\times10^{-3}\ \mathrm{N}$.

(أ) عيّن القوة الكهروستاتيكية F بين A وB.

(ب) عيّن شحنة B.

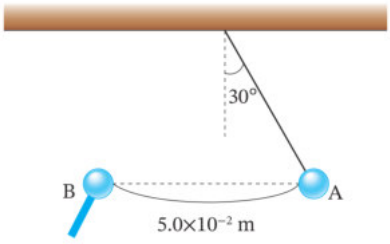


الشكل 8-1-2 • التمرين 1: تنحرف كرة مشحونة (A) -معلقة بخيط خفيف- بفعل كرة مشحونة ثانية (B) تُقرَّب منها.

٢) أعطيت شحنة لكرة صغيرة A كتلتها 2.0×10^{-3} kg ومعلقة بخيط خفيف، وقربت منها كرة B شحنتها 4.9×10^{-7} C. استقرتا عند الارتفاع نفسه والمسافة 5.0×10^{-2} m ، وانحرف الخيط 30° عن الرأسي.

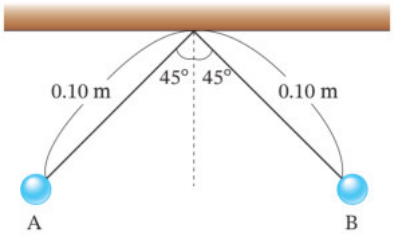
(أ) عيّن القوة الكهروستاتيكية F بين A وB.

(ب) عينّ شحنة A.



الشكل 9-1-2 ·التمرين 2: الكرة **A** التي كتلتها **kg** $^{-3}$**10×2.0** معلّقة بجوار الكرة **B** التي تحمل شحنة مقدارها **C** $^{-7}$**10×4.9**، وتقع الكرتان عند الارتفاع نفسه.

٣) كرتان صغيرتان A وB كتلة كل منهما 0.25 kg، معلقتان بخيطين خفيفين طول كل منهما 0.10 m من نقطة مشتركة. عند إعطائهما مقدارًا متساويًا من الشحنة الموجبة استقرتا، بحيث يصنع كل خيط زاوية 45° مع الرأسي. عيّن شحنة A.



الشكل 10-1-2 ·التمرين 3: كرتان كتلتهما 0.25 كجم معلقتان بخيطين طول كل منهما 0.10 م من نقطة مشتركة، ومشحونتان بشحنة متماثلة.

الدرس ٢-٢ — المجال الكهربائي

؟ سؤال الدرس:
لماذا تؤثر القوى بين الشحنات الكهربية و بينها مسافات؟

سوف تتعلم أن

١. تعرّف المجال الكهربي E بأنه القوة المؤثرة على وحدة الشحن الموجبة، وتستخدم $F = qE$ لإيجاد القوة الكهروستاتيكية المؤثرة على شحنة q موضوعة داخل المجال.

٢. تحسب مجال شحنة نقطية من قانون كولوم $E \frac{k|Q|}{r^2}$، وتحدد اتجاهه: إلى الخارج إذا كانت Q موجبة، ونحو الشحنة إذا كانت Q سالبة.

٣. توجد محصلة المجال الكهربي لعدة شحنات نقطية جمعًا جبريا وفق مبدأ التراكب.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تتابع

• راقب طفلًا قرب نهاية زحليقة بلاستيكية طويلة؛ تجد خصلات شعره تتجه إلى الخارج وتتباعد وهو لا يزال يتحرك. أدى الاحتكاك بالزحليقة إلى شحن جسمه، وملأت هذه الشحنة الحيز المحيط به بالمجال الكهربي. وتحمل كل شعرة جزءًا من نفس الشحنة، فتتعرض لقوة تدفعها إلى الخارج في اتجاه المجال، من دون يد أو تلامس. لا الجسم مباشرة، فالمجال هو الذي يؤثر في أي شحنة توجد فيه.

وصف الشكل 2-2-1: قرب نهاية زحليقة بلاستيكية طويلة يشحن الاحتكاك جسم الطفل، فتملأ شحنته الحيز المحيط بمجال كهربائي، وتتأثر كل شعرة مشحونة بقوة تدفعها إلى الخارج.

تنبأ:
(أ) توضع شحنة اختبار موجبة صغيرة في المجال المحيط بجسم الطفل المشحون. هل تتجه القوة المؤثرة فيها مع المجال أم عكسه؟
(ب) إذا زاد مقدار شحنة الاختبار إلى الضعف، فماذا يحدث للقوة المؤثرة عليها؟

فكرة أساسية:
المجال الكهربائي — E [N/C]
هو ما تؤثر به الشحنة في الحيز المحيط بها. ما مقدار القوة المؤثرة على شحنة q موضوعة في ذلك الحيز، وما هو اتجاهها؟

مصطلح:
المجال الكهربائي – هو المفهوم التحليلي (أو الأداة الوصفية) الذي يبنيه هذا الدرس. فبدلاً من التساؤل عما تفعله شحنةٌ ما بشحنةٍ أخرى عبر مسافة فاصلة، ينبغي التساؤل عن الحالة التي تُحدثها الشحنة الأولى عند كل نقطة محيطة بها؛ إذ إن أي جسم يُوضع في تلك النقطة لاحقاً يستجيب فقط للحالة السائدة في الموقع الذي استقر فيه.

استكشف — كيف يقل تأثير مجال قضيب مشحون مع المسافة؟

ما ستفعله: استخدم شحنة اختبار خفيفة معلقة بخيط لقياس تناقص قوة الجذب أو الدفع الجانبية لقضيب مشحون عند الابتعاد عنه، لتكتشف أن المجال يقل وفقا للعلاقة .

الزمن: 15 دقيقة.

الأدوات:

- قضيب بلاستيكي وقطعة قماش لشحنه .
- كرة مغطاة برقائق معدنية ومعلقة بخيط رفيع لتعمل شحنة اختبار .
- حامل لتثبيت القضيب رأسيًّا .
- مسطرة لقياس المسافة والإزاحة الجانبية.

مسطرة

كرة اختبار على خيط

قضيب مشحون

الخطوات:

١ ادلك طرف القضيب البلاستيكي (السنتيمترات القليلة العليا فقط) بقطعة القماش. لا تنتقل الشحنة على طول العازل، فتبقى مركزة قرب الطرف وتتصرف كشحنة نقطية واحدة. ثبّت القضيب رأسيًّا.

٢ لامس الكرة المغطاة بالرقائق بالقضيب المشحون للحظة قصيرة حتى تكتسب شحنة صغيرة من النوع نفسه، ثم اتركها معلقة بحرية. ولتشابه الشحنتين يبتعد الخيط عن القضيب.

٣ اجعل شحنة الاختبار عند مستوى الطرف المشحون وعلى مسافة أفقية منه مقدارها r، ثم قِس بالمسطرة الإزاحة الجانبية d للخيط، واحسب $d \times r^2$.

٤ أعد شحن الطرف وكرر القياس عند مسافتين أكبر مع استخدام نفس الكرة والخيط .

المحاولة	المسافة الفاصلة r	والإزاحة الجانبية d بالسنتيمتر بوصفها مقياسًا للقوة		$d \times r^2$
1				
2				
3				

اكتب تفسيرك في سطرين قبل قراءة الجزء التالي.

حلّل البيانات التي جمعتها:

(أ) ماذا يحدث لمقدار الانحراف **d** كلما زادت المسافة **r**؟ قارن بين القيم الثلاث التي حصلت عليها للمقدار $d \times r^2$؛

— هل تظل هذه القيم ثابتة تقريباً؟

وصف الشكل 2-2-2: كرة مغطاة بالرقائق ومعلقة بخيط، شُحنت بملامسة القضيب فأصبحت شحنة اختبار من النوع نفسه. بالقرب من القضيب يكون انحراف الخيط كبيرًا، وعند الابتعاد يقل الانحراف، فيوضح اتجاه المجال وشدته.

ملاحظة القياس:
أعد شحن الطرف قبل كل محاولة لضمان بقاء الشحنة (Q) ثابتة، وقِس مقدار الإزاحة الجانبية (d) بعد استقرار الخيط وتوقفه عن الحركة. تعبّر هذه الإزاحة عن القوة طالما ظلت قيمتها صغيرة مقارنةً بطول الخيط؛ لذا احرص على إجراء جميع المحاولات ضمن هذا النطاق.

(ب) يعبّر الانحراف d عن القوة، وتتناسب القوة طردياً مع المجال. إذا كان المقدار $d \times r^2$ ثابتاً تقريباً، فماذا يخبرك ذلك عن طبيعة اعتماد المجال على المسافة r؟

— وكيف يتوافق ذلك مع العلاقة $E = k|Q|/r^2$؟

من الملاحظة إلى النموذج:

لماذا يستحق الأمر ابتكار "وسيط"؟

لا يتطرق قانون كولوم –الذي تناولناه في الدرس السابق– إلى مسألة الفراغ الفاصل بين الشحنتين؛ فهو يربط القوة بشحنتين وبالمسافة الفاصلة بينهما، وكأن كل جسم يمد تأثيره عبر الفراغ ليمسك بالجسم الآخر لحظياً. وهذا المفهوم يثير حفيظة علماء الفيزياء؛ لذا يتمثل البديل في تقسيم تلك العبارة الواحدة إلى شقين: حيث تُحدث الشحنة الأولى تغييراً في الحيز المحيط بها، ثم تتفاعل الشحنة الثانية مع ما تجده في موقعها. وفي هذه العملية، لا يلزم انتقال أي شيء بين الجسمين لإتمام الخطوة الثانية؛ إذ يكفي أن تكون الشحنة الثانية على دراية بما يحيط بها مباشرة.

فصل شحنة الاختبار

لا تكتسب عملية الفصل هذه جدواها إلا إذا أمكن وصف الخطوة الأولى دون الإشارة إطلاقاً إلى الجسم الثاني؛ وهذا أمر ممكن بالفعل. لنفترض وضع شحنة صغيرة (q) عند نقطة مختارة وقياس القوة المؤثرة عليها، ثم تكرار التجربة باستخدام شحنة مضاعفة؛ سنجد أن القوة تتضاعف، لكن النسبة (F/q) تظل ثابتة. وهذا الثبات هو جوهر الحجة بأكملها؛ فالمقدار الذي يتبقى بعد قسمة القوة على شحنة الاختبار يخص النقطة نفسها، لا الجسم الذي وُضع هناك لاستكشافها، ومن ثم يمكن تدوين قيم النسبة (F/q) في جداول واستخدامها لأي شحنة لاحقة. ويجب أن تكون هذه النسبة كمية متجهة لأن القوة التي تعبّر عنها هي كمية متجهة؛ وبما أن الشحنة السالبة (q) تعكس اتجاه القوة دون أن تغير دلالة النسبة، فإن إشارة الشحنة وحدها هي التي تحدد اتجاه الدفع (الشكل ٢-٢-٣)..

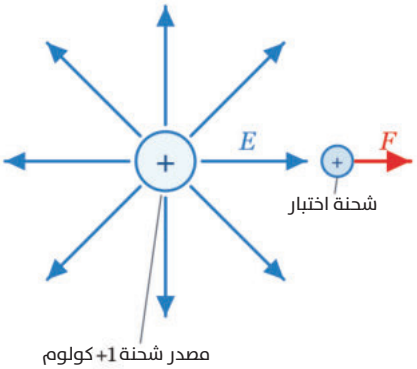
من شحنة واحدة إلى شحنات متعددة

أصبح تطبيق عملية القسمة ذاتها على قانون كولوم أمراً ميكانيكياً بحتاً: فبقسمة طرفي المعادلة $F = k|Q||q|/r^2$ على شحنة الاختبار q، تختفي هذه الشحنة من الطرف الأيمن، وتتبقى كمية تعتمد فقط على الشحنة المصدرية Q وعلى المسافة الفاصلة. وتُستمد اتجاهية هذه الكمية من اتجاه القوة المؤثرة على شحنة اختبار موجبة؛ إذ تندفع الشحنة بعيداً عن المصدر الموجب وتنجذب نحو المصدر السالب (الشكل ٢-٢-٤).

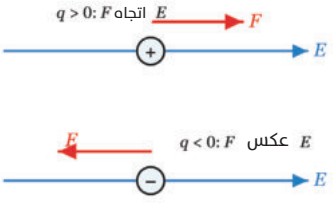
ويمكن التعامل مع وجود عدة مصادر للشحنة بالسهولة ذاتها؛ إذ تُجمع القوى المؤثرة على شحنة الاختبار جمعاً اتجاهياً –وهذا يندرج ضمن الميكانيكا التقليدية وليس قانوناً جديداً– وعند قسمة كل حد من حدود هذا المجموع الاتجاهي على المقدار q نفسه، تظل المساهمات الفردية تُجمع بالطريقة ذاتها تماماً. ولهذا السبب يُعد إنشاء متوازي الأضلاع –الموضّح في المثال المحلول– إجراءً صحيحاً، كما يفسر ذلك كيف يمكن لمجالات متساوية في المقدار أن تلغي بعضها تماماً في اتجاه معين، بينما تعزز بعضها البعض في اتجاه آخر.

ملاحظة القياس:
اترك الكرتين حتى تستقرا قبل القراءة، وقِس r من المركز إلى المركز، وأعد شحنهما بالتساوي في كل محاولة لأن الشحنة الساكنة تتسرب سريعًا في الهواء الرطب.

حقيقة أساسية:
تنيوتن لكل كولوم (N/C) هي الوحدة الناتجة عن قسمة القوة على الشحنة. وفي الدرس الذي يلي الدرس القادم ستصادف الكمية نفسها مكتوبةً بالصيغة V/m؛ وهما تمثلان الوحدة ذاتها ولكن بمسميات مختلفة .



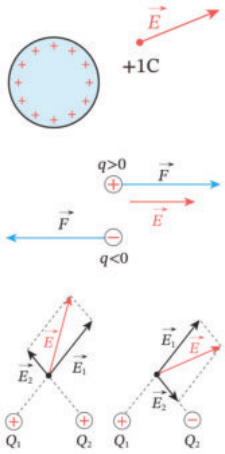
وصف الشكل 2-2-3: كرة مغطاة بالرقائق ومعلقة بخيط، شُحنت بملامسة القضيب فأصبحت شحنة اختبار من النوع نفسه. بالقرب من القضيب يكون انحراف الخيط كبيرًا، وعند الابتعاد يقل الانحراف، فيوضح اتجاه المجال وشدته.



الشكل 2-2-4 • في المجال نفسه **E**، تتأثر الشحنة الموجبة بقوة **F** في اتجاه المجال، بينما تتأثر الشحنة السالبة بقوة على الخط نفسه ولكن في الاتجاه المعاكس.

ملاحظة:
يجب أن يكون المسبار صغيراً بدرجة تكفي لعدم التأثير على ما يقوم بقياسه؛ إذ تؤدي شحنة المسبار الكبيرة إلى إزاحة شحنات المصدر نفسه، وبذلك تصف القراءة التي حصل عليها ترتيباً أنتَ من أحدثه، بدلاً من الترتيب الذي كنتَ تنوي فحصه.

نقطة

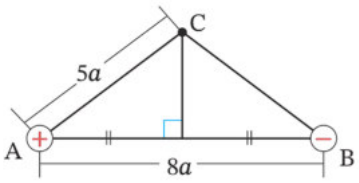


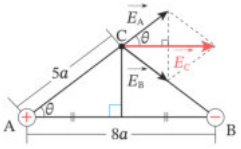
- تُعرف خاصية الحيز (أو الفراغ) التي تؤثر بقوة على شحنة كهربية باسم **المجال الكهربي**. والمجال الكهربي هو كمية متجهة لها مقدار واتجاه.
- يتحدد المجال الكهربي (E) عند أي نقطة في الحيز من خلال القوة التي ستؤثر على شحنة موجبة مقدارها الوحدة (شحنة اختبار موجبة) إذا وُضعت عند تلك النقطة.
  مقدار المجال الكهربي (E) ... هو مقدار القوة المؤثرة على شحنة موجبة مقدارها الوحدة.
  اتجاه المجال الكهربي (E) ... هو اتجاه القوة المؤثرة على شحنة موجبة مقدارها الوحدة.
- يُحسب مقدار القوة الكهروستاتيكية (F) [بوحدة نيوتن N] المؤثرة على شحنة (q) [بوحدة كولوم C] موضوعة عند نقطة شدة المجال الكهربي فيها تساوي (E) [بوحدة نيوتن / كولوم N/C] بالعلاقة: $F = qE$
- تتأثر الشحنة الموجبة بقوة كهروستاتيكية في اتجاه المجال الكهربي، بينما تتأثر الشحنة السالبة بقوة كهروستاتيكية في الاتجاه المعاكس لاتجاه المجال الكهربي.
- تُحسب شدة المجال الكهربي (E) [بوحدة N/C] الناشئ عن شحنة نقطية مقدارها (Q) [بوحدة C] عند مسافة (r) [بوحدة m] باستخدام قانون كولوم: $E = k|Q|/r^2$
- عند وجود عدة شحنات نقطية، يمكن جمع مجالاتها الكهربية باستخدام مبدأ التراكب ويكون اتجاه المجال الكهربي نحو الخارج مبتعداً عن الشحنة النقطية عندما تكون (Q) موجبة، نحو الداخل باتجاه الشحنة النقطية عندما تكون (Q) سالبة

صندوق المعادلات:

المجال والقوة:	$F = qE$، ومنه $E = F/q$، ووحدة المجال N/C.
مجال شحنة نقطية:	$E = k\|Q\|/r^2$؛ إلى الخارج إذا كانت $Q > 0$، وإلى الداخل إذا كانت $Q < 0$
التراكب:	$\vec{E} = \vec{E}1 + \vec{E}2 + \ldots$ أي المجموع المتجهي للمجالات المنفصلة

مثال محلول:

الموقف:	(أ) وُضعت شحنة نقطية مقدارها $-4.0\times10^{-10}C$ عند موضع ما، فتأثرت بقوة كهروستاتيكية مقدارها $8.0\times10^{-8}N$ إلى اليمين. عيّن اتجاه المجال الكهربائي وشدته E عند هذا الموضع.  الشكل 5-2-2 — مثال محلول (b): من الشكل الأصلي، نركز هنا على الهندسة فقط: توجد شحنة موجبة +q عند النقطة A. توجد شحنة سالبة -q عند النقطة B. * المسافة بين الشحنتين 8a. تقع النقطة C على المنصف العمودي للمسافة AB. المسافة من C إلى كل من الشحنتين A وB تساوي 5a (ب) المسافة بين نقطتين A وB تساوي 8a، ووُضعت q+ عند A وq- عند B. عيّن اتجاه المجال CE وشدته عند نقطة C على العمود المنصف لـAB، حيث AC = BC = 5a. خذ ثابت كولوم k.
المعطيات والمطلوب:	(أ) $q = -4.0\times10^{-10}C$ ، و $F = 8.0\times10^{-8}N$ إلى اليمين؛ المطلوب اتجاه E وشدته. (ب) q+ عند A وq- عند B ، و AB = 8a، وAC = BC = 5a؛ المطلوب CE عند C.
التمثيل	في الحالة (a)، تكون الشحنة سالبة، ولذا فإن القوة والمجال يشيران إلى اتجاهين متعاكسين. أما في الحالة (b)، فانظر الشكل 6-2-2: نظراً لأن AC = BC = 5a وأن نصف طول AB يساوي 4a، فإن المسافة العمودية من C إلى AB تساوي 3a (وفقاً لخصائص المثلث القائم الزاوية بأبعاد 5-4-3)، ويُشكّل كل من EA وEB ضلعين من أضلاع مُعيّن.
الاستراتيجية:	نستخدم F = qE بالمقادير فقط، ونحدد الاتجاه من إشارة الشحنة. وفي حالة الشحنتين نحسب مجال كل شحنة من $E = k|Q|/r^2$ ثم نجمع المجالين جمعًا متجهيًّا.
الحل الموضح:	أ) الشحنة سالبة، ولذلك تكون القوة عكس المجال. ولأن القوة إلى اليمين فإن المجال يتجه إلى اليسار. وبالمقادير: $E\times4.0\times10^{-10} = 8.0\times10^{-8}$. إذن $E = (8.0\times10^{-8}) \div (4.0\times10^{-10}) = 2.0\times10^{2}$ N/C إلى اليسار. ب) يتجه المجال E_A عند C الناتج عن الشحنة عند A من A إلى C، وشدته $kq/(5a)^2$. ويتجه E_B الناتج عن الشحنة عند B من C نحو B، وبالشدة نفسها. وبسبب التماثل تلغي المركبتان العموديتان إحداهما الأخرى، وتجمع المركبتان الموازيتان لـAB، فتتجه المحصلة من A إلى B. لنفترض أن CAB = θc. وبسبب التماثل، فإن EC = EA cos θ × 2. وبما أن cos θ = 4a/5a = 4/5، فإن، $EC = k\cdot q/(5a)^2 \times (4/5) \times 2 = 8kq/(125a^2)$ [N/C] ويكون الاتجاه من A إلى B.



وصف الشكل 2-2-6: مثال محلول: عند النقطة C يكون مجال الشحنة الموجبة عند A ومجال الشحنة السالبة عند B متساويين في المقدار، لذا فإن مركباتهما الرأسية تلغي بعضها البعض ويكون المجال الكهربائي الناتج موازياً لـAB.

منطقية الحل:	أ) مجال شدته 2.0×10^{2} N/C يؤثر في شحنة مقدارها 4.0×10^{-10} C بقوة 8.0×10^{-8} N، وهي القوة المعطاة. ب) للشحنتين المقدار نفسه وتبعدان 5 a عن C، فتتساوى شدة المجالين؛ تلغى المركبتان العموديتان وتُجمع المركبتان على AB، فتتفق المحصلة مع $8\ kq/125a^2$).
اشرح بنفسك:	لماذا يتجه المجال في: (أ) عكس القوة؟ ولماذا تقع محصلة المجال في (ب) على الخط AB لا عموديًّا عليه؟

الآن حاول:

توضع شحنة نقطية موجبة مقدارها 5.0×10^{-9} C في مجال شدته 3.0×10^{3} N/C إلى اليمين. أوجد مقدار القوة المؤثرة فيها واتجاهها.

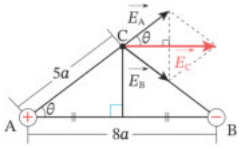
حاول:

(١) وضعت شحنة نقطية مقدارها 2.0×10^{-9} C عند موضع ما، فتأثرت بقوة كهروستاتيكية مقدارها 4.0×10^{-6} N إلى اليمين. عيّن اتجاه المجال وشدته عند هذا الموضع.

(٢) وضعت شحنة نقطية مقدارها -3.0×10^{-6} C في مجال شدته 1.6×10^{3} N/C إلى اليمين. عيّن مقدار القوة الكهروستاتيكية واتجاهها.

(٣) عيّن شدة المجال الذي تنشئه شحنة نقطية مقدارها 5.0×10^{-8} C عند نقطة P تبعد 0.30 m، وحدد هل يتجه المجال شعاعيًّا إلى الخارج أم إلى الداخل. خذ $k = 9.0\times10^{9}\ N.m^2/C^2$.

(٤) المسافة بين A وB تساوي a2. وُضعت -q عند A وq+ عند B. عيّن اتجاه المجال EC وشدته عند C الواقعة على العمود المنصف لـAB وعلى مسافة a من منتصف AB. خذ ثابت كولوم k، ويمكن ترك الإجابة في صورة جذرية.



وصف الشكل 2-2-7 الحالة 4: شحنة نقطية $-q$ عند A وشحنة $+q$ عند B، تفصل بينهما مسافة 2a.

في سياق جديد

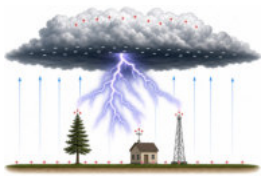
توجه طابعات الليزر وآلات التصوير الحبر باستخدام المجالات الكهربائية. تُعطى حبيبات الحبر الدقيقة شحنة صغيرة، ثم تُطلق قرب أسطوانة دوارة تحمل نمطًا من الشحنات. يؤثر المجال حول الأسطوانة في كل حبيبة بقوة $F = qE$، فيجذب الحبر المشحون بدقة إلى المناطق التي ستكوّن الصورة المطبوعة قبل تسخين الورق لتثبيته.

وصف الشكل 2-2-8: داخل طابعة ليزر تنجذب حبيبات الحبر الدقيقة انتقائيًّا إلى الأشرطة المشحونة على الأسطوانة الدوارة، ثم تنتقل في نمط مطابق إلى الورقة المارة أسفلها.

طبيعة العلم:

لنعد إلى الأصل: البرق هو أيضاً تفريغ للكهرباء الساكنة.

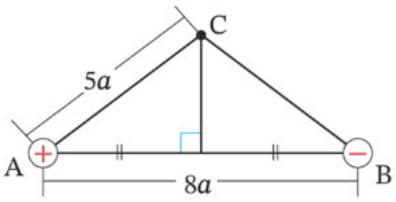
البرق عبارة عن "تفريغ" تتدفق فيه فجأةً عبر الهواء شحناتٌ كهربائية ساكنة تراكمت داخل السحب. إذ تحتك جزيئات الجليد داخل السحب ببعضها البعض فتتولد كهرباء ساكنة، وتتجمع الشحنات السالبة عند قاعدة السحب؛ وهذا يجذب بقوة الشحنات الموجبة الموجودة على سطح الأرض، فيزداد المجال الكهربائي بين السحابة والأرض لدرجة تؤدي إلى تأين الهواء (انهيار عازليته) وتدفق تيارهائل، وهذا هو البرق.



وصف الشكل 2-2-9: تتجمع الشحنة السالبة عند قاعدة السحابة وتتجمع الشحنة الموجبة على الأرض، ويشتد المجال بينهما حتى ينهار عزل الهواء ويحدث تفريغ البرق.

يُعد المجال الكهربائي نموذجاً علمياً؛ فنحن لا نستطيع رؤية "خاصية الحيز المكاني" هذه بحد ذاتها، ولكن من خلال تعريفها استناداً إلى القوة المؤثرة على شحنة موجبة مقدارها الوحدة، يمكننا التنبؤ - بمعادلة واحدة - بالقوة المؤثرة على أي شحنة في أي مكان. ويكتسب النموذج مصداقيته

عندما تؤدي فكرة غير مرئية – كالمجال – إلى تنبؤات قابلة للقياس والاختبار، مثل تحديد مكان وزمان حدوث الانهيار الكهربائي للهواء أثناء العاصفة.

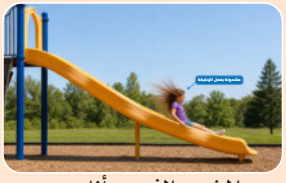


رسم فاراداي خطوط القوة في ثلاثينيات القرن التاسع عشر دون الاستعانة تقريباً بأي رياضيات، ورفض البعض هذا التصور لهذا السبب بالتحديد؛ ثم صاغها ماكسويل في صورة معادلات، فأصبحت اللغة القياسية لهذا المجال العلمي. إذ يمكن للتصور الفيزيائي أن يظهر قبل صياغته الرياضية، ومع ذلك يظل هو التصور الصحيح.

دورك الآن: اقترح ملاحظة من الحياة اليومية تتيح لك معرفة اتجاه المجال الكهربائي لجسم مشحون دون الحاجة إلى لمسه.

دورك: اقترح ملاحظة يومية تمكّنك من تحديد اتجاه مجال جسم مشحون من دون لمسه.

إجابة سؤال الدرس:



المشهد الذى بدأنا به

لا تؤثر الشحنة عبر الفراغ مباشرة؛ بل تملأ الحيز المحيط بها بمجال كهربائي، وتستجيب أي شحنة ثانية لهذا المجال حيث موضعها فيه. مجال الشحنة النقطية $E = k|Q|/r^2$، ويتجه إلى الخارج في حالة Q الموجبة وإلى الداخل للسالبة. ويؤثر المجال في الشحنة q بقوة $F = qE$، يكون اتجاهها مع المجال أو عكسه بحسب إشارة الشحنة q؛ ومن ثم تؤثر الشحنات المتباعدة بعضها في بعض.

تمرين:

١) وُضعت شحنة نقطية مقدارها -2.0×10^{-10} C عند موضع ما، فتأثرت بقوة كهروستاتيكية مقدارها 6.0×10^{-8} N إلى اليمين. عيّن اتجاه المجال وشدته عند هذا الموضع.

٢) وُضعت شحنة نقطية مقدارها 2.0×10^{-6} C في مجال شدته 1.4×10^{-6} N/C إلى اليمين. عيّن مقدار القوة الكهروستاتيكية واتجاهها.

٣) عيّن شدة المجال عند نقطة P تبعد 2.0 m عن شحنة نقطية مقدارها 8.0×10^{-6} C، وحدد هل يتجه إلى الخارج أم إلى الداخل. خذ $k = 9.0\times109$ N.m^2/C^2.

٤) المسافة بين A وB تساوي 0.60 m. وُضعت شحنة 2.0×10^{-8} C عند A وشحنة -2.0×10^{-8} C عند B. تقع C على العمود المنصف لـ AB وتبعد 0.30 m عن المنتصف O. خذ $k = 9.0\times10^9$ N.m^2/C^2 و$\sqrt{2} = 1.4$.

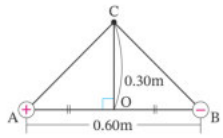
(أ) عيّن اتجاه المجال E_O وشدته عند O.

(ب) عيّن اتجاه المجال E_C وشدته عند C.

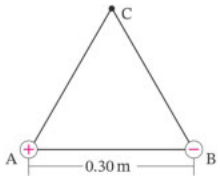
(ج) إذا أصبحت شحنة B موجبة 2.0×10^{-8} C، فعيّن اتجاه EC وشدته عند C.

٥) في مثلث متساوي الأضلاع ABC طول ضلعه 0.30 m، وُضعت شحنة 4.0×10^{-8} C عند A وشحنة -4.0×10^{-8} C عند B. عيّن اتجاه المجال EC وشدته عند C. خذ $k = 9.0\times10^9$ N.m^2/C^2.

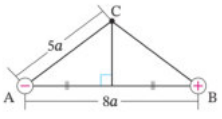
٦) المسافة بين A وB تساوي 8a. وُضعت -q عند A وq+ عند B. عيّن اتجاه المجال EC وشدته عند C على العمود المنصف لـ AB، حيث AC = BC = 5a. خذ ثابت كولوم k .



الشكل 2-2-10 تمرين 4: شحنتان مقدارهما 2.0×10^{-8} C عند النقطة A و -2.0×10^{-8} C عند النقطة B، تفصل بينهما مسافة 0.60 m، وتقع النقطة C على المنصف العمودي.



الشكل 2-2-11 تمرين 5: مثلث متساوي الأضلاع ABC طول ضلعه 0.30 متر، توجد شحنة مقدارها 4.0×10^{-8} كولوم عند الرأس A وشحنة مقدارها -4.0×10^{-8} كولوم عند الرأس B.



الشكل 2-2-12 تمرين 6: توجد شحنة مقدارها q– عند النقطة A وشحنة مقدارها q+ عند النقطة B، وتفصل بينهما مسافة 8a وتقع النقطة C على المنصف العمودي للخط الواصل بينهما، بحيث تكون المسافة من C إلى كل من A وB تساوي 5a.

الدرس ٢-٣ — الجهد الكهربائي

؟ سؤال الدرس:

كيف يكسب المجال (الحيز) الموضوع فيه شحنة ما طاقة وضع كهربية مثل طاقة الوضع المكتسبة لجسم نتيجة ارتفاعه فى مجال الجاذبية الارضية؟

ستتعلم أن

١. بيّن أن الجهد الكهربائي عند نقطة ما هو طاقة الوضع لشحنة موجبة مقدارها الوحدة موضوعة عند تلك النقطة، ويُقاس بوحدة الفولت (V).

٢. احسب طاقة الوضع لشحنة باستخدام العلاقة $U = qV$، بوحدة الجول (J).

٣. أوجد الشغل الذي تبذله القوة الكهروستاتيكية عند انتقال شحنة بين نقطتين، باستخدام العلاقة $W = qV_A - qV_B$.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تتابع

عندما تسحب قدميك فوق سجادة في يوم جاف ثم تلمس مقبض باب معدني، تنتج شرارة صغيرة نحو طرف إصبعك مصحوبةً بصوت طقطقة؛ فعملية سحب القدمين هذه أدت إلى تراكم شحنة إضافية عليك، مما رفع جهدك الكهربي إلى مستوى عالٍ. وحين تقترب يدك من المقبض المتصل بالأرض، تندفع تلك الشحنة عبر الفاصل الهوائي نحو منطقة ذات جهد أقل بكثير، وتُفرّغ طاقتها المخزنة على هيئة شرارة. فالشحنة الكهربية -تماماً كالثقل المرفوع- تحمل طاقةً تتحدد قيمتها بناءً على موقعها داخل المجال.

فكرة أساسية:

الجهد الكهربي V هو طاقة الوضع الكهروستاتيكية لكل وحدة شحنة موجبة، ويقاس بالفولت: حيث $1\,V = 1\,J/C$.

وصف الشكل 2-3-1: تقفز شرارة من إصبع مشحون إلى مقبض باب متصل بالأرض؛ فتحرر الشحنة التي رُفعت إلى جهد مرتفع طاقتها المختزنة عند انتقالها إلى جهد أقل.

تنبأ:

(أ) إذا نقلتَ شحنة موجبة صغيرة من نقطة ذات جهد عالٍ إلى نقطة ذات جهد منخفض، فهل تبذل القوة الكهروستاتيكية شغلاً موجباً أم سالباً؟

(ب) وإذا دفعتَ تلك الشحنة الموجبة -بدلاً من ذلك- نحو نقطة ذات جهد أعلى، فمن الذي يبذل الشغل: المجال أم يدك.

استكشف - رسم خريطة الجهد على ورقة موصّلة

ما ستفعله: قِس تغير قراءة الفولتميتر خطوة بخطوة عبر ورقة موصّلة، لتكشف أن المجال الكهربائي يكون أشد حيث يتغير الجهد بأسرع معدل مع المسافة.

الزمن: 20 دقيقة.

الأدوات:

- ورق موصل عليه قطبان.
- بطارية جهدها صغير.
- فولتميتر.
- مسطرة.

مسطرة

فولتميتر

بطارية

ورق موصل

الخطوات:

١ صِل القطبين على الورقة الموصّلة بالبطارية حتى ينشأ مجال كهربي ثابت خلال الورقة.

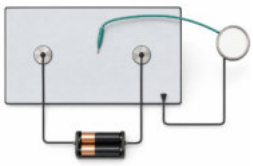
٢ ضع أحد طرفي توصيل الفولتميتر على القطب A ليكون مرجعًا ثابتًا، وضع المسطرة على الخط المستقيم الواصل بين القطبين.

٣ حرّك الطرف الثاني بمسافات متساوية x على طول الخط، وسجّل قراءة الجهد V عند كل خطوة. واحسب لكل فترة معدل تغير الجهد مع المسافة $\Delta V/\Delta x$.

٤ تحرك جانبيًا وابحث عن نقاط أخرى تعطي نفس القراءة، ثم صِل بينها لتحصل على خط تساوي الجهد.

٥ أضف مزيدًا من العملات، واترك النظام ليبلغ وضع اتزانه الجديد، وكرر القياس.

٦ عُد إلى الحمل الأول. كرر القياس باستخدام إزاحة ابتدائية صغيرة ثم إزاحة ابتدائية أكبر، مع إبقاء الكتلة دون تغيير.



وصف الشكل 2-3-2: قطبان على ورقة موصلة موصلان ببطارية، ويظل أحد مسباري الفولتميتر عند مرجع ثابت بينما يتحرك الآخر فوق الورقة لتحديد نقاط الجهد المتساوي.

المحاولة	المسافة X بالسنتيمتر	قراءة الفولتميتر V بالفولت	$\Delta V/\Delta x$ بوحدة V/cm

ملاحظة القياس:
اضغط بقوة على القطب (A) وثبّته في مكانه عند أخذ كل قراءة؛ إذ يؤدي عدم إحكام التلامس إلى إزاحة العمود بأكمله. اقرأ قيمة الجهد (V) مع إبقاء الطرف المتحرك ثابتاً في وضع عمودي

حلِّل ما جمعته:

(أ) من العمود $\Delta V/\Delta x$: هل يزداد الجهد بنفس المقدار في كل خطوة أم بقيمة أكبر في منطقة معينة؟ وأين تبلغ النسبة $(\Delta V/\Delta x)$ أكبر قيمة؟

(ب) تكون شدة المجال الكهربي أكبر ما يمكن حيث تكون النسبة $(\Delta V / \Delta x)$ أكبر. تنبأ بموضع ازدحام خطوط تساوي الجهد، وفسر لماذا لا يتطلب تحريك شحنة على خط تساوي الجهد شغلًا.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل قراءة الجزء التالي.

من الملاحظة إلى النموذج:

لماذا لا تُعد قواعد الرسم مجرد اصطلاحات:

لا تكون صورة المجال مفيدة إلا إذا كانت صادقة (غير قابلة للكذب)، ويتبين أن كل قاعدة من قواعد رسمها تُفرض فرضاً ولا تخضع للاختيار؛ فعند أي نقطة محددة، يدفع توزيع الشحنات جسيم الاختبار في اتجاه واحد لا غير، ولو التقى منحنيان عند تلك النقطة لكان على الجسيم أن يتبع اتجاهين في آن واحد — وهو أمر لم تظهره أي قياسات أخرى — وكذلك الحال لو انقسم المنحنى إلى فرعين. وتتحدد المسافات الفاصلة بالقدر ذاته من الحتمية؛ فإذا تتبعتَ كل منحنى ينطلق من كرة صغيرة تحيط بشحنة ما، اتبع كل منحنى تاركًا كرة صغيرة حول الشحنة ونفس الشيء، لا بد أن تنتشر مجموعة منها على سطح كرة أكبر تقع على مسافة أبعد؛ فتوزُّع الكمية ذاتها على مساحة أوسع هو بالضبط ما يعنيه تضاؤل قوة الدفع. وعليه، فإن التزاحم ليس مجرد إشارة شكلية تدل على القوة، بل هو القوة ذاتها وقد تجسدت في هيئة مرئية.

القسمة على شحنة الاختبار مرة أخرى:

في الدرس السابق، قمنا بقسمة القوة على شحنة اختبار لنستخلص بذلك مقداراً يخص النقطة ذاتها. وينطبق الأمر ذاته تماماً على الطاقة؛ فعند نقل شحنة اختبار إلى نقطة محددة، تُختزن فيها طاقة، وإذا نُقلت شحنة تعادل ضعف تلك الشحنة عبر المسار نفسه، فإن الطاقة المختزنة تتضاعف أيضاً. ومن ثم، فإن نسبة الطاقة المختزنة إلى الشحنة تظل مستقلة عن طبيعة الشحنة المنقولة، ويمكن تسجيل قيمتها في جداول خاصة بتلك النقطة وحدها. ونظراً لأن الطاقة كمية عددية مجردة لا اتجاه لها، فإن هذه النسبة تُعد كمية قياسية (غير متجهة)؛ وهي ميزة عملية بالغة الأهمية، إذ يمكن دمج قيمتين منها بمجرد الجمع الحسابي العادي، دون الحاجة إلى عمليات التركيب المتجهي التي يتطلبها جمع مجالين.

لماذا لا يمكن قياس سوى الفروق:

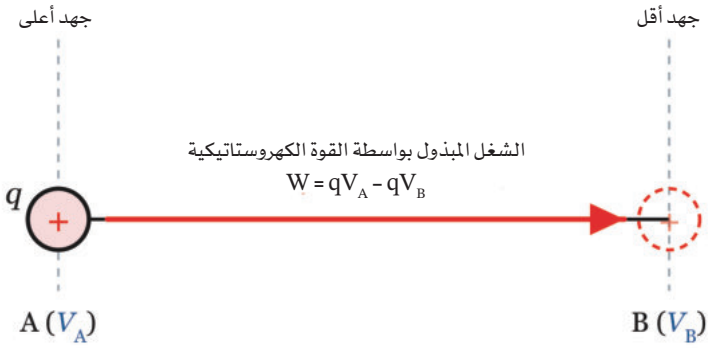
تتضح بقية الفكرة في سطرين: بما أن القوة الكهروستاتيكية قوة محافظة، فإن الشغل الذي تبذله أثناء انتقال الشحنة يساوي مقدار الطاقة المخزنة المفقودة خلال هذا الانتقال — أي الفرق بين قيمتي الطاقة عند نقطتي البداية والنهاية، بغض النظر عن المسار المتبع. وعند التعبير عن الطاقة المخزنة عند كل طرف بوصفها حاصل ضرب الشحنة في النسبة التي عُرِّفت للتو، نجد أن الشحنة عامل مشترك في كلا الحدين ويمكن إخراجها منهما؛ فيتبقى لدينا الشحنة مضروبة في مقدار "الهبوط" (أو الفرق) بين الطرفين (الشكل 3-3-2). وثمة نتيجة تستحق الاهتمام هنا: وهي أن "الهبوط" هو المقدار الوحيد الذي يظهر في النتيجة، دون الحاجة لذكر القيمتين المنفصلتين؛ إذ إن أي جزء مشترك بينهما يلغي بعضه بعضاً، مما يتيح لنا تحديد نقطة الصفر في أي موضع ملائم — سواء عند التأريض، أو عند أحد طرفي البطارية، أو حتى عند مسافة لا نهائية — دون أن يؤدي ذلك إلى تغيير أي تنبؤ قابل للقياس. وهذا أيضاً هو السبب في أن تحريك شحنة على طول منحنى ذي قيمة ثابتة لا يكلّف شيئاً على الإطلاق.

ملاحظة:

هذه المنحنيات مجرد رسم توضيحي، وليست اكتشافاً. لا شيء يمر عبر الفضاء ولا شيء ينتقل على امتدادها. ارسم ضعف عددها وسيظل الترتيب كما هو؛ فالمعنى يكمن فقط في التزاحم النسبي من موضع لآخر.

حقيقة أساسية:

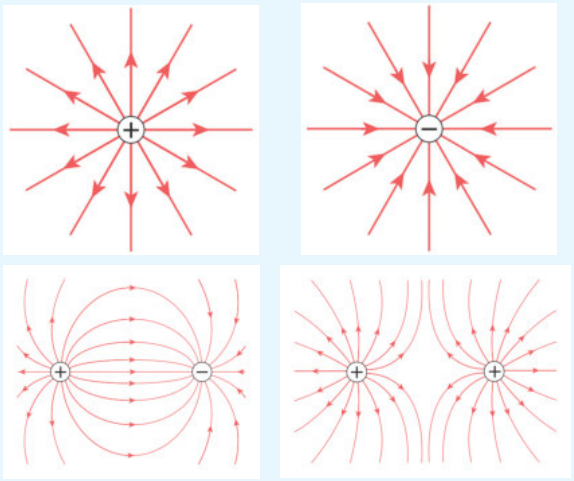
يُعرَّف الفولت الواحد بأنه "جول واحد لكل كولوم" (1 J/C)؛ لذا فإن خليةً جهدها 1.5 فولت تمنح 1.5 جول من الطاقة لكل كولوم تدفعه عبر الدائرة الكهربية. ويُعد الفولت الواحد مقداراً صغيرا من الطاقة لكل وحدة شحنة، في حين أن صاعقة البرق تنطوي على مئات الملايين من الفولتات.



وصف الشكل 2-3-3: تنتقل شحنة موجبة q من A ذات الجهد VA إلى B ذات الجهد VB، فتبذل القوة الكهروستاتيكية شغلًا W = qVA - qVB عند هبوط الشحنة إلى جهد أقل.

مصطلح:
عند النقطة التي تتوقف عندها الصورة — تُعبِّر كلٌّ من المنحنيات وخطوط تساوي الجهد عند ترتيبٍ معين. فإذا تحركت الشحنات نفسها، وجب إعادة رسم النمط بأكمله؛ وعليه، فإن الصورة الثابتة والمرتبة في هذا الدرس تمثل حالة اتزان، لا خريطةً دائمةً للمجال.

نقطة

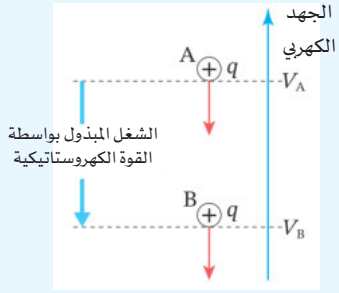


- يُطلق على الخط الذى يمثل حالة المجال الكهربائى اسم «خط المجال الكهربى». تُرسم خطوط المجال الكهربى بأسهم تشير إلى اتجاهها.
- خصائص خطوط المجال الكهربى:
  - تبدأ من الشحنات الموجبة وتنتهى عند الشحنات السالبة.
  - لا تتقاطع ولا تتفرع.

تكون خطوط المجال متقاربة أكثر فى المناطق التى يكون فيها المجال الكهربى أقوى.

يُحدد المماس لخط المجال عند أى نقطة اتجاه المجال الكهربى.

- تُعرف طاقة الوضع التى تمتلكها شحنة موجبة مقدارها الوحدة عند وضعها فى نقطة معينة باسم «الجهد الكهربى»، ووحدته هى الفولت (الرمز V). ويمكن التعبير عن طاقة الوضع U [بالجول] الناتجة عن القوة الكهروستاتيكية لشحنة q [بالكولوم] بالمعادلة: U = qV، حيث V [بالفولت] هو الجهد الكهربى.



- عندما تنتقل شحنة مقدارها q [بالكولوم] من النقطة A (التى جهدها V_A) إلى النقطة B (التى جهدها V_B)، فإن الشغل الذى تبذله القوة الكهروستاتيكية يساوى مقدار النقص فى طاقة الوضع الناشئة عن هذه القوة.

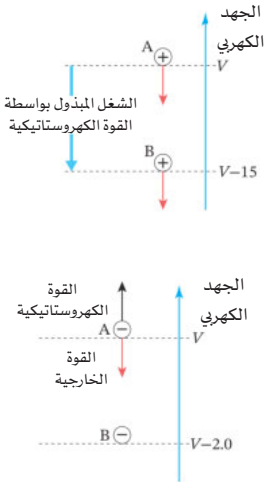
W = qVA - qVB

صندوق المعادلات:

طاقة الوضع الكهربية:	U = qV، حيث U بالجول وq بالكولوم وV بالفولت.
شغل القوة الكهروستاتيكية:	$W = qV_A - qV_B = q(V_A - V_B)$.

مثال محلول:

الموقف:	**عيّن ما يأتي:** (أ) وُضعت شحنة نقطية -2.0×10^{-5} C عند موضع جهده 5.0 V. عيّن طاقة وضعها U. (ب) انتقلت شحنة 4.2×10^{-8} C من A إلى B، حيث جهد B أقل من جهد A بمقدار 15 V. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W. (جـ) تؤثر قوة خارجية في شحنة C 7-3.0×10- عند A وتنقلها ببطء إلى B، حيث الجهد أقل بمقدار 2.0 V. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W وشغل القوة الخارجية W'.
المعطيات والمطلوب:	(أ) $q = -2.0 \times 10^{-5}$ C و $V = 5.0$ V. (ب) $q = 4.2 \times 10^{-8}$ C و $V_A - V_B = 15$ V. (جـ) $q = -3.0 \times 10^{-7}$ C و $V_A - V_B = 2$ V.
التمثيل:	راجع شكل 3-3-2 لشحنة تتحرك من A إلى B. ويوضح شكل 2-3-4 الحالة (ج) حيث يكون جهد B أقل من A بمقدار 2.0 V، وتوازن القوة الخارجية القوة الكهروستاتيكية طوال الانتقال البطيء.
الاستراتيجية:	لحساب شغل القوة الكهروستاتيكية نحدد جهدي نقطتي البداية والنهاية ثم نستخدم $q(V_A - V_B)$. ولطاقة وضع شحنة ساكنة نستخدم $U = qV$.
الحل المشروح:	(أ) $U = qV = (-2.0 \times 10^{-5}) \times 5.0 = -1.0 \times 10^{-4}$ J. (ب) إذا كان جهد A هو V، فإن جهد B هو 15 – V. ولذلك $W = (4.2\times10^{-8})\times V - (4.2 \times 10^{-8})\times(V - 15) =$ $(4.2\times10^{-8})\times15 = 6.3\times10^{-7}$ J (جـ) إذا كان جهد A هو V، فإن جهد B هو 2 – V. ومن ثم $W = (-3.0\times10^{-7})\times V - (-3.0\times10^{-7})\times(V - 2.0) =$ $(-3.0\times10^{-7})\times2.0 = -6.0\times10^{-7}$ J ولأن الشحنة «نُقلت ببطء»، توازن القوة الخارجية القوة الكهروستاتيكية، فيكون شغل القوة الخارجية –W. ومن ثم $W' = 6.0\times10^{-7}$ J.
منطقية الحل:	(أ) للشحنة السالبة عند جهد موجب طاقة وضع سالبة. (ب) تفقد الشحنة الموجبة طاقة وضع عند انتقالها إلى جهد أقل، فتكون قيمة شغل المجال موجبة. (جـ) تعارض القوة الكهروستاتيكية النقل البطيء فتبذل شغلًا سالبًا، وتبذل القوة الخارجية شغلًا مساويًا في المقدار ومضادًا في الإشارة.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يعتمد شغل القوة الكهروستاتيكية على فرق الجهد $V_A - V_B$ فقط، ولا يعتمد على القيمة المجهولة V نفسها؟ وصف الشكل 2-3-4: مثال محلول (ج): يتم نقل شحنة سالبة ببطء من النقطة A، عند جهد V، إلى النقطة B، عند جهد 2.0 – V فولت؛ القوة الخارجية تعادل القوة الكهروستاتيكية. الآن جرّب: تنتقل شحنة نقطية مقدارها 5.0×10^{-6} C من A إلى B، حيث جهد B أقل من جهد A بمقدار 8.0 V. أوجد شغل القوة الكهروستاتيكية W.



حاول:

1- وُضعت شحنة نقطية $1.2\times10^{-6}\ C$ عند موضع جهده $6.0\ V$. عيّن طاقة الوضع U.

2- انتقلت شحنة نقطية $3.6\times10^{-8}\ C$- من A إلى B، حيث جهد B أقل من جهد A بمقدار $20\ V$. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W.

3- أثرت قوة خارجية في شحنة نقطية $2.1\times10^{-7}\ C$ عند A، ونقلتها ببطء إلى B حيث الجهد أعلى بمقدار $10\ V$. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W وشغل القوة الخارجية 'W.

في سياق جديد:

وصف الشكل: تدفع بطارية سيارة جهدها $12\ V$ تيارًا في دائرة كاملة لإضاءة المصباح الأمامي، بينما تظل الأسلاك والبطارية مظلمة.

تُكتب على بطارية السيارة القيمة $12\ V$. وهذا الرقم فرق جهد؛ فكل كولوم تدفعه البطارية من طرفها ذي الجهد المرتفع عبر المصابيح إلى الطرف ذي الجهد المنخفض يهبط خلال فرق جهد $12\ V$، ويسلم المصباح $12\ J$ من الطاقة. والعلاقة نفسها $W = q(V_A - V_B)$ التي تحكم شحنة نقطية مجهرية تحدد طاقة تيار كامل في دائرة.

دورك: تنقل بطارية $12\ V$ شحنة مقدارها $2.0\ C$ من الطرف مرتفع الجهد إلى الطرف منخفض الجهد. استخدم $W = q(V_A - V_B)$ لإيجاد شغل القوة الكهروستاتيكية.

طبيعة العلم:

وصف الشكل 2-3-5: تخضع خطوط الكنتور على تل وخطوط تساوي الجهد حول شحنتين للقاعدة نفسها؛ حيث تتقارب الخطوط يكون الميل شديدًا والمجال قويًّا

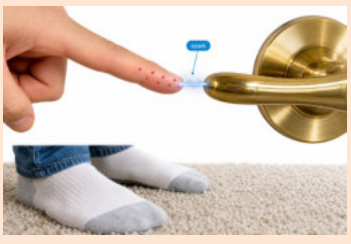
من الأصل - خطوط الكنتور على الخريطة وخطوط تساوى الجهد. تسمى الخطوط التى تصل بين نقاط متساوية الجهد الكهربائى خطوط تساوى الجهد، وهى تشبه خطوط الكنتور على الخريطة. فكما تدل خطوط الكنتور المتقاربة على منحدر شديد، تدل خطوط تساوى الجهد المتقاربة على مجال كهربائى شديد. وكما يتدفق الماء من موضع مرتفع إلى منخفض، تتحرك الشحنة الموجبة مع المجال من جهد أعلى إلى جهد أقل.

هذا تشبيه علمي؛ تُستعار صورة مألوفة، هى الارتفاع على سطح، لتسهيل التفكير فى كمية غير مرئية هى الجهد الكهربائي. والتشبيه أداة نمذجة قوية لأنه ينقل الحدس المعروف، لكنه يجب أن يُختبر عند حدوده لأن الجهد والارتفاع ليسا الكمية الفيزيائية نفسها.

دورك: اقترح خريطة أو مخططًا يوميًّا، غير خريطة الكنتور، يستخدم خطوطًا أو تظليلًا لإظهار أين تكون كمية كبيرة أو صغيرة، وبيّن ما الذى تمثله «خطوط تساوى الجهد» فيه.

إجابة سؤال الدرس:

الخاصية التي تحدد طاقة وضع الشحنة هى الجهد الكهربائى V؛ فهو طاقة وضع وحدة الشحنة الموجبة عند النقطة. ولذلك تمتلك شحنة q طاقة $U = qV$. وعند انتقالها من A إلى B تبذل القوة الكهروستاتيكية شغلًا يساوي النقص فى هذه الطاقة: $W = q(V_A - V_B)$، وهو الدور نفسه الذى يؤديه الارتفاع فى مجال الجاذبية..



المشهد الذى بدأنا به

تمرين:

(أ) وُضعت شحنة نقطية $6.0 \times 10^{-6}\ C$ عند موضع جهده $2.0\ V$. عيّن طاقة الوضع U.

(ب) وُضعت شحنة نقطية $-8.0 \times 10^{-5}\ C$ عند موضع جهده $1.5\ V$. عيّن طاقة الوضع U.

(جـ) انتقلت شحنة نقطية $2.1 \times 10^{-8}\ C$ من A إلى B، حيث جهد B أقل من جهد A بمقدار $3.0\ V$. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W.

(د) انتقلت شحنة نقطية $3.2 \times 10^{-7}\ C$ من A إلى B، حيث جهد B أعلى من جهد A بمقدار $2.0\ V$. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W.

(هـ) أثرت قوة خارجية في شحنة نقطية $-3.2 \times 10^{-7}\ C$ عند A، ونقلتها ببطء إلى B حيث الجهد أقل بمقدار $5.0\ V$. عيّن شغل القوة الكهروستاتيكية W وشغل القوة الخارجية W.

الدرس ٢-٤: المجال الكهربائي المنتظم وفرق الجهد

؟ سؤال الدرس:

في مجال كهربائي منتظم، ما العلاقة بين فرق الجهد بين نقطتين وشدة المجال والمسافة بينهما؟

ستتعلم أن

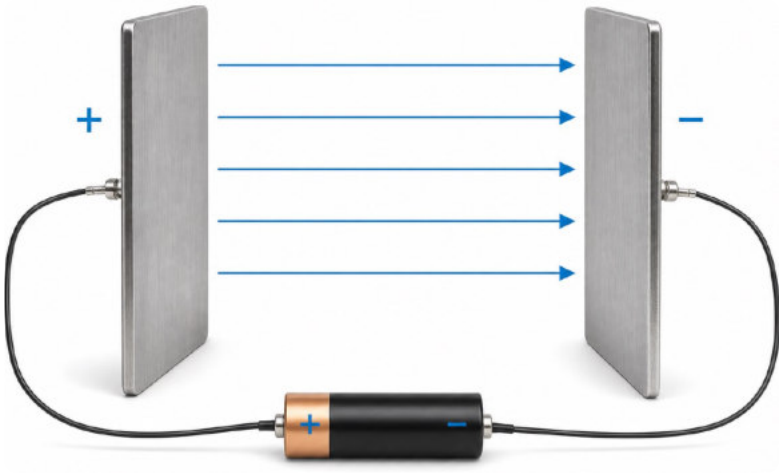
1. تربط فرق الجهد بشدة المجال والمسافة في مجال كهربائي منتظم باستخدام $V = Ed$.
2. تنظر إلى شدة المجال E باعتبارها مقدار ميل منحنى الموضع-الجهد x-V، بوحدة V/m.
3. تحدد اتجاه القوة الكهروستاتيكية $F = qE$ ومقدارها لشحنة موضوعة داخل المجال.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تتابع

عند توصيل صفيحتين (لوحين) معدنيتين كبيرتين ومتوازيتين ببطارية، فإن إحداهما تكون موجبة والأخرى سالبة. يحمل الحيز بينهما مجالًا كهربائيًّا له الشدة والاتجاه نفسيهما عند كل نقطة؛ أي مجالًا منتظمًا. وإذا أُطلقت كرة صغيرة موجبة الشحنة عند أي موضع بين الصفيحتين، تعرضت لقوة ثابتة نحو الصفيحة السالبة. يكون الجهد مرتفعًا قرب الصفيحة الموجبة، وينخفض بانتظام عبر الفجوة حتى الصفيحة السالبة..

فكرة أساسية:

يكون المجال الكهربائي بين صفيحتين متوازيتين ومشحونتين منتظمًا؛ أي له الشدة والاتجاه نفسيهما عند كل نقطة.



وصف الشكل 2-4-1: المجال بين صفيحتين متوازيتين ومشحونتين منتظم، فتظل شدته واتجاهه ثابتين عند كل نقطة.

تنبأ:

(أ) عند الانتقال من الصفيحة (اللوح) الموجبة إلى السالبة، هل يرتفع الجهد أم ينخفض أم يظل ثابتًا؟

(ب) إذا ضاعفت المسافة بين الصفيحتين (اللوحين) مع ثبات فرق الجهد، فهل تزداد شدة المجال أم تقل أم تظل ثابتة..

استكشف - رسم خريطة الجهد عبر الفجوة بين صفيحتين [القطبين المتوازيين]

ما ستفعله: اقرأ الجهد عند عدة مواضع على امتداد الفجوة بين صفيحتين (قطبين) متوازيتين يثبت بينهما فرق جهد، واختبر هل تكون $E = V/x$ ثابتة في كل موضع.

الزمن: 15 دقيقة.

الأدوات:

- صفيحتان (قطبان) معدنيتان متوازيتان على حاملين.
- مصدر جهد مستمر ثابت.
- فولتميتر عالي المقاومة بمسبارين .
- مسطرة.

مسطرة

فولتميتر

مصدر تيار مستمر

ألواح متوازية

الخطوات:

١ ثبّت المسافة d بين الصفيحتين واضبط فرق جهد ثابتًا بينهما، ولا تغيره طوال المحاولة.

٢ ضع مسبارى الفولتميتر عند موضع x مقاس من الصفيحة السالبة، وسجّل الجهد V.

٣ كرر القياس عند مواضع أخرى، واحسب لكل صف $E=\frac{V}{x}$ بوحدة V/m.

٤ ارسم العلاقة بين V مقابل الموضع x، وحدد شكل المنحنى.

٥ جدول النتائج: لكل محاولة من 1 إلى 3 سجّل الموضع x بالمتر، والجهد V بالفولت، ثم $E=\frac{V}{x}$ بوحدة V/m.

رقم التجربة	الموضع (m) ×	الجهد (V) V	$E=\frac{V}{x}$ (V/m)
1			
2			
3			

حلِّل ما جمعته:

(أ) هل تظل $E=\frac{V}{x}$ ثابتة تقريبًا في كل موضع؟ وهل تؤدي الزيادات المتساوية في x إلى زيادات متساوية في V؟

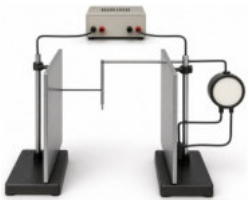
(ب) الرسم البياني للجهد V مقابل الموضع x هو خط مستقيم. ماذا يخبرك مقدار ميل الخط المستقيم عن شدة المجال الكهربائي؟ وفي أي اتجاه يشير المجال.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل قراءة الجزء التالي.

من الملاحظة إلى النموذج:

من أين يأتي انتظام المجال، وماذا يتيح لنا؟

لا يوجد ما يفرض على المجال الكهربائي أن يكون متساويًا في كل مكان؛ فعلى سبيل المثال، حول شحنة منفردة لا يكون المجال منتظمًا بوضوح، بل تضعف شدته مع مربع المسافة. أما (صفيحتان) لوحان كبيران ومتوازيان، فترتيبهما هو الذي يزيل هذا التغير. قف في أي مكان في



وصف الشكل 2-4-2: صفيحتان متوازيتان تفصل بينهما مسافة ثابتة d، ويحافظ مصدر تيار مستمر على فرق جهد ثابت بينهما، بينما يقرأ مسبار فولتميتر عالي المقاومة الجهد عند كل موضع x في الفجوة

ملاحظة القياس:

قِس x من الصفيحة السالبة منخفضة الجهد على الخط المستقيم المتجه إلى الصفيحة الموجبة، وأبقِ المسبار على خط المنتصف حتى تنتمي كل قراءة إلى موضع محدد

منتصف المسافة بين اللوحين، وستبدو الألواح متشابهة في كل اتجاه — فلا توجد حافة أقرب، ولا موضع مميز عن غيره — ولذلك لا يوجد شيء يجعل المجال يتغير معه.

وهذا التشابه هو الفائدة الأساسية من هذا الدرس: فهو يحوّل العلاقات التي تناولناها في الدرسين السابقين من عبارات تتعلق بالنقاط إلى عبارات تتعلق بالمسافات التي يمكنك قياسها بالمسطرة.

اشتقاق العلاقة في ثلاث خطوات:

خذ ترتيب اللوحين، وادفع شحنة q مباشرة عبر المسافة بينهما، وهي مسافة d، في اتجاه المجال الكهربائي.

الآن احسب الطاقة بطريقتين.

الطريقة الأولى: كما تعلمنا في الدرس السابق، فإن القوة الكهروستاتيكية تبذل شغلًا يساوي حاصل ضرب الشحنة q في مقدار الانخفاض بين الطرفين.

الطريقة الثانية: من الميكانيكا، إذا أثرت قوة ثابتة: $F = qE$ على امتداد مسار مستقيم طوله d، فإنها تبذل شغلًا مقداره: $W = qEd$ هاتان الطريقتان تصفان نفس انتقال الطاقة، ولذلك: $qEd =$ (الانخفاض) q وبإلغاء الشحنة q — وهو أمر منطقي، لأن اللوحين والمسافة بينهما لا يعتمدان على الشحنة التي تم نقلها — يتبقى علاقة تربط ثلاث كميات....

لماذا يكون الرسم البياني خط مستقيم؟

الزيادات المتساوية في المسافة تقابل الآن مقادير متساوية من فرق الجهد؛ لأن المجال الكهربائي له نفس الشدة، وبالتالي يبذل الشغل نفسه خلال كل مسافة متساوية.

وأي كمية تتغير بمقادير متساوية خلال فترات متساوية يتم تمثيلها بيانيًا بخط مستقيم؛ لذلك فإن الرسم البياني Vx في صورة خط مستقيم هو دليل بصري على أن المجال الكهربائي منتظم. وعندما ينحني الرسم البياني الحقيقي، فهذا يعني أن المجال غير منتظم في تلك المنطقة. ويعبّر ميل الخط عن مقدار فرق الجهد الذي يتغير لكل متر، وهو ما يساوي شدة المجال الكهربائي بدقة. وبما أن الحركة في اتجاه المجال تعني أن الجهد الكهربائي ينخفض، فإن الخط البياني ينحدر في الاتجاه الذي يشير إليه المجال. لذلك:

* إشارة الميل تحدد اتجاه المجال.
* مقدار الميل يحدد شدة المجال الكهربائي.

فرق الجهد والعلاقة $V = Ed$:

يسمى الفرق في الجهد الكهربائي بين نقطتين $V_A - V_B$ فرق الجهد أو الفولتية. ويسمى المجال الذي له الشدة والاتجاه نفسيهما في كل نقطة مجالًا كهربائيًا منتظمًا.

في مجال منتظم شدته E بوحدة N/C، يكون فرق الجهد V بين نقطتين A وB تفصل بينهما مسافة d مقاسة في اتجاه المجال: $V = Ed$.

شدة المجال هي ميل منحنى V–x:

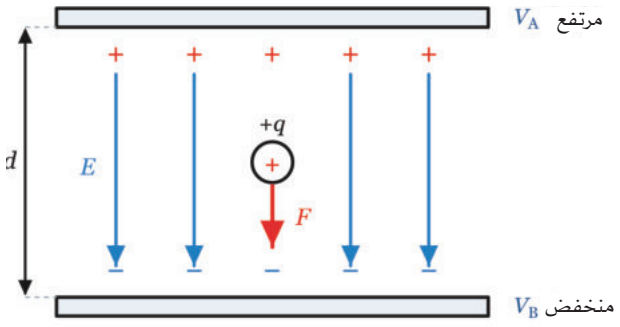
من $V = Ed$ يمكن كتابة $E = V/d$. ولذلك تساوي شدة المجال E مقدار ميل الخط المستقيم في منحنى الجهد V مقابل الموضع x. ولهذا تُستخدم V/m أيضًا وحدة لشدة المجال، وهي مكافئة لـ N/C.

يتجه المجال الكهربائي من الجهد الأعلى نحو الجهد الأدنى.

مصطلح:
تفشل فكرة التشابه بالقرب من حواف اللوحين، حيث يمكن للنقطة أن تحدد أي حافة هي الأقرب إليها. هناك تنحني خطوط المجال إلى الخارج وتنتشر، ولذلك يجب أن يكون اللوحان عريضين مقارنةً بالمسافة الفاصلة بينهما قبل أن يمكن الوثوق بأي حسابات في هذا الدرس.
(فرق الجهد (الفولتية) هو الفرق في الجهد الكهربائي بين نقطتين VB – VA، ويقاس بالفولت.)

فكرة أساسية:
حقيقة أساسية: في المجال الكهربائي المنتظم تكون شدة المجال ثابتة عند كل نقطة، وفرق الجهد خلال مسافة d في اتجاه المجال هو $V = Ed$، ومنه $E = V/d$

ملاحظة:
في منحنى x–V تساوي شدة المجال مقدار الميل، ويتجه المجال من الجهد الأعلى إلى الجهد الأدنى



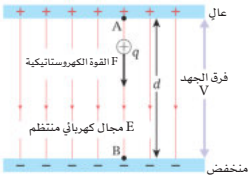
وصف الشكل 2-4-3: مجال منتظم E بين صفيحتين أفقيتين تفصل بينهما مسافة d، ويتجه من الصفيحة ذات الجهد العالي V_A إلى الصفيحة ذات الجهد المنخفض V_B. وتتأثر شحنة موجبة q+ بقوة F = qE من الجهد العالي نحو المنخفض

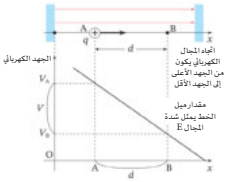
نقطة

- فرق الجهد بين نقطتين هو $V_A - V_B$.
- والمجال الذي له الشدة والاتجاه نفسيهما في كل موضع هو مجال كهربائي منتظم، وفيه يكون فرق الجهد عبر مسافة d في اتجاه المجال V = Ed.
- ولذلك تساوي شدة المجال مقدار ميل منحنى V–x وتقاس بوحدة V/m. ويتجه المجال من الجهد الأعلى نحو الجهد الأدنى.

صندوق المعادلات:

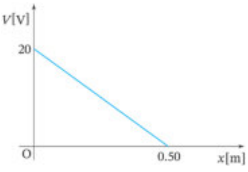
فرق الجهد:	$V = V_A - V_B$، ووحدته الفولت.
المجال المنتظم:	V = Ed، ومنه E = V/d، ووحدة E هي V/m = N/C.
شغل القوة الكهروستاتيكية:	القوة على شحنة: F = qE؛ وتكون قوة الشحنة الموجبة في اتجاه المجال





مثال محلول:

الموقف:	يوجد مجال كهربائي منتظم موازٍ لمحور x. يبين منحنى الجهد V مقابل x أن الجهد 20 V عند x = 0 وينخفض إلى الصفر عند x = 0.50 m. أ- حدد اتجاه المجال. ب- حدد شدة المجال E بوحدة V/m. ج- إذا وُضعت شحنة موجبة $+1.2\times10^{-7}$ C في المجال، فحدد اتجاه القوة F ومقدارها.
المعطيات والمطلوب:	من المنحنى: V = 20 V عند x = 0، و V = 0 عند x = 0.50 m؛ أي إن فرق الجهد عبر d = 0.50 m هو 20 V. والشحنة $q = +1.2\times10^{-7}$ C.
التمثيل:	الجهد أعلى عند x = 0 وأقل عند x = 0.50 m، والخط في منحنى V–x مستقيم.
الاستراتيجية:	نستخدم V = Ed، ومنه E = V/d بوصفه مقدار الميل. ويشير المجال من الجهد الأعلى إلى الأدنى. ثم نستخدم F = qE، وتكون قوة المؤثرة على الشحنة الموجبة في اتجاه المجال.
الحل الموضح:	(أ) ينخفض الجهد عند زيادة x من 20 V إلى الصفر؛ ولذلك يتجه المجال من الجهد الأعلى إلى الأدنى، أي في الاتجاه الموجب لمحور x. (ب) E = V/d = 20/0.50 = 40 V/m. (ج) تتأثر الشحنة الموجبة بقوة في اتجاه المجال، أي الاتجاه الموجب لمحور x. ومقدارها $F = qE = (1.2\times10^{-7}) \times 40 = 4.8\times10^{-6}$ N.



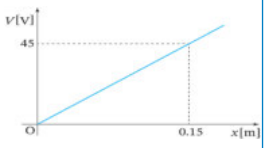
وصف الشكل 2-4-4: مثال محلول: ينخفض الجهد V بشكل منتظم من 20 فولت عند x = 0 إلى 0 عند x = 0.50 متر.

منطقية الحل:	يعطي تغير 20 V خلال 0.50 m ميلًا مقداره 40 V/m. وضرب هذه الشدة في الشحنة الصغيرة 1.2×10^{-7} C يعطي قوة من رتبة 10^{-6} N، وهو مقدار معقول. وتُدفع الشحنة الموجبة نحو الجهد المنخفض كما هو متوقع.
اشرح بنفسك:	لماذا تساوي شدة المجال مقدار ميل خط x–V؟ ولماذا تتجه قوة الشحنة الموجبة نحو الجهد المنخفض؟

حاول:

١) تقع A وB على خط المجال نفسه في مجال منتظم. المسافة بينهما 0.80 m، وجهد A أعلى من B بمقدار 40 V. عيّن شدة المجال بوحدة V/m.

٢) يوجد مجال منتظم موازٍ لمحور x. يبين منحنى V مقابل x أن الجهد يزداد بانتظام حتى يبلغ 45 V عند $x = 0.15$ m. (أ) عيّن اتجاه المجال. (ب) عيّن شدته E. (ج) وُضعت شحنة 1.6×10^{-7} C + داخله؛ عيّن اتجاه ومقدار القوة التي تتأثر بها الشحنة نتيجة هذا المجال.



وصف الشكل 2-4-5: يرتفع الجهد Vبشكل منتظم مع x ليصل الى 45 فولت عند x=1.5m

في سياق جديد:

يمكن أحيانًا معاملة الحيز بين القاعدة المستوية لسحابة رعدية والأرض المستوية كمجال منتظم له الشدة نفسها في كل موضع. ويمكن تقدير شدة المجال من ارتفاع السحابة وفرق الجهد بينها وبين الأرض باستخدام E = V/d. وعندما تتجاوز الشدة الحد الذي يتحمله الهواء، نحو 3×10^{6} V/m، يصبح الهواء موصلًا فجأة ويحدث البرق.

دورك: ترتفع قاعدة سحابة رعدية 800 m فوق أرض مستوية، وفرق الجهد بينهما 2.4×10^{8} V. قدّر شدة المجال، وبيّن هل وصلت إلى حد انهيار عزل الهواء 3×10^{6} V/m.

وصف الشكل: تعمل القاعدة المستوية لسحابة عاصفة والأرض المستوية كصفيحتين متوازيتين تقريبًا، ويؤدي انهيار عزل الهواء في المجال شبه المنتظم إلى ضربة برق نحو الأرض

طبيعة العلم:

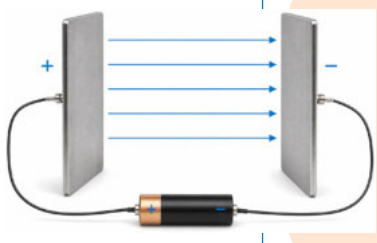
من الأصل – المجال بين سحابة رعدية والأرض. إن معاملة الفجوة الهائلة غير المنتظمة بين السحابة والأرض باعتبارها «مجالًا منتظمًا» تقريب بعيد عن الواقع؛ فالمجال الحقيقي ليس منتظمًا تمامًا. ومع ذلك يسمح النموذج البسيط بتقدير الشدة من كميتين قابلتين للقياس: فرق الجهد والمسافة، ويتنبأ بالرتبة الصحيحة لانهيار عزل الهواء.

يُحكم على النموذج الفيزيائي بمدى فائدته ووضوح حدود تنبؤه، لا بكونه مطابقًا للواقع تمامًا. ويُعتمد نموذج المجال المنتظم عندما تكون الصفائح أو الأسطح كبيرة ومتقاربة، ويفشل قرب الحواف حيث ينتشر المجال ولا تعود الخطوط مستقيمة ومتساوية التباعد.

دورك: اقترح حالة يؤدي فيها افتراض انتظام مجال كهربائي حقيقي إلى تقدير ضعيف، وحدد السمة التي تكسر افتراض الانتظام..

إجابة سؤال الدرس:

في المجال الكهربائي المنتظم ترتبط الكميات الثلاث بالعلاقة V = Ed؛ ففرق الجهد بين نقطتين يساوي شدة المجال مضروبة في المسافة بينهما مقاسة في اتجاه المجال. وبالمثل تكون E = V/d مقدار ميل منحنى x–V بوحدة V/m، ويتجه المجال من الجهد الأعلى إلى الأدنى. وتتأثر شحنة داخله بقوة F = qE، في اتجاه المجال للشحنة الموجبة.



الشكل الذى بدأناه

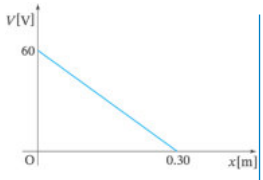
تمرين:

١) تقع A وB على خط المجال نفسه في مجال منتظم، والمسافة بينهما 0.60 m، وجهد A أعلى من B بمقدار 15 V. عيّن شدة المجال بوحدة V/m.

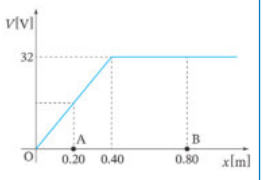
٢) تقع A وB على خط مجال منتظم شدته 40 V/m، وجهد A أعلى من B بمقدار 20 V. عيّن المسافة بينهما بالمتر.

٣) مجال منتظم موازٍ لمحور x، ويبين منحنى V مقابل x أن الجهد ينخفض من 60 V عند x = 0 إلى الصفر عند x = 0.30 m. (أ) عيّن اتجاه المجال. (ب) عيّن شدته. (ج) وُضعت شحنة $+2.8 \times 10^{-7}$ C؛ عيّن اتجاه القوة ومقدارها.

٤) يوجد مجال موازٍ لمحور x، ويزداد الجهد بانتظام حتى 32 V عند x = 0.40 m ثم يظل ثابتًا. تقع A عند x = 0.20 m وB عند x = 0.80 m. (أ) عيّن شدة المجال عند A. (ب) عيّن شدة المجال عند B. (ج) إذا نُقلت شحنة $+1.0 \times 10^{-7}$ C من B إلى الأصل O، فعيّن شغل القوة الكهربائية W.



وصف الشكل 2-4-6: التمرين 3: ينخفض الجهد V بشكل منتظم من 60 فولت عند x = 0 إلى 0 عند x = 0.30 متر



وصف الشكل 2-4-7: التمرين 4: يرتفع الجهد بشكل منتظم إلى 32 فولت عند x = 0.40 m ويبقى ثابتًا بعد ذلك؛ تقع النقطة A عند x = 0.20 m وتقع النقطة B عند x = 0.80 m

الدرس ٢ ـ ٥: حركة الشحنات تحت تأثير قوة كهروستاتيكية

؟ سؤال الدرس:

مثلما تزداد سرعة كرة ساقطة بفعل الجاذبية، كيف تتغير سرعة الشحنة وطاقتها أثناء حركتها في مجال كهربائي؟

ستتعلم أن

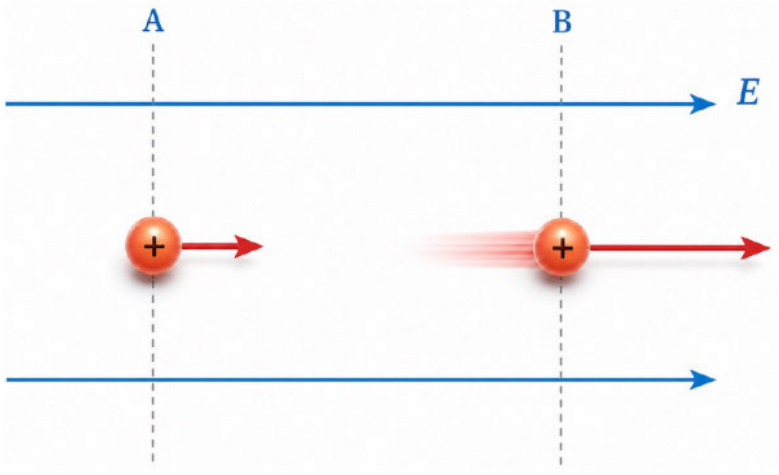
1. تعبّر عن طاقة وضع شحنة في مجال كهربائي بالعلاقة $U = qV$ بوحدة الجول.
2. تطبق حفظ الطاقة الميكانيكية، $\frac{1}{2}mv^2 + qV =$ ثابت، على شحنة تتأثر فقط بالقوة الكهروستاتيكية وحدها.
3. تجد سرعة جسيم مشحون عند نقطة من سرعته وجهده عند نقطتين معلومتين، مع مراعاة إشارات q وV.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تستمر

يوجد أيون موجب في منطقة ذات جهد كهربائي مرتفع، ثم يتحرك نحو منطقة جهدها أقل تحت تأثير القوة الكهروستاتيكية وحدها. دون أن يدفعه أحد تزداد سرعته، مثل كرة تسقط من ارتفاع بفعل الجاذبية. هنا يبذل المجال الكهربائي الشغل، فتتحول طاقة الوضع الكهربائية المختزنة إلى طاقة حركة...

فكرة أساسية:

القوة الكهروستاتيكية قوة محافظة؛ فالشغل الذي تبذله بين نقطتين لا يعتمد على المسار المتبع. حيث عندما تتحرك شحنة موجبة من جهد كهربائي أعلى إلى جهد كهربائي أقل، فإن طاقة وضعها الكهربائية تقل، وتتحول هذه الطاقة إلى طاقة حركة، فتزداد سرعته



وصف الشكل 2-5-1: تزداد سرعة أيون موجب أثناء انتقاله من A ذات الجهد المرتفع إلى B ذات الجهد الأقل في اتجاه المجال E

تنبأ:

(أ) أثناء انتقال الأيون الموجب من جهد مرتفع إلى جهد أقل، هل تزداد طاقة حركته، أم تنقص، أم تظل ثابتة؟

(ب) عندما تنخفض طاقة وضعه qV، فأين تذهب هذه الطاقة؟

استكشف - تبادل الطاقة على مستوى مائل أملس

ما ستفعله: دحرج كرة صغيرة على مستوى مائل أملس، وقِس السرعة التي تكتسبها نتيجة انخفاض رأسي معلوم، لتختبر هل تحدد قيمة الانخفاض وحدها مقدار السرعة المكتسبة.

الزمن: 15 دقيقة.

الأدوات:

- مستوى أو مسار مائل أملس منخفض الاحتكاك.
- كرة زجاجية أو فولاذية صغيرة.
- بوابة ضوئية بمؤقت لقراءة السرعة عند B.
- مسطرة أو عصا مترية.
- ميزان لتعيين كتلة الكرة m.

ميزان

مسطرة

بوابة ضوئية

منحدر مائل

الخطوات:

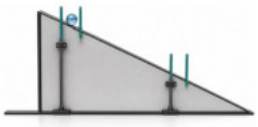
١ زن الكرة لتعيين كتلتها m، وضع البوابة الضوئية عند نقطة منخفضة B على المستوى الأملس.

٢ حرر الكرة من السكون عند نقطة محددة A، وقِس الانخفاض الرأسي Δh إلى B، واقرأ سرعتها v_B من البوابة.

٣ احسب لكل محاولة طاقة الحركة المكتسبة $\frac{1}{2}mv_B^2$، وطاقة وضع الجاذبية المفقودة $mg\Delta h$، مع $g = 9.8\ m/s^2$.

٤ كرر من نقطتي إطلاق أعلى بحيث تزداد Δh في كل مرة.

محاولة	Δh بالمتر	v_B بوحدة (m/s)	v_B^2 بوحدة (m^2/s^2)	$v^2/\Delta h$ بوحدة (m/s^2)
1				
2				
3				



وصف الشكل 2-5-2: تُحرر كرة عند A على ارتفاع h_A، فتنزلق على مستوى أملس منخفض الاحتكاك إلى B ذات الارتفاع h_B، وتقرأ بوابة ضوئية سرعتها.

حلّل ما جمعته:

(أ) هل تظل $v_B^2/\Delta h$ ثابتة ضمن خطأ القياس عند زيادة ارتفاع الإطلاق؟ وماذا تخبرك القيمة الثابتة عن مصير الطاقة التي تفقدها الكرة عند الهبوط؟

(ب) القوة الكهروستاتيكية محافظة مثل الجاذبية. فإذا استبدلت mgh بطاقة الوضع الكهربائية qV، فما هو المجموع الثابت الذي يجب أن تحافظ عليه الشحنة؟ وهل تزداد سرعتها أم تقل عندما تنخفض qV؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل قراءة الجزء التالي.

ملاحظة القياس:

حرر الكرة من السكون، وخذ $\Delta h = h_A - h_B$ باعتباره الهبوط الرأسي لا طول المسار المائل. تحمل الكرة المتدحرجة جزءًا من طاقتها في صورة دوران، ولذلك تكون $\frac{1}{2}mv^2$ المقاسة أقل من $mg\Delta h$ بالنسبة نفسها تقريبًا في كل محاولة؛ والثابت الدقيق هو التناسب: إذا تضاعف الهبوط تضاعفت v^2.

من الملاحظة إلى النموذج:

طاقة الوضع لشحنة في مجال:

لماذا يجب أن تكون الطاقة مساوية للشحنة مضروبة في الجهد؟

لأن هذا هو المعنى المقصود بالجهد أصلًا؛ فكل كولوم يوضع عند نقطة معينة يمتلك مقدارًا محددًا من الطاقة، والجهد الكهربائي V ليس إلا مقدار هذه الطاقة لكل كولوم.

نضرب الجهد في عدد الكولومات الموجودة فعليًا عند تلك النقطة، فنحصل على الطاقة نفسها بوحدة الجول.

لا يوجد شيء إضافي تم قياسه هنا؛ فخريطة الجهد للمجال، التي تم رسمها مرة واحدة، تتحول إلى خريطة للطاقة بمجرد تحديد مقدار الشحنة التي نضعها عليها.

وبما أن الشحنة يمكن أن تكون موجبة أو سالبة، كما أن الجهد يمكن أن تكون قيمته أقل من الصفر، فإن حاصل الضرب يحمل إشارتين مستقلتين؛ فمثلًا:

الشحنة السالبة الموضوعة عند جهد موجب تمتلك طاقة وضع سالب.

لماذا يمكن كتابة سجلّ للطاقة أصلًا؟

تُعطى الجاذبية طاقةَ وضع mgh لسبب واحد: الشغل الذي تبذله الجاذبية بين ارتفاعين معينين يكون نفسه، بغضّ النظر عن المسار الذي يسلكه الجسم.

وبالمثل، فإن القوة الكهروستاتيكية ترتبط بطاقة الوضع qV للسبب نفسه. وهذه الخاصية هي التي تجعل الحساب بأكمله ممكنًا؛ إذ إن الشغل الذي يبذله المجال بين نقطتين يتحدد فقط بجهدي النقطتين، ولذلك لا يمكن أن يُستهلك جزء من الطاقة في طول المسار أو شكله.

ومن ثم، فإن أي نقص في طاقة الوضع يجب أن يظهر في صورة زيادة في طاقة الحركة، ولا شيء آخر.

نحسب مجموع الطاقتين عند البداية، ثم عند النهاية، ونجعل القيمتين متساويتين، ونختصر الكتلة والشحنة حيث تتكرران، فنحصل على معادلة السرعة المجهولة.

$$V_B^2 = V_A^2 + \frac{2q(V_A - V_B)}{m}$$

لاحظ ما الذي لا يظهر في المعادلة:

لا توجد مسافة، ولا شدة مجال كهربائي، ولا وصف للمسار.

فقط الجهدان عند النقطتين والسرعة التي بدأ بها الجسم.

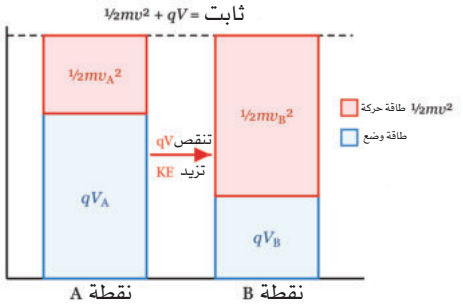
تكتب طاقة الوضع U الناتجة عن القوة الكهروستاتيكية لشحنة q في الصورة U = qV، حيث V هو الجهد عند موضع الشحنة. ويحمل كل من q وV إشارته، ولذلك قد تكون U موجبة أو سالبة.

حفظ الطاقة الميكانيكية

لأن القوة الكهروستاتيكية قوة محافظة، ينطبق عليها قانون حفظ الطاقة الميكانيكية: طاقة الوضع + طاقة الحركة = ثابت.

إذا مرت شحنة كتلتها m بالنقطة A بسرعة vA وجهد VA، ثم بالنقطة B بسرعة vB وجهد VB، ظل مجموع qV و½mv² ثابتًا: ½mvA² + qVA = ½mvB² + qVB

عندما تنخفض طاقة الوضع ترتفع طاقة الحركة بالمقدار نفسه وتزداد سرعة الشحنة.



وصف الشكل 3 – 5 – 2: يوضح مخطط الطاقة عند A وB أن طاقة الوضع qV وطاقة الحركة ½mv² تتبادلان، لكن مجموعهما يظل ثابتًا؛ فعندما تنخفض qV من A إلى B ترتفع طاقة الحركة بالمقدار نفسه

حقيقة أساسية:

الجول، كما يُقرأ من خريطة الجهد الكهربي 1J = 1C V

أي أن شحنة مقدارها واحد ميكروكولوم عند جهد مقداره واحد كيلوفولت تمتلك بالفعل طاقة مقدارها ميلي جول واحد.

أما الأيون الذي يحمل شحنة مقدارها 10^{-19}، فيحتاج إلى آلاف الفولتات حتى تصبح الطاقة التي يخزنها ذات قيمة يمكن حسابها وقياسها

مصطلح:

القوة المحافظة قوة هي قوة يكون شغلها بين نقطتين متماثلًا على طول أي مسار، وهذا هو بالضبط الشرط اللازم لوجود طاقة وضع لهذه القوة.

أما الاحتكاك ومقاومة الهواء فلا يحققان هذا الشرط؛ إذ يزداد شغلهما بزيادة طول المسار، ولذلك لا يمكن تعريف طاقة وضع ثابتة لهما. وبالتالي، فإن مجموع الطاقة الميكانيكية لا يظل ثابتًا بمجرد تأثير إحدى هاتين القوتين على الشحنة.

لذلك يفترض نموذج هذا الدرس أن الشحنة تتأثر بالمجال الكهربائي وحده ويعتمد شغلها على نقطتي البداية والنهاية فقط، ولذلك ترتبط بطاقة وضع. والقوة الكهروستاتيكية محافظة، ويكون لها ½mv² + qV = ثابت.

ملاحظة:

يظل مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع الكهربائية ثابتًا عند كل نقطة:

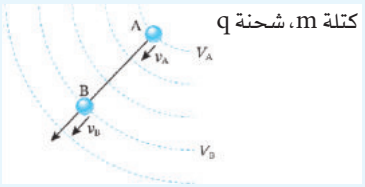
$\frac{1}{2}mvA^2 + qV_A = \frac{1}{2}mvB^2 + qV_B$

نقطة:

قانون حفظ الطاقة الميكانيكية: – ثابت = طاقة الحركة + طاقة الوضع

يمكن التعبير عن طاقة الوضع U[J] الناتجة عن القوة الكهروستاتيكية التي تمتلكها شحنة q[C] بالعلاقة: U=qV حيث V [V] هو الجهد الكهربائي.

بما أن القوة الكهروستاتيكية قوة محافظة، فإن قانون فظ الطاقة الميكانيكية ينطبق عند النقطتين A و B:



كتلة m، شحنة q

	طاقة الحركة	طاقة الوضع بسبب القوة الكهروستاتيكية
1	$\frac{1}{2}mv_A^2$	qV_A
2	$\frac{1}{2}mv_B^2$	qV_B

$$\frac{1}{2}mv_A^2 + qV_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + qV_B$$

يجب أن تكون لكل من q و V إشارة.

صندوق المعادلات:

طاقة الوضع الكهروستاتيكية:	$U = qV$
الوحدة:	الجول J، حيث q بالكولوم C، و V بالفولت V. سجلّ الطاقة (Energy ledger) مجموع الحدّين المكتوب في النقطة السابقة يأخذ قيمة واحدة ثابتة طوال الرحلة. نحسبه عند نقطة البداية، ثم نحسبه عند نقطة النهاية، ونجعل القيمتين متساويتين.
سرعة الجسيم عند النقطة B:	$V_B^2 = V_A^2 + \frac{2q(V_A - V_B)}{m}$ (بعد حل سجلّ الطاقة لإيجاد السرعة المجهولة)

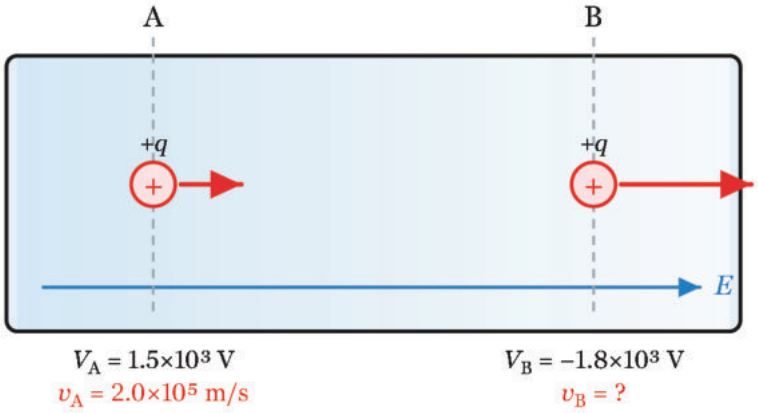
مثال محلول:

الموقف:	مر أيون موجب كتلته 6.6×10^{-27} kg وشحنته 3.2×10^{-19} C بالنقطة A، جهدها 1.5×10^{3} V، بسرعة 2.0×10^{5} m/s. عيّن سرعته عند B، جهدها -1.8×10^{3} V، بافتراض أن القوة الكهروستاتيكية وحدها تؤثر فيه.
المعطيات والمطلوب:	$m = 6.6 \times 10^{-27}$ kg، $q = 3.2 \times 10^{-19}$ C، $V_A = 1.5 \times 10^{3}$ V، $V_A = 2.0 \times 10^{5}$ m/s، $V_B = -1.8 \times 10^{3}$ V. المطلوب V_B.
التمثيل:	يحمل الأيون عند كل نقطة طاقة حركة $\frac{1}{2}mv^2$ وطاقة وضع qV، ويظل مجموعهما متساويًا عند A و B.
الاستراتيجية:	حدِّد النقطتين اللتين يمر بهما الأيون، واكتب الكميات المعروفة عند كل نقطة: السرعة والجهد الكهربائي. وبما أن شغل المجال يتحدد بواسطة هذين الجهدين فقط، فيمكن حساب مجموع الطاقتين عند نقطة البداية، ثم حسابه مرة أخرى عند نقطة النهاية، وبعد ذلك نجعل القيمتين متساويتين. عوِّض عن q وعن الجهدين مع مراعاة إشاراتهما؛ فالجهد الثاني هنا سالب، ثم أوجد المجهول المتبقي نساوي مجموع طاقة الحركة وطاقة الوضع عند البداية والنهاية، لأن القوة الكهروستاتيكية محافظة. نحتفظ بإشارات q و V.

ملاحظة مهمة:

لا تحدد مسبقًا الاتجاه الذي يجب أن تزداد فيه سرعة الجسيم.
فالشحنة السالبة تعكس الحالة؛ إذ يمكنها أن تزداد سرعتها أثناء تحركها نحو جهد كهربائي أعلى، لأن $q<0$، وبالتالي فإن حاصل الضرب qV يقل عندما يزداد V.
لذلك، عوّض بالقيم التي تحمل إشاراتها الصحيحة، ودع العمليات الجبرية تحدد النتيجة

الحل الموضح:	من حفظ الطاقة: $\frac{1}{2}mvA^2 + qV_A = \frac{1}{2}mvB^2 + qV_B$. $\frac{1}{2} \times (6.6\times10\times \frac{1}{2} = (10^3\times1.5) \times (^{19}-10\times3.2) + ^2(10^5\times2.0) \times (^{27}-$ $^{27}-10\times6.6)) \times v^2 + (3.2\times10^{-19}) \times (-1.8\times10^3)$. إذن $v^2 = (2.0\times10^5)^2 + [2 \times (3.2\times10^{-19}) \times \{1.5\times10^3 - (-$ $(1.8\times10^3)\}] \div (6.6\times10^{-27})$. ومنه $v^2 = 4.0 \times 10^{10} + 32 \times 10^{10} = 36 \times 10^{10}$ m/s. $v = 6.0 \times 10^5$
منطقية الحل:	انخفض الجهد بمقدار 3.3×10^3 V، ولذلك يفقد الأيون الموجب طاقة وضع كهربائية وتزداد سرعته. والسرعة النهائية 6.0×10^5 m/s أكبر من الابتدائية 2.0×10^5 m/s كما هو متوقع.
اشرح بنفسك:	لماذا تزداد سرعة الأيون رغم أن جهد B سالب؟ ولماذا يجب الاحتفاظ بإشارة V_B؟



وصف الشكل 4-5-2: يمر الأيون الموجب A بسهم سرعة قصير ($V_A = 2.0\times10^3$ m/s، $V_A = 1.5 \times 10^3$ V) بسهم أطول B و ($V_B = -1.8 \times 10^3$ V، $V_B = ?$).

الآن حاول: أيون موجب كتلته 6.6×10^{-27} kg وشحنته 3.2×10^{-19} C أُطلق من السكون عند A ذات الجهد 1.65×10^3 V، وانتقل إلى B ذات الجهد صفر تحت تأثير القوة الكهروستاتيكية وحدها. أوجد سرعته عند B.

حاول:

١) وُضع جسيم مشحون كتلته 3.0×10^{-6} kg وشحنته 1.6×10^{-7} C برفق عند A ذات الجهد 8.0 V، فبدأ يتحرك. عيّن سرعته عند B ذات الجهد 2.0 V، بافتراض أن القوة الكهروستاتيكية وحدها تؤثر فيه..

وصف الشكل: داخل أنبوب مفرغ تخرج الجسيمات من الفتيلة الساخنة بسرعة تكاد تكون صفرًا، وتتسارع خلال فتحة المصعد لتكوّن حزمة سريعة مستقيمة نحو الشاشة.

في سياق جديد:

مدفع الإلكترونات الموجود في أنبوب مفرغ يستخدم مبدأ تبادل الطاقة نفسه بصورة معكوسة. يُطلق إلكترون سالب الشحنة من السكون قرب فتيلة ساخنة، ويُجذب نحو صفيحة عند جهد أعلى. وأثناء عبوره فرق الجهد تنخفض طاقة وضعه الكهربائية وتزداد طاقة حركته، فيصل إلى الصفيحة بسرعة كبيرة؛ وهذا أساس شعاع الإلكترونات في شاشات التلفاز القديمة.

دورك: يبدأ إلكترون، مقدار شحنته 1.6×10^{-19} C وكتلته 9.1×10^{-31} kg، من السكون ويتسارع خلال فرق جهد 100 V. استخدم $\frac{1}{2}mv^2 = |q|V$ لتقدير سرعته النهائية.

طبيعة العلم:

١) من الأصل - آلية مسرّع الجسيمات. تستخدم بحوث الفيزياء أجهزة ضخمة تسمى المسرعات لتسريع الإلكترونات والبروتونات إلى سرعات قريبة من سرعة الضوء ثم تصادمها. حيث يُنشأ بداخلها مجال كهربائي قوي لجذب الجسيمات المشحونة، وبتحويل طاقة الوضع الكهربائية المكتسبة من المجال الكهربائي القوي إلى طاقة حركة، تصل الجسيمات إلى سرعات هائلة.

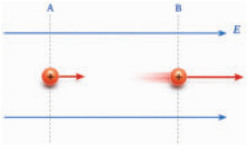
٢) العلاقة $\frac{1}{2}mv^2 + qV$ ثابت، التي تُختبر على أيون بطيء في المختبر، هي مبدأ حساب الطاقة نفسه الذي يوجه آلات تمتد لكيلومترات. لكن عند الاقتراب من سرعة الضوء يجب استبدال طاقة الحركة بصيغتها النسبية. وهكذا تكتسب النماذج الثقة: يتم التأكد من صحة القانون في حالة بسيطة مضبوطة، ثم يواصل التنبؤ خارجها. ونفس الحساب الذي يفسر كرة على مستوى مائل، يفسر أيونًا بين صفيحتين، وبروتونًا في مسرّع.

دورك: اقترح جهازًا يوميًّا يسرع الشحنات بتحويل طاقة الوضع الكهربائية إلى طاقة حركة، واذكر الطاقتين المتبادلتين.

وصف الشكل 2-5-5: مسرّع خطي يمر فيه جسيم مشحون عبر سلسلة من أنابيب الانجراف، ويمنحه المجال في كل فجوة دفعة تحول طاقة الوضع الكهربائية إلى حركة فتستمر سرعته في الزيادة.

إجابة سؤال الدرس:

لأن القوة الكهروستاتيكية محافظة، تحفظ الشحنة المتحركة في مجال كهربائي طاقتها الميكانيكية: $\frac{1}{2}mv^2 + qV$ ثابت. وعندما تنتقل إلى جهد تصبح عنده طاقة وضعها qV أقل، تتحول الطاقة المفقودة إلى طاقة حركة فتزداد سرعتها، مثل كرة ساقطة تحول طاقة وضع الجاذبية إلى حركة. ويتبع تغير السرعة $v_B^2 = v_A^2 + 2q(V_A - V_B)/m$ مع مراعاة إشارات q و V.



المشهد الذي بدأنا به

تمرين:

١). مر أيون موجب كتلته 6.6×10^{-27} kg وشحنته 3.2×10^{-19} C بالنقطة A، جهدها 3.3×10^3 V، بسرعة 2.0×10^5 m/s. عيّن سرعته عند B ذات الجهد صفر، بافتراض أن القوة الكهروستاتيكية وحدها تؤثر فيه.

٢. كانت شحنة موجبة مقدارها q وكتلتها m ساكنة عند A ذات الجهد V_A، ثم أثرت فيها القوة الكهروستاتيكية وحدها فمرت بالنقطة B ذات الجهد V_B، حيث $V_B < V_A$. عيّن سرعتها عند B.

الدرس ٢-٦ — المكثف

؟ سؤال الدرس:

ما الآلية التي تستطيع تخزين الكهرباء مؤقتًا ثم إطلاقها في صورة تيار عند الحاجة؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. ربط الشحنة المختزنة بفرق الجهد بين طرفي المكثف بالعلاقة Q = CV، وتقيس السعة C بالفاراد F.

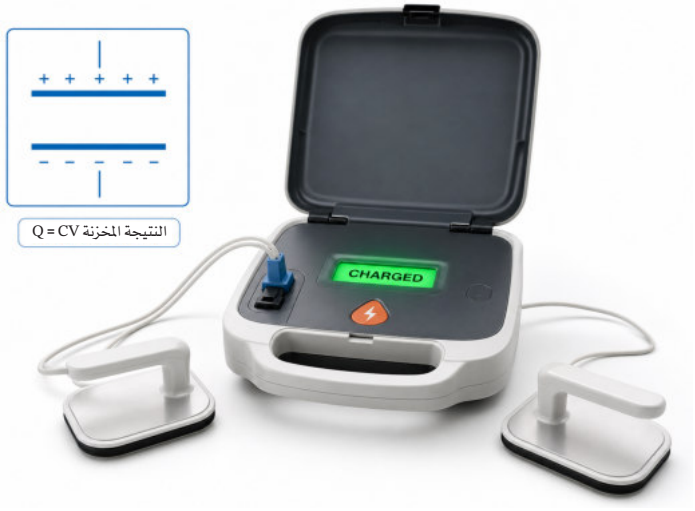
٢. تحول قيم السعة بين الفاراد والميكروفاراد μF والبيكوفاراد pF.

٣. تتنبأ بأثر تنصيف المسافة بين اللوحين أو مضاعفتها في الشحنة والجهد، بحسب بقاء البطارية متصلة أو فصلها.

الظاهرة — تنبأ قبل أن تستمر

يبقى جهاز مزيل الرجفان صامتًا حتى تدعو الحاجة إليه. بضغطة زر، تشحن بطاريةٌ ببطء مكثفًا داخليًا حتى يصل إلى جهد عالٍ، مخزنةً شحنة كبيرة Q = CV على ألواحه. عند تشغيل المجاديف، تتدفق تلك الشحنة المختزنة دفعة واحدة – نبضة تيار قوية واحدة تُطلق في جزء من الثانية. حيث يخزن الجهاز الكهرباء بهدوء، ثم يطلقها كلها عند الحاجة.

حقيقة أساسية:
السعة C هي مقدار الشحنة التي يخزنها المكثف لكل فولت؛ Q = CV، وتقاس بالفاراد، حيث 1 F = 1 C/V.



وصف الشكل (2.6.1): يشحن جهاز إزالة الرجفان القلبي مكثفًا إلى جهد مرتفع فيختزن Q = CV، ثم يطلق الشحنة في نبضة تيار قصيرة وقوية.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) أثناء شحن المكثف، هل يكون تيار الشحن أكبر عند اللحظة الأولى أم عندما يقترب المكثف من الامتلاء؟

(ب) بعد شحن المكثف وفصل البطارية، هل تبقى الشحنة عليه أم تتسرب فورًا؟

استكشف — ارسم عملية العبور

ما ستفعله: اشحن المكثف نفسه عند جهود مختلفة، ثم أفرغ كل شحنة خلال مصباح، ولاحظ كيف تتبع الشحنة المختزنة جهد الشحن.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات):
- مكثف
- بطارية قابلة لضبط الجهد
- مفتاح ثنائي الاتجاه
- مصباح صغير
- مقياس كولوم لقراءة Q.

مصباح

مفتاح ذو اتجاهين

بطارية

مكثف

الخطوات:

١ اضبط المفتاح ناحية البطارية واشحن المكثف إلى جهد مختار V، ثم اقرأ فرق الجهد بين اللوحين.

٢ حوّل المفتاح ناحية المصباح؛ يفرغ المكثف شحنته فيومض المصباح. اقرأ Q على مقياس الكولوم، ولاحظ أن الوميض الأكثر سطوعًا والأطول زمنًا يقابل شحنة أكبر.

٣ كرر عند جهود شحن أعلى، واحسب لكل محاولة النسبة Q/V.

٤ للتحقق، استبدل المكثف بآخر أكبر سعة واشحنه إلى الجهد نفسه.

المحاولة	جهد الشحن V بالفولت	الشحنة Q بالميكروكولوم	Q/V بالميكروفاراد
١			
٢			
٣			

حلّل ما جمعته:

(أ) ماذا يحدث للشحنة Q عند زيادة V؟ وماذا تلاحظ في النسبة Q/V؟

(ب) تمثل القيمة الثابتة لـ Q/V السعة C. استخدمها للتنبؤ بالشحنة عند جهد لم تختبره، وفسر لماذا أعطى المكثف الأكبر ومضة أكبر عند الجهد نفسه.

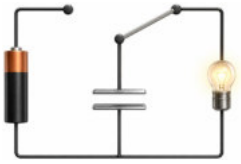
اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

لماذا تزداد الشحنة المخزنة تدريجيًا مع الجهد؟

انظر إلى ما تفعله البطارية فعليًا. فهي تسحب الإلكترونات من إحدى اللوحتين وتجمعها على اللوحة الأخرى، وكل إلكترون تنقله يجعل نقل الإلكترون التالي أكثر صعوبة؛ إذ إن اللوحة التي فُرِّغت من الإلكترونات تجذبها مرة أخرى، بينما اللوحة التي تراكمت عليها الإلكترونات تدفعها للخلف. لذلك لا تستمر عملية انتقال الشحنة إلى ما لا نهاية، بل تتوقف عندما تُكوِّن اللوحتان فرق جهد يساوي فرق جهد البطارية.

إذا بذلت البطارية دفعًا أكبر بمرتين، فإن التوقف يحدث عند ضعف الزمن تقريبًا، مع انتقال ضعف كمية الشحنة.



وصف الشكل (2.6.2): يوصل مفتاح ثنائي الاتجاه المكثف بالبطارية للشحن أو بالمصباح للتفريغ.

ملاحظة القياس:
انتظر استقرار جهد الشحن قبل تحويل المفتاح، واستخدم المصباح نفسه في جميع المحاولات، واعتمد اتجاه قيم Q/V أكثر من الاعتماد على ومضة واحدة.

ومن هنا تأتي العلاقة الخطية المباشرة المذكورة في النقطة (Point)؛ فهي ليست مجرد قانون طبيعي اكتُشف بالتجربة، بل يمكن فهمها من خلال حسابات عملية شدّ وجذب تنتهي دائمًا بالتوازن.

وثابت التناسب يجيب عن سؤال واحد:

ما مقدار الشحنة التي يمكن لهذا الزوج من اللوحات أن يخزنها قبل أن يقاوم بزيادة مقدارها فولت واحد؟

ما الذي يحدده الشكل الهندسي؟

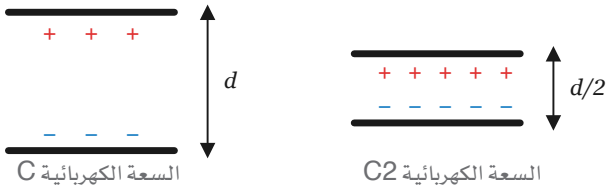
هناك عاملان هندسيان يتحكمان في هذه الكمية، وكلاهما يعمل وفق سلسلة الاستدلال نفسها.

فعندما تزداد المسافة بين اللوحين، تنتشر الشحنة نفسها على نطاق أكبر، فتكون كثافتها أقل، وبالتالي يكون تأثيرها في مقاومة انتقال المزيد من الشحنة أضعف. لذلك يتأخر الوصول إلى حالة التوقف، ويمكن تخزين كمية أكبر من الشحنة قبل أن يصل فرق الجهد إلى القيمة المطلوبة أي أن السعة تزداد بزيادة مساحة اللوحين.

أما إذا قلّلنا المسافة بين اللوحين، فإن كثافة الشحنة على اللوحين لا تتغير، لكن الشحنة أصبحت تحتاج إلى الانتقال عبر مسافة أقصر. لذلك يتولد فرق جهد أصغر من كمية الشحنة نفسها، ويمكن تخزين شحنة أكبر قبل أن يتساوى فرق الجهد مع جهد البطارية — أي أن السعة تزداد كلما قلت المسافة بين اللوحين.

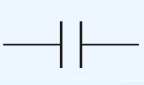
إذا نصّفنا المسافة بين اللوحين، فإن السعة تتضاعف، وهذا بالضبط هو التغير الذي يوضحه المثال المحلول التالي.

نفس مساحة اللوحين، ونفس فرق الجهد V:

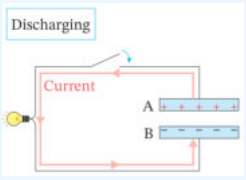


وصف الشكل (3.6.2): عند ثبات مساحة اللوحين والجهد، يؤدي تنصيف المسافة إلى مضاعفة السعة، فيخزن اللوحان المتقاربان ضعف الشحنة.

نقطة



وصف الشكل (4.6.2): رمز المكثف في الدائرة لوحان متوازيان.



عندما يتقابل لوحان معدنيان متساويا المساحة ويتصلان بطرفي بطارية، تتحرك الشحنة في صورة تيار وتُختزن على اللوحين. يسمى الجهاز مكثفًا، ويسمى اللوحان قطبيه أو لوحيه. ويسمى تخزين الشحنة شحنًا، ويسمى خروجها مرة أخرى في صورة تيار تفريغًا.

! تتناسب الشحنة Q المختزنة مع فرق الجهد V بين اللوحين: $Q = CV$. وثابت التناسب C هو السعة الكهربائية، ووحدته الفاراد F.

الوحدات العملية والعوامل المحددة للسعة

لأن السعات الواقعية صغيرة عادة، يكتب 10^{-6} F في صورة 1 μF، و10^{-12} F في صورة 1 pF.

فمثلًا $30\ \mu F = 30 \times 10^{-6}\ F$، و $45\ pF = 45 \times 10^{-12}\ F$.

تنبيه:
يحمل لوحا المكثف +Q و−Q، ولذلك يظل المكثف متعادلًا كليًا. وتمثل Q الشحنة المنقولة من لوح إلى الآخر، لا شحنة خلقت.

مصطلح:
المكثف: زوج من الأقطاب الكهربائية المتقابلة (الألواح) التي تخزن الشحنة؛ الشحن يخزنها، والتفريغ يطلقها كتيار كهربائي.
السعة الكهربية (Capacitance) هي خاصية للمكوّن أو الجهاز نفسه (Hardware)، وليست خاصية للشحنة الموجودة عليه.
حتى إذا كان الجهاز فارغًا تمامًا من الشحنة، تظل السعة C كما هي دون تغيير؛ لأن قيمة السعة تتحدد بواسطة:
* شكل اللوحين.
* المسافة بين اللوحين.
* المادة التي تملأ الفراغ بينهما.
وهنا أيضًا يصل النموذج النظري إلى حدوده: فعندما تتراكم شحنة كبيرة بدرجة كافية، يحدث انهيار للعازل الموجود بين اللوحين. عندها يقوم المكثف بتفريغ شحنته فجأة، ولا يعود من الممكن وصف سلوكه باستخدام قيمة ثابتة للسعة C.

حقيقة أساسية:
يتم تعريف الفاراد من خلال 1 F = 1 C/V. شحنة مقدارها 1 كولوم على مكثف سعته 1 فاراد تكون عند 1 فولت.
ولهذا السبب نادرًا ما تُستخدم وحدة الفاراد بصورتها الأساسية؛ لأن الكولوم كمية هائلة جدًا من الشحنة بالنسبة لما يمكن أن تخزنه ألواح المكثف، بينما تكون قيم المكثفات العادية أصغر بملايين أو تريليونات المرات.
لذلك فإن البادئات (Prefixes) المستخدمة مع وحدة الفاراد ليست مجرد وسيلة لتسهيل كتابة الأرقام، بل هي ضرورة

نظـرًا لأن السـعة الواقعيـة عـادةً مـا تكـون صغـيرة جـدًا، يُكتـب 10^{-6} فـاراد علـى شـكل ميكروفـاراد (μF) و10^{-12} فـاراد علـى شـكل بيكوفـاراد (pF)؛ علـى سـبيل المثـال، 30 ميكروفـاراد $= 30 \times 10^{-6}$ فـاراد و45 بيكوفـاراد $= 45 \times 10^{-12}$ فـاراد. تتناسـب السـعة طرديًـا مـع مسـاحة الألـواح وعكسـيًا مـع المسـافة بينهـا، لـذا فـإن تقريـب الألـواح أو توسـيعها يزيـد مـن السـعة. وبالتـالي، فـإن تقليـل المسـافة إلى النصـف يضاعـف السـعة.

! تتناسـب السـعة طرديًـا مـع **مسـاحة** اللوحـين وعكسـيًا مـع المسـافة بينهمـا؛ لذلـك يـؤدي تقريـب اللوحـين أو زيـادة مسـاحتهما إلى زيـادة C. وتنصيـف **المسـافة** يضاعـف السـعة.

الشـحنة المختزنـة في مكثـف $Q = CV$، حيـث C السـعة بالفـاراد $1\ pF = 10^{-12}\ F$ و$1\ \mu F = 10^{-6}\ F$ تتناسـب السـعة طرديًـا مـع مسـاحة اللوحـين وعكسـيًا مـع المسـافة بينهمـا. عنـد فصـل البطاريـة تثبـت الشـحنة، وعنـد بقائهـا متصلـة يثبـت الجهـد.

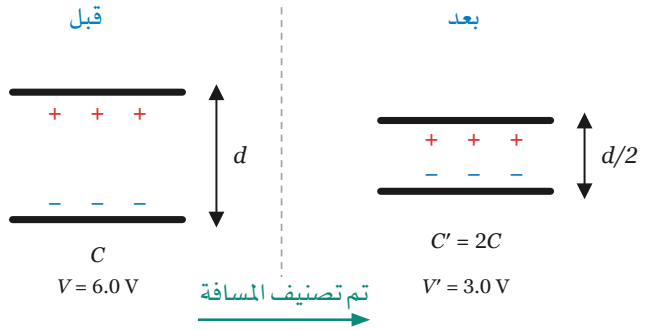
صندوق المعادلات:

شحنة المكثف	$Q = CV$. الوحدة ($C = FV$).
البادئات	$1\ \mu F = 10^{-6}\ F, 1\ pF = 10^{-12}\ F$.
الهندسة	السـعة (C) تتناسـب طرديًـا مـع المساحة/المسـافة؛ بتقسـيم المسـافة علـى اثنـين نحصـل علـى $C' = 2C$.
تغير الحالة	عند فصل البطارية: Q ثابتة، $V' = \frac{Q}{C'}$. عند توصيل البطارية: V ثابتة، $Q' = C'V$.

مثال محلول:

الموقف:	مكثف ذو لوحين متوازيين سعته $4.0\ \mu F$ وبينهما فراغ، شُحن ببطارية $6.0\ V$. (أ) بعد فصل البطارية نُصفت المسافة؛ عيّن فرق الجهد V'. (ب) مع بقاء البطارية متصلة نُصفت المسافة؛ عيّن الشحنة Q'.
المعطيات والمطلوب:	$C = 4.0\ \mu F = 4.0 \times 10^{-6}\ F$، و$V = 6.0\ V$. (أ) تم فصل البطارية، وتم تقليل المسافة إلى النصف؛ أوجد V'. (ب) تم توصيل البطارية، وتم تقليل المسافة إلى النصف؛ أوجد Q'.
التمثيل:	انظر الشكل 2-6-3 لمعرفة كيف يؤثر تقليل المسافة بين الصفائح إلى النصف على السعة. ارسم شكل الصفائح قبل وبعد تقليل المسافة إلى النصف (الشكل 2-6-5).
الاستراتيجية:	نحسب الشحنة الأصلية من $Q = CV$. يؤدي تقليل المسافة إلى النصف إلى مضاعفة السعة، $C' = 2C$. عند فصل البطارية تثبت Q فنستخدم $V' = Q/C'$، وعند اتصالها يثبت V فنستخدم $Q' = C'V$.

الحل الموضح:	الشحنة بعد الشحن: $Q = CV = (4.0 \times 10^{-6}) \times 6.0 = 2.4 \times 10^{-5}\ C$. عند تنصيف المسافة: $C' = 2C = 8.0 \times 10^{-6}\ F$. (أ) البطارية مفصولة، لذلك Q ثابت: $V' = Q/C' = (2.4 \times 10^{-5}) \div (8.0 \times 10^{-6}) = 3.0\ V$. (ب) البطارية متصلة، لذلك $V = 6.0\ V$ ثابت: $Q' = C'V = (8.0 \times 10^{-6}) \times 6.0 = 4.8 \times 10^{-5}\ C$.
منطقية الحل:	عند ثبات Q ومضاعفة C ينصف V من 6.0 إلى 3.0 V. وعند ثبات V ومضاعفة C تتضاعف Q من 2.4×10^{-5} إلى $4.8 \times 10^{-5}\ C$.
فسِّرها بنفسك:	لماذا يحافظ فصل البطارية على Q، بينما يحافظ اتصالها على V؟



وصف الشكل (5.6.2): المكثف قبل تنصيف المسافة وبعده؛ تصبح الفجوة d/2 والسعة 2C. وعند فصل البطارية تثبت الشحنة فينخفض الجهد من 6.0 إلى 3.0 V.

حاول بنفسك: مكثف سعته 2.0 μF شُحن ببطارية 12 V. فُصلت البطارية ثم نُصفت المسافة. أوجد فرق الجهد الجديد.

حاول:

(أ) عند تطبيق 30 V على مكثف سعته 6.0 μF، عيّن شحنته لأقرب رقمين عشريين.

(ب) مكثف ذو لوحين متوازيين سعته 20 pF شُحن ببطارية 15 V. (أ) بعد فصل البطارية ضوعفت المسافة؛ عيّن Q_1 و V_1. (ب) مع اتصال البطارية ضوعفت المسافة؛ عيّن Q_1 و V_2. أعط الإجابات لأقرب رقمين عشريين.

ملاحظة:
عند فصل البطارية، تكون الشحنة Q ثابتة، لذا $V = Q/C$. عند توصيل البطارية، يكون الجهد V ثابتًا، لذا $Q = CV$.

في سياق جديد

يعتمد فلاش الكاميرا الإلكتروني على مكثف. بين اللقطات تشحن بطارية المكثف ببطء إلى جهد مرتفع، فيختزن $Q = CV$. وعند فتح الغالق يفرغ المكثف شحنته خلال أنبوب الفلاش في جزء صغير من الثانية، فينتج وميضًا شديدًا لا تستطيع البطارية الصغيرة توفيره لحظيًّا. وتعتمد أجهزة إزالة الرجفان المستخدمة لإعادة تشغيل القلب على نفس فكرة التخزين ثم الإطلاق.

دورك الآن: يستخدم فلاش كاميرا مكثفًا سعته $100\ \mu F$ مشحونًا إلى $300\ V$.

استخدم $Q = CV$ لإيجاد الشحنة.

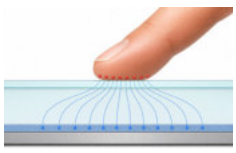
وصف الشكل (6.6.2): تشحن بطارية صغيرة مكثفًا كبيرًا ببطء، ثم يطلق المكثف شحنته فجأة خلال أنبوب الفلاش.

طبيعة العلم: من الأصل - شاشات اللمس في الهواتف

تعمل الشاشة بطريقة اللمس السعوي؛ يوجد مجال كهربائي ضعيف على سطحها، وعند لمس الإصبع يتكون مكثف صغير بينه وبين الشاشة، فيتغير مقدار الشحنة المختزنة، أي السعة. يقرأ حساس هذا التغير لتحديد موضع اللمس.

هذا مثال على تحويل كمية غير مرئية إلى قياس؛ فالإصبع يغير سعة أصغر من أن تُحس، لكن الجهاز يكتشفها بثبات ويحولها إلى موضع. وتصبح الكمية مفيدة علميًّا عندما توجد طريقة واضحة لقياسها، لا عندما يمكن رؤيتها فقط.

دورك: اقترح جهازًا يوميًّا آخر يعمل باكتشاف تغير في الشحنة المختزنة، واذكر الكمية التي يقيسها فعليًّا.



وصف الشكل (7.6.2): يُكوّن لمس الشاشة مكثفًا صغيرًا بين الإصبع والسطح، ويقرأ الحساس تغير الشحنة بوصفه موضع اللمس.

سؤال الدرس، وإجابته:

يخزن المكثف الكهرباء؛ يحمل قطبان متقابلان شحنة $Q = CV$ تظل مختزنة عند فصل البطارية، ثم تخرج في صورة تيار عند توصيل اللوحين بدائرة. وتتحدد السعة C بالفاراد من مساحة اللوحين والمسافة بينهما، فيمكن ضبط الجهاز ليختزن مقدار الشحنة المطلوب.

المشهد الذى بدأنا منه

تمرين:

١. طُبق جهد $15\ V$ على مكثف سعته $3.0\ \mu F$. عيّن الشحنة لأقرب رقمين عشريين.

٢. طُبق جهد $60\ V$ على مكثف سعته $5.0\ pF$. عيّن الشحنة لأقرب رقمين عشريين.

٣. مكثف سعته $3.0\ \mu F$ شُحن ببطارية $20\ V$.

(أ) بعد فصل البطارية نُصفت المسافة؛ عيّن Q_1 و V_1.

(ب) مع اتصال البطارية نُصفت المسافة؛ عيّن Q_2 و V_2.

٤. مكثف سعته $40\ pF$ شُحن ببطارية $20\ V$.

(أ) بعد فصل البطارية ضوعفت المسافة؛ عيّن Q_1 و V_1.

(ب) مع اتصال البطارية ضوعفت المسافة؛ عيّن Q_2 و V_2. أعط الإجابات لأقرب رقمين عشريين.

الفصل الثالث

التيار الكهربي والدوائر

٣-١ الأميتر والفولتميتر .

٣-٢ قوانين كيرشوف .

٣-١ — الأميتر والفولتميتر

؟ سؤال الدرس:

كيف يمكن للأميتر أو الفولتميتر قياس تيارات وفروق جهد كهربى تتجاوز بكثير مدى القياس الخاص بهما؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١ توصّيل الأميتر على التوالي والفولتميتر على التوازي، وتفسّر لماذا يحتاج الأميتر إلى مقاومة داخلية صغيرة بينما يحتاج الفولتميتر إلى مقاومة كبيرة.

٢ زيادة مدى الجلفانومتر بمقاومة (مجزيء التيار) يتم توصيلها على التوازي، مستخدمًا شرط تساوي فرق جهد وقانون أوم لإيجاد قيمة مقاومة مجزيء التيار.

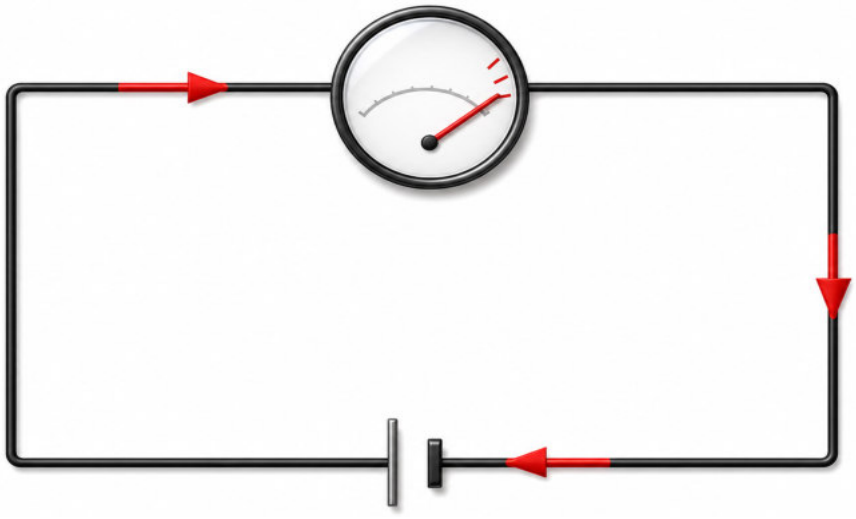
٣ زيادة مدى الجلفانومتر بمقاومة (مضاعِف الجهد) يتم توصيلها على التوالي، مستخدمًا شرط تساوي التيار وقانون أوم لإيجاد قيمة مقاومة مضاعِف الجهد.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

جلفانومتر صغير مُدرَّج مصمم ليقرأ حتى 10 mA على الأكثر، ومع ذلك تحتاج إلى قياس تيار مقداره 200 mA في دائرة. عند مرور التيار كله مباشرة فى الجلفانومتر يتسبب فى ان المؤشر يتحرك إلى ما بعد الحد الاقصى بكثير وقد يحرق الملف. ومع ذلك، تقرأ أجهزة القياس الحقيقية في الورش تيارات وفروق جهد أكبر مئات المرات من مدى الجهاز (الحد الأقصى) الذي يسمح به المؤشر--- وحده دون أن تتلف.

فكرة أساسية

يُوصل الأميتر في مسار الدائرة، بينما يُوصل الفولتميتر على التوازي؛ ولكل منهما مقاومة داخلية خاصة به. فما هي قيمة هذه المقاومة التي تضمن أن يعكس المقياس حالة الدائرة الفعلية دون أن يغير خصائصها؟ وكيف يمكن عملية القياس تُسجّل قراءةً تتجاوز الحد الأقصى لمدى تدريجها؟



شكل (1.2.1) مؤشر جلفانومتر يقيس أقصى تيار 10 mA وُضِع مباشرة في فرع يمر به تيار 200 mA، فتجاوز المؤشر نهاية التدريج

تنبأ:

(أ) لتمكين جهاز قياس (مؤشر) أقصى تيار يقيسه 10 ملي أمبير فقط من تسجيل تيار يساوى 200 ملي أمبير، أين ستُمرِّر التيار الزائد البالغ 190 ملي أمبير، وكيف ستصل ذلك المسار — على التوالي أم على التوازي مع جهاز القياس؟

لتمكين مؤشر سعته من تسجيل تيار خط مقداره ، أين ستوجّه الـ ، وكيف ستوصّل ذلك المسار — على التوالي أم على التوازي مع المؤشر؟

(ب) لقياس فرق جهد أكبر من مدى الفولتميتر، هل يتم إضافة مقاومة على التوالي أم على التوازي مع الجهاز.

استكشف — زيادة مدى ملّي-أميتر بمقاومة تحويل [مجزيء تيار]

ما ستفعله: توصّل عدة مقاومات قيمتهم صغيرة عبر ملّلي-أميتر وترى كم يزيد تيار الخط الذي يستطيع قراءته، فتكتشف نسبة تقسيم التيار التي تفرضها مقاومة مجزيء التيار.

الزمن: 15 دقائق

الأدوات:

- مؤشر ملّلي-أميتر معروف قيمة أقصى تياره
- أميتر مرجعي لقراءة تيار المسار الحقيقي
- مصدر تيار كهربي مستمر ومقاومة متغيرة لضبط التيار بأمان
- مجموعة مقاومات صغيرة القيمة لتجربتها كمقاومات مجزيء للتيار

مقاومة (مجزيء التيار)

مقاومة متغيرة (ريوستات)

مصدر تيار مستمر

أميتر

الخطوات:

١ دون تركيب أي مقاومة مجزيء التيار، ارفع جهد المصدر حتى يقرأ الملّي-أميتر المدى الكامل، وسجّل ذلك التيار Im.

٢ وصّل مقاومة صغيرة مباشرة عبر طرفَي الجهاز، ثم اضبط المقاومة المتغيرة حتى يستقر الملّي-أميتر عند المدى الكامل ثانية.

٣ اقرأ تيار المسار I على الأميتر المرجعي، واحسب معامل المضاعفة $n = I / Im$.

٤ استبدل المقاومة بمجزيء للتيار أصغر وكرّر الخطوات.

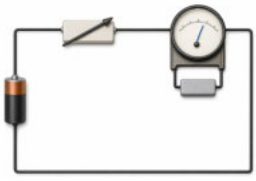
المحاولة	قراءة الجهاز Im (mA)	تيار المسار I (mA)	المعامل $n = I / Im$
١			
٢			
٣			

حلّل ما جمعته:

(أ) بإستخدام مقاومة مجزيء التيار أصغر، ماذا حدث للمعامل n، ومن ثمّ لقيمة تيار المسار التي تجاوزت المؤشر؟

(ب) الجهاز ومقاومة المجزيء التيار لهما نفس الطرفين (يشتركان في نفس النقطتين) وبالتالي لهما نفس فرق جهد. استخدم ذلك للتنبؤ بأي مقاومة مجزيء ستوصلها لجعل المؤشر يقرأ تيار المسار يساوي 20 ضعف مداه.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.



شكل (2.1.3) ملّلي-أميتر على التوالي مع مصدر ومقاومة متغيرة، (ريوستات) ومقاومة صغيرة موصّلة مباشرة عبر طرفَي الجهاز ليمر جزء من تيار الخط متجاوزًا مؤشر الجهاز

ملاحظة عملية

اقرأ الملّلي-أميتر والأميتر المرجعي في نفس اللحظة، وأبقِ المؤشر عند علامة أقصى مدى أو دونها بضبط المقاومة المتغيرة - لا مقاومة المجزيء - وبذلك لا يتعرض الملف للتشغيل اكبر من مداه مطلقا.

من الملاحظة إلى النموذج

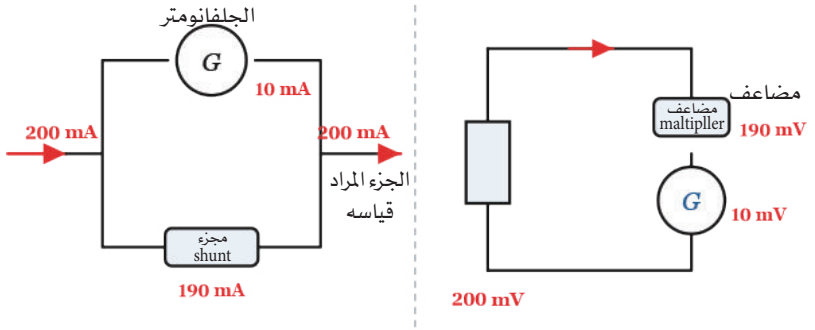
لماذا يجب أن يكون جهاز القياس غير مرئي تقريبًا (شبه خفي)

الغرض من أداة القياس هو أن قياس حالة الدائرة الكهربية كما هي، لا أن تعيد صياغتها؛ غير أن كلاً من هذه الأدوات يُحدث تغييراً في الدائرة بمقدار يعادل تماماً قيمة المقاومة التي تحتويها الأداة نفسها. فإذا قمت بقطع أحد فروع الدائرة ووضعت جهاز القياس في الفجوة الناشئة، فإنك بذلك تضيف مقاومةً إلى الفرع ذاته لقياس تياره؛ وحينها، ستكون القراءة التي يشير إليها المؤشر أقل من قيمة التيار الأصلي الذي كان يسري قبل التغيير حيث يكمن الفرق في نسبة تتحدد بناءً على مقارنة مقاومة الجهاز بالمقاومات الأخرى الموجودة في ذلك الفرع. لذا، يجب تقليل هذه المقاومة إلى أدنى حد ممكن (أي جعلها تقترب من الصفر). ومع ذلك، يترتب على الأمر حدوث ضرر؛ إذ إن توصيل جهاز القياس بالتوازي مع أحد المكونات يوقعك في الخطأ المعاكس: فأنت بذلك تفتح أمام التيار مساراً بديلاً، وأي جزء من التيار يمر في هذا المسار لن يصل إلى المكون الأصلي، مما يؤدي إلى انخفاض الجهد عبره. ويكمن الحل في النقيض تماماً: أي جعل المسار البديل صعباً وشاقاً للغاية لدرجة لا تجعل أي تيار -أو تكاد- يختاره. وعليه، فإن القاعدتين المذكورتين لا تمثلان حقيقتين منفصلتين للحفظ، بل هما وجهان لفكره واحدة؛ فجهاز القياس يكتسب دقة قراءته من خلال «سحب» أقل قدر ممكن من الكمية التي لا يقوم بقياسها.

نطاق القياس

لا يؤدى أيٌّ من الحلين إلى زيادة المدى بذاته؛ فالمؤشر ما زال يحترق فوق مداه وزيادة المدي يعني إرسال الزائد إلى مكان آخر وقراءة القيمة الثابتة المتبقية فقط. صل مقاومة صغيرة بجانب الأميتر ينقسم الخط عند ذلك التقاطع. ويبدأ الطريقان وينتهيان عند نفس الطرفين ، فلا بد أن يكونا لهما نفس فرق جهد — ثم يقسم قانون أوم التيار بينهما بالنسبة العكسية لمقاومتيهما. أعطِ المجزىء(الممر الجانبي) تُسع مقاومة الجهاز، يحمل تسعة أمثال تياره، فتصل عشرة أجزاء ويظهر المؤشر جزءًا واحدًا. وضع مقاومة كبيرة أمام الفولتميتر وستظهر الصورة المعكوسة: مسار واحد، وبالتالي تيار واحد، وبالتالي جهد مقسم.

بالتناسب الطردى مع المقاومات ، والزائد يهبط خارج الجهاز بلا ضرر. ولكل تصميم شرط ليس أكثر من تعريف لتوصيله، وقانون أوم يحول التعريف إلى رقم.



شكل (3.1.3) الترتيبان جنبًا إلى جنب، ليُقرأ التماثل بينهما بنظرة واحدة: على اليمين تكون المقاومة المضافة على التوالي مع الجهاز، فتُلزم الاثنين بتقسيم فرق جهد وتدعهما يقسمان تيارًا؛ وعلى اليسار تكون المقاومة المضافة أمام الجهاز، فتُلزمهما بتقسيم تيار وتدعهما يقسمان فرق جهد. كل شرط من شروط التصميم هو ببساطة خاصية التوصيل الخاص به — وهذا هو المنطق الذي يتركه الشكلان الواردان في «النقطة» ضمنيًا

مصطلح

المُجَـزِّئ (Shunt) - وهو المسار الجانبي المُركَّب بجانب الحركة. لاحظ التكلفة المترتبة على ذلك: فالعداد الآن لا يقيس سوى جزء ثابت من تيار المسار، ولذا يجب ضرب كل قـراءة في معامل معين، وتتوقف دقة النتيجة النهائية على دقة تلك المقاومة المنخفضة القيمة. فالمُجَزِّئ الذي تتغير قيمته بتأثير الحرارة يُقلل من دقة كل قراءة.

المُضاعِف (Multiplier) - وهو المكوّن الساحب للجهد، والمُركَّب قبل آلية الحركة. إنه يُتيح توسيع نطاق القياس مقابل سحب تيار أصغر فأصغر من الدائرة الخاضعة للاختبار (وهو أمر مرغوب فيه)، ولكنه يفرض وجود مقاومة كبيرة وحساسة لدرجة الحرارة في مسار القياس (وهو أمر غير مرغوب فيه).

حقيقة أساسية

يُستمد معامل التوسيع من نسبة المقاومة وحدها. ففي حالة استخدام مقاومة تحويل (bypass) قيمتها r بالتوازي مع مقاومة داخلية قيمتها R، يكون تيار الخط مساوياً لـ (1 + R/r) ضعف القيمة التي يشير إليها المؤشر؛ ومن ثم، يتطلب معامل توسيع مقداره 20 أن تكون r = R/19. أما في حالة الفولتميتر، فتنعكس النسبة: إذ يصبح الجهد المطبّق مساوياً لـ (1 + r/R) ضعف القراءة، ولذا يتطلب المعامل نفسه (أي 20) أن تكون r = 19R.

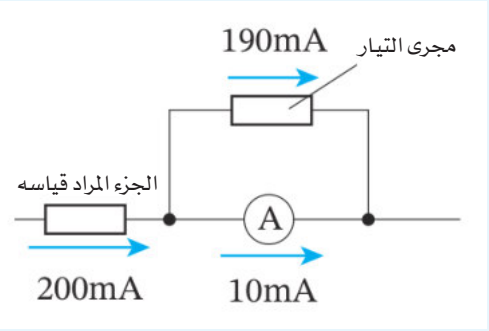
نقطة

لقياس التيار المار في جزء معيّن من دائرة، يُوصَّل الأميتر على التوالي.

وللأميتر مقاومة داخلية. ولتقليل أثرها على التيار المار في الجزء المراد قياسه، ينبغي أن تكون المقاومة الداخلية أصغر ما يمكن.

لزيادة مدى قياس جلفانومتر، تُوصَّل مقاومة على التوازي معه للسماح لجزء من التيار بتجاوزه. وتُسمى هذه المقاومة مقاومة المجزيء (**shunt**).

مثال: عندما تريد قياس تيار حتى **200 mA** بجلفانومتر يقيس حتى **10 mA**، فإذا مر **10 mA** من التيار في الجلفانومتر وسُمح لـ **190 mA** الباقية بتجاوزه عبر مقاومة المجزيء، يكون التيار الكلي 20 مرة مثل القيمة التي يقيسها الجلفانومتر.



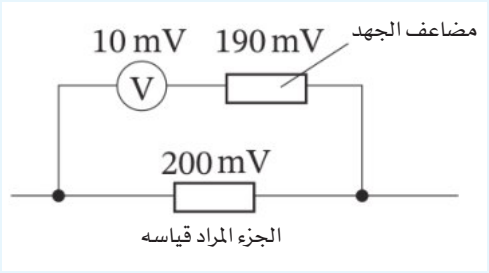
شكل (3-1-4) توصيل مقاومة المجزيء، منقول من الأصل: ملف الجهاز (الجلفانومتر) ومقاومة صغيرة (المجزيء) لهما نفس نقطتي التوصيل (متصلان على التوازي)، لذا فإن الخط القادم من اليمين ينقسم بين الفرعين ثم يتحد مرة أخرى على اليسار. تشير علامات الأسهم إلى التقسيم الخاص بالمثال الموجود بجانبه.

لقياس الفرق جهد في جزء معيّن من دائرة، يُوصَّل الفولتميتر على التوازي.

وللفولتميتر مقاومة داخلية. وبما أنه يُوصَّل على التوازي مع الجزء المراد قياسه، ينبغي أن يكون التيار المار فيه أصغر ما يمكن. ولهذا الغرض ينبغي أن تكون مقاومته الداخلية أكبر ما يمكن.

لزيادة مدى قياس جلفانومتر، تُوصَّل مقاومة على التوالي معه لإسقاط جزء من الفرق جهد. وتُسمى هذه المقاومة مضاعِف الجهد.

مثال: عندما تريد قياس فرق جهد حتى **200 mV** بجلفانومتر يقيس حتى **10 mV**، فإذا طُبِّق **10 mV** من فرق الجهد على الجلفانومتر وأُسقِط الـ **190 mV** الباقية عبر المضاعِف، تكون فرق الجهد الكلية 20 مرة مثل القيمة التي يقيسها الجلفانومتر.

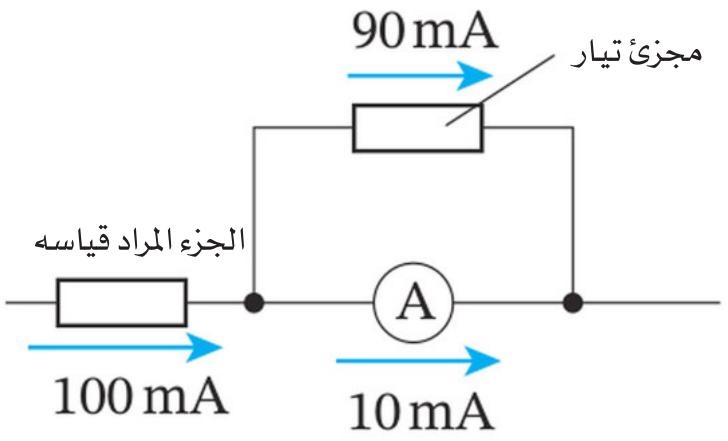


شكل (3-1-5) توصيل المضاعِف، منقول من الأصل: الجهاز والمقاومة يقعان أحدهما خلف الآخر على طول فرع واحد، وهو نفسه متصل عبر المكوّن قيد الاختبار، بحيث يمر تيار واحد عبر كليهما، وتوضح الملصقات كيفية توزيع الجهد المطبق البالغ 200 mV

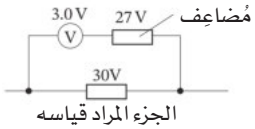
صندوق المعادلات:

الأميتر ومقاومة المجزيء	الأميتر على التوازي، فرق الجهد لهما متساويان $I_s = I - I_g$ ، حيث $I_g R_g = I_s R_s$ حيث sI: التيار المار خلال مقاومة المجزيء، Ig: التيار المار خلال الجلفانومتر، I: التيار الكلي (تيار المسار).
الفولتميتر والمضاعِف	على التوالي، التياران متساويان: $\frac{V_g}{R_g} = \frac{V_m}{R_m}$ ، حيث $V_m = V - V_g$ حيث V_g: فرق الجهد عبر مقاومة الجلفانومتر، V_m: فرق الجهد عبر المضاعف، V: الجهد المطبق (الجهد الكلي).
قانون أوم	$V = IR$

مثال محلول:



شكل 3-1-6 المثال المحلول (a): مقاومة مجزيء التيار بجانب الجلفانومتر G تحمل 90 mA من تيار الخط البالغ 100 mA، فتظل الإبرة تقرأ قيمة مداها الكامل 10 mA فقط.



شكل 3-1-7 المثال المحلول (b): مقاومة مضاعِف على التوالي مع الجلفانومتر يأخذ 27 V من الـ 30 V المطبَّقة المراد قياسها، تاركًا 3.0 V عبر الجهاز نفسه.

الموقف:	أوجد ما يلي: (أ) جلفانومتر مقاومته الداخلية 1.8 Ω يستطيع القياس حتى 10 mA. لقياس تيارات حتى 100 mA باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة لمقاومة المجزيء بالأوم. (ب) يوجد جلفانومتر مقاومته الداخلية 3.0 kΩ يستطيع قياس فروق جهد حتى 3.0V. لقياس فروق جهد حتى 30V باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة للمضاعِف بالكيلوأوم.
المعطيات والمطلوب:	(أ) مقاومة داخلية 1.8 Ω، مدى الجهاز الكامل 10 mA، المدى المستهدف 100 mA؛ أوجد مقاومة المجزيء R_s [Ω]. (ب) مقاومة داخلية 3.0 kΩ، مدى الجهاز الكامل 3.0V، المدى المستهدف 30V؛ أوجد مقاومة المضاعِف R_m [kΩ].
التمثيل:	الشكل أعلى الجدول هو الجزء (a): الجلفانومتر ومقاومة التحويل على التوازي، وخط الـ 100 mA ينقسم بينهما 90 mA/10mA. والشكل 3-1-7 هو الجزء (b): الجلفانومتر والمضاعِف على التوالي، يتقاسمان تيارًا واحدًا.

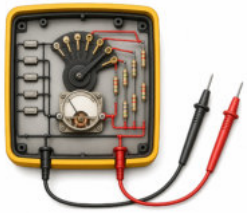
الاستراتيجية:	مقاومة المجزيء التي تعمل على زيادة مدى الجلفانومتر تُوصَّل على التوازي، فأقم معادلة بقانون أوم من شرط تساوي فرق الجهد عبر الجهاز ومقاومة المجزيء. والمضاعِف الذي يعمل على زيادة مدى الجلفانومتر يُوصَّل على التوالي، فأقم معادلة من شرط تساوي التيار في الجهاز والمضاعِف.
الحل الموضح:	(أ) بما أن الجلفانومتر ومقاومة المجزيء على التوازي، فإن فرق الجهد لهما متساويان. وعندما يمر تيار 100 mA في الجزء المراد قياسه، ينبغي أن يسري 10 mA في الجلفانومتر و 90 mA في مقاومة المجزيء. لتكن مقاومة المجزيء R_s [Ω]. من قانون أوم: $1.8 \times 10 = R_s \times 90$ $R_s = \frac{18}{90} = 0.20\ \Omega$ (ب) بما أن الجلفانومتر والمضاعِف على التوالي، يتساوى التياران المارّان فيهما. وعندما تُطبَّق فرق جهد 30 V على الجزء المراد قياسه، ينبغي أن يُطبَّق 3.0 V على الجلفانومتر و27 V على المضاعِف. لتكن مقاومة المضاعِف R_m (KΩ). $\frac{3}{3} = \frac{27}{R_m}$ $R_m = \frac{3 \times 27}{3} = 27\ k\Omega$
منطقية الحل:	(أ) يجب أن تحمل مقاومة التحويل 9 أضعاف تيار الجهاز عند الفرق جهد نفسها، فينبغي أن تكون مقاومتها تُسع 1.8 Ω، و $1.8/9 = 0.20\ \Omega$ تنطبق. (ب) يجب أن يُسقِط المضاعِف 9 أضعاف فرق جهد الجهاز عند التيار نفسه، فينبغي أن تكون مقاومته 9 أضعاف 3.0 kΩ، و $9 \times 3.0 = 27\ k\Omega$ تنطبق.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، قل لماذا تستخدم معادلة مقاومة التحويل تساوي الفرق جهد بينما تستخدم معادلة المضاعِف تساوي التيار.

والآن حاول أنت: جلفانومتر مقاومته الداخلية 4.0 Ω يقرأ حتى 5.0 mA. أوجد مقاومة التحويل اللازمة ليقرأ حتى 25 mA.

حاول:

(أ) يوجد جلفانومتر مقاومته الداخلية 3.0 Ω يستطيع القياس حتى 1.0 A. لقياس تيارات حتى 3.0 A باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة لمقاومة المجزيء بالأوم.

(ب) يوجد جلفانومتر مقاومته الداخلية 3.0 kΩ يستطيع قياس فروق جهد حتى 5.0 V. لقياس فروق جهد حتى 30 V باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة للمضاعِف بالكيلوأوم.



شكل (8-1-3) جهاز مركزي واحد يُعاد استعماله لكل مدى، مع مقاومات مجزيء قصيرة سميكة منخفضة المقاومة موصّلة على التوازي لنطاقات (مدى) التيار، ومضاعِفات طويلة رفيعة عالية المقاومة موصّلة على التوالي لنطاقات (مدى) فرق الجهد، يُختار منها واحد في كل مرة بالمفتاح الدوّار.

في سياق جديد

يُخفي المتعدد الرقمي الحديث (modern multimeter) الفكرة نفسها داخل مفتاحه الدوّار. فإدارة الجهاز إلى مدى تيار أعلى توصل ببساطة مقاومة مجزيء أصغر عبر الجهاز الداخلي نفسه، فيتجاوزه قدر أكبر من تيار الخط؛ وإدارته إلى مدى فرق جهد أعلى تُدخِل مضاعِفًا أكبر على التوالي، فتُسقَط قيمة أكبر من فرق الجهد المطبَّق خارج المؤشر. فجهاز حساس واحد صغير يُعاد استعماله عبر حدود تمتد أُسسًا عشرية عديدة، وذلك بمجرد اختيار المقاومات.

دورك الآن: جهاز أقصى قراءة لمؤشره حتى 50 mV. ما مقاومة مضاعِف الجهد المتصلة على التوالي، وتجعل مداه يصل حتى 500 mV إذا كان الجهاز يمر به 1.0 mA عند المدى الكامل؟

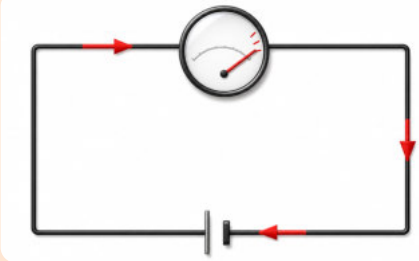
طبيعة العلم: من الأصل — المقاومة الداخلية للأميتر والفولتميتر.

الأميتر المثالي مقاومته الداخلية 0 Ω، والفولتميتر المثالي مقاومته الداخلية لانهائية. والغرض من ذلك ضمان ألا يزيد توصيل الأميتر على التوالي المقاومة الكلية للدائرة، وأن يمنع توصيل الفولتميتر على التوازي مرور تيار غير ضروري إليه. وتُصمَّم الأجهزة الفعلية أيضًا لتقترب من هذين المثالين. والأميتر المثالي والفولتميتر المثالي نموذجان قياسيان (محددان): لا يبلغ جهاز حقيقي 0 Ω ولا مقاومة لانهائية، ومع ذلك يدفع المهندسون كل تصميم نحو مثاله حتى يصير الاضطراب المتبقي صغيرًا بما يكفي لإهماله في القياس المطروح. فجهاز القياس الجيد هو الذي يُبلِّغ عن كمية وهو يغيّرها أقل ما يمكن.

والمؤشر في قلب هذه الأجهزة هو الملف المتحرك لدارسونفال وديبريه، المبني عام 1882، الذي جعله ويستون محمولًا ودقيقًا بما يكفي لبيعه عام 1888. والتقدّم في الفيزياء كثيرًا ما يكون تقدّمًا في الأجهزة: فالكمية لا تصير عادية إلا حين يوجد ما يقرؤها بثقة.

دورك الآن: اقترح قياسًا واحدًا تُغيِّر فيه المقاومة الداخلية المحدودة لفولتميتر القراءة تغييرًا ملحوظًا، وقل أي خاصية في الدائرة تجعل الأثر كبيرًا.

سؤال الدرس، وإجابته:



المشهد الذي بدأنا به

الطريقة هي إبقاء قيمة صغيرة ثابتة فقط من الكمية داخل مؤشر الجهاز وتحويل الباقي خلال مقاومة مضافة. فللتيارات الكبيرة، فالتيار الزائد تحمله مقاومة مجزيء صغيرة المقاومة متصّلة على التوازي ، ويُحدَّد مقدارها بتساوي فرق الجهد؛ ولفروق الجهد الكبيرة، فرق الجهد الزائد يكون عبر مقاومة مضاعِف كبيرة (عالية) المقاومة متصّلة على التوالي ، ويُحدَّد مقداره بتساوي التيار. وفي الحالتين يُحسب من قانون أوم قيمة المقاومة المضافة.

تمرين:

(أ) يوجد جلفانومتر مقاومته الداخلية 9.0 Ω يستطيع القياس حتى 30 mA. لقياس تيارات حتى 300 mA باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة لمقاومة المجزيء بالأوم.

(ب) يوجد جلفانومتر مقاومته الداخلية 2.0 kΩ يستطيع قياس فروق جهد حتى 5.0 V. لقياس فروق جهد حتى 50 V باستخدامه، أوجد المقاومة المطلوبة للمضاعِف بالكيلوأوم.

(جـ) املأ الفراغات في الجمل التالية. لقياس التيار المار في جزء معيّن من دائرة، يُوصَّل الأميتر على (i). وينبغي أن تكون المقاومة الداخلية للأميتر (ii) ما يمكن. ولقياس فرق الجهد في جزء معيّن من دائرة، يُوصَّل الفولتميتر على (iii). وينبغي أن تكون المقاومة الداخلية للفولتميتر (iv) ما يمكن.

الدرس ٣-٢ — قانونا كيرشوف

؟ سؤال الدرس:

في دائرة يتفرّع فيها التيار بطرق معقّدة، ما هى العلاقات التى تربط بين التيارات المارة وفروق الجهد في كل مسار؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. تميّز انخفاض الجهد عبر المقاومة وارتفاع الجهد من المصدر، وتحسب كلًّا منهما من الكميات المعطاة.

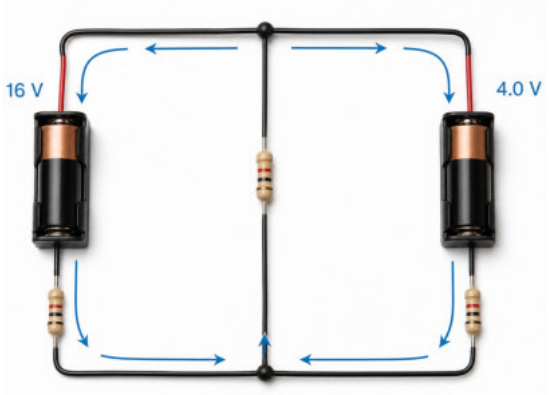
٢. تكتب معادلة العقدة لأي نقطة تلتقي عندها الفروع، مستخدمًا قانون كيرشوف الأول (KCL).

٣. تكتب معادلة المسار لأي مسار مغلق، مستخدمًا قانون كيرشوف الثاني (KVL)، وتحل مجموعة المعادلات الآنية لإيجاد تيار كل فرع — متخذا الاشارة السالبة على أنه اتجاه معاكس.

فكرة أساسية:
كل سلك يلتقي عند عقدة يحمل تيار فرعه I (A) ، وعليك أن تختار اتجاهًا لكل منها قبل أن تجمع التيارات.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

بطاريتان القوة الدافعة الكهربية لهما مختلفة متصلتان بنفس المجموعة من المقاومات، وعند إحدى الوصلات تلتقي ثلاثة أسلاك، فيستطيع التيار أن ينقسم ثم يتجمع مرة أخري. وتتشارك الحلقتان مقاومة واحدة. وقبل أن تحل شيئًا، انظر إلى الفرع الذي يحمل البطارية الأصغر.



شكل 1-2-3 • بطاريتان غير متساويتَي القوة الدافعة الكهربية تدفعان ثلاث مقاومات في حلقتين تتشاركان فرعًا أوسط وتلتقيان عند وصلة.

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) في أي اتجاه يمر التيار في الفرع الذي يحمل البطارية الأصغر — فى نفس اتجاة التيار للبطارية الأكبر، أم عكسه؟

(ب) هل يمكن أن يتبين لك أن التيار في أحد الفروع يمر عكس الاتجاه الذي افترضته أولًا؟

استكشف — ارسم عملية العبور

ما ستفعله: تقيس تيارات الفروع الثلاثة حيث تلتقي حلقتان وتتحقق مما إذا كان التيار الداخل إلى العقدة يساوي فعلًا التيار الخارج منها.

الزمن: 20 دقيقة

ما تحتاجه (الأدوات):

- بطاريتان مختلفتا القوة الدافعة (مثلًا 9 V و 4.5 V)
- ثلاث مقاومات
- أميتر (يُنقل بين الفروع، أو ثلاثة)
- فولتميتر وأسلاك توصيل

فولتمتر

أميتر

مقاومة كهربائية

بطاريتان

الخطوات:

١ كوّنِ دائرة الحلقتين وارسم سهمًا مفترضًا للتيار في كل فرع من الفروع الثلاثة: I_1 و I_2 في الفرعين الخارجيين، و I_3 في الفرع الأوسط المشترك.

٢ ضع الأميتر في الفرع الخارجي الأول واقرأ I_1؛ ثم انقله إلى الفرع الخارجي الثاني لقراءة I_2، ثم إلى الفرع الأوسط لقراءة I_3.

٣ لكل محاولة احسب القيمة المشتقة $I_1 + I_2 - I_3$ وأدخلها في العمود الأخير.

٤ (اختياري) استخدم الفولتميتر لقياس الانخفاض في الجهد عبر كل مقاومة والقوة الدافعة لكل بطارية، واجمعها في مسار مغلق واحد.

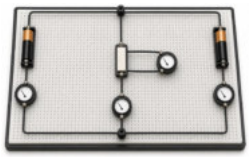
المحاولة	I_1 داخل (A)	I_2 داخل (A)	I_3 داخل (A)	$I_1 + I_2 - I_3$ (A)
١				
٢				
٣				

حلّ ما جمعته:

(أ) من العمود الأخير: ما القيمة الواحدة التي يظل $I_1 + I_2 - I_3$ قريبًا منها في كل محاولة، وماذا يخبرك ذلك عن مقدار الشحنة التي تتجمّع عند العقدة؟

(ب) إذا كان تيار أحد الفروع سالبًا، فماذا تعني إشارته، وهل تظل حالة التساوي بين التيارات عند العقدة قائمًا حين تُبقي تلك الإشارة؟ وتوقَّع هل يكون مجموع فروق الجهد والمقاسة بالفولتميتر متساو.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.



شكل (3-2-2) دائرة اختبار ذات مسارين: بطاريتان في الفرعين الخارجيين، ومقاومة وسطى مشتركة، وأميتر (A) في كل فرع، وفولتميتر (V) عبر المقاومة.

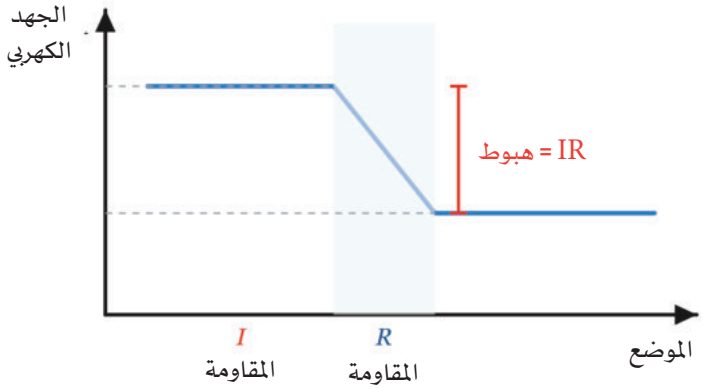
ملاحظة عملية:

وصّل الأميتر دائمًا على التوالي داخل الفرع والفولتميتر على التوازي عبر المكوّن (المقاومة أو البطارية). ولاحظ القراءة التي يظهرها جهازك: إذا قرأ فرع قيمة سالبة، فالتيار الحقيقي يمر في عكس اتجاهك المفترض — سجّله بإشارته، ولا تعكس الأطراف.

من الملاحظة إلى النموذج:

الانخفاض فى فرق الجهد والقوة الدافعة الكهربية:

تخيّل أن الجهد الكهربي هو الارتفاع والدائرة الكهربية هى مسار في تلال. فالمصدر هو الشيء الوحيد الذي يدفع الشحنة؛ وكل مقاومة يسمح لها بالانخفاض مرة أخرى. وقيمة كل انخفاض ليست كمية جديدة تُبحث عنها — فقانون أوم يحددها بالفعل ، إذ إن R وI اللتين تحددان سلوك المقاومة تحددان أيضًا كم يجب أن ينخفض الجهد خلالها. وهذا هو كل مضمون الحدّ الأول المذكور في «نقطة»: الانخفاض فى الجهد يقاس بالفولت، يمكنك حساب قيمته بالفعل. والارتفاع فى جهد المصدر هو نظيره، ومن الجدير التدقيق فيما يقيسه، بل هو الطاقة التي يكتسبها كل كولوم في طريقه خلال المصدر. وبالنسبة لمصدر مثالي — أي مصدر لا توجد فيه مقاومة خاصة به يمر عبرها التيار — يظهر ذلك التسليم غير نقصان عند الطرفين، ولذلك يمكن قراءته باستخدام فولتميتر.



شكل 3-2-3 : الجهد الكهربي على طول موصّل: يظل ثابتًا، ثم يهبط درجةً بمقدار هبوط الفرق جهد IR عبر المقاومة R التي تحمل التيار I.

من أين تأتي القاعدتان (القانونين)؟

ليست أيٌّ من القاعدتين اكتشافًا جديدًا فى مجال الكهرباء؛ بل كل منهما قانون حفظ قديم في ثوب الدوائر. فالشحنة لا تُخلق ولا تفنى ولاتخزن عند نقطة في سلك، فمكان التقاء الفروع لا يسعه إلا أن يمرّر ما يصله — فما يصل في الثانية يجب أن يغادر في الثانية، وهذه هي القاعدة الأولى لا غير. والطاقة كذلك لا تُخلق ولا تفنى، والجهد طاقة لكل كولوم؛ فاحمل كولومًا واحدًا حول مسار مغلق كامل ولا بد أن يعود إلى الارتفاع الذي بدأ منه، فالارتفاع الذي ناله يجب أن يتطابق (يتساوى) مع الانخفاض الذى مر به. وهذه هي القاعدة الثانية.

ويتبع الإجراء الوارد في «الخلاصة» من هذا، وتعليماته الافتتاحية تستحق الانتباه. فأنت مطلوب منك اختيار الأسهم قبل أن تعرف شيئًا — والاختيار لا يمكن أن يكون خاطئًا، بل غير موفَّق فحسب. اخترا اختيارًا بشكل غير صحيح يردّ عليك الجبر إشارة سالبة، وليست رسالة خطأ بل جواب: السهم رُسم معكوسًا، والمقدار صحيح. وهذا ما يجعل الطريقة آلية لا ذكية . فلست مضطرًا إلى استنتاج مسار التيار؛ بل تضع افتراضًا ، وتكتب نوعَي المعادلات، وتدع الإشارات تصحح لك. وكل وصلة (عقدة) تعطي معادلة، وكل حلقة مستقلة تعطي أخرى، ومتى صار عدد المعادلات كعدد التيارات المجهولة يتم حل الدائرة .

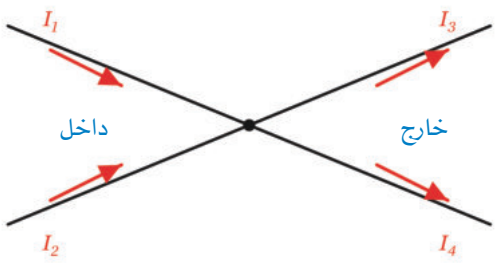
فكرة أساسية:

كلتا الكميتين مقاسة بوحدة الفولت، وكلتاهما تؤولان إلى التطابق فى وحدات القياس:
$1\,V = 1\,\Omega.A = 1\,J/C$
فمقاومة 20 Ω يمر بها 0,50 A يصبح فرق الجهد 10 V — جزء واحد من عشرة أجزاء طاقة كل كولوم يمر خلال المقاومة، يتحول إلى حرارة.

مصطلح:

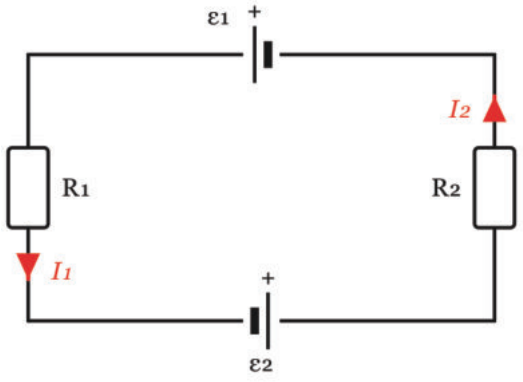
القوة الدافعة الكهربية:
اسم معروف من القرن التاسع عشر ومضلِّل منذ ذلك الحين: فالكمية طاقة لكل وحدة شحنة، تقاس بالفولت، لا قوة بالنيوتن. ولاحظ أيضًا الحدّ المختبئ في الحالة المثالية أعلاه. فالبطارية الحقيقية تحمل مقاومة في داخلها، فتفقد جزءًا من الجهد الداخلي ويُظهر الطرفان أقل من الرقم الكامل — وكلما زاد التيار المسحوب زاد الجهد المفقود داخل البطارية. وكل حساب في هذا الدرس يفترض أن الجهد المفقود داخل البطارية يساوي صفر.

يوضح الشكلان أدناه تقاطعًا واحدًا وحلقة واحدة، مع المعادلة التي ينتجها كل منهما.



$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4$$

شكل 3-2-4 • قانون كيرشوف الأول عند عقدة: التيارات الداخلة يساوي التيارات الخارجة، $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$



$$E_1 + E_2 = R_1I_1 + R_2I_2$$

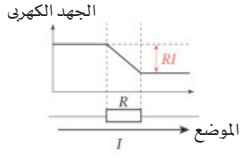
شكل 3-2-5 : قانون كيرشوف الثاني حول حلقة مغلقة فيها مصدران ومقاومتان: $R_1I_1 + R_2I_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

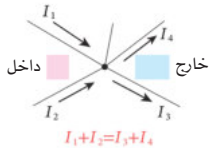
ملاحظة:

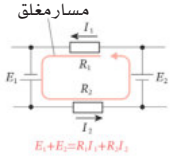
خطأن في الحسابات. الأول: معادلة الحلقة لا تصح إلا إذا حافظت على اتجاه سير واحد متسق حولها كلها — فإذا عكس في منتصف الطريق تتغير ع إشارات الانخفاضات التي حسبتها من قبل بالفعل. والثاني: عُدَّ معادلاتك قبل أن تبدأ الحل: ثلاثة تيارات مجهولة تحتاج ثلاث معادلات مستقلة، وإعادة استعمال نفس الوصلة (العقدة) مرتين لا تقدّم جديدًا. بل مجرد إعادة ترتيب للمعلومات التي كانت لديك بالفعل. التيار لا يُستهلك أثناء مساره (تدفقه). ينص القانون الأول على العكس: كل ما يتدفق إلى نقطة تقاطع (عقدة) يتدفق منها خارجًا. ما تستهلكه المقاومات هو الطاقة، وليس الشحنة.

نقطة

- عندما يمر تيار I(A) خلال موصّل مقاومته R (Ω) يُسمى النقصان (الانخفاض) في الجهد بمقدار IR عبر المقاومة هبوط في فرق الجهد.
- يُسمى فرق الجهد بين طرفَي البطارية أو مصدر الطاقة بالقوة الدافعة الكهربية.
- عند النظر في الدوائر المعقّدة، استخدم قانونَي كيرشوف
  1. افترض اتجاه التيار.
  2. قانون كيرشوف الأول. ركِّز على الوصلات (الأفرع) في الدائرة وأقم المعادلات.
     مجموع التيارات الداخلة = مجموع التيارات الخارجة
  3. قانون كيرشوف الثاني. ركِّز على مسار مغلق في الدائرة وأقم المعادلات.
     مجموع القوى الدافعة الكهربية = مجموع الهبوط في فروق الجهد





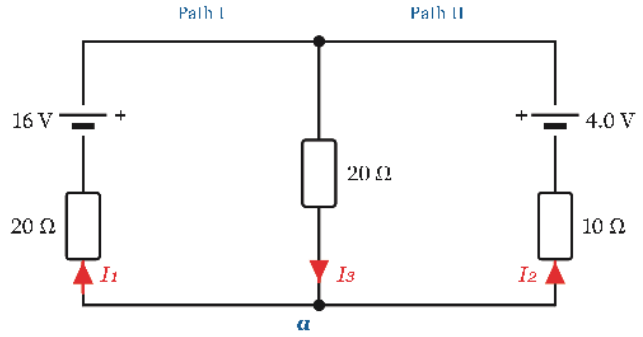


صندوق المعادلات:

هبوط فرق الجهد	$IR =$ (الوحدة: $\Omega \cdot A = V$)
القانون الأول بالرموز:	$\Sigma I_{in} = \Sigma I_{out}$ ⟹ للوصلة المرسومة أعلاه، $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$
القانون الثاني بالرموز:	$\Sigma \varepsilon = \Sigma RI$ ⟹ للحلقة المرسومة أعلاه، $R_1I_1 + R_2I_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

مثال محلول:

الموقف:	تتكون دائرة من بطارية ومقاومات كما في الشكل 3-2-6: قوتان دافعتان كهربيتان 16 V و 4.0 V ، ومقاومة 20 Ω في المسار I، ومقاومة 20 Ω في الفرع المشترك، ومقاومة 10 Ω في المسار II، تلتقي عند الوصلة a. أوجد اتجاه ومقدار التيار المار خلال مقاومة 10 Ω.
المعطيات والمطلوب:	القوتان الدافعتان ε = 16V (المسار I) و4.0 V (المسار II)؛ المقاومات 20 Ω (المسار I)، و 20 Ω (المشترك)، و 10 Ω (المسار II). أوجد اتجاه ومقدار التيار في مقاومة 10 Ω.
التمثيل:	لتكن التيارات خلال المقاومات I_1 (المسار 20 Ω، I)، وI_2 (المسار 10 Ω، II)، وI_3 (المشترك، 20 Ω)، بالاتجاهات المفترضة في الشكل 3-2-6، وكلها تلتقي عند الوصلة a.
الاستراتيجية:	الخطوة 1: افترض اتجاهًا لكل تيار. الخطوة 2: طبّق قانون كيرشوف الأول عند الوصلة a. الخطوة 3: طبّق قانون كيرشوف الثاني على المسار I وعلى المسار II. ثم حل المعادلات الثلاث آنيًا.
الحل الموضح:	باستخدام قانون كيرشوف الأول عند النقطة α: $I_1 + I_2 = I_3$ ... (i) باستخدام قانون كيرشوف الثاني للمسار I: $16 = 20 \times I_1 + 20 \times I_3$ ... (ii) وللمسار II: $4.0 = 10 \times I_2 + 20 \times I_3$ ... (iii) بحل المعادلات (i) و(ii) و(iii)، نجد أن: ، I1 = 0.50 A و I2 = −0.20 A، و I3 = 0.30 A. وبما أن قيمة I2 سالبة، فإن اتجاه التيار يعاكس الاتجاه المفترض. وعليه، فإن التيار المار عبر المقاومة 10 Ω يتجه لأسفل (عكس الاتجاه المفترض)، وبمقدار 0.20 A.
منطقية الحل:	بالتعويض عن $I_3 = (I_1 + I_2)$ في المعادلتين (ii) و(iii): تصبح المعادلة (ii) على الصورة $40I_1 + 20I_2 = 16$، أي $2I_1 + I_2 = 0.80$؛ وتصبح المعادلة (iii) على الصورة $20I_1 + 30I_2 = 4.0$، أي $2I_1 + 3I_2 = 0.40$. وبالطرح نحصل على $2I_2 = -0.40$، ومن ثم تكون $I_2 = -0.20$ أمبير، و$I_2 = 0.50$ أمبير، و $I_3 = 0.30$ أمبير — وهي نتائج تطابق الإجابات المذكورة أعلاه. وتتوافق القيمة السالبة لـ I2 مع حقيقة أن البطارية الأكبر في القوة الدافعة الكهربية تتغلب على البطارية الأصغر في القوة الدافعة الكهربية.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، قل ماذا تخبرك القيمة السالبة لـ I_2 فيزيائيًا، ولماذا لا تعني أن خطأً قد وقع.

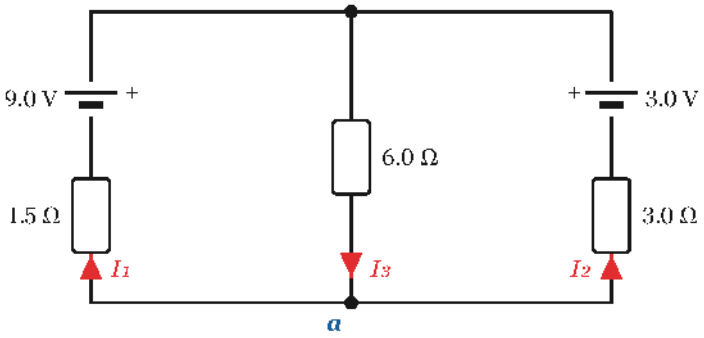


شكل 3-2-6 المثال المحلول: بطاريتان (16 V و 4.0 V) وثلاث مقاومات (20 Ω و 20 Ω و 10 Ω) تكوّن مسارين تتشاركان فرعًا أوسط يلتقيان عند الوصلة a؛ والتيارات المفترضة I_1 و I_2 و I_3.

حاول بنفسك: بطاريتان، 9.0 V و 6.0 V، تدفعان تيارًا إلى فرع مشترك؛ ويحمل كل فرع خارجي والفرع المشترك مقاومة 10 Ω أوجد التيار في المقاومة المشتركة.

حاول:

1. تتكون دائرة من بطارية ومقاومات كما في الشكل 3-2-7. أوجد اتجاه ومقدار التيار المار خلال كل مقاومة.



شكل 3-2-7 • جرِّب: بطاريتان 9.0 V و 3.0 V مع مقاومات 1.5 Ω و 6.0 Ω و 3.0 Ω في شبكة ذات مسارين — تتشارك بطارية 9.0 V فرعها مع مقاومة 1.5 Ω، وبطارية 3.0 V مع مقاومة 3.0 Ω، ومقاومة 6.0 Ω هي الفرع الأوسط المشترك.

في سياق جديد

يصف قانونا كيرشوف أكثر بكثير من الدوائر الكهربية. فقانونه الأول أشبه بعدّ السيارات عند تقاطع: عدد السيارات الداخلة يساوي عدد الخارجة، فتُحفَظ حركة المرور تمامًا كما يُحفَظ التيار عند وصلة. وقانونه الثاني أشبه بارتقاء طريق جبلي: إذا صعدت وهبطت وعدت إلى نقطة انطلاقك، كان اجمالي تغيّر ارتفاعك صفرًا — تمامًا كما أن اجمالي تغيّر جهد شحنة حول أي مسار مغلق يساوي صفر. وبهاتين القاعدتين وحدهما تستطيع تحليل أي شبكة طرق، مهما تشابكت، وأي دائرة مبنية على نفس المنوال نفسه.

دورك الآن: عند تقاطع، يجلب طريقان 400 و250 سيارة في الدقيقة، ويحمل طريق خروج واحد 300 سيارة في الدقيقة. باستخدام فكرة القانون الأول، كم سيارة في الدقيقة يجب أن تغادر عبر طريق الخروج المتبقي؟.

شكل 3-2-8 • تشبيهان من الحياة اليومية لقانوني كيرشوف: عند وصلة طرق يوازن سيل السيارات الداخلة سيلَ الخارجة (قاعدة الوصلة)، بينما يشكّل درب قمة تلة مسار مغلق تعود إلى علامة بدايتها فيكون ناتج تغيّر الارتفاع حول الحلقة صفرًا (قاعدة المسار المغلق).

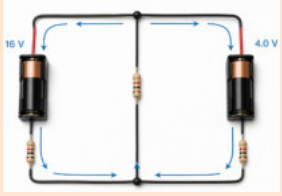
طبيعة العلم:

من الأصل — قانونا حفظ متنكّران. قانونا كيرشوف ليسا قوى جديدة ولا قياسات جديدة — بل هما قاعدتان حسابيتان تتبعان من مبادئ حفظ موثوقة أصلًا في الفيزياء. فالقانون الأول (العقدة) يعبّر عن حفظ الشحنة الكهربية: لا يمكن للشحنة أن تتراكم عند نقطة، فما يدخل يجب أن يخرج. والقانون الثاني (المسار المغلق) يعبّر عن حفظ الطاقة: الشحنة المحمولة مرة حول مسار مغلق تعود إلى الجهد نفسه، فالجهد الذي تمدّه المصادر يجب أن يساوي الجهد المفقود نتيجة انخفاضات فرق جهد عبر المقاومات.

ورؤية فكرة واحدة تظهر ثانيةً في صورة أخرى عادةٌ من عادات العلم الجيد: فقاعدة عن المرور، وقاعدة عن الارتفاع في رحلة سير، وقاعدة عن الدوائر، كلها العبارة نفسها عن الحفظ في ثياب مختلفة. وإدراك ذلك البناء المشترك هو ما يتيح لطريقة واحدة أن تحل مسائل تبدو غير مترابطة.

دورك الآن: اقترح أي قانون حفظ يعبّر عنه كل من قانونَي كيرشوف، واذكر حالة أخرى في الفيزياء يُستخدم فيها نفس قانون الحفظ.

سؤال الدرس، وإجابته:

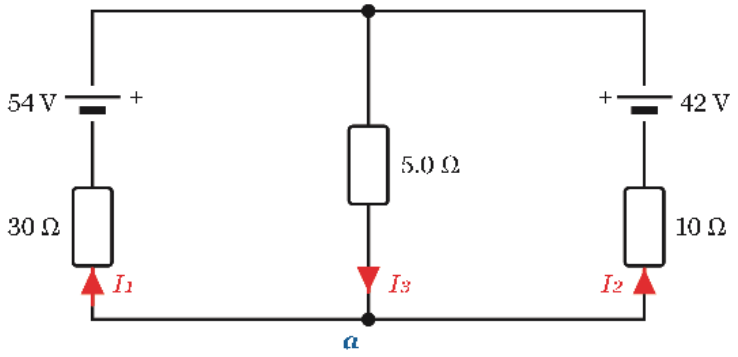


المشهد الذى بدأنا به

في دائرة متفرّعة يخضع التياران وفروق الجهد لقاعدتين (قانونين)، هما قانونا كيرشوف. فعند كل وصلة تتساوى التيارات الداخلة والتياراتِ الخارجة (قانون حفظ الشحنة)، وحول كل مسار مغلقة تساوي مجموع القوى الدافعة الكهربية ومجموعَ انخفاضات فرق الجهد IR (قانون حفظ الطاقة). وإسناد اتجاه لكل تيار وكتابة معادلة وصلة واحدة ومعادلة مسار واحدة لكل مسار مستقل يعطي معادلات آنية كافية لإيجاد كل تيار — والجواب السالب يعكس ببساطة السهم المفترض.

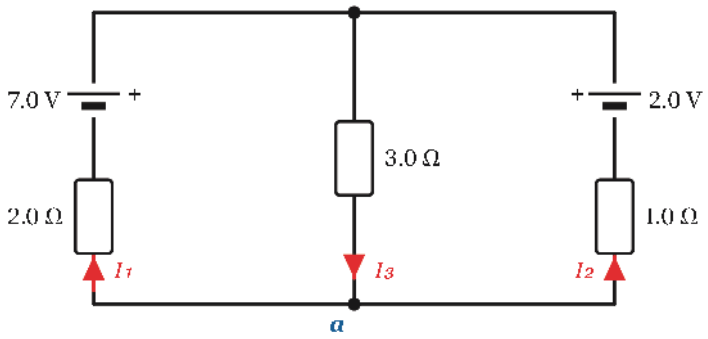
تمرين:

١. تتكون دائرة من بطارية ومقاومات كما في الشكل 3-2-9. أوجد اتجاه ومقدار التيار المار خلال كل مقاومة.



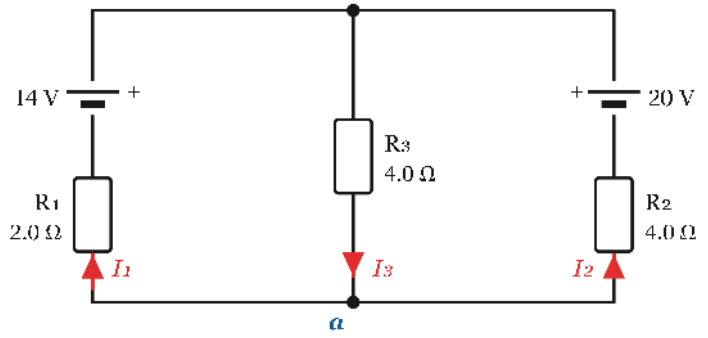
شكل 3-2-9 تمرين 1: بطاريتان 54 V و42 V مع مقاومات 30 Ω و5.0 Ω و10 Ω في شبكة ذات حلقتين

٢. تتكـون دائـرة مـن بطاريـة ومقاومـات كمـا في الشـكل 3-2-10. أوجـد اتجـاه ومقـدار التيـار المـار خـلال كل مقاومـة.



شكل 3-2-10 تمرين 2: بطاريتان 7.0 V و 2.0 V مع مقاومات 2.0 Ω و 3.0 Ω و 1.0 Ω في شبكة ذات حلقتين.

٣. تتكـون دائـرة مـن بطاريـة ومقاومـات R_1 إلى R_3 كمـا في الشـكل 3-2-11. أوجـد اتجـاه ومقـدار التيـار المـار خـلال كل مقاومـة.



شكل 3-2-11 تمرين 3: بطاريتان 14 V و 20 V مع $R_1 = 2.0\,\Omega$، و$R_2 = 4.0\,\Omega$، و$R_3 = 4.0\,\Omega$ في شبكة ذات حلقتين.

الفصل الرابع

المغناطيسية والحث الكهرومغناطيسي

٤-١ — المجال المغناطيسي الناتج عن تيار كهربي

٤-٢ — القوة المؤثرة على تيار كهربي بواسطة مجال مغناطيسي

٤-٣ — حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي

٤-٤ — الحث الكهرومغناطيسي

٤-٥ — الحث الذاتي

الدرس ٤–١ — المجال المغناطيسي الناتج عن تيار كهربي

؟ سؤال الدرس:
ما مدى قوة المجال المغناطيسي الذي ينشئه التيار الكهربائي؟ وما العوامل التي تحدد مقداره؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** شدة المجال المغناطيسي H بوحدة A/m عند مسافة r من سلك طويل مستقيم يمر به تيار، باستخدام: $H = \frac{1}{2\pi r}$

٢. **تحسب** شدة المجال المغناطيسي عند مركز دائرة يمر بها تيار باستخدام: $H = \frac{1}{2r}$ ثم تضرب الناتج في عدد اللفات N عندما تكون الدائرة ملفًا

٣. **تحدد** شدة المجال المغناطيسي داخل ملف لولبي (Solenoid) من عدد اللفات لكل متر، باستخدام: H=nI.

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

ضع بوصلة مغناطيسية بشكل أفقي واترك إبرتها تستقر في اتجاه الشمال–الجنوب. ثم مرّر سلكًا مستقيمًا فوق الإبرة، بحيث يكون اتجاه السلك ثابتًا، وشغّل التيار الكهربائي.

ستلاحظ أن إبرة البوصلة تنحرف عن اتجاهها.

أوقف التيار، فستعود الإبرة إلى اتجاهها الأصلي. ثم اعكس اتجاه التيار، وستنحرف الإبرة في الاتجاه المعاكس.

هذا يدل على أن الشحنات المتحركة في السلك تولّد مجالًا مغناطيسيًا حول السلك.

شكل (1.1.4)

سلك مستقيم يمر به تيار كهربائي موضوع فوق بوصلة. أثناء مرور التيار I، تنحرف إبرة البوصلة عن اتجاه الشمال–الجنوب.

فكرة أساسية:
حول السلك الذي يمر به تيار كهربائي، يتكوّن مجال مغناطيسي، وتُقاس شدة هذا المجال H بوحدة الأمبير لكل متر (A/m). إلى أي مدى يمتد هذا المجال؟ وما اتجاهه؟ يمكن أن تساعدك البوصلة في تحديد ذلك.

تنبأ

(أ) إذا ضاعفت شدة التيار المار في السلك، فهل تزداد زاوية انحراف إبرة البوصلة، أم تقل، أم تظل كما هي؟

(ب) إذا أبعدت البوصلة مسافة أكبر عن السلك، فهل تزداد شدة المجال المغناطيسي الذي تتعرض له، أم تقل، أم تظل كما هي؟

استكشف — دائرة بوصلة أورستد

ما الذي ستفعله: اقرأ كيف تدور إبرة البوصلة بالقرب من سلك مستقيم يمر به تيار كهربائي، بينما تغيّر شدة التيار والمسافة، لتكتشف أن المجال المغناطيسي يتناسب عكسيًا مع المسافة r.

الزمن: 15 دقيقة

الأدوات المطلوبة:

- بطاقة صلبة يمر خلالها سلك رأسي.
- عدة بوصِلات صغيرة لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي.
- مسطرة لقياس المسافة r، ومنقلة لقياس زاوية الانحراف θ.
- أميتر لقياس شدة التيار I.
- خلية جافة، مع مقاومة متغيرة للتحكم في شدة التيار.

بطارية جافة (خلية) — أميتر (لقياس التيار) — بوصلة صغيرة (عدة بوصلات) — كرتونة صلبة + سلك رأسي

شكل (2.3.4)

الخطوات:

١ ثبّت السلك رأسيًا بحيث يمر خلال البطاقة، ثم وزّع البوصلات الصغيرة حول السلك، واتركها تستقر في اتجاه الشمال–الجنوب قبل مرور التيار.

٢ شغّل تيارًا معلوم الشدة I واقرأ قيمته من الأميتر. ثم اختر إحدى البوصلات الموجودة على مسافة r من السلك، وسجّل مقدار زاوية انحراف إبرتها θ.

٣ زِد شدة التيار I على خطوات مع تثبيت المسافة r، ثم ثبّت شدة التيار I وغيّر المسافة r تدريجيًا، مع قراءة انحراف البوصلات.

٤ (اختياري) اعكس اتجاه التيار، ولاحظ أن كل إبرة بوصلة تنحرف في الاتجاه المعاكس.

المحاولة	شدة التيار I.(A)	المسافة r(m)	زاوية الانحراف θ°	$\frac{1}{r}$ (A/m)
1				
2				
3				

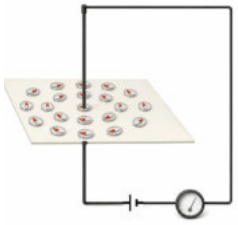
حلّ ما جمعته:

(أ) قارن عمود زاوية الانحراف θ بعمود $\frac{1}{r}$. عندما تزداد قيمة $\frac{1}{r}$ هل تزداد زاوية الانحراف أيضًا؟ ما العلاقة الوحيدة بين شدة التيار والمسافة التي يبدو أن المجال المغناطيسي يتبعها؟

(ب) قانون المجال المغناطيسي حول سلك مستقيم هو: $H = \frac{1}{2r}$

توقّع من هذا القانون: للحصول على نفس زاوية الانحراف، هل تؤدي مضاعفة شدة التيار I ومضاعفة المسافة r في الوقت نفسه إلى إلغاء تأثير كل منهما؟ هل تتفق نتائج تجاربك مع هذا التوقع؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.



شكل (2.1.4)

سلك رأسي يمر خلال بطاقة، حيث تصطف البوصلات الصغيرة على دوائر حول السلك لتحديد شكل المجال المغناطيسي، بينما يقرأ الأميتر شدة التيار I.

ملاحظة عملية:

زاوية الانحراف θ المقاسة من اتجاه الشمال تعتمد على المجال المغناطيسي للأرض، لذلك يجب قياسها دائمًا بالنسبة إلى خط الشمال نفسه. حافظ على الحديد وأي مغناطيسات أخرى بعيدًا عن البوصلة حتى يكون المجال الناتج عن السلك هو المؤثر الأساسي على الإبرة.

من الملاحظة إلى النموذج: التيار الكهربائي يُنشئ مجالاً مغناطيسيًا حوله

لقد أعطتكم البوصلات الإجابة قبل استخدام أي معادلة. فعندما كانت الدائرة مفتوحة، كانت كل إبرة تتجه نحو الشمال. وعند غلق الدائرة وتشغيل التيار، انحرفت جميع الإبر؛ وهذا يدل على أن التيار الكهربائي، وليس أي مغناطيس آخر، هو الذي ينشئ المجال المغناطيسي حول السلك. لم تتجه الإبر نحو السلك أو بعيدًا عنه، بل استقرت على دوائر تحيط بالسلك؛ ولذلك يُقال إن المجال المغناطيسي يدور حول التيار بدلًا من أن يمتد خارجًا منه. وعند عكس اتجاه التيار، تنحرف كل إبرة في الاتجاه المعاكس؛ أي إن اتجاه دوران المجال المغناطيسي يتحدد باتجاه التيار، وهذا ما يوضحه قاعدة قبضة اليد اليمنى.

زاوية الانحراف لا تعطي قيمة عددية مباشرة لشدة المجال، وإنما تسمح بالمقارنة. وقد ظلت هذه المقارنة صحيحة في جميع التجارب: تزداد زاوية انحراف الإبرة عند زيادة شدة التيار I، وتقل عند زيادة المسافة r عن السلك. لذلك تعتمد شدة المجال على الكمية: $\frac{1}{r}$

وبالتالي، فإن التيار مقسومًا على المسافة هو الكمية التي يحدد بها النموذج شدة المجال المغناطيسي H، وتكون وحدتها الأمبير لكل متر (A/m). أما العامل الذي يحدد القيمة العددية الدقيقة لشدة المجال، فيعتمد على شكل السلك الذي يمر به التيار.

ثلاثة أشكال هندسية أساسية:

يمكن ثني السلك بثلاثة أشكال مختلفة، ويُظهر قانون المجال الأساسي ثلاث صور مختلفة للمجال المغناطيسي.

السلك المستقيم:

عندما يكون السلك مستقيمًا، ينتشر المجال المغناطيسي بالتساوي حوله في صورة دوائر متحدة المركز، ويزداد نصف قطر هذه الدوائر كلما ابتعدنا عن السلك. لذلك يتوزع التيار على محيط دائرة أكبر، وتقل شدة المجال المغناطيسي بزيادة المسافة عن السلك. وهذا يفسر وجود 2π في المقام.

السلك في صورة حلقة دائرية:

عند ثني السلك ليصبح حلقة دائرية، تتجه مساهمات المجال الناتجة عن أجزاء السلك المختلفة نحو مركز الحلقة. عند المركز، تضاف هذه المساهمات معًا، ولذلك تكون شدة المجال عند مركز الحلقة أكبر من شدة المجال الناتج عن سلك مستقيم على مسافة تساوي نصف قطر الحلقة.

وتكون شدة المجال عند مركز الحلقة: $H = \frac{I}{2r}$

وعند استخدام N لفات متطابقة، تتجمع مساهمات جميع اللفات: $H = \frac{NI}{2r}$

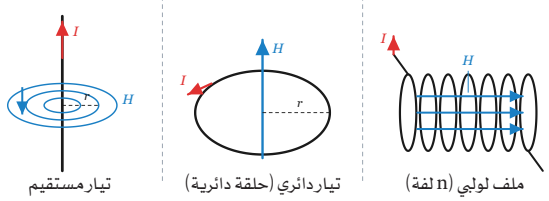
الملف اللولبي (Solenoid):

عند لف السلك حول أسطوانة طويلة بحيث تتجاور اللفات وتتداخل تأثيراتها، يصبح المجال المغناطيسي داخل الملف قويًا ومتقاربًا في المقدار على امتداد محوره.

وتعتمد شدة المجال داخل الملف على عدد اللفات لكل وحدة طول n وعلى شدة التيار I:

$H=nI$

ومن الملاحظ أن قطر الملف لا يظهر في هذه العلاقة.



شكل (3.1.4)

ثلاثة أشكال للمجال المغناطيسي: المجال المغناطيسي يحيط بالتيار المستقيم، ويمر خلال مركز التيار الدائري، ويكون منتظمًا داخل الملف اللولبي.

مصطلح:

مقدار شدة المجال المغناطيسي الناتج عن 1 أمبير في سلك مستقيم يساوي تقريبًا: 0.16A/m على بُعد متر واحد.

0.16 A/m على بُعد سنتيمتر واحد.

وللحصول على قيم تصل إلى آلاف A/m كما في بعض المغناطيسات الكهربائية، لا نحتاج إلى زيادة التيار بدرجة كبيرة، بل يمكن لف مئات اللفات لكل متر.

حقيقة أساسية:

Solenoid — الملف اللولبي

اعتبار المجال المغناطيسي داخل الملف منتظمًا هو نموذج تقريبي، ويكون هذا التقريب جيدًا فقط داخل أسطوانة يكون طولها أكبر بكثير من قطرها.

عند الاقتراب من طرفي الملف، يقل تداخل تأثيرات اللفات، لذلك تصبح شدة المجال هناك أضعف من القيمة التي تتنبأ بها المعادلة، ويمتد المجال إلى الخارج بدلًا من أن يظل محصورًا في اتجاه مستقيم.

نقطة

! المجال المغناطيسي الناتج عن تيار مستقيم.

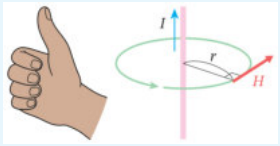
ليكن:

- H شدة المجال المغناطيسي بوحدة A/m.
- I شدة التيار بوحدة A.
- r المسافة من السلك الذى يمر فيه التيار بوحدة m.

للحلقة الدائرية الواحدة: $H = \frac{1}{2\pi r}$

قاعدة قبضة اليد اليمنى:

وجّه إبهام اليد اليمنى في اتجاه التيار I، فتشير الأصابع الملتفة حول السلك إلى اتجاه المجال المغناطيسي H



شكل (4.1.4)

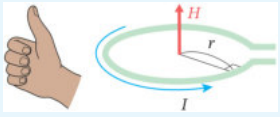
أمسك السلك بحيث يشير إبهامك في اتجاه التيار I، وتلتف أصابعك في اتجاه المجال المغناطيسي H حول السلك.

! شدة المجال المغناطيسي عند مركز تيار دائري.

ليكن:

- H شدة المجال المغناطيسي بوحدة A/m.
- I شدة التيار بوحدة A.
- r نصف قطر الحلقة الدائرية بوحدة m. $H = \frac{1}{2r}$

المعنى: عند مركز الحلقة، يكون اتجاه المجال المغناطيسى H على طول محور الحلقة، بينما يسرى التيار I فى مسار الحلقة.



شكل (5.1.4)

عند مركز حلقة نصف قطرها r، يشير المجال المغناطيسي H على طول محور الحلقة، بينما يسري التيار I حول الحلقة.

! شدة المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي (**Solenoid**)

الملف اللولبي هو ملف أسطواني مكوَّن من سلك موصل ملفوف بإحكام في صورة لفات متقاربة.

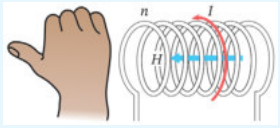
ليكن:

- H شدة المجال المغناطيسي بوحدة A/m.
- I شدة التيار بوحدة A.
- n عدد اللفات لكل متر، ووحدته m^{-1}.

إذن: $H=nI$

قاعدة اليد اليمنى:

لف أصابع اليد اليمنى في اتجاه سريان التيار في لفات الملف، فيشير الإبهام إلى اتجاه المجال المغناطيسي H على طول محور الملف.



شكل (6.1.4)

لف أصابعك في اتجاه سريان التيار I في لفات الملف، فيشير إبهامك إلى اتجاه المجال المغناطيسي H على طول محور الملف

صندوق المعادلات:

تيار مستقيم:	$H = \frac{1}{2\pi r}$
تيار دائرى عند المركز:	$H = \frac{1}{2r}$
ملف دائرى عدد لفاته N:	$H = \frac{NI}{2r}$
ملف لولبى:	$H=nI$

حيث: $H = \frac{N}{L}$

أي أن n هو عدد اللفات لكل متر، وN عدد اللفات الكلي، وL طول الم

مثال محلول:

الموقف:	حدد قيمة كل إجابة مقربةً إلى رقمين عشريين، بافتراض أن $\pi = 3.14$. (أ) حدد شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) عند نقطة تبعد مسافة 1.0 متر عن سلك مستقيم يمر به تيار شدته 6.0 أمبير. (ب) عند مرور تيار شدته 0.30 أمبير في ملف دائري مكون من 5 لفات ونصف قطره 0.20 متر، حدد شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) عند مركز الدائرة. (ج) عند مرور تيار شدته 2.0 أمبير في ملف لولبي (سولينويد) طوله 0.50 متر ومكون من 300 لفة، حدد شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) المتولد داخله.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات والمطلوب:** (أ) $I = 6.0\ A$، $r = 1.0\ m$؛ أوجد H. (ب) $I = 0.30\ A$، $N = 5$، I، الطول (ج) $I = 2.0\ A$؛ أوجد H عند المركز. $r = 0.20\ m$ $L = 0.50\ m$، $N = 300$ لفة؛ أوجد H في الداخل
التمثيل:	انظر الشكل 3-1-4: استخدم لوحة السلك المستقيم للحالة (a)، ولوحة الحلقة الدائرية للحالة (b)، ولوحة الملف اللولبي للحالة (c).
الاستراتيجية:	اختر الصيغة الرياضية التي تناسب كل شكل هندسي — تيار مستقيم $H = I/(2\pi r)$، تيار دائري $H = I/(2r)$، ملف لولبي $H = nI$ — ثم عوّض بقيم التيار أو المسافة أو عدد اللفات لتحديد شدة المجال المغناطيسي. بالنسبة للملف العادي، اضرب ناتج اللفة الواحدة في N؛ أما بالنسبة للملف اللولبي، فاحسب أولاً قيمة $n = N/L$
الحل الموضح:	(أ) تيار مستقيم، $H = I/(2\pi r)$: $H = 6.0/(2 \times 3.14 \times 1.0) = 6.0/6.28 = 0.955\ldots \approx 0.96\ A/m$ (ب) في ملف دائري مكون من N لفة، تكون شدة المجال مساوية لـ N ضعف شدة مجال تيار دائري ذي لفة واحدة، $H = NI/(2r)$: $H = 0.30/(2 \times 0.20) \times 5 = 0.75 \times 5 = 3.75 \approx 3.8\ A/m$ (ج) ملف لولبي (سولينويد)، $H = nI$ حيث $n = N/L = 300/0.50$: $H = (300/0.50) \times 2.0 = 600 \times 2.0 = 1.2 \times 10^3\ A/m$
منطقية الحل:	(أ) تؤدي قسمة بضعة أمبيرات على 6 تقريباً إلى الحصول على مجال يقارب 1 أمبير/متر، وهي قيمة مناسبة لسلك يبعد مسافة متر واحد. (ب) تضيف كل لفة 0.75 أمبير/متر، وتنتج خمس لفات مجالاً بقيمة بضعة أمبيرات/متر. (ج) يعمل الملف المكدس بإحكام -بمعدل 600 لفة لكل متر- على تركيز المجال، لذا يُتوقع الحصول على قيمة تبلغ آلاف الأمبيرات/متر.
فسِّرها بنفسك:	بيّن في جملة واحدة سبب توليد الملف الدائري مجالاً أقوى عند مركزه مقارنةً بحلقة مفردة يمر فيها التيار نفسه.

جرِّب بنفسك: حدد شدة المجال المغناطيسي H بوحدة A/m عند نقطة تبعد 2.0 m عن سلك مستقيم يمر به تيار شدته 8.0 A، مع اعتبار: pi = 3.14 والإجابة إلى رقمين عشريين.

حاول:

١. احسب ما يلي مقرباً الناتج إلى رقمين معنويين، بافتراض أن $\pi = 3.14$: حدد شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) عند نقطة تبعد مسافة 0.50 m عن سلك مستقيم يمر به تيار شدته 4.0 A.

٢. عند مرور تيار شدته 0.72 A في ملف دائري مكون من 20 لفة ونصف قطره 0.15 m، احسب شدة المجال المغناطيسي عند مركز الدائرة (بوحدة A/m).

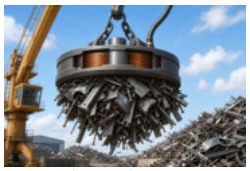
٣. عند مرور تيار شدته 1.5×10^{-2} A في ملف لولبي طوله 0.20 m ومكون من 200 لفة، احسب شدة المجال المغناطيسي المتولد داخله (بوحدة A/m).

في سياق جديد

ملفًا لولبيًا، ثم ضع قلبًا من الحديد بداخله، وشغّل التيار الكهربائي؛ سيتحول الملف إلى مغناطيس كهربائي يمكن تشغيل مجاله وإيقافه، والتحكم في اتجاهه من خلال اتجاه التيار. وبما أن المجال المغناطيسي داخل الملف اللولبي يتبع العلاقة: $H = nI$

فإن زيادة عدد اللفات لكل متر أو زيادة شدة التيار تجعل المجال المغناطيسي أقوى. وهذا هو المبدأ الذي يفسر كيفية عمل المرحلات الكهربائية، وكيف تستطيع رافعات ساحات الخردة الإمساك بالحديد، وكذلك كيفية قيام مكبرات الصوت بتحريك الأغشية الخاصة بها.

جرِّب بنفسك: ملف لولبي طوله 0.40 m، ملفوف حوله 800 لفة، ويمر به تيار شدته 1.5 A. احسب شدة المجال المغناطيسي داخله بوحدة).



شكل (7.1.4)

مغناطيس كهربائي لرفع الخردة
مغناطيس كهربائي يُستخدم في ساحة للخردة لرفع المعادن؛ وهو عبارة عن ملف يحتوي على عدد كبير من اللفات النحاسية ملفوفة حول قلب من الحديد، ويتصل الملف بكابل طاقة معزول. يستطيع المغناطيس الكهربائي الإمساك بكمية كبيرة من خردة الحديد والصلب الموجودة أسفل سطحه المسطح ورفعها ضد تأثير الجاذبية. ولا تظل ملتصقة به إلا المواد الفيرومغناطيسية، وتكون أكثر كثافة بالقرب من سطح المغناطيس.

طبيعة العلم:

من الأصل — هل الأرض مغناطيس كهربائي ضخم؟

تتصرف الأرض مثل مغناطيس ضخم؛ حيث يتصرف القطب الجغرافي الشمالي كأنه قطب مغناطيسي جنوبي، بينما يتصرف القطب الجغرافي الجنوبي كأنه قطب مغناطيسي شمالي، ويُعرف ذلك باسم المغناطيسية الأرضية (Geomagnetism).

ويُعتقد أن هذا المجال المغناطيسي ينشأ من الحديد السائل ذي درجة الحرارة المرتفعة في مركز الأرض، والذي يتحرك بالحمل الحراري بالتزامن مع دوران الأرض، مما يؤدي إلى توليد تيار كهربائي هائل داخل الأرض.

العلاقة بين التيار الكهربائي والمجال المغناطيسي التي اكتشفها أورستد هي علاقة واحدة يمكن التعبير عنها بعدة صور، بحيث توجد صورة مناسبة لكل هندسة أو شكل للموصل، بدلًا من اعتبارها مجموعة من الحقائق المنفصلة.

إن اعتبار المجال المغناطيسي للأرض دليلًا على وجود تيار كهربائي داخلي يوضح كيف يستطيع الفيزيائيون توسيع قانون تم اختباره على سلك في المختبر ليطبّقوه على نظام لا يمكنهم الوصول إليه مباشرة، ثم يختبرون صحة هذا التفسير باستخدام ما يمكنهم قياسه عند سطح الأرض.

دورك الآن: اقترح ملاحظة واحدة عند سطح الأرض يمكن لعالِم استخدامها لاختبار فكرة أن مغناطيسية الكوكب ناتجة عن تيار كهربائي داخلي.

شكل (8.1.4)

الأرض كمغناطيس كهربي
عملاق: يُولِّد التيارُ الساري في اللبِّ السائل (المكوَّن من الحديد) والخاضع لعملية الحمل الحراري مجالاً ثنائي القطب، وتصطفُّ البوصلةُ الموجودة على السطح بمحاذاته

مشهد البداية

سؤال الدرس، وإجابته:

يحيط بالتيار الكهربائي دائماً مجال مغناطيسي تُقاس شدته (H) بوحدة أمبير/متر (A/m). وتتحدد قيمة هذه الشدة بناءً على مقدار التيار والهندسة الخاصة بالموصل؛ إذ تكون $H = I/(2\pi r)$ عند مسافة r من سلك مستقيم، و $H = I/(2r)$ مضروبة في عدد اللفات N في حالة الملف) عند مركز تيار دائري، و $H = nI$ داخل ملف لولبي ومن ثم، فإن زيادة شدة التيار، أو جعل الهندسة أكثر تقارباً، أو زيادة عدد اللفات لكل متر، تؤدي جميعها إلى زيادة شدة المجال.

تمرين:

١. احسب ما يلي مقرباً النتيجة إلى رقمين معنويين، بافتراض أن $\pi = 3.14$: احسب شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) عند نقطة تبعد 0.20 متر عن سلك مستقيم يمر به تيار شدته 3.14 أمبير.

٢. احسب شدة المجال المغناطيسي (بوحدة A/m) عند نقطة تبعد 0.20 متر عن سلك مستقيم يمر به تيار شدته 0.68 أمبير.

٣. عند مرور تيار شدته 0.40 أمبير في سلك موصل دائري نصف قطره 0.10 متر، احسب شدة المجال المغناطيسي عند مركز الدائرة (بوحدة A/m).

٤. عند مرور تيار شدته 0.50 أمبير في ملف دائري مكون من 10 لفات ونصف قطره 0.10 متر، احسب شدة المجال المغناطيسي عند مركز الدائرة (بوحدة A/m).

٥. عند مرور تيار شدته 2.0 أمبير في ملف لولبي (سولينويد) طوله 0.10 متر ومكون من 500 لفة، احسب شدة المجال المغناطيسي المتولد داخله (بوحدة A/m).

٦. عند مرور تيار في ملف لولبي طوله 0.10 متر ومكون من 250 لفة، تولد مجال مغناطيسي شدته 5.0×10^2 A/m داخله. احسب شدة التيار المار (بوحدة الأمبير).

٤-٢ القوة المؤثرة على موصل يمر به تيار موضوع في مجال مغناطيسي

؟ سؤال الدرس:

ما مقدار القوة التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على سلك يمر فيه تيار، وما اتجاه هذه القوة؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **احسب** القوة المؤثرة على سلك يمر به تيار وموضوع عمودي على مجال مغناطيسي باستخدام العلاقة $F = \mu IHL$، مع تحديد μ على أنها النفاذية المغناطيسية $[N/A^2]$ للمادة المحيطة.

٢. **استخدم** كثافة الفيض المغناطيسي $B = \mu H\,[T]$ لكتابة القوة بالصيغة $F = IBL$، واستخدم $I \sin\theta$ للتيار الذي يقطع المجال بزاوية معينة: $F = IBL \sin\theta$.

٣. **طبّق** قاعدة اليد اليسرى لفلمنج لتحديد اتجاه القوة المغناطيسية عن طريق معرفة اتجاه كل من التيار الكهربي والمجال المغناطيسي.

فكرة أساسية

يتأثر سلك طوله L ويمر به تيار I موضوع في مجال مغناطيسي شدته B (بوحدة تسلا)، بقوة F (بوحدة نيوتن). ما مقدار هذه القوة وما اتجاهها؟

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

ضع طرف إصبعك برفق على المخروط الورقي لمكبر الصوت أثناء تشغيل الموسيقى؛ ستشعر به وهو يهتز ذهابًا وإيابًا. ففي الداخل، تتدلى لفافة (ملف) من سلك رفيع معلقة في الفجوة الضيقة لمغناطيس دائم، وهي مثبتة لاصقًا بالجزء الخلفي من المخروط. وعندما يمرر مكبر الصوت تيار الموسيقى ذهابًا وإيابًا عبر الملف ، يقوم المجال المغناطيسي بدفع الملف — ومعها المخروط — إلى الداخل والخارج، فيدفع المخروط المتحرك الهواءَ ليُصدر الصوت. وإذا تم زيادة مستوى الصوت عند نفس النغمة ، تزداد قوة اهتزاز المخروط؛ فالتيار الكهربي المار في الملف الموجود داخل مجال مغناطيسي يتعرض لقوة مؤثرة.

الشكل 4-2-1 • تتدلى ملف الصوت الخاص بمكبر الصوت داخل المجال المغناطيسي: إذ يؤدي مرور تيار الموسيقى عبر الملف إلى أن المجال يؤثر عليه — وللمخروط المُلصق بها — نحو الداخل والخارج (بقوة F)، وبالتالي فإن التيار الأكبر يولد قوة مؤثرة أكبر.

تنبأ:

(أ) إذا قمت برفع مستوى الصوت بحيث يزداد التيار المار في الملف، فهل تزداد القوة المؤثرة على المخروط، أم تقل، أم تظل كما هي؟

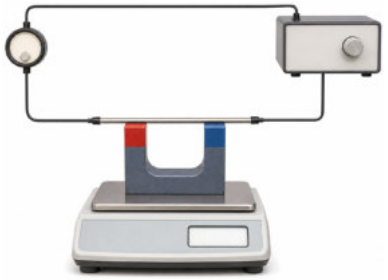
(ب) إذا كان سلك الملف في مستوى موازى لاتجاه المجال المغناطيسي بدلًا من أن يكون في وضع عمودى، فهل ستزداد القوة المؤثرة، أم ستقل، أم ستتلاشى؟

استكشف —

ما ستفعله: قِس القوة المؤثرة على موصل يمر به تيار كهربي باعتبارها سبب التغير في الوزن على ميزان، ولاحظ كيف تزداد هذه القوة بزيادة التيار.

الزمن: 15 دقيقة.

ستحتاج إلى:



الشكل 4-2-2 • قضيب موصل طوله L ويمر به تيار I، موضوع بين قطبي مغناطيس ومستقر على ميزان حساس؛ حيث يقيس الميزان القوة، ويُستخدم مقياس تيار (أميتر) ومصدر طاقة قابل للضبط لتحديد قيمة التيار I، بينما يُظهر المنظر العلوي القضيب وقد أُدير بزاوية θ بالنسبة للمجال H.

الخطوات:

١ ثبّت المغناطيس بحيث يواجه قطباه (الشمالي والجنوبي) بعضهما البعض عبر فجوة، وضع قضيبًا موصلًا مستقيمًا طوله (L) بحيث يمتد عبر الفجوة ويكون عموديًا على اتجاه المجال المغناطيسي.

٢ ضع المغناطيس على كفة ميزان حساس واضبط القراءة عند الصفر في غياب سريان التيار.

٣ أغلق الدائرة الموصلة بمصدر تيار مستمر وجهاز أميتر، واضبط شدة التيار عند القيمة (I)، ثم اقرأ قيمة القوة (F) من خلال التغير في قراءة الميزان، واحسب النسبة (F/I).

٤ زِد قيمة التيار (I) بمقدار خطوات متساوية وكرر العملية، مع الحرص على إبقاء القضيب في وضع عموديًا على اتجاه المجال المغناطيسي.

المحاولة	شدة التيار I (A)	القوة F (mN)	F / I (mN / A)
١			
٢			
٣			

حلّل ما جمعته:

(أ) من العمود المخصص للنسبة F/I: كيف تتغير قيمتها مع تغير التيار (I)؟ وما الذي تدل عليه ثبات قيمة F/I عن طبيعة اعتماد القوة (F) على التيار (I)؟

(ب) بالنسبة لهذه الفجوة، تساوي القيمة الثابتة F/I مع المقدار BL. بالاستعانة بطول الموصل L الذي حددته، توقّع مقدار القوة عند قيمة معينة للتيار لم تقم باختبارها، وبيّن كيف سيؤثر استخدام مغناطيس أقوى على هذه القيمة.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة عملية

يجب ضبط الميزان عند الصفر أثناء إيقاف التيار، بحيث تمثل كل قراءة التغير الناشئ عن التيار وحده؛ إذ يعني التغير في الكتلة (Δm) وجود قوة مقدارها $F = \Delta m \times g$

من الملاحظة إلى النموذج

المجال المغناطيسي يؤثر بقوة دفع على التيار

تُحدد مرحلة الاستكشاف طبيعة العلاقة؛ فقد ازدادت قوة الدفع تدريجيًّا مع زيادة التيار، وظلت النسبة التي سجلتها في الجدول ثابتة رغم تغير قيمة التيار الكهربي، مما يعني أن القوة تتناسب طرديًا مع شدة التيار (I). وللسبب ذاته، يجب أن يدخل عاملان آخران في معادلة الضرب هذه: فالجزء الأطول من السلك الموجود داخل الفجوة يحتوي -بشكل متناسب- على كمية أكبر من الشحنات المتحركة التي تتعرض للدفع، كما أن المجال الأقوى يدفع كل حامل شحنة بقوة أكبر تتناسب مع شدة المجال. وهذا يحدد القوة باعتبارها حاصل ضرب كل من التيار وشدة المجال وطول السلك المغمور، مع بقاء ثابت واحد يعبر عن تأثير المادة التي تملأ الفجوة، وهو «النفاذية المغناطيسية» (μ)؛ ولهذا السبب تولد الفجوة المملوءة بالحديد قوة دفع أكبر بكثير مقارنة بالفجوة الهوائية عند نفس شدة المجال (H). وعند إزاحة السلك عن الوضع العمودي، لا يطرأ أي تغيير على خصائص المجال، بل يتغير فقط التوزيع الهندسي: أي ذلك الجزء من التيار الذي يسري بمحاذاة خطوط المجال. لا يتعرض لأي دفع على الإطلاق، ولذا فإن المركبة الموازية للمجال (أو الممتدة عبره) هي وحدها التي تبقى، وتتناقص قيمتها وفقًا لدالة الجيب ($\sin\theta$) إلى أن يصبح السلك الممدود بموازاة المجال غير خاضع لأي دفعٍ مهما.

كثافة الفيض المغناطيسي ووحدة التسلا

يُعد التعامل مع الرمزين μ و H بشكل منفصل أمرًا مزعجًا؛ إذ أن التيار نفسه المار في الفجوة ذاتها يولد قوة دفع مختلفة اعتمادًا على المادة الموجودة داخل تلك الفجوة. ولما كان هذان الرمزان يظهران دائمًا معًا كحاصل ضرب، فمن الأجدى دمجهما في كمية واحدة؛ وهذه الكمية المدمجة هي التي تحظى باسم ووحدة قياس خاصين بها. ويؤدي هذا الاستبدال إلى اختصار معادلات القوة لتصبح في صيغة تخلو تمامًا من الرمز μ، مما يحقق فائدة عملية كبيرة: فالكمية المدمجة الناتجة تطابق تمامًا القيمة التي نحصل عليها عند قياس القوة؛ إذ يكفي قياس قوة الدفع المؤثرة على تيار معلوم يمر عبر طول معلوم، ثم إجراء عملية القسمة، لتكشف الفجوة عن قيمتها الخاصة — في حين لا يمكن استنتاج قيمة H إلا بعد معرفة نوع المادة الموجودة في ذلك الحيز. وتُعرَّف وحدة «التسلا» بناءً على عملية القياس هذه تحديدًا، حيث تساوي نيوتنًا واحدًا لكل أمبير-متر.

اتجاه القوة

لا يشير مقدار القوة إلى الاتجاه الذي سيتحرك فيه السلك، بل يجب تحديد ذلك بشكل منفصل. وما تؤكده الهندسة الفعلية للوضع هو أن الاتجاهات الثلاثة — التيار والمجال وقوة الدفع — متعامدة فيما بينها؛ ولذا فإن قوة الدفع تتجه دائمًا خارجةً من المستوى الذي يحدده الاتجاهان الآخران. وتُعد قاعدة «فليمنغ» ببساطة وسيلةً لتجسيد هذه الحقيقة باستخدام اليد؛ إذ يمثل بسط ثلاثة أصابع من اليد اليسرى بزوايا قائمة هذا الترتيب، وتتيح قراءة وضعية الأصابع الإجابة عن السؤال دون الحاجة إلى إعادة الرسم. وينتج عن ذلك أمران مباشران: إذا عكستَ اتجاه التيار أو بدّلتَ القطبين، ينعكس اتجاه قوة الدفع، أما إذا عكستَ كليهما معًا، فلا يتغير اتجاهها. ونظرًا لأن قوة الدفع غالبًا ما تتجه عموديًا نحو الخارج من الصفحة أو نحو الداخل فيها، فإن هذا الدرس يعتمد على رمزي العمق (النقطة) أكثر بكثير من اعتماده على أي سهم.

حقيقة أساسية

القياس:

تيارٌ شدته أمبير واحد يسري في سلك طوله متر واحد موضوعٍ داخل مجال مغناطيسي شدته تسلا واحدة، يتعرض لقوة دفع مقدارها نيوتن واحد — أي ما يعادل تقريبًا وزن تفاحة صغيرة. أما مغناطيسات المختبر فلا تولّد سوى بضعة أجزاء من المئة من التسلا، ولهذا السبب فإن قوى الدفع التي تقيسها في المختبر تكون بمقياس الميلي نيوتن.

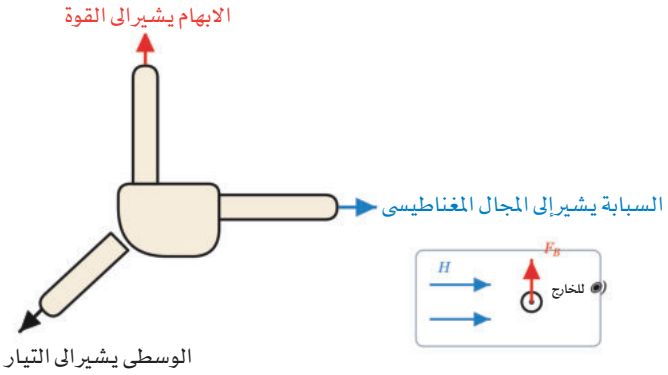
مصطلح

النفاذية المغناطيسية:

إن التعامل مع μ بوصفها قيمة ثابتة واحدة هو ما يحافظ على بساطة النموذج، وهو افتراض آمن عند التعامل مع الهواء أو الأوساط العادية غير المغناطيسية. غير أن الحديد والمواد المغناطيسية الحديدية الأخرى تخالف هذه القاعدة؛ إذ تعتمد نفاذيتها ذاتها على المجال المغناطيسي المُطبَّق عليها، وتنهار هذه النفاذية بمجرد وصول المادة إلى حالة التشبع، مما يؤدي إلى زوال العلاقة الخطية المباشرة بين H وB.

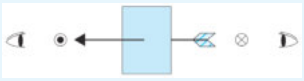
ملحوظة

نستخدم هنا قاعدة اليد اليسرى. توجد نسخة أخرى خاصة باليد اليمنى، لكنها تجيب عن سؤال مختلف - يتعلق باتجاه التيار المستحث، وهو موضوع سنتناوله بعد درسين - واستخدام اليد الخطأ يؤدي إلى عكس الإجابة تمامًا. لاحظ أيضًا أن هذه القاعدة تحدد الاتجاه فقط؛ إذ يجب أخذ عامل ($\sin\theta$) في الاعتبار عند حساب المقدار.

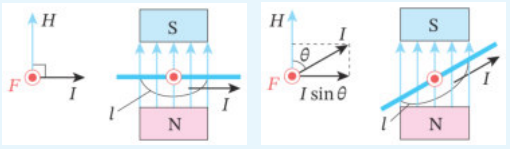


الشكل 4-2-3 • قاعدة اليد اليسرى لفليمنغ: عند وضع الإبهام والسبابة والإصبع الوسطى بحيث تشكل زوايا قائمة فيما بينها، تشير الإصبع الوسطى إلى اتجاه التيار (I)، وتشير السبابة إلى اتجاه المجال المغناطيسي (H)، بينما يحدد الإبهام اتجاه القوة (F)؛ كما هو موضح في الشكل الفرعي الذي يظهر قضيبًا يمر فيه تيار خارجًا من مستوى الصفحة عبر مجال مغناطيسي يتجه نحو اليمين.

نقطة



- الرموز التي تمثل الاتجاه العمودي على الصفحة
يُرمز للاتجاه الخارج من الصفحة بـ (◉)،
ويُرمز للاتجاه الداخل إلى الصفحة بـ (⊗).



- لنفترض أن مقدار القوة المؤثرة على التيار بواسطة المجال المغناطيسي هو F [نيوتن]، والتيار هو I [أمبير]، وشدة المجال المغناطيسي هي H [أمبير/متر]، وطول السلك الموصل في المجال المغناطيسي هو l [متر]،
- عندما يتقاطع التيار والمجال المغناطيسي عموديًّا $F = \mu IHl$ يُسمى μ النفاذية المغناطيسية [نيوتن/أمبير^2]، ويتم تحديده بواسطة نوع المادة المحيطة.
- عندما لا يكون التيار والمجال المغناطيسي متعامدين:
تُستخدم المركبة العمودية على المجال المغناطيسي من قيمة التيار، وهي ($I \sin \theta$).

- تُسمى الكمية التي تعبر عن حالة المجال المغناطيسي – بما في ذلك تأثير المواد المحيطة – «كثافة الفيض المغناطيسي»، وتُعرف بالمعادلة: $B = \mu H$.

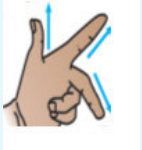
وحدة قياس كثافة الفيض المغناطيسي المستخدمة هي «التسلا» (ورمزها T).

- للتعبير عن مقدار القوة F [نيوتن] التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على التيار باستخدام كثافة الفيض المغناطيسي B [تسلا]:

عندما يتقاطع التيار والمجال المغناطيسي بشكل متعامد:

$F = IBl$

عندما يتقاطع التيار والمجال المغناطيسي بشكل مائل: $F = IBl \sin \theta$



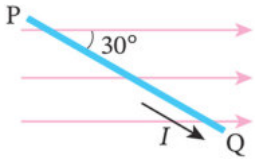
- قاعدة اليد اليسرى لفليمنج
اتجاه الإصبع الأوسط ← اتجاه التيار
اتجاه إصبع السبابة ← اتجاه المجال المغناطيسي
اتجاه الإبهام ← اتجاه القوة

صندوق المعادلات:

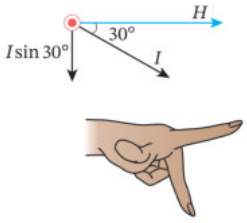
القوة (شدة المجال **H**)	$F = \mu IHl$ عندما يكون التيار عموديًا على المجال.
كثافة الفيض المغناطيسي	$B = \mu H$، ووحدة B هي التسلا T.
قوة (كثافة الفيض **B**)	$F = IBl$ عندما يكون التيار عموديًا على المجال. $F = IBl\sin\theta$ عندما يصنع التيار زاوية θ مع المجال

مثال محلول:

الموقف:	وُضع قضيب موصل PQ طوله 0.10 متر في مجال مغناطيسي منتظم شدته 50 أمبير/متر (A/m) ومُتجه نحو اليمين، بحيث يميل بزاوية قدرها 30 درجة بالنسبة للمجال المغناطيسي، وسرى فيه تيار كهربائي شدته 1.2 أمبير في الاتجاه من P إلى Q. حدد اتجاه ومقدار القوة F (بوحدة نيوتن) التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على القضيب الموصل PQ، مقربًا النتيجة إلى رقمين عشريين. افترض أن النفاذية المغناطيسية تساوي 1.26×10^{-6} نيوتن/أمبير^2 (N/A^2).
المعطيات والمطلوب:	$I = 1.2\ A\ ,\ H = 50\ A/m\ ,\ l = 0.10\ m\ ,\ \theta = 30°, \mu = 1.26\times10^{-6}\ N/A^2$ أوجد اتجاه القوة F ومقدارها مقربًا النتيجة إلى رقمين عشريين.
التمثيل:	انظر الشكل 4-2-5: يحمل القضيب PQ تيارًا مقداره I يميل بزاوية 30 درجة على مجال أفقي H؛ وتكون مركبة التيار المارّة عبر المجال هي $I\sin 30°$.
الاستراتيجية:	حدد اتجاه القوة باستخدام قاعدة اليد اليسرى لفليمنغ (الإصبع الأوسط ← التيار، السبابة ← المجال، الإبهام ← القوة). ثم أوجد المقدار: حيث يتقاطع التيار مع المجال بزاوية، لذا استخدم المركبة العمودية $I\sin\theta$ في المعادلة $F = \mu IHl\sin\theta$.
الحل الموضح:	**الاتجاه:** وفقًا لقاعدة اليد اليسرى لفليمنغ، تكون القوة عمودية على الصفحة ومتجهةً إلى الخارج منها (◉). **المقدار:** يصنع التيار زاوية قدرها 30 درجة مع المجال، لذا نستخدم العلاقة: $F = \mu IHl\sin\theta$ $F = (1.26\times10^{-6})\times1.2\times\sin 30°\times50\times0.10$ $= (1.26\times10^{-6})\times1.2\times0.50\times50\times0.10 = 3.78\times10^{-6} \approx 3.8\times10^{-6}\ N$
منطقية الحل:	تجعل النفاذية المغناطيسية التي تبلغ حوالي 10^{-6} القوةَ صغيرةً جدًا، كما أن العوامل ذات الرتبة 1 (للتيار) و0.1 (للطول) تُبقي قيمتها في حدود بضعة أضعاف 10^{-6} نيوتن؛ وهو مقدار مناسب لسلك تجارب موضوع في مجال مغناطيسي ضعيف. ونظرًا لأن الزاوية تبلغ 30 درجة فقط، فإن المعامل ($\sin\theta = 0.50$) يؤدي إلى خفض القوة إلى النصف مقارنةً بما سيختبره تيار متعامد مع المجال.
فسِّرها بنفسك:	اذكر في جملة واحدة سبب كون القوة هي الأكبر إذا أُدير القضيب ليصبح عموديًا على المجال بدلًا من وضعه بزاوية 30 درجة.



الشكل 4-2-4
مثال محلول: يقع القضيب PQ بزاوية 30 درجة بالنسبة لمجال مغناطيسي يتجه نحو اليمين، ويمر فيه تيار I من النقطة P إلى النقطة Q.



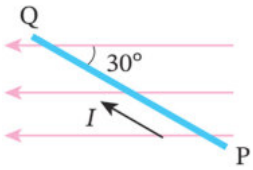
الشكل 4-2-5
مثال محلول: يقطع التيار I المجال H بزاوية 30 درجة، ولذا فإن المركبة العمودية I sin 30° هي فقط التي تولّد القوة؛ وتُظهر اليدُ قاعدة اليد اليسرى لفليمنج.

حان دورك الآن: وُضع قضيب موصل طوله 0.10 متر في مجال مغناطيسي منتظم شدته 40 أمبير/متر بحيث يميل بزاوية 30 درجة على اتجاه المجال، وسرى فيه تيار كهربائي شدته 2.0 أمبير. احسب مقدار القوة مقربًا النتيجة إلى رقمين معنويين (علمًا بأن $\mu = 1.26 \times 10^{-6}$ نيوتن/أمبير^2).

حاول:

١. حدد القيم التالية مقربةً إلى رقمين معنويين: سلك موصل ممدود بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم شدته 20 A/m، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره 4.0 A. احسب مقدار القوة (بوحدة نيوتن) المؤثرة على جزء من السلك الموصل طوله 0.10 m. افترض أن النفاذية المغناطيسية تساوي $1.26 \times 10^{-6}\ N/A^2$.

٢. كما هو موضح في الشكل، وُضع قضيب موصل PQ طوله 0.10 m في مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه المغناطيسي 2.0×10^{-6} T ومتجه نحو اليسار، بحيث يميل بزاوية 30° على اتجاه المجال المغناطيسي، ويمر فيه تيار مقداره 1.2 A في الاتجاه من P إلى Q. حدد اتجاه ومقدار القوة F (بوحدة نيوتن) التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على القضيب الموصل PQ.



الشكل 4-2-6
تجربة: يمر تيار I في الموصل المستقيم PQ عبر مجال منتظم تتجه خطوطه نحو اليسار، بحيث يقطعها بزاوية 30°

في سياق جديد

تدور المحركات الموجودة في المراوح الكهربائية والمركبات الكهربائية والعديد من الآلات الأخرى مستخدمةً هذه القوة تحديدًا؛ إذ يمر تيار كهربائي عبر ملف موضوع بين قطبي مغناطيس، فيؤثر المجال المغناطيسي بقوة دفع على جانبي الملف في اتجاهين متعاكسين، مما يؤدي إلى دوران الملف بفعل هاتين القوتين. وعندما يتجاوز الملف الوضع الرأسي أثناء دورانه، ينعكس اتجاه التيار المار فيه، بحيث تعمل قوة الدفع دائمًا على استمرار دورانه في الاتجاه نفسه. إن الدوران المنتظم الناتج عن المجال المغناطيسي ما هو إلا تطبيق متكرر للقوة ($F = IBl$) على حلقة الملف.

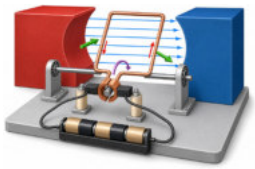
دورك الآن: يقع أحد جانبي ملف محرك بطول 0.050 متر بشكل عمودي على مجال مغناطيسي كثافة فيضه 0.20 تسلا (T)، ويمر به تيار شدته 3.0 أمبير (A). احسب مقدار القوة المؤثرة على هذا الجانب من الملف بوحدة النيوتن (N).

طبيعة العلم:

من المصدر الأصلي — تعريف الكمية الفيزيائية من خلال القوة التي تولدها. لا تُقرأ قيمة كثافة الفيض المغناطيسي (B) مباشرةً من جهاز قياس، بل تُعرَّف من خلال العلاقة $F = IBl$. إذ يقوم الفيزيائيون بتمرير تيار معلوم الشدة (I) في سلك ذي طول معلوم (l) موضوع بشكل عمودي على المجال، ثم يقيسون القوة (F) ويحسبون قيمة B باستخدام المعادلة $B = F/(Il)$. وبناءً على ذلك، يُعرَّف «التسلا» بأنه شدة المجال الذي يولد قوة مقدارها نيوتن واحد (1 N) على سلك طوله متر واحد (1 m) يمر فيه تيار شدته أمبير واحد (1 A). يُعد هذا تعريفًا إجرائيًا؛ حيث تتحدد الكمية الفيزيائية بناءً على عملية القياس التي تنتجها، وليس بناءً على تصور لماهية المجال نفسه. فبينما تُبرز الصيغة $B = \mu H$ العلاقة مع المادة المحيطة، تربط الصيغة $F = IBl$ قيمة B بشيء ملموس يمكن قياس وزنه باستخدام الميزان.

لقد أجرى أمبير قياسًا لهذه القوة في غضون أسابيع قليلة من سماعه عن تجربة أورستد والبوصلة عام ١٨٢٠. أما قاعدة فلمنج فقد ظهرت لاحقًا بكثير، وهي مجرد وسيلة مساعدة للتذكر — أي طريقة لاستحضار الترتيب الهندسي في الذهن وليست قانونًا طبيعيًا؛ فالأساس الفيزيائي يكمن في العلاقة المتجهية التي تعبر عنها هذه القاعدة.

دورك الآن: اقترح قياسًا واحدًا يمكنك إجراؤه على سلك يمر به تيار وموضوع بين قطبي مغناطيس، وذلك لتحديد كثافة الفيض المغناطيسي (B) في تلك الفجوة.



الشكل 4-2-7
محرك تيار مستمر بسيط: (ينسق امام طبيعة العلم) يتعرض التيار (I) المار في ملف يقع بين القطبين الشمالي (N) والجنوبي (S) لقوى متعاكسة ($F = IBl$) عند جانبيه، مما يؤدي إلى دوران الملف؛ ويعمل مبدّل التيار على عكس اتجاه التيار عند كل نصف دورة، لضمان استمرار الدوران في الاتجاه نفسه.

سؤال الدرس، وإجابته:

يتعرض التيار المار في مجال مغناطيسي لقوة؛ إذ يؤثر المجال بقوة دفع على الشحنة المتحركة، مما يؤدي إلى تحرك السلك.

عندما يكون اتجاه التيار عموديًا على اتجاه المجال، تُحسب القوة بالعلاقة $F = \mu IHl = IBl$، حيث تمثل $B = \mu H$ كثافة الفيض المغناطيسي بوحدة التسلا؛ أما إذا التقيا بزاوية θ، فإن المركبة المؤثرة هي $I \sin \theta$ فقط، وتصبح المعادلة: $F = IBl \sin \theta$. ويُحدد اتجاه هذه القوة باستخدام قاعدة اليد اليسرى لفليمنج. وتزداد القوة بزيادة شدة التيار، أو قوة المجال المغناطيسي، أو طول السلك.

المشهد البداية

تمرين:

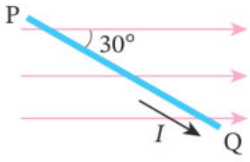
١. حدد القيم التالية بدقة رقمين معنويين. سلك موصل ممدود بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم شدته $20\ A/m$، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره $1.0\ A$. حدد مقدار القوة المؤثرة على جزء من السلك الموصل طوله $0.20\ m$ بوحدة النيوتن (N). افترض أن النفاذية المغناطيسية تساوي $1.26 \times 10^{-6}\ N/A^2$.

٢. سلك موصل ممدود بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم شدته $25\ A/m$، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره $2.0\ A$. حدد مقدار القوة المؤثرة على جزء من السلك الموصل طوله $0.10\ m$ بوحدة النيوتن (N). افترض أن النفاذية المغناطيسية تساوي $1.26 \times 10^{-6}\ N/A^2$.

٣. سلك موصل ممدود بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه المغناطيسي $0.50\ T$، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره $4.0\ A$. حدد مقدار القوة المؤثرة على جزء من السلك الموصل طوله $0.20\ m$ بوحدة النيوتن (N).

٤. سلك موصل ممدود بشكل عمودي على مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه المغناطيسي $2.0 \times 10^{-3}\ T$، ويمر فيه تيار كهربائي مقداره $5.0\ A$. حدد مقدار القوة المؤثرة على جزء من السلك الموصل طوله $2.0\ m$ بوحدة النيوتن (N).

٥. كما هو موضح في الشكل، وُضع قضيب موصل PQ طوله $0.20\ m$ في مجال مغناطيسي منتظم شدته (A/m) وموجه نحو اليمين، بحيث يميل بزاوية قدرها 30 درجة بالنسبة للمجال المغناطيسي، ويمر فيه تيار كهربائي شدته $1.0\ A$ في الاتجاه من P إلى Q. حدد اتجاه ومقدار القوة F (بالنيوتن) التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على القضيب الموصل PQ، وافترض أن النفاذية المغناطيسية تساوي $1.26 \times 10^{-6}\ (N/A^2)$.



شكل 8-2-4
التمرين 5: يقع القضيب الموصل PQ بزاوية 30 درجة بالنسبة لمجال مغناطيسي منتظم موجه نحو اليمين، حيث يسري التيار I من P إلى Q.

الدرس ٤-٣ — حركة الجسيمات المشحونة في مجال مغناطيسي

؟ سؤال الدرس:
ما القوة التي يؤثر بها مجال مغناطيسي على شحنة متحركة، وما المسار الذي تسلكه تلك الشحنة عندئذ؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** مقدار قوة لورنتز المؤثرة على شحنة تتحرك عموديًا على مجال مغناطيسي باستخدام $F = qvB$.

٢. **تستخدم** قاعدة فلمنج لليد اليسرى لتحديد اتجاه قوة لورنتز، باعتبار التيار المكافئ في اتجاه حركة الشحنة الموجبة وعكس حركة الشحنة السالبة.

٣. **تساوي** قوة لورنتز بالقوة الجاذبة المركزية $qvB = mv^2/r$، لتجد نصف قطر المسار $r = mv/(qB)$ والزمن الدوري $T = 2\pi m/(qB)$. في المسار الدائري.

فكرة أساسية:
قوة لورنتس f [N] — ما يفعله مجال B بشحنة واحدة q تتحرك بسرعة v. ما مقدارها، وفي أي اتجاه، وأي مسار تفرضه؟

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

أرسل حزمة إلكترونية رفيعة عبر الفجوة بين قطبَي مغناطيس. ومع إبعاد المغناطيسين، تندفع الحزمة مستقيمة إلى بقعة متوهجة على الشاشة البعيدة. أدِر المجال فتنزاح البقعة جانبًا؛ ومع زيادة المجال تنحني الحزمة إلى قوس أضيق، حتى تلتفّ في دائرة كاملة تعود على نفسها. والإلكترونات الأسرع ترسم دوائر أوسع، والأبطأ أضيق — ومع ذلك لا يلمس الحزمةَ شيءٌ سوى المجال.

شكل (1.3.4)

عند تلاشي المجال تسري الحزمة الإلكترونية مستقيمة إلى الشاشة؛ وبتشغيل مجال متجه إلى داخل الصفحة تلتفّ إلى مسار دائري.

تنبأ

(أ) إذا تم زيادة المجال المغناطيسي، هل يزداد نصف قطر المسار الدائري للإلكترون أم ينقص أم يبقى كما هو؟

(ب) إذا زادت سرعة الإلكترونات، هل يزداد زمن إتمام دورة كاملة (الزمن الدوري) أم ينقص أم يبقى كما هو؟

استكشف — انحناء حزمة إلكترونية في مسار دائري

ما ستفعله: قم بتوجّيه حزمة إلكترونية دقيقة باستخدام مجال مغناطيسي وقس كيف يعتمد نصف قطر مسارها الدائري على سرعة الحزمة وعلى شدة المجال.

الزمن: 20 دقيقة

ما تحتاجه:

- أنبوبة حزمة دقيقة (e/m)
- ملفّا هلمهولتز
- مصدر تيار مستمر
- مسطرة
- فولتميتر لفرق جهد التعجيل وأميتر لتيار الملف

مسطرة

مصدر تيار مستمر

ملفات هلمهولتز

أنبوبة أشعة رقيقة

شكل (2.3.4)

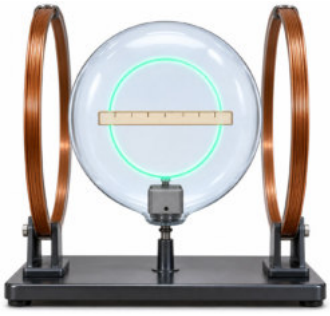
الخطوات:

١ اضبط فرق جهد التعجيل بحيث تغادر الإلكترونات المدفع بسرعة معلومة V، وأدِر ملفَّي هلمهولتز لملء الأنبوب بمجال منتظم B عمودي على الحزمة.

٢ اضبط تيار الملف حتى تنغلق الحزمة المتوهجة في دائرة كاملة؛ اقرأ قطرها 2r على المسطرة واقسمه على اثنين للحصول على نصف القطر r.

٣ ثبّت V وارفع B، معيدًا قراءة r؛ ثم ثبّت B وارفع V، معيدًا قراءة r. وسجّل لكل محاولة V وB وr، واحسب r·B/V.

٤ أخيرًا، قارن النسبة r/V بين تشغيلاتك ذات B الثابتة: إن لم تتغيّر، فزمن الدورة الواحدة، 2πr/V، لا يعتمد على السرعة أيضًا.



شكل (3.3.4)

أنبوبة حزمة دقيقة (e/m): مدفع إلكتروني يطلق حزمة يثنيها مجال ملف إلى دائرة متوهجة، يُقرأ قطرها 2r على مسطرة عبر الأنبوبة.

المحاولة	السرعة V (m/s)	المجال B (T)	نصف القطر r (m)	r·B/V
1				
2				
3				

حلّل ما جمعته:

(أ) مع تغيير السرعة V والمجال B من محاولة إلى أخرى، ماذا يحدث لقيمة r·B/V في العمود الأخير؟

(ب) تلتفّ الحزمة إلى دائرة مغلقة ومع ذلك لا تتسارع أبدًا — ماذا يقول ذلك عن اتجاه قوة المجال، وكيف يشير ثبات r·B/V إلى العلاقة r = mv/(qB)؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة عملية:

احصل على السرعة من فرق جهد التعجيل Va باستخدام eVa = ½ mv²، وعلى المجال من تيار الملف باستخدام ثابت B لكل أمبير المطبوع على زوج هلمهولتز. واقرأ قطر الحزمة 2r مباشرة عبر الأنبوبة مقابل المسطرة واقسمه على اثنين؛ وسدِّد نظرك إلى الحافة البعيدة للحلقة المتوهجة عموديًا لتجنّب خطأ الاختلاف المنظوري.

من الملاحظة إلى النموذج:

المجال المغناطيسي يدفع الشحنة المتحركة جانبًا لا يلزم افتراض شيء جديد هنا: فالتيار ليس إلا شحنة في عبور، ومن ثمّ فالقوة التي قاسها الدرس السابق على سلك كامل لا بد أن تكون مجموع القوي المؤثرة على حاملات الشحنة المفردة داخله. اقسم قوة السلك تلك على عدد الحاملات التي يحتويها الطول المغمور، يتبقَّ نصيب جسيم واحد. ولا بد أن يزداد مع مقدار الشحنة التي يحملها الجسيم ومع سرعة قطع تلك الشحنة لخطوط المجال، وتثبّت نتيجةُ السلك ثابتَ التناسب بأنه كثافة الفيض نفسها — وهي قوة لورنتس، F = qvB، لجسيم يعبر المجال بزوايا قائمة (يتحرك عموديا بالنسبة للمجال). ولا يحتاج الاتجاه قاعدة جديدة كذلك: استبدل الجسيم مكان طولَ التيار القصير وستكون الاجابة نفسها الذي ينوب عنه تُجِب اليد اليسرى نفسها. ويجدر ذكر فخ واحد: التيار الاصطلاحي يمر باتجاه سير الشحنة الموجبة، فبالنسبة للإلكترون يشير التيار البديل إلى الخلف على طول الحركة، وتخرج القوة على الجانب المقابل لجسيم موجب يسلك المسار نفسه.

دفعة جانبية تحوّل الحركة إلى دائرة:

اسأل الآن: ماذا تستطيع أن تفعل قوة ثابتة المقدار، تبقى دائمًا جانبية بجسيم متحرك؟

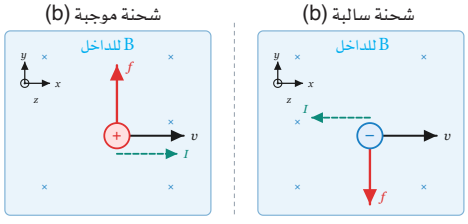
لا تستطيع أبدًا أن تزيد السرعة أو تنقصها، لأنها لا تملك قط مركّبة موازية للسرعة (القوة المتعامدة مع السرعة تغير اتجاه الحركة فقط ولا تغير مقدار السرعة) – فهي لا تبذل شغلًا، ولهذا لم يزداد تتوهّج الحزمة في الأنبوبة أثناء الانحراف . وكل ما تستطيعه هو التوجيه. وقوة ثابتة المقدار تظل تدور لتبقى عمودية على الحركة هي بالضبط شرط الدوران بمعدل ثابت، فينغلق المسار على نفسه. وبمساواة تلك القوة بمتطلَّب القوة المركزية،

$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

– يُختصَر عامل واحد من السرعة فورًا ويتبقّى

$$r = \frac{mv}{qB}$$

فالسرعة تقرر كم تتّسع الدائرة، لا ما إذا كانت هناك دائرة. واحمل نصف القطر ذاك إلى الزمن الدوري تُختصَر السرعة مرة ثانية، وهي المفاجأة التي أشارت إليها محاولة الاستكشاف – عند مضاعِف السرعة فإن الجسيم يكتفي بالجري في دائرة مضاعفة الحجم لا غير، ويعود في نفس الزمن بالضبط. لذا فإن الكتلة والشحنة والمجال وحدهم هم الذين يحددون الزمن الدوري.



شكل (3.3.4)

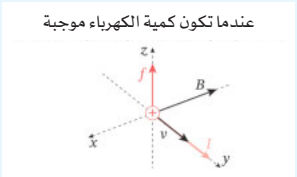
قوة لورنتس في مجال متجه إلى داخل الصفحة: للشحنة الموجبة يمر التيار المكافئ I مع V وتشير f إلى أعلى؛ وللشحنة السالبة يمر I عكس V وتشير f إلى أسفل.

نقطة

تُسمى القوة المؤثرة على جسيم مشحون يتحرك في مجال مغناطيسي قوة لورنتز.

لتكن قوة لورنتس F (N) عندما يتحرك جسيم مشحون بشحنة q [C] بسرعة v [m/s] في اتجاه عمودي على المجال المغناطيسي في مجال كثافة فيضه B [T]،

F = vq B



مصطلح:

قوة لورنتس — الصيغة f = qvB هي حالة التعامد ولا غير. فالجسيم المنساق بمحاذاة خطوط المجال لا يتأثر بأي قوة ، والداخل بزاوية مائلة لا تدفعه إلا مركّبة سرعته العابرة للمجال، فيحتفظ بانسياقه بمحاذاة المجال ويلتفّ إلى الأمام على حلزون بدل أن يغلق دائرة.

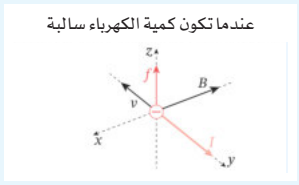
حقيقة أساسية:

مقياس الأمر: إلكترون مُعجَّل خلال 1000 V يسير بنحو 1.9×10^{7} m/s، ومجال مقداره 1.0×10^{-3} T فقط يثنيه على دائرة نصف قطرها نحو 0.11m – حلقة تراها من عبر المنضدة. أما بروتون بالسرعة نفسها، وهو أثقل 1800 مرة، فيحتاج 1800 ضعف المجال ليلتفّ بالإحكام نفسه.

! لتحديد اتجاه قوة لورنتز، افترض تيارًا مقابلًا I واستخدم قاعدة اليد اليسرى لفليمنج. وعند استخدام قاعدة اليد اليسرى، انتبه لإشارة الشحنة واتجاه التيار.

! عندما يدخل جسيم مشحون مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا عموديًا، تؤثر قوة لورنتس دائمًا في اتجاه عمودي على اتجاه حركة الجسيم المشحون

⇒ يقوم الجسيم المشحون بحركة دائرية منتظمة في مستوى عمودي على المجال المغناطيسي.

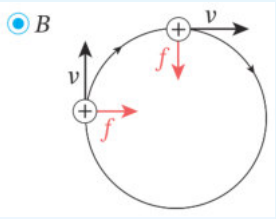


! معادلات الحركة الدائرية المنتظمة

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

الزمن الدوري T

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$



صندوق المعادلات:

قوة لورنتس: $F = qvB$ (الوحدة: N؛ v عمودية على B)

الاتجاه: قاعدة اليد اليسرى لفليمنج، التيار I مع v (شحنة موجبة) أو عكس v (شحنة سالبة)

الحركة الدائرية:

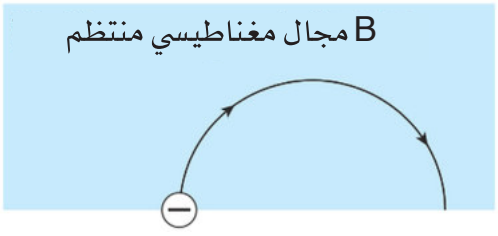
$$\frac{mv^2}{r} = qvB$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

الزمن الدوري T

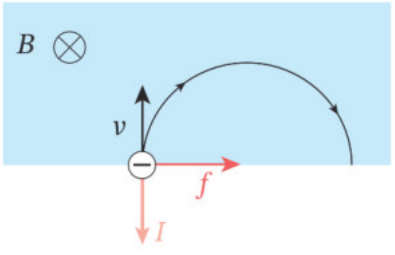
$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

مثال محلول:



شكل (4.3.4)

المثال المحلول: إلكترون يدخل مجالًا منتظمًا B عموديًا على الصفحة ويرسم نصف دائرة داخله.



شكل (5.3.4)

الموقف:	يدخل إلكترون كتلته m وشحنته $-e$ مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا كثافة فيضه B وعموديًا على الصفحة. يدخل عموديًا بسرعة v ويصف نصف دائرة (أ) أوجد اتجاه المجال المغناطيسي. (ب) أوجد مقدار القوة بالنيوتن التي يتعرض لها الإلكترون من المجال المغناطيسي. (ج) أوجد نصف قطر نصف الدائرة التي يرسمها الإلكترون بالمتر. (د) أوجد الزمن بالثانية الذي يستغرقه الإلكترون لقطع نصف الدائرة.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** الكتلة m ، والشحنة $-e$ ، والمجال B عمودي على الصفحة، وسرعة الدخول v عمودية على B. **المطلوب:** (أ) اتجاه المجال، (ب) مقدار القوة f، (ج) نصف القطر r، (د) زمن نصف الدائرة t.
التمثيل:	انظر الشكل 5-3-4: يدخل الإلكترون المجال وينحني على نصف دائرة؛ وتشير قوة لورنتز f إلى مركز تلك الدائرة في كل لحظة.
الاستراتيجية:	اتبع الخطوات المعتادة لجسيم مشحون في مجال مغناطيسي: أوجد قوة لورنتس $F = qvB$ على الجسيم، وساوِها بالقوة المركزية في معادلة الحركة $mv^2/r = qvB$ ، ومن ذلك حُلّ لإيجاد نصف قطر المدار r والزمن الدوري T. وثبّت اتجاه المجال بقاعدة اليد اليسرى لفليمنج، مع تذكّر أن شحنة الإلكترون سالبة فيمر تياره المكافئ عكس v.
الحل الموضح:	(أ) بقاعدة اليد اليسرى لفليمنج، تشير قوة لورنت على الإلكترون إلى مركز مساره الدائري. وشحنة الإلكترون سالبة، فيمر التيار المكافئ I عكس v. وبتطبيق القاعدة بذلك التيار يكون المجال عموديًا على الصفحة، متجهًا إلى داخل الصفحة. (ب) بأخذ مقدار الشحنة e (وإهمال الإشارة) $f = evB$ بوحدة N . (ج) قوة لورنتز هي القوة الجاذبة المركزية : $mv^2/r = evB$؛ ومنه $r = mv^2/(evB) = mv/(eB)$ بوحدة m. (د) يستغرق نصف الدائرة نصف الزمن الدوري: $t = T/2 = \pi r/v$. وبالتعويض عن r: $t = \pi \cdot [mv/(eB)]/v = \pi m/(eB)$ بوحدة s.
منطقية الحل:	(ب) تزداد القوة مع الشحنة والسرعة والمجال، كما ينبغي لـ $f = evB$. (ج) المجال الأقوى B يعطي نصف قطر أصغر، والإلكترون الأسرع يعطي أكبر، بما يطابق ملاحظة الحزمة المنحنية. (د) زمن نصف الدائرة $\pi m/(eB)$ لا يحوي v، فالإلكترونات الأسرع والأبطأ تستغرق الزمن نفسه لإتمام الحلقة — وهو بالضبط ما تعنيه ثباتية r/v في الاستكشاف.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، فسِّر لماذا تغيّر قوة لورنتز اتجاه سرعة الإلكترون دون أن تغيّر مقدارها أبدًا.

جرِّب بنفسك: جسيم مشحون شحنته q وكتلته m يدخل مجالًا منتظمًا كثافة فيضه B بسرعة v، عموديًا على المجال. أوجد (i) مقدار قوة لورنتز التي تؤثر عليه و(ii) الزمن الدوري لحركته الدائرية.

حاول:

1. كما في الشكل 6-3-4، عندما يدخل جسيم موجب الشحنة كتلته m [kg] وشحنته q [C] مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا عموديًا على الصفحة كثافة فيضه B [T] دخولًا عموديًا بسرعة v [m/s]، يرسم نصف دائرة. أوجد اتجاه المجال المغناطيسي.
2. أوجد الزمن بالثانية الذي يستغرقه الجسيم المشحون لقطع نصف الدائرة.
3. لكي لا يعبر الجسيم المشحون الجزء (طوله l) في الشكل ويذهب إلى الجانب الأيمن، أوجد القيمة العظمى لسرعة السقوط v بـ m/s.

في سياق

لأن نصف القطر r = mv/(qB) يعتمد على كتلة الجسيم وشحنته، يعمل المجال المغناطيسي فارزًا للجسيمات المشحونة. أرسل أيونات لها نفس الشحنة والسرعة داخل مجال مغناطيسي منتظم فتنحرف كل كتلة على نصف قطرها الخاص — تنحرف الأيونات الأثقل في أقواس أوسع والأخف في أقواس أضيق — فيكشف موضع سقوط كل حزمة عن كتلتها. وهذا هو مبدأ عمل مطياف الكتلة، والفيزياء نفسها توجّه حزم الجسيمات حول حلقة مسرِّع دائري.

دورك الآن: أيونان يحملان الشحنة q نفسها ويدخلان المجال B نفسه بالسرعة v نفسها، لكن كتلة أحدهما ضعف الآخر. أوجد النسبة بين نصفَي قطر دائرتيهما.

طبيعة العلم:

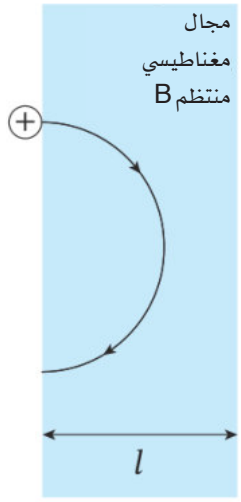
من الأصل — الشفق القطبي وقوة لورنتس. يرتبط «الشفق القطبي» الجميل المرئي في المناطق القطبية بقوة لورنتس. فالجسيمات المشحونة عالية الطاقة المتدفقة من الشمس (الرياح الشمسية) يأسرها مجال الأرض المغناطيسي ويوجّهها نحو القطبين الشمالي والجنوبي، منثنيةً في مسارات حلزونية بفعل قوة لورنتس. وحيث تصطدم بذرات الأكسجين والنيتروجين في الغلاف الجوي، تبعث الذرات ضوءًا، ويشكّل ذلك التوهّج الشفق.

وهذا يُظهر قانونًا اختُبر على حزمة فوق منضدة وهو يفسّر عرضًا بسعة السماء: فالـ F= qvB نفسها التي تلوي إلكترونًا في أنبوب تحني أيضًا جسيمات الرياح الشمسية على خطوط مجال الكوكب. ويثق الفيزيائيون بذلك المدّ لأن الشفق يظهر تمامًا حيث يتنبأ النموذج — فوق القطبين المغناطيسيين، حيث يوجّه المجال الجسيمات المشحونة نزولًا إلى الهواء.

دورك الآن: اقترح ملاحظة واحدة عن أين أو متى يظهر الشفق يمكن لعالِم أن يستخدمها لاختبار فكرة أن قوة لورنتس توجّه جسيمات الرياح الشمسية نحو القطبين.

سؤال الدرس، وإجابته:

يؤثر المجال المغناطيسي بقوة لورنتز f = qvB على شحنة تتحرك عبره، ويحدد اتجاهها قاعدةُ اليد اليسرى لفليمنج (التيار مع v للشحنة الموجبة، وعكسها للشحنة السالبة). ولأن تلك القوة تبقى عمودية على السرعة، فإنها تدير الشحنة دون تغيير مقدار سرعتها، فيتحرك جسيم يدخل مجالًا منتظمًا عموديًا في دائرة نصف قطرها r = mv/qB وزمنها الدوري $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$.

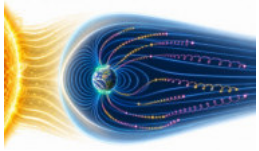


شكل (6.3.4)

جرِّب: شحنة موجبة تدخل مجالًا منتظمًا B يملأ شريطًا عرضه l وتدور عبر نصف دائرة داخله.

شكل (7.3.4)

مطياف كتلة: أيونات لها الشحنة نفسها وكتل مختلفة تسلك أقواسًا دائرية بأنصاف أقطار مختلفة، وأثقلها أقلّها انحناءً.



شكل (8.3.4)

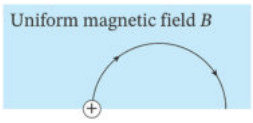
جسيمات الرياح الشمسية يأسرها مجال الأرض المغناطيسي فتلتفّ حلزونيًا على خطوط المجال نحو القطبين، حيث تُضيء الغلاف الجوي شفقًا.

تمرين:

1. عندما يدخل جسيم موجب الشحنة كتلته m [kg] وشحنته q [C] مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا عموديًا على الصفحة كثافة فيضه B [T] دخولًا عموديًا بسرعة v [m/s]، يرسم نصف دائرة. (i) أوجد اتجاه المجال المغناطيسي. (ii) أوجد الزمن بالثانية الذي يستغرقه الجسيم لقطع نصف الدائرة.

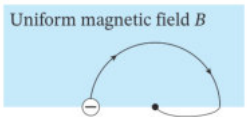
2. عندما يدخل إلكترون كتلته m [kg] وشحنته e [C]– مجالًا مغناطيسيًا منتظمًا عموديًا على الصفحة كثافة فيضه B [T] دخولًا عموديًا، يرسم نصف دائرة نصف قطرها a [m]. (i) أوجد اتجاه المجال المغناطيسي. (ii) أوجد سرعة سقوط الإلكترون بـ m/s.

3. كما في الشكل 11-3-4، عندما يدخل جسيم موجب الشحنة كتلته m [kg] وشحنته q [C] المجالَ المغناطيسي من موضع يبعد r [m] عن A بسرعة v [m/s] عموديًا على AB وعموديًا على المجال المغناطيسي، يطير الجسيم المشحون خارج المجال عموديًا على AD من بين A و D، على بُعد r [m] من A. (i) أوجد اتجاه المجال المغناطيسي. (ii) أوجد مقدار كثافة الفيض المغناطيسي بالتسلا. (iii) أوجد الزمن بالثانية الذي يستغرقه من دخول الجسيم المشحون المجالَ المغناطيسي حتى طيرانه خارجه.



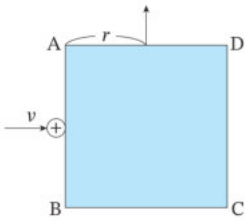
شكل (9.3.4)

تمرين 1: شحنة موجبة تدخل المجال المنتظم B من أسفل وترسم نصف دائرة داخله.



شكل (10.3.4)

تمرين 2: الإلكترون يدخل المجال المنتظم B ويدور عبر نصف دائرة نصف قطرها a.



شكل (11.3.4)

تمرين 3: الجسيم يعبر AB على بُعد r من A، متحركًا عموديًا على AB، ويغادر عبر AD على المسافة r نفسها من A.

الدرس ٤-٤ — الحث الكهرومغناطيسي

؟ سؤال الدرس:

لماذا يمر تيار في ملف عند تقريب أو ابعاد مغناطيس منه ، دون توصيل أي بطارية؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تعرّف** الفيض المغناطيسي بالعلاقة $\Phi_B = BA$ ، أي حاصل ضرب كثافة الفيض B في مساحة A عمودية على المجال، وتقاس بوحدة الوبر Wb.

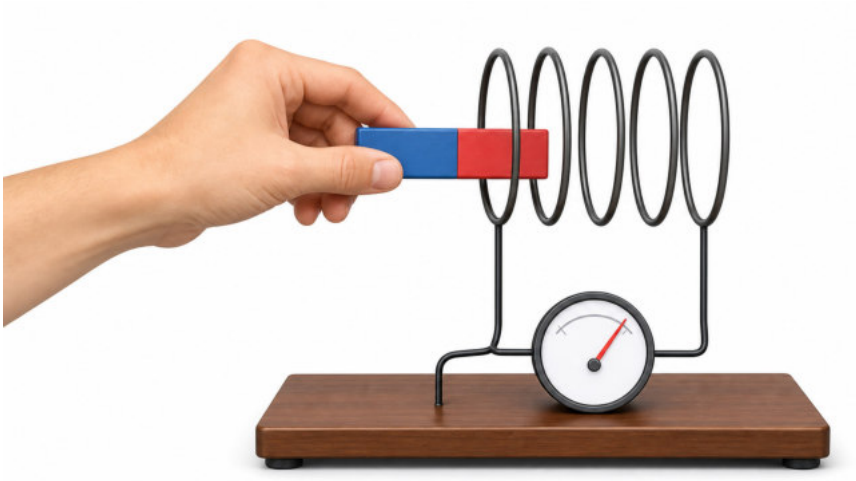
٢. **تطبق** قانون فاراداي للحث $\varepsilon = -N\Delta\Phi_B/\Delta t$ لحساب مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة في ملف عدد لفاته N.

٣. **تستخدم** قاعدة لنز لتحديد اتجاه التيار المستحث فى ملف، بحيث يعاكس الفيضُ المغناطيسي الناشئ عنه التغيّرَ في الفيض المغناطيسى الخارجي.

فكرة أساسية:

الفيض المغناطيسي Φ_B (Wb) — كثافة الفيض B مضروبة في المساحة A التي يخترقها. فما الذي يجب أن يفعله Φ_B قبل أن تُظهر دائرة قوة دافعة كهربية ، وما الذي يحدد مقدارها؟

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر



شكل (1.4.4)

ملف موصول بجلفانومتر وحده، بلا بطارية؛ وتحريك المغناطيس القضيبي على محور الملف يحرّك الإبرة بينما يتغيّر المجال خلال الملف.

توقَّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) هل ينتج التيار لأن المغناطيس قريب من الملف، أم لأن المجال المغناطيسي خلال الملف يتغيّر؟

(ب) إذا زادت سرعة المغناطيس إلى الضعف، ماذا يحدث لزاوية الانحراف، ولماذا؟

استكشف — دراسة أثر المسافة على الاتزان

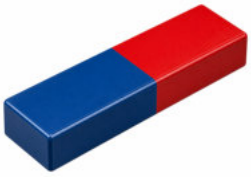
ما ستفعله: حرّك المغناطيس خلال ملف بسرعات مختلفة ووضح كيف يتحكّم معدّل تغيّر الفيض المغناطيسي في مقدار القوة الدافعة المستحثة واتجاهها.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه:

- ملف عدد لفاته كثيرة.
- قلم رصاص ليكون نقطة ارتكاز أسفل منتصف المسطرة.
- جلفانومتر صفر التدريج في المنتصف.
- مغناطيس.
- مسطرة وساعة إيقاف وأسلاك توصيل.

مسطرة


مغناطيس

جلفانومتر

ملف

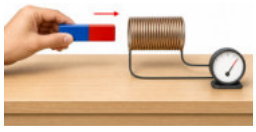
الخطوات:

١ صِل الملف بالجلفانومتر، دون بطارية، واضبط المؤشر على الصفر في المنتصف.

٢ حدد مسافة انتقال ثابتة على المنضدة بالمسطرة؛ ومع إبقاء المغناطيس ساكنًا في الخارج، تأكّد أن المؤشر يقرأ صفرًا.

٣ حرك المغناطيس عبر تلك المسافة نفسها داخل الملف — مرة ببطء ومرة بسرعة — مسجّلًا الزمن Δt وأقصى زاوية انحراف (المقدار والجهة)؛ ثم أمسكه ساكنًا في الداخل وراقب القراءة تعود إلى الصفر.

٤ اسحب المغناطيس خارجًا عبر نفس المسافة، ولاحظ أن الانحراف صار في الاتجاه المعاكس، واحسب $1/\Delta t$ لكل محاولة.



شكل (2.4.4)
إعداد المنضدة: ملف من لفات كثيرة متصل بجلفانومتر صفر التدريج في المنتصف؛ ويُدخَل المغناطيس في الملف ويُسحَب منه على محوره.

المحاولة	الفعل: إدخال أو تثبيت أو إخراج	زمن الحركة Δt بالثانية.	أقصى انحراف وتقسيماته وجهته يسارًا أو يمينًا	المعدل $1/\Delta t$ بوحدة s^{-1}
1				
2				
3				

ملاحظة عملية:
اقرأ ذروة الانحراف في اللحظة التي يكون فيها المغناطيس أسرع ما يكون، وحرّك المغناطيس عبر المسافة المعلَّمة نفسها في كل محاولة حتى لا يتغيّر إلا الزمن Δt — فيبقى تغيّر الفيض $\Delta\Phi_B$ كما هو.

حلّل ما جمعته:

(أ) عندما يزداد المعدل $1/\Delta t$ بتحريك نفس المغناطيس أسرع خلال نفس المسافة، ماذا يحدث لأقصى انحراف؟ وكيف تقارن محاولة تثبيت المغناطيس؟

(ب) لأن المغناطيس نفسه خلال المسافة نفسها يعطي $\Delta\Phi$ نفسه، فماذا يكشف النمط عن $V = -N\,\Delta\Phi/\Delta t$؟ ولماذا يؤدي إدخال وإخراج المغناطيس إلى انحرافين متعاكسين؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

الفيض المغناطيسي يقيس المجال خلال مساحة

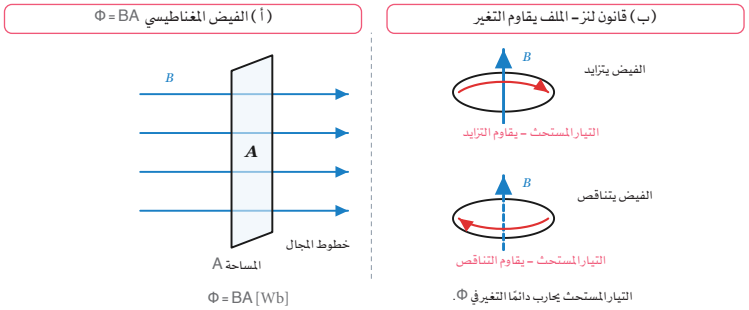
ارسم مجالًا يمثل مجموعة من الخطوط ودع ازدحامها يمثّل شدته ويصبح من السهل طرح سؤال ثانٍ وأكبر: أن مدى قوة المجال ليس عند نقطة معينة، بل ما تحيط بها من مساحة. هذا

المجموع هو ما يمثله الفيض المغناطيسي Φ_B — مدى كثافة خطوط المجال، مضروبةً في مقدار المساحة التي تمر من خلالها. يمكن لحلقتين موجودتين في نفس المجال أن تحيطا بمجاميع مختلفة تمامًا، ويمكن لحلقة واحدة أن تحيط بمجاميع مختلفة عند إمالتها، لأن الحلقة المائلة تعمل على تقليل الخطوط التي تمر خلالها. فقط الحلقة الموضوعة بشكل عمودي على المجال تقطع الخطوط كاملا B، وهذا هو الافتراض المطبق في كل مكان في هذا الدرس. ووحدته تتبع من حاصل الضرب (الناتج): تسلا . مترمربع (الوبر).

الفيض المتغيّر يولد قوة دافعة كهربية:

تجربتك تفصل بين الأمرين اللذين كان من الممكن أن يكونا ذوي أهمية. فعند إبقاء المغناطيس ثابتًا، سواء كان مضغوطًا على الملف أو بعيدًا عنه، لم ينتج عن ذلك أي شيء على الإطلاق — لذا فإن مقدار الفيض الذي يمر عبر الملف لا يمكن أن يكون هو ما يحرك الإبرة. أما تحريك نفس المغناطيس عبر نفس المسافة المحددة بسرعة مضاعفة، فقد أدى إلى التغير نفسه في نصف الوقت، وتضاعف الانحراف. ما يستجيب له الملف،

إذن، هو المعدل: فالقوة الدافعة الكهربية تتبع $\Delta\Phi_B/\Delta t$.. كل لفة هي حلقة أخرى تحيط بنفس التغير، لذا فإن N لفات تزيد النتيجة N مرات — وهذا هو السبب في أن الملف المختبري يُلف بمئات اللفات. عندما تكون الحلقة صلبة، يكون المجال وحده هو الذي يمكنه التغير، لذا فإن التغير في الفيض (التدفق) يُحسب من التغير في B وحده. وهذا يترك الإشارة، وهي ليست مجرد زخرفة. لنفترض أن التيار المستحث ساعد التغير بدل مقاومته لاستمر في الزيادة بلا طاقة مزودة لذا يجب عليه أن يقاوم التغير بدلاً من ذلك. وتمثل الإشارة السالبة في قانون فاراداي على قانون حفظ الطاقة، وهذا هو مغزى علامة السالب — التي تُعرف كقاعدة عملية، وهي قانون لنز. خذ المقدار عندما يكون مقدار القوة الدافعة الكهربية هو المطلوب فقط، وحدد الاتجاه بناءً على تلك القاعدة.

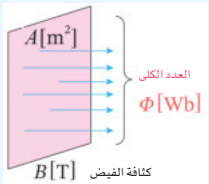


شكل (3-4-4) : يسارًا: خطوط مجال كثافتها B خلال مساحة A تعطي الفيض Φ = BA. يمينًا: بقانون لنز يدور التيار المستحث بحيث يعارض فيضُه التغيّرَ — مقاومًا الزيادة (أعلى) والنقصان (أسفل).

نقطة

تُسمى الخطوط الممثِّلة لحالة كثافة الفيض المغناطيسي خطوط المجال المغناطيسي. وفي مجال مغناطيسي منتظم كثافة فيضه B [T]، يمر B من خطوط المجال المغناطيسي خلال مساحة 1 m^2 عمودية على المجال.

ويُسمى العدد الكلي لخطوط المجال المغناطيسي المارّة خلال منطقة كثافة فيضها المغناطيسي B [T] ومساحتها A [m^2] الفيضَ المغناطيسي Φ_B. والوحدة المستخدَمة هي الوبر (رمزها Wb).



مصطلح:

الفيض المغناطيسي — إن التعبير عنه يفترض أمرين في آن واحد: أن يكون المجال متماثلاً في كل نقطة على امتداد الحلقة، وأن تكون الحلقة مواجهةً له بشكل عمودي. فإذا تم إمالة الحلقة، لا يُعتد إلا بمسقطها؛ وإذا تفاوتت شدة المجال من موضع لآخر، يجب استبدال حاصل الضرب بمجموع لقيم على مساحات صغيرة، لكل منها قيمة خاصة للمجال (B).

التيار الدوامي — تيار حثّي حلقي ينشأ داخل جسم موصل مصمت بفعل مجال مغناطيسي متغير، كما هو الحال في أجهزة التسخين بالحث المغناطيسي

حقيقة أساسية:

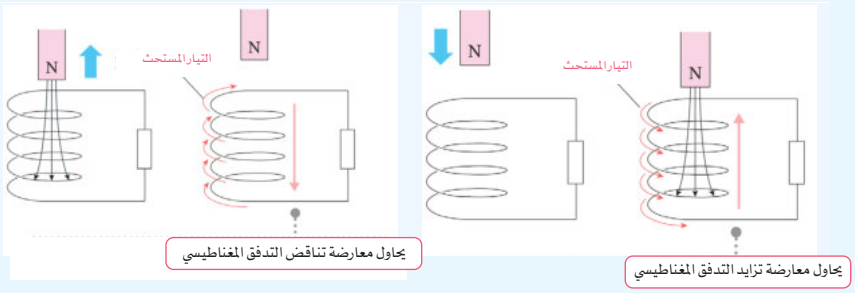
قبل لكل 500 لفة بمساحة مقطع عرضي تبلغ 2 سم^2، موضوعة في مجال مغناطيسي تتغير شدته بمقدار 1 تسلا خلال عُشر ثانية، تُنتج جهداً كهربائياً يبلغ حوالي 1 فولت. ولهذا السبب يُصنَّع المولد الكهربي من لفات عديدة تدور بسرعة بدلاً من الاعتماد على مغناطيس واحد ضخم؛ فتكلفة توفير معدل التغير هذا أقل بكثير من تكلفة توليد المجال المغناطيسي ذاته.

ملاحظة:

ثمة خطآن منفصلان يتعلقان بمفهوم "الدلتا" (التغير): يتمثل الخطأ الأول في استخدام قيمة نفس الفيض المغناطيسي بدلاً من قيمة *التغير*

تُسمى الظاهرة التي تتولّد فيها فرق جهد في ملف بسبب تغيّر في المجال المغناطيسي داخله الحثَّ الكهرومغناطيسي. وتُسمى فرق الجهد المتولّدة بالقوةَ الدافعة الكهربية المستحثة، ويُسمى التيار الذي يمر نتيجة لها التيارَ المستحث.

تتولّد القوة الدافعة الكهربية المستحثة في اتجاه يجعل الفيض المغناطيسي الذي ينتجه التيار المستحث معاكسًا للتغيّر في الفيض المغناطيسي المطبَّق خارجيًا.



تتعين قيمة القوة الدافعة الكهربية المسنحثة ε(V) عندما يتغير التدفق المغناطيسي داخل ملف ذي N لفة إلى [Wb] ΔΦ بعد Δt ثانية $\varepsilon = (-N\ \Delta\Phi)/\Delta t$

التغيّر في الفيض $\Delta\Phi_B$ يمكن أن يتعين من العلاقة: $\Delta\Phi_B = \Delta AB$ ومع ذلك، عند تحديد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة نستخدم ε

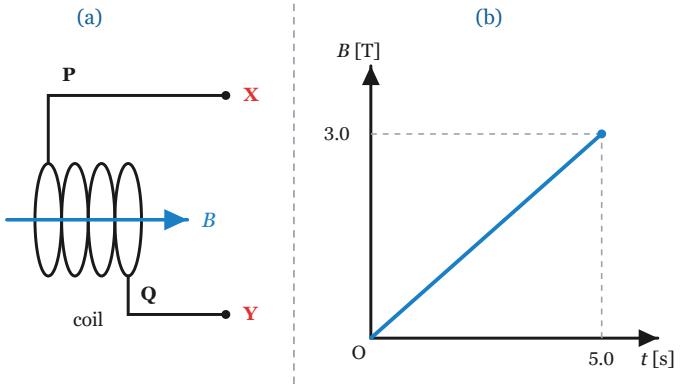
$$\varepsilon = \left| \frac{-N\,\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$$

في ذلك الفيض؛ فوضع ملفٍ ساكنٍ داخل أقوى مجال مغناطيسي ثابت في الغرفة لا يولد أي تيار أو جهد مستحث مطلقا. أما الخطأ الثاني فيكمن في استخدام الفترة الزمنية التي قضيتها في المراقبة بدلاً من استخدام الفترة الزمنية التي استغرقها التغير الفعلي؛ فالمغناطيس الذي يسقط عبر ملف خلال 0,05 ثانية ثم يظل ساكناً لمدة دقيقة يمثل حدثاً زمنياً مدته 0,05 ثانية فقط، وبالتالي فإن القسمة على 60 ثانية تؤدي إلى التقليل من قيمة القوة الدافعة الكهربائية (emf) بمقدار ألف ضعف.

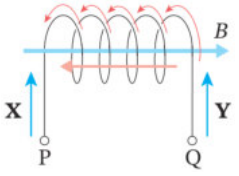
صندوق المعادلات:

الفيض المغناطيسي:	$\Phi_B = BA$ (الوحدة: وبر، Wb)
قانون فاراداي:	$\varepsilon = (-N\ \Delta\Phi)/\Delta t$
تغيّر الفيض	$\Delta\Phi_B = \Delta AB$: Φ_B مجال منتظم، مساحة ثابتة

مثال محلول:



شكل (4-4-1): (أ) الملف بطرفيه P وQ، والنقطتان الخارجيتان X وY، وسهم الإسناد B الذي يثبّت اتجاه المجال الموجب. (ب) كثافة الفيض B ترتفع بانتظام من O إلى 3.0 T عند t = 5.0 s.



شكل (5.4.4)

• المثال المحلول (b): التيار المستحث في الملف، مرسومًا بالأحمر، ينشئ مجالًا يعارض نمو B، فيمر التيار في الدائرة الخارجية نحو Y.

الموقف:	تتغير كثافة الفيض B داخل ملف عدد لفاته 500 ومساحة مقطعه $2.0 \times 10^{-4}\ m^2$، والمجال منتظم واتجاه السهم في الشكل موجب كما في الشكل 4-4-4b، للإعداد المبيّن في الشكل 4-4-4a. وكثافة الفيض المغناطيسي داخل الملف منتظمة، ويُؤخَذ اتجاه السهم في الشكل 4-4-4a موجبًا. (أ) أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة بين P وQ للملف بالفولت. (ب) عند توصيل مقاومة بين P وQ، حدِّد ما إذا كان التيار يمر نحو X أم نحو Y في الشكل 4-4-4a.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** • $N = 500$، و$S = 2.0 \times 10^{-4}\ m^2$. من الرسم تزداد كثافة الفيض بانتظام في الاتجاه الموجب بمقدار $\Delta B = 3.0\ T$ خلال $\Delta t = 5.0\ s$. **المطلوب:** (أ) مقدار القوة الدافعة ε [V] الظاهرة عبر P وQ. (ب) أي اتجاه يمر فيه تيارها حول الدائرة — نحو X أم نحو Y.
التمثيل:	انظر الشكل 4-4-4: اللوحة (أ) تُظهر الملف بطرفيه P وQ وسهم الإسناد B المشير بين X وY؛ واللوحة (ب) هي التمثيل البياني الخطي لـ B مقابل t مرتفعًا من O إلى 3.0 T عند 5.0 s. والشكل 4-4-5 يحمل إجابة (b): التيار المستحث مرسومًا على الملف نفسه.
الاستراتيجية:	اقرأ ΔB وΔt مباشرة من التمثيل البياني، وحوّلهما إلى تغيّر في الفيض بمساحة الملف نفسها، ومرّر ذلك المعدّل خلال قانون فاراداي لإيجاد المقدار. واحسم الاتجاه بسؤال منفصل: بأي اتجاه يجب أن يدور تيار ليعارض مجالُه الخاص النموَّ الذي يُظهره التمثيل البياني؟
الحل الموضح:	(أ) لتكن ε هي القيمة المطلوبة. $\Delta\Phi_B = \Delta B \cdot A = 3.0 \times (2.0 \times 10^{-4}) = 6.0 \times 10^{-4}$ Wb. ومنه $\varepsilon = |-500 \times (6.0 \times 10^{-4}) \div 5.0| = 6.0 \times 10^{-2}$ V.. (ب) التمثيل البياني يرتفع، إذن المجال في الاتجاه الموجب ينمو. فيردّ الملف بدوران يشير مجالُه الخاص في الاتجاه الآخر، إلى اليسار، وذلك الاتجاه هو Y.
منطقية الحل:	بإعادة الكتابة، $\varepsilon = N A \cdot (\Delta B/\Delta t) = 500 \times 2.0 \times 10^{-4} \times (3.0/5.0)$ $= 0.10 \times 0.60 = 0.060$ V، وهو يوافق 6.0×10^{-2} V. وY هو الاتجاه الذي يدفع مجالُه الخاص ضد النمو؛ أما الاتجاه الآخر فكان سيغذّيه، وكانت الطاقة ستظهر من العدم.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، قل لماذا تنعكس إجابة (ب) لو كان التمثيل البياني في الشكل 4-4-4b منحدرًا إلى أسفل بدل أن يرتفع.

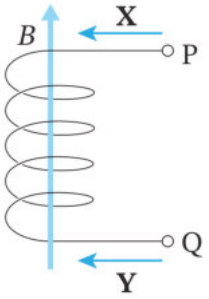
والآن حاول أنت: والآن حاول أنت: ملف من 200 لفة ومساحته $3.0 \times 10^{-4}\ m^2$ يقع في مجال منتظم ترتفع كثافته بانتظام بمقدار 2.0 T في 4.0 s. أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة.

حاول:

ترتفع كثافة الفيض المغناطيسي B [T] داخل ملف من 100 لفة ومساحة مقطعه 2.0×10^{-4} m² بانتظام بمقدار 8.0 T خلال 4.0 s، للإعداد المبيّن في الشكل 6-4-4. وكثافة الفيض داخل الملف منتظمة، ويُؤخَذ اتجاه السهم في الشكل 6-4-4 موجبًا.

(أ) أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة عبر الملف بالفولت.

(ب) عند توصيل مقاومة بين P وQ، حدِّد ما إذا كان التيار يمر في اتجاه X أم Y في الشكل 6-4-4.

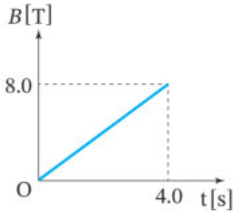


شكل (6.4.4) جرِّب: الملف بطرفيه P وQ، وسهم الإسناد B المثبَّت للاتجاه الموجب، والاتجاهان X وY في الدائرة الخارجية.

في سياق جديد

يمر هذا القانون نفسه في كل مولّد كهربي. ففي دينامو دراجة أو مولّد محطة قدرة، يُدار ملف في مجال مغناطيسي (أو يُدار مغناطيس أمام ملف ثابت)، فيرتفع الفيض خلال الملف ويهبط باستمرار. وبحسب $\mathcal{E} = -N\,\Delta\Phi B/\Delta t$، يعطي الدوران الأسرع أو زيادة اللفات قوةً دافعة كهربية أكبر — وهو بعينه سبب استخدام المولّدات ملفاتٍ كثيرة اللفات ودورانها السريع.

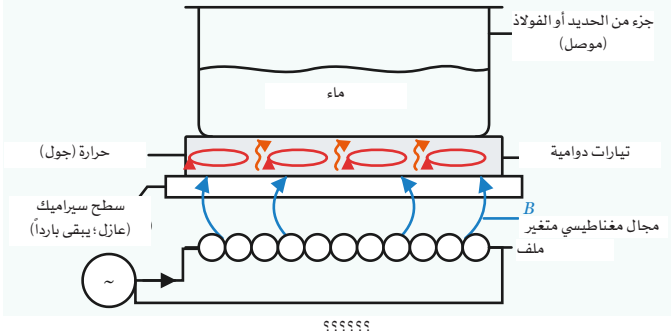
دورك الآن: ملف مولّد من 200 لفة ومساحته 5.0×10^{-4} m² يقع في مجال يتغيّر بانتظام من 0 إلى 0.40 T في 0.10 s. أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة.



شكل (7.4.4)
جرِّب: كثافة الفيض داخل الملف ترتفع بانتظام من O إلى 8.0 T عند t = 4.0 s.

طبيعة العلم:

من الأصل — سخّانات الطهي بالحث والتيارات الدوّامية. يستخدم «سخّان الطهي بالحث»، الذي يستطيع غلي الماء دون استعمال لهب، الحثَّ الكهرومغناطيسي. فعندما يُغيَّر التيار في الملف الداخلي تغييرًا سريعًا لتغيير المجال المغناطيسي، يُستحَثّ تيار دوّامي في قاع الإناء المعدني الموضوع فوقه. ويسخن الإناء بحرارة جول المتحرّرة بمرور هذا التيار خلال المقاومة الكهربية للإناء نفسه.



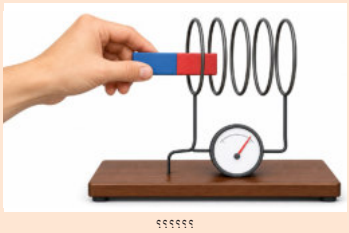
شكل (4-4-9): داخل سخّان طهي بالحث. تيار سريع التغيّر في الملف أسفل السطح الخزفي يرسل مجالًا مغناطيسيًا متغيّرًا صاعدًا خلاله إلى قاعدة الإناء. ولأن تلك القاعدة موصّلة، يقود الفيض المتغيّر تياراتٍ دوّامية داخل المعدن، وتسخينها الجولي يدفئ الإناء نفسه — ويظل السطح الخزفي باردًا.

والمبدأ نفسه الذي يُضيء جلفانومترًا يطهو الطعام أيضًا: فالفيض السريع التغيّر يقود تيارات حقيقية في الموصّلات المجاورة. ويتتبّع العلماء قانون فاراداي من عرض مخبري إلى جهاز منزلي يومي، وهكذا يكتسب نموذج فيزيائي الثقة بتفسيره مواقف منفصلة كثيرة دفعة واحدة.

دورك الآن: اقترح لماذا يعمل سخّان الحث مع إناء حديدي لا زجاجي.

شكل (8.4.4) دينامو دراجة: مغناطيس دوّار يغيّر الفيض خلال ملف، فيستحثّ قوة دافعة تُضيء المصباح.

سؤال الدرس، وإجابته:



يمر تيار لأن تحريك المغناطيس يغيّر الفيض المغناطيسي خلال الملف، والفيض المتغيّر يستحثّ قوة دافعة كهربية حتى مع عدم وجود بطارية. وبقانون فاراداي تكون القوة الدافعة الكهربية المستحثة $\varepsilon = -N\,\Delta\Phi_B/\Delta t$، فلا تظهر إلا بينما يتغيّر الفيض وتنمو مع معدّل التغيّر؛ وبقانون لنز يعارض اتجاهُها ذلك التغيّرَ دائمًا.

تمرين:

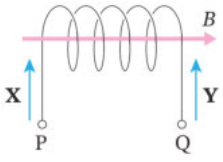
١. تغيّر الفيض المغناطيسي المارّ خلال ملف من 200 لفة بمقدار 2.5×10^{-4} Wb في 0.20 ثانية. أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة عبر الملف بالفولت.

٢. تغيّرت كثافة الفيض المغناطيسي داخل ملف من 100 لفة ومساحة مقطعه 4.0×10^{-4} m² بمقدار 0.60 T بمعدل ثابت في 4.0×10^{-2} ثانية. أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة عبر الملف بالفولت.

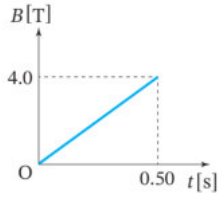
٣. ترتفع كثافة الفيض المغناطيسي B [T] داخل ملف من 200 لفة ومساحة مقطعه 1.2×10^{-3} m² بانتظام بمقدار 4.0 T خلال 0.50 s، للإعداد المبيّن في الشكل 10-4-4. وكثافة الفيض داخل الملف منتظمة، ويُؤخَذ اتجاه السهم في الشكل 10-4-4 موجبًا.

(i) أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة بين P وQ للملف بالفولت.

(ii) عند توصيل مقاومة بين P وQ، حدِّد ما إذا كان التيار يمر في اتجاه X أم Y في الشكل 10-4-4.



شكل (4-4-10) تمرين 3: الملف بطرفيه P وQ، وسهم الإسناد B، والاتجاهان X وY في الدائرة الخارجية.



شكل (4-4-11) تمرين 3: كثافة الفيض داخل الملف ترتفع بانتظام من O إلى 4.0 T عند t = 0.50 s.

الدرس ٤–٥ — الحث الذاتي

؟ سؤال الدرس:
لماذا لا يتوقف التيار المار في ملفٍ ما فوراً، حتى لو حاولت إيقافه فجأة؟

ستتعلم أن

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تشرح** سبب مقاومة الملف لأي محاولة لتغيير التيار المار فيه، وتحسب مقدار القوة الدافعة الكهربية العكسية (back emf) الناتجة عن معدل تغير معين.

٢. **حلل** مسألة تتضمن عملية تبديل (المفتاح) عند اللحظتين البسيطتين: لحظة تحريك المفتاح، واللحظة التي تلي ذلك بفترة طويلة، وتحدد قيمة كل من التيار والقوة الدافعة الكهربية العكسية في كلتا الحالتين.

٣. **تحسب** مقدار الطاقة التي يختزنها الملف الذي يمر به تيار، وتحدد ما التحول في هذه الطاقة عند قطع الدائرة الكهربية.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

عند إطفاء مروحة كهربية أو مثقاب كهربي من مفتاح الحائط، قد تلمح شرارة زرقاء صغيرة بين نقاط التلامس؛ فملفات المحرك كانت تسري فيها شدة تيار ثابتة، وفي اللحظة التي يقطع فيها المفتاح هذا التيار، تقاوم الملفات ذلك التغير المفاجئ، مما يولد جهداً كهربيا كبيرا يدفع التيار للاستمرار لفترة زمنية قصيرة، فيقفز عبر الفجوة المتسعة على هيئة شرارة. أما عند إعادة التشغيل، فلا يصل التيار إلى قيمته القصوى مرة واحدة، بل يتزايد تدريجياً؛ إذ تنشأ في الملف مقاومةً لأي تغير يطرأ على التيار المار فيه، سواء عند بدء سريانه أو عند توقفه.

فكرة أساسية:
الحث الذاتي — ظهور قوة دافعة كهربية مستحثة في ملف بسبب تغيّر تيار نفس الملف.

شكل (1.5.4) إطفاء دائرة تحمل ملفًا: مع قطع التيار، يستحثّ الملف فرق جهد كبيرة تُشرِر عبر التلامسات المنفتحة.

تنبأ:
(أ) عندما تغلق المفتاح، هل يبلغ التيار في الملف قيمته العظمى في لحظة الغلق، أم يتزايد تدريجيًا؟
(ب) في اللحظة التي يفتح فيها المفتاح، هل تكون القوة الدافعة الكهربية التي يستحثّها الملف صغيرة، أم كبيرة بما يكفي لإحداث شرارة؟

استكشف — ومضة قطع التيار

ما ستفعله: ما ستفعله: تقطع تيار ملف ثابتًا بسرعات مختلفة وتقرأ ومضة النيون التي يُطلقها، فيتكشّف أن القوة الدافعة المستحثة تنمو مع معدّل تغيّر التيار.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه:

- ملف من لفات كثيرة.
- بطارية القوة الدافعة الكهربية لها صغيرة.
- مفتاح.
- مصباح نيون (يضئ عند 90V).
- أميتر لقراءة التيار الثابت قبل فتح المفتاح.

مصباح نيون — مفتاح — بطارية — ملف

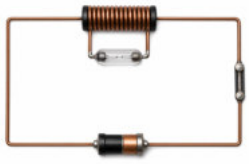
الخطوات:

١ صِل ملفًا من لفات كثيرة على التوالي مع بطارية القوة الدافعة الكهربية لها صغيرة ومفتاح، وصِل مصباح نيون عبر الملف؛ فالمصباح لا يضئ إلا فوق نحو تنسق 90V ويعمم، وهي أكثر بكثير مما تمدّه البطارية.

٢ أغلِق المفتاح، حتى تثبت شدة التيار، وتأكّد أن المصباح يظل غير مضئ.

٣ افتح المفتاح لقطع التيار؛ وعين زمن القطع Δt ولاحظ شدة سطوع مصباح النيون.

٤ كرِّر، فاتحًا المفتاح ببطء أكبر(Δt أكبر)؛ واحسب لكل محاولة معدّل الانخفاض (الانهيار) $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I}{\Delta t}$ وسجله في العمود الأخير.



شكل (2.5.4) مصباح نيون موصول عبر الملف؛ ومع تيار ثابت يبقى المصباح مظلمًا، لأن فرق جهد البطارية الصغيرة أدنى بكثير من فرق جهد المطلوب لإضاءته.

المحاولة	كيف فتحت المفتاح	سرعة القطع (بطيء/سريع)	سطوع الاضاءة (مظلم/خافت/ساطع)	المعدل النسبي للانخفاض (الانهيار) (صغير/كبير)
1	سريعا			
2	متوسط			
3	ببطء			

حلّل ما جمعته:

(أ) انظر إلى العمود الأخير: مع نمو معدّل الهبوط $\frac{L\Delta I}{\Delta t}$، ماذا يحدث لسطوع الومضة؟ وماذا يخبرك ذلك عن مقدار القوة الدافعة المستحثة؟

(ب) يحتاج النيون نحو 90 V ليضيء، ومع ذلك لا تعطي البطارية إلا فرق جهد صغير — توقَّع كم يجب أن تبلغ القوة الدافعة المستحثة لحظةَ إضاءة ساطعة، واربط جوابك بـ $\varepsilon = \left|\frac{-L\Delta I}{\Delta t}\right|$.

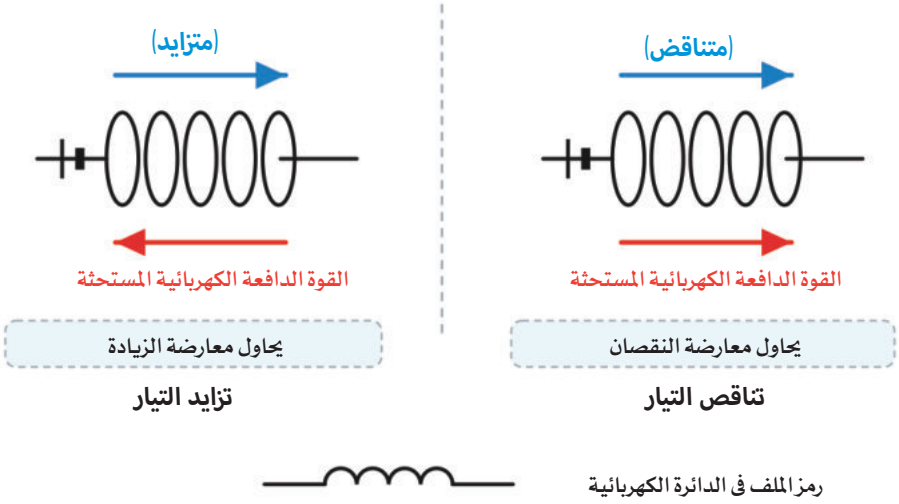
ملاحظة عملية:
الومضة قصيرة جدًا، فراقب المصباح في غرفة معتمة. وافتح المفتاح بقطعة نظيفة لقطع التيار سريعًا، وثِق بالاتجاه العام عبر التشغيلات أكثر من أي ومضة مفردة.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

من الملاحظة إلى النموذج:

الملف يقاوم أي تغيّر للتيار الماربه المصباح دلّك على موضع النظر. فالتيار الثابت تركه مظلمًا، مع أن ذلك التيار كان يمر طوال الوقت؛ ولم تُضئه إلا لحظة القطع، وكانت المحاولات التي زاد فيها عمودها الأخير — معدّل الهبوط — هي التي أومضت أسطع. إذن الملف لا يستجيب لتيار ربل لتيار متغيّر، ويستجيب بفرق جهد تفوق كثيرًا البطارية التي كانت تدفعه، إذ لا يضيء النيون دون نحو 90V. ولا شيء في ذلك يتجاوز الدرس السابق؛ فالحلقة أُغلِقت على نفسها فحسب. فالملف يطوّق المجال الذي يصنعه بعينه، فرفع التيار فيه يرفع الفيض المخترق له، وبقانون فاراداي يُنتج الفيض المرتفع فرق جهد — هذه المرة في اللفّة نفسها التي سبّبته. ثم تثبّت قاعدة لنز اتجاه تلك فرق الجهد: لا بد أن تقاوم ما يفعله التيار، فتكبحه وهو يزداد وتسنده وهو يقل. ومن هنا جاء اسم التأثير.

حقيقة أساسية:
اقطع 3A من ملف قيمته 0.10H في جزء من ألف من الثانية يظهر خلاله نحو 300 V — مئة ضعف الخلية التي كانت تدفعه، وكافية بسهولة لقفز الفجوة المتّسعة في مفتاح ينفتح. وأبطئ القطع نفسه إلى عُشر ثانية تهبط إلى 3 V، ولا تُرى شرارة.



شكل (3.5.4) عندما يرتفع التيار يستحثّ الملف قوة دافعة تعارض الزيادة؛ وعندما يهبط يستحثّ قوة دافعة تعارض النقصان. وإلى جانبهما رمز الملف في الدوائر.

ما مقدار القوة الدافعة المستحثة؟

لنتبع التسلسل التالي: يتناسب الفيض المغناطيسي الذي يولده الملف طردياً مع شدة التيار المار فيه، كما يتناسب الجهد الكهربي طردياً مع معدل تغير ذلك الفيض. وبما أن لدينا علاقتي تناسب متتاليتين، فيمكن وضعهما في علاقة واحدة؛ إذ يصبح بالإمكان تحديد الجهد بناءً على معدل تغير التيار وحده، مع وجود ثابت تناسب وحيد يربط بينهما. يجمع هذا الثابت كافة الخصائص الهندسية للملف — مثل عدد اللفات، ومدى إحكام اللف، وطبيعة القلب الذي يلتف حوله — في قيمة رقمية واحدة؛ ولهذا السبب تدرج ورقة البيانات هذه القيمة دون الحاجة لسؤالك عن تفاصيل عملية اللف. وتُعد وحدة القياس هذه كبيرة؛ فالملف الذي تبلغ معامل حثه "هنري" واحداً يولد جهداً قدره فولت واحد استجابةً لتغير في التيار بمعدل أمبير واحد في الثانية. أما الإشارة السالبة فهي مجرد اصطلاح رياضي يعبر عن الاتجاه الذي سبق توضيحه؛ لذا، اكتفِ بأخذ المقدار العددي (القيمة المطلقة) عندما يكون هو المطلوب.

الملف في دائرة تيار مستمر

يمكن تحديد حالتين زمنيتين دون الحاجة إلى إجراء حسابات معقدة للمتغيرات الزمنية. ففي الحالة الأولى —أي لحظة تحريك المفتاح— لا يمكن للملف أن يغير حالته الراهنة فوراً؛ إذ إن حدوث قفزة مفاجئة في التيار سيعني وجود معدل تغير لا نهائي وقوة دافعة كهربية عكسية لا نهائية، وهو أمر لا يمكن لأي دائرة كهربية توفيره. لذا، نعتمد القيمة السابقة للتيار وننقلها مباشرةً لتكون هي القيمة عند لحظة التبديل. أما في الحالة الثانية —أي بعد مرور فترة زمنية طويلة— فيتوقف

التيار عن التغير تماماً؛ حيث ينخفض معدل التغير إلى الصفر وتتلاشى معه القوة الدافعة الكهربية العكسية، ليصبح الملف مجرد سلك عادي كأي سلك آخر. وفي الفترة الفاصلة بين هاتين الحالتين، ينتقل التيار تدريجياً من قيمة إلى أخرى، وهذا الانتقال التدريجي هو ما يمثله المنحنى المرسوم بجوار النقطة المحددة.

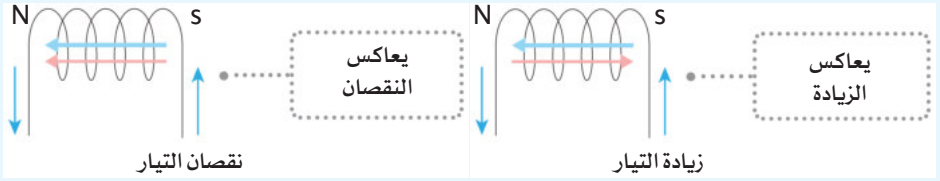
الطاقة المختزنة في الملف

لقد تطلب رفع شدة التيار إلى تلك القيمة بذل شغل في المقام الأول؛ إذ كان لا بد من دفع كل زيادة في التيار قسراً في مواجهة الجهد المعاكس الذي يولده الملف نفسه. وهذا الشغل لا يضيع على هيئة حرارة، بل يُحفظ في المجال المغناطيسي الذي أنشأه الملف، ويُسترد بمجرد تلاشي التيار؛ وهذا هو بالضبط مصدر الطاقة التي تظهر في ومضة الفصل (عند إيقاف التيار). لنحسب إجمالي الشغل المبذول أثناء تصاعد التيار من الصفر: عند لحظة معينة تكون فيها قيمة التيار i، يولد الملف جهداً معاكساً مقداره $\frac{L\Delta I}{\Delta t}$، وبالتالي فإن دفع الزيادة التالية Δi خلال ذلك الزمن يتطلب شغلاً مقداره LiΔi؛ وهي تكلفة غير ثابتة، بل تتزايد طردياً مع قيمة التيار القائم بالفعل. وإذا رسمنا بيانياً هذه المقاومة (الجهد المعاكس) مقابل التيار، نحصل على خط مستقيم ينطلق من نقطة الأصل ويصل إلى القيمة LI عند بلوغ التيار النهائي I؛ ويكون الشغل المبذول مساوياً للمساحة الواقعة تحت هذا الخط، وهي مساحة مثلث قاعدته I وارتفاعه LI. ومن ثم، فإن الطاقة المختزنة تساوي $\frac{1}{2}LI^2$. إن المعامل $\frac{1}{2}$ ليس مجرد رقم يُحفظ، بل هو يمثل متوسط قيمة الجهد المعاكس الذي بدأ من الصفر وانتهى عند القيمة LI.

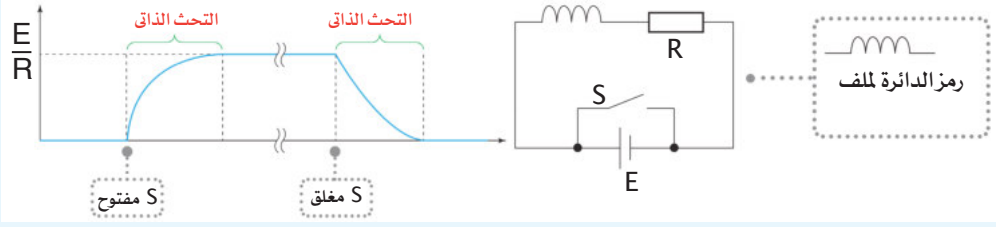
النقطة

تُسمى الظاهرة التي تتولّد فيها قوة دافعة كهربية مستحثة في ملف في اتجاه يعارض تغيّر التيار عندما يتغيّر التيار المار في الملف إلى ΔI بعد زمن قدره Δt ثانية بالحثّ الذاتي. ومقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة عندئذ (V) هو: $\varepsilon=\left|\frac{-L\Delta I}{\Delta t}\right|$

ويُسمى ثابت التناسب L هذا معامل الحثّ الذاتي، ووحدته الهنري (رمزها H).



مفهوم دوائر التيار المستمر المتضمّنة ملفات مباشرة بعد تشغيل المفتاح... يكون التيار المار هو نفسه قبل التشغيل. وبعد مرور زمن كافٍ على تشغيل المفتاح... يمكن اعتبار الملف سلكًا موصّلًا.



مثال: مباشرة بعد فتح المفتاح S : I = 0 (كما مباشرة قبل الفتح). وبعد مرور زمن كافٍ على فتح المفتاح S : I = ε/R (باعتبار الملف سلكًا موصّلًا). ومباشرة بعد إغلاق المفتاح S : I = ε/R (كما مباشرة قبل الإغلاق).

عندما يمر تيار I [A] في ملف حثه الذاتي L [H]، تكون الطاقة المختزنة في الملف U [J] $U=\frac{1}{2}LI^2$

مصطلح:

فيما يتعلق بالحث الذاتي، يتعامل النموذج مع المعامل L باعتباره خاصية ثابتة للملف، وهو افتراض دقيق بما يكفي للملفات ذات القلب الهوائي. أما الملف ذو القلب الحديدي فالأمر يختلف؛ إذ عند تجاوز قيمة معينة للتيار، يصل القلب إلى حالة التشبع، وتنخفض قيمة L، وتتوقف القوة الدافعة الكهربائية العكسية عن مواكبة معدل التغير وفق علاقة خطية؛ ومن ثم، تصبح القيمة المذكورة في ورقة البيانات صالحة فقط عند مستويات التيار التي تقل عن تلك القيمة الحدية.

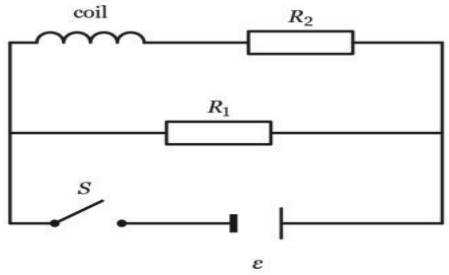
ملاحظة عملية:

يسري مبدأ الاستمرارية على الفرع الذي يحتوي على الملف، دون غيره؛ إذ قد يتغير تيار فرعٍ آخر (يحتوي على مقاومة) في اللحظة التي يتحرك فيها المفتاح. وتعني عبارة "مدة كافية" مدةً طويلةً مقارنةً بالزمن اللازم لاستقرار هذه الدائرة تحديداً؛ وهو زمنٌ قد يكون –في حالة الملف الكبير والمقاومة الصغيرة– أطول بكثير مما يوحي به النظر.

صندوق المعادلات:

القوة الدافعة المستحثة:	$\varepsilon = \left\|\frac{-L\,\Delta I}{\Delta t}\right\|$ (الوحدة: V؛ L بالهنري، $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ [H] معدّل تغيّر التيار)
الطاقة المختزَّنة:	$U=\frac{1}{2}LI^2$ (الوحدة: J)
قواعد الملف في التيار المستمر: مباشرة بعد التبديل: I دون تغيّر ← بعد زمن طويل: الملف = سلك موصّل ($\varepsilon_L = 0$)	

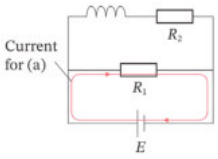
مثال محلول:



شكل (4.5.4)

بطارية قوتها الدافعة ε: المقاومة R_1 تجلس مباشرة عبر البطارية، بينما تكوّن المقاومة R_2 على التوالي مع الملف فرعًا ثانيًا؛ والمفتاح S في خط التغذية.

الموقف:	كما في الشكل، تُوصَل بطارية قوتها الدافعة الكهربية ε [V]، ومقاومتان قيمتاهما R_1 وR_2 [Ω]، وملف، ومفتاح. وللحالتين التاليتين، أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة ε_L [V] المتولّدة في الملف والتيار I [A] المار في المقاومة R_1. (أ) مباشرة بعد إغلاق المفتاح. (ب) بعد مرور زمن كافٍ على إغلاق المفتاح.
المعطيات والمطلوب:	**المعطيات:** الدائرة: R_1 موصولة مباشرة عبر البطارية ε؛ والملف وR_2 يكوّنان فرعًا ثانيًا عبر البطارية. **المطلوب:** في كل حالة: القوة الدافعة المستحثة ε_L عبر الملف والتيار I خلال R_1.
التمثيل:	انظر الشكل 4-5-4: البطارية ε، والمقاومة R_1 عبر البطارية، والمقاومة R_2 على التوالي مع الملف في الفرع الآخر، والمفتاح S. ويتتبّع الشكل 5-5-4 التيار الذي يجيب عن (a).
الاستراتيجية:	طبّق قاعدتَي الملف في التيار المستمر. فمباشرة بعد إغلاق المفتاح، يحتفظ الملف بالتيار الذي كان يحمله قبلُ (صفر)، فلا يمر تيار في فرع R_2– الملف وتظهر القوة الدافعة الكاملة للبطارية عبر الملف. وبعد زمن طويل، يكون التيار ثابتًا، فيسلك الملف سلوك سلك عادي وتكون قوته الدافعة المستحثة صفرًا. وفي الحالتين تجلس R_1 مباشرة عبر البطارية، فيكون التيار خلالها ε/R_1.



شكل (5.5.4)

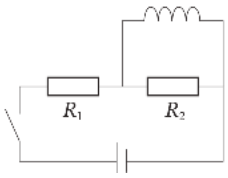
المثال المحلول (a): مباشرة بعد إغلاق المفتاح لا يحمل فرع الملف شيئًا، فيكون الدوران كله هو الحلقة المرسومة بالأحمر – البطارية وR_1 والعودة.

الحل الموضح:	(أ) مباشرة بعد الإغلاق. كان التيار في الملف صفرًا ولا يستطيع القفز، فلا يحمل فرع الملف تيارًا ولا يوجد هبوط عبر R_2؛ وتظهر القوة الدافعة الكاملة للبطارية عبر الملف: $\varepsilon_L = \varepsilon$ [V]. وبما أن R_1 مباشرة عبر البطارية، يكون التيار خلالها $I = \varepsilon/R_1$ [A]. (ب) بعد زمن طويل. التيار ثابت، إذن $\Delta I/\Delta t = 0$ والملف سلك عادي: $\varepsilon_L = 0$ V. وR_1 ما زالت مباشرة عبر البطارية، إذن $I = \varepsilon/R_1$ [A].
منطقية الحل:	كلا الحدّين معقول: ففي اللحظة الأولى يسدّ الملف فرعه ويسلك سلوك فجوة مفتوحة، فلا بد أن يحمل القوة الدافعة الكاملة؛ وبعدها بزمن طويل لا يقدّم أي معارضة ولا يُسقِط أي فرق جهد. والتيار في R_1 لا يعتمد أبدًا على فرع الملف لأن R_1 موصولة مباشرة عبر البطارية.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، فسِّر لماذا تكون القوة الدافعة المستحثة عبر الملف أكبر ما تكون في اللحظة الأولى بعد إغلاق المفتاح وتهبط إلى الصفر لاحقًا.

حاول بنفسك: يمر تيار مقداره 0.40 A في ملف حثه الذاتي 5.0 H. أوجد الطاقة المخزَّنة في الملف بالجول.

حاول:

١ كما في الشكل، تُوصَل بطارية قوتها الدافعة الكهربية ε [V]، ومقاومتان قيمتاهما R_1 وR_2 [Ω]، وملف، ومفتاح. وللحالتين التاليتين، أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة ε_L [V] المتولّدة في الملف والتيار I [A] المار في المقاومة R_1. (i) مباشرة بعد إغلاق المفتاح. (ii) بعد مرور زمن كافٍ على إغلاق المفتاح.



شكل (6.5.4)

جرِّب 1: البطارية ε، والمقاومتان R_1 وR_2، والملف، والمفتاح، موصولة كما وُصِف.

٢ ازداد التيار المار في ملف حثه الذاتي 10 H من 0.20 A إلى 0.30 A. بكم جول ازدادت الطاقة المخزَّنة في الملف؟

في سياق جديد

يستخدم محرك البنزين هذا الأثر عن قصد. فملف إشعاله يحمل تيارًا ثابتًا في ملفّ ابتدائي؛ وعندما يقطع تلامسٌ ذلك التيار فجأة، تصير $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ هائلة، فتقفز القوة الدافعة الذاتية الاستحثاث $\varepsilon_L = \left|\frac{L\,\Delta I}{\Delta t}\right|$ عبر تلك اللفّة إلى عدة مئات من الفولتات. والملف ملفوف محوّلًا، بلفات في ثانويّه أكثر بكثير من ابتدائيّه، فيستحثّ المجالُ المنهار هناك عشرات الآلاف من الفولتات — كافيةً لقفز شرارة عبر شمعة الإشعال وإشعال الوقود. فالأثر الذي يقطع شرارةً عبر مفتاح ينفتح يُسخِّر إذن، ثم يُرفَع، لتشغيل المحرك.

دورك الآن: في ملف حثه الذاتي 8.0 H، يُقطَع تيار مقداره 3.0 A إلى الصفر في 1.0×10^{-3} s. أوجد مقدار القوة الدافعة المستحثة بالفولت.

طبيعة العلم

من الأصل — طفرات الصواعق والحث الذاتي. أثناء ضربة صاعقة، يمكن أن يمر تيار كبير مفاجئ (طفرة صاعقة) في خطوط القدرة. فيحدث عندئذ حث ذاتي في الملفات داخل الأجهزة المنزلية ويمكن أن يولّد قوة دافعة عكسية هائلة تبلغ آلاف الفولتات. ولأن هذه الفرق جهد العالية قد تدمّر دوائر الأجهزة الإلكترونية كالحواسيب، يحترس المهندسون منها باستخدام مشترَكات كهربية مزوّدة بواقيات طفرات.

وهنا يفسّر القانون نفسه أثرًا مرغوبًا (شرارة إشعال) وخطرًا غير مرغوب (طفرة تُتلِف حاسوبًا). وإدراك أن علاقة واحدة، $\left|\varepsilon_L = \frac{L\,\Delta I}{\Delta t}\right|$، تحكم ملفًا مخبريًا ومحرك سيارة وطفرة صاعقة هو كيف يحوّل الفيزيائيون مبدأً واحدًا إلى جهاز ووقاية معًا.

وقد أبلغ جوزيف هنري عن هذا الأثر وفسّره تفسيرًا صحيحًا في يوليو 1832، عاملًا في أمريكا مستقلًا عن فاراداي في لندن، وتحمل وحدة الحث اسمه لأجله. فقد يبلغ شخصان النتيجة نفسها منفصلَين، وتُحسَم الأسبقية بالسجل لا بالسمعة.

دورك الآن: اقترح خاصية تصميمية واحدة في واقي الطفرات يمكن اختبارها للتحقق مما إذا كان يحدّ فعلًا من القوة الدافعة العكسية الواصلة إلى حاسوب موصول.

سؤال الدرس، وإجابته:

يقاوم الملف أي تغيّر في تياره الخاص: فعندما يحاول التيار أن يتغيّر، يستحثّ الملف قوة دافعة $\left|\varepsilon_L = \frac{L\,\Delta I}{\Delta t}\right|$ تعارض التغيّر. وقطع التيار سريعًا يجعل $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ هائلة، فتكون القوة الدافعة المستحثة كبيرة جدًا — كبيرة بما يكفي لإبقاء التيار ساريًا لحظةً ولإحداث شرارة عبر التلامسات المنفتحة. ولهذا لا يتوقف التيار في ملف فورًا.

تمرين:

١) ازداد التيار المار في ملف حثه الذاتي 10 H بمقدار 0.60 A بمعدل ثابت في 0.20 ثانية. أوجد مقدار القوة الدافعة الكهربية المستحثة المتولّدة في الملف بالفولت.

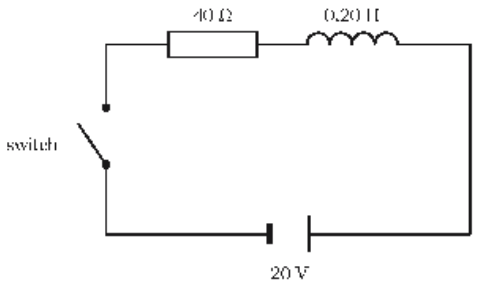
٢) عندما ازداد التيار المار في ملف بمعدل 2.0 A في الثانية، تولّدت في الملف قوة دافعة كهربية مستحثة مقدارها 5.0 V. أوجد الحث الذاتي للملف بالهنري.

٣) كما في الشكل، تُوصَل بطارية قوتها الدافعة الكهربية 20 V، ومقاومة قيمتها 40 Ω، وملف حثه الذاتي 0.20 H، ومفتاح.

(i) أوجد التيار المار في الدائرة مباشرة بعد إغلاق المفتاح بالأمبير.

(ii) بعد مرور زمن كافٍ على إغلاق المفتاح، أوجد التيار المار في الدائرة بالأمبير.

(iii) عند الحالة (ii)، أوجد الطاقة المخزَّنة في الملف بالجول.



شكل (9.5.4) تمرين 3: بطارية 20V ومقاومة 40 Ω وملف 0.20 H ومفتاح، موصولة في دائرة واحدة.

شكل (7.5.4)

ملف إشعال سيارة مقطوع، بلفات ابتدائية سميكة قليلة فوق لفات ثانوية دقيقة كثيرة على قلب حديدي، يرسل فرق جهد عالية عبر سلك معزول واحد إلى شمعة إشعال، حيث تقفز شرارة زرقاء بيضاء فجوة القطبين.

شكل (8.5.4) طفرة صاعقة تنتقل عبر خط القدرة إلى منزل؛ ويقف مشترَك بواقي طفرات بين المقبس والحاسوب، بينما يبني الملف داخل الجهاز قوة دافعة عكسية كبيرة.

الفصل الخامس

الطبيعة الكمية للضوء والمادة

5-1 الطبيعة الجسيمية للضوء

5-2 الأشعة السينية

5-3 موجات المادة

٥-١ — الطبيعة الجسيمية للضوء

؟ سؤال الدرس:
ما الظواهر التي يمكن تفسيرها إذا اعتبرنا أن الضوء مجموعةً من الجسيمات وليس موجةً؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تحسب** مقدار الطاقة التي تحملها حزمة ضوء واحدة، انطلاقًا من لون الضوء (تردد الضوء) أو من طوله الموجي.

٢. **تتنبأ** بما يحدث لمعدن معين تعند تسليط ضوء مصباح معين: هل تغادره شحنة (هل تنبعث منه شحنة نتيجة سقوط ضوء المصباح) أصلًا، وما هى السرعة القصوى للإلكترونات، وما الذي يتغيّر إذا جُعل المصباح أكثر سطوعًا (شدة ضوء المصباح وليس لونه) بدلًا من أن يُجعل أزرق (لون ضوء المصباح وليس شدته).

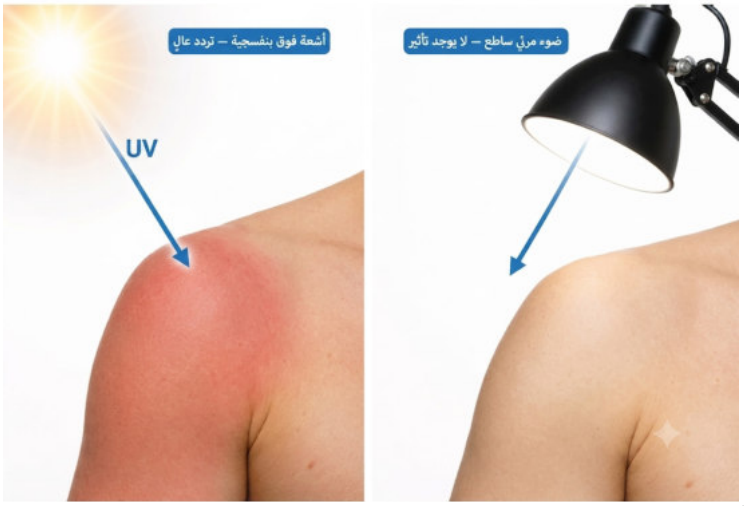
٣. **تقيس** ثابتين من خط تجريبي واحد — ثابتًا عام للضوء ويحدد من ميل الخط البيانى وآخر خاصًّا بالمعدن من موضع قطعه للمحورين.

فكرة أساسية

الفوتون:
حزمة منفردة غير قابلة للتجزئة التي يُنقل بها الضوء. ما الذي يحدد طاقته: لون الضوء أم سطوعه؟

الظاهرة — توقَّع قبل أن تستمر

قضاء ظهيرة كاملة تحت مصباح داخلي ساطع لا يحرق جلدك أبدًا، في حين أن فترة قصيرة في الشمس قد تحرقه — لأن ضوء الشمس يحمل أيضًا أشعة فوق بنفسجية. وزيادة سطوع المصباح أكثر لا تفعل شيئًا، بينما تؤذي الأشعة فوق البنفسجية عالية التردد الجلدَ حتى بكميات أصغر بكثير. فما يستطيع شعاع الضوء فعله يبدو متوقفًا على لونه (تردده) لا على شدة سطوعه — وهو الدليل الأول على أن الضوء ينقل طاقته في حزم ثابتة.



شكل 5-1-1: مصباح عادي ساطع يترك الجلد سليمًا، بينما تحرقه أشعة فوق بنفسجية أضعف بكثير — دليل على أن أثر الضوء يحدده تردده (لونه) لا سطوعه.

تنبأ:

(أ) إذا جعلت المصباح المرئي العادي أكثر سطوعًا، فهل يبدأ في إيذاء الجلد كما يفعل قليل من الأشعة فوق البنفسجية؟

(ب) إذا كان الأثر يحدده التردد لا السطوع، فهل يغيّر تقليل شدة مصدر الاشعة فوق البنفسجية (فوتونات أقل) الطاقةَ التي ينقلها كل فوتون مفرد؟

استكشف — اللون أم السطوع: ما الذي يفرّغ الصفيحة؟

ما ستفعله: تشحن كشافًا كهربيًا (الالكتروسكوب) ذا صفيحة زنك، ثم تختبر ضوءًا مرشَّحًا متصاعد (متزايد) اللون (التردد) عند مستويات سطوع مختلفة لتجد ما الذي يُسقِط الورقة فعلًا.

الزمن: 15 دقيقة.

ما تحتاجه (الأدوات):

- كشاف كهربي ذو ورقة ذهبية وصفيحة زنك نظيفة.
- مصباح على حامل قابل للضبط مع متحكّم في السطوع.
- مجموعة مرشّحات ألوان (أحمر ← بنفسجي) ومصدر فوق بنفسجي.
- قضيب مشحون لإعطاء الصفيحة شحنة سالبة.

قضيب مشحون

مرشح ملون (واحد من مجموعة)

مصباح على حامل

كشاف كهربائي

الخطوات:

١ اشحن صفيحة الزنك شحنة سالبة بالقضيب المشحون حتى ترتفع الورقة الذهبية، وسجّل زاوية الورقة.

٢ ركِّب المرشّح الأحمر، ووجّه المصباح نحو الصفيحة، وارفع السطوع على خطوات — وسجّل في العمود الأخير ما إذا كانت الورقة تسقط ام لا.

٣ بدّل المرشّحات باتجاه البنفسجي وأخيرًا إلى المصدر فوق البنفسجي؛ ولكل لون، نازلًا في الجدول من التردد المنخفض إلى المرتفع، لاحظ ما إذا كانت الصفيحة تُفرَّغ.

٤ لأول لون يفرّغ الصفيحة، قلل سطوع المصباح وتحقّق مما إذا كانت الورقة ما زالت تسقط.

المحاولة	لون المرشّح (التردد ν متصاعد)	سطوع المصباح	هل تُفرَّغ الورقة؟ (نعم/لا)
١			
٢			
٣			

حلّل ما جمعته:

(أ) بقراءة العمود نزولًا من الأحمر إلى فوق البنفسجي، أين تبدأ الورقة في السقوط أول مرة — وهل يفرّغ رفعُ لونٍ فاشلٍ (لم يستطيع اسقاط الورقة) إلى أقصى درجة سطوع إلى تفريغ اللوحة؟

(ب) أي خاصية واحدة من خواص الضوء تقرر ما إذا كانت الشحنة تغادر المعدن؟ وفسِّر لماذا يناقض هذا الفكرة الموجية القائلة إن شعاعًا أسطع، يحمل طاقة أكبر، ينبغي أن يحرّر الشحنة دائمًا.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

شكل 5-1-2: مصباح على حامل بمتحكّم في السطوع ومصدر مرئي/فوق بنفسجي قابل للتبديل، موجَّه إلى صفيحة الزنك في كشاف كهربي ذي ورقة ذهبية.

ملاحظة عملية

سقوط الورقة يعني أن شحنة تغادر الصفيحة — راقب الورقة لا المصباح. وأبقِ الصفيحة على نفس المسافة من المصباح في كل محاولة، بحيث يتغيّر فقط اللون والسطوع بين الصفوف.

من الملاحظة إلى النموذج

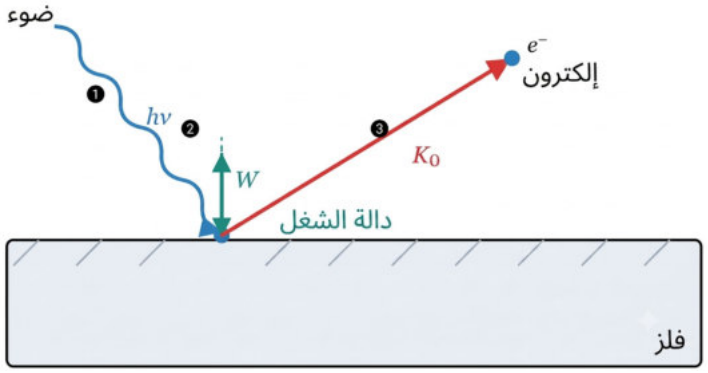
الضوء مجموعة هائلة (تيارًا) من الفوتونات

لماذا يجب أن يصل الضوء في حزم أصلًا؟ نتيجة الاستكشاف (التجربة) هي المفتاح. فمهما زاد سطوع المصباح الأحمر لا تسقط الورقة أبدًا، بينما يفرّغ مصدرٌ فوق بنفسجي سطوعه خافت (شدته ضعيفة) الصفيحةَ فورًا. والموجة تنشر طاقتها بانسياب عبر الصفيحة كلها، فينبغي لموجة أقوى أن تغلب في النهاية دائمًا ولا ينبغي أن يكون للون شأن؛ لكن القياس يقول العكس. ولا يستقيم ذلك إلا إذا كان الشعاع ينقل طاقته في حزم غير قابلة للتجزئة يحدد حجمَها اللونُ — فزيادة إضاءة المصباح ترسل

المزيد من الحزم، وليس حزمًا أكبر أبدًا.. وقياس كيف ينمو حجم الحزمة مع اللون يعطي تناسبًا مستقيمًا، والثابت الذي يحدد مقياسه يظهر نفسه لكل معدن وكل لون تم تجربته على الإطلاق، وهو ما يجعله ثابتاً من ثوابت الطبيعة بدلاً من أن يكون خاصية للمصباح.

التأثير الكهروضوئي

لا شيء في الصورة الموجية يمنع بدايةً بطيئة: فالموجة الضعيفة ينبغي ببساطة أن تحتاج زمنًا أطول لتجميع طاقة كافية عند بقعة واحدة. لكن «منضدة الاختبار» ترفض ذلك أيضًا. فدون لون معيّن يكون التيار صفرًا تمامًا مهما طال الانتظار ومهما كان سطوع المصباح، وفوقه يظهر التيار دون أي تأخّير قابل للقياس حتى حين يكون الضوء خافتًا لدرجة أن الموجةً كانت ستحتاج ساعات لتجميع الطاقة. وبالتالي مقياسان (مفتاحان) مستقلان يعملان أحدهما يقرر هل يخرج إلكترون وبأي سرعة يغادر، والآخر يقرر فقط عدد الإلكترونات التي تخرج. وذلك الفصل غير ممكن إلا إذا تعاملت حزمة واحدة مع إلكترون واحد.



شكل 5-1-3 آلية الفوتون في ثلاث مراحل: ❶ يمتصّ إلكترون مفرد فوتونًا طاقته hν؛ ❷ يدفع الإلكترون دالة الشغل Φ ليفلت من المعدن؛ ❸ يغادر الباقي طاقةً حركية عظمى K_0.

تتبّع الطاقة خلال عملية واحدة.:- تصل الحزمة حاملةً hγ؛ والتخلّص من السطح يكلّف قيمة ثابتة (دالة الشغل) Φ تخصّ المعدن؛ وما يتبقى من الطاقة يظهر في صورة طاقةً حركية. والإلكترونات الاكثر ارتباطًا (أعمق) تحتاج إلى طاقة أكبر (زيادةً) للخروج، فالفرق يمثل الحد الأقصى (السقف) لا قيمةٌ مشتركة — وهذا ما يسجّله في K_0. واقرأ الآن ذلك الحد الأقصى في معادلةَ خط مستقيم في المتغيّر ν: صورته ، فتمثيل طاقة الإلكترون مقابل التردد لا بد أن يعطي خطًا مستقيمًا ميله h يقطع محور الطاقة عند Φ-.

ثم تظهر ثابتان ذوا طابعين مختلفين تمامًا من الرسم البياني الواحد: الميل يعطي h، وهو ثابت لكل معدن، بينما نقطة التقاطع تعطي Φ ، وهي مختلفة لكل معدن. يقطع الخط محور التردد حيث تكون الحزمة كبيرة بما يكفي لدفع الرسوم فقط (الحد الأدنى من الطاقة) ولا أكثر، $h\gamma = \Phi$، لذا:

$$\gamma_0 = \frac{\Phi}{h}$$

— تحت تلك النقطة ستعطي المعادلة طاقة حركية سالبة، وهي طريقة الطبيعة في القول بأنه لاتنبعث الكترونات (لايخرج شيء) على الإطلاق.

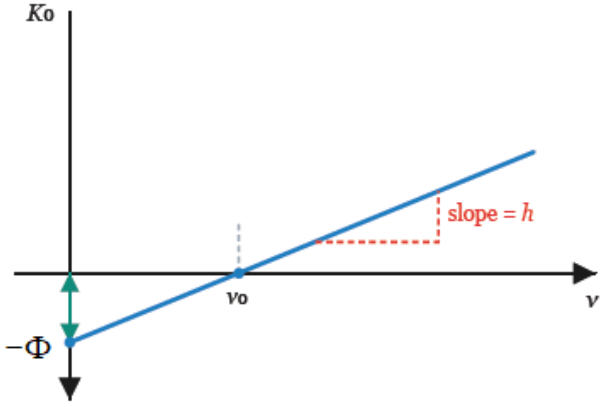
حقيقة أساسية

المقياس:

- ثابت بلانك من أصغر الأعداد في الفيزياء، فحزمة واحدة من الضوء المرئي ضئيلة: المثال المحلول أدناه يقدّر فوتونًا واحدًا بـ 6.0×10^{-19} J. والضوء العادي ينقل من الحزم في الثانية عددًا كبيرًا إلى حدّ أن الفوتون لا يمكن رؤيته قط، ولهذا خدمت الصورة الموجية قرنين قبل أن يقوم أي شخص بفحص سطح معدني واحد عن كثب (قرب).

ملاحظة

انتبه: «ضوء أقوى» و«ضوء أعلى ترددًا» تغييران مختلفان، والأسئلة تخلطهما عمدًا؛ فاقرأ أيّهما مثبَّت قبل أن تجيب.



شكل 5-1-4 • الطاقة الحركية العظمى K_o مقابل التردد ν: خط مستقيم ميله h يلاقي محور K_o عند المقطع Φ- ويعبر محور ν عند التردد الحرج ν_o.

الخلاصة

فرضية الفوتون

- الضوء تيار من الجسيمات. ويُسمى هذا الجسيم **فوتونًا (كمّ ضوء)**. وتُحدَّد شدة الضوء بتردده **وعدد الفوتونات**.
- طاقة الفوتون الواحد $E[j]$ تتناسب مع تردد الضوء $h\nu$ [Hz]، ويُعبَّر عنها بالصيغة:

$E = h\nu$، حيث h ثابت يُسمى **ثابت بلانك**، $h \approx 6.63 \times 10^{-34}$ J·s.

تُسمى الظاهرة التي تنبعث فيها إلكترونات من معدن عندما يسقط الضوء على سطحه التأثير الكهروضوئي. وتُسمى هذه الإلكترونات المنبعثة الإلكترونات الكهروضوئية. ولا يحدث التأثير الكهروضوئي إذا كان تردد الضوء الساقط أقل من التردد الحرج. وعند زيادة تردد الضوء، تزداد الطاقة الحركية للإلكترونات الكهروضوئية. وعند زيادة شدة الضوء (زيادة عدد الفوتونات)، يزداد عدد الإلكترونات الكهروضوئية. (ولا تتغيّر الطاقة الحركية للإلكترونات الكهروضوئية.)

تفسير التأثير الكهروضوئي بفرضية الفوتون:

١ يعطي فوتون واحد طاقته $h\nu$ طاقةً لإلكترون واحد في المعدن.

٢ يقفز الإلكترون الذي اكتسب الطاقة خارج المعدن (ويسمى الحد الأدنى اللازم لتحرير الكترون خارج المعدن، Φ، بدالةَ الشغل).

٣ الباقي بعد طرح دالة الشغل من طاقة الفوتون يكون الطاقة الحركية العظمى K_o للإلكترون:

$K_o = h\nu - \Phi$

التمثيل البياني لتردد الضوء ν والطاقة الحركية العظمى للإلكترونات K_o

ميل الخط المستقيم h: **ثابت بلانك**.

مقطع الخط المستقيم Φ-: **دالة الشغل** Φ.

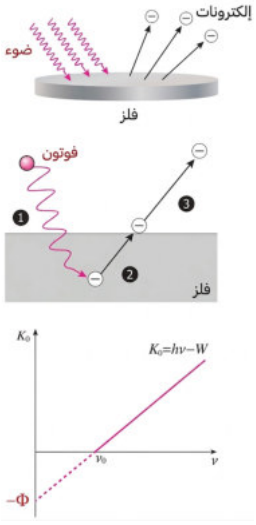
تقاطع الخط مع محور $h\nu$ عند $h\nu_o$: حيث $h\nu_o$ **التردد الحرج**.

وعندما $h\nu < h\nu_o$ لا تنبعث إلكترونات؛

وعندما $h\nu > h\nu_o$ تنبعث الإلكترونات.

مصطلح

حيث يتوقف النموذج — Φ خاصية لسطح المعدن، لا للضوء أبدًا، فلا يستطيع أي ضبط للمصباح إزاحتها، بينما تزيحها كثيرًا طبقةُ أكسيد أو بصمةُ إصبع على الصفيحة. والمعادلة الكهروضوئية تعطي الحد الأقصى لا سرعةَ كل إلكترون: فلا يبلغه إلا الإلكترونات المحرَّرة عند السطح تمامًا.



صندوق المعادلات:

طاقة الفوتون:	$E = h\nu$ $(h \approx 6.63 \times 10^{-34}\ J\cdot s)$؛ وبدلالة الطول الموجي $E = \frac{hc}{\lambda}$، حيث الطول الموجي λ يتعين من العلاقة $\lambda = \frac{c}{h\nu}$
المعادلة الكهروضوئية:	$K_o = h\gamma - \Phi$ (K_o هي الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الكهروضوئية؛ Φ دالة الشغل)
التمثيل البياني لـ K_o مقابل ν:	الميل $= h$ المقطع $= -\Phi$ عبور محور $h\gamma$، مع $h\nu_o = h\gamma$، $\Phi = h\nu_o$
العتبة:	$\Phi = h\nu_o$

مثال محلول:

الموقف:	يسقط ضوء طوله الموجي $3.3\times10^{-7}\ m$ على معدن دالة شغله $3.7\times10^{-19}\ J$. أجب لأقرب رقمين عشريين، بفرض أن ثابت بلانك $6.6 \times 10^{-34}\ J\cdot s$ وسرعة الضوء $3.0 \times 10^{8}\ m/s$. (أ) أوجد طاقة E لفوتون واحد من هذا الضوء بالجول. (ب) أوجد الطاقة الحركية العظمى K_o للإلكترونات الكهروضوئية المنبعثة من سطح المعدن بالجول. (جـ) إذا بقيت شدة الضوء ثابتة وقُصِّر الطول الموجي فقط، صِف كيف تتغيّر الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الكهروضوئية.
المعطيات والمطلوب:	$\lambda = 3.3 \times 10^{-7}\ m$، $\Phi = 3.7 \times 10^{-19}\ J$، $h = 6.6 \times 10^{-34}\ J\cdot s$، $c = 3.0 \times 10^{8}\ m/s$. أوجد: (أ) طاقة الفوتون E (ب) الطاقة الحركية العظمى K_o (جـ) كيف تستجيب K_o لطول موجي أقصر.
التمثيل:	انظر الشكل 3-1-5 لانتقال الطاقة بين الفوتون والإلكترون: يمدّ الفوتون $E = h\nu$، وتُدفَع دالة الشغل Φ للإفلات، والباقي هو K_o.
الاستراتيجية:	عبِّر عن التردد بدلالة الطول الموجي والسرعة c/x = واستخدم $E = h\nu$ للحصول على طاقة الفوتون. ثم اطرح دالة الشغل من طاقة الفوتون. وللجزء (c)، استخدم $C = \lambda.\gamma$ لترى كيف يتغيّر التردد، ومن ثمّ طاقة الإلكترون، مع نقصان λ. $E = h\gamma = (h\ c)/\lambda$

الحل الموضح:	(أ) التردد من الطول الموجي، $\gamma = c/\lambda = 3.0 \times 10^{8} / 3.3 \times 10^{-7}$، ثم $E = h\nu$: $E = (6.6 \times 10^{-34}) \times (3.0 \times 10^{8} / 3.3 \times 10^{-7}) = 6.0 \times 10^{-19}$ J. (ب) اطرح دالة الشغل من طاقة الفوتون: $K_o = (6.0 \times 10^{-19}) - (3.7 \times 10^{-19}) = 2.3 \times 10^{-19}$ J. (جـ) كلما قصر الطول الموجي كبر التردد، فتكبر الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الكهروضوئية.
منطقية الحل:	طاقة الفوتون 6.0×10^{-19} J أكبر من دالة الشغل 3.7×10^{-19} J، فيحدث الانبعاث فعلًا، والباقي $K_o = 2.3 \times 10^{-19}$ J موجب وأصغر من طاقة الفوتون — تمامًا كما تقتضي. $K_o = h\gamma - \Phi$
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، قل لماذا زيادة سطوع (شدة) نفس الضوء (دون تغيير طوله الموجي) لا تُغير أقصى طاقة حركة للإلكترونات الكهروضوئية.

حاول بنفسك: يسقط ضوء طوله الموجي 6.6×10^{-7} m على معدن دالة شغله 2.0×10^{-19} J ($h = 6.6 \times 10^{-34}$ J·s، $c = 3.0 \times 10^{8}$ m/s)، لأقرب رقمين عشريين.

أوجد طاقة الفوتون E والطاقة الحركية العظمى K_o

حاول:

١. أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين. عندما يسقط ضوء تردده 5.0×10^{14} Hz على معدن دالة شغله 3.0×10^{-19} J، يحدث التأثير الكهروضوئي. أوجد الطاقة الحركية العظمى K_o للإلكترونات الكهروضوئية المنبعثة من سطح المعدن بالجول. افترض أن ثابت بلانك 6.6×10^{-34} J·s.

٢. عندما أُسقِط ضوء بترددات مختلفة على معدن معيّن، كانت العلاقة بين تردد الضوء ν[Hz] والطاقة الحركية العظمى K_o [J] للإلكترونات الكهروضوئية كما في الشكل 5-1-5. أوجد دالة شغل هذا المعدن بالجول. افترض أن ثابت بلانك 6.6×10^{-34} J·s.

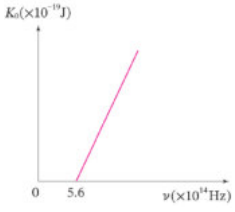
في سياق جديد

تعتمد أجهزة استشعار الضوء في كل مكان على الآلية نفسها: يدخل الفوتون ويخرج الإلكترون. فالكاشف الضوئي المضاعِف المستخدم في أجهزة الكشف عن الإشعاع، ومقياس الضوء في الكاميرا، وشعاع فتح الأبواب الأوتوماتيكية، والصمام الثنائي الضوئي في قارئ الباركود، كلها تعتمد على ضوء ذي تردد مرتفع بدرجة كافية لتحرير شحنة من سطح أو عبر وصلة. وبما أن التردد المرتفع فقط (وليس السطوع) هو القادر على تحرير إلكترون والتغلب على دالة الشغل، فإن كل جهاز يُصنع من مادة لها تردد حرج يتوافق مع الضوء الذي يجب أن يستشعره الجهاز.

دورك الآن: معدن دالة شغله 2.0×10^{-19} J. أوجد التردد الحرج ν_o الذي لا تنبعث دونه إلكترونات كهروضوئية ($h = 6.6 \times 10^{-34}$ J·s، رقمان معنويان).

طبيعة العلم:

من الأصل — الخلايا الشمسية والتأثير الكهروضوئي. تطبّق الخلايا الشمسية المستخدَمة في الآلات الحاسبة والألواح الشمسية على الأسطح الأثرَ الكهروضوئي الجهدي. فعندما تصطدم جسيمات الضوء (الفوتونات) بشبه موصّل وتقذف إلكترونات، تتحوّل طاقة الضوء مباشرة إلى طاقة كهربية، مولِّدةً تيارًا كهربيًا.



شكل 5-1-5: جرِّب: أكبر طاقة للإلكترونات الضوئية ممثَّلة مقابل تردد الضوء؛ ويلاقي الخط محور التردد عند 5.6×10^{14} Hz.

وقد استحقّت فرضية الفوتون مكانها بتفسيرها ما عجز عنه النموذج الموجي بالضبط: عتبةُ تردد للانبعاث، وطاقةٌ حركية عظمى تعتمد على التردد لا على السطوع. والنموذج في الفيزياء يُبقى عليه حين يفسّر الملاحظات العنيدة التي يتركها منافسه دون تفسير، ثم يُوظَّف — هنا في تحويل ضوء الشمس تيارًا مباشرة.

وقد عثر هرتز على الأثر مصادفةً عام ١٨٨٧، وبيّن لينارد عام ١٩٠٢ أن اللون (التردد) لا السطوع (الشدة) هو ما يقرر مغادرة الشحنة للمعدن — نتيجة لم يستطع أي تفسير موجي استيعابها. وكان تفسير أينشتاين عام ١٩٠٥ سببَ نيله جائزة نوبل عام 1921، لا النسبية. فالشذوذ الذي يأبى الزوال هو ما يُرغِم الفيزياء على تغيير رأيها.

دورك الآن: اقترح قياسًا واحدًا على خلية كهروضوئية يتيح لعالِم أن يفصل بين الصورة الموجية والصورة الجسيمية (الكمية) للضوء.

شكل 5-1-6 • باب زجاجي منزلق أوتوماتيكي مزوَّد بباعث ضوء ومستقبِل كهروضوئي متقابلين أسفل الإطارين؛ يعبر شعاع رفيع مستقيم المدخل، فتقطعه ساق الشخص المقترب، فتُشير إلى اللوحين بالانزلاق.

سؤال الدرس، وإجابته:

إن اعتبار الضوء مجموعة من الجسيمات يفسر ثلاثة أمور لا يستطيع نموذج الموجة تفسيرها:

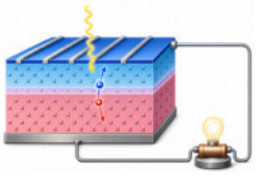
أولًا: وجود تردد حرج من الأساس؛ فالموجة، أيًّا كان لونها، ينبغي أن تحرر الشحنة في النهاية، بينما الفوتون إما أن يمتلك طاقة كافية للتغلب على حاجز سطح المعدن أو لا يمتلكها.

ثانيًا: أن سرعة الإلكترونات تعتمد على لون الضوء (تردده) ولا تعتمد على سطوعه؛ لأن كل إلكترون يتفاعل مع فوتون واحد.

ثالثًا: يبدأ انبعاث الإلكترونات فورًا حتى مع الضوء الخافت، لأنه لا توجد طاقة تحتاج إلى أن تتراكم أولًا.

إن الخط المستقيم الناتج من رسم طاقة الإلكترونات مقابل التردد يمثل الدليل الكمي على الأمور الثلاثة؛ إذ إن:

- ميل الخط يقيس ثابتًا كونيًا.
- نقطة تقاطع الخط مع محور الطاقة تقيس دالة الشغل الخاصة بالمعدن.
- نقطة تقاطع الخط مع محور التردد تحدد بداية انبعاث الإلكترونات، أي التردد الحرج.



شكل 5-1-7 • ضوء الشمس على خلية شمسية: تصطدم الفوتونات بشبه الموصّل وتقذف إلكترونات عبر الوصلة، فتقود تيارًا كهربيًا يشغّل آلة حاسبة.

تمرين:

١. أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين. عندما سقط ضوء طاقة فوتونه 9.0×10^{-19} J على معدن دالة شغله 6.9×10^{-19} J، حدث الأثر الكهروضوئي. ما الطاقة الحركية العظمى K_o للإلكترونات الضوئية القافزة خارج المعدن بالجول؟

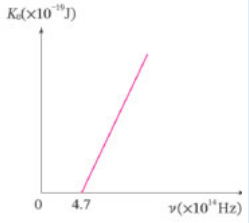
٢. أُسقِط ضوء طوله الموجي 2.2×10^{-7} m على معدن دالة شغله 4.4×10^{-19} J. افترض أن ثابت بلانك 6.6×10^{-34} J·s وسرعة الضوء 3.0×10^{8} m/s.

(i) أوجد طاقة E لفوتون واحد من هذا الضوء بالجول.

(ii) أوجد الطاقة الحركية العظمى K_o للإلكترونات الضوئية القافزة خارج المعدن بالجول.

(iii) إذا بقي الطول الموجي ثابتًا وزادت شدة الضوء وحدها، صِف كيف تتغيّر الطاقة الحركية العظمى للإلكترونات الكهروضوئية.

٣. عندما يسقط ضوء بترددات مختلفة على معدن معيّن، تكون العلاقة بين تردد الضوء ν [Hz] والطاقة الحركية العظمى K_o [J] للإلكترونات الضوئية المنبعثة من المعدن كما في الشكل 5-1-8. أوجد دالة شغل هذا المعدن بالجول. افترض أن ثابت بلانك 6.6×10^{-34} J·s.



شكل 5-1-8 • تمرين 3: الطاقة الحركية العظمى K_o للإلكترونات الضوئية ممثَّلة مقابل تردد الضوء ν لهذا المعدن.

الدرس ٥-٢ — الأشعة السينية

؟ سؤال الدرس:

كيف تُنتَج الأشعة السينية وهي الأشعة النافذة المستخدَمة للنظر خلال الحقائب والأجسام على السواء؟

ستتعلم أن:

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

١. **تفسّر** تولد جزأي طيف الأشعة السينية – الطيف المتصل والطيف الخطي المميز – وايهما يتغير عند تغيير فرق جهد الأنبوبة وأيّها يتغير عند تغيير معدن مادة الهدف..

٢. **تحسب** طاقة وكمية حركة فوتون واحد من الأشعة السينية من طوله الموجي، وتحديد اتجاه كمية الحركة.

٣. **تتنبّأ** بأقل طول موجي للاشعة السينية المنبعثة لذي يقطع عنده الأنبوبة من جهد التسارع (الجهد المعجل بين الفنيلة ومادة الهدف)، وتحوّل بين الجول والإلكترون فولت.

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

شكل 5-2-1 • ماسح مطار يصنع أشعة سينية بدفع إلكترونات معجَّلة إلى هدف معدني؛ وتنفذ الأشعة خلال الحقيبة لتصوير محتوياتها.

توقّع قبل أن تستمر — اكتب توقعك:

(أ) إذا رفعت فرق جهد التعجيل، هل يصير أقصر طول موجي للأشعة السينية المنبعثة أطول أم أقصر؟

(ب) هل تتحرك القمم الحادة عند تغيير فرق الجهد، أم فقط عند تغيير معدن الهدف؟

حقيقة أساسية:

الأشعة السينية:

إشعاع يُصنَع لا يُوجَد: ادفع إلكترونات خلال فرق جهد V إلى هدف معدني يعُد جزء من طاقتها أشعةً أنفذ بكثير من الضوء. فما الذي يحدد أطوالها الموجية؟

استكشف — قراءة طيف الأشعة السينية

ما ستفعله: تقرأ أقصر طول موجي من طيفين سينيين مقيسين أُخِذا عند فروق جهد تعجيل مختلفتين (V)، وتختبر ما إذا كان حاصل الضرب λ_{min} V يظل ثابتًا.

الزمن: 10 دقائق

ما تحتاجه (الأدوات):

- الطيفان السينيان المقيسان أدناه
- مسطرة لقراءة حدّ القطع
- آلة حاسبة

مصدر جهد عالٍ

مسطرة

الخطوات:

١ على كل منحنى متصل، حدد أين يقطع بحدّة من جهة الطول الموجي القصير؛ فنقطة اللقاء تلك مع المحور هي أقصر طول موجي λ_{min}. اقرأها لمنحنى الفرق جهد العالية ولمنحنى الفرق جهد المنخفضة..

٢ سجّل بجانب كل قراءة فرق جهد التعجيل V المطبوعة على ذلك المنحنى (50 kV أو 25 KV).

٣ احسب لكل محاولة حاصل الضرب λ_{min} V وأدخله في العمود الأخير.

٤ قارن حاصل الضرب نزولًا في العمود الأخير لتحكم على ما إذا كان λ_{min} V يبقى كما هو مع تغيّر فرق جهد التعجيل (V).

المحاولة	فرق جهد التعجيل V (kV)	أقصر طول موجي ($\lambda_{min} \times 10^{-11}$ m)	$V \times \lambda_{min}$
منحنى فروق الجهد العالية			
منحنى فروق الجهد المنخفضة			

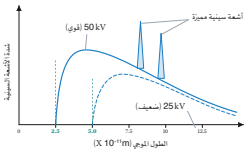
حلّ ما جمعته:

(أ) مع ارتفاع فرق جهد التعجيل V، هل يصير أقصر طول موجي λ_{min} أطول أم أقصر؟ وانظر الآن نزولًا في العمود الأخير – ماذا تلاحظ على حاصل ضرب $\lambda_{min} \times V$؟

(ب) إذا كان $\lambda_{min} \times V$ ثابتًا، فإن $\lambda_{min} = \frac{\text{ثابت}}{V}$. عبّر عن الثابت بدلالة h و c و e، واستخدمه للتنبؤ بـ λ_{min} عند فرق جهد لم تقرأه.

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.

ملاحظة عملية:
اقرأ λ_{min} حيث يلاقي منحنى متصل محورَ الطول الموجي في قطع حادّ – لا عند قمة؛ فالقمم المميِّزة العالية يثبّتها المعدن، فتجاهلها عند تحديد موضع القطع. واستخدم مقياس الطول الموجي نفسه للمنحنيين.



شكل 5-2-2 • طيفان سينيان مقيسان من الهدف المعدني نفسه: المنحنى المتصل عند kV 50 يقطع عند $2.5\,m \times 10^{-11}$، والمنحنى المتقطع عند $25KV$ عند $5.0\,m \times 10^{-11}$. وتقع القمم المميِّزة عند أطوال موجية يحددها المعدن، فلا تتغير مع الفرق جهد.

من الملاحظة إلى النموذج:

الأشعة السينية المتصلة والخطية المميّزة

تعمل آليتان مختلفتان تمامًا داخل نفس الأنبوبة هـ، ويفصل بينهما الطيف بالشكل. فالإلكترون الذي ينحرف فحسب وهو يشقّ طريقه إلى الهدف يشعّ جزءًا من طاقته؛ ويختلف المقدار من إلكترون إلى آخر،فينتج عن هذا الاشعاع طيف متصل يعرف بالاشعاع الناعم. أما الإلكترون الذي يصطدم بأحد الالكترونات القريبة من نواة ذرة هدف فيبدأ شيئًا آخر: إذ يهبط إلكترون خارجي في المكان الخالي ويشعّ فرق الطاقة الثابتة بين مستويين من مستويات تلك الذرة. والطاقة الثابتة تعني طولًا موجيًا ثابتًا، فيظهر هذا الاشعاع قممًا ضيقة مواضعُها بصمةٌ للعنصر المستخدَم — استبدل النحاس بالتنجستن يتغير الطول الموجي للطيف المميز، بينما تحتفظ الحدبة بشكلها. ولمسار الانحراف وحده حد أقصى: فالإلكترون يصل حاملًا eV من الطاقة ويستطيع أن ينقلها، على الأكثر، كلها لفوتون واحد، فيخضع أقصر طول موجي للعلاقة

$$eV = \frac{hc}{\lambda_{min}}$$

كلما زاد فرق جهد التعجيل (V) كلما قل أقل طول موجي (λ_{min})، بحيث يظل حاصل ضربهما ثابتا كما في العمود الاخير من استكشف (التجربة)

طاقة الفوتون وكمية تحركه

علاقتا الفوتون تم تناولهما بالفعل في الدرس 5–1 مع معادلة الموجة $c=\gamma\lambda$ ؛ والشغل هنا ليس إلا اختيار الصورة الملائمة. فالتردد هو المتغيّر الطبيعي حين تُمتصّ حزمة بواسطة إلكترون واحد، لكن أجهزة الأشعة السينية معايَرة بالطول الموجي، فحذف التردد v من العلاقتين يتيح قراءة الطاقات مباشرة من محور طول موجي — نفس الفوتون موصوفًا بطريقتين، لا فوتونين مختلفين. أما علاقة كمية التحرك فتضيف معلومة جديدة حقًا: الحزمة لا تنقل طاقة فقط بل تنقل دفعًا أيضًا. وكمية الحركة كمية متجهة بينما الطاقة ليست كذلك، لذا فإن الإجابة عن كمية الحركة p تظل غير مكتملة حتى يتم تحديد اتجاهها، وهذا الاتجاه هو ببساطة المسار الذي يسلكه الفوتون. وهذا هو السبب في أن الحزمة الممتصة تضغط على أي شيء يوقفها، والسبب في أن الثابت h يحدد كلاً من مقياس الطاقة ومقياس كمية الحركة للضوء.

الإلكترون فولت يتم اختيار الوحدات بحيث تتناسب مع القيم التي يتم التعامل معها فعليًّا. وعند كتابة القيم بالجول، تقع كل طاقة في هذا الفصل بالقرب من 10^{-19} وهو نطاق يتضمن فيه كل حساب أسًّا عشريًا، ولا يمكن مقارنة رقمين معًا بنظرة سريعة. إن دفع إلكترون واحد خلال فولت واحد فر معيارًا طبيعيًّا لهذا الحجم بالضبط، لذا فإن ذكر الطاقات مضاعفاتٍ لها يزيل الأسّ بالكلية: فأنبوبة تعمل عند ثلاثين ألف فولت يعطي كل إلكترون 30 keV، رقمًا يُقرأ مباشرة من جهاز فرق الجهد دون أي تحويل. لى الإطلاق. الثمن هو أن هذا المقياس ليس وحدة من وحدات النظام الدولي

— قبل إدخاله في المعادلة $E = hc/\lambda$، أو أي معادلة أخرى، يجب تحويله مرة أخرى إلى جول عن طريق ضربه في الشحنة الأولية. تعمل فيزياء النووية والجسيمات بعدة أسسًا من العشرة أعلى من ذلك، ولهذا السبب تحمل وحدتها اليومية البادئة «ميجا».

حقيقة أساسية:

المقياس:

الأشعة السينية في هذا الدرس أطوالها الموجية قرب 10^{-11} m، أي أقصر نحو عشرة آلاف مرة من الضوء الأخضر وقريبة من تباعد الذرات في بلورة. وذلك التوافق هو ما يجعل حيود الأشعة السينية الطريقةَ المعيارية لقياس بنية البلورات.

ملاحظة:

انتبه:

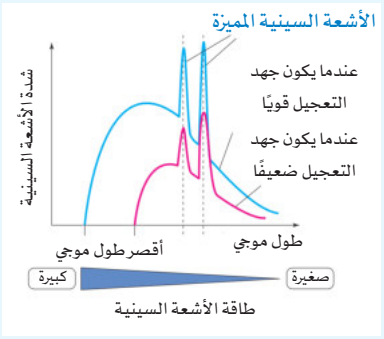
سؤال عن «الطول الموجي للأشعة السينية» له هدفان ممكنان على التمثيل البياني نفسه. أقل (أقصر) طول موجي (λ_{min}) يخصّ الطيف كله ويتغير عند تغيير فرق جهد الأنبوبة (أنبوبة كولدج)؛ أما الأطوال الموجية المميزة فتخصّ معدن الهدف ولا تتغير بتغير فرق جهد الأنبوبة . وقراءة قمة حين كان المطلوب حدّ القطع هي أشيع خطأ هنا.

نقطة

تُسمى القيمة المطلقة للشحنة التي يحملها إلكترون واحد الشحنةَ الأولية، ويُرمَز لها بالرمز e

– **الاشعة السينية هى موجات كهرومغناطسية،** أطولها الموجية أقصر من الاشعة فوق البنفسجية

يُبيِّن التمثيل البياني لشدة الأشعة السينية مقابل طولها الموجي، المتحصَّل عن طريق تصادم معدن بإلكترونات معجَّلة بفرق جهد عالية، تخطيطيًا في الشكل أعلاه. ويُسمى الجزء الناعم من المنحنى الأشعةَ السينية المتصلة، وتُسمى الأجزاء التي تبرز فيها الشدة الأشعةَ السينية المميِّزة.



وتُحدَّد أطوال موجات الأشعة السينية المميِّزة بنوع المعدن الذي تصطدم به الإلكترونات. (وكلما صغر الطول الموجي كبرت الطاقة.) وعندما تتحول طاقة إلكترون كلها إلى طاقة فوتون من الاشعة السينية واحد، تصبح طاقة فوتون الاشعة السينية أكبر مايمكن، ويصبح الطول الموجي أقصر ما يكون.

طاقة الفوتون الواحد E [J] تتناسب مع تردد الضوء $E = h\gamma$: γ (Hz)

(حيث h: ثابت بلانك) — وبالتعويض $\gamma = \frac{c}{\lambda}$ ، $E = \frac{hc}{\lambda}$

وكمية تحرك الفوتون الواحد p (kg.m/s) تتناسب عكسيًا مع الطول الموجي للضوء λ — $\lambda = \frac{h}{p}$ وبالتعويض عن $\lambda = \frac{c}{v}$ نحصل على $\lambda = \frac{hv}{c}$. واتجاه كمية التحرك هو اتجاه سير الفوتون نفسه.

بما أن طاقة إلكترون واحد أو فوتون واحد صغيرة للغاية، يُستخدَم أحيانًا الإلكترون فولت (رمزه eV) وحدةً للطاقة إلى جانب الجول (رمزه J). و 1eV يساوي الطاقة التي يكتسبها إلكترون شحنته e [C] عند تعجيله بفرق جهد 1V

$$1\ eV = 1.6\times10^{-19}\ J = e\ (J)$$

كما يُسمى 10^6 eV ميجا إلكترون فولت (رمزه MeV).

صندوق المعادلات:

طاقة الفوتون:	$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ (h = ثابت بلانك؛ الوحدة: J)
كمية تحرك الفوتون:	$p = \frac{h\nu}{c}$ (الوحدة: kg·m/s، في اتجاه سير الفوتون)
أقصر طول موجي: λ_o	$eV = \frac{h\nu}{\lambda_o}$ ⇐ $\lambda_o = \frac{h\nu}{c}$ (طاقة الإلكترون كلها ⇐ فوتون واحد)
الإلكترون فولت	1 eV = 1.6 × 10^{-19} J = e (J) (الطاقة المكتسَبة لشحنة e خلال V1) 10^6 eV = 1MeV (واحد ميجا الكترون فولت)

ملاحظة عملية:

تصف العلاقة الحالةَ التي ينقل فيها إلكترون كل شيء لفوتون واحد، وهو ما لا يكاد يحدث: فمعظم الإلكترونات تنتج عدة فوتونات ضعيفة أو تسخّن الهدف فحسب، فأنبوبة الأشعة السينية محوّل رديء ولا بد من تبريد الأنود (المصعد). فالعلاقة تتنبّأ إذن بحافة، لا بارتفاع الطيف ولا شكله، ولا تذكر شيئًا على الإطلاق عن مكان وقوع الخطوط المميز — فتلك تأتي من المستويات الداخلية لذرة الهدف.

مثال محلول:

الموقف:	أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين. خذ ثابت بلانك $6.6\ J{\cdot}s \times 10^{-34}$، وسرعة الضوء $3.0\ m/s \times 10^{8}$، والشحنة الأولية $1.6\ C \times 10^{-19}$. (أ) إلكترونات معجَّلة بفرق جهد $2.2\ V \times 10^{4}$ تصطدم بمعدن. أوجد أقصر طول موجي، بالمتر، للأشعة السينية المتولّدة. (ب) فوتون من الاشعة السينية طوله الموجي $1.5\ m \times 10^{-10}$ يسير في الاتجاه الموجب لمحور x. أوجد اتجاه ومقدار كمية تحركه، بـ kg·m/s.
المعطيات والمطلوب:	(أ) $e = 1.6 \times 10^{-19}$ ، $c = 3.0\ m/s \times 10^{8}$ ، $h = 6.6\ J{\cdot}s \times 10^{-34}$ ، $V = 2.2 \times 10^{4}$ ؛ أوجد أقصر طول موجي λ_0. (ب) $\lambda = 1.5\ m \times 10^{-10}$ بمحاذاة +x؛ أوجد اتجاه p ومقداره.
التمثيل:	يحدث أقصر طول موجي عندما تتحول طاقة إلكترون واحد كلها إلى طاقة فوتون واحد. والإلكترون المعجَّل خلال V يكتسب طاقة حركية eV (من طاقة الوضع $U = qV$ مع $q = e$)، وهي تساوي طاقة الفوتون العظمى hc / λ_0. وفي (b)، تشير كمية تحرك الفوتون بمحاذاة اتجاه سيره.
الاستراتيجية:	طاقة الإلكترون = طاقة الفوتون، $eV = hc / \lambda_0$، وحُلّ لإيجاد $\lambda_0 = hc / eV$). ولكمية التحرك، استخدم $p = h / \lambda$ مباشرة، واحتفظ باتجاه السير.
الحل الموضح:	(أ) عندما تصير طاقة الإلكترون كلها طاقة فوتون واحد، يكون الطول الموجي أقصر ما يكون. وطاقة الإلكترون، eV [J] فمع أقصر طول موجي λ_0، وبما أن $eV = hc/\lambda_0$، فإن $\lambda_0 = hc/(eV)$. $\lambda_0 = (6.6\times10^{-34})(3.0\times10^{8}) / [(1.6\times10^{-19})(2.2\times10^{4})] =$ $(1.98\times10^{-25})/(3.52\times10^{-15}) = 5.625\times10^{-11} = 5.6\ m \times10^{-11}$. (ب) بجعل كمية التحرك $p\ [kg{\cdot}m/s]$: $p = \lambda / h = (6.6\times10^{-34})/(1.5\times10^{-10}) = 4.4\times10^{-24}$، إذن $4.4\ kg{\cdot}m/s \times 10^{-24}$ في الاتجاه الموجب لمحور x.
منطقية الحل:	(أ) بالتعويض عكسيًا، $hc/\lambda_0 = (1.98\times10^{-25})/(5.625\times10^{-11}) = 3.52\times10^{-15}\ J$، و $eV = (1.6\times10^{-19})(2.2\times10^{4}) = 3.52\times10^{-15}\ J$ — فالطاقتان متطابقتان. (ب) الطول الموجي الأقصر كان سيعطي كمية تحرك أكبر؛ و $1.5\times10^{-10}\ m$ طول موجي سيني نمطي ويعطي كمية تحرك صغيرة من رتبة 10^{-24} kg·m/s، كما هو متوقَّع لفوتون واحد.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، فسِّر لماذا تجعل زيادةُ فرق جهد التعجيل V أقصرَ طول موجي λ_0 أصغر.

حاول بنفسك: فوتون أشعة سينية طوله $3.0\times10^{-11}\ m$. أوجد طاقته من $E = hc/\lambda$

حاول:

(أ) أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين. خذ ثابت بلانك 6.6×10^{-34} J·s، وسرعة الضوء 3.0×10^{8} m/s، والشحنة الأولية 1.6×10^{-19} C. إلكترونات معجَّلة بفرق جهد 5.0×10^{4} V تصطدم بمعدن. أوجد أقصر طول موجي، بالمتر، للأشعة السينية المتولّدة.

(ب) فوتون أشعة سينية طوله 6.0×10^{-10} m ويتحرك في الاتجاه السالب لمحور x

(i) أوجد طاقته (J).

(ii) أوجد اتجاه ومقدار كمية تحركه بـ kg·m/s..

شكل 5-2-3 • أثناء تصوير الصدر بالأشعة السينية، يوجّه أنبوب علوي شعاعًا مخروطيًا من بقعته البؤرية الصغيرة عبر صدر المريض إلى كاشف مسطح، بينما يعمل فنيّ الأشعة خلف حاجز واقٍ؛ وتُظهر الشاشة العظمَ الكثيف أبيض ساطعًا مقابل حقول رئوية أغمق نافذة للأشعة.

في سياق جديد:

تستخدم صورة الصدر السينية لمريض هذه الفيزياء بعينها. فالجهاز يعجّل إلكترونات خلال فرق جهد أنبوبة مختارة؛ وفرق الجهد الأعلى تنتج أشعة سينية أقصر طولًا موجيًا وبالتالي أعلى طاقةً للفوتون، فتنفذ خلال النسيج أقوى. ويختار فنيّو الأشعة الفرق جهد لتناسب جزء الجسم: فرق جهد أدنى لليد، وأعلى للصدر، حتى تعبر فوتونات كافية لتكوين صورة واضحة على الكاشف دون استخدام طاقة أكثر من اللازم.

دورك الآن: ضُبطت أنبوبة على جهد 4.0×10^{4} V. باستخدام $\lambda_0 = hc/(eV)$، قدّر أقصر طول موجي لأشعته السينية.

طبيعة العلم:

في عام ١٦٣٢، تخيّل جاليليو مقصورة أسفل سطح سفينة تُبحر بهدوء: ماء يتساقط، وأسماك في وعاء، وفراشات تحوم. فلا توجد أي ملاحظة داخل المقصورة تكشف ما إذا كانت السفينة ساكنة أم تتحرك بسرعة منتظمة. فما يقيسه المراقب يعتمد على حركة المراقب نفسه — هو نفس الدرس المستفاد من المطر المتساقط على نافذة الأتوبيس (الحافلة). ولا تكون السرعة ذات معنى إلا عندما يتم تحديد الإطار المرجعي

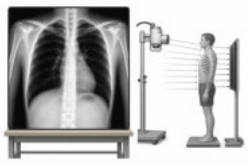
دورك الآن: اقترح كيف يمكن لمراقبَين دقيقين أن يسجّلا سرعتين مختلفتين لنفس قطرة المطر دون أن يكون أيّ منهما مخطئًا.

من الأصل — كيف ترى الأشعة السينية خلال الجسم. الأشعة السينية موجات كهرومغناطيسية قصيرة الطول الموجي جدًا وذات قدرة قوية على النفاذ خلال المادة (القدرة النافذة). ومع ذلك لا تنفذ بسهولة خلال المواد عالية الكثافة التي تحتوي كثيرًا من الكالسيوم، كالعظام، فلا تظهر على الفيلم الفوتوغرافي أو الحسّاس إلا أجزاء العظام ظلالًا بيضاء، مما يتيح رؤية داخل الجسم.

ويتقدّم العلم حين تُربَط كمية لا يمكن رؤيتها — هنا طاقة الفوتون التي تحملها أشعة سينية — بمعادلة واحدة، $E = hc/\lambda$، بشيء قابل للقياس، وهو الطول الموجي. ونموذج الفوتون نفسه الذي يحدد أقصر طول موجي في أنبوب يتنبّأ أيضًا بعمق نفاذ الإشعاع في النسيج، فيتيح للمهندسين تصميم صورة طبية آمنة ونافعة من المبادئ الأولى.

وقد عثر رونتغن على هذه الأشعة مصادفةً في نوفمبر 1895 وهو يعمل بأنابيب التفريغ، وجلب الاكتشاف أول جائزة نوبل في الفيزياء عام 1901. وربط ديوان وهنت لاحقًا حافةَ الطول الموجي القصير بفرق جهد الأنبوب — وهي العلاقة المستخدَمة هنا بعينها. فالمصادفة لا تصير اكتشافًا إلا حين يتتبّعها أحد بعناية.

دورك الآن: اقترح قياسًا واحدًا على طيف الشدة–الطول الموجي يتيح لك تحديد أي معدن استُخدِم هدفًا.



شكل 5-2-4 • تنفذ الأشعة السينية من المصدر خلال النسيج الرخو لكن يوقفها العظم الكثيف، فتُطبَع العظام ظلالًا بيضاء ساطعة على الكاشف.

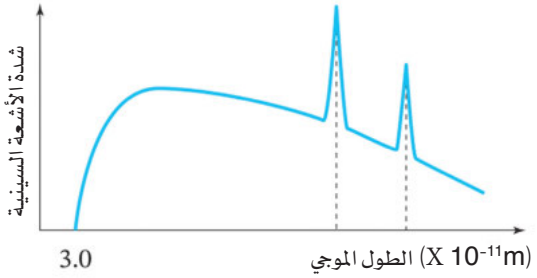
سؤال الدرس، وإجابته:

في أنبوبة، لا في الطبيعة. تُسحَب الإلكترونات خلال فرق جهد كبير وتصطدم بهدف معدني، حيث تتحول طاقتها الحركية إلى إشعاع عبر مسارين: انحرافُ الإلكترونات يعطي طيف متصلة، وانتقال إلالكترونات الداخلية من ذرات الهدف تعطي خطوطًا مميِّزة حادة. ويحدد فرق جهد التعجيل كمية الطاقة التي يحملها كل إلكترون نحو أقصى مدى يبلغه الطيف من جهة الطول الموجي القصير، عند $\lambda_0 = hc/(eV)$؛ ويحدد اختيار الهدف مواضع الخطوط الطيفية المميزة الحادة. ولأن الحزم الناتجة أعلى طاقة بكثير من حزم الضوء، فإنها تتسلل عبر الأنسجة الرخوة وتتوقف عند العظام — وهذا ما يرسم الصورة.

تمرين:

(أ) أوجد ما يلي لأقرب رقمين عشريين. بافتراض $h = 6.6\times10^{-34}$ J·s، و$c = 3.0\times10^{8}$ m/s، و$e = 1.6\times10^{-19}$ C، إلكترونات معجَّلة بفرق جهد 3.0×10^{4} V تصطدم بمعدن. أوجد أقصر طول موجي، بالمتر، للأشعة السينية المتولّدة.

(ب) يُبيَّن طيف الشدة–الطول الموجي للأشعة السينية المتولّدة بقذف معدن بإلكترونات معجَّلة في الشكل؛ ويقع حدّ قطعه الحادّ عند الطول الموجي القصير عند 3.0×10^{-11} m. أوجد فرق جهد التعجيل V، بالفولت، المستخدَمة لتوليد هذه الأشعة السينية.



شكل 5–2–5 • تمرين 2: طيف الشدة–الطول الموجي للأشعة السينية، أقل طول موجي عند 3.0×10^{-11} m وقمتين مميِّزتين.

(جـ) تُعجَّل إلكترونات بفرق جهد 1.0×10^{5} V وتصطدم بمعدن.

(i) أوجد طاقة الإلكترونات المعجَّلة بالجول.

(ii) أوجد أقصر طول موجي، بالمتر، للأشعة السينية المتولّدة.

(iii) أوجد كمية تحرك، بـkg·m/s، الفوتونات السينية ذات ذلك الطول الموجي الأقصر.

الدرس ٥-٣ — موجات المادة

؟ سؤال الدرس:
تمامًا كما يسلك الضوء سلوك جسيم وموجة معًا، هل يستطيع جسيم كالإلكترون أن يسلك سلوك موجة أيضًا؟

ستتعلم

بنهاية هذا الدرس، ستكون قادرًا على أن:

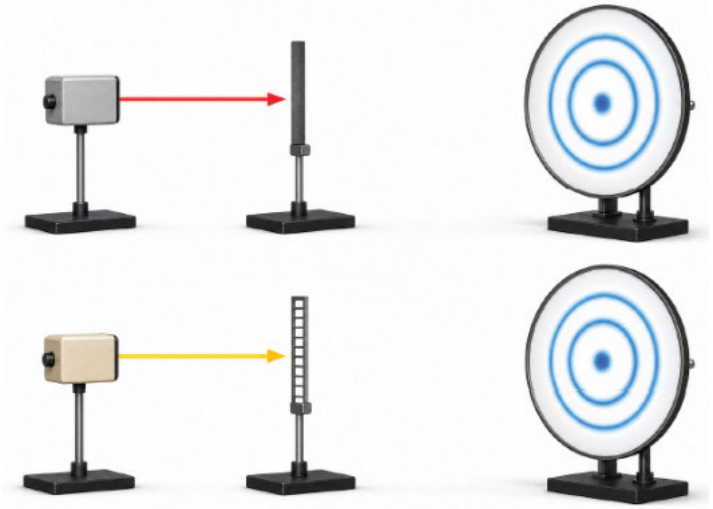
١. تشرح ما معنى أن يكون لجسم ذي كتلة طول موجي أصلًا، وتسمّية تلك الموجة الخاصة في حالة الإلكترون.

٢. تستخرج منها قيمة عددية: تحوّل كتلة وسرعة معينين إلى طول موجي، و مقارنة النتيجة بحجم الذرة.

٣. تستدل من ذلك الرقم على سبب قدرة المجهر الإلكتروني على تمييز تفاصيل لا يستطيع المجهر الضوئي الوصول إليها..

الظاهرة — توقّع قبل أن تستمر

أرسل حزمة ضيقة من إلكترونات سريعة خلال صفيحة رقيقة من الجرافيت ودعها تسقط على شاشة. قد تتوقع بقعة ساطعة واحدة حيث تتكدّس الجسيمات. لكن الشاشة تُظهر بدلًا من ذلك مجموعة حلقات ساطعة متحدة المركز، وهي بالضبط نوع النمط الذي يصنعه الضوء حين يمر خلال محزوز دقيق. فتيار «الجسيمات» قد انتشر وتداخل كموجة.



شكل 5-3-1 • حزمة إلكترونية خلال غشاء جرافيت تصنع حلقات الحيود المتحدة المركز نفسها التي يصنعها الضوء خلال محزوز — فالحزمة الإلكترونية تسير كموجة.

تنبأ:

(أ) إذا جُعِلت الإلكترونات في الحزمة تتحرك أسرع، فتكبر كمية تحركها p، فهل تتوقع أن تتباعد الحلقات أكثر أم تتقارب؟

(ب) هل تُظهر حزمة من جسيمات أثقل بكثير تتحرك بنفس السرعة نمط حلقات أوسع أم أضيق؟

فكرة أساسية:
موجة المادة — مقايضة الموجة والجسيم تجري في الاتجاهين: فما ظُنّ موجةً محضة تبيّن أنه يحمل كمية تحرك، وما ظُنّ جسيمًا محضًا تبيّن أن له طولًا موجيًا..

استكشف — قدِّر طول موجة الإلكترون من حلقاته

ما ستفعله: ما ستفعله: ترسل حزمة إلكترونية خلال غشاء جرافيت عند عدة فروق جهد تعجيل وتقيس كيف يتغيّر حجم حلقة الحيود مع نمو كمية تحرك الإلكترونات.

الزمن: 15 دقيقة

ما تحتاجه:

- أنبوبة حيود إلكتروني
- مصدر تيار مستمر عالي الفرق جهد
- فولتميتر
- مسطرة

مسطرة

فولتيمتر

مصدر طاقة عالي الجهد

انبوبة الحيود

الخطوات:

١ اضبط مصدر الطاقة عالي الجهد على فرق جهد تعجيل معلوم V واقرأه على الفولتميتر. وكلما أسرعت الإلكترونات كبرت كمية تحركها $p = mv$..

٢ بالمسطرة، قِس قطر D لحلقة ساطعة مختارة على الشاشة.

٣ ارفع V على خطوات، وسجّل للحلقة نفسها V وقطرها D في كل مرة.

٤ احسب لكل محاولة $D \times \sqrt{V}$ وأدخله في العمود الأخير.

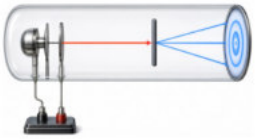
المحاولة	الجهد V بوحدة kV	قطر الحلقة D بوحدة cm	حاصل $D \times \sqrt{V}$ بوحدة $cm \times \sqrt{kV}$
١.			
٢.			
٣.			

حلّل ما جمعته:

(أ) مع ارتفاع فرق جهد التعجيل V، ماذا يحدث لقطر الحلقة D؟ وانظر نزولًا في العمود الأخير — ماذا تلاحظ على الجداء $D \times \sqrt{V}$ ؟

(ب) قطر الحلقة D ينمو مع الطول الموجي λ، والـ V الأكبر يعطي كمية تحرك p أكبر. ومن ثبات $D \times \sqrt{V}$ تقريبًا، احتجّ على كيفية اعتماد λ على p، وتنبّأ بالحلقات التي ستصنعها حزمة إلكترونية أبطأ بكثير؟

اكتب تفسيرك في سطرين قبل أن تقرأ الصفحة التالية.



شكل 5-3-2 · أنبوب حيود إلكتروني: يطلق المدفع إلكترونات خلال فرق جهد التعجيل V إلى هدف جرافيت؛ ويُقاس نصف قطر الحلقة على الشاشة

ملاحظة عملية:

أظلِم الغرفة، وقِس في كل مرة الحلقة الساطعة نفسها عبر مركزها من الحافة الداخلية إلى الحافة الداخلية؛ وثِق بالاتجاه العام عبر التشغيلات أكثر من أي قراءة مفردة.

من الملاحظة إلى النموذج:

الجسيم المتحرك يحمل موجة

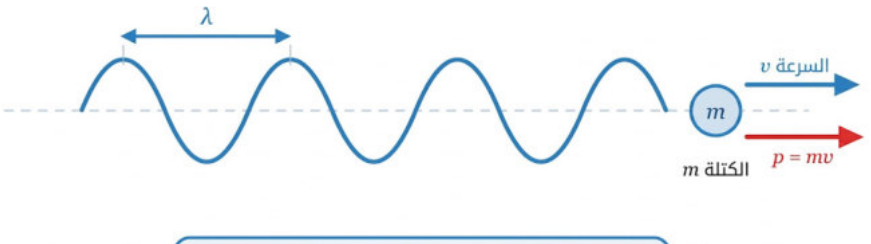
كان التبرير الذي أدى إلى ظهور هذه الفكرة هو مبدأ التناظر. فقد ظل الضوء يُنظر إليه لمدة قرن على أنه موجة، ثم، في التأثير الكهروضوئي وفي تشتت الأشعة السينية، على السلوك كشيء يحمل كمية تحرك

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

وسأل دي برولي: لماذا تستخدم الطبيعة تلك العلاقة في اتجاه واحد فقط؟ وقرأها معكوسة: بمعلومية شيء ذي كمية تحرك معينة، حُلّ المعادلة نفسها لإيجاد λ. ولا شيء في تلك الخطوة دليل — إنه تخمين، لكنه تخمين دقيق قابل للاختبار. فإن كانت حزمة من الإلكترونات تحمل حقًّا طولًا موجيًا بحجم الذرّة، فإن توجيهها نحو بلورة، تصادف أن تكون المسافات بين مستويات ذراتها تقريبًا بنفس الحجم، لا بد أن ينتج عنه نمط الحلقات الذي ينتجه محزوز حيود مع الضوء. وحلقات الشكل 1-3-5 هي دليل على نجاح هذا الاختبار.

الطول الموجي تحدده كمية التحرك:

اقرأ الصيغة كقاعدةً تتعلق بمقامها. فكل ما يجعل الشيء أصعب انحرافًا — كتلة أكبر، سرعة أكبر — يقع تحت ثابت بلانك، فكل زيادة كهذه تُقلّل (تقلص) الناتج؛ ولأن الثابت في الأعلى نفسه من رتبة 10^{-34}، فحتى المقام الصغير جدًا يترك نتيجة صغيرة جدًا. وتلك الحقيقة وحدها تحدد أين يمكن ملاحظة التأثير على الإطلاق.. فللحصول على طول موجي كبير بما يكفي للحيود، يجب أن تكون كمية التحرك ضئيلة، وهو ما يعني عمليًا شيئًا خفيفًا كالإلكترون مدفوعًا بفروق جهد صغيرة لا أكثر. وزيادة فرق جهد التعجيل في الاستكشاف (التجربة) يفعل العكس: يزيد كمية التحرك، ويقلّل الطول الموجي، ويسحب الحلقات إلى الداخل — وهو بالضبط سبب ثبات حاصل الضرب في العمود الأخير.



$$\lambda = h/p = h/(mv)$$
$h \approx 6.63\times10^{-34}$ J·s

شكل 5-3-3 · الوصفان مرسومين معًا: كتلة m تسير بسرعة v، والموجة التي تجري على المسار نفسه، ويثبّت تباعدَ قممها كميةُ التحرك

حقيقة أساسية:

المقياس — إلكترون المثال المحلول يخرج عند نحو 7×10^{-11} m، أي تقريبًا عرض ذرة؛ أما كرة تنس مقذوفة فتخرج قرب 10^{-34} m، أدنى بكثير من أي طول قابل للقياس أو يمكن لشيء أن يحيد حوله. وكلا الجوابين من الصيغة نفسها. فالسلوك الموجي ليس نادرًا ولا غريبًا — بل كوني، ولأي شيء أثقل من ذرة هو غير مرئي بالمرة.

الخلاصة

للجسيمات خواص موجية. ويُسمى هذا موجةَ مادية. وعلى وجه الخصوص، عندما يكون الجسيم إلكترونًا تُسمى الموجة موجةً إلكترونية. ولتكن كمية تحرك الجسيم p [kg·m/s]، وكتلة الجسيم m [kg]، والسرعة v [m/s]، فإن الطول الموجي λ [m] لموجة المادة يُعبَّر عنه بـ:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

ملاحظة:

انتبه — اعمل بالوحدات الدولية طوال الوقت: فكتلة تُدسّ بالغرام، أو سرعة بـ km/s، تزحزح الجواب أُسسًا عشرية كاملة، وعند هذا المقياس يكون الأسّ العشري هو الجواب. واقسم على كمية التحرك، لا على السرعة وحدها.

صندوق المعادلات:

طول موجة المادة:	$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$ (h: ثابت بلانك)
كمية التحرك: $p = mv$ (الوحدة: kg·m/s)	
الثوابت: $h = 6.63\times10^{-34}$ J·s ≈؛ **كتلة الإلكترون** $m = 9.1\times10^{-31}$ kg	

مثال محلول:

الموقف:	أوجد طول موجة إلكترون سرعته $1.0 \times 10^{7}\ m/s$، بافتراض $h = 6.6 \times 10^{-34}\ J\cdot s$ وكتلة الإلكترون $9.1 \times 10^{-31}\ kg$.
المعطيات والمطلوب:	$v = 1.0 \times 10^{7}\ m/s$ ، $m = 9.1 \times 10^{-31}\ kg$ ، و $h = 6.6 \times 10^{-34}\ J\cdot s$؛ والمطلوب λ.
التمثيل:	يحمل الإلكترون موجة مادة يثبّت طولَها الموجي كميةُ تحركه $p = mv$.
الاستراتيجية:	احسب أولًا $p = mv$ من الكتلة والسرعة، ثم عوض في $\lambda = h/p$
الحل الموضح:	**كمية التحرك p:** $p = (9.1 \times 10^{-31}) \times (1.0 \times 10^{7}) = 9.1 \times 10^{-24}\ kg\cdot m/s.$ والطول الموجي: $\lambda = 6.6 \times 10^{-34} \div 9.1 \times 10^{-24} \approx 7.3 \times 10^{-11}\ m$
منطقية الحل:	الطول الموجي في حدود $10^{-10}\ m$، أي قريب من حجم الذرة وأقصر كثيرًا من الضوء المرئي، نحو $5 \times 10^{-7}\ m$. وهذا الطول الصغير هو ما يتيح لحزمة الإلكترونات تمييز تفاصيل ذرية.
فسِّرها بنفسك:	في جملة واحدة، قل لماذا يجعل تسريعُ الإلكترون طولَ موجته المادية أقصر.

جرِّب بنفسك: أوجد طول موجة جسم كتلته $0.10\ kg$ وسرعته $30\ m/s$، حيث $h = 6.6 \times 10^{-34}\ J\cdot s$.

حاول:

أوجد لأقرب رقمين عشريين طول موجة إلكترون سرعته $2.0 \times 10^{6}\ m/s$، حيث $h = 6.6 \times 10^{-34}\ J\cdot s$ و $m = 9.1 \times 10^{-31}\ kg$.

في سياق جديد

يوظّف المجهر الإلكتروني موجةَ المادة. فلأن الموجة الإلكترونية يمكن أن يُعطى لها طول موجي أقصر آلاف المرات من طول موجة الضوء المرئي، فإن جهازًا يركّز موجات إلكترونية بدل أشعة الضوء يستطيع تصوير أجسام صغيرة للغاية بوضوح — كالفيروسات وتراكيب الأسطح الدقيقة التي لا يستطيع مجهر ضوئي عادي تمييزها أبدًا. وكلما قصر الطول الموجي أمكن رؤية التفاصيل بدقة.

دورك الآن: قارن موجة المثال $\lambda \approx 7.3 \times 10^{-11}\ m$ بالضوء الأخضر $\lambda \approx 5 \times 10^{-7}\ m$. كم مرة تقريبًا تكون موجة الإلكترون أقصر؟ ولماذا يتيح ذلك للمجهر الإلكتروني تفاصيل أدق؟

طبيعة العلم:

من الأصل — تحويل فكرة غريبة إلى أداة عملية. الادّعاء بأن الجسيم موجة أيضًا يبدو مفارقة، لكنه قُبل بعد اختباره؛ فقد حيّدت حزم الإلكترونات وأنتجت حلقات موجية، ووافقت أطوالها المقاسة $\lambda = \frac{h}{p}$. وما إن نجت العلاقة من ذلك الاختبار حتى لم تُترَك طُرفة — بل صارت مبدأ عمل المجهر الإلكتروني، وهو جهاز لا يعمل إلا إذا كانت الإلكترونات تسلك حقًّا سلوك موجات قصيرة الطول الموجي. فالنموذج يكسب الثقة حين يؤكّد القياسُ تنبؤَه المفاجئ ثم يؤدي عملًا موثوقًا.

وقد اقترح دي برولي هذا في أطروحته عام 1924 دون تجربة وراءه، على التناظر وحده؛ ثم حاد ديفيسون وجيرمر، وج. ب. طومسون، الإلكتروناتِ عام 1927 فحوّلوا الحدس فيزياءً. فالفرضية الجريئة مرحَّب بها في العلم، لكنها لا تكسب مكانها إلا حين يوافقها قياس.

دورك الآن: اقترح ملاحظة واحدة يمكن لمجرِّب إجراؤها بأنبوبة حيود إلكتروني لاختبار التنبؤ بأن حزمة إلكترونية أسرع لها طول موجي أقصر.

سؤال الدرس، وإجابته:

نعم، والدليل صورة فوتوغرافية. فالإلكترونات المقذوفة إلى غشاء جرافيت تسقط في حلقات متحدة المركز، وهو ما لا يستطيعه إلا شيء ينتشر ويتداخل؛ أما تيار من كرات صلبة صغيرة فكان سيصنع بقعة واحدة. وتوافق أحجامُ الحلقات الطولَ الموجي المتنبَّأ به من كمية تحرك الإلكترونات، وتتقلّص عند رفع فرق جهد التعجيل، تمامًا كما هو متوقَّع. وسبب بقاء الأثر خفيًّا في الحياة اليومية حسابي لا مبدئي: اقسم ثابت بلانك على كمية تحرك أي شيء تستطيع حمله يكن الناتج أصغر من أي جسم يمكن أن ينثني حوله. والطول الموجي القصير نفسه الذي يجعل الأثر غير مرئي لكرة تنس هو ما يجعل المجهر الإلكتروني ممكنًا.

تمرين:

عتبر إلكترونًا كتلته m وشحنته $-e$ معجَّلًا من السكون خلال فرق جهد V. افترض أن ثابت بلانك h.

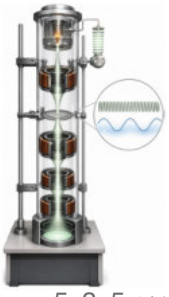
(i) أوجد كمية تحرك الإلكترون المعجَّل.

(ii) أوجد الطول الموجي للموجة الإلكترونية.

شكل 5-3-4 • مجهر إلكتروني نافذ يرسل حزمة إلكترونية دقيقة نزولًا في عمود مفرَّغ، تركّزها ملفات عدسات مغناطيسية حلقية على عيّنة ضئيلة، منتجةً صورة رمادية عالية التكبير لفيروس مميَّز إلى ما وراء متناول أي مجهر ضوئي.

مصطلح:

المجهر الإلكتروني — جهاز يستخدم موجات إلكترونية، طولها الموجي أقصر بكثير من طول موجة الضوء، لتصوير أجسام صغيرة للغاية بوضوح.



شكل 5-3-5 • عمود مجهر إلكتروني يركّز الحزمة الإلكترونية بعدسات مغناطيسية على العيّنة؛ ويقارن الإطار المُدرَج الطول الموجي الإلكتروني القصير جدًا (الأخضر) بالطول الموجي الأطول كثيرًا للضوء (الأزرق) — ولهذا تميّز الحزمة الإلكترونية تفاصيل دقيقة يعجز عنها الضوء.

المؤلفون

Maki Komizo
Yukihiro Kawakubo
Tomoaki Tsunoyama
Yoko Sasamori
Yuki Toda
Ritsu Igarashi
Yasser Mahdy
Kotomi Shirai (Designer)

المراجعون

أ.د. هاني نظمي سليمان
أ.د. هند علي محمد علي
أ.د. إسلام محمد شيحة
أ.د. وليد محمد أحمد دسوقى
د. عزيزة رجب خليفة
د. حنان أبو العباس محمد
أ. أيمن شوقي السيد
أ. سعيد محمد على
أ. نورة محمد عبد المجيد

الإشراف العام

د. جبريل أنور حميدة

رئيس الادارة المركزية لتطوير المناهج

EDUCATION SPRINGS NEW LIFE

SPRIX

CACD

رؤية 2030 VISION OF EGYPT