

إنّ تسخين الهواء داخل بالون "الهواء الساخن" يرفع درجة حرارة الهواء، ويؤدّي إلى تمدّده وإجباره على الخروج من الفتحة السفلية. كما أنّ نقص الهواء في الداخل يعني أنّ كثافته أقلّ، أي أنّ هناك قوّة طفو (قوّة دفع) محصلة نحو الأعلى على البالون.

سندرس في هذا الفصل درجة الحرارة وأثرها في المادة؛ التمدّد الحراريّ وقوانين الغازات. ويُعدّ قانون الغاز المثالي والتعبير عنه بدلالة الجزيئات الأكثر أهمية.

الفصل 13

درجة الحرارة ونظرية الحركة

إنّ هذا الفصل هو الأول من ثلاثة فصول (13، 14، 15) مكرّسة لمواضيع ذات علاقة ببعضها هي: درجة الحرارة، والحرارة، والديناميكا الحرارية. وسيخصص غالبية هذا الفصل لتمحيص نظرية أنّ المادة مبنية من ذرّات، وأنّ هذه الذرّات في حركة عشوائية مستمرة. وتُسمّى هذه النظرية "نظرية الحركة". كما سنناقش أيضًا مفهوم درجة الحرارة وكيفية قياسها، بالإضافة إلى الخصائص المقيسة تجريبيًا للغازات التي تخدم تأسيس نظرية الحركة هذه.

1-13 النظرية الذرية للمادة

تعود فكرة أنّ المادة مكوّنة من ذرّات إلى قدماء الإغريق. حيث رأى الفيلسوف الإغريقي ديموقريتوس أنّه إذا قطعت قطعة صغيرة من مادة نقيّة - مثلًا قطعة حديد - إلى قطع أصغر فأصغر، فستصل أخيرًا إلى قطعة لا يمكن تقسيمها أكثر. تُسمّى هذه القطعة الذرة، والتي تعني بالإغريقية "غير قابلة للانقسام".* لقد أصبحت النظرية الذرية اليوم مقبولة بصورة عامّة. أمّا الدلائل التجريبية التي تؤكّدها، فقد برزت في القرون الثامن عشر والتاسع عشر، والعشرين، وكثيرٌ منها تمّ الحصول عليه من تحليل التفاعلات الكيميائية.

النظرية الذرية - الدليل.

* اليوم لا ينظر إلى الذرة على أنّها غير قابلة للانقسام، بل إنّها تتكوّن من النواة (حتوي بروتونات ونيوترونات) والإلكترونات.

الكتل الذرية والجزئية

سوف نتكلم كثيرًا عن الكتل النسبية للذرات والجزئيات؛ أي ما نسقيه الكتلة الذرية أو الكتلة الجزئية، على الترتيب.* وتعدّ هذه أساسًا على اختيار ذرة نظير الكربون ^{12}C وتعيين قيمة 12.000 وحدة كتلة ذرية (u) لها. وبدلالة الكيلوغرام

$$1 \text{ u} = 1.6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

وهكذا تكون الكتلة الذرية للهيدروجين 1.0078 u، وقيم ذرات أخرى مبيّنة في الجدول الدوري للعناصر داخل الغلاف الخلفي لهذا الكتاب، وكذلك في (الملحق ب). وتُعرّف الكتلة الجزئية لمركب ما بأنها مجموعة الكتل الذرية المكونة لجزئيات ذلك المركب.**

إنّ الجزء المهمّ من الأدلة على النظرية يُعرف بالحركة البراونية، نسبةً إلى عالم الأحياء روبرت براون الذي اكتشفها عام 1827. عندما كان براون يلاحظ حبوب اللقاح المعلقة في الماء تحت مجهره، لاحظ أن الحبوب الدقيقة تتحرك في مسارات متعرجة (الشكل 13 - 1)، رغم أنّ الماء كان ساكنًا تمامًا. تُفسّر النظرية الذرية الحركية البراونية بسهولة إذا أخذنا الفرض المعقول بأن ذرات أيّ مادة في حالة حركة مستمرة. عند ذلك فإنّ حبوب اللقاح الدقيقة تُدفع للتحرك بفعل حركة جزئيات الماء.

في عام 1905 فحص ألبرت آينشتاين الحركة البراونية من الوجهة النظرية وكان قادرًا بواسطة البيانات التجريبية على حساب الحجم والكتل التقريبية للذرات والجزئيات. وقد أظهرت حساباته أنّ قطر الذرة النموذجية يبلغ حوالي 10^{-10} m .

في بداية (الفصل 10)، ميّزنا حالات المادة الثلاث أو أطوار المادة: الصلب، والسائل، والغاز، اعتمادًا على خصائص عينية "تدرج كبير". وسنرى الآن كيفية اختلاف هذه الأطوار الثلاثة للمادة من وجهة النظر الذرية أو المجهرية. من الواضح أنّ الذرات والجزئيات تؤثر بقوى جاذبية في بعضها، وإلا فكيف ستتماسك قطعة من الحجر أو الألمنيوم معًا؟ هناك طبيعة كهربائية لقوى الجذب هذه بين الجزئيات (سيذكر الكثير من ذلك في فصول لاحقة). وعندما تقترب الجزئيات من بعضها، يجب أن تصبح القوى بينها قوى تنافر (تنافر كهربائي بين إلكتروناتها الخارجية)، وإلا فكيف ستشغل المادة حيّزًا؟ وهكذا تحافظ الجزئيات على إبقاء مسافة دنيا بينها.

في المادة الصلبة تكون قوى التجاذب كبيرة لدرجة أنّ حركة الذرات والجزئيات تكون ضئيلة (اهتزازية) حول مواقع سكونها، في نظام يعرف عادة بالشبكة البلورية، كما هو مبين في (الشكل 13 - 1أ). أمّا في السوائل فتكون حركة الذرات والجزئيات أسرع، أو أنّ القوى بينها تكون أضعف، لدرجة أنّها تنتقل بحرية أكثر، كما في (الشكل 13 - 2ب). في حين تكون القوى في الغازات ضعيفة جدًا، أو أنّ السرعات تكون عالية، لدرجة أنّ الجزئيات لا تبقى قريبةً من بعضها، بل إنّها تتحرّك بسرعة في الاتجاهات كلّها، (الشكل 13 - 2ج)، لتماماً أيّ وعاء، وأحيانًا تصطدم ببعضها.

* أحيانًا تستعمل تعبيرات الوزن الذري والوزن الجزئي لهذه الكميات، لكننا في الواقع نقارن الكتل.

** العنصر هو مادة مثل الذهب، والحديد، والنحاس، التي لا يمكن تجزئتها لمواد أبسط بالوسائل الكيماوية. أمّا المركبات فهي مواد مكونة من عناصر ويمكن خليلها إلى ذرات كثنائي أكسيد الكربون والماء. إنّ أصغر جزء من العنصر هي الذرة، في حين أنّ الجزيء هو أصغر جزء من المركب. وتتكوّن الجزئيات من ذرات؛ فجزء الماء مثلاً، مكوّن من ذرتين من الهيدروجين وذرة واحدة من الأكسجين، وصيغته الكيماوية هي H_2O .

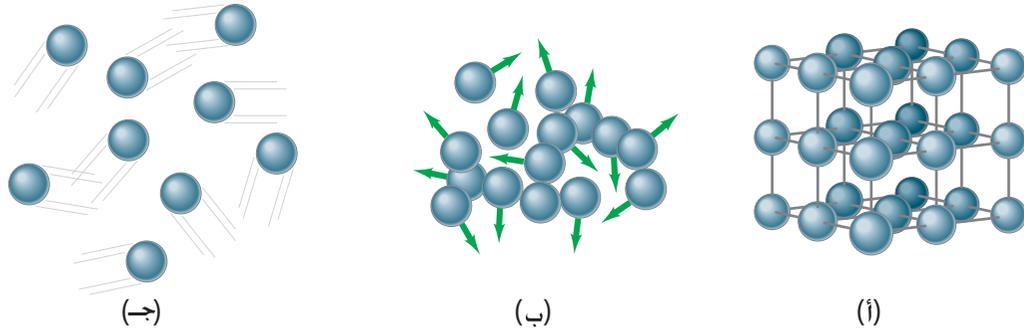


الشكل 13 - 1 مسار جسيم دقيق (حبوب لقاح مثلاً) معلق في الماء. الخطوط المستقيمة تصل بين الأماكن المشاهدة للجسيم في فترات زمنية متساوية

حالات المادة

الخصائص الجاهرية والمجهرية.

الشكل 13 - 2 ترتيب الذرات في (أ) صلب بلوري. (ب) سائل. (ج) غاز.



في المتوسط، تكون السرعة عالية في الغازات بحيث عندما يتصادم جزيئان، فإنّ قوّة التجاذب ليست قويّة بما يكفي لحفظهما قريبين، وينتقلان في اتجاهين جديدين.

المثال 1-13 خُمّن البعد بين الذرات

تساوي كثافة النحاس $8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ، وكلّ ذرة نحاس كتلتها 63 u . احسب بالتقريب المسافة المتوسطة بين ذرات النحاس المتجاورة.

النّهج: نفترض مكعباً من النحاس طول ضلعه 1 m . ومن الكثافة، يمكننا حساب كتلة مكعب حجمه 1 m^3 . نقسم ذلك على كتلة ذرة واحدة (63 u) لإيجاد عدد الذرات في 1 m^3 .

ليكن N عدد الذرات في طول 1 m^3 . وهكذا، فإنّ $(N)(N)(N) = N^3$ هو عدد الذرات في 1 m^3 .

الحل: كتلة ذرة نحاس واحدة هي $1.05 \times 10^{-25} \text{ kg} = 63 \times 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

وهذا يعني أنه في مكعب طول ضلعه 1 m (الحجم 1 m^3) هناك

$$\frac{8.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3}{1.05 \times 10^{-25} \text{ kg/atom}} = 8.5 \times 10^{28} \text{ atoms/m}^3$$

ولذلك على أحد جوانب مكعب حجمه $V = l^3$ هناك عدد من الذرات $(8.5 \times 10^{28})^{1/3} \text{ atoms} = 4.4 \times 10^9$.

لذا، تكون المسافة بين الذرات المتجاورة

$$\frac{1 \text{ m}}{4.4 \times 10^9 \text{ atoms}} = 2.3 \times 10^{-10} \text{ m}$$

ملحوظة: انتبه للوحدات. مع أنّ "الذرات" ليست وحدات، إلا أنه من المفيد تضمينها للتأكد أنك تحسب بصورة صحيحة.

2-13 درجة الحرارة وموازين الحرارة

في الحياة اليومية، تُعدّ درجة الحرارة مقياساً لمدى سخونة الجسم أو برودته. ومن هنا يقال إنّ الفرن الساخن درجة حرارته عالية، أمّا درجة حرارة الجليد فمنخفضة.

إنّ كثيراً من خصائص المادة تتغير مع درجة الحرارة. فمثلاً، هناك العديد من المواد تتمدد عند تسخينها*. فعمود من الحديد سيزداد طوله عندما يكون ساخناً، ولكنه يتقلص قليلاً تبعاً لانخفاض درجة الحرارة هذه، والتي بسببها توضع فواصل قابلة للانضغاط أو وصلات للتمدد (الشكل 13 - 3) على مسافات منتظمة. كما أنّ المقاومة الكهربائية للمادة تتغير كذلك بتغير درجة الحرارة (انظر الفصل 18) واللون الذي يشع من الأجسام على الأقل عند درجة الحرارة العالية. ومن الممكن أنك قد لاحظت أن سلك التسخين في المدفأة الكهربائية يتوهج بلون أحمر عندما يسخن. وعند درجات الحرارة الأعلى، تتوهج المواد الصلبة كالحديد بلون أصفر وحتى الأبيض. إنّ الضوء الأبيض الناتج من مصباح الإنارة المتوهج ينتج من سلك تنجستين حار جداً. ويمكن قياس درجة حرارة سطح الشمس والنجوم الأخرى بواسطة اللون (وبدقة أكبر الأطوال الموجية) للضوء الذي تشعّه.

تسمى الأدوات المصممة لقياس درجات الحرارة موازين حرارة.

هناك أنواع كثيرة من الموازين، إلا أنّ عملها يعتمد دائماً على خاصية في المادة تتغير مع درجة الحرارة. تستند معظم موازين الحرارة الدارجة إلى تمدد المادة بزيادة درجة الحرارة. إنّ أول فكرة لميزان الحرارة (الشكل على 13 - 14)، تعود إلى غاليليو، عن طريق استخدامه تمدد الغاز. تتألف موازين الحرارة الدارجة اليوم من أنبوب زجاجي أجوف مملوء بالزئبق أو بالكحول الملون بصبغة حمراء، كأول موازين حرارة مستعملة (الشكل 13 - 4 ب) (الشكل 13 - 4 ج) يبينان ميزان حرارة طبي من نوع آخر يعتمد على تغير الكثافة مع درجة الحرارة.

* معظم المواد تتمدد بزيادة درجة الحرارة، ولكن ليس كلّها. فالماء، مثلاً، يتقلص مع زيادة درجة الحرارة في مدى الحرارة 0°C إلى 4°C (انظر البند 13 - 4).

الشكل 13 - 3 وصلة تمدد على جسر





(ج)

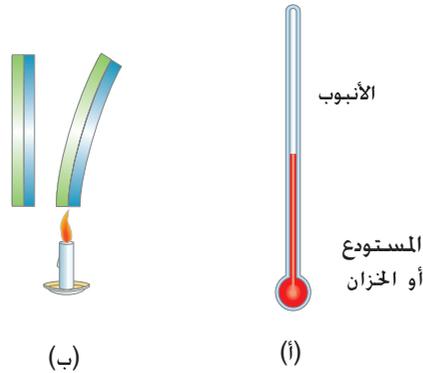


(ب)



(أ)

(الشكل 13 - 4) نموذجٌ لفكرة غاليليو الأصلية لميزان الحرارة. (ب) موازين حرارة حقيقية بواسطة الأكاديمية ديلا سيمنتو (1657-1667) بنيت في فلورنسا وكانت من بين المعروفة مبكرًا. تحتوي هذه الأدوات الحساسة على الكحول، وأحيانًا كان ملونًا مثل كثير من موازين الحرارة في أيامنا هذه. (ج) وكانت موازين الحرارة الطبية لها شكل الضفدع بواسطة الأكاديمية ديلا سيمنتو يمكن ربطها على معصم المريض. لكل من الكرات الصغيرة المعلقة في السائل كثافة مختلفة قليلًا. عدد الكرات التي يمكن أن تغطس كانت مقياسًا لحمى المريض.

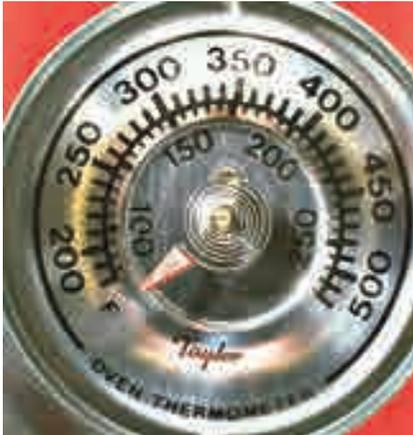


(ب)

(أ)

الشكل 13 - 5 (أ) ميزان حرارة
زئبقي أو كحولي في الزجاج.
(ب) شريحة معدنية مزدوجة.

الشكل 13 - 6 صورة لميزان حرارة
يستخدم شريحة معدنية مزدوجة
ملفوفة.



في ميزان الحرارة الذي يحتوي سائلًا في زجاج، يتمدد السائل أكثر من تمدد الزجاج عند رفع درجة الحرارة. لذلك، يرتفع مستوى السائل في الأنبوب (الشكل 13 - 5). وعلى الرغم من أن الفلزات تتمدد بالحرارة أيضًا، إلا أن الزيادة في طول قضيب فلزي عادة تكون صغيرة ويصعب قياسها بدقة للتغيرات العادية في درجة الحرارة. وعلى أي حال، يمكن عمل ميزان حرارة مفيد بربط فلزين مختلفين معًا بحيث يكون معدل تمددهما مختلف (الشكل 13 - 5). عند زيادة درجة الحرارة، يختلف مقدار التمدد بسبب انحناء الشريحة الفلزية المزدوجة. وتكون الشريحة المزدوجة عادة بصورة ملف، إحدى نهايتها ثابتة، أما الأخرى فترتبط بمؤشر (الشكل 13 - 6). ويستخدم هذا النوع من موازين الحرارة كميزان حرارة الهواء، وميزان حرارة الأفران، ومفاتيح أجهزة إعداد القهوة، ومنظم الحرارة في الغرفة للتحكم بفتح السخانات وإغلاقها، ومكيفات الهواء. تستخدم موازين الحرارة الدقيقة الخصائص الكهربائية (الفصل 18)، مثل موازين المقاومة، والازدواج الحرارية وعادة مع قراءة رقمية.

جناحا الطائرة والرفع الديناميكي

لقياس درجة الحرارة بصورة كمية: لا بد من تعريف نوع من التدرج العددي. إن أكثر التدرجات شيوعًا هو تدرج سيلزيوس، ويدعى أحيانًا تدرج سنتغراد. أما في الولايات المتحدة، فإن تدرج فهرنهايت أيضًا شائع. ولكن أكثر التدرجات أهمية من الناحية العلمية هو التدرج المطلق، أو كلفن، وسوف يتم مناقشته لاحقًا في هذا الفصل.

إن إحدى الطرائق لتعريف تدرج حراري هو تعيين قيم اختيارية لدرجتي حرارة يمكن إعادة قياسهما. وللتدرجين السيلزيوسي والفهرنهايتي، تم اختيار درجتي حرارة لتكونا نقطتي التجمد والغليان* للماء، وتؤخذان عند الضغط الجوي. فدرجة التجمد في التدرج السيلزيوسي هي الصفر 0°C ودرجة الغليان 100°C .

* درجة جمد مادة ما هي درجة الحرارة التي يكون عندها طورًا الحالة الصلبة والسائل في حالة اتزان: أي دون تحول السائل كاملاً إلى صلب أو العكس. تجريبياً، وجد أن ذلك يحدث عند درجة حرارة محددة تحت ضغط معين. وكذلك درجة الغليان عرفت بدرجة الحرارة التي عندها يكون السائل والغاز في حالة اتزان، ولأن هاتين النقطتين تتغيران مع الضغط، لذا يجب تحديده (عادة 1 atm).

على التدرج الفهرنهايتي، عُرِّفت درجة التجمد عند 32°F ، ودرجة الغليان عند 212°F . يُدرَج ميزان الحرارة بوضعه في ظروف هُيئت بدقة عند كل من درجتي الحرارة، ووضَع علامة عند موضع السائل أو المؤشر: في ميزان سيلزيوس، المسافة بين العلامتين تُقسم إلى مئة فترة متساوية تمثل كل درجة بين 0°C و 100°C (سنتغراد تعني مئة خطوة). أما في تدرج فهرنهايت، فإن المسافة بين 32°F و 212°F تقسم إلى 180 فترة. ولدرجات الحرارة تحت نقطة التجمد وفوق درجة غليان الماء يمكن عمل امتداد للتدرج باستعمال طول الفترة نفسه.

وعلى أي حال، فإن موازين الحرارة تستخدم عبر مدى محدد نظرًا لمواصفات هذه الموازين الخاصة. فمثلاً، يتجمد سائل الزئبق في الميزان الزئبقي عند نقطة معينة، ودون هذه الدرجة يصبح الميزان عديم الفائدة.

كما أن ذلك ينطبق فوق درجات حرارة معينة والتي عندها يتبخّر السائل. ولدرجات الحرارة المنخفضة كثيرًا أو المرتفعة أيضًا، تستعمل موازين خاصة سنذكر بعضها لاحقًا.

إن كل درجة حرارة على ميزان سيلزيوس تقابل درجة على ميزان فهرنهايت، (الشكل 13 - 7). يمكن التحول بسهولة من تدرج إلى آخر إذا تذكرت أن 0°C مقابل 32°F ، وأن مدى 100°C على ميزان سيلزيوس تقابل 180° على تدرج فهرنهايت. وهكذا، فإن درجة فهرنهايت واحدة (1°F) تقابل $\frac{5}{9}$ من $100/180 = \frac{5}{9}$ على مقياس سيلزيوس (1°C).

ملاحظة: عندما تشير إلى درجة حرارة معينة، نقول "درجة مئوية" كما في 20°C ؛ ولكن عندما تشير إلى تغير في الحرارة أو في فترة حرارية، كما في " 2°C " ويمكن كتابة التحويل بين مقياسي الحرارة على الصورة .

أي أن $1^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9}^{\circ}\text{C}$ ويمكن كتابة التحويل بين التدرجين كما يلي:

$$T(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}T(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad \text{أو} \quad T(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9}[T(^{\circ}\text{F}) - 32]$$

وبدل من حفظ هاتين العلاقتين (حيث يسهل الخلط بينهما)، عادة نتذكر أن $0^{\circ}\text{C} = 32^{\circ}\text{F}$ وأنّ تغيّر 5°C يساوي تغيّرًا مقداره 9°F .

المثال 13-2 كيف تقيس درجة حرارتك؟

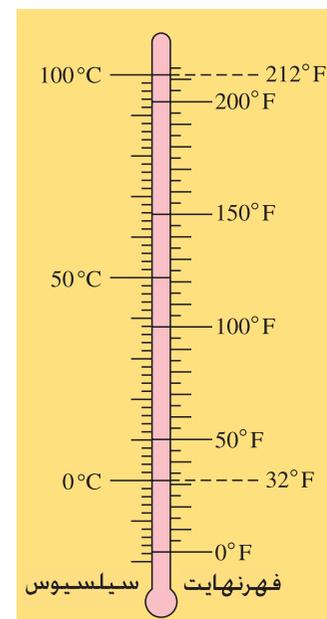
درجة حرارة الجسم الطبيعي هي 98.6°F . ماذا تعادل هذه الدرجة على تدرج سيلزيوس؟
النهج: تذكر أن $0^{\circ}\text{C} = 32^{\circ}\text{F}$ ، وأنّ $9^{\circ}\text{F} = 5^{\circ}\text{C}$

الحل: أولاً، نقرن درجة الحرارة المعطاة بدرجة جُمَد الماء (0°C). أي أنّ 98.6°F هي $66.6^{\circ}\text{F} = 98.6 - 32.0$ فوق درجة جُمَد الماء. ولأنّ كل درجة $^{\circ}\text{F}$ تساوي $\frac{5}{9}^{\circ}\text{C}$ ، فهذا يكافئ درجة سيلزيوس $37.0 = \frac{5}{9} \times 66.6$ فوق درجة التجمد. درجة التجمد هي 0°C . لذلك، فدرجة الجسم تساوي 37.0°C .

التمرين أ: عين درجة الحرارة التي عندها يتفق التدرجان ($T_{\text{C}} = T_{\text{F}}$).

إنّ المواد المختلفة لا تتمدد بالكيفية نفسها فوق مدى واسع من درجات الحرارة. وبالتالي، إذا درّجنا أنواعًا مختلفة من الموازين بالضبط كما وصفنا سابقًا، فإنّها عادةً لا تتفق بدقة. وبسبب كيفية تدرجهما، سوف تتفق 0°C و 100°C . ولكن، نظرًا لاختلاف خصائص تمددها، فقد لا تتفق في المنطقة البينية (تذكر أننا قسمنا التدرج بين 0°C و 100°C إلى 100 فترة متساوية). وهكذا، فقد يسجل ميزان حرارة زئبق مدرج بحرص 52.0°C ، ولكن ميزانا من نوع آخر مدرج كذلك بدقة قد يسجل 52.6°C .

وبسبب هذا التفاوت، لا بدّ من اختيار نوع عياري بحيث تُعرف هذه الدرجات المتوسطة بدقة. إنّ النوع العياري لهذا الغرض هو ميزان الغاز ثابت الحجم. وكما هو مبين في الرسم المبسط في (الشكل 13 - 8)، يتكوّن هذا الميزان من مستودع مملوء بغاز مخفف موصول بأنبوب رفيع إلى مانومتر زئبقي.



الشكل 13-7 مقارنة بين التدرجين؛ السيلزيوسي والفهرنهايتي.

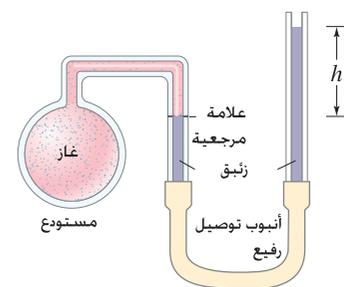
تنويه:

حوّل درجة الحرارة بتذكر أنّ

$$0^{\circ}\text{C} = 32^{\circ}\text{F}$$

وأنّ تغيّر $9^{\circ}\text{F} = 5^{\circ}\text{C}$.

الشكل 13-8 مقياس حرارة الغاز الثابت الحجم.



ويرفع الأنبوب الأيمن من المانومتر أو خفضه، يمكن الإبقاء على حجم الغاز ثابتًا بحيث ينطبق الزئبق في الأنبوب الأيسر مع علامة المرجع. إنَّ زيادة درجة الحرارة تسبب زيادة متناسبة في الضغط داخل المستودع. ولذلك يجب رفع الأنبوب إلى الأعلى للحفاظ على حجم الغاز ثابتًا. وعليه، فإنَّ ارتفاع الزئبق في الأنبوب الأيمن هو مقياس لدرجة الحرارة. إنَّ ميزان الحرارة هذا يعطي النتائج نفسها للغازات جميعها في النهاية الحديثة لتخفيض ضغط الغاز في المستودع إلى الصفر. ويعمل التدرج الناتج كقاعدة لميزان الحرارة العياري.

* 13-3 الاتزان الحراري وقانون الديناميكا الحرارية الصفري.

كأننا معتادون على الحقيقة بأنَّه إذا وضع جسمان درجتا حرارتيهما مختلفتين في حالة تماس حراري (يعني أنَّ الطاقة الحرارية يمكن أن تنتقل من أحدهما إلى الآخر)، فسوف يصل الجسمان في النهاية إلى درجة الحرارة نفسها. يقال عندها إنَّهما في حالة اتزان حراري. مثلاً، تضع ميزان الحرارة الطبي في فمك حتى تصل إلى اتزان حراري مع محيطه، ومن ثم تقرأه. ويقال إنَّ جسمين في حالة اتزان حراري إذا وُضعا في حالة تماس حراري، ولم تنتقل طاقة حرارية من أحدهما إلى الآخر، ولا تتغير درجة حرارتيهما. تشير التجارب إلى أنه إذا كانا في حالة اتزان حراري مع نظام ثالث فإنَّهما سيكونان نظامين في حالة اتزان حراري مع بعضهما. هذه المسألة تدعى قانون الديناميكا الحرارية الصفري. وقد سميت بهذا الاسم غير المعتاد لأنه بعد الانتهاء من وضع قانوني الديناميكا الحرارية الأول والثاني (الفصل 15) أدرك العلماء أنَّ هذه المسألة الواضحة يجب صياغتها أولاً.

درجة الحرارة هي خاصية النظام التي تفرّز فيما إذا كان النظام في حالة اتزان حراري مع أنظمة أخرى. عندما يكون نظامان في حالة اتزان حراري، فإنَّ درجتا حرارتيهما ستكونان متساويتين بالضرورة، وسوف لا يتم أيُّ تبادل حراري بينهما. وهذا ينسجم مع انطباعنا اليومي لدرجة الحرارة، لأنه عند وضع جسم ساخن في حالة تماس مع جسم بارد، فسوف يصلان أخيراً إلى درجة الحرارة نفسها. لهذا، فإنَّ أهمية القانون الصفري في أنه يسمح بتعريف مفيد لدرجة الحرارة.

4-13 التمدد الحراري

تتمدد معظم المواد إذا سُخِّنَتْ، وتقلص إذا برّدت. وعلى أيِّ حال، فإنَّ مقدار التمدد والتقلص يختلف، وذلك استناداً إلى نوع المادة.

التمدّد الطولي

تشير التجارب إلى أنَّ التغيّر في الطول ΔL في معظم المواد الصلبة، وبتقريب جيد، يتناسب طردياً مع التغيّر في درجة الحرارة ΔT ، ما دام ΔT ليس كبيراً جداً. كما هو متوقع فإنَّ التغيّر في الطول يتناسب أيضاً مع الطول الأصلي للجسم L_0 ، (الشكل 13 - 9). أيُّ أنه وللتغيّر نفسه في درجة الحرارة، فإنَّ قضيباً من الحديد طوله 4-m سوف يزداد في الطول ضعف زيادة قضيب آخر من الحديد طوله 2-m. ويمكننا كتابة هذا التناسب بصورة معادلة كالآتي:

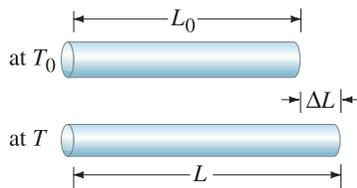
$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (13 - 1)$$

حيث α ثابت التناسب، ويُسمّى معامل التمدد الطولي لمادة معيّنة وله وحدات $(C^\circ)^{-1}$. نعوض $L = L_0 + \Delta L$ ، ونكتب المعادلة السابقة على الصورة الآتية:

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (13 - 1ب)$$

حيث L_0 هو الطول الابتدائي عند درجة حرارة T_0 ، و L هو الطول بعد التسخين أو التبريد إلى درجة T . إذا كان التغير في درجة الحرارة $\Delta T = T - T_0$ سالباً، فإنَّ $\Delta L = L - L_0$ سيكون سالباً أيضاً. وبالتالي، يقلُّ الطول مع انخفاض درجة الحرارة.

الشكل 13 - 9 قضيب رقيق طوله L_0 عند درجة حرارة T_0 يسخن إلى درجة حرارة T ليصبح طوله L ، حيث $L = L_0 + \Delta L$



التمدّد الطولي.

الجدول 13 - 1 معاملات التمدد، قرب 20°C.

معامل التمدد الحجمي $\beta(C^\circ)^{-1}$	معامل التمدد الطولي $\alpha(C^\circ)^{-1}$	المادة
مواد صلبة		
75×10^{-6}	25×10^{-6}	ألومنيوم
56×10^{-6}	19×10^{-6}	نحاس أصفر
50×10^{-6}	17×10^{-6}	نحاس أحمر
42×10^{-6}	14×10^{-6}	ذهب
35×10^{-6}	12×10^{-6}	حديد أو فولاذ
87×10^{-6}	29×10^{-6}	رصاص
9×10^{-6}	3×10^{-6}	زجاج (بايركس)
27×10^{-6}	9×10^{-6}	زجاج (عادي)
1×10^{-6}	0.4×10^{-6}	كوارتز
$\approx 36 \times 10^{-6}$	$\approx 12 \times 10^{-6}$	أسمنت
$4-10 \times 10^{-6}$	$1.4-3.5 \times 10^{-6}$	رخام
سوائل		
950×10^{-6}		كاز
180×10^{-6}		زئبق
1100×10^{-6}		كحول إيثانيل
500×10^{-6}		غلسرين
210×10^{-6}		ماء
غازات		
3400×10^{-6}		هواء (ومعظم الغازات عند الضغط الجوي)

قيم α للمواد المختلفة عند 20°C المعروضة في (الجدول 13-1) في الواقع، تختلف α قليلاً مع درجة الحرارة (وذلك تختلف دقة مقاييس درجات الحرارة المصنعة من مواد مختلفة) ولكن، إذا لم يكن مدى درجات الحرارة كبيراً فيمكن إهمال هذا التفاوت عادة.

المثال 3-13 تمدد الجسور

الفرشنة الفولاذية لجسر معلق طولها 200 m عند درجة 20°C. إذا كان حدًا الحرارة اللذان قد يتعرض لهما الجسر هما 30°C- و 40°C+، فما مقدار تقلصها وتمددتها؟
النَّهَج: سوف نفرض أن الفرشنة الفولاذية تتمدد وتتقلص بصورة خطية مع درجة الحرارة، كما هو معطى في (المعادلة 13 - 1).
الحل: من (الجدول 13 - 1)، نجد أن $\alpha = 12 \times 10^{-6}(C^\circ)^{-1}$ للفولاذ.
 الزيادة في الطول عندما يكون عند درجة 40°C:

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T = (12 \times 10^{-6}/C^\circ)(200 \text{ m})(40^\circ C - 20^\circ C) = 4.8 \times 10^{-2} \text{ m}$$
 أو 4.8 cm. وعندما تكون درجة الحرارة 30°C-، $\Delta T = -50 \text{ C}^\circ$ عندها

$$\Delta L = (12 \times 10^{-6}/C^\circ)(200 \text{ m})(-50 \text{ C}^\circ) = -12.0 \times 10^{-2} \text{ m}$$
 أو نقص في الطول مقداره 12 cm. المدى الكلي الذي يجب أن تتلاءم معه وصلات التمدد هو

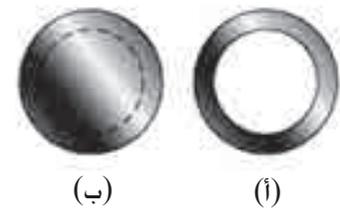
$$12 \text{ cm} + 4.8 \text{ cm} \approx 17 \text{ cm}$$

المثال المفاهيمي 4-13 هل تتمدد الفجوات أم تتقلص؟

إذا سُخِّنَت حلقة دائرية رقيقة (الشكل 13 - 11) في فرن، فهل ستكبر هذه الحلقة أم ستصغر؟
الإجابة: قد تظن بأن الفلز يتمدد إلى داخل الفجوة مما يؤدي إلى صغر الفتحة، إلا أن الأمر ليس كذلك. تخيل أن الحلقة مصممة مثل قطعة النقود (الشكل 13-10ب). ارسم دائرة عليها بقلم كما هو مبين. عند تمدد الفلز، فإن المادة في داخل الدائرة تتمدد مع بقية الفلز. ولذلك، تكبر الدائرة. اقطع الفلز حيث تكون الدائرة، فسترى أن الفجوة تكبر من حيث القطر.

تطبيق الفيزياء (الإنشاءات)

الشكل 13 - 10 (المثال 13 - 4)



المثال 5-13 حلقة على قضيب

يُراد مواءمة حلقةٍ بإحكام على قضيبٍ أسطواناني. عند 20°C ، قطر القضيب 6.445 cm ، والقطر الداخلي للحلقة 6.420 cm . ولكي تنزلق الحلقة حول القضيب، يجب أن تكون أكبر قليلاً من قطره بحوالي 0.008 cm . إلى أي درجة حرارة يجب تسخين الحلقة بحيث يكون قطرها كبيراً بما يكفي لتنزلق حول القضيب؟

النهج: الفجوة في الحلقة يجب زيادتها من قطر 6.420 cm إلى قطر $6.445\text{ cm} + 0.008\text{ cm} = 6.453\text{ cm}$. ويجب تسخين الحلقة؛ لأنّ قطرها يزداد خطياً مع درجة الحرارة. (كما في المثال 13 - 4).

الحل: نحلّ (المعادلة 13 - 11) لإيجاد ΔT

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{\alpha L_0} = \frac{6.453\text{ cm} - 6.420\text{ cm}}{(12 \times 10^{-6}/\text{C}^\circ)(6.420\text{ cm})} = 430\text{ C}^\circ$$

لذلك، يجب زيادة درجة الحرارة إلى $T = (20^\circ\text{C} + 430^\circ\text{C}) = 450^\circ\text{C}$ على الأقل. **ملحوظة:** في حلّ المسائل: تذكر الخطوة الأخيرة، وهي إضافة درجة الحرارة الابتدائية هناك (20°C).

تطبيق الفيزياء فتح غطاء محكم الإغلاق.

المثال المفاهيمي 6-13 فتح غطاء جرة مغلقة بإحكام

لديك جرة زجاجية مغلقة بإحكام، إذا وُضع غطاؤها في مجرى ماء ساخن لفترةٍ وجيزة، فسيصبح فتحها أسهل. لماذا؟

الإجابة: يمكن أن يصطدم الماء الساخن بالغطاء مباشرةً أكثر من الزجاج، ولذلك يتمدد مبكراً. ولكن حتى لو لم يكن الأمر كذلك، فإنّ الفلزات تتمدد أكثر من الزجاج للتغير نفسه في درجة الحرارة، (α أكبر - انظر الجدول 13 - 1).

التمدد الحجمي

إنّ التغير في حجم المادة يخضع لتغيرٍ في درجة الحرارة، يُعطى بعلاقة مشابهة (للمعادلة 13 - 11)، أي

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T$$

(2-13)

حيث ΔT هو التغير في درجة الحرارة، أما V_0 فهو الحجم الأصلي، في حين يشير ΔV إلى التغير في الحجم، و β هو معامل التمدد الحجمي. إنّ وحدات β هي $(\text{C}^\circ)^{-1}$ وقيم β لمواد مختلفة معروضة في (الجدول 13-1). لاحظ أنّ β للمواد الصلبة تساوي تقريباً 3α (حلّ سؤال 19 لمعرفة السبب). وللمواد الصلبة غير المتجانسة (أي ليس لها الخصائص نفسها في الاتجاهات جميعها)، فإنّ العلاقة $\beta \approx 3\alpha$ لا تنطبق. (لاحظ أنّ التمدد الطولي ليس له معنى في السوائل والغازات لأنّ ليس لها أشكال ثابتة).

التمدد الحجمي.

$$\beta \approx 3\alpha$$

المثال 7-13 خزان وقود تحت تأثير الشمس

خزان وقود سيارة، سعته 70 L ، تمت تعبئته كاملاً عند 20°C . وقفت السيارة تحت أشعة الشمس بحيث وصلت درجة حرارة الخزان إلى 40°C (104°F). فكم كمية الوقود التي ستندفق خارج الخزان؟ **النهج:** سيتمدد كلّ من الوقود والخزان بسبب التغير في درجة الحرارة، وسوف نفرض أنّ ذلك يتمّ بصورةٍ خطية كما في (المعادلة 13 - 2). حجم الوقود المتدفق خارج الخزان يساوي الزيادة في حجم الوقود مطروحاً منها الزيادة في حجم الخزان.

الحل: الوقود يتمدد بـ

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T = (950 \times 10^{-6} \text{ C}^\circ)^{-1}(70\text{ L})(40^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 1.3\text{ L}$$

الخزان يتمدد كذلك. يمكن أن نعتبر الخزان قشرةً فولاديتةً تتمدد حجمياً ($\beta \approx 3\alpha = 36 \times 10^{-6} \text{ C}^\circ)^{-1}$). لو كان الخزان مصمماً، فإنّ القشرة سوف تتمدد بالطريقة نفسها. لذلك سيزداد حجم الخزان بـ

$$\Delta V = (36 \times 10^{-6} \text{ C}^\circ)^{-1}(70\text{ L})(40^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 0.050\text{ L}$$

لذلك، فإنّ تمدد الخزان ذو أثر قليل. ومن هنا، فإنّ أكثر من لترٍ من الوقود سوف ينسكب خارجاً. **ملحوظة:** هل تريد توفير بعض النقود؟ املا الخزان عندما يكون بارداً والوقود أكثر كثف: جزيئات أكثر مقابل نقود أقل. ولكن لا تملأ الخزان إلى حافته.

تطبيق الفيزياء فيضان خزان الوقود.

(المعادلتان 13 - 1 و 13 - 2) دقيقتان فقط إذا كان ΔL (أو ΔV) صغيراً بالمقارنة مع L_0 (أو V_0) إنَّ هذا مهمٌّ بصورة خاصة في السوائل وهو أكثر أهمية في الغازات نظراً لكبير قيم β . إضافة إلى ذلك، تتغيّر β نفسها بصورة جوهريّة مع درجة الحرارة في الغازات. لهذا، فإنَّ وصفاً أفضل للتغيّر الحجمي للغازات أمرٌ ضروري، كما سنناقش في (البند 13 - 6).

التصريف الشاذ (غير العادي) للماء دون درجة 4°C

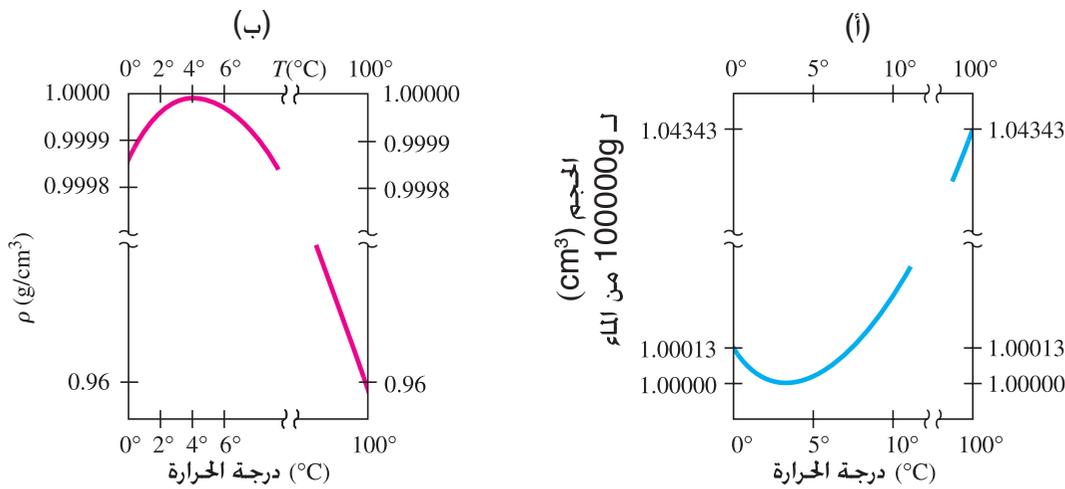
تمتدّد معظم المواد بانتظام تقريباً مع زيادة درجة الحرارة ما دام ليس هناك تغيّر في الطور (الحالة). لكن الماء، لا يتبع النمط العادي. فإذا سخنا الماء الذي درجته 0°C، فسينقص حجمه حتى يصل إلى درجة حرارة 4°C، ثم يتصرف الماء بالصورة المعتادة، ويتمدد حجمه كلّما زادت درجة الحرارة، (الشكل 11 - 13). لذلك، فالماء له أكبر كثافة عند 4°C. هذا التصريف الشاذ للماء ذو فائدة عظيمة للإبقاء على الأحياء المائية حيّة خلال فصول الشتاء الباردة. عندما تكون درجة حرارة الماء في بحيرة أو نهر أعلى من 4°C، ويبدأ بالبرودة نتيجة ملامسته للماء البارد، فإنّ ماء السطح يغطس لأنّ كثافته أكبر. يحلّ محله ماءً أكثر دفئاً من أسفل. هذا المزج يستمر حتى يصل إلى 4°C. عندما يبرد سطح الماء أكثر، يبقى على السطح لأنه أقل كثافة من الماء الذي درجته 4°C. لذلك، يتجمد الماء على السطح أولاً، ويبقى الجليد على السطح لأنه (الوزن النوعي = 0.917) أقل كثافة من الماء. يبقى الماء في القعر سائلاً، إلا إذا كان الطقس بارداً جداً بحيث يتجمد الماء كله. لو كان الماء كباقي المواد، فإنّه يصبح أكثر كثافة كلّما برد، وسوف يتجمد الماء في قعر البحيرة أولاً. وسوف تتجمد البحيرات بسرعة أكبر لأنّ دورة الماء تجلب الماء الدافئ إلى السطح ليتجمّد تبريده. التجمّد الكامل للبحيرة سوف يلحق تلفاً كبيراً للحياة النباتية والحيوانية. وبسبب التصريف غير العادي للماء دون درجة 4°C، فنادرًا ما يتجمّد الكم الكبير منه، وهذا يتمّ بمساعدة الطبقة السطحية الجليدية التي تتصرف بدورها كعازل للإبقاء تدفق الحرارة خارج الماء إلى الهواء البارد فوقها. ودون هذه الخاصية الشاذة للماء، على الرغم من أهميّتها الفائقة، فإنّ الحياة على هذا الكوكب كما نعرفها قد لا تكون ممكنة.

لا يتمدّد الماء فقط عند تبريده من 4°C إلى 0°C، لكنّه يتمدّد أكثر عند تحوّله إلى جليد. لهذا، فإنّ مكعبات الجليد تطفو على سطح الماء، وتتكسر الأنابيب عندما يتجمد الماء داخلها.

الماء غير عادي: يتقلص عند تسخينه من 0°C إلى 4°C.

تطبيق الفيزياء الحياة تحت الجليد.

الشكل 11 - 13 تصرف الماء كدالة بدرجة الحرارة قرب 4°C. (أ) حجم 1.00000 gram من الماء كدالة في درجة الحرارة. (ب) الكثافة مقابل درجة الحرارة. [لاحظ الانقطاع في كل محور].



في كثيرٍ من الحالات، كما في المباني والطرق، فإنّ نهايات الدعامات، أو شرائح من المواد، تكون مثبتة بقوة بما يحد من تمددها أو تقلصها. وإذا تغيرت درجة الحرارة، فإنّ شدّاً كبيراً أو ضغطاً يُدعى الشدّ الحراري، سيحدث. ويمكن حساب مقدار هذا الشدّ باستعمال مفهوم معامل المرونة الذي ذكر في الفصل التاسع. وحساب الشدّ الداخلي، يمكننا أن نفكر في أنّ العملية حصلت على مرحلتين: خالو الدعامة أن تتمدد (أو تتقلص) بمقدار ΔL المبنية في (المعادلة 13 - 1)؛ وكذلك المادة الصلبة الملاصقة للدعامة تؤثر فيها بقوة لتضغطها (أو تمددها)، محافظة عليها عند الطول الأصلي نفسه. القوة المطلوبة تُعطى وفق (المعادلة 9 - 4):

$$\Delta L = \frac{1}{E} \frac{F}{A} L_0$$

حيث E معامل بانغ لهذه المادة. وحساب الشد الداخلي F/A ، ندع ΔL في (المعادلة 13 - 1) تساوي ΔL في المعادلة أعلاه لنجد

$$\alpha L_0 \Delta T = \frac{1}{E} \frac{F}{A} L_0$$

ومن ثمّ فإنّ الشدّ يساوي

$$\frac{F}{A} = \alpha E \Delta T$$

المثال 8-13 الشد في الأسمنت في يوم حار

يُراد بناء طريق سريع من قطع من الأسمنت بطول 10 m توضع متلاصقة دون فواصل للسماح بالتمدد. إذا وضعت هذه القطع عند درجة حرارة 10°C ، فما الشد الانضغاطي الذي سيحدث إذا وصلت درجة الحرارة إلى 40°C ؟ مساحة التماس لكل قطعة 0.20 m^2 . هل سيحدث تشوه؟
 النهج: نستعمل تعبير الشد F/A الذي سبق اشتقاقه، ونجد قيمة E من (الجدول 9 - 1). لمعرفة فيما إذا حدث تشوه أم لا، نقارن هذا الشد مع قدرة حمل الأسمنت، (الجدول 9 - 2).
 الحل:

$$\frac{F}{A} = \alpha E \Delta T = (12 \times 10^{-6}/\text{C}^\circ)(20 \times 10^9 \text{ N/m}^2)(30 \text{ C}^\circ) = 7.2 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

هذا الشد ليس بعيداً عن قدرة حمل الإسمنت تحت الضغط (الجدول 9 - 2) ويزيد عليه في القصّ والسحب. إذا لم يكن اصطفاغ الأسمنت صحيحاً، فإنّ مركبة القوة ستكون قوة قص ويكون التشوه محتملاً. لهذا تستعمل فواصل ليّنة أو وصلات تمدد (الشكل 13 - 3) في ممرات الأرصفة، والطرق السريعة، والجسور.

تطبيق الفيزياء
 التواء الطريق السريع

6-13 قوانين الغازات ودرجة الحرارة المطلقة

إنّ (المعادلة 13-2) ليست ذات فائدة كبيرة لوصف تمدد الغازات؛ لأنّ التمدد يمكن أن يكون كبيراً. ومن جهة أخرى، لأنّ الغازات عادةً تتمدد لتملأ الوعاء الذي توضع فيه. في الواقع، (المعادلة 13 - 2) تكون ذات معنى فقط إذا أبقينا الضغط ثابتاً. يعتمد حجم الغاز كثيراً على الضغط بالإضافة إلى درجة الحرارة. لذا، فإنّه مهمّ لتحديد العلاقة بين الحجم، والضغط، ودرجة الحرارة، وكتلة الغاز. تسمى مثل هذه العلاقة "معادلة الحالة". (نعني بكلمة "الحالة" الظرف الفيزيائي للنظام).

إذا تغيرت حالة النظام، فعلى الانتظار حتى يصل الضغط ودرجة الحرارة القيمة نفسها عبره. ولذلك، نعتبر فقط حالات الاتزان للنظام - عندما تصبح المتغيرات التي تصفه (مثل درجة الحرارة والضغط) متماثلة خلاله ولا تتغير مع الزمن. نلاحظ أيضاً أن نتائج هذا الجزء تكون دقيقة فقط للغازات غير عالية الكثافة (الضغط ليس كبيراً، بحدود الضغط الجوي) وليس قريباً من نقطة السيولة (الغليان).

لكميّة معيّنة من الغاز؛ فقد وجد تجريبيًا أنّ - وتقريب جيد - حجم الغاز يتناسب عكسيًا مع الضغط الكليّ المؤثر فيه عند ثبات درجة الحرارة. أي أنّ

$$V \propto \frac{1}{P}$$

[T ثابتة]

حيث P هو الضغط الكلي (ليس "الضغط المقيس" - انظر البند 10 - 4)، فمثلاً إذا ضاعفنا الضغط على غاز، فسينقص الحجم إلى نصف قيمته الأصلية. وتُعرف هذه العلاقة بقانون بويل، نسبة إلى روبرت بويل (1627-1691)، الذي كان أول من وضعها اعتماداً على نتائجه العملية. رُسم للعلاقة بين V و P عند درجة حرارة ثابتة مبين في (الشكل 13 - 12). ويمكن كتابة قانون بويل (أيضاً بالصورة).

$$PV = \text{ثابت}$$

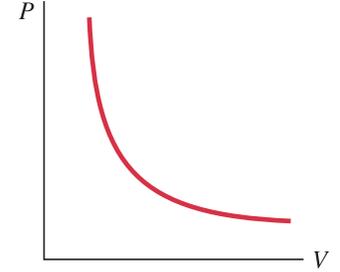
[T ثابتة]

أي أنه عند درجة حرارة ثابتة، إذا تغير الضغط أو الحجم للغاز، فإنّ المتغير الآخر سوف يختلف بحيث يبقى حاصل ضربيهما ثابتاً.

تؤثر درجة الحرارة أيضاً في حجم الغاز، لكن علاقة كمية بين الحجم V ودرجة الحرارة T لم يتم التوصل إليها إلا بعد مرور أكثر من قرن على قانون بويل. وجد الفرنسي جاك شارل (1746-1823) أنه عندما لا يكون الضغط عالياً ويحفظ ثابتاً، يزداد حجم الغاز مع درجة الحرارة بمعدل ثابت تقريباً، كما في (الشكل 13 - 13).

وعلى أيّ حال، فإنّ الغازات جميعها تسيل عند درجات حرارة منخفضة (مثلاً الأكسجين يسيل عند -183°C)، لذلك لا يمكن امتداد الرسم دون نقطة الإسالة. الرسم في الأساس هو خط مستقيم، وإذا أسقطناه لدرجات حرارة منخفضة، كما يبين الخط المتقطع، فإنه يتقاطع مع المحور عند حوالي -273°C . مثل هذا المنحنى يمكن رسمه لأيّ غاز؛ ودائماً يمتد الخط إلى -273°C عند الحجم صفر. هذا يبدو أنّه لو بردنا الغاز إلى -273°C فإنّ حجمه يصبح صفرًا، وعند درجات حرارة أقل يصبح حجمه سالبًا، وهذا ليس له معنى. قد يقال إنّ درجة -273°C هي أقل درجة ممكنة، بالفعل، وهناك الكثير من التجارب الحديثة تشير إلى أن الأمر كذلك. تُسمّى هذه الحرارة **الصفر المطلق** لدرجة الحرارة. وقد تمّ تحديد قيمته بأنّها تساوي -273.15°C .

قانون بويل

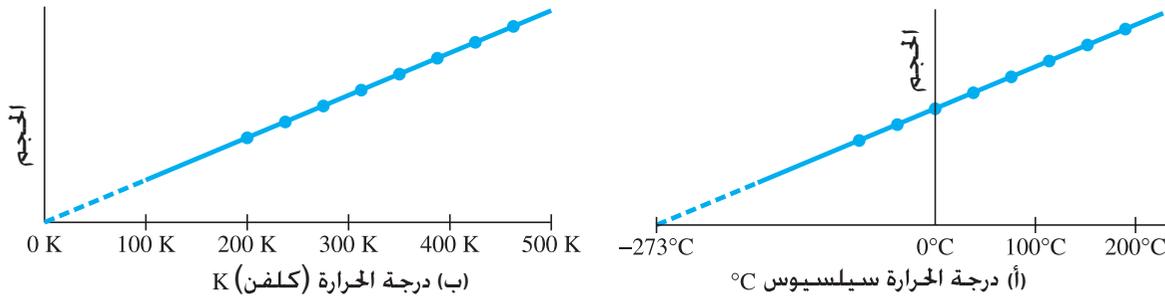


الشكل 13 - 12 الضغط

مقابل الحجم لكمية ثابتة من الغاز عند درجة حرارة ثابتة، يبين العلاقة العكسية تبعاً لقانون بويل: عند نقص الضغط يزيد الحجم.

الصفر المطلق

الشكل 13 - 13 حجم كمية معينة من الغاز كدالة (أ) بدرجة الحرارة سيلزيوس . (ب) درجة الحرارة كلفن عندما يحفظ الضغط ثابتاً.



يشكل الصفر المطلق الأساس لتدريج درجة حرارة يُعرف **بالتدريج المطلق** أو **تدريج كلفن**، ويُستعمل على نطاق واسع في المجال العلمي. على هذا التدرج، حدّد درجة الحرارة بدرجات كلفن أو، يُفضل، كلفن (K) دون استعمال إشارة درجة. الفترات هي نفسها للتدريج سيلزيوس، لكن الصفر على هذا التدرج (0 K) يختار على أنه الصفر المطلق. وهكذا فدرجة جُمد الماء (0°C) هي 273.15 K ، أمّا درجة غليان الماء فهي 373.15 K . في الواقع أيّ درجة حرارة على التدرج سيلزيوس يمكن تحويلها إلى كلفن بإضافة 273.15 إليها:

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

الآن، دعنا ننظر إلى (الشكل 13 - 13ب)، حيث العلاقة بين حجم الغاز ودرجة الحرارة المطلقة هي خطّ مستقيم يمرّ بنقطة الأصل. وهكذا، وتقريب جيّد، فإنّ حجم مقدار معين من الغاز يتناسب طردياً مع

تدريج كلفن

تحويل بين تدريجي كلفن (المطلق) والسيلزيوس.

قانون شارل

قانون جاي - لوساك

درجة الحرارة المطلقة عند المحافظة على الضغط ثابتًا. يُسمّى هذا قانون شارل، ويُكتب

[ثابت P]

$$V \propto T$$

قانون ثالث للغازات، يسمى قانون جاي - لوساك، نسبة إلى جوزيف جاي - لوساك (1778 - 1850)،

وينصّ على ما يلي: يتناسب الضغط الكلي للغاز تناسبًا طرديًا مع درجة الحرارة المطلقة عند ثبات الحجم:

[ثابت V]

$$P \propto T$$

هناك مثالٌ شائعٌ وهو أنّ جرّةً مغلقةً أو علبةً ضباب (aerosol) إذا أُلقيت في النار سوف تنفجر

بسبب زيادة ضغط الغاز الناتج من زيادة درجة الحرارة.

إنّ قوانين بويل، شارل وجاي - لوساك ليست قوانين بالمعنى الذي نستعمله اليوم (دقيق،

عميق، واسع نطاق التطبيق)، بل إنّها في الواقع تقريبية، وهي دقيقة للغازات الحقيقية فقط إذا كان

ضغط الغاز وكثافته ليسا كبيرين، والغاز ليس قريبًا من درجة الإسالة (التكثيف). إنّ تعبير قانون

المطبق على هذه العلاقات أصبح تقليدًا ليس إلا، ولذلك نتمسك بهذا الاستعمال.

المثال المفاهيمي 9-13 لا تُلق بزجاجة مغلقة في نار مخيم.

ماذا يمكن أن يحدث لو أُلقيت زجاجة فارغة محكمة الإغلاق في النار، ولماذا؟

الإجابة: داخل الزجاجة ليس فارغًا؛ إنّهُ مملوءٌ بالهواء. عندما يُسخّن داخل الزجاجة، تزداد درجة حرارته.

بتغيّر حجم الزجاجة قليلًا فقط نتيجة التسخين. وتبعًا لقانون جاي - لوساك يزداد الضغط P داخل

الزجاجة بصورة دراماتيكية، ما يكفي لانفجار الزجاجة، راميًا بقطع الزجاجة بعيدًا.

7-13 قانون الغاز المثالي

تم استنتاج قوانين الغازات لبويل، شارل وجاي - لوساك بطريقة مفيدة جدًّا في العلوم: أي الحفاظ على متغيّر أو أكثر ثابتًا لملاحظة العلاقة بين متغيرين آخرين، يمكن الآن دمج هذه القوانين في قانون واحد أكثر شموليّة بين الضغط الكليّ، والحجم، ودرجة الحرارة المطلقة لكمية ثابتة من الغاز كما يلي:

$$PV \propto T$$

تبيّن هذه العلاقة كيفيّة تصرّف أيّ من الكميات P ، أو V ، أو T عند تغيير الكميتين الأخرين، وتؤوّل هذه العلاقة إلى قوانين، بويل، شارل أو جاي - لوساك عند حفظ درجة الحرارة أو الضغط، أو الحجم على الترتيب، ثابتًا.

أخيرًا، يجب أن ندمج أثر كمّيّة الغاز الموجودة. كلّ من نفخ بالونًا يعرف أنّه كلّما أُجبرنا هواء أكثر داخل البالون، فإنّ البالون يكبر (الشكل 13 - 14). وفي الحقيقة، تبيّن التجارب الدقيقة أنّه عند ثبات درجة الحرارة، والضغط، فإنّ حجم الغاز المحصور V يزداد بزيادة كتلة (m) الغاز الموجود. لذلك نكتب ما يلي:

$$PV \propto mT$$

يمكن تحويل هذا التناسب إلى معادلة بإدخال ثابت تناسب. تبيّن التجارب أنّ هذا الثابت له قيمّ مختلفة للغازات المختلفة. وعلى أيّ حال، فإنّ ثابت التناسب يصبح نفسه للغازات جميعها، إذا استعملنا عدد المولات بدلًا من الكتلة m .



الشكل 13 - 14 نفخ بالون يعني وضع هواء أكثر (جزيئات هواء أكثر) داخله، وهذا يزيد حجمه. الضغط ثابت تقريبًا (الضغط الجوي) فيما عدا الأثر القليل لمرونة البالون.

يعرف المول الواحد (يختصر مولاً) بأنه مقدار المادة الذي يحتوي عدداً من الذرات أو الجزيئات مساوياً لتلك التي في 12 grams من نظير الكربون-12 (الذي كتلته الذرية بالضبط 12 u). هناك تعريف أبسط ويكافئ هذا التعريف وهو: المول الواحد هو ذلك العدد من الغرامات من مادة يساوي عددياً الكتلة الجزيئية (البند 13 - 1) من المادة. فمثلاً الكتلة الجزيئية للهيدروجين (H_2) هي 2.0 u (لأنّ كلّ جزيء يحتوي ذرتين من الهيدروجين، وكلّ ذرة كتلتها الذرية 1.0 u). وهكذا، فإنّ مولا واحداً من H_2 كتلته 2.0 g. وبطريقة ماثلة، فإنّ مولا واحداً من غاز النيون له كتلة 20 g، وأنّ كتلة مول واحد من CO_2 هي $44 g = [12 + (2 \times 16)]$ لأنّ كتلة الأكسجين الذرية هي 16 (انظر الجدول الدوري داخل الغلاف الخلفي). المول هو الوحدة الرسمية لمقدار المادة في النظام الدولي SI.

وبشكل عام، فإنّ عدد المولات، n ، في عينة معينة مادة نقية يساوي كتلة العينة بالغرامات مقسومة على الكتلة الجزيئية محددة بالغرامات لكلّ مول:

$$n \text{ (mol)} = \frac{\text{الكتلة (g)}}{\text{الكتلة الجزيئية (g/mol)}}$$

مثلاً، عدد المولات في 132 g من CO_2 (الكتلة الجزيئية 44 u) هو

$$n = \frac{132 \text{ g}}{44 \text{ g/mol}} = 3.0 \text{ mol}$$

يمكننا كتابة معادلة التناسب التي ناقشناها بصورة معادلة كالآتي:

(3 - 13)

$$PV = nRT$$

حيث تمثل n عدد المولات، و R ثابت التناسب. يسمى R ثابت الغازات العام؛ لأنّ قيمته - وجدت تجريبياً - نفسها للغازات جميعها. قيمة R بوحدات متعددة (فقط الأولى هي وحدة دولية SI).

[وحدة SI]

$$\begin{aligned} R &= 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} \\ &= 0.0821 \text{ (L} \cdot \text{atm)/(mol} \cdot \text{K)} \\ &= 1.99 \text{ calories/(mol} \cdot \text{K)}. * \end{aligned}$$

(المعادلة 13 - 3) تسمى قانون الغاز المثالي، أو معادلة الحالة للغاز المثالي.

نستعمل التعبير "مثالي"؛ لأنّ الغازات الحقيقية لا تتبع (المعادلة 13 - 3) بدقة، وخصوصاً عند الضغط العالي (والكثافة) أو عندما يكون الغاز قريباً من الإسالة (= الغليان). لكن عند ضغوط أقل من الضغط الجوي أو ما شابه، وعندما تكون T بعيدة عن درجة التسييل للغاز، تصبح (المعادلة 13 - 3) دقيقة بصورة كافية ومفيدة للغازات الحقيقية.

تذكر دائماً عند استعمال قانون الغاز المثالي أنّ درجة الحرارة يجب أن تكون بالمطلق (كلفن) (K)، وأنّ الضغط P يجب أن يكون ضغطاً كلياً وليس ضغطاً مقيساً (البند 10 - 4).

8-13 حل المسائل بقانون الغاز المثالي.

يعدّ قانون الغاز المثالي أداة مفيدة جداً، وسنورد بعضاً من الأمثلة. كما أننا سنعود كثيراً إلى "ظروف عيارية" أو "درجة حرارة وضغط عياريين" (STP)، والتي تعني:

$$T = 273 \text{ K (0}^\circ\text{C)} \text{ and } P = 1.00 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 101.3 \text{ kPa}$$

$$STP = 273 \text{ K, } 1 \text{ atm}$$

المثال 10-13 حجم مول واحد عند STP

احسب حجم مول واحد من أيّ غاز، بفرض أنه يتصرف كغاز مثالي، عند الظروف العيارية STP. النهج: نستخدم قانون الغاز المثالي، لنحلّ من أجل إيجاد V . الحلّ: نحلّ لإيجاد V في (المعادلة 13 - 3)

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{(1.00 \text{ mol})(8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K})(273 \text{ K})}{(1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2)} = 22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

بما أنّ $1000 \text{ cm}^3 = 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ لذلك، فإنّ حجم مول واحد من أيّ غاز هو $V = 22.4 \text{ L}$ عند الظروف العيارية STP.

* سيُعرف كالمول في (البند 14 - 1): أحياناً يكون من المفيد استعمال R كما هي معطاة بدلالة الكالوري.

قانون الغاز المثالي

ثابت الغازات العام.
(بوحدة مختلفة)

تنويه:

تعطى قيم T دائماً بالمطلق (K) وتعطى قيم P بالضغط الكلي، وليس الضغط المقيس.

حجم مول واحد من أيّ غاز في الظروف المعيارية هو $V = 22.4 \text{ L}$

وعلينا نذكر أنّ 22.4 L هو حجم مول واحد من الغاز المثالي في الظروف العيارية STP لتسهيل الحسابات أحياناً.
التمرين ب : ما حجم مول واحد من الغاز المثالي عند 20°C؟

المثال 11-13 بالون الهيليوم

على فرض أنّ بالون حفلات مملوءً بالهيليوم كرويًّا تمامًا، ونصف قطره 18.0 cm . وضغطه الداخلي عند درجة حرارة الغرفة (20°C) يساوي 1.05 atm . أوجد عدد مولات الهيليوم في البالون، وكتلة الهيليوم اللازمة لنفخه.

النّهج: يمكننا استعمال قانون الغاز المثالي لحساب n ، حيث لدينا P و T ، ويمكننا حساب V من نصف القطر المعلوم.

الحل: نجد الحجم V من صيغة حجم الكرة:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \\ = \frac{4}{3}\pi (0.180 \text{ m})^3 = 0.0244 \text{ m}^3$$

الضغط معلومٌ ويساوي $1.064 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. يجب التعبير عن درجة الحرارة بالكلفن، لذلك نحسب 20°C تقابل $293 \text{ K} = (20 + 273) \text{ K}$. أخيرًا، نختار قيمة R حيث $R = 8.314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ لأننا نستعمل وحدات النظام الدولي SI، أي

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{(1.064 \times 10^5 \text{ N/m}^2)(0.0244 \text{ m}^3)}{(8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K})(293 \text{ K})} = 1.066 \text{ mol}$$

يمكن الحصول على كتلة الهيليوم (الكتلة الذرية = 4.00 g/mol) كما تعطى في (الفهرس ب) أو الجدول الدوري) من الكتلة = $n \times$ الكتلة الجزيئية = $(1.066 \text{ mol})(4.00 \text{ g/mol}) = 4.26 \text{ g}$

تطبيق الفيزياء

الكتلة (والوزن) للهواء في غرفة.

المثال 12-13 احسب بالتقريب كتلة الهواء في غرفة.

احسب بالتقريب كتلة الهواء في غرفة أبعادها 5 m × 3 m × 2.5 m عند الظروف العيارية STP.
النّهج: نحسب أولاً عدد المولات باستخدام الحجم المعلوم n . ثم نضرب في كتلة المول الواحد للحصول على الكتلة الكلية.

الحل: يشير (مثال 13 - 10) إلى أنّ المول الواحد عند 0°C حجمه 22.4 L حجم الغرفة هو 5 m × 3 m × 2.5 m

$$n = \frac{(5 \text{ m})(3 \text{ m})(2.5 \text{ m})}{22.4 \times 10^{-3} \text{ m}^3} \approx 1700 \text{ mol}$$

الهواء هو مزيج من الغازات: حوالي 20% أكسجين (O_2)، و 80% نيتروجين (N_2) ولذلك، فإنّ الكتلة الجزيئية هي $2 \times 16 \text{ u} = 32 \text{ u}$ و $2 \times 14 \text{ u} = 28 \text{ u}$ ، على الترتيب، أي بمتوسط حوالي 29 u. وهكذا، فإنّ كتلة مول واحد من الهواء هي $29 \text{ g} = 0.029 \text{ kg}$ تقريبًا. إذن، كتلة الهواء في الغرفة المذكورة أعلاه هي:

$$m \approx (1700 \text{ mol})(0.029 \text{ kg/mol}) \approx 50 \text{ kg}$$

ملحوظة: هذا حوالي 100 lbs من الهواء.

التمرين ج: عند أيّ من 20°C، و 0°C تكون كتلة الهواء أكبر أو أقل؟

في كثيرٍ من الأحيان، يُعبّر عن الحجم باللترات والضغط بالضغط الجوي. وبدل تحويل هذه إلى الوحدات الدولية SI، يمكننا استعمال قيمة R المعطاة في (البند 13 - 7) ب $0.0821 \text{ L}\cdot\text{atm/mol}\cdot\text{K}$ في كثيرٍ من المواقف، لا تحتاج إلى استعمال قيمة R على الإطلاق. مثلاً، كثير من المسائل تتضمن تغيّرًا في الضغط، ودرجة الحرارة والحجم لمقدار محدد من الغاز، $PV/T = nR$ = ثابت، لأنّ n و R ثابتة.

حل المسألة

استعمال قانون الغاز المثالي كنسبة.

إذا افترضنا أن P_1 و V_1 و T_1 تعبر عن المتغيرات المناسبة ابتداءً، و P_2 و V_2 و T_2 تمثل المتغيرات بعد حدوث التغير، عندها يمكننا كتابة ما يلي:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

إذا عرفنا أيّ خميس من الكميات المبينة في المعادلة، فهذا يساعدنا على معرفة السادسة. أو، إذا كان أحد المتغيرات الثلاث ثابتاً، ($V_1 = V_2$ أو $P_1 = P_2$ أو $T_1 = T_2$) فيمكننا عند ذلك حلّ المعادلة لإيجاد مجهول واحد، مع معرفة الكميات الثلاث الأخرى.

المثال 13-13 اختبار العجلات وهي باردة.

تمّ ملء إطار سيارة (الشكل 13 - 15) لضغط مقيس مقداره 200 kPa عند درجة 10°C. وبعد مسافة 100 km ترتفع الحرارة داخل الإطار إلى 40°C. ما قيمة الضغط داخل الإطار الآن؟
النّهج: لا نعرف عدد مولات الغاز داخل الإطار، أو حجم الإطار، ولكن نعرف أنّهما ثابتان. لذا، نستعمل صيغة النسبة لقانون الغاز المثالي.

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad \text{فإنّ } V_1 = V_2 \text{ فإنّ}$$

هذه صيغة قانون جاي- لوساك. وبما أنّ الضغط المعطى هو الضغط المقيس (البند 4 - 10)، فيجب أن نضيف الضغط الجوي (101 kPa) للحصول على الضغط الكلي $P_1 = (200 \text{ kPa} + 101 \text{ kPa}) = 301 \text{ kPa}$. نحول كذلك درجة الحرارة إلى الكلفن بإضافة 273، ونحلّ لإيجاد P_2 .

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = (3.01 \times 10^5 \text{ Pa}) \left(\frac{313 \text{ K}}{283 \text{ K}} \right) = 333 \text{ kPa}$$

نطرح الضغط الجوي للحصول على الضغط المقيس. ويساوي 232 kPa، ويساوي 16% زيادة. يبين هذا المثال لماذا تقترح تعليمات السيارات فحص ضغط العجلات عندما تكون الاطارات باردة.
ملحوظة: عند استعمال قانون الغاز المثالي، يجب أن تكون درجات الحرارة بالكلفن (K) والضغط P بالضغط الكلي، وليس الضغط المقيس.

تطبيق الفيزياء

الضغط في دولاب حار.



الشكل 13-15 (مثال 13-13).

حل المسألة

لا يُستعمل الضغط المقيس أو درجة الحرارة °C في قانون الغاز المثالي.

9-13 قانون الغاز المثالي بدلالة الجزيئات: عدد أفوجادرو.

تعدّ الحقيقة القائلة إنّ ثابت الغاز R له القيمة نفسها للغازات كلّها ملحوظة مهمة لسهولتها في الطبيعة. لقد أدرك العالم الإيطالي أميديو أفوجادرو (1776 - 1856) ذلك أولاً، ولكن بشكلٍ مختلفٍ قليلاً. قال أفوجادرو: "الحجوم المتساوية من الغاز عند درجة الحرارة والضغط نفسيهما تحتوي عدداً متساوياً من الجزيئات. يدعى ذلك أحياناً فرضية أفوجادرو. ونلاحظ أنّ ذلك ينسجم مع كون R هو نفسه للغازات كلّها، ويمكن إدراكه كما يلي. قبل كلّ شيء، سنرى من (المعادلة 13 - 3) أنه بعدد المولات نفسها n ، وبالضغط ودرجة الحرارة نفسيهما، سيكون الحجم نفسه للغازات جميعها ما دام R نفسه. ثانياً، عدد الجزيئات في مول واحد هو نفسه للغازات جميعها. وهكذا،* فإنّ فرضية أفوجادرو تكافئ أن R هو ذاته للغازات كلّها. يُنسَمّى عدد الجزيئات في مول واحدٍ لأيّ مادّةٍ نقيّةٍ عدد أفوجادرو، N_A . وعلى الرغم من أنّ أفوجادرو هو صاحب الفكرة، إلاّ أنّه لم يكن قادراً على حساب هذا العدد N_A . وفي الواقع، فإنّ الأقيسة الدقيقة له لم تتوافر قبل القرن العشرين.

* مثلاً الكتلة الجزيئية للهيدروجين H_2 هي 2.0 u (وحدة كتلة ذرية)، أما لغاز O_2 فهي 32.04 u. وهكذا، فإنّ مولاً واحداً من H_2 كتلته 0.0020 kg، ومولاً واحداً من O_2 (غاز) كتلته 0.0320 kg. إنّ عدد الجزيئات في مول واحد يساوي حاصل قسمة الكتلة الكلية للمول M على كتلة جزيء واحد. وبما أنّ هذه النسبة M/m هي نفسها للغازات جميعها من خلال تعريف المول، فإنّ المول الواحد من أيّ غاز يجب أن يحوي العدد نفسه من الجزيئات.

عدد أفوجادرو.

وهناك عددٌ من الطرق لقياس N_A ، والقيمة المقبولة حاليًا هي:

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \quad \text{عدد أفوجادرو} \quad [\text{جزيء/مول}]$$

وبما أنّ العدد الكليّ للجزيئات N في غازٍ يساوي العدد لكلّ مولٍ مضروبًا في عدد المولات ($N = nN_A$)، فإنّ قانون الغاز المثالي- (المعادلة 13 - 3) يمكن كتابته بدلالة عدد الجزيئات

الموجودة:

$$PV = nRT = \frac{N}{N_A} RT$$

أو

$$PV = NkT \quad (4 - 13)$$

قانون الغاز المثالي (بدلالة الجزيئات)

حيث $k = RN_A$ يُدعى ثابت بولتزمان وله قيمة تساوي

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}}{6.02 \times 10^{23} / \text{mol}} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

ثابت بولتزمان.

تطبيق الفيزياء

الجزيئات في شهيقي واحد.

المثال 14-13 كتلة ذرة الهيدروجين

استعمل عدد أفوجادرو لتحديد كتلة ذرة الهيدروجين.

النّهج: كتلة ذرة واحدة تساوي كتلة مولٍ واحدٍ مقسومًا على عدد الذرات في مولٍ واحد، N_A .
الحلّ: إنّ المول الواحد من ذرات الهيدروجين (الكتلة الذرية = 1.008 u البند 13 - 1 أو الملحق B) له كتلة $1.008 \times 10^{-3} \text{ kg}$ ويحتوي 6.02×10^{23} ذرة. لذا، فالذرة الواحدة لها كتلة:

$$m = \frac{1.008 \times 10^{-3} \text{ kg}}{6.02 \times 10^{23}} = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

ملحوظة: تاريخيًا، العملية العاكسة كانت إحدى طرائق حساب عدد أفوجادرو N_A : أي أنّ قيمةً دقيقةً لعدد أفوجادرو N_A يمكن الحصول عليها من قياسٍ دقيقٍ لكتلة ذرة الهيدروجين.

المثال 15-13 كم عدد الجزيئات في شهيقي واحد؟

خمن عدد الجزيئات التي تنتفسسها في شهيقي لتر واحد.

النّهج: نحسب كم مولا يساوي اللتر الواحد باستعمال نتيجة (المثال 13 - 10) حيث إنّ المول الواحد له حجم 22.4 L عند الظروف العيارية STP، ثم نضرب ذلك في عدد أفوجادرو N_A لنجد عدد الجزيئات في هذا الحجم من المولات.

الحلّ: المول الواحد يقابل 22.4 L عند STP، لذلك 1.0 L من الهواء يقابل $(1.0 \text{ L}) / (22.4 \text{ L/mol}) = 0.045 \text{ mol}$. وعليه، فإنّ اللتر الواحد من الهواء يحتوي على جزيء. $3 \times 10^{22} \approx (0.045 \text{ mol})(6.02 \times 10^{23} \text{ جزيء/مول})$

10-13 نظرية الحركة والتفسير الجزيئي لدرجة الحرارة

إنّ تحليل تركيب المادة بدلالة الذرات دائمة الحركة العشوائية يدعى نظرية الحركة. وسنبحث الآن في خصائص الغازات من وجهة نظرية الحركة التي تعتمد على أسس الميكانيكا الكلاسيكية. ولكن تطبيق قوانين نيوتن لكلّ جزيءٍ من العدد الهائل من جزيئات الغاز ($10^{25} / \text{m}^3$ عند STP) أبعد بكثير عن قدرة أيّ حاسوب. وبدلاً من ذلك، نأخذ منحني إحصائيًا، ونحدّد المتوسط لكميات معينة، وهذه المتوسطات تقابل متغيرات جاهرية. نريد طبعًا، أن يقابل وصفنا الجهرى الخصائص الجاهرية للغازات، وإلاّ فإنّ نظريتنا ستكون قليلة الفائدة. والأكثر أهميةً من ذلك، فإننا سنصل إلى علاقة مهمة بين الطاقة الحركية المتوسطة للجزيئات في غاز من جهة ودرجة الحرارة المطلقة من جهة أخرى.

وسنجري الفرضيات التالية على الغاز؛ حيث تعكس هذه الفرضيات نظرة بسيطة إليه، ولكن بغض النظر، فإنّ النتائج التي سنتوصل إليها تعود إلى الصفات الأساسية للغازات الحقيقية عند الضغوط القليلة وبعيدة عن درجة الإسالة. عند هذه الظروف، تتبع الغازات الحقيقية قانون الغاز المثالي. وفي الواقع، فإنّ الغاز الذي نضعه الآن نرجع إليه على أنّه الغاز المثالي. وفيما يلي الفرضيات التي تمثل المسلمات الأساسية لنظرية الحركة:

1. هناك عددٌ كبيرٌ من الجزيئات، N ، كتلة كلٍّ منها m ، تتحرك حركة عشوائية بسرعات مختلفة. وتنسجم هذه الفرضية مع ملاحظتنا أنّ الغاز يملأ الوعاء الذي يحل فيه، وكذلك في حالة الهواء على الأرض، فإنّه يحفظ من الإفلات بواسطة قوة الجاذبية فقط.
2. الجزيئات في المتوسط بعيدة عن بعضها. أي أنّ هناك فاصلاً متوسطاً أكبر بكثير من قطر الجزيء.
3. نفترض أنّ الجزيئات تتبع قوانين الميكانيكا الكلاسيكية، ويُفترض أنّ يتفاعل أحدها مع الآخر عند التصادم فقط. ورغم أنّ الجزيئات تؤثر بقوى جذبٍ ضعيفةٍ بين التصادمات، فإنّ طاقة الوضع المرافقة لهذه القوى تكون قليلةً بالمقارنة مع الطاقة الحركية، وسوف نهمّلها في الوقت الحاضر.
4. يفترض أنّ تكون التصادمات بين الجزيئات أو مع جدران الوعاء تامة المرونة، وهي تدوم لفترة صغيرة جداً قبل التصادمات مقارنة مع الزمن بينها. عندها نستطيع إهمال طاقة الوضع المرافقة للتصادمات مقارنة بالطاقة الحركية بين التصادمات.

مسلمات نظرية الحركة

نستطيع أن نرى فوراً كيف أنّ هذه النظرية الحركية للغاز تفسر قانون بويل (البند 13-6). ويُعزى الضغط الناشئ على جدران الوعاء الذي يحتوي على الغاز إلى القذف المستمر للجزيئات. إذا أنقصنا الحجم إلى النصف (مثلاً تكون الجزيئات متقاربة أكثر) فإنّ عدد الصدمات يتضاعف لكل وحدة مساحة من الجدار في الثانية. ونتوقع أن يصبح الضغط ضعف قيمته وهو ما يتفق مع قانون بويل. دعنا نحسب الآن بصورةٍ كميةٍ ضغط الغاز المؤثر في الوعاء الذي يحويه اعتماداً على نظرية الحركة. سنستعمل أنّ الجزيئات موجودة داخل وعاء بشكل متوازي مستطيلات (سائلاً) جوانبه لها مساحة A ، وطول ضلعه l ، كما هو مبين في (الشكل 13 - 16).

تفسير قانون بويل

الشكل 13 - 16 (أ) جزيئات غاز تتجول في وعاء متوازي مستطيلات.
(ب) تشير الأسهم للزخم لجزيء واحد عند ارتداده عن الجدار.

إنّ الضغط الناتج من الغاز على الجدران - تبعاً لنموذجنا - يحدث بسبب التصادمات بين الجزيئات والجدران. دعنا نركز اهتمامنا على الجدار الذي مساحته A عند الطرف الأيسر للوعاء، ونتفحص ماسيحدث عندما يصطدم به جزيء، كما هو واضح في (الشكل 13 - 16 ب). يؤثر هذا الجزيء بقوة في الجدار. واستناداً إلى قانون نيوتن الثالث؛ يؤثر الجدار بقوةٍ مساويةٍ ومعاكسةٍ في الجزيء. إنّ مقدار هذه القوة على الجزيء وتبعاً لقانون نيوتن الثاني يساوي معدل تغير الزخم الخطي، $F = \Delta(mv)/\Delta t$ (المعادلة 2-7)، وعلى افتراض أنّ التصادم مرن، فإنّ المركبة السينية لزوجم الجزيء فقط هي التي تتغير، ويكون تغيرها من $-mv_x$ إلى $+mv_x$. وهكذا التغير في الزخم الخطي للجزيء، $\Delta(mv)$ ، وهو الزخم النهائي مطروحاً منه الزخم الابتدائي، يساوي

$$\Delta(mv) = mv_x - (-mv_x) = 2mv_x$$

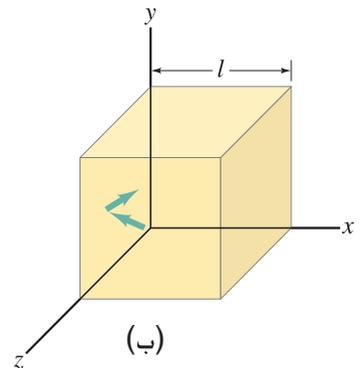
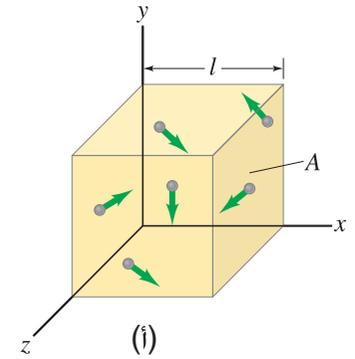
ولتصادم واحد، فإنّ هذا الجزيء سيقوم بتصادمات كثيرة على الجدار، وكلُّ تصادم مفصول بزمن Δt ، وهو الزمن اللازم للجزيء كي ينتقل عبر الوعاء ويعود ثانية، مسافة مساوية $(2l)$. وهكذا $2l = v_x \Delta t$ ، أو

$$\Delta t = \frac{2l}{v_x}$$

إنّ الزمن Δt بين التصادمات صغيرٌ جداً. لذا، يكون عدد التصادمات في الثانية كبيرٌ جداً. ولهذا، فإنّ القوة المتوسطة - يُؤخذ معدلها لعددٍ كبيرٍ من التصادمات - سوف تساوي التغير في الزخم خلال تصادمٍ واحدٍ مقسوماً على الزمن بين التصادمات (قانون نيوتن الثاني):

(ناجٍ من جزيء واحد)

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{2l/v_x} = \frac{mv_x^2}{l}$$



وخلال مروره إلى الأمام والخلف عبر الوعاء، يمكن أن يصطدم الجزيء مع قمة الوعاء أو قعره ، ولكن ذلك لا يغير المركبة x للزخم. لذا، فإنه لا يؤثر في النتيجة. كما أنه قد يصطدم بغيره من الجزيئات والذي قد يغير v_x وعلى أي حال، فإن أي فقد (أو كسب) في الزخم سوف تناله الجزيئات الأخرى، وبما أننا سنجمع على الجزيئات جميعها، فإن هذا الأثر سوف يكون متضمناً. ولذلك، فإنّ نتيجتنا السابقة غير مختلفة.

إنّ القوّة الحقيقية الناجمة من جزيء واحد سوف تكون متقطعة، ولكن بسبب العدد الهائل من الجزيئات التي تصدم الجدار في الثانية، فإنّ القوّة، بالتوسط، تبقى ثابتة. وحساب القوّة الناجمة من الجزيئات كلها في الوعاء؛ علينا إضافة المساهمة من هذه الجزيئات جميعها. ولهذا، فالقوّة المحصلة على الجدار هي

$$F = \frac{m}{l} (v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots + v_{xN}^2)$$

حيث v_{x1} هي v_x للجزيء رقم 1 (حيث يجري ترقيم الجزيئات اختياريًا)، والجمع يجري على الجزيئات جميعها، والتي عددها N في الوعاء. القيمة المتوسطة لمربع المركبة x السرعة هي

$$(5 - 13)$$

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots + v_{xN}^2}{N}$$

وهكذا يمكن كتابة القوّة بالصورة

$$F = \frac{m}{l} N \overline{v_x^2}$$

نعرف أن مربع أي قيمة يساوي مجموع مربعات مركباته (نظرية فيثاغورس). وهكذا $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ ولأني سرعة v . وبأخذ المتوسط نجد

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}$$

وبما أنّ سرعات الجزيئات تكون عشوائية، فليس هناك تفضيل لأيّ اتجاه على آخر، ولذلك نحصل على

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}$$

وبجمع هه العلاقة مع العلاقة التي تسبقها نحصل على

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

نعوض ذلك في معادلة القوّة F :

$$F = \frac{m}{l} N \frac{\overline{v^2}}{3}$$

وبهذا، فإنّ الضغط على الجدار يساوي

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{3} \frac{Nm\overline{v^2}}{V}$$

أو

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

$$(6 - 13) \text{ الضغط في الغاز}$$

حيث $V = lA$ هو حجم الوعاء. وهذه هي النتيجة التي كتبتنا عنها؛ الضغط الناتج من غاز على جدران الوعاء الذي يحويه بدلالة خصائص الجزيئات.

ويمكن كتابتها في المعادلة (13 - 6) ، $P = \frac{1}{3} N m \bar{v}^2 / V$ ، بصورة أوضح بضرب طرفيها في V وترتيب

الجانب الأيمن:

$$(7 - 13) \quad PV = \frac{2}{3} N \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right)$$

الكمية $\frac{1}{2} m \bar{v}^2$ هي متوسط الطاقة الحركية (\overline{KE}) لجزيئات الغاز، إذا قارنا (المعادلة 7-13) (بالمعادلة 13 - 4) ،

قانون الغاز المثالي $PV = NkT$ فسنرى أن القانونين يتفقان إذا:

$$\frac{2}{3} \left(\frac{1}{2} m \bar{v}^2 \right) = kT$$

أو:

درجة الحرارة مرتبطة بمتوسط
الطاقة الحركية للجزيئات

(الغاز مثالي) [13 - 8]

$$\overline{KE} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2 = \frac{3}{2} kT$$

وتخبرنا هذه المعادلة بما يلي:

تناسب الطاقة الحركية المتوسطة للجزيئات ذات الحركة العشوائية في الغاز المثالي تناسباً طردياً مع درجة الحرارة المطلقة للغاز.

كلما كانت درجة الحرارة أعلى بناءً على النظرية الحركية، كانت سرعة الجزيئات أكبر بالمتوسط. هذه العلاقة هي أحد انتصارات النظرية الحركية.

المثال 13-16 الطاقة الحركية للجزيئات

ما الطاقة الحركية الانتقالية المتوسطة للجزيئات في غاز مثالي عند درجة 37°C ؟
النَّهَج: نستعمل درجة الحرارة المطلقة في (المعادلة 13 - 8).
الحل: نحول 37°C إلى 310 K ونعوضها في (المعادلة 13 - 8):

$$\overline{KE} = \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(310 \text{ K}) = 6.42 \times 10^{-21} \text{ J}$$

ملحوظة: الطاقة الحركية الكلية لمول واحد من الجزيئات تساوي 3900 J (6.02×10^{23}) $(6.42 \times 10^{-21} \text{ J})$ ، وهي تساوي الطاقة الحركية لحجر كتلته 1-kg يسير بسرعة أكبر من 85 m/s .

تنطبق (المعادلة 13 - 8) ليس على الغازات فقط، بل وعلى السوائل والجوامد كذلك بدقة معقولة. وهكذا، فنتيجة (المثال 13 - 16) تنطبق على الجزيئات في الخلايا الحية لجسم بدرجة (37°C).
يمكننا استعمال (المعادلة 13 - 5) لحساب متوسط سرعة حركة الجزيئات. لاحظ أن المتوسط في (المعادلة 13 - 8) هو لربع السرعة. ويُسمَّى الجذر التربيعي لـ $\overline{v^2}$ سرعة (*root - mean - square*) جذر - متوسط - المربع، v_{rms} (لأننا نأخذ الجذر التربيعي لمتوسط مربع السرعة):

سرعة مربع معدل الجذر
(rms).

$$(9 - 13) \quad v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

سرعة الجزيئات (rms).

المثال 13-17 سرعات جزيئات الهواء

ما سرعة جذر متوسط المربع (O_2 و N_2) عند درجة حرارة الغرفة (20°C)؟
النَّهَج: للحصول على v_{rms} ؛ نحتاج إلى كتلة O_2 و N_2 ، ثم نطبق (المعادلة 13 - 9) على الأكسجين والنيتروجين منفصلين لأن كتلتهما مختلفتان.
الحل: كتلة جزيء واحد من O_2 (الكتلة الجزيئية = 32 u) و N_2 (الكتلة الجزيئية = 28 u) (حيث $1 \text{ u} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$).

$$m(\text{O}_2) = (32) (1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}) = 5.3 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

$$m(\text{N}_2) = (28) (1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}) = 4.6 \times 10^{-26} \text{ kg}$$

وبالتالي للأكسجين:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{(3)(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(293 \text{ K})}{(5.3 \times 10^{-26} \text{ kg})}} = 480 \text{ m/s}$$

والنيتروجين $v_{rms} = 510 \text{ m/s}$ * هاتان v السرعتان أكبر من 1700 km/h أو 1000 mi/h .

* السرعة v_{rms} هي مقدار فقط. يكون متوسط السرعة المتجهة للجزيئات صفرًا: السرعة المتجهة لها اتجاه. وكما تحرك بعض الجزيئات نحو اليمين يتحرك مثلها أيضًا نحو اليسار.

التمرين د: ما السرعة التي يتحرك بها مشبك ورق كتلته 1-g إذا كان له الطاقة الحركية نفسها للجزيء في (المثال 13 - 17)؟

تتضمن (المعادلة 13 - 8)، $\overline{KE} = \frac{3}{2}kT$ ، أنه عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق، تقترب الطاقة الحركية للجزيئات من الصفر. وتخبرنا نظرية الكم الحديثة أن الوضع ليس كذلك بالضبط. بدلاً من ذلك، وعند الاقتراب من الصفر المطلق، تقترب الطاقة الحركية من قيمة صغيرة جداً ولا تساوي صفرًا. وعلى الرغم من أن الغازات الحقيقية كلها تصبح سائلة أو صلبة عند 0 K، فإن الحركة الجزيئية لا تتلاشى، حتى عند الصفر المطلق.

* 11-13 توزيع السرعات الجزيئية

فرضنا أن جزيئات الغاز في حالة حركة عشوائية، وهذا يعني أن كثيرًا من هذه الجزيئات لها سرعة أقل من سرعة جذر متوسط المربع، في حين أن لبعضها سرعات أكبر منها. توصل جيمس كلارك ماكسويل (1831 - 1879) في عام 1859 إلى أن سرعات الجزيئات تتوزع تبعًا للرسم في (الشكل 13 - 17)،

توزيع ماكسويل للسرعات
جزيئات الغاز.

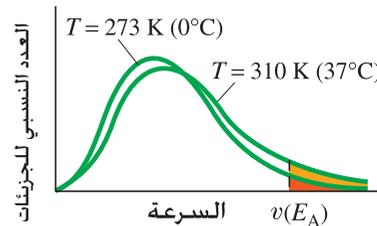
معتمدا على النظرية الحركية. وهذا ما يسمى بتوزيع ماكسويل للسرعات*. تتفاوت السرعات من صفر حتى قيم أكبر بكثير من v_{rms} ، لكن وكما بين الشكل، فإن معظم الجزيئات لها سرعات ليست بعيدة عن السرعة المتوسطة. أقل من 1% من الجزيئات تزيد على أربعة أضعاف v_{rms} .

بدأت التجارب لإيجاد التوزيع في الغازات الحقيقية في عام 1920. وقد أكدت بدقة كبيرة توزيع ماكسويل والنسب الطردية بين متوسط الطاقة الحركية ودرجة الحرارة المطلقة، (المعادلة 13 - 8).

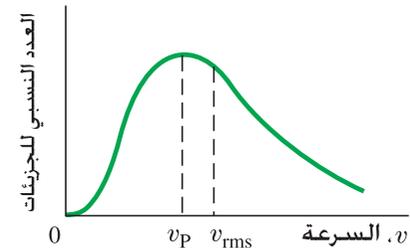
يبين (الشكل 13 - 18) توزيع ماكسويل لدرجاتي حرارة مختلفتين: تمامًا كما تزيد v_{rms} مع درجة الحرارة، كذلك فإن منحنى التوزيع كله ينزاح نحو اليمين عند درجات الحرارة العالية. يبين هذا الشكل كيف تفسر الطاقة الحركية زيادة سرعة التفاعلات الكيماوية، بما في ذلك تفاعلات الخلايا الحية عند زيادة درجة الحرارة. قد يتفاعل جزيئان كيماويان فقط إذا كانت طاقتهم أكبر من قيمة دنيا معينة (تسمى طاقة التنشيط)، E_A ، مثلما عند تصادمهما، فإنهما يخترقان بعض الشيء. يبين (الشكل 13 - 18) أنه عند درجة حرارة أعلى، فإن كثيرًا من الجزيئات تملك سرعات وطاقات حركية KE أعلى من طاقة العتبة E_A .

تطبيق الفيزياء

كيف تعتمد التفاعلات الكيميائية على درجة الحرارة؟



الشكل 13 - 18 توزيع سرعات الجزيئات لدرجاتي حرارة مختلفتين.



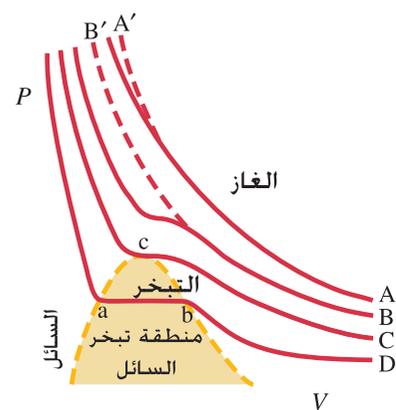
الشكل 13 - 17 توزيع السرعات لجزيئات غاز مثالي. لاحظ أن v_{rms} ليست عند قمة المنحنى (هذه السرعة تسمى الأكثر احتمالية v_p): لأن المنحنى يميل إلى اليمين وهو غير متماثل.

* 12-13 الغازات الحقيقية وتغيرات الطور

بعد قانون الغاز المثالي وصفًا دقيقًا لتصرف الغاز الحقيقي ما دام الضغط ليس عاليًا، وما دامت درجة الحرارة بعيدة عن نقطة الإسالة. ولكن ماذا يحدث عندما لا يتحقق هذان المعياران؟ أولًا، سنناقش تصرف الغاز الحقيقي، ثم نحص كيف تساعدنا الطاقة الحركية على فهم هذا التصرف.

* رياضيًا، يُعطى التوزيع بـ $\Delta N = Cv^2 \exp(-\frac{1}{2}mv^2/kT)\Delta v$ حيث ΔN عدد الجزيئات التي لها سرعة بين v و $v + \Delta v$ ، C ثابت، و \exp تعني أن التعبير بين قوسين هو أس بالعدد الطبيعي $e = 2.718...$

مخطط PV



الشكل 13 - 19 مخطط PV لمادة حقيقية. المنحنيات A, B, C, D تمثل الغاز نفسه عند درجات حرارة مختلفة. ($T_A > T_B > T_C > T_D$)

دعنا نلقي نظرةً على منحنى للضغط مرسومٍ مقابل الحجم لكميةٍ معينةٍ من الغاز. على هذا "المخطط PV" (الشكل 13 - 19) تمثل كل نقطةٍ حالة اتزان للمادة المعطاة. المنحنيات المختلفة (المشار إليها بـ A, B, C, D) تبين كيف يتغير الضغط عند تغير الحجم مع تثبيت درجة الحرارة لقيمٍ متعددةٍ من درجات الحرارة. ويمثل المنحنى المتقطع A تصرف الغاز المثالي، أي ثابت $PV =$. في حين يشير المنحنى المتصل إلى تصرف الغاز الحقيقي عند درجة الحرارة نفسها. لاحظ أنه عند الضغط العالي، يكون حجم الغاز الحقيقي أقل من القيمة التي تنتج من قانون الغاز المثالي. ويمثل المنحنيين B, C في (الشكل 13 - 19) الغاز عند درجات حرارةٍ أقل، ونرى أن التصرف ينحرف أكثر عن المنحنيات الناتجة من قانون الغاز المثالي (مثلًا المنحنى B') ويكون الانحراف أكبر كلما اقتربنا من درجة الإسالة.

لتفسير ذلك؛ نلاحظ أنه عند ضغط أعلى نتوقع أن تقترب الجزيئات من بعضها. وبشكلٍ خاص عند درجات حرارةٍ أقل، وأن طاقة الوضع المرافقة لقوى التجاذب بين الجزيئات (سبق إهمالها) لم تعد مهمة مقارنةً بالطاقة الحركية المنخفضة الآن للجزيئات. تؤدي قوى التجاذب هذه إلى تقريب الجزيئات أكثر بحيث (عند ضغط معين) يكون الحجم أقل مما نتوقعه من قانون الغاز المثالي. وعند درجة حرارةٍ أقل، تسبب هذه القوى الإسالة، وتصبح الجزيئات قريبة جدًا من بعضها.

يمثل المنحنى D الوضع عندما تحدث الإسالة. وعند ضغط منخفض على هذا المنحنى D (إلى يمين الشكل 13 - 19)، فإن المادة هي غاز، وتمثل حجمًا كبيرًا. وعند زيادة الضغط، يقل الحجم حتى نصل النقطة b. وبعد النقطة b، يقل الحجم دون تغير الضغط، وتحول المادة تدريجيًا من طور الغاز إلى طور السائل. وعند النقطة a، تتحول المادة كلها إلى سائل. إن الزيادة الإضافية في الضغط تقلل الحجم بكمية قليلة - السوائل (تقريبًا) غير قابلة للانضغاط - لذلك، (إلى اليسار) فإن المنحنى يكون شديد الانحدار كما هو مبين. تمثل المنطقة المظللة تحت الخط المتقطع المنطقة التي يكون فيها السائل والغاز في حالة اتزان.

يمثل المنحنى C في (الشكل 13 - 19) تصرف المادة عند درجة حرارتها الحرجة؛ تُسمَّى النقطة C (النقطة الوحيدة التي يكون فيها المنحنى أفقيًا) **النقطة الحرجة**. وعند درجات حرارةٍ أقل من الدرجة الحرجة. (وهذا هو تعريف الكمية)، سوف يتحول الغاز إلى الطور السائل إذا أثرنا بضغط كاف. وفوق درجة الحرارة الحرجة هذه، لا يوجد مقدار من الضغط يمكن أن يسبب تغير طور الغاز ليصبح سائلًا؛ لا يتشكل سطح السائل. توجد درجات الحرارة الحرجة لغازاتٍ مختلفة في (الجدول 13 - 2). حاول العلماء على مدى سنين إسالة الأكسجين دون جدوى. ولكن بعد اكتشاف النقطة الحرجة فقط، تم إدراك أن إسالة الأكسجين ممكن فقط إذا برّدها أولاً دون درجة الحرارة الحرجة -118°C .

عادةً، يتم التمييز بين التعبيرين "غاز" و "بخار"؛ حيث تُسمَّى المادة دون درجة حرارتها الحرجة في الحالة الغازية "بخارًا"، في حين تسمى "غازًا" فوق الدرجة الحرجة هذه.

يمكن رسم تصرف المادة على منحنى PT، وليس على منحنى PV فقط. يُسمَّى المنحنى PT عادةً "منحنى الطور"، ويكون مناسبًا خاصًة لمقارنة الأطوار المختلفة للمادة.

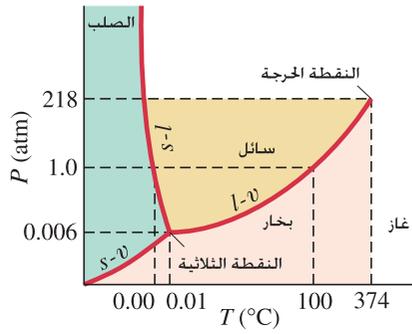
النقطة الحرجة

البخار والغاز

مخطط بياني للطور

الجدول 13 - 2 درجات الحرارة والضغط الحرجة

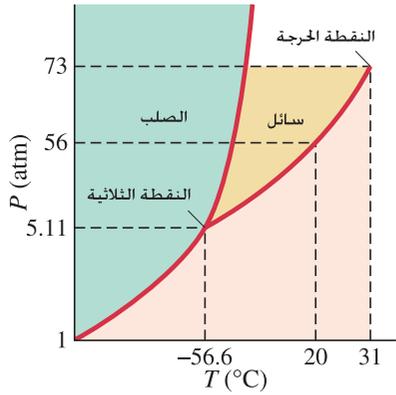
المادة	درجات الحرارة الحرجة	
	°C	K
ماء	374	647
CO ₂	31	304
أكسجين	- 118	155
نيتروجين	- 147	126
هيدروجين	- 239.9	33.3
هيليوم	- 267.9	5.3



الشكل 13 - 20 مخطط الطور للماء (لاحظ أن التدرج ليس خطيًا).

الدرجة (النقطة) الثلاثية

الشكل 13 - 21 مخطط الطور لثاني أكسيد الكربون.



الميوعة الفائقة.

يبين (الشكل 13 - 20) مخطط الطور للماء. ويمثل المنحنى المُشار إليه بـ $l-v$ تلك النقاط حيث يكون طور السائل والبخار في حالة اتزان - لذلك فهو رسم لدرجة الغليان مقابل الضغط. لاحظ أن المنحنى يبين بصورة صحيحة أنه عند ضغط 1 ضغط جوي، فإن درجة الغليان هي 100°C ، وأن هذه الدرجة تتناقص بانخفاض الضغط. أما المنحنى $s-l$ ، فيمثل النقاط حيث يكون كل من الصلب والسائل في حالة اتزان، وبالتالي فهو منحنى لدرجات التجمد كما هو مبين. لاحظ أيضًا أنه في (الشكل 13 - 20) وعند الضغط 1 atm، تكون المادة في حالة سيولة بين درجة 0°C و 100°C وقتها. ولكنها يكون في طول الحالة الصلبة أو السائلة إذا كانت درجة الحرارة أقل من 0°C أو أكبر من 100°C . في حين يشير المنحنى $s-v$ إلى منحنى درجة التسامي مقابل الضغط. إن درجة التسامي تعود إلى العملية التي يتحول فيها الصلب عند الضغط المنخفض مباشرة إلى طور البخار دون المرور في حالة السيولة. يحدث التسامي للماء إذا كان ضغط بخار الماء أقل من 0.0060 ضغط جوي (atm). يُسمّى ثاني أكسيد الكربون في الحالة الصلبة الجليد الجاف، وهو يتسامى حتى عند الضغط الجوّي العاديّ.

إن تقاطع المنحنيات الثلاث في (الشكل 13 - 20) هي النقطة الثلاثية. ويحدث هذا للماء عند $T = 273.16\text{ K}$ و $P = 6.03 \times 10^{-3}\text{ atm}$. تستطيع الأطوار الثلاثة أن توجد في حالة اتزان عند النقطة الثلاثية فقط. ولأن هذه النقطة تعود إلى قيمة فريدة لدرجة الحرارة والضغط، فإنه يمكن إعادة الحصول عليها. وتستخدم عادة كنقطة مرجعية. فمثلاً، تحدد درجة الحرارة العيارية عادة وبالضبط عند 273.16 K عند النقطة الثلاثية للماء، وليس عند 273.15 K درجة جُمَد الماء عند ضغط 1 atm.

لاحظ أن منحنى $s-l$ للماء يميل إلى الأعلى نحو اليسار، وهذا صحيح فقط للمواد التي تتمدد عند التجمد: عند ضغط أعلى، نحتاج إلى درجة حرارة أقل تؤدي إلى تجميد السائل. أما الأكثر شيوعاً، فهو أن المادة تنكمش عند التجمد، ويميل منحنى $s-l$ إلى الأعلى نحو اليمين، كما هو مبين لثاني أكسيد الكربون (CO_2) في (الشكل 13 - 21).

التحولات في الطور التي كنا نناقشها حتى الآن هي الحالات الشائعة. وعلى أي حال، فإن بعض المواد قد تتكوّن في أشكال متعددة في الحالة الصلبة. إن التحول من طور إلى آخر يحصل عند درجة حرارة وضغط معينين، تمامًا كما في الأطوار العادية، فمثلاً، لوحظ أن الجليد يتكون في ثمانية أشكال عند الضغط العالي. وللهيليوم العادي طوران مختلفان في حالة السيولة هما: هيليوم I، وهيليوم II. وهما يتكونان فقط عند درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق. إن هيليوم II له خصائص غير عادية، يقال لها الميوعة الفائقة. إنها في الأساس ذات لزوجة معدومة، ولها خصائص غريبة كصعودها نحو أعلى وعاء مفتوح.

* 13-13 ضغط البخار والرطوبة

التبخّر

إذا تركنا كوباً من الماء خلال الليل معرضة للجو، فسوف ينقص مستوى الماء فيها حتى الصباح، وهنا نقول إن الماء قد تبخر، وهذا يعني أن بعضه تحول إلى بخار أو إلى الحالة الغازية. ويمكن تفسير عملية التبخّر هذه على أساس النظرية الحركية: تمرّ الجزيئات في السائل بجوار بعضها بسرعات متفاوتة، تتبع تقريباً توزيع ماكسويل. هناك قوى جاذب كبيرة بين هذه الجزيئات التي تحافظ عليها متجاورة وقريبة في طور السائل. وبسبب سرعته، يمكن لجزيء قريب من سطح السائل أن يغادر سطح السائل لحظياً. ولكن، وكما هو الحال عند قذف حجر إلى الأعلى من سطح الأرض فإنه يعود إليها، فإن قوى الجذب للجزيئات الأخرى تستطيع سحب هذا الجزيء المغادر ليعود إلى سطح السائل - هذا إذا كانت سرعته ليست كبيرة. أما الجزيء الذي له سرعة عالية وكافية فسيغادر سطح السائل نهائياً كصاروخ يفلت من الأرض، ويصبح جزءاً من الحالة الغازية. إن الجزيئات التي لها طاقة أعلى من حدّ معين فقط هي التي تستطيع الإفلات إلى الحالة الغازية. وقد سبق وأشرنا إلى أن نظرية الحركية تبين أن عدد الجزيئات النسبي التي لها طاقة حركية أكبر من قيمة معيّنة مثل E_A في (الشكل 13 - 18) يزداد مع درجة الحرارة. وهذا يعزز الملاحظة المألوفة في أن معدل التبخر يكون أكبر عند درجات الحرارة العالية.

وبسبب أنّ الجزيئات الأكبر سرعةً هي التي تنجو من سطح السائل، فإنّ متوسط سرعة الجزيئات المتبقية يكون أقلّ. وعندما يكون متوسط السرعة أقلّ، فإنّ درجة الحرارة المطلقة تكون أقلّ كذلك. وهكذا تستنتج النظرية الحركية أنّ التبخّر هو عملية تبريد. إنك بلا شك قد لاحظت هذا الأثر عندما تخرج من حمام ساخن، وتشعر بالبرد عندما يبدأ الماء الذي على جسمك بالتبخّر، وعندما تتعرق نتيجة بذل جهد في يوم حار، فإنّ نسمةً لطيفةً تشعرك بالبرد من خلال التبخّر.

ضغط البخار

يحتوي الهواء عادةً على بخار ماء (ماء في الحالة الغازية)، ويأتي ذلك بصورة رئيسة من التبخّر. وسنتناول هذه العملية بتفصيل أكبر، خذ وعاءً مغلّقًا مملوءًا جزئيًا بالماء (أو سائل آخر) وقد أزيل منه الهواء كذلك (الشكل 13 - 22). تتبخّر الجزيئات الأكثر سرعةً بسرعةٍ إلى الحيز فوق سطح السائل. وفي أثناء جّولها، يصطدم بعض هذه الجزيئات بسطح السائل، وتصبح جزءًا من السائل مرة أخرى، وهذا هو التكاثف. يزداد عدد الجزيئات في البخار حتى يصل إلى مرحلة يكون فيها عدد الجزيئات التي تغادر السائل مساويًا لعدد الجزيئات العائدة إليه في الفترة الزمنية نفسها. وهكذا يتحقق الاتزان، ويسمى الحيز فوق سطح السائل مشبعًا. ويسمى ضغط البخار عندما يكون مشبعًا "ضغط البخار المشبع" (أو أحيانًا للسهولة "ضغط البخار").

لا يعتمد ضغط البخار المشبع على حجم الوعاء. إذا قلّلنا الحجم فوق سطح السائل فجأة، فإنّ كثافة الجزيئات في طور البخار تزداد مؤقتًا. وسوف يزيد عدد الجزيئات التي تصطدم بالسائل في الثانية. وسوف يكون هناك معدّل للجزيئات العائدة إلى السائل حتى تصل إلى الاتزان مرّةً أخرى، وهذا يتحقق عند قيمة ضغط البخار السابقة نفسها ما دامت درجة الحرارة ثابتة لم تتغير.

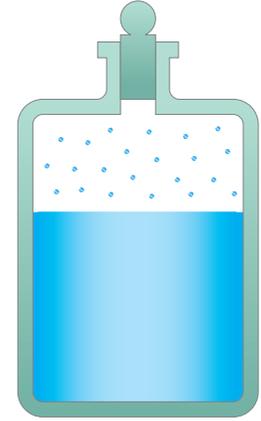
إنّ ضغط البخار المشبع لأيّ مادة يعتمد على درجة الحرارة. وعند درجات الحرارة العالية، فإنّ كثيرا من الجزيئات يكون لديها طاقة حركية كبيرة للخروج من سطح السائل إلى الحالة الغازية. ضغط البخار المشبع للماء عند درجات حرارة مختلفة مبيّن في (الجدول 13 - 3). لاحظ أنّه حتى المواد الصلبة - مثلًا الجليد - لها ضغط بخار مشبع يمكن قياسه.

في الحياة اليومية، يتم التبخّر من سطح السائل إلى الهواء وليس إلى الفراغ. وهذا لا يغير المناقشة السابقة المتعلقة (بالشكل 13 - 22). سوف نصل إلى اتزان عندما يكون هناك عدد كافٍ من الجزيئات في طور الغاز بحيث يكون العدد الذي يدخل عائداً إلى السائل مساويًا للعدد الذي يتبخّر. إنّ تركيز جزيئات معيّنة (مثل الماء) في الحالة الغازية لا يتأثر بوجود الهواء، رغم أنّ التصادم مع جزيئات الهواء ربما يزيد من الوقت اللازم للوصول إلى الاتزان. وهكذا يحصل الاتزان عند القيمة نفسها من ضغط البخار المشبع كما لو لم يكن الهواء موجودًا.

إذا كان الوعاء كبيرًا أو مفتوحًا (ليس مغلّقًا)، فقد يتبخّر السائل كلّهُ قبل الوصول إلى الاتزان. وإذا لم يكن الوعاء محكمًا - مثل غرفة في بيتك - فلا يحتمل حصول التشبّع ببخار الماء (إلا إذا كانت تمطر في الخارج).

الغليان

يزداد ضغط البخار المشبع بزيادة درجة الحرارة إلى النقطة التي يصبح عندها ضغط البخار المشبع عند تلك الدرجة مساويًا للضغط الخارجي، فيحدث الغليان (الشكل 13 - 23). وعند الاقتراب من درجة الغليان، تتشكل فقاعات صغيرة داخل السائل تشير إلى تحوّل من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية.



الشكل 13 - 22 يظهر البخار فوق السائل في وعاء مغلّق.

الجدول 3-13
ضغط البخار المشبع للماء

درجة الحرارة (°C)	ضغط البخار المشبع Pa (= N/m ²)	ضغط البخار المشبع torr (= mm-Hg)
- 50	0.030	4.0
- 10	1.95	2.60 × 10 ²
0	4.58	6.11 × 10 ²
5	6.54	8.72 × 10 ²
10	9.21	1.23 × 10 ³
15	12.8	1.71 × 10 ³
20	17.5	2.33 × 10 ³
25	23.8	3.17 × 10 ³
30	31.8	4.24 × 10 ³
40	55.3	7.37 × 10 ³
50	92.5	1.23 × 10 ⁴
60	149	1.99 × 10 ⁴
* 70	234	3.12 × 10 ⁴
80	355	4.73 × 10 ⁴
90	526	7.01 × 10 ⁴
**100	760	1.01 × 10 ⁵
120	1489	1.99 × 10 ⁵
150	3570	4.76 × 10 ⁵

* درجة الغليان في اجتماع قمة جبل إفرست.

** درجة الغليان عند مستوى سطح البحر.

عند الغليان، ضغط البخار المشبع يساوي الضغط الخارجي.



الشكل 13 - 23 الغليان:
فقاعات بخار الماء تطفو نحو الأعلى من القاعدة (حيث درجة الحرارة الأعلى).

الرطوبة النسبية

وعلى أي حال، إذا كان ضغط البخار داخل الفقاعات أقل من الضغط الخارجي، فسوف تسحق الفقاعات حالاً. وعند زيادة درجة الحرارة، فإن ضغط البخار المشبع داخل الفقاعة يصبح في النهاية مساوياً لضغط الهواء الخارجي أو يزيد عليه، وعندئذ لا تنهار الفقاعة، بل قد تصعد نحو السطح، ويكون الغليان قد بدأ. يغلي السائل عندما يصبح ضغط بخاره المشبع مساوياً للضغط الخارجي. وهذا ما يحدث في حالة الماء عند ضغط (760 torr) 1 atm وعند 100°C، كما يلاحظ من (الجدول 13 - 3).

تعتمد درجة غليان السائل بصورة واضحة على الضغط الخارجي. عند الارتفاعات العالية، تكون درجة غليان الماء أقل من تلك التي عند سطح البحر: لأن ضغط الهواء أقل في الأعلى. فمثلاً، يكون ضغط الهواء عند قمة جبل إفرست (8850 m) ثلث قيمته عند سطح البحر تقريباً. ومن (الجدول 13 - 3)، نستطيع رؤية أن غليان الماء حوالي 70°C. إن طهي الطعام بالغليان يحتاج إلى وقت أطول عند المرتفعات: لأن درجة الحرارة تكون أقل. إلا أن أوعية الطبخ بالضغط، تخفض الزمن: لأنها ترفع الضغط إلى حوالي 2 atm، وبالتالي تؤدي إلى درجات غليان عالية.

الضغط الجزئي والرطوبة

عندما نقول إن الطقس حارٌّ أو رطبٌ، فإننا نعود إلى محتوى بخار الماء في الهواء، والذي يكون مزيجاً من غازات مختلفة. ويكون الضغط الكلي هو مجموع الضغوط الجزئية لكل من الغازات الموجودة*. نعني بالضغط الجزئي الضغط الذي يؤثر به كل غاز منفرداً. ويكون الضغط الجزئي للماء في الهواء منخفضاً إلى الصفر، ويمكن أن يتغير صعوداً إلى حد أقصى بحيث يساوي ضغط البخار المشبع للماء عند درجة الحرارة المعطاة.

وهكذا، عند 20°C، لا يزيد الضغط الجزئي للماء على 17.5 torr (انظر الجدول 13 - 3). تعرف الرطوبة النسبية كحاصل قسمة الضغط الجزئي لبخار الماء على ضغط البخار المشبع عند درجة حرارة معينة. وتوصف عادةً بصورة مئوية

$$\text{الرطوبة النسبية} = \frac{\text{الضغط الجزئي } H_2O}{\text{ضغط البخار المشبع لـ } H_2O} \times 100\%$$

وهكذا، عندما تكون الرطوبة النسبية قريبة من 100% يحتفظ الهواء (تقريباً) ببخار الماء الذي يمكنه استيعابه كله.

المثال 13-18 الرطوبة النسبية

في يوم حار، درجة الحرارة 30°C، وضغط بخار الماء الجزئي في الهواء يساوي 21.0 torr. ما قيمة الرطوبة النسبية.

النَّهَج: من (الجدول 13 - 3)، نرى أن ضغط البخار المشبع للماء عند 30°C هو 31.8 torr.

الحل: وهكذا، فإن الرطوبة النسبية هي

$$\frac{21.0 \text{ torr}}{31.8 \text{ torr}} \times 100\% = 66\%$$

تطبيق الفيزياء

الرطوبة والشعور بالراحة.

الإنسان حساس للرطوبة. لذا، فإن رطوبة نسبية من 40 إلى 50% عادة تكون مثالية للصحة والشعور بالراحة. والرطوبة العالية، خاصة في الأيام الحارة، تقلل تبخر الرطوبة من الجلد، وهي واحدة من العمليات الحيوية الضرورية لتنظيم درجة حرارة الجسم. الرطوبة المتدنية في المقابل، يمكن أن تحفّف الجلد والأغشية المخاطية.

* مثلاً، 78% (من الحجم) من جزيئات الهواء هو نيتروجين، و 21% أكسجين، وبكمية قليلة كثيراً من بخار الماء، والأرغون، وغازات أخرى. عند ضغط هواء 1 atm، يؤثر الأكسجين بضغط جزئي 0.21 atm والنيتروجين 0.78 atm.



الشكل 13-24 يستوطن الضباب فوق قرية تقع في منطقة منخفضة حيث انخفضت درجة الحرارة دون نقطة الندى.

يكون الهواء مُشبعًا ببخار الماء عند ما يكون الضغط الجزئي للماء في الهواء مساويًا لضغط البخار المشبع عند درجة الحرارة تلك. إذا زاد الضغط الجزئي للماء على ضغط البخار المشبع، فيقال إنَّ الهواء فوق التشبع. ويمكن لهذا الوضع أن يحدث عند انخفاض درجة الحرارة. فمثلًا، افرض أنَّ درجة الحرارة 30°C ، والضغط الجزئي للماء هو 21 torr، حيث يمثّل رطوبةً نسبيّة قدرها 66% كما رأينا في (المثال 13-18). والآن، افرض أنَّ درجة الحرارة انخفضت إلى 20°C ، كما يحدث في الليل. من (الجدول 13 – 3)، نرى أنَّ ضغط البخار المشبع عند 20°C هو 17.5 torr. ولهذا، تكون الرطوبة النسبية أكثر من 100%، ولا يستطيع الهواء فوق التشبع أن يتحمّل هذا الماء الزائد. قد يتكاثف الماء الزائد ويظهر بصورة ندى، أو ضباب، أو مطر (الشكل 13-24). عندما يبرد الهواء الذي يحتوي كميةً معيّنةً من الماء، فسنصل إلى درجة حرارة حيث يساوي الضغط الجزئي للماء ضغط البخار المشبع؛ وهذا ما يدعى بنقطة الندى. يعدّ قياس درجة الندى أدق أسلوب لتحديد الرطوبة النسبية. أحد الأساليب إلى هذا هو استعمال سطح معدني مصقول ملامس للهواء يبرد تدريجيًا. إنَّ درجة الحرارة التي يبدأ عندها ظهور الرطوبة على السطح هي نقطة الندى، ويمكن الحصول عندها على الضغط الجزئي للماء من قوائم ضغط البخار المشبع. فمثلًا، إذا كانت درجة الحرارة 20°C في يوم ما، وكانت درجة الندى 5°C ، فإنَّ الضغط الجزئي للماء (الجدول 13-3) في الهواء الذي درجته 20°C هو 6.54 torr، فيما يكون ضغط البخار المشبع 17.5 torr. ومن هنا، فإنَّ الرطوبة النسبية هي $6.54/17.5 = 37\%$.

* 14-13 الانتشار

إذا وضعت نقاطًا قليلةً من الملون الغذائي بعناية في وعاء يحتوي كميةً من الماء كما في (الشكل 13-25)، فسترى أنَّ اللون ينتشر خلال الماء. قد يستغرق ذلك عدة ساعات (بفرض أنك لم ترّج الزجاج)، ولكن اللون سوف يتجانس أخيرًا. ويعدّ هذا المزج المعروف بالانتشار دليلًا آخر على الحركة العشوائية للجزيئات.

كما أنَّ الانتشار يحدث كذلك في الغازات. ومن الأمثلة الشائعة على هذا العطور أو الدخان الذي ينتشر في الهواء، إضافة إلى رائحة شيء يطبخ، رغم أنَّ تيارات الحمل تؤدي غالبًا دورًا في نشر الروائح ونقلها بدرجة أكثر من الانتشار. يعتمد الانتشار على التركيز، والذي يقصد به عدد الجزيئات، أو عدد المولات لوحدة الحجم.

وبشكل عام، تنتقل المادة المنتشرة من المنطقة ذات التركيز الأعلى إلى أخرى ذات التركيز الأقل. يمكن فهم الانتشار أيضًا على أساس النظرية الحركية وحركة الجزيئات العشوائية. خذ أنبوبًا مساحة مقطعه A ، ويحتوي جزيئات تركيزها عالٍ في اليسار أكثر منه في اليمين، (الشكل 13-26).

يحدث الانتشار من المناطق ذات التركيز الأعلى إلى المناطق ذات التركيز الأقل.

يبين الشكل 13-25 انتقال نقاط قليلة من الملونات الغذائية ببطء خلال الماء، لتصبح متجانسةً أخيرًا.



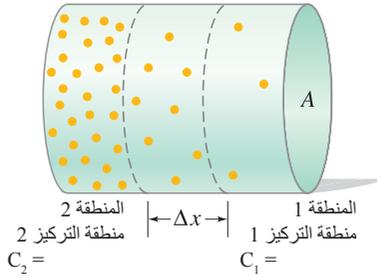
(جـ)



(ب)



(أ)



نُفرض أنّ الجزيئات في حركة عشوائية. وبالتالي سيكون هنالك جريان من الجزيئات نحو اليمين. لِمَ يُعدّ هذا صحيحاً؟ نفترض جزءاً صغيراً من الأنبوب طوله Δx كما هو مبين. تعبر الجزيئات من المنطقتين 1 و 2 هذه المنطقة المركزية نتيجة هذه الحركة العشوائية. كلّما كانت الجزيئات أكثر في منطقة ما، زاد عدد الجزيئات التي تصدم مساحةً معيّنة أو تعبر منطقة فاصلة. وبما أنّ تركيز الجزيئات أكثر في المنطقة 1 مقارنةً ما في المنطقة 2، فإنّ جزيئات أكثر تعبر المنطقة الوسطى من المنطقة 1 إلى المنطقة 2. وبهذا يكون هناك تدفق محصل للجزيئات من اليسار إلى اليمين، من التركيز الأعلى إلى التركيز الأقل. ويصبح التدفق المحصل صفرًا عند تساوي التركيزين فقط.

الشكل 13-26 يحدث الانتشار من منطقة عالية التركيز إلى أخرى قليلة التركيز. (فقط نوع واحد من الجزيئات مبيّن).

وقد نتوقع أنّه كلّما كان الفرق في التركيز أكبر كان معدل الجريان أكبر. وهذا ما يحصل فعلاً، حيث يتناسب معدّل الجريان J (عدد الجزيئات أو المولات أو kg في الثانية)، طردياً مع التغيّر في التركيز لكلّ وحدة مسافة، $(C_1 - C_2)/\Delta x$ (يسمى تدرّج التركيز)، وكذلك مع مساحة المقطع A (انظر الشكل 13-26):

$$J = DA \frac{C_1 - C_2}{\Delta x}$$

(10-13)

D هو ثابت تناسب ويُسمّى ثابت الانتشار. (المعادلة 10-13) تدعى معادلة الانتشار، أو قانون فيك. إذا أُعطي التركيزان بوحدة mol/m^3 ، فإنّ J هو عدد المولات التي تمر بنقطة معينة في الثانية. وإذا أُعطي التركيزان بـ kg/m^3 ، فإنّ J هي الكتلة المتحركة في الثانية. في حين تعطى المسافة Δx بالأمتار. قيم D لمواد متنوعة موجودة في (الجدول 13-4).

معادلة الانتشار

تطبيق الفيزياء

زمن الانتشار

الجدول 13-4 ثابت الانتشار، D (20°C , 1 atm)		
الجزيئات المنتشرة	الوسط	D (m^2/s)
H_2	هواء	6.3×10^{-5}
O_2	هواء	1.8×10^{-5}
O_2	ماء	100×10^{-11}
الدم	ماء	6.9×10^{-11}
جلايسين حمض أميني	ماء	95×10^{-11}
(كتلة DNA 6×10^6 u)	ماء	0.13×10^{-11}

المثال 13-19 انتشار الأمونيا في الهواء

لنأخذ فكرةً عن الزمن اللازم للانتشار، احسب بالتقريب الوقت اللازم لإيجاد الأمونيا (NH_3) على بعد 10 cm من قنينة بعد فتحها، بفرض أنّ الانتشار هو الموجود فقط. النهج: سيكون هذا حساباً تقريبياً. يمكن اعتبار معدل الانتشار J مساوياً لعدد الجزيئات N المنتشرة عبر مساحة A في زمن t : $J = N/t$ ، حيث عندها $t = N/J$ ، حيث J كما أُعطيت (بالمعادلة 10-13). سوف نحتاج إلى عمل بعض الفرضيات بشأن التركيزات لاستعمال (المعادلة 10 - 13).

الحل: باستعمال (المعادلة 10 - 13)، نجد أنّ

$$t = \frac{N}{J} = \frac{N}{DA \Delta C}$$

متوسط التركيز (في منتصف المسافة بين القنينة والأنف) يمكن تقريبها بـ $\bar{C} \approx N/V$ ، حيث V هو الحجم الذي تتحرك خلاله الجزيئات والذي يساوي $V \approx A \Delta x$ ، حيث Δx هي 10 cm أي 0.10 m تقريباً. نعوض في المعادلة السابقة

$$t \approx \frac{(\bar{C} A \Delta x) \Delta x}{DA \Delta C} = \frac{\bar{C}}{\Delta C} \frac{(\Delta x)^2}{D}$$

إنّ تركيز الأمونيا كبير بالقرب من القنينة، ولكنّه قليل بالقرب من الأنف، لذلك $\bar{C} \approx \Delta C/2$ أو $(\bar{C}/\Delta C) \approx \frac{1}{2}$.

بما أنّ جزيئات الأمونيا NH_3 لها حجم بين H_2 و O_2 ، لذلك من (الجدول 13 - 4) يمكن تقريب D بـ $D \approx 4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ، لذا، فإنّ

$$t \approx \frac{1}{2} \frac{(0.10 \text{ m})^2}{(4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} \approx 100 \text{ s}$$

أو بين دقيقة ودقيقتين.

ملحوظة: يبدو من هذه النتيجة أنّ المدة طويلة مقارنة بالتجربة، وهذا يقترح أنّ التيارات الهوائية (تيارات الحمل) أكثر أهمية من الانتشار في نقل الروائح.

يُعد الانتشار مهمًا جدًا بين الأعضاء الحية. فمثلًا، تنتشر الجزيئات الناتجة من تفاعلات كيميائية داخل الخلايا إلى مناطق أخرى لتأخذ، دورها في تفاعلات أخرى.

كما أن انتشار الغازات مهم أيضًا؛ فالنباتات تحتاج إلى ثاني أكسيد الكربون للتمثيل الكلوروفيلي (الضوئي). ينتشر CO₂ في الأوراق من الهواء الخارجي خلال فتحات صغيرة. وعند استعمال CO₂ في الأوراق، يقل تركيزه عن تركيزه في الهواء الخارجي. لذا، فإنه ينتشر أكثر نحو الداخل في الأوراق. أما بخار الماء والأكسجين الناتج في الأوراق، فينتشر نحو الخارج في الهواء.

كما أن الحيوانات تتبادل الأكسجين و CO₂ كذلك مع الجو المحيط. الأكسجين ضروري لتفاعلات إنتاج الطاقة، ويجب أن ينتشر إلى داخل الخلايا. في حين ينتج CO₂ من كثير من تفاعلات الأيض، ويجب أن ينتشر إلى خارج الخلايا، لكن انتشاره بطيء خلال المسافات الطويلة. ولذلك، فإن الأعضاء الصغرى جدًا في عالم الحيوان قد تنجو دون تطوير أنظمة معقدة للتنفس والدورة الدموية. وفي الإنسان، يؤخذ الأكسجين إلى الرئتين، حيث ينتشر إلى مسافات صغيرة عبر أنسجة الرئتين وللدم. ثم ينقله الدم إلى الخلايا في أنحاء الجسم. كذلك يحمل الدم CO₂ الناتج من الخلايا عائدًا إلى الرئتين، حيث ينتشر إلى الخارج.

ملخص

حيث $R = 8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ للغازات جميعها. تتبع الغازات الحقيقية قانون الغاز المثالي بدقة إذا لم تكن تحت ضغط كبير، أو قريبة من درجة الإسالة. يعرف المول الواحد من المادة بأنه عدد الغرامات الذي يساوي الكتلة الذرية أو الجزيئية عدديًا.

عدد أفوجادرو، $N_A = 6.02 \times 10^{23}$ ، هو عدد الذرات أو الجزيئات في مول واحد لأي مادة نقية.

يمكن كتابة قانون الغاز المثالي بدلالة عدد الجزيئات N في الغاز.

$$PV = NkT \quad (4 - 13)$$

حيث $k = R/N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ هو ثابت بولتزمان.

بحسب النظرية الحركية للغازات، والتي تبنى على فكرة أن الغاز مكون من جزيئات تتحرك بسرعة وبصورة عشوائية، فإن الطاقة الحركية المتوسطة للجزيئات تتناسب مع درجة الحرارة T بالكلفن:

$$\overline{KE} = \frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT \quad (8 - 13)$$

حيث k ثابت بولتزمان. عند أي لحظة هناك توزيع واسع لسرعات الجزيئات لغاز ما.

*يختلف تصرف الغازات عند الضغط العالي أو قرب درجة الإسالة عن الغاز المثالي؛ نظرًا لحجم الجزيئات وقوى التجاذب بينها. تحت درجة الحرارة الحرجة، يتحول الغاز إلى سائل إذا تعرض لضغط كاف، ولكن إذا كانت درجة الحرارة أعلى من الدرجة الحرجة، فليس هناك مقدار من الضغط يمكن أن يشكل سطح السائل. النقطة الثلاثية لمادة ما هي درجة الحرارة المنفردة والضغط التي تكون عندها الحالات كلها للمادة - الصلبة، الغازية والسائلة - حالة اتزان.

* تبخر السائل هو نتيجة الجزيئات السريعة التي تنجو من السطح. ويرجع ضغط البخار المشبع إلى ضغط البخار فوق سائل عندما يكون الطوران في حالة اتزان. إن ضغط البخار لمادة ما عند درجة غليانها يساوي الضغط الجوي. الرطوبة النسبية للهواء في مكان معين هو النسبة بين الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء إلى ضغط البخار المشبع عند درجة الحرارة تلك؛ ويعبر عنها بصورة نسبة مئوية.

* الانتشار عملية تتحرك فيها الجزيئات من منطقة إلى أخرى بسبب الاختلاف في التركيز.

تتنبأ النظرية الذرية للمادة بأن المادة مكونة من وحدات دقيقة تسمى ذرات، ويبلغ قطرها حوالي 10^{-10} m . كتل الذرات والجزيئات محددة على تدرج حيث يختار الكربون العادي (^{12}C) ويُعطى القيمة 12.0000 u (وحدة كتلة ذرية).

يُعدى التمييز بين الأجسام الصلبة والسائلة والغازية إلى متانة قوى التجاذب بين الذرات أو الجزيئات وسرعتها المتوسطة.

درجة الحرارة هي مقياس لمدى سخونة الجسم أو برودته. تستعمل موازين الحرارة لقياس درجة الحرارة على مقاييس سيلزيوس ($^{\circ}\text{C}$)، أو فهرنهايت ($^{\circ}\text{F}$) أو كلفن (K).

هناك نقطتان عياريتان على كل تدرج هما: درجة تجمد الماء (0°C , 32°F , 273.15K) ودرجة غليانه، (100°C , 212°F , 373.15K). تغير وحدة على مقياس المطلق (كلفن) يساوي درجة واحدة على سيلزيوس أو $\frac{5}{9}$ درجة فهرنهايت. ترتبط الدرجات المطلقة بالسيلزيوس ($^{\circ}\text{C}$) بـ

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15$$

يتناسب التغير في الطول، ΔL ، لمادة صلبة عندما تتغير درجة حرارة بمقدار ΔT طرديًا مع تغير الحرارة والطول الأصلي L_0 . أي

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (11 - 13)$$

حيث α معامل التمدد الطولي. يتناسب التغير في الحجم لمعظم المواد الصلبة، السائلة والغازية مع التغير في درجة الحرارة والحجم الأصلي V_0 :

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T \quad (2-13)$$

معامل التمدد الحجمي β ، يساوي 3α تقريبًا للمواد الصلبة المتجانسة. الماء غير عادي لأنه، وبخلاف معظم المواد التي يزيد حجمها بزيادة درجة الحرارة، فإن حجمه يقل في الواقع عند زيادة درجة الحرارة في المدى 0°C إلى 4°C .

قانون الغاز المثالي، أو معادلة الحالة للغاز المثالي تربط الضغط P ، الحجم V ودرجة الحرارة T (بالكلفن) لعدد مولات n بـ:

$$PV = nRT \quad (3 - 13)$$

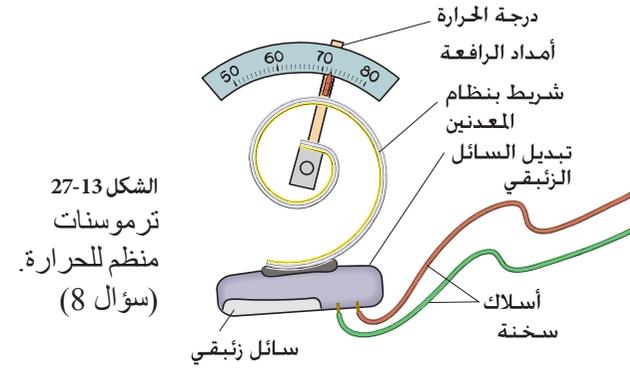
أسئلة

15. يستبّب تجميد عليّة من الصودا انتفاخ قاعدتها والجزء العلوي منها لدرجة أنّ العلبه لا تستقرّ على قاعدتها. ما الذي حصل؟
16. عندما يضغط غاز بسرعة (مثلاً باستعمال مكبس)، تزداد درجة حرارته. وعندما يتمدد غاز ضد مكبس فإنه يبرد. فسّر هذه التغيرات في درجة الحرارة باستعمال نظرية الحركة، مع ملاحظة (بشكل خاص) ما يحدث لزخم الجزيئات عندما تصطدم بالمكبس المتحرك.
17. هل ستزداد قوّة الطفو على كرة من الألمنيوم مغمورة في الماء إذا زادت درجة حرارتها من 20°C إلى 40°C أم ستنقص؟ فسّر.
18. فسّر بالكلمات كيف ينتج قانون شارل من نظرية الحركة والعلاقة بين الطاقة الحركية المتوسطة ودرجة الحرارة المطلقة.
19. فسّر بالكلمات كيف ينتج قانون جاي - لوساك من نظرية الحركة.
20. عندما تصعد عاليًا في الغلاف الجويّ الأرضي، فإنّ معدّل N_2 إلى O_2 من الجزيئات يزداد، لماذا؟
- 21* سرعة الإفلات من الأرض تعود إلى أقلّ سرعة يجب على أيّ جسم أن يملكها للخروج من الأرض وعدم العودة أبدًا. سرعة الإفلات من القمر حوالي خمس سرعة الإفلات من الأرض بسبب صغر كتلة القمر. فسّر سبب عدم امتلاك القمر (عمليًا) غلافًا جويًّا؟
- 22* تبخّر الكحول أسرع من تبخّر الماء عند درجة حرارة الغرفة. ماذا تستنتج حول الخصائص الجزيئية لأحدهما نسبةً إلى الآخر.
- 23* فسّر لماذا يكون الجوّ الحارُّ الرطبُّ مزعجًا، وغير مريح أكثر من الجوّ في يوم حارّ جافّ عند درجة الحرارة نفسها؟
- 24* هل يمكن أن نغلي الماء عند درجة حرارة الغرفة (20°C) دون تسخين؟ فسّر ذلك.
- 25* افترض يومين تكون درجتا الحرارة فيهما متساويتين، ولكن الرطوبة مختلفة. أيهما أكثر كثافة عند درجة الحرارة T نفسها؛ الهواء الجاف أم الهواء الرطب؟ فسّر.
- 26* فسّر لماذا يكون من الخطورة فتح غطاء المبرّد (الريديتر) لمحرك سيارة حار جدًا؟
- 27* لماذا يبدو هواء الزفير كغيمّة بيضاء قليلًا في الشتاء (الشكل 13-28) (المسألة 27).



الشكل 13-28 (المسألة 27).

1. أيهما يحوي ذرات أكثر: 1 kg من الحديد، أم 1 kg من الألمنيوم؟ انظر الجدول الدوري أو الملحق B.
2. اذكر خصائص متعدّدة للمواد التي تُستغلّ لعمل ميزان حرارة.
3. أيهما أكبر 1C° أم 1F° ؟
- 4* إذا كان النظام A في حالة اتزان مع النظام B، ولكن B ليس في حالة اتزان حراري مع النظام C، فماذا يمكن أن تقول عن درجات الحرارة للأنظمة A، B، و C؟
5. شريحة منسبطة مزدوجة الفلز تتكوّن من ألمنيوم مثبتة إلى شريحة من الحديد. وعند تسخينها ستنتهي. أيّ الفلزين سيكون من الجهة الخارجية للمنحنى؟ [مساعدة: انظر الجدول 13 - 1]. لماذا؟
6. في العلاقة $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$ ، هل ستكون L_0 الطول الأصلي، الطول النهائي، أو أي طول غير مهم؟ فسّر.
7. وحدات معامل التمدد الحراري α هي $^{\circ}\text{C}^{-1}$ وليس هناك ذكرٌ لأيّ وحدة طول مثل المتر. هل سيختلف معامل التمدد لو استخدمنا القدم، والملمتر بدلاً من المتر؟ فسّر.
8. يبيّن (الشكل 13 - 27) رسمًا لمنظّم حرارة بسيطٍ يُستعمل للتحكّم بفرن (أو أي نظام تسخين أو تبريد). يتكوّن المزودج الحراريّ من شريحتين من فلزين مختلفين يُربطان معًا. يتكوّن المفتاح الكهربائيّ من وعاء زجاجيّ يحتوي الزئبق السائل الذي يصل الكهرباء عندما تستطيع الجريان لتلمس سلكي التماس. فسّر كيف تعمل هذه الأداة على التحكم بالفرن، وكيف يمكن وضعه عند درجات حرارة مختلفة.



9. أنابيب البخار الطويلة المثبتة عند النهاية غالبًا ما يكون لها جزء بصورة حرف U. لماذا؟
10. أسطوانة منسبطة منتظمة من الرصاص تطفو في الزئبق عند 0°C . هل سيطفو الرصاص مرتفعًا عند زيادة درجة الحرارة أم منخفضًا؟ فسّر.
11. عندما يُوضع ميزان حرارة زئبقيّ باردٍ أولًا في ماءٍ ساخن، ينخفض مستوى الزئبق أولًا ثم يرتفع، علّل ذلك.
12. قد ينكسر وعاء زجاجي إذا سخّن أو بردنا جزءًا منه أسرع من الأجزاء المجاورة. علّل ذلك.
13. المبدأ الأساس في زجاج البايروكس أنّ معامل تمدده أصغر من ذلك الذي للزجاج العادي (الجدول 13-1). فسّر كيف يؤدي ذلك إلى زيادة مقاومة البايروكس للحرارة.
14. ساعة جذك دقيقة عند درجة 20°C . هل ستسير أسرع في يوم حار (30°C) أم أبطأ؟ فسّر. تستخدم الساعة بندولاً مثبتًا في قضيب من النحاس الأصفر نحيف وطويل.

1-13 النظرية الذرية

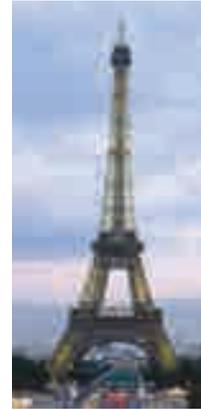
1. (I) كم ذرّة موجودة في بنس من النحاس كتلته 3.4-g؟
2. (I) كيف نقارن عدد الذرات في خاتم كتلته 26.5-g من الذهب مع عدد الذرات في خاتم فضة له الكتلة نفسها؟

2-13 درجة الحرارة وموازن الحرارة

3. (I) (أ) "درجة حرارة الغرفة" تُؤخذ عادة 68°F. ما درجة الحرارة هذه على مقياس سيلزيوس؟ (ب) درجة الفتيال في مصباح كهربائي حوالي 1800°C. ما درجة الحرارة هذه على مقياس فهرنهايت؟
4. (I) بين أعلى وأقل درجات الحرارة التي سُجّلت، كانت 136°F في الصحراء الليبية و -129°F في أنتاركتكا. ما درجات الحرارة هذه على مقياس سيلزيوس؟
5. (I) (أ) 15°C تحت الصفر، ما درجة الحرارة هذه على مقياس فهرنهايت؟ (ب) تحت الصفر ما هذه الدرجة بالسيلزيوس؟
6. (II) في ميزان حرارة كحولي، طول عمود الكحول 11.82 cm عند درجة حرارة 0.0°C ويكون طول 22.85 cm عند 100.0°C. ما درجة الحرارة إذا كان طول عمود الكحول 16.7 cm؟ (ب) 20.50 cm؟

4-13 التمدد الحراري

7. (I) طريق سريع من الإسمنت، بُني يقطع، طول كل منها 12 m (20°C). ما عرض أخاديد التمدد بين القطع عند 20°C بحيث تمنع التقوس إذا كان مدى درجات الحرارة من -30°C إلى +50°C؟
8. (I) الأنفار سبيكة من الحديد والنيكل، وهي مادة قوية بمعامل تمدد طولي صغير. $[10^{-6} (C^\circ)^{-1}]$. سطح طاولة طوله 2.0-m مصنوع من هذه المادة ويستخدم لأقيسة دقيقة بالليزر حيث نحتاج إلى دقة عالية جداً. ما مقدار تمدد هذه الطاولة من حيث الطول إذا زادت درجة الحرارة 5.0°C؟ قارن ذلك مع سطح طاولة من الفولاذ.
9. (I) برج إيفل مبني من الحديد بارتفاع 300 m تقريباً. (الشكل 29-13). احسب بالتقريب كم يتغير طوله بين يوليو (درجة الحرارة حوالي 25°C) وكانون الثاني (متوسط درجة الحرارة 2°C). أهمل الزوايا في الأعمدة الحديدية وافترض البرج عموداً رأسياً.



الشكل 29-13
(المسألة 9)
برج إيفل في باريس

10. (II) لعمل مواعمة صحيحة؛

- تكون مسامير البرشام المستعملة أكبر من فتحة المسمار حيث يبرد المسمار (عادةً باستعمال الجليد الجاف) قبل وضعه في الفتحة. مسمار فولاذ قطره 1.871 cm يُراد وضعه في فتحة 1.869 cm من حيث القطر عند 20°C. إلى أي درجة يجب تبريد المسمار إذا أُريد إدخاله في الفتحة؟
11. (II) كثافة الماء عند 4°C هي $1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ، فما كثافة الماء عند 94°C؟
12. (II) كرة من الكوارتز قطرها 8.75 cm ماذا سيكون التغير في حجمها إذا سخنت من 30°C إلى 200°C؟

13. (II) مُلئت قارورة من الزجاج حتى الحافة بـ 350.0 mL ماء عند 100.0°C. إذا خفضنا درجة الحرارة إلى 20.0°C، فكم من الماء يمكننا إضافته للقارورة.
14. (II) لوحظ أنّ 55.50 mL ماء عند 20°C تملأ بصورة كاملة الوعاء. عند تسخين الوعاء والماء إلى 60°C فقدنا 0.35 g من الماء. (أ) ما معامل التمدد الحجمي للوعاء؟ (ب) ما المادة الأكثر احتمالاً أن يكون الوعاء مصنوعاً منها إذا علمت أنّ كثافة الماء عند 60°C هي 0.98324 g/mL.
15. (II) (أ) سداة من النحاس الأصفر يُراد وضعها في حلقة من الحديد. عند 20°C قطر السداة 8.753 cm والقطر الداخلي للحلقة 8.743 cm. إلى أي درجة حرارة مشتركة يجب تسخينهما بحيث يتواءما؟ (ب) ماذا سيحدث لو كانت السداة من الحديد والحلقة من النحاس الأصفر؟
16. (II) إذا وضعنا سائلاً في وعاء طويل ضيق، بحيث يمكن أن يتمدد باتجاه واحد فقط. بين أنّ معامل التمدد الطولي α يساوي معامل التمدد الحجمي β تقريباً؟
17. (II) (أ) بين أنّ التغير في الكثافة ρ لمادة ما، عندما تتغير درجة الحرارة ΔT يعطي بـ $\Delta\rho = -\beta\rho \Delta T$. (ب) ما التغير النسبي في الكثافة لكرة رصاصية تملأ درجة حرارتها من 25°C إلى -40°C؟
18. (II) صفيحة منتظمة مستطيلة طولها l وعرضها w ، ومعامل تمددها الطولي α . بين أنه إذا أهملنا الكميات الصغيرة جداً، فإنّ التغير في المساحة للصفيحة مع تغير في درجة الحرارة ΔT هو $\Delta A = 2\alpha lw \Delta T$. انظر (الشكل 13-30).



الشكل 30-13 (المسألة 18)
تسخين صفيحة مستطيلة

19. (III) بين أنه لجسم صلب متجانس، $\beta = 3\alpha$ إذا كان مقدار التمدد قليلاً. α و β هما معامل التمدد الحجمي والطولي على الترتيب. [مساعدة: افترض جسماً صلباً مكعباً، واهمل الكميات الصغيرة جداً. انظر أيضاً المسألة 18 الشكل 13-30]
20. (III) البندول في ساعات الأجداد القديمة مصنوع من النحاس الأصفر، ويكون التوقيت دقيقاً عند درجة حرارة 17°C. كم من الوقت نكسب أو نفقد خلال سنة إذا حفظنا الساعة عند 25°C؟ (افرض أنّ التردد يعتمد على الطول كما في البندول البسيط).
21. (III) (أ) أنبوب ميزان حرارة زئبقي قطره الداخلي 0.140 mm، وحجم المستودع 0.255 cm³. إلى أي مدى سوف يتحرك خيط الزئبق عندما تتغير الحرارة من 11.5°C إلى 33.0°C؟ خذ بالحسبان تمدد زجاج البايروكس. (ب) اشتق صيغة لتغير طول خيط الزئبق بدلالة الكميات المعقولة. أهمل الحجم مقارنة بحجم المستودع.
22. (III) عجلة أسطوانية مصممة من الألمنيوم كتلتها 23.4 kg ونصف قطرها 0.41 m، تدور حول محورها عديم الاحتكاك بسرعة زاوية $\omega = 32.8 \text{ rad/s}$. إذا رفعنا درجة حرارتها من 20.0°C إلى 75.0°C، فما التغير النسبي في ω ؟

13* - 5 الإجهاد الحراري

37. (II) يحقّق بالون هواء ساخن قوّة الطفو لرفعه بواسطة تسخين الهواء داخله، بحيث تصبح كثافته في الداخل أقلّ منها في الخارج. افرض أنّ حجمه كان 1800 m^3 ، والقوّة اللازمة لرفعه 2700 N (تقريب لوزن الركاب والأدوات).

احسب درجة الحرارة داخل البالون، بحيث تؤدّي الرفع اللازم. افرض أنّ درجة الحرارة في الخارج 0°C ، وأنّ الغاز مثالي تحت هذه الظروف. ما العوامل التي تحدد أقصى ارتفاع يمكن تحقيقه بهذه الطريقة لحمل معين؟ (أهمّل العوامل مثل الرياح).
38. (II) تمّ ملء إطار سيارة بالهواء عند درجة 15°C إلى ضغط مقيس 220 kPa . إذا وصلت درجة حرارة الإطار إلى 38°C ، فما نسبة الهواء الأصلي التي يجب التخلص منها إذا رغبتنا في الإبقاء على الضغط الأصلي 220 kPa ؟

39. (II) 61.5 L من الأكسجين عند 18.0°C وضغط كلي 2.45 atm تم ضغطها إلى 48.8 L ، وفي الوقت نفسه تم رفع درجة الحرارة إلى 50.0°C ، فماذا سيكون الضغط الجديد؟

40. (II) بالون مملوء بالهيليوم أقلت من يد طفل عند مستوى سطح البحر، ودرجة 20.0°C . عندما وصل إلى ارتفاع 3000 m حيث درجة الحرارة 5.0°C والضغط 0.70 atm فقط، فما حجمه بالمقارنة مع حجمه عند سطح البحر؟

13 - 9 قانون الغاز المثالي بدلالة الجزيئات؛ عدد أفوجادرو

41. (I) احسب عدد الجزيئات في غاز مثالي عند الظروف المعيارية STP.

42. (I) ما عدد مولات الماء في اللتر؟ وكم عدد الجزيئات؟

43. احسب بالتقريب عدد (أ) المولات. (ب) الجزيئات للماء في محيطات الكرة الأرضية كلها. افرض أنّ الماء يغطي 75% من الأرض بعمق متوسط 3 km .

44. (II) صندوق مكعب الشكل حجمه $5.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ يُملأ بالهواء عند الضغط الجوي ودرجة 20°C . يغلق الصندوق ويسخن إلى 180°C . ما مقدار القوّة المحصلة على كلّ جانب من الصندوق؟

45. (III) احسب عدد جزيئات الهواء في كلّ شهيق حجمه 2.0 L وهو عدد الجزيئات التي أخذها غاليليو آخر مرة. [مساعدة: افرض أنّ الجو على ارتفاع 10 km وكثافته ثابتة].

13 - 10 التفسير الجزيئي لدرجة الحرارة

46. (I) (أ) ما الطاقة الحركية المتوسطة لجزيء أكسجين عند STP؟ (ب) ما الطاقة الحركية الانتقالية لـ 2.0 mol من O_2 عند 20°C ؟

47. (I) احسب جذر متوسط مربع السرعة rms لذرات الهيليوم بالقرب من سطح الشمس عند درجة حرارة حوالي 6000 K ؟

48. (I) بأيّ نسبة سوف تزداد rms لسرعة جزيئات إذا زادت درجة الحرارة من 0°C إلى 100°C .

49. (I) غاز درجة حرارته 20°C . إلى أيّ درجة حرارة يجب رفعه لمضاعفة قيمة rms لسرعة جزيئاته؟

50. (I) اثنا عشر جزيئاً لها السرعات التالية بـ km/s : 4، 2، 6، 4، 0، 1، 8، 5، 3، 7، 8. احسب rms للسرعة.

51. (II) يُراد زيادة rms للسرعة لجزيئات غاز عند 20.0°C بنسبة 1.0% . لأيّ درجة حرارة يجب تسخينه؟

52. (II) إذا ضاعفنا ضغط غاز مع بقاء حجه ثابتاً. ما نسبة تغيّر v_{rms} ؟

23* (II) قضيب من الألمنيوم طوله مناسب عند درجة 15°C . ما مقدار الإجهاد اللازم للمحافظة على طوله هذا ثابتاً إذا زادت درجة حرارته إلى 35°C ؟

24* (II) (أ) ذراع أفقي من الفولاذ مساحة مقطعه 0.041 m^2 مثبت بقوّة مع جسرين فولاذيين عموديين. إذا تم تثبيت الذراع عند درجة 30°C ، ما الإجهاد الذي سينشأ في الذراع إذا نقصت درجة حرارته إلى 30°C ؟ (ب) هل تجاوزنا قدرة الفولاذ النهائية؟ (ج) ما الإجهاد الناشئ لو كان الذراع من الأسمنت ومساحة مقطعه 0.13 m^2 ؟ هل سيتشوّه؟

25* (III) برميل قطره 134.122 cm عند 20°C ، ويراد تطويقه بحزام من الحديد. القطر الداخلي للحزام الدائري 134.110 cm عند 20°C وعرض الحزام 7.4 cm ، وسمكه 0.65 cm . (أ) إلى أيّ درجة حرارة يجب تسخين الحزام ليطوق البرميل؟ (ب) ماذا سيكون الشد في الحزام عندما يبرد إلى 20°C ؟

13-6 قوانين الغازات؛ درجة الحرارة المطلقة

26. (I) ما درجات الحرارة التالية على التدرج المطلق (كلفن): (أ) 86°C ؛ (ب) 78°F ؛ (ج) -100°C ؛ (د) 5500°C ؛ (هـ) 459°F ؟

27. (I) ما هي درجة الصفر المطلق على المقياس الفهرنهايتي؟

28. (II) درجات الحرارة النموذجية في باطن الأرض والشمس هي حوالي 4000°C و $15 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C}$ على الترتيب. (أ) ما درجات الحرارة هذه بالكلفن؟ (ب) ما النسبة المئوية للخطأ في كل حالة إذا نسي الشخص تحويلها من $^\circ\text{C}$ إلى K ؟

13 - 7 و 13 - 8 قانون الغاز المثالي

29. (I) 3.00 m^3 من غاز في الظروف المعيارية STP وُضِعَتْ تحت ضغط 32.0 atm ، فارتفعت درجة حرارتها إلى 38.0°C . فما الحجم؟

30. (I) في محرك الاحتراق الداخلي، يضغط الهواء الذي ضغطه يساوي الضغط الجوي وحرارته 20°C في الأسطوانة بواسطة المكبس إلى $\frac{1}{9}$ حجمه الأصلي (نسبة الضغط = 9.0). احسب، بالتقريب، درجة حرارة الهواء المضغوط بفرض أنّ الضغط يصل إلى 40 atm .

31. (II) احسب كثافة الأكسجين عند STP مستعملاً قانون الغاز المثالي.

32. (II) يحتوي خزان على 21.6 kg من (N_2) عند ضغط كليّ 3.65 atm . ماذا سيكون الضغط لو تمّ استبدال (N_2) بالكتلة نفسها من غاز CO_2 ؟

33. (II) يحتوي خزان على $18.5 \text{ kg}(\text{N}_2)$ عند ظروف STP. (أ) ما حجم الخزان؟ (ب) ماذا سيكون الضغط لو أضفنا 15.0 kg نيتروجين دون تغيير درجة الحرارة؟

34. (II) 18.75 kg مول من غاز الهيليوم عند 10.0°C وضغط مقيس 0.350 atm . احسب: (أ) حجم غاز الهيليوم تحت هذه الظروف. (ب) درجة حرارته إذا ضُغَط إلى نصف الحجم وضغط مقيس 1.00 atm .

35. (II) ما الضغط داخل خزان حجمه 35.0-L ويحتوي على 105.0 kg من غاز الأرغون عند 385 K ؟

36. (II) يحتوي خزان على 26.0 kg إلى (O_2) غاز عند ضغط مقيس مقداره 8.70 atm . إذا استعملنا الهيليوم بدلا من الأكسجين، ما عدد الكيلوغرامات اللازمة من الهيليوم للحصول على ضغط مقيس مقداره 7.00 atm ؟

- 13* - 13 ضغط البخار؛ الرطوبة
- 63* (I) ما هي نقطة الندى (تقريبًا) إذا كانت الرطوبة 50% في يوم درجة الحرارة فيه 25°C؟
- 64* (I) احسب الضغط الجوي في مكان حيث يغلي الماء عند 90°C؟
- 65* (I) إذا كان ضغط الهواء الجوي في مكان جبلي 0.72 atm، احسب درجة الحرارة التي يغلي عندها الماء.
- 66* (I) ما درجة الحرارة في يوم عندما يكون الضغط الجزئي للماء 530 Pa، والرطوبة النسبية 40%؟
- 67* (I) ما الضغط الجزئي للماء في يوم درجة الحرارة فيه 25°C، والرطوبة النسبية 35%؟
- 68* (I) ما الضغط بالتقريب داخل وعاء ضغط إذا كان الماء يغلي عند درجة 120°C؟ افرض عدم ضييع ماء خلال عملية التسخين التي بدأت عند 20°C.
- 69* (II) إذا كانت الرطوبة في غرفة حجمها 680 m³ عند درجة 25°C تساوي 80%، ما كتلة الماء التي تستطيع أن تتبخّر من مقلاة مفتوحة؟
- 70* (III) يُسحبُ هواء عند نقطة الندى 5°C إلى مبنى حيث يسخن إلى 25°C. ماذا ستكون الرطوبة النسبية عند هذه الدرجة؟ افرض ضغطًا ثابتًا 1.0 atm. خذ بالحسبان تمدد الهواء.

13* - 14 الانتشار

- 71* (II) احسب الزمن اللازم لجزيء جلايسين (انظر الجدول 13 - 4) كي ينتشر 15 μm في الماء عند 20°C إذا كان تركيزه سيتغير من 1.00 mol/m³ إلى 0.40 mol/m³. قارن هذه السرعة بسرعة rms للجزيء. الكتلة الجزيئية 75 u.
- 72* (II) ينتشر الأكسجين من سطح الحشرات إلى داخلها خلال أنابيب دقيقة تُسمى قصبات هوائية. بالمتوسط، كل قصبية طولها 2 mm ومساحة مقطعها 2 × 10⁻⁹ m². افرض أن تركيز الأكسجين في الداخل يساوي نصف تركيزه في الخارج. (أ) برهن أن تركيز الأكسجين في الهواء (21% أكسجين) عند 20°C حوالي 8.7 mol/m³. (ب) احسب معدل الانتشار J . (ج) خمن الزمن المتوسط لجزيء كي ينتشر إلى الداخل. افرض أن ثابت الانتشار يساوي 1 × 10⁻⁵ m²/s.

- 53 (II) اثبت أن قيمة rms لسرعة الجزيئات في غاز يعطى بالعلاقة $v_{rms} = \sqrt{3P/\rho}$ حيث P الضغط في الغاز، و ρ كثافته.
- 54 (II) أثبت أنه في مزيج من غازين عند درجة الحرارة نفسها، النسبة بين جذر متوسط المربع rms للسرعتين تساوي مقلوب النسبة للجذر التربيعي لكتلتيهما الجزيئيتين.
- 55 (II) ما هي rms لسرعة جزيئات النيتروجين حجمها 8.5-m³ عند 2.1 atm إذا كان المقدار الكلي للنيتروجين يساوي 1300 mol؟
- 56 (II) (أ) احسب rms سرعة لجزيء أكسجين عند 0°C. (ب) حدد كم مرة في الثانية يتحرك ذهابًا وإيابًا عبر غرفة 7.0-m في المتوسط، بفرض أن تصادماته مع الجزيئات الأخرى مهملة.
- 57 (II) ما المسافة المتوسطة بين جزيئات النيتروجين عند الظروف المعيارية STP؟
- 58 (II) (أ) احسب بالتقريب السرعة rms لحامض أميني كتلته الجزيئية تساوي 89 u في خلية حية عند 37°C. (ب) ماذا ستكون سرعة rms لبروتين كتلته الجزيئية 50,000 u عند 37°C؟
- 59 (II) برهن أن ضغط الغاز P يمكن كتابته على صورة $P = \frac{1}{3} \rho v^2$ ، حيث ρ هي كثافة الغاز، و v هي سرعة rms للجزيئات.
- 60 (III) يمكن فصل نظيري اليورانيوم ²³⁵U و ²³⁸U (يشير الرقم العلوي إلى الكتلة الذرية) بواسطة عملية طرد مركزي للغاز بتركيبهما مع الفلور للحصول على UF₆. احسب سرعة rms لهذه الجزيئات للنظيرين عند درجة حرارة T .

12 - 13* الغازات الحقيقية؛ تحولات الطور

- 61* (I) (أ) عند الضغط الجوي، ما الأطوار التي يمكن لـ CO₂ أن يكون فيها؟ (ب) لأي مدى من الضغط ودرجات الحرارة يكون CO₂ سائلًا؟ ارجع إلى (الشكل 13 - 21).
- 62* (I) ما الطور الذي سيكون عليه الماء عندما يكون الضغط 0.01 atm ودرجة الحرارة (أ) 90°C؟ (ب) -20°C؟

مسائل عامة

78. أقل ضغط يمكن الوصول إليه باستعمال أحدث مفرغات الهواء هو 10⁻¹² N/m². عند مثل هذا الضغط، كم جزيئًا يبقى لكل cm³ عند 0°C؟
79. غطّاسٌ يملأ رنتيه بصورة كاملة 5.5 L عندما يكون على عمق 10 m تحت السطح، إلى أي حجم سوف تتمدد رنتاه إذا ارتفع فجأة إلى السطح؟ هل يُنصح بذلك؟
80. تدخل مركبة فضاء عائدة من القمر الغلاف الجوي للأرض بسرعة 40,000 km/h. فأَي درجة حرارة تقابل الجزيئات (افرض النيتروجين) التي تصطدم بمقدمة المركبة عند هذه السرعة؟ (بسبب درجة الحرارة العالية هذه، يجب أن تُصنع مقدمة المركبة من مواد خاصة، في الواقع جزء منها يتبخّر وهذا يبدو كوهج لامع عند الدخول).
81. درجة حرارة غاز مثالي زادت من 110°C إلى 360°C في حين يبقى الحجم وعدد المولات ثابتًا. بأي نسبة تغير الضغط؟ وبأي نسبة زادت سرعة v_{rms} ؟

73. تمّ تدريج شريط قياس دقيق من الفولاذ عند 20°C. عند 34°C (أ) هل سيقبس أكثر أم أقل؟ (ب) ماذا سيكون الخطأ المئوي؟
74. كوب قياس من البايركس تمّ تدريجها عند درجة حرارة الغرفة. ماذا سيكون الخطأ في وصفة تتطلب 300 mL من الماء البارد إذا كان الماء والكوب عند درجة 80°C بدل 20°C؟ اهتم تمدد الزجاج.
75. الضغط المقيس في أنبوب غاز هيليوم 28 atm. بعد أن تمّ تعبئة كثير من البالونات، انخفض الضغط المقيس إلى 5 atm. فما نسبة الغاز المتبقي داخل الأنبوبة؟
76. قدر عدد جزيئات الهواء في غرفة أبعادها 6.5m × 3.1 m × 2.5m. افرض أن درجة الحرارة هي 22°C. ماذا يقابل ذلك بالمول؟
77. كثافة المادة في الفضاء الخارجي حوالي ذرة واحدة لكل cm³، غالبًا من الهيدروجين، ودرجة الحرارة حوالي 2.7 K. احسب سرعة rms لذرات الهيدروجين هذه والضغط (ب atm).

92. تساوي سرعة الإفلات من الأرض 1.12×10^4 m/s، ولهذا، فإنّ جُزيء غازٍ ينتقل بعيدًا عن الأرض بالقرب من الحافة الخارجية للغلاف الجويّ الأرضي سوف (وبهذه السرعة) يكون قادرًا على الإفلات من مجال جذب الأرض. عند أيّ درجة حرارة يكون متوسط سرعة.

(أ) جزيء أكسجين؟ (ب) ذرات هيليوم تساوي 1.12×10^4 m/s؟ (ج) لِم يحتوي غلافنا الجويّ على الأكسجين وليس الهيليوم.

93. غطاء علبة نفايات كتلته 1.0 kg يعلّق ضدّ الجاذبية بواسطة قذفه رأسياً نحو الأعلى بكرات تنس. كم كرة تنس يجب أن ترتدّ في الثانية عن الغطاء (ارتداد تام المرونة)؟ كتلة الكرة الواحدة 0.060 kg وسرعتها 12 m/s.

94. غوّاص ينفث فقاعة هواء كروية قطرها 3.00 cm عند عمق 14.0 m في بحيرة. افترض أنّ الحرارة ثابتة عند 298 K، والهواء يتصرف كغاز مثالي. ما حجم هذه الفقاعة عند وصولها إلى السطح.

95* احسب الضغط الكلي لبخار الماء في الهواء في اليومين التاليين: (أ) يوم صيف حار 30°C ورطوبة نسبية 40% (ب) يوم شتاء بارد 5°C ورطوبة نسبية 80%.

96* حجم الهواء في ساونا 7.0 m^3 ، ودرجة حرارة 90°C . الهواء جاف تمامًا. كم يلزم من الماء (بالكيلوغرام) ليتبخّر إذا أردنا زيادة الرطوبة النسبية من 0% إلى 10%؟ انظر (جدول 13 - 3).

97* احسب النسبة المئوية للفرق في كثافة الحديد عند STP وعندما يكون في باطن الأرض عند درجة 2000°C . وضغط 5000 atm. افترض معامل الجرم $90 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ومعامل التمدد الحجمي لا يتغير مع الحرارة ويبقى بالقيمة عند STP.

98* (أ) استعمل قانون الغاز المثالي لبرهان أنّ الغاز مثالي عند ضغط ثابت، معامل التمدد الحجمي يساوي $\beta = 1/T$ ، حيث T درجة الحرارة بالكلفن. قارن مع (الجدول 13 - 1) للغازات عند $T = 293 \text{ K}$. (ب) برهن أنّ معامل الجرم (البند 9-5) للغاز المثالي عند درجة حرارة ثابتة هو $B = P$ ، حيث P الضغط.

99* في الأجواء الرطبة، يعتمد الناس باستمرار لتقليل الرطوبة في قبو التخزين لمنع العفن والعفن الفطري. إذا كان القبو في بيت (20°C) مساحته 95 m^2 ، وارتفاع السقف 2.8 m، فما كتلة الماء الواجب إزالتها لخفض الرطوبة من 95% إلى 30%؟

82. بيت حجمه 770 m^3 . (أ) ما الكتلة الكلية للهواء داخله عند 20°C ؟ (ب) إذا انخفضت درجة الحرارة إلى 10°C ، فما كتلة الهواء الذي يدخل من البيت أو يخرج منه؟

83. من القيمة المعلومة للضغط الجوي على سطح الأرض، ختم العدّد الكليّ لجزيئات الهواء في الغلاف الجويّ الأرضي.

84. ما هي سرعة rms لجزيئات النيتروجين الموجودة في 7.6-m^3 عند ضغط 4.2 atm إذا كان مقدار النيتروجين الكلي 1800 mol؟

85. أسطوانة أكسجين تستخدم في مستشفى لها ضغط مقيس مقداره 2000 psi أي (13,800 kPa) وحجم 16 L (0.016 m^3) عند $T = 295 \text{ K}$. لأيّ زمن سوف تدوم الأسطوانة إذا كان معدل الجريان المقيس عند الضغط الجوي ثابتًا عند 2.4 L/min.

86. مكعب حديد يطفو في حوض زئبق عند 0°C (أ) إذا رفعنا درجة الحرارة إلى 25°C ، فهل سيطفو المكعب أكثر أم أقل في الحوض؟ (ب) بأيّ نسبة سوف يتغير حجم الجزء المغمور؟

87. كثافة الكاز عند 0°C هي $0.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. فما الكثافة في يوم جار 38°C ؟ ما نسبة التغير؟

88. إذا أريد حزم الأرض عند خطّ الاستواء بحزام من الفولاذ بصورة محكمة عند 25°C ، ولكن درجة الحرارة ارتفعت إلى 45°C ، فما ارتفاع الفولاذ فوق سطح الأرض بفرض التساوي في كلّ مكان؟

89. غطاء من النحاس الأصفر مثبت بإحكام على جرّة من الزجاج عند 20°C . للمساعدة في فتح الجرّة؛ فإنّها توضع في ماء ساخن. بعد هذه المعالجة، كانت درجة الحرارة والغطاء 60°C . القطر الداخلي للغطاء 8.0 cm عند 20°C . جد الفرق في نصف القطر بسبب عملية التسخين هذه.

90. أوّل طولٍ عياريّ تمّ تبيّنه في القرن الثامن عشر كان قضيبًا من البلاتين محدّدًا بعلامتين البعد بينهما 1 m. إذا كان هذا المقياس دقيقًا لدرجة $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ، فإلى أيّ درجة من الدقّة احتاج القائمون على ذلك إلى ضبط درجة الحرارة؟ معامل التمدد الطولي للبلاتين هو $9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

91. يكون ضغط خزّان غوّاص عند ملئه 195 atm عند 20°C . حجم الخزّان هو 11.3 L.

(أ) ماذا سيكون حجم الهواء عند 1.00 atm ودرجة الحرارة نفسها؟ (ب) يستهلك الشخص قبل دخوله الماء 2.0 L هواء في كلّ شهيق، ويتنفس 12 مرة في الدقيقة. لهذا المعدل، كم سيذوم الخزّان؟ (ج) عند عمق 20.0 m في ماء البحر ودرجة حرارة 10°C ، كم سيذوم هذا الخزّان بفرض أنّ معدل التنفس لم يتغير؟

إجابات التمارين

أ: $-40^\circ\text{F} = -40^\circ\text{C}$

ج: أقل

ب: 24.0 L

د: $3.5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$