

1 الطاقة في الفيزياء الحرارية

1.1 الاتزان الحراري Thermal Equilibrium

تعدّ درجة الحرارة من أهم المفاهيم في الثرموديناميكا (Thermodynamics)، وستعرف تعريفاً علمياً في الوحدة الثالثة، وسنبداً بتعريف تمهيدي لمفهوم درجة الحرارة.

درجة الحرارة هي مقدار ما يقيسه ميزان الحرارة، ويسمى (الثرموميتر) بصورة أولية، فإذا أردت قياس درجة حرارة حساء موضوع في قدر، فما عليك إلا أن تغمر طرف الثرموميتر في الحساء، وتنتظر قليلاً، ثم تقرأ درجة الحرارة التي يشير إليها تدرج الثرموميتر، ويطلق على هذا التعريف «التعريف التشغيلي» (Operational Definition)، الآلية التي يعمل بها الثرموميتر تعتمد على خاصية تمدد الزئبق أو انكماشه تبعاً لتغير درجة الحرارة من ارتفاع أو انخفاض داخل أنبوبة الثرموميتر. وتكون درجة الحرارة التي يشير إليها الزئبق على تدرج الثرموميتر هي درجة حرارة المحيط.

يعتمد عمل الثرموميتر على المبدأ الأساسي الآتي: إذا تلامس جسمان تختلف درجة حرارتهما، وأعطيا الوقت الكافي، فإن درجة حرارتهما تتساوى، أي يتوقف الانتقال الحراري بينهما. ويمكن هنا وضع تعريف جديد لدرجة الحرارة، وهو أنها ذلك الشيء الذي يكون متساوياً لجسمين متلامسين أعطيا وقتاً كافياً. ويمكن اعتبار هذا التعريف تعريفاً نظرياً (Theoretical Definition) لدرجة الحرارة، غير أن شيئاً من الغموض يكتنف هذا التعريف، ما نوع التلامس الذي نتحدث عنه؟ وهل هناك كمية أخرى، مازالت متساوية بين الجسمين المتلامسين؟ وقبل الإجابة عن هذه الأسئلة، دعنا نعرف بعض الاصطلاحات العلمية الأخرى. إذا تلامس جسمان مختلفان في درجة حرارتهما، وأعطيا الوقت الكافي نقول: إنهما وصلا إلى الاتزان الحراري (Thermal Equilibrium)، حيث يُعرف الزمن الذي يتطلبه الوصول إلى الاتزان الحراري بزمن الاسترخاء (Relaxation Time). ودعنا الآن نتعرف ما نعني بتلامس الجسمين.

إن الطاقة الحرارية المنتقلة بين الجسمين المتلامسين المختلفين في درجة حرارتهما تدعى الحرارة مباشرة إذا كان هناك تلامس ميكانيكي، وإذا لم يكونا متلامسين على نحو مباشر، فإن انتقال الحرارة بينهما يكون على صورة موجات كهرومغناطيسية بألية الإشعاع. وإذا ما وضع بين الجسمين مادة عازلة مثل ألياف الزجاج، أو الجدار المزدوج في الشروس، فإن الانتقال الحراري يتم بطريقة بطيئة جداً، ويحتاج إلى فترة زمنية طويلة للوصول إلى الاتزان الحراري، ويكون زمن الاسترخاء في هذه الحالة كبيراً جداً.

ولفهم زمن الاسترخاء، سنعطي الأمثلة الآتية:

عند إضافة حليب إلى كوب قهوة ساخن، يصل الخليط إلى الاتزان الحراري في زمن استرخاء لا يتعدى ثواني عدة، ولكنه يحتاج إلى دقائق عدة لتصل درجة حرارته إلى درجة حرارة محيطه، لذا فإن زمن الاسترخاء هنا يكون كبيراً (دقائق عدة)⁽¹⁾.

ويثير هذا المثال بعض الاستفسارات الأخرى، هل تتساوي المادتان في درجة حرارتهما فقط؟ وهل هناك أنواع أخرى من الاتزان؟ في الحقيقة، فإن هناك اتزان الانتشار (Diffusive Equilibrium) بين جزيئات الحليب والماء، وهناك أيضاً نوع آخر من الاتزان يدعى الاتزان الميكانيكي، عندما تكون حركة الجزيئات كبيرة (مثل تمدد البالونات في الشكل 1.1). وحدث الاتزان يتطلب انتقال كمية فيزيائية من جسم إلى آخر، ويمكن تلخيص ذلك على النحو الآتي:

نوع الاتزان	الكمية المتبادلة
حراري	الطاقة
ميكانيكي	الحجم
انتشار	الجزيئات

لاحظ أنه في حالة الاتزان الحراري، فإن الكمية المتبادلة هي الطاقة. ويمكن القول الآن: إنه عند تلامس جسمين قابلين لتبادل الطاقة بينهما، فإن الطاقة تنتقل بشكل طبيعي من الجسم الذي تكون درجة حرارته أعلى من الجسم الآخر. مع الاحتفاظ بهذا المفهوم، دعنا نحاول وضع تعريف نظري لمفهوم درجة الحرارة.

تُعرف درجة الحرارة نظرياً بأنها قابلية الجسم لإعطاء الحرارة بصورة طبيعية لمحيطه، والجسم الذي يفقد الطاقة لمحيطه تكون درجة حرارته أعلى من درجة حرارة محيطه. وسيوضح هذا التعريف على نحوٍ دقيق في الوحدة الثالثة.

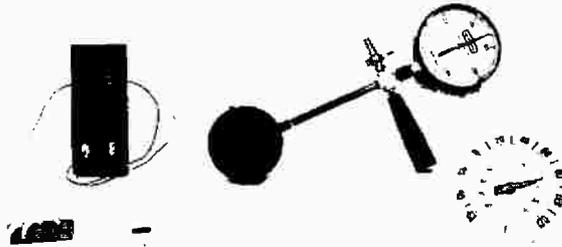
(1) يُعرف زمن الاسترخاء بأنه الزمن اللازم لتخفيض درجة الحرارة بمعامل يساوي $e \approx 2.7$ من قيمتها الأصلية، وسنحتاج في هذا الكتاب إلى التعريف الوصفي، وليس الكمي.



الشكل 1.1: يتفاعل بالون الهواء الساخن مع محيطه حراريًا، وميكانيكيًا وانتشارًا بتبادل الطاقة والحجم والجزيئات، ولا تكون هذه التفاعلات جميعها في وضع اتزان.

لعد إلى درجة حرارة التشغيل، أو ما يقيسه الترموميتر، وكيف يُدرج بصورة تتيح لنا قراءة القيم العددية لدرجة الحرارة على نحو مباشر.

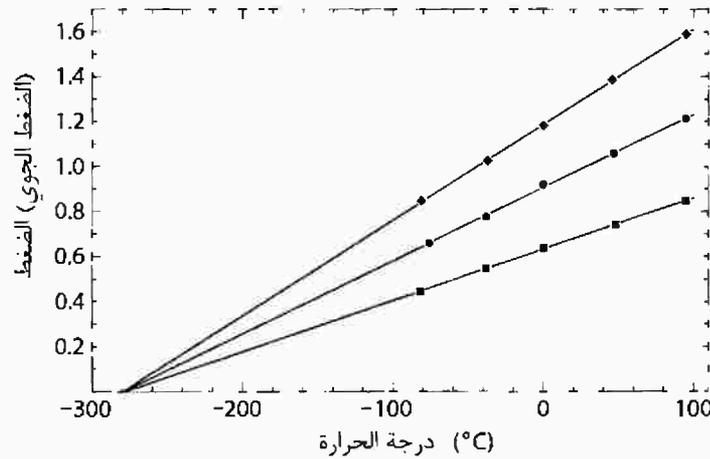
المبدأ الأساسي الذي يعتمد عليه عمل الترموميتر هو خاصية التمدد، أي قابلية المادة لشغل حجم أكبر عند ضغط ثابت مع ارتفاع درجة الحرارة. ولتدريج الترموميتر تُختار نقاط قياسية ثابتة، مثل نقطة انصهار الجليد ونقطة غليان الماء (تحت ضغط جوي).



الشكل 2.1: مجموعة من الترموميترات: في الوسط نوعان من الترموميترات المصممة على تمدد السائل، يستخدم الزئبق في هذا النوع من الترموميترات لقياس درجة الحرارة العالية، والكحول لقياس درجة الحرارة المنخفضة. الترموميتر القرصي إلى اليمين يدل انحراف مؤشره على درجة الحرارة، في حين أن الجهاز الذي إلى يمينه على صورة بوصلة يقيس الضغط عند ثبوت حجم الغاز، الترموميتر الرقمي في المؤخرة اليسرى يستخدم المزدوج الحراري - وصلة من معدنين تولد درجة حرارة معتمدة على فرق الجهد، وفي المقدمة اليسرى ثلاثة مخاريط فخارية، تنصهر، وتدل على درجة الحرارة المطلوبة لفرن الفخار.

تُقسم المسافة بين النقطتين إلى مئة جزء متساوٍ، يمثل كل جزء درجة حرارة واحدة (0 إلى 100) وليس ضرورياً أن يكون الثرموميتر زئبقياً، حيث يمكن استخدام التمدد الحراري لبعض المواد كالصفيحة المعدنية أو تمدد الغاز تحت ضغط ثابت. ويمكن أيضاً الاستفادة من الخواص الكهربائية لعمل ثرموميتر، بحيث تتغير المقاومة مع درجة الحرارة. ويبين الشكل 2.1 مجموعة من الثرموميترات المستخدمة، وليس ضرورياً أن يكون تدريجها بين 0 و 100 درجة.

يُختار نوع الثرموميتر على دقة القياس التي نحتاج إليها في حياتنا العملية. وهناك أهمية خاصة للثرموميتر الغازي تحت الحجم الثابت، فإذا رُسم الضغط على أنه دالة في درجة الحرارة (شكل 3.1) فإننا نحصل على خطٍ مستقيم يتقاطع امتداده مع المحور السيني عند درجة حرارة -273°C وتدعى هذه الدرجة «الصفر المطلق» في تدريج كلفن (Kelvin Scale)، الذي اقترحه أول مرة (William Thomson) عام 1848، وعُرف فيما بعد بالبوردر كلفن. إن الوحدة الأساسية لدرجة الحرارة في النظام SI هي الكلفن⁽²⁾. وإن الدرجة الواحدة في قياس كلفن تساوي درجة مئوية واحدة، ويبدأ تدريج كلفن من -273 يمثل الصفر في هذا التدريج.



الشكل 3.1: بيانات مأخوذة من تجربة طالب، لقياس ضغط الغاز عند حجم ثابت ودرجات حرارة مختلفة. (باستخدام الثرموميتر الغازي تحت الحجم الثابت). مجموعة البيانات تمثل ثلاث كميات من الغاز (الهواء). وبغض النظر عن كمية الغاز، فإن الضغط يكون دالة خطية مع درجة الحرارة، ويتقاطع امتدادها في تجربة الطالب عند -280°C (وعند إجراء تجارب أكثر دقة، فقد تبين أن تقاطع الخطوط عند نقطة الصفر يعتمد اعتماداً بسيطاً على كمية الغاز، ويكون هناك حد ثابت، معرفاً تعريفاً تاماً، عندما تتوّل كثافة الغاز إلى الصفر يكون تقاطع امتداد الخطوط عند الصفر المطلق الذي يساوي -273.15°C).

(2) وقد أُقرّ عدم جواز استخدام (درجة كلفن) والافتصار على (كلفن) فقط، ويجب ألا تُكتب أسماء الوحدات في النظام الدولي SI بأحرف كبيرة.

يجب التنويه هنا أنه قبل تعويض درجة الحرارة في أي معادلة ثرموديناميكية يجب أن تحول من أي تدرج آخر إلى تدرج كلفن. وهناك تدرج أخرى مستخدمة، مثل تدرج رانكن (Rankin Scale) (سؤال 2.1) والتدرج الفهرنهايتي (Fahrenheit Scale) (سؤال 1.1).

السؤال 1.1: في التدرج الفهرنهايتي تكون نقطة انصهار الجليد 32°F ونقطة غليان الماء 212°F ، والجزء الواحد بين هاتين النقطتين يدعى الدرجة الفهرنهايتية.

(أ) اشتق صيغة رياضية لتحويل درجة الحرارة الفهرنهايتية إلى مئوية وبالعكس.

(ب) احسب درجة الحرارة الفهرنهايتية التي تعادل الصفر المطلق.

السؤال 2.1: يرمز لدرجة الحرارة في مقياس رانكن بالرمز ($^{\circ}\text{R}$). وتكون الدرجة مساوية للفهرنهايت، ويبدأ تدرجه من الصفر المطلق. لذلك، فإن التحويل بين درجتي فهرنهايت ورانكن هو التحويل نفسه بين التدرج المئوي وتدرج كلفن.

(أ) أوجد صيغة رياضية لتحويل درجات الحرارة من رانكن إلى فهرنهايت، ومن رانكن إلى كلفن، ثم أوجد درجة حرارة الغرفة بتدرج رانكن.

السؤال 3.1: قدر درجة الحرارة لكل مما يأتي بتدرج كلفن:

(أ) درجة حرارة جسم الإنسان.

(ب) درجة غليان الماء تحت ضغط جوي معياري.

(ج) درجة حرارة أبرد يوم تتذكره.

(د) درجة حرارة غليان النيتروجين السائل (-196°C).

(هـ) درجة انصهار الرصاص 327°C .

السؤال 4.1: إذا قلت: إن جسمًا ما حار كضعفي جسم آخر، فهل يكون ذلك مفهومًا؟ وهل هناك فرق إذا كان مرجعك التدرج المئوي أو تدرج كلفن؟ وضح إجابتك.

السؤال 5.1: هل يمكن أن تقدر زمن الاسترخاء لعملية قياس درجة حرارة مريض بثرموميتر عادي؟

السؤال 6.1: هل يمكنك إعطاء بعض أمثلة توضح فيها عدم الدقة في الحكم على سخونة جسم ما أو برودته عن طريق اللمس فقط؟

السؤال 7.1: يزداد حجم الزيتق بمقدار $1/550,000$ من حجمه الأصلي عند زيادة درجة حرارته درجة مئوية واحدة، ويدعى التغير في حجم الجسم بالنسبة إلى التغير في درجة الحرارة عند ثبوت الضغط، معامل التمدد الحراري (β).

$$\beta \equiv \frac{\Delta V / V}{\Delta T}$$

حيث إن V يرمز إلى الحجم، و Δ إلى التغير، و T إلى درجة الحرارة.

للحصول على قيمة دقيقة لـ β يؤخذ عادة فرق صغير في درجات الحرارة.

مثلاً: β للزئبق هو $1.81 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1} = 1/550,000 \text{ K}^{-1}$ عند درجة حرارة 100°C ،

وتتغير β بنحو 1% بين درجتَي حرارة 0°C و 200°C .

(أ) أحضر ثرموميتر زئبقيًا، قدر حجم مستودعه، ثم قدر قطر الأنبوب الداخلي اللازم له ليعمل الثرموميتر على النحو المطلوب مهملاً تمدد الزجاج.

(ب) يشذ الماء في خواصه الحرارية عن كثير من المواد، فمعامل التمدد الحراري للماء عند 100°C يساوي $7.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ، ويتناقص تناقصاً تدريجياً مع انخفاض درجة الحرارة ليصل إلى الصفر عند درجة حرارة 4°C ثم تصبح قيمته سالبة بعد هذه الدرجة، ويفسر هذا كون الجليد أقل كثافة من الماء فكيف يمكن أن يكون تجمد بركة ماء إذا افترض أن معامل التمدد موجب، وليس سالباً عند درجة حرارة أقل من 4°C .

السؤال 8.1: يعرف معامل التمدد الطولي α :

$$\alpha \equiv \frac{\Delta L / L}{\Delta T}$$

L الطول، T درجة الحرارة، Δ التغير.

(أ) قدر التغير في جسر فولاذي طوله 1 km ، بين ليلة شتاء باردة ونهار صيف حار، إذا كان معامل التمدد الطولي للفولاذ $1.1 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

(ب) اشرح كيف يعمل الثرموميتر الذي على صورة القرص المبين في الشكل 2.1، إذا كان مكوناً من شريط معدني ملفوف مصنوع من معدنين مختلفين ملتصقين ببعضهما.

(ج) أثبت أن معامل التمدد الحجمي β للأجسام الصلبة، يساوي مجموع معاملات التمدد الطولي في الأبعاد الثلاثة

$$\beta(x, y, z) = \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z$$

إذا كانت المادة متجانسة isotropic يكون معامل التمدد الحجمي لهذه المادة $\beta = 3\alpha$.

فإذا كان التمدد في الجسم المتجانس متساوياً في الاتجاهات جميعها، فيصبح $(\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z)$.

2.1 الغاز المثالي The Ideal Gas

يمكن تلخيص خواص الغاز المثالي بقانون الغاز المثالي:

$$(1.1) \quad PV = nRT$$

حيث إن (P) الضغط، (V) الحجم، (n) عدد المولات، T درجة الحرارة و(R) ثابت الغاز. إذا عوض عن T في المعادلة (1.1) بالدرجة المثوية، فإن حجم الغاز يؤوّل إلى الصفر عند الصفر المثوي، وهذا غير صحيح؛ لذا يجب التعويض عن درجة الحرارة بالكلفن. قيمة ثابت الغاز (R) هي:

$$(2.1) \quad R = 8.31 \frac{J}{\text{mol.K}}$$

تستخدم وحدات النظام العالمي SI، في كل من الضغط ($N/m^2 = Pa$)، والحجم m^3 ، في حين تستخدم وحدة الضغط الجوي (atm) في كثير من كتب الكيمياء، حيث إن $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ، (البار $10^5 \text{ Pa} = \text{bar}$)، واللتر 0.1 m^3 يعرف المول بأنه كمية المادة التي تحتوي على عدد أفوجادرو من الجزيئات

$$(3.1) \quad N_A = 6.02 \times 10^{23}$$

وهذه وحدة أخرى أكثر فائدة في الكيمياء منها في الفيزياء. وغالبًا ما يعبر عن عدد الجزيئات N على النحو الآتي:

$$(4.1) \quad N = n \times N_A$$

إذا عوض N/N_A مع افتراض أن $k = R/N_A$ (ثابت بولتزمان) تصبح معادلة الحالة للغاز المثالي:

$$(5.1) \quad PV = NkT$$

و ثابت بولتزمان (k) في هذه المعادلة قيمته صغيرة جدًا في نظام SI

$$(6.1) \quad k = \frac{R}{N_A} = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J / K}$$

ولتذكر ارتباط هذه الثوابت ببعضها، يمكن حفظ الصيغة الآتية:

$$(7.1) \quad nR = Nk$$

ويمثل قانون الغاز المثالي عددًا من الحقائق الفيزيائية المهمة، فمثلاً: لكمية محدودة من الغاز عند درجة حرارة ثابتة، عند تضاعف الضغط، فإن حجم الغاز يقل إلى النصف، وعند حجم ثابت، فإذا تضاعفت درجة الحرارة يتضاعف الضغط.

ويُعدّ قانون الغاز المثالي قانونًا تقريبيًا كغيره من قوانين الفيزياء الكثيرة؛ لذا يجب توافر بعض الشروط للنظام لاستخدام هذا القانون، كأن تكون المسافات بين جزيئات الغاز كبيرة بالنسبة إلى حجم الجزيء، وقد

وجد أنه يمكن تطبيق هذا القانون على الهواء عند درجة حرارة الغرفة، وتحت ضغط جوي معياري، حيث إن معدل المسافة بين جزيئات الغاز نحو 10 أضعاف قطر الجزيء.

السؤال 9.1: احسب حجم مول واحد من الهواء عند درجة حرارة الغرفة وتحت ضغط جوي واحد؟

السؤال 10.1: قدر عدد جزيئات الهواء في غرفة.

السؤال 11.1: غرفتان A و B متساويتان في الحجم، ومتصلتان بباب مفتوح بينهما، فإذا كانت درجة حرارة الغرفة A أعلى من درجة حرارة الغرفة B، فأَي الغريتين تحتوي على كتلة أكبر من الهواء؟

السؤال 12.1: احسب معدل الحجم/ جزيء، لغاز مثالي عند درجة حرارة الغرفة وتحت ضغط جوي واحد. بأخذ الجذر التربيعي لإجابتك، فإن ذلك يمثل معدل المسافة بين جزيئات الهواء. كيف تقارن ذلك بحجم جزيء N_2 أو H_2O ؟

السؤال 13.1: يساوي المول الواحد عدد البروتونات في جرام واحد من البروتونات. وحيث إن كتلة النيوترون تساوي تقريباً كتلة البروتون، بإهمال كتلة الإلكترون، أرجع إلى الجدول الدوري، واحسب كتلة واحد مول بالجرام⁽³⁾ من كل من الماء، N_2 ، الرصاص، الكوارتز (SiO_2) .

السؤال 14.1: احسب كتلة مول واحد من الهواء الجاف، إذا كانت نسبة النيتروجين تمثل 78% والأكسجين 21% والأرجون 1%.

السؤال 15.1: قدر درجة الحرارة للغاز داخل البالون المبين في (الشكل 1.1) إذا افترض أن كتلة البالون وما يحمله من أجهزة تساوي 500 kg، ثم قدر كتلة الهواء داخل البالون.

السؤال 16.1: الجوي الأسي The exponential atmosphere

(أ) إذا كانت هناك كتلة من الهواء سماكتها dz في حالة السكون، وكان الضغط أسفل الصفيحة يعادل وزنها، إضافة إلى الضغط الواقع عليها من أعلى. فأوجد باستعمال هذه المعطيات تعبيراً رياضياً لـ dp/dz بدلالة كثافة الهواء.

(ب) باستخدام قانون الغاز المثالي، أوجد علاقة تربط بين كثافة الغاز، والضغط الجوي، ودرجة الحرارة، ومعدل كتلة جزيء الغاز (المعلومات المتعلقة بحساب كتلة الغاز أعطيت في السؤال 14.1)، ثم أثبت

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{mg}{kT} P$$

أن الضغط يتبع المعادلة التفاضلية:

تدعى هذه بالمعادلة البارومترية barometric equation

(3) التعريف الدقيق للمول هو عدد الذرات الموجودة في 12 g من الكربون 12. وتعطى كتل الذرات والجزيئات بوحدة الكتل الذرية atomic mass unit التي يُعبّر عنها الرمز (u)، حيث إن u تساوي 1/12 من كتلة ذرة الكربون 12. كتلة البروتون المعزول نقل قليلاً عن 1u، في حين تزيد قليلاً كتلة النيوترون عن 1u. وفي هذا السؤال ومعظم الأسئلة في الفيزياء الحرارية تُقَرَّب الأرقام إلى أقرب عدد صحيح لمقادير تأخذ في الحسبان كتل كل من البروتون والنيوترون.

(ج) إذا افترض أن درجة حرارة الجو لا تعتمد على الارتفاع، حل المعادلة التفاضلية في الفرع (ب) لتحصل على معادلة الضغط بوصفها دالة في الارتفاع:

$$P(z) = P(0)e^{-mgz/kT}$$

وأثبت أن تغير الكثافة مع الارتفاع يتبع معادلة مماثلة.

(د) قدر الضغط بوحدات الضغط الجوي مفترضاً أن الضغط عند سطح البحر يساوي ضغطاً جويّاً واحداً لكلّ مما يأتي: مدينة أوجادين (1430m)، مدينة كولارادو 3090m، كاليفورنيا 4420m، جبال إفرست 8840m.

السؤال 17.1: لا يمكن استعمال معادلة الغاز المثالي للغازات الحقيقية، ولإيجاد معادلة للغازات الحقيقية، يستخدم التمدد الحدي (Virial Expansion)

$$PV = nRT \left(1 + \frac{B(T)}{(V/n)} + \frac{C(T)}{(V/n)^2} + \dots \right)$$

$B(T)$ ، $C(T)$ ، إلخ دوال في درجة الحرارة. إذا كانت كثافة الغاز ليست عالية، يكون الحجم لكل مول كبيراً؛ لذا يكون كل حد أكبر من الذي يليه، وفي الغالب يمكن الاكتفاء بحددين. يعطي الجدول الآتي قيم $B(T)$ عند درجات حرارة مختلفة.

T (K)	B (cm ³ /mol)
100	-160
200	-35
300	-4.2
400	9.0
500	16.9
600	21.3

(أ) احسب $B(T)/(V/n)$ ، عند الضغط الجوي لغاز النيتروجين.

(ب) فسر- بالرجوع إلى القوى بين الجزيئات- لماذا تكون قيم $B(T)$ سالبة عند الدرجات المنخفضة، وموجبة عند درجات الحرارة العالية؟

(ج) تستخدم في الثرموديناميكا للغازات الحقيقية معادلة فاندر - ويلز Vander - Waals equation

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2} \right) (V - nb) = nRT$$

حيث إن a و b ثابتان.

أوجد الحدين $C(T)$ و $B(T)$ ، لغاز تنطبق عليه معادلة فاندنر - ويلز.
 استخدم $(1+x)^p \approx 1 + px + \frac{1}{2}p(p-1)x^2$ ، حيث إن $|px| \ll 1$ ، للمقدار $(1-nb/V)^{-1}$.
 (د) ارسم منحى معادلة فاندنر - ويلز للحد $B(T)$ ، باختيار الثوابت a و b للنيتروجين.

نموذج مجهري للغاز المثالي Microscopic Model of Ideal Gas

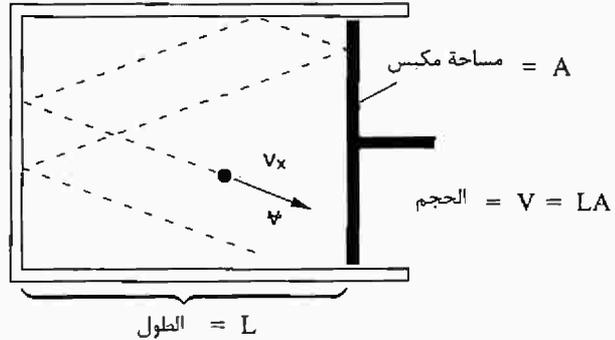
عُرّف كلاً من درجة الحرارة والاتزان الحراري على نحو مختصر في الجزء 1.1 في هذه الوحدة. حيث مثل الاتزان الحراري عملية تبادل الطاقة بين نظامين، والسؤال الذي لم نجب عنه: ما العلاقة بين درجة الحرارة والطاقة؟ وللإجابة عن هذا التساؤل، سنفترض أن النظام عبارة عن غاز مثالي، ونقترح نموذجاً مجهرياً⁽⁴⁾ لفهم هذه العلاقة.

لنتخيل أسطوانة طولها L ومساحة مقطع المكبس A (شكل 4.1) تحتوي على جزيء واحد من الغاز. حجم الأسطوانة $V = LA$ عند لحظة ما يكون متجه سرعة الجزيء v ، ومركبة السرعة في اتجاه x هي v_x ولنفترض أن الاصطدام بين الجزيء والسطح الداخلي للأسطوانة والمكبس اصطدام مرن، حيث يرتد الجزيء ارتداداً متماثلاً وعمودياً مع السطح نتيجة للاصطدام المرن، أي إنه لا يحدث تغيراً في سرعة الجزيء نتيجة لهذه الاصطدامات. ولإيجاد علاقة بين درجة الحرارة والطاقة الحركية للجزيء سنستعين بقانون الغاز المثالي.

$$PV = NkT \quad (8.1)$$

الضغط يساوي القوة الواقعة على وحدة المساحة، المؤثر في سطح المكبس (وسطوح الأسطوانة الداخلية) ولكن ما الضغط الواقع على سطح المكبس نتيجة التصادمات المتتالية والمسببة بقوة لحظية على سطح المكبس؟ سنعرف أولاً العلاقة بين الضغط والطاقة الحركية، ثم نعرف بالرجوع إلى قانون الغاز المثالي العلاقة بين درجة الحرارة والطاقة الحركية⁽⁵⁾.

الشكل 4.1: نموذج مبسط للغاز المثالي، إذ إن هناك جزيئاً واحداً يصطدم بسطح الأسطوانة والمكبس اصطدامات مرنة.



(4) يعود اقتراح النموذج إلى دانيال برنولي Daniel Bernoulli عام 1738، ولم يستخدم في كثير من التطبيقات حتى عام 1840.
 (5) تكون هذه الفرضيات صالحة فقط لمعدل خواص الجزيئات المرتدة عند السطوح، وفي أي من اصطدام الجزيء يمكن أن يكتسب أو يفقد طاقة كما يرتد بأي زاوية.

افترض أن \bar{P} (معدل الضغط) لفترة زمنية طويلة، يمكن حساب معدل الضغط على النحو الآتي:

$$(9.1) \quad \bar{P} = \frac{\bar{F}_{x, \text{on piston}}}{A} = \frac{-\bar{F}_{x, \text{on molecule}}}{A} = \frac{m \left(\frac{\Delta v_x}{\Delta t} \right)}{A}$$

تكتب معدل الضغط بدلالة حركة القوة في اتجاه x ثم استخدم قانون نيوتن الثاني، (القوة = الكتلة × العجلة) حيث عوض عن العجلة بالمقدار $\Delta v_x / \Delta t$ والزمن الذي أخذ هو الزمن الذي يستغرقه الجزيء في دورة واحدة من اليسار إلى اليمين والعودة ثانية، أي في فترة زمنية مقدارها Δt وتكتب:

$$(10.1) \quad \Delta t = 2L / v_x$$

وخلال هذه الفترة الزمنية ينجز الجزيء اصطدامًا واحدًا مع سطح المكبس، وتكون سرعته في الاتجاه x هي:

$$(11.1) \quad \Delta v_x = (v_{x, \text{final}}) - (v_{x, \text{initial}}) = (-v_x) - (v_x) = -2v_x$$

وعند تعويض هذه المعادلة في المعادلة (9.1) تحصل على معادلة الضغط على المكبس.

$$(12.1) \quad \bar{P} = -\frac{m (-2v_x)}{A (2L / v_x)} = \frac{m v_x^2}{AL} = \frac{m v_x^2}{V}$$

في هذه المعادلة عاملان: أحدهما نتيجة للتغير في Δv_x ، حيث إنه كلما كانت سرعة الجزيء أكبر أنتج ضغطًا أكبر على سطح المكبس، والعامل الآخر نتيجة للتغير في درجة الحرارة Δt ، حيث يسبب الارتفاع في درجة الحرارة زيادة في سرعة الجزيء؛ لذا تزداد عدد اصطداماته بـ سطح المكبس.

ولتعميم هذه النتائج، نفترض وجود عدد كبير من الجزيئات (N) تتحرك حركة عشوائية⁽⁶⁾ في ثلاثة أبعاد، نون أن تصطدم مع بعضها، ويمكن كتابة المعادلة 12.1 في هذه الحالة:

$$(13.1) \quad \bar{P}V = m v_{1x}^2 + m v_{2x}^2 + m v_{3x}^2 + \dots$$

إن الرمز v_{ix}^2 هو معدل قيمة مربع السرعة للجسيم الأول، وهي ستساوي v_{2x}^2 وتساوي v_{3x}^2 إلى v_{ix}^2 ويرجع السبب لعدم وجود علاقة تربط الجسيمات ببعضها أو عليه يصبح مجموع v_x^2 لجميع الجسيمات هو عبارة عن N مضروبًا في معدل قيم v_x^2 . ولذلك يمكن كتابة المعادلة 13.1 بالشكل الآتي:

$$(14.1) \quad PV = Nm \overline{v_x^2}$$

(6) ماذا نعني بكلمة عشوائية؟ لقد كتب الفلاسفة آلاف الصفحات للإجابة عن هذا السؤال، ولحسن الحظ، فإننا لا نحتاج في الفيزياء الحرارية إلى فهم عميق لهذه الكلمة، وبكل بساطة، فإنني أعني هنا أن توزيع مواقع الجزيئات ومتجهات السرعة بصورة ما متجانسة، وليس هناك ميل لاتجاه محدد.

لنحاول الآن إخضاع المعادلة (8.1) لقانون الغاز المثالي من الناحية التجريبية، وذلك بالتعويض بالعامل NkT بدلاً من PV في المعادلة 14.1، فنحصل على ما يأتي:

$$(15.1) \quad \overline{\frac{1}{2}mv_x^2} = \frac{1}{2}kT \quad \text{أو} \quad kT = \overline{mv_x^2}$$

يمثل الطرف الأيسر من هذه المعادلة، معدل طاقة حركة الجزيئات، ويمكن كتابة هذه المعادلة بوجه عام، وافترض أن مركبات الحركة بالأبعاد الثلاثة x, y, z تكون متساوية لأن حركة الجزيئات هي حركة عشوائية، لذا، فإن:

$$(16.1) \quad \overline{\frac{1}{2}mv_y^2} = \overline{\frac{1}{2}mv_x^2} = \frac{1}{2}kT$$

وعليه، فإن معدل طاقة الحركة الانتقالية هي:

$$(17.1) \quad \overline{K_{\text{trans}}} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{1}{2}m(\overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}) = \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT = \frac{3}{2}kT$$

(لاحظ أن معدل طاقة الحركة للجزيئات هو مجموع طاقة الحركة في الاتجاهات (x, y, z) من المعادلة 17.1، معدل طاقة الحركة يساوي ثابت مضروباً في درجة الحرارة.

وبناءً على هذا النموذج يمكن افتراض أن درجة الحرارة هي المقياس لمعدل الطاقة الحركية الانتقالية،

وتعطي النتيجة أيضاً تفسيراً جيداً لثابت بولتزمان (k) الذي يُعبّر عنه بوحدة J/K . واعتبار ثابت بولتزمان معاملاً للتحويل بين درجة الحرارة والطاقة الحركية للجزيئات. فمثلاً، لأي جزيء عند درجة حرارة الغرفة ($300K$)، فإن قيمة kT هي

$$(18.1) \quad (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(300K) = 4.14 \times 10^{-21} \text{ J}$$

تكون معدل الطاقة الحركية تساوي $3/2$ من هذه القيمة.

يُعدّ الجول وحدة طاقة كبيرة بالنسبة إلى الأنظمة الصغيرة التي طاقتها الحركية صغيرة جداً؛ لذا أدخلت وحدة جديدة للطاقة سُميت إلكترون فولت - فولت eV ، وهي طاقة الحركة اللازمة لتسريع إلكترون بين فرق جهد مقداره 1 فولت. $1eV = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ، وثابت بولتزمان يساوي $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ وتساوي kT عند درجة حرارة الغرفة (300 K)

$$(19.1) \quad kT = (8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K})(300K) = 0.026eV \approx \frac{1}{40} eV$$

وكذلك بوحدة eV فإن معدل الطاقة الحركية للجزيئات يكون كمية صغيرة. ولايجاد معدل سرعة الجزيئات يمكن الرجوع إلى المعادلة 17.1 حيث إن:

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m} \quad (20.1)$$

أخذ الجذر التربيعي لطرفي المعادلة لا يعطي معدل سرعة الجزيء، ولكن كمية تدعى جذر متوسط المربعات (rms أو اختصاراً root - mean - square)

$$v_{rms} \equiv \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (21.1)$$

والسؤال هنا: هل يمكن استخدام المعادلة 17.1 لإيجاد معدل الطاقة الحركية للغازات الحقيقية؟ تصطمم جزيئات الغاز الحقيقي ببعضها وبجدران الوعاء اصطداماً غير مرن، ما يتناقض مع ما افترض لاشتقاق هذه المعادلة، ولكن هذه الاصطدامات غير المرنة لا تحدث تأثيراً ملموساً في معدل سرعة جزيئات الغاز، وعندما تزداد كثافة الغاز ازيداً كبيراً، بحيث لا يمكن عندها إهمال حجم الجزيئات بالنسبة إلى حجم الوعاء، ولا تكون فرضية أن الجزيئات تسير بخطوط مستقيمة صحيحة، فلا نستطيع في هذه الحالة تطبيق قانون لغاز المثالي.

وعلى الرغم من ذلك، تبقى هذه المعادلة صحيحة بصورة تقريبية ليس فقط للغازات الحقيقية، بل للمواد السائلة والصلبة، وسيتم أيضاً إثبات ذلك في الجزء 3.6.

السؤال 18.1: احسب مقدار جذر متوسط المربعات rms لجزيء غاز النيتروجين عند درجة حرارة الغرفة.

السؤال 19.1: إذا وضع غازا الهيدروجين وغاز الأكسجين في وعاء وفي حالة اتزان حراري، فأَي جزيئات الغازين سرعته أكبر؟ وبأَي مقدار؟

السؤال 20.1: لليورانيوم نظيران كتلتهم الذرية 238 و235. ويُفصل النظيران بعضهما عن بعض بخلط اليورانيوم بالفلور، ما ينتج عن التفاعل غاز (UF₆)، ومن ثم يُفصل النظيران لاختلاف السرعات الحرارية للجزيئات المحتوية على نظائر مختلفة. احسب جذر متوسط المربعات عند درجة حرارة الغرفة لكل نظير.

السؤال 21.1: خلال عاصفة من البرد، افترض أن معدل كتلة حبة البرد 2g ومعدل سرعتها 15m/s. فإذا اصطدمت العاصفة بنافاذة مساحتها 0.5m² وبزاوية 45°C بمعدل 30 حبة في الثانية، فاحسب معدل الضغط الجوي على النافذة، وقارن إجابتك بالضغط الجوي (كم ضغطاً جويًا؟).

السؤال 22.1: تمثل حالة الانتشار للغازات، بتسرب غاز موجود في وعاء يحتوي على ثقب صغير الحجم.

(أ) إذا كانت مساحة الثقب A، فأثبت أن عدد الجزيئات التي تصطمم بهذا الثقب في فترة زمنية Δt يُعَبَّر عنه بالعلاقة $P A \Delta t / (2m \overline{v_x})$.

$P =$ الضغط، A مساحة الثقب، Δt الفترة الزمنية، $\overline{v_x}$ معدل سرعة الجزيئات في الاتجاه x التي تصطدم بالجدار.

(ب) ليس من السهل حساب $\overline{v_x}$ ، ولكن التقريب المقبول هو $(\overline{v_x^2})^{1/2}$ ، حيث إن الخط العلوي يمثل $(\overline{v_x^2})^{1/2}$.

معدل السرعة الجزيئات جميعها.

$$\text{أثبت أن: } (\overline{v_x^2})^{1/2} = \sqrt{\frac{kT}{m}}$$

(ج) إذا أخذ ذلك الجزء الصغير من الجدار، بحيث إن الجزيئات تمر من خلال الثقب الصغير بدلاً من الاصطدام به، مع افتراض عدم انتقال أي جزيئات من الخارج إلى الداخل، وأثبت أن عدد الجزيئات داخل الوعاء دالة في الزمن يُعبّر عنها بالمعادلة التفاضلية.

$$\frac{dN}{dT} = -\frac{A}{2V} \sqrt{\frac{kT}{m}} N$$

حل هذه المعادلة بافتراض ثبوت درجة الحرارة لتحصل على صيغة رياضية على الصورة $N(t) = N(0)e^{-t/\tau}$

حيث إن τ تُدعى الزمن المميز Characteristic Time لـ N و P لتتخفف بمعامل مقداره e .

(د) احسب الزمن المميز للهواء عند درجة حرارة الغرفة إذا كانت مساحة الثقب 1 mm^2 وحجم الوعاء مترًا مكعبًا واحدًا.

(هـ) إذا تسرب الهواء كليًا من إطار سيارة خلال ساعة، فقدّر مساحة الثقب في الإطار.

(و) في رواية جول - فيرن «رحلة حول القمر»، إذا فتح أحد الركاب النافذة للتخلص من بعض الفضلات ثم أغلقها، فهل تعتقد أنه يستطيع القيام بذلك بسرعة لا تحدث تغييرًا كبيرًا في كمية الهواء المتسربة إلى الخارج؟ دَعِّمْ إجابتك بتقديرات عددية.

3.1 تساوي توزيع الطاقة Equipartition of Energy

تمثل المعادلة 17.1 حالة خاصة أكثر شمولاً لتعريف تساوي توزيع الطاقة، وعلى نحو ما سنوضح لاحقاً، فإن تطبيق هذه المعادلة لا يعتمد على حالة خاصة، بل يشمل أنواع الطاقة جميعها، وسيُوضَّح ذلك أيضاً للطاقات التي تكون صيغها الرياضية صيغاً تربيعية.

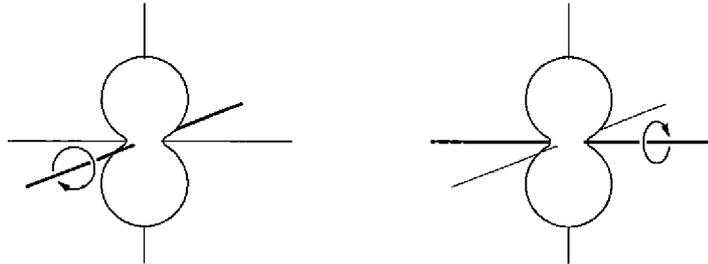
وكل شكل من أشكال الطاقة يتضمن ما يسمى درجات الحرية degrees of freedom وتشمل درجات انحرافية للطاقة الحركية الاتجاهات x, y, z والطاقات للحركات الدورانية، والاهتزازية، وطاقة الوضع (الطاقة المخزونة في زنبرك) المرنة. وتتشابه الصيغ الرياضية أنواع هذه الحركات جميعها:

$$(22.1) \quad \frac{1}{2} m v_x^2, \frac{1}{2} m v_y^2, \frac{1}{2} m v_z^2, \frac{1}{2} I \omega_x^2, \frac{1}{2} I \omega_y^2, \frac{1}{2} k_s x^2 \dots \dots \dots etc$$

وتمثل الحدود $I\omega^2$ في اتجاهاته الثلاثة (x, y, z) طاقة الحركة الدورانية، حيث إن الطاقة تكون دالة في عزم القصور الزاوي (I) moment of inertia، والسرعة الزاوية (ω) angular velocity، ويمثل الحد الأخير طاقة الوضع المخزونة في زنبرك، ثابت الزنبرك (k) و (x) الإزاحة. وتنص نظرية تساوي توزيع الطاقة على «أن كل درجة حرية ترافقها طاقة مقدارها $1/2 kT$ ». إذا افترض أن نظاماً عدد جزيئاته N ، يمتلك كل منها درجات حرية f ، وأهملت أي طاقة أخرى لا تعتمد على درجة الحرارة، فإن الطاقة الحرارية لهذا النظام تكون:

$$(23.1) \quad U_{\text{thermal}} = N \cdot f \cdot \frac{1}{2} kT$$

تمثل المعادلة 23.1 مجموع الطاقة الحرارية للنظام. وسنناقش نظرية تساوي توزيع الطاقة على نحوٍ تفصيلي في الجزء 3.6، وما يهمنا في هذه المرحلة هو فهم أساسيات هذه النظرية.



الشكل 5.1: يمكن للجزيء ثنائي الذرة الدوران حول محورين متعامدين، ومن غير المسموح له بالدوران حول المحور الثالث على امتداد طول الجزيء.

تدور الجزيئات ثنائية الذرة مثل الأكسجين (O_2) والنيتروجين (N_2) حول محورين مختلفين (انظر الشكل 5.1). ولا يدخل في حساب الطاقة دوران الجزيء حول المحور في اتجاه طول الجزيء لأسباب وضح في ميكانيكا الكم. ويكون ذلك صحيحًا في حالة غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، حيث إن له محور تماثل على امتداد طول الجزيء، وغالبية الجزيئات متعددة الذرات يمكن أن تدور حول المحاور الثلاثة.

وليس واضحًا سبب امتلاك درجات الحرية المرافقة للحركة الدورانية معدل الطاقة نفسه لدرجات الحرية المرافقة للحركة الانتقالية. إذا تخيلت جزيئات غاز ثنائي الذرة تتحرك داخل وعاء عشوائيًا، ويصطدم بعضها ببعض، وكذلك بجدران الوعاء، ستلاحظ بعد فترة زمنية أنها ستصل إلى وضع الاتزان، وتزداد الفترة الزمنية للوصول إلى حالة الاتزان، كلما كان معدل السرعة لهذه الجزيئات أكبر (درجات الحرارة العالية). ويمكن نتيج لاصطدامات الجزيئات أن تتحول الطاقة الدورانية إلى طاقة حركة انتقالية أو العكس.

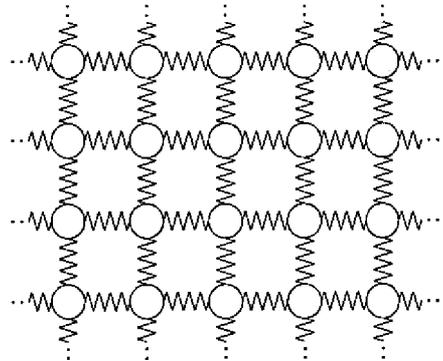
يمكن للجزيئات ثنائية الذرة أن تهتز، ككرتين ترتبطان بزنبك. ولهذا النوع من الاهتزازات درجتا حرية إحداهما للطاقة الحركية الاهتزازية، والأخرى لطاقة الوضع (يكون معدل طاقة الحركة ومعدل طاقة الوضع لمتذبذب توافقي متساويين، كما تتوقع الميكانيكا الكلاسيكية). أما الجزيئات المعقدة، فيمكن أن تتحرك بطرق مختلفة، مثل: الامتداد، الشني، أو اللف، وكل نمط من هذه الأنماط يعادل الطاقة المرافقة لأي حركة درجتي حرية. وغالبًا ما تكون مساهمة الطاقة الاهتزازية عند درجات حرارة الغرفة، مهملة. وسيوضح ذلك في الفصل الثالث.

ويجب التنويه هنا إلى أن الطاقة الحرارية لا تمثل الطاقة الداخلية الكلية للنظام، حيث إن هناك نوعًا آخر من الطاقة يدعى الطاقة الساكنة static energy لا تتغير بتغير درجة الحرارة، ومن أمثلة ذلك الطاقة بين الروابط الكيميائية وطاقة السكون (mc^2) لجسيمات النظام جميعها.

لذا، فإن تطبيق هذه النظرية سيقترن فقط على الطاقة الحرارية بأشكالها المختلفة، فمثلًا الطاقة الحرارية الوحيدة التي يمتلكها الغاز المثالي أحادي الذرة، مثل الهيليوم والأرجون هي الطاقة الحركية؛ لذا فإن عدم درجات الحرية التي يمتلكها كل جزيء من جزيئات هذه الغازات $f=3$ ، أما الغازات ثنائية الذرة، مثل O_2 و N_2 إضافة إلى الطاقة الحركية، فإن الجزيء يمتلك طاقة دورانية، حيث يدور كل جزيء حول محورين مختلفين.

إن الغازات ثنائية الذرة، مثل (N_2, O_2) تمتلك خمس درجات حرية عند درجة حرارة الغرفة. وتسهم الحركة الاهتزازية في درجات الحرية إذا كانت درجة حرارة الغاز مرتفعة؛ لذا تُعدّ حالة الجزيئات بالنسبة إلى الحركة الاهتزازية والدورانية في حالة تجمد.

الشكل 6.1: نموذج زنبكات السرير (bed-spring) للجوامد البلورية، تمثل كل ذرة بكرة ترتبط بالذرة المجاورة لها بزنبك. في الأبعاد الثلاثة هناك 6 درجات من الحرية لكل ذرة، 3 من الطاقة الحركية، و3 من الطاقة المخزونة في الزنبكات.



تُعَدّ السوائل أكثر تعقيداً من الغازات والجوامد، ولكن بوجه عام يمكن استخدام الصيغة $3/2 kT$ في إيجاد معدل طاقة الحركة الانتقالية لجزيئات السائل، إن نظرية تساوي الطاقة لا تصلح لبقيّة أنواع الطاقة الحرارية، حيث إن طاقة الوضع الناتجة عن تجاذب الجزيئات لا تكون على صورة معادلة تربيعية. وسيدرس في الجزء 6.1 من هذا الفصل دراسة لنتائج نظرية تساوي توزيع الطاقة ومقارنة توقعاتها ببعض النتائج العملية.

أما في المواد الصلبة، فتهتز الذرات في ثلاثة اتجاهات متعامدة؛ لذا فإن كل ذرة تمتلك ست درجات حرية؛ ثلاث درجات لطاقة الحركة وثلاث أخرى لطاقة الوضع). والشكل 6.1 يوضح نموذجاً بسيطاً للجوامد البلورية، فإذا كانت N تمثل عدد الذرات و f عدد درجات الحرية لكل ذرة، فإنه باستخدام المعادلة 23.1 والتعويض عن f للجوامد $f=6$ يمكن أن تكون بعض درجات الحرية عند درجات حرارة الغرفة مجمدة.

السؤال 23.1: احسب الطاقة الحرارية الكلية للتر من غاز الهيليوم عند درجة حرارة الغرفة، ثم أعد الحساب للتر من الهواء.

السؤال 24.1: احسب الطاقة الحرارية الكلية لجرام واحد لذرات تسهم في هذه الطاقة.

السؤال 25.1: اكتب درجات الحرية جميعها لجزيء من بخار الماء (فكر جيداً في الطرق كلها التي يمكن أن يتذبذب بها الجزيء).

4.1 الحرارة والشغل Heat and Work

يهتم علم الترموديناميكا بثلاثة مفاهيم أساسية هي: درجة الحرارة، والطاقة، والشغل. وقد يجد الطالب بعض الغموض في فهم الفروق بين هذه المفاهيم. وستوضّح في هذا الجزء هذه المفاهيم. لقد بينا أن التعريف الأولي لدرجة الحرارة هو أنها تدل على قابلية الجسم لفقدان أو اكتساب حرارة بصورة طبيعية، فأى زيادة في طاقة جسم ينتج عنه زيادة في درجة حرارة الجسم (ولا يُعَدّ هذا التعريف هو التعريف الدقيق لدرجة الحرارة). وتُعَدّ للطاقة أكثر المفاهيم شمولاً في الفيزياء، حيث تأخذ أشكالاً مختلفة، مثل الحركية، والكهربائية، والجاذبية، والكيميائية، والتعددية، وغيرها، ولكن يبقى المجموع الكلي للطاقة في الكون ثابتاً، حيث يمثل ذلك قانون حفظ الطاقة.

فإذا زادت طاقة أي نظام ترموديناميكي، فإن ذلك يدل على أن النظام قد اكتسب كمية من الطاقة من مصدر خارجي، ولا يمكن للنظام أن يستحدث هذه الزيادة في طاقته ذاتياً؛ لأن ذلك يتناقض مع قانون حفظ الطاقة، وتحدد الترموديناميكا آلية اكتساب أو فقدان النظام للطاقة من خلال مفهوم الحرارة والشغل، وستوضّح هذه المفاهيم فيما يأتي:

الحرارة: تُعرّف بأنها الانتقال الطبيعي للطاقة من جسم إلى آخر نتيجة لوجود فرق في درجة، فمثلاً

تنتقل الحرارة من الماء الساخن إلى الجليد، ومن الشمس إلى الأرض. ولكن آلية انتقال الحرارة تختلف في هاتين الحالتين. والطاقة المنتقلة بغض النظر عن طريقة الانتقال تدعى الحرارة.

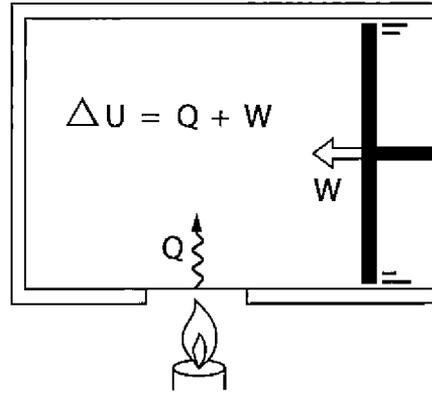
الشغل: يُعدّ الشغل شكلاً آخر لانتقال الطاقة من جسم إلى آخر، كدفع مكبس داخل أسطوانة، أو تحريك كوب من القهوة، أو تمرير تيار كهربائي خلال موصل، ففي كل حالة يُبذل فيها شغلٌ على النظام يؤدي إلى زيادة طاقته، وفي هذه الحالة لا تكون الزيادة في الطاقة نتيجة لوجود فرق في درجات الحرارة. لاحظ أن الشغل والحرارة يرتبطان بعملية انتقال الطاقة من نظام إلى آخر؛ لأننا لا يمكن أن نسأل ما كمية الحرارة أو مقدار الشغل داخل النظام. وللدلالة على طاقة النظام الداخلية يرمز إليها بالحرف (U) وإلى كمية الحرارة بالحرف Q وإلى الشغل بالحرف W، ويمكن لأي من Q أو W أن يكون سالباً أو موجباً.

ومجموع الطاقة المنتقلة إلى النظام يسمى الطاقة الحرارية والشغل، ويتحول أي منهما أو مجموعهما إلى طاقة داخلية يمتلكها النظام (انظر الشكل 7.1). وتكتب هذه العبارة رياضياً على النحو الآتي:

$$\Delta U = Q + W \quad (24.1)$$

أي إن التغير في طاقة النظام يساوي مجموع الشغل والحرارة⁽⁷⁾.

الشكل 7.1: التغير الكلي في طاقة النظام يساوي الحرارة المضافة والشغل المنجز على النظام.



حيث تمثل هذه المعادلة القانون الأول في الترموديناميكا. في نظام الوحدات SI، وتكون وحدة الطاقة هي «الجول» ($\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$). فمثلاً إذا كانت سرعة جسيم كتلته 1 kg وسرعته هي 1 m/s، فإن طاقة حركته تساوي $\frac{1}{2} \text{ J}$. وتستخدم وحدة السعر (Calorie) في بعض الأحيان استخداماً تقليدياً للطاقة، حيث يعرف السعر (الكالوري) بأنه كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة مئوية واحدة. ومن خلال

(7) كثير من كتب الفيزياء وكتب الهندسة تفترض قيمة W موجبة، عندما يكون شغل - طاقة خارجاً من النظام وليس داخلياً إليه، وفي هذه الحالة تكتب المعادلة $\Delta U = Q - W$, 24.1، يكون ذلك مفيداً في حالة المكائن الحرارية وقد وجدت ذلك مربكاً في حالات أخرى. ويستخدم الكيميائيون هذه الفرضية، ويستخدمها الفيزيائيون أيضاً

أما التجارب التي أجراها جول وغيره⁽⁸⁾ فقد وجدت العلاقة بين الشغل والحرارة، حيث إن السعر الواحد يساوي تقريباً 4.2J، والقيمة الدقيقة هي 4.186 J. أما كلمة سعر (أو كالوري) المستخدمة في احتساب السعرات في المواد الغذائية، فإنها في الحقيقة kilocalorie أي 4.186 J.

وبخصوص الانتقال الحراري، فإنه يتم من خلال ثلاث طرق هي: التوصيل، والحمل الحراري والإشعاع. ويتطلب حدوث الانتقال الحراري بالتوصيل اتصالاً بين الأجسام ووجود فرق في درجات الحرارة.

يحدث الحمل الحراري عادة في الموائع (الغازات والسوائل) نتيجة لقابلية المادة للتمدد، حيث تقل كثافته مع ارتفاع درجة الحرارة، فيرتفع إلى أعلى، وينخفض السائل أو الغاز الأبرد ليحل مكانه، وهكذا ينشأ تيار الحمل الحراري. وأما الإشعاع: فهو انبعاث الأشعة الكهرومغناطيسية على صورة أمواج، والأشعة المنبعثة عند درجة حرارة الغرفة هي الأشعة تحت الحمراء، وتنبعث من الأجسام التي تكون درجة حرارتها عالية، كالشمس أو المصباح الكهربائي أشعة غير مرئية.

السؤال 26.1: عند غمر مجموعة من المقاومات موصولة على التوالي بمصدر كهربائي في الماء، فهل الطاقة المنتقلة إلى الماء من المقاومات يمكن أن نعددها حرارة أم شغلاً؟ وكيف تصنف الطاقة الخارجة من المصدر الكهربائي إلى المقاومات؟

السؤال 27.1: أعط مثلاً لكل عملية من العمليات الآتية:

- ارتفاع درجة حرارة نظام دون انتقال كمية حرارة إليه.

- إضافة كمية حرارة إلى النظام دون ارتفاع درجة حرارته.

السؤال 28.1: قدر الوقت اللازم لوصول ماء موضوع في كوب إلى درجة الغليان، إذا وضع في مايكروويف قدرته 600W، وشرح لماذا لا نتحدث عن كمية الحرارة هنا.

السؤال 29.1: إذا وضعت كوباً يحتوي على 200g من الماء عند درجة حرارة 20°C في غرفة، وبعد 10 دقائق أصبحت درجة حرارته 25°C، فماذا تستنتج من كمية الحرارة المضافة إلى الماء؟

السؤال 30.1: ضع كمية من الماء داخل قارورة محكمة الإغلاق، وتحقق من أن درجة الحرارة هي درجة حرارة الغرفة، ثم رج القارورة بقوة قدر استطاعتك، واستمر في ذلك دقائق عدة، ثم قس درجة حرارة الماء. هل تستطيع حسابياً أن تقدر التغير في درجة الحرارة؟ قارن تقديرك بدرجة الحرارة التي قستها.

(٤) هناك مسألة أخرى تتعلق بكل من ΔU , Q , W حيث نحتاج إليها بوصفها قيماً لا متناهية، وفي هذه الحالة سنكتب dU بدلاً من ΔU مع ترك الرمز Q, W دون وضع الرمز Δ . كما كتبت القيم اللامتناهية لكل منهما dQ و dW ، ولا تقرأ ذلك التغير في الشغل أو التغير في درجة الحرارة؛ لأن ذلك لا معنى له. وهناك بعض المؤلفين يضعون خطأ صغيراً مع الحرف d وتكتب Q و W ، ولكني أفضل عدم استخدام ذلك.

- من بين الذين أسهما في وضع القانون الأول

Benjamin Thompson (Count Rumford), William Thomson and Herman von Helmholtz

5.1 شغل الانضغاط Compression Work

من أهم أنواع الشغل في الترموديناميكا، هو الشغل الناتج عن الضغط، فالشغل الميكانيكي الناتج عن حركة مكبس لأسطوانة تحتوي على غاز يُعبّر عنه بالعلاقة:

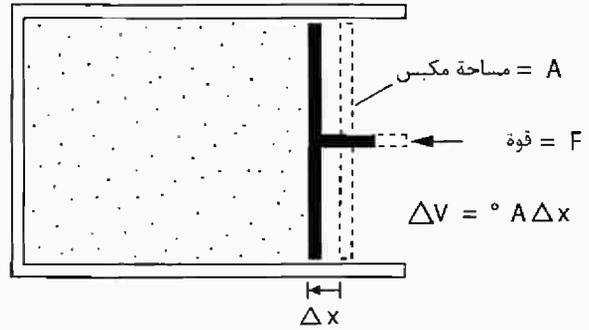
$$(25.1) \quad W = \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

حيث إن $d\vec{r}$ هي مقدار إزاحة المكبس نتيجة للضغط، ولا تتعامل الترموديناميكا مع الشغل الناتج عن القوى ذات المدى الواسع، كقوة الجاذبية؛ لذا تتعامل مع نظرية الشغل - الطاقة، لحساب تغير الطاقة الكلية للنظام نتيجة للشغل المنجز عليه، حيث إن الطاقة الكلية للنظام تزداد بمقدار $W^{(9)}$.

ويعبر عن الشغل في الأنظمة الغازية بدلالة الضغط والحجم، وعلى نحو ما هو موضح في الشكل 8.1 نجد أن القوة وإزاحة المكبس في اتجاه واحد، (الزاوية بينهما تساوي صفرًا)، لذا يمكن كتابة المعادلة 26.1 على النحو الآتي:

$$(26.1) \quad W = F\Delta x$$

الشكل 8.1: عندما يتحرك المكبس إلى الداخل، فإن الحجم يتغير بمقدار ΔV (كمية سالبة) ويكون الشغل المنجز على الغاز (بافتراض انضغاط شبه سكوني) هو $-P\Delta V$ - ويستخدم الضغط الابتدائي في المعادلة 28.1 إذا كان التغير في حجم الغاز صغيرًا. أما إذا كان التغير كبيرًا، فتقسم العملية إلى عمليات صغيرة متتالية، وتطبق المعادلة 28.1 على كل عملية، ومن ثم يحسب الشغل الناتج عن هذه العمليات.



تكون Δx موجبة إذا تحرك المكبس إلى الداخل. وفي حالة كون حركة المكبس بطيئة جدًا، بحيث يعطى الغاز الوقت الكافي ليكون متجانسًا في أثناء إجراء العملية، فإن العملية في هذه الحالة تدعى شبه ساكنة quasistatic. وإذا كانت حركة المكبس سريعة (قريبة من سرعة الصوت) فإن الغاز داخل الأسطوانة لا يكون متجانسًا في أثناء إجراء العملية، حيث تدعى هذه الحالة: عملية ليست شبه ساكنة non-quasistatic.

(9) لمزيد من المعرفة لتعريف الشغل يمكن الرجوع إلى "All About Work American" John Mallinckrodt and Harvey S Leff

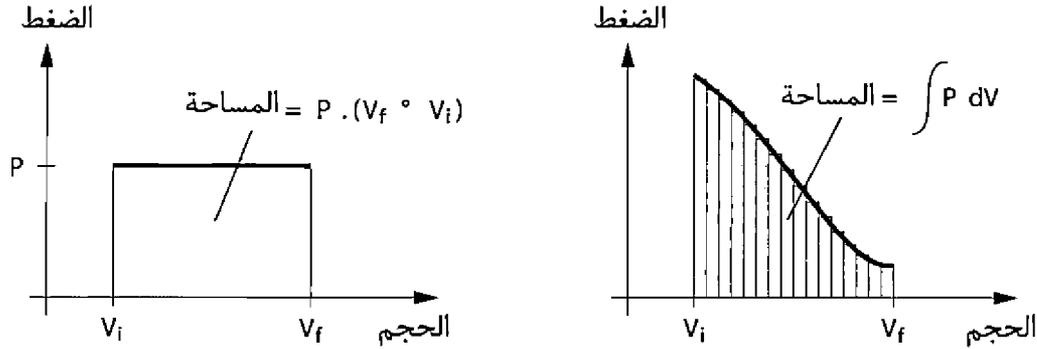
والكمية $P \Delta x$ هي عبارة عن التغير في الحجم، ويكون الشغل في العملية شبه الساكنة ⁽¹⁰⁾ هو:

$$(27.1) \quad W = PA\Delta x \quad \text{انضغاط، بعملية شبه ساكنة}$$

المقدار $A \Delta x$ عبارة عن القيمة السالبة للتغير في الحجم (سالبة لكون الحجم يتناقص عند تحرك المكبس إلى الداخل) وهكذا،

$$(28.1) \quad W = -P\Delta V \quad \text{(شبه ساكنة)}$$

مثال: إذا تغير حجم غاز عند ضغط جوي واحد (10^5 N/m^2) بمقدار لتر واحد (10^{-3} m^3)، فإن الشغل المبذول لإحداث هذا التغير هو 100 J . لاحظ أنه في حالة تمدد الغاز، فإن ΔV في المعادلة 28.1 تكون موجبة.



الشكل 9.1: عند ثبوت ضغط الغاز وتغير حجمه يكون الشغل هو المساحة (بالسالب) تحت المنحنى المرسوم بين الضغط ودرجة الحرارة، ويكون ذلك صحيحاً إذا كان الضغط متغيراً.

ولفهم ذلك يمكن الرجوع إلى الشكل 9.1. ويمثل المنحنى إلى اليسار عملية تحت الضغط الثابت، والشغل في هذه الحالة هو المساحة تحت المنحنى المرسوم في مستوى $P - V$. وإذا كان الضغط متغيراً يقسم الشكل إلى عناصر متناهية في الصغر، ويكون عندئذٍ الشغل عبارة عن مجموع مساحات هذه العناصر، أي إن:

$$(29.1) \quad W = \int_{V_i}^{V_f} P(V) dV \quad \text{(شبه ساكنة)}$$

(10) حتى في العملية شبه الساكنة، فإن الاحتكاك بين المكبس وجدران الأسطوانة يخل بالاتزان بين القوى الخارجية والقوى الداخلية التي يحدثها الغاز. إذا كانت W تمثل الشغل المنجز على المكبس من الغاز، فإن ذلك لا يمثل مشكلة، ولكن إذا مثل الشغل الذي تبذله لدفع المكبس، فسأفترض إهمال هذا الشغل.

لاحظ أن المعادلة 29.1 تشترط أن تكون العملية شبه ساكنة، حيث يمكن استخدامها في حالة الضغط الثابت أو المتغير. لا بد من أن نشير هنا إلى أن هناك أنواعاً أخرى من الشغل، إضافة إلى الشغل الناتج عن الانضغاط، وسيشرح ذلك في الفصول المقبلة.

السؤال 31.1: وضع غاز هيليوم عند ضغط جوي واحد داخل أسطوانة سعتها (1 liter) وتمدد الهيليوم ليصل الحجم إلى 3 liters، حيث ازداد ضغطه طردياً مع حجم الهيليوم.

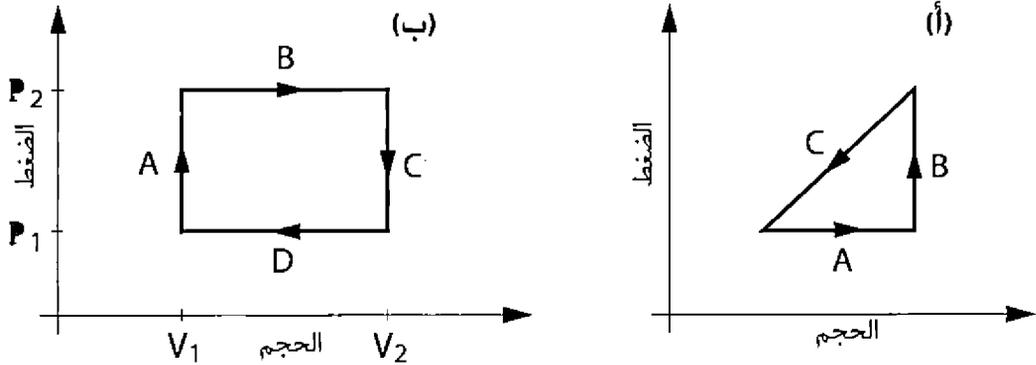
- ارسم منحنى بين الضغط والحجم لهذه العملية.
- احسب مقدار الشغل المنجز خلال هذه العملية.
- احسب مقدار التغير في طاقة الهيليوم الداخلية.
- احسب مقدار الحرارة المكتسبة أو المفقودة نتيجة لهذه العملية.
- فسر كيف يمكن أن يزداد الضغط مع زيادة الحجم.

السؤال 32.1: إذا تم تعرض ماء لضغط مقداره 200 ضغط جوي، فإن حجمه يصبح 99% من حجمه الأصلي. مثل هذه العملية بمنحنى مرسوم بين P و V ، ثم قدر الشغل اللازم إذا كان الحجم الأصلي للماء 1 liter.

السؤال 33.1: أجريت على غاز مثالي العمليات المبينة في الشكل 10.1، بين أنه للمسارات A، B، C تكون قيم ما يأتي سالبة، أو موجبة، أو صفراً.

- الشغل المنجز.
- تغير طاقة الغاز.

(ج) الحرارة المضافة إلى الغاز، ثم حدد إشارة كل من الشغل، والطاقة والحرارة للدورة الكاملة.



الشكل 10.1: منحنيات $P - V$ للأسئلة 33.1 و 34.1.

السؤال 34.1: إذا أجريت العمليات المبينة في الشكل 10.1 على غاز مثالي ثنائي الذرة موضوع في

أسطوانة بمكبس متحرك. افترض أن الطاقة الاهتزازية مهملة، وأن الشغل الوحيد هو الشغل الناتج عن الانضغاط في عمليات شبه ساكنة.

(أ) بدلالة P, V ، احسب لكل عملية الحرارة المضافة، والشغل المنجز، والطاقة الداخلية.

(ب) أعط وصفاً من الناحية الفيزيائية لكل عملية، مثلاً خلال العملية A أضيفت حرارة إلى الغاز (من مصدر خارجي)، في حين بقي المكبس ثابتاً في مكانه.

(ج) احسب مقدار الشغل الكلي، والحرارة الكلية والطاقة الداخلية للغاز خلال الدورة الكاملة، هل تفاجئك النتيجة؟ اشرح باختصار.

انضغاط الغاز المثالي Compression of an Ideal Gas

لفهم العلاقات السابقة يُدرس انضغاط الغاز المثالي للهواء تحت ضغط جوي واحد. إذا تعرض غاز مثالي داخل أسطوانة معزولة لضغط خارجي، فإن المكبس يتحرك مسبباً شغلاً منجزاً على الغاز ما يؤدي إلى رفع درجة حرارته⁽¹¹⁾. أما إذا كانت الأسطوانة غير معزولة عن محيطها الخارجي، وتسمح بانتقال الحرارة من المحيط وإليه، فلن تلاحظ زيادة في درجة حرارة الغاز.

وستتحدث في هذا الجزء عن عمليتين مثاليتين يمكن إجراؤهما على الغاز المثالي: تدعى الأولى العملية الأيزوثرمية isothermal process، حيث ينضغط الغاز مع بقاء درجة حرارته ثابتة، وأما الثانية فيكون فيها النظام معزولاً عن محيطه الخارجي، حيث لا يُسمح بانتقال الطاقة من النظام إلى المحيط أو بالعكس، وتدعى العملية الأديباتيكية. adiabatic process.

يمثل الشكل 11.1 منحنى العملية الأولى في مستوى $P - V$ عند ثبوت درجة الحرارة لغاز مثالي، ويعطي رسم العلاقة $P = NkT/V$ منحنى على شكل قطع زائد مقعر إلى أعلى concave - up - hyperbola، وتمثل المساحة تحت المنحنى الشغل (سالِب).

$$W = - \int_{V_i}^{V_f} P dV = - NkT \int_{V_i}^{V_f} \frac{1}{V} dV$$

$$= - NkT (\ln V_f - \ln V_i) = NkT \ln \frac{V_i}{V_f}$$

(30.1)

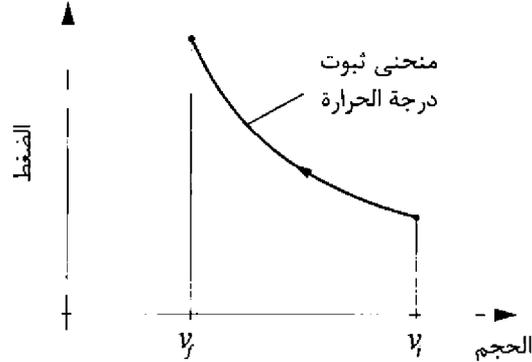
لاحظ أن الشغل يكون موجباً إذا كانت $V_i < V_f$.

(11) تحفظ خزانات العنطس مملوءة تحت الماء؛ لتجنب انضغاط الهواء الذي يؤدي إلى زيادة كبيرة في درجة حرارته.

وإذا انضغط الغاز المثالي تحت درجة حرارة ثابتة، فسيكون هناك انتقال للحرارة من النظام إلى محيطه ويستخدم القانون الأول في الثرموديناميكا. ولما كانت حقيقة أن الطاقة الداخلية (U) للنظام هي دالة فقد في درجة الحرارة، فإن

$$(31.1) \quad Q = \Delta U - W = \Delta\left(\frac{1}{2}NfkT\right) - W = 0 - W = NkT \ln \frac{V_f}{V_i}$$

الشكل 11.1: يكون منحنى PV لانضغاط غاز مثالي في عملية إيسوثرمية قطعاً زائداً مقعراً نحو الأعلى، والشغل (السالب) هو المساحة تحت المنحنى.



عودة إلى العملية الأدياباتيكية، نفترض أن العملية شبه ساكنة، والنظام معزول عزلاً كاملاً عن محيطه حيث لا يوجد تبادل في الطاقة بين النظام والمحيط، ونتيجة لذلك تتغير الطاقة الداخلية للنظام

$$(32.1) \quad \Delta U = Q + W = W$$

ويمثل الشكل 12.1 منحنى العملية الأدياباتيكية في مستوى $P - V$ ، حيث يكون مشابهاً لمنحنى العملية الأيزوثرمية، ولكن بتقعر أكثر حدة، ويربط بين منحنيات العمليات الأيزوثرمية T_1 و T_2 . ولإيجاد معادلة تصف شكل منحنى هذه العملية على نحو دقيق، يمكن الرجوع إلى نظرية تساوي الطاقة:

$$(33.1) \quad U = \frac{f}{2} NkT$$

حيث إن f عدد درجات الحرية لكل جزيء، 3 درجات حرية للغاز المثالي أحادي الذرة، و5 درجات حرية للغاز ثنائي الذرة عند درجة حرارة الغرفة. ويكون التغير في الطاقة لعنصر dU هو:

$$(34.1) \quad dU = \frac{f}{2} NkdT$$

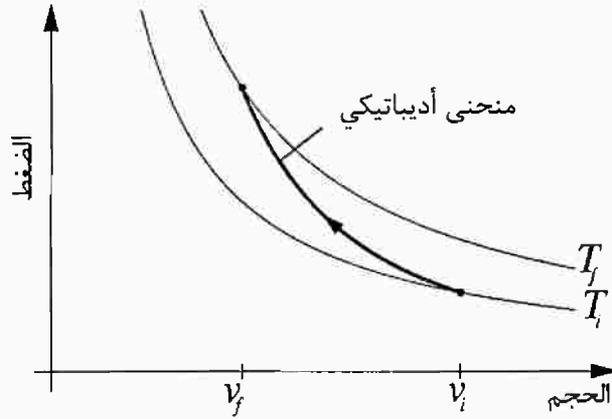
وأما في العملية شبه المستقرة، فإن الشغل يساوي $-PdV$ ، لذا، فإن المعادلة 32.1 تكتب عند تطبيقها على عملية متناهية في الصغر على صورة:

$$(35.1) \quad \frac{f}{2} NkdT = -PdV$$

المعادلة التفاضلية (35.1) تربط بين تغير درجة الحرارة والحجم من خلال أي عملية انضغاط، ولحل هذه المعادلة يكتب الضغط بدلالة $(P = NkT/V)$ فتصبح المعادلة:

$$(36.1) \quad \frac{f}{2} \frac{dT}{T} = -\frac{dV}{V}$$

الشكل 12.1: منحنى PV للعملية الأديباتيكية، يبدأ عند منحنى درجة الحرارة المنخفضة، وينتهي عند منحنى درجة الحرارة المرتفعة.



وَأخذ التكامل بين القيم الابتدائية والنهائية للحجم ودرجة الحرارة نحصل على:

$$(37.1) \quad \frac{f}{2} \ln \frac{T_f}{T_i} = -\ln \frac{V_f}{V_i}$$

يمكن كتابة هذه المعادلة بصيغة أبسط باستخدام الجبر:

$$(38.1) \quad V_f T_f^{f/2} = V_i T_i^{f/2}$$

أبـ بطريـقة أكثر اختصاراً:

$$(39.1) \quad VT^{f/2} = \text{ثابت}$$

يمكن حساب درجة الحرارة النهائية في العملية الأديباتيكية إذا عُرفت V_i, V_f, T_i ، وإذا حذفنا T من طرفي المعادلة 38.1 وعوّض عنها بدلالة $P.V$ من قانون الغاز المثالي نحصل على علاقة تربط بين الضغط

والحجم في العملية الأديباتيكية.

(40.1) ثابت $V^\gamma P =$

حيث إن γ عامل يساوي $f / (f + 2)$

السؤال 35.1: اشتق المعادلة 40.1 من المعادلة 39.1.

السؤال 36.1: إذا ضُخَّ 1 لتر من الهواء في إطار دراجة عند ضغط جوي واحد ليصل إلى 7 ضغط جوي في عملية أديباتيكية (افتراض أن الهواء مكون من جزيئات ثنائية الذرة N_2 و O_2).

(أ) احسب الحجم النهائي للغاز.

(ب) احسب مقدار الشغل المنجز.

(ج) إذا كانت درجة حرارة الهواء الابتدائية 300 K، فاحسب درجة الحرارة النهائية.

السؤال 37.1: ينضغط الهواء بسرعة في محرك مكنة الديزل، ينضغط من حجمه الأصلي إلى نحو $1/20$ من حجمه الأصلي، قدر درجة حرارة الهواء بعد عملية الانضغاط، ثم فسر لماذا لا يحتاج محرك الديزل إلى شمعات اشتعال Spark Plugs.

السؤال 38.1: تخيل فقاعتين A و B من الغاز تكوّنتا في قعر بحيرة، وتحركتا صعوداً إلى السطح، ونتيجة لفرق الضغط بين قعر البحيرة وسطحها يزداد حجم الفقاعة، كلما صعدت إلى الأعلى، وخلال صعود الفقاعة A كانت سرعتها كبيرة، حيث لم تتبادل الطاقة بينها وبين الماء، ولكن الفقاعة B تحركت بسرعة بطيئة حيث كان هناك اتزان حراري بينها وبين ماء البحيرة، فأَي الفقاعتين تمتلك حجماً أكبر عند وصولهما إلى السطح؟ اشرح ذلك بالتفصيل.

السؤال 39.1: يمكن إثبات أن سرعة الصوت بتطبيق قوانين نيوتن لوسط متصل ومتذبذب هي:

$$c_s = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

حيث إن ρ كثافة الوسط، و B معامل المرونة الحجمي bulk modulus حيث يعرف $B = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V}$. ويكتنف هذا التعريف نوع من الغموض؛ لعدم تحديد نوع العملية الترموديناميكية، هل هي عملية أيزوثرمية أو أديباتيكية؟

(أ) أوجد الصيغة الرياضية لمعامل المرونة الحجمي للغاز المثالي بدلالة ضغطه في العملية الأيزوثرمية والعملية الأديباتيكية.

(ب) إذا حسبنا سرعة الصوت، فإن B هو الذي يجب استخدامه. ناقش ذلك.

(ج) اشتق علاقة لسرعة الصوت في الغاز المثالي بدلالة درجة الحرارة ومعامل كتلة الجزيء، قارن النتيجة

بالصيغة التي أعطيت لجذر متوسط المربعات rms، ثم احسب سرعة الصوت للهواء عند درجة حرارة الغرفة. (د) لاحظ أحد الموسيقيين أن الصوت الموسيقي الصادر عن موسيقا القرب يتغير كلما زاد الارتفاع عن سطح البحر، فهل تتوقع أن يؤثر الارتفاع عن سطح البحر في سرعة الصوت، وفي ترددات الأمواج المستقرة (standing waves)؟ إذا كانت إجابتك بالموافقة أو النفي فسر ذلك.

السؤال 40.1: في السؤال 16.1 حُسب الضغط الجوي بوصفه دالة في الارتفاع، بافتراض ثبوت درجة الحرارة. ولكن في الواقع، فإنها تتناقص في طبقة التروبوسفير (من 10 إلى 15km عن سطح البحر). وعادة ما يبدأ التوصل الحراري بالحمل إذا زادت (dT/dz) على حد معين، ما ينتج عنه ارتفاع الهواء الساخن ذي الكثافة المنخفضة إلى أعلى، ليحل محله الهواء الأقل سخونة والأكثر كثافة، وانخفاض الضغط مع زيادة الارتفاع ينتج عنه تمدد في كمية «الغاز المرتفعة» إلى أعلى في عملية أديباتيكية تؤدي إلى انخفاض في درجة حرارته. والشرط الأساسي لحدوث الحمل الحراري هو بقاء كمية الهواء المندفعة إلى أعلى أسخن من الهواء المحيط بها على الرغم من أن العملية أديباتيكية.

(أ) أثبت أنه عند تمدد الغاز في عملية أديباتيكية، فإن درجة الحرارة والضغط تربطهما المعادلة التفاضلية الآتية:

$$\frac{dT}{dP} = \frac{2}{f+2} \frac{T}{P}$$

(ب) افترض أن (dT/dz) تمثل القيمة الحرجة اللازمة لبدية عملية التوصيل بالحمل، مستخدمًا نتيجة السؤال 16.1 لإيجاد صيغة رياضية لهذه الحالة. يجب أن تحصل على ثابت $10^\circ\text{C}/\text{km}$ تقريبًا، ولا يعتمد على درجة الحرارة أو الضغط، وتعرف هذه القيمة Dry adiabatic lapse rate.

6.1 السعات الحرارية Heat Capacities

تُعرّف السعة الحرارية بأنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الجسم درجة مئوية واحدة.

$$(41.1) \quad C \equiv \frac{Q}{\Delta T}$$

(ترمز C إلى السعة الحرارية) وكلما زادت كمية المادة ازدادت سعتها الحرارية، والكمية المستعملة في الثرموديناميكا هي السعة الحرارية النوعية التي تُعرّف بأنها السعة الحرارية لوحدة الكتل. (C ترمز إلى السعة الحرارية النوعية)

$$(42.1) \quad c \equiv \frac{C}{m}$$

ويكتنف هذا التعريف بعض الغموض، هل تعتمد السعة الحرارية النوعية على الظروف المحيطة بالجسم؟ وهل بذل شغل على الجسم؟ وما مقدار هذا الشغل إذا بذل خلال رفع درجة حرارة الجسم؟ وللإجابة عن هذه الأسئلة، نعوض المعادلة 41.1 في معادلة القانون الأول في الثرموديناميكا،

$$(43.1) \quad C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U - W}{\Delta T}$$

وإذا كانت طاقة الجسم معرفة بأنها دالة في درجة الحرارة (في بعض الحالات لا يكون صحيحًا)، فإن الشغل المنجز قد يكون أي شيء، وكذلك C.

هناك طريقتان لاختيار الشغل: الأولى أن يساوي الشغل صفرًا، أي لا يوجد شغل أنجز على النظام، وفي هذه الحالة تُعرّف السعة الحرارية بأنها السعة الحرارية تحت الحجم الثابت (C_p).

وعندئذٍ تُكتب 3 بالمعادلة 43.1 على النحو الآتي:

$$(44.1) \quad C_v = \left(\frac{\Delta U}{\Delta T} \right)_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v$$

(يشير الرمز ∂ إلى التفاضل الجزئي). ويمكن افتراض أن U دالة في الحجم ودرجة الحرارة، حيث تكون T المتغيرة عند إجراء التفاضل الجزئي). ويطلق على C_v عادة «سعة الطاقة energy capacity» حيث إنها عبارة عن الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة الجسم درجة مئوية واحدة، بغض النظر أن تكون الطاقة الداخلة هي طاقة حرارية أو غيرها.

وتساوي السعة الحرارية النوعية تحت الحجم الثابت لجرام واحد من الماء $1 \text{ Cal}/^\circ\text{C}$ أو نحو $2.1 \text{ J}/^\circ\text{C}$ ، ولما كان الجسم يتمدد عند ارتفاع درجة حرارته، وهذا ما يحدث شغلًا سالبًا على محيطه، فإن C_p تكون أكبر أو تساوي C_v ($C_p \geq C_v$).

وإذا ما كان الضغط حول الجسم ثابتاً، فإن السعة الحرارية تدعى السعة الحرارية تحت الضغط الثابت C_p وبالتعويض في المعادلة 43.1 نجد:

$$(45.1) \quad C_p = \left(\frac{\Delta U - (-P\Delta V)}{\Delta T} \right)_P = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_P + P \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$$

الحد الأخير في هذه المعادلة يمثل تعويضاً للحرارة التي فقدت بوصفها شغلاً، حيث تزداد قيمة هذا الحد كما زاد الحجم. وتكون هذه القيمة صغيرة للأجسام الصلبة والسائلة، حيث يمكن إهمالها من المعادلة.

ولما كانت المعادلات من 41.1 إلى 45.1 عبارة عن تعريفات؛ لذا فإنه يمكن استخدامها للأجسام جميعها.

ولإيجاد قيمة السعة الحرارية لجسم، فإن أمامك ثلاثة اختيارات هي: قياسها بطريقة مباشرة (السؤال 41.1)، أو البحث عن قيمتها في المراجع المحتوية على جداول للسعات الحرارية، أو توقعها نظرياً (هل تعتقد أن هذه الطريقة ممكنة).

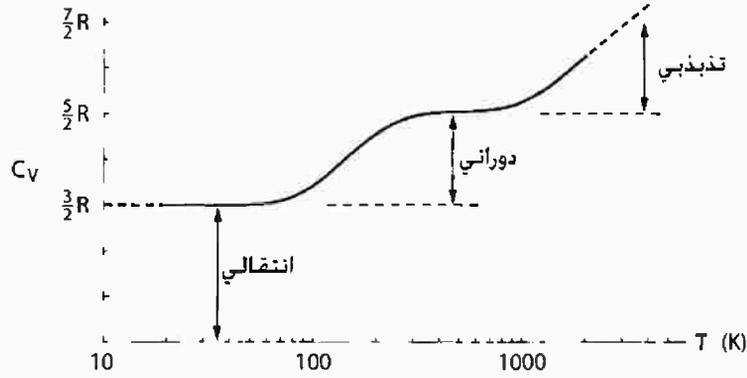
افترض أن نظاماً يخزن طاقة حرارية على النحو الذي سُرح في الجزء 3.1، لذا فمن نظرية التقسيم المتساوي للطاقة، فإن طاقته الداخلية تساوي $U = \frac{f}{2} NkT$ (مع إهمال أي نوع من أنواع الطاقة لا يعتمد على درجة الحرارة، أي إن:

$$(46.1) \quad C_v = \frac{\partial U}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{NfkT}{2} \right) = \frac{Nfk}{2}$$

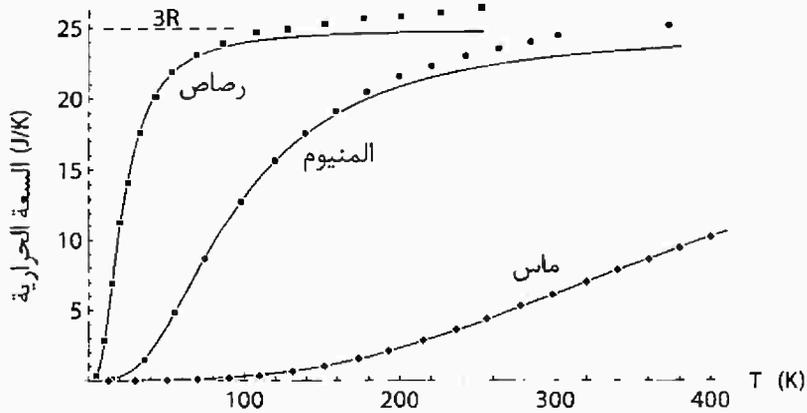
مع افتراض أن f لا تعتمد على درجة الحرارة (يمكن اشتقاق $\partial U / \partial T$ عند ثبوت أي من الحجم أو الضغط) تكون f للغاز المثالي أحادي الذرة = 3؛ لذا فإن: $C_v = \frac{3}{2} Nk = \frac{3}{2} nR$. وهكذا، فالسعة الحرارية لكل مول من الغاز المثالي أحادي الذرة = $\frac{3}{2} R = 12.5 \text{ J/K}$. وحيث إن عدد درجات الحرية للغازات المثالية ثائية الذرة أكبر منها لأحادية الذرة؛ لذا فمن المتوقع أن تكون السعة الحرارية تحت الحجم الثابت للغازات ثائية الذرة أكبر منها للغازات أحادية الذرة.

يبين الشكل 13.1 العلاقة بين C_p و T لمول واحد من غاز الهيدروجين (H_2). ومن الشكل نفسه، فإن مساهمة درجات الحرية المرافقة للحركات الدورانية والاهتزازية عند درجات الحرارة المنخفضة لا يكون لها تأثير في قيمة السعة الحرارية، ويمكن اعتبارها مجمدة/ غير فاعلة عند هذه الدرجة. وللمواد الصلبة، فإن $f = 6$ ؛ لذا فإن السعة الحرارية لمول واحد تساوي $\frac{6}{2} R = 3R$ ، وتدعى هذه النتيجة قاعدة ديولنج - بيتت Rule of Dulong and Petit، وعند اقتراب درجة الحرارة من الصفر المطلق $T \rightarrow 0$ فإن السعة الحرارية تحت الحجم الثابت تقرب من الصفر، وهذا يعني أن الجزيء في حالة استقرار (سكون).

$$(47.1) \quad \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{NkT}{P} \right) = \frac{Nk}{P} \quad (\text{غاز مثالي})$$



الشكل 13.1: السعة الحرارية عند ثبوت الحجم بوصفه دالة لدرجة الحرارة (المحور السيني مدرج باللوغاريتم) عند درجة حرارة أقل من 100 K، لا يوجد سوى درجات الحرية المرافقة للطاقة الحركية، وعند وصول الحرارة إلى درجة حرارة الغرفة يبدأ تأثير درجات الحرية المرافقة للطاقة الحركية والطاقة الدورانية، وليبدأ تأثير الطاقة المرافقة للاهتزازية، يحتاج ذلك إلى درجة حرارة لا تقل عن 1000 K عند ضغط جوي واحد. يتحول غاز الهيدروجين إلى سائل عند درجة حرارة 20 k ويبدأ في التفكك عند درجة حرارة 2000 K (البيانات من Wooley et.al (1948)).



الشكل 14.1: القيم المخبرية المقيسة عملياً للسعة الحرارية تحت الضغط الثابت لثلاث مواد، هي: الألماس، والألمنيوم والقصص. الخط الأسود يمثل السعة الحرارية المحسوبة طبقاً للنموذج الذي شرح في الجزء 5.7. والخط الأفقي المتقطع يمثل قيمة $C_v = 3R$ تم توقعها من نظرية تقسيم الطاقة بالتساوي، والاختلاف بين نتائج المنحنى النظري عند درجات الحرارة المرتفعة سببه الفرق بين السعات الحرارية C_p و C_v . عند $T \rightarrow 0$ تختفي درجات الحرية، حيث تصبح $C_v = C_p = 0$ Data from Y.S Touloukian, ed. Thermodynamic Properties of Matter (Plenum New York 1970).

لذ فإن:

$$(48.1) \quad C_p = C_v + Nk = C_v + nR \quad (\text{غاز مثالي})$$

السؤال 41.1: لقياس السعة الحرارية لجسم يوضع بتماس مع جسم آخر سعته الحرارية معروفة. إذا غمرت قطعة من المعدن في وعاء معزول يحتوي على ماء عند درجة حرارة (100°C)، ثم نُقلت بسرعة إلى وعاء معزول آخر يحتوي على 250g عند درجة حرارة 20°C. افترض أنه ليس هناك طاقة متبادلة بين النظام ومحيطه، ووصل النظام إلى الاتزان الحراري.

(أ) احسب كمية الحرارة التي اكتسبها الماء.

(ب) احسب كمية الحرارة المفقودة من الجسم.

(ج) احسب السعة الحرارية.

(د) احسب السعة الحرارية النوعية للجسم إذا كانت كتلته 100g.

السؤال 42.1: وضع جسم كتلته 340g، وسعته الحرارية 1.8J/g.C ودرجة حرارته 25°C، داخل وعاء معزول يحتوي على 1.5 لتر من الماء عند درجة الغليان (100°C)، احسب درجة حرارة الماء النهائية.

السؤال 43.1: احسب السعة الحرارية لكل مول من الماء بدلالة ثابت بولتزمان k . إذا افترض أن الطاقة الحرارية الكلية قد اختزنت بالصيغة التربيعية لدرجات الحرية، ما عدد درجات الحرية التي يمتلكها كل جزيء؟

السؤال 44.1: تم جدولة قيم C_p لبعض المواد في نهاية هذا الكتاب، فهل يمكنك حساب هذه القيم اعتماداً على نظرية تقسيم الطاقة بالتساوي؟ وأي هذه المواد يكون القيمة المحسوبة نظرياً تختلف بشكل كبير عن القيم المعطاة في الجداول؟

السؤال 45.1: بوصفه مثالاً رياضياً للتفاضلات الجزئية، افترض:

$$x = yz \quad \text{و} \quad w = xy$$

(أ) اكتب المشتقة للشغل w بدلالة x, z ، ومن ثم بدلالة z, y .

(ب) اكتب الصيغ الرياضية لمشتقات جزئية لكل من:

$$\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_z \quad \text{و} \quad \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_y$$

وبين أنهما غير متساويتين، (لحساب $\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_y$)، استخدم الصيغة لـ w بدلالة x, y وليس z ، وبالمثل لحساب $\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_z$ من الصيغة لـ w بدلالة z, x فقط.

(ج) أوجد المشتقات الأربعة الأخرى لـ w (كل مشتقتين بدلالة y و z)، وبين أن النتيجة تعتمد على المتغير المراد تثبيته).

السؤال 46.1: تقاس السعات الحرارية في العادة تحت ضغط ثابت، وليس حجمًا ثابتًا، حيث يفترض ثبوت الحجم. ويمكن فهم ذلك على النحو الآتي:

(أ) عند ثبوت الضغط مع زيادة درجة الحرارة، يتغير الحجم بمقدار dV . اكتب تعبيرًا رياضيًا لتغير الحجم dV_1 بدلالة dT ومعامل التمدد الحجمي β (سؤال 7.1).

(ب) لنفترض أن مادة قد تغير حجمها dV_2 نتيجة لتعرضها للضغط، اكتب التغير في الحجم dV_2 بدلالة dP ومعامل الانضغاط الأيزوثيرمي K_T الذي يعرف:

$$K_T \equiv -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

(ج) أخيرًا، افترض أن المادة قد تغير حجمها نتيجة للضغط فرع (ب) بمقدار زيادة حجمها نفسه نتيجة لارتفاع درجة الحرارة الفرع (أ). ولذا فإن النسبة بين dP و dT هي $\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$. اكتب هذه المشتقة التفاضلية الجزئية بدلالة K_T و β و V .

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V = -\frac{\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P}{\left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T} \quad \text{يجب أن تحصل على}$$

هذه صيغة رياضية بحثة، يمكن من خلالها أن يحدد المتغير الثالث إذا عرف المتغيران الآخران.

(د) إن قيم K_T و β للماء عند درجة حرارة 25°C هي:

$$\beta = 2.57 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}, \quad \kappa_T = 4.52 \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$$

(هـ) إذا تغيرت درجة حرارة الماء من 20°C إلى 30°C ، فما مقدار الضغط اللازم لمنع الماء من التمدد؟ وإذا كانت:

$\beta = 1.81 \times 10^{-4} \text{K}^{-1}$ ، $\kappa_T = 4.04 \times 10^{-11} \text{Pa}^{-1}$ للزئبق عند درجة حرارة 25°C ، فاحسب مقدار الضغط اللازم لمنع الزئبق من التمدد، وإذا كان لك الخيار، فهل تفضل قياس السعة الحرارية تحت الضغط الثابت أو تحت الحجم الثابت؟

الحرارة الكامنة Latent Heat

يمكن للمادة في بعض الحالات أن تكتسب كمية من الطاقة دون أن ترتفع درجة حرارتها، ويحدث ذلك عند تحول الطور phase transformation (ذوبان الجليد، أو غليان الماء) حيث يتم هذا التحول عند درجة حرارة ثابتة. (وتكون السعة الحرارية غير محددة (لا نهائية).

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{Q}{0} = \infty \quad (\text{خلال تحول الطور}) \quad (49.1)$$

وكمية الحرارة اللازمة/ كتلة المادة تُعرف بالحرارة الكامنة:

$$(50.1) \quad L \equiv \frac{Q}{m} \text{ لإنجاز التحول}$$

وبالتشابه مع تعريف السعة الحرارية، لم تبين هذه المعادلة هل هناك شغل أنجز على النظام أم لا.

فمثلاً الحرارة الكامنة لانصهار الجليد = 333 J/g أو 80 cal/g، والحرارة الكامنة لتبخير الماء 2260 J/g أو 540 cal/g. (لاحظ أن الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء من صفر إلى 100°C تساوي 100 cal/g).

السؤال 47.1: احسب مقدار كمية الجليد اللازمة لتخفيض درجة حرارة 200g من الماء من درجة الغليان إلى 65°C (إذا كانت درجة حرارة الجليد 15°C- وسعته الحرارية النوعية 0.5 cal/g.°C).

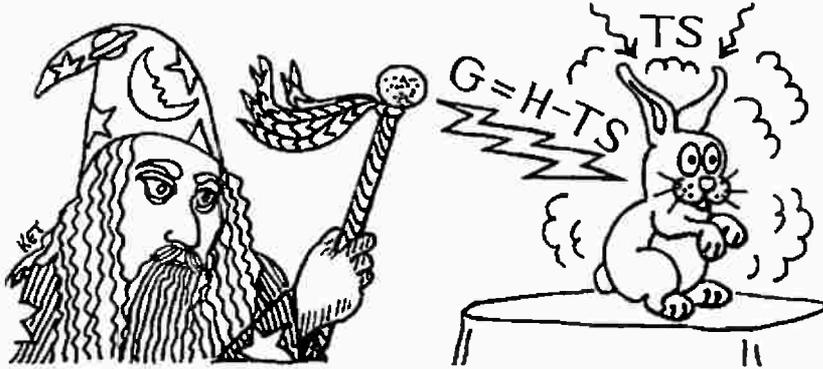
السؤال 48.1: إذا تكونت طبقة من الجليد على أحد الجبال سمكها 2m، وتتكون من 50% جليد و50% هواء. وكان معدل الطاقة الشمسية في بداية فصل الربيع يساوي 1000 W/m² حيث ينعكس من هذه الطاقة نحو 90%، ويمتص الجليد 10%. فكم أسبوعاً تحتاج إليه طبقة الجليد لتذوب ذوباناً كاملاً؟ (افتراض الطاقة الوحيدة هي الطاقة الشمسية).

الإنثالي Enthalpy

غالباً ما تجري العمليات الترموديناميكية تحت الضغط الثابت، ويرافق تغير حالة النظام تغير في حجمه، أي إن هناك شغلاً منجزاً من أو على النظام. وسندخل هنا مفهوماً جديداً، هو تأثير الشغل في الطاقة الداخلية للنظام، ويضاف في هذه الحالة المقدار PV إلى الشغل على طاقة النظام الكلي، حيث يرمز إلى مجموع الطاقة الداخلية $PV+$ بالإنثالي:

$$(51.1) \quad H \equiv U + PV$$

وتمثل H الطاقة الكلية التي يمكن للنظام أن يعطيها للمحيط إذا فرغ من طاقته الداخلية، أو بلغة أخرى إذا أرتت إفاءة نظام، فإن الطاقة المستخرجة من النظام ليست U وإنما أضيف إليها PV (انظر الشكل 15.1) والحد الأخير يمثل الشغل الذي أنجزه المحيط ليملاً الفراغ الذي تركه إفاءة النظام.



الشكل 15.1: لتستحدث أرثياً من لا شيء، وتضعه على المنضدة، فإن الساحر يحتاج، ليس إلى U فقط بل إلى PV ، ليدفع الجو بعيداً لإيجاد متسع له؛ لذا فإن الطاقة اللازمة هي الإنثالي $H = U + PV$

ولنتعرف الآن فوائد استخدام الأنثليبي في الترموديناميكاً، بافتراض أن هناك تغيراً حدث للنظام - إضافة حراراً، أو تفاعل كيميائي أو غير ذلك - شريطة بقاء الضغط ثابتاً، حيث تتغير الطاقة، والحجم والأنثليبي بالمقادير ΔU ، ΔH ، لذا فإن الأنثليبي للنظام هو:

$$\begin{aligned} H + \Delta H &= (U + \Delta U) + P(V + \Delta V) \\ &= (U + PV) + (\Delta U + P\Delta V) \\ &= H + (\Delta U + P\Delta V) \end{aligned} \quad (52.1)$$

وعليه، فإن التغير في الأنثليبي عند ثبوت الضغط هو:

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \quad (\text{ثبوت الضغط}) \quad (53.1)$$

وتبين المعادلة 53.1 أن التغير في الأنثليبي يكون نتيجة زيادة الحجم والشغل المنجز على المحيط. وبالرجوع إلى القانون الأول في الترموديناميكاً، الذي ينص على أن التغير في طاقة النظام يساوي كمية الحرارة المضافة والشغل الناتج عن تمدد النظام، إضافة إلى أي نوع آخر من الشغل (الكهربائي مثلاً).

$$\Delta U = Q + (-P\Delta V) + W_{other} \quad (54.1)$$

من المعادلتين 53.1 و 54.1 نحصل على:

$$\Delta H = Q + W_{other} \quad (P \text{ ثبوت}) \quad (55.1)$$

وتمثل هذه المعادلة التغير في الأنثليبي الناتج عن الحرارة وأنواع الشغل الأخرى، وعند ثبوت الضغط تعرف C_p بطريقة C_v نفسها،

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (56.1)$$

هناك تشابه بين هذه المعادلة والمعادلة 45.1، حيث يمكن افتراض C_v هي «سعة الطاقة energy capacity» و C_p «سعة الأنثليبي enthalpy capacity» وكما في C_v ، ليس شرطاً أن يكون التغير في الطاقة نتيجة لدخول حرارة إلى النظام، ويمكن أن يكون التغير نتيجة لأي نوع من أنواع الشغل، (مثلاً ارتفاع درجة حرارة جسم عنه وضعه في فرن مايكروويف) تحتوي كتب الكيمياء على قوائم لقيم ΔH لعمليات ترموديناميكية مختلفة، مثل تحولات الطور، والتفاعلات الكيميائية، والتأين... إلخ.

ومثال على قيم الأنثليبي: التغير في الأنثليبي عند غليان 1 مول من الماء $J = 40660/18$ = 2260 مول من الماء يساوي 16g: 18g أكسجين، 2g هيدروجين)، لاحظ أن هذا الرقم هو الرقم نفسه الذي أعطي للحرارة

الكامنة للغليان، ولا يمتلك بخار الماء هذه الكمية من الحرارة لطاقته الداخلية، حيث إن حجم مول واحد من الماء طبقاً لقانون الغاز المثالي PT/P، (مع إهمال الحجم الابتدائي للماء) هو:

$$(57.1) \quad PV = RT = (8.31 \text{ J/K})(373 \text{ K}) = 3100\text{J}$$

وتمثل هذه القيمة نحو 8% من القيمة 40,660 J التي احتاج إليها 1 مول من الماء ليتبخر. ومثال آخر هو تفاعل الهيدروجين والأكسجين لتكوين الماء

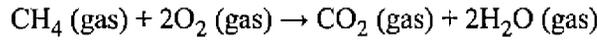


التغير في الأنثليبي لكل مول من الماء نتيجة هذا التفاعل -286J ويعرف في الجداول بأنثليبي التشكيل enthalpy of formation. (وهذا الرقم والأرقام المشابهة تم جدولتها في نهاية الكتاب، للمواد الداخلة في التفاعل والمواد الناتجة عند درجة حرارة الغرفة وضغط جوي واحد).

إذا حُرّق 1 مول من الهيدروجين، فإنه ينتج 286J من الحرارة. ونتيجة للطاقة الحرارية والكيميائية للجزيئات، مع جزء صغير من الشغل المنجز لملء الفراغ الذي حدث من استهلاك غاز الهيدروجين، وعلى نحو ما سيوضح في الوحدة الخامسة، فإن الطاقة التي تنتج عن التفاعلات الكيماوية تستخدم بوصفها طاقة كهربائية.

السؤال 49.1: إذا حُرّق مول واحد من الهيدروجين، ونصف مول من الأكسجين تحت الظروف القياسية من ضغط ودرجة حرارة، فاحسب مقدار الطاقة الناتجة عن عملية الاحتراق، والطاقة الناتجة عن الشغل المنجز عن طريق المحيط على النظام (أهمل حجم الماء).

السؤال 50.1: تمثل عملية احتراق غاز الميثان بالمعادلة الكيماوية:



إذا احترق 1 مول من غاز الميثان عند درجة حرارة 298 K وضغط 10^5 pa ،

(أ) فاحسب التغير في الأنثليبي (ارجع إلى القوائم في نهاية الكتاب) إذا افترض جدلاً تفكك مول واحد من الميثان إلى عناصره الأولية: الهيدروجين والكربون.

(ب) تخيل تكوّن مول واحد من CO_2 و 2 مول من بخار الماء من عناصرهما الأولية، احسب ΔH لهذه العملية.

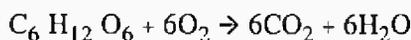
(ج) احسب التغير في الأنثليبي من التفاعل المباشر، حيث يتفاعل الميثان والأكسجين لإنتاج ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء.

(د) احسب مقدار الحرارة الناتجة عن التفاعل في (ج).

(هـ) ما مقدار التغير في طاقة النظام خلال هذا التفاعل؟ وهل تتغير إجابتك إذا كان الماء الناتج في حالة سائلة، وليس بخاراً؟

(و) إذا افترض أن وقود الشمس عبارة عن احتراق وقود عادي كالميثان، وكانت كتلة الشمس 2×10^{30} kg ومعدل انبعاث الطاقة منها 3.9×10^{26} watts، فما الفترة الزمنية التي تحتاج إليها الشمس لينفذ وقودها؟

السؤال 51.1: احسب مقدار ΔH لاحتراق مول واحد من الجلوكوز.



السؤال 52.1: تقدر كمية الأنتلي الناتجة عن احتراق جالون واحد من البنزين (3.8 liters) بنحو 1000 kcal. والأنتلي الناتجة عن 28g من الكورن فليكس بنحو 100 kcal. قارن بين تكلفة البنزين والكورن فليكس لكل كالوري.

السؤال 53.1: القيمة المبينة للأنتلي للهيدروجين في نهاية الكتاب، تمثل التغير في الأنتلي لذرات الهيدروجين لتكون جزيء هيدروجين H_2 . احسب مقدار التغير في الأنتلي اللازمة لتفكك جزيء هيدروجين واحد، بوحدات eV.

السؤال 54.1: إذا أراد متسلق جبال بزن 60kg تسلق جبل ارتفاعه 1500m.

(أ) افترض أن 25% (كفاءة تحول) من الطاقة الكيميائية تتحول إلى شغل ينجز خلال عملية التسلق. فكم طبقاً من الكورن فليكس (الطبق يعادل 28g، ويعطي 100 kcal) يحتاج المتسلق إلى تناوله ليتمكن من تسلق الجبل؟

(ب) وإذا افترض أن 75% من الطاقة الكيميائية قد تحولت إلى حرارة في جسم المتسلق، ما الارتفاع المتوقع في درجة حرارة جسمه؟

(ج) إذا افترض أن الحرارة المنتجة في فرع (ب) تفقد عن طريق التعرق، حيث تنجز من سطح جسمه كم كوباً من الماء يحتاج إليه المتسلق للتعويض عما يفقده. (عند درجة حرارة $25^\circ C$ الحرارة الكامنة للتبخير 580 kcal/g، وهي 8% أكثر منها عند $100^\circ C$).

السؤال 55.1: بوجه عام، فإن قيمة السعة الحرارية تكون موجبة، وقد تشذ بعض الأنظمة عن ذلك لوجود قوى الجاذبية على نحو ما هو في المجموعات الشمسية star clusters.

(أ) إذا افترض أن نظاماً يتكون من جسمين متماثلين في الكتلة، يدوران حول مراكز ثقلهما، فأثبت أن طاقة الوضع الناتجة عن الجاذبية لهذا النظام تساوي 2- مرة لطاقتهم الحركية.

(ب) نتيجة الفرع (أ) تبدو صحيحة:

حيث إن \bar{U} تمثل معدل الطاقة الداخلية الكلية للنظام لفترة زمنية طويلة، وتدعى هذه النتيجة النظرية الحدية virial theorem (لإثبات النظرية ارجع إلى الجزء 2.4 من Carroll and Ostle 1996) ومفترضاً أن هناك طاقة أضيفت إلى النظام، وترك النظام ليصل إلى حالة الاتزان، فماذا يحدث لطاقة الحركة؟ هل تزداد أم تنقص؟ اشرح ذلك.

(ج) يمكن تصور النجم بأنه مكون من جسيمات غاز ترتبط فيما بينها بطاقة الجاذبية فقط، وطبقاً لنظرية تقسيم الطاقة بالتساوي، فإن معدل طاقة الحركة للجسيمات المكونة للنجم هي $\frac{3}{2}KT$. عبّر عن الطاقة الكلية للنجم بدلالة معدل درجة حرارته، واحسب السعة الحرارية (لاحظ الإشارة سالبة أو موجبة).

(د) باستخدام تحليل الأبعاد Dimensional Analysis، أثبت أن مجموع طاقة الوضع للنجم تساوي GM^2/R مضروباً في ثابت مقداره 1، حيث إن M هي كتلة النجم و r نصف قطره.

(هـ) إذا افترض أن الشمس تتكون من الإلكترونات والبروتونات، فقدر معدل درجة حرارتها إذا كانت كتلتها تساوي $2 \times 10^{30} \text{kg}$ ونصف قطرها يساوي $7 \times 10^8 \text{m}$.

7.1 معدل تغير العمليات Rates of Processes

لتحديد ما حالة الاتزان لنظام ما، فإننا لسنا في حاجة إلى معرفة الفترة التي يستغرقها النظام للوصول إلى الاتزان. إذ إن الترموديناميكا تركز فقط على دراسة حالات الاتزان نفسها. وتعامل الأسئلة المتعلقة بالزمن ومعدل التغير على نحو منفصل (على الرغم من ارتباطهما)، ويدعى هذا الموضوع أحياناً نظرية النقل Transport theory.

لن يتم الشرح التفصيلي لمعدل التغير في العمليات في فصول هذا الكتاب، حيث إن ذلك يتطلب معالجة خارجة عن نطاق الكتاب، وستشرح نظرية النقل لبعض الحالات البسيطة، وهذا هو هدف هذا الجزء⁽¹²⁾.

التوصيل الحراري Heat Conduction

إن معدل انتقال الحرارة من الجسم الساخن إلى الجسم البارد يعتمد على آلية الانتقال والظروف المحيطة به. إن الطريقة الوحيدة للانتقال الحراري للأجسام المتباعدة هي الإشعاع (مثل انتقال الحرارة من الشمس إلى الأرض)، وسيشتق معدل الإشعاع في الفصل السابع. أما في الموائع (السوائل والغازات)، فإن آلية الانتقال الحراري هي الحمل الحراري، حيث يعتمد معدل الحمل الحراري على مجموعة من العوامل، مثل السعة الحرارية، والقوى المحتملة المؤثرة في النظام، ولن يشتق معدل الحمل الحراري في هذا الكتاب.

أما التوصيل الحراري فيحدث في المواد الصلبة، والسائلة والغازية، ويحدث التوصيل في المواد السائلة ولغازية نتيجة لانتقال الحرارة عبر تصادم الجزيئات، فإذا اصطدم جزيء يسير بسرعة كبيرة بجزيء سرعته أقل تنتقل الطاقة من الجزيء ذي السرعة العالية إلى الجزيء الذي اصطدم به ذو السرعة المنخفضة. ويحدث التوصيل الحراري في المواد الصلبة عبر الحركة الاهتزازية للذرات.

يتم التوصيل الحراري في المعادن عبر إلكترونات التوصيل؛ لذا فإن المواد المعدنية ذات التوصيل الكهربائي الجيد يكون توصيلها الحراري جيداً أيضاً. أما التوصيل من خلال اهتزازات الذرات في الشبكات البلورية، فهو أقل كفاءة من ذلك الذي يتم عبر إلكترونات التوصيل.

(12) يُعدّ هذا الجزء، جزءاً إضافياً لا يرتبط بفصول الكتاب اللاحقة.

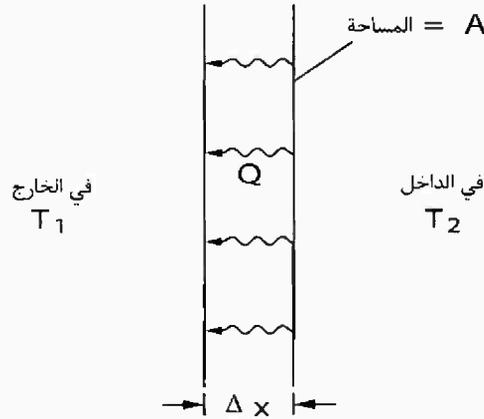
يمكن إيجاد قانون التوصيل الحراري بطريقة سهلة، والشكل 16.1 يمثل نافذة زجاجية تفصل بين محيطين، داخل غرفة دافئة، ومحيط خارجي بارد. تتناسب كمية الحرارة Q التي تمر من خلال زجاج النافذة تناسباً طردياً مع مساحة النافذة (A) ومع الفترة الزمنية التي تنتقل خلالها Δt ، وتتناسب عكسياً مع سماكة زجاج النافذة (Δx)، وأخيراً تتناسب طردياً مع فرق درجات الحرارة بين الداخل والخارج، ويمكن تلخيص هذه التوقعات على النحو الآتي:

$$(59.1) \quad \frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{dT}{dx} \quad \text{أو} \quad Q \propto \frac{A \Delta T \Delta t}{\Delta x}$$

ويعتمد ثابت التناسب على نوع المادة التي مرت من خلالها Q . ويسمى «ثابت التوصيل الحراري للمادة» ويرمز إليه بالرمز k_f . وستضاف إشارة سالب (-) إلى الطرف من المعادلة (5.1) للدلالة على أن T تزداد من اليسار إلى اليمين، وتنتقل Q من اليمين إلى اليسار (انظر الشكل 16.1)، وعلمية يكتب قانون التوصيل الحراري على النحو الآتي:

$$(60.1) \quad \frac{Q}{\Delta t} = -k_f A \frac{dT}{dx}$$

وتدعى هذه المعادلة قانون فوريير للتوصيل الحراري Fourier Heat Conduction Law.



الشكل 16.1: معدل الانتقال بالتوصيل الحراري خلال لوح من زجاج نافذة، يتناسب طردياً مع مساحته A وعكسياً مع سماكته Δx .

لاشتقاق قانون فوريير للتوصيل الحراري وتوقع قيمة k_f لمادة معينة، لا بد من استخدام نموذج للجزيئات لنتعرف ما يحدث خلال عملية التوصيل الحراري، وسنفترض أن النظام عبارة عن غاز مثالي، وسيتم ذلك في الأجزاء اللاحقة. وبصورة مؤقتة، دعنا نفترض أن قانون فوريير هو قانون تجريبي، والمعامل k_f عبارة عن خاصية يراد قياسها لمادة معينة.

7.1 معدل تغير العمليات 39

تختلف الموصلية الحرارية thermal conductivity للمواد اختلافاً كبيراً، باستخدام وحدات نظام SI فهي: 0.026 للهواء، 0.08 للخشب، 0.6 للماء، 0.8 للزجاج، 80 للحديد، 400 للنحاس، وإن القيم المعطاة للماء والهواء تنطبق فقط على التوصيل الحراري.

وعودة إلى النافذة، إذا كانت مساحتها 1m^2 ، وسُمك الزجاج 3.2mm . ودرجة الحرارة الداخلية 20°C ، ودرجة الحرارة في الخارج 0°C . فإن معدل انتقال الحرارة هو:

$$(61.1) \quad \frac{Q}{\Delta t} = \frac{(0.8\text{W/m.K})(1\text{m}^2)(293\text{K} - 273\text{K})}{0.0032\text{m}} = 5000\text{ Watts}$$

يبدو الرقم الناتج كبيراً، وهذا صحيح، إن افتراض الفرق بين درجة الحرارة في الداخل والخارج هو 20°C ليس واقعياً، حيث إن هناك طبقة رقيقة من الهواء على كل جانب من جوانب الزجاج تشكل طبقة عازلة، إذ إن انتقال الحرارة في هذه الظروف لا يزيد على مئات عدة، وليس 5000 Watts (انظر السؤال 57.1).

السؤال 56.1: احسب معدل التوصيل الحراري خلال طبقة من الهواء سُمكها 1mm على مساحة 1m^2 إذا كان الفرق في درجات الحرارة 20°C .

السؤال 57.1: عادة ما يستخدم في مجال العزل الحراري للأبنية الكمية R التي تعرف بأنها سمك العينة/الموصلية الحرارية:

$$R \equiv \frac{\Delta x}{k_t}$$

(أ) احسب قيمة R للوح من الزجاج سمكه 3.2mm ، لطبقة من الهواء سمكها 1mm بوحدات SI. تستخدم الولايات المتحدة الوحدات الإنجليزية للتعبير عن R بوحدات $(\text{F}^\circ \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{hr} / \text{Btu})$ ، حيث إن Btu هي الوحدة البريطانية للتوصيل الحراري. وهي عبارة عن الطاقة اللازمة لرفع درجة حرارة باوند واحد من الماء درجة فهرنهايتية واحدة.

(ب) أوجد عامل التحويل للقيمة R بين النظام الدولي للوحدات SI والنظام البريطاني، واكتب الأجوبة.

(ج) أثبت أن قيمة R للمواد المكونة من أكثر من طبقة من مواد مختلفة، مثل الهواء والزجاج، أو الحجر والخشب، تساوي المجموع الجبري لقيم R لكل طبقة.

(د) احسب القيمة المؤثرة (Effective Value) لـ R للوح من الزجاج على سطحية طبقة من الهواء سمكها 1mm (القيمة الفعالة لطبقة الهواء تعتمد على سرعة الهواء، والسمك المفترض 1mm يُعدّ تقديرًا جيداً تحت تأثير العوامل المناخية المختلفة).

استخدم قيمة (R)، ثم أعد تقدير كمية الحرارة المفقودة من خلال نافذة مساحتها 1m وسمك زجاج النافذة 3.2mm إذا كان فرق درجات الحرارة بين سطحي النافذة 20°C .

السؤال 58.1: بالرجوع إلى الجداول المعتمدة، فإن قيمة R لفراغ عرضه 3.5 إنش (inch) في جدار عمودي هي 1.0 بالوحدات البريطانية، في حين يساوي 10.9 إذا كان هذا الفراغ مملوءاً بالألياف الزجاجية العازلة. احسب R للفراغ نفسه إذا كان مملوءاً بهواء ساكن *still air* سمكه 3.5 in، مقارناً إجابتك بالأجوبة السابقة.

السؤال 59.1: قدر بصورة تقريبية مجموع معدل التوصيل الحراري المفقود خلال النوافذ، والجدران، والأرضية، والسقف لبيت عادي في جو بارد، ثم قدر تكلفة كمية الحرارة المفقودة خلال شهر معتمداً على سعر الطاقة الكهربائية في بلدك. (kwh)

السؤال 60.1: وضعت مقلاة بيد حديدية طولها 20cm على طباخ درجة حرارته 200°C . قدر الوقت اللازم لتصبح يد المقلاة ساخنة جداً، حيث لا تستطيع لمسها (كثافة الحديد 7.9 g/cm^3 ، سعتهما الحرارية النوعية $0.45 \text{ J/g}^{\circ}\text{C}$).

السؤال 61.1: يُقاس التدفق الحراري من الأرض بحفر فُتح بأعماق قد تصل إلى مئات الأمتار، وتقاس درجة الحرارة على أنها دالة في العمق. افترض أنه في أحد المواقع كان تغير درجة الحرارة هو 20°C لكل كيلومتر، والموصلية الحرارية للصخور 2.5 W/m.K ، فما معدل التوصيل الحراري لكل متر مربع في هذا الموقع؟ إذا افترض أن هذا المعدل هو نفسه في أي موقع آخر على سطح الأرض، قدر بطريقة تقريبية معدل فقدان الحرارة من الأرض عن طريق التوصيل الحراري (نصف قطر الأرض = 6400 km).

السؤال 62.1: افترض قضيباً منتظماً من مادة، حيث تتغير درجة الحرارة على امتداد طول القضيب في اتجاه x فقط. اشتق المعادلة:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

حيث إن $K = k_t / c\rho$ ، c السعة الحرارية النوعية للمادة، ρ كثافة المادة، افترض أن الانتقال الحراري يتم فقط عبر التوصيل الحراري، ولا يتبادل القضيب الطاقة مع محيطه. و K لا تعتمد على درجة الحرارة.

فأثبت أن حل معادلة الحرارة هو:

$$T(x,t) = T_0 + \frac{A}{\sqrt{t}} e^{-x^2/4Kt}$$

T_0 = درجة الحرارة الابتدائية، A ثابت. ارسم هذا الحل بدلالة x لقيم عدة لـ t فسر ذلك فيزيائياً، ثم اشرح كيف تنتشر الحرارة خلال القضيب مع مرور الوقت.

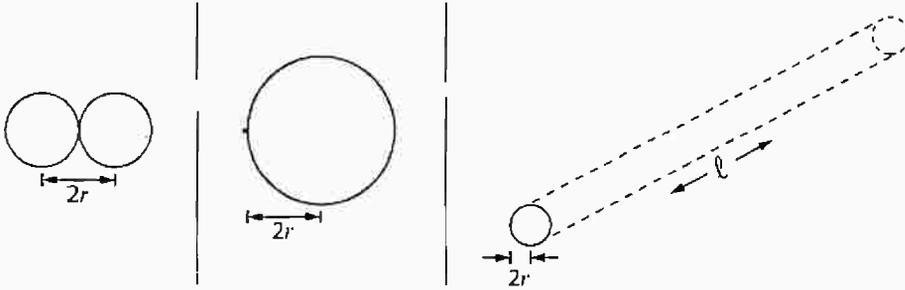
موصلية الغاز المثالي Conductivity of an Ideal Gas

يعتمد معدل الحرارة في الغاز المثالي على مقدار المسافة التي يقطعها الجزيء قبل أن يصطدم بجزيء آخر. ومعدل هذه المسافة تدعى المسار الحر المتوسط (mean free path). ففي الغاز المخفف، فإن قيمة المسار الحر أكبر بمرات عدة من معدل المسافة بين الجزيئات؛ لأن الجزيء المتحرك قد يمر بجانب عدد من الجزيئات في أثناء حركته قبل أن يصطدم بجزيء آخر. ولإيجاد قيمة تقريبية للمسار الحر في هذا النوع من الغازات، لنفترض أن هناك جزيئاً واحداً متحركاً، في حين أن الجزيئات جميعها ثابتة في أماكنها. وسنحاول إيجاد المسافة التي يقطعها الجزيء في هذه الحالة قبل اصطدامه بجزيء ثابت. يحدث الاصطدام عندما يكون مركز الجزيء المتحرك على مسافة $2r$ من مركز جزيء آخر (r نصف قطر الجزيء)، ويمكن القول: إن الاصطدام يحدث بين جزيء وآخر إذا مثل الجزيء الثابت كنقطة ونصف مركز الجزيء المتحرك يبعد عن هذه النقطة مسافة $2r$ (انظر الشكل 17.1). عندئذٍ يمكن أن نفترض أن الجزيء يتحرك بصورة مستقيمة خارجاً من أسطوانة افتراضية نصف قطرها $2r$ ، ويحدث التصادم عندما يكون حجم هذه الأسطوانة مساوياً لمعدل حجم الجزيء، ويمثل عندها طول المسار الحر بطول الأسطوانة الافتراضية (ℓ) (الشكل 17.1)، أي إن التصادم يحدث عند تحقق الشرط.

حجم الأسطوانة = معدل حجم جزيء الغاز.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \pi(2r)^2 \ell &\approx \frac{V}{N} \\ (62.1) \quad \Rightarrow \ell &\approx \frac{1}{4\pi r^2} \frac{V}{N} \end{aligned}$$

لقد أهملت حركة الجزيئات الأخرى، وكذلك الاختلاف بين أطوال المسارات الحرة لاصطدامات الجزيئات؛ لذا فإن معدل المسار الحر الحقيقي سيختلف عددياً بعامل ليس بعيداً كثيراً عن 1. وإن r أيضاً ليست محددة بدقة، ولجزيئات لا تكون كروية الشكل⁽¹³⁾.



الشكل 17.1: يحدث التصادم بين الجزيئات، عندما تكون المسافة بين مركزيهما ضعف نصف قطر الجزيء (r). ويكون صحيحاً أيضاً إذا كان الجزيء له نصف قطر $2r$ ، والجزيء الآخر ممثلاً بوصفه نقطة. عند تحرك أسطوانة نصف قطرها $2r$ في خط مستقيم، فإن الجزيء يخرج من الأسطوانة الذي حجمها يساوي $4\pi r^2 \ell$.

(13) ارجع إلى كتاب Reif 1965، لاشتقاق أكثر دقة.

يتراوح نصف القطر الفعال لجزيء النيتروجين أو الأكسجين بين 1 أو 2 أنجستروم. وإذا ما افترض أن الهواء عبارة عن غاز مثالي، وافترضنا أيضاً أن نصف قطر النيتروجين أو الأكسجين يساوي $1.5 \times 10^{-10} \text{m}$ فإن

$$\frac{V}{N} = \frac{kT}{P} = 4 \times 10^{-26} \text{m}^3$$

عند درجة حرارة الغرفة والضغط الجوي العادي. وإذا عوّض ذلك في المعادلة 62.1، نجد أن معدل المسار الحر نحو 150nm وهو أكبر بنحو 40 مرة من معدل المسافة بين جزيئات الهواء. يمكن تقدير معدل الزمن بين الاصطدامات على النحو الآتي:

$$(63.1) \quad \bar{\Delta t} = \frac{\ell}{v} \approx \frac{\ell}{v_{\text{rms}}} \approx \frac{1.5 \times 10^{-7} \text{m}}{500 \text{m/s}} = 3 \times 10^{-10} \text{s}$$

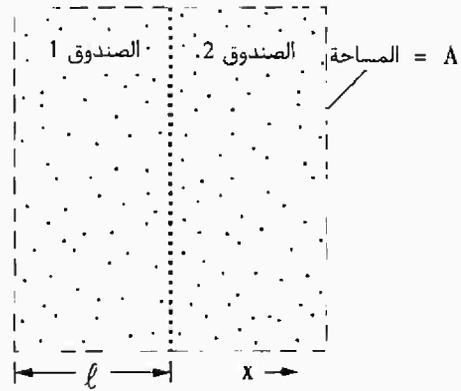
لنفترض الآن غازاً في وعاء يفصله حاجز على نحو ما هو في الشكل 18.1، حيث تمر الحرارة خلال المستوى المتعامد مع x (الخط المنقط في الشكل). ولتقدير كمية الحرارة المارة من خلال هذه الحاجز، افترض أن Δt هو معدل الزمن بين كل اصطدامين لجزيئات الغاز، حيث يقطع الجزيء مسافة تساوي المسار الحر في هذه الفترة الزمنية.

ويمكن أن تمر الجزيئات من الصندوق 1 إلى الصندوق 2 أو العكس، معتمداً على معدل الطاقة للجزيئات في كل صندوق. ولنفترض أن الطاقة الكلية للغاز في الصندوق: 1 هي $\frac{U_1}{2}$ أي إن نصف عدد الجزيئات ستكون لها سرعة موجبة في الاتجاه x في لحظة ما، ووفقاً للمبدأ فإن الطاقة، المنتقلة خلال المستوى (الخط المنقط) من الصندوق 2 إلى الصندوق 1، تساوي نصف الطاقة الكلية في الصندوق 2.

لذا فإن الطاقة المنتقلة عبر المستوى بين الصندوقين هي:

$$(64.1) \quad Q = \frac{1}{2}(U_1 - U_2) = -\frac{1}{2}(U_2 - U_1) = -\frac{1}{2}C_V(T_2 - T_1) = -\frac{1}{2}C_V \ell \frac{dT}{dx}$$

الشكل 18.1: يحدث التوصيل الحراري عبر الخط المتقطع؛ لأن الجزيئات التي تتحرك من الصندوق 1 إلى الصندوق 2 لها معدل طاقة يختلف عن الجزيئات التي تنتقل من الصندوق 2 إلى الصندوق 1. ولحدوث مرور حر بين الصندوقين يجب أن يكون عرض كل منهما يساوي طول مسار حر.



C_v السعة الحرارية للغاز تحت الحجم الثابت، T_1 و T_2 معدل درجات الحرارة في الصندوقين. يتبين من المعادلة 64.1 أن معدل التوصيل الحراري يتناسب طردياً مع الفرق في درجات الحرارة بين النظامين، ويتوافق ذلك مع قانون فورير. وبمقارنة المعادلة 60.1 بالمعادلة 64.1 يمكن توقع التوصيلية الحرارية على النحو الآتي:

$$(65.1) \quad k_t = \frac{1}{2} \frac{C_v \ell}{A \Delta t} = \frac{1}{2} \frac{C_v}{A \ell} \frac{\ell^2}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{C_v}{V} \ell v$$

C_v/V السعة الحرارية لوحدة الحجم التي يمكن إيجادها من المعادلة الآتية:

$$(66.1) \quad \frac{C_v}{V} = \frac{\frac{f}{2} Nk}{V} = \frac{f}{2} \frac{P}{T}$$

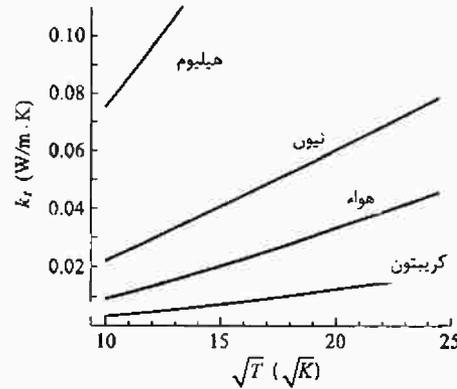
f عدد درجات الحرية لكل جزيء، ℓ للغاز تتناسب طردياً مع V/N . أي إن الموصلية الحرارية للغاز تعتمد فقط على درجة حرارته من خلال تناسب معدل السرعة مع درجة الحرارة مع احتمالية بسيطة لتأثير f وقد وجد عملياً أن f تكون ثابتة في مدى معين من درجات الحرارة، لذلك فإن kt يجب أن يتناسب طردياً مع الجذر التربيعي لدرجة الحرارة المطلقة، وهذا ما أكدته التجارب العملية لعدد كبير من الغازات (انظر الشكل 19.1) إذا كانت f للغاز تساوي 5 عند درجة حرارة الغرفة، والضغط الجوي، فإن

$$C_v/V = \frac{5}{2} (10^5 \text{ N/m}^2) (300\text{K}) \approx 800 \text{ J / m}^3 \cdot \text{K}.$$

لذا فإن المعادلة تتوقع موصلية حرارية لهذا الغاز

$$(67.1) \quad k_t \approx \frac{1}{2} (800 \text{ / m}^3 \cdot \text{K}) (1.5 \times 10^{-7} \text{ m}) (500 \text{ m/s}) = 0.031 \text{ W/m.K}$$

وهي نتيجة معقولة إذا أخذنا جميع الفروض التي اعتمدت في هذا الجزء. يعرف التحليل السابق للموصلية الحرارية للغازات بالنظرية الحركية kinetic theory، والمثال الآخر هو ما شرح في الجزء 1.2. هذه النظرية تتعلق بدراسة طرق حركة الجزيئات المختلفة، وهو فهم ليس سهلاً في الفيزياء. ولحسن الحظ، هناك طرق فيزيائية يمكن استخدامها لتوقع الخواص الفيزيائية للمواد في حالة الاتزان، دون الحاجة إلى معرفة آلية حركة الجزيئات. ولكن لتوقع معدل تغير العمليات يمكن الرجوع إلى نظرية الحركة للغازات.



الشكل 19.1: رسمت الموصلية الحرارية لمجموعة من الغازات بوصفها دالة في الجذر التربيعي لدرجة الحرارة المطلقة. وكما توقعت المعادلة 65.1 فإن هذه المنحنيات عبارة عن خطوط مستقيمة (البيانات من (Lid (1994)

السؤال 63.1: عند أي ضغط ودرجة حرارة يمكن أن يكون معدل المسار الحر لغاز يساوي 10cm؟

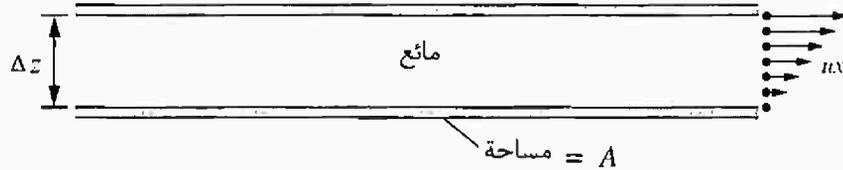
السؤال 64.1: احسب بصورة تقريبية الموصلية الحرارية لغاز الهيليوم عند درجة حرارة الغرفة، وناقش نتيجتك، ولماذا تختلف هذه القيمة عن موصلية الهواء؟

السؤال 65.1: تخيل أنك تعيش في القرن التاسع عشر، ولا تعرف قيمة عدد أفوجادرو⁽¹⁴⁾ (أو ثابت بولتزمان، أو كتلة أو حجم الجزيء) فبين كيف يمكن لك أن تقدر قيمة عدد أفوجادرو من قياس الموصلية الحرارية، إضافة إلى بعض القياسات الأخرى.

اللزوجة Viscosity

ليست الطاقة هي الوحيدة على المستوى الجزيئي التي تنتشر في السوائل، بل هناك كمية أخرى تدعى الزخم (كمية الحركة) momentum.

ولدراسة هذه الكمية، افترض أن الحالة الميينة في الشكل 20.1، الذي يبين سطحين معدنيين تفصل بينهما مسافة مملوءة بالسائل أو الغاز، ويتحركان بالنسبة إلى بعضهما. لنفترض أن السطح العلوي يتحرك في اتجاه $x+$ والسطح السفلي ثابت، فكيف تتأثر حركة المائع بحركة السطح العلوي؟ تتحرك جزيئات المائع بسرعة قد تصل إلى مئات عدة من الأمتار في الثانية عند درجة حرارة الغرفة، ودراسة اللزوجة تهمل هذه الحركة مؤقتاً للنظر إلى الحركة على المستوى الجاهري macroscopic ولاشتقاق معادلة للزوجة سنفترض ما يأتي: عند السطح السفلي تكون هناك طبقة رقيقة من المائع ملتصقة بهذا السطح وطبقة مشابهة ملتصقة بالسطح العلوي، في حين تكون طبقة المائع القريبة من السطح السفلي مستقرة. وعند تحرك الصفيحة العليا، تتحرك هذه الطبقة مع السطح، ما يتسبب في حركة المائع بين الصفيحتين. ويمكن لحركة المائع أن تكون حركة مضطربة turbulent أو عشوائية chaotic ولا توجد مثل هذه الحركات إذا كانت الصفيحة العليا تتحرك ببطء لتسمح للمائع بالتحرك في اتجاه حركة الصفيحة، حيث تدعى هذه الحركة «الحركة الرقائقية» "laminar motion". وعندئها، فإن سرعة المائع u_x تزداد باطراد في اتجاه z على نحو ما هو مبين في الشكل 20.1.



الشكل 20.1: لتوضيح اللزوجة بصورة بسيطة، وضعت صفيحتان متوازيتان بينهما مائع. فإذا كانت الحركة بطيئة والمسافة بين الصفيحتين صغيرة، فإن المائع يتحرك بحركة رقائقية، حيث يتحرك المائع أفقياً من وجهة النظر الجهوية دون اضطراب في حركته. تؤدي حركة الصفيحة العليا إلى توليد قوى تدعى قوى القص shear force، وجل الموائع بعضها لها قابلية مقاومة لهذا النوع من

(14) لم يعرف أفوجادرو قيمة عدد أفوجادرو حتى وفاته عام 1865، الذي سمي الرقم باسمه فيما بعد. وأول تقدير دقيق لعدد أفوجادرو لم يُعرف حتى عام 1913 عندما أجرى روبرت ميليكن تجربته لقياس شحنة الإلكترون، وبعدها أجرى علماء آخرون تجارب لقياس نسبة الشحنة الكتلة للبروتون (الذي يدعى بايون الهيدروجين)، وعند ذلك أمكن حساب كتلة البروتون.

القوى ما عدا بعض الموائع عند درجات الحرارة المنخفضة جداً، وتسمى هذه المقاومة «اللزوجة».

عندما تبدأ الصفيحة العليا في الحركة، فإن الطبقة العليا للمائع تعطي الطبقة التي بعدها زخمًا، وهكذا حتى تصل هذه القوى إلى السطح السفلي. وطبقًا لقانون نيوتن الثالث، فإن الزخم المنتقل من الطبقة العليا إلى الأسفل يؤدي إلى حدوث قوة معاكسة من السطح السفلي في اتجاه السطح العلوي، وكلما زادت كثافة المائع زادت كفاءة انتقال الزخم، وتبعًا لذلك تزداد القوى المعاكسة من السطح السفلي.

وبسبب من الصعب، كما في التوصيل الحراري معرفة اعتماد قوة الإزاحة drag force على الحالة الهندسية. حيث تتناسب القوة طرديًا مع مساحة السطح، وعكسيًا مع عرض الفجوة بين الصفائح، وطرديًا مع الفرق في السرعة بين السطحين، (Ux ترمز إلى السرعة في حالة اللزوجة)، ويمكن كتابة هذه التناسبات بالصورة الرياضية.

$$(68.1) \quad \frac{F_x}{A} \propto \frac{\Delta u_x}{\Delta z} \quad \text{أو} \quad F_x \propto \frac{A \cdot (u_{x,top} - u_{x,bottom})}{\Delta z}$$

ويدعى ثابت التناسب، معامل اللزوجة coefficient of viscosity أو لزوجة المائع، والرمز المستخدم عادة لمعامل اللزوجة هو (η)؛ لذا فإن معادلة اللزوجة تكتب على الصورة الآتية:

$$(69.1) \quad \frac{|F_x|}{A} = \eta \frac{du_x}{dz}$$

لاحظ أن $|F_x|$ تعني أن القوتين المؤثرتين في السطح العلوي والسفلي تكونان متساويتين في المقدار ومتعاكستين في الاتجاه، وأن وحدة القوة / المساحة هي وحدة الضغط (Pa أو N/m^2). وعدم تسمية $\frac{|F_x|}{A}$ بالضغط، يعود إلى أن تأثير القوة يكون أفقيًا، وليس عموديًا، حيث تدعى هذه القيمة في هذه الحالة جهد القص shear stress. وتقاس اللزوجة طبقًا للمعادلة 69.1 بوحدة Pascal – seconds في النظام الدولي SI (تستخدم وحدة Poise بوحدة cgs وتساوي $dyne \cdot sec/cm^2$ ، حيث تكون القيمة أقل بعشر مرات من القيمة بوحدة SI).

تتغير اللزوجة من مائع إلى آخر، وتتغير أيضًا على نحو كبير مع تغير درجة حرارة المائع. فمثلًا: لزوجة الماء 0.0018 Pa.s عند درجة 0°C، وتصل إلى 0.00028 Pa.s عند درجة حرارة 100°C. ولزوجة الهواء عند درجة حرارة الغرفة هي 19 $\mu Pa.s$ ، وهي لا تعتمد على الضغط، وتزداد بوصفها دالة في درجة الحرارة. وتحتاج هذه الخاصية الغريبة إلى بعض التوضيح. إن هذه الظاهرة تشابه مع ما شرح في الجزء السابق المتعلق بالموصلية الحرارية للغاز المثالي، حيث إنها لا تعتمد على الضغط، وتتناسب مع الجذر التربيعي لدرجة الحرارة المطلقة \sqrt{T} .

وتعتمد الطاقة المنتقلة من خلال الغاز على كثافة الجسيمات N/V . أما ما يتعلق باللزوجة، فإن الزخم هو المنتقل في الغاز في هذه الحالة، حيث يكون الانتقال في اتجاه عمودي خلال الغاز، ويعتمد على ثلاثة عوامل،

هي: كثافة الزخم، ومعدل المسار الحر ومعدل السرعة الحرارية.

ويعتمد العاملان الأول والثاني على كثافة الجسم، حيث إن تأثير العامل الأول يلغي تأثير العامل الثاني. وعليه، فإن الزخم يعتمد على معدل السرعة الحرارية فقط، وزيادة كثافة الغاز، ولكون حركة الجزيئات حركة عشوائية، فإن الزخم ينتقل في زمن معين لمسافة أقصر، وكلما زادت درجة الحرارة زادت سرعة الجزيئات وعليه، يمكن أن نتوقع أن اللزوجة دالة في \sqrt{T} على نحو ما هو الحال في التوصيل الحراري، وقد أثبتت التجارب العملية صحة هذا التوقع.

وأما ما يتعلق بالسوائل، فإن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى تناقص لزوجة السائل. وسبب ذلك أنه عند درجات الحرارة المنخفضة تلتحم بعض الجزيئات ببعضها في أثناء اصطدامها، ما يزيد من كفاءة انتقال الزخم من جزيء إلى آخر. أما في المواد الصلبة، فترتبط ذراتها بروابط كيميائية، ما يجعل لزوجتها لا متناهية، وتدفع المواد الصلبة يحتاج إلى تدريج بحقب جيولوجية.

السؤال 66.1: باتباع الطريقة التي استخدمت لاشتقاق الموصلية الحرارية، اشتق معادلة تقريبية للزوجات الغاز المثالي بوصفها دالة في الكثافة، ومتوسط المسار الحر ومعدل السرعة الحرارية للجزيئات، ثم بين أن اللزوجة لا تعتمد على الضغط، بل تتناسب مع الجذر التربيعي لدرجة الحرارة المطلقة. واحسب قيمة اللزوجة عددياً، وقارن نتيجتك بالقيمة التي وردت في هذا الجزء.

الانتشار Diffusion

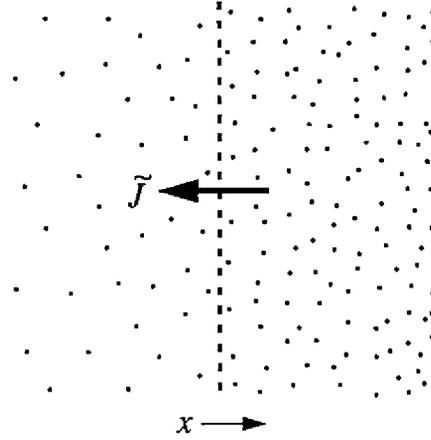
تنقل الطاقة عن طريق التوصيل الحراري نتيجة للحركات الحرارية العشوائية، في حين تنتج اللزوجة نتيجة لانتقال الزخم، وتكون الحركات الحرارية العشوائية السبب الأساسي للزوجات في الغازات. وتنتقل الجسيمات من المنطقة عالية التركيز إلى المنطقة الأقل تركيزاً للجسيمات، وينتج ذلك أيضاً نتيجة للحركات الحرارية العشوائية، وتدعى هذه الظاهرة الانتشار⁽¹⁵⁾.

(وضع نقطة من الحبر في كوب مملوء بالماء، حيث ينتشر الحبر خلال الماء وفي الاتجاهات جميعها). وفيما يتعلق باشتقاق علاقات التوصيل الحراري والزخم، يمكن توقع صيغة مشابهة للانتشار، حيث إن التوصيل الحراري يحدث نتيجة للفرق في درجات الحرارة، في حين تحدث اللزوجة بسبب فرق السرعة. أما الانتشار فيحدث نتيجة لاختلاف تركيز الجسيمات (عدد الجسيمات في وحدة الحجم N/V)، وتستخدم n للدلالة على تركيز الجسيمات.

وللسهولة سنفترض أنه لنوع محدد من الجسيمات، فإن n تزداد بانتظام في اتجاه x (الشكل 21.1).

(15) يعالج السؤال 22.1 عملية سهلة لمرور الغاز خلال ثقب صغير إلى الفراغ، وتدعى هذه العملية التسرب effusion.

الشكل 21.1: عندما يزداد تركيز الجسيمات من اليسار إلى اليمين، يحدث انتشار، ويكون التدفق الصافي من اليمين إلى اليسار.



يعرف التدفق flux لهذه الجسيمات بالعدد الصافي من الجسيمات الذي يخترق الحاجز لكل وحدة مساحات ووحدة زمن. وبطريقة مشابهة للمعادلات 60.1 و 69.1 يمكن توقع أن التدفق \vec{J} يتناسب مع dn/dx ، لذا فإن التدفق في اتجاه x يكتب على الصورة:

$$(70.1) \quad J_x = -D \frac{dn}{dx}$$

حيث إن D ثابت التناسب. والإشارة (-) في المعادلة تعني أنه إذا كانت dn/dx موجبة، يكون التدفق سالبًا في اتجاه x وتدعى هذه المعادلة قانون فيك (Fick's law) بعد أن اقترحه العالم الألماني Adolf Evgen Fick في القرن التاسع عشر.

ويدعى ثابت التناسب D معامل الانتشار (Diffusion Coefficient) ويعتمد على نوع الجزيء والحاجز الذي ينتشر الجزيء من خلاله، ووحدته في نظام SI هي (m^2/s) ، ويتغير معامل الانتشار في الماء معتمدًا على طبيعة الجزيء، وعند درجة حرارة الغرفة، فإنه يساوي 9×10^{-9} لأيونات الهيدروجين، و 5×10^{-10} للجلوكوز، ويصل إلى 10^{-11} لبعض الجزيئات الكبيرة كجزيئات البروتين.

ويكون انتشار الغازات أسرع: فمثلًا لجزيئات CO الذي تنتشر في الهواء عند درجة حرارة الغرفة والضغط الجوي هي $D = 2 \times 10^{-5} m^2/s$ ، والجزيئات الصغيرة الأخرى التي تنتشر في الهواء يكون معامل انتشارها تقريبًا مساويًا لهذه القيمة، وتزداد قيمة معامل الانتشار مع زيادة درجة الحرارة.

ويمثل الانتشار أهمية كبيرة للخلايا الحيوية الصغيرة، ولصناعة أشباه الموصلات. فمثلًا، افترض أن نقطة نون أضيفت إلى كوب مملوء بالماء، وانتشر اللون بانتظام خلال النصف الأعلى من الكوب، فما الزمن الذي يستغرقه اللون لينتشر إلى النصف الآخر من الماء؟ وطبقًا لقانون فيك يمكن كتابة ذلك بصورة تقريبية:

$$(71.1) \quad \frac{N}{A\Delta t} = D \frac{N/V}{\Delta x}$$

حيث إن N تمثل عدد الجزيئات لنقطة اللون، وإن $\Delta x = 0.1m$ ؛ لذا فإن $V \approx A \cdot \Delta x$ ، وحيث إننا نعلم حجم الجزيء في المادة الملونة، ولنفترض أن حجم جزيئاتها يماثل حجم جزيء مادة السيكرور؛ لذا سنفترض أن $D = 10^{-9} m^2/s$. وعند حل المعادلة لإيجاد Δt نجد أنها تساوي $\Delta t = 10^7 s$ (أي نحو أربعة أشهر تقريبًا). وفي الواقع أن عملية الانتشار تحدث أسرع من ذلك بكثير نتيجة لعملية الحمل الحراري الذي ينتج عن حركة جزيئات الماء.

السؤال 67.1: إذا وضعت نقطة ملونة في وعاء يحتوي على ماء، فقدر المسافة التي ينتشر فيها اللون خلال دقيقة واحدة.

السؤال 68.1: إذا فتحت زجاجة عطر في طرف غرفة، فكم نحتاج من الوقت لتصل رائحة العطر إلى شخص يقف في الطرف الآخر من الغرفة؟ وهل تعتقد أن عملية الانتشار هي الآلية الأساسية في هذه العملية؟

السؤال 69.1: إذا افترض أن تركيز الجزيئات يتغير في الاتجاه الطولي (اتجاه x) لأنبوب مملوء بالماء، وافترض أن تدفق الجسيمات يحدث من الاتجاهين في اتجاه Δx اشتق قانون فيك الثاني Fick's Second Law.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

لاحظ التشابه بين هذه الصيغة الرياضية ومعادلة الحرارة في السؤال 62.1.

السؤال 70.1: اشتق بطريقة مماثلة لاشتقاق الموصلية الحرارية، صيغة تقريبية لمعامل الانتشار للغاز المثالي بدلالة متوسط المسار الحر، ومعدل السرعة الحرارية. ثم عوض في المعادلة عدديًا، وقرن إجابتك بقيم معامل الانتشار للغاز المثالي، ثم بين كيف تعتمد D على T عند ثبوت الضغط.

البشر حساسون إلى درجة كبيرة لتدفق الطاقة أكثر من درجات الحرارة ذاتها، وهو الأمر الذي يمكنك التثبت من صحته بنفسك. ذات ليلة باردة عندما كنت في مخيم وعلى قمة جبل، وكان المخيم يحتوي على مراحيض ذات مقاعد معدنية وأخرى خشبية عند درجة الحرارة نفسها، وعلى الرغم من أن جسدي الذي يُعدّ مقياسًا مميّزًا لدرجة الحرارة، يؤدي دورًا فعالًا للغاية في تعريفك أي نوع من المقاعد أنت جالس عليه المعدنية أم الخشبية.

Graig F. Bohren and Bruce A. Albert Atmospheric Thermodynamics
(Oxford University Press, New York 1998)