

القانون الثالث: انعدام إمكانية إحراز الصفر

The Third Law: The Unattainability of Zero

قدمنا حتى الآن درجة الحرارة والطاقة الداخلية والإنتروبي. ومن الناحية الجوهرية، يمكن التعبير عن كل الثيرموديناميك بدلالة هذه الكميات الثلاث. كما قدمنا الإثالي وطاقة هلمهولتز وطاقة غبس، ولكنها مجرد كميات حسابية وليست مفاهيم أساسية جديدة. والقانون الثالث للثيرموديناميك ليس من نفس مجموعة الثلاثة الأول، بل جادل البعض في أنه ليس قانوناً ثيرموديناميكياً على الإطلاق، فقط لكونه لا يقدم خاصية ثيرموديناميكية جديدة. ومع هذا فإنه هو ما يجعل تطبيقاتها في الواقع ممكنة.

ولقد تضمنت سياقات حديثنا عن القانون الثاني تلميحات للقانون الثالث حينما تحدثنا عن التلاجات. فقد رأينا أن معامل أداء التلاجة يعتمد على درجة حرارة كل من الجسم الذي نريد تبريده والمحيط. كما رأينا من المعادلات التي وردت في الفصل الثالث^(١) أن معامل الأداء ينخفض إلى الصفر باقتراب درجة حرارة الجسم البارد إلى الصفر، أي

^(١) حتى لا يمر وقتك بالعودة إلى الوراء فلما كل من:

$$c = 1 / (T_{\text{surroundings}} / T_{\text{cold}} - 1)$$

$$\infty T_{\text{surroundings}} / T_{\text{cold}} \rightarrow$$

وبالتالي:

$$c \rightarrow 0$$

كلما:

$$T \rightarrow 0$$

أننا بحاجة لأن ننجز شغلاً يتزايد دون توقف، ومن ثم شغلاً لا نهائي، وذلك من أجل إزالة الطاقة من الجسم كحرارة مع اقتراب درجة الحرارة إلى الصفر المطلق.

كما أننا أُلحنا إلى القانون الثالث مرة أخرى عندما تحدثنا عن القانون الثاني، فكنا قد رأينا وجود مقاربتين لتعريف الإنتروبي، إحداهما ثيرموديناميكية لكلازيوس، والثانية إحصائية لبولتزمان. هذان التعريفان ليسا متماثلين بالكامل، فالأول ثيرموديناميكي يتعرض **للتغير في الإنتروبي**، والثاني إحصائي يتعرض **للإنتروبي المطلق**. والأخير يجبرنا أن إنتروبي النظام التام الانتظام، أي الذي يكون بدون فوضى مكانية (موضعية) وبدون فوضى حرارية - باختصار، النظام الذي يكون في حالته الحامدة غير المتعددة-، هذا النظام يكون ذا إنتروبي مساوياً للصفر بغض النظر عن التركيب الكيميائي للنظام، أما التعريف الأول فيترك الباب مفتوحاً لأن يتخذ إنتروبي المادة قيمة موجبة عندما $T = 0$ وأن تكون للمواد المختلفة قيم إنتروبي مختلفة عند هذه الدرجة.

القانون الثالث هو الحلقة الأخيرة لتأكيد أن تعريفي كلازيوس وبولتزمان هما تعريفان لخاصية واحدة، ومن ثم فهو الذي يبرر ويسوغ التفسير الذي يحدد أن التغير في الإنتروبي المحسوب ثيرموديناميكياً هو عبارة عن التغيرات في عدم انتظام النظام، على اعتبار أن المقصود بعدم الانتظام هو التفسير المعقد نسبياً الذي تمت مناقشته في الفصل الثالث. كما يتيح القانون الثالث الاستفادة من المعطيات والبيانات الناتجة عن القياسات الحرارية، كالسعات الحرارية، للتنبؤ بما تتكون منه الأنظمة المتفاعلة من مكونات موافقة لحالة عند التوازن. كما أن لديه مضامين عسيرة، خاصة لأولئك الذين يشدون الوصول إلى درجات حرارة شديدة الانخفاض.

وكما هي العادة في الثيرموديناميك الكلاسيكي (التقليدي)، فإننا نركز على ما هو خارج النظام الذي يعيننا، أي على محيطه، ونتجاهل، على الأقل في البداية، أية معلومات أو مفاهيم مسبقة قد تكون لدينا بخصوص التركيب الجزيئي للنظام. بمعنى أننا

إذا ما كنا نصبو إلى التوصل إلى قانون تيرموديناميكي، فعلينا أن نشرع بذلك وبصورة كلية بطريقة فينومينولوجية (ظاهراتية).

ثمّة أشياء غريبة ومثيرة تحدث للمادة عند تبريدها إلى درجات حرارة منخفضة جداً. فعلى سبيل المثال لم نكتشف الصورة الأصلية **للتوصيل الفائق** *superconductivity*، وهو قدرة مواد معينة على توصيل الكهرباء دون إبداء أي مقاومة، إلا بعدما تمكنا من تبريد المادة إلى درجة حرارة الهيليوم السائل (بالقرب من 4 K). بل إن الهيليوم السائل نفسه يُبدي عند تبريده إلى قرابة 1K خاصية خارقة للعادة هي **الميوعة الفائقة** *superfluidity*، وهي القدرة على التدفق والتسلق على الجهاز الذي يحتويه دونما لزوجة تذكر. إن التحدي، والذي يعزى جزئياً إلى مجرد وجود هذه الخاصية، يكمن في تبريد المادة إلى درجة الصفر المطلق نفسها. التحدي الآخر الذي سنعود إليه لاحقاً هو اكتشاف ما إذا كان بالإمكان - بل ما إذا كان ذا معنى حتى - أن تُبرد المادة إلى درجات حرارة أدنى من الصفر المطلق؛ أي ما إذا كان بالإمكان كسر حاجز درجة الحرارة.

لقد أثبتت تجارب تبريد المادة إلى الصفر المطلق أنها صعبة للغاية، ليس فقط بسبب كمية الشغل المتزايدة التي يتوجب بذلها لسحب كمية محددة من الحرارة من الجسم باقتراب درجة حرارته إلى الصفر المطلق، بل لأنه تم التسليم أيضاً بحقيقة استحالة المحافظة على الصفر المطلق والوصول إليه بواسطة التقنيات الحرارية التقليدية؛ أي تلك الثلجات المبنية على أسس تصميم الآلة الحرارية والتي نوقشت في الفصل الثالث. هذه المشاهدة التجريبية هي نص النسخة الفينومينولوجية (الظاهراتية) للقانون الثالث للثيرموديناميك:

لا يمكن لعدد نهائي (محدد) من العمليات الدائرية النجاح في تبريد جسم إلى الصفر المطلق

هذه عبارة نافية، ولكننا كنا قد رأينا أنه يمكن التعبير عن القانونين الأول والثاني بعبارات نافية كهذه، (لا يحدث تغير في الطاقة الداخلية لنظام معزول، لا تستطيع آلة حرارية أن تعمل دون

مصرف بارد، وما إلى ذلك)، ولذلك فليس هذا بدليل ضعف في مضمونه. لاحظ أنه يشير إلى العملية الدائرية: فقد توجد عملية من أنواع أخرى يمكنها تبريد الجسم إلى الصفر المطلق، ولكن الجهاز الذي يستخدم لن يبقى على نفس الحالة التي كان عليها في البداية.

لعلك تتذكر - من الفصل الأول - أننا قدمنا الكمية β على أنها المقياس الأكثر طبيعية *more natural* لدرجة الحرارة (على اعتبار أن $\beta = 1/kT$)، وأن الصفر المطلق يقابل قيمة لا نهائية للكمية β . وإذا ما تخيلنا أن القانون الثالث في نصه - الذي ذكرنا قبل قليل - موجود لدى أناس يستخدمون β للتعبير عن درجة الحرارة فسيبدو القانون دليلاً على نفسه، لأنه يمكن أن يتخذ صياغة أخرى:

لا يمكن لعدد نهائي من العمليات الدائرية النجاح في تبريد جسم إلى β لا نهائية

وهذه صياغة شبيهة بالقول إنه ليس ثمة سلّم نهائي يمكن أن نصعد عليه لبلوغ اللانهاية. لا بد أن القانون الثالث يخفي ما هو أكثر مما يبدي.

كنا قد بينّا أن التيرموديناميكين يغدون مستثارين ومدهوشين حينما لا يرون شيئاً يحدث إطلاقاً، وأنه يمكن أن يكون للنفي تداعيات إيجابية متى ما فكرنا فيها بيقظة وعناية. والسبيل إلى التداعيات الإيجابية في هذه الحالة هو الإنتروبي، وعلينا ان نأخذ بالاعتبار الكيفية التي يمسُّ من خلالها القانون الثالث التعريف التيرموديناميكي للإنتروبي. ونحتاج من أجل ذلك التفكير في الكيفية التي يتم من خلالها الوصول إلى درجات الحرارة المنخفضة.

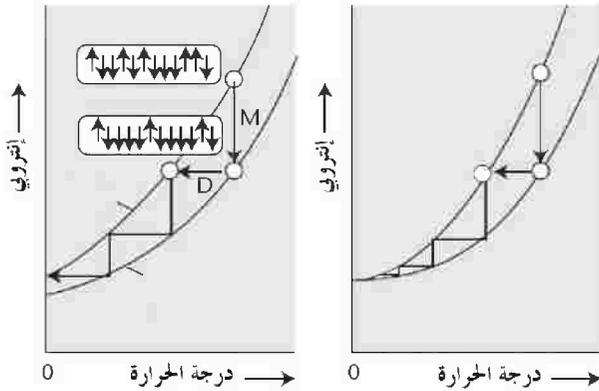
لنفترض أن النظام يتكون من جزيئات لكل منها إلكترون واحد فقط. وعلينا أن نعرف أن للإلكترون المنفرد خاصية *الغزل spin*، والذي يمكن، - لصالح أغراضنا هنا - التفكير به وكأنه حركة مغزلية فعلية. ولأسباب تجد جذورها في ميكانيكا الكم، يغزل الإلكترون بسرعة ثابتة ويمكن أن يفعل ذلك إما باتجاه عقارب الساعة وإما بعكسها. ويرمز لهاتين الحالتين من الغزل بسهمين رأس أحدهما إلى الأعلى (\uparrow)، ورأس الثاني إلى الأسفل (\downarrow). ونحن نعرف أن الحركة المغزلية تولد مجالاً مغناطيسياً، مما يتيح لنا

التفكير بكل إلكترون وكأنه قضيب مغناطيسي ضئيل، يتخذ واحداً من اتجاهين ممكنين. في وجود مجال مغناطيسي مسلط، ستكون الطاقتان الناشئتان عن الغزل لاتجاهيَّ القضيبين الضئيلين مختلفتين، ويمكن لتوزيع بولتزمان أن يحسب لنا الفرق الطفيف بين عدد الإلكترونات التي تتخذ هذا الاتجاه وتلك التي تتخذ الاتجاه الثاني. وعند درجة حرارة الغرفة سيوجد عدد من الإلكترونات ذات الغزل المنخفض الطاقة، أي ذات الاتجاه ↓، أكبر من ذات الغزل المرتفع الطاقة، أي ذات الاتجاه ↑. ولو تمكنا، بطريقة ما، من إيجاد وسيلة نُحوّل بواسطتها اتجاه غزل بعض الإلكترونات من ↑ إلى ↓، فإن الفرق بينهما سيكون انعكاساً لدرجة حرارة أدنى، وسنكون قد بردنا العينة، ولو تمكنا من جعلها جميعاً تغزل بالاتجاه ↓، فعندئذ سنكون قد وصلنا بها إلى الصفر المطلق.

وسنمثل العينة عند درجة حرارة الغرفة، وبغياب مجال مغناطيسي بالهيئة: ...↓↑↓↑↓↑↓↑... أي بتوزيع عشوائي للغزلين ↓ و↑. هذه الغزلات هي في تماس حراري مع بقية المواد في العينة وتشارك معها في درجة الحرارة نفسها. نزيد الآن من المجال المغناطيسي مع بقاء العينة في تماس حراري مع محيطها. وحيث إنه يمكن للمادة أن تعطي محيطها طاقة، فإنه يمكن للإلكترونات المختلفة في الغزل أن تعدل من أوضاعها. وستتخذ العينة الهيئة: ...↑↓↑↓↑↓↑↓... بسيادة* قليلة من الغزل ↓ على الغزل ↑. يساهم تنظيم الغزل في الإنتروبي، وبسبب أن توزيع الغزل صار أقل عشوائية (إذ صرنا أكثر ثقةً في الحصول على غزل من النوع ↓ في انتقاء أعمى/عمياني) فإننا نستطيع استنتاج أن إنتروبي العينة قد انخفض (الشكل رقم ٥.١). بمعنى أننا نخفض إنتروبي العينة بزيادة المجال المغناطيسي، وبسماحنا للطاقة بالهروب كلما طوّرت الغزلات الإلكترونية اصطفاقاتها.

* لا يوجد خطأ في طباعة كلمة "سيادة"، فلا تظن أن "زيادة" حتى لو أأصالحة لإعطاء المعنى، ولكن التعبير عنه بكلمة "سيادة" كان هو اختيار المؤلف. (الترجم).

ولنأخذ بالاعتبار الآن ما يحدث حينما نعزل العينة حرارياً عن محيطها، ومن ثم نخفض المجال المغناطيسي المسلط تدريجياً إلى الصفر. ولما كانت العملية التي تحدث دونما انتقال للطاقة على شكل حرارة توصف بأنها آديباتية (مكظومة) - كما كنا قد رأينا في الفصل الأول-، فإن هذه الخطوة نسميها "الخطوة الآديباتية لإزالة المغنطة"، وهي التي تمنح العملية مسماها. ولما كانت العملية آديباتية، فإن تروبي العينة كلها (الغزلات ومحيطها المباشر) يبقى كما هو. ولأن الغزلات الإلكترونية ليست تحت تأثير مجال مغناطيسي حتى تصطف إزاءه، فإنها تستعيد ترتيبها الأصلي ذا العشوائية الأعلى بإنتروبي المرتفع ... $\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow\uparrow\uparrow\downarrow\downarrow$ ، غير أن عدم وجود تغير في إجمالي إنتروبي العينة يوجب على إنتروبي الجزيئات الحاملة للإلكترونات أن ينخفض، مما يعني بذلك حدوث انخفاض في درجة الحرارة. أي أن المغنطة الثابتة الدرجة حينما تعقبها إزالة مغنطة آديباتية (مكظومة) فإن درجة الحرارة ستتناقص.



الشكل رقم (١، ٥). عملية إزالة المغناطيسية بطريقة آديباتية (مكظومة) للوصول إلى درجات حرارة منخفضة. تمثل الأسهم اصطفاغزلات إلكترونات العينة. الخطوة الأولى (M) هي مغنطة ثابتة الدرجة، ترفع من اصطفاغزلات الغزلات، والثانية (D) هي إزالة مكظومة للمغناطيسية تحفظ الإنتروبي، وبذلك تعني حدوث انخفاض في درجة الحرارة. وإذا لم يلتق المنحنيان عند $T = 0$ ، فسيكون ممكناً خفض الدرجة إلى الصفر (كما هو موضح في اليسار). أن لا يوصل تتابع نائي من الدورات درجة الحرارة إلى الصفر (كما هو موضح في اليمين)، فهذا يعني أن المنحنيين يلتقيان عند $T = 0$.

ونعيد الكرة بعد ذلك. نمغنط العينة التي بُردت للتو مغنطةً ثابتة الدرجة، ثم نغزلها عزلاً حرارياً ونخفض المجال أدبياتياً. ستحدث هذه الدورة مزيداً من الخفض في درجة حرارة العينة. بمعنى أنه بإمكاننا من الناحية المبدئية تكرار هذه العملية الدائرية حتى تنخفض درجة الحرارة إلى الدرجة التي نرغب.

عند هذه النقطة، ينزع الذئب الذي في القانون الثالث ثياب الحمل التي يتخفى بها. فإذا ما كان إنتروبي العينة بوجود المجال المغناطيسي وبغير وجوده، هو كما هو مبين في النصف الأيسر من الشكل رقم (٥،١)، فسيكون بإمكاننا اختيار سلسلة من التغيرات الدائرية التي تذهب بالعينة إلى الدرجة $T=0$ ، وذلك عبر سلسلة محدودة من الخطوات. لم يتم إثبات إمكانية الوصول إلى الصفر المطلق بهذه الطريقة. فما ينطوي عليه الأمر هو أن الإنتروبي لا يتخذ النمط المبين في الجزء الأيسر من الشكل، ولكن يجب أن يكون كما يبينه الجزء الأيمن، حيث يتقاطع المنحنيان عند $T=0$.

توجد وسائل أخرى يمكن أن نفكر بها من أجل الوصول إلى الصفر المطلق بطريقة دائرية. فعلى سبيل المثال، يمكن لنا أن نأخذ غازاً عند حجم معين ثم نقلص حجمه بالضغط عليه عند ثبات درجة الحرارة (بطريقة آيزوثيرمية)، ثم نسمح له بالتمدد المكظوم (بطريقة أدبياتية) إلى حجمه السابق. هذا التمدد المكظوم ينجز شغلاً، وبما أنه ليس ثمة حرارة تأتي إلى النظام، فإن الطاقة الداخلية تنخفض. وكما كنا قد رأينا، فإن المنشأ الأساسي للطاقة الداخلية للغاز هو الطاقة الحركية لجزيئاته، ولذلك فلا بد أن يؤدي التمدد المكظوم إلى جعلها بطيئة، وهذا يقود بذلك إلى خفض درجة حرارة الغاز. يبدو للوهلة الأولى وكأنه بإمكان هذه الدورة، أي انضغاط الغاز عند ثبات درجة الحرارة ثم تمدده مكدماً، أن تتكرر بشكل متواصل، على أمل أن ينتهي أمر درجة الحرارة إلى الصفر. غير أنه تبين أن تأثير التمدد المكظوم على درجة الحرارة يجبو كلما انخفضت درجة الحرارة، وهذا ما أعاق الاستفادة من هذه الوسيلة واعترضها.

بل حتى يمكن ابتكار وسيلة أكثر إحكاماً وإتقاناً، وذلك من خلال تفاعل كيميائي تستخدم فيه مادة متفاعلة A، تتحول إلى مادة ناتجة B، ومن ثم إيجاد طريقة أدبياتية (مكثومة) لإعادة إنتاج المادة A، وأخيراً تكرار العملية. ومرة أخرى أظهرت الدراسة الدقيقة لهذه التقنية أنها ستفشل في الوصول إلى الصفر المطلق بسبب أن إنتروبياً المادتين A و B يؤولان إلى نفس القيمة باقتراب درجة الحرارة إلى الصفر. إن اقتفاء المظهر المشترك لهذه الإخفاقات المتراكمة يكشف أنه يعزى إلى اقتراب إنتروبيات المواد إلى القيمة نفسها باقتراب T إلى الصفر. ولذلك فإمكاننا أن نستبدل بالنص الفينومينولوجي (الظاهري) السابق، نصاً جديداً أكثر تعقيداً ومعبراً عنه بدلالة الإنتروبي:

يقترَب إنتروبي كل مادة نقية تامة التبلور إلى القيمة نفسها باقتراب درجة الحرارة إلى الصفر لاحظ أنه لا الدليل العملي، ولا القانون الثالث، يثبتاننا عن القيمة المطلقة لإنتروبي المادة حينما تكون درجة الحرارة المطلقة صفراً، أي عندما $T=0$. كل ما يتضمنه القانون هو أن جميع المواد لها الإنتروبي نفسه عند $T=0$ ، ما دامت لها حالات خمود غير متعددة المستويات nondegenerate ground states. (ليس ثمة انتظام متبقٍ ناشئ عن عدم انتظام مكاني من النوع الذي يميز الثلج). غير أنه من المناسب والمعقول أن يكون الصفر هو القيمة المشتركة المختارة لكل المواد التامة التبلور، وتبعاً لذلك نصل إلى نص "الإنتروبي" الاصطلاحي للقانون الثالث:

إنتروبي كل المواد التامة التبلور يساوي صفراً عند $T=0$

لا يقدم لنا القانون الثالث خاصية ثرموديناميكية جديدة، ولذلك فهو ليس من طراز القوانين الثلاثة: إنه يشير ببساطة إلى إمكانية التعبير عن الإنتروبي بقيمة مطلقة.

يبدو للوهلة الأولى أن أهمية القانون الثالث تنحصر في النضال البشري لتحطيم السجل القياسي لأدنى درجة حرارة أمكن الوصول إليها (وهو $0.000\ 000\ 000\ 1\ K$) تقريباً للمواد الصلبة و $0.000\ 000\ 000\ 5$ للمواد الغازية حين تتحرك الجزيئات ببطء بحيث إنها تستغرق ثلاثين ثانية لتقطع بوصة واحدة). وخلافاً لقوانين التيرموديناميك الثلاثة الأخرى التي تحكم حياتنا اليومية بارتباط مخيف، فإنه يبدو وكأن لا علاقة للقانون الثالث بشؤون الحياة اليومية.

وبالتأكيد فإنه لا توجد للقانون الثالث تداعيات ملحة في حياتنا اليومية، ولكن توجد له تداعيات ملحة بالنسبة للمقيمين في المختبرات. فهو يُعرّض ويشمت بوحدة من المقدسات أو المثاليات العلمية المدللة ويهزأ بها، ونقصد هنا على وجه التحديد الغاز الكامل (المثالي). فالغاز الكامل - وهو مائع يمكن النظر إليه على أنه حشد فوضوي من جزيئات مستقلة في حالة حركة عشوائية نشطة-، يُتخذ ليكون نقطة البداية لكثير من المناقشات والصياغات النظرية في التيرموديناميك، غير أن القانون الثالث لا يؤمن بوجوده عند $T=0$. ولن نورد هنا الحوارات المتعلقة بهذا الأمر لكونها شكلية إلى حد كبير، غير أنها جميعاً تنبع من تلاشي الإنتروبي عند $T=0$ ^(١). توجد مُسكّنات شكلية لما تبدو وكأنها إصابات مُني بها نسيجه (بنيتة)، وبهذا يتعايش علم التيرموديناميك مع هذا الهجوم الضاري من قوانينه. كما يوجد تداعٍ شكليّ يتعلق بحقيقة أن أحد أهم التطبيقات الرئيسة في التيرموديناميك، هو الاستفادة من المعلومات والمعطيات الحرارية، وعلى وجه الخصوص السعات الحرارية المقيسة على مدى واسع من درجات الحرارة، لحساب مكونات (تركيب)

(١) يلمح القانون الثالث إلى أن معامل التمدد الحراري thermal expansion coefficient - وهو مقياس لكيفية استجابة حجم المادة للتغير في درجة الحرارة-، لا يزداد وأن يتلاشى كلما اقتربت درجة الحرارة من الصفر ($T \rightarrow 0$)، إلا أن الخواص التيرموديناميكية للغاز الكامل تلمح إلى أنه يؤول إلى ما لا يمايه باقتراب درجة الحرارة إلى الصفر ($T \rightarrow 0$).

التفاعلات عند التوازن، من أجل اتخاذ القرار حول ما إذا كان تفاعل ما مرشحاً للنجاح أم لا، ومن أجل تحسين ظروف تطبيقه في الصناعة. يقدم القانون الثالث مفتاح هذا التطبيق، الأمر الذي لا يمكن تحقيقه لو كانت إنتروبيات المواد مختلفة عند الصفر المطلق.

بمعنى ما، فإنه لا يمكن إحراز الصفر المطلق والوصول إليه. ولا ينبغي التعويل كثيراً على القانون الثالث وتحميله ما لا يحتمل، لأنه في تعبيره عن عدم إمكانية الوصول إلى الصفر المطلق يهتم بالعمليات التي تحافظ على التوازن الحراري وتكون دائرية. ولذلك فهو يترك الباب على مصراعيه لإمكانية الوصول إليه عبر طرق غير دائرية *non-cyclic*. السؤال الذي قد ينشأ ويثير الفضول هو ما إذا كان بالإمكان اختراع وسيلة تنقل بها العينة إلى الجانب الآخر للصفر، حيث تكون درجة الحرارة "المطلقة" سالبة، مهما كان مؤدى هذا المعنى.

ولفهم معنى أن تكون درجة الحرارة تحت الصفر، أي أقل من أدنى قيمة ممكنة لها، وهو كما يبدو أمر متناقض، فعلياً أن نتذكر من الفصل الأول أن T هي عامل يظهر في توزيع بولتزمان، ويحدد أعداد قاطني أو متخذي مستويات الطاقة المتوافرة. وسيكون من الأسهل، وعملياً من الأيسر للإدراك، أن نأخذ نظاماً بمستويي طاقة اثنين فقط، هما مستوى حالة الحمود وثانٍ يعلوه في الطاقة. المثال الواقعي لذلك هو غزل إلكترون في مجال مغناطيسي من النوع الذي تم الحديث عنه في هذا الفصل قُبيل. وكما كنا قد أوضحنا، فبسبب أن هاتين الحالتين للغزل تعبران عن توجهين متعاكسين للقضيب المغناطيسي، فإن لهذين الاتجاهين طاقتين مختلفتين.

حسب توزيع بولتزمان، فعند كل درجات الحرارة المحددة بقيم معينة، سيكون عدد الإلكترونات ذات الطاقة المنخفضة (أي التي تتخذ اتجاه الغزل ↓) أكثر من تلك ذات الطاقة المرتفعة (أي التي تتخذ اتجاه الغزل ↑). وعند $T = 0$ ، ستكون كل الإلكترونات في مستوى طاقة الحمود. تؤدي زيادة درجة الحرارة إلى عزوف إلكترونات

مستوى الحمود عن مستواها هذا، واتجاهها إلى المستوى الأعلى، وستزداد قيم كل من الطاقة الداخلية والإنتروبي. وحينما تصبح درجة الحرارة لا نهائية، فإن الإلكترونات ستتوزع بالتساوي على المستويين، فنصفها سيتخذ اتجاه الغزل ↓ ونصفها الآخر سيتخذ اتجاه الغزل ↑. وسيكون الإنتروبي قد وصل إلى نهايته العظمى، أي تلك القيمة التي تناسب، حسب معادلة بولتزمان، مع $\log 2$. يلاحظ فيما سبق أن درجة الحرارة اللانهائية لا تعني أن كل الإلكترونات في الحالة الأعلى: فعند درجة الحرارة اللانهائية يكون عدد الإلكترونات في الحالتين متساوٍ. وكتيجة عامة: إذا ما كان للنظام عدة مستويات من الطاقة، فإن هذه المستويات عند درجة الحرارة اللانهائية ستكون مسكونة بالتساوي.

لنفترض الآن أن T سالبة، كأن تكون 300 K-. نجد أن عدد سكان المستوى الأعلى في توزيع بولتزمان، حينما تكون درجة الحرارة سالبة، هو أكثر من عدد سكان المستوى الأدنى. فلو حدث، على سبيل المثال عند درجة الحرارة الموجبة 300 K، أن كانت النسبة:

أعلى : أدنى

$$5 : 1$$

فإن جعل درجة الحرارة تساوي 300 K- سيجعل الأمر:

أعلى : أدنى

$$1 : 5$$

أي أن عدد حالات الغزل ذات الطاقة العالية سيفوق عدد حالات الغزل ذات الطاقة المنخفضة خمس مرات. ويجعل درجة الحرارة 200 K- فإن:

أعلى : أدنى

$$1 : 11$$

ويجعل درجة الحرارة 100 K - فإن :

أعلى : أدنى

1 : 125

ويجعل درجة الحرارة 10 K - فإن :

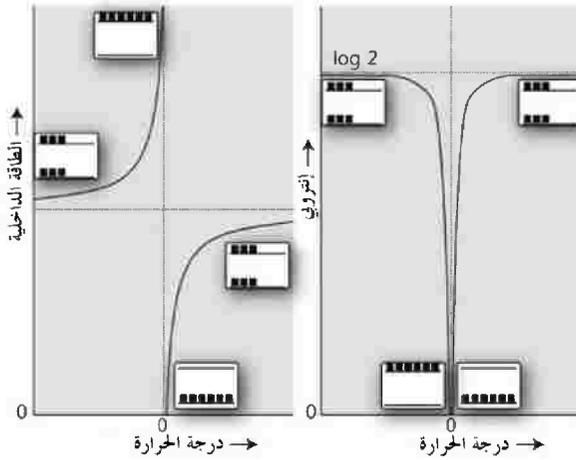
أعلى : أدنى

1 : 1 000 000 000 000 000 000 000

لاحظ كيف أنه باقتراب درجة الحرارة إلى الصفر من تحت ، أي من الجهة السالبة (300 K - ثم 200 K - ثم 100 K -... إلخ) ، فإن كل أفراد السكان تقريباً ينتقلون إلى حالة الطاقة الأعلى. وفي الحقيقة فإنه عند أقرب قيمة سالبة إلى الصفر يكون الكل موجوداً في الحالة **الأعلى** طاقة ، وعند أقرب قيمة موجبة إلى الصفر يكون الكل موجوداً في الحالة **الأقل** طاقة. وكنا قد رأينا أن في حال ارتفاع درجة الحرارة من الصفر إلى ما لا نهاية ، فإن الهجرة تحدث من الأدنى طاقة إلى الأعلى حتى تصبح الحالتان متساويتين في أعداد سكانها. ولكن بخفض درجة الحرارة من الصفر إلى **سالب** ما لا نهاية فالهجرة تكون من الحالة الأعلى طاقة إلى حالة الخمود ، وتصبح الحالتان مرة أخرى متساويتان في أعداد سكانها عند درجة سالب ما لا نهاية.

كنا قد رأينا في الفصل الأول أن مقلوب درجة الحرارة T ، ونعني بذلك على وجه التحديد $\beta = 1/kT$ ، هو مقياس طبيعي لدرجة الحرارة أكثر من T نفسها. وأن اللوعة البشرية بعدم تبني β لتتضح جلية حينما نرسم الطاقة مقابل β كما في الشكل رقم (٥.٣) ، عوضاً عن أن نرسمها مقابل T كما في الشكل رقم (٥.٢) ، حيث نحظى بمنحنى أنيق ورقيق بدلاً من تلك القفزة غير المرضية ولا المريحة عند $T = 0$ في الشكل رقم (٥.٢). وعليك أن تلاحظ أيضاً ذلك الامتداد الطويل لقيمة β عند قيم عالية

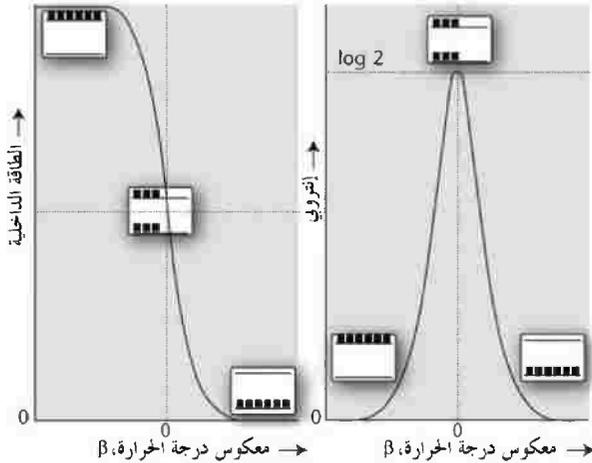
منها، أي الممثل لدرجات الحرارة المنخفضة جداً، وينبغي ألا يكون مفاجئاً وجود مجال واسع للكثير من الفيزياء الجديرة بالاهتمام باقتراب T إلى الصفر. ولكن قد علقت بنا T غير الملائمة بدلاً من β الملائمة، لنكرر قائلين قد خسرناك يا β .



الشكل رقم (٥،٢). الاختلافات في الطاقة الداخلية (يسار) وفي الإنتروبي (يمين) لنظام ثنائي المستويات. يمكن حساب قيم هاتين الخاصيتين لدرجات الحرارة السالبة كما هو موضح في الجزء الأيسر من الشكل. ما أن تكون درجة الحرارة فوق $T = 0$ حتى تكون جميع الجزيئات في حالة الحمود، أما تحت $T = 0$ فتكون كل الجزيئات في الحالة الأعلى. وحينما تكون درجة الحرارة لا نائية في أي اتجاه فإن الأعداد تكون متساوية في المستويين.

لو كان بإمكاننا اختراع نظام يتضمن عدداً من الإلكترونات بالاتجاه المرتفع في الطاقة (↑) أكثر من عددها بالاتجاه المنخفض في الطاقة (↓)، فإنه يمكننا بذلك، ومن خلال توزيع بولتزمان، أن نعزو هذا النظام إلى درجة حرارة سالبة. ولذلك فلو ابتدعنا نظاماً يكون فيه عدد الإلكترونات ذات الغزل المرتفع (↑) خمسة أضعاف عدد الإلكترونات ذات الغزل المنخفض (↓) فإن درجة الحرارة ستكون 300 K^- ، وذلك

لنفس التباعد في الطاقة كما افترضنا في المناقشة السابقة. وإذا ما جعلنا النسبة 11 إلى 1، فستكون الدرجة 200 K -، وهكذا. وعلينا أن نلاحظ أن إمكانية إيجاد نظام عند درجات شديدة الانخفاض (أي تلك الأقرب إلى سالب ما لا نهاية) هو الأسهل وذلك لأنها تعكس قدرًا طفيفاً من عدم التعادل في أعداد الإلكترونات التي تغزل بالاتجاهين المتعاكسين، في الوقت الذي يكون فيه عدم التعادل كبيراً عند درجة حرارة تحت الصفر بمقدار قليل، فلو كانت درجة الحرارة 1 000 000 K -، فالنسبة لن تكون إلا 1.0005 إلى 1، أي بفرق يساوي 0.05% فقط.



الشكل رقم (٥،٣). تمثيل للنظام الموجود في الشكل رقم (٥،٢)، ولكنه مرسوم مقابل β عوضاً عن T .
تغير الطاقة الداخلية بانسيابية عبر كل النطاق.

يقتضي الإنتروبي أثر هذه التغيرات في توزيع سكان المستويات. ولذلك فإنه في الوقت الذي تتغير فيه قيمة S (بوحدة مناسبة) من صفر إلى $\log 2$ بارتفاع T من الصفر إلى ما لا نهاية، فإنها تفعل نفس الشيء بانخفاض T من الصفر إلى سالب ما لا نهاية. وهكذا نجد أننا، وعلى أي من جانبي الصفر، نعرف بدقة الحالة التي يكون

عليها كل إلكترون (فوق الصفر مباشرة يتخذ الحالة ↓ وتحت الصفر مباشرة يتخذ الحالة ↑)، وبذلك فإن $S = 0$. ويكون عدد الإلكترونات ذات الاتجاه ↓ وذات الاتجاه ↑ متساوياً عند أي من الطرفين اللانهايين، ولذلك تتساوى فرصة الحصول على إلكترون من أي من النوعين في أي اختيار عشوائي. وينبغي علينا أن نتأمل ملياً في هذه القيم بدلالة β عوضاً عن T .

السؤال الكبير هو ما إذا كان يمكن تحقيق معكوس التعداد عند التوازن الحراري (أي معكوس تعداد بولتزمان). الجواب هو نعم يمكن ذلك، ولكن ليس بطرق ثيرموديناميكية. تتوافر أنواع من الطرق التجريبية لإحداث ما يعرف **بالاستقطاب polarizing** لجمع من الإلكترونات أو الغزلات النووية بواسطة نبضات من الطاقة ذات تردد الراديو radiofrequency energy. ويوجد الآن تصميم نستخدمه يومياً يستفيد من درجة الحرارة السالبة: إنه الليزر. المبدأ الأساسي لليزر هو إنتاج أعداد هائلة من الذرات أو الجزيئات في حالة متهيّجة، ومن ثم تهيّأتها وحثّها للتخلص من طاقاتها بشكل جماعي متضافر. يمكن النظر إلى ما ذكرنا أنها حالات للإلكترون من النوع ↓ أو النوع ↑ على أنها نظائر أو مماثلات للذرات أو الجزيئات ذات مستويات الطاقة المنخفضة أو المرتفعة في مادة الليزر، ومعكوس الأعداد (السكان) التي يعتمد عليها تأثير الليزر هو انعكاس لدرجة حرارة مطلقة سالبة. إن كل الأجهزة التي نستخدم في بيوتنا والمزودة بالليزر، مثل القرص المدمج CD أو الدي في دي DVD، تؤدي عملها عند درجة حرارة تحت الصفر.

وينطبق، في الحقيقة، مفهوم درجة الحرارة السالبة أثناء الممارسة، على الأنظمة التي تحوز مستويين من مستويات الطاقة فقط. وتحقيق توزيع للسكان (أفراد العينة) على ثلاثة أو أكثر من مستويات الطاقة، التي يمكن التعبير عنها كتوزيع لبولتزمان عند درجة حرارة تكون من الناحية الشكلية سالبة القيمة، أصعب بكثير ومصطنع بشكل

أكثر. وفوق ذلك، تأخذنا درجات الحرارة السابقة إلى خارج نطاق التيرموديناميك الكلاسيكي، والسبب هو أنها يجب أن توجد لها وسيلة، وهي لا تدوم لأكثر من فترات وجيزة. ومع هذا فإنه بالإمكان - ومن المثير - التفكير في خواص النظام التيرموديناميكية التي تكون درجات حرارتها شكلياً سالبة.

القانون الأول فظ ومتماسك، ولا يعتمد على كيفية التوزيع على المستويات الموجودة. ولذلك ففي منطقة ذات درجة حرارة سالبة تكون الطاقة محفوظة، ويمكن تغيير الطاقة الداخلية بإنجاز شغل أو من خلال الاستفادة من فرق في درجة الحرارة.

القانون الثاني يبقى حياً، لأن تعريف الإنتروبي باقٍ حيٍّ، غير أن مضامينه مختلفة. ولذلك، لو افترضنا أن الطاقة **تغادر** نظاماً كحرارة عند درجة حرارة سالبة، فإن إنتروبي النظام حسب معادلة كلازيوس **يزداد**: أي أن التغير في الطاقة سالب (لنقل 100 J) وكذلك درجة الحرارة سالبة (لنقل 200 K)، ولذلك فنسبتهما ستكون حتماً موجبة (ومقدار ذلك في هذه الحالة: $0.5 \text{ J K}^{-1} = +200 \text{ K} / 100 \text{ J}$). ويمكن لنا فهم هذه النتيجة على المستوى الجزيئي من خلال التفكير في نظام ثنائي المستويات: لنفكر في معكوس عدد السكان (عدد أفراد العينة) ذي الطاقة العالية والإنتروبي المنخفض، وهو يفقد بعض طاقته ويعود السكان إلى التساوي، أي أن الإنتروبي يزداد كلما فقدت الطاقة. وبالمثل لو أن الطاقة دخلت كحرارة إلى نظام درجة حرارته سالبة، فإن إنتروبي النظام ينقص (إذا ما كانت هذه الطاقة 100 J ودرجة الحرارة 200 K)، فالتغير في الإنتروبي هو $0.5 \text{ J K}^{-1} = -200 \text{ K} / 100 \text{ J}$). في هذه الحالة تغدو الحالة المرتفعة مزدحمة كثيراً كلما فاضت الطاقة نحو الداخل، ولذلك يتحرك السكان نحو كثير من عدم التعادل، ومنه إلى وضع يكون فيه كل السكان في الحالة الأعلى في الطاقة والإنتروبي يكون قريباً من الصفر.

القانون الثاني هو الذي يأخذ بالاعتبار "تبريد" نظام درجة حرارته سالبة. لنفترض أن النظام يفقد حرارة: **سيزداد إنتروبي النظام (كما قد رأينا قبل قليل)**. ولو دخلت الطاقة إلى المحيط ودرجة حرارته موجبة فإن إنتروبي المحيط سيزداد هو الآخر. ولذلك فعندما تنتقل الحرارة من منطقة درجة حرارتها سالبة، إلى منطقة درجة حرارتها "طبيعية" موجبة، فإن الإنتروبي الإجمالي يزداد. وما أن تتساوى أعداد السكان للنظام الأول حتى نكون قادرين على التعامل معه على أن درجة حرارته عالية بالموجب، أي درجة حرارة قريبة من اللانهاية. ومن هذه النقطة وما يليها يكون بين يدينا نظام مألوف حار جداً، في حالة تماس مع نظام أبرد، وبتدفق الحرارة من الأول إلى الثاني سيستمر الإنتروبي بالازدياد. وباختصار فإن القانون الثاني يقول إنه سيوجد انتقال تلقائي للحرارة من نظام درجة حرارته سالبة إلى نظام درجة حرارته موجبة في حالة تماس معه، وهذه العملية ستستمر حتى تتساوى درجتا الحرارة. الفرق الوحيد بين هذا النقاش والنقاش التقليدي هو في أنه حينما تكون درجة حرارة أحد النظامين سالبة، فإن الحرارة ستنتقل من النظام الذي تكون درجة حرارته أدنى (سالبة)، إلى النظام الذي تكون درجة حرارته أعلى (موجبة).

وإذا ما كانت درجتا حرارة النظامين سالبتين، فإن الحرارة ستنتقل من الذي درجة حرارته أعلى (أقل سالبية)، إلى الذي درجة حرارته أدنى (أكثر سالبية). ومن أجل فهم هذه النتيجة، لنفترض أن نظاماً درجة حرارته 100 K - يفقد حرارة قدرها 100 J ، عندئذ سيحدث تغير في الإنتروبي قدره $1\text{ J K}^{-1} = (-100\text{ J})/(-100\text{ K})$. ولو أعطيت نفس هذه الحرارة لنظام درجة حرارته 200 K -، عندئذ سيحدث نتيجة لذلك نقص في الإنتروبي، ومقدار هذا النقص هو $-0.5\text{ J K}^{-1} = (-200\text{ J})/(+100\text{ K})$. ولذلك، فالتغير الإجمالي لإنتروبي النظامين سيكون $+0.5\text{ J K}^{-1}$ وانتقال الحرارة من

النظام الذي درجة حرارته 100 K - (درجة الحرارة الأعلى) إلى النظام الذي درجة حرارته 200 K - (درجة الحرارة الأقل) هو انتقال تلقائي.

ما زالت كفاءة الآلة الحرارية، والتي هي نتاج مباشر للقانون الثاني، تُعرّف حسب معادلة كارنوت التي وردت في الفصل الثالث^(٣). ولكن إذا كانت درجة حرارة المستودع البارد سالبة، فكفاءة الآلة يمكن أن تكون أكبر من 1. فعلى سبيل المثال، إذا كانت درجة حرارة المستودع الحار 300 K والمصرف البارد 200 K -، عندئذ سنجد أن الكفاءة تساوي 1.67: أي يمكن لنا أن نتوقع الحصول على شغل من المحرك يفوق الحرارة التي أمددنا بها المصدر الحار. هذه الزيادة في الطاقة جاءت في الحقيقة من المصرف البارد، والسبب، كما رأينا، هو أن أخذ حرارة من مصدر درجة حرارته سالبة يزيد من إنتروبي هذا المصدر^(٤). وبمعنى من المعاني، فإنه كلما تهاوت مكونات العينة، أي السكان، عائدة إلى التساوي، فإن الطاقة المتحررة تساهم في الشغل الذي تنتجه الآلة.

وإذا ما كان كل من مصدر حرارة الآلة الحرارية، ومصرفها عند درجة حرارة سالبة، فإن الكفاءة ستكون أقل من 1، والشغل المنجز هو تحويل الطاقة المأخوذة كحرارة من المصرف الأقل سالبية "الأسخن".

(٣) توفيراً لجهودك ووقتك هي: $\epsilon = 1 - T_{\text{smk}}/T_{\text{source}}$.

(٤) لنفترض أننا أخذنا حرارة قدره q من مصدر درجة حرارته 300 K، سينقص الإنتروبي بمقدار يساوي $q/(300 \text{ K})$. وإذا ما أخذنا أيضاً حرارة قدرها q' من المصرف عند درجة حرارة 200 K -، فإن إنتروبيه سيزداد بمقدار $q'/(200 \text{ K})$. والتغير الإجمالي سيكون موجباً، بشرط أن تكون قيمة $q'/(200 \text{ K})$ على الأقل مساوية لقيمة $q/(300 \text{ K})$ ، أو أن تكون $q' = (200 \text{ K}/300 \text{ K})q$. ويمكن تحويل كلتا المساهمتين إلى شغل دون تغيير الإنتروبي، ومن ثم فالشغل الذي يمكن أن نجنيه يساوي $q + q'$. والكفاءة هي حاصل قسمة الشغل المنجز على الحرارة الممتصة من مصدر الحرارة:

$$\begin{aligned} & \text{(work done)/ (heat absorbed from the heat source)} \\ & (q + q')/q = 1 + (200\text{K}/300 \text{ K}) = 1.67 \end{aligned}$$

يحتاج القانون الثالث إلى تعديل طفيف وذلك على ضوء الانقطاع (عدم الاستمرارية discontinuity) في الخواص الحرارية أثناء العبور خلال $T = 0$. فعلى الجانب "الطبيعي" من الصفر، وعلى الجانب الآخر منه، يجب علينا تغيير القانون ليصبح لهما وعلى التوالي كما يلي:

يستحيل تبريد أي نظام إلى الصفر عبر عدد محدود من الدورات،

ويستحيل تسخين أي نظام إلى الصفر عبر عدد محدود من الدورات

وهو ما أشك في أن يتمنى محاولته أحد منا!

الخاتمة

نحن الآن في نهاية رحلتنا. لقد رأينا أن علم التيرموديناميك، وهو علم دراسة تحولات الطاقة، موضوع عظيم الاتساع، وعليه ينبنى العديد من المفاهيم الأكثر شيوعاً في حياتنا، وعلى ضوءه يتم تفسيرها وتوضيحها، مثل درجة الحرارة والطاقة. كما رأينا أنه انبثق من أفكار عن قياسات خواص مواد عينية ومحسوسة bulk samples، وأن التفسير الجزيئي لمفاهيمه يثري فهمنا لها.

يقدم كل قانون من الثلاثة قوانين الأولى خاصية تيرموديناميكية ينبنى عليها صرح علم التيرموديناميك. فمفهوم درجة الحرارة يقدمه لنا القانون الصفري، ومفهوم الطاقة الداخلية يقدمه لنا القانون الأول، ومفهوم الإنتروبي يقدمه لنا القانون الثاني. يضع القانون الأول حدوداً للتغيرات الممكنة في الكون: **إنها فقط تلك التي تحفظ الطاقة**. ويبين القانون الثاني أياً من هذه التغيرات يكون تلقائياً، أي لديه الميل للحدوث دون أن يحتاج إلى شغل منا يجبره على ذلك. ويضع القانون الثالث كلاً من الصياغات الجزيئية والتجريبية لعلم التيرموديناميك في بوتقة واحدة، ويجعلهما بحالة توافق، إنه يوحد فيما بين النهرين.

ما خشيت التطرق إليه يقع في نطاقين ينبعان من مماثلات ونظائر تيرموديناميكية. فلم أتطرق لعالم التيرموديناميك غير المتوازن (أي عند غير حالة التوازن) الذي ما زال

عالم غير آمن، حيث تمت محاولات لاشتقاق قوانين خاصة بالسرعة التي تُنتج بها عملية ما قدراً من الإنتروبي جرّاء حدوثها. كما لم أتطرق إلى المماثلات أو النظائر الخارقة للعادة وغير المفهومة في مجال نظرية المعلومات، حيث تكون محتويات الرسالة لصيقة بالتعريف الإحصائي للإنتروبي. ولم أتعرض أيضاً لمظاهر أخرى يعدّها آخرون مركزية لفهم أعمق للثيرموديناميك، مثل أن قوانينه، وبالذات الثاني، هي إحصائية بطبعها وبذلك أعترف بالاختلافات الطفيفة حينما تتقلب الجزئيات نحو ترتيبات مفاجئة. ما صبوت إلى تغطيته هو لبّ المفاهيم، تلك المفاهيم التي انشقت الآلة البخارية عنها، ولكن امتدت لتطوّق إنكشاف فكرة ما. حقيقةً إن هذه الحفنة الضئيلة من القوانين تسيّر الكون، وتلامس وتضيء كل شيء نعرفه.

قراءات إضافية

إذا كنت ترغب في المضي أكثر في أي من الموضوعات التي تطرقنا إليها فإليك ؛ بعضاً من المقترحات.

- كتبتُ عن حفظ الطاقة وعن مفهوم الإنتروبي بمستوى مقارب لما هو هنا ولكن بمنظور كمي أقل وكان ذلك في كتابي :

Galileo's Fingers: The Ten Great Ideas of Science (Oxford University Press, 2003).

كما حاولت عرض مفاهيم القانون الثاني ومضامينه ، بطريقة أغلب ما تكون تصويرية عبر اختراع كون صغير جداً نرى فيه كل ذرة من الذرات ، وكان ذلك في كتابي :

The Second Law: (W. H. Freeman & Co., 1997).

وتوجد تفسيرات أكثر جدية في كتبي المختلفة. وبترتيب حسب التعقيد في هذه الكتب هي :

1. *Chemical Principles: The Quest for Insight* (with Loretta Jones, W. H. Freeman & Co., 2008).
2. *Elements of Physical Chemistry: (with Jolio de Paula, Oxford University Press and W. H. Freeman & Co., 2006).*
3. *Physical Chemistry: (with Jolio de Paula, Oxford University Press, 2006).*

- وبالطبع فقد كتب آخرون حول هذه القوانين ببراعة. ويمكنني أن أدلك إلى أكثر الأعمال موثوقة وهي :

1. *The Theory Thermodynamics*, by J. R. Waldram (Cambridge University Press, 1985).
2. *Applications of Thermodynamics*, by B. D. Wood (Addison-Wisley, 1992).

3. *Entropy Analysis*, by N. C. Crago (VCH, 1992).
 4. *Entropy in Relation to Incomplete Knowledge*, by K. G. Denbigh and J. s. Denbigh (Cambridge University Press, 1985).
- Statistical Mechanics: A concise Introduction for Chemistry, by B. Widom (Cambridge University Press, 2002).

فهرس الرموز والوحدات

١٠	كالفن	K	٦٩	طاقة هلمهولتز	A
١٣	كيلوغرام	kg	١٢	$\beta = 1/kT$	β
٢٠	الكتلة	m	٦٢	معامل الأداء	c
١٣	متر	m	٣٣	السعة الحرارية	C
٣١	الضغط	p	٥٧	تساوي الطاقة	D
٥٢	الطاقة المنقولة كحرارة	q	٣١	$\Delta X = X_{\text{final}} - X_{\text{initial}}$	ΔX
٤٨، ٣٩	الإنتروبي	S	١٢	الطاقة	E
١٥	ثانية	s	٤٦	الكفاءة	\mathcal{E}
٩	درجة الحرارة	T	٢٠	تسارع السقوط الحر	g
٢٢	الطاقة الداخلية	U	٧٤	طاقة غيبس	G
٥٠	وات	W	٣١	الإنثالبي	H
٥٦	وزن الترتيب	W	١٣	جول	J
٦٢	الطاقة المنقولة كشغل	w	١٢	ثابت بولتزمان	k

كشاف الموضوعات

إنتروبي ٥٥ - ٥٧ ، ٥٩ ، ٦٠
مطلق ٦٤ ، ٦٥
وعدم الانتظام ٥٦ ، ٥٧ ، ٦٢ ، ٦٣ ،
٧٣ ، ٨٠ ، ٩٦
انتقال طوري ٨٥ ، ٨٨
إنتالبي ٣٣ ، ٣٤ ، ٣٧ ، ٧٥ ، ٧٦ ،
٨٢ ، ٨٣ ، ٨٦
إنتالبي الانصهار ٣٦
إنتالبي التبخر ٣٦
انصهار ٨٦
آلة الاحتراق الداخلي ٧٣
آلة بخارية ٧٣
تجريد ٤٤ ، ٧٣
المحيط ١ ، ٢ ، ٢٤ ، ٢٩ ، ٣٢ ، ٣٦ ،
٤٦ ، ٤٧ ، ٤٩ ، ٥٠ ، ٥٤ ، ٥٨ ، ٦٩
- ٧٢ ، ٧٥ ، ٧٧ ، ٧٨ ، ٩٥ ، ١١١

أ

احتراق ٣١ ، ٣٣ - ٣٥ ، ٧٣ ، ٨٢ ، ٨٣
إحصائي ، ثيرموديناميك ١ ، ٤ ، ٥ ،
٩ ، ١٠ ، ١٩ ، ٢٠ ، ٢٢ ، ٢٣ ، ٢٦ ،
٢٨ ، ٣٠ ، ٣٣ ، ٣٥ ، ٣٧ ، ٤١ ، ٤٣ ،
٤٨ ، ٥٨ ، ٦٤ ، ٧٥ ، ٧٨ ، ٩٥ ، ٩٦ ،
١٠٣ ، ١١٠
أدينوسين ، ثاني فوسفات ٩٠
أدينوسين ، ثالث فوسفات ٨٩ ، ٩٠
استخلاص ، قوة ٤٤
إعادة ضريبة ٤٨ ، ٧٥ - ٧٧ ، ٨١ -
٨٣
أميني ، حمض ٧٣ ، ٨٨ - ٩٠
إنتروبي ، التغير في ٥٦ - ٥٨

تبريد إلى درجات منخفضة ٩٧
 تجمد ٨، ٩، ١٤، ٥٤، ٥٥، ٨٥، ٨٨
 تدرج ثيرموديناميكي ٨
 تدرج رانكين ٩
 تسارع السقوط الحر ٢٠
 تسامي ٨٨
 تعددية المستويات ٦٧
 تغير ممكن الحدوث ٦١
 تفسير جزئي للحرارة ٣٠
 حرارة ٣٠، ٣٣، ٣٤
 طاقة هلمهولتز ٧٨ - ٨٤، ٩٥
 ضغط ٥، ١٥
 شغل ٦٤، ٧٦
 تقليدي/كلاسيكي، ثيرموديناميك ٩،
 ١٠، ٦٣، ٩٦، ١١٠
 تكتف ٨٨
 تلقائي ٤٨
 تغير ٦١، ٧٧، ٧٩، ٨٠
 عملية ٧٠، ٨١، ٨٤
 عملية ثابتة الضغط ٨٤
 عملية ثابتة الحجم ٨٤
 تماثل وقوانين الحفظ ٤١



بالوعة ٤٥، ٤٦
 بخار فائق التسخين ٤٦
 بروتين ٣٦، ٧٣، ٨٨ - ٩٠
 بطارية ٢١، ٩٣، ٩٤
 بطارية ميتة ٨٥، ٩٣
 بطارية كهربائية ٢١، ٩٣
 بطارية فارغة ٩٤
 بقاء، تماثل و ٤، ٢٣، ٤١، ٤٩
 بلانك، إم ٦٥
 بولتزمان، ل ١٠، ١١
 بولتزمان، توزيع ١١، ١٢، ١٥، ٣٦،
 ٦٢، ١٠٤
 بولتزمان، ثابت ١٢، ١٥، ٦٤
 بولتزمان، صيغة ٦٤، ٦٥، ١٠٥
 بيتا ١١، ٧٤



تابع الحالة ٢٤
 تبخر ٣٦، ٨٦، ٨٨

تمدد، معامل ١٠٣

توازن ١١، ٩١

توزيع ماكسويل وبولتزمان ١٦

توازن ميكانيكي ٤، ٦، ٣٢

توازن حراري ٥، ٦، ١٧، ٣٢



ثابتة الحجم، عملية تلقائية ٨٤

ثابتة الضغط، عملية تلقائية ٨٤

ثلاجة ٤٩، ٥٠، ٦٩ - ٧١

ثلج ٨، ٣٦، ٦٧، ٨٦، ١٠٢

تركيب ٣٩

فاضل/باقي الإنتروبي ٦٦

ثلج جاف ٨٨

ثيرموديناميك اللاتوازن

ثيرمومتر /ميزان حراري ٧



جسيم في صندوق ٦٢، ٦٣

جول، جي بي ٢٢

جول ٢٠، ٧٤



حالة خمود ٦٥

حرارة ٢١، ٢٤، ٢٦

حرارة كامنة ٣٦

حركة أبدية ٢٦

حضاري، نهوض

حيوية، تحولات الطاقة ٨٥



خاصية ٣

خاصية مكثفة ٣

خاصية ممتدة ٣



درجات حرارة منخفضة ٣٨، ٩٧، ١٠٠

درجة الحرارة ١٦

درجة الحرارة بدلالة الشغل ٥٢

درجة الحرارة اللانهائية ١٣، ١٠٥

درجة حرارة الغاز الكامل ٥٥، ١٠٣

درجة حرارة سالبة ١٠٧، ١٠٩ - ١١١

دون، جي ٧٤



شغل

القدرة على إنتاج ٢٠

أقصى كعكسي ٣٢

طبيعته الجزئية ٢٧ - ٢٩

شغل أقصى ٣٢



رابطة هيدروجينية ٦٨

فضلة أنثروبي ٦٨

رقم قياسي لأدنى درجة حرارة ١٠٣



صلب متعدد المستويات ١٠٢



زوال المغناطيسية ١٠٠



ضريبة حرارية ٧٥، ٧٧

ضغط، تفسير جزئي ٤٠، ٨٤



سخان ٢٢، ٣٠

سخان كعامل ٣٠

سرعة، متوسط ١٦

مقياس طبيعي ١٠٦

سعة حرارية ٤٠



طاقة

نوعية

كمية ١١

طاقة حرة ٨٠، ٨٧

طاقة داخلية ٧٩

الاعتماد على درجة حرارية ٢٣، ٩٢

سنو، سي بي

سيلزيوس، أ ١٤، ١٥، ٥٢، ٥٤

سيلزيوس، تدرج ٥٤

- اعتمادها على درجة الحرارة ٢٣، ٩٢
 كطاقة كلية ٤٠، ٨٠
 طبقة الصقيع ٥٣، ٨٨
 طعام ٤٥، ٧١، ٧٣، ٨٥، ٩١
 طور ٨٥
 طومسون، دبليو ٤٧
- تفاعل كيميائي ٩٣، ١٠٢
 مزج ٩٢
 انتقال طوري ٨٥
 اعتماد على درجة الحرارة ٢٣، ٩٢
 طبيعة جزيئية
 غزل ٩٨
 غزل إلكتروني ١٠٤
 غزلات مستقطبة ١٠٩
 غليان ٨٥
- عدد السكان النسبي ١١، ٦٢، ١٠٦،
 ١١٠، ١١١
 عملية طبيعية ١١١
 عملية عكسية ٣١، ٨٠
 عملية غير دائرية ٤٧
- غاز كامل / مثالي ١٥، ٥٥، ١٠٣
 انعدام وجوده
 غازولين، حرق ٣٥، ٨٢
 غبس، جي. دبليو ٨٣
 غبس، طاقة ٨٣ - ٨٨
- فائقة، توصيلية ٩٧
 فائقة، ميوعة ٩٧
 فضلة الأنتروبي ٦٦ - ٦٨
 فهرنهايت، دال ٨، ١٥، ٥٣
 فهرنهايت، تدرج ٨، ١٤
 عند درجات حرارة سالبة ١٠٧،
 ١٠٩ - ١١٢

كارنوت ٤٥	قانون، الأول، ١، ١٩
محرك حراري ٥٢	قانون، الثالث، ٩٥، ٩٦، ٩٨
كلازيوس، ر ٤٨	الإنتروبي عند الصفر المطلق ٦٤
كلازيوس، تعريف، ٥٦، ٦٣، ٦٥	قانون، الثاني، ٤٣، ٤٤، ٤٧
كلازيوس، صيغة، ٤٩، ٥٠	تعريف كلازيوس ٥٦، ٦٣، ٦٥
كمية الطاقة، ١٩، ٤٤، ٥٧	تعريف الأنتروبي ٩٦، ١١٠
كون، ١، ٢	تعريف كالفن ٤٧
كيميائي، توازن، ٩١، ٩٢	عند درجات حرارة سالبة
كيميائي ٩١	قانون، الصفري، ١، ٣، ٥، ٦
ميكانيكي، ٤، ٥	كفكرة مستقبلية / تالية
حراري ٥	قانون حفظ الطاقة، ١٩، ٧٨
	قوة ٥٧

J

ليزر ١٠٩

K

	كارنوت، س ٤٥
	كارنوت، كفاءة ٥٣
	عند درجة حرارة سالبة
مائع غير قابل للوزن ٤٥	كالفن ٤٧
مثيل العطس ٥٦، ٦٩	لورد ٤٧
مثيل الوزن ٩١	تدرج ٨، ٩
محرك حراري ٥٢	تعريف
كفاءة ٤٦	كربون، أول أكسيد الصلب ٦٧، ٨٨
محيط ١	كفاءة ٤٦

نظام مفتوح ٢	مزج ٩٢
نظرية التمدد والتبديد ٣٨	مستوى الطاقة ١١، ١٣، ١٥، ١٧،
نظرية المعلومات	٣٦، ٣٩، ٦٢، ٦٣، ١٠٤، ١٠٩
نظرية نويشر ٤١	انفصال
نقطة ثلاثية ٥٤	مصدر ٤٧
نويشر، إي ٤١	مضخة حرارية ٧٠
نوعية الطاقة ٢٦	مطلق، إنتروبي ٦٤، ٩٦

ب

هلمهولتز، هـ، فون ٧٨	مطلق، صفر ١٤، ٩٧
هلمهولتز، طاقة ٧٨ - ٨١، ٩٥	انعدام المحافظة على ٩٧
تفسير جزيئي ٤٠، ٨٤	معامل الأداء ٧١، ٩٥
هواء، مكيف ٣٧، ٤٥	ثلاجة ٥٠، ٦٩ - ٧١
هيليوم سائل ٩٧	مضخة حرارية ٧٠، ٧٢، ٧٣
	معامل التمدد الحراري ١٠٣
	مغلق، نظام ٢
	مكبس ٣
	مكظومة، إزالة للمغنطة ١٠٠، ١٠٢
	منفذ للحرارة ٧، ٥٢

و

وات ٥٧
وزن الترتيب/التنظيم ٦٤

ن

نظام ١
نظام معزول ٢