الفصل الثاني

القانون الأول: حفظ الطاقة
The First Law: The Conservation of Energy

القانون الأول عادة لا يتطلب الكثير حتى يُستوعب، وذلك لكونه امتداداً *لقانون حفظ الطاقة law of conservation of energy*، الذي ينص على أن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث، بمعنى أنه مهما كانت كمية الطاقة عند بداية الكون فإنها ستكون هي نفسها عند نهايته. غير أن الثيرموديناميك موضوع دقيق، والقانون الأول أكثر إثارة من مجرد ما توحي به هذه الملاحظة. إضافة إلى ذلك، فمثلما أن القانون الصفري قد أعطى دفعة لتقديم خاصية "درجة الحرارة" وتوضيحها، فإن القانون الأول يحفز هذا التقديم، ويساعد على إيضاح معنى المفهوم الغامض لكلمة "الطاقة".

سنفترض في مستهل حديثنا بأننا لا نملك أدنى فكرة عن هذه الخاصية، تماماً كما فعلنا عند تقديمنا للقانون الصفري حينما لم نفترض مسبقاً أن ثمة شيء ينبغي علينا أن نسميه "درجة الحرارة"، لنجد إثر ذلك أن المفهوم قد فرض نفسه علينا ضمنياً في القانون. إن كل ما سنفترض أننا نفهمه هو المفاهيم الراسخة للميكانيكا والديناميكا كالكتلة والوزن والقوة والشغل. وسيكون فهمنا لفكرة "الشغل"، على وجه الخصوص، هو الأساس الذي نبني عليه كل هذا العرض.

الشغل work: هو الحركة ضد قوة معاكسة. نحن نبذل شغلاً حينما نرفع ثقلاً باتجاه معاكس للجاذبية. ومقدار الشغل الذي نبذله يعتمد على كتلة الجسم، وقوة الجاذبية، والارتفاع الذي تم إيصال الجسم إليه. أنت بذاتك قد تكون هذا الثقل أو الجسم، فأنت

obeikandl.com

تبذل شغلاً عند صعودك على الدرج: الشغل الذي تبذله يتناسب مع كل من وزنك والارتفاع الذي وصلت إليه في صعودك. كما أنك تبذل شغلاً عندما تقود دراجتك الهوائية باتجاه معاكس لاتجاه الريح: كلما كانت الريح أشد والمسافة التي تقطعها أطول كلما كان الشغل الذي عليك بذله أكبر. أنت تبذل شغلاً حينما تمط أو تضغط زنبركاً: الشغل الذي تبذله يعتمد على قوة الزنبرك والمسافة التي مُطّ إليها أو ضُغط.

كل تلك الأشغال مكافئة لرفع الثقل. فمثلاً، لو فكرنا بمط زنبرك ووصلنا الزنبرك الممطوط ببكرة وثقل، فبمقدورنا متابعة المسافة التي سيرتفع إليها الثقل حينما يعود الزنبرك إلى وضعه السابق. إن مقدار الشغل المبذول لرفع كتلة قدرها m (ولنقل 50 kg مثلاً) مسافة تبعد عن سطح الأرض مسافة قدرها h (ولنقل مترين مثلاً)، يمكن حسابه من المعادلة:

$$work = mgh$$

الشغل = الكتلة × التسارع × المسافة

حيث g (التسارع) مقدار ثابت يعرف باسم *تسارع السقوط الحر acceleration of free fall*، والذي تبلغ قيمته عند سطح الأرض $9.8\ m\ s^{-2}$. أي أن رفع ثقل كتلته 50 kg مسافة مترين فوق سطح الأرض سيتطلب بذل شغل قدره $980\ kg\ m^2\ s^{-2}$. وكما ذكرنا في الهامش رقم 1 فإن هذا التجمع من الوحدات (كيلوغرام متر^2 لكل ثانية^2) ليس صعب الاستعمال وحسب بل غير مناسب أيضاً، ولذلك جرت العادة على استعمال ما يدل عليه وهو *جول joul* الذي يرمزله بالرمز J. ولذلك فرفع ثقلنا السابق يتطلب بذل شغل قدره 980 J.

يعد الشغل الركن الأهم في الثيرموديناميك، وبالذات لقانونه الأول. فما من نظام إلا ولديه القدرة على إنجاز شغل. وفيما يلي بضعة أمثلة. أحد هذه الأمثلة ما كنا قد بيناه قبل قليل بخصوص إمكانية إنجاز شغل بواسطة الزنبرك حينما يكون إما ممطوطاً

obeikandl.com

وإما مضغوطاً. والمثال الآخر هو البطارية الكهربائية التي بوسعها إنجاز شغل من خلال وصلها بمحرك كهربائي motor، وهذا المحرك يستطيع بدوره أن يقوم برفع ثقل. وكذلك كومة من الفحم في محيط هوائي، هذه الكومة يمكن حرقها داخل نوع معين من الآلات، وهذا بدوره يمكن استعماله لإنجاز الشغل. وأخيراً، ومع أنها نقطة لا تبدو جلية إلا أن تمرير تيار كهربائي في ملف معدني لمدفأة كهربائية يعني في الحقيقة أننا ننجز شغلاً على المدفأة، وذلك لأن التيار نفسه يمكن تمريره في محرك كهربائي motor عوضاً عن المدفأة ليقوم برفع ثقل. أما لماذا نسمي المدفأة بهذا الإسم "مدفأة heater" ولا نسميها "منجزة شغل أو عاملة worker"، فهو ما سيتضح أمره حالما نتمكن من تقديم مفهوم الحرارة heat، وهو الذي لم يظهر ويتبدّ لنا بعد.

نحن حينما نقول إن الشغل هو المفهوم الأولي والأساسي للثيرموديناميك، فإننا عندئذٍ سنكون بحاجة لمصطلح نعبر بواسطته عن وسع النظام أو قدرته على إنجاز شغل: هذه القدرة نسميها *طاقة energy*. أن نقول إن الزنبرك المطوط إلى أقصى ما يمكن يمتلك قدرةً على إنجاز شغل تفوق قدرة الزنبرك المطوط بدرجة أقل، هي كأن نقول إن طاقة الزنبرك المطوط إلى أقصى ما يمكن تفوق طاقة الزنبرك المطوط بدرجة أقل. وأن نقول إن لتراً ساخناً من الماء يمتلك قدرة على إنجاز شغل تفوق قدرة لتر من ماء بارد، هي كأن نقول إن لتراً ساخناً من الماء يمتلك طاقة تفوق طاقة لتر من ماء بارد. في مثل هذا السياق ليس ثمة غموض حول الطاقة، إذْ أننا نعرف تماماً ماذا نعني بالشغل.

سنقوم الآن بتوسيع هذا المفهوم ليمتد مما هو ميكانيكي إلى ما هو ديناميكي بفعل الحرارة (ثيرموديناميكي). افترض أن لدينا نظاماً في إناء تحيط به جدران آديباتية (أي جدران غير منفذة للحرارة). إذا تذكرنا أننا كنا قد شرعنا في التأسيس لمفهوم "آديباتي" في الفصل الأول مستعملين القانون الصفري، فبإمكاننا القول إننا لا ننزلق نحو مصطلح غير معرّف. فنحن بكلمة "آديباتي" نقصد، من الناحية العملية، إناءً

معزولاً عزلاً حرارياً، مثل دورق مفرغ معزولاً عزلاً جيداً. أما درجة حرارة محتويات الإناء فنستطيع مراقبتها بواسطة ثيرمومتر، وهذا مفهوم آخر قدمه لنا أيضاً القانون الصفري، ولذلك فنحن ما زلنا على أساس قوي. وسنجري الآن بعض التجارب.

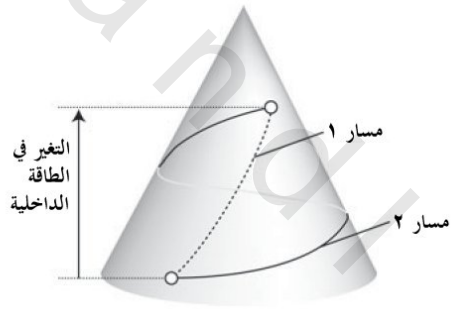
نخض أولاً محتويات الإناء (التي تشكّل النظام) بمحراك يحركه ثقل ساقط، ونسجل التغير في درجة الحرارة الذي أحدثه هذا الخض. في السنوات التي تلت سنة 1843م تم إجراء تجربة تشابه تماماً نمط هذه التجربة بواسطة أحد آباء علم الثيرموديناميك وهو جي. بي. جول، المولود سنة ١٨١٨م والمتوفى سنة ١٨٨٩م. ونحن نعرف بالتأكيد مقدار الشغل المنجز من معرفتنا لكتلة الثقل الساقط والمسافة التي قطعها في سقوطه. بعد ذلك سنزيل الجدران الآدياباتية (غير المنفذة للحرارة) حتى يستعيد النظام حالته التي كان عليها في البداية. ونضع فيه سخاناً كهربائياً نمرر فيه تياراً لمدة لا تسمح إلا بإنجاز شغل على السخان مساوياً للشغل الذي أنجزه سقوط الثقل. وبدون أدنى شك، لا بد وأننا قد أجرينا عدة قياسات للربط بين التيار المار بمحرك لفترات زمنية مختلفة، وبين الارتفاع الذي كان عليه الثقل، وذلك من أجل أن نتمكن من تفسير أن التيار المار خلال زمن معين هو نفسه الشغل الذي تم إنجازه. إن النتيجة التي سنخلص إليها من هاتين التجربتين، ومن حشد مشابه من نفس النوع هي: *بغض النظر عن كيفية إنجازه، فإن نفس القدر من الشغل سيحدث التغيير نفسه في حالة النظام.*

تشبه هذه النتيجة تسلق جبل عبر مسارات متعددة، فكل مسار يمثل طريقة مختلفة لإنجاز الشغل. فعلى افتراض أن نقطة البداية لكل المسارات واحدة وكذلك نقطة النهاية، فإننا سنكون قد ارتفعنا من نقطة البداية إلى نقطة النهاية بنفس القدر بغض النظر عن المسار الذي كنا قد سلكناه بينهما. بمعنى أنه لو ألصقنا رقم ارتفاع altitude على كل نقطة في الجبل، فسنجد أن الارتفاع الذي وصلناه، وبغض النظر عن الطريق الذي سلكناه، سيساوي دائماً الفرق بين أول رقم ارتفاع كنا عنده وآخر رقم وصلنا

إليه. وهذا ما ينطبق تماماً على نظامنا آنف الذكر. إن حقيقة عدم الاعتماد على المسار الذي تم من خلاله التغيّر، يعني أنه بمقدورنا تحديد أو إعطاء رقم يرتبط بكل حالة من الحالات المختلفة للنظام، هذا الرقم سنعطيه اسماً ورمزاً، الاسم هو *الطاقة الداخلية* *internal energy*، والرمز هو U. وبعد ذلك نستطيع حساب الشغل المطلوب انجازه للانتقال بين أيّ حالتين وذلك بأخذ الفرق بين قيمتي الطاقة الداخلية في الحالتين الابتدائية والنهائية (الشكل رقم ٢.١)، كالتالي:

الشغل اللازم = الطاقة الداخلية النهائية - الطاقة الداخلية الابتدائية

work required = U(final) – U (initial)



الشكل رقم (٢,١). إيضاح أن التماثل في فولنا: إن اختلاف طرق إنجاز الشغل على النظام، ومن ثم تغيير حالته بين نقطتي البداية والنهاية المحددتين، قد تطلب المقادير نفسها من الشغل، مع فولنا: إن مسارات مختلفة في الجبل تؤدي إلى نفس الفرق في الارتفاع بين نقطتي البداية والنهاية، وإيضاح أن هذا التماثل هو الذي يقودنا للاعتراف بوجود خاصية تدعى الطاقة الداخلية.

ومع إدراكنا أن النظام في هذه المرحلة آديباتي (مكظوم)، فإن ملاحظة عدم اعتماد الشغل على المسار عند الانتقال بين حالتين محددتين هي التي نبّهت إلى الاعتراف بوجود خاصية للنظام تعد مقياساً لمدى قدرته على أن ينجز شغلاً. وفي الثيرموديناميك، فإن الخاصية التي لا تعتمد إلا على الحالة الراهنة للنظام بغض النظر

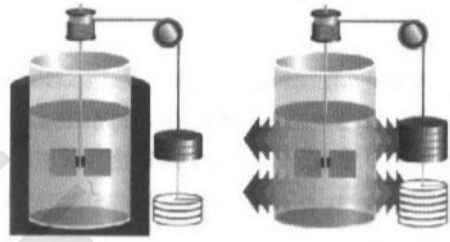
عن كيفية وصوله إليها، (كالارتفاع في الجغرافيا مثلاً)، تسمى: *دالة (أو تابع) الحالة state function*. ولهذا تكون ملاحظتنا قد قادتنا إلى تقديم دالة (أو تابع) الحالة المعروفة باسم "الطاقة الداخلية". في مرحلتنا هذه، قد لا نستوعب بعمق طبيعة الطاقة الداخلية، غير أننا لم نكن نفهم بعمق أيضاً طبيعة دالة (أو تابع) الحالة المعروفة باسم "درجة الحرارة" حينما واجهتنا في سياق القانون الصفري.

لم نصل بعد إلى القانون الأول، فهذا الأمر يحتاج، حرفياً ومجازياً، إلى مزيد من الشغل. ولكي ننطلق يتوجب علينا أن نبقى مع نظامنا نفسه ولكن بعد تعريته من جدرانه العازلة حتى لا يكون آديباتياً (مكظوماً). ثم لنفترض أننا استأنفنا مجدداً عملية الخض بادئين من الحالة الابتدائية نفسها ومستمرين إلى أن ينتهي النظام بنفس حالته النهائية. سنجد أن مقداراً مختلفاً من الشغل قد بذل للوصول إلى نفس الحالة النهائية.

وبنفس النموذج، سنجد أن الشغل الذي ينبغي إنجازه هو أكثر مما هو في الوضع الآديباتي (المكظوم). وهكذا نقاد إلى استنتاج أن الطاقة الداخلية يمكن أن تتغير عبر شيء آخر غير الشغل. هنا تظهر لنا واحدة من وسائل النظر إلى هذا التغير الإضافي، وذلك من خلال تفسير هذا التغير على أنه ناتج عن انتقال الطاقة من النظام إلى المحيط (تذكر أن الجدران ليست آديباتية) بفعل اختلاف درجة الحرارة الذي تسبب به الشغل الذي فعلناه بخضنا لمحتويات النظام. يدعى هذا الانتقال للطاقة النابع من اختلاف درجة *الحرارة heat*.

يمكن لنا وبسهولة قياس مقدار الطاقة المنتقلة كحرارة من النظام أو إليه: كل ما نعمله هو أن نقيس الشغل المطلوب لإحداث تغيير في النظام الأدياباتي (المكظوم) ومن ثم الشغل المطلوب لإحداث نفس التغيير في نظام دياثيرمي (أي ذاك المنزوعة عنه جدران العزل)، وبعد ذلك نأخذ الفرق بين القيمتين. هذا الفرق هو الطاقة التي انتقلت كحرارة. هنا لا بد من ملاحظة أن عملية قياس هذا المفهوم المخادع، وهو "الحرارة"،

قد أخضعناه لمبادئ ميكانيكية كما لو أنه يمثل الفرق في الارتفاع الذي سقط خلاله ثقلٌ معين لإحداث تغيير محدد في الحالة عند ظرفين مختلفين (الشكل رقم ٢,٢).



الشكل رقم (٢,٢). يمكن إحداث تغيير محدد في الحالة بمجرد إنجاز شغل، وذلك حينما يكون النظام آديباتياً (مكظوماً) كما في الجزء الأيسر من الشكل. ولكن حينما يحدث لهذا النظام التغير نفسه بطريقة غير آديباتية (غير مكظومة) كما في الجزء الأيمن فينبغي إنجاز شغل أكثر. إن الفرق بينهما هو الطاقة المفقودة كحرارة.

تريّث، فنحن لسنا إلا قاب قوسين أو أدنى من القانون الأول. افترض أن لدينا نظاماً مغلقاً نستعمله لإنجاز شغل، أو للسماح له بتسريب حرارة، مما يؤدي إلى خفض طاقته الداخلية. وبعد ذلك نجعل النظام معزولاً عن محيطه لما يحلو لنا من الوقت، ثم نعود إليه. سنجد دون منازعة أن قدرته على إنجاز شغل - طاقته الداخلية - لم تعد كما كانت عليه. بمعنىً آخر:

إن الطاقة الداخلية لنظام معزول ثابتة

هذا هو القانون الأول للثيرموديناك، أو على الأقل أحد نصوصه فهو يأتي بعدة نصوص متكافئة.

ومن أحد القوانين الطبيعية الكونية، ونحن نقصد هنا طبيعة البشر، هو أن التطلع للثراء يدفع إلى الخداع والغش. فلو أمكن للقانون الأول أن يكون خاطئاً ضمن ظروف معينة فإن الثروة - والمنافع المضمرة للبشرية - ستتراكم إلى حدود غير معروفة.

openkandil.com

فمثلاً لو أمكن إنجاز شغل بواسطة نظام آدياباتي (مكظوم) مغلق، دون إنقاص طاقته الداخلية فسيكون القانون الأول غير صحيح. وبطريقة أخرى نقول إننا لو استطعنا تحقيق *حركة دائمة perpetual motion*، فإنه سيكون بإمكاننا إنجاز شغل دون استهلاك وقود. والحقيقة هي أنه، ومع كل ما بذل من جهود، لم يتم ابداً إنجاز شغل من هذا النوع. بالتأكيد كانت هناك إدعاءات متراكمة، ولكن أياً منها لم يخل من درجة من الخداع أو الانخداع. ولهذ أوصدت مكاتب البراءات أبوابها أمام مثل هذه الادعاءات، فالقانون الأول صار غير قابل للخرق أو الانتهاك إلى حد أن أي ادعاء يخالف ذلك لا يستحق أن يبذل في سبيل مجادلته أيّ وقت أو جهد. وهنا يحق لنا القول: إن ثمة حالات معينة في العلوم، وبالتأكيد في التقنية، يكون فيها الانغلاق الفكري مبرراً.

هناك أشياء كثيرة علينا حسمها قبل أن ننتهي من هذا القانون. فأولاً: ما يتعلق باستعمالنا اللغوي لكلمة "حرارة heat"*. تستخدم كلمة heat (في اللغة الإنجليزية) إما فعلاً كأن نقول: we heat (وتعني باللغة العربية: نحن نُسخّن)، وإما اسماً كأن نقول: heat flows (وتعني باللغة العربية: الحرارة تنتقل). الحرارة في الثيرموديناميك ليست شيئاً أو كينونة ولا حتى شكلاً من أشكال الطاقة: *الحرارة هي نمط لانتقال الطاقة*. ونؤكد مرة أخرى: الحرارة ليست شكلاً من أشكال الطاقة، ولا مائعاً من أي شكل كان. الحرارة هي انتقال الطاقة بمحض اختلاف درجة الحرارة. الحرارة هي اسم لوسيلة وليست اسماً لشيء أو لكينونة.

ستكون أحاديثنا متلعثمة ومتعثرة إذا ما أصررنا على الاستعمال الدقيق لكلمة "حرارة"، فالأنسب هو الحديث عن حرارة تنتقل من جسم إلى آخر، والأنسب هو القول إننا نسخن شيئاً. فالاستخدام الأول للكلمة ناجم عن نظرتنا إلى أن الحرارة هي

* ما يتحدث عنه المؤلف هنا خاص باللغة الإنجليزية. (المترجم).

openkandil.com

شيء مائع ينتقل بين جسمين مختلفين في درجة الحرارة، وهذ المجاز القوي مغروس في لغتنا بصورة تتعذر إزالتها. بالتأكيد توجد مظاهر عديدة لانتقال الطاقة بسبب التفاوتات في درجة الحرارة، وقد تم التعامل معها رياضياً وبشكل مثمر من خلال النظر إلى الحرارة وكأنها تدفق لمائع عديم الكتلة (بمعنى أن ليس له وزن يقاس). ولكن ما هذا إلا مصادفة بحتة، ولا يعد دليلاً على أن الحرارة شيء مائع إلا لو قبلنا القول إن انتشار أحد الاختيارات الاستهلاكية بين السكان، وهو ما يمكن التعامل معه بمعادلات من نفس النوع، هو مائع محسوس.

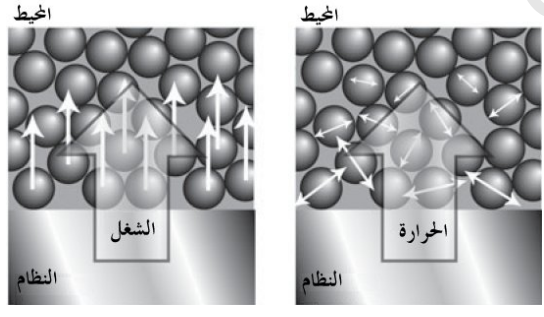
ما ينبغي علينا تكراره، والتكرار دون أدنى شك ممل، هو التأكيد على أن الطاقة تنتقل كحرارة (ويكون ذلك بفعل اختلاف درجة الحرارة). أما حينما نستخدم (باللغة الإنجليزية) كلمة حرارة heat كفعل كما في قولنا: نحن نسخن we heat، فمن الأصوب أن يستعاض عنها بكلام آخر فيه إطناب، مثل: "إننا نستنبط اختلاف درجة الحرارة كما لو أنه سيلان للطاقة عبر جدران دياثيرمية (منفذة للحرارة) في الاتجاه الذي نرغب". ومع هذا، ولأن الحياة قصيرة جداً، فمن الأنسب، باستثناء الحالات التي لا بد وأن نكون فيها دقيقين للغاية، أن نتبنى ما درجت عليه الألسن، وهذا ما سنفعله آملين ألا ننسى حقيقة الأمر*.

قد يبدو وكأن ثمة مخاتلة في ما ذكرناه قبل قليل، إذْ إننا، ومع تحذيرنا من النظر إلى "الحرارة" كشيء مائع سيّال، ما زال لدينا شيئاً من المرونة في هذا الأمر في استخدامنا لكلمة "طاقة". إنه ليبدو وكأننا طمرنا مفهوم المائع تحت السطح. ومع ذلك، فهذا الغش المفضوح نجد له حلاً من خلال التعرف على الطبائع الجزيئية للحرارة

* لدى المتحدثين بالعربية مقولة تعبر عما قصده المؤلف هنا وهي: "خطأ شائع خير من صواب متروك". (المترجم).

والشغل. فكما هي العادة، فإن التنقيب في العالم السفلي للظواهر هو الذي يضيئها. نحن دائما نميز، في الثيرموديناميك، فيما بين الطرق المختلفة لانتقال الطاقة، من خلال مراقبتنا ومشاهدتنا للمحيط، فالنظام أعمى عن الطرق التي أكسبته أو أفقدته طاقة. يمكن أن نعد النظام وكأنه مصرف (بنك)، فالنقود يمكن أن تدخل إليه أو تسحب منه كعُملتين، ولكن ما أن يكون النقد في الداخل فلا فرق بين نوعية الصناديق التي تم فيها خزن الودائع.

سنتحدث الآن عن الطبيعة الجزيئية للشغل، ثم عن الطبيعة الجزيئية للحرارة. فبالنسبة للشغل فسبق لنا أن عرفنا أن إنجازه، من الناحية المرئية، يكافئ تماماً عملية رفع ثقل. أما إنجازه من الناحية الجزيئية فرفع الثقل هو انعكاس لتحرك كل ذراته في نفس الاتجاه. إن رفع قطعة من الحديد مثلاً يعني أن كل ذرات الحديد قد ارتفعت. وعند خفض القطعة – ومن ثم تكون هذه القطعة قد أنجزت شغلاً على النظام، مثلما هو الأمر عند ضغط زنبرك أو غاز، الأمر الذي يزيد من الطاقة الداخلية للنظام- ، فإن كل الذرات تكون قد انخفضت بشكل متماثل. هنا نقول: *الشغل هو انتقال للطاقة يتم باستغلال الحركة المتماثلة لجميع الذرات في المحيط* (الشكل رقم ٢,٣).



الشكل رقم (٢,٣). التمييز الجزيئي بين انتقال الطاقة كشغل (يسار) وكحرارة (يمين). يظهر لنا إنجاز الشغل في حركة متماثلة لكل الذرات في المحيط، أما التسخين فهو إثارة لحركتها غير المنتظمة.

لنتحدث الآن عن الطبيعة الجزيئية للحرارة. كنا قد رأينا في الفصل الأول أن درجة الحرارة هي معيار ينبئنا بالعدد النسبي للذرات الموجود في حالات الطاقة المسموح بها، بحيث يتزايد عدد الذرات التي تكون بحالات الطاقة المرتفعة بتزايد درجة الحرارة. وبعبارات تصويرية أوضح، فقطعة الحديد الساخنة تتكون من ذرات تهتز بشدة في مواقعها، وعندما تكون درجة حرارة القطعة منخفضة، فالاهتزاز سيبقى قائماً ولكن بشدة أقل. وعندما تتماس قطعة ساخنة بقطعة باردة، فالذرات شديدة الاهتزاز على سطح القطعة الساخنة تتصادم بتلك الذرات ضعيفة الاهتزاز على سطح القطعة الباردة، أي تداحمها، فتجعلها تهتز بأكثر مما كانت عليه قبل التماس وبذلك فهي تكون قد مررت طاقتها نحوها. لم تكن هناك محصلة حركة، ولكن الطاقة قد انتقلت من القطعة الساخنة إلى القطعة الباردة بفعل هذا التصادم أو التداحم العشوائي الذي حدث في منطقة التماس. هنا نقول: *إن الحرارة هي انتقال للطاقة يحدث بفعل الاهتزازات العشوائية للذرات في المحيط* (الشكل رقم ٢.٣ نفسه).

ما أن تصبح الطاقة في وسط النظام، سواءٌ بالاستفادة من الحركة المنتظمة للذرات في المحيط (سقوط ثقل) أو من الاهتزاز العشوائي لها (جسم أكثر سخونة كاللهب مثلاً)، فليست هناك أي ذاكرة لدى النظام في كيفية انتقالها. فبمجرد دخولها تكون الطاقة قد خزّنت كطاقة ناشطة (أي طاقة حركية) والأمر نفسه بالنسبة لطاقة الوضع، أي طاقة الموقع التي كانت عليه الذرات المكوّنة للنظام، وهذه الطاقة يمكن سحبها كحرارة أو كشغل. إن التمييز بين الشغل والحرارة يتم في المحيط: النظام لا يتذكر الوسائل التي تم بواسطتها نقل الطاقة ولا حتى يهتم بكيفية استخدام مخزونه من الطاقة.

هذا العمى عن وسائل الانتقال يحتاج إلى شيء من التوضيح على النحو الآتي: حينما يضغط غاز في إناء آديباتي (مكظوم) بفعل سقوط ثقل فالكابس المسلط على الغاز يقوم بعمل المضرب في لعبة ميكروسكوبية لتنس الطاولة. فحينما يضرب جزيءٌ

المكبسَ فإن الجزيء سيتسارع. ولكن ما أن يعود طائر نحو الغاز فإنه سيواجه تصادمات مع جزيئات أخرى في النظام وكنتيجة لذلك فإن طاقته الحركية المتعززة تتشتت على تلك الجزيئات سريعاً. واتجاهات حركته ستغدو عشوائية. وحينما نسخن نفس العينة الغازية فإن التدافع العشوائي للذرات في المحيط يحفز جزيئات الغاز نحو المزيد من الحركة ، وسيتبدد تسارع الجزيئات عند الجدران الموصلة للحرارة بسرعة في كافة أرجاء العينة. والنتيجة فيما يخص النظام تبقى كما هي.

بإمكاننا العودة الآن إلى الملاحظة المبهمة قليلاً بخصوص أنه من الأفضل أن ننظر إلى السخان الكهربائي كمشغل كهربائي. فالتيار الكهربائي المار عبر الأسلاك الملفوفة في السخان هو سيل متجانس من الإلكترونات. وهذه الإلكترونات تتصادم بذرات السلك وتجعلها تترنح في مواقعها. أي أن طاقة السلك الملفوف - ودرجة حرارته - تكون قد ارتفعت من خلال الشغل الذي أجري عليه. ولكن هذه الأسلاك الملفوفة في حالة تماس حراري مع محتويات النظام، والحركة العنيفة لذرات السلك تثير ذرات النظام، هذا معنى أن الملف يسخن النظام. ولذلك، ومع أننا ننجز شغلاً على السخان، فعلينا أن ندرك أن هذا الشغل قد أفضى إلى تسخين النظام: إن العامل أو منجز الشغل قد صار سخاناً the worker has become heater.

والنقطة الأخيرة في هذا المجال هي أن التفسير الجزيئي للحرارة والشغل يكشف مظهراً واحداً من مظاهر التطور البشري. فاكتشافنا للنار كان أسبق من استهلاكنا للوقود بغية إنجاز شغل. ويسهل علينا الحصول على حرارة النار –والنار هي تبعثر الطاقة بشكل حركة فوضوية للذرات - وذلك بسبب أن ليس ثمة قيود على البعثرة، أي لكونها ليست غير لعبة الطاقة في التحرك العشوائي للذرات. أما الشغل، فمع أنه طاقة أيضاً، إلا أنه طاقة مروّضة مدجّنة طيّعة، مما يعني أن الحصول عليه صعب ويحتاج لترتيبات معقدة. ولذلك لم ينتظر الإنسان في مسيرته التاريخية طويلاً ليكتشف

النار، ولكن تطلب الأمر منه آلاف السنين لاختراع المحركات البخارية وآلات الاحتراق الداخلي والمحركات النفاثة.

كان مؤسسو علم الثيرموديناميك بارعين للغاية، إلى حد أنهم أدركوا أنه ينبغي عليهم أن يكونوا حذرين عند تحديد كيفية إجراء عملية ما. ومع أن ما سنصفه الآن من الناحية العملية ليس له علاقة وطيدة بالقانون الأول، على الأقل فيما يهم حوارنا الراهن، إلا أنه سيؤكد أهميته الحيوية حينما نأتي إلى القانون الثاني.

كنت قد أشرت في الفصل الأول إلى أن العلم يختطف الكلمات الشائعة ويضيف إلى معانيها شيئاً من التحديد. وفي هذا السياق نتحدث عن كلمة "عكسي reversible". ففي استعمالنا اليومي لهذه الكلمة نعني بالعملية العكسية تلك التي يمكن إرجاعها للخلف. فدوران العجلة يمكن عكسه، مما يعني مبدئياً أن الرحلة يمكن قطعها بالاتجاه المعاكس أو الخلفي. فيمكن عكس عملية الضغط على الغاز من خلال رفع المكبس الذي يقوم بالضغط. ولكن في الثيرموديناميك تعني كلمة "عكسي" شيئاً أكثر من هذا، *فالعملية العكسية* في الثيرموديناميك هي تلك التي يمكن إحداث تراجع لها بواسطة تعديلات *متناهية الصغر infinitesimal* في الظروف المحيطة.

والكلمة السحرية هنا هي كلمة (*متناهية الصغر infinitesimal*). فلو نظرنا إلى غاز في نظام له ضغط محدد، وله مكبس يتحرك بعيداً عنه ضد ضغط خارجي أقل، فالتغيّر الطفيف المتناهي الصغر في الضغط الخارجي لن يتمكن من إرجاع حركة المكبس. فالتمدد عكسي، في لغتنا المحكية، ولكنه ليس عكسياً في الثيرموديناميك. فإذا ما غمست قطعة حديد درجة حرارتها 20°C (ولنعتبر أنها النظام) في حمام مائي درجة حرارته 40°C فالطاقة ستتسرب كحرارة من الحمام المائي نحو قطعة الحديد. ولن يكون لأي تغيّرات طفيفة في درجة حرارة الماء أيّ تأثير في اتجاه التدفق. هنا لا يكون انتقال الطاقة كحرارة عكسياً من وجهة النظر الثيرموديناميكية. ولكن لنأخذ بالاعتبار الحالة التي يتساوى

فيها الضغط الخارجي مع ضغط الغاز في النظام. فكما مر معنا في الفصل الأول، نحن نقول إن النظام في حالة توازن ميكانيكي مع محيطه. لنقم بزيادة الضغط الخارجي بمقدار ضئيل: هذا يحدو المكبس لأن يتحرك نحو الداخل قليلاً. الآن لنقم بإنقاص الضغط قليلاً: هذا سيحدو المكبس لأن يتحرك نحو الخارج قليلاً. وهكذا يتبين لنا أن اتجاه حركة المكبس يتغير بفعل حدوث تغيرات طفيفة في خاصية معينة للمحيط، ونقصد بها هنا تحديداً الضغط. إن التمدد عكسيّ من وجهة النظر الثيرموديناميكية. وبشكل مماثل، لننظر إلى نظام درجة حرارته تساوي درجة حرارة المحيط. هنا نقول إن النظام ومحيطه في حالة توازن حراري. فلو خفضنا درجة حرارة المحيط بمقدار طفيف فالطاقة ستتسرب خارجة من النظام كحرارة. وحينما نرفع درجة حرارة المحيط بمقدار طفيف فالطاقة ستتسرب داخلةً إلى النظام كحرارة. هنا يكون انتقال الطاقة كحرارة عكسياً من وجة النظر الثيرموديناميكية.

ولكي نحصل على أقصى قدر من الشغل يجب أن يكون التمدد عكسياً في كل خطوة من خطوات حدوثه. وبذلك فنحن نساوي بين الضغطين الخارجي والداخلي، ثم نخفض الضغط الخارجي بمقدار ضئيل: أي أن المكبس سيتحرك نحو الخارج بقدر قليل، وضغط الغاز سينخفض بمقدار طفيف لأنه صار يشغل حجماً أكبر بقليل مما كان عليه. إن هذه العملية التي تجعل الضغط الخارجي يتناغم مع انخفاض ضغط الغاز ستستمر في الحدوث إلى أن يتحرك المكبس باتجاه الخارج بالقدر المرغوب، من أجل أن نُنجز به من خلال ربطه بثقل قدراً محدداً من الشغل. ليس ثمة شغل أقصى من هذا يمكن إنجازه لأنه لو تمت زيادة الضغط الخارجي ولو بقدر ضئيل فالمكبس سيتحرك نحو الداخل عوضاً عن الخارج. بمعنى أنه من خلال المحافظة على أن تكون كل خطوة من خطوات العملية عكسية، من وجهة نظر ثيرموديناميكية، فإن النظام سينجز أقصى قدر ممكن من الشغل. ويمكن تعميم هذه النتيجة من خلال العبارة التالية: *التغيرات العكسية هي التي تنجز أقصى قدر من الشغل*. وفي الفصول القادمة، سنحتاج إلى تذكّر هذه النتيجة.

ونؤكد مرة أخرى بأن علماء الثيرموديناميك دقيقون أثناء مناقشاتهم للقضايا، وهذا ما سنراه هنا في مناقشتهم لكمية الحرارة التي يمكن استخراجها من النظام، مثال ذلك حرق الوقود. ويمكن لنا تقدير أهمية هذه القضية على النحو الآتي. افترض أننا أحرقنا كمية معينة من مادة هيدروكربونية في إناء مغلق بمكبس متحرك. ما أن يحترق الوقود، إلا وينتج غاز ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء اللذان سيحتاجان لحيّز يشغلانه أكبر من الحيز الذي كان يشغله الوقود والأوكسجين، ولذلك فلا بد للمكبس أن يندفع نحو الخارج لكي يوفر لهما ذلك. هذا التمدد لا يأتي دون إنجاز شغل. أي أن حرق الوقود في مكان قابل للاتساع سيجعل جزءاً من الطاقة الناتجة عن الحرق يُستهلك لإنجاز شغل. ولكن لو تم الحرق في مكان غير قابل للاتساع، فالاحتراق سينتج نفس القدر من الطاقة دون هدر أي شيء منها لإنجاز شغل، وسبب هذا أنه لا مجال لحدوث تمدد. وبكلمات أخرى، تتوفر في الحالة الأخيرة الطاقة بمقدار أكبر من توفرها في السابقة. ولحساب الحرارة التي يمكن انتاجها في الحالة السابقة ينبغي علينا أن نأخذ في حسباننا الطاقة المستعملة لإيجاد مكان يشغله كل من ثاني أكسيد الكربون وبخار الماء، ثم نطرحه من مجمل التغير الحادث في الطاقة. ويبقى هذا صحيحاً حتى ولو لم يكن هناك مكبس فعليّ –كأن تتم عملية الحرق في صحن- ، وذلك لأن النواتج لا بد وأن تهيء لنفسها مكاناً تشغله، حتى ولو لم نستطع رؤية ذلك بالعين المجردة.

لقد طور الثيرموديناميكيون طريقة ذكية يأخذون من خلالها بعين اعتبارهم الطاقة المستخدمة لإنجاز شغل حينما يحدث تغير ما، وخاصة حرق الوقود، وذلك دون الحاجة الصريحة لحساب الشغل في كل مرة. ولإجراء ذلك صرفوا نظرهم عن الطاقة الداخلية للنظام، أي عن محتوى النظام الكلي من الطاقة، وركزوا نظرهم عوضاً عن ذلك على كمية أخرى شديدة الارتباط بها، إن هذه الكمية هي *الإنثالبي enthalpy*، والتي نعطيها الرمز (H). هذه الكلمة ذات أصل يوناني يعني "الحرارة

الداخلية، أو المحتوى الحراري، أو المخزون الحراري". ومع أننا، وكما شدّدنا، نصر على عدم وجود شيء اسمه "حرارة *Heat*"، (فالحرارة طريقة انتقال وليست شيئاً)، فإن الحذر والاحتراز هما اللذان قادا إلى اختيار الكلمة، وهذا ما سنراه لاحقاً. إن العلاقة الشكلية بين الإنثالبي H والطاقة الداخلية U تكتب على النحو الآتي:

$$H = U + pV$$

الإنثالبي = الطاقة الداخلية + الضغط × الحجم

حيث يدل الحرف p على ضغط النظام، والحرف V على حجمه. ينجم عن هذه العلاقة أن إنثالبي لتر واحد من الماء المفتوح للجو لا يزيد عن طاقته الداخلية بأكثر من 100 J، ولكن ما يهمنا أكثر ليس مجرد ملاحظة هذا الفرق القليل بين قيمتيهما بل إدراك دلالة هذا الفرق.

وهكذا يتجلى أن الطاقة المنتجة كحرارة من قبل نظام قادر على التمدد والانكماش بفعل حدوث عملية ما، وكشيء متميّز عن الطاقة الإجمالية الناتجة عن العملية، هي بالضبط نفسها التغيّر في إنثالبي النظام. إن الأمر ليبدو وكأنه بطريقة سحرية - ولكن في الحقيقة بطريقة رياضية - وكأنه قد تم أخذ ما حدث من تسريب للطاقة من النظام كشغل بعين الاعتبار بصورة آلية (أوتوماتيكية)، وأن ذلك قد تم من خلال تركيز النظر على الإنثالبي. وبكلمات أخرى نقول: إن الإنثالبي هو الأساس لنوع من الخدع الحسابية التي تمكننا من أن نتتبع بطريقة خفية الشغل الذي أنجزه النظام، وأن نكتشف مقدار الطاقة التي أنتجت كحرارة، بشرط أن تكون لدى النظام حرية التمدد في المحيط الذي يمارس ضغطاً ثابتاً عليه.

ينتج عن ذلك أنه إذا ما كنا مهتمين بالحرارة التي يمكن الحصول عليها من حرق وقود في إناء مفتوح كالفرن، فعندئذ سنلجأ إلى جداول الإنثالبي لحساب التغير في الإنثالبي المصاحب لعملية الاحتراق. يكتب هذا التغيّر بصورة ΔH، حيث دائماً ما

يستعمل، في الثيرموديناميك، الحرف اليوناني دلتا بصورته الكبيرة (Δ) للدلالة على التغير في الكمية. ومن ثم نعرّف ذلك التغير على أنه الحرارة المتولدة عن النظام. ولنأخذ مثالاً حياً على ذلك: التغير في الإنثالبي المصاحب لحرق لتر من وقود السيارات (الغازولين) هو تقريباً 33 ميغا جول (الواحد ميغا جول، 1 MJ، هو مليون جول). ولذلك نعرف دون أن نجري أي مزيد من الحسابات أن حرق لتر واحد من الغازولين، في إناء مفتوح، سيعطي 33 MJ من الحرارة. ويبين التحليل الأعمق لنفس عملية الحرق أنه لا بد وأن ينجز النظام شغلاً قدره 130 kJ (الواحد كيلو جول، 1 kJ، هو ألف جول) من أجل أن يتيح مكاناً تشغله الغازات الناتجة، ولكن هذا الطاقة ليست متاحة لنا كحرارة.

يمكن لنا استخراج تلك الطاقة الفائضة، ونقصد الـ 130 kJ، والتي تكفي لتسخين حوالي نصف لتر من الماء من درجة حرارة الغرفة إلى درجة غليانه، متى ما تمكنا من منع الغازات عن التمدد لأن ذلك سيجعل الطاقة الناتجة عن الاحتراق تتحرر بكاملها كحرارة. إحدى وسائل تحقيق ذلك ومن ثم الحصول عل كامل الطاقة كحرارة هو أن يتم ترتيب عملية الاحتراق بحيث تحدث في إناء مغلق ذي جدران غير قابلة للتمدد. مما لا يتيح أدنى فرصة لفقد الطاقة كشغل. ولكن من الناحية العملية فإنه من الأسهل تقنياً (تكنولوجياً) استخدام أفران مفتوحة للمحيط، ومن الناحية العملية أيضاً فإن الفرق بين الحالتين يبلغ من الصغر حداً لا يستحق بذل أدنى جهد، ولكن في علم الثيرموديناميك الصارم، والذي هو موضوع دقيق ومنطقي، فمن الأصول إجراء حسابات الطاقة بدقة وبمنهجية. وفي هذا العلم لابد للفرق بين التغير في الطاقة الداخلية والتغير في الإنثالبي أن يظل ماثلاً للعيان.

بسبب حاجة المباعدة بين جزيئات السائل بعضها عن البعض الآخر للطاقة، فإن تبخير السائل يتطلب إمداده بالطاقة. وهذه الطاقة تقدم له عادة كحرارة، وذلك

باستغلال الفرق بين درجة حرارة السائل ودرجة حرارة المحيط. في أيام سالفة كانت الطاقة الزائدة لدى البخار تسمى "*الحرارة الكامنة latent heat*" وذلك لأن الحرارة تتحرر من البخار عند تكثيفة وبذلك تكون بمعنى من المعاني "الكامنة" في البخار. إن التأثير الحارق للجلد من البخار هو خير إيضاح لذلك. أما في المصطلحات الحديثة للثيرموديناميك، فيُعْرف الإمداد بالحرارة من خلال معرفة التغير في إنثالبي السائل، ولذلك تم اعتماد المصطلح الجديد "*إنثالبي التبخر enthalpy of vaporization*" ليحل محل المصطلح القديم "*الحرارة الكامنة latent heat*". إنثالبي تبخير غرام واحد من الماء يبلغ حوالي 2 kJ، ومن ثم فالحرارة الناتجة عن تكثيف غرام واحد من الماء ستساوي القيمة نفسها، والتي بإمكانها القضاء على بروتين بشرتنا متى ما تعرضت لها. ويوجد مصطلح مقابل لذلك في عملية صهر المادة الصلبة وهو "*إنثالبي الانصهار enthalpy of fusion*". إن إنثالبي انصهار الكتلة نفسها أقل بكثير من إنثالبي تبخيرها، ولن تحترق بشراتنا إذا ما تعرضت لماء سائل يتحول إلى ثلج. بعبارة أخرى، فإن حرارة كتلة معينة من البخار كفيلة بإحداث حروق جسيمة لجلودنا لا تحدثه حرارة نفس الكتلة من السائل.

كنا قد رأينا في الفصل الأول أثناء الحديث عن القانون الصفري أن "درجة الحرارة" هي معيار ينبئنا عما يحدث من احتلال لمستويات الطاقة في النظام. مهمتنا الآن هي أن نرى كيفية ارتباط خاصية القانون الصفري هذه بخاصية الطاقة الداخلية للقانون الأول وبخاصية الإنثالبي المشتقة من الحرارة.

كلما ارتفعت درجة الحرارة واكتسب توزيع بولتزمان ذيلاً أطول، فهناك عدد من الجسيمات التي تتخذ حالات طاقة منخفضة تغادر هذا الوضع لتتخذ حالات طاقة مرتفعة. وتبعاً لذلك يزداد *متوسط* الطاقة، وذلك لأن متوسط الطاقة يعتمد على طاقات الحالات المتوفرة وأعداد الجزيئات التي تشغل كلاً منها. وبكلمات أخرى، فإنه كلما ارتفعت درجة الحرارة تزداد الطاقة الداخلية، والإنثالبي يرتفع هو الآخر. ولكننا

لسنا بحاجة لأن نشغل أنفسنا بالإنثالبي أو نمنحه اهتماماً خاصاً به لأنه دائماً يقتفي أثر التغيّر في الطاقة الداخلية.

يسمى ميل الخط المرسوم في العلاقة البيانية بين الطاقة الداخلية ودرجة الحرارة باسم "*السعة الحرارية للنظام heat capacity of the system*"، ونرمز لها بالرمز C[1]. فالمواد ذات السعات الحرارية العالية (مثل الماء) تتطلب مقادير عالية من الحرارة لإحداث ارتفاع محدد في درجة الحرارة، وذلك بخلاف المواد ذات السعات الحرارية المتدنية (مثل الهواء). ومن شروط الثيرموديناميك أنه لا بد من تحديد الظروف التي يتم عندها التسخين. فإذا ما تم التسخين، على سبيل المثال، عند ثبات الضغط، وهذا يعني أن العينة تمتلك حرية التمدد، فإن جزءاً من الحرارة التي اكتسبتها العينة سيستهلك لإحداث شغل التمدد. بمعنى أن القدر المتبقي من الطاقة في العينة سيكون أقل من الكمية التي تم إمدادها بها. وهذا يعني أن الارتفاع في درجة الحرارة عند ثبات الضغط سيكون أقل منه لو أن الظرف الذي تم عنده التسخين كان ثابت الحجم، بمعنى عدم إمكانية العينة لأن تتمدد. ولذلك نقول إن السعة الحرارية للعينة عند ثبات الضغط أكبر منها عند ثبات الحجم. هذا الفرق بين السعتين الحراريتين عند ثبات الضغط وعند ثبات الحجم ذو أهمية عملية قصوى بالنسبة للغازات، والتي تمر بتغيرات كبيرة في حجومها حينما تسخن في آنية يمكنها التمدد.

وتختلف السعة الحرارية عند درجة حرارة معينة عنها عند درجة حرارة أخرى. وإحدى الملاحظات التجريبية الهامة والتي سيكون لها دور هام في الفصل القادم، هي

---

[1] حتى نكون أقرب إلى الدقة فإن السعة الحرارية تُعرّف على أنا حاصل قسمة الحرارة المكتسبة على الارتفاع المتحقق في درجة الحرارة بفعل هذا الاكتساب:

C = (heat supplied)/(resulting temperature rise)

السعة الحرارية = الحرارة المكتسبة/التغير الحاصل في درجة الحرارة

إن إمداد غرام واحد من الماء بجول واحد من الطاقة ينجم عنه ارتفاع في درجة الحرارة يقارب 0.2°C.

أن السعة الحرارية، وهي المقدار اللازم من الحرارة لرفع درجة الحرارة، أو الناتج عن خفضها، لأي مادة تنخفض إلى الصفر عند درجات الحرارة القريبة من الصفر المطلق (T = 0). ويعني المقدار الطفيف للسعة الحرارية أن اكتساب النظام لمقدار قليل جداً من الحرارة يؤدي إلى ارتفاع كبير في درجة الحرارة، وهذا هو إحدى صعوبات عدم التمكن من الوصول إلى درجات حرارة منخفضة، فتسرب أو تسلل مجرد قدر ضئيل من الحرارة إلى النظام، يؤدي إلى تأثير كبير في درجة الحرارة (انظر الفصل الخامس).

يمكن لبصيرتنا عن الأصل الجزيئي للسعة الحرارية أن تكون أكثر نفاذاً متى ما تأملنا - كما هو الأمر دائماً - في توزيع الجزيئات على حالات الطاقة الموجودة. توجد في علم الفيزياء نظرية تدعى *نظرية التذبذب والتبديد fluctuation-dissipation theorem*، والتي تتضمن أن قابلية النظام لتبديد الطاقة (جوهرياً امتصاصها)، يتناسب مع مقادير التذبذبات حول متوسط قيمة معينة لخاصية مقابلة. والسعة الحرارية هي مصطلح تبديدي، فهي مقياس لقابلية المادة لامتصاص الطاقة التي تقدم إليها كحرارة. أما مصطلح التذبذب المقابل فهو انتشار كافة الجزيئات أو المكونات على حالات الطاقة المختلفة للنظام. وحينما تكون كل جزيئات النظام في حالة واحدة من حالات الطاقة، فليس هناك انتشار لهذه المكونات، و"التذبذب" لديها يساوي صفراً، واستجابة لذلك تكون السعة الحرارية للنظام صفراً هي الأخرى. وكما كنا قد رأينا في الفصل الأول أنه عندما T = 0 فإن الحالة المشغولة في النظام هي فقط الحالة الأدنى في الطاقة، لذا يمكننا أن نستنتج من نظرية التذبذب والتشتت أن السعة الحرارية، كما قد لوحظ، ستكون صفراً هي الأخرى. أما عند درجات الحرارة المرتفعة فمجمل الجزيئات تنتشر على عدة حالات ومن ثم، وكما قد لوحظ أيضاً، لاتكون السعة الحرارية صفراً.

في معظم الحالات، يزداد انتشار مكونات النظام (جزيئات النظام) بازدياد درجة الحرارة، ومن ثم، وكما قد لوحظ، فالسعة الحرارية تزداد بزيادة درجة الحرارة. ولكن

العلاقة هذه أكثر تعقيداً من الصورة التي تبدو لنا بها، وذلك لأنه قد تبين أن الدور الذي يلعبه انتشار الجزيئات يتضاءل بارتفاع درجة الحرارة، إذْ إن السعة الحرارية، ومع أن ازدياد الانتشار يستمر، لم تزدد بنفس الوتيرة أو السرعة. بل إنه في بعض الحالات تتم موازنة الزيادة في الانتشار بدقة تامة بانخفاض قيمة ثابت التناسب الذي يربط الانتشار بالسعة الحرارية، فتستقر السعة الحرارية عند قيمة ثابتة. وهذه هي الحالة التي تحدث فيها مساهمات من كل الأنماط الأساسية للحركة: حركة الانتقال من موقع إلى آخر، وحركة الدوران، وحركة اهتزاز الجزيئات، والتي تستقر جميعها عند قيم ثابتة.

وحتى نفهم القيمة الفعلية للسعة الحرارية لمادة ما، والزيادة في الطاقة الداخلية، كنتيجة لارتفاع درجة الحرارة، فإننا بحاجة لأن نفهم، بدايةً، كيفية اعتماد مستويات الطاقة للمادة على تركيب هذه المادة. فبشكل عام، تتخذ مستويات الطاقة مواقع (قيم طاقية) متقاربة حينما تكون الذرات ثقيلة. وزيادة على ذلك، تكون مستويات طاقة الانتقال متقاربة جداً إلى الحد الذي تشكل عنده متصلاً شديد التلاصق، أما مستويات طاقة الدوران لجزيئات الغازات فهي متباعدة، ولكن مستويات طاقة الاهتزاز - تلك المرتبطة باهتزازات ذرات الجزيء الواحد - فتكون متباعدة أكثر وأكثر. ولذلك فإنه إذا ما سُخّنت عينة غازية فإن الجزيئات ستتهيج مباشرة نحو حالات انتقالية أعلى (ببساطة تتحرك بشكل أسرع)، وفي كل الحالات العملية فإنها جميعاً تنتشر بسرعة على كثير من الحالات الدورانية (ببساطة تدور بشكل أسرع). وفي كل حالة من الحالات فإن طاقة الجزيئات، ومن ثم الطاقة الداخلية للنظام، تزداد برفع درجة الحرارة.

أما جزيئات المادة الصلبة (الجامدة) فهي لا تنتقل من موقع إلى آخر (أي لا تتزحزح عن مواقعها قيد أنملة) ولكنها تهتز في هذه المواقع، وتكتسب الطاقة عبر هذه الوسيلة. هذه الاهتزازات المتراكمة لكل جزيئات المادة الصلبة تكون ترددتها (عدد مرات حدوثها في زمن معين) أقل بكثير من ترددات الاهتزازات التي تقوم بها الذرات

داخل الجزيء، وبذلك يكون تهييجها وإثارتها أيسر بكثير. فما أن تمد المادة الصلبة بالطاقة حتى تتهيج الذرات، وتزداد شدة اهتزازاتها، ويزداد عدد الذرات الذي يتخذ مستويات مرتفعة من الطاقة، وذلك من خلال وصول توزيع بولتزمان إلى مستويات أرفع، ونسجل عندئذ النتيجة بالقول: إن درجة حرارة المادة الصلبة قد ارتفعت. وبالمثل فإنه تنطبق على السوائل ملاحظات مماثلة. وتجدر الإشارة إلى أن حركة جزيئات المادة السائلة غيرمقيّدة بالقدر الذي تعاني منه جزيئات المادة الصلبة. للماء سعة حرارية عالية، مما يعني أن رفع درجة حرارته يتطلب قدراً كبيراً من الطاقة. وعلى الضد من ذلك فالماء الساخن يختزن قدراً كبيراً من الطاقة الأمر الذي يميط اللثام عن سبب استخدامه في أنظمة التدفئة المركزية (فضلاً عن كونه رخيصاً)، وعن سبب بطء ارتفاع أو انخفاض درجة حرارة المحيطات، بما يتضمنه ذلك من تأثيرات على مناخنا.

وكما بيّنا فالطاقة الداخلية باختصار هي مجمل الطاقة الموجودة في النظام، وهي باختصار أيضاً مجموع طاقات كل الجزيئات وطاقات ما يحدث فيما بينها من تعاملات. أما إعطاء تفسير جزيئي للإنثالبي فإنه لأمر أصعب، وذلك لأن الإنثالبي خاصية مستنبطة للقيام بتتبع حِسَابِيّ لشغل التمدد، وليس خاصية أصيلة كالطاقة الداخلية. ولهذا الغرض فمن الأفضل التفكير في الإنثالبي كمقياس للطاقة الكلية، ولكن دون أن ننسى أن هذا ليس صحيحاً بالكامل. باختصار فإنه ما أن ترتفع درجة حرارة النظام فإن جزيئاته ستشغل مستويات من الطاقة أرفع وأرفع، ونتيجة لذلك تزداد قيم كل من متوسط طاقاتها، والطاقة الداخلية، والإنثالبي. أما إعطاء تفسيرات جزيئية أصيلة ودقيقة فلا يتأتى إلا للخواص الأصيلة للنظام، كدرجة الحرارة أو الطاقة الداخلية أو –كما سنرى في الفصل القادم - الإنتروبي. كما لا يمكن إعطاء مثل هذه التفسيرات للخواص "الحسابية"، أي تلك الخواص التي استنبطت لجعل الحسابات أسهل.

لقد تم بناء القانون الأول بصورة أساسية على مبدأ حفظ الطاقة، أي على حقيقة أن الطاقة لا يمكن استحداثها (خلقها)، ولا إفناءها. لقوانين الحفظ —وهي القوانين التي تنص على عدم حدوث تغيرٍ لخاصية معينة - أصل عميق، والذي هو أحد أسباب انبهار العلماء، وخاصة الثيرموديناميكيين منهم، حينما لا يحدث شيئاً. توجد نظرية معتبرة هي *نظرية نويثر Noether's theorem*، وهي نظرية كان قد اقترحها الرياضي الألماني إيمي نويثر Emmy Noether، المولود سنة ١٨٨٢م والمتوفى سنة ١٩٥٣م، والتي تنص على أنه يوجد لكل قانون حفظ تماثل مقابل له. وهكذا فإن قوانين الحفظ معتمدة على مظاهر متعددة لشكل الكون الذي نقطنه. وفي الحالة الخاصة بحفظ الطاقة فالتماثل هو ذلك التماثل الخاص بشكل الزمن. فالطاقة محفوظة لأن الزمن متماثل: أي أن الزمن ينساب بثبات، فهو لا يتجمع في حزم أوعناقيد لينقضي بصورة أسرع ومن ثم يتفتت وينتشر لينقضي بصورة أبطأ. إن الزمن هو بعد متماثل التركيب. فلو كان للزمن أن يتجمع ثم يتبدد فإن الطاقة لن تكون محفوظة. ومن ثم فإن القانون الأول للثيرموديناميك مبني على مظهر عميق لكوننا، والثيرموديناميكيون الأوائل كانوا يَجُسُّون شكله دون وعي منهم.

obeikandl.com