العلم الشيطاني

www.nasainarabic.net
@NasaInArabic NasaInArabic NasaInArabic NasaInArabic NasaInArabic

أنا ممتنٌ كثيراً لأحد الحقائق الأساسية في الطبيعة عند تشغيلي لنظام التدفئة في هذا اليوم البارد والمزعج من أيام فبراير/شباط في شمال لندن. تلك الحقيقة هي: تتدفق الحرارة من الساخن إلى البارد، ولو لم تكن تفعل ذلك، لن يكون لدى المُشع (**radiator**) الخاص بي أي فرصة لتسخين غرفتي المتجمدة. ولو أنّ الحرارة تجري من البارد إلى الساخن، سيمتص حينها المُشع الكمية القليلة من الحرارة الموجودة في الغرفة، وكلُ ما يُمكنني قوله حينها: "اححح..."

تَجَّذر تلك الحقيقة في أحد قوانين الطبيعة أمرٌ غاية في الأهمية، وكان العالم الألماني رودولف كلاوزيوس واحداً من اوائل الناس الذين قالوا ذلك بوضوح عام 1850 ، فقد كتب: "لا يُمكن للحرارة أن تعبر من الجسم الأبرد نحو الأسخن دون حصول تغيرات أخرى مرتبطة بذلك في الوقت نفسه".

إذا أردت أن تتدفق الحرارة في الاتجاه المعاكس لرغبتها ـكما هي الحال مع البرّادـ عليك إضافة كمية من الطاقة ـتُمثل الطاقة "التغيرات الأخرى" التي قصدها كلاوزيوسـ وإلا لن يحصل ذلك أبداً.

يُعرف قانون كلاوزيوس اليوم بالقانون الثاني في الترموديناميك (**second law of thermodynamics**) ـأما القانون الأول فينص على أن الطاقة لا تفنى ولا تخلق من عدم. وبفضل كلاوزيوس، تمكّن لورد كلفن وجيمس كلارك ماكسويل، إضافة إلى آخرين، من تعرفينا على حقيقة الحرارة.

جيمس كلارك ماكسويل.

الحرارة شكل من أشكال الطاقة التي تملكها الجزيئات والذرات التي تُؤلف المادة، وهي ناتجة عن اهتزاز تلك الجسيمات والجزيئات في السائل أو الغاز، وعن حركتها العشوائية، وتصادماتها مع بعضها البعض.

كلما كانت حركتها أكثر نشاطاً، كلما كانت طاقتها الوسطية الحركية أعلى، وكلما كانت المادة أكثر سخونة. على سبيل المثال: في داخل مكعب جليدي، تستقر الجزيئات داخل شبكة صلبة، لكنّها حالما تسخن، تبدأ بالاهتزاز وفي النهاية تُحطم سلاسلها، مما يتسبب في أن يصير الماء أكثر دفئاً وسائلاً أيضاً.

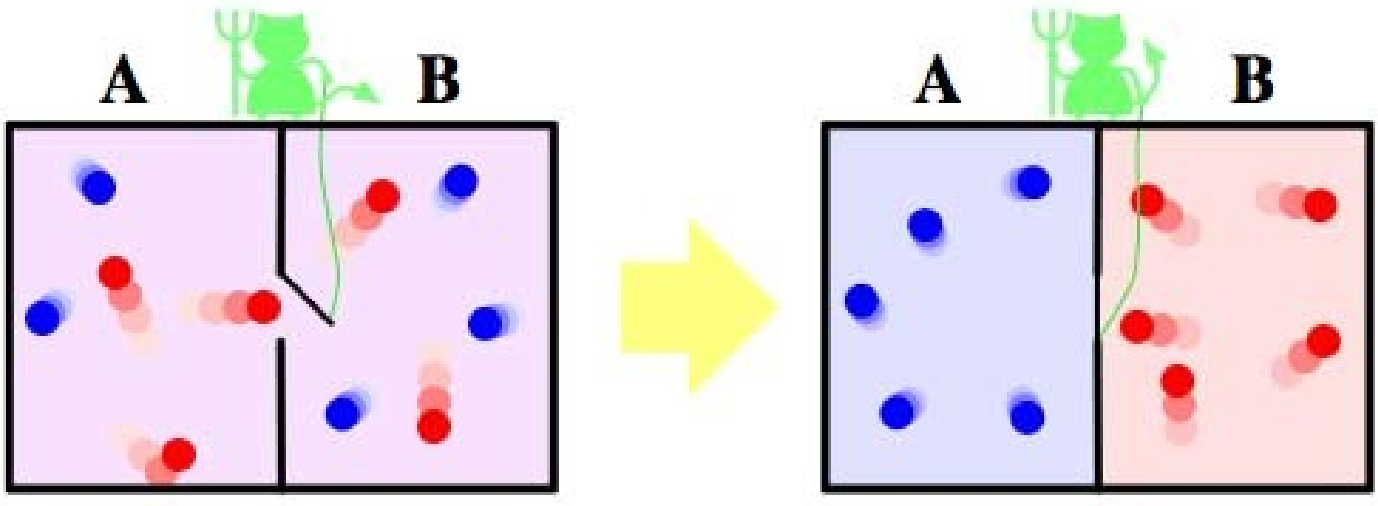
كان ذلك الفهم الجديد لطبيعة الحرارة عميقاً وصحيحاً في الظاهر، لكن هناك مشكلة!

في العام 1867، كتب ماكسويل إلى صديقه عن تجربةٍ فكريةٍ اقترحت إمكانية انتهاك القانون الثاني في الترموديناميك، فمن الممكن جعل الحرارة تتدفق من البارد إلى الساخن دون بذل أي جهد. وستُغذى هذه العملية بالمعلومات فقط، ويُمكنك تسخين غرفة كاملة بهذه الطريقة، أي ستستطيع وبشكلٍ فعال تحويل المعلومات إلى طاقة.

- **الحرارة الشيطانية**

تُعرف تلك التجربة الذهنية الآن باسم شيطان ماكسويل (**Maxwell's demon**)، وقد حيّرت العلماء على مدار أكثر من مئة عام. لعب سيث لليود (**Seth Lloyd**) من معهد ماساشوستس للتكنولوجيا في بوسطن، وهو خبيرٌ في شيطان ماكسويل، دوراً رئيسياً في معالجة الأمر.

يقول لليود: "تخيّل ماكسويل غازاً موجوداً في وعاء. في البداية، كان الغاز في حالة توازن ولذلك وُجد كل شيء عند نفس درجة الحرارة. هناك حاجز موجود في مركز الوعاء وله بابٌ صغير جداً، ويحرس ذلك الباب شيطانٌ صغيرٌ جداً، ورشيقٌ وقادرٌ على اكتشاف حركة الجزيئات المنفردة في الغاز أثناء توجهها إلى الباب.



شيطان ماكسويل. حقوق الصورة: Htkym.

يُصنف الشيطان الجزيئات على أنّها ساخنة وباردة. وإذا شاهد جزيئات متحركة بسرعة وقادمة من اليسار، أو جزيئات بطيئة قادمة من اليمين، سيفتح الباب ويسمح للجزيئات السريعة بالذهاب من اليسار إلى اليمين وللبطيئة من اليمين إلى اليسار. في حين أنه إذا شاهد

العكس، سيُحافظ على الباب مغلقاً".

ونتيجةً لتلك العملية، سيزيد الشيطان تدريجياً من السرعة الوسطية للجزيئات في الجانب الأيمن من الوعاء، ويُنقصها في الأيسر. وسيسخن الجانب الأيمن من الصندوق، في حين سيبرد الجانب الأيسر، وستتدفق الحرارة من الجزء البارد إلى الجزء الساخن.

يُمكنك صياغة الأمر كالتالي: لا حاجة لاستثمار أي طاقة لجعل التدفق العكوس يحصل. على سبيل المثال، إذا كان الباب موجود فوق نابض، سيحتاج الشيطان إلى كمية قليلة من الطاقة لدفعه، لكن تُستعاد تلك الطاقة عندما يُغلق الباب من جديد.

يعني ما سبق أن الحرارة تدفقت من البارد إلى الساخن دون بذل أي جهد لجعل ذلك يحصل، وبذلك انتُهك القانون الثاني في الترموديناميك. الشياطين اللازمة لانتهاك ذلك القانون هي المعرفة، والمعلومات حول حركة الجزيئات.

- **الحد الأدنى**

لشيطان ماكسويل، الواضح لعددٍ قليل جداً من الناس، جذورٌ تمتد إلى اعتبارات لا يُمكن أن تكون عملية. شهدت بداية القرن التاسع عشر ظهور المحرك البخاري (**steam engine**)، لكن مع حقيقة مزعجة تمثّلت في كون تلك المحركات غير فعالة.

ألهم ذلك الأمر المهندس الفرنسي الشاب سادي كارنو (**Sadi Carnot**) لمعرفة الحدود النظرية لمردود المحركات الحرارية، التي تعمل على تحويل الحرارة التي تجري من منبعٍ ساخن إلى بارد إلى عمل. في العام 1824، نشر كارنو كتاباً حمل العنوان الجميل "**Reflections on the motive power of fire**"، وفيه برهن على أنّ المردود الاعظمي (**maximal efficiency**) الذي نرغب بإنجازه لأي محرك حراري يعتمد فقط على النسبة بين درجات الحرارة للمنبع الساخن (\(T_{hot}\)) والمنبع البارد (\(T_{cold}\))، وكانت المعادلة كالتالي:

$$Eff = 1 - T_{cold}/T_{hot}$$

يعني ذلك أنه بالإمكان الوصول إلى مردود مساوٍ لـ 100% عندما تكون درجة حرارة المصرف (المنبع البارد) مساوية للصفر. ولأنّ كارنو قاس درجات الحرارة تلك بالكلفن، يعني ذلك أنه يُمكن الوصول إلى مردود مساوٍ لـ 100% عندما تكون درجة حرارة المصرف الحراري مساوية للصفر المطلق، أي ـ273.15 درجة سلسيوس، وهي درجة حرارة من المستحيل الوصول إليها.

لذلك، تمتلك كل المحركات الحرارية مردوداً أقل من 100% بصرف النظر عن مثاليّتها؛ ودوماً، سيضيع جزءٌ من الحرارة التي تنتقل إلى المحرك. بعد حوالي 40 عام على عمل كارنو، ركّز كلاوزيوس جهوده على حل هذا العجز المتأصل والموجود في أي محرك. اكتشف كلاوزيوس تعبيراً رياضياً لحساب كمية الطاقة غير المتاحة للقيام بعمل في نظام فيزيائي.

وكتب أنه من الممكن دعوة تلك الكمية بالمحتوى المتغير (**transformational content**) للنظام. لكنّه فضّل تسميته بالكلمة الإغريقية الإنتروبي (**entropy**) مُلهماً بكلمة "**tropi**" التي تعني التحول، واختيرت لتكون قريبةً أكثر ما يُمكن من كلمة الطاقة (**energy**).

عندما طبق كلاوزيوس تعريفه ذلك على تدفق الحرارة من جسمٍ ساخن إلى بارد، برهن أن انتروبي الجسم الساخن يتناقص، في حين يتزايد انتروبي الجسم البارد. على أية حال، فإن الزيادة الحاصلة في الجسم البارد أكبر من التناقص الحاصل في الجسم الساخن، ولذلك عندما نجمع الجسمين معاً، يتزايد الإنتروبي الكلي (**overall entropy**).

بشكل أكثر عمومية، إذا قبلت أن الحرارة تتدفق بشكلٍ طبيعي من الأجسام الساخنة إلى الباردة، وليس في الاتجاه المعاكس، يُمكنك فقط إثبات أن الانتروبي الخاص بجملة فيزيائية مغلقة (وهي جملة لا تتفاعل مع المحيط) يتزايد أو يبقى ثابتاً فقط، باختصار: لا يُمكن أن يتناقص.

على النقيض من ذلك، إذا كنت سعيداً بالاعتقاد أن انتروبي نظام مغلق لا يُمكنه التناقص أبداً، يمكنك بعد ذلك الحصول على الحرارة أثناء تدفقها من الأجسام الساخنة إلى الباردة فقط. وأسلوبي التعبير السابقين متكافئين، ولذلك السبب غالباً ما يُشار إلى القانون الثاني في الترموديناميك باستخدام تعبير الانتروبي عوضاً عن تدفق الحرارة، ويكون نصه:

"لا يُمكن لانتروبي نظام فيزيائي مغلق أن يتناقص أبداً".

- **التعريف الكلاسيكي للإنتروبي**

بالنسبة لعملية عكوسة وتتضمن انتقالاً للحرارة من حجم Q موجود عند درجة حرارة T، يُكون التغير في الإنتروبي معطاً بالعلاقة التالية:

$$\Delta S = Q/T$$

العملية العكوسة هي العملية التي لا تُبدد فيها الطاقة ـ على سبيل المثال على شكل احتكاك.

- **الإنتروبي هو الفوضى**

حصل كارنو على نتيجته المتعلقة بالمحركات الحرارية على الرغم من أن فكرته حول طبيعة الحرارة كانت خاطئة بالكامل. اعتقد كارنو أن الحرارة عبارة عن مائع بدلاً من كونها طاقةً حركية (**kinetic energy**) للجزيئات والذرات. لسوء الحظ، لم يمتلك كارنو أي وقت لإصلاح تلك الفكرة الخاطئة، فقد توفي بعد ست سنوات من نشره لعمله جرّاء إصابته بمرض الكوليرا عندما كان عمره 36 عام فقط.

على أية حال، فإن التفسير الجزيئي للإنتروبي هو ما دفع بشيطان ماكسويل إلى حيز الوجود. أدرك ماكسويل ولودفيغ بولتزمان وآخرون أنه يُمكن النظر إلى الإنتروبي على أنه قياسٌ لفوضى النظام.

لفهم تلك الفكرة، تخيل غرفة تحتوي شمعة محترقة داخلها. يُمكن تحويل حرارة الشمعة إلى عمل. على سبيل المثال، تستطيع استخدام الهواء الحار الناتج عنها في تغذية أحد ألعاب عيد الميلاد الألمانية التي تمتلك مروحةً في قمتها.

الآن، تخيل الغرفة نفسها بعد نفاذ الشمعة وتجانس درجة الحرارة داخلها. لا يُمكنك الحصول على أي عمل في هذه الحالة، ولذلك إذا فكرت بالانتروبي على أنه قياسٌ للعجز عن الإتيان بعمل، سيكون من الواضح لك أن الغرفة تتمتع بإنتروبي أعلى عندما احترقت الشمعة بالكامل مقارنةً مع الحالة التي كانت تستمر فيها بالاشتعال.

لعبة هرم عيد الميلاد الألمانية.

لكن عند الأحجام الجزيئية، فإن الحالة الثانية، مع احتراق الشمعة، تكون أقل ترتيباً بكثير. تعني حقيقة امتلاك الهواء لدرجة حرارة متجانسة في كافة أرجاء الغرفة أن الجزيئات المتحركة بسرعة وببطء تمتزج مع بعضها؛ فإذا تم فصلها بنفس الطريقة، سيُوجد لديك تدرجٌ حراري في الغرفة.

في الحقيقة، يجد التوازن الحراري للغرفة نفسه في حالة الفوضى الأعظمية. وعندما كانت الشمعة لا تزال مشتعلة، بقيت الجزيئات الأسرع موجودة بجوار اللهيب، مما أدى إلى وجود حالة أكثر ترتيباً بكثير.

لكن كيف يمكنك وبشكلٍ صارم تحديد مقدار الترتيب أو الفوضى في نظامٍ ما؟

أحد التشبيهات الجيدة لهذه الحالة هي رزمة من أوراق اللعب. عندما تشتريها من محلٍ تجاري، تكون تلك الرزمة مرتبة وفقاً للقيم العديدة والنوع. وهناك طريقة واحدة للقيام بذلك، وهذا هو الترتيب المثالي. إذا ما رتبت الأوراق وفقاً للنوع فقط، سيكون هناك المزيد من الغموض حول الأوراق من النوع نفسه، فهي ليست مرتبة بطريقةً ما، وبالتالي هي حالة أقل ترتيباً.
إذا ما أردت الوصول إلى الفوضى، تقوم بخلط الأوراق معاً، وقد يؤدي ذلك إلى وجود أوراقك ضمن عدد ضخم من الترتيبات المحتملة، ويُنظر إلى كلٍ منها على أنه فوضوي. إذاً، يُمكنك تحديد مقدار الفوضى لنظامٍ ما عبر إحصاء عدد التشكيلات التي يُمكن لمكونات النظام الوجود فيها دون تغيير الطبيعة الكلية للنظام.

يقول لليود: "وضع ماكسويل وبولتزمان صيغةً للإنتروبي بدلالة احتمالية أن تأخذ جزيئات الغاز مواقعاً محددة وتمتلك سرعات معينة أيضاً". تُخبرك تلك الاحتمالية عدد التشكيلات المختلفة التي يُمكن أن تكونها الجزيئات مع بقاء الغاز في الحالة نفسها، ولذلك فهي تُحدد مقدار الفوضى.

ووفقاً لذلك التعريف، للغاز الساخن انتروبي أكبر من انتروبي الغاز البارد، وبالتالي ستتوزع الطاقة الحركية للجزيئات المفردة على مجالٍ أوسع. وكما أشرنا سابقاً، فإن الغاز المتوازن حرارياً يكون موجوداً في حالة يكون فيها الإنتروبي أعظمي.

صيغة بولتزمان المحفورة على شاهدة قبره. حقوق الصورة: Daderot

لتفهم السبب الكامن وراء كون الانتشار أوسع إذا كانت الطاقة الوسطية أعلى، تخيل سيارتين في سباق. إذا كانت السرعة الوسطية

للسيارتين 200 كيلومتر في الساعة، بالتالي ستكون سرعة السيارة الواحدة قيمة تقع بين 0 و400 كيلومتر في الساعة. إذا كانت السرعة الوسطية 100 كيلومتر في الساعة، بالتالي ستقع السرعات المنفردة في مكانٍ ما بين 0 و200 كيلومتر في الساعة.

- **التعريف الميكروسكوبي للإنتروبي**

افترض أن غازاً ما يُوجد في حالة عيانية، ولهذا الغاز ضغط أو درجة حرارة محددة. ليكن W هو عدد التشكيلات التي يُمكن للجزيئات المنفردة تكوينها لتكون في تلك الحالة العيانية المحددة. حينها سيُعطى الإنتروبي بالعلاقة:

$$S = k\ln W$$

حيث أن K هو ثابت بولتزمان وله القيمة

$$k = 1.38062 \times 10^{-23} J/K$$

كُتبت هذه الصيغة على شاهدة قبر بولتزمان في فيينا. تعمل هذه الصيغة عندما تمتلك كل تشكيلات الجزيئات الاحتمال نفسه. وهناك تعميم لهذه الصيغة، ويُطبق هذا التعميم عندما لا تكون تلك التشكيلات متساوية الاحتمال، وتُعطى الصيغة العامة بالمعادلة التالية:

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i$$

حيث pi هو احتمالية حصول التشكيل i.

- **الإنتروبي هو المعلومات**

تبيّن أن تعريف الإنتروبي بدلالة الفوضى مكافئ للتعريف الأصلي الذي وضعه كلاوزيوس بدلالة درجة الحرارة والطاقة. ويُقدم تعريف الفوضى رابطاً مباشراً مع المعلومات. إذا كان النظام موجوداً في حالة عالية الفوضى، ستحتاج بالتالي إلى الكثير من المعلومات لوصفه: هناك العديد من التشكيلات التي يُمكن ترتيب النظام وفقاً لها.

إذا وُجد المزيد من الترتيب في النظام ـ على سبيل المثال عندما تكون كل الجزيئات مكونة من غاز يتحرك في نفس الاتجاه وبنفس السرعة ـ ستحتاج حينها إلى كمية أقل من المعلومات لوصف النظام. كلما وُجد المزيد من الفوضى، كلما كان الإنتروبي أكبر واحتجنا إلى مزيدٍ من المعلومات لوصف النظام.

يُفسر لليود الأمر قائلاً: "عندما جاء القرن العشرين، أصبح واضحاً ان الإنتروبي يتناسب مع كمية المعلومات اللازمة لوصف تلك الجزيئات ومواقعها وسرعاتها". ويتابع: "يتناسب الإنتروبي مع عدد البتّات اللازمة لوصف حركة الذرات والجزئيات. أو بطريقة أخرى، مع كمية المعلومات التي تحتويها".

لكن ما الذي تعنيه هذه التفسيرات المتنوعة للإنتروبي بالنسبة لشيطان ماكسويل؟

ينتهك الشيطان الصيغة الأولى للقانون الثاني في الترموديناميك لأنه يجعل الحرارة تتحرك من البارد إلى الساخن دون تقديم الطاقة. وبالإمكان تحويل الحرارة المتراكمة في الجانب الأيسر من الصندوق إلى عمل، ولذلك إذا فسّرت الإنتروبي على أنه قياس لعجز نظام ما عن تقديم عمل، سينتهك الشيطان الصيغة الثانية للقانون الثاني أيضاً عبر إنقاصه من ذلك العجز.

ولأنّ الشيطان يفترض بنية من نوعٍ ما على الغاز الذي كان متوازناً سابقاً، فإنّه ينتهك أيضاً القانون الثاني إذا فسّرت الإنتروبي على أنه قياس للفوضى. ومن ثمَّ، يكون الشيطان مذنب في الحالات الثلاث لأنّ الصيغ الثلاث متكافئة كما شاهدت ذلك.

- التاريخ: 2015-05-27
- التصنيف: أسئلة كُبرى

#الحرارة #الترموديناميك #شيطان ماكسويل #ماكسويل #بولتزمان

المصطلحات

- **الإنتروبي (entropy)**: هو كمية الطاقة غير المتاحة للقيام بعمل في نظام فيزيائي، وقد أطلق عليه كلاوزيوس مصطلح الإنتروبي ملهماً بكلمة tropi التي تعني التحول، واختيرت لتكون أقرب ما يُمكن من كلمة الطاقة (energy)، ويقول أشهر قوانين الطبيعة المعروف بالقانون الثاني في الترموديناميك "لا يُمكن لانتروبي نظام فيزيائي مغلق أن يتناقص أبداً".
- **الأيونات أو الشوارد (Ions)**: الأيون أو الشاردة هو عبارة عن ذرة تم تجريدها من الكترون أو أكثر، مما يُعطيها شحنة موجبة.وتسمى أيوناً موجباً، وقد تكون ذرة اكتسبت الكتروناً أو أكثر فتصبح ذات شحنة سالبة وتسمى أيوناً سالباً

المصادر

- كامبريدج
- الصورة

المساهمون

- ترجمة
  - همام بيطار
- تصميم
  - عمار الكنعان
- نشر
  - همام بيطار