حدود المعلومات

هل تتذكر دليل الهاتف؟ ذلك الكتابَ الضخم الثقيل ذا اللون الأصفر الذي كان يُعتبر من الأشياء التي لا يُمكن لأي منزلٍ الاستغناء عنها. اليوم، لم يعد لنا حاجة لهذا الدليل؛ فقد صار بإمكاننا تخزين كمية من المعلومات تفوق تلك التي تحتويها عدة نسخٍ من دليل الهاتف داخل أجهزة صغيرة نضعها في جيوبنا. لكنْ، حتى هذه الأجهزة المُتقدمة لن تصمد طويلاً؛ إذ ستحلّ محلّها أجهزة أحدث قريباً، وربما يُصبح بمقدرونا التحكّم بالمعلومات بشكل كامل يوماً ما في المستقبل القريب. في ذلك الوقت سيكون بإمكاننا ترميز كمياتٍ لا نهائية من المعلومات ووضعها على رُقاقاتٍ صغيرة الحجم نزرعُها في أدمغتنا.

صورة لمجرةٍ مُلتفّة التقطها تلسكوب سبتزر الفضائي Spitzer Space Telescope التابع لوكالة ناسا يظهر في وسطها شيءٌ يُشبه العين. هذه العين هي ثُقب أسود عملاق تُحيط به حلقة من النجوم. المصدر: وكالة ناسا/مختبر الدفع النفاث- معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا

بالرغم من أننا نتحدّث عن فكرة زرع أدمغتنا برقاقاتٍ تحتوي على كمياتٍ من المعلومات، إلّا أننا لم نفعل ذلك حتى الآن، ليس لأننا لا نمتلك المعرفة التكنولوجية اللازمة، بل لأن قوانين الطبيعة لا تسمح بتنفيذ هذا الأمر. هناك حدٌ معينٌ لكمية المعلومات التي يُمكنك حشوها في مساحةٍ مُعينة تحتوي على كمية محدودة من المادة. وفي هذا الصدد يُوضّح جيكوب بيكينستاين **Jacob Bekenstein** عالم الفيزياء الذي طرح فكرة حدودِ المعلومات لأول مرة في بدايات ثمانينيات القرن العشرين: "ما نتحدث عنه هنا هو تلك المعلومات التي يمكنك تخزينها ونسخها، لكن لكي تتمكن من فعل هذا، فستحتاجُ إلى وضعِ المعلومات داخل وسطٍ مادي إمّا من خلال تخزينها ورقياً أو إلكترونياً".

إنّ بيكينستاين ليس عالماً أو مهندساً في مجال الحاسوب، بل هو عالم فيزياء نظرية، وعندما طرح فكرته المُسمّاة "حدّ بيكينستاين" (**Bekenstein Bound**)، التي أصبحت تُعرف في هذه الأيام بـ "حُدود المعلومات"، فقد كان يُفكّر في أحد الألغاز المرتبطة بالثقوب السوداء. تنشأ الثقوب السوداء عندما تنضغطُ كمية هائلة من الكتلة ضمن منطقة صغيرة من الفضاء. ووفقاً لنظرية الجاذبية لأينشتاين، فإن مقدار قوة الجاذبية لتلك الكتلة يُصبح قوياً لدرجة أنْ لا شيء، حتى الضوء، يمكنه الإفلات من المنطقة المُحيطة بالثقب الأسود، وتلك الميزة هي التي دفعت العلماء لتسمية الثقوب السوداء بهذا الاسم.

مُتّسعٌ لبعض العشوائية

يتعلق اللغز المطروح بالسؤال التالي: ما الذي يحدث عندما يسقط جسمٌ ما داخل ثقبٍ أسود؟ للإجابة على هذا السؤال نقول أن أغلب النُظم الفيزيائية فيها مُتّسعٌ للتغيير والتنويع. على سبيل المثال، فإنّ جميع الذرات والجُزيئات التي تُشكّل جسدي مُرتّبة بشكلٍ معين في هذه اللحظة من الزمن، لكنّ هذا الترتيب أو هذا التوزيع ليس سوى واحدٍ من عدة احتمالات، أي أن ذرات وجزيئات جسدي يمكن أن تتّخذ أكثر من طريقة ترتيب واحدة. فيُمكنك مثلاً تبديل مواضع جزيئات الشاي الموجودة الآن في معدتي، أو عكس الاتجاه الذي تتحرك فيه من دون إحداث أي تغييرٍ في حالتي الماكروية (الجاهرية) (**macrostate**). يُشير مصطلح الحالة الماكروية (الجاهرية) إلى المُتغيّرات الفيزيائية التي يمكنني أن أُلاحظها في جسدي.

ويُقاس ذلك المُتّسع للتغيير – أي ذلك القدر المسموح به من العشوائية التي تُشكّل حالتي الماكروية – بناءً على رقمٍ يُطلق عليه الفيزيائيون اسم "الإنتروبي" (**entropy**). وكلما زاد عدد الطرق التي يمكن فيها ترتيب المُكوّنات الأصغر (أي الحالات الميكروبية (**microstates**)) التي تتطابق مع حالتي الماكروية، ازداد مستوى الإنتروبي الخاص بي. يمكن تفسير مفهوم الإنتروبي بالاعتماد على المعلومات أيضا، فمثلا إذا كان عددٌ كبير من الحالات الميكروبية مُمكناً، فالسبب هو أن هناك العديد من المُكوّنات المُختلفة (على سبيل المثال: الذرات) التي يُمكن ترتيبها بعدة طرق مختلفة. لكنّ وصف حالة ميكروبية واحدة بشكل دقيق يستلزم تحديد الموقع الدقيق لكل واحدٍ من المُكوّنات وسرعته واتجاه حركته، وهذا الأمر يتطلب توافر كمية كبيرة من المعلومات. وكلما ارتفع مستوى الإنتروبي، كانت هناك حاجة للمزيد من المعلومات. لهذا السبب يمكن وصف الإنتروبي بأنه عملية قياس الحد الأدنى من عدد أجزاء المعلومات التي سوف تحتاجها من أجل وصف حالتي الميكروبية بدقّة بناءً على حالتي الماكروية.

نعتمد في وصفنا للسلوك الذي يقوم به الإنتروبي الخاص بنظام مُعيّن على مرّ الوقت على قانون فيزيائي يُعرف باسم " القانون الثاني للديناميكيا الحرارية" (**second law of thermodynamics**)، وينص هذا القانون على أن مُستوى الإنتروبي الخاص بنظام فيزيائي مُنفصل يمكن أن يرتفع أو يبقى كما هو، لكنّه لا يمكن أن ينخفض أبداً. ولتسليط مزيد من الضوء على هذه الجُزئية، دعونا نأخذ كوب الشاي خاصتي كمثال قبل شُربه. في البداية، وفي اللحظة التي أصبّ فيها الحليب داخل الكوب، تكون جزيئات الشاي والحليب مُنفصلة عن بعضها بشكل مثالي. ولكن بعد بُرهة من الزمن، يبدأ الحليب بالانتشار في الكوب ويختلط بالشاي بشكل تام ويكون السائل الناتج قد وصل إلى مستوى متوازن من الحرارة. الحالة التالية لعملية اختلاط الحليب بالشاي تمتلك مستوى إنتروبي أعلى من الحالة التي سبقت عملية اختلاط الحليب بالشاي. يُعزى هذا إلى حقيقة أن عدد الحالات الميكروبية الموجودة بعد عملية الخلط ووصول الكوب إلى حالة التوازن الحراري يفوق عدد الحالات الميكروبية التي يمكن أن تُوجد لو أننا سمحنا لجزيئات الحليب والشاي بالتواجد فقط في مناطق محددة داخل الكوب. لذا، فقد ازداد الإنتروبي الخاص بكوبي مع مرور الوقت. (يمكنك الاطلاع على المزيد حول مفهوم الإنتروبي عبر هذا الرابط)

خسارة الإنتروبي

لكن، ماذا عن تلك الثقوب السوداء؟ في البدايات، اعتبر العلماء أن الثقوب السوداء ما هي إلّا أجسامٌ بسيطة جداً ولا يوجد فيها متّسع للاختلاف والتنوّع إطلاقاً. وقد اعتقد الفيزيائيون أن الإنتروبي الخاص بالثقوب السوداء يساوي صفراً. لكنني إن سقطتُ داخل ثقبٍ أسود فإنني لن أستطيع الخروج منه مرة أخرى، وسيُفقد الإنتروبي الخاص بي. خسارتي لهذا الإنتروبي ستعني أن الإنتروبي الإجمالي الخاص بالكون سوف ينخفض. "إن وجود ثقبٍ أسود هو بمثابة وجود سلة مُهملات، حيث يمكن إخفاء الإنتروبيات" كما يقول بيكينستاين، الذي يُضيف: "إذاً، السؤال هنا هو: ما هو رأي القانون الثاني في تلك الحالة؟"

صورة التقطها مرصد تشاندرا للأشعة السينية Chandra X-ray Observatory التابع لوكالة ناسا حيث تظهر فيها بقايا انفجار في مجرة قنطوروس أ Centaurus A. يحتوي مركز هذه المجرة على ثقب أسود عملاق. المصدر: وكالة ناسا

بناءً على هذا الكلام، يبدو أن القانون الثاني سوف يُنتَهك، وسوف يحصل هذا الأمر فعلاً في حال لم يمتلك الثقب الأسود أي إنتروبي على

الإطلاق. لكن، ومن جهة أخرى، فإنّ العالم ستيفن هوكينغ **Stephen Hawking** اكتشف في عام 1970 أن الثقوب السوداء تمتلك خاصيّة تُشبه في سلوكها خاصية الإنتروبي إلى حد كبير. كذلك يمتلك كُلّ ثقبٍ أسود ما يُعرف بـ "أُفق الحدث" (**event horizon**)، وهو المنطقة التي تُعرف بمنطقة اللاعودة التي إذا ما عبرتها فإنك لن تتمكّن من العودة أبداً. يُشبه أُفق الحدث قشرة البيضة من حيث امتلاكه لمساحةٍ معينة. ومن خلال الاعتماد على بعض الحسابات النظرية، أظهر هوكينغ أنه مهما حدث للثقب الأسود فإن تلك المساحة لا تقلّ أبداً، مثلها مثل الإنتروبي الخاص بنظام فيزيائي عادي.

لكنّ بيكنستاين، وفي خطوة جريئة منه، اقترح أن منطقة أُفق الحدث تقيس فعلاً شكلاً من أشكال الإنتروبي. ويوضح بيكينستاين قائلاً: "الثقب الأسود جسمٌ بسيطٌ جداً، لكنه يُخفي تاريخاً مُعقداً". وفي النظام العادي مثل كوب الشاي خاصتي، يُمكن وصف الإنتروبي على أنه مقياس لمستوى عدم يقيننا بما يحصل على المستوى الجزيئي. فإذا كان الإنتروبي خاصته عالياً، فذلك عائد إلى وجود العديد من الحالات الميكروبية المُحتملة المتوافقة مع حالة ماكروبية معينة. يمكنني كشخصٍ أن أعاين الحالة الماكروبية بنفسي، على سبيل المثال درجة حرارة الشاي وكتلته، لكنّ ذلك لا يُوضّح لي ما هي الحالة الميكروبية بشكل دقيق؛ لأن هنالك العديد من الاحتمالات. وفي هذا السياق يقول بيكينستاين: "حتّى مع أبسط أنواع الثقوب السوداء فإن جُلّ ما يُمكنني معرفته حولها هو كتلتها، لكنّ الحقيقة أن هناك العديد من الطرق المُحتملة التي يمكن أن تكون هذه الثقوب قد تشكّلت من خلالها. أي أن هناك العديد من النُسخ المُختلفة التي تحكي تاريخ هذه الثقوب السوداء وجميعها تُؤثر في الإنتروبي".

كانت الفكرة التي طرحها بيكينستاين مُثيرة للجدل في البداية، لكن بعد إجراء المزيد من الدراسات والتحقيقات في نظرية الثقوب السوداء اتّضح أن من المنطقي تعريف الإنتروبي الخاص بالثقب الأسود (لنُسميه هنا بـ **SBH**). كما تبيّن أن هذا الإنتروبي يتناسب مع الرُبع مضروباً بمساحة سطح أُفق الحدث في الثقب الأسود **A**. فيما يلي تمثيل دقيق للمعادلة:

$$S_{BH} = \frac{1}{4} \times \frac{A}{L_p^2}$$

حيث $L_p = 1.62 \times 10^{-35}$ سنتم، ويُطلق عليها اسم "طول بلانك" **Plank Length**.

استرداد الإنتروبي

وفّرت فكرة إنتروبي الثقوب السوداء للناس طريقةً يمكنهم من خلالها تعميم القانون الثاني للديناميكيا الحرارية على الأنظمة التي تشمل الثقوب السوداء. وبالنسبة لمثل هكذا نظام، فهي مجموع الإنتروبي العادي الموجود خارج الثقب الأسود وإنتروبي الثقب الأسود الذي لا يمكن أن تنخفض. ويشرح بيكينستاين هذا بقوله: "إذا سقط إنتروبي معين داخل ثقبٍ أسود، فإن مساحة السطح ستزيد بما يكفي لكي يزيد معها مجموع هذين الإنتروبيين". بهذا فإن الزيادة في إنتروبي الثقوب السوداء سيؤدي إلى التعويض عن الخسارة في الإنتروبي العادي الموجود خارج الثقب، أو ربما المُبالغة في التعويض في أغلب الأحيان.

ألهم القانون الثاني المُعمّم بيكينستاين للقيام بتجربة ذهنية بسيطة نتج عنها ولادة فكرة "حدّ بيكينستاين" المرتبط بالمعلومات. لنفرض في هذه التجربة أن لديك حزمة صغيرة من المادة ذات إنتروبي قيمته S وقمت بإنزالها إلى داخل ثقب أسود. ما سيحدث هنا هو أن إنتروبي الثقب الأسود ومساحة سطحه سيزدادان بشكل متساوٍ. لكن عليك أن تُنزل الحزمة داخل الثقب الأسود بحذر لكي تكون درجة الاضطراب الحاصلة في الثقب الأسود أقل ما يُمكن وأن تحدث زيادة في مساحة السطح بأقل قدرٍ مُمكن، ويعرف الفيزيائيون جيداً كيفية حساب ذلك القدر. إذا استخدمنا الرمز G ليُشير إلى ثابت الجاذبية (ثابت نيوتن) والرمز c ليُشير إلى سرعة الضوء، فإن المعادلة الناتجة تكون كالتالي:

$$A_{increase} \geq \frac{8\pi \times G \times m \times r}{c^2}$$

حيث ترمز **m** إلى إجمالي كتلة الحزمة، و **r** إلى نصف القُطر. وبهذا، فإن إنزال الحزمة داخل الثقب الأسود سيزيد من قيمة S_{BH} بما لا يقل عن:

[\ .{frac{2\pi \times G \times m \times r}{c^2 \times L_ p^2\ ]\

وعندما ترمي بالحزمة إلى داخل الثقب الأسود، فسيكون ما هو خارج الثقب قد خسر مقدارS من الإنتروبي. وبما أن الإنتروبي الكلي لا يُمكن أن يقل، فإن على الزيادة في S_{HB} أن تُوازن قيمة $S.$ أو تتجاوزها بدقة.

بمعنى آخر:

[\ .{S \leq \frac{2\pi \times G \times m \times r}{c^2 \times L_ p^2]\

كذلك، لا يُمكن للإنتروبي الخاص بحُزمتك أن يكون أكبر من الرقم الموجود على يمين هذه المعادلة التي تعتمد على كلّ من كُتلة الحزمة وحجمها. وبالرغم من أنه يُمكن، من الناحية النظرية، إنزال أي حزمة تحمل إنتروبي داخل ثقبٍ أسود بناءً على هذه الطريقة، إلا أن على هذه الحُزمة وغيرها أن تتوافق مع حدّ بيكينستاين.

حدود تخزين المعلومات

لكن، كيف نربط كل ذلك الكلام بموضوع سعة التخزين في رقاقات الحواسيب أو غيرها من أجهزة تخزين المعلومات؟ في الحقيقة، يقيس الإنتروبي عدد البتّات اللازمة لوصف الحالة الميكروبية للرُقاقة. وتذهب بعض هذه البتّات إلى حدّ وصف أجزاء الرُقاقة المُصممة لتخزين المعلومات. كلما زادت سعة التخزين، كان هناك حاجة لوجود إنتروبي أكبر، وبما أن الإنتروبي محدود (من حيث كتلة الرُقاقة وحجمها) بناءً على التعبير الحسابي السابق، فإن سعة التخزين ستكون محدودة كذلك. لذا، من أجل زيادة كمية المعلومات التي يُمكن لجهازٍ ما تخزينها بدون حُدود، فإننا سنحتاج إلى زيادة حجم ذلك الجهاز أو كتلته أو الاثنين معاً بشكل غير محدود أيضاً.

هل يُمكن تحميل الدماغ البشري إلى جهاز حاسوب؟

الأجهزة المُتوفرة حالياً بعيدةٌ كلّ البُعد عن حدّ بيكينستاين، لذا ليس هُناك داعٍ للقلق، فلا يزال هناك وقتٌ طويلٌ حتى نصل إليه. في الحقيقة، الأشياء الوحيدة التي يعرف الفيزيائيون بأنها تصل إلى حدّ بيكينستاين هي الثقوب السوداء نفسها. إن فكرة وجود هذا الحدّ هي في حدّ ذاتها فكرةٌ غريبة ومُثيرة للاهتمام، ويُعلّق بيكينستاين على هذا بقوله: "قد تُصبح تقنيات تخزين المعلومات أفضل بكثيرٍ في المستقبل، لكن حتى في ذلك الوقت لن نكون قادرين على تجاوز هذا الحدّ. حدّ بيكينستاين كبيرٌ جداً بالفعل، لكن لا يمكن أن نقول أنه حدّ لا نهائي".

من جهة أخرى، تجدر الإشارة إلى أنّ هناك جانباً آخر مُثيرًا للاهتمام فيما يتعلق بحدّ بيكينستاين، إذ إن هُناك حدّاً لكمية المعلومات التي تحتاجها لكي تصف نظاماً فيزيائياً بشكل كامل، مثل الدماغ البشري، وصولاً إلى أصغر تفاصيل الجسم. وحسب حدّ بيكينستاين، فإن المعلومات محدودة، وهذا يعني أنّه من الممكن، نظرياً على الأقل، إعادة خلق الدماغ البشري بشكلٍ كامل بواسطة الحاسوب. والكثير من الناس يُؤمنون بأن كل ما يرتبط بالإنسان، كالوعي والشعور بالذات على سبيل المثال، ينشأ من العمليات الفيزيائية التي تحدث داخل الدماغ البشري، وهذا يعني أن بالإمكان تحميل شخصٍ ما إلى آلة معينة. لكنّنا لا نزال بعيدين كُلّ البُعد عن القيام بهذا الأمر؛ إذ ليس لدينا القدرة الحاسوبية أو غيرها من التقنيات اللازمة لتنفيذ هذه العملية، لكنها تبقى فكرةً مُدهشة حقاً.

يبدو أن عصر الماتريكس قد أضحى قريباً.

- التاريخ: 2016-07-31
- التصنيف: أسئلة كُبرى

#الكون #الثقوب السوداء #الدماغ #المعلومات

المصطلحات

- **أفق الحدث (Event horizon)**: هي بعدٌ معين عن الثقب الأسود لا يمكن لأي شيء يقطعه الإفلات من الثقب الأسود. بالإضافة إلى ذلك، لا يُمكن لأي شيء أن يمنع جسيم ما من صدم المتفرد الذي يتواجد لفترة قصيرة جداً من الزمن بعد دخول الجسيم عبر الأفق. ووفقاً لهذا المبدأ، فأفق الحدث عبارة عن "نقطة اللاعودة". انظر نصف قطر شفارتزشيلد. المصدر: ناسا
- **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".

المصادر

- plus magazine
- الصورة

المساهمون

- ترجمة
  - طارق شعار
- مُراجعة
  - همام بيطار
- تحرير
  - معاذ طلفاح
- تصميم
  - علي كاظم
- نشر
  - سارة الراوي