

L'Univers est-il un ordinateur quantique ?

Peut-on simuler l'Univers à l'aide d'un gigantesque ordinateur quantique ? L'idée que tous les problèmes de physique puissent être traités à l'aide de la seule théorie quantique séduit les physiciens.



PAR **Giacomo Mauro D'Ariano**,
physicien à l'université de
Pavie, en Italie.

Demandez à un physicien de quoi est fait notre Univers. De manière spontanée, il vous répondra d'abord : « Il est constitué de particules ! » Puis, après quelques instants de réflexion, il se corrigera : « Il s'agit d'un champ quantique » ; les particules, elles, ne sont que la manifestation des fluctuations ou des excitations de ce champ, qui peuvent être créées ou annihilées. La plus belle – et la plus récente – preuve de cela est le boson de Higgs, particule qui donne sa masse à toutes les autres, que l'on a découverte en 2012 dans le Grand collisionneur de hadrons du CERN, à Genève.

Mais de quoi est fait le champ quantique ? Il est formé de multiples systèmes quantiques, dont les particules, qui interagissent les uns avec les autres. On a longtemps considéré que le champ quantique n'était qu'un *continuum* de ces systèmes : un ensemble dont les éléments sont inséparables, constituent un tout. On pense aujourd'hui que, si on le représentait avec une résolution de 10^{-35} mètre, « à l'échelle de Planck », on obtiendrait qu'il est discontinu. À cette échelle, on pourrait en isoler des parties – des « pixels quantiques ». Ces pixels quantiques sont si minuscules que, si on les ramenait à la taille d'un écran d'ordinateur, un électron serait aussi grand qu'une galaxie !

En physique théorique, la notion de *continuum* a été d'une grande aide mathématique depuis l'époque d'Isaac

Newton, au XVII^e siècle. Mais elle est aussi à l'origine de tous les problèmes majeurs en théorie quantique des champs – c'est le nom de la théorie dans laquelle on considère les particules comme des fluctuations quantiques.

En revanche, imaginer que l'Univers, la réalité, sont discontinus, discrets, signifie que ce ne sont pas seulement les particules, mais bien l'espace tout entier, qui est issu des pixels quantiques : autrement dit, les pixels ne sont pas « dans l'espace », ils « sont » l'espace. Cela signifie que le temps, lui aussi, est discontinu : chaque événement correspond à une séquence de film.

Hypothèse inestimable. Cette représentation de l'Univers peut sembler absurde. Sur le plan scientifique, cette hypothèse a pourtant une valeur inestimable, puisqu'elle permet de traiter tous les problèmes de physique à l'aide de la théorie quantique, et rien d'autre.

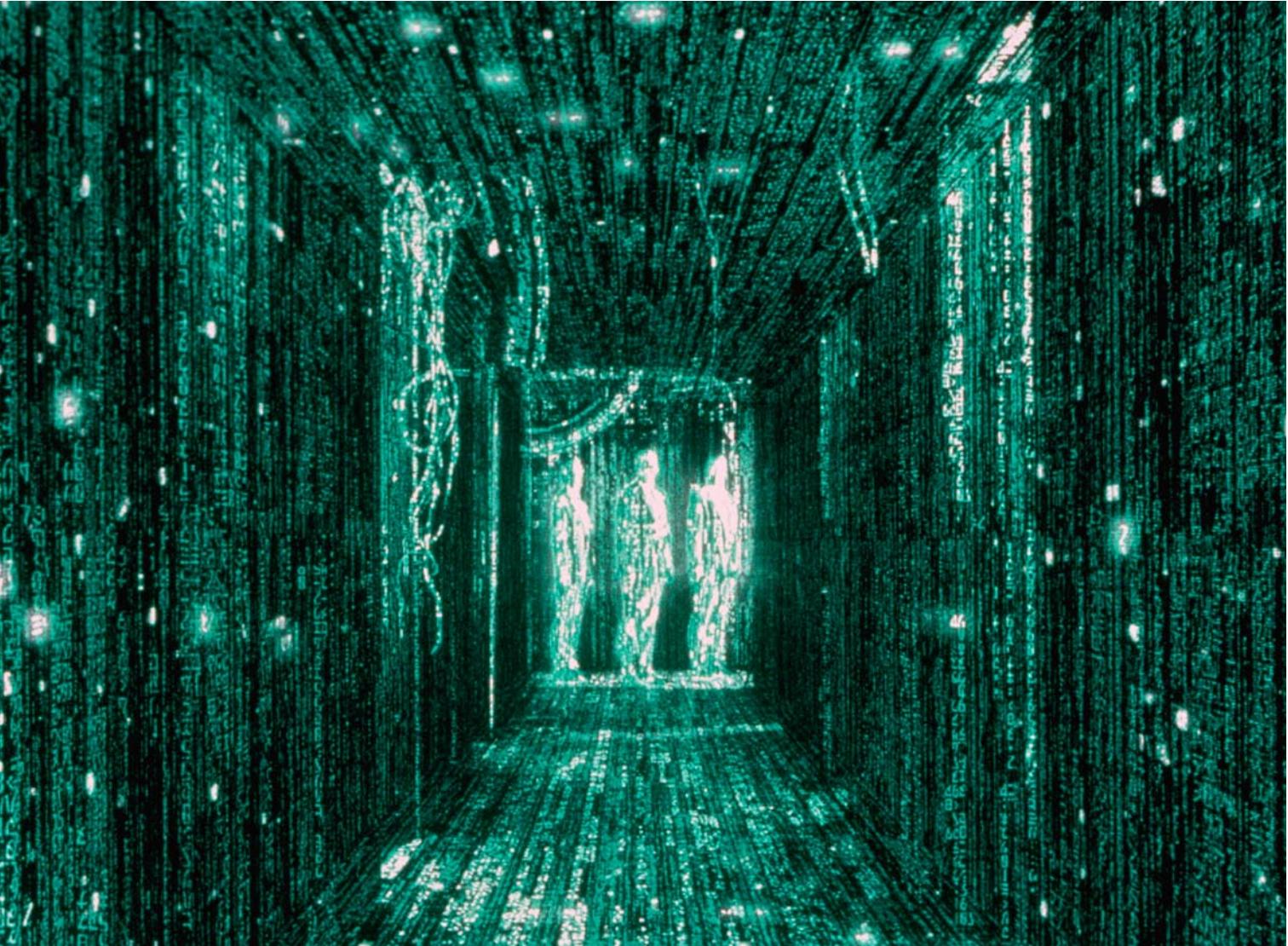
Un ensemble de systèmes quantiques, qui interagissent les uns avec les autres, c'est aussi comme cela qu'on définit un ordinateur quantique, d'après l'inventeur du concept, le physicien américain Richard Feynman. Feynman est aussi celui qui a envisagé, le premier, l'Univers comme un ordinateur quantique géant, en 1982 [1]. L'idée fut ensuite reprise par le physicien britannique David Deutsch, de l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, et par Seth Lloyd, du MIT, aux États-Unis.

L'essentiel

> NOTRE UNIVERS est constitué de systèmes minuscules, qui interagissent les uns avec les autres, comme dans un ordinateur quantique.

> SI NOTRE UNIVERS est une simulation numérique quantique, des principes très simples mais inconnus doivent la faire fonctionner.

> CES PRINCIPES nouveaux permettraient de résoudre des problèmes de physique jusqu'ici insolubles.



Et si notre réalité n'était fondamentalement constituée que d'information, comme le proposait l'intrigue du film *Matrix* en 1999 (ce que le héros parvient à visualiser, ci-dessus) ?

Si l'on admet que notre Univers peut être simulé à l'aide d'un ordinateur quantique géant, une question se pose : quel nouveau type de matériel informatique permettrait de réaliser cette simulation ? La réponse est d'ordre métaphysique : si vraiment on ne peut pas distinguer la réalité – notre Univers – de sa simulation, cela veut dire que la réalité est la simulation. Le logiciel ne s'exécute donc pas sur du matériel informatique, puisque le matériel informatique est lui-même une simulation. Et la réalité n'est en fait qu'un logiciel pur.

Si l'on poursuit notre comparaison, la théorie quantique est donc une forme de science informatique, de « théorie de l'information » – ce que notre équipe a d'ailleurs prouvé en 2011 [2]. Cette idée circulait alors depuis de nombreuses

années. Le physicien, John Archibald Wheeler, de l'université de Princeton, aux États-Unis, l'avait ainsi émise une vingtaine d'années auparavant à l'aide d'une formule devenue célèbre : « It from bit », « l'être à partir du bit », où « l'être » – chaque particule, ou l'espace-temps lui-même – tire sa fonction, sa signification, des réponses « oui » – « non » que les appareils ont donné aux questions, aux choix binaires, aux bits [3].

Méthode opérationnelle. C'est d'ailleurs sous l'impulsion de Wheeler que « l'information » est devenue le nouveau paradigme. Cette idée d'envisager le monde au travers du prisme de la théorie de l'information a donné naissance à une nouvelle approche scientifique : ce que j'ai appelé l'informationnalisme.

L'informationnalisme n'est pas une méthode spéculative, mais une méthode « opérationnelle ». Tout est traité comme un processus, un algorithme. Pour les partisans de

l'informationnalisme, les entités réelles ne sont pas des « choses », ce sont des « événements » – des faits qui peuvent se produire de manière probabiliste, comme l'explique le philosophe britannique d'origine autrichienne, Ludwig Wittgenstein : « *Le monde est la somme de tous les faits, pas de toutes les choses* [4]. »

Ces « événements » sont connectés par des « liens », et ces deux notions sont véritablement fondamentales pour les informationnalistes : les événements ne se produisent pas dans l'espace-temps, ils forment l'espace-temps. En d'autres termes, l'espace-temps est notre moyen de relier les événements entre eux, de les organiser.

Si l'on cherche à formuler une théorie – celle de l'espace-temps par exemple – en termes d'événements observés (ou potentiellement observables), cela implique de bâtir entre eux un réseau de connexions entrée–sortie. Dans une théorie causale, ces connexions sont appelées des liens causaux. >>>

L'Univers est-il un ordinateur quantique ?

»» Le langage informatique fonctionne exactement sur ce principe. Les événements sont les sous-routines du programme : chacun d'entre eux agit sur des paramètres d'entrée ; après que le travail a été effectué sur ces paramètres, ils retournent une valeur de sortie. Les liens sont les connexions où l'information entre, est traitée, puis ressort. La théorie quantique est aussi une théorie de type causal. Dans le langage physique, les liens sont les systèmes quantiques, et les événements sont leurs transformations ou leurs interactions.

Dans un ordinateur quantique, les sous-routines prennent la forme de transformations unitaires – aussi appelées « portes » – tandis que les systèmes sont les bits quantiques, plus connus sous le nom de « qubits ». Si l'on se place dans le cadre informationnel, une loi physique correspond alors à un petit motif de portes connectées, qui pavent un réseau calculatoire régulier et sans limites ; ce réseau forme la réalité. Le calcul met en parallèle une infinité de sous-routines identiques, que l'on fait

fonctionner toutes ensemble, à l'infini, conformément à l'idée selon laquelle la « loi » est, par définition, vraie partout et tout le temps [fig. 1].

Complexité minimale. On pourrait se demander : si la réalité est un calcul quantique, quel logiciel la fait fonctionner ? Si la nature fonctionne comme une simulation, il doit exister des principes qui nous sont inconnus pour réguler le calcul qui la produit. Selon le raisonnement philosophique du rasoir d'Occam, qui est à la base de la méthode scientifique moderne, ces principes doivent être les plus simples possibles : le logiciel qui fait fonctionner l'Univers doit donc être le plus court possible, et la complexité algorithmique de son calcul, minimale.

Si l'on fait une comparaison, on se rend compte que la notion de « loi physique » correspond au principe du réseau homogène, pour lequel le calcul peut être réduit au fonctionnement perpétuel et parallèle d'une seule sous-routine. La complexité de ce réseau est réduite encore davantage si on admet que les interactions

sont locales et ne varient pas en fonction de la direction. Nous pouvons alors supposer que les caractéristiques quantiques atteignent leur degré le plus simple : l'évolution est linéaire et unitaire, et la dimension du système est minimale.

Quels résultats physiques peut-on tirer de principes algorithmiques si généraux ? De manière étonnante, une liste impressionnante [5] ! Pour bien la comprendre, il faut rappeler la distinction entre les deux échelles physiques : l'échelle de Planck, et l'échelle « normale ». L'échelle de Planck, comme nous l'avons déjà dit, c'est celle des minuscules pixels quantiques. L'échelle normale inclut les phénomènes de la vie quotidienne, la physique qui est menée dans le Grand collisionneur de hadrons (le LHC) du CERN, à Genève, les rayons cosmiques extrêmement énergétiques, et bien d'autres choses encore.

Les principales conséquences physiques de ces nouveaux principes sont au nombre de trois. Première conséquence : la théorie de la relativité restreinte, élaborée par Albert Einstein en 1905, n'est que partiellement valide. La théorie de la relativité restreinte stipule que la simultanéité de deux événements dépend du référentiel dans lequel se trouvent les observateurs : deux événements se produisant au même moment pour un observateur donné pourront se produire à des instants différents pour un autre observateur. Avec les nouveaux principes, elle reste parfaitement juste à l'échelle normale, mais pas à celle de Planck.

À cette échelle, c'est une autre forme de relativité, la relativité doublement restreinte, qui est à l'œuvre. Cette théorie a été proposée par Giovanni Amelino-Camelia, de l'université de Rome La Sapienza, en 2002 [6]. Puis elle fut modifiée par Lee Smolin, de l'institut Perimeter, au Canada, et João Magueijo, de l'Imperial College, à Londres. Dans le cadre de cette théorie, la relativité ne s'applique pas qu'aux événements se produisant de manière simultanée, elle s'étend aux événements qui se déroulent au même endroit.

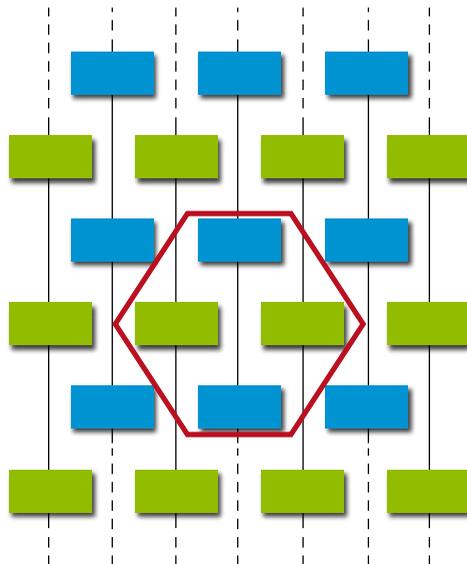
Deuxième conséquence : à l'échelle de Planck, tout n'est constitué que de

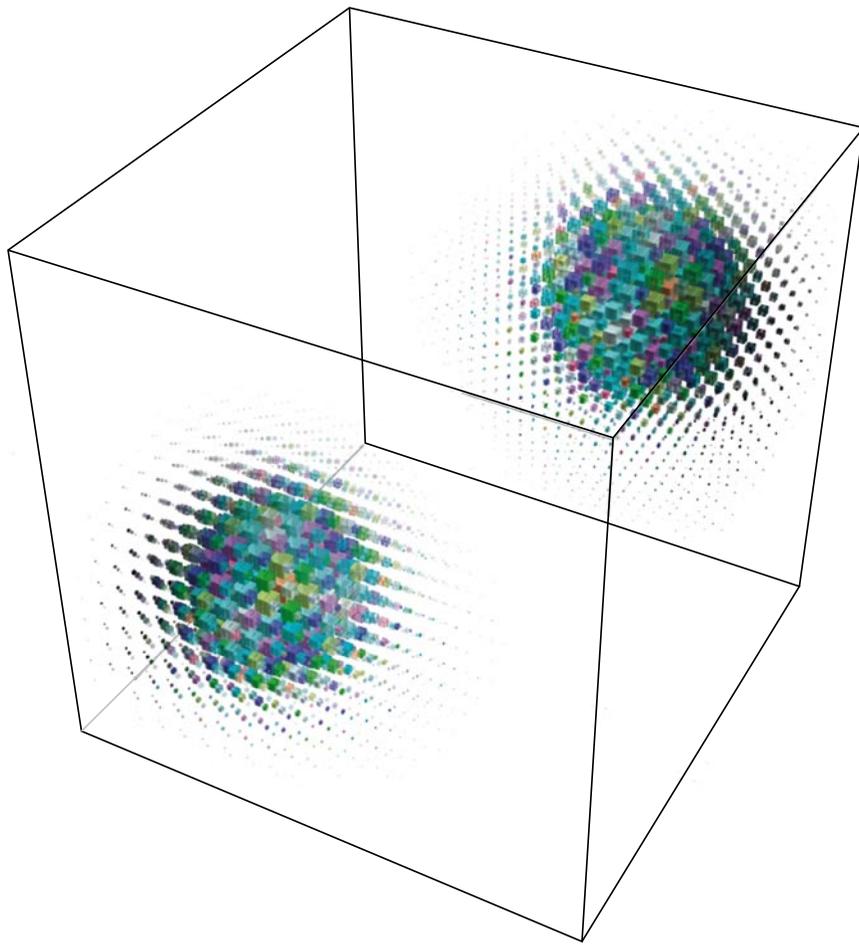
Fig.1 Une loi physique est un réseau quantique

UN CIRCUIT QUANTIQUE prend la forme d'un réseau sans limites, jalonné de portes logiques (en bleu et en vert). Quatre portes logiques correspondent à une sous-routine d'un programme informatique (hexagone en rouge). Toutes les sous-routines sont identiques et fonctionnent ensemble, à l'infini, si bien que le circuit quantique peut être réduit au fonctionnement d'une seule sous-routine. C'est sur ce même principe que fonctionne une loi physique, dans le cadre de la théorie de l'information.

© INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS ;

SOURCE : GIACOMO MAURO D'ARIANO





Ces deux sphères représentent des particules. Elles sont constituées de pixels quantiques (cubes de couleur), qui symbolisent la nature discontinue de l'Univers, telle qu'elle apparaîtrait dans une simulation quantique. © GIACOMO MAURO D'ARIANO

fermions, particules élémentaires de matière. Les particules responsables des interactions entre les fermions n'apparaissent, elles, qu'à l'échelle normale. La théorie quantique des champs, selon laquelle on considère les particules comme des fluctuations quantiques, n'est donc valable qu'à l'échelle normale, comme la relativité restreinte.

Principe unitaire. Troisième et dernière conséquence : on peut aussi faire des prédictions de la relativité générale, sans y avoir recours, à l'échelle de Planck. En conséquence du principe unitaire, selon lequel toute transformation, en théorie quantique, est réversible, on prédit par exemple qu'une particule possède une valeur maximale jusqu'à laquelle elle ne fournit aucune information. Cette valeur correspond à la masse de Planck, soit environ 22 microgrammes.

Pouvons-nous mesurer les effets de ces nouveaux principes dans l'Univers ? À l'échelle normale, ces effets sont tellement minuscules qu'ils doivent être accumulés pendant des milliards d'années avant de pouvoir être observés. Cela signifie qu'il en existe peut-être des traces dans le rayonnement des quasars, galaxies très énergétiques et très lumineuses aux frontières de l'Univers visible, puisque celui-ci peut nous parvenir sans aucune perturbation. C'est en tout cas ce que pense Giovanni Amelino-Camelia. Dans les images de quasars prises par le champ ultraprofond du télescope spatial Hubble, il a observé un décalage aux hautes fréquences, qui serait, selon lui, la manifestation de ces nouveaux principes.

Le nouveau paradigme imposé par la théorie de l'information représente un changement ontologique majeur. Aucun « truc » ne soutient les bits quantiques

puisque les « trucs » sont eux-mêmes faits de bits quantiques ! Ce changement de perspective est difficile à concevoir. Notre imagination est très attachée à l'idée que l'espace-temps est le théâtre où les particules se meuvent comme des objets constitués de « trucs ».

La réalité est-elle une gigantesque computation quantique, y compris à l'échelle de Planck ? Nous ne pouvons pas encore l'affirmer. Cependant, cette idée est séduisante car elle permettrait de résoudre une longue liste de problèmes de physique fondamentale apparemment insurmontables.

Refonder toute la physique à partir de la théorie de l'information quantique constitue un programme de recherche à part entière, et qu'il va falloir développer. Le problème le plus important à traiter, dans cette optique, est celui de la gravité. En effet, jusqu'à présent, nous ne possédons pas de théorie de la gravité quantique. Retrouver la gravité à partir des principes computationnels nous permettrait d'y accéder, vu qu'elle apparaîtrait automatiquement comme quantique.

Nous ferions alors d'une pierre deux coups : nous aurions enfin une théorie de la gravité quantique ; elle permettrait aussi l'unification de la relativité générale et de la théorie quantique. On résoudrait alors ce que l'on considère comme les deux problèmes les plus remarquables de la physique. ■

- [1] R. P. Feynman, *Int. J. Theor. Phys.*, 21, 467, 1982.
- [2] G. Chiribella et al., *Phys. Rev. A*, 84, 012311, 2011.
- [3] J. A. Wheeler, in *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, W. Zurek (dir.), Addison-Wesley, 1990.
- [4] L. Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, *Annalen der Naturphilosophie*, 1921.
- [5] G. M. D'Ariano et P. Perinotti, arXiv:1306.1934, 2013 ; A. Bisio et al., *Phys. Rev. A*, 88, 032301, 2013.
- [6] G. Amelino-Camelia et al., *Phys. Rev. D*, 87, 084023, 2013.

Pour en savoir plus

- L. Smolin, *The Trouble With Physics*, Mariner Books, 2007.
- S. Lloyd, *Programming The Universe*, Vintage Books, 2007.
- G. M. D'Ariano, in *Philosophy of Quantum Information and Entanglement*, A. Bokulich et G. Jaeger (dir.), Cambridge University Press, p. 85, 2010.