

Cellules de grille : l'espace... et le temps aussi

Les cellules de grille s'activent lorsque la position de l'animal coïncide avec l'un des nœuds d'un réseau périodique constitué d'hexagones. De ce fait, elles jouent un rôle clé dans l'orientation spatiale de l'animal. Une étude publiée en novembre 2015 par Benjamin Kraus et ses collègues, à l'université de Boston, montre que les cellules de grille sont aussi fortement impliquées dans l'intégration des informations temporelles.

Ces chercheurs ont enregistré sur des rats l'activité de cellules de grille pendant que les rongeurs parcouraient un petit labyrinthe simple en forme de 8, où l'un des tronçons était un tapis roulant sur lequel les animaux couraient en faisant du sur

place. Le tapis roulant, de vitesse réglable, fonctionnait pendant une durée fixe (16 secondes) ou roulait pendant une durée telle que la distance parcourue soit fixe (70 mètres). Les enregistrements au cours de différentes sessions expérimentales ont montré

que, lorsque les rats se trouvaient sur le tapis roulant, la quasi-totalité des cellules de grille présentaient un rythme élevé de décharge soit à des instants particuliers, soit pour certaines valeurs de la distance parcourue sur le tapis roulant. Le parcours des rats sur le tapis roulant se déroulant dans un cadre visuel constant, Benjamin Kraus et ses collègues concluent que les cellules de grille fournissent une représentation du temps écoulé et de la distance parcourue qui est indépendante des repères externes dont l'animal peut disposer.

figure aussi parmi les premiers indicateurs de la maladie.

Aux stades plus avancés de la maladie d'Alzheimer, des cellules de l'hippocampe meurent, ce qui conduit à une incapacité à se souvenir d'expériences vécues ou de concepts tels que les noms des couleurs. En fait, une étude récente a apporté des preuves que même des personnes jeunes portant un gène qui leur fait courir un risque élevé de développer la maladie d'Alzheimer présentent parfois des défauts de fonctionnement de leurs réseaux de cellules de grille, une découverte susceptible d'inspirer de nouvelles méthodes pour diagnostiquer la maladie.

Aujourd'hui, plus de quatre-vingts ans après que Tolman a proposé pour la première fois l'existence d'une carte mentale de notre environnement, il est clair que les cellules de lieu ne sont que l'une des composantes d'une représentation complexe que le cerveau se fait de son environnement spatial pour calculer la position, la distance, la vitesse et la direction. Les nombreux types cellulaires découverts dans le système d'orientation et de navigation du cerveau de rongeurs sont également présents chez les chauves-souris, les singes et les êtres humains. Leur existence dans plusieurs ordres taxinomiques de mammifères suggère que les cellules de grille et d'autres intervenant

dans la navigation sont apparues tôt au cours de l'évolution des mammifères et que des processus neuraux similaires servent à l'orientation chez de nombreuses espèces.

Bon nombre des éléments constituant la carte conjecturée par Tolman ont été découverts et nous commençons à comprendre comment le cerveau les crée et les déploie. La représentation spatiale est devenue l'un des circuits les mieux connus du cortex des mammifères et les algorithmes sous-jacents sont en cours d'identification, ce qui aidera à déchiffrer les codes neuraux que le cerveau utilise pour l'orientation et la navigation.

Des cartes géantes pour les migrants ?

Comme dans beaucoup d'autres domaines de la science, de nouveaux résultats soulèvent de nouvelles questions. Nous savons désormais que le cerveau dispose d'une carte interne, mais il nous reste à mieux comprendre comment les éléments de la carte fonctionnent de concert pour produire une représentation cohérente de la localisation et comment les informations sont lues par d'autres systèmes du cerveau pour prendre des décisions quant au lieu de destination et à la manière de s'y rendre.

De nombreuses autres questions se posent. Le réseau spatial associé à l'hippocampe et au cortex entorhinal est-il limité à la navigation dans l'espace local ? Avec les rongeurs, nous examinons des zones qui ne font que quelques mètres de rayon. Les cellules de lieu et de grille servent-elles également aux déplacements sur de longues distances, comme lorsque les chauves-souris migrent sur des centaines ou milliers de kilomètres ?

Enfin, nous nous demandons comment les cellules de grille se forment, s'il existe une période critique de formation pour les cellules de grille au cours du développement d'un animal et s'il existe des cellules de lieu et de grille chez d'autres animaux vertébrés ou invertébrés. Si les invertébrés sont aussi équipés de ces cellules, cela impliquerait que l'évolution a créé ce système de cartographie spatiale il y a des centaines de millions d'années. Le système de localisation et d'orientation dont est doté le cerveau continuera à produire une mine précieuse de sujets pour de nouvelles recherches, qui occuperont des générations de scientifiques dans les décennies à venir. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

B. J. Kraus *et al.*, *During running in place, grid cells integrate elapsed time and distance run*, *Neuron*, vol. 88, pp. 578-589, 2015.

E. I. Moser *et al.*, *Grid cells and cortical representation*, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 15 (7), pp. 466-481, 2014.

E. I. Moser, *Grid cells and the entorhinal map of space*, conférence de réception du prix Nobel, 7 décembre 2014 (<http://bit.ly/1WPRGPt>).

M.-B. Moser, *Grid cells, place cells and memory*, conférence de réception du prix Nobel, 7 décembre 2014 (<http://bit.ly/1wBRVt>).

DOSSIER POUR LA SCIENCE - MATHÉMATIQUES - GÉOMÉTRIE - DESIGN - MORPHOGENÈSE - FRACTALES

Triangle, rectangle, cercle... Ils n'ont pas livré tous leurs secrets.

À quoi ressemble
transformé en un tore
toutes les longueurs sont
conservées ?

Actuellement en kiosque

AVANT-PROPOS
DE **CÉDRIC
VILLANI**

Naissance des formes



N° 91 Avril-Juin 2016

pourlascience.fr

EL - 0.0 $\mathcal{C}_{\text{EL}}$ IN - 12.5 $\mathcal{C}_{\text{IN}}$ POW-LS - 0.0 $\mathcal{C}_{\text{LS}}$ MID - 0.5 $\mathcal{C}_{\text{MID}}$ WID-TOW - 1.0 $\mathcal{C}_{\text{WID-TOW}}$ V - 2.500 $\mathcal{C}_{\text{V}}$ YRF-PORT CONT - 0.5 $\mathcal{C}_{\text{YRF-PORT CONT}}$

N° 91 – 120 pages – prix de vente : 7.50 €

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

LES MULTIPLES VISAGES DE LA MATIÈRE NOIRE

Bogdan Dobrescu et Don Lincoln

Pourquoi n'a-t-on toujours pas détecté la matière noire, censée être majoritaire dans l'Univers ? Parce qu'elle n'existe pas ? Ou parce qu'elle est bien plus complexe qu'on ne le pensait, comme le proposent de nouveaux modèles ?



LA GALAXIE D'ANDROMÈDE, comme la plupart des galaxies spirales, tourne trop vite sur elle-même pour que la force gravitationnelle due à sa matière visible assure sa cohésion. Pour expliquer cette rotation rapide, les physiciens supposent que la galaxie est pimbée d'un halo sphérique de matière noire, une substance abondante dans l'Univers mais qui échappe à toute détection directe.

L'ESSENTIEL

- Les physiciens pensent que l'Univers contient de grandes quantités de matière noire.
- La recherche de matière noire s'est fondée sur des modèles à un seul type de particules, mais celles-ci restent indétectées.
- La matière noire pourrait contenir plusieurs types de particules interagissant à peine avec la matière ordinaire, ce qui expliquerait l'absence de détection.
- Dans certains scénarios, la matière noire formerait par exemple des « atomes », ou un disque à l'échelle de la galaxie.

La galaxie d'Andromède, notre voisine céleste, recèle un mystère. Elle tourne trop vite sur elle-même pour que les lois connues de la physique en maintiennent la cohésion. La gravité engendrée par la matière visible de la galaxie est trop faible pour retenir les étoiles à sa périphérie qui, filant à toute vitesse, devraient être projetées hors de la galaxie. Si la matière existante se résumait à la matière visible, Andromède, comme presque toutes les galaxies spirales, ne devrait tout simplement pas exister.

Les cosmologistes pensent qu'un type de matière invisible – de la « matière noire » – entoure et imprègne Andromède et les autres galaxies, apportant le supplément de force gravitationnelle nécessaire pour en maintenir la cohésion. Cette matière noire représenterait plus de 80 % de la matière contenue dans l'Univers.

Dans les théories les plus simples, la matière noire est composée d'un unique type de particules, qui reste à identifier. Mais en dépit de décennies de recherche, personne n'a pu obtenir de preuve directe de l'existence de la matière noire. De plus, quelques désaccords subsistent entre les observations astronomiques et cette théorie simple. Combinés, ces désaccords résiduels et l'échec de la détection de cette substance insaisissable amènent certains scientifiques à remettre en cause la piste d'un seul type de matière noire. En effet, l'absence de détection est une information en soi, dont on déduit des limites sur certaines propriétés de la matière noire. Par exemple, l'absence de signal permet de calculer une limite supérieure à la probabilité d'interaction de la matière noire avec la matière ordinaire. Ces limites sont de plus en plus sévères et d'autant moins compatibles avec un modèle de matière noire à un seul type de particules.

Certains physiciens explorent des scénarios qui se dispensent de matière noire. Par exemple, ils étudient des théories où les lois de la gravitation sont modifiées et dont le comportement s'écarte de la mécanique newtonienne pour des accélérations extrêmement faibles (et non testées en laboratoire), comme dans les régions périphériques des galaxies. Cette approche reproduit de façon satisfaisante la rotation des galaxies spirales. Mais elle a ses défauts et requiert, par exemple, l'ajout de matière invisible pour décrire la dynamique des amas de galaxies.

De nombreux physiciens restent convaincus par l'hypothèse de la matière noire car

elle explique une grande variété d'observations astronomiques et cosmologiques : le mouvement des galaxies au sein des amas galactiques, la distribution de la matière à l'échelle de l'Univers, la dynamique de la matière lors d'une collision de deux amas ou le phénomène de lentilles gravitationnelles (l'amplification de la lumière émise par une source lointaine grâce à la déformation de l'espace-temps par la présence d'un objet massif dans la ligne de vue).

Dès lors, si l'hypothèse de la matière noire semble fondée, mais que le scénario à un seul type de particules n'est pas satisfaisant, il faut envisager que la matière noire puisse être plus complexe. Après tout, la matière ordinaire se présente bien sous de nombreuses formes – peut-être la matière noire est-elle tout aussi riche.

Ces dernières années, des physiciens ont envisagé cette possibilité. Cela pourrait s'accompagner d'un nouveau type de forces jusque-là insoupçonnées, agissant fortement sur la matière noire et très faiblement (ou pas du tout) sur la matière ordinaire. Des observations récentes de collisions de galaxies apportent peut-être un soutien préliminaire à cette hypothèse. De tels modèles expliqueraient de façon plus naturelle l'absence de signaux de la matière noire dans les différentes expériences actuelles et proposent des solutions à certaines difficultés théoriques posées par les modèles simples. Si la matière noire complexe existe, l'Univers est alors encore plus riche et fascinant que ne l'imaginaient les cosmologistes.

La part cachée de l'Univers

Bien que nous ne sachions pas encore de quoi est constituée la matière noire, nous en déduisons certaines propriétés grâce à son influence sur la matière ordinaire, par des observations ou des simulations numériques. Par exemple, les particules qui composent la matière noire sont probablement assez lourdes. Des particules de matière noire légères fileraient à une vitesse proche de celle de la lumière et ne se seraient pas accumulées dans des régions de l'Univers primordial qui sont à l'origine des grandes structures observées aujourd'hui.

Parce qu'elles n'absorbent pas de rayonnement électromagnétique et n'en émettent pas, elles doivent être électriquement neutres. Elles ne sont pas non plus