

neurone réticulaire est important, l'activité électrique des deux neurones se met à osciller en boucle, de façon autonome : l'information est en permanence réinjectée dans le neurone thalamo-cortical au lieu d'être acheminée vers le cortex.

Cette oscillation a un fondement moléculaire. Sous l'influence inhibitrice du neurone réticulaire, la membrane du neurone thalamique s'hyperpolarise, c'est-à-dire que la différence de potentiel qui règne de part et d'autre de la membrane neuronale augmente, freinant les décharges électriques. Ce phénomène active une classe de canaux ioniques, les canaux de calcium à bas seuil, ce qui donne naissance à une onde de dépolarisation. Cette onde repart vers le neurone réticulaire, à nouveau mis à contribution : le processus se répète de façon cyclique, ce qui produit des oscillations dont la fréquence est analogue à celle du sommeil.

Peut-on extrapoler à l'animal ces résultats obtenus sur des coupes de cerveau ? Effectivement, on sait que chez des

chats endormis, l'activité des neurones thalamiques et réticulaires oscille, elle aussi, en boucle. De plus, le réseau hybride peut être tiré de son « sommeil », soit par un fort influx nerveux en provenance de la rétine (l'équivalent d'une lumière aveuglante réveillant le dormeur), soit par de la noradrénaline, une hormone de l'éveil. Ainsi, les neurones artificiels reproduisent assez bien les caractéristiques des réseaux réels.

Dans certaines situations, des groupes de neurones entrent en résonance (fonctionnent en boucle), pendant que d'autres continuent à transmettre les informations sensorielles au cortex. Ce filtre pourrait aider à se concentrer sur une modalité sensorielle particulière. Certains musiciens, quand ils se concentrent intensément sur les sons qu'ils produisent, disent percevoir le monde visuel avec moins d'intensité, de façon floue. Grâce aux nouvelles méthodes d'exploration du cerveau, mêlant biologie et électronique, on espère progresser dans la compréhension de ces phénomènes.

Le palimpseste cosmique

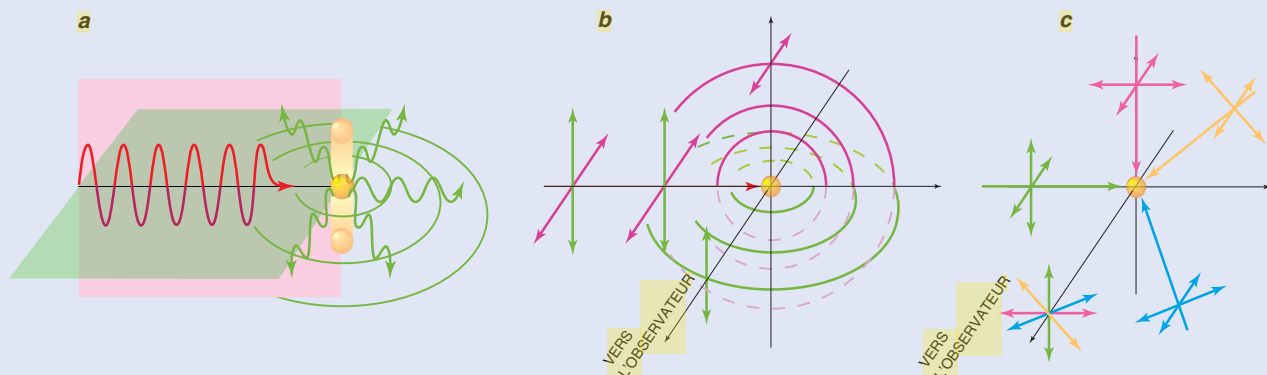
Aux informations gravées dans le rayonnement cosmologique fossile et déjà connues – son spectre et ses fluctuations –, s'ajoute sa polarisation, dont la mesure apporte de nouvelles informations sur l'Univers primordial.

Lorsque, 300 000 ans après le Big Bang, le plasma chaud et indifférencié qui emplissait l'Univers s'est refroidi au-dessous de quelques milliers de kelvins, il s'est transformé en gaz neutre. Il a libéré le rayonnement qu'il enfermait et qui nous parvient aujourd'hui sous la forme de micro-ondes. Ainsi, de la Terre, le fond du ciel constitue une coquille sphérique d'environ 14 milliards d'années-lumière de diamètre brillant dans le domaine des micro-ondes et que les astronomes nomment surface de dernière diffusion. Elle porte l'image du plasma primordial, tel qu'il était à cette époque reculée. Récemment, en employant un radiotélescope installé en Antarctique, les astronomes du DASI (pour *Degree Angular Scale Interferometer*, ou

interféromètre à l'échelle angulaire de un degré) ont mesuré la très faible polarisation qui a été imprimée à ce rayonnement micro-onde au moment où il a été libéré. Ce signal nous renseigne sur les grumeaux de plasma présents à cette époque.

L'essentiel de la lumière que nous recevons est non polarisée. Il est constitué de trains d'ondes électromagnétiques indépendants qui oscillent chacun dans des plans différents. Toutefois, la lumière non polarisée peut acquérir une direction d'oscillation privilégiée lorsqu'elle est diffusée ou réfléchi. Dans ce cas, l'essentiel de l'énergie du rayonnement incident est ré-émis sous forme d'ondes qui oscillent toutes dans un même plan.

Lorsque l'Univers était suffisamment chaud, le rayonnement qu'il contenait était en permanence absorbé et réémis au sein d'un plasma de particules chargées (protons et électrons). L'Univers s'étendant, la température de la matière et du rayonnement décru et les collisions entre photons et particules chargées se sont raréfiées. Finalement, les photons de basse énergie ne pouvaient plus détruire le nombre croissant de particules neutres (essentiellement des atomes d'hydrogène) qui commençaient à se former et le rayonnement fut libéré tandis que le gaz chaud passait à l'état neutre. Les cosmologistes nomment cette période « la recombinaison ». Elle s'acheva lorsque les photons du rayonnement



Une onde électromagnétique (a, en rouge) polarisée linéairement oscille dans un plan (en rose). Lorsqu'elle atteint un électron (en orange), elle lui imprime un mouvement oscillatoire qui provoque l'émission de l'onde diffusée (en vert). Cette onde est concentrée dans le plan perpendiculaire au mouvement (en vert) et polarisée comme l'onde incidente. Quand l'onde incidente n'est pas polarisée, elle peut tout de même être représentée comme la somme de deux ondes polarisées, l'une selon la direction de la ligne de visée (b, en rose), l'autre selon la direction perpendiculaire (en vert). Le rayon-

nement diffusé dû à la première composante est contenu dans le plan perpendiculaire à la ligne de visée et ne peut être observé. Seul nous parvient le rayonnement (en vert) induit par la seconde composante et polarisé comme elle. Lorsque la particule chargée reçoit des ondes non polarisées de différentes directions (c, en vert, rose, jaune et bleu), elle réémet vers l'observateur des ondes polarisées dans différentes directions. Si le rayonnement incident n'est pas isotrope, l'une de ces émissions polarisées est légèrement plus intense que les autres et l'on observe un léger excédent de polarisation.

Le guidage des artères

Lors de la formation de l'embryon, les artères se mettent en place en calquant leurs trajectoires sur celles du système nerveux.

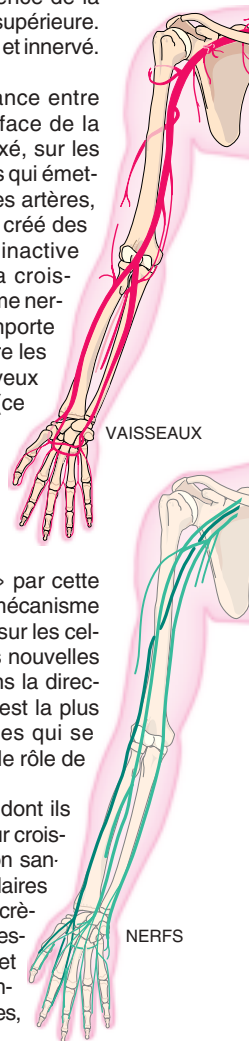
Ouvrez un livre d'anatomie à la page du système nerveux. Regardez les arborescences qui se prolongent dans les moindres recoins de l'organisme. Puis regardez le plan du réseau sanguin. De larges vaisseaux partent du cœur, puis se divisent en plus petits, jusqu'à atteindre les minuscules dimensions des capillaires. Cette observation montre que le réseau sanguin et le réseau nerveux sont dessinés sur le même modèle. On vient d'en comprendre la raison. Trois équipes de biologistes de l'Institut de technologie de Californie, du Centre Max Delbrück de médecine moléculaire de Berlin et de l'Université de Tokyo ont montré que le réseau des petites artères s'inspire du trajet des fibres nerveuses pour trouver sa place sous la peau. Les nerfs envoient des messages chimiques aux artères, et les attirent vers eux.

Le réseau des nerfs et celui des artères sont extrêmement ramifiés. La longueur totale de tous les vaisseaux sanguins bout à bout équivaut à deux fois la circonférence de la Terre, et la longueur du système nerveux est encore supérieure. Grâce à ces ramifications, tout l'organisme est irrigué et innervé. Pourquoi ces arborisations sont-elles identiques ?

L'équipe japonaise a observé la correspondance entre les fines artères et les fibres nerveuses à la surface de la peau d'embryons de souris. Ces biologistes ont fixé, sur les artérioles, des marqueurs moléculaires fluorescents qui émettent une lumière verte et révèlent le trajet précis des artères, identique à celui des fibres nerveuses. Puis ils ont créé des souris génétiquement modifiées : une mutation inactive une molécule normalement destinée à guider la croissance des neurones vers la peau. Dès lors, le système nerveux est bouleversé, et les fibres partent dans n'importe quelle direction. Pourtant, les artères suivent encore les fibres nerveuses, ce qui montre que le système nerveux guide le système artériolaire lors de sa formation (ce n'est pas le cas pour les veines).

Comment les neurones s'attachent-ils les services des petits vaisseaux ? On a découvert que les cellules de Schwann, des cellules entourant les neurones, émettent une molécule (un facteur de croissance vasculaire endothélial), concentré près de la cellule nerveuse. Les artères sont « attirées » par cette molécule, c'est-à-dire par le nerf. On a identifié le mécanisme de cette attraction. Le facteur de croissance se fixe sur les cellules artérielles, ce qui déclenche leur division. Les nouvelles cellules contribuent à la croissance de l'artère, dans la direction où la concentration en facteur de croissance est la plus forte. Le nerf attire aussi des cellules musculaires qui se fixent autour des artères, et qui, plus tard, joueront le rôle de petites pompes, pour propulser le sang.

Les artères apportent aux neurones l'oxygène dont ils ont besoin et produisent une molécule qui stimule leur croissance. En retour, les nerfs participent à la circulation sanguine en stimulant la contraction des cellules musculaires de la paroi des vaisseaux sanguins. En outre, ils sécrètent des peptides inflammatoires lorsque la peau est blessée. Cette étude a porté sur l'association des nerfs et des artères sous-cutanées, mais des mécanismes semblables sont sans doute en jeu dans de nombreux organes, dont la vascularisation reflète l'innervation.



Carte du fond de rayonnement cosmologique, où la polarisation (traits noirs) a été superposée à la température (du jaune au rouge).

cosmologique subirent leur dernière diffusion sur les dernières particules chargées libres. En 1968, l'astrophysicien Martin Rees prédit que, selon ce modèle, chaque point du fond de rayonnement cosmologique devait avoir acquis une polarisation légèrement différente des points voisins, précisément à l'instant de la dernière diffusion. Après plus de 30 ans de recherche, on vient enfin de mesurer ces fluctuations de la polarisation.

Lorsqu'une particule chargée, un électron, par exemple, reçoit une onde lumineuse, venue d'une direction donnée, le rayonnement qu'elle diffuse ne présente pas de direction privilégiée de polarisation. En revanche, la fraction de ce rayonnement qui est émise vers un observateur est polarisée dans une direction perpendiculaire à la direction de l'onde incidente. Dans le plasma primordial, un tel électron recevait de la lumière de nombreuses ondes indépendantes venues de toutes les directions, ondes dont la fraction diffusée vers la Terre est constituée de rayonnements polarisés, mais chacun dans une direction indépendante. Ainsi, si le rayonnement incident sur l'électron était parfaitement isotrope à l'époque de la recombinaison, la somme du rayonnement diffusé dans notre direction ne devrait pas faire apparaître de direction privilégiée... Cependant, le fond de rayonnement cosmologique n'est pas parfaitement isotrope. Il existe de petites fluctuations qui proviennent du fait que le plasma primordial n'était pas complètement homogène et isotrope. Ces petites fluctuations assurent qu'il reste un léger excédent de polarisation en chaque point de la surface de dernière diffusion. C'est la carte de cette polarisation que les astronomes du DASI viennent d'établir.

Ces mesures ont un double intérêt. Tout d'abord, il s'agit d'une nouvelle confirmation des modèles de Big Bang, puisqu'on a désormais la preuve que le rayonnement micro-onde a bien été émis à la suite d'une diffusion par un plasma. En fait, si l'on n'avait pas détecté de polarisation, les modèles les plus simples se seraient effondrés... De plus, la carte de la polarisation du rayonnement nous renseigne sur les fluctuations du plasma primordial, puisque ce sont elles qui provoquent en chaque point les petits excédents locaux de polarisation. Ces renseignements s'apparentent à ceux que l'on a obtenus en établissant la carte de l'intensité et de la température de ce rayonnement, mais, à la différence des fluctuations de température, le champ de la polarisation n'est pas modifié par la présence de nuages intergalactiques hétérogènes dans l'Univers actuel. Ces nuages déforment certainement la carte de température et d'intensité du fond de rayonnement, mais l'information imprimée dans sa polarisation, elle, nous parvient sans être dégradée. Ces mesures ouvrent, par conséquent, une nouvelle fenêtre sur la physique de l'Univers primordial.

Alejandro GANGUI, IAFE et Université de Buenos Aires