

qui ne satisfont pas à ces critères explosent. Elles peuvent amasser lentement de l'hélium, produit par la fusion de l'hydrogène, jusqu'à atteindre la limite de Chandrasekhar et exploser. La couche d'hélium peut aussi atteindre, avant la limite de Chandrasekhar, une masse critique et s'allumer de manière explosive. Dans ce dernier cas, des ondes de choc secouent violemment l'étoile et déclenchent la fusion du carbone dans son cœur. La fusion s'emballe et, en quelques secondes, l'étoile est transformée en nickel et en d'autres éléments de masse comprise entre celle du silicium et celle du fer. Le nickel, dispersé dans l'espace, se désintègre radioactivement en cobalt, puis en fer, en quelques centaines de jours.

Les astronomes avaient déjà attribué les supernovae de type Ia à l'explosion de naines blanches riches en carbone. Le spectre d'émission d'une telle supernova ne révèle aucune trace d'hydrogène ni d'hélium, contrairement à ceux des autres supernovae produites par l'explosion d'étoiles massives. Les supernovae de type Ia seraient une source importante de fer et d'éléments lourds dans l'Univers. En moyenne, quatre supernovae de type Ia explosent tous les 1 000 ans dans une galaxie telle que la Voie lactée.

Avant la découverte des sources de rayonnement X de basse énergie, les astronomes n'étaient pas certains du déroulement des événements qui conduisent à une supernova de type Ia. Les explications invoquaient soit des systèmes doubles symbiotiques, en particulier les novae récurrentes (qui ont été observées au moins deux fois), rares, soit la coalescence de deux naines

blanches riches en carbone. Cependant, cette dernière hypothèse est aujourd'hui contestée : on n'a jamais observé de système de deux naines blanches de masses et de périodes orbitales adéquates, et des calculs ont montré qu'une telle fusion ne serait pas assez violente pour produire une explosion thermonucléaire. Les sources de rayonnement X de faible énergie et les autres systèmes où la fusion se produit sur des naines blanches sont les candidats les plus crédibles : leur fréquence de disparition est proche de la fréquence observée des supernovae. Ces sources binaires lumineuses de rayonnement X de faible énergie sont ainsi la première classe d'objets identifiés qui peuvent achever leur existence en supernovae de type Ia.

Ce résultat peut améliorer la précision des mesures des distances dans l'Univers. De faibles variations de brillance peuvent faire la différence entre des hypothèses contradictoires sur l'origine et le destin de l'Univers. Les cosmologistes ont toujours craint que de petites erreurs systématiques, dues à la connaissance incomplète que les astronomes ont de l'évolution des étoiles qui deviennent supernovae, ne soient prises pour des variations réelles. Quand les sources de rayonnement X furent découvertes pour la première fois, personne ne s'attendait à ce que les recherches qu'elles susciteraient rassemblent tant de phénomènes en une seule théorie cohérente. Nous savons aujourd'hui que plusieurs classes d'étoiles variables, de novae et de supernovae ne sont que des variantes d'un même système : une étoile ordinaire en orbite autour d'une naine blanche à la surface de laquelle de l'hydrogène fusionne.

Peter KAHABKA dirige l'Institut d'astronomie de l'Université d'Amsterdam, où travaille aussi Edward VAN DEN HEUVEL. Saul RAPPAPORT est professeur de physique à l'Institut de technologie du Massachusetts.

Edward VAN DEN HEUVEL et Jan VAN PARADIJS, *Les étoiles binaires émettrices de rayons X*, in *Pour la Science*, janvier 1994.

Sumner STARRFIELD et Steven SHORE, *Vie et mort de la nova V1974 Cygni*, in *Pour la Science*, mars 1995.

Rosanne DI STEFANO, *Luminous Supersoft X-ray Sources as Progenitors of Type Ia Supernovae*, in *Supersoft X-ray Sources*, sous la direction de Jochen Greiner, Springer-Verlag, 1996.

P. KAHABKA et E.P.J. VAN DEN HEUVEL, *Luminous Supersoft X-ray Sources*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 35, pp. 69-100, 1997.

Pilar RUIZ-LAPUENTE, Ramon CANAL et Andreas BURKERT, *SNeIa : On the Binary Progenitors and Expected Statistics*, in *Thermonuclear Supernovae*, sous la direction de Ramon Canal, Pilar Ruiz-Lapuente et Jordi Isern, Kluwer, 1997.

Ken'ichi NOMOTO, Koichi IWAMOTO et Nobuhiro KISHIMOTO, *Type Ia Supernovae : Their Origin and Possible Applications in Cosmology*, in *Science*, vol. 276, pp. 1378-1382, 30 mai 1997.

Nicolas PRANTOS et Thierry MONTMERLE, *Naissance, vie et mort des étoiles*, Presses Universitaires de France, 1998.

Le développement des membres

ROBERT RIDDLE • CLIFFORD TABIN

La protéine Sonic hedgehog qui commande le développement des membres chez l'embryon participerait aussi à l'apparition de certains cancers.

L'attente nous avait semblé interminable, mais, enfin, le temps était venu de casser quelques œufs. Une semaine plus tôt, nous avions percé un petit trou dans la coquille d'un œuf fécondé et nous avions introduit quelques cellules génétiquement modifiées dans l'un des deux minuscules bourgeons de l'embryon qui devaient donner les ailes de l'oiseau. Nous avions modifié les cellules pour leur faire produire une protéine que nous pensions être indispensable au développement correct des ailes. Comment les cellules introduites avaient-elles perturbé la formation de l'aile?

Tandis que nous scrutions l'embryon au microscope, nous avons constaté que les cellules génétiquement modifiées avaient déclenché la formation de plusieurs doigts à l'extrémité de l'aile : nous avions bien identifié un facteur essentiel du développement des membres.

Cette expérience, réalisée au cours de l'été 1993, apportait une réponse partielle à la question que des biologistes se posent depuis près de 100 ans : dans un membre en développement, comment les cellules «reconnaissent»-elles la gauche de la droite, le haut du bas, l'arrière de l'avant ? Plus précisément, pourquoi le premier doigt est-il le pouce, et le cinquième l'auriculaire ? Qu'est-ce qui garantit que l'os du bras (l'humérus) est le plus proche du tronc, et ceux des doigts les plus éloignés ?

1. AU COURS DU DÉVELOPPEMENT embryonnaire, les mains humaines et les ailes de poulet sont façonnées par les mêmes signaux chimiques. Les biologistes identifient aujourd'hui les signaux qui indiquent aux cellules des membres en développement où sont le haut et le bas, l'avant et l'arrière ou la tête et la queue.

Pendant des décennies, les embryologistes ont étudié ces questions en identifiant les cellules nécessaires au développement correct des membres. Grâce aux techniques de la biologie moléculaire, ils peuvent aujourd'hui analyser les gènes de la formation des membres. Plusieurs de ces gènes – et les

protéines qu'ils fabriquent – sont analogues à d'autres gènes qui commandent le développement des membres chez la drosophile : c'est étrange, car les vertébrés et les insectes semblent avoir eu un ancêtre commun dépourvu de membres. Éclairant enfin le miracle de la vie, ces études expliquent également



certaines anomalies du développement embryonnaire. De surcroît, elles montrent que la même protéine qui détermine l'organisation des membres agit aussi sur d'autres mécanismes du développement, que ce soit la formation du système nerveux central ou la croissance des cellules qui, lorsqu'elle n'est plus contrôlée, déclenche des cancers.

La manipulation des œufs

Au cours de l'embryogenèse, tous les organismes sont-ils régis par des mécanismes similaires ou chacun a-t-il son propre mode de développement? Les bras des humains se développent vraisemblablement comme ceux des chimpanzés, mais quelle est la ressemblance entre le développement d'un bras de mammifère et celui d'une aile de poulet ou encore d'une aile de drosophile?

Pendant des années, les biologistes ont été convaincus que les facteurs qui modèlent les jambes d'une future ballerine et les pattes d'une drosophile sont très différents. Les ressemblances

paraissaient résulter d'une évolution convergente : des mécanismes différents aboutiraient à des structures analogues. Puis deux concepts ont bousculé ces *a priori*.

D'une part, les biologistes ont découvert que des gènes similaires (parfois les mêmes gènes) orchestrent le développement de nombreux organismes, de la mouche à l'homme en passant par la souris. Presque tous les animaux ont une tête située à une extrémité et une queue à l'autre, notamment en raison de la présence, chez ces différentes espèces, d'une famille de gènes, les gènes homéotiques (gènes *Hox*). D'autre part, des gènes qui commandent un aspect du développement – la formation des membres, par exemple – jouent aussi un rôle dans des domaines éloignés, la formation du système nerveux par exemple. La nature semble utiliser sans cesse les mêmes pièces détachées pour construire des organismes très variés.

Les œufs de poule sont très utiles pour l'étude de la formation des membres. Depuis Aristote, qui observa

des œufs à des stades d'évolution différents, on sait que, pour observer comment un embryon de poulet se développe, il suffit de pratiquer un petit trou dans la coquille d'un œuf fécondé. Les embryologistes modifient chirurgicalement des embryons de poulets en opérant par ces petites ouvertures, puis en les rebouchant avec de la paraffine (ou avec du ruban adhésif) et en attendant l'éclosion des œufs.

Ainsi, ils ont observé que les membres commencent à se former à partir de bourgeons qui apparaissent sur les côtés de l'embryon. Ces bourgeons consistent en un «manchon» de cellules externes, ou ectoderme, entourant un «cœur» de cellules du mésoderme. Bien que les ébauches de membres ne soient pas des structures organisées, elles contiennent toutes les informations requises pour la formation d'un membre : quand on prélève une telle ébauche et qu'on la transplante en un autre endroit de l'embryon, un membre normal se développe dans une position anormale.

