

> Dossier

Matière

RADIOSCOPIE D'UN MO

La face cachée de l'Univers est la clé de son évolution. Des résultats tout récents (voir p. 28) lèvent le voile sur l'énergie sombre qui constitue la majeure partie du côté obscur du cosmos. Une bonne raison de faire le point sur l'autre composante invisible de l'Univers : la matière "noire". Un portrait-robot circule déjà.

Dossier préparé par Serge Jodra, Françoise Harrois-Monin et Jean-Marc Bonnet-Bidaud

C'EST une énigme à rebondissements. Elle a commencé dans les années 1930 lorsque l'astronome Fritz Zwicky se mit en tête de calculer la masse de sept galaxies dans l'amas du Coma en utilisant les bonnes vieilles lois de la gravitation. Le résultat obtenu était 400 fois supérieur à celui auquel il aboutissait en évaluant la même masse par une autre méthode, celle de la luminosité (**Zoom**). Deux ans plus tard, Sinclair Smith recommence l'expérience sur l'amas de Virgo et confirme le grand écart entre les deux modes de calcul — 200 fois, cette fois-là⁽¹⁾. Zwicky reprend ses travaux, les

> Zoom

Plus une étoile — en pleine force de l'âge — est massive, plus elle est lumineuse et dans des proportions bien déterminées. Exemple : une étoile de 10 masses solaires est 10 000 fois plus lumineuse que le Soleil ; un astre de 0,1 masse solaire est 1 000 fois moins lumineux que lui.

SOmbore

NDÉ INVISIBLE

affine, conclut qu'on est loin de voir toute la matière présente dans les galaxies et donc que la détermination des masses d'après la luminosité sous-estime largement la quantité de matière présente dans l'Univers. Bref, cette "masse sombre", comme l'appelle déjà Zwicky représenterait entre 90 et 99 % de la masse de l'amas du Coma. Mazette !

À l'époque, les astronomes ne prêtent pourtant guère attention aux remarques de

Fritz Zwicky. Il faut attendre les années 1970 et l'amélioration des mesures des vitesses stellaires pour que la "matière sombre" revienne sur le tapis. Les résultats s'accumulent et la matière noire, visible nulle part, est présente dans de nombreux articles scientifiques jusqu'au jour de 1974 où trois astrophysiciens, Jeremiah Ostriker, James

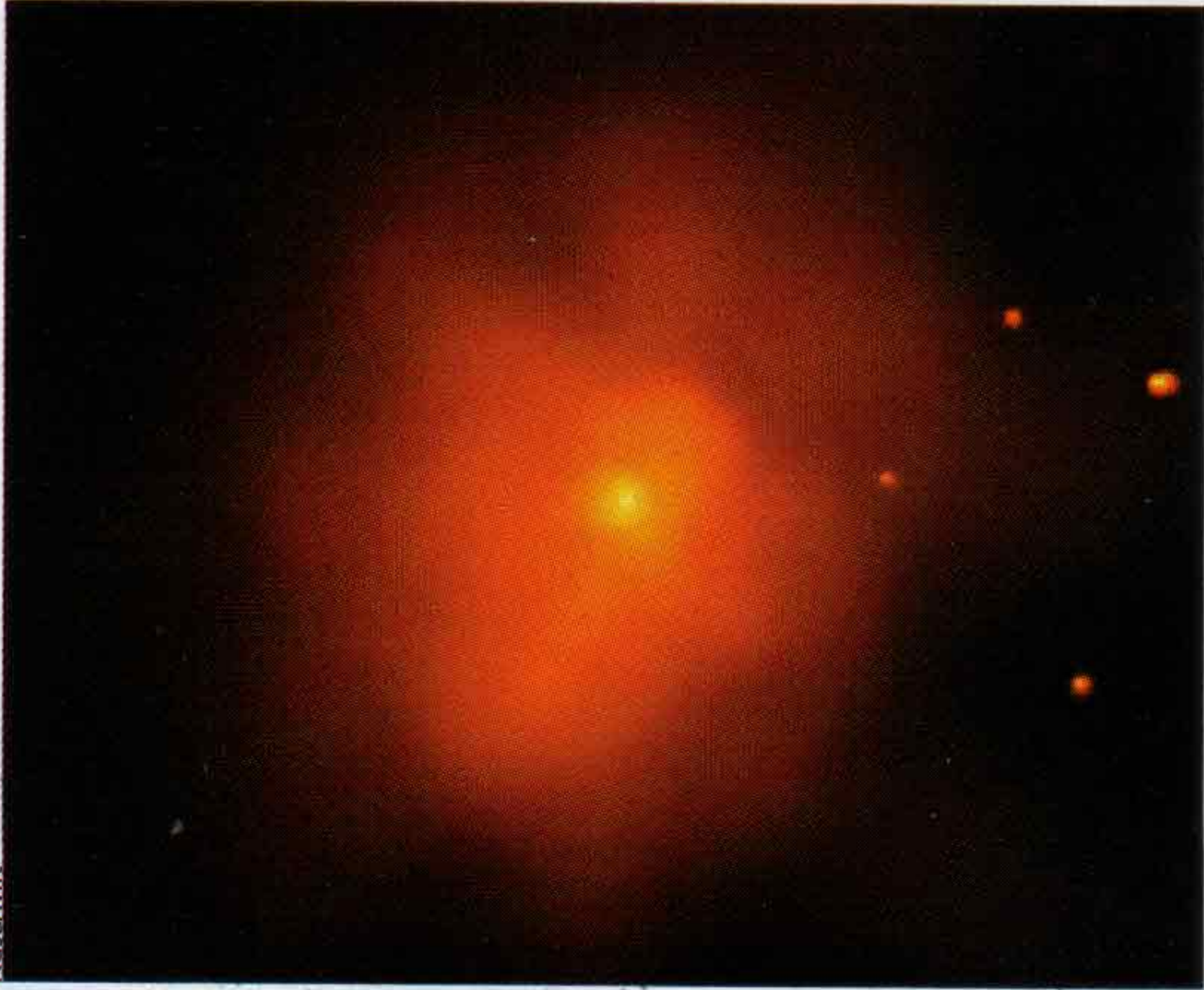
> Zoom

Une lentille gravitationnelle est un objet massif qui, situé sur la ligne de visée, déforme l'image d'un astre en arrière-plan.

Peebles (université de Princeton) et Amos Yahil (université de Tel-Aviv) écrivent : "Il y a de bonnes raisons de croire que la masse de galaxies ordinaires a été jusque-là sous-estimée d'un facteur 10." Un

article qui fait date. Et, aujourd'hui, on a pu confirmer, grâce aux lentilles gravitationnelles (**Zoom**), que ce qui s'applique aux galaxies est aussi valable pour les amas et les superamas de galaxies. Bref, hésitants il y a trente ans, les astronomes en sont maintenant persuadés : il existe dans l'Univers d'immenses quantités de matière

Trop de matière, pas assez de lumière, voilà toute l'affaire !



La masse du gaz chaud détecté par les satellites X autour des galaxies regroupées en amas est bien supérieure à celle des galaxies elles-mêmes. Elle reste cependant inférieure à la masse totale requise pour assurer la cohésion de tout ceci.

inaccessibles à l'observation directe. Et c'est la distribution de cette matière qui assure la cohésion gravitationnelle des grands objets de l'Univers. Sans elle, les galaxies dont les étoiles tournent trop vite s'éparpilleraient dans le cosmos ; les amas, les superamas

> Zoom

Les galaxies se rassemblent en amas qui, eux-mêmes, se réunissent en superamas organisés en filaments. Ils constituent ces fameuses grandes structures qui forment la trame cosmique.

n'existeraient pas, et les grandes structures (**Zoom**) qui sillonnent l'Univers n'auraient jamais vu le jour.

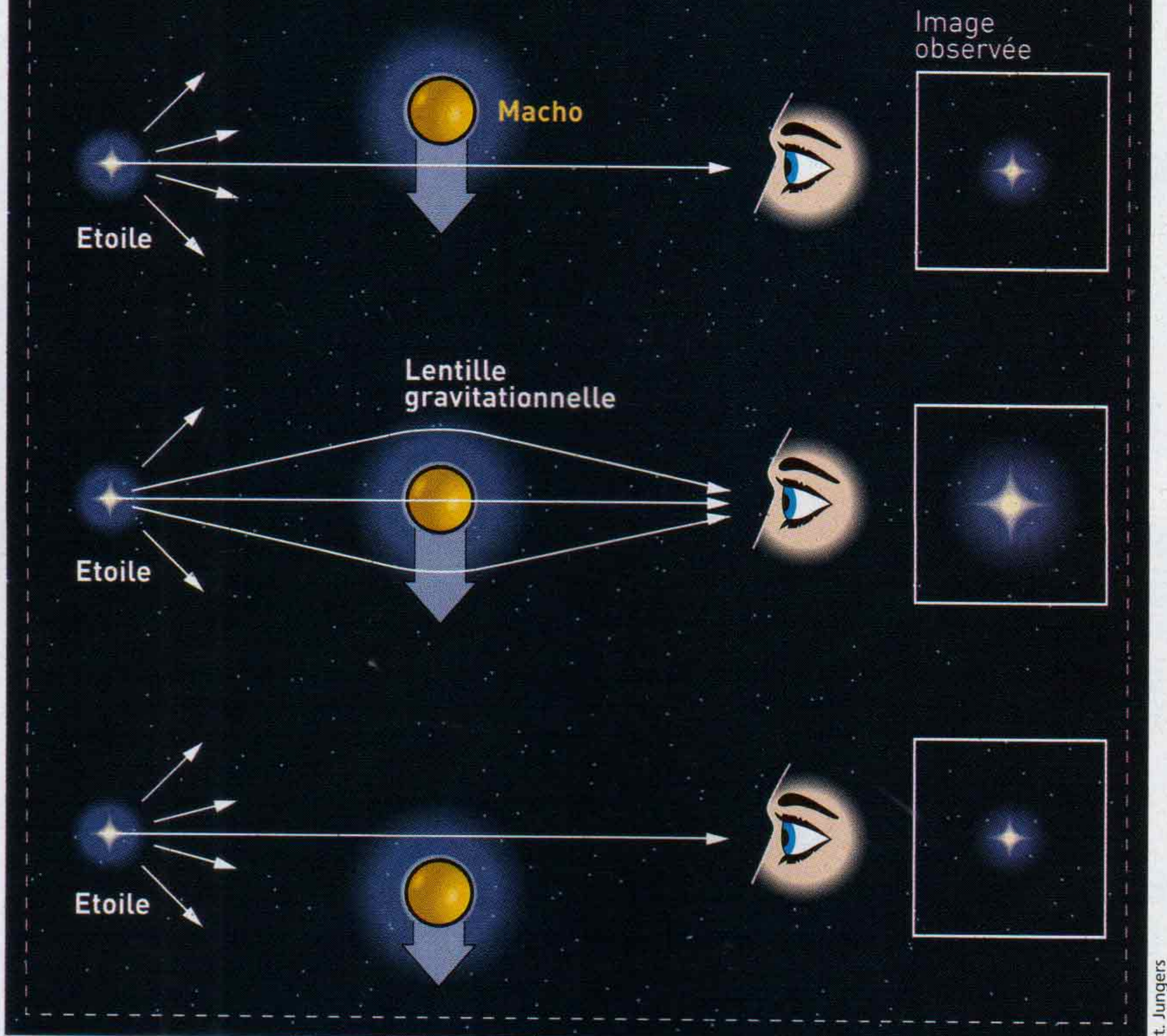
Personne ne sait à quoi ressemble cette face cachée du cosmos. Le plus simple, bien sûr, est de supposer qu'elle n'est rien d'autre que de la matière ordinaire, si peu lumineuse que son rayonnement électromagnétique

échappe aux instruments actuels. Alors le côté obscur de l'Univers ne serait-il constitué que d'atomes, d'électrons, de noyaux où sont confinés protons et neutrons, ou de simples protons et neutrons en goguette ? Ces deux dernières particules, baptisées baryons, pourraient être contenues dans des astres relativement froids et compacts, comme les naines brunes ou

blanches, ou même dans des trous noirs, impossibles à détecter. Cette population hypothétique d'objets massifs compacts, plus connus sous le nom de Machos (Massive Compact Halo Objects), se situerait dans les halos des galaxies. Mais ces Machos sont-ils en nombre suffisant pour faire la loi

dans l'Univers ? Justement non. Ces trois dernières années, plusieurs équipes travaillant sur les projets Éros et Macho ont

Le phénomène de microlentilles



tenté d'identifier les effets de microlentilles (**Zoom**) qui auraient révélé d'éventuels Machos dans le halo de la Voie lactée. De tels événements ont bien été repérés çà et là sur quelques-unes des millions d'étoiles des Nuages de Magellan. Mais franchement, leur nombre est bien insuffisant pour rendre compte de la totalité de la composante sombre de notre galaxie.

L'énigme s'approfondit encore lorsqu'on s'inquiète de la quantité de matière pro-

duite dans l'Univers au cours des premières minutes du big bang. En théorie, elle dépend du rapport entre l'abondance, longtemps controversée, de tel ou tel élément

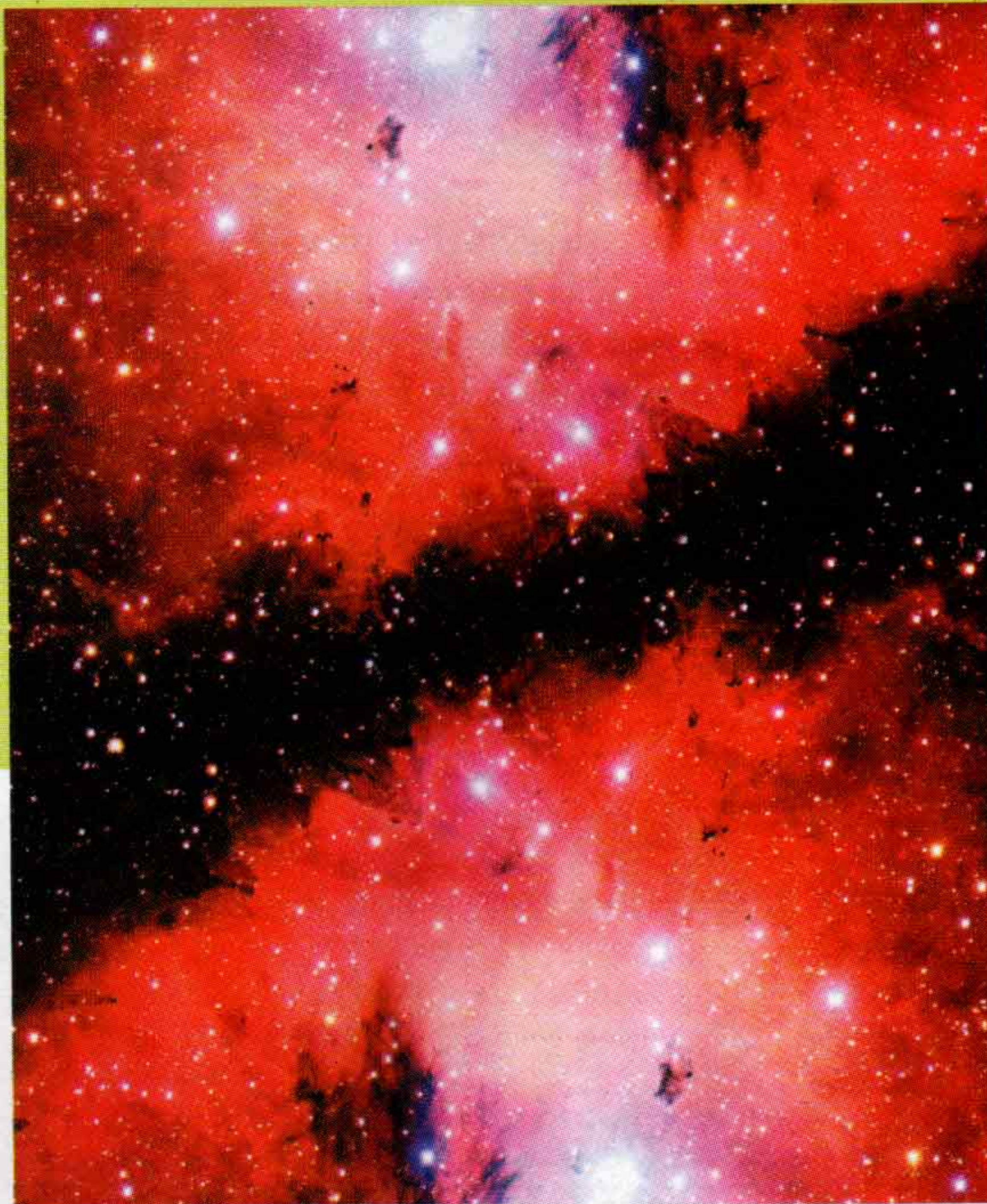
Les microlentilles gravitationnelles (en haut) provoquent l'amplification de la lumière d'une étoile située lors de l'interposition d'un objet massif. Cette technique a révélé la rareté des Machos de la Voie lactée. En revanche, les arcs gravitationnels autour des galaxies des amas (en bas) trahissent l'abondance de matière sombre.

Des mondes à l'envers

Et si la matière sombre n'existait tout simplement pas ? Il s'est bien trouvé quelques astrophysiciens pour l'imaginer. Parmi eux, l'Israélien Mordechai Milgrom a énoncé dès 1983 une théorie connue sous le nom de Mond (Modified Newtonian Dynamics). Il y explique la rotation des galaxies en supposant que la gravitation diminue moins vite avec la distance que ne le prévoit l'attraction newtonienne. Du coup, pas besoin d'avoir recours à la matière sombre. Mais le prix à payer est exorbitant : il faudrait renoncer à la plupart des principes fondateurs de la physique ! D'autres chercheurs conservent l'idée de la matière sombre, mais lui supposent une nature inédite. C'est le cas, en Australie, de Robert Foot et Ray Volkas, qui imaginent que chaque particule de matière ordinaire possède un double : une particule miroir, au rôle un peu analogue à celui d'une antiparticule, mais pour laquelle ce n'est plus la charge électrique qui est opposée, mais une autre grandeur : la parité. Il existerait ainsi, superposé au nôtre, un second monde,

composé de galaxies, d'étoiles, de planètes invisibles, et qui communiquerait avec le nôtre seulement par la gravitation... Défrichée indépendamment, la piste suivie par Jean-Pierre Petit, à l'observatoire de Marseille, apparaît comme un élargissement des idées de Foot et Volkas. Elle conduit elle aussi à dupliquer l'Univers matériel, en suscitant l'existence d'un monde qui serait non plus le miroir, mais le jumeau du nôtre. La grande différence est que les particules gémellaires, toujours invisibles comme on l'attend de la matière sombre, devraient aussi avoir une masse négative, et leurs effets gravitationnels sur les particules ordinaires seraient alors répulsifs. Peut-être, estime le chercheur, une manière d'expliquer la présence de masses sombres détectées par l'optique gravitationnelle et l'expansion accélérée de l'Univers.

L'Univers a-t-il un double, et celui-ci est-il son jumeau ou son image dans le miroir ? Ou quand l'énigme de la matière sombre sort des sentiers battus...



J.-C. Guillemandre/GHT

tesques impliquées dans les amas de galaxies et que l'on sait de mieux en mieux évaluer. Aujourd'hui donc, la majorité des astrophysiciens acceptent l'idée que nous ne voyons (en chiffres ronds) que 1 % de la matière contenue dans l'Univers. *Grosso modo*, les Machos invisibles, des baryons donc, compteraient pour 9 %. Force est d'admettre que les 90 % restants sont constitués par de la matière sombre non baryonique, c'est-à-dire par des particules dont on ne sait rien...

Enfin, rien, c'est vite dit, car les astronomes ont des ressources. Pour eux, le cosmos, c'est avant tout le terrain de jeu de la gravitation. C'est elle qui agit sur la matière pour constituer la plupart des astres, de la planète au superamas de galaxies. Dans un Univers où 90 % de l'attraction est potentiellement imputable à une composante sombre, il est impossible de ne pas s'interroger sur le commerce que celle-ci entretient avec la gravitation. Ce qui a conduit à caractériser la matière sombre par sa manière de réagir à la gravitation. D'un côté, il y aurait la matière sombre "chaude", par analogie avec un gaz ordinaire dont la

température est fonction de la vitesse d'agitation des molécules qui le composent. Elle serait constituée de particules ultralégères animées de vitesses proches de celle de la lumière. De l'autre, on trouverait de la matière

sombre froide composée de particules un peu plus massives, donc plus lentes.

Décider si la matière sombre est chaude ou froide n'a pas été une mince affaire. À la fin des années 1970, les seules particules stables et non baryoniques connues étaient (et restent) les neutrinos. On leur attribuait en général une masse nulle, mais rien n'interdisait de leur supposer une masse infime. Ils pouvaient donc bien faire office de matière sombre chaude. Cette piste a été abandonnée dès 1984. Lorsqu'ils introduisaient des particules non baryoniques de matière sombre chaude dans leurs modèles de simulation de l'Univers, les astrophysiciens n'arrivaient pas à former les grandes structures dans les délais voulus. Cette soupe chaude avait du mal à s'effondrer sur elle-même sous l'effet de son propre poids dans les temps requis. On peut d'ailleurs le comprendre si l'on remarque que plus une particule est rapide, plus il est difficile à la gravitation de la ralentir pour former ces centres — les halos sombres (**Zoom**) — où

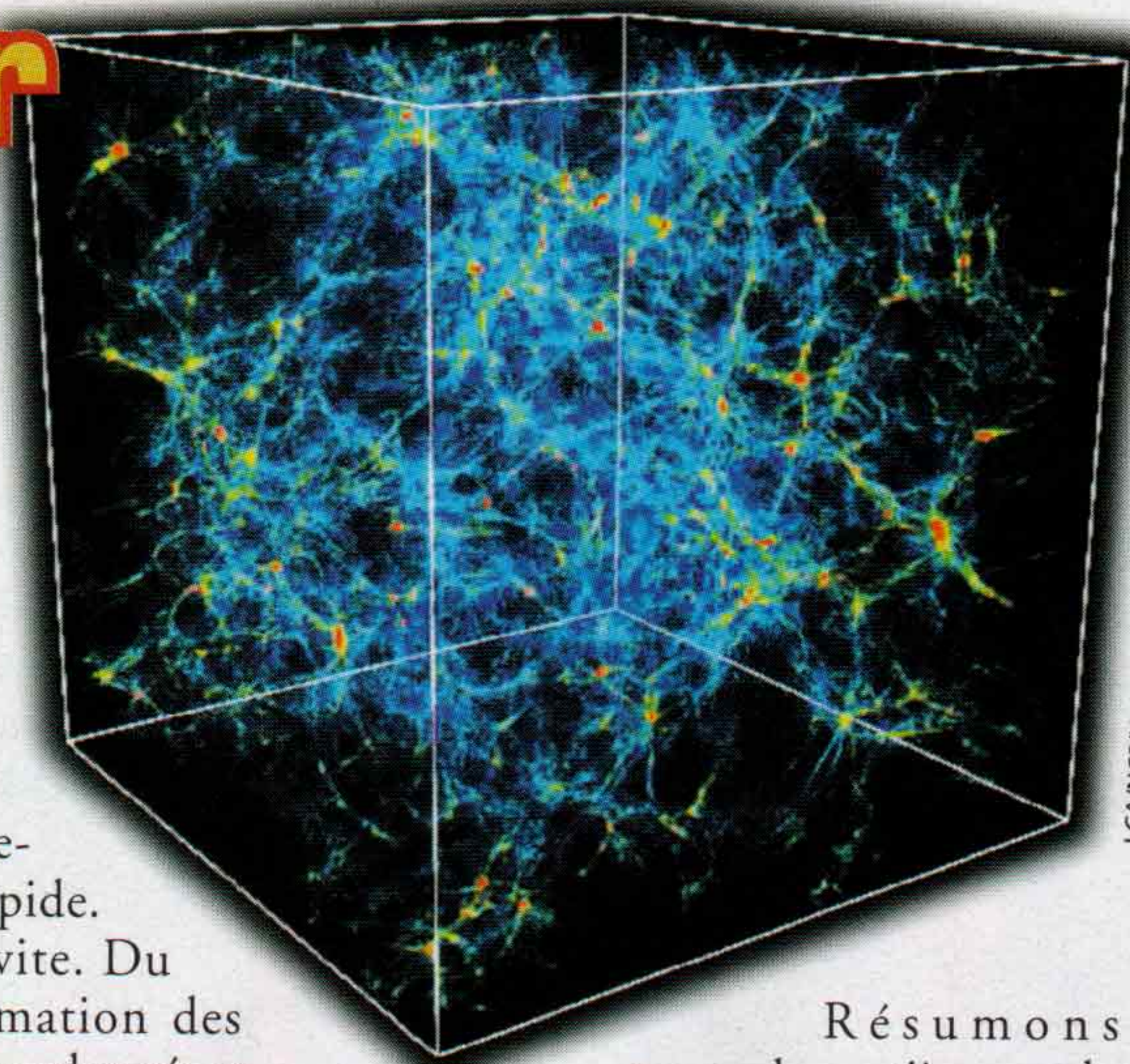
> Zoom

Le halo est une sorte de coquille sphérique qui entoure une galaxie, où l'on ne trouve que de vieilles étoiles et de la matière sombre.

léger produit lors de l'émergence de l'Univers et le nombre bien connu de photons présents dans le fond diffus cosmologique, cette rémanence de l'explosion originelle dont la température avoisine les 3 K. Or, sur la base de mesures d'abondance d'un de ces éléments, le deutérium, il semble désormais acquis que le big bang a fabriqué trop peu de matière. Assez pour rendre compte de la masse des galaxies mais pas suffisamment pour expliquer les masses gigan-

va s'accumuler le reste de la matière. *Exit* donc l'une des deux candidates possibles au titre de "face cachée" de l'Univers.

Il ne restait plus que la matière sombre froide. La piste semblait plus prometteuse. Mais cette fois, tout allait trop vite. Les modèles aboutissaient à un effondrement gravitationnel trop rapide. L'Univers vieillissait trop vite. Du coup, ces modèles de formation des galaxies et des amas ont été abandonnés en 1992. Deux ans plus tard, jamais à court d'imagination, les astrophysiciens ont proposé des modèles mixtes, où un mélange de matière sombre chaude et froide était injecté dans les équations. Les résultats étaient mitigés et les simulations de l'Univers avançaient cahin-caha. Jusqu'en 1998. Cette année-là, les chercheurs, en recoupant des résultats d'observation de supernovae très lointaines et ceux de l'analyse du fond diffus cosmologique, ont montré qu'il existait probablement dans l'Univers trois



LCM/CS/Univ. Illinois

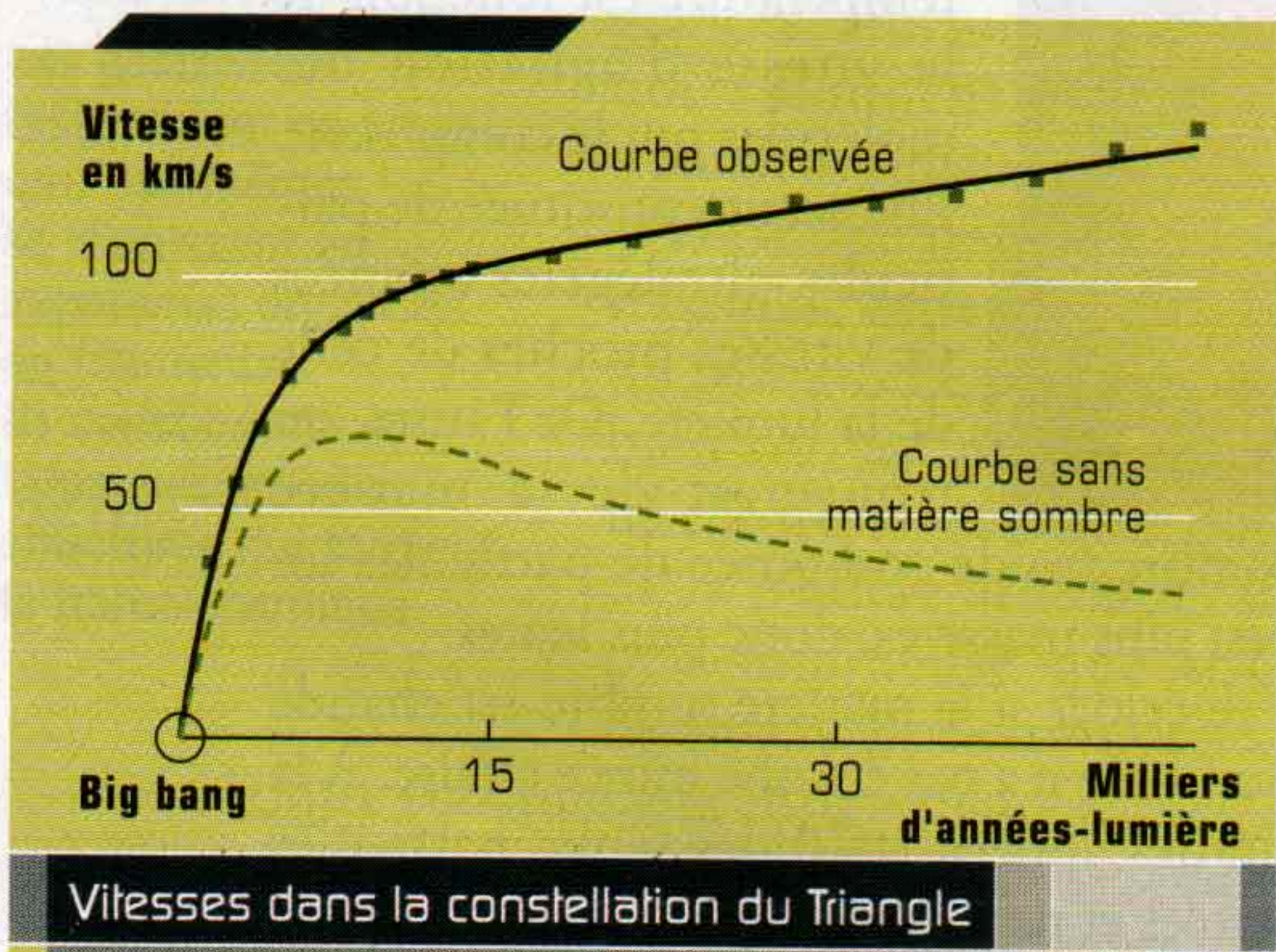
C'est à l'aide de simulations numériques que les astronomes reconstituent l'histoire de la constitution des amas et superamas de galaxies. Là encore, même constat : cela n'est possible qu'en invoquant d'immenses quantités de matière sombre froide.

Résumons-nous : la matière sombre existe bel et bien. Elle représente 99 % de la matière. Un dixième environ pourrait s'expliquer par de la matière ordinaire invisible. Le reste se distribue entre

l'énergie sombre (les deux tiers) et la matière sombre froide (le tiers restant). Toutefois, un gros souci demeure. Il se résume en une phrase : aucune particule connue ne peut jouer le rôle de la matière sombre froide. Du coup, les astronomes ont appelé les physiciens des particules à la rescousse, pour pister et étudier ensemble les candidats les mieux placés. La traque ne fait que commencer... ■

(1) Des résultats toutefois approximatifs en raison du petit nombre de galaxies étudiées et de l'imprécision des instruments de mesure.

SUR LA PISTE des astroparticules sombres



La courbe de vitesse des étoiles et des nuages à la périphérie des galaxies spirales est supérieure à ce qu'elle serait si la seule matière lumineuse était présente. Solution : supposer l'existence d'un halo sombre autour de ces galaxies.

fois moins de matière sombre que ce que l'on croyait. Les deux tiers restants sont à attribuer à une autre composante obscure de l'Univers : une énergie sombre elle aussi (lire à ce sujet l'article p. 28), qui serait responsable de l'accélération de l'expansion cosmique. Aujourd'hui donc cohabiteraient dans l'Univers une matière sombre froide, dont la proportion est revue à la baisse, et une énergie sombre imposante. Forts de ces nouvelles hypothèses, les théoriciens ont de nouveau fait mouliner leurs ordinateurs. Et comme par miracle, les principaux obstacles rencontrés auparavant ont semblé s'aplanir.

L'énigme de la matière sombre oblige les astronomes à se tourner vers la physique des particules. Aujourd'hui, ce sont eux les principaux détectives qui pistent ces astroparticules, composantes majeures de cette face cachée de l'Univers. Partons donc sur les traces de ces objets énigmatiques...

LE défi est de taille. Les astrophysiciens recherchaient désespérément des particules massives, stables, froides, n'entretenant que peu de commerce avec les autres et qui leur permettraient de résoudre l'énigme de la "face cachée" de l'Univers. Ils ne savaient pas trop où se tourner pour dénicher ces oiseaux rares qu'ils avaient regroupés en une famille baptisée Wimps (Weakly Interactive Massive Particles). À bout de ressources, ils ont demandé aux physiciens des

particules de jeter un coup d'œil dans le bestiaire des objets qui peuplent leurs théories pour tenter d'y dénicher quelques bonnes candidates au titre de "miss matière sombre". Une tâche longue et minutieuse, difficile à suivre si l'on ne connaît pas les principes de base avec lesquels travaillent les chercheurs de l'infiniment petit.

Depuis belle lurette, les physiciens ont reconnu que seulement quatre interactions fondamentales (appelées aussi forces) gouvernent le monde et expliquent les différents phénomènes observés dans la nature. La plus manifeste d'entre elles est, bien sûr, la gravitation, qui opère sur tout ce qui existe dans l'Univers, la matière comme l'énergie. Elle fait aussi bien tomber les pommes que tourner les galaxies. En deuxième position vient l'interaction électromagnétique, qui préside aux échanges entre particules porteuses de charges électriques comme les électrons et les protons. Elle règne sur le royaume de la matière lumineuse. Les deux autres forces ne s'observent normalement qu'à l'échelle des noyaux atomiques. L'une, l'interaction forte est responsable de leur cohésion.

L'autre, l'interaction faible a des effets très subtils. Elle est impliquée, entre autres, dans la désintégration radioactive et les transmutations nucléaires se déroulant au cœur des étoiles.

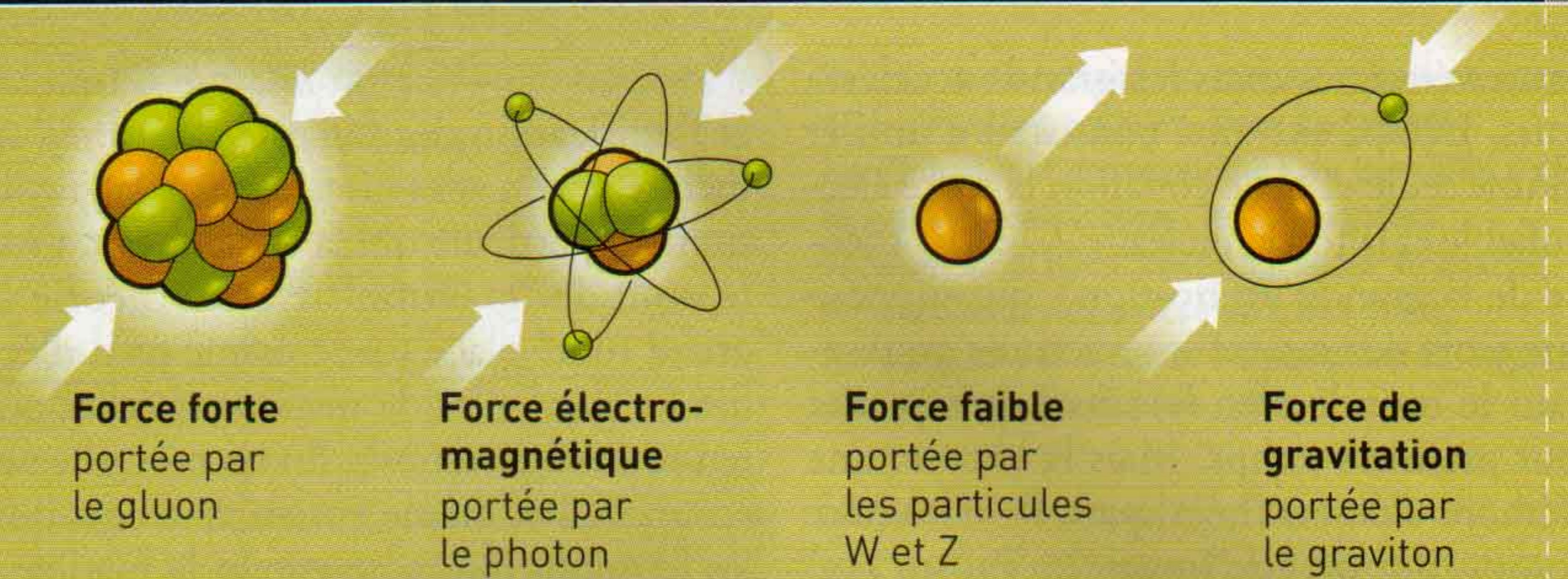
Trois de ces interactions (laissons pour l'instant la gravité de côté) sont coulées dans le même moule : elles reposent sur les principes de la physique quantique (**Zoom**) et fondent le modèle standard des particules, où chacune d'entre elles occupe une place précise (voir tableau). Dans ce modèle, on distingue d'une part des objets bien matériels, des briques élémentaires : les particules que leur comportement classe dans une famille que les physiciens nomment les fermions.

D'autre part, on trouve des particules médiatrices des interactions — ou porteuses de force —, appartenant, elles, à la famille des bosons. Elles représenteraient en quelque sorte le ciment qui lie plus ou moins solidement les particules de matière entre elles. Prenons l'exemple d'un atome d'hydrogène : son noyau comporte un proton où se pressent trois quarks (particules de matière) maintenus ensemble par un boson, la particule médiatrice de l'interaction forte, baptisée ici gluon. L'interaction forte qui affecte les quarks (ils sont au nombre de six) compte ainsi huit bosons-gluons médiateurs. En ajoutant un électron (particule de matière), on obtient l'atome qui émettra un photon (le boson qui véhicule l'interaction électromagnétique).

Mais à l'origine, aux tout premiers temps après le big bang, les physiciens étaient persuadés que ces quatre interactions étaient unifiées, qu'elles n'en faisaient qu'une. Une seule interaction qui s'est brisée au fur et à mesure du refroidissement de l'Univers — on parle alors de rupture de symétrie (voir dessin). Quatre forces distinctes ont émergé. La gravitation, suppose-t-on, s'est séparée des autres en premier alors que l'Univers n'était âgé que de 10^{-43} seconde et que sa température avoisinait les 10^{32} K. Puis, l'interaction forte et l'interaction faible ont dû se scinder en deux entités distinctes alors que le cosmos n'avait que 10^{-34} seconde et que sa température frôlait les 10^{27} K. Le divorce suivant eu lieu un peu plus tard. La force électromagnétique et l'interaction faible ont décidé de vivre chacune de leur côté. Le monde naissant comptait 10^{-10} seconde et bouillonnait à 10^{15} K. Une belle théorie, esthétique en

diable, baptisée "théorie du grand tout" ou plus scientifiquement "théorie de la supersymétrie" (**Zoom**). Mais pour l'élaborer et la rendre cohérente, les physiciens ont dû inventer et inclure dans leurs modèles une multitude de particules dont ils n'avaient jamais vu l'ombre d'une manifestation. Pas une seule petite preuve ne venait étayer l'élégante construction. Lorsqu'en 1964, les trois physiciens Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg démontrent que la force électromagnétique et la force faible sont bien que les deux facettes d'une même entité, bapti-

Les quatre forces qui gouvernent le monde



Petit dictionnaire des particules élémentaires

Matière	Atome	Noyau	Proton
FERMIONS	LEPTONS	QUARKS	
1ère famille (matière stable)	électron, neutrino électron	bas (down), haut (up)	
2e famille	muon, neutrino muon	étrange (strange), charme (charm)	
3e famille	tau, neutrino tau	beauté (beauty), sommet (top)	
BOSONS	autres bosons (hypothétiques)		
Photon, Bosons intermédiaires (Z ⁰ , W ⁺ , W ⁻), Gluons	Gravitons, Higgs, Axions		

St. Jungers

La matière telle que nous la connaissons se réduit en dernière analyse une poignée de particules. Les particules médiatrices des interactions sont classées toutes parmi les bosons. Les fermions qui rassemblent les particules de matière. Les leptons sont sensibles à l'interaction faible et éventuellement à l'interaction électromagnétique ; les quarks sont sensibles aux deux interactions précédentes et à l'interaction forte. L'axion et le boson de Higgs restent hypothétiques. De même que le graviton.

Plusieurs théories (supergravité, supercordes, etc.) sont en fait réunies pour constituer la "théorie du grand tout".

> Zoom

Plusieurs théories (supergravité, supercordes, etc.) sont en fait réunies pour constituer la "théorie du grand tout".

sée depuis interaction "électro-faible", ils sont obligés d'inventer des bosons dont aucun n'avait été repéré. Ce n'est que vingt ans plus tard que Carlo Rubbia et son équipe mettent en évidence trois de ces objets, les bosons intermédiaires (baptisés W⁺, W⁻, Z⁰) — qui étaient à la théorie électro-faible ce que le photon était à l'électromagnétisme.

Un premier pas vers l'unification des forces venait bel et bien d'être franchi. Mais une particule manque toujours à l'appel : le fameux boson de Higgs ou higgsboson, un mastodonte que traquent les spécialistes des

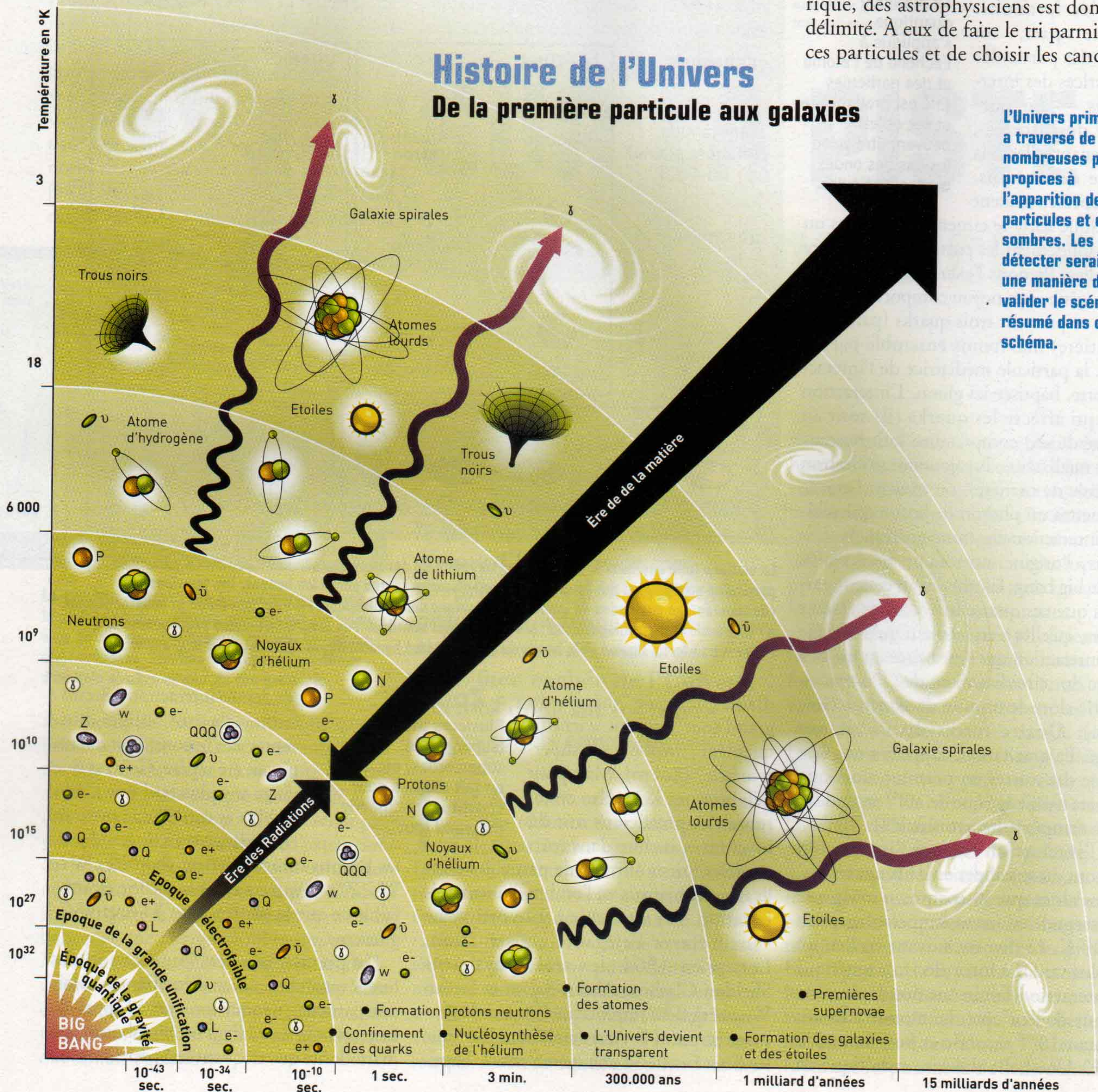
hautes énergies dans les grands accélérateurs. L'étape suivante consistait à unifier en une seule et belle équation la force électrofaible et la force nucléaire. C'est la "théorie de la grande unification", qui suppose que trois des quatre interactions gouvernant le monde n'en faisaient qu'une aux tout premiers temps. Mais là encore, une pléthore d'objets théoriques, de nouveaux bosons, ont dû être imaginés. Pas un seul n'a été repéré. Existents-ils vraiment ? Aujourd'hui, sur le papier uniquement.

Si l'on veut, comme l'ont fait les plus audacieux des théoriciens, grimper encore

d'un cran dans l'harmonisation du monde et l'unification des forces, il faut bien sûr inclure la reine des interactions : la gravitation. La particule qui la véhiculerait a reçu le nom de "graviton". Cette "théorie du grand tout" place sur le même pied d'égalité les particules de matière et celles porteuses des interactions. En un mot, elle unit en un seul et même ensemble d'équations les fermions qui représentent la matière et les bosons qui portent les forces. Au passage, des particules bizarres ont dû être imaginées pour que l'ensemble soit cohérent. Dans ce vivier tout théorique pour l'instant, chaque particule de la famille "matière-fermions" posséderait un superpartenaire dans la famille des "interactions-

bosons". Ainsi, du côté de la matière, à l'électron correspondrait un selectron, aux quarks des squarks, aux neutrinos des sneutrinos, etc. Du côté des bosons, les particules porteuses de force, on remarquerait le photino partenaire du photon, le gluino, du gluon, le gravitino du graviton. On trouverait aussi des particules curieuses, l'axino, supercousin de l'axion, une particule qu'il a fallu inventer à la frontière du modèle standard pour expliquer certains effets prédits mais jamais observés de l'interaction forte, et le neutralino, autre superparticule qui n'est le partenaire direct de personne mais une sorte de cousin germain du côté des fermions.

Le terrain de chasse, entièrement théorique, des astrophysiciens est donc bien délimité. À eux de faire le tri parmi toutes ces particules et de choisir les candidates



L'Univers primordial a traversé de nombreuses phases propices à l'apparition de particules et d'objets sombres. Les détecter serait une manière de valider le scénario résumé dans ce schéma.

Les reliques sombres du big bang

Date	Époque	Wimps et autres particules	Machos et objets "lourds" apparentés
10^{-43} s	Fin de l'ère supersymétrique		Maximons, pyrgons, newtorites
10^{-34} s	Grande unification		Monopôles magnétiques
10^{-30} s	Ère électrofaible	Axions	
10^{-12} s	Formation des protons, neutrons		Trous noirs primordiaux
10^{-5} s			Etrangelets, étoiles à axions
10^{-4} s	Ère radiative (fin de l'antimatière, résorption des défauts topologiques, début de la constitution des noyaux atomiques)	Photinos, gravitinos	
10^{-3} s		Photinos, sneutrinos, neutralinos, axinos, neutrinos lourds	
1 s		Neutrinos	

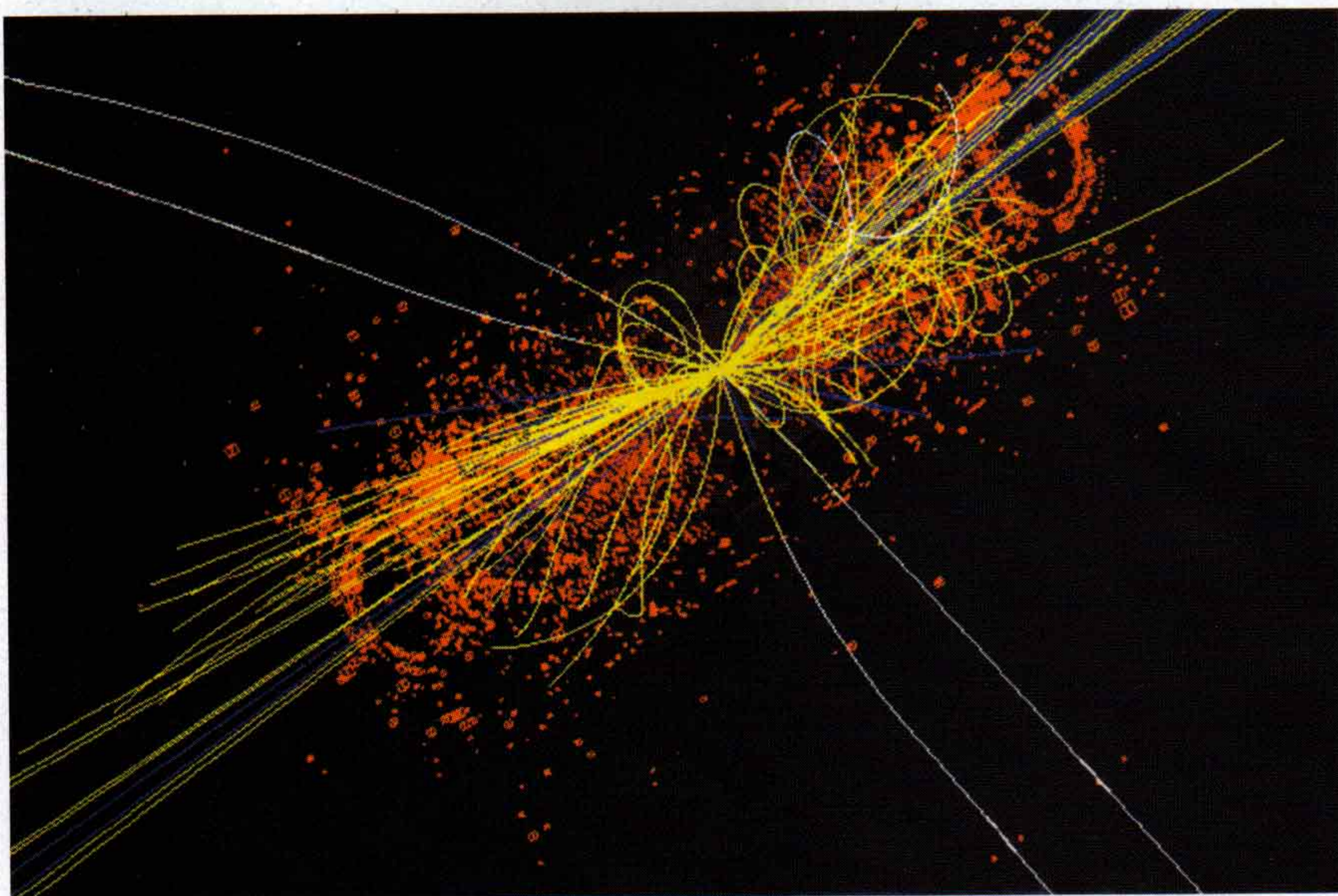
Pour la matière sombre, tout s'est joué au cours de la première seconde. Dans ce tableau, les Wimps font presque figure de banalités à côté des exotiques Machos : les étrangelets seraient ainsi d'immenses agrégats de quarks, les maximons des sortes de trous noirs, les pyrgons des bizarreries possibles si l'espace a plus de trois dimensions, etc.

instables. Il ne reste plus guère de choix aux astrophysiciens. Il leur faut trouver les postulants idéals dans le bestiaire des particules de la théorie du "grand tout". Des expériences conduites au LEP (Large Electron Positron Collider) du Cern semblent aujourd'hui disqualifier le sneutrino. Le

Deux candidats se détachent : l'axion et le neutralino

gravitino et l'axino, avec leur masse comparable à celle de l'électron, pourraient peut-être constituer au mieux une matière sombre tiède. Au hit-parade des citations dans les articles spécialisés, reste le neutralino, qui devance même l'axion dont il a toutes les qualités plus une masse conséquente, bien supérieure à celle du proton. Ces deux postulants ne sont pas des adversaires. Tous les deux pourraient contribuer de concert à cette improbable matière sombre froide. Ils y côtoient peut-être les photinos ou les higgsinos.

À quoi ressemblera vraiment cette extraordinaire armée de Wimps qui relègue les atomes et les particules qui nous constituent au rang d'anecdote dans la grande symphonie cosmique ? Pour le savoir, il faudrait pouvoir fabriquer quelques-uns des énigmatiques membres de la famille dans la prochaine génération d'accélérateurs ou parvenir à les détecter dans les rayons cosmiques. À ce jour, les résultats sont négatifs. De quoi décourager certains qui vont même jusqu'à nier l'existence de la matière sombre. D'autres confèrent à celle-ci une nature encore plus exotique que celle qu'elle a déjà. Des approches assurément fascinantes, mais on ne peut pas dire, pour l'instant, qu'elles résolvent mieux les mystères de la construction de l'Univers que le modèle à matière sombre froide. La prolifération des suppositions a au moins le mérite de nous rappeler ce qu'est le statut actuel de la matière sombre, celui d'une hypothèse, et il le restera tant qu'aucune particule sombre n'aura été identifiée. ■



Voici à quoi pourrait ressembler la création d'un higgsoson dans un accélérateur de particules. Mais il pourrait en naître aussi de la rencontre de neutralinos piégés par le Soleil. Un tel phénomène serait suivi d'une émission de neutrinos dotés d'une énergie caractéristique. Leur détection confirmerait l'existence du higgsoson, et fournirait aussi une première identification de matière sombre...

qui répondent le mieux à leurs critères de choix — masse, froideur, stabilité — et dignes de recevoir le titre de "face cachée de l'Univers". Pour ce qui est du modèle standard, tous les éléments prédits ont été identifiés. Depuis 1995, date de la découverte du dernier des quarks, il affiche complet. Et on n'y trouve aucune particule massive et sombre qui pourrait prétendre à la couronne "matière noire". On a songé un temps aux neutrinos mais, en définitive, ils

ont été disqualifiés en raison d'abord de leur température élevée et ensuite de leur légèreté. Les chercheurs se sont donc penchés sur les particules issues de l'unification de la force électromagnétique et de la force faible : le higgsoson par exemple ferait-il un bon postulant ? Après tout, il est massif. Mais il a un problème rédhibitoire : il est instable. Et une particule liée à l'interaction forte comme l'axion peut-elle postuler ? Bien qu'il fasse figure de poids plume, il n'a jamais été chauffé et peut donc sembler être une particule de matière sombre froide idéale. Ouf ! en voilà au moins un.

D'autres candidates sérieuses ont-elles pu apparaître dans les équations de la "grande unification", le stade suivant de l'unification ? Eh bien justement non. Aucune ne fait l'affaire. Toutes sont trop