

d'années). Si l'on tient maintenant compte de l'attraction gravitationnelle de la matière, on calcule que les objets se déplaçaient plus vite dans le passé, et que leurs positions actuelles sont donc atteintes plus rapidement que si leur vitesse avait été constante. Cette nouvelle hypothèse réduit encore d'un tiers l'âge estimé, ce qui aggrave la contradiction.

Au cours des 70 dernières années, les astronomes ont affiné leur détermination de la vitesse d'expansion, mais ils n'ont pas réussi à éliminer la difficulté. Avec le lancement du télescope spatial *Hubble* et le développement de nouvelles techniques d'observation, les mesures de la constante de Hubble de ces dix dernières années (entre 50 et 100 kilomètres par seconde et par mégaparsec) commencent finalement à converger. Selon l'une des dernières estimations, la valeur de la constante de Hubble serait comprise entre 65 et 81, avec une valeur la plus probable égale à 73 kilomètres par seconde et par mégaparsec (voir *L'expansion de l'Univers*, par Wendy Freedman, in *Pour la Science*, janvier 1993). Ces résultats placent la limite supérieure sur l'âge d'un univers plat à environ dix milliards d'années.

La crise de l'âge

Cette valeur résout-elle les conflits? Hélas non, car les astronomes observent des objets ayant plus de dix milliards d'années. Les amas globulaires sont parmi les objets les plus anciens de notre Galaxie. Ces groupes denses d'étoiles situés pour la plupart à sa périphérie se sont probablement formés avant le reste de la Voie lactée. En se fondant sur la vitesse à laquelle ces étoiles consomment du combustible nucléaire, on estime que leur âge est compris entre 15 et 20 milliards d'années. C'est plus que les dix milliards annoncés!

En 1995, afin de déterminer si ce conflit d'âge provenait de la cosmologie ou de la modélisation stellaire, nous avons réévalué l'âge des amas globulaires. Nous avons conclu que les amas les plus vieux avaient jusqu'à 12,5 milliards d'années, ce qui

Résumé des valeurs déduites de la densité de matière cosmique

Observation	$\Omega_{\text{matière}}$
Âge de l'Univers	< 1
Densité de protons et de neutrons	0,3-0,6
Amas de galaxies	0,3-0,5
Évolution des galaxies	0,3-0,5
Fond diffus cosmologique	≤ 1
Supernovae de type Ia	0,2-0,5

5. LES MESURES de la contribution matérielle à Ω sont à peu près concordantes (on note Ω le quotient de la densité mesurée et de la densité critique ; $\Omega = 1$ correspond à un univers plat). Bien que chaque type de mesures soit contestable, la plupart des astronomes acceptent aujourd'hui que la matière seule ne rende pas Ω égal à un. Toutefois, d'autres formes d'énergie, comme la constante cosmologique, pourraient y contribuer.

contredisait toujours l'âge d'un univers plat, dominé par la matière.

Voici deux ans, le satellite *Hipparcos* de l'Agence spatiale européenne mesura les positions précises de plus de 100 000 étoiles ; leurs distances, ainsi que celles des amas globulaires, furent réévaluées. Ces nouvelles mesures ont conduit à recalculer l'âge des étoiles, car les nouvelles luminosités absolues, déduites des distances, correspondent à des vitesses différentes de consommation du carburant nucléaire par les étoiles et, donc, à des durées de vie différentes de celles qui avaient été calculées. Compte tenu des erreurs d'observation, il semble maintenant que les amas globulaires pourraient avoir seulement dix milliards d'années, ce qui serait compatible avec les âges cosmologiques.

Toutefois, cet accord marginal est inconfortable, parce qu'il requiert que les déterminations soient chacune à l'extrémité de l'intervalle possible. Pourquoi, alors, ne pas admettre que nous ne vivons pas dans un Univers plat dominé par la matière? Si nous acceptons de vivre dans un Univers peu dense, ouvert, et dont la décélération serait moins rapide, les difficultés s'amenuiseraient. Toutefois, même ainsi, l'âge de l'Univers n'est supérieur à 12,5 milliards d'années que si l'Univers est dominé non pas par la matière, mais par une constante cosmologique : la force

répulsive résultante accélérerait l'expansion ; les galaxies s'éloigneraient plus lentement qu'aujourd'hui, mettant plus de temps pour atteindre leurs séparations actuelles, de sorte que l'Univers serait plus vieux.

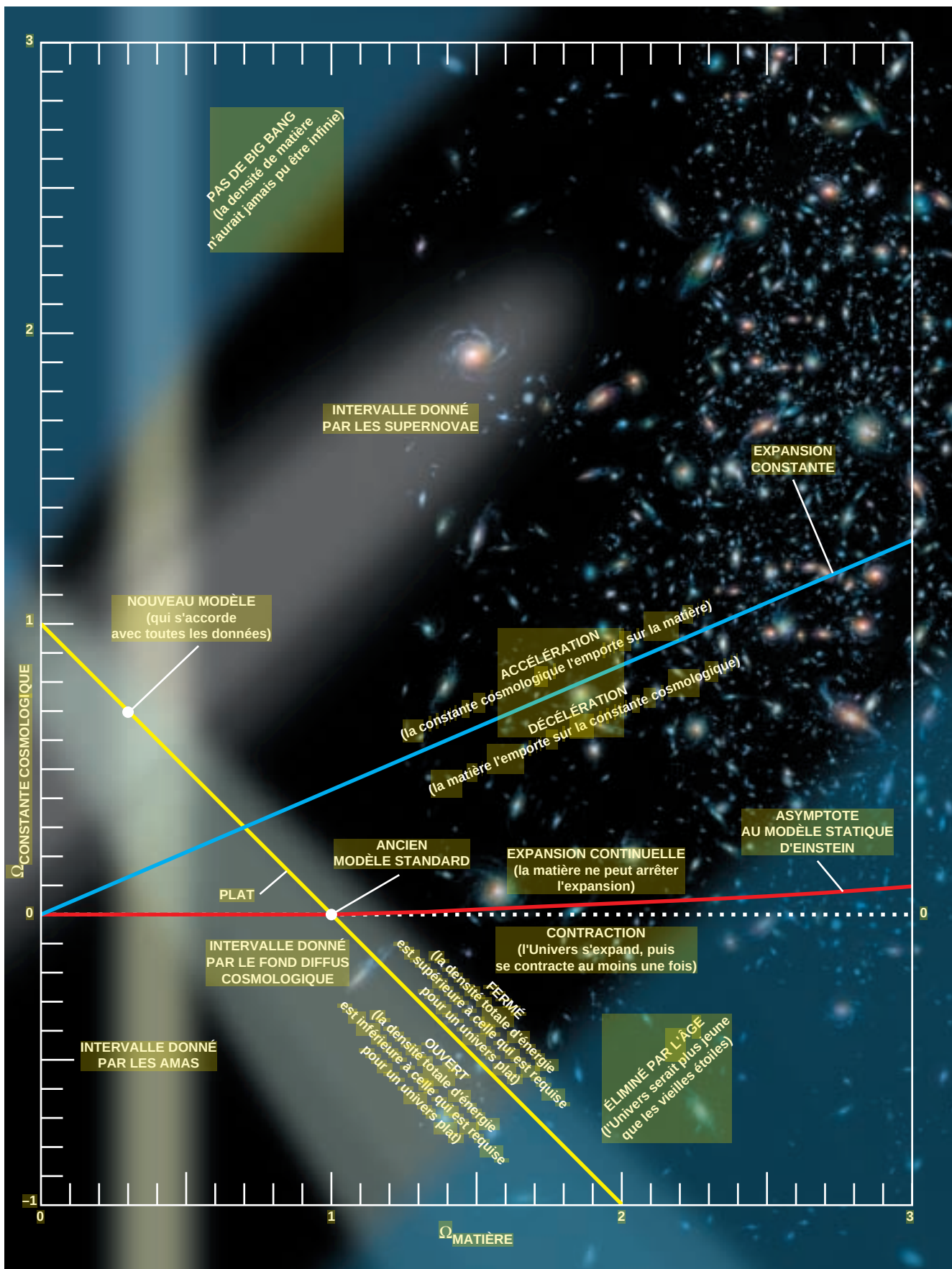
Alors que les cosmologistes évoquaient ces idées, d'autres observations ont contribué à ébranler l'édifice théorique classique. Notamment, les astronomes ont sondé des régions toujours plus grandes du cosmos et mieux recensé la matière qui s'y trouvait. Il est aujourd'hui clair que la quantité totale de matière est insuffisante pour que l'Univers soit plat.

Pour obtenir un recensement précis de la matière de l'Univers, les astronomes doivent estimer la synthèse des éléments légers au cours du Big Bang. Les éléments légers

du cosmos – l'hydrogène, l'hélium et leurs isotopes plus rares, tel le deutérium – furent créés dans l'Univers primordial en quantités déterminées par le nombre de protons et de neutrons initialement présents. Ainsi, en comparant les proportions des divers isotopes, les astronomes déduisent la quantité totale de matière ordinaire produite peu après le Big Bang (il pourrait exister, bien sûr, une autre matière qui ne se composerait pas de protons et de neutrons).

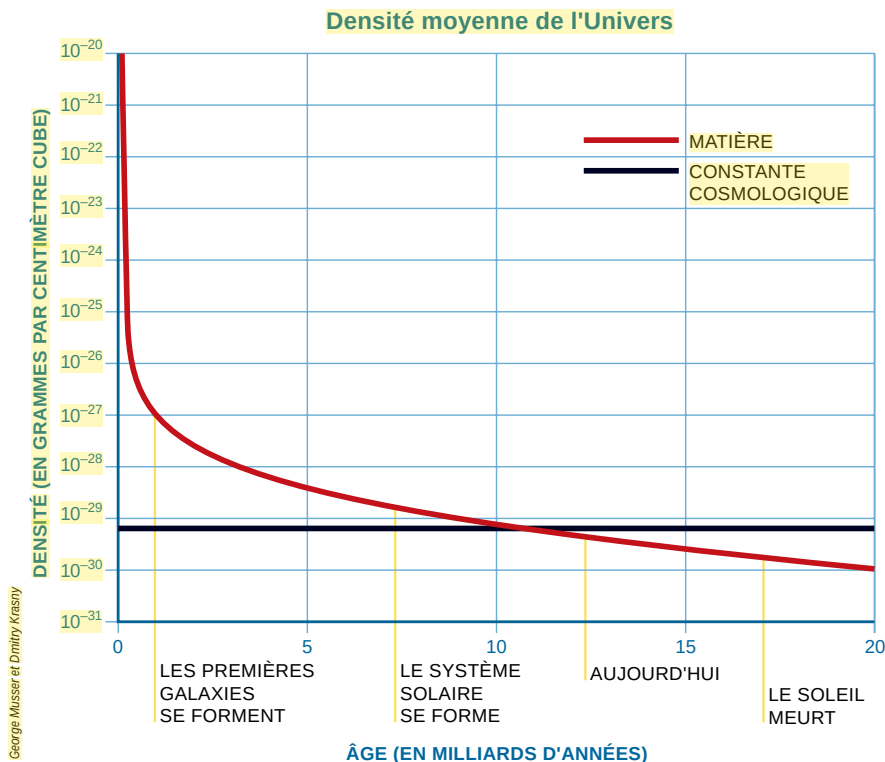
Ces estimations progressèrent en 1996, lorsque David Tytler, Scott Burles et leurs collègues de l'Université de San Diego déterminèrent la quantité primordiale de deutérium en mesurant l'absorption de la lumière d'un quasar par des nuages d'hydrogène intergalactiques. Comme ces nuages n'ont jamais contenu d'étoiles, leur deutérium ne peut avoir été synthétisé que lors du Big Bang. L'étude de ce deutérium montre que la densité moyenne de matière ordinaire est seulement quatre à sept pour cent de la quantité totale nécessaire pour que l'Univers soit plat!

Les astronomes ont également évalué la densité de matière en étudiant les plus gros objets gravitationnellement liés de l'Univers : les amas de galaxies. Ces groupes de centaines de galaxies renferment l'essentiel de la matière visible. Ils sont principalement composés d'un gaz intergalactique



6. CE DIAGRAMME montre comment l'évolution de l'Univers dépend de deux quantités cosmologiques clés : la densité moyenne de matière (axe horizontal) et la densité d'énergie due à la constante cosmologique (axe vertical). Leurs valeurs, données ici en unités cosmologiques standards, ont trois effets distincts. D'abord, leur somme (qui représente l'énergie cosmique totale) détermine la géométrie de

l'espace-temps (ligne jaune). Ensuite, leur différence (qui représente l'intensité relative de l'expansion et de la gravité) détermine comment la vitesse d'expansion varie au cours du temps (ligne bleue). Ces deux effets ont été sondés par des observations récentes (régions plus claires). Le troisième, un équilibre des deux densités, détermine l'évolution de l'Univers (ligne rouge). Au total, les possibilités sont très nombreuses.



7. LA COÏNCIDENCE COSMIQUE est l'un des nombreux mystères cosmologique. La densité moyenne de matière ordinaire décroît quand l'Univers se dilate (en rouge). La densité équivalente représentée par la constante cosmologique est fixe (en noir). Pourquoi alors, malgré ces comportements opposés, ont-elles toutes les deux presque la même valeur aujourd'hui ? S'agit-il d'un hasard, d'une nécessité pour que la vie ait pu exister ou l'indication d'un mécanisme encore inconnu ?

chaud, qui émet des rayons X. La température de ce gaz, déduite du spectre des rayons X, dépend de la masse totale de l'amas : plus les amas sont massifs, plus la gravité est forte, de sorte que la pression et la température sont élevées ; les amas massifs sont ainsi plus chauds. En 1993, après l'étude de plusieurs amas, des astronomes allemands avaient déduit que la matière lumineuse représentait seulement 10 à 20 pour cent de la masse totale des objets. Ces résultats, combinés aux mesures du deutérium, impliquent que la densité totale de la matière dans les amas – incluant les protons et les neutrons, ainsi que des particules plus exotiques comme certains candidats pour la matière sombre – est au plus égale à 60 pour cent de celle requise pour que l'Univers soit plat.

Un troisième ensemble d'observations, qui concerne aussi la répartition de la matière aux échelles les plus grandes, conforte l'idée que l'Univers ne contient pas assez de matière pour être plat. Aucune partie de la cosmologie n'a probablement autant progressé au cours des 20 dernières années que la compréhension de l'origine et de la nature des structures cosmiques.

Les astronomes ont longtemps supposé que les galaxies se sont formées à partir de petites concentrations de matière dans l'Univers jeune, mais on ignorait comment ces concentrations initiales étaient apparues. La théorie de l'inflation, dans les années 1980, fut le premier mécanisme plausible : elle stipulait une amplification des fluctuations quantiques à des dimensions macroscopiques.

Les simulations numériques de la croissance des structures après l'inflation ont montré que, si la matière sombre n'était pas composée de neutrons et de protons, mais d'un autre type de particules (telles que les WIMP, des particules massives qui interagissent peu avec la matière), de minuscules rides dans le fond diffus cosmologique pouvaient croître et former les structures que nous observons aujourd'hui. De surcroît, avec une densité globale de matière élevée, des concentrations de matière devraient encore évoluer en amas de galaxies. La croissance relativement lente du nombre d'amas de galaxies dans l'histoire récente de l'Univers montre que la densité de matière est inférieure à 50 pour cent de celle qui est requise pour

un Univers plat (voir *Les amas de galaxies*, par Patrick Henry, Ulrich Briel et Hans Böhringer, in *Pour la Science*, février 1999).

Rien ne compte

L'ensemble des observations a finalement vaincu l'*a priori* théorique qui refusait l'introduction de la constante cosmologique. Deux possibilités demeurent : soit l'Univers est ouvert, soit il est rendu plat par une forme d'énergie qui n'est pas associée à la matière ordinaire. Pour savoir quelle est la solution, les astronomes veulent mesurer le fond diffus cosmologique avec précision, car la mesure des fluctuations de la température du fond diffus renseigne sur la géométrie de l'Univers. Selon les premières indications apportées par le satellite *COBE* et par des détecteurs embarqués sur des ballons, l'Univers serait plat. Par ailleurs, pour la première fois, les mesures de la lumière émise par les supernovae lointaines indiquent que l'expansion de l'Univers accélère ; la constante cosmologique que l'on estime alors correspond à celle que l'on déduit d'autres observations (voir *Des supernovae pour sonder l'espace-temps*, par Craig Hogan, Robert Kirshner et Nicholas Suntzeff, page 36). Le fond diffus cosmologique, qui reflète la structure de l'Univers peu après le Big Bang, révèle la géométrie de l'Univers, qui dépend de la densité totale d'énergie, quelle que soit sa forme, tandis que les supernovae sondent directement le taux d'expansion de l'Univers, qui dépend de la différence entre la densité de matière (qui ralentit l'expansion) et la constante cosmologique (qui peut l'accélérer).

Ainsi les cosmologistes estiment que la constante cosmologique contribuerait pour 40 à 70 pour cent de l'énergie nécessaire pour rendre l'Univers plat (voir la figure 6). Soyons pourtant prudents : il est dit, dans la communauté des cosmologistes, qu'une théorie dont les prédictions confirment toutes les observations est probablement fautive, ne serait-ce que parce que certaines mesures ou certaines prédictions sont sans doute erronées. Sans attendre, les théoriciens se précipitent déjà pour comprendre ce qui aurait été impensable voilà 20 ans : l'existence d'une constante cosmologique positive,