



← L'amas de la Balle résulte de la collision entre deux amas de galaxies. La coloration en rose met en évidence le choc entre particules de matière ordinaire; chauffées, elles émettent des rayons X détectables. Les zones en violet représentent la matière noire, dont la présence a été constatée grâce aux lentilles gravitationnelles. Zéro émission de rayons X: la matière noire est passée comme un fantôme.

Les joueurs normaux se percutent et sont considérablement ralentis. La friction provoque un échauffement général. Mais les fantômes traversent le pack adverse sans être ralentis le moins du monde.

Dans l'«amas de la Balle», le télescope spatial *Hubble* a capturé une image d'une telle collision entre deux amas (voir la photo ci-dessus). La zone en rose à gauche représente la matière visible de l'amas galactique qui va vers la gauche, en d'autres termes l'amas qui vient de la droite. La zone rose à droite montre l'autre amas galactique, qui est arrivé par la gauche et se déplace vers la droite. Sous l'effet de la friction, toute cette matière a été chauffée pendant la collision et a engendré de grandes quantités de rayons X: ce sont ces derniers qui sont représentés en rose. Les zones en violet représentent la matière noire, dont la présence a été détectée grâce aux lentilles gravitationnelles. La coloration violette a ainsi été ajoutée à l'image, alors que les zones en rose correspondent à de la matière ordinaire qui émet des rayons X. Le décalage entre la matière noire (en violet) et la matière visible (en rose) apparaît clairement.

L'UNIVERS DEVIENT TRANSPARENT

De leur côté, les astrophysiciens de la collaboration *Planck* ont déterminé la quantité de matière de l'Univers au moyen d'une autre méthode: en étudiant le fond cosmologique diffus. Avant de résumer ces travaux, remontons aux

premiers temps de l'Univers, à savoir le Big Bang, une explosion massive qui s'est produite il y a 13,8 milliards d'années (voir l'encadré page 98).

Énergie libérée par le Big Bang est d'abord apparue sous forme de rayonnement. Les particules ont commencé à apparaître une fois l'Univers suffisamment refroidi par son expansion. C'est seulement 380 000 ans plus tard, une fois la température descendue jusqu'à (seulement) 6000 °C environ, que les atomes ont commencé à se former, car au-dessus de cette température, ils se brisent. Ce fut un moment critique: l'Univers connut une transition majeure, passant d'une soupe très énergétique de particules chargées à un espace constitué d'atomes neutres, permettant enfin la libre propagation d'ondes électromagnétiques telles que la lumière. À partir de là, l'Univers est devenu transparent, traversé par la lumière. Et celle-ci est toujours présente.

Comment est-ce possible? Il faut comprendre que l'Univers était à l'époque, et est toujours, un immense espace essentiellement vide. Sur Terre, ou sur n'importe quelle étoile, la densité y est bien plus grande, mais les distances entre les astres sont tellement grandes que la densité moyenne de l'Univers ne dépasse pas... 5 protons par mètre cube! Par comparaison, 1 mètre cube d'eau contient 6×10^{29} protons et neutrons, ces deux particules ayant plus ou moins la même masse. Il n'y a donc rien d'étonnant à ce que presque toute la lumière présente

380 000 ans après le Big Bang soit encore en train de voyager dans l'Univers aujourd'hui, faute d'obstacles sur son passage.

Ce rayonnement fossile, ou fond diffus cosmologique, date de cette époque, quand l'Univers n'avait que 380 000 années d'existence. Chez les humains, ce serait l'équivalent de l'âge d'un jour pour une personne centenaire. Un bébé Univers ! Cette lumière fossile se propage depuis lors, et nous atteint de toutes les directions.

DES GRUMEaux... EN COULEUR

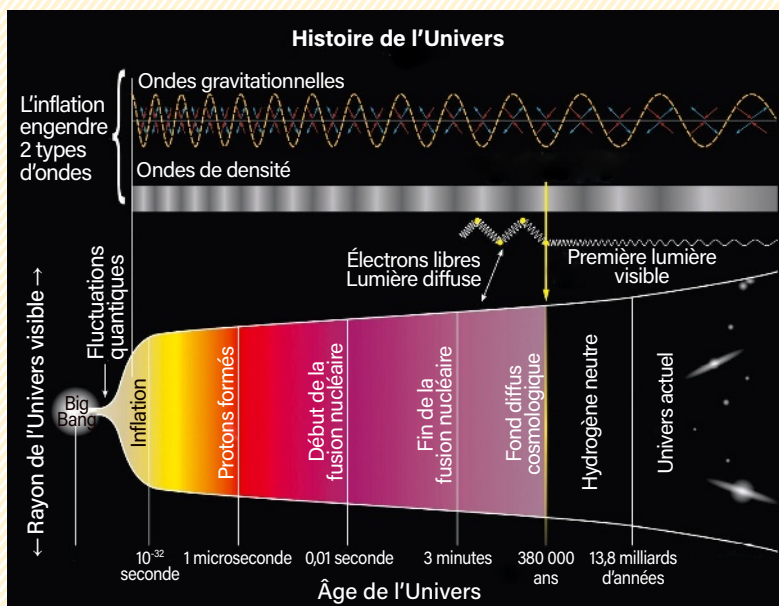
Pour les ondes électromagnétiques telles que la lumière, il y a une correspondance entre la température et le rayonnement qu'un corps émet quand il est chauffé. La lumière rayonnée lorsque l'Univers faisait 6000 °C correspond à la lumière visible, comme celle produite par un morceau de métal chauffé jusqu'à ce qu'il commence

à rougeoier. Pendant l'expansion, l'énergie de l'Univers a été distribuée sur un plus gros volume. Il s'est donc refroidi, comme l'eau chaude d'un verre que l'on verserait dans un volume beaucoup plus grand d'eau froide. Les gouttes d'eau chaude cèdent une part de leur énergie à l'ensemble du liquide, qui au final atteint une température bien inférieure à celle de l'eau chaude initiale.

La température de l'Univers aujourd'hui ne dépasse pas - 270,425 °C, ou, sur l'échelle absolue, 2,725 kelvins. Cela correspond au domaine des microondes. Ainsi, la lumière visible de l'Univers nouveau-né perdure, sous une forme imperceptible à l'œil, mais pas aux capteurs du satellite *Planck* qui ont livré la plus « vieille » image que nous ayons de l'Univers (voir la figure page ci-contre). Elle nous montre à quoi il ressemblait dans son jeune âge et nous apporte des informations importantes sur la manière dont les particules ont réussi à rester groupées dans

Les débuts de l'Univers

Un instant après le Big Bang, la température de l'Univers a atteint le niveau invraisemblable de 10^{27} degrés (avouons-le, peu importe qu'ils soient celsius ou kelvin) ne laissant de place pour exister qu'à du rayonnement. Après une phase d'expansion ultrarapide, l'Univers a continué à se dilater, mais à un rythme bien plus lent. Toute l'énergie qu'il contient étant dispersée dans un volume toujours plus grand, il a fini par se refroidir doucement. Son contenu s'est peu à peu matérialisé sous forme de particules (les quarks et les gluons), d'abord trop pleines d'énergie pour se lier ; elles constituaient un plasma quark-gluon. Puis, environ 10^{-10} secondes après le Big Bang, la température fut assez



basse pour que protons et neutrons puissent se former. À ce stade, l'essentiel de l'Univers restait encore sous forme de rayonnement ; les particules de matière apparaissent

et disparaissent. Il fallut encore patienter 380 000 ans pour les premiers atomes, et un bon milliard d'années pour les grandes formations comme les galaxies et les amas.