

POUR LA

Édition française de Scientific American

SCIENCE

HORS-SÉRIE

M 01930 - 106H - F: 7,90 € - RD

FÉVRIER-MARS 2020
N° 106

PROUESSE
**LA PREMIÈRE
PHOTO D'UN
TROU NOIR**

MATIÈRE NOIRE
**TOUS LES
CANDIDATS AU
BANC D'ESSAI**

TROUS BLANCS
**LES SOSIES
DES TROUS
NOIRS**

DÉBAT
**VERS UNE
GRAVITATION
QUANTIQUE**

**« ET SI ON
RÉHABILITAIT
LA CONSTANTE
COSMOLOGIQUE
D'EINSTEIN ? »**

JEAN-PIERRE LUMINET

TROUS NOIRS
MATIÈRE NOIRE
ÉNERGIE SOMBRE

ENQUÊTE SUR L'UNIVERS NOIR

GROUPE POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Révisseuses: Maud Bruguère, Anne-Rozenn Jouble

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

Stagiaire: Lucas Gierczak

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Aëla Keryhuel

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel,
Ingrid Leroy, Charlotte Calament Véronique Marmont,

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Cheffe de produit: Charline Buché

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Secrétariat général: Nicolas Bréon

Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry
et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:
William Rowe-Pirra

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél.: 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements
Pour la Science – 19 rue de l'Industrie – BP 90053
67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (16 numéros)

France métropolitaine: 79 euros – Europe: 95 euros

Reste du monde: 114 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting editor in chief: Curtis Brainard

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressés par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Italie

Taux de fibres recyclées: 0%

« Eutrophisation » ou « Impact sur l'eau »: Ptot 0.008kg/tonne

Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.



10-32-2813 / Certifié PEFC / pefc-france.org



LOÏC MANGIN
Rédacteur
en chef adjoint

L'Univers et les toiles noires

Durant toute sa carrière, il n'a eu de cesse d'explorer les rapports entre le noir et la lumière, de transformer avec eux l'espace et le temps et de faire surgir l'une de l'autre à travers des textures, lisses ou fibreuses. Un cosmologiste? Non, un peintre, Pierre Soulages, qui a eu 100 ans le 24 décembre 2019. Il est célèbre pour son outrenoir, son « noir-lumière », inventé en 1979, à partir d'un tableau qu'il pensait raté. Depuis, il peint avec la lumière réfléchie par les différents états de surface du noir de ses toiles.

Mais ses préoccupations sont bien celles des cosmologistes qui aimeraient faire la lumière sur quelques entités ténébreuses de l'Univers, l'énergie sombre, la matière noire et les trous noirs. Ces derniers, les moins obscurs de la trilogie, ont récemment été sous les feux de l'actualité: entre la première image d'un de ces astres et la détection des ondes gravitationnelles que la fusion de deux trous noirs émet, c'est une nouvelle « lumière » qui est portée sur notre Univers.

Les deux autres, la matière noire et l'énergie sombre, sont plus discrètes. Selon le modèle standard de la cosmologie, la première explique la dynamique des galaxies et des structures à plus grande échelle, tandis que la seconde rend compte de l'expansion observée de l'Univers. Qui plus est, elles représentent à elles deux 95% du contenu de l'Univers. Problème: on ne sait pas – encore – en quoi elles consistent.

Ce numéro dresse l'état de l'art sur les moyens déployés pour résoudre ces mystères. Et les astrophysiciens ne ménagent pas leurs efforts! Nouvelles théories, candidats inédits, projets ambitieux de détecteurs... L'Univers devient alors « une peinture » au sens de Soulages, « un tout organisé [...] sur lequel viennent se faire et se défaire les sens qu'on lui prête. »

Au moment où il inventait l'outrenoir, au réveil d'une nuit agitée par le tableau « raté » de la veille, Pierre Soulages a eu cette phrase: « Le noir avait tout envahi, à tel point que c'était comme s'il n'existait plus. » On souhaite la même épiphanie aux cosmologistes!



SOMMAIRE

POUR LA
SCIENCE
HORS-SÉRIE

N° 106

Février-Mars 2020

TROUS NOIRS, MATIÈRE NOIRE
ÉNERGIE SOMBRE

Enquête sur l'Univers noir

Constituez
votre collection
de *Hors-Séries*
Pour la science
Tous les numéros
depuis 1996

pourlascience.fr



P. 6 Repères

Le côté obscur de l'Univers

P. 10

Avant-propos

JEAN-PIERRE LUMINET

« Je continue à penser que
la constante cosmologique
fait partie intégrante
de la relativité générale
et explique correctement
les choses »



Entretien exclusif avec
l'astrophysicien, romancier,
poète, compositeur...
sur les mystères de l'Univers.



TROUS NOIRS SUPERSTARS

P. 16

**L'épopée
d'une image historique**

Alain Riazuelo

Retour sur une quête longue d'un quart
de siècle: la première photo d'un trou noir.

P. 22

**À l'écoute des ondes
gravitationnelles**

Damir Buskulic et Loïc Villain

Les ondes gravitationnelles ont été détectées
directement pour la première fois fin 2015.

P. 32

Une nouvelle fenêtre sur l'Univers

Olivier Minazzoli

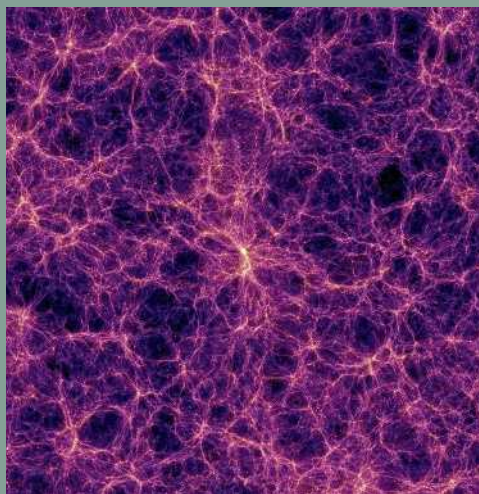
L'analyse des ondes gravitationnelles est
une aubaine pour étudier les trous noirs.

P. 36

Troublants trous blancs

Carlo Rovelli

Les trous blancs? Des sosies inversés des
trous noirs dont ils seraient le destin ultime.



INSAISSABLE MATIÈRE NOIRE

P.46 *Entretien*

« La matière noire pourrait être très différente de ce que l'on pense. Quelque chose de profond nous échappe »

Benoît Famaey

P.50

La grande quête inachevée

Alain Riazuelo

Omniprésente, la matière noire résiste pourtant à toute tentative de détection.

P.56

L'axion, une idée qui a la cote

Leslie Rosenberg

Les axions, produits durant le Big Bang, rendraient compte de la matière noire.

P.64

La piste des trous noirs

Juan García-Bellido et Sébastien Clesse

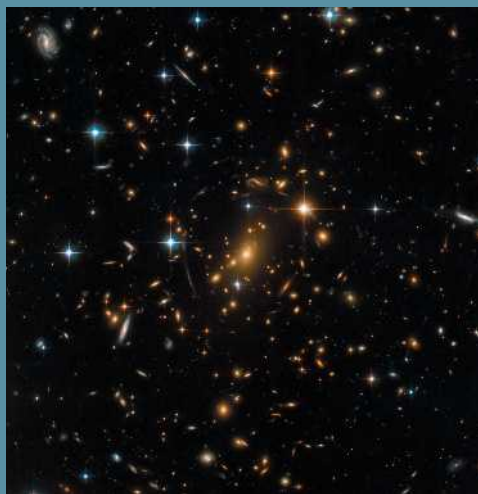
De quoi est faite la masse manquante de l'Univers? Peut-être de trous noirs primordiaux.

P.72

Et les neutrinos cosmologiques !

Alain Riazuelo

Dans la quête de la matière noire, on néglige les neutrinos nés lors du Big Bang.



LES SOUBRESAUTS DE L'ÉNERGIE SOMBRE

P.76

Un problème de vitesse

Natalie Wolchover

Cinq mesures de la vitesse de l'expansion de l'Univers ont été livrées. Toutes différentes!

P.84

À la poursuite de l'énergie sombre

Joshua Frieman

Pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, on sonde les confins du cosmos.

P.92

Indispensable constante cosmologique

Jean-Pierre Luminet

Pour expliquer l'énergie sombre, la constante cosmologique, introduite par Einstein, suffit.

P.100

Vers une nouvelle gravitation ?

Cédric Deffayet

Pour expliquer l'expansion de l'Univers, les théoriciens explorent plusieurs voies.

P.108

À lire en plus



RENDEZ-VOUS

par Loïc Mangin

P.110

Rebondissements

CRISPR-Cas9: première application en cancérologie • Un jeu de taquin bien taquin • Remonter le cours du plastique • Alzheimer, une nouvelle cause identifiée

P.114

Données à voir

Les cartes de Robert Szucs révèlent tous les bassins versants du monde, et en couleurs.

P.116

Les incontournables

Des livres, des expositions, des sites internet, des vidéos, des podcasts... à ne pas manquer.

P.118

Spécimen

L'infamale génétique du paradis

P.120

Art & Science

Ibis, les sacrifiés de l'autel

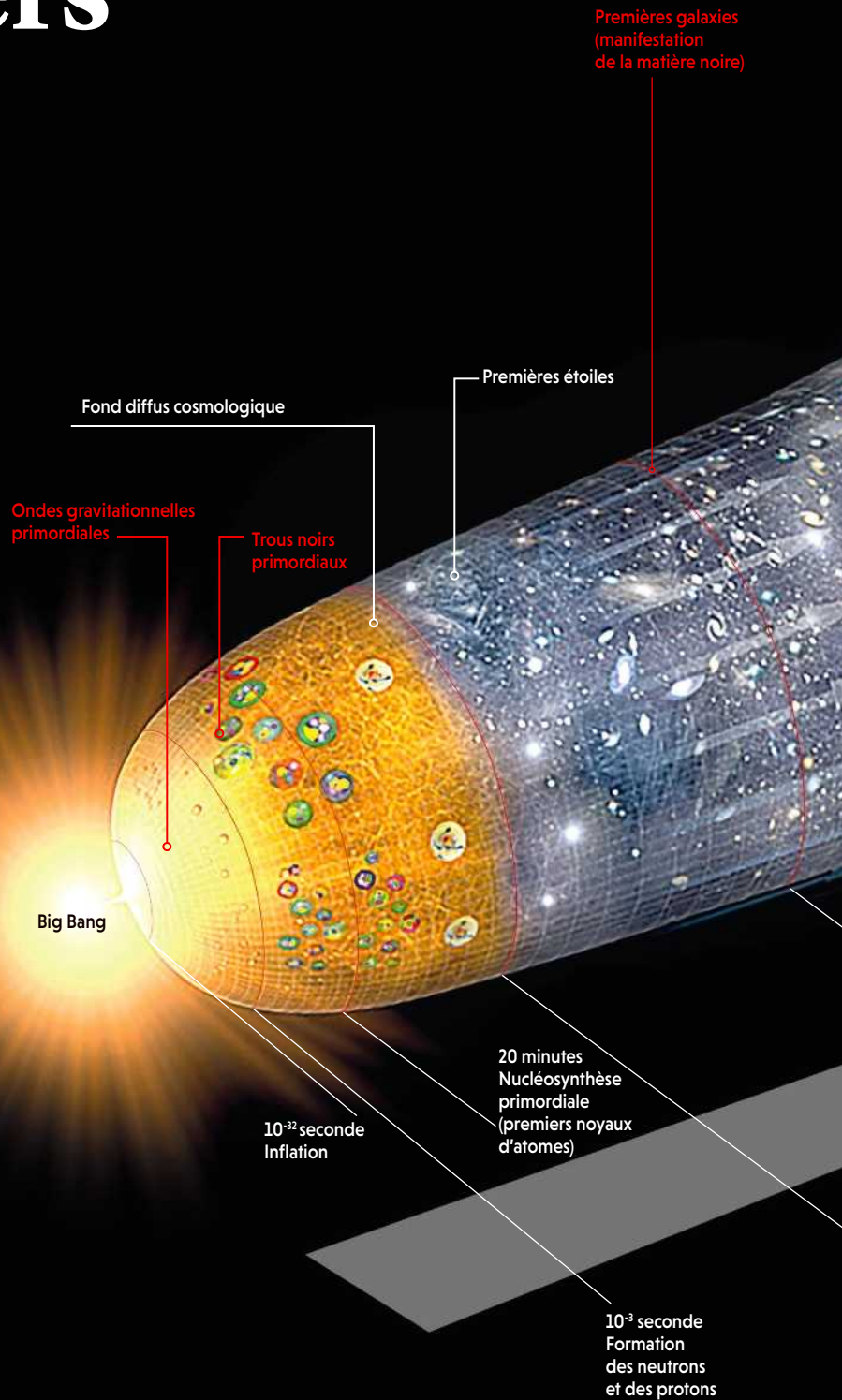
Le côté obscur de l'Univers

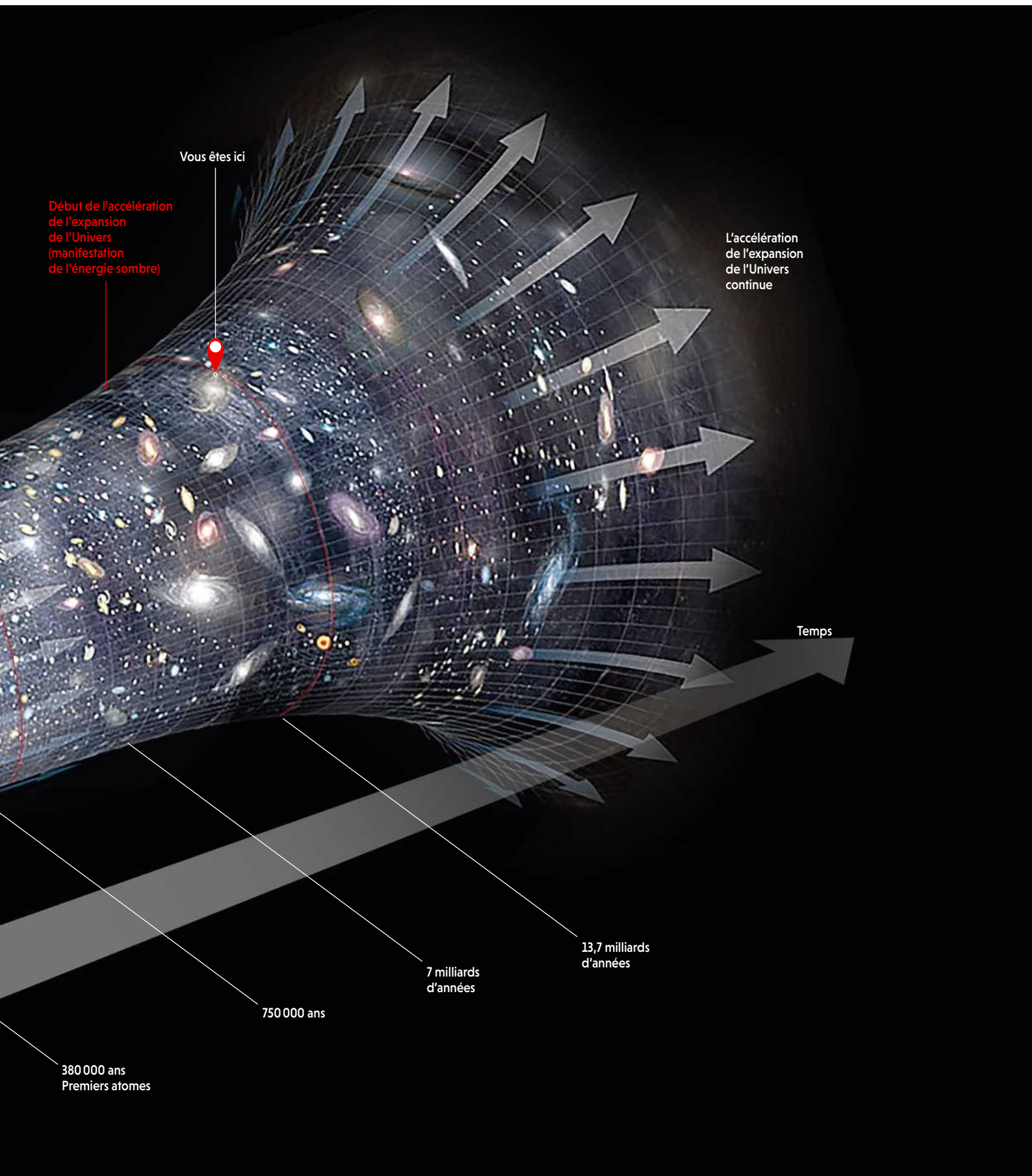
Il y a bien longtemps, dans un Univers lointain, très lointain... il n'y avait même pas de galaxie. Selon le modèle qui prévaut, tout a commencé il y a 13,7 milliards d'années à partir du Big Bang, lorsque l'Univers s'est déployé.

Plusieurs étapes sont marquantes (*celles marquées en rouge sont détaillées dans ce numéro*) et lors de certaines d'entre elles, se sont manifestées plusieurs entités obscures dont on ignore encore la nature : la matière noire et l'énergie sombre. Lors de l'inflation, aux premiers instants, l'Univers a considérablement grandi ! À cet instant, des ondes gravitationnelles primordiales auraient été émises. Peu après, à l'occasion de fluctuations de la matière, des trous noirs primordiaux se seraient formés. Vers 380 000 ans, neutrons, protons et électrons se sont formés, laissant libres les photons qui constituent aujourd'hui le fond diffus cosmologique.

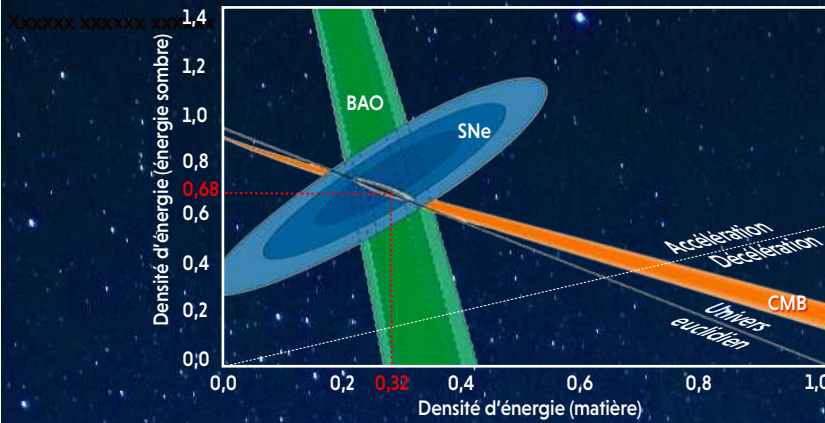
Par la suite, les étoiles, les galaxies, les amas de galaxies et toutes les grandes structures de l'Univers se sont agencés. Sans la matière noire et ses effets gravitationnels, ces éléments n'auraient pas l'allure qu'ils ont.

Simultanément, l'Univers a continué de s'étendre. Cette expansion s'est même accélérée il y a 7 milliards d'années. On attribue ce phénomène à une mystérieuse énergie sombre. ■





LES INGRÉDIENTS DE L'UNIVERS



La composition de l'Univers s'exprime en fonction d'une densité d'énergie critique égale à 1, correspondant à un Univers « plat » (sa géométrie est euclidienne) comme on l'observe à grande échelle. On dispose de trois types d'observations : le fond diffus cosmologique (CMB), les oscillations acoustiques des baryons (BAO) et les supernovae (SNe). De la zone de compatibilité avec les trois (en gris), on déduit pour l'Univers (en rouge) une répartition d'environ 68 % d'énergie sombre et 32 % de matière (que l'on décompose, à partir d'autres observations, en 27 % de matière noire et 5 % de matière ordinaire).

TOUTE LA MATIÈRE ET L'ÉNERGIE DE L'UNIVERS



**ABONNEZ-VOUS À
POUR LA
SCIENCE**

2 FORMULES AU CHOIX

	FORMULE PAPIER + HORS-SÉRIE	FORMULE INTÉGRALE
Le magazine papier 12 numéros par an	✓	✓
Le magazine en version numérique 12 numéros par an		✓
Le hors-série papier 4 numéros par an	✓	✓
Le hors-série en version numérique 4 numéros par an		✓
Accès à purlascience.fr actus, dossiers, archives depuis 1996		✓
VOTRE TARIF D'ABONNEMENT	79€ Au lieu de 114,40€	99€ Au lieu de 174,40€

31 %
de réduction *

43 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

PAG19STDDOS



OUI, je m'abonne
pour 1 an à **POUR LA SCIENCE**

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

**FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE**

- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

79€
Au lieu de ~~114,40€~~

 FORMULE
INTÉGRALE

- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

99€
Au lieu de ~~174,40€~~

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal Ville:

Téléphone

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science☐ Carte bancaire

Nº _____

Date d'expiration Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire:

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société *Pour la Science*. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. *Pour la Science* ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à *Pour la Science*. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://lebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.