

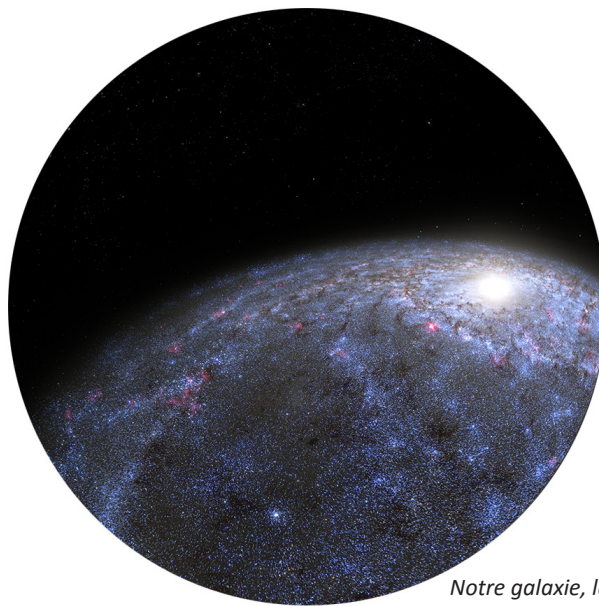
DARK UNIVERSE

Voyage au coeur de la matière noire

Le développement des instruments d'observation sur terre et dans l'espace a permis de mieux comprendre l'évolution de l'univers, du Big Bang à nos jours. De spectaculaires visualisations, fondées sur d'authentiques données scientifiques associées aux découvertes les plus récentes emmèneront vos élèves dans une nouvelle ère de découverte cosmique.

Ce film est précédé d'une séquence de 10 minutes d'observation du ciel visible le soir de votre visite.

A partir du cycle 3 / durée totale: 35 minutes



Notre galaxie, la Voie lactée

Déroulement et contenu

Notre place dans l'espace intergalactique.

A cent millions d'années-lumière de la Terre, chaque point de lumière représente une galaxie complète contenant des milliards d'étoiles. Au cours des cent dernières années, nous avons découvert où se trouvaient ces galaxies, de quoi elles étaient constituées et comment elles sont apparues.

Nous avons découvert que l'Univers est né d'un événement que l'on a appelé le Big Bang, il y a environ 14 milliards d'années. Depuis, il n'a jamais cessé de s'étendre et d'évoluer.

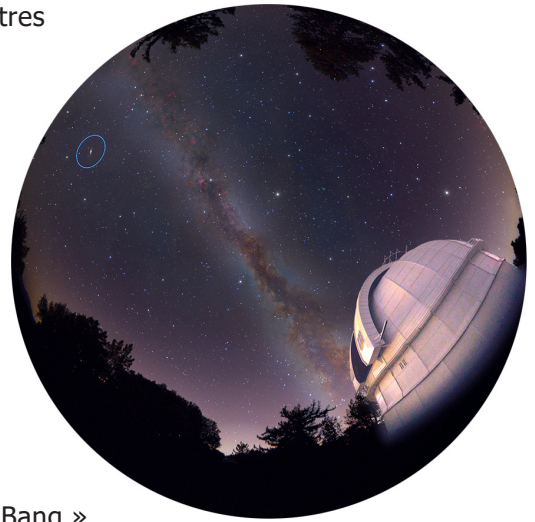
La Voie lactée n'est pas toute seule.

Alors que l'être humain n'en a jamais su autant sur l'immensité de l'Univers, il a aussi pris conscience de l'étendue de son ignorance.

L'histoire commence dans les années 1920 à l'observatoire du mont Wilson en Californie lorsque des astronomes découvrent que la nébuleuse d'Andromède est en fait une galaxie, comme la Voie lactée, et qu'elle est très éloignée.

En approfondissant les recherches, ils observent d'autres galaxies et constatent avec surprise que les plus distantes s'éloignent de nous à des vitesses plus élevées.

Cela signifie que le cosmos s'étend constamment et qu'il entraîne un nombre incalculable de galaxies.



Le Big Bang : une idée qui n'était pas si folle

Puisque l'Univers refroidit à mesure de son expansion, il doit avoir été, à une époque, beaucoup plus chaud et dense qu'aujourd'hui.

Les sceptiques se sont moqués de la théorie du « Big Bang ».

Puis en 1964, des chercheurs des Laboratoires Bell (New Jersey) qui testaient une antenne radio ont enregistré par hasard un rayonnement micro-ondes provenant de toutes les directions : le fonds diffus cosmologique. Il s'est avéré qu'il s'agissait du plus ancien rayonnement observé, émis juste après la période chaude du Big Bang.

Depuis cette date, trois satellites hors norme ont cartographié ce rayonnement avec une grande précision, révélant la composition fondamentale de l'Univers. Des preuves supplémentaires de la théorie du Big Bang ont été fournies par la mesure de la quantité d'hydrogène, de deutérium et d'hélium. Les chercheurs ont prédit que ces atomes légers s'étaient formés par fusion au cours de la période extrêmement chaude de l'Univers.

En 1995, la mission Galileo de la NASA a confirmé cette prédiction en découvrant du deutérium dans l'atmosphère de Jupiter.

L'Univers se révèle beaucoup plus sombre qu'on ne le pensait.

Tandis que les chercheurs reconstituaient l'histoire des atomes, ils se sont rendus compte que la majeure partie de l'Univers n'était en fait pas formée d'atomes. Il semble désormais clair que toutes les étoiles qui brillent sont l'écume scintillante d'un océan cosmique invisible constitué de ce que les astronomes appellent la matière noire et l'énergie sombre.

Nous ne pouvons pas voir la matière noire car elle n'émet et n'absorbe aucun type de rayonnement. Mais sa gravité est en interaction avec la matière normale visible, comme les étoiles et les galaxies, ce qui permet aux astronomes de savoir qu'elle existe. La gravité générée par la matière noire est nécessaire pour que l'immense structure de l'Univers actuel, semblable à un réseau, puisse se former.

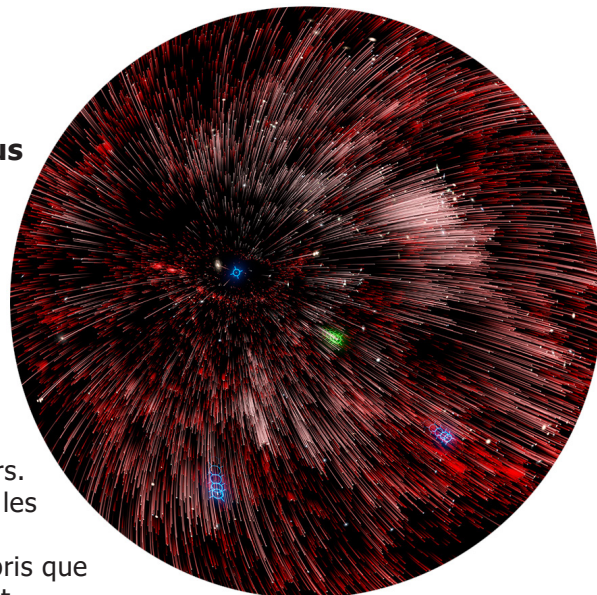
Les chercheurs utilisent des détecteurs à des profondeurs extrêmes sous la Terre, dans des accélérateurs de particules et même dans la station spatiale internationale afin de découvrir en quoi elle consiste.

Le cosmos s'étend de plus en plus vite.

Une autre découverte étonnante a eu lieu en 1998.

Les astronomes avaient prédit que la gravité exercée par toute cette matière ferait office de frein, ralentissant l'expansion de l'Univers. Mais en mesurant les distances et les vitesses des étoiles qui explosent, appelées supernovae, ils ont compris que l'expansion de l'Univers s'accélérait.

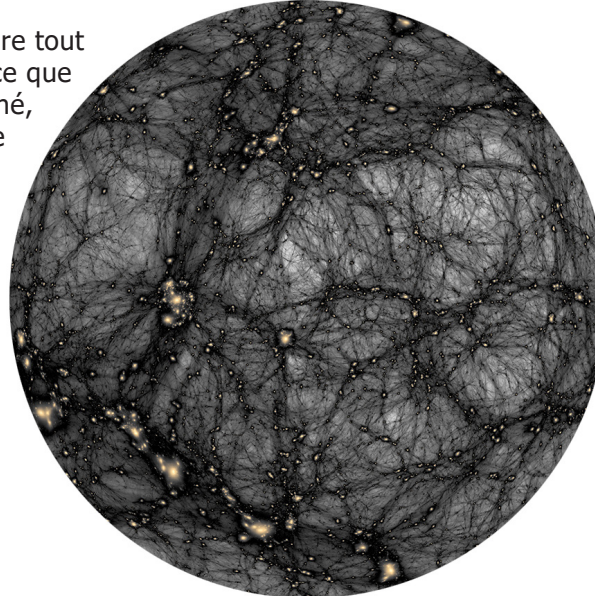
La pression à l'origine de cette accélération a été appelée énergie sombre.



Nous sommes dans le noir.

Nous ne connaissons pas encore la nature de l'énergie sombre, même si elle constitue près de 70 % de l'énergie de masse de l'Univers. La matière noire représente la quasi-totalité restante.

La matière visible, c'est-à-dire tout ce que nous sommes, tout ce que nous avons déjà vu ou touché, représente moins de 5 % de l'Univers observable.



L'Univers s'étend au-delà des frontières du visible.

Puisque chaque observateur se situe au centre de son propre Univers observable, l'ensemble de l'Univers doit être beaucoup plus grand que ce que peut voir un observateur et pourrait même être infini.

Si nous plongeons au-delà du visible, nous serons à l'aube de nombreuses autres découvertes.

1. Ce que nous savons sur l'Univers

De quoi est constitué l'Univers ?

L'Univers est constitué de matière et d'énergie. La matière visible ou normale est présente dans tout ce que nous pouvons toucher et voir, notamment notre propre personne, les chiens, les arbres, les planètes, les étoiles.

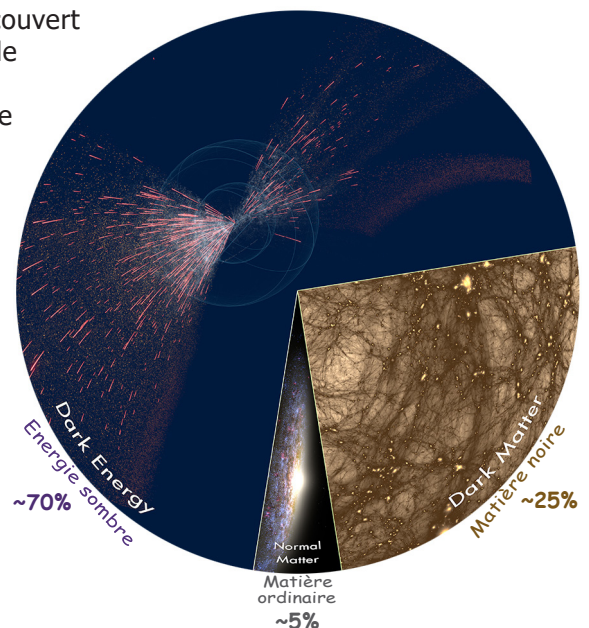
Au cours des 20 dernières années, nous avons découvert qu'elle représente moins de 20% de la masse totale de l'Univers.

Tout le reste semble être constitué d'une substance invisible appelée la matière noire. Celle-ci n'émet pas et n'absorbe pas la lumière mais nous pouvons observer son effet gravitationnel sur la matière normale.

La matière noire retient les ensembles d'étoiles appelées galaxies et détermine où les galaxies se rassemblent en amas et en filaments.

Une découverte plus récente concerne l'énergie sombre, une pression mystérieuse qui s'oppose à la gravité et qui est responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Dans sa célèbre équation $E=mc^2$, Einstein a démontré que la masse **m** et l'énergie **E** étaient équivalentes, et qu'elles étaient liées à la vitesse de la lumière **c**. Autrement dit, nous pouvons les représenter ensemble comme énergie de masse.

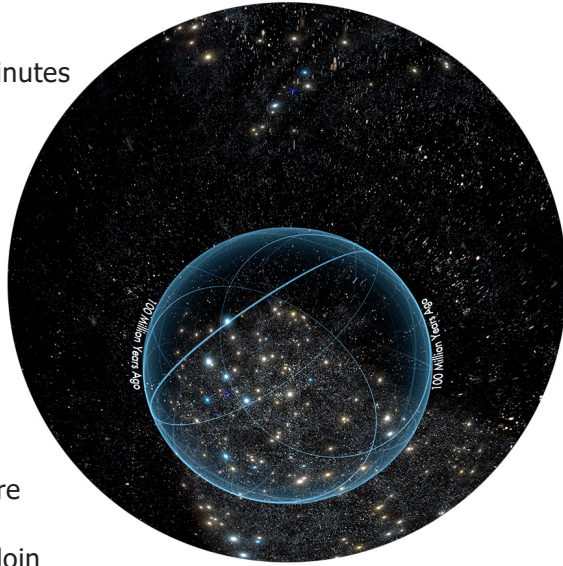


Les segments du diagramme circulaire représentent les proportions observées dans l'Univers.

Comment les chercheurs étudient-ils l'Univers ?

La quasi-totalité de nos informations sur l'Univers proviennent du rayonnement émis, absorbé ou réfléchi par les objets qui s'y trouvent. Puisque le rayonnement met du temps à se propager, plus nous regardons loin dans l'Univers, plus nous remontons loin dans le temps. Lorsque nous actionnons un interrupteur, la lumière de l'ampoule parvient jusqu'à nous en quelque nanosecondes.

Mais la lumière du Soleil met déjà 8 minutes à parvenir jusqu'à la Terre, celle des étoiles proches a mis des années ou des siècles à arriver jusqu'à nous et celle des galaxies lointaines peut dater de milliards d'années.



Les télescopes qui se trouvent sur la Terre, en orbite autour de la Terre et du Soleil peuvent observer cette lumière à différentes longueurs d'onde.

Les sondes spatiales vont encore plus loin et nous renvoient des données et des échantillons d'autres parties du système solaire. Face à l'immensité des échelles d'espace et de temps, et à des conditions trop extrêmes pour être reproduites en laboratoire, les scientifiques font appel à la modélisation mathématique et aux simulations informatiques pour comprendre nos observations.

Que savons-nous des origines de l'Univers ?

Il y a 13,8 milliards d'années, l'ensemble de l'Univers observable était plus petit qu'un atome et infiniment chaud et dense. Cette période est appelée Big Bang par les chercheurs. Puis en un instant, sa température et sa densité ont baissé mais elles sont restées aussi chaudes que le cœur d'une étoile, de telle sorte que de l'hydrogène lourd (deutérium) et de l'hélium se sont formés partout.

Depuis cette période, il ne s'est plus formé de deutérium. Sa mesure nous permet donc de déterminer les conditions exceptionnelles qui existaient pas plus de quinze minutes après le Big Bang.

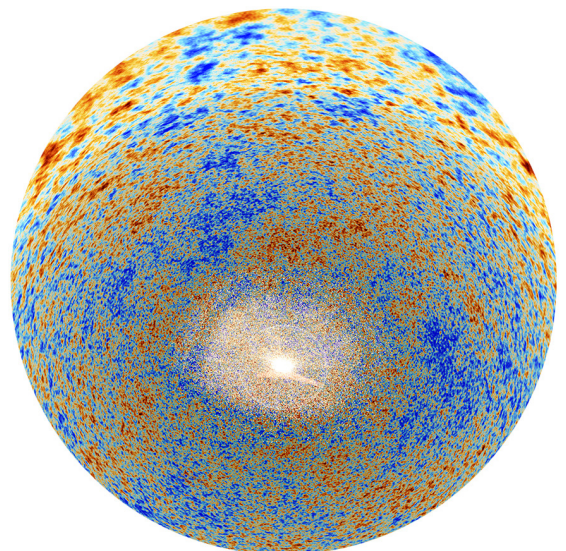
L'Univers était encore si dense qu'il était entièrement opaque : la lumière était piégée dans la matière.

Au bout de 380 000 années (moins de 0,01 % de l'âge actuel de l'Univers), comme l'Univers continuait à s'étendre et à se refroidir, l'hydrogène ionisé et l'hélium se sont combinés aux électrons pour former des atomes neutres et l'Univers est devenu transparent, permettant ainsi à la lumière de se propager librement.

Cette période au cours de laquelle l'Univers est devenu transparent correspond au fond diffus cosmologique (CMB), rayonnement initial qui remplit encore le cosmos et représente la limite de l'Univers observable.

Comment l'Univers a-t-il évolué dans le temps ?

Depuis le Big Bang, l'Univers s'est étendu. Il contient la même quantité de matière mais il est désormais bien plus grand et plus froid qu'il ne l'était à la période correspondant au CMB. Pendant plus de cent millions d'années, la gravité a agi sur les faibles différences de répartition de la masse présentes au moment du CMB.



Cela a formé des amas de matière qui se sont effondrés vers l'intérieur pour former les premières étoiles et des petites galaxies, puis les amas et filaments de galaxies beaucoup plus grandes.

Ces amas et tout ce qu'ils contiennent sont liés ensemble par la gravité. Parallèlement, l'expansion du cosmos se poursuit, entraînant avec elle des amas de galaxies.

Jusqu'en 1998, la théorie prédominante consistait à affirmer que la gravité ralentissait l'expansion de l'Univers. Mais depuis, les scientifiques ont découvert qu'une pression mystérieuse s'opposait à la gravité. Appelée énergie sombre, elle a accéléré l'expansion de l'Univers au cours des cinq derniers milliards d'années et ce processus devrait se poursuivre.

2. Les instruments de mesure de l'Univers

Ces quatre instruments sont utilisés par les astronomes pour explorer l'évolution de l'Univers :

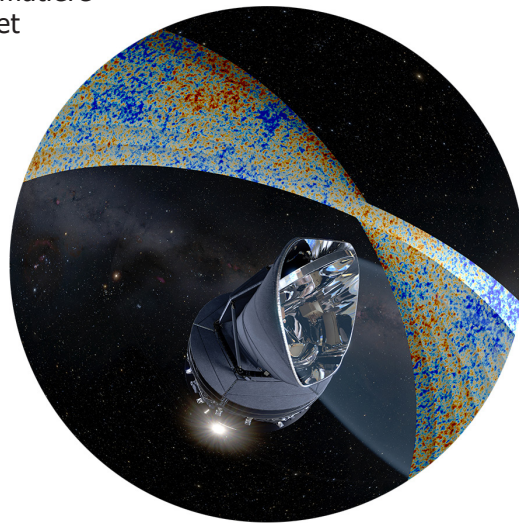
Satellite Planck

- **Quand** : Lancé en 2009
- **Où** : En orbite autour du Soleil en un point où la gravité de la Terre et du Soleil sont en parfait équilibre.
- **Quoi** : Mesure le rayonnement dans la gamme des micro-ondes
- **Pourquoi** : Pour compléter nos connaissances sur l'âge et le contenu de l'Univers

Fait intéressant :

Chaque année, Planck cartographie le firmament dans son intégralité, en observant certains points des milliers de fois.

Le 21 mars 2013, l'équipe du satellite Planck a publié la cartographie du fond diffus cosmologique la plus précise jamais réalisée. Ses mesures des variations infimes ont contribué à définir à quelle période étaient apparues les premières étoiles ainsi que d'autres paramètres cosmologiques importants tels que l'âge, la vitesse d'expansion de l'Univers et les parts respectives de la matière normale, de la matière noire et de l'énergie noire.



Observatoire Keck

- **Quand** : Keck I en service depuis 1993, Keck II depuis 1996
- **Où** : Sommet du volcan Mauna Kea de l'île d'Hawaï
- **Quoi** : Mesure le rayonnement dans le visible et l'infrarouge
- **Pourquoi** : Pour étudier l'Univers, notamment pour connaître les spectres des explosions des supernovae les plus éloignées.

Fait intéressant :

Des climatiseurs gigantesques maintiennent les coupoles à une température inférieure ou égale au point de congélation et empêchent des variations de température qui pourraient déformer l'acier et les miroirs du télescope.

L'observatoire contient deux des plus grands télescopes optiques et infrarouges au monde. Chacun d'entre eux compte huit étages, avec des miroirs de dix mètres de diamètre. Les spectres qu'ils mesurent démontrent que les anciennes supernovae ont explosé dans un Univers qui s'étendait plus lentement qu'à l'heure actuelle.

Cela prouve que l'expansion de l'Univers s'est accélérée. Les scientifiques attribuent cette accélération à l'énergie sombre.

Télescope du pôle sud

- **Quand** : En service depuis 2007
- **Où** : Station de recherche Amundsen-Scott Pôle Sud
- **Quoi** : Mesure le rayonnement dans la gamme des micro-ondes.
- **Pourquoi** : Pour étudier la formation de la structure à grande échelle de l'Univers et à travers le temps.

Fait intéressant :

Avec ses dix mètres de diamètre, il s'agit du télescope le plus grand jamais déployé au Pôle Sud, sans aucun obstacle risquant de déformer ou de disperser les ondes radio reçues. Sans l'énergie sombre, un nombre beaucoup plus élevé d'amas massifs de galaxies qu'il n'en existe à l'heure actuelle se serait formé au cours des 13 milliards d'années. La conception innovante et l'emplacement stratégique de ce radiotélescope en font un instrument adapté à la recherche d'amas de galaxies. En suivant l'évolution de ces amas, les scientifiques peuvent cartographier l'impact de l'énergie sombre sur l'histoire de l'Univers.

Détecteurs à matière noire

- **Quand** : Depuis 2006
- **Où** : une demi-douzaine de laboratoires souterrains en Amérique du Nord et en Europe.
- **Quoi et pourquoi** : Détecter directement les particules de matière noire.

Fait intéressant :

Des détecteurs ultra-sensibles sont enterrés jusqu'à une profondeur de 1 600 mètres pour les protéger du rayonnement cosmique, qui risquerait autrement de brouiller les faibles signaux.

La prochaine preuve de taille qui appuierait la théorie du Big Bang dans la cosmologie réside dans la détection directe de la matière noire. Les progrès sont en bonne voie. Pour être crédibles, les résultats doivent être reproductibles; de nombreuses expériences sont donc réalisées simultanément.

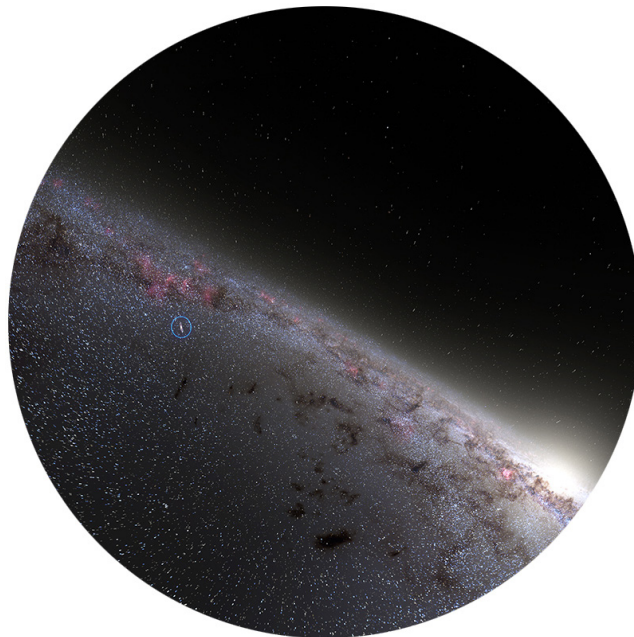
L'une d'elles consiste à observer les interactions de la matière noire avec des solides à des températures extrêmement basses, d'autres observent les interactions avec des gaz rares liquéfiés.

3. Les Découvertes

Les découvertes du siècle dernier ont transformé la science de la cosmologie et, avec elle, la perception de notre place dans un Univers en expansion.

- **1905-1916** : Albert Einstein publie ses Théories de la relativité restreinte et de la relativité générale. Elles regroupent les notions auparavant distinctes d'espace et de temps, en fournissant une explication cohérente de l'Univers physique. Convaincu que l'Univers est statique, Einstein est tout d'abord choqué que ses équations permettent de conclure à une expansion de l'Univers.
- **1916-1927** : L'astronome hollandais Willem de Sitter, le mathématicien russe Alexander Friedmann et le mathématicien belge George Lemaître émettent chacun l'hypothèse d'une expansion de l'Univers. Les fondements de la théorie du Big Bang sont ainsi établis.
- **1918** : Harlow Shapley démontre que le Soleil est situé à mi-parcours entre le centre et le bord de notre galaxie, la Voie lactée, dont on croyait à l'époque qu'elle constituait l'ensemble de l'Univers.
- **1924-1929** : Edwin Hubble découvre que plus une galaxie est éloignée, plus elle se déplace rapidement. Il s'agit de la première observation réelle de l'expansion de l'Univers.
- **1933-1937** : Fritz Zwicky observe la vitesse et les orientations des galaxies en amas et émet l'hypothèse que ces amas sont liés entre eux par de grandes quantités d'une « matière froide et sombre » invisible et inconnue.
- **1948** : George Gamow prédit l'existence d'un fonds diffus cosmologique qui serait le résidu de l'époque dense et chaude de l'origine de l'Univers.
- **1965** : Arno Penzias et Robert Wilson découvrent par hasard ce rayonnement : un signal micro-onde diffus en provenance de toutes les directions. La persistance visuelle du Big Bang est appelée le fond diffus cosmologique (CMB). La théorie d'un Univers statique est réfutée définitivement.

- **1978** : Vera Rubin mesure les vitesses de rotation des étoiles dans les galaxies spirales et met en évidence la force gravitationnelle d'un certain type de matière noire (la matière dont Zwicky avait émis l'hypothèse deux décennies auparavant). Rubin estime que la majeure partie de la matière contenue dans les galaxies est constituée par cette substance.
- **1990** : Les mesures spatiales sensibles prises par le télescope Cosmic Background Explorer démontrent que le CMB n'est absolument pas uniforme. Il s'agit de la première preuve des structures initiales de l'Univers.
- **1998** : Deux équipes indépendantes d'astronomes affirment que l'expansion de l'Univers s'accélère. Cela ne peut s'expliquer que par l'existence d'une énergie ou d'une pression encore inexpliquée et appelée depuis énergie sombre, qui s'oppose à la gravité.
- **2002** : Mesurées par la sonde Wilkinson Microwave Anisotropy, les caractéristiques des fluctuations du CMB démontrent que la matière ordinaire représente moins de 5 % de la masse et de l'énergie de l'Univers et que la matière noire représente seulement 24 % supplémentaires, les 70 % restants étant constitué d'énergie sombre.
- **2013** : Les données du satellite Planck lancé par l'Agence spatiale européenne en 2007 confirment l'âge et la quantité d'énergie de l'Univers et révèlent que l'énergie noire peut être compatible avec la théorie originale d'Einstein sur la relativité générale.



4. Glossaire

Big Bang : il y a quelque 13,8 milliards d'années, période à laquelle l'Univers a commencé à s'étendre à partir d'un état pratiquement infiniment dense et chaud.

CMB- Fond diffus cosmologique : énergie des micro-ondes en provenance de toutes les directions du ciel, observée à une température équivalente à 2,7° au-dessus du zéro absolu, considéré comme le rayonnement résiduel du Big Bang.

Cosmologie : étude astrophysique de l'Univers dans son ensemble, notamment de son origine, son évolution, sa structure et sa dynamique.

Énergie sombre : pression mystérieuse qui entraîne l'accélération de l'expansion de l'Univers. Perceptible par son influence gravitationnelle, elle existe depuis le Big Bang.

Galaxie : regroupement massif d'étoiles, de planètes, de gaz interstellaires, de poussières et de matière noire dont la cohésion est assurée par la gravitation.

Gravité : force d'attraction entre deux masses.

Masse : quantité de matière contenue dans un objet donné.

Énergie de masse : total combiné de la masse **m** et de l'énergie **E** d'un objet ou d'une région, mis en évidence par la relation d'Einstein $E = mc^2$, dans laquelle **c** représente la vitesse de la lumière.

Matière : toute chose qui exerce une gravité et se déplace plus lentement que la vitesse de la lumière. La matière visible ou normale est constituée de protons, de neutrons, d'électrons et d'autres particules subatomiques.

Fusion nucléaire : combinaison de noyaux d'atomes qui permet la production de noyaux plus lourds et la libération d'énergie.

Par exemple, au coeur du soleil, la fusion des noyaux d'hydrogène produit de l'hélium. Cette fusion nucléaire produit l'énergie du soleil.

Rayonnement: énergie qui se déplace sous la forme d'ondes électromagnétiques telles que les rayonnements infrarouges, ultraviolets ou visibles, les rayons X et les rayons gamma, ou sous la forme de particules subatomiques se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière.

L'envers du décor

Au 21^e siècle, les spectacles consacrés à l'espace s'inscrivent dans une longue tradition des musées qui font appel à des scientifiques, des artistes et des enseignants pour exposer au public une représentation exacte du monde naturel.

Le film de Dark Universe repose sur des données réelles : des millions d'observations astronomiques combinées à des modèles numériques fondés sur la physique. De puissants ordinateurs effectuent des calculs complexes afin de simuler les phénomènes cosmiques fondés sur ces modèles. Les images proviennent en majorité de Digital Universe, un atlas tridimensionnel de tous les objets astronomiques dont la distance par rapport à la Terre est connue.

D'éminents scientifiques du monde entier se sont réunis pour retracer les grands moments de Dark Universe et définir les informations les plus importantes à communiquer.

Pour transposer l'aventure de l'Univers dans la coupole, l'équipe de production a travaillé directement à partir de ces ensembles de données, en étroite collaboration avec les scientifiques. Des spécialistes en arts numériques ont recréé des sondes spatiales dans les moindres détails, après avoir consulté les ingénieurs et les chercheurs qui ont travaillé sur ces missions.

L'expérience visuelle est rendue plus vivante par une bande son originale enregistrée en direct, associée à des effets sonores spatiaux impressionnants et à un récit.

Ce film est produit par l'AMNH (American Museum Natural History), Hayden Planetarium de New York.