

Initiation à la cosmologie

Marc Lachièze-Rey

avec la collaboration de

Julien Ribassin

Docteur en physique

5^e édition

DUNOD

Illustration de couverture :
Amazing Andromeda Galaxy, NASA/JPL-Caltech

© Dunod, 2013, 2020 pour la nouvelle présentation 11
rue Paul Bert, 92240 Malakoff
EAN 978-2-10-081559-3
www.dunod.com

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre 1 • Découvrir le cosmos	1
Peut-on étudier l'Univers?	1
Y a-t-il une cosmologie scientifique?	2
Principes de la cosmologie	3
L'objet de la cosmologie	4
1.1 L'Univers et son apparence	6
1.1.1 De la Terre aux étoiles	6
1.1.2 Les étoiles, matière lumineuse	7
1.1.3 Notre galaxie et les autres	8
1.1.4 Galaxies primordiales et protogalaxies	10
1.2 La distribution de la matière	10
1.2.1 Au-delà du Groupe local	10
1.2.2 Amas et superamas	11
1.2.3 Catalogues	12
1.2.4 Corrélations et statistiques	13
1.2.5 Problèmes et solutions	14
1.3 Distances et vitesses dans l'Univers	15
1.3.1 Des méthodes qui se complètent	15
1.3.2 Les parallaxes des étoiles proches	16
1.3.3 L'échelle des distances	18
1.3.4 L'expansion de l'Univers et le décalage vers le rouge	21
1.3.5 Éloignement dans l'espace, éloignement dans le temps	24
Chapitre 2 • L'Univers relativiste	27
2.1 Les relativités	27
2.1.1 La relativité restreinte	27
2.1.2 L'Univers de la relativité générale	28
2.1.3 La métrique de l'espace euclidien	30
2.1.4 Les métriques des espaces courbes	31
2.1.5 Longueurs et volumes	32
2.1.6 Les métriques de l'espace-temps	36
2.1.7 La métrique de l'espace-temps courbe	37

Table des matières

2.2	Cosmographie relativiste	37
2.2.1	L'Univers homogène isotrope	37
2.2.2	L'expansion	38
2.2.3	L'Univers relativiste	40
2.2.4	Équation du rayon lumineux	41
2.2.5	Le décalage dans l'Univers relativiste	43
2.2.6	Les distances cosmologiques	45
2.2.7	Causalité et horizons	47
Chapitre 3 • La relativité générale et la dynamique de l'Univers		51
3.1	Les équations de l'Univers	51
3.1.1	Le tenseur métrique	51
3.1.2	Les équations de Friedmann	52
3.1.3	Le fluide cosmique, son équation d'état, sa dilution	53
3.1.4	Des paramètres cosmologiques	55
3.1.5	Densité de l'Univers et masse cachée	57
3.1.6	Lentilles gravitationnelles	60
3.2	Les modèles de big bang	63
3.2.1	Le rôle dynamique du rayonnement	63
3.2.2	Un univers plat ?	64
3.2.3	Les modèles sans constante cosmologique	67
3.2.4	Univers avec constante cosmologique	68
3.2.5	Un âge qui n'en est pas un	70
Chapitre 4 • L'univers primordial		77
4.1	Vers le big bang	77
4.1.1	Expansion, dilution et refroidissement	77
4.1.2	Absence de structures	78
4.1.3	Équilibres thermiques	78
4.1.4	L'Univers dominé par le rayonnement	80
4.1.5	Le couplage matière-rayonnement	80
4.2	Le fond diffus cosmologique	81
4.2.1	Découplage et recombinaison	81
4.2.2	Le fond diffus cosmologique	83
4.2.3	Le spectre de corps noir du CMB	85
4.2.4	Les écarts au spectre thermique	85
4.2.5	Les anisotropies du CMB	87
4.2.6	Anisotropies et formation des structures	90
4.3	Les événements de l'univers primordial	96
4.3.1	L'apparition des structures	96
4.3.2	Les particules dans l'univers primordial	96
4.3.3	L'histoire des neutrinos	98
4.3.4	Autres particules	99
4.3.5	Des quarks aux nucléons	101
4.3.6	L'histoire des électrons	101

4.4 La nucléosynthèse primordiale	102
4.4.1 Nucléosynthèse historique	102
4.4.2 Formation du deutérium	103
4.4.3 Abondances des protons et neutrons	104
4.4.4 La production de l'hélium	105
4.5 L'univers très primordial	107
4.5.1 L'univers des particules	107
4.5.2 L'unification des interactions	108
4.5.3 Transition de phase	108
4.5.4 Monopôles magnétiques et cordes cosmiques	110
4.5.5 L'énergie du vide et l'inflation	112
4.5.6 Le big bang revisité	113
4.6 Cosmologie quantique	114
4.6.1 Gravitation et cosmologie quantique	114
4.6.2 Supergravité et supercordes	115
4.6.3 Cosmologie quantique à boucle	116
Chapitre 5 • La formation des galaxies	119
5.1 Gravitation et fluctuations	119
5.1.1 La question de base	119
5.1.2 Le mécanisme de l'instabilité gravitationnelle	120
5.1.3 Les échelles des fluctuations	121
5.1.4 La statistique des fluctuations	122
5.1.5 Lien entre statistiques et objets	124
5.2 L'amplification des fluctuations	125
5.2.1 Les étapes de la croissance des fluctuations	125
5.2.2 Croissance linéaire et masse de Jeans	126
5.2.3 Les fluctuations avant la recombinaison	127
5.2.4 Amplification relativiste	129
5.2.5 Le spectre à la recombinaison	131
5.2.6 Liens avec le fond diffus cosmologique	132
5.2.7 Après la recombinaison	133
5.2.8 Doutes et incertitudes	134
5.2.9 L'apparition des galaxies	135
Conclusion	139
Glossaire	141
Bibliographie	147
Index	151

DÉCOUVRIR LE COSMOS

1

PLAN

- 1.1 L'Univers et son apparence
- 1.2 La distribution de la matière
- 1.3 Distances et vitesses dans l'Univers

Peut-on étudier l'Univers?

La cosmologie se consacre à l'étude la plus globale qui soit, celle de l'Univers, du cosmos. L'objet de son étude, le concept d'univers, ou de cosmos, recouvre davantage qu'un simple rassemblement d'objets, fussent-ils célestes. Il implique l'existence de propriétés, de relations que l'on ne peut attribuer à tel ou tel objet en particulier mais qui sont globales, universelles précisément. Ainsi, le cosmologue ne s'intéresse pas spécifiquement aux différents astres qui peuplent l'Univers — planètes, étoiles ou galaxies — mais à leurs relations mutuelles, au cadre général dans lequel ils évoluent, aux lois communes auxquelles ils obéissent, à la structure qui les abrite, tout ceci constituant précisément les propriétés globales du cosmos, considéré comme une globalité.

Les divers phénomènes célestes ne le concernent que pour autant qu'ils manifestent une propriété cosmique : ainsi se fait le lien avec l'astrophysique et l'astronomie.

L'examen de la distribution des galaxies, par exemple, concerne le cosmologue à plusieurs titres. D'une part, les processus dynamiques — formation des galaxies et structuration de la matière — qui ont produit cette distribution font partie de l'histoire cosmique. D'autre part, les galaxies jouent le rôle de jalons qui dévoilent la structure géométrique de l'Univers lui-même. L'analyse de cette structure requiert l'examen des galaxies, ne serait-ce que pour mesurer leurs éloignements. Le cosmologue ne peut donc éviter d'être aussi astronome et astrophysicien.

Le terme de cosmologie s'est généralisé et recouvre ce qui autrefois apparaissait sous les dénominations distinctes de cosmographie et de cosmogonie. La cosmographie — sans doute la branche la plus « dépouillée » de toute l'astrophysique — étudie la structure géométrique globale de l'espace-temps (courbure et topologie, homogénéité et isotropie, extension finie ou infinie) indépendamment de son contenu. Elle fait appel essentiellement à la théorie de la relativité générale et aux mathématiques que cette théorie implique. De plus, toutes les observations s'accordent avec

l'idée d'évolution du cosmos. La manifestation la plus patente en est l'expansion accélérée de l'Univers. La description de cette structure et de son évolution fait l'objet de ce que l'on appelle un *modèle cosmologique*.

Dans le cadre de l'Univers (décrit par un modèle) se déroulent des phénomènes physiques : l'évolution de la matière — dilution et refroidissement avec l'expansion —, l'apparition progressive des objets de la physique — atomes, molécules, étoiles, galaxies — et de l'organisation qu'ils manifestent, etc. C'est l'étude de cette évolution créatrice que recouvre le terme de cosmogonie. Cette branche de la cosmologie, orientée vers la physique, s'intéresse au contenu de l'Univers et à son évolution au cours de l'histoire cosmique, à la manière dont peuvent être observés les phénomènes cosmiques. Cette cosmologie physique fait appel à toutes les branches de la physique, jusqu'à la physique des particules. Bien entendu, ces deux branches de la discipline sont étroitement liées.

Y a-t-il une cosmologie scientifique?

La question résulte de l'originalité de l'Univers en tant qu'objet de la cosmologie : il est unique, il nous englobe, il ne peut être observé que de l'intérieur. Ce n'est pas le cas de la plupart des systèmes auxquels s'intéresse la pratique scientifique. Aussi les préoccupations et les méthodes de la cosmologie se distinguent-elles de celles du reste de la physique.

La pratique « expérimentale », qui exige de reproduire des manipulations, des expériences dans des conditions définies, ne peut, bien entendu, s'appliquer en cosmologie. Si les cosmologues conçoivent un modèle d'univers, il est impossible de créer l'univers correspondant pour observer comment il évolue ! Y a-t-il même un sens à parler de la possibilité d'un tel univers ? La cosmologie dérive ses lois à partir d'un seul échantillon.

Cette discipline peut néanmoins prétendre au titre de science, une science naturelle, d'observation. Les modèles cosmologiques, ceux de big bang par exemple, sont bien issus, en partie, de l'observation. Mais c'est surtout sur la base de principes fondamentaux que la cosmologie procède. Dans ce sens, il s'agit d'une science abstraite : l'histoire de l'Univers est une reconstruction de l'esprit et c'est de manière relativement indirecte qu'elle est confrontée aux observations.

Fondée sur des principes, confrontable et confrontée à l'observation, la cosmologie est bien une science. Une science particulière du fait de son objet, du fait de la position particulière de l'observateur. Ce dernier — l'astronome, le cosmologue, chacun de nous — se situe à l'intérieur de l'objet qu'il étudie. Il en résulte des préjugés — des « biais », comme disent les astronomes — qui affectent notre interprétation des observations.

Enfin, comme toutes les sciences, mais sans doute davantage, la cosmologie repose sur des principes, des présupposés d'ordre métaphysique. Elle n'est peut-être encore qu'une science imparfaite, dans la mesure où leurs influences sont difficilement reconnaissables et reconnues.

Étudiant des problèmes fondamentaux qui mettent en cause la nature de notre univers, la question de son origine et de son devenir, ainsi que la place qu'y occupe l'homme, la cosmologie partage ses centres d'intérêt avec des disciplines non scientifiques, métaphysique, théologie, philosophie... Il n'est pas toujours facile d'établir une barrière entre ce qui relève d'elles et ce qui relève de la science, ni de reconnaître les influences des différents mythes qui nous hantent, ou de notre héritage socio-culturel. Il est en tout cas important de garder à l'esprit que la cosmologie scientifique repose sur des principes métaphysiques.

Principes de la cosmologie

Le premier principe fondateur de la cosmologie consiste sans doute à énoncer qu'une cosmologie scientifique a un sens et qu'un univers existe, qui ne se réduit pas à la simple accumulation des objets existants et qu'il est intelligible. Aujourd'hui, notre confiance dans ce principe est affermie par le fait que nous observons des propriétés qui nous semblent effectivement caractéristiques de l'Univers dans son ensemble. Je veux parler en premier lieu de l'expansion cosmique. Si celle-ci se manifeste par les mouvements apparents des galaxies, son caractère général implique qu'elle n'est pas une propriété de ces objets, mais d'un système beaucoup plus global, l'Univers précisément.

La confrontation des modèles cosmologiques aux observations requiert l'observation des astres les plus éloignés, dont il faut reconnaître la nature. Cela exige la connaissance des phénomènes qui s'y produisent, de la physique qui s'y applique. Les astronomes et les cosmologues postulent que les lois physiques sont partout les mêmes ; que les lois de la gravitation, de l'électromagnétisme, de la physique quantique, etc., sont identiques en tout point de l'Univers. Comment penser autrement ? Sans cette profession de foi, aucune cosmologie scientifique n'est possible. Mais encore une fois, il s'agit là d'un principe posé *a priori*. En fait, l'idée même de loi physique implique l'universalité de sa validité. Mais une loi n'est valable que dans un certain domaine (par exemple de température, ou d'énergie) alors que bien souvent les conditions physiques de l'Univers se situent en dehors de ce domaine.

Aujourd'hui, la plupart des cosmologues estiment que l'espace présente le même aspect en tous les points : il est homogène. Ce *principe cosmologique* est lui aussi un postulat, à la base des modèles d'univers les plus courants. Les quelques résultats d'observations dont nous disposons, si fragmentaires par rapport à la démesure du cosmos, nous donnent confiance en lui mais ne peuvent en établir fermement la validité. Il énonce qu'aucun lieu n'est privilégié dans le cosmos. Les modèles d'univers considérés aujourd'hui comme « standard », ceux de big bang, reposent sur cette homogénéité supposée. L'examen d'une littérature récente montre une situation curieuse : certains semblent s'étonner de l'homogénéité de l'Univers et tentent de l'expliquer dans le cadre des modèles de big bang. Alors que, dans ces modèles, elle est posée comme principe au départ ! Cette contradiction montre que l'essence de ces modèles n'est pas toujours comprise.



ENCART 1.1 L'idée d'univers ne s'impose pas à l'esprit.

Jusqu'à la Renaissance, les conceptions du monde sont restées dominées par une cosmologie inspirée des travaux d'Aristote et de Platon. Le monde terrestre (ou *sublunaire*, en deçà de l'orbite de la Lune) et le monde céleste étaient totalement distincts. Leur composition, leur organisation, leur cinématique, leur dynamique différaient radicalement.

À partir du ^{xvi}^e siècle, les travaux de Tycho Brahé, Johannes Kepler, Galileo Galilei conduisent à abandonner cette distinction: des observations d'étoiles nouvelles et de comètes, les résultats de Galilée concernant l'aspect de la Lune, les phases de Vénus, les satellites de Jupiter, la résolution en étoiles de la Voie lactée... À partir de Galilée, commence à s'imposer l'idée de lois véritablement universelles, c'est-à-dire valables en tout lieu et en tout temps, autrement dit dans un cadre qui devient l'Univers.

Isaac Newton donne le premier énoncé explicite d'une loi véritablement universelle, celle de la gravitation. Et il énonce les propriétés de l'Univers, comme celles de l'espace et du temps physiques, qui constituent le cadre où se déroulent les phénomènes physiques. La reconnaissance de l'Univers et des lois universelles marque la naissance de la physique proprement dite.

Au ^{xx}^e siècle, la cosmologie prend une nouvelle consistance dans le cadre de la relativité: celle-ci considère l'espace-temps comme un objet dynamique, relatif, aux propriétés mesurables. Dans les premières décennies du siècle, l'expansion cosmique est découverte. Cette propriété concerne l'Univers dans son ensemble, et non pas l'une ou l'autre de ses parties. Elle fournit une justification observationnelle au concept d'univers, désormais relativiste.

Si le cosmos est le même en chacun de ses points, a-t-il toujours été le même à tous les instants de son histoire? Cette hypothèse a séduit plusieurs cosmologues, sous le nom de *principe cosmologique parfait*. Elle n'est pas plus déraisonnable que la précédente. Mais les observations — en premier lieu celle de l'expansion cosmique — impliquent que l'Univers évolue. Au point qu'il est aujourd'hui impossible de concilier l'idée d'un univers stationnaire avec les observations.

L'objet de la cosmologie

Au fur et à mesure que la technique en élargit le champ, les limites de l'Univers reculent mais restent toujours inaccessibles. Le cosmos demeure un cadre mystérieux auquel l'humanité a toujours tenté d'associer des concepts, où elle a tenté de faire séjourner les entités qu'elle révère. Étymologiquement séjour de l'ordre et de l'harmonie, le « cosmos » fut longtemps considéré comme le refuge des dieux. S'il est aujourd'hui considéré comme l'un des champs d'application de la démarche scientifique, devons-nous y voir le signe que cette discipline est en voie de déification? Il est certain en tout cas que le cosmos reste un objet de fascination, qu'il soit pensé comme une rationalité matérielle, stricte et neutre, ou au contraire, que l'on reconnaisse dans l'histoire de l'Univers le champ d'application d'une intention cosmique.