
Avant-Projet

Vous trouverez ci-joint une proposition d'avant-projet pour un ouvrage dédié à l'enseignement de la Cosmologie. Cet ouvrage serait un cours à destination d'un public d'étudiants scientifiques, de filières physique, chimie, mathématiques ou géosciences et de niveau L3-M ou école d'ingénieurs. On y aborde la physique des processus qui opèrent aux échelles de l'Univers pour comprendre l'objet 'Cosmos', ses lois, son contenu et son histoire.

Je décris par la suite mon approche du sujet, les compétences que je souhaite transmettre aux lecteurs, les autres sources je considère comme des références pour ce projet. Je finis par une description détaillée du plan proposé.

Origines du cours

J'enseigne la cosmologie au M2 d'Astrophysique de l'Université de Strasbourg ainsi qu'aux License première année de toutes filières dans le cadre d'un enseignement d'ouverture. Ce cours est basé sur mes notes de cours, en particulier sur un fascicule que je distribue chaque année à mes étudiants de M2: l'extrait de cours ci-joint en est directement issu ainsi que la très grande majorité du plan proposé. Il a aussi bénéficié de plusieurs cours donnés lors de l'école d'été européenne de physique, organisée tous les ans à Strasbourg au niveau L3-M1 ainsi que de cours donnés par le passé à des étudiants de L3 Sciences de la Terre et de l'Univers. Par conséquent, cette proposition est largement le fruit des enseignements que j'ai été amené à faire dans le cadre de mon service de maître de conférences et je crois qu'il a ainsi bénéficié des multiples cadres dans lequel il a été donné et des retours d'étudiants.

Ce cours est essentiellement axé sur les aspects théoriques de la cosmologie. Même si il fait référence aux contraintes observationnelles actuelles, il n'a pas pour objet de décrire les techniques d'analyse ou instrumentales permettant de sonder les propriétés du cosmos. Son objectif est plutôt décrire les grands concepts de la cosmologie, qui exercent toujours un fort attrait auprès du public étudiant, et d'en profiter pour exposer ce public à la démarche/réflexion du physicien armés de ces outils que sont le mathématiques couplées 'un certain sens physique'.

De fait, mon expertise scientifique n'est pas liée à la cosmologie la plus théorique ou à la détermination observationnelle des propriétés de l'Univers à l'aide d'instruments spatiaux. Je suis un spécialiste de cosmologie numérique : je conçois et j'utilise des codes informatiques de simulation cosmologiques, capables d'utiliser les plus grands super-calculateurs du monde pour produire des Univers synthétiques évoluant en accéléré. J'ai ainsi participé à la production et l'analyse de calculs de simulation cosmologique parmi les plus grands jamais réalisés. C'est une expertise à cheval sur l'astrophysique, la cosmologie, les mathématiques appliquées et l'informatique lourde et de fait mon expertise de la cosmologie est liée à la nécessité de la comprendre finement pour pouvoir réaliser ce type de codes numériques. Par ailleurs, mon champ d'étude porte sur la formation des premières galaxies, champ pour lequel la cosmologie est surtout *un contexte* dans lequel évoluent ces objets.

Par conséquent, les propriétés et les lois cosmologiques de l'Univers sont

- des choses que je modélise (je ne les invente pas comme un théoricien pur et je ne les détermine pas comme un observateur)
- un contexte pour mon champ d'étude et sont donc d'ordre *utilitaires* et non la finalité de mes travaux.

Cette connaissance est donc pragmatique, empirique, intéressée et non naturelle : c'est par nécessité que j'ai été amené à étudier la cosmologie pour pouvoir réaliser ma science la plus directe. Ce cours est donc aussi le fruit de mes questionnements, de mes raisonnements pour lever les ambiguïtés et éclaircir les points obscurs qui faisaient obstacle à mes propres travaux.

Par ailleurs, la cosmologie est un outil pour mes travaux et non une fin en soi: en essayant de modéliser un Univers en évolution, nous sommes amenés à dégager l'important et l'utile au détriment du futile et de l'inutilement complexe. Ce cours je crois traduit ce détachement, ce recul par rapport à la discipline, qui est à mon avis bien adapté à un premier cours de cosmologie.

Compétences visées

Parmi les compétences visées, il est évidemment l'ambition de fournir une connaissance des concepts importants de la cosmologie moderne et si possible de lever certaines ambiguïtés qui apparaissent lorsque l'on s'intéresse à l'Univers tout entier. Certaines notions comme les distances, les temps ou les vitesses deviennent non-univoques et semblent parfois en contradiction avec notre expérience quotidienne : il suffit généralement de peu pour lever ces ambiguïtés et je m'attache à les lever le plus systématiquement possible.

Pour ce qui est des compétences méthodologiques, ce cours possède une quantité raisonnable d'équations et de mathématiques. Toutefois, l'accent n'est pas mis sur la résolution des équations mais sur leur analyse. Mon propos est d'essayer de démontrer qu'une équation censée décrire une loi de la nature 'parle' énormément avant même d'avoir été résolue. Une analyse bien menée (à base d'analyse dimensionnelle ou de structure des équations) permet souvent d'extraire les échelles caractéristiques des problèmes étudiés, les termes dominants ou les tendances lourdes. La résolution technique, mathématique, permet une approche quantitative mais le comportement qualitatif peut très souvent être connu en amont.

Je constate lors de mes cours que cela permet de briser la 'muraille des mathématiques' qui paralyse grand nombre d'aspirants physiciens. En repoussant le début de l'analyse physique après la résolution mathématique, on fait souvent l'erreur de mettre une barrière (la résolution mathématique) qui doit être franchie avant d'entamer toute réflexion sur le phénomène physique étudié. En essayant d'avoir un propos physique avant toute résolution mathématique, on ne rend plus cette dernière indispensable. et elle devient même plus aisée à effectuer si l'on sait à l'avance l'essentiel de ce qui doit être trouvé comme tendances ou échelles caractéristiques. Par ailleurs, nous entrons qu'on le veuille où non dans une époque où il est facile d'avoir accès à des outils qui permettent de résoudre automatiquement toute sorte d'équations, reste l'analyse et la compréhension de ces équations qui doit alors être encouragée.

De même, j'attache une importance particulière à la réalisation de graphes 'à la main' pour soutenir une réflexion, de même qu'à l'analyse approfondie de courbes, théoriques ou expérimentales. Dégager des régimes de comportement ou des échelles caractéristiques est une autre compétence que les étudiants se doivent d'acquérir le plus tôt possible.

Ces principes de réflexion sont ceux que j'applique dans mon travail de chercheur au jour le jour et guide grand nombre de spécialistes des simulations numériques et de la modélisation: c'est une approche hybride entre la théorie et l'expérimentation propre à ma discipline. Cette approche, basée sur l'analyse des équations/reliations/figures permet également d'aborder certains problèmes complexes de la cosmologie sans tomber dans le simplisme et la sur-approximation ni dans la mathématisation outrancière.

Autant que possible, ce sont des principes que j'essaie de faire transparaître dans mes cours et qui je crois bénéficient aux étudiants en les sortant à la fois du 'tout mathématique' et du 'tout avec les mains'.

Références à d'autres ouvrages

Le type d'ouvrage que j'aimerais idéalement écrire serait une version française du « Cosmological Physics » de John Peacock (Cambridge University Press). C'est un ouvrage exhaustif, plus exhaustif que le plan décrit ci-après, et qui met l'emphasis sur la compréhension physique et

intuitive de la cosmologie à partir d'études détaillées des équations maîtresses ou des courbes fondamentales. Les mathématiques y sont mises au service de la compréhension des phénomènes.

Il existe également 2 sites d'astrophysiciens réputés, Ned Wright¹ (UCLA) et Wayne Hu² (Chicago), qui ne rechignent pas à décrire des processus cosmologiques complexes en y mettant toute la pédagogie nécessaire et sans tomber dans le simplisme. Ils reposent également sur un usage important des figures et l'analyse poussée des équations.

Contenu du cours

Le plan du cours proposé est relativement classique.

Il débute par un « chapitre 0 », un exposé de l'état des connaissances sur les propriétés de l'Univers: caractérisation de l'expansion, contenu en matière/énergie, les grandes étapes de son histoire et un bref exposé des objets et techniques astronomiques qui permettent d'étudier le cosmos dans sa globalité. La suite du cours est divisé en 3 parties : une première partie, axée sur la théorie et qui décrit l'Univers idéal homogène, avec des notions de bases comme l'expansion, la géométrie ou le rougissement cosmologique décrits en détail (chapitre 2 & 3). Les chapitres 4, 5 & 6 portent sur l'Univers chaud et primordial, dont la physique est liée à la physique des particules et aux processus aux échelles corpusculaires. Les chapitres 7 & 8 sont dédiés à la formation des structures, qui chronologiquement suit l'Univers chaud. Le dernier chapitre est consacré à l'Inflation et se situe quelque peu à part car il concerne des époques extrêmes (les premiers instants, des énergies gigantesques) dont l'existence est fortement soupçonnée mais non démontrée actuellement.

Partie I: L'Univers Homogène

Le second chapitre est dédié aux concepts fondamentaux. On y définit la cosmologie et la notion d'Univers avant d'exposer le *principe cosmologique*, à savoir 'l'axiomatique' qui permet d'étudier l'Univers dans son ensemble. Ce chapitre se termine par une discussion sur la gravitation et exposé bref de concepts de relativité générale. Cette partie permet de dégager 2 outils nécessaires par la suite, la métrique de Friedmann-Robertson-Walker (qui permet de mesurer l'intervalle entre 2 points dans un Univers non statique) et l'équation de Friedmann (qui décrit l'expansion de l'Univers en fonction de son contenu).

Le chapitre 3 explore en détail la mécanique de l'Univers en expansion. On y explore notamment le rôle joué par la matière, le rayonnement et « le vide » et des notions importantes telles que les paramètres de densité sont introduits. Des modèles simples d'Univers sont exposés, permettant de calculer pour chacun d'eux l'âge de l'Univers et son histoire d'expansion. En particulier, on démontre dans cette partie que l'expansion accélérée de l'Univers qui est observée aujourd'hui ne peut s'expliquer sans faire appel à une énergie du vide de nature inconnue. C'est ce chapitre qui est proposé comme extrait, directement issu du fascicule de cours donné à mes étudiant de M2.

Partie II L'Univers Chaud

Les chapitres 4 et 5 sont liés et décrivent les processus à l'oeuvre dans l'Univers primordial, âgé de moins de quelques minutes. Le chapitre 4 porte sur la physique statistique et la thermodynamique nécessaires à décrire le bain de particules existant dans ces époques reculées et les notions d'équilibre et de gel de réactions y sont exposées. Tous ces concepts servent à

¹ <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>

² <http://background.uchicago.edu/index.html>

établir l'évolution générique des abondances à l'équilibre des particules élémentaires. Le chapitre 5 utilise les principes vus au chapitre précédent pour les appliquer aux particules principales du modèle standard (protons, neutrons, électrons, neutrinos, photons, etc...) : on en dérive une histoire thermique de l'Univers. Par la suite, on décrit en détail le processus de nucléosynthèse primordiale qui conduit à la synthèse de l'Hélium et des éléments légers.

Le chapitre 6 est entièrement dédié au fond diffus cosmologique, le rayonnement fossile émis lors de la création des atomes d'hydrogène, 380 000 ans après le Big Bang. Il s'agit sans doute de l'objet le plus important de la cosmologie de part la quantité d'informations sur l'Univers jeune qu'il contient. Son origine (le processus de recombinaison) est décrit en détail dans un premier temps. Par la suite, un bref historique de sa découverte est proposé, compte tenu de l'importance première de cet objet pour la discipline et la physique en général. Enfin, ses grandes propriétés sont décrites et analysées: dans un premier temps son spectre (dit de corps noir) est discuté et dans un second temps, on analyse dans le détail sa structure spatiale avec une première introduction aux notions de spectre de puissance et d'oscillations baryoniques acoustiques.

Partie III La formation des Structures

Les chapitres 7 et 8 vont également de pair et sont dédiés aux grandes structures de l'Univers. Le chapitre 7 est dédié à la matière noire avec dans un premier temps les indices amenant à penser qu'une telle matière existe au sein des galaxies. Dans un second temps, des éléments de dynamique gravitationnelle non-collisionnelle sont exposés comme la notion de temps de relaxation, de rayons de Viriel, d'instabilités : ces éléments permettent une introduction au concept de halos de matière noire, ainsi qu'une discussion sur la nature de la matière noire ('chaude' ou 'froide'). Pour finir, on exposera les phénomènes pouvant être expliqués par la présence de matière noire ainsi que les difficultés que rencontre cette hypothèse. Le chapitre 8 lui explorera la théorie de l'instabilité gravitationnelle, précisément dictée pour l'essentiel par la matière noire. On y fait en particulier tout le traitement de la croissance initiale des grandes structures de l'Univers, croissance qui mène in fine à la formation des galaxies. On introduit ainsi la notion essentielle de longueur de Jeans, qui permet de déterminer le degré de stabilité d'une structure. Le traitement complet dans le régime linéaire permet d'expliquer le mécanisme de formation des oscillations baryoniques acoustiques et la forme observée du spectre de puissance de la distribution de matière dans le cosmos.

Pour finir le chapitre 9 est dédié à une phase plus spéculative de l'histoire de l'Univers, la période d'inflation qui aurait pris place environ 10^{-30} secondes après le Big-Bang. Dans un premier temps, le cours décrit comment cette phase d'expansion rapide expliquerait la platitude de l'Univers ainsi que son homogénéité. Par la suite, on décrit le mécanisme d'inflation pour les modèles les plus simples, en introduisant la notion de champ et d'énergie associée : en particulier le lien avec l'énergie du vide sera discuté. Cette partie se conclut sur un bref descriptif des pistes qui permettraient une validation définitive de l'existence de cette phase.

Pour tous ces chapitres, je dispose déjà de notes de cours détaillées. L'essentiel du travail devrait consister en une homogénéisation/rationalisation des notations et surtout en l'addition de figures/iconographie au manuscrit : dans mon cours actuel ces figures sont fournies dans les transparents projetés qui accompagnent mes cours.