



« Notre univers est infiniment plus grand, plus extraordinaire et plus mystérieux que nous avons pu le penser. Nous ne connaissons aujourd’hui que 0,5 % de sa composition et la nature de la matière noire est une des grandes énigmes de l’astrophysique contemporaine ».



**L’astrophysicienne Françoise COMBES,
est nommée titulaire de la nouvelle chaire *Galaxies et cosmologie***

- Leçon inaugurale le 18 décembre 2014 -

Véritable exploratrice de nos origines les plus reculées, le Pr Françoise Combes est spécialiste de la formation des galaxies, de leur dynamique et de leur évolution depuis le Big Bang, mais aussi de la matière noire dont il faudra déterminer la nature pour mieux comprendre l’évolution de notre univers et la formation des grandes structures galactiques. Son parcours scientifique et l’importance de ses découvertes, dans un domaine de recherche particulièrement vaste, en font une des figures majeures de sa discipline.

Les recherches de Françoise Combes couvrent, et cela est rare, à la fois des aspects observationnels, qui lui ont permis par exemple de détecter des galaxies dans les premiers 10% de l’âge de l’univers (les galaxies primordiales), et des aspects théoriques, avec notamment des travaux pionniers de simulation numérique pour comprendre l’émergence des galaxies.

Le mystère de la matière noire

L’astronomie et la cosmologie, qui ont connu ces 20 dernières années une vitalité et un renouvellement extraordinaire, sont aujourd’hui considérées comme des sciences de précision, permettant de dater l’origine de notre univers à 13,8 milliards d’années ou encore d’affiner des théories fondamentales comme celle du Big Bang. Mais les découvertes récentes, comme l’existence d’un trou noir super massif au centre de notre galaxie, ont également mis en évidence le nombre vertigineux de phénomènes et de mécanismes entraperçus mais encore inexplicables.



« Notre connaissance a fait de tels progrès au 20^{ème} siècle que nous pouvons nous lancer avec beaucoup d’espoir dans la quête de nos origines de façon scientifique et réaliste. La science nous permet maintenant d’aborder les problèmes en laissant entrevoir des réponses aux questions essentielles : comment notre environnement s’est-il formé et a-t-il évolué, d’où venons nous et sommes nous seuls ? Mais la tâche est immense, lorsqu’il s’agit de bâtir un scénario de formation des structures alors que nous avons identifié seulement 0,5 % de la composition de l’univers. D’énormes progrès sont nécessaires pour résoudre les grandes questions restées en suspens. Lorsque les réponses seront connues avec plus de précisions, nous aurons acquis une nouvelle vision du monde et de notre propre signification dans l’univers », estime Françoise Combes.

Les cours du Pr Combes auront lieu les mercredis à 16h30.

Son enseignement sera disponible en audio, vidéo et en version anglaise sur www.college-de-france.fr

Galaxies et Cosmologie : problèmes actuels et perspectives

Comment sont nées les galaxies ? Quand et comment se sont formées toutes les étoiles qui nous entourent ? Connaît-on la composition détaillée de l'Univers ? C'est peut-être cette dernière question, qui pourtant apparaît la plus simple, qui représente l'énigme la plus mystérieuse de l'astrophysique contemporaine.

D'un côté, optimiste, les progrès récents ont été fulgurants, et l'on parle aujourd'hui de la cosmologie comme une science de précision, alors qu'au XXe siècle elle faisait l'objet encore de spéculations. Grâce à la mesure des anisotropies dans le fonds micro-onde, qui ne sont que des rides d'amplitude 1/100 000 du fonds de rayonnement cosmique, aux lentilles gravitationnelles, et aux supernovae lointaines (qui ont fait l'objet du prix Nobel de Physique en 2011), nous savons avec précision depuis le début du 3^e millénaire que l'Univers est né il y a 13,8 milliards d'années, que la courbure de l'espace est nulle à grande échelle, et que les composants sont à 70% de l'énergie noire, 25% de la matière noire faite de particules encore inconnues, et 5% de matière ordinaire, que nous appelons les baryons (protons, neutrons étant les principaux composants). D'un autre côté, plus pessimiste, on s'aperçoit que l'Univers est fait de 95% d'inconnu, que l'on appelle le secteur sombre, et encore parmi les 5% restants, qui sont faits de matière ordinaire, nous n'en observons que 10% (soit 0.5% du total !) sous forme de galaxies, d'étoiles et de gaz. Le reste des baryons ne rayonne pas, et sans doute est sous forme de gaz trop chaud ou trop froid pour se manifester.

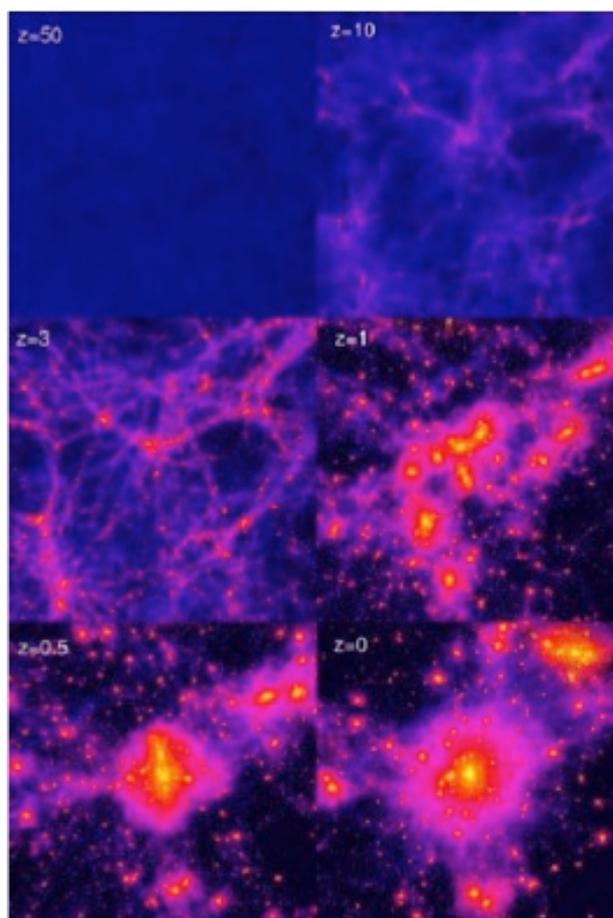
On voit donc que la tâche est immense, lorsqu'il s'agit de bâtir un scénario de formation des structures, alors que nous n'avons identifié la nature que de 0,5% de leur composition !

La théorie du Big Bang et ses raffinements récents nous proposent un scénario dynamique et hiérarchique de la formation des structures dans l'Univers (cf illustration ci-dessous): des fluctuations primordiales de matière noire commencent par croître sous l'effet de la gravité, et s'effondrent pour former des petits halos en équilibre gravitationnel. Le gaz de protons et de neutrons subit lui aussi cette attraction gravitationnelle et chute au coeur des halos. Les effets hydrodynamiques entrent alors en jeu (pression, chocs, turbulence) et conduisent le gaz à s'échauffer progressivement. Lorsque la température atteint environ 10 000 degrés, le plasma ionisé se refroidit très rapidement en rayonnant des photons ultraviolets et provoque l'effondrement catastrophique du gaz, qui conduit à la formation d'un disque de gaz très dense, en équilibre centrifuge, à savoir une galaxie. Pour comprendre en détails l'émergence des galaxies, il faut savoir traiter la physique du gaz dans toute sa complexité (hydrodynamique, transfert radiatif) et sur une incroyable dynamique en taille, en température et en densité. Ces premières galaxies naines vont interagir et fusionner, et ainsi donner naissance par coalescence hiérarchique à des galaxies géantes, de la taille de la Voie Lactée. Le scénario est déjà vérifié dans ses grandes lignes par les observations et les simulations actuelles, mais d'énormes progrès sont nécessaires pour résoudre les grandes questions restées en suspens : de quelle nature sont les premières étoiles ? Quelles sont leurs masses et leurs durées de vie ? Vont-elles réussir à ré-ioniser l'Univers, qui deviendrait transparent et observable ensuite ? à quelle époque ? Dans quel réseau de réactions nucléaires les éléments lourds que nous observons aujourd'hui dans

notre galaxie, et dont nous sommes constitués, ont-ils été synthétisés ? Quel processus explique la différence entre galaxies spirales et galaxies elliptiques ?

LAu delà de la curiosité implacable qui pousse l'humanité aux découvertes les plus fondamentales, l'exploration de nos origines grâce à l'astrophysique permettra d'apporter des éléments de réponse aux questions éternelles, comme celles de notre place et de notre rôle dans l'univers. Nous pourrions alors considérer l'avenir de notre civilisation avec plus de sérénité et de confiance. Déjà nous réalisons, grâce au grand nombre de planètes extra-solaires découvertes ces dernières années, combien dans ce monde immense à la fois dans l'espace et le temps, la vie est quelque chose de fragile, éphémère et précieux.

Françoise Combes



Simulation cosmologique de la formation des galaxies. Les 6 panneaux font défiler de gauche à droite et de bas en haut 6 étapes de la formation d'une galaxie comme la Voie Lactée. L'époque est indiquée par le décalage vers le rouge (ou redshift z), qui repère le niveau d'expansion de l'espace : toute dimension caractéristique (ou règle par exemple) varie comme $R = R_0/(1+z)$. La température de l'Univers se refroidit dans l'expansion, comme $T = T_0 (1+z)$, et vaut aujourd'hui $T_0 = 2,73$ degrés Kelvin. Le temps écoulé varie approximativement comme $(1+z)^{-3/2}$, et vaut 0,05, 0,5, 2, 5, 7 et 13,8 milliards d'années pour les 6 époques. Noter que les galaxies se forment dans des structures filamenteuses, que l'on appelle la toile cosmique.

Activités de recherche du Pr Françoise Combes

Elles incluent d'abord la dynamique des galaxies, leur structure spirale ou barrée, les interactions entre galaxies, étudiées à la fois par les observations à diverses longueurs d'onde et par des simulations numériques. Mais aussi l'étude du milieu interstellaire des galaxies, en particulier le gaz moléculaire qui donne naissance aux étoiles, que ce soit dans les galaxies très proches de nous comme Andromède, ou les galaxies aux confins de l'Univers, il y a 13 milliards d'années. Elle s'intéresse à plusieurs modèles différents de matière noire, mais aussi à une des alternatives qu'est la gravité modifiée. Elle a également développé un modèle pour rendre compte de la matière noire baryonique encore inconnue, sous forme de gaz moléculaire froid.

Les principaux défis auxquels s'attaquent aujourd'hui Françoise Combes et ses collaborateurs sont la compréhension de l'évolution et de la croissance des galaxies, de la co-évolution des trous noirs super-massifs et de la nature de la matière noire. Ils utilisent pour ces recherches les télescopes les plus puissants, comme l'interféromètre millimétrique ALMA, qui permet de détecter le gaz interstellaire et la formation d'étoiles dans les galaxies primordiales.

L'équipe du Pr Combes est à l'origine de la découverte de flots de gaz éjectés par les trous noirs supermassifs et effectue actuellement des simulations numériques pour établir le rôle de ces flots dans la modération de la formation d'étoiles au cours de la vie d'une galaxie. Alors que la dynamique de la Voie Lactée sera bientôt connue à 3 dimensions, grâce au satellite européen GAIA, elle effectue des calculs en prévision pour contraindre la théorie. Son équipe travaille également à l'étude de la dynamique des galaxies en gravité modifiée, qui pourrait apporter une alternative à la matière noire.

Son intérêt se porte aussi sur les prochains surveys du ciel à grande échelle, qui vont éclairer le problème de l'énergie noire, et faire progresser notre connaissance de l'évolution des galaxies : Le satellite Européen EUCLID ou l'interféromètre radio SKA (Square Kilometer Array), un instrument gigantesque qui mobilise le plus grand nombre de pays sur la planète. Il permettra par exemple de détecter le spectre d'un milliard de galaxies, grâce à la raie fondamentale de l'hydrogène atomique, à 21cm de longueur d'onde.

Biographie

Françoise Combes, est ancienne élève de l'École normale supérieure (ENS, Paris), agrégée de sciences physiques (1975), et docteur d'État en Astrophysique (1980). Elle a été enseignant-chercheur à l'ENS (maître de conférences, 1975-85), Sous-Directeur du Laboratoire de Physique à l'ENS (1985-89), puis Astronome à l'Observatoire de Paris (1989-2014). Elle a été présidente de la Société française d'Astronomie et d'Astrophysique (2002-2004) et a dirigé le Programme national Galaxies du CNRS (2001-2008).

Françoise Combes assure la présidence du Cofusi (Comité français des unions scientifiques internationales) depuis le 3 janvier 2010. Elle est membre de l'académie des sciences depuis 2004, et Honorary Fellow de la Royal Astronomical Society depuis 2013. Elle est, depuis 2003, éditeur de la revue européenne *Astronomy & Astrophysics*. Elle a reçu un grand nombre de distinctions et prix, comme la médaille d'argent du CNRS en 2001, le Prix Tycho Brahe de la Société Astronomique Européenne en 2009, le prix des Trois Physiciens de l'École Normale Supérieure en 2012, et le prix R.M. Petrie de la Société Astronomique Canadienne en 2013.

(Biographie détaillée : <http://www.college-de-france.fr/site/francoise-combes/Biographie.htm>)

Première année d'enseignement : La matière noire

Le cours 2014-15 portera sur un des problèmes les plus mystérieux en Astrophysique, la matière noire, qui constitue près de 85% de la matière de l'Univers. Françoise Combes s'attachera à décrire toutes les circonstances dans lesquelles elle se manifeste, par son attraction gravitationnelle : les disques de galaxies spirales en rotation, les sphéroïdes des galaxies elliptiques et naines, les amas de galaxies, les lentilles gravitationnelles. Elle passera en revue les candidats possibles à cette matière noire, qui sont recherchés par des expériences de détection directe ou indirecte. Elle décrira le rôle de cette matière dans la formation des galaxies, et comment les simulations cosmologiques permettent de contraindre les scénarios, et de poser de nouveaux problèmes. Les diverses pistes pour résoudre le problème seront discutées, comme les modèles de gravité modifiée.

Les cours du Pr Françoise Combes auront lieu les mercredis à 16h30.

(Calendrier des cours : <http://www.college-de-france.fr/site/francoise-combes/course-2014-2015.htm>)

Ils seront suivis à 17h30 d'un séminaire en rapport avec le cours. Pour chaque séminaire un spécialiste de renommée internationale viendra décrire son point de vue et ses recherches récentes

(Programme des séminaires : <http://www.college-de-france.fr/site/francoise-combes/seminar-2014-2015.htm>)

Perspectives :

Dans les années futures, les thèmes abordés seront choisis parmi la dynamique des galaxies: formation des barres, spirales – interactions et fusions; la formation des galaxies: modèle hiérarchique et évolution séculaire; le milieu interstellaire et la formation d'étoiles, son évolution cosmique; l'énergie noire et les modèles d'Univers; la réionisation de l'Univers; les trous noirs super-massifs et les quasars; le milieu intergalactique; les amas de galaxies et les grandes structures.

L'ensemble de l'enseignement du Pr Françoise Combes sera disponible en audio, vidéo et en version anglaise sur www.college-de-France.fr