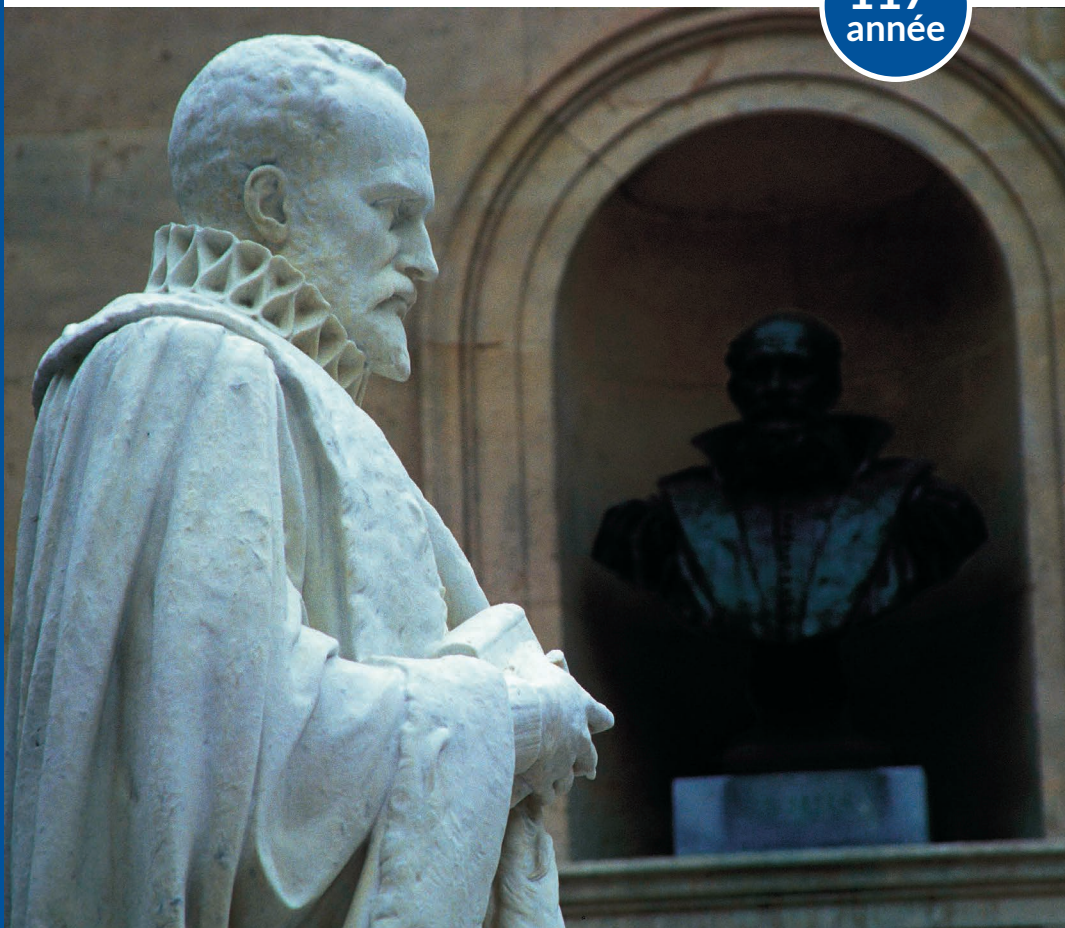


# ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2016 - 2017

Résumé des cours et travaux

117<sup>e</sup>  
année



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

# GALAXIES ET COSMOLOGIE

Françoise COMBES

Membre de l'Institut (Académie des sciences),  
professeure au Collège de France

---

Mots-clés : énergie noire, expansion, inflation, Univers, vide quantique, trous noirs, principe holographique, galaxies, formation d'étoile

---

La série de cours et séminaires « Énergie noire et modèles d'Univers » est disponible, en audio/et ou vidéo, sur le site internet du Collège de France (<http://www.college-de-france.fr/site/francoise-combes/course-2016-2017.htm>).

## ENSEIGNEMENT

### COURS ET SÉMINAIRES – ÉNERGIE NOIRE ET MODÈLES D'UNIVERS

#### **Introduction**

Depuis 1998, on sait que l'expansion de l'Univers s'accélère. Du fait de cette découverte, faite grâce à l'observation des supernovae de type Ia, qui peuvent être considérées comme des chandelles standard, le prix Nobel a été décerné à Saul Perlmutter, Adam Riess et Brian Schmidt en 2011. Jusqu'à cette époque, les astronomes étaient persuadés que l'expansion décélèrait, ralentie par la propre gravité du contenu de l'Univers. Une accélération implique une répulsion, et non une attraction, d'où l'invention de l'énergie noire, composant dont la pression est une fonction négative de la densité. Cette énergie noire pourrait-elle être l'énergie du vide quantique, extrapolée sur des échelles cosmologiques ? Très vite, on s'aperçoit que ce n'est pas le cas, car l'énergie prédite serait de 120 ordres de grandeur supérieure à ce qui est observé. Toutes les observations sont plutôt compatibles avec une constante cosmologique, mais le problème d'ajustement fin et de coïncidences remarquables est difficile à expliquer. La constante cosmologique permettrait de prédire le destin de notre Univers, en expansion exponentielle, comme l'Univers vide de De Sitter. Cette expansion exponentielle ressemble fort à la phase première

qui se produit dans une fraction de seconde après le Big Bang : l'inflation. L'inflation est nécessaire pour expliquer le problème de l'horizon et de la platitude de l'Univers. Le cours a décrit en détail les théories qui sont avancées pour expliquer l'énergie noire : la quintessence, mais aussi la gravité modifiée, les branes et les Univers à multiples dimensions, provenant de la théorie des supercordes. Dans la plupart des théories faisant intervenir une cinquième force, ou un cinquième élément, les constantes fondamentales peuvent varier, en fonction du temps ou de l'espace. Nous avons passé en revue les contraintes expérimentales et observationnelles de cette nouvelle physique. Dans un futur proche, le problème va progresser énormément grâce au lancement du satellite Euclid, ou de la mise en opération de grands *surveys*, comme celui du télescope LSST (Large Synoptic Survey Telescope).

### **Cours 1 – Accélération de l'expansion et énergie noire**

#### **Séminaire – Accélération de l'expansion : supernovae, lentilles**

Pierre Astier (UPMC, Paris), le 28 novembre 2016

Dans ce premier cours introductif, l'évidence observationnelle de l'existence de l'énergie noire ou d'une constante cosmologique est passée en revue et expliquée : la découverte des supernovae de type Ia lointaines, et leur distance plus grande que prévue par leur décalage vers le rouge, mais aussi les lentilles gravitationnelles. L'énergie noire n'est sensible que depuis récemment (5 milliards d'années). Juste après le Big Bang, son influence était négligeable, mais dans le futur, elle va complètement dominer l'Univers, qui ressemblera alors au modèle de De Sitter, en expansion exponentielle. La constante cosmologique a une longue histoire. Albert Einstein l'a introduite en 1917 pour pouvoir représenter un Univers statique. Son modèle d'Univers était une sphère de masse finie. Peu après était découverte l'expansion de l'Univers, et la constante cosmologique a été supposée nulle pendant quatre-vingt ans ! Wolfgang Pauli avait toutefois essayé en 1920 d'interpréter la constante cosmologique comme étant due à l'énergie du vide quantique, et s'était heurté à une incompatibilité de plusieurs ordres de grandeur. Le calcul a été repris dans les années 1960-1970, avec la théorie des champs et la chromodynamique quantique. L'énergie du vide est toujours d'un ordre de grandeur supérieur à ce qui est observé. Il faudrait inventer une constante cosmologique qui annule exactement la contribution du vide quantique, et cet ajustement fin apparaît très improbable. L'énergie du vide est pourtant une réalité confirmée : l'effet Casimir, découvert en 1948, est mesuré avec précision depuis plus de trente ans. Les expériences servent aussi à tester la force de gravité, actuellement jusqu'à des échelles de 10 microns. Les diverses solutions proposées pour l'énergie noire seront développées dans les cours suivants : divers modèles de quintessences, ou bien de gravité modifiée, des modèles d'Univers à de multiples dimensions, branes, etc.

### **Cours 2 – Énergie noire et gravité quantique – Inflation et contraintes du CMB**

#### **Séminaire – Contraintes du fonds cosmologique micro-onde**

François Bouchet (IAP, Paris), le 5 décembre 2016

Le problème de l'incompatibilité des ordres de grandeur pour l'énergie du vide quantique provient certainement de la gravité quantique, qui est encore incomprise.

Depuis plus d'un siècle, les physiciens essaient de construire une théorie quantique de la gravité, mais encore sans succès. Depuis la théorie quantique des champs, les forces forte, faible et électromagnétique ont pu être unifiées. Une tentative pour la gravité est la théorie des cordes. Depuis quarante ans, elle remplace la singularité des particules par des éléments à une dimension (de taille  $10^{-35}$  m). Mais elle nécessite des dimensions supplémentaires de l'espace, 26 dans certains cas, et 10 s'il existe la supersymétrie entre fermions de bosons, et toute une classe de particules supersymétriques à supposer au-delà du modèle standard de particules élémentaires. Dans cette unification des forces, la gravité aurait aussi son boson d'interaction – le graviton –, et l'on pourrait imaginer l'addition d'un potentiel de Yukawa à petite échelle. Il est donc primordial de tester la loi de la gravité à petite échelle. Des expériences de plus en plus précises, communes avec la mesure de la force de Casimir, n'ont toujours pas donné de déviations. Les tests du principe d'équivalence (EP) et de l'universalité de la chute libre (UFF) sont passés en revue depuis l'expérience d'Eötvös jusqu'au satellite Microscope lancé avec succès en avril 2016. Plus de dix ordres de grandeur ont été gagnés. Quelques aspects de la théorie des cordes sont abordés, en particulier son aspect de renormalisation des infinis (la gravité n'est pas renormalisable en théorie des champs). Plusieurs théories des cordes ont subsisté jusqu'en 1995, quand la M-théorie unifie les cinq théories des cordes, avec dix dimensions. La description des états quantiques peut se faire avec les D-branes, ou surfaces incluses dans l'Univers à onze dimensions de la supergravité. L'observation du fonds micro-onde, vestige du Big Bang, apporte de nombreuses contraintes sur la nature de l'énergie noire. Bien que l'énergie noire soit négligeable à  $t = 380\,000$  ans, on peut utiliser les effets de lentille gravitationnelle du fonds cosmologique par les structures de l'Univers, entre  $z = 1000$  et  $z = 0$ , et prouver l'existence de l'énergie noire, uniquement avec le fonds CMB.

### Cours 3 – Variation des constantes fondamentales

#### Séminaire – Oscillations acoustiques baryoniques

Éric Aubourg (CEA, Saclay), le 12 décembre 2016

Chaque constante est associée à une force, une théorie :  $G$  à la gravité,  $h$  à la mécanique quantique,  $c$  à la relativité, etc.) L'unification des forces est établie sur des brisures de symétrie ; le couplage de la chromodynamique quantique explique la masse des particules. Ainsi, à très haute énergie, le rapport de masse entre proton et électron  $\mu = m_p/m_e$  doit varier. Il doit même exister des relations entre  $\delta\mu/\mu$  et  $\delta\alpha/\alpha$ ,  $\alpha$  étant la constante de structure fine. La variation des constantes permet d'explorer une nouvelle physique au-delà du modèle standard, et de tester l'existence d'une cinquième force, de la quintessence. Historiquement, l'idée de la variation de  $G$  remonte à Paul Dirac en 1937. Plus généralement, les théories d'unification avec dimensions spatiales supplémentaires, compactifiées à petite échelle, introduisent des constantes de couplage dans notre Univers 3D reliées à la taille de ces dimensions additionnelles, qui varient en fonction du temps. Toutes les mesures de variation de constantes sont passées en revue : la mesure par horloge atomique au laboratoire, ou par le réacteur nucléaire naturel d'Oklo (au Gabon), l'abondance dans les météorites, les raies d'absorption devant le quasar, la nucléosynthèse primordiale, et le fonds cosmologique micro-onde. Des limites supérieures au niveau de  $10^{-6}$  en  $\alpha$  et  $\mu$  à grand *redshift* ( $\mu$  à  $10^{-7}$  à bas  $z$ ,  $2 \times 10^{-8}$  localement) sont obtenues. Dans le futur, des mesures plus précises pourront être faites

sur ESPRESSO au VLT et HIRES sur E-ELT, qui permettront de gagner 1 à 2 ordres de grandeur, et aussi sur ALMA en longueurs d'onde millimétriques. D'autres contraintes sur l'énergie noire sont obtenues grâce aux oscillations acoustiques baryoniques, ces vestiges de l'Univers jeune, où les photons et baryons oscillaient ensemble. Une fois gelée, la taille de la plus grande oscillation sert de règle standard, et permet de mesurer l'expansion de l'Univers en fonction du temps. Jusqu'à présent, l'énergie noire ne peut pas se différencier d'une constante cosmologique. Une mesure plus précise sera obtenue avec Euclid, LSST et SKA.

#### **Cours 4 – Couplage des structures et du secteur sombre**

##### **Séminaire – Structuration à grande échelle, amas de galaxies**

Alain Blanchard (IRAP, Toulouse), le 9 janvier 2017

L'Univers est extrêmement homogène et isotrope à son début, comme le montre le fonds cosmologique micro-onde. Mais aujourd'hui, les grandes structures sont très contrastées. Existerait-il un effet de ces structures sur la dynamique de l'espace-temps ? C'est ce phénomène que l'on appelle la « *back-reaction* ». Pour décrire l'Univers, on se place en effet dans l'hypothèse d'homogénéité, d'un Univers « lisse » à partir d'une densité moyenne, qui permet de calculer la métrique, et de définir la géométrie de l'Univers. Les équations d'Einstein relient la géométrie de l'Univers à son contenu en densité de matière et impulsion. Mais il n'y a pas de commutativité entre l'application de ces équations et le calcul de la moyenne, les équations d'Einstein sont non linéaires. Certains ont essayé de calculer l'influence de la *back-reaction* et de montrer qu'elle pourrait conduire à une expansion accélérée de l'Univers, même à partir d'un fluide avec pression positive ou nulle. L'avantage de ce modèle est qu'il ne serait pas nécessaire d'ajouter une cinquième force, et cela expliquerait que l'énergie noire ne devienne dominante que récemment, lorsque les structures deviennent très contrastées. Le modèle-jouet de Nambu-Tanimoto en 2005, à partir d'une petite sphère-test, était prometteur. Mais depuis, Green et Wald (2011, 2016) ont montré avec des calculs plus sophistiqués que l'effet serait négligeable. Le débat reste ouvert, par manque d'une quantification ultime. De nombreux tests sont possibles, les amas de galaxies en fournissent plusieurs, de même que les oscillations acoustiques baryoniques (BAO), les lentilles gravitationnelles, etc. Localement, les flots cosmiques locaux des structures commencent à être bien connus, notamment notre mouvement de 600 km/s vers le grand attracteur, un superamas de galaxies derrière la Voie lactée. Pourtant nous n'arrivons pas à converger vers un dipôle commun avec le fonds cosmologique micro-onde, il existe un flot cosmique résiduel de 200 km/s. Les amas de galaxies, avec l'effet SZ connu en micro-onde, et les émissions de rayons X permettent aussi de déterminer les distances, et de lever des dégénérescences avec le fonds cosmologique.

#### **Cours 5 – Constante cosmologique, ou quintessence**

##### **Séminaire – L'énergie sombre, un problème de physicien**

Philippe Brax (CEA, Saclay), le 16 janvier 2017

L'énergie du vide correspond à une pression négative, son équation d'état se résume à  $P = w\rho$ , avec  $w$  négatif. Dans l'équation d'Einstein qui donne l'accélération

de l'expansion, le terme intervient comme  $-(\rho + 3P)$ , donc pour assurer une accélération de l'expansion, il faut que  $w < -1/3$ . Le problème de l'énergie noire peut être résolu de deux façons, selon que l'on ajoute le terme supplémentaire à droite ou qu'on le soustraie à gauche de l'équation d'Einstein. En modifiant le terme de droite comprenant le tenseur énergie-impulsion, on ajoute un terme à la matière, la quintessence, ou K-essence, tachyons, gaz de Chaplygin, ou modèles couplés, etc. En modifiant le terme de gauche, on modifie la gravité, par exemple avec les théories de gravité modifiée  $f(R)$  ( $R$  le Ricci), modèles tenseur-scalaire, monde des branes, gravité massive, inhomogénéités, etc. ( $w < -1$  possible). Il y a parfois des recouvrements entre les deux types de solution.

Les théories de quintessence reviennent à ajouter un champ scalaire, de spin 0 ; en théorie des champs, le seul dans le modèle standard est le champ de Higgs, dont l'interaction donne la masse aux particules. Le champ scalaire devrait avoir une faible masse ( $10^{-33}$  eV) et donc descendre en pente douce vers son minimum. Un grand nombre de possibilités ont été envisagées : par exemple le cosmon, doué d'un couplage avec les neutrinos. Le couplage des neutrinos avec le cosmon étant plus fort qu'avec la gravité, la masse des neutrinos pourrait croître avec le temps, et les neutrinos devenir non relativistes il y a 5 milliards d'années. Il existe aussi la théorie des caméléons, qui sont des particules dont la masse varie avec l'environnement : leur masse effective croît avec la densité. Elles ont donc une très haute masse dans le système solaire, avec une faible portée (1 mm). À grande échelle, une faible masse et une portée bien plus grande ( $>$  kpc). Ainsi ces particules échappent à la détection sous forme de cinquième force. La théorie des galiléons utilise le mécanisme d'écrantage de Vainshtein, qui supprime la cinquième force dans un certain rayon au voisinage de sources massives. Des modèles génériques de quintessence sont étudiés (soit dégel, soit congélation, selon leur comportement en fonction du temps cosmique).

## Cours 6 – Énergie noire et nouvelle physique

### Séminaire – Gravité modifiée, branes, gravité massive

Cédric Deffayet (IAP, Paris), le 23 janvier 2017

L'échelle de Planck ( $10^{-35}$ m) est une limite fondamentale pour la gravité quantique. À cette échelle, l'idée d'un espace lisse s'effondre. Si l'on veut disposer d'une énergie suffisante pour localiser une particule, cette énergie est telle qu'elle crée son propre trou noir. Les trous noirs jouent un grand rôle dans la gravité quantique. Les trous noirs s'évaporent grâce à l'existence du vide quantique et de ses particules virtuelles. La théorie des cordes peut donner une représentation de gravité quantique, et justifier l'origine microscopique de l'entropie de Bekenstein-Hawking. Le problème de l'entropie perdue des trous noirs peut trouver une partie de solution dans le principe holographique : l'information contenue dans le volume délimité par l'horizon du trou noir ne peut pas être supérieure à ce qui est contenu sur sa surface. Il existe un quantum d'entropie (ou d'information) qui est le quart de la surface de Planck. L'entropie du trou noir est donc inférieure au quart de sa surface.

Les modèles de gravité modifiée vont des théories où l'on remplace le Ricci  $R$ , par  $f(R)$ , aux théories où un ou plusieurs champs scalaires, ou même vectoriels, sont ajoutés, comme par exemple la théorie tenseur-scalaire-vectoriel TeVeS, qui reproduit les idées et les succès de MOND pour les observations de galaxies, sans

matière noire. Il y a aussi un grand nombre de modèles à dimensions supplémentaires, où la gravité est la seule à se propager dans les autres dimensions. Il est possible de généraliser aux modèles tenseur-scalaires génériques de Horndeski, présentés par Cédric Deffayet. Depuis 2010, il est aussi possible d'imaginer que le graviton a une masse, car le fantôme qui empêchait de produire une théorie non linéaire de gravité massive a été résolu. Pour étudier la théorie des cordes, il est pratique d'utiliser les espaces anti-de Sitter (AdS) à constante cosmologique négative, et le principe d'équivalence AdS/CFT (théorie conforme des champs). La gravité peut alors être équivalente à une théorie de champ. La combinaison du principe holographique, et de la correspondance entre température et accélération (pour les trous noirs, cf. Unruh) est à l'origine de l'hypothèse de Erik Verlinde que la gravitation ne serait pas une force fondamentale mais une force entropique. Les variations de l'entropie d'intrication quantique, dues à la présence de matière peut expliquer l'émergence de la gravité. Une autre possibilité est la théorie quantique à boucle, qui crée son propre espace-temps.

## Cours 7 – Inflation et nouveaux paradigmes

### Séminaire – Théories inflationnaires

Jérôme Martin (IAP, Paris), le 30 janvier 2017

L'inflation, ou expansion exponentielle de  $\sim 10^{30}$  entre  $10^{-36}$ s et  $10^{-32}$ s a été inventée pour résoudre les problèmes de l'horizon, de la platitude de l'Univers, et la non-existence de monopôles. En prime, le modèle donne une origine naturelle aux fluctuations de densité initiales, qui sont à l'origine de toutes les structures de l'Univers aujourd'hui : en effet, l'expansion est si forte que lorsqu'une paire virtuelle particule-antiparticule se forme dans le vide, des régions connectées causalement se trouvent soudain déconnectées : les particules ne peuvent plus s'annihiler, et des fluctuations de densité sont créées. Les dernières observations du fonds cosmologique micro-onde par Planck ont confirmé le rôle de l'inflation dans la génération des structures (alors que les défauts topologiques sont éliminés). Les premières théories d'inflation provenaient d'un changement de phase et d'une brisure de symétrie. Aujourd'hui l'inflation chaotique n'a plus besoin de changement de phase. Il faut un champ scalaire, qui évolue en pente douce (*slow roll*). Ce champ ressemble à celui d'une quintessence, sauf que les amplitudes et échelles de temps sont complètement différentes. Les modèles actuels d'inflation souffrent du problème d'inflation éternelle. Il est difficile d'arrêter l'inflation partout. On peut l'arrêter juste pour notre Univers, avec réchauffement et création de particules, mais elle continue dans des Univers multiples. C'est une inflation fractale, avec une multitude de paysages, d'autant plus dans la théorie des cordes que l'espace à un grand nombre de dimensions supplémentaires. Quelles pourraient être les alternatives ? Certains développent des modèles cycliques, ou ekpyrotiques, à partir de branes en collision, ou bien cyclique, avec rebond, comme Turok et Steinhardt. Un test critique serait l'observation d'ondes gravitationnelles primordiales, qui prouverait l'inflation. Ce test a été tenté avec les modes de polarisation de symétrie B dans le fonds cosmologique micro-onde, mais n'ont pas encore donné de résultat. Les prochaines expériences pourraient être assez sensibles pour trancher.

## Cours 8 – Perspectives : Euclid, WFIRST, LSST, SKA

### Séminaire – Perspectives avec le LSST

Pierre Antilogus (UPMC, Paris), le 6 février 2017

Ce dernier cours discute des perspectives dans un proche avenir pour progresser dans le problème de l'énergie noire. Des missions satellitaires seront consacrées à ce problème, comme Euclid, satellite de l'ESA, qui sera lancé en 2020, ou la mission *Wide Field Infrared Survey Telescope* (WFIRST) de la NASA, consacrée à l'énergie noire et aux exoplanètes (~ 2025-2030 ?). Au sol, le LSST, ou *Large Synoptic Survey Telescope*, un 8 m à très grand champ situé au Chili, et le SKA, ou *Square Kilometer Array*, un réseau d'antennes radio basses fréquences, situé à la fois en Australie et en Afrique du Sud, selon la fréquence d'observation, entre 2 cm et 6 m de longueur d'onde. Les cinq principaux outils pour obtenir l'équation d'état de l'énergie noire, et donc sa nature, sont les lentilles faibles (le cisaillement cosmique), les supernovae de type Ia, les BAO, les *Redshift Space Distorsions* (ou RSD), et les amas de galaxies. D'autre part, la présence de structures en fonction du temps permettra de mesurer le taux de leur croissance, et donc de tester la gravité modifiée. Il est aussi possible de mieux connaître l'origine des structures cosmiques, donc de tester l'inflation, en améliorant d'un facteur 20 l'index spectral de la distribution en échelles, ou l'amplitude du spectre de puissance, les non-gaussianités, etc. Tous les paramètres cosmologiques sont enchevêtrés dans plusieurs modèles, et il est important de mesurer plus précisément la constante de Hubble, dont la valeur dérivée du fonds cosmologique micro-onde est en tension avec la détermination optique à partir des céphéides. Le SKA pourra en avoir une détermination indépendante, grâce aux mégamasers dans les galaxies par exemple. Le SKA pourra déterminer les BAO avec des traceurs complètement différents des galaxies optiques (biais vers les amas de galaxies), *i.e.* avec les galaxies riches en gaz, qui se trouvent plutôt entre les amas. Le LSST aura un aspect très riche dans le domaine variable, il fera une cartographie globale du ciel tous les trois jours, et publiera 1 à 2 millions d'alertes par nuit pour les objets variables.

ENSEIGNEMENT À L'EXTÉRIEUR

## Cours à l'Académie royale des Sciences de Belgique, Collège Belgique

### Les trous noirs supermassifs, trop gloutons

15 mars 2017

Nous connaissons les trous noirs, objets si compacts que même la lumière ne peut en sortir, de deux sortes : les trous noirs de masses stellaires, produits par l'explosion en fin de vie des étoiles massives, et les trous noirs supermassifs, de l'ordre de 1 million à 1 milliard de masses solaires. S'il existe dans chaque galaxie des milliards de trous noirs de la première sorte, il n'existe qu'un seul trou noir supermassif, au centre de chaque galaxie. Nous connaissons très bien celui de la Voie lactée, le plus proche, de 4 millions de masses solaires. Le mouvement propre des étoiles autour a été suivi depuis plus de vingt ans : les étoiles sont animées de vitesse de plus de 1 000 km/s, et ont une trajectoire parfaitement képlérienne. Notre trou noir n'est pas



actif, il montre tout de même quelques signes d'émission radio et en rayons X, avec des sursauts quasi-périodiques sur des échelles de temps de l'ordre du quart d'heure. Les trous noirs actifs sont à l'origine du phénomène de quasars, découverts par Maarten Schmidt en 1964. Leurs particularités remarquables, comme l'existence de jets superluminiques, viennent de l'énergie gravitationnelle colossale libérée par la chute de matière sur le trou noir. Ces trous noirs sont toutefois limités dans leur accrétion de matière par la luminosité d'Eddington, et ils sont obligés de recracher une grande partie de cette matière, d'où le nom de gloutons.

### Un peu de lumière sur la matière noire

16 mars 2017

La matière noire est une inconnue qui nous accompagne depuis des dizaines d'années. On la découvre au niveau des galaxies, par la vitesse de rotation de la matière, dans les amas de galaxies, par sa dynamique, et aussi le phénomène de lentille gravitationnelle, *i.e.* la déflexion des rayons lumineux d'arrière-plan par la masse de l'amas, et enfin au niveau de l'Univers tout entier, par ses empreintes dans les fluctuations de température du fond cosmique micro-onde, observé récemment par le satellite Planck. Le contenu de l'Univers actuel est de 70 % d'énergie noire, 25 % de matière noire non baryonique, et seulement de 5 % de matière ordinaire, les baryons. Et encore ne voit-on qu'une faible fraction de ces baryons (6 % seulement dans les galaxies). C'est depuis 1985 que nous avons établi que la matière noire ne peut pas être baryonique : la matière ordinaire ne peut former de structures que très tard dans l'Univers, étant piégée par les photons. Les simulations cosmologiques de la formation des structures dans le cadre du modèle standard de matière noire parviennent à représenter remarquablement les observations à grande échelle, à partir des fluctuations initiales mesurées par Planck. C'est seulement à petite échelle, celle des galaxies, que la théorie standard rencontre des problèmes. Les astronomes explorent toutes les solutions possibles, que ce soit dans la physique des galaxies, ou bien dans la gravité modifiée.

### RECHERCHE

Durant cette année académique 2016-2017, notre équipe a continué ses travaux sur les rétroactions des noyaux actifs de galaxies (encore appelés « *AGN feedback* »). Nous avons en particulier obtenu des résultats de l'interféromètre ALMA sur la galaxie IC5063 (Dasyra *et al.*, 2016). Le jet radio expulsé par ce noyau se trouve dans le plan même de la galaxie, et non perpendiculaire, comme il est plus fréquent. Ainsi le couplage avec la galaxie est maximum. À chaque impact avec des nuages de la galaxie, le jet est dévié et l'on détecte des flots moléculaires perpendiculaires au plan, à grande vitesse. L'une des particularités de ces flots, observés dans plusieurs raies de rotation de la molécule CO, est que l'émission se trouve être en grande partie optiquement mince, contrairement à d'autres flots moléculaires dans la littérature.

Dans le cadre du projet CARS (*Close AGN Reference Survey*), nous avons observé un certain nombre d'AGN proches en spectrographie optique (MUSE), en rayons X (Chandra) et aussi en millimétrique avec ALMA. Nous avons découvert que la galaxie Mrk1018, qui était classifiée comme Seyfert 1, avec des raies de Balmer très

larges et un fort continuum, a tout d'un coup perdu ces raies larges et ce continuum en l'espace de un à deux ans (McElroy *et al.*, 2016, Husemann *et al.*, 2016). Cette galaxie a changé de classe, et elle est devenue Seyfert 2. Curieusement, ce changement de classe très rare s'était déjà produit dans cette galaxie dans les années 1970, il y a plus de trente ans. Nous avons obtenu des données temporellement compatibles en X, optique et radio, pour connaître le mécanisme de ce changement de type, qui pourrait nous apprendre beaucoup sur la nature de ces objets. Nous avons pu montrer qu'il ne s'agissait pas d'obscurisation brutale par un nuage de poussière, mais bien d'une activité réduite du trou noir central, sans doute due à un taux d'accrétion de gaz réduit. Reste un mystère : comment expliquer que la source de gaz puisse se tarir sur des échelles aussi courtes ? L'hypothèse a été émise qu'il s'agirait peut-être d'un trou noir binaire, et que le compagnon perturbe le disque d'accrétion. Mais d'autres hypothèses sont possibles, et nous sommes actuellement en train de continuer le monitoring.

Les galaxies pénétrant pour la première fois dans un amas riche de galaxies sont soumises à une pression dynamique, due au gaz très chaud intra-amas, à des millions de degrés Kelvin. Cette pression dynamique est équivalente à un vent qui balaie le gaz atomique diffus des galaxies. Le gaz moléculaire plus dense en général n'est pas sensible à ce vent. Pourtant, nous avons mis en évidence des éjections de gaz moléculaire très importantes dans la galaxie D100 entrant dans l'amas de Coma (Jachym *et al.*, 2017). Le gaz s'étale sur une longueur de plusieurs rayons galactiques, et correspond aussi à des émissions X et Halpha de gaz ionisé. Le gaz moléculaire détecté par la molécule CO correspond à un milliard de masses solaires. Soit la pression dynamique est extrêmement forte, soit le gaz éjecté est transformé de gaz atomique en moléculaire en aval de l'éjection.

## PUBLICATIONS

AALTO S., MULLER S., COSTAGLIOLA F., SAKAMOTO K., GALLAGHER J.S., FALSTAD N., KÖNIG S., DASYRA K., WADA K., COMBES F., GARCÍA-BURILLO S., KRISTENSEN L.E., MARTÍN S., VAN DER WERF P., EVANS A.S. et KOTILAINEN J., « Luminous, pc-scale CO 6-5 emission in the obscured nucleus of NGC1377 », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 608, 2017, A22, DOI : 10.1051/0004-6361/201730650 [arXiv:1702.05458].

BUSCH G., ECKART A., VALENCIA-S. M., FAZELI N., SCHARWÄCHTER J., COMBES F. et GARCÍA-BURILLO S., « Star formation and gas flows in the centre of the NUGA galaxy NGC 1808 observed with SINFONI », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 598, 2017, A55, DOI : 10.1051/0004-6361/201629440 [arXiv:1611.07868].

CARLETON T., COOPER M.C., BOLATTO A.D., BOURNAUD F., COMBES F., FREUNDLICH J., GARCIA-BURILLO S., GENZEL R., NERI R., TACCONI L.J., SANDSTROM K.M., WEINER B.J. et WEISS A., « PHIBSS: Exploring the dependence of the CO-H<sub>2</sub> conversion factor on total mass surface density at  $z < 1.5$  », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 467, n° 4, 2017, p. 4886-4901, DOI : 10.1093/mnras/stx390 [arXiv:1611.04587].

COMBES F., « The Galactic Center compared with nuclei of nearby galaxies », *Proceedings of the International Astronomical Union*, IAU Symposium, vol. 11, n° S322, 2016, p. 245-252, DOI : 10.1017/S174392131601231X [arXiv:1608.04009].

CORBELLI E., BRAINE J., BANDIERA R., BROUILLET N., COMBES F., DRUARD C., GRATIER P., MATA J., SCHUSTER K., XILOURIS M. et PALLA F., « From molecules to Young Stellar Clusters: the star formation cycle across the M33 disk », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 601, 2017, A146, DOI : 10.1051/0004-6361/201630034 [arXiv:1703.09183].

DASYRA K.M., COMBES F., OOSTERLOO T., OONK J.B.R., MORGANTI R., SALOME P. et VLAHAKIS N., « ALMA reveals optically thin, highly excited CO gas in the jet-driven winds of the galaxy IC5063 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 595, 2016, L7, DOI : 10.1051/0004-6361/201629689 [arXiv:1609.03421].

DESSAUGES-ZAVADSKY M., ZAMOJSKI M., RUJOPAKARN W., RICHARD J., SKLIAS P., SCHAEERER D., COMBES F., EBELING H., RAWLE T.D., EGAMI E., BOONE F., CLÉMENT B., KNEIB J.-P., NYLAND K. et WALTH G., « Molecular gas properties of a lensed star-forming galaxy at  $z \sim 3.6$ : A case study », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 605, 2017, A81, DOI : 10.1051/0004-6361/201628513 [arXiv:1610.08065].

FABIAN A.C., WALKER S.A., RUSSELL H.R., PINTO C., CANNING R.E.A., SALOME P., SANDERS J.S., TAYLOR G.B., ZWEIBEL E.G., CONSELICE C.J., COMBES F., CRAWFORD C.S., FERLAND G.J., GALLAGHER J.S. III, HATCH N.A., JOHNSTONE R.M. et REYNOLDS C.S., « HST imaging of the dusty filaments and nucleus swirl in NGC4696 at the centre of the Centaurus Cluster », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 461, n° 1, 2016, p. 922-928, DOI : 10.1093/mnras/stw1350 [arXiv:1606.02436].

FENSCH J., RENAUD F., BOURNAUD F., DUC P.-A., AGERTZ O., AMRAM P., COMBES F., DI MATTEO P., ELMEGREEN B., EMSELLEM E., JOG C.J., PERRET V., STRUCK C. et TEYSSIER R., « High-redshift major mergers weakly enhance star formation », *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 465, n° 2, 2017, p. 1934-1949, DOI : 10.1093/mnras/stw2920 [arXiv:1610.03877].

FRAGKOU DI F., DI MATTEO P., HAYWOOD M., GÓMEZ A., COMBES F., KATZ D. et SEMELIN B., « Bars & boxy/peanut bulges in thin & thick discs. I : Morphology and line-of-sight velocities of a fiducial model », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 606, 2017, A47, DOI : 10.1051/0004-6361/201630244 [arXiv:1704.00734].

GRATIER P., BRAINE J., SCHUSTER K., ROSOŁOWSKY E., BOQUIEN M., CALZETTI D., COMBES F., KRAMER C., HENKEL C., HERPIN F., ISRAEL F., KORIBALSKI B.S., MOOKERJEA B., TABATABAEI F.S., RÖLLIG M., TAK F.F.S. van der, WERF P. van der et WIEDNER M., « The molecular gas mass of M33 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 600, 2017, A27, DOI : 10.1051/0004-6361/201629300 [arXiv:1609.03791].

JACHYM P., SUN M., KENNEY J.D.P., CORTESE L., COMBES F., YAGI M., YOSHIDA M., PALOUS J. et ROEDIGER E., « Molecular gas dominated 50 kpc ram pressure stripped tail of the coma galaxy D100 », *The Astrophysical Journal*, vol. 839, n° 2, 2017, p. 114, DOI : 10.3847/1538-4357/aa6af5 [arXiv:1704.00824].

JEAN-BAPTISTE I., DI MATTEO P., HAYWOOD M., GOMEZ A., MONTUORI M., COMBES F. et SEMELIN B., « On the kinematic detection of accreted streams in the Gaia era: A cautionary tale », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 604, 2017, A106, DOI : 10.1051/0004-6361/201629691 [arXiv:1611.07193].

HUNT L.K., WEISS A., HENKEL C., COMBES F., GARCIA-BURILLO S., CASASOLA V., CASELLI P., LUNDGREN A., MAIOLINO R., MENTEN K.M. et TESTI L., « Physical conditions of the molecular gas in metal-poor galaxies », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 606, 2017, A99, DOI : 10.1051/0004-6361/201731000 [arXiv:1704.05252].

HUSEMANN B., URRUTIA T., TREMBLAY G.R., KRUMPE M., DEXTER J., BUSCH G., COMBES F., CROOM S.M., DAVIS T.A., ECKART A., MCELROY R.E., PEREZ-TORRES M., POWELL M. et SCHARWÄCHTER J., « The Close AGN Reference Survey (CARS): What is causing Mrk 1018's return to the shadows after 30 years? », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 593, 2016, L9, DOI : 10.1051/0004-6361/201629245 [arXiv:1609.04425].

LABIANO A., GARCÍA-BURILLO S., COMBES F., USERO A., SORIA-RUIZ R., PIQUERAS LÓPEZ J., TREMBLAY G., HUNT L., FUENTE A., NERI R. et OOSTERLOO T., « AGN feedback and star formation in young and old radio galaxies », *Astronomische Nachrichten*, vol. 337, n° 1-2, 2016, p. 188-193, DOI : 10.1002/asna.201512289.

- MALHOTRA S., RHOADS J.E., FINKELSTEIN K., YANG H., CARILLI C., COMBES F., DASSAS K., FINKELSTEIN S., FRYE B., GERIN M., GUILLARD P., NESVADBA N., RIGBY J., SHIN M.-S., SPAANS M., STRAUSS M.A. et PAPOVICH C., « Herschel extreme lensing line observations: [CII] Variations in galaxies at redshifts  $z = 1 - 3$  », *The Astrophysical Journal*, vol. 835, n° 1, 2017, p. 110, DOI : 10.3847/1538-4357/835/1/110.
- MCELROY R.E., HUSEMANN B., CROOM S.M., DAVIS T.A., BENNETT V.N., BUSCH G., COMBES F., ECKART A., PEREZ-TORRES M., POWELL M., SCHARWÄCHTER J., TREMBLAY G.R. et URRUTIA T., « The Close AGN Reference Survey (CARS): Mrk 1018 returns to the shadows after 30 years as a Seyfert 1 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 593, 2016, L8, DOI : 10.1051/0004-6361/201629102 [arXiv:1609.04423].
- MIGLIO A., CHIAPPINI C., MOSSER B. *et al.*, « PLATO as it is: A legacy mission for Galactic archaeology », *Astronomical Notes: Astronomische Nachrichten*, vol. 338, n° 6, 2017, p. 644-661, DOI : 10.1002/asna.201713385 [arXiv:1706.03778].
- MULLER S., MÜLLER H.S.P., BLACK J.H., BEELEN A., COMBES F., CURRAN S., GÉRIN M., GUÉLIN M., HENKEL C., MARTÍN S., AALTO S., FALGARONE E., MENTEN K.M., SCHILKE P., WIKLIND T. et ZWAAN M.A., « OH<sup>+</sup> and H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> absorption toward PKS 1830–211 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 595, 2016, A128, DOI : 10.1051/0004-6361/201629073 [arXiv:1609.01060].
- MULLER S., MÜLLER H.S.P., BLACK J.H., GÉRIN M., COMBES F., CURRAN S., FALGARONE E., GUÉLIN M., HENKEL C., MARTÍN S., MENTEN K.M., ROUEFF E., AALTO S., BEELEN A., WIKLIND T. et ZWAAN M.A., « Detection of CH<sup>+</sup>, SH, and their <sup>13</sup>C- and <sup>34</sup>S-isotopologues toward PKS 1830–211 », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 606, 2017, A109, DOI : 10.1051/0004-6361/201731405 [arXiv:1707.07446].
- PADOVANI P., COMBES F., TRIGO M.D., ETTORI S., HATZIMINAOGLOU E., JONKER P., SALVATO M., VITI S., ADAMI C., AIRD J., ALEXANDER D., CASELLA P., CECCARELLI C., CHURAZOV E., CIRASUOLO M., DADDI E., EDGE A., FERUGLIO C., MAINIERI V., MARKOFF S., MERLONI A., NICASTRO F., O'BRIEN P., OSKINOVA L., PANESSA F., POINTECOUTEAU E., RAU A., ROBRADE J., SCHAYE J., STOEHR F., TESTI L. et TOMBESI F., *ESO-Athena Synergy White Paper*, 2017 [arXiv:1705.06064].
- PANDEY-POMMIER M., RICHARD J., COMBES F., EDGE A., GUIDERDONI B., NARASIMHA D., BAGCHI J. et JACOB J., « Non-thermal emission and dynamical state of massive galaxy clusters from CLASH sample », in C. REYLÉ, J. RICHARD, L. CAMBRÉSY, M. DELEUIL, E. PÉCONTAL, L. TRESSE et I. VAUGLIN (dir.), *SF2A-2016. Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, 2016, p. 367-372 [arXiv:1612.00225].
- PANDEY-POMMIER M., SIROTHIA S., CHADWICK P., MARTIN J.-M., COLOM P., VAN DRIEL W., COMBES F., KHARB P., CRESPEAU P.-J., RICHARD J. et GUIDERDONI B., « The low-frequency radio emission in blazar PKS2155-304 », in C. REYLÉ, J. RICHARD, L. CAMBRÉSY, M. DELEUIL, E. PÉCONTAL, L. TRESSE et I. VAUGLIN (dir.), *SF2A-2016. Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, 2016, p. 373-378 [arXiv:1610.05650].
- RAMPAZZO R., D'ONOFRIO M., ZAGGIA S., DJORGOVSKI S.G., ELMEGREEN D.M., POGGIANTI B.M., CALZETTI D., COMBES F., LONGAIR M.S. et BROMM V., « In pursuit of high redshift galaxies », in *From the Realm of the Nebulae to Populations of Galaxies*, Cham, Springer, 2016, coll. « Astrophysics and Space Science Library », n° 435, p. 479-508, DOI : 10.1007/978-3-319-31006-0\_6.
- TACCONI L.J., GENZEL R., SAINTONGE A., COMBES F., GARCÍA-BURILLO S., NERI R., BOLATTO A., CONTINI T., SCHREIBER N.M.F., LILLY S., LUTZ D., WUYTS S., ACCURSO G., BOISSIER J., BOONE F., BOUCHÉ N., BOURNAUD F., BURKERT A., CAROLLO M., COOPER M., COX P., FERUGLIO C., FREUNDLICH J., HERRERA-CAMUS R., JUNEAU S., LIPPA M., NAAB T., RENZINI A., SALOME P., STERNBERG A., TADAKI K., ÜBLER H., WALTER F., WEINER B. et WEISS A., « PHIBSS: Unified scaling relations of gas depletion time and molecular gas

fractions », *The Astrophysical Journal*, vol. 853, n° 2, 2018, p. 179, DOI : 10.3847/1538-4357/aaa4b4 [arXiv:1702.01140].

RANDRIAMAMPANDRY T.H., DEG N., CARIGNAN C., COMBES F. et SPEKKENS K., « Exploring the GalMer database : bar properties and non-circular motions », *Astronomy and Astrophysics*, vol. 594, 2016, A86, DOI : 10.1051/0004-6361/201629081 [arXiv:1608.00690].

VANTYGHEM A.N., MCNAMARA B.R., RUSSELL H.R., HOGAN M.T., EDGE A.C., NULSEN P.E.J., FABIAN A.C., COMBES F., SALOME P., BAUM S.A., DONAHUE M., MAIN R.A., MURRAY N.W., O'CONNELL R.W., O'DEA C.P., OONK J.B.R., PARRISH I.J., SANDERS J.S., TREMBLAY G. et VOIT G.M., « Molecular gas along a bright H-alpha filament in 2A 0335+096 revealed by ALMA », *The Astrophysical Journal*, vol. 832, n° 2, 2016, p. 148, DOI : 10.3847/0004-637X/832/2/148 [arXiv:1610.00716].

WEBB N.A., GUÉROU A., CIAMBUR B., DETOEUF A., CORIAT M., GODET O., BARRET D., COMBES F., CONTINI T., GRAHAM A., MACCARONE T.J., MRKALJ M., SERVILLAT M., SCHROETTER I. et WIERSEMA K., « Understanding the environment around the intermediate mass black hole candidate ESO 243-49 HLX-1 », *Astronomy & Astrophysics*, vol. 602, 2017, A103, DOI : 10.1051/0004-6361/201630042 [arXiv:1704.04434].