

Informations sur le stage

Catégories

Cosmologie, Univers primordial, origine et évolution des grandes structures de l'Univers et des galaxies

Sujet du stage

Équilibre et rétroaction de la formation stellaire dans les disques de galaxies spirales

Étude multi-longueur d'onde des trous d'hydrogène neutre dans le disque de M31

Contexte et problématique :

Les galaxies spirales évoluent dans un équilibre dynamique entre l'accrétion de gaz primaire, fourni par les filaments du réseau cosmique, et les processus de rétroaction énergétique issus de la formation stellaire (explosions des supernovæ, vents stellaires). Cet équilibre régule l'efficacité de la formation stellaire et détermine l'évolution à long terme du disque galactique. Cependant, les mécanismes couplés qui maintiennent cet état quasi stationnaire – la modulation de l'accrétion externe par le gaz chaud du halo et la régulation interne par le chauffage et la turbulence – restent mal contraints. La mesure du taux de formation stellaire (SFR) et de la distribution du gaz froid dans les galaxies repose sur l'utilisation de traceurs observationnels indirects, chacun étant sensible à des phases physiques et des échelles de temps distinctes. Une compréhension globale de l'évolution des galaxies nécessite donc une combinaison critique de ces différents indicateurs.

La galaxie d'Andromède (M31), galaxie spirale majeure la plus proche (à 780 kpc), offre un laboratoire unique pour étudier les mécanismes à petite échelle qui régulent l'évolution des galaxies. Son histoire, marquée par une collision avec M32 (Block et al. 2006), a conduit à la formation d'un anneau de formation stellaire à ~ 10 kpc. Cet environnement est le siège d'une rétroaction stellaire intense, matérialisée par la présence de plus de 140 "trous" et coquilles dans la distribution de gaz atomique (HI), découverts par Brinks & Bajaja (1986). Ces structures sont interprétées comme le résultat de l'impact cumulé des vents stellaires et des supernovæ, jouant un rôle présumé central dans le **cycle des baryons** en éjectant le gaz du disque pour potentiellement le ré-accréter via un effet "**fontaine**" **galactique**. Cependant, les preuves observationnelles directes de ce cycle restent rares et fragmentaires.

1. Les Traceurs de la Formation Stellaire Récente

L'historique de formation stellaire peut être décomposé en sondant différentes populations stellaires grâce à des traceurs complémentaires :

- **Des traceurs des étoiles massives récentes (~ 10 Myr).** La combinaison de l'émission **H α** (provenant du gaz ionisé) et de l'émission **infrarouge à 24 μ m** (provenant de la poussière chauffée) est utilisé pour estimer le taux de formation stellaire instantané.

Ces traceurs sont sensibles au rayonnement ionisant des étoiles massives de type OB, dont la durée de vie est courte, ainsi qu'à l'émission des poussières qui corrige absorption dans les régions denses. Il capture ainsi les épisodes de formation d'étoiles ayant eu lieu au cours des **10 derniers millions d'années**, même partiellement obscurcis.

- **Un traceur des populations jeunes étendues (~100 Myr).** L'émission dans l'**ultraviolet lointain (FUV)** provient principalement de l'émission photosphérique des étoiles jeunes de types OB mais aussi A. Comme les étoiles de type A ont une durée de vie plus longue, ce traceur intègre la formation stellaire sur une échelle de temps plus étendue, de l'ordre de **100 millions d'années**. Il offre ainsi une vision plus "lissée" de l'activité récente.

2. Les Traceurs de la Matière Première : le Gaz Neutre et Moléculaire

La densité surfacique du gaz, précurseur de la formation stellaire, est également tracée de manière indirecte :

- **La phase atomique (HI) :** Elle est principalement tracée par l'émission de la raie à 21 cm de l'hydrogène neutre. Ce gaz diffuse et constitue le réservoir à partir duquel se forme le gaz moléculaire.
- **La phase moléculaire (H₂) :** L'hydrogène moléculaire, difficile à observer directement, est généralement quantifié via l'émission du **monoxyde de carbone (CO)** en radio, utilisé comme traceur de la densité de colonne d'H₂ sous l'hypothèse d'un facteur de conversion constant (X_{CO}).

Problématique et objectifs du stage :

Si le scénario de la rétroaction est théoriquement bien établi, les processus dynamiques qui le régissent – l'évacuation du gaz, son chauffage, sa transition de phase et sa ré-accrétion – sont encore mal contraints observationnellement. L'objectif principal de ce stage est de **comprendre l'impact multi-phasique de la rétroaction stellaire** en caractérisant les trous de HI dans M31.

Pour cela, le/la stagiaire sera amené(e) à :

1. **Caractériser la population de trous de HI :** Ré-analyser le catalogue historique de Brinks & Bajaja (1986) à l'aide des données HI modernes de Koch et al. (2025) (voir aussi Chemin et al. 2009) pour en dériver des propriétés physiques précises (tailles, masses d'énergie requises, âges dynamiques).
2. **Établir un lien causal avec les populations stellaires jeunes :** Corréler systématiquement la position et la morphologie des trous avec les cartes de formation stellaire récente (traceurs H α , 24 μ m/Spitzer, FUV/GALEX) et les catalogues de régions HII (Azimlu et al. 2011) pour identifier les sources de rétroaction responsables.
3. **Sonder l'impact sur la phase moléculaire :** Investiguer l'environnement gazeux des trous en les comparant avec la distribution du gaz moléculaire froide (données CO de Nieten et al. 2006). L'objectif est de déterminer si la rétroaction dissocie le H₂, le comprime pour en former, ou n'a aucun effet détectable.
4. **Rechercher des signatures observationnelles de l'effet fontaine :** Tenter d'identifier, en combinant l'ensemble de ces diagnostics, des preuves indirectes du cycle gaz-éjection-rechute, comme la présence de gaz en train de retomber ou des signatures de refroidissement autour des trous.

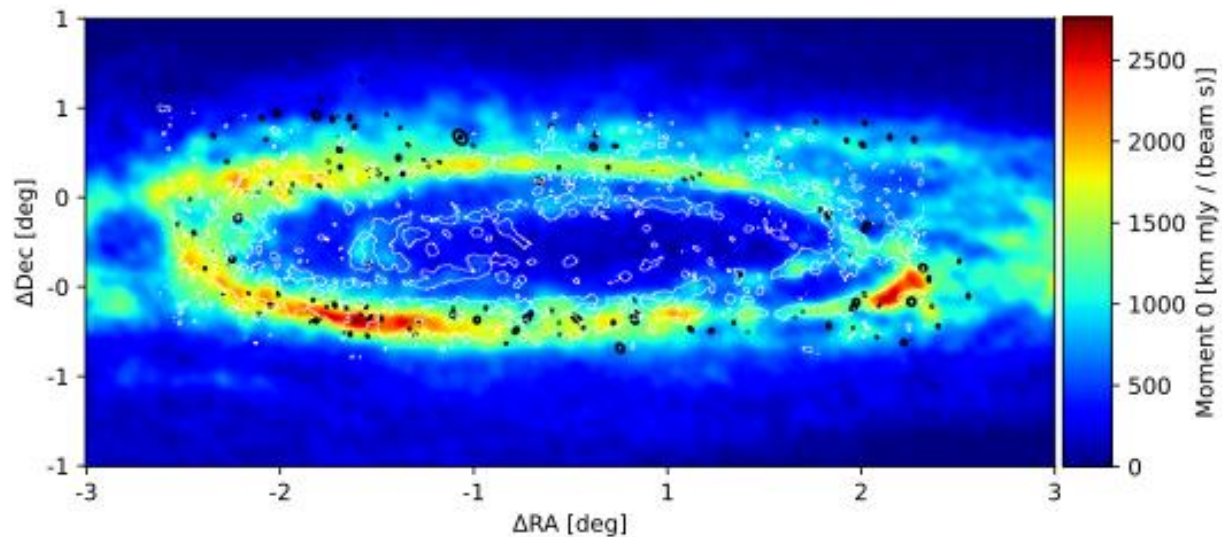


Figure : Distribution de l'hydrogène neutre HI de la galaxie M31 (Chemin et al. 2009). Les contours blancs correspondent au gaz moléculaire (Neininger et al. 2006). Les petites ellipses noires correspondent aux trous HI identifiés par Brinks & Bajaja (1986).

Le milieu interstellaire de M31, marqué par des centaines de "trous" dans le gaz HI, est supposé être une manifestation directe de la rétroaction stellaire. Cependant, le lien quantitatif entre les populations stellaires jeunes, l'explosion des supernovae, et la création de ces structures demeure mal contraint. Ce stage vise à répondre à des questions fondamentales : **Dans quelles conditions la formation stellaire génère-t-elle un trou de HI observable ? Pourquoi certaines régions actives en sont-elles dépourvues ?** En comprenant ces mécanismes, nous pouvons quantifier l'efficacité réelle de la rétroaction à réguler le cycle du gaz.

Méthodologie :

Pour répondre à cette problématique, le stage s'articulera autour de trois axes principaux :

1. Établir un lien causal quantitatif entre la formation stellaire et les trous de HI.

- Le/la stagiaire testera et quantifiera l'hypothèse historique de Brinks & Bajaja (1986) : **Les trous ($D < 300$ pc) sont-ils systématiquement et exclusivement associés aux régions de formation stellaire récente** (traces H α , 24 μ m, régions HII) ?
- **Méthode** : Cartographie comparative et analyse statistique des co-localisations pour dériver des probabilités d'association.

2. Comprendre l'absence de trous : contraintes sur l'efficacité de la rétroaction.

- Une question tout aussi cruciale sera d'étudier **les régions de formation stellaire où aucun trou n'est détecté**. Le/la stagiaire cherchera à déterminer si cette absence est liée à l'âge des populations stellaires, à la densité du gaz ambiant, à la morphologie du disque, ou à un stade différent dans le cycle de rétroaction.
- **Méthode** : Analyse comparative des propriétés (densité de SFR, métallicité, pression du gaz) entre les régions "avec trous" et "sans trous".

3. Contraindre la séquence temporelle et l'efficacité énergétique.

- En corrélant les propriétés des trous (taille, énergie dynamique, âge estimé) avec l'intensité et l'âge de l'épisode de formation stellaire déclencheur, le/la stagiaire

tentera de **reconstituer la séquence causale liant l'ionisation, les vents stellaires et l'explosion des supernovae à la création des cavités.**

Ce travail observationnel sur M31 sera enrichi par une **démarche comparative à l'échelle galactique**. Le/la stagiaire confrontera ses résultats aux études menées dans d'autres disques de galaxies (ex: travaux de Bagetakos et al. 2011, Boomsma et al. 2008, Shaji et al. 2025). Enfin, une comparaison critique avec les prédictions des **simulations numériques cosmologiques** (e.g., Bahé et al. 2016) permettra d'évaluer dans quelle mesure les modèles théoriques reproduisent fidèlement la diversité et les propriétés des structures de rétroaction observées.

Données :

Ce projet observationnel s'appuiera sur l'analyse et la corrélation de jeux de données multi-longueurs d'onde de haute qualité :

- **Gaz atomique** : Cartes HI de Chemin et al. (2009).
- **Gaz moléculaire** : Cartes CO de Nieten et al. (2006).
- **Formation stellaire** : Images H α , 24 μ m (Spitzer), FUV (GALEX) et catalogues de régions HII.

Le travail consistera en un traitement et une analyse quantitative de ces données (astropy, spectral-cube), incluant de la photométrie, de la modélisation simple et de la comparaison statistique.

Compétences développées :

- Astrophysique du milieu interstellaire et des galaxies.
- Analyse de données multi-longueurs d'onde.
- Programmation scientifique (Python) et traitements d'images.
- Synthèse de résultats et rédaction scientifique.

Références :

- Azimlu et al. 2011, Astronomical Journal 142, 139
- Bagetakos et al. 2011, Astronomical Journal 141, 23
- Bahé et al. 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 456, 1115
- Block et al. 2006, Nature 443, 832
- Boomsma et al. 2008, Astronomy and Astrophysics 490, 550
- Brinks & Bajaja 1986, Astronomy and Astrophysics 169, 14
- Chemin et al. 2009, Astrophysical Journal 705, 395
- Koch et al. 2025, Astrophysical Journal Supplements 279,35
- Nieten et al. 2006, Astronomy & Astrophysics 453, 459
- Shaji et al. 2025, Astronomy & Astrophysics en révision, 2025arXiv250710549A