

# Une croix d'Einstein exceptionnelle révèle un halo de matière noire

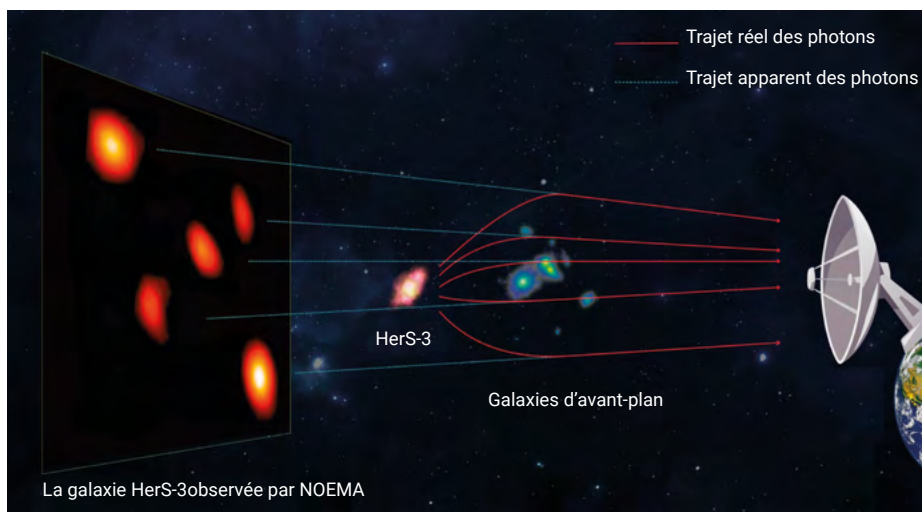
Pierre Cox (pierre.cox@iap.fr), Institut d'Astrophysique de Paris, 98b boulevard Arago, 75014 Paris

Le phénomène d'amplification gravitationnelle permet d'observer des galaxies aux confins de l'Univers en traçant avec une grande précision leurs morphologies et leurs conditions physiques. Récemment, grâce aux observations obtenues avec deux interféromètres, le *Northern Extended Millimeter Array* (NOEMA, Institut de Radioastronomie Millimétrique – IRAM, France) et le *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA, Chili), une galaxie dans l'univers lointain s'est révélée être gravitationnellement amplifiée en une croix d'Einstein contenant une cinquième image en son centre. Cette configuration, qui n'a jamais été vue jusqu'à maintenant, ne peut s'expliquer que par la présence d'un halo massif de matière noire associé au groupe de galaxies d'avant-plan qui amplifie la lumière de la source. Cette découverte a mis en lumière un laboratoire unique pour sonder la matière noire et mieux comprendre l'évolution des galaxies.

Une amplification gravitationnelle se produit lorsque la lumière d'une galaxie lointaine passe par une galaxie massive (ou un groupe de galaxies), qui déforme l'espace-temps. La trajectoire de la lumière de la source d'arrière-plan est infléchiée, la rendant plus brillante et produisant de multiples images, des arcs ou un anneau. L'amplification qui en résulte permet d'étudier en détail les galaxies de l'Univers primordial.

Pour un alignement presque parfait et une distribution elliptique de la masse de la lentille, la galaxie d'arrière-plan apparaîtra comme un système avec quatre images. L'archétype de tels systèmes est la croix d'Einstein où les quatre images distinctes forment une croix avec un grand degré de symétrie. Trouver des croix d'Einstein reste un défi observationnel et, à ce jour, la majorité d'entre elles ont été détectées par des observations faites dans les domaines optique et proche infrarouge [1, 2].

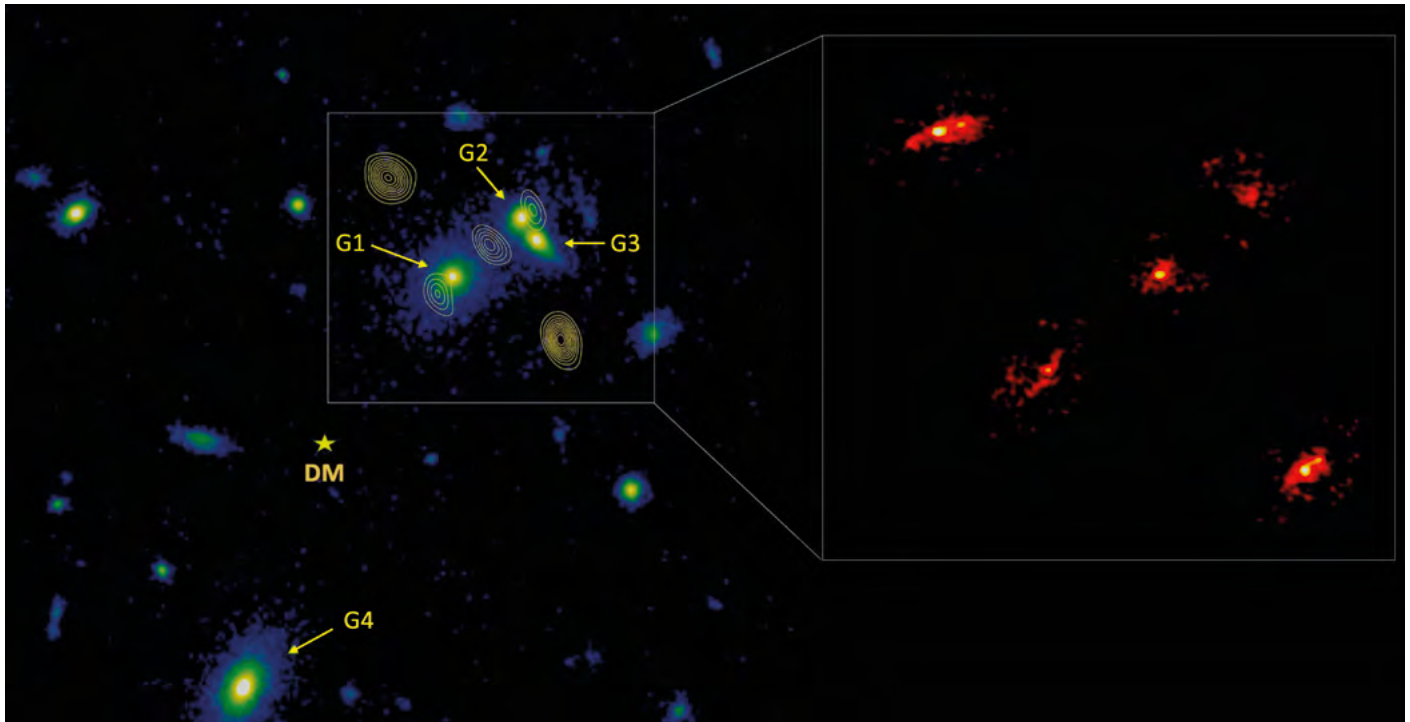
Les premiers calculs d'amplification gravitationnelle appliqués à des étoiles (lentille et source amplifiée) ont été publiés par O. Chwolson en 1924 [3] et, une décennie plus tard, par A. Einstein [4] qui remarquait dans son article « qu'il n'y avait pas grande chance de pouvoir observer ce



1. Représentation de l'amplification gravitationnelle de la galaxie HerS-3 par le groupe de galaxies d'avant-plan, montrant le trajet réel des photons (en rouge) et le trajet apparent (en bleu). La masse des galaxies du groupe et de son halo de matière noire agit comme une lentille gravitationnelle en déviant la lumière émise par HerS-3. Pour l'observateur, la galaxie lointaine apparaît comme une croix d'Einstein avec une cinquième image en son centre. © Nicolás Lira Turpaud (ALMA Observatory), adapté de Cox et al. (2025).

phénomène ». Une année plus tard, en 1937, F. Zwicky [5] soulignait que des nébuleuses extragalactiques (soit des galaxies) « offraient une bien meilleure chance que les étoiles pour observer les effets de lentille gravitationnelle ». Quarante années s'écoulerent avant la première découverte dans le visible d'un quasar lointain amplifié en

deux images distinctes [6]. Peu de temps après cette découverte, en 1985, le troisième objet amplifié, de nouveau un quasar lointain, se révélait être amplifié en quatre images distinctes, formant une croix parfaite et connue depuis sous le nom de croix d'Einstein [1].



2. À gauche : la galaxie HerS-3, amplifiée gravitationnellement dans une croix d'Einstein, avec une cinquième image centrale, telle qu'observée par NOEMA dans le continuum millimétrique (contours jaunes), superposée à l'image proche infrarouge du HST, identifiant les quatre galaxies (G1 à G4) du groupe de galaxies d'avant-plan. L'étoile jaune indique la position du halo de matière noire (DM) associé au groupe.

À droite : morphologie détaillée de chacune des cinq images de la croix d'Einstein révélées par ALMA. Adapté de Cox *et al.* (2025).

De nombreux cas de galaxies gravitationnellement amplifiées ont été découverts dans le domaine submillimétrique, en observant des galaxies riches en poussières et lumineuses dans l'infrarouge lointain. La grande majorité de ces systèmes sont amplifiés par des galaxies d'avant-plan sphériques et apparaissent comme des anneaux d'Einstein complets ou partiels, ou bien des arcs étendus [7]. De rares cas d'anneaux d'Einstein ont aussi été observés dans le domaine optique, comme récemment avec le télescope spatial Euclid [8].

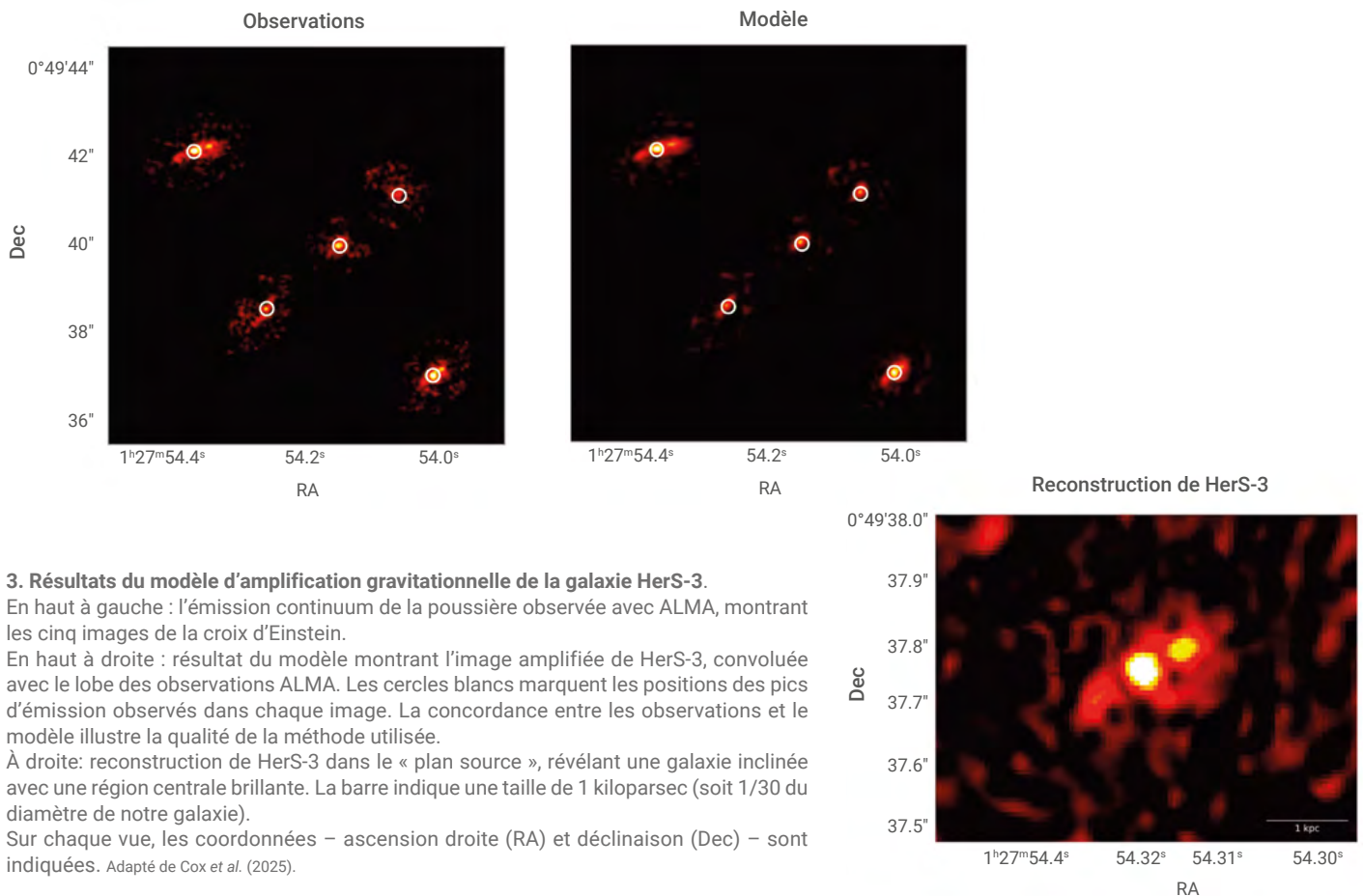
Les lignes de visée le long desquelles sont observées des galaxies gravitationnellement amplifiées constituent de puissants laboratoires astrophysiques qui permettent de contraindre les propriétés de la matière noire dans les galaxies, les groupes et les amas de galaxies d'avant-plan. Les théories actuelles suggèrent que la matière noire, qui représente environ 80 % de la masse de l'Univers, est constituée de particules encore inconnues qui n'interagissent pas avec la lumière visible. Cependant, en raison de sa masse importante, la matière noire peut être identifiée par son influence gravitationnelle.

Lorsque NOEMA a observé la galaxie HerS-3, située à 11,6 milliards d'années-lumière, cinq images distinctes sont apparues, produisant une croix presque parfaite (fig. 1). Cette croix d'Einstein, un phénomène déjà rare est, dans ce cas, encore plus extraordinaire en raison de la présence d'une cinquième image centrale. Chacune des cinq images est détectée dans plusieurs raies d'émission moléculaire, observées avec NOEMA à des fréquences (décalées vers le rouge) identiques, indiquant que les images tracent la même galaxie lointaine et sont donc le résultat d'une amplification gravitationnelle. Les observations réalisées avec ALMA ont permis, grâce à la meilleure résolution angulaire, de révéler la morphologie détaillée de chaque image (fig. 2). La remarquable configuration de lentille de HerS-3 est aussi la première détection d'une croix d'Einstein aux longueurs d'onde submillimétrique. La lumière de HerS-3 est déviée le long de la ligne de visée par quatre galaxies massives (fig. 2) qui sont au cœur d'un groupe plus vaste contenant au moins dix autres galaxies, situées à 7,8 milliards d'années-lumière de la Terre, et qui ont été identifiées dans le proche-infrarouge par le *Hubble Space Telescope* (HST).

>>>

“  
Le système de HerS-3, avec sa croix d'Einstein contenant une cinquième image centrale, est un laboratoire astrophysique unique, créé par l'Univers lui-même.

”



### 3. Résultats du modèle d'amplification gravitationnelle de la galaxie HerS-3.

En haut à gauche : l'émission continuum de la poussière observée avec ALMA, montrant les cinq images de la croix d'Einstein.

En haut à droite : résultat du modèle montrant l'image amplifiée de HerS-3, convoluée avec le lobe des observations ALMA. Les cercles blancs marquent les positions des pics d'émission observés dans chaque image. La concordance entre les observations et le modèle illustre la qualité de la méthode utilisée.

À droite: reconstruction de HerS-3 dans le « plan source », révélant une galaxie inclinée avec une région centrale brillante. La barre indique une taille de 1 kiloparsec (soit 1/30 du diamètre de notre galaxie).

Sur chaque vue, les coordonnées – ascension droite (RA) et déclinaison (Dec) – sont indiquées. Adapté de Cox et al. (2025).



- 1• J. Huchra, M. Gorenstein, S. Kent et al., *Astronomical Journal* **90** (1985) 691.
- 2• D. Stern, S. G. Djorgovski, A. Krone-Martins, et al., *Astrophysical Journal* **921** (2021) 42.
- 3• O. Chwolson, *Astronomische Nachrichten* **221** (1924) 329.
- 4• A. Einstein, *Science* **84** (1936) 506.
- 5• F. Zwicky, *Physics Review* **51** (1937) 679.
- 6• D. Walsh, R. F. Carswell et R. J. Weymann, *Nature* **279** (1979) 381.
- 7• ALMA Partnership, C. Vlahakis, T. R. Hunter et al., *Astrophysical Journal Letters* **808** (2015) L4.
- 8• C.M. O'Riordan, L.J. Oldham, A. Nersesian et al., *Astronomy & Astrophysics* **694** (2025) A145.

Cette étude est présentée dans l'article intitulé "HerS-3: An Exceptional Einstein Cross Reveals a Massive Dark Matter Halo" publié dans l'*Astrophysical Journal* : Cox, Butler, Keeton et al., *Astrophysical Journal Letters* **991** (2025) 53 <https://cutt.ly/iopscience-iop-org-pdf>

>>>

Afin de reconstituer les propriétés intrinsèques de la galaxie lointaine HerS-3 et d'explorer les caractéristiques du groupe de galaxies en avant-plan, un modèle d'amplification gravitationnelle, qui simule la façon dont la gravité courbe la lumière de galaxies, a été appliqué. En ne prenant en compte que les quatre galaxies massives visibles et situées à proximité de HerS-3 au centre du groupe de galaxies, les modèles n'ont pas pu reproduire de manière précise les propriétés de chacune des cinq images de la croix d'Einstein.

L'absence dans le champ d'une autre galaxie visible à la même distance et proche du groupe a ouvert la possibilité d'une autre composante massive et invisible : un halo de matière noire associé au groupe de galaxies. En ajoutant cette composante massive, située au centre de masse du groupe (fig. 2), le modèle reproduit avec une grande précision les propriétés de chacune des cinq images, à savoir leurs positions, leurs orientations et leurs morphologies (fig. 3). La masse estimée du halo de matière

noire s'élève à quelques mille milliards de masses solaires.

Une fois reconstruit à partir de ce modèle d'amplification gravitationnelle, HerS-3 apparaît comme une galaxie lumineuse, en rotation et inclinée (fig. 3c), formant activement des étoiles (de l'ordre de 500 masses solaires par an), avec un flot de gaz moléculaire éjecté de la région centrale.

Le système de HerS-3, avec sa croix d'Einstein contenant une cinquième image centrale, est un laboratoire astrophysique unique, créé par l'Univers lui-même. Il nous permet d'observer la structure complexe d'une galaxie durant la phase la plus active de l'évolution cosmique, tout en révélant, dans le groupe de galaxies d'avant-plan, la présence du halo de matière noire, cette masse cachée qui forme les galaxies et sculpte l'Univers. L'étude plus détaillée de tels systèmes pourrait nous permettre de révéler les propriétés de la matière noire et de mieux comprendre son influence au cours de l'évolution cosmique. ■