

L'Univers dans ma poche



Les tourbillons du cosmos



Bożena Czerny
Centre de Physique Théorique
de l'Académie des Sciences
Pologne



Anneaux de Saturne (NASA/ESA Hubble Space Telescope)

Le mouvement des particules sur des orbites circulaires n'est en aucun cas l'exemple le plus simple d'un mouvement. Lorsqu'aucune force n'agit sur un corps, celui-ci se déplace en ligne droite à vitesse constante. Mais la force de gravitation courbe sa trajectoire. L'orbite dépend de deux paramètres : l'énergie du corps et son moment cinétique. Si l'énergie est élevée, comme par exemple dans le cas d'une comète, celle-ci s'éloigne après avoir fait le tour du Soleil. Dans le cas d'une énergie trop faible, le corps ne peut pas s'échapper. Le mouvement circulaire est un cas très particulier de ce type de mouvement.

Les anneaux de Saturne

Qui n'a jamais vu les anneaux de Saturne, au télescope ou simplement en photo ? Ils sont magnifiques et semblent éternels, du moins à l'échelle de la vie humaine. Vus de dessus, ils ressemblent à des anneaux. Mais vus de profil, ils font penser à un disque très fin.

Ces anneaux sont constitués de morceaux de glace, mêlés à des fragments rocheux. Ces morceaux se déplacent sur des orbites circulaires fixes, pratiquement sans collisions. C'est pourquoi, après le chaos initial de la formation du Système solaire, ils se sont maintenus pendant des millions d'années. Mais les rares collisions qui se produisent pourraient les faire disparaître dans environ 300 millions d'années.



Formation d'un disque d'accrétion autour d'un trou noir massif suite à la rupture d'une étoile (illustration NASA/ESA/D. Player STScI).

Il arrive qu'une étoile qui traverse une galaxie se retrouve trop près du trou noir central. Elle est alors déchiquetée et son orbite est déformée. Certains de ses débris peuvent s'échapper, mais une partie sera piégée dans le champ gravitationnel, les orbites deviendront presque circulaires et la matière formera un disque d'accrétion.

L'image ci-dessus n'est pas une photo, mais de tels phénomènes sont réellement observés.

Les disques d'accrétion

Certains disques brillent de leur propre lumière, et non de lumière réfléchie comme les anneaux de Saturne. Un disque constitué de gaz et soumis à un champ magnétique voit sa matière bouillonner, s'échauffer et briller d'elle-même. En perdant de l'énergie et du moment cinétique, ce plasma chaud se dirige vers l'objet central. C'est ce qu'on appelle un disque d'accrétion.

Ce paradoxe apparent - perdre de l'énergie et en gagner pour briller - provient du fait que l'énergie potentielle de gravitation se transforme en énergie cinétique (vitesse) et thermique. L'effet est maximal lorsque l'astre central est compact (c'est-à-dire que le rapport de son rayon à sa masse est très petit). C'est le cas des étoiles à neutrons et des trous noirs, qu'on trouve en grand nombre dans l'espace. Le processus d'accrétion peut s'achever en quelques secondes ou durer des années. 5

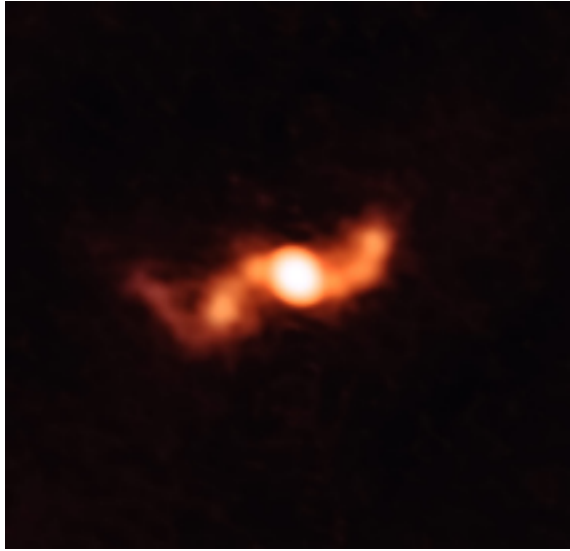


Image en micro-ondes de SS 433. Crédit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/K. Blundell (University of Oxford, UK), R. Laing, S. Lee & A. Richards, *Ap J Letters*.

Les disques d'accrétion autour des trous noirs stellaires sont si petits qu'il est impossible d'obtenir une image du disque lui-même. Mais la chute de matière sur un trou noir s'accompagne souvent de la formation d'un jet de matière sortant perpendiculairement au disque. L'image ci-dessus montre un jet bipolaire, l'éjection se faisant dans deux directions opposées. On ne sait pas encore exactement comment de tels jets se forment, mais un champ magnétique intense y joue certainement un rôle important.

Trous noirs stellaires et compagnons

Dans notre galaxie - la Voie lactée - il existe probablement de nombreux trous noirs dont la masse est légèrement supérieure à celle du Soleil. La plupart ne sont pas visibles, mais si un trou noir a pour proche compagnon une étoile ordinaire, il en aspire la matière, et ce gaz, avant de tomber dans le trou noir, forme un disque d'accrétion. Ces disques sont visibles en rayons X. Certains brillent continûment, d'autres de manière erratique, selon le débit de matière. C'est un phénomène rare - on ne connaît que quelques dizaines de tels couples dans la Voie lactée, et ces objets sont trop faibles pour être facilement observés dans les galaxies lointaines. Les objets les plus brillants sont les sursauts gamma - l'épisode dramatique qui marque la fin de l'évolution d'une étoile massive lorsqu'elle s'effondre en trou noir. Un disque peut se former brièvement, mais il demeure invisible, masqué par la matière éjectée lors de l'explosion.



Disques protoplanétaires - images des télescopes ALMA, VLT et Hubble. Crédit : NASA, ESA, ESO, STScI, ALMA, S. Andrews (CfA), Bill Saxton (NRAO, AUI, NSF), T. Stolker (ALMA)

Les jeunes étoiles et les systèmes planétaires se forment dans les disques protoplanétaires. La physique de ce processus est extrêmement complexe. Les images qu'on peut obtenir permettent de mieux comprendre les différentes étapes de l'évolution. Mais la théorie est tout aussi importante, car les photos ne montrent pas comment se forment les premières billes de glace, les premières roches et les embryons de planètes.

Les étoiles jeunes

Les disques d'accrétion autour des étoiles en formation sont les plus intéressants mais aussi les plus complexes. C'est à partir d'un tel disque autour du Soleil que notre Terre s'est formée il y a 4,5 milliards d'années. D'où notre grand intérêt pour ce processus, qui se déroule de nos jours autour d'autres étoiles.

Ces disques sont faits de gaz, de fines particules de glace et de fragments rocheux. La matière provient des restes du nuage à partir duquel l'étoile s'est formée, mais elle subit d'incessantes transformations. Une partie du gaz est avalée par l'étoile, une autre est éjectée, une autre encore forme des planètes gazeuses. Les grains de poussière s'agglomèrent et finissent par former des planètes rocheuses. Mais le mécanisme est lent et complexe. C'est pourquoi toute observation de ce phénomène est précieuse.



À gauche : la galaxie active JO742+2704 (NASA, ESA, K. Nyland (United States Naval Research Laboratory), J. DePasquale (STScI)), à droite : une radiogalaxie (Crédit image : NASA, ESA, S. Baum et C. O'Dea (RIT), R. Perley et W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), et l'équipe Hubble Heritage (STScI/AURA)). Les observations radio sont en rose, les observations optiques sont en blanc.

Les galaxies actives lointaines sont souvent appelées quasars (objets quasi-stellaires). Sur les images, la galaxie-mère et le jet sont à peine visibles. On en voit un exemple sur la figure de gauche. À droite, au contraire, on voit très bien le jet, qui est beaucoup plus grand que la galaxie entière. De objets sont très rares.

Les noyaux actifs de galaxies

Au centre de toutes les galaxies résident des trous noirs massifs, des centaines de milliers ou des milliards de fois plus massifs que le Soleil. Ces trous noirs attirent gravitationnellement la matière environnante, forment autour d'eux des disques d'accrétion.

Mais il n'est pas facile d'aspirer de la matière: il faut qu'elle soit présente dans le voisinage immédiat. C'est pourquoi seule une galaxie sur un million possède un noyau très lumineux et très actif. La luminosité du disque d'accrétion peut dépasser mille fois celle de toutes les étoiles de la galaxie.

Ces galaxies actives, tout comme les sursauts gamma, sont visibles jusqu'aux limites de l'Univers observable. Elles sont nombreuses, vivent longtemps et peuvent être observées dans toutes les directions.



Image du trou noir au centre de la Voie lactée, avec le tracé des lignes de champ magnétique (EHT).

Le centre de notre Galaxie est invisible aux télescopes optiques ordinaires: il y a trop de poussière sur le trajet lumineux. Mais les ondes radio peuvent traverser cette poussière. L'image ci-dessus été faite en ondes radio - plus précisément dans les ondes millimétriques, ce qui permet de voir le disque. La partie sombre au centre est le trou noir, qui n'émet pas de lumière. Cette image a nécessité la collaboration de nombreux radiotélescopes répartis sur la Terre, chacun contribuant aux données nécessaires à sa construction.

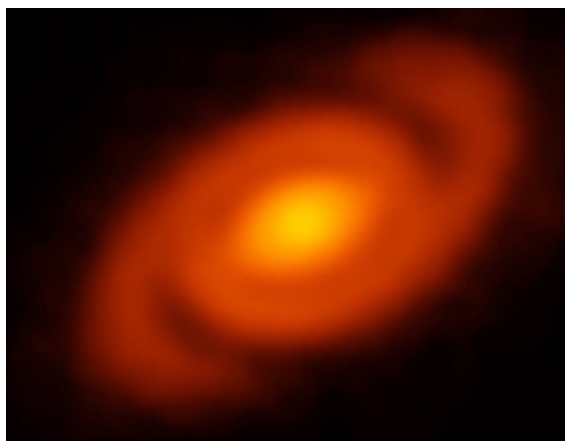
Qu'en est-il de notre galaxie ? Est-elle active ? En fait, cela dépend de la façon dont on voit les choses. Certes, elle abrite en son centre un trou noir dont la masse est quatre millions de fois supérieure à celle du Soleil. Mais la matière y est accrétée à un rythme des milliards de fois plus faible que dans les galaxies actives. Il s'y passe bien quelque chose, mais nous n'en voyons l'effet que parce que nous sommes proches.

Grâce à l'Event Horizon Telescope, nous avons enfin son image. Elle a été difficile à obtenir et a nécessité un énorme effort d'équipe. On y voit un disque d'accrétion, mais il est peu massif. Il est constitué de plasma très chaud, à des millions de degrés, comme celui qui règne à l'intérieur du Soleil. Il brille dans les rayons X, mais pas seulement : des électrons rapides émettent aussi des ondes radio, et c'est dans cette bande spectrale que l'image a été obtenue.

Sauras-tu
deviner...



... laquelle de ces photos
ne représente pas
un disque ?



Essaie !

1. La Nébuleuse du Crabe

Rayons X (XPE : NASA/ASI/MSFC/INAF/R. Ferrazzoli, et al.), (Chandra : NASA/CXC/RIKEN & GSFC/T. Sato et al.)
Optique : Image DSS Traitement : NASA/CXC/SAO/K. Arcand, L. Frattare & N. Wolk

Réponse

2. La galaxie M88

ESA/Hubble/NASA/D. Thilker

3. Le disque autour de la jeune étoile HL Tauri

ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

Seule l'image
numéro 1
ne représente
pas un disque !

4. Les anneaux d'Uranus dans l'infrarouge

NASA, ESA, CSA, STScI

5. Image du disque autour du trou noir de la galaxie M87

© EHT Collaboration

6. Disque protoplanétaire autour de l'étoile Elias 2-27

L. Pérez / B. Saxton / MPIfR / NRAO / AUI / NSF / ALMA / ESO / NAOJ / NASA / JPL Caltech / WISE Team

L'Univers dans ma poche N° 47

Ce mini-livre a été écrit en 2026 par Bożena Czerny du Centre de Physique Théorique de l'Académie Polonaise des Sciences à Varsovie, et révisé par Stan Kurtz (IRyA, Morelia, Mexique).

Couverture : image du disque autour de la jeune étoile HL Tauri, dans lequel des planètes sont en train de se former.
Crédit : ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



Pour en savoir plus sur cette série d'éditions et sur le thème présenté dans ce mini-livre, aller sur <http://www.tuimp.org>

Traduction: Grażyna Stasińska
TUIMP Creative Commons

