Noyaux actifs changeants

Dr. Frédéric Marin

Observatoire astronomique de Strasbourg | ObAS

COLLÈGE DE FRANCE 1530

cnrs dépasser les frontières

Université de Strasbourg

13 décembre 2021 – Les phénomènes variables en astrophysique – Collège de France

Noyaux actifs de galaxies changeants

Dr. Frédéric Marin

Observatoire astronomique de Strasbourg | ObAS

Collège de France 1530

cnrs dépasser les frontières

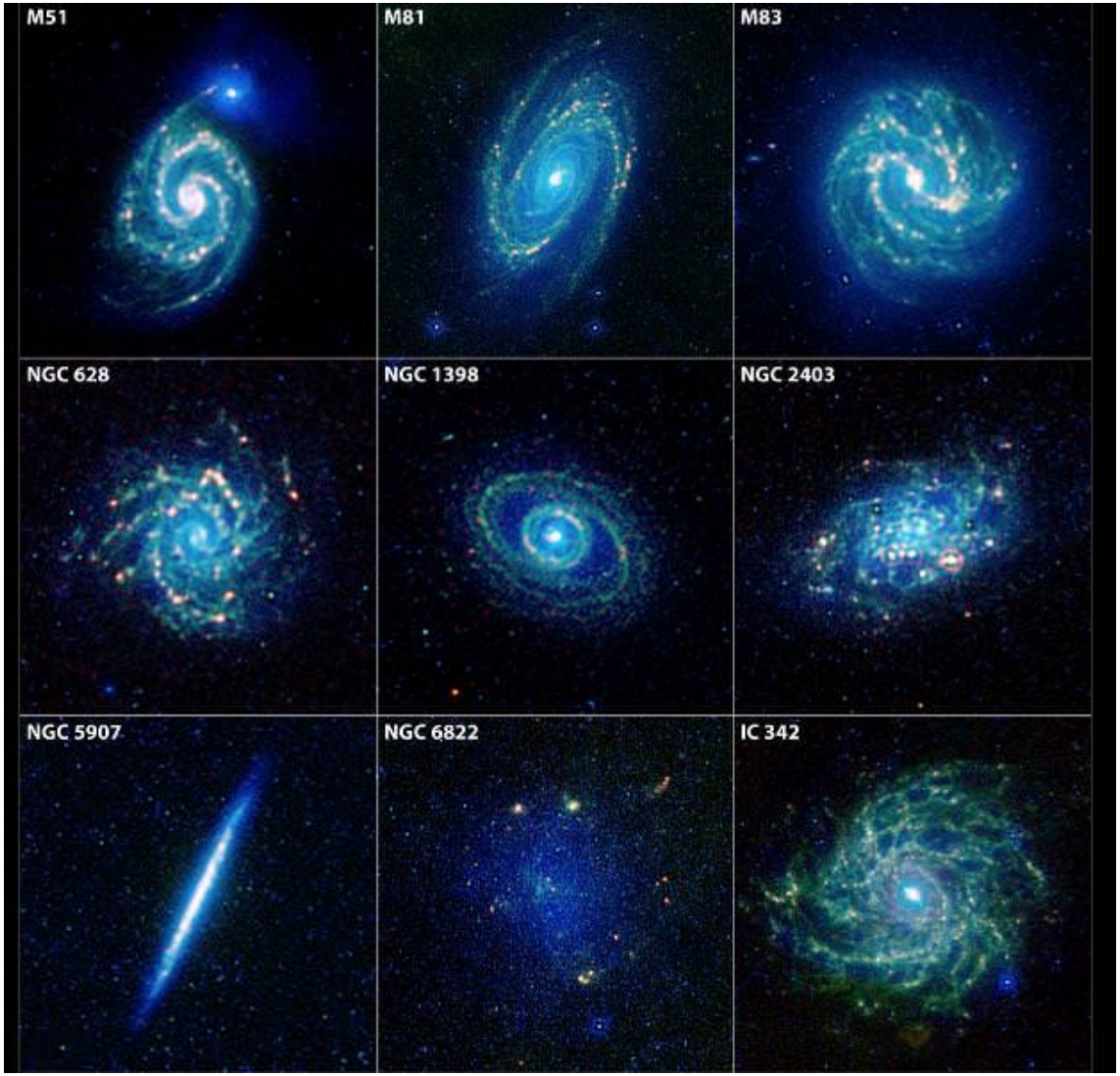
Université de Strasbourg

13 décembre 2021 – Les phénomènes variables en astrophysique – Collège de France

LES GALAXIES

Qu’est-ce que nous entendons par là ?

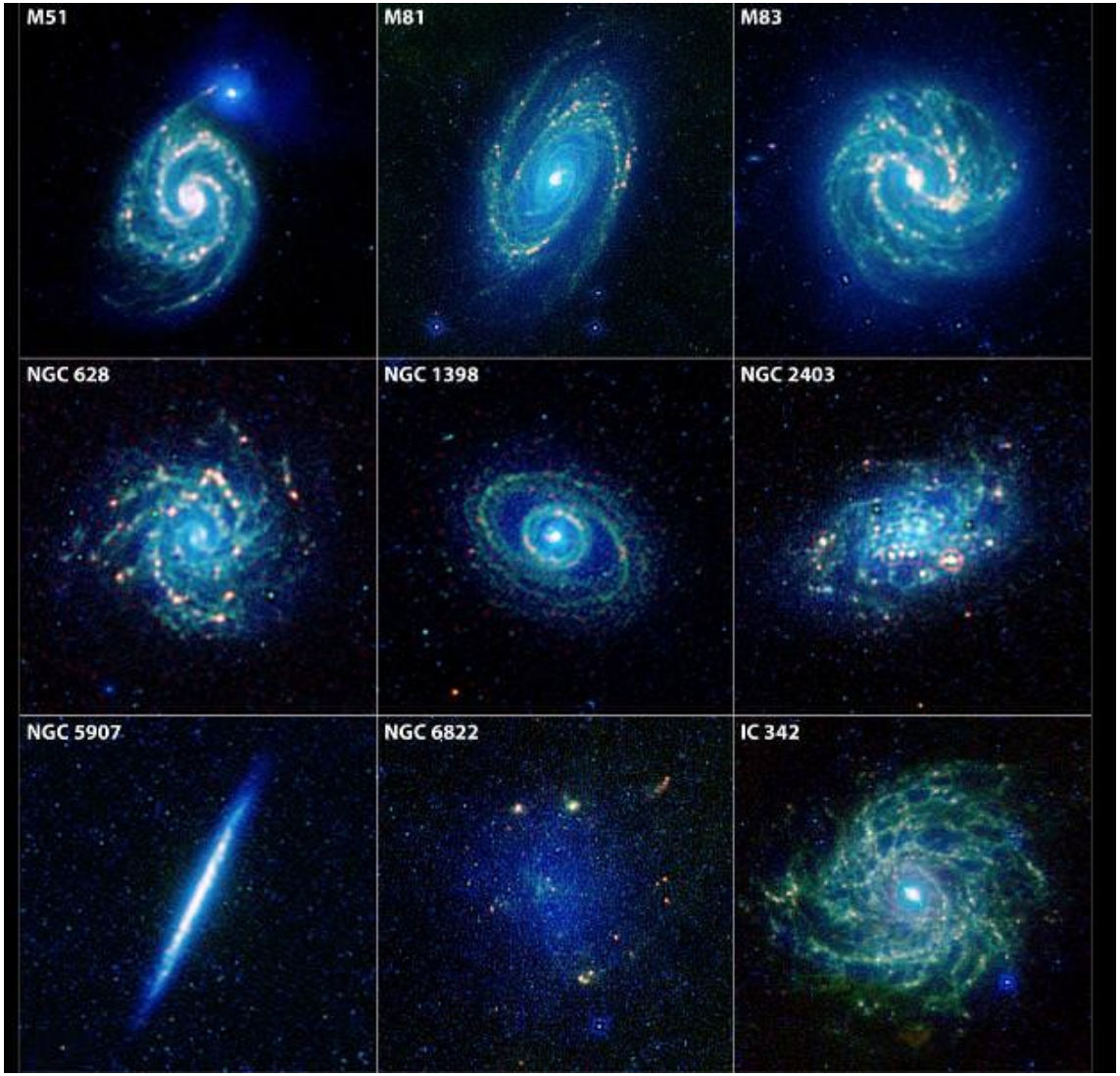
Des millions (milliards) de galaxies peuplent notre Univers



LES GALAXIES

Qu’est-ce que nous entendons par là ?

Des millions (milliards) de galaxies peuplent notre Univers



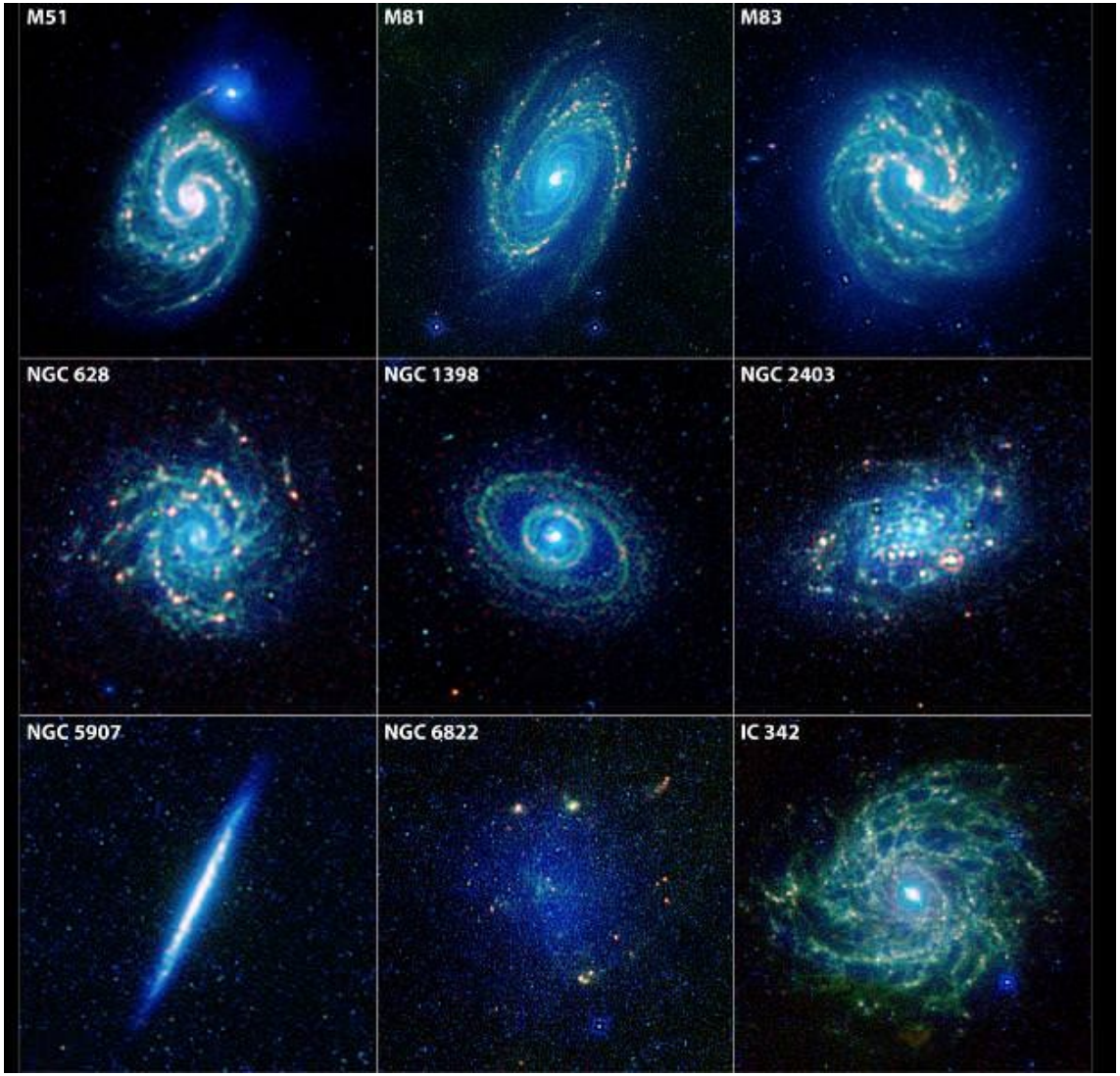
Edwin Hubble a conçu un diagramme afin de classer chacune des quatre formes de galaxies connues :

- elliptiques
- spirales
- lenticulaires
- irrégulières

LES GALAXIES

Qu'est-ce que nous entendons par là ?

Des millions (milliards) de galaxies peuplent notre Univers



Edwin Hubble a conçu un diagramme afin de classer chacune des quatre formes de galaxies connues :

- elliptiques
- spirales
- lenticulaires
- irrégulières

Hypothèse de Hubble : chacune des formes représentent un stage de l'évolution des galaxies à travers le temps, des elliptiques aux lenticulaires puis aux spirales et enfin aux irrégulières

LES GALAXIES

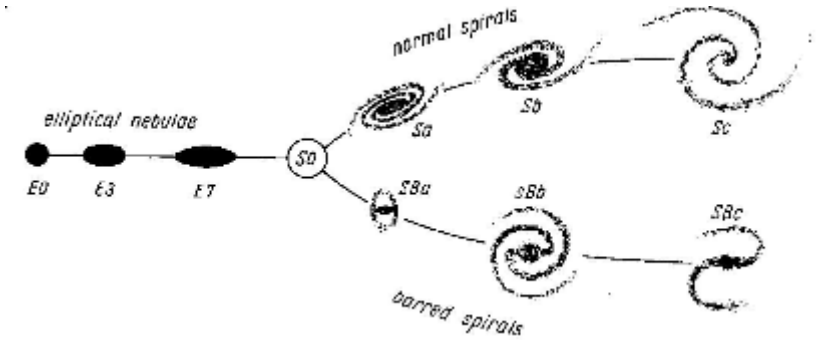
La genèse et l'évolution des galaxies

Les astronomes ont maintenant le point de vue opposé

→ l'Univers primitif était probablement dominé par des spirales et des irrégulières
→ avec le temps se sont rapprochées par gravité
→ fusion en galaxies elliptiques

Preuve observationnelle : les grands amas de galaxies

La version «définitive» de la classification de Hubble a été présentée dans un article du célèbre étudiant de Hubble, Alan Sandage, en 1975



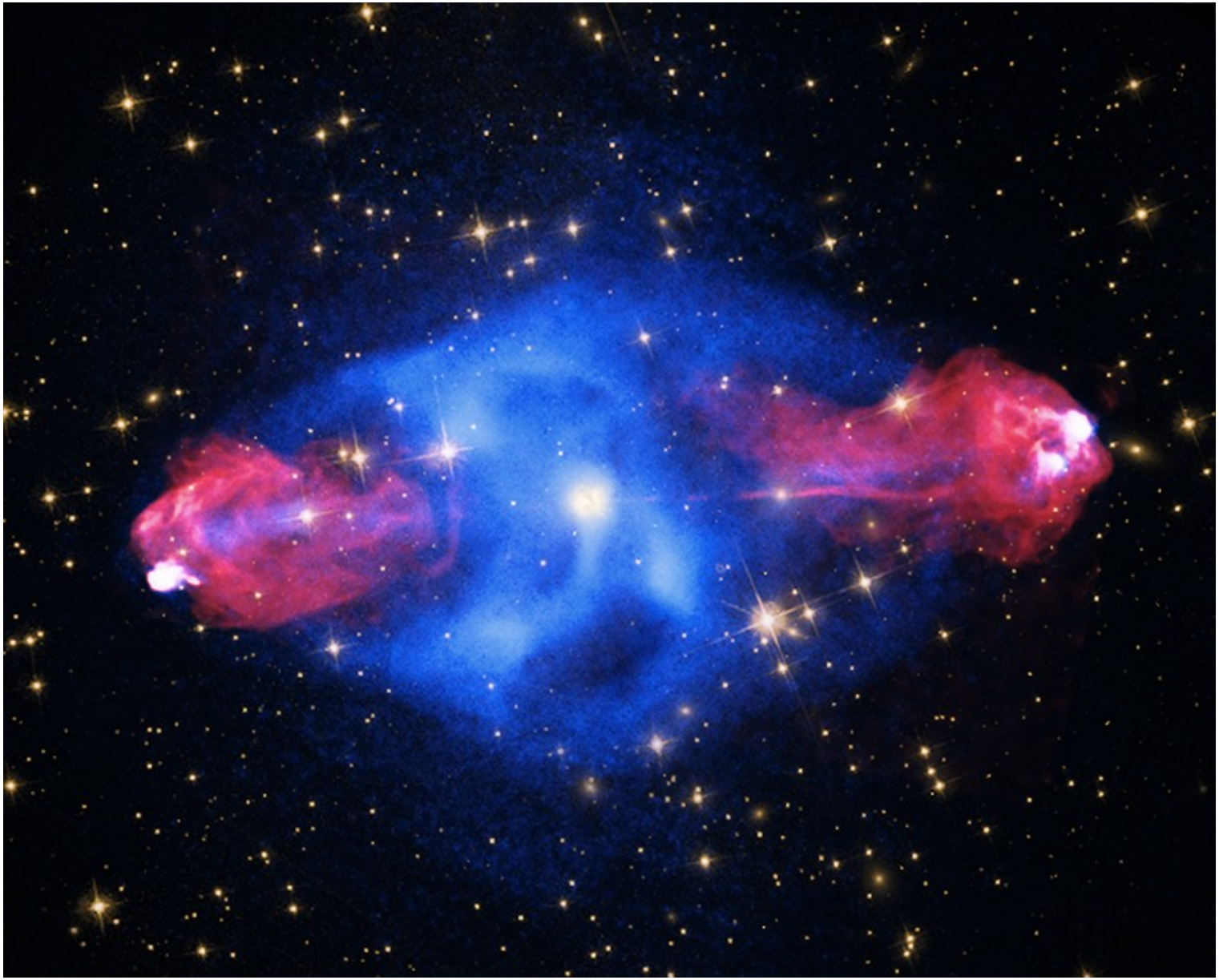
LES GALAXIES

Tout est bien dans le meilleur des mondes

NGC 3368
Galaxie spirale barrée (Lion)

LES GALAXIES

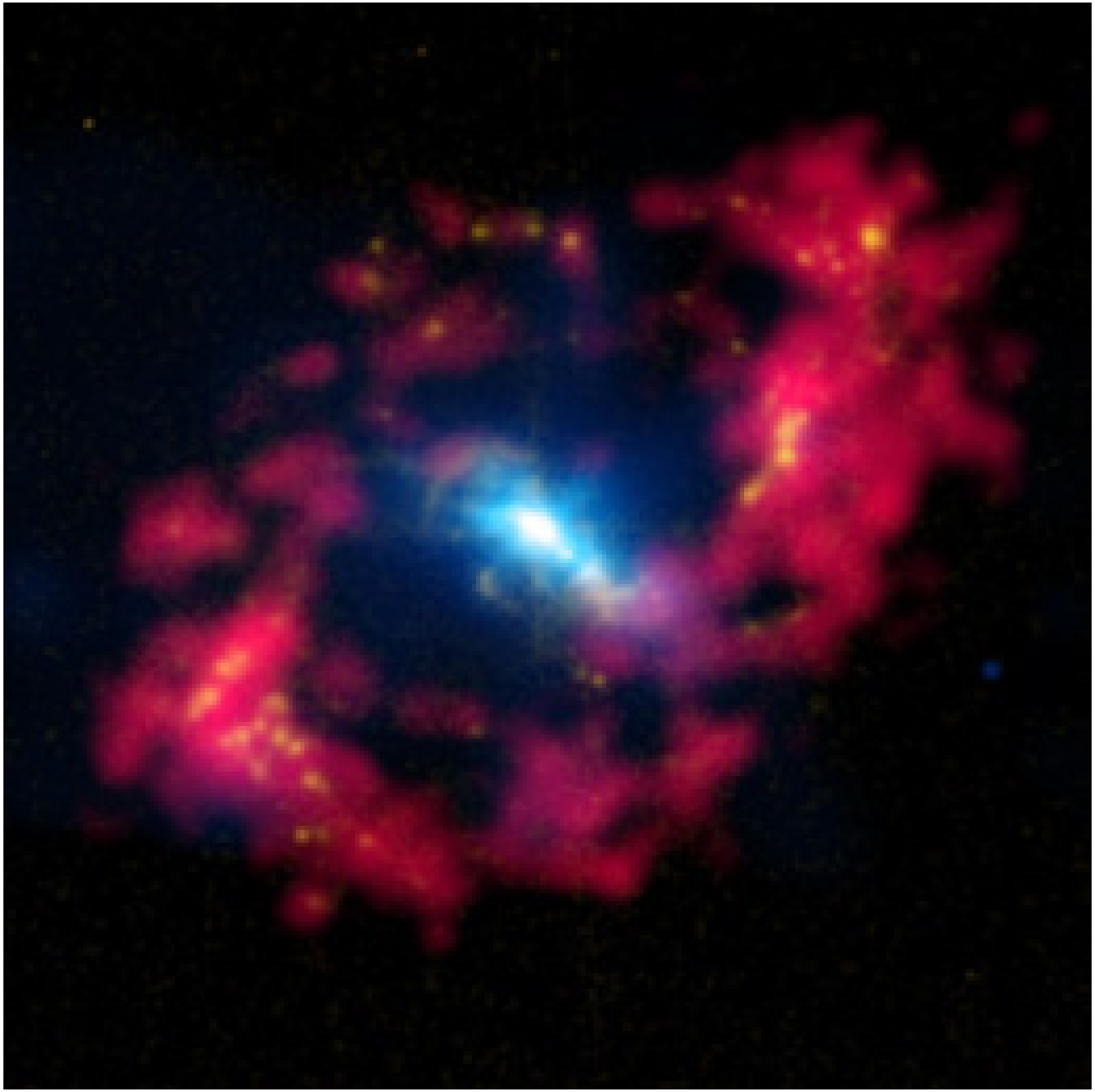
Sauf que ...



Cygnus A

LES GALAXIES

Sauf que ...



NGC 4151

LES GALAXIES

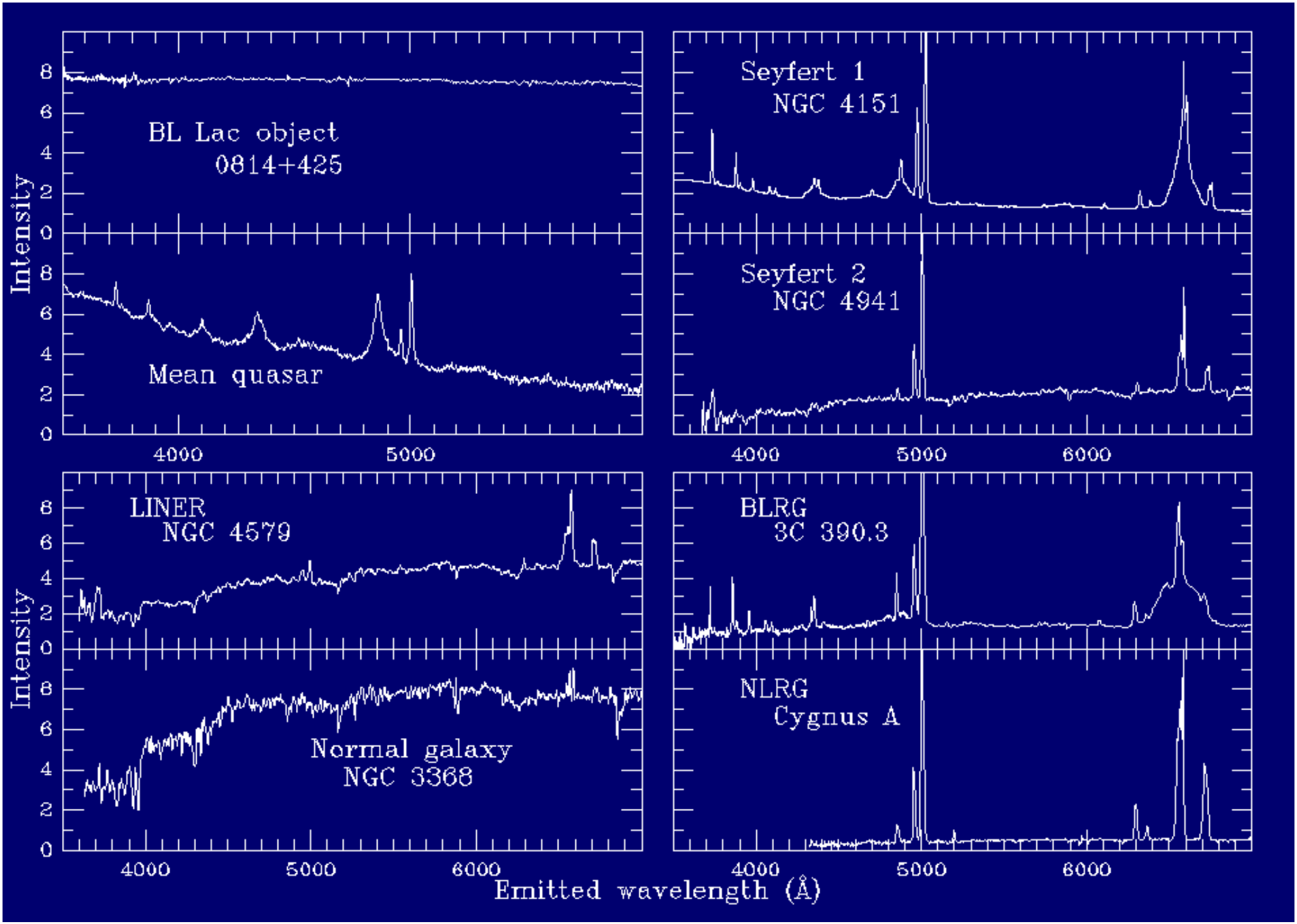
Sauf que …

Il existe des galaxies très étranges qui ne rentrent pas du tout dans la définition de Hubble ou de Sandage

Mettons nos lunettes de spectroscopistes

Cygnus A

NGC 4151


BL Lac object
0814+425
Mean quasar
Seyfert 1
NGC 4151
Seyfert 2
NGC 4941
LINER
NGC 4579
Normal galaxy
NGC 3368
BLRG
3C 390.3
NLRG
Cygnus A
Intensity
Intensity
0
2
4
6
8
4000
5000
6000
Emitted wavelength (Å)

LES GALAXIES

Sauf que …

Il existe des galaxies très étranges qui ne rentrent pas du tout dans la définition de Hubble ou de Sandage

- spectres optiques complètement différents d'une galaxie normale et présentant une vaste zoologie de signatures !

- présence de jets et de lobes (particulièrement visibles en ondes radio)

- le cœur de la galaxie est parfois si lumineux qu'il éclipse la luminosité des étoiles de la galaxie hôte

- la luminosité est variable (et la variabilité change en fonction de la longueur d'onde)

- on détecte de ces objets à tous les redshifts

- mais ils sont bien plus rares que les galaxies normales (fraction dépendante du redshift)

Cygnus A

NGC 4151

LES GALAXIES

Qu'en dites-vous Sherlock Holmes ?

Il existe des galaxies très étranges qui ne rentrent pas du tout dans la définition de Hubble ou de Sandage

- spectres optiques complètement différents d'une galaxie normale et présentant une vaste zoologie de signatures !

- présence de jets et de lobes (particulièrement visibles en ondes radio)

- le cœur de la galaxie est parfois si lumineux qu'il éclipse la luminosité des étoiles de la galaxie hôte

- la luminosité est variable (et la variabilité change en fonction de la longueur d'onde)

- on détecte de ces objets à tous les redshifts

- mais ils sont bien plus rares que les galaxies normales (fraction dépendante du redshift)

Il doit y avoir un (plusieurs ?) paramètre clef qui gouverne tout cela

Éjection de matière = enrichissement du milieu ambiant = évolution

Le mystère est caché au centre

Variabilité = indication de taille

Phénomène omniprésent

Indication sur la durée de vie du phénomène

LES GALAXIES A NOYAUX ACTIFS

Résolution du mystère

Les galaxies actives sont des galaxies qui ont un petit noyau d'émission intégré au centre d'une galaxie par ailleurs typique

→ ce noyau est généralement très variable et très brillant par rapport à la galaxie hôte

Pour les galaxies normales, l'énergie totale émise est la somme de l'émission de chacune des étoiles de la galaxie,

→ pas dans les galaxies actives : excédent infrarouge, radio, UV et rayons X

La plupart des galaxies normales, sinon toutes, ont un trou noir supermassif en leur centre

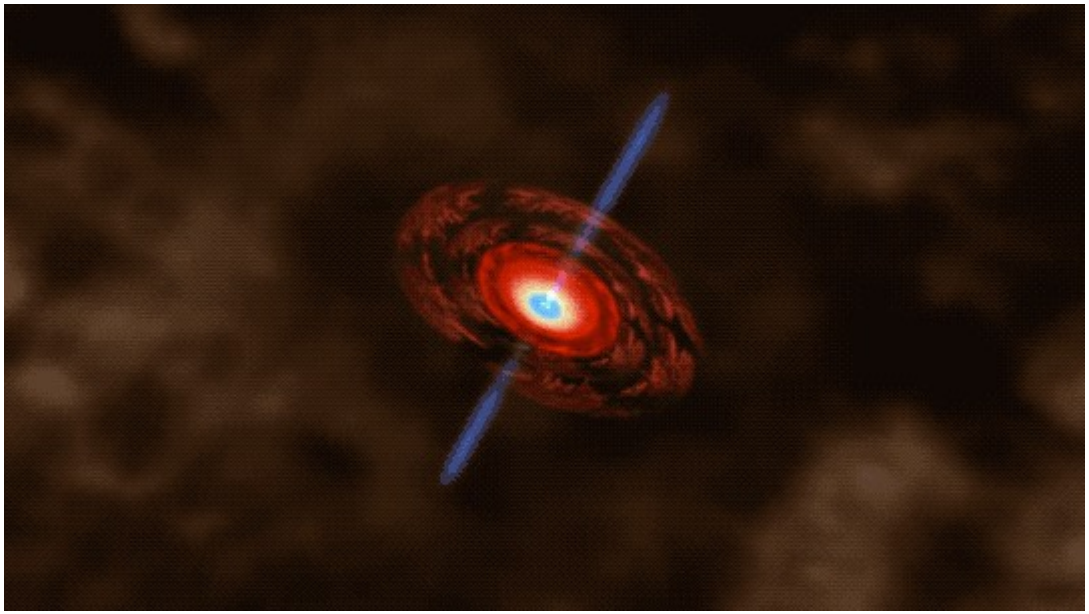
- dans une galaxie standard, le trou noir est quiescent (inactif)
- dans une galaxie active, le trou noir supermassif accumule de la matière (accrète)

Formation d'un disque d'accrétion

LES GALAXIES A NOYAUX ACTIFS

Résolution du mystère

Le frottement, l'irradiance inégale, les effets magnétohydrodynamiques et d'autres forces induisent des instabilités provoquant une spirale de la matière en orbite dans le disque vers le corps central



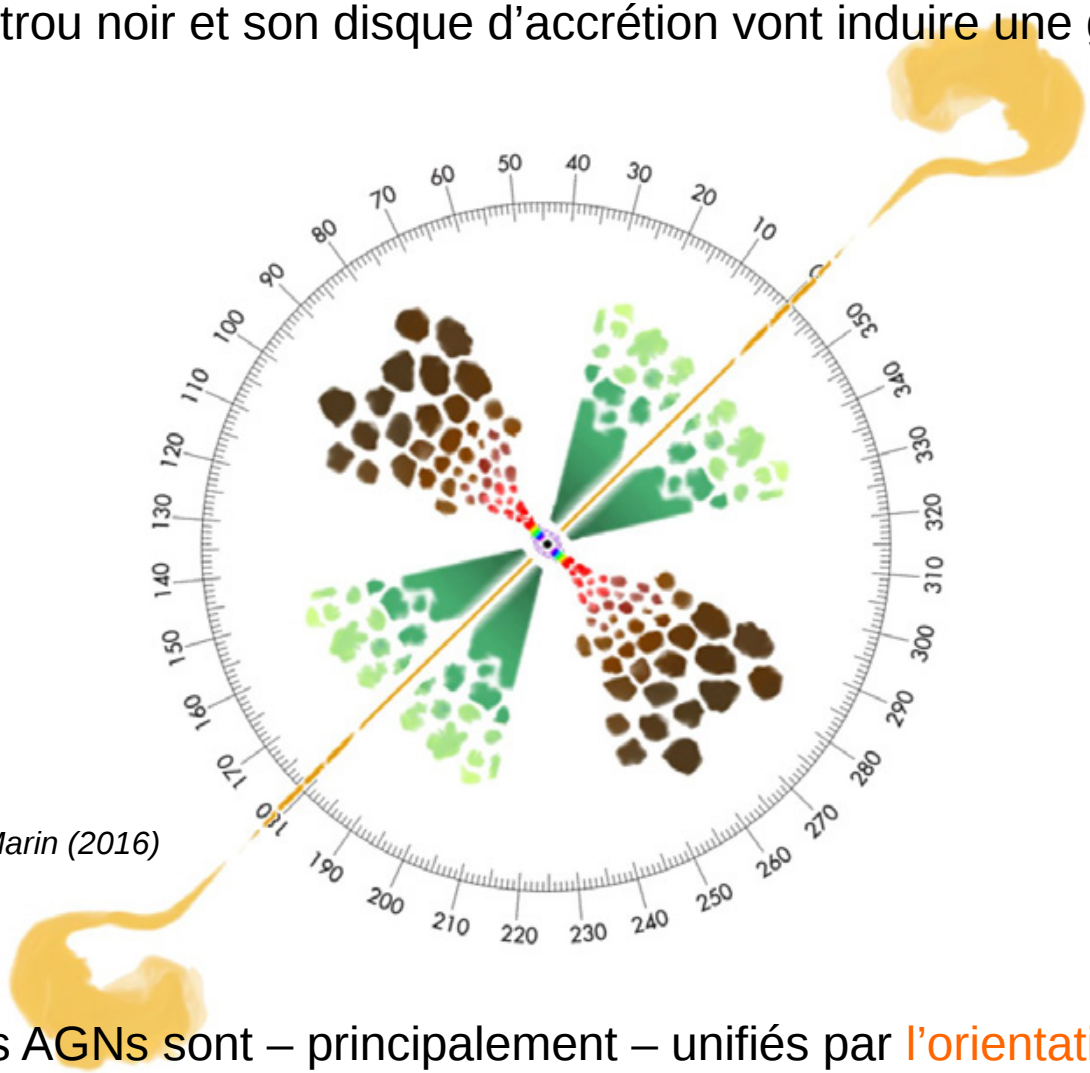
Les forces de gravitation et de friction compriment et élèvent la température de la matière, provoquant l'émission d'un rayonnement électromagnétique

→ la matière s'organise de manière non-symétrique autour du trou noir

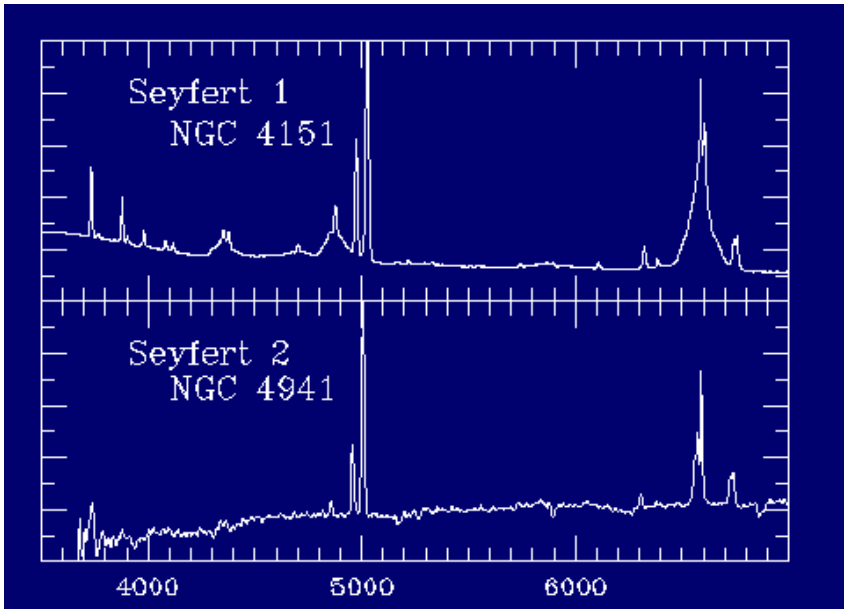
LES GALAXIES A NOYAUX ACTIFS

Une historie d'asymétrie

Le trou noir et son disque d'accrétion vont induire une géométrie spécifique dans les AGNs :



Marin (2016)

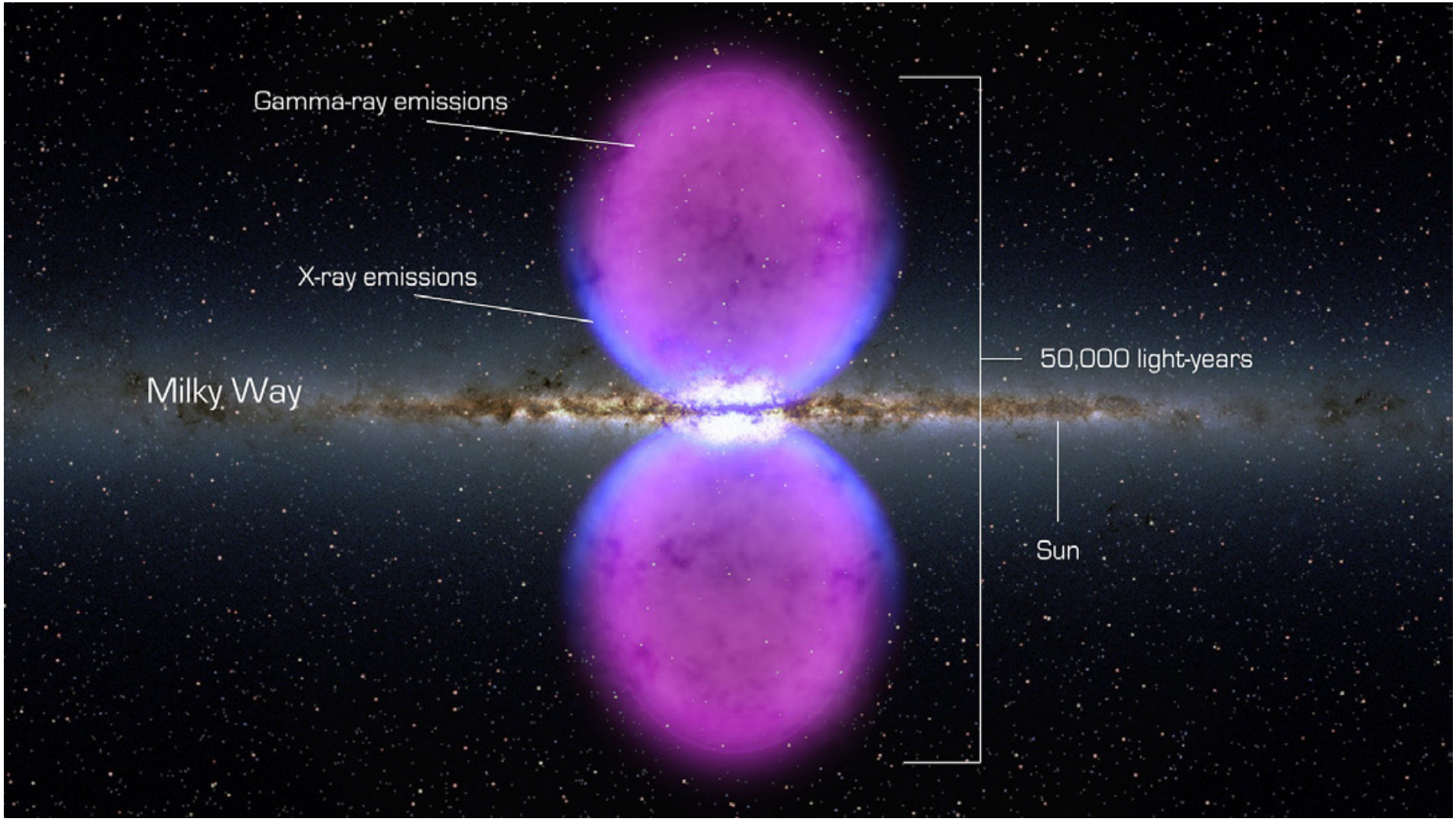


Les AGNs sont – principalement – unifiés par l'orientation de la ligne de visée de l'observateur

VARIABILITE

Vous avez parlé de variabilité ?

L'état de noyau actif n'est pas continu dans l'histoire de l'évolution d'un AGN / quasar
→ c'est une phase transitoire



VARIABILITE

Vous avez parlé de variabilité ?

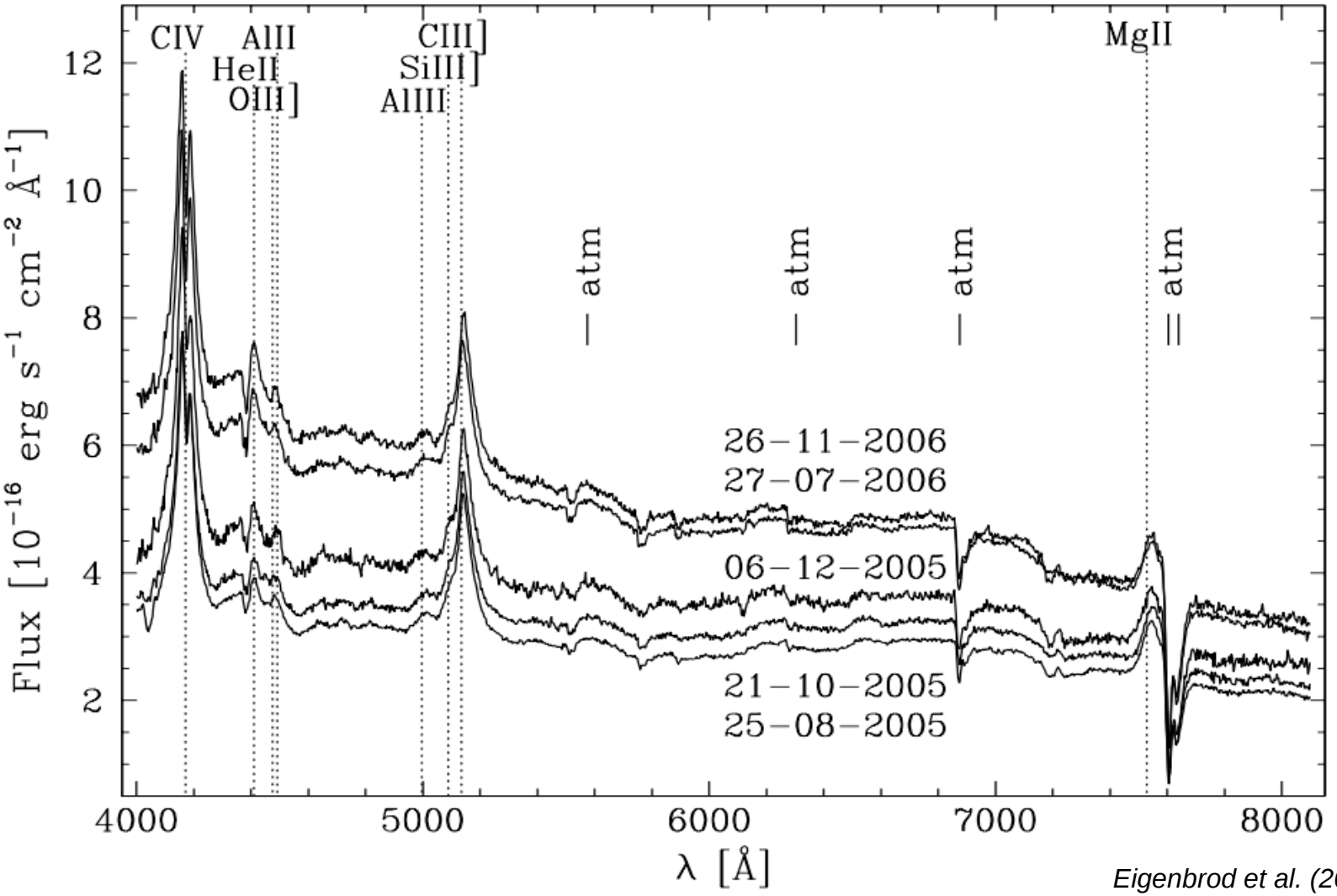
L'état de noyau actif n'est pas continu dans l'histoire de l'évolution d'un AGN / quasar
→ c'est une phase transitoire

Le lancement du satellite IXPE (NASA) le 9 décembre dernier a pour but de prouver cette hypothèse en étudiant l'écho de cette période tumultueuse que seule la polarisation de la lumière peut révéler

VARIABILITE

Vous avez parlé de variabilité ?

Le continu, l'intensité des raies, parfois leur largeur, peuvent varier dans le temps

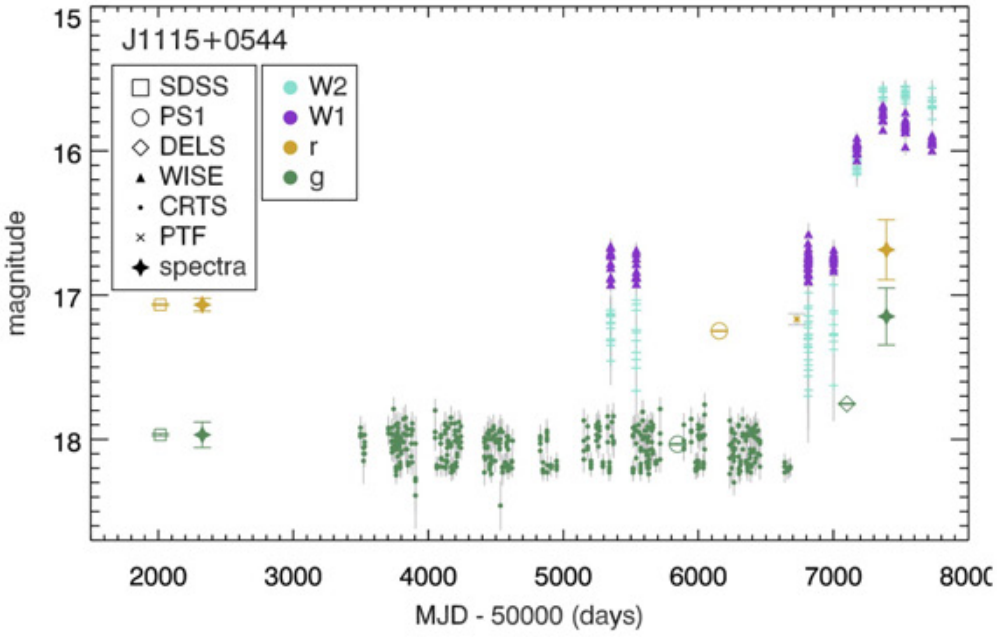


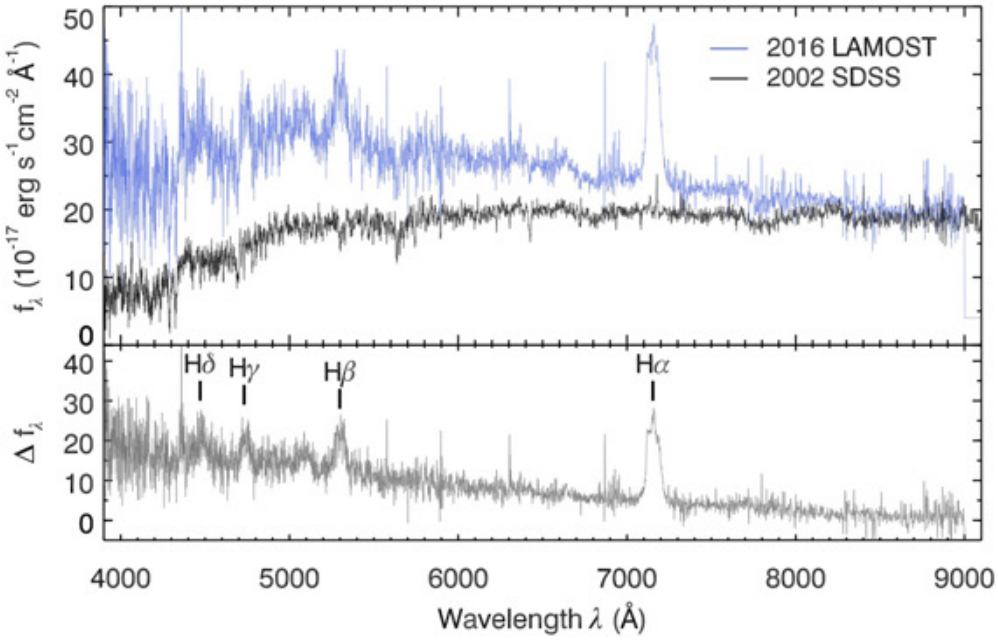
Eigenbrod et al. (2008)

VARIABILITE

Vous avez parlé de variabilité ?

Et ça, c'est quoi encore ?





Yang et al. (2018)

Un AGN dont le flux triple en l'espace de deux ans et demi, puis reste à un niveau stable pendant des dizaines d'années (e.g. Mrk 1018) et qui possède de toutes nouvelles signatures spectrales ???

LES CHANGING LOOK

Comment est-ce possible ?

UN AGN comme J0831+3646 (celui présenté ci-avant) possède un disque d'accrétion d'un rayon d'environ 0.01 parsecs (10 jours-lumière, 308 milliards de kilomètres)

→ il faudrait qu'un objet plus grand que notre système solaire (rayon < nuage d'Oort) change complètement en deux ans ?

LES CHANGING LOOK

Remise en contexte

Connaissez-vous Arturo Brachetti ?

LES CHANGING LOOK

Comment est-ce possible ?

UN AGN comme J0831+3646 (celui présenté ci-avant) possède un disque d'accrétion d'un rayon d'environ 0.01 parsecs (10 jours-lumière, 309 milliards de kilomètres)

→ il faudrait qu'un objet plus grand que notre système solaire (rayon < nuage d'Oort) change complètement en deux ans ?

Remise en contexte

Arturo Brachetti

Temps moyen pour se transformer ~ 2 secondes
Taille : 1.8 m
Ratio : 0.9

Noyau actif de galaxie « changing-look »

Temps moyen pour se transformer ~ 6.31×10^{7} s (2 ans)
Taille : 3.09×10^{14} m
Ratio : 4 896 989

=> pour faire pareil, Arturo Brachetti devrait se transformer en 0.37 micro-secondes

LES CHANGING LOOK

Quelle peut être la cause d'un tel phénomène ?

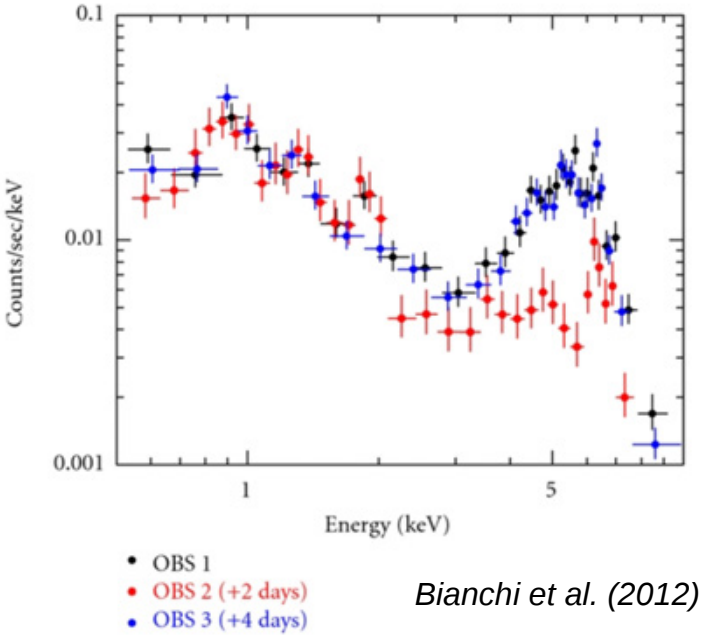
- une étoile massive passant très proche du trou noir ?
  → cela produirait un pic de luminosité pendants quelques années puis plus rien
  → ne durerait pas plusieurs dizaines années

LES CHANGING LOOK

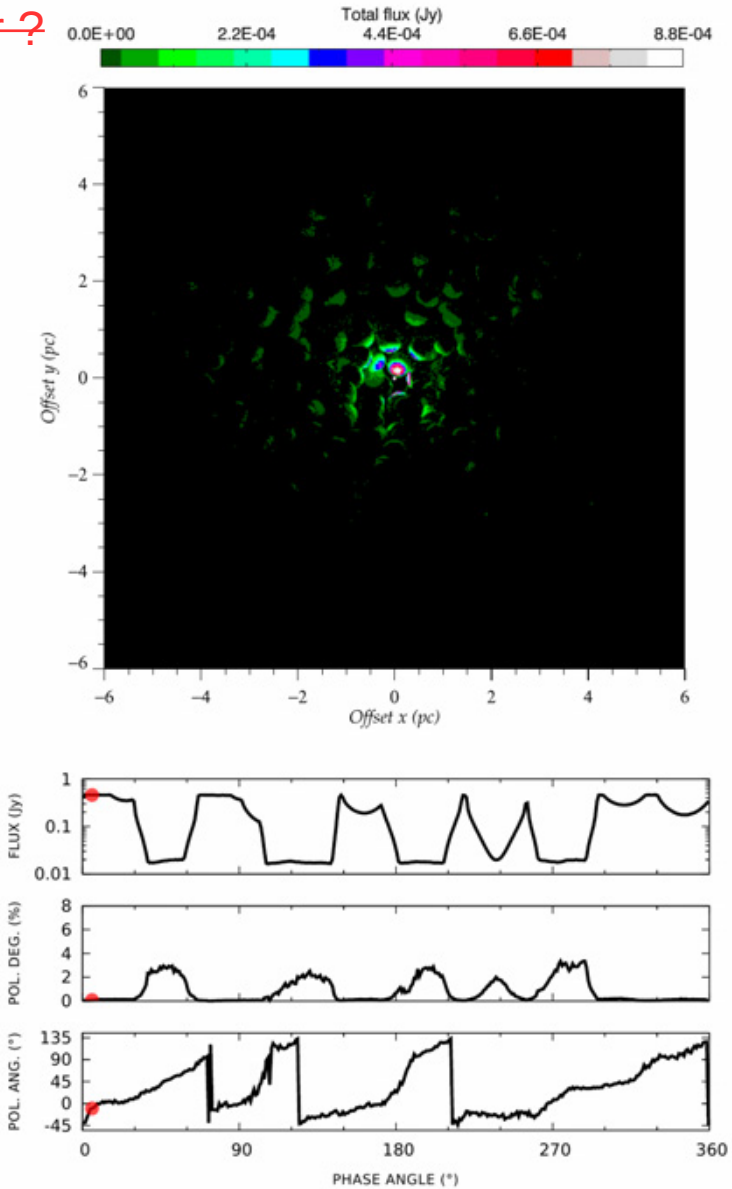
Quelle peut être la cause d'un tel phénomène ?

Marin (2016)

~~- une étoile massive accrétée rapidement par le trou noir ?~~
- de l'obscuration par un nuage de gaz ?
  - → le nuage doit passer sur la ligne de visée
  - → extinction dans les spectres en optique et X
  - → événement court



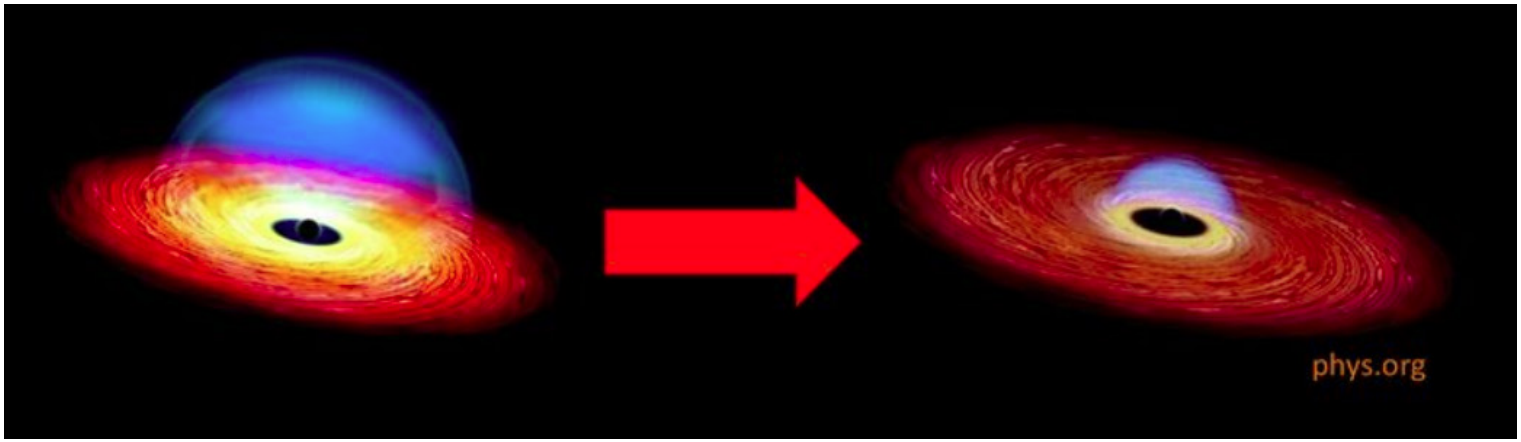
Bianchi et al. (2012)



LES CHANGING LOOK

Quelle peut être la cause d'un tel phénomène ?

- ~~une étoile massive accrétée rapidement par le trou noir ?~~
- de l'obscuration par un nuage de gaz (uniquement pour les variations rapides)
- déclin/renaissance de l'activité d'accrétion
  - → transition d'état déclenchée par une baisse rapide du taux d'accrétion de masse
  - → le disque interne s'évapore pour être remplacé par un flux d'accrétion dominé par l'advection
  - → apparition/disparition de raies (luminosité ↘ dispersion des vitesses ↗)
  - → mais la théorie standard prédit des temps de transition beaucoup plus longs !



LES CHANGING LOOK

Quelle peut être la cause d'un tel phénomène ?

- ~~une étoile massive accrétée rapidement par le trou noir ?~~
- de l'obscuration par un nuage de gaz (uniquement pour les variations rapides)
- déclin/renaissance de l'activité d'accrétion (montre les faiblesses de nos théories)
- fusion avec une autre galaxie ?
  - → second trou noir en interaction
  - → vents d'émission
  - → peut-être pour certains candidats, mais certainement pas tous

NASA, ESA, and J. Olmsted (STScI)

LES CHANGING LOOK

Quelle peut être la cause d'un tel phénomène ?

- ~~une étoile massive accrétée rapidement par le trou noir ?~~
- de l'obscuration par un nuage de gaz (uniquement pour les variations rapides)
- déclin/renaissance de l'activité d'accrétion (montre les faiblesses de nos théories)
- fusion avec une autre galaxie (ne peut pas expliquer chaque candidat)

Et c'est tout !

→ les noyaux actifs de galaxie changeants restent une énigme
- découverts relativement récemment
- posent de grandes questions sur notre compréhension de l'accrétion

Le problème d'Alloin

En 1985, Danielle Alloin avait déjà démontré que l'on ne comprenait fondamentalement pas grand-chose à l'accrétion dans les AGN :

→ les raies Balmer de NGC 1566 suivent la variation de flux à 3700 Å durant une période de changement longue (14 mois) mais pas lors d'un changement court, elle les précèdent !

Alloin et al. (1985)

CONCLUSION

Certains noyaux actifs de galaxies montrent des signes de transitions brusques

→ énorme augmentation/diminution du flux optique, UV et X
→ apparition/disparition de signatures observationnelles (raies)
→ retour à la normal dans certains cas, plateau pendant des décennies pour d'autres

Ces monstres ne peuvent pas se transformer complètement en si peu de temps !

→ destruction d'une étoile par effets de marée ?
→ obscuration par des nuages ?
→ variations intrinsèques ?
→ fusion de galaxies ?

Aucune théorie ne marche complètement

→ les meilleures pointent vers une révision en profondeur de nos théories sur l'accrétion
→ d'autres études, parfois oubliées, le démontrent aussi

Un cas fascinant

→ l'astrophysique se révolutionne au fil des découvertes et des contradictions
→ la multiplicité des techniques d'observation est la clef :

- photométrie
- spectroscopie
- imagerie
- polarimétrie