

Histoire de la découverte des trous noirs au centre des galaxies

Les quasars

Plan

- Introduction
 - Etat des lieux en 1945
 - Notion de trou noir
- Les galaxies de Seyfert
- Les radio-galaxies
- Leur identification optique
- Des contradictions stupéfiantes
- Vers la compréhension des phénomènes
- Les quasars aujourd'hui

État des lieux en 1945

- La notion de galaxies
- Leurs distances
- L'expansion

Notion de trou noir

- **1784 : John Michell** à partir de la vitesse d'échappement : si la masse du Soleil était 500 fois plus élevée pour un même rayon : la lumière resterait sur le Soleil.
- **1796 : Laplace** : « Un astre lumineux de même densité que la terre, et dont le diamètre serait deux cent cinquante fois plus grand que celui du soleil, ne laisserait en vertu de son attraction, parvenir aucun de ses rayons jusqu' à nous ; il est donc possible que les plus grands corps lumineux de l'univers, soient par cela même, invisibles. »
- **1916 : Karl Schwarzschild** définit le rayon de l'horizon de ce qu'on nommera trou noir.

- **1939 : Oppenheimer et Snyder** : après épuisement de ses sources d'énergie nucléaires, la contraction d'une étoile vers une densité infinie tend vers l'infini.
- 1958 : l'horizon des événements comme solution de Schwarzschild.
- 1963 : le terme de trou noir apparaît dans la littérature astronomique.

Les galaxies de Seyfert

NUCLEAR EMISSION IN SPIRAL NEBULAE

Apj 1943 97 285

Carl Seyfert

Carnegie Institution of Washington

Mount Wilson Observatory

October 1942

Il étudie **six galaxies** dont l'émission du noyau est plus élevée que celle de toute la galaxie.

EMISSION SPIRALS OBSERVED

NGC	1950		TYPE	m_{total}	$m_{\text{nucl.}}$	SPECT.	MODULUS
	R.A.	Dec.					
1068.....	2 ^h 40.1	- 0° 14	Sb	10.0	13.0	G3	26 ^m 0
1275.....	3 15.6	+41 18	E:	13.0	15.5	G3	30.0
3516.....	11 3.4	+72 50	Sa	12.2	13.7	G2:	28.5
4051.....	12 0.6	+44 48	Sb	11.7	14.0	G2	26.0
4151.....	12 8.0	+39 41	Sb	11.2	12.0	G2	26.0
7469.....	23 0.7	+ 8 36	Sa	13.0	14.3:	G0:	29.8

Des raies d'émission alors que les galaxies sont formées d'étoiles

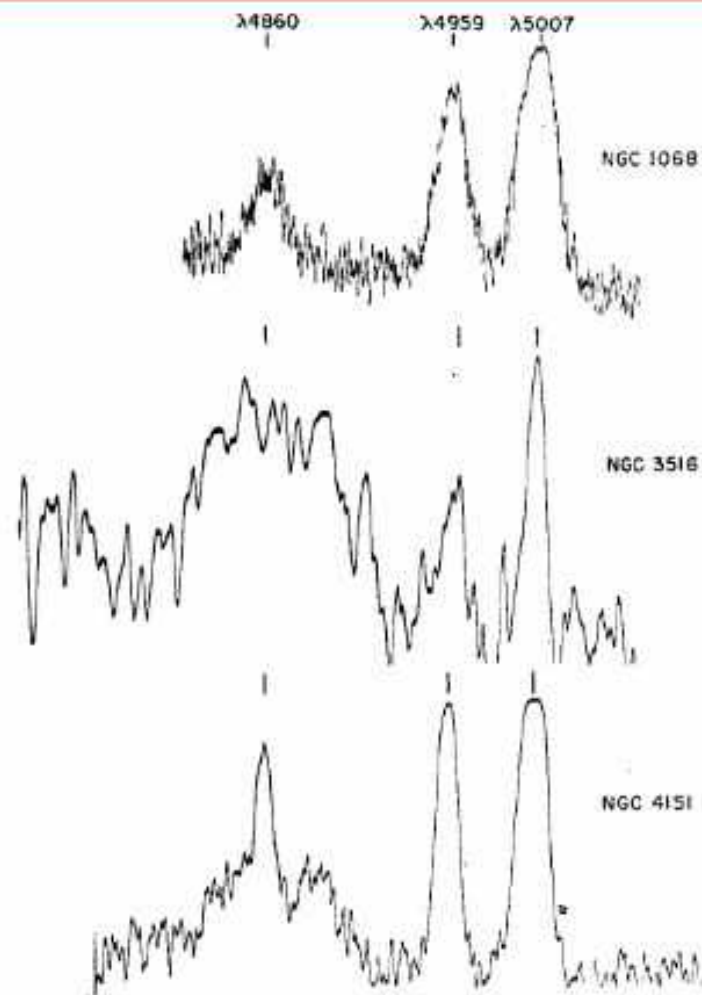


FIG. 1.—Microphotometer tracings of the emission lines $\lambda\lambda$ 4860 ($H\beta$), 4959 and 5007 [$O\text{ III}$] in the nebulae NGC 1068, 3516, and 4151.

Les galaxies de Carl Seyfert

- Leur **spectre** montre des raies en émission comme dans les nébuleuses planétaires(H et OIII) mais plus larges et plus brillantes.
- L'étude Doppler indique la très **grandes vitesse** des particules émises (8000 km/s).
- De plus le rayonnement est de **couleur bleue**.
- Mystère, mais au même moment :

Les radio-sources

- **1931 : Karl Jansky** étudie aux laboratoires Bell Telephone l'arrivée des orages.
- Quand le temps est calme il observe une émission persistante à 20.5 mégacycles correspondant une longueur d'onde de 14.6 m.
- Sa direction est fixe au cours de l'année.
- Il en trouve plusieurs, près du plan galactique.

Leaflet No. 259—November, 1950

• • •

GALACTIC RADIO WAVES

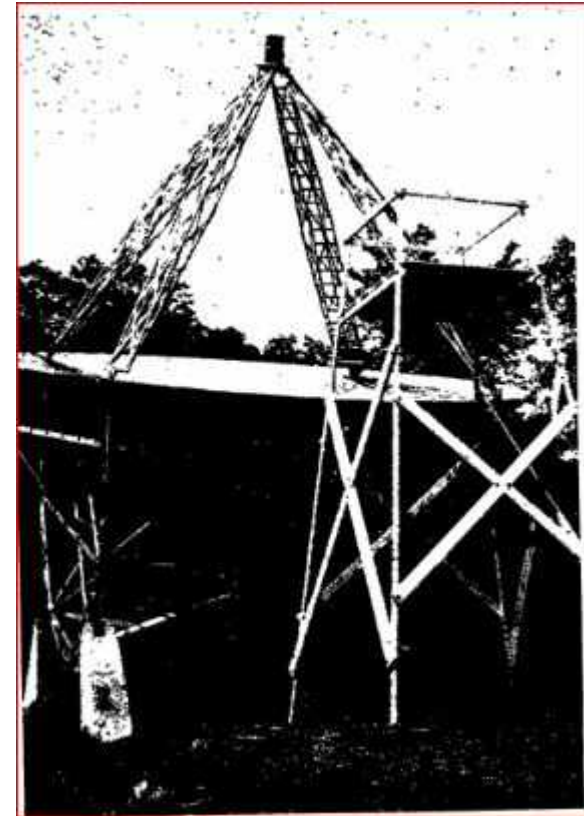
By GROTE REBER

National Bureau of Standards

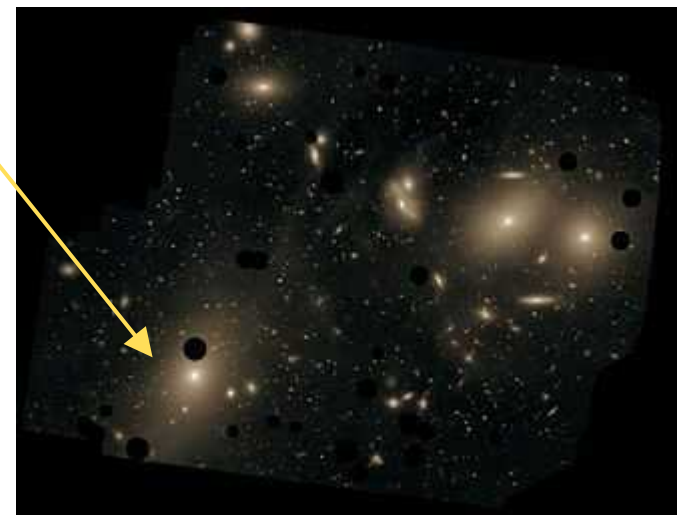
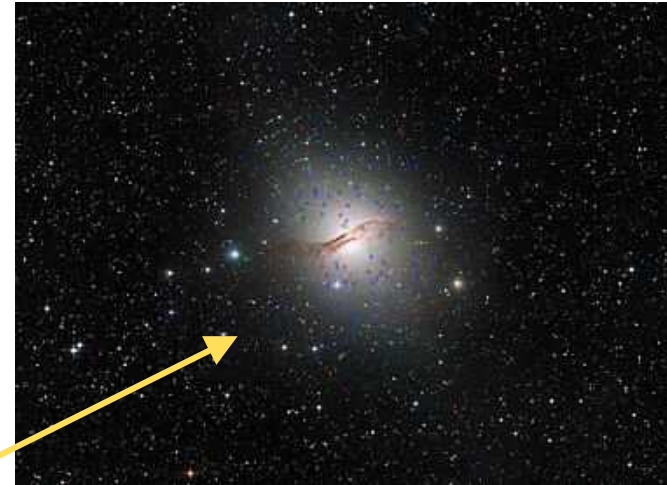
1937 : **Grote Reber** construit des paraboles et observe dans différentes fréquences.

En 1942, il commence ses recherches.
En 1943 il a trouvé une émission dans la constellation du Cygne.

1948 : Il a recensé cinq radio sources: CygA, Vir A, Cas A, Cen A et Tau A.



- 1949 : La recherche en optique de ces sources.
 - **Tau A** : nébuleuse du crabe
 - **Cen A**: galaxie elliptique : NGC 5128
 - **Vir A : NGC 4486, M87** : galaxie elliptique. Curtis en 1918 y avait observé un jet.



Les observations de Baade et Minkowski

Quid de Cas A et Cyg A ?

IDENTIFICATION OF THE RADIO SOURCES IN CASSIOPEIA, CYGNUS A, AND PUPPIS A

W. BAADE AND R. MINKOWSKI

MOUNT WILSON AND PALOMAR OBSERVATORIES

CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Received June 19, 1953

- 1951-52 : Baade et Minkowski au Palomar identifient :
 - **Cas A** : un rémanent d'une supernova inconnue jusqu'alors.
 - **Cyg A** : un objet bizarre ...

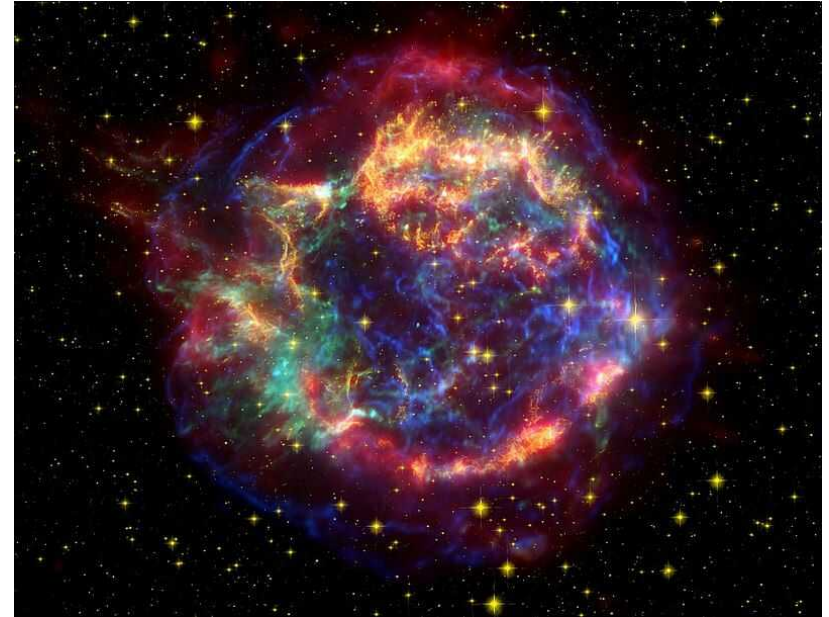
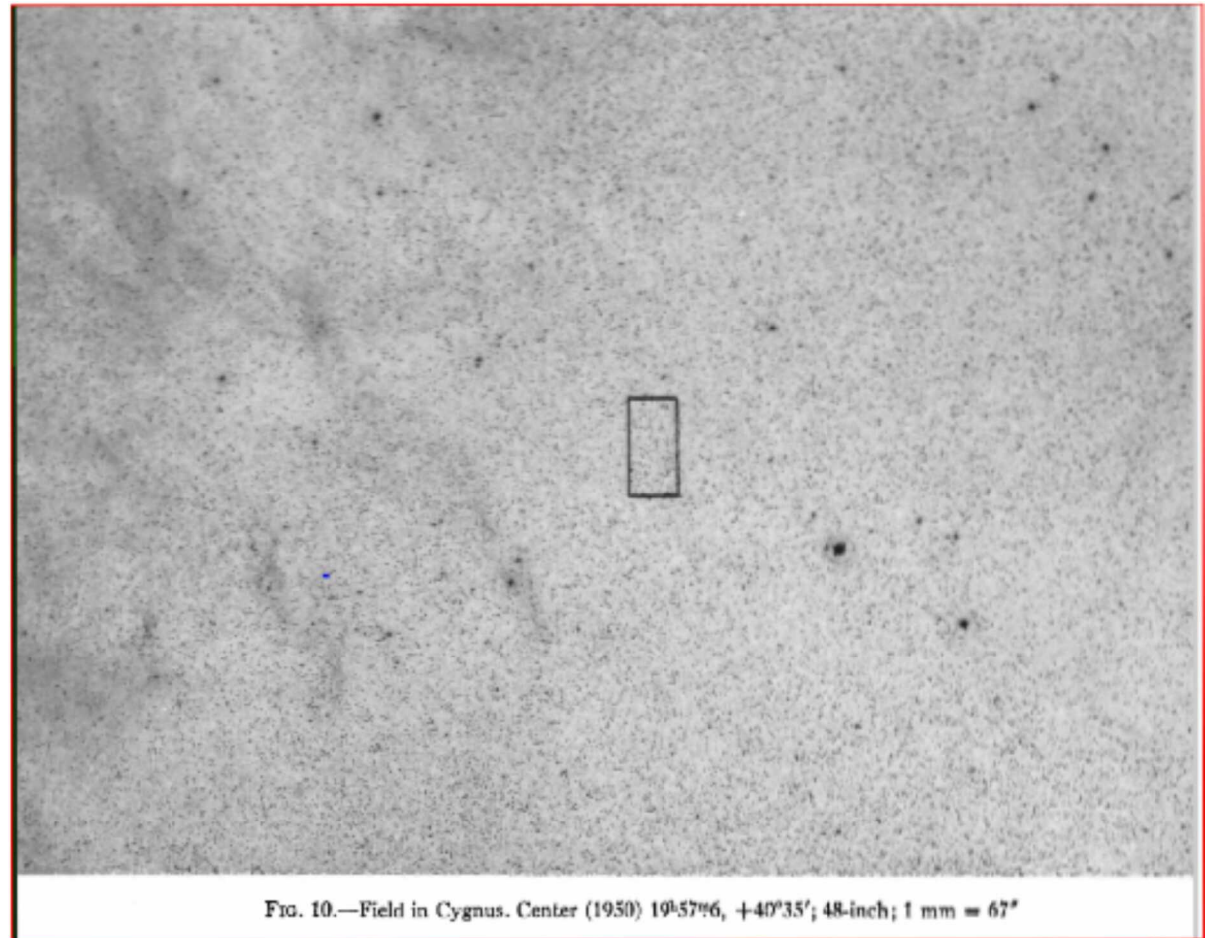
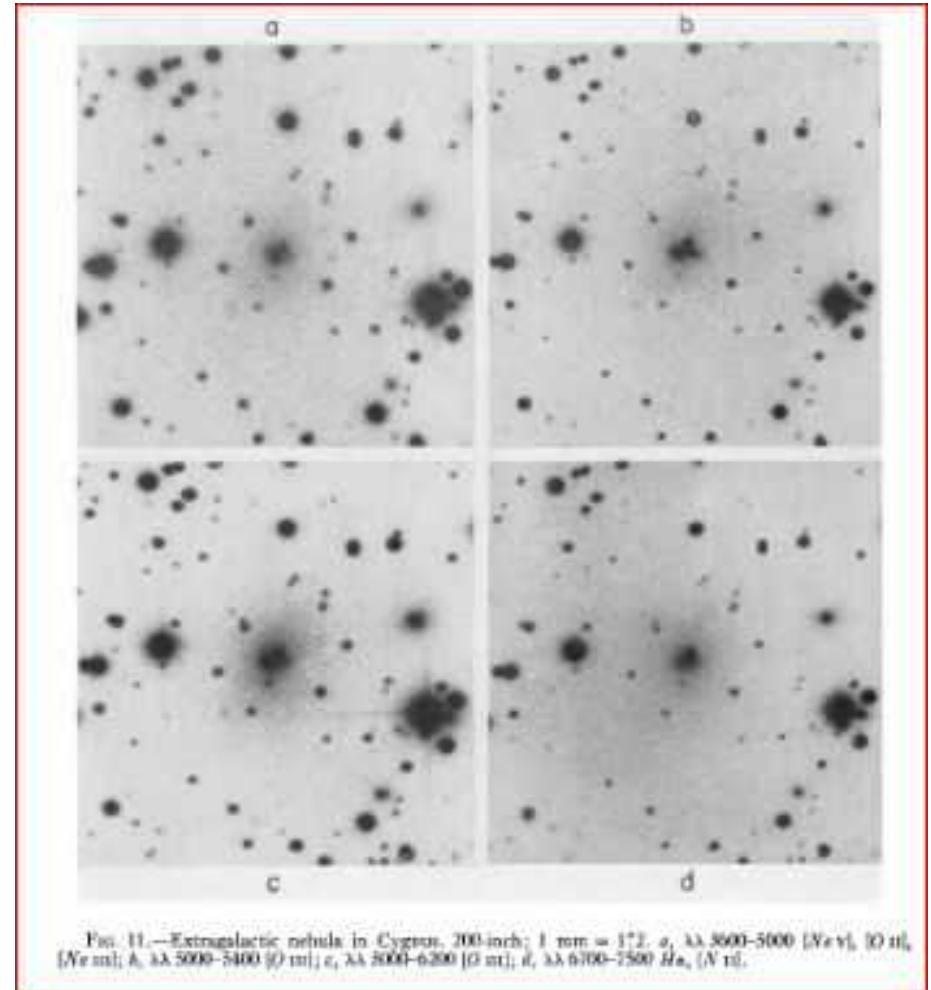


Photo du champ de
Cyg A (Baade et
Minkowski)



« Au centre de cette nébuleuse (Fig. 11, a) se trouvent deux condensations brillantes séparées d'environ 2".
... cette nébuleuse est un objet très curieux qui semble défier toute classification. »



- Au total sur les cinq objets :
 - Deux sont des rémanents de supernova
 - Deux sont hébergés dans des galaxies
 - Une cinquième Cyg A pourrait ressembler à une galaxie mais cela reste incertain.
- Les trois derniers objets sont **extra-galactiques**, ils ont en commun qu'une énorme énergie est reçue sur Terre, alors que deux des objets au moins sont très éloignés : **l'énergie émise doit être colossale !**

- Baade et Minkowski toujours, observent un spectre étrange pour **Cyg A** : Des raies en émission mais décalées vers le rouge de 5.6 %

Le spectre de comparaison est en haut et en bas du spectre de Cyg A.

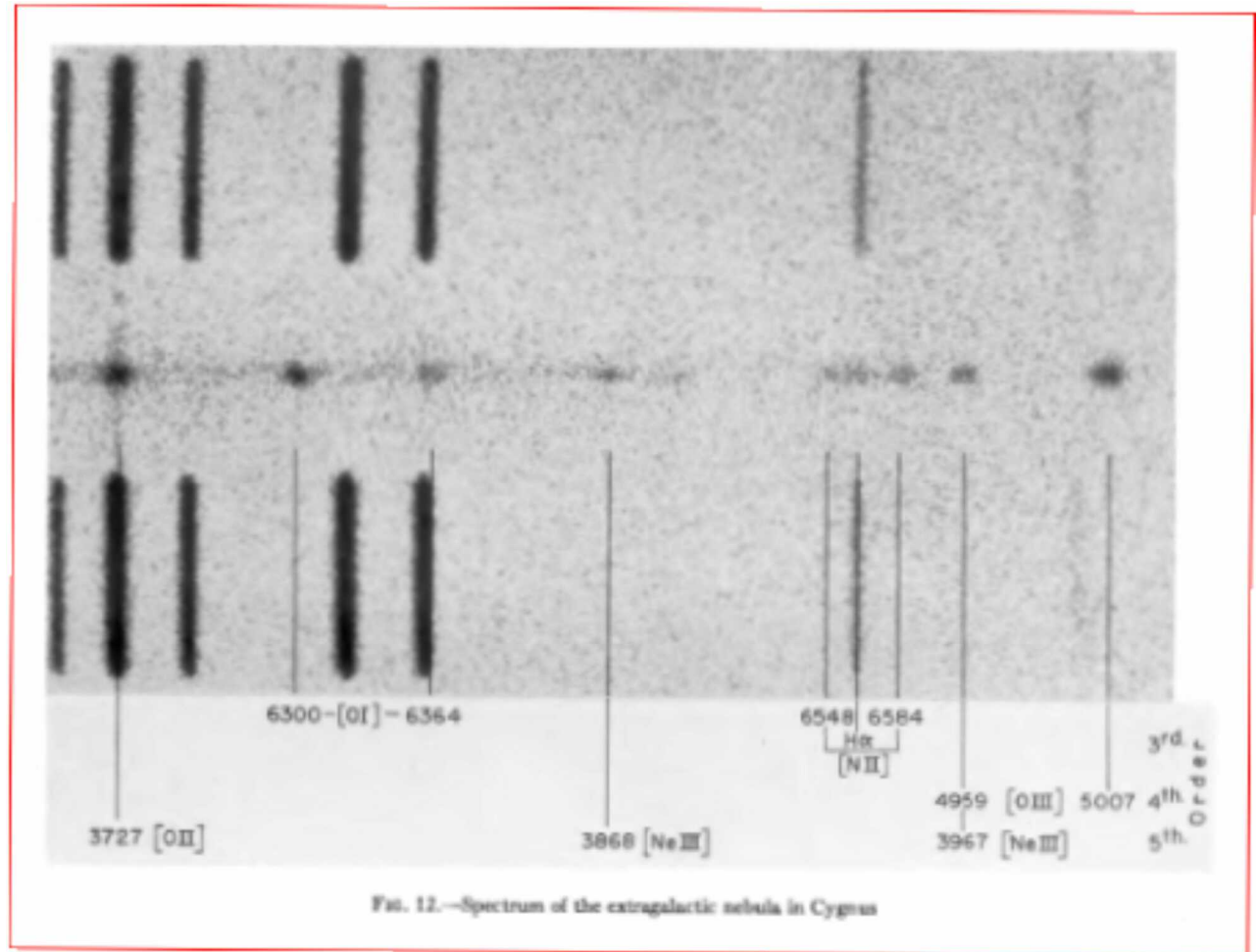


FIG. 12.—Spectrum of the extragalactic nebula in Cygnus

- Ce spectre suit une loi de puissance et il est polarisé.
- La loi de Hubble lui donne une grande distance : $z = 0.056$ et $d = 700$ millions d'a.l.
- Mais alors l'éclat observé correspondrait à une luminosité 100 fois supérieure à celle de la Voie lactée !

Les conclusions de Baade et Minkowski

- « Comme la distance de la nébuleuse est connue, l'énergie totale émise en ondes radio peut être calculée ;
 - Le flux total est ainsi de l'ordre de 6×10^{14} watts m^{-2} .
- Avec la source située à la distance de 3.3×10^7 pcs, l'énergie totale émise en ondes radio est de 8×10^{42} ergs/sec soit **$8 \times 10^{35} \text{ J.s}^{-1}$** .
- Ceci est plus grand que toute l'énergie émise en optique qui est de 5.6×10^{42} ergs/sec.
- La source d'énergie de l'émission radio pourrait provenir de l'énergie cinétique de collision des nébuleuses qui est de l'ordre de 10^{59} ergs pour une vitesse relative de 500 km/sec. »

1 erg = 10^{-7} joule soit 100 nJ

- Le mystère reste entier.
- Les astrophysiciens cherchent des théories susceptibles d'expliquer leurs étonnantes observations.

- Une hypothèse: le **rayonnement synchrotron** observé dans les accélérateurs.
 - Dû à des électrons accélérés dans un champ magnétique
 - Vérifie une loi de puissance et la polarisation.
 - Il est de couleur bleue (cf galaxies de Seyfert)
- Reste que la luminosité correspond à une énergie considérable non atteinte dans les accélérateurs.

- 1953-1962 se construit le troisième **catalogue de radio sources de Cambridge** : du 1C au 3C.
 - **3C 295** ressemble à Cyg A avec un décalage de 46.1 % donc 10 fois plus lointaine que Cyg A.
 - **3C 273** : sa position sera mesurée précisément grâce à une occultation par la Lune (Marteen Schmidt) : décalage de 16 %.
 - **3C 48** : décalage de 37 % et raies très élargies.

Le problème est qu'aucun de ces objets ne ressemble à une galaxie ???

- En 1963, Mathews et Sandage observent des **variations de lumière** issues des trois objets précédents, de l'ordre de 50 % de leurs éclats.
- Cette variation se produit sous forme d'un **jet** pour 3C 273.

Existe-t-il d'autres objets similaires ?

- Ils ont en commun une intensité du signal beaucoup plus élevée que les objets de même type astronomique.
 - **Certains sont indiscutablement des galaxies**
 - On se souvient qu'en 1943 avaient été décrites les galaxies de Seyfert.
 - Assez proches : on peut donc bien les identifier comme des galaxies.
 - Les travaux sur ces objets sont repris en 1959.
 - Les galaxies dites « à noyau actifs »
 - **D'autres semblent ponctuels, comme des étoiles**

Retour aux années 1960

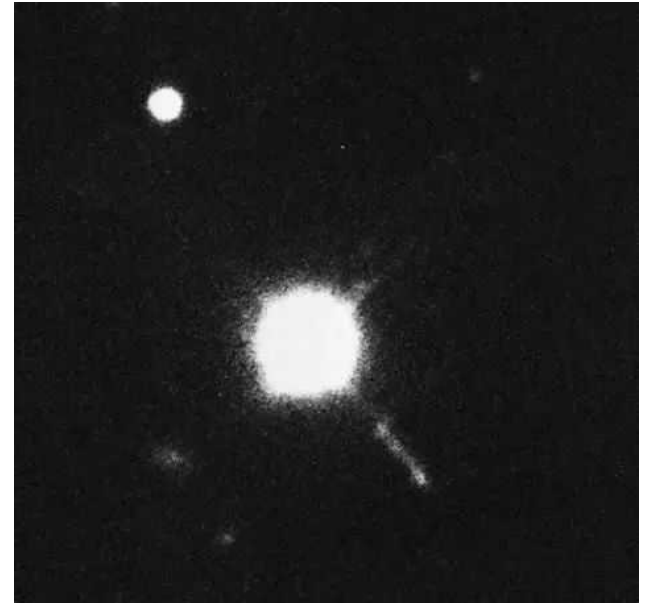
- Les travaux de **Marteen Schmidt**

Optical Observations of the radio Source 3C 273.

J.B. Oke and M. Schmidt. Mount Wilson and Palomar Observatories.

- Présenté au congrès de 1963 de l'American Astronomical Society

- Il étudie la source 3C 273 qui en optique semble être une étoile bleue.
- Il réalise un spectre et constate un très fort décalage vers le rouge.
- Ce sont donc des objets lointains
- C'est lui qui donne, en 1966, à ces objets le nom de **QUASAR**.



A partir de 1959 on s'intéresse de nouveau aux galaxies de Seyfert

- Galaxies de Seyfert et quasars ont en commun :
 - Des raies en absorption
 - Des raies en émission permises (Balmer, Mg...) et interdites (O[III] comme dans les nébuleuses planétaires) mais fortement **élargies**.
 - Qu'est ce qui produit cet élargissement et ce décalage ?
 - Un effet gravitationnel ?

- On sait que le **décalage gravitationnel** :

$$z_{\text{grav}} \sim GM / R c^2 \quad (R : \text{rayon de la source})$$

- Or le rayon de la source des quasars et des galaxies de Seyfert est de la centaine d'a.l . donc pour que z_{grav} soit grand il faut que M soit énorme de l'ordre de 10^{12} masses solaires !
- A cette époque (1943) c'est impensable.
- Autre hypothèse : le **décalage cosmologique** mais alors c'est leur distance qui est exceptionnelle.
- Comme on n'y comprend rien, on se désintéresse des galaxies de Seyfert jusqu'en 1959 avec les travaux des Burbidge.

Les galaxies de Seyfert

- En 1959 M. et J. Burbidge étudient la galaxie NGC 1068 (M77).
 - Ils mesurent sa masse avec la courbe de rotation de la galaxie (classique) et obtiennent < 1 milliard de M_{sol} .
 - Problème : c'est une galaxie de Seyfert or l'émission radio provenant du centre donne, par le calcul, une masse beaucoup plus élevée.
 - Quel est ce phénomène ?



- Résumé de l'article :
 - La source radio correspond à un objet ponctuel de type étoile de mag 12.3 et à un jet adjacent .
 - Les deux objets ne sont pas séparés de plus de 1".
 - Le spectre montre les raies en émission de la série de Balmer et des raies de O[III]

Conclusion

- Les auteurs évoquent deux hypothèses :
 - **une étoile à neutron** de rayon = 10 km, mais l'hypothèse est rejetée en raison de l'aspect du spectre.
 - **Le noyau très lumineux d'une galaxie à la distance de 500 Mpc** (1.6 milliards d'a.l.). Ce noyau aurait un diamètre de moins de 1 pc. Le jet mesurerait 50 kpc.

- Hypothèse physique:
 - Les Burbidge estiment que le gaz provenant de la région centrale n'est pas en rotation ; il serait **éjecté** à grande vitesse du noyau de la galaxie où doit siéger **une énorme masse centrale**.

- Apparaît une difficulté importante: la grande diversité des objets responsables de ces émissions intenses : depuis les galaxies de Seyfert jusqu'aux des quasars. Et même dans ces types d'objets il apparaît des différences notables.
- L'étude de M77 et celle de 3C 273 ne représentent que des cas particuliers.
- *En sciences un biais fréquent dit de sélection: l'objet, soit le plus fréquent, soit le plus lumineux est choisi parmi les autres pour des raisons évidentes de facilité.*

- En réalité on commence à comprendre que ce qui compte dans les galaxies c'est le noyau et on regroupe ces objets résolus en :

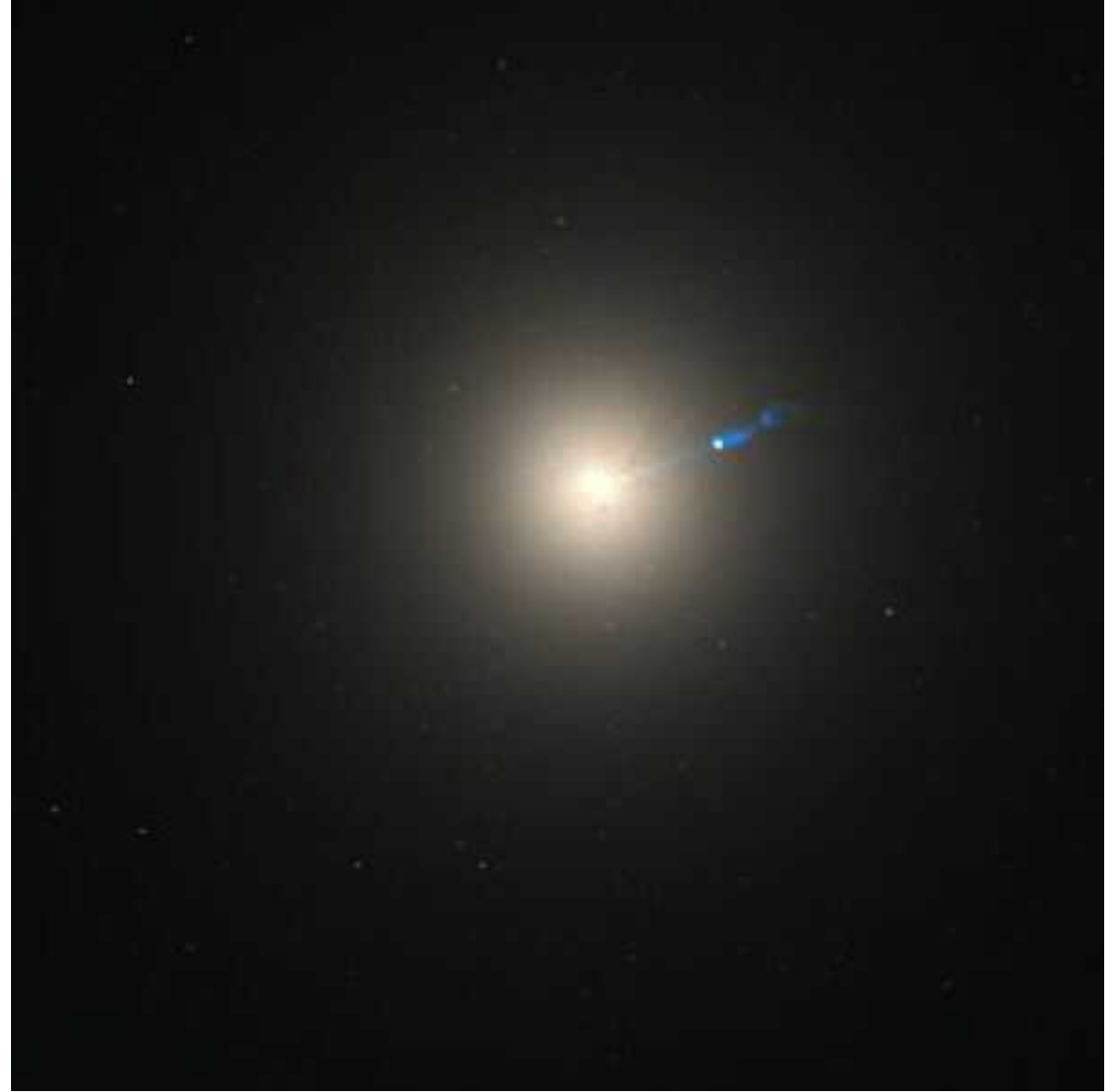
AGN : Active Galactic Nucleus (noyau actif de galaxie).

- C'est très bien mais qu'est-ce qui se passe dans ce noyau et dans les quasars qui leurs sont semblables ?
- Au début des années 1970 la question n'est pas résolue.
- En s'inspirant de la **découverte des pulsars** certains pensent qu'il pourrait exister au centre des AGN une étoile à neutrons gigantesque (1 milliard de M_{sol})

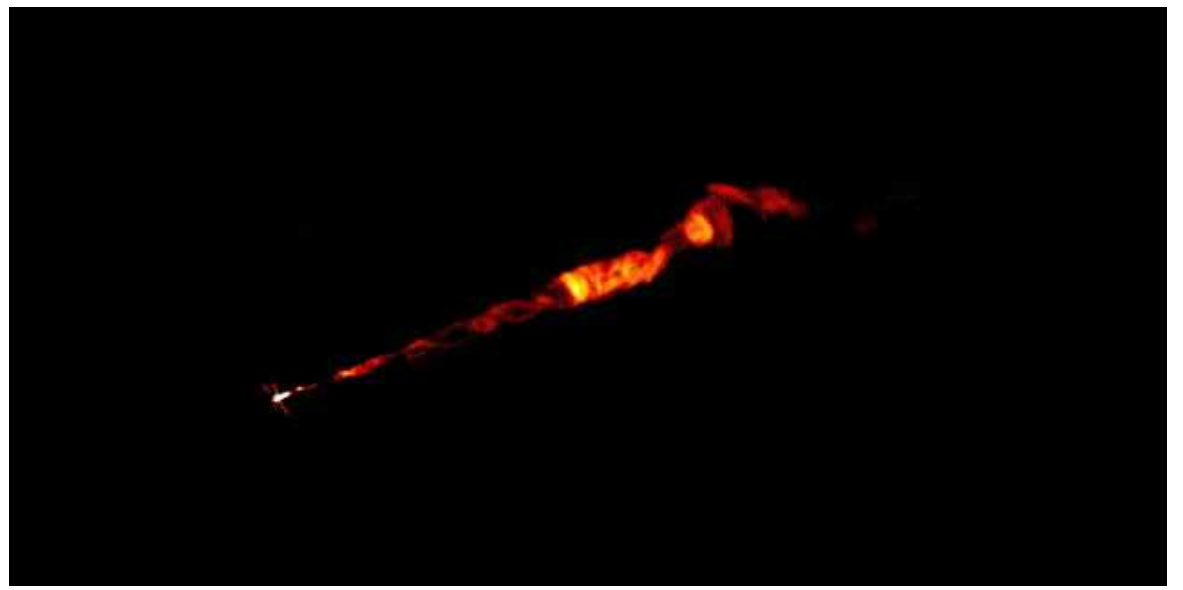
- L'essor de **l'interférométrie radio** permet alors de mesurer des séparation de l'ordre de la milliseconde d'arc.
 - On comprend mieux la topographie des émissions
 - On applique la méthode aux quasars
 - On observe des déplacements mesurables au sein de l'AGN ou du quasar.
 - L'exemple de M87

M 87 (NGC 4486), vu
par le HST avec un jet
visible en optique.

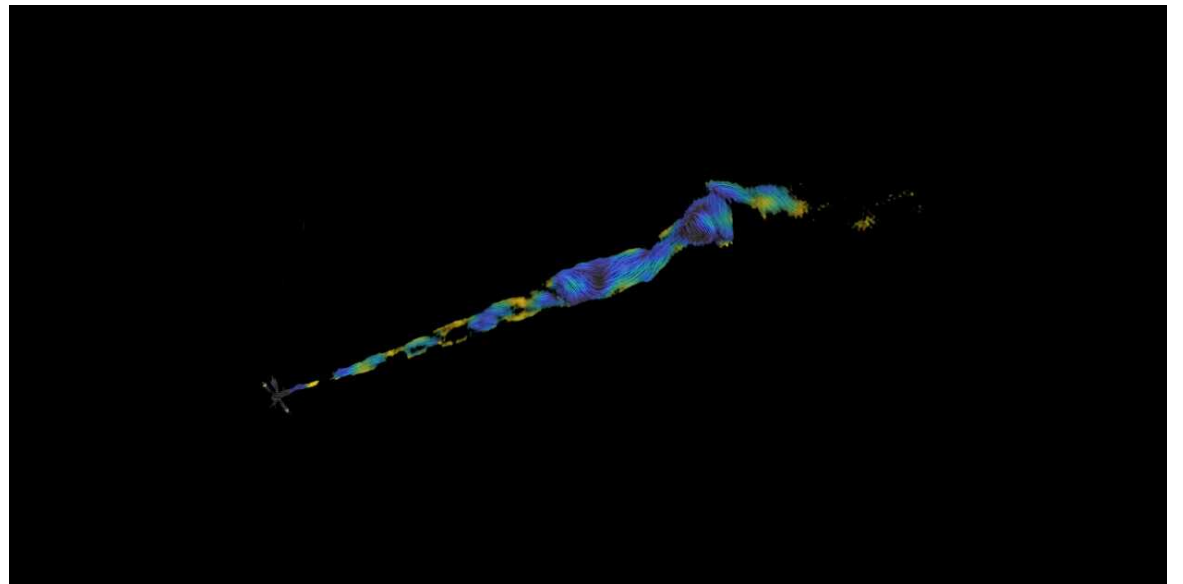
Signalé par Curtis en
1918.



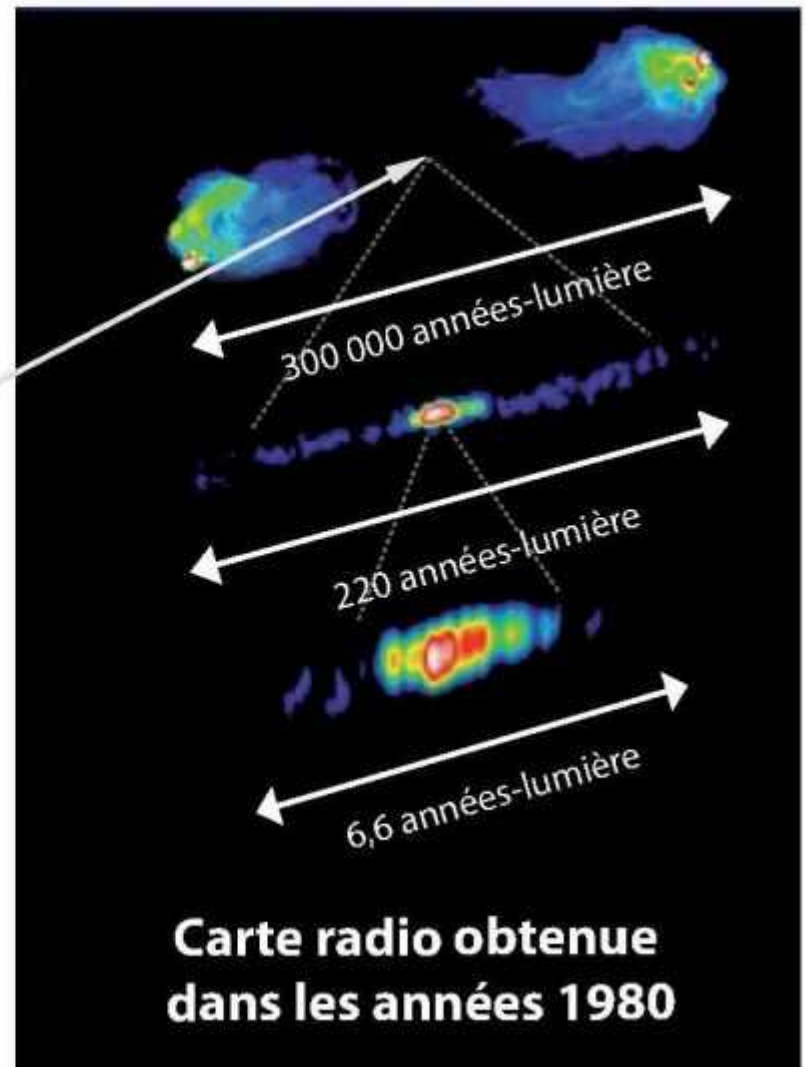
Le jet vu en ondes radio.



La galaxie est masquée.



Les
échelles:
exemple
de Cyg A



Une étape inspirante : **les trous noirs stellaires**

- Les pulsars binaires (Jocelyn Bell 1967),
- Ils permettent de calculer les masses des corps
- C'est fait pour la source X, **Cygnus X-1** qui a une masse de $8.7 M_{\text{sol}}$.
- En 1972 on est presque sûr que l'objet le plus compact, une étoile héberge un **trou noir** stellaire.

Retour aux quasars

- Une synthèse par Martin J. Rees en 1978 :
 - Plusieurs centaines d'objets recensés
 - Ils constituent un zoo avec d'objets divers, trouvés dans des conditions d'observation disparates.
 - **Critère principal** : grands redshifts, rendant les raies Ly alpha visibles dans les spectres IR.

- Raies d'absorption nombreuses avec des redshifts différents dus aux gaz présents autour du quasar.
- **Un consensus** : les quasars sont des AGN optiques dont la lumière non stellaire dépasse de plus de 100 fois la luminosité de la galaxie rendant celle-ci **invisible** lorsque l'objet est lointain.
- La source d'émissions de hautes fréquences est limitée à une zone de l'ordre de seulement 10^{-4} sec ou 1 jour lumière.
- **Mais quelle est l'énergie à l'œuvre dans cette petite source centrale ?**

- On a observé des variations de luminosité dans certains quasars de plus de 1000 fois l'énergie de notre Galaxie, ceci en quelques semaines .
- A priori :
 - L'objet central serait commun à tous les objets
 - Ce qui les distingue serait l'environnement galactique de celui-ci.
- Finalement le seul processus possible serait lié à la présence d'un trou noir.
- Son existence permettrait de comprendre l'existence des **jets** observés dans plusieurs quasars.
- **Mais là encore : d'où proviennent l'énergie et les variations de luminosité ?**

Deux mouvements en opposition

- Les jets de matière alors fréquemment observés:vers l'extérieur
- Une autre hypothèse : l'accrétion, vers l'intérieur.

- **G.A. Shields** (Thermal continuum from accretion disks in quasars. Nature 272, 706–708 (1978).) en se basant sur l'accrétion au sein des pulsars binaires met en évidence un phénomène: l'**accrétion** autour d'une masse centrale dans les AGN.
- Il l'évoque en observant les spectres des AGN et en prenant un compte la présence d'une 'bosse' dans la courbe du spectre de puissance dans la zone bleu et proche UV,
- L'intensité du rayonnement est due au fait que, contrairement aux étoiles les AGN rayonnent dans **toutes** les longueurs d'ondes.
- Il développe le modèle de **l'accrétion.**

- Les AGN et les quasars renferment donc des **trous noirs supermassifs**.
- L'énergie cinétique de **l'accrétion** est transformée en une énorme énergie rayonnée (30 % de $E = mc^2$) ; rendement supérieure à l'énergie de fusion nucléaire des étoiles.

1978 : Ozernoi et Reinhardt : « Massive Black Holes in Nuclei of Galaxies and Quasars »

Les galaxies « normales » avec un
TNSM

Un exemple type : le TNSM au centre de la galaxie

- D:\Astronomie\SAL\Séminaire 2022\Histoire TN supermassifs\TN_saggitariusA.odp

Et aujourd'hui ?

Quasars : 19 430 publications entre 1979 et 2022

4 849 611 quasars dans WISE survey.

Trou noirs galactiques : 32 220 références.

I - Problème : la classifications des galaxies radio

Category	Classes
Morphology	Double; Classical double; Triple; Narrow-angle tail; Wide-angle tail; Bent-tail; FRI, FRII, FR0*; Hybrid; X-shaped; S-shaped; C-shaped; Relaxed; Dying RG; Double-double; Core-dominant; Core-halo; Core-jet; CSO; 1-sided
Size	Compact (pc); Galactic (<10 kpc); extended RG (10-1000 kpc); Giant RG (>1 Mpc)
Host	Radio Galaxy; SFG: Spiral; Seyfert I,II; QSO; Blazar BLLac; BLRG; NLRG; ULIRG; LERG; HERG; LINER; BCG
Spectra	Flat; Steep; Ultra-steep; GigaHz Peaked; Inverted; Convex; Concave; Complex

- Cette grande diversité de types de radio-galaxies :
 - Un casse-tête pour les chercheurs.
 - Problème encore non complètement résolu !
- *Radio Galaxy Classification par Lawrence Rudnick ApJ 2021*

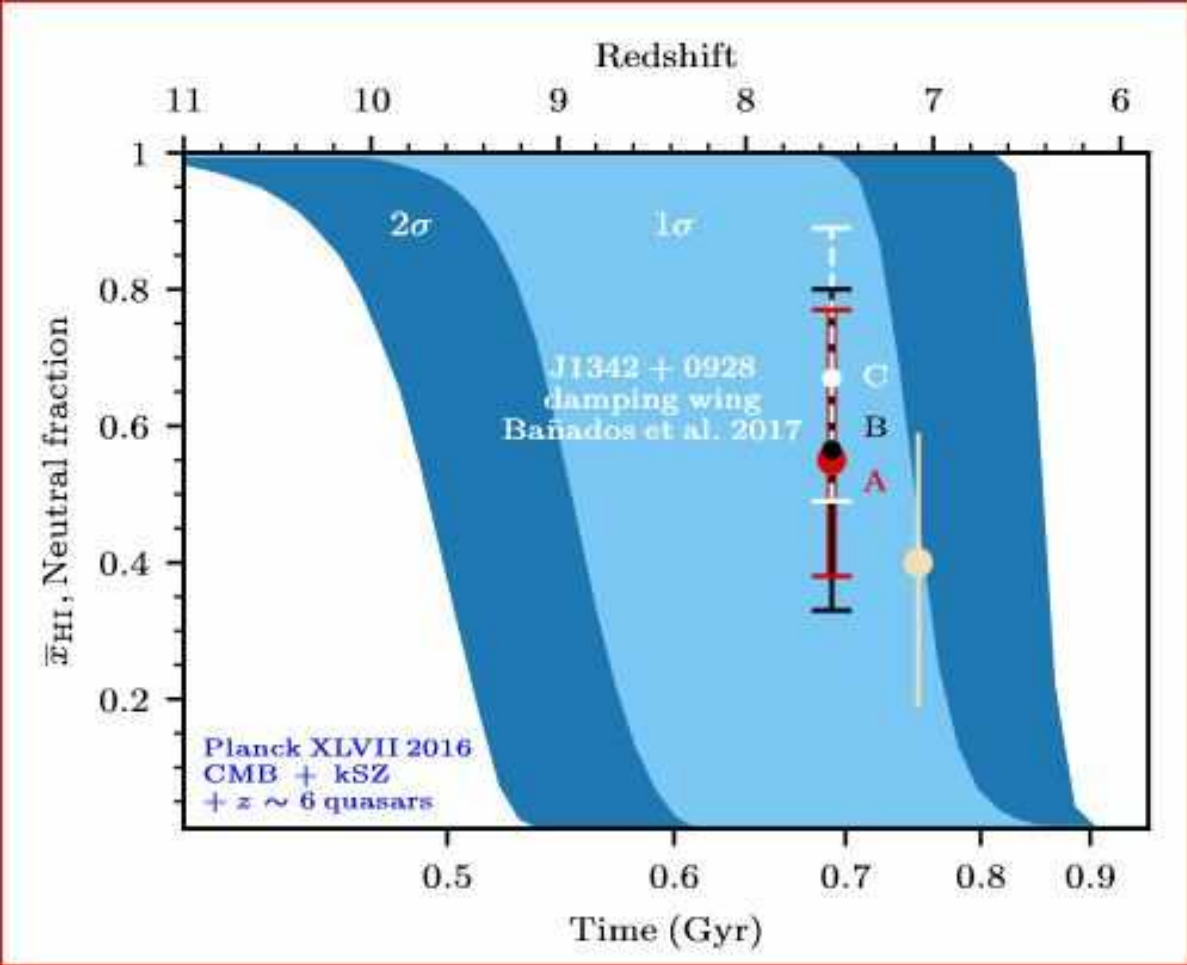
II - L'intérêt principal des quasars aujourd'hui :

L'étude des quasars avec des TNSM à des **z très élevés** (proches du Big Bang)

Petit rappel

- 380 000 après le BB : l'univers devient neutre transparent mais noir : pas d'étoile : âges sombres.
- Avec la matière noire , les atomes se reformant, les premières étoiles/galaxies apparaissent: univers lumineux mais il se re-ionise.
- Un milliard d'années plus tard : l'univers est totalement ionisé (il l'est toujours aujourd'hui).
- Des nouvelles étoiles et des nouvelles galaxies se forment.
- **Des incertitudes sur la chronologie levées par les quasars ?**

Trois quasars très lointains
Environ 700 000 000 al après
le Big Bang.



Le quasar **ULAS J1342+0928**

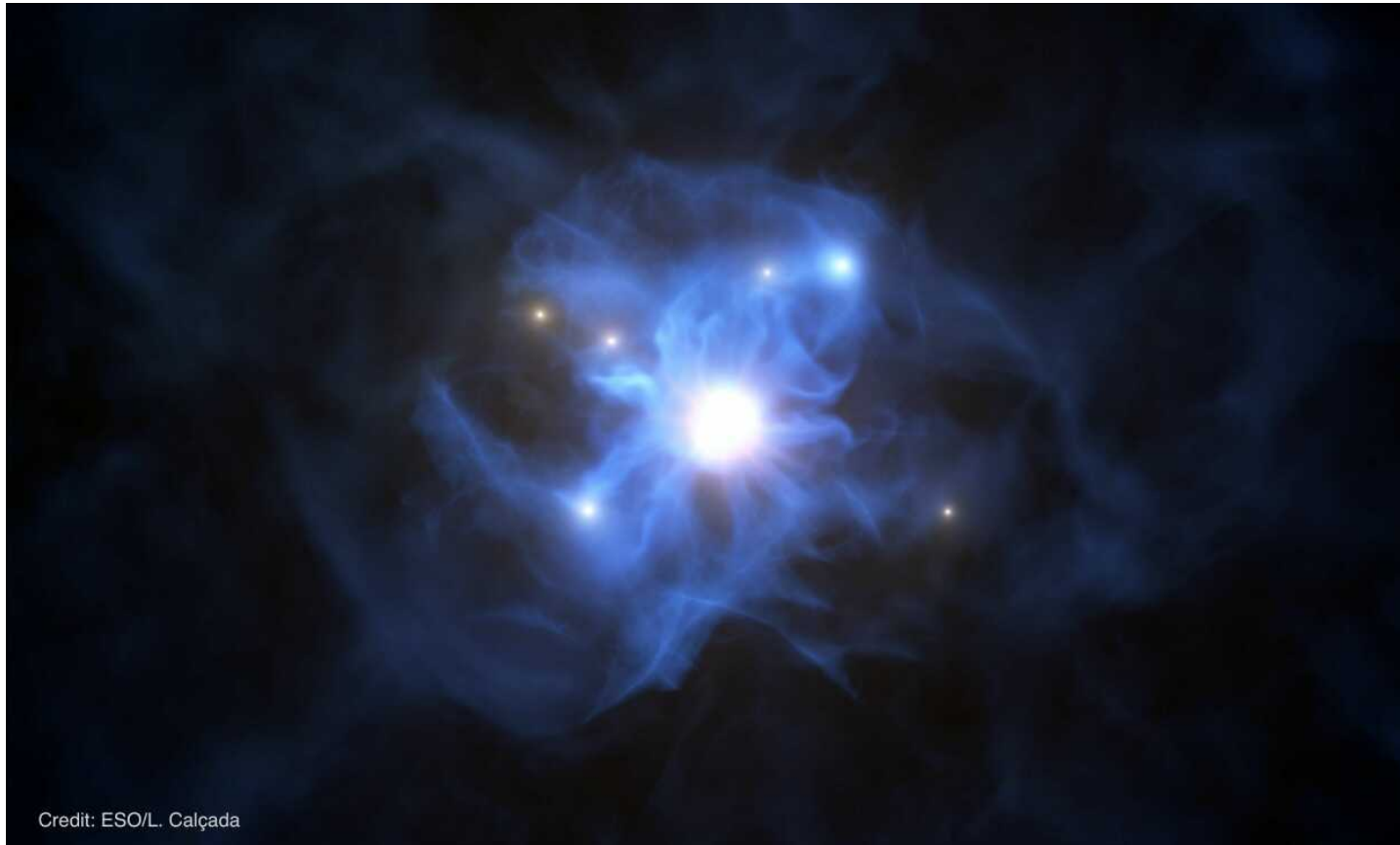
- À $z = 7.54$
- Distance 13.1 G a.l.
- Observé tel qu'il était 690 000 000 ans après le BB. Donc avant la fin de la re-ionisation.
- Masse : $780 \cdot 10^6 M_{\text{sol}}$

Il soulève de nouvelles questions

The first measurement of the quasar lifetime distribution
MNRAS 2021

- **Comment de telles masses peuvent elles exister à moins de 1 milliard d'années après le Big Bang ?**
 - Graines initiales déjà très massives
 - Ou accrétion très rapide au-delà de la limite d'Eddington ? (*annexe 3*)

L'environnement des quasars jeunes



Credit: ESO/L. Calçada

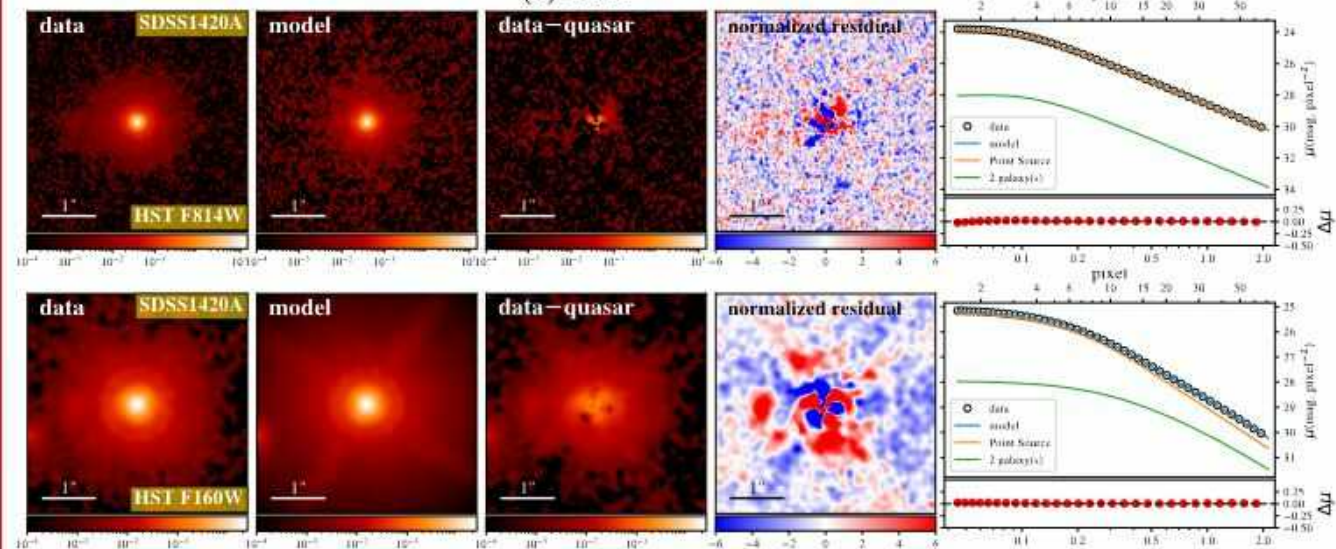
- Dans le Sloan Digital Sky Survey (SDSS) il y a **750 414 quasars** (2022).
- Base de donnée accessible avec Python.

https://github.com/QiaoyaWu/sdss4_dr16q_tutorial

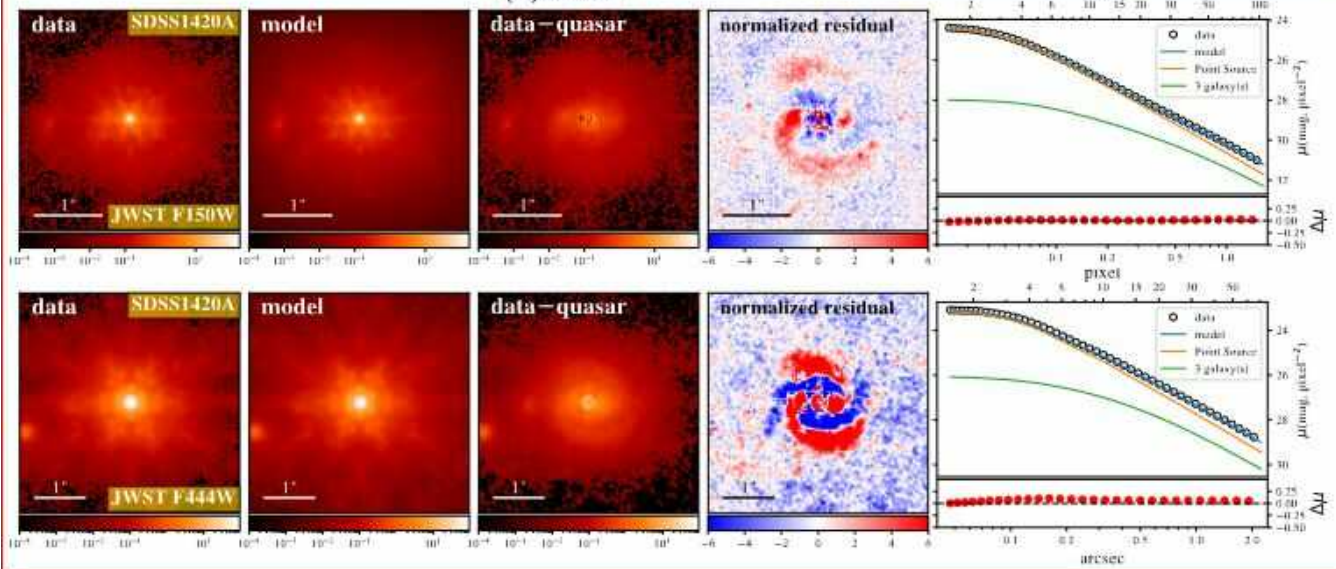
- Redshift : $0.1 < z < 6$
- Luminosité : $11 < \log(L_{\text{bol}}/\text{ergs s}^{-1}) < 18$

- **Autre nouvelle source d'information :**
 - Avec le **télescope James Webb** : observation des quasars à $z > 3$.
 - Comparaison avec le HST.

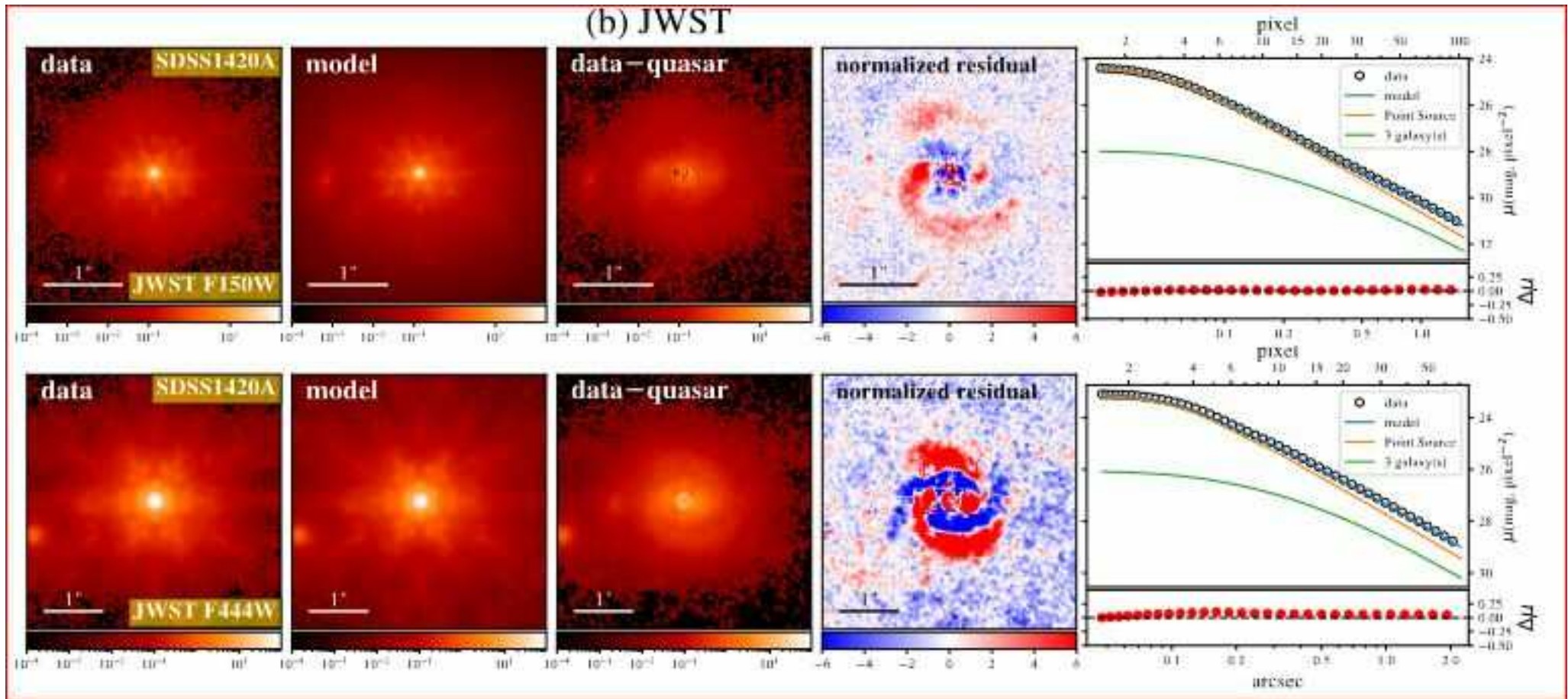
(a) HST



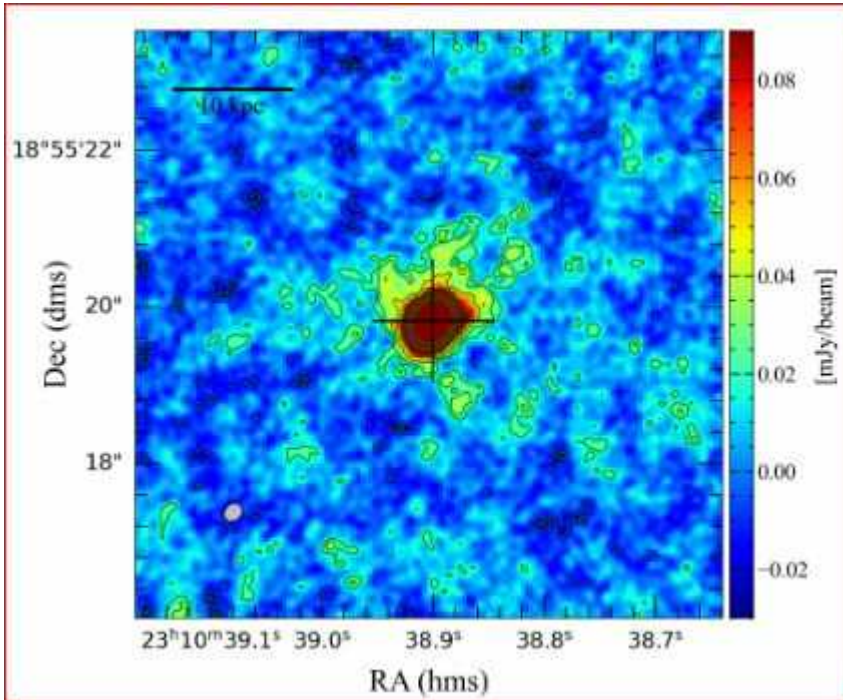
(b) JWST



On observe nettement la galaxie hôte



Observation avec ALMA



- QSO J2310+1855 à $z = 6 \pm 0.3$: 12.8 Giga années ; module de distance : 48.85 mag
- Intérêt : connaissance des galaxies actives très précoces.

Etude des **quasars à $z = 6$**

- Cosmologic look-back time = 12.866 G_{années}
- 116 confirmés
- Ont des TN qui sont **parmi les plus massifs**
- Ont donc dû se former très tôt et **croître en moins de 800 000 ans**
- Cette croissance est-elle liée à des fusions de galaxies ? A priori non.
- *J. Greiner et al. 2021. Quasar clustering at redshift 6*

- Et encore : des **quasars suspectés à $z = 13$** (à 13.469 G_{années} soit environ 330 millions d'années seulement après le Big Bang)
- A l'origine de la re-ionisation ?
- En cours d'investigation.

- Il y a donc existé des galaxies avec des TNSM entre 400 000 000 et 690 000 000 d'années.
- Comment se sont-elles formées ?

III - - les quasars à $z=0$ sont ils semblables à ceux observés à $z \geq 4.5$?

Une étude de Li et al. Avec 152 quasars observés avec Chandra : pas de différence.

- Ils pourraient de ce fait être utilisés comme « **chandelles standards** » pour les mesures de distances.

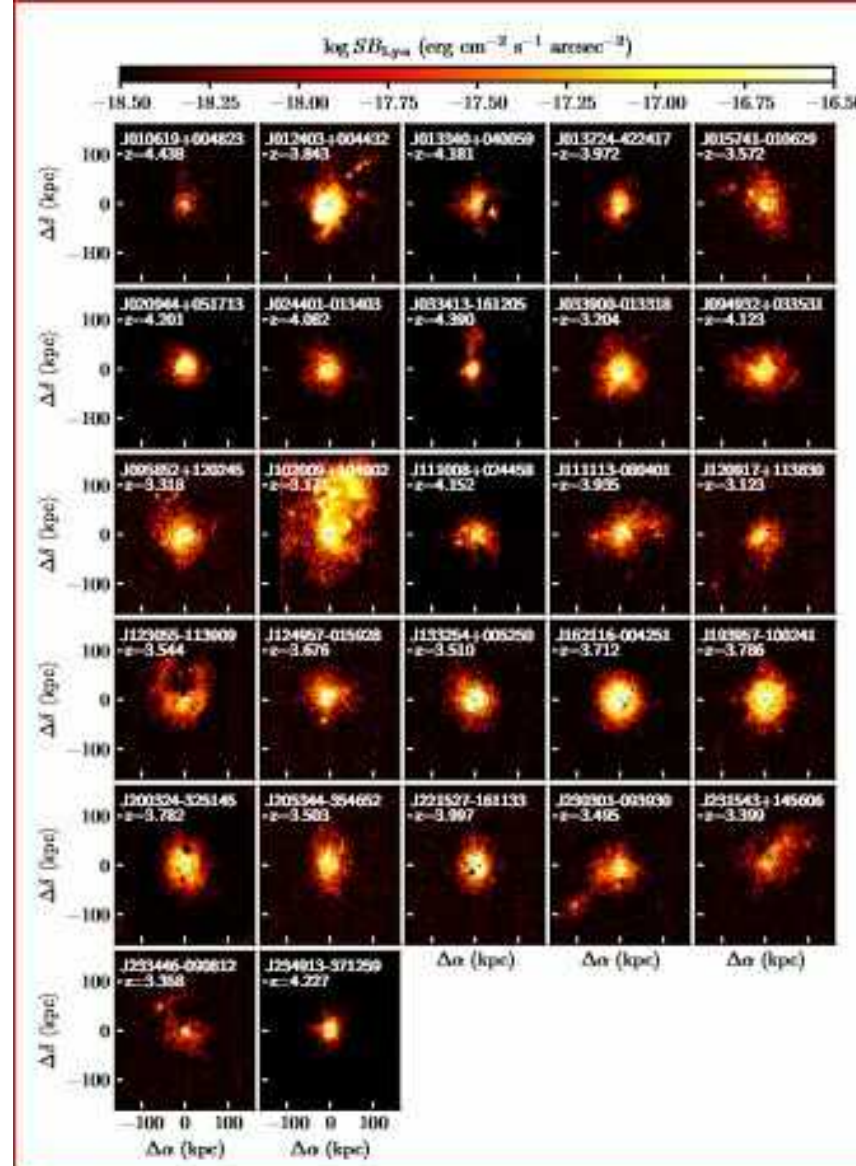
IV- les émissions des quasars et AGN

L'apport de MUSE.

Sources de rayonnement des quasars

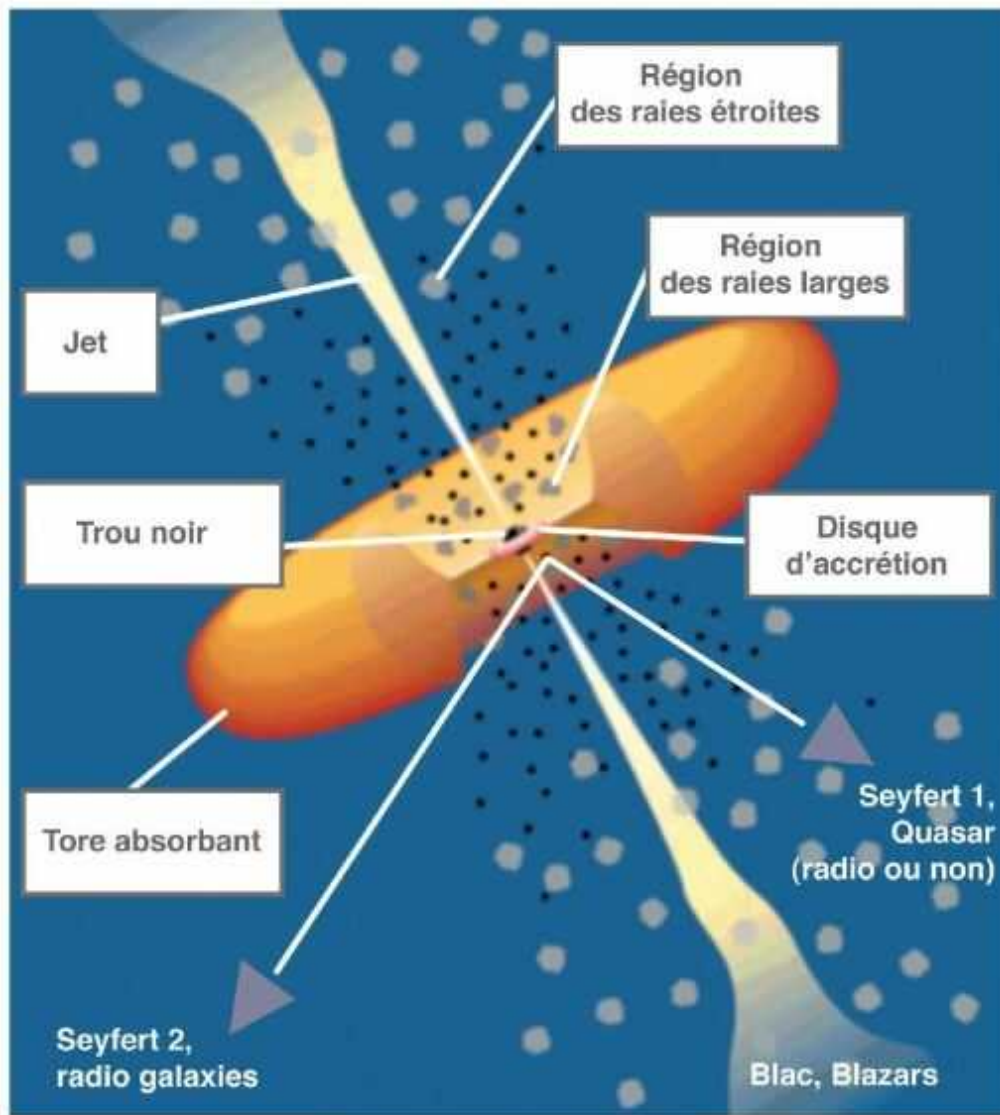
- En rayons X (Chandra, XMM Newton...)
 - L'émission de photons UV par effet Compton inverse des électrons chauds provenant du disque d'accrétion
 - L'émission directe du disque d'accrétion
 - Le jet de matière
 - l'émission en rayons X produite par le milieu environnant.
- En visible ($\text{Ly}\alpha$, CIV, HeII) : les gaz autour de la galaxie (étude avec MUSE en 2021).
- En ondes radio : tous les éléments.

Etude de l'émission Ly α des nébuleuses gazeuses autour des quasars (MUSE 2021)



Conclusions

- Les quasars marqueurs de l'univers primordial proche de 380 000ans après le Big Bang.
- Les quasars pour mesurer les distances lointaines.
- Une structure assez bien connue.
- Des TNSM dans toutes les galaxies ?



Engin central d'un quasar

Annexe 1

- Spectre en loi de puissance
 - En ordonnée : $F_\nu \log(\text{intensité})$
 - En abscisse : $\log(\text{fréquence } \nu) \text{ en Hz}$
 - $F_\nu \text{ prop } 1 / \nu$

Annexe 2

- Erg : ancienne unité (cgs) encore utilisée par les astrophysiciens.
- $1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ joule}$ soit $100 \text{ nJ} = 624.15 \text{ GeV}$

Annexe 3

- Limite d'Eddington : limite de luminosité au-delà de laquelle la pression de radiation devient supérieure à la force de gravitation.
- Au départ limite de luminosité d'un corps sphérique ne peut pas dépasser :

$$L_{\text{Edd}} = 3.3 \cdot 10^4 (M/M_{\text{sol}}) L_{\text{sol}}$$

- La limite de la vitesse d'accrétion par les TN est dépassée : accrétion supercritique.