

Société Astronomique de France 30-1-2021

Commission de cosmologie

Les quasars :

lucioles éphémères qui éclairent le passé de l'univers

François Sibille (*)

CNRS retraité

Association SÉLÉNÉ

Académie des Sciences Belles-Lettres et Arts de Lyon



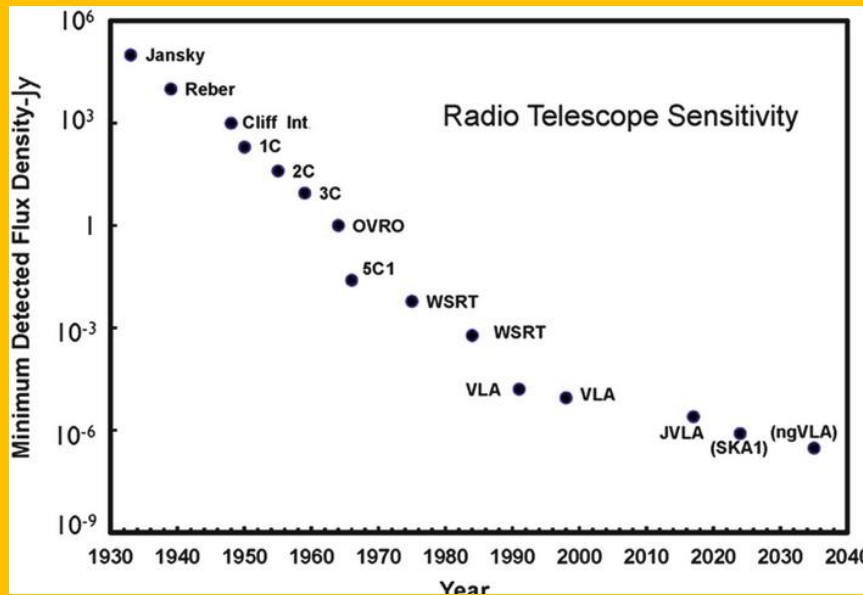
(*) chez lui

1950 : démarrage de la radioastronomie

Guerre de 39-45 : progrès fulgurants de l'électronique

Radar → essor de la radioastronomie : Cambridge (UK), Martin Ryle

Catalogues de sources radio : 1C, 2C, (1959) 3C ...6C de plus en plus fournis



Adapté de NRAO and Radio Astronomy in the Twenty-First Century



Mullard Radio observatory
Cambridge

Toutes sortes de sources radio

Des galaxies : Cyg A, Vir A, etc

Des nébuleuses galactiques, Régions HII, M42 (hydrogène ionisé)

Sources étendues ou ponctuelles (non résolues : diamètre $< \lambda/D$)

...etc.

On cherche des contreparties optiques (lumière visible)

Mesure des positions de plus en plus précises :

(1962) Hazard , **occultation par la Lune de 3C273** → identifié avec une étoile (m=13)

Spectre dans le visible de 3C273

(1964) Maarten Schmidt fait un spectre de 3C 273

"3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift" (open)

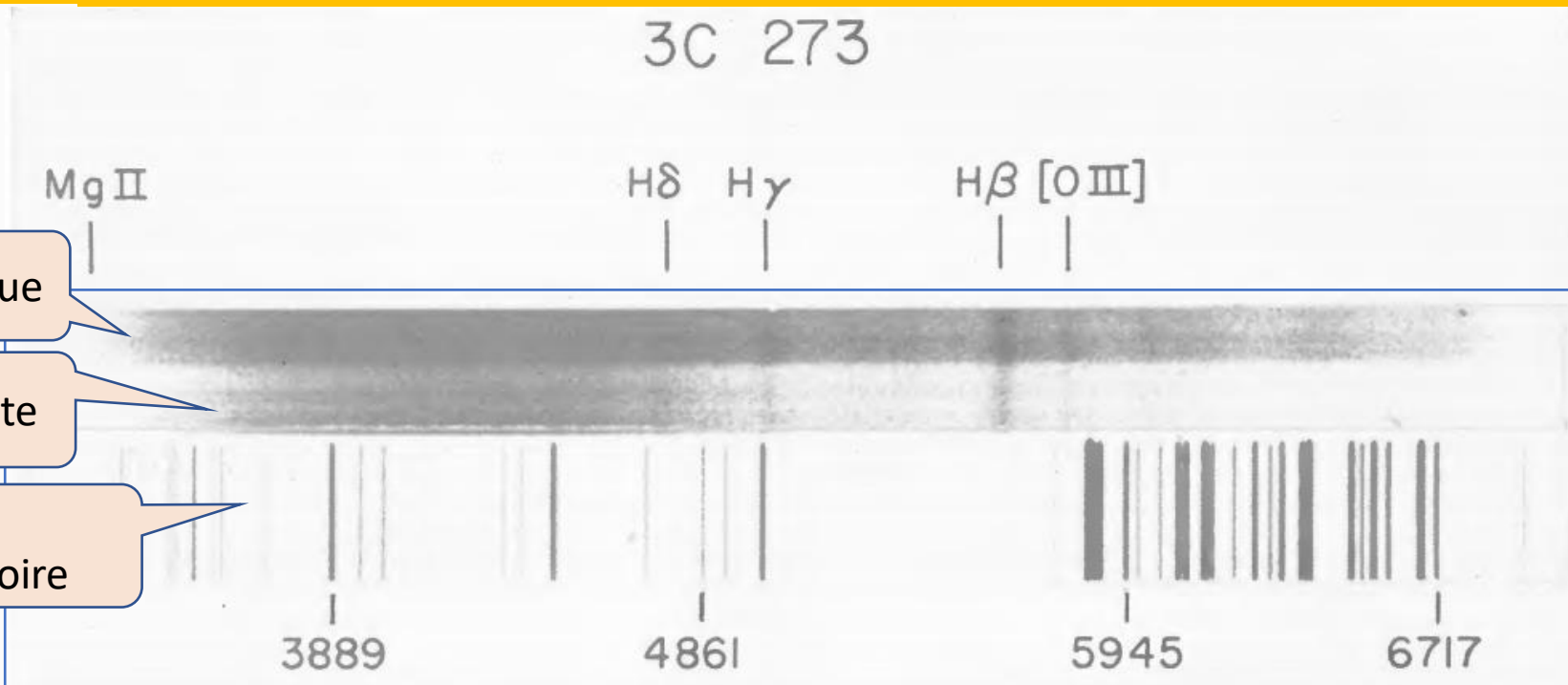


FIG. 2.—Spectrum of the quasi-stellar object 3C 273B, 400 Å/mm original, 103a-F, January 23, 1963. The comparison spectrum is H + He + Ne. Exposure over the upper half of slit was three times that over the lower half. Redshifted emission lines of H and [O III] are indicated; also the barely visible line of Mg II, confirmed on denser exposures.

Spectre dans le visible de 3C273

(1964) Maarten Schmidt fait un spectre de 3C 273

("3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift", open)

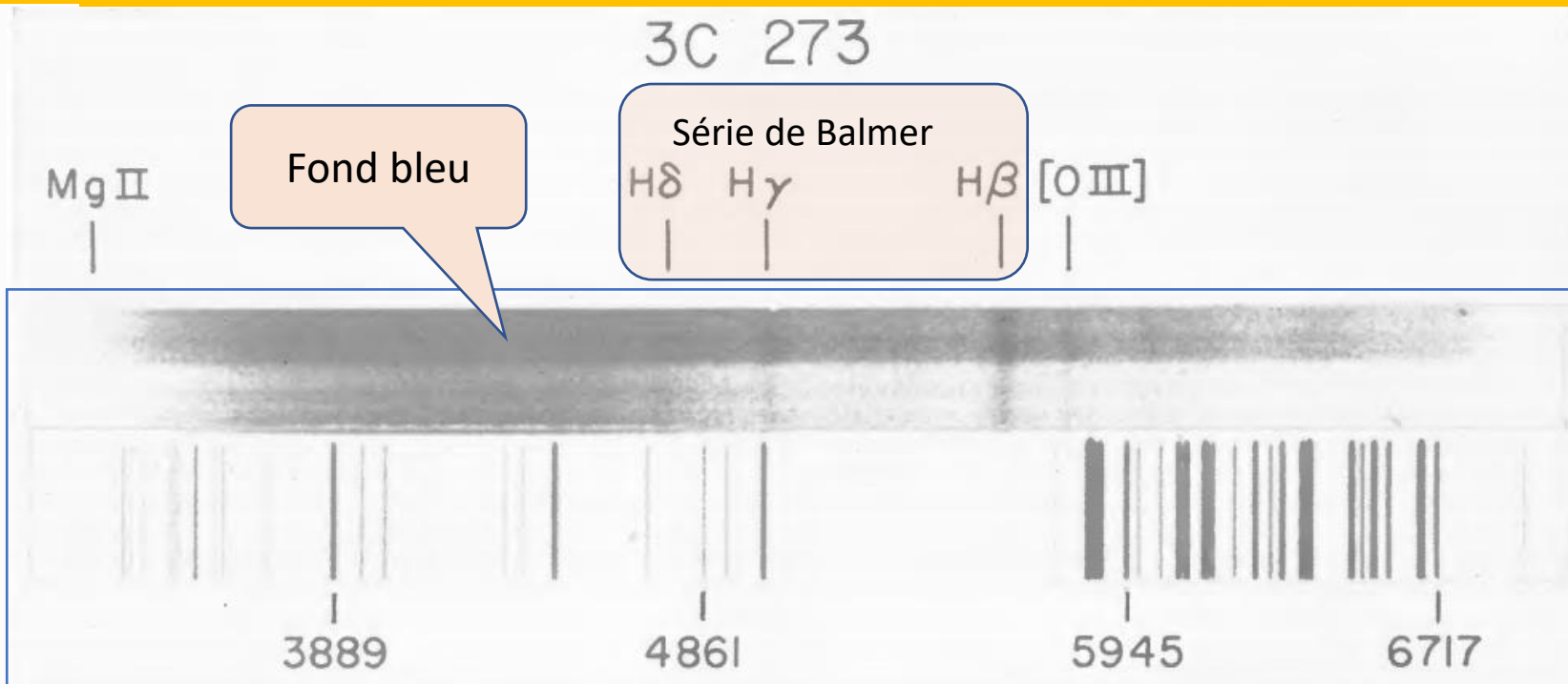


FIG. 2.—Spectrum of the quasi-stellar object 3C 273B, 400 Å/mm original, 103a-F, January 23, 1963. The comparison spectrum is H + He + Ne. Exposure over the upper half of slit was three times that over the lower half. Redshifted emission lines of H and [O III] are indicated; also the barely visible line of Mg II, confirmed on denser exposures.

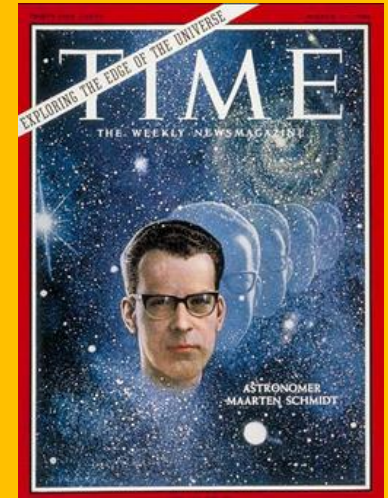
Début d'interprétation du spectre visible des quasars

M. Schmidt identifie des raies de la série de Balmer :

H β , H γ , H δ , plus tard H α , de l'atome H neutre (H I)

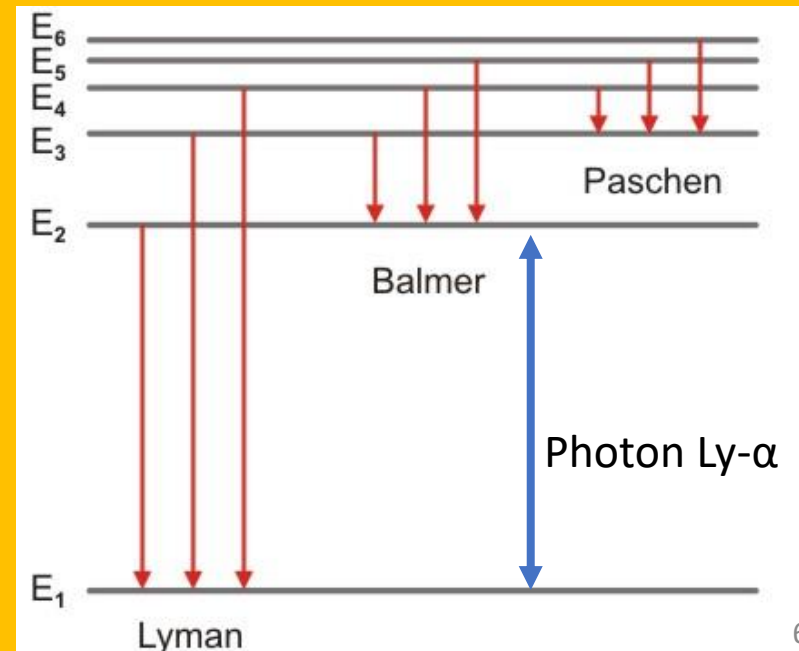
MAIS décalées vers le rouge de $z = 0,16$ $\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{emis}} = z \lambda_{\text{emis}}$

Balmer \rightarrow Lyman \rightarrow Il y a de l'UV + le fond bleu



L'atome d'hydrogène HI
Série de Lyman : tous les sauts qui aboutissent au niveau $n = 1$
 $\lambda \leq 0,1215 \mu\text{m}$ ou $\Delta E \geq 10 \text{ eV}$

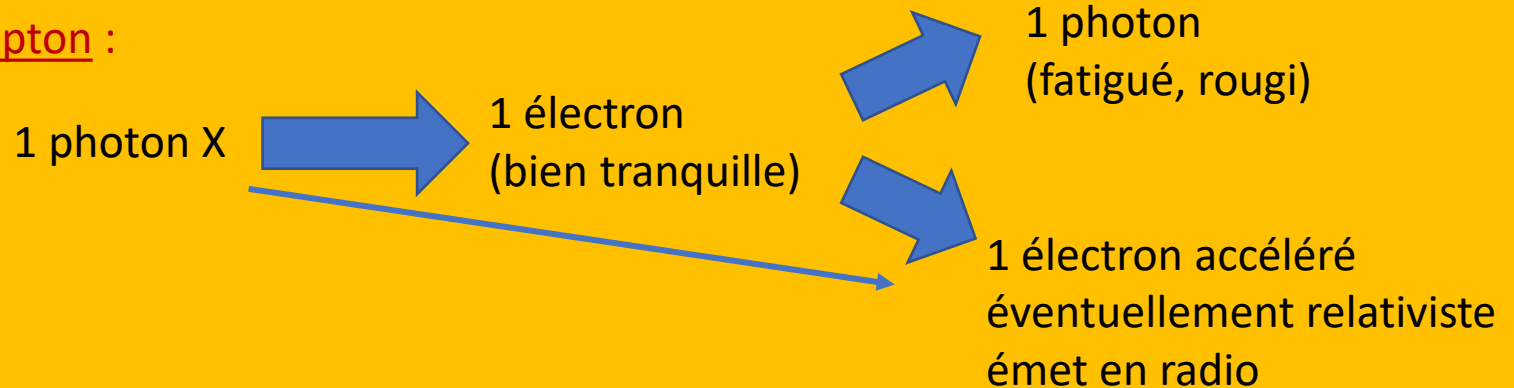
Série de Balmer : les sauts qui aboutissent au niveau $n = 2$.
Suppose la présence d'excitation de la série de Lyman



Interprétation du rayonnement radio des quasars

Effet d'un photon énergétique (X, γ) sur un gaz ou un plasma

Effet Compton :



On fabrique l'acronyme

QUASAR QUAsi Stellar Radio source

Avec 3C273 : quelques conclusions sur les quasars

Décalage Doppler $z = 0,16$ de 3C273

Vitesse radiale $V_r = zc \rightarrow 50\,000$ km/sec Vitesse due à l'expansion

Loi de Hubble

Distance $D = V_r/H_0$ avec $H_0 = 70$ km/sec/Mpc $\rightarrow D = 700$ Mpc

Donc la source est :

Très lointaine 700 Mpc (1000 fois la distance de la galaxie d'Andromède)

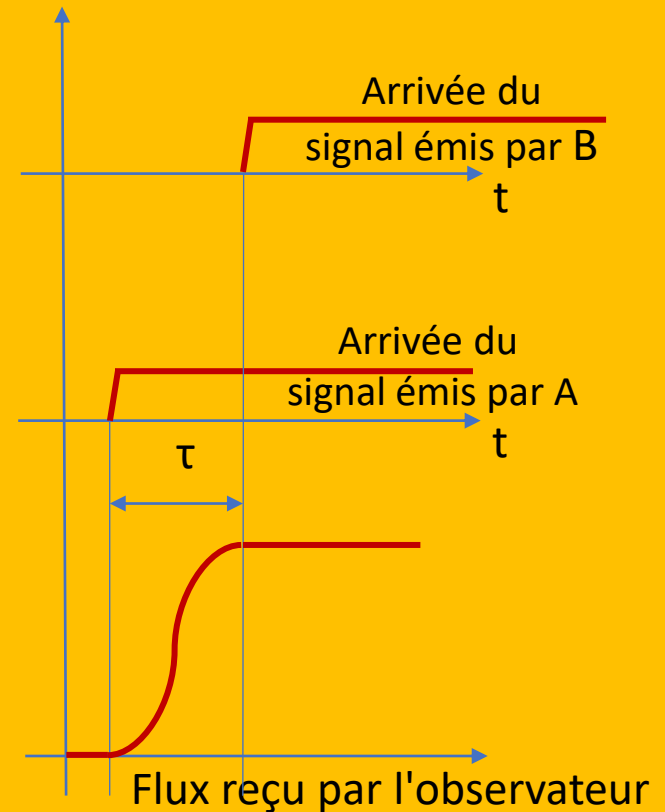
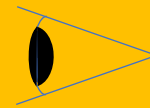
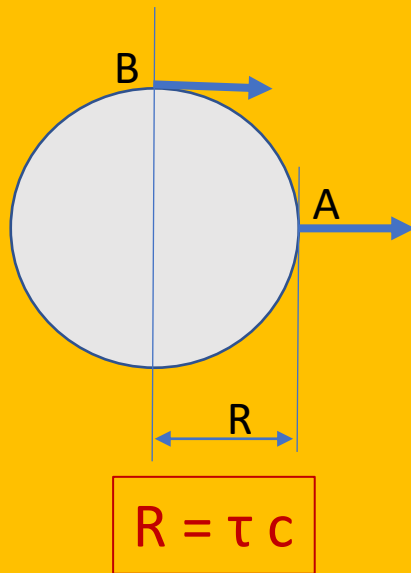
ET DONC AUSSI

Très lumineuse : 10 000 fois toute la Voie Lactée = 10^{41} Watt

Grande luminosité \rightarrow problème

Variations de luminosité → taille maximale des quasars

Une source présente un saut de luminosité



Raisonnement indépendant de la distance

Variations rapides, $\tau = 1 \text{ h à } 1 \text{ an} \rightarrow$ Taille de l'ordre de 1 heure à 1 Année-lumière

LES QUASARS SONT DES SOURCES TRÈS COMPACTES

Si lumineux et compactes : Comment marchent les quasars ?

Appel à la transformation *Matière* → *Rayonnement* : $E = mc^2$

1 Gan = 10^9 ans

10^{41} Watt ↔ 10^{24} [kilo/sec] ↔ 15 M_{\odot} /an ↔ 2 x masse de la Voie Lactée/10 Gan

- Super amas d'étoiles ? 10^7 étoiles dans quelques (AL)³
- Super étoiles ? $10^8 M_{\odot}$



Source Républicain Lorrain

Modèles déraisonnables. Ça ne marche pas !

Une question légitime :
Et si les quasars n'étaient pas si loin que ça ?

La grande controverse sur
la distance des quasars
Locale vs cosmologique ?

QUASAR DISTANCE
~~CONFERENCE~~
CONTROVERSY



L'hypothèse locale

Objets éjectés de la Voie Lactée, ou de galaxies proches ?

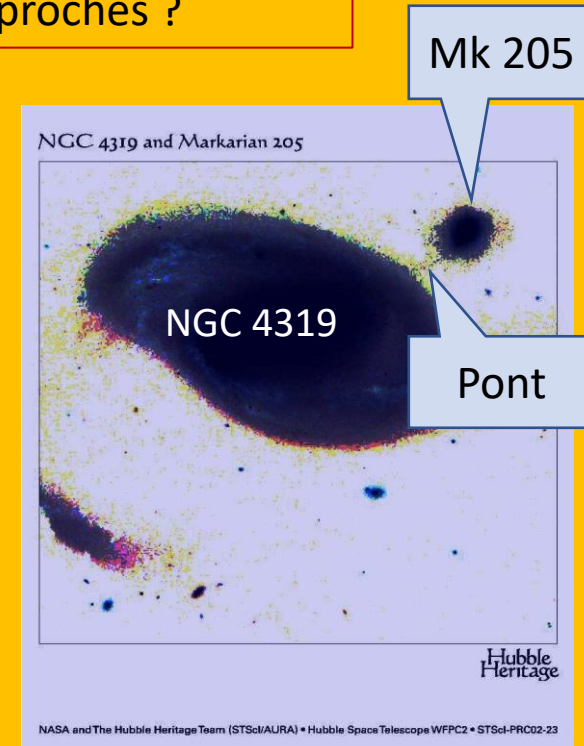
Exemple troublant

- NGC 4319, une galaxie ordinaire proche, $z = 0,005$
- Mk 205 : quasar $z = 0,062$
- Pont de matière entre les deux

Markarian 205 aurait été éjecté de NGC 4319 ?

Vitesse relative : $(0,062 - 0,005) \times 300\,000 = 15\,000$ km/sec

Vitesse dynamique → éjection avec une énergie cinétique phénoménale !



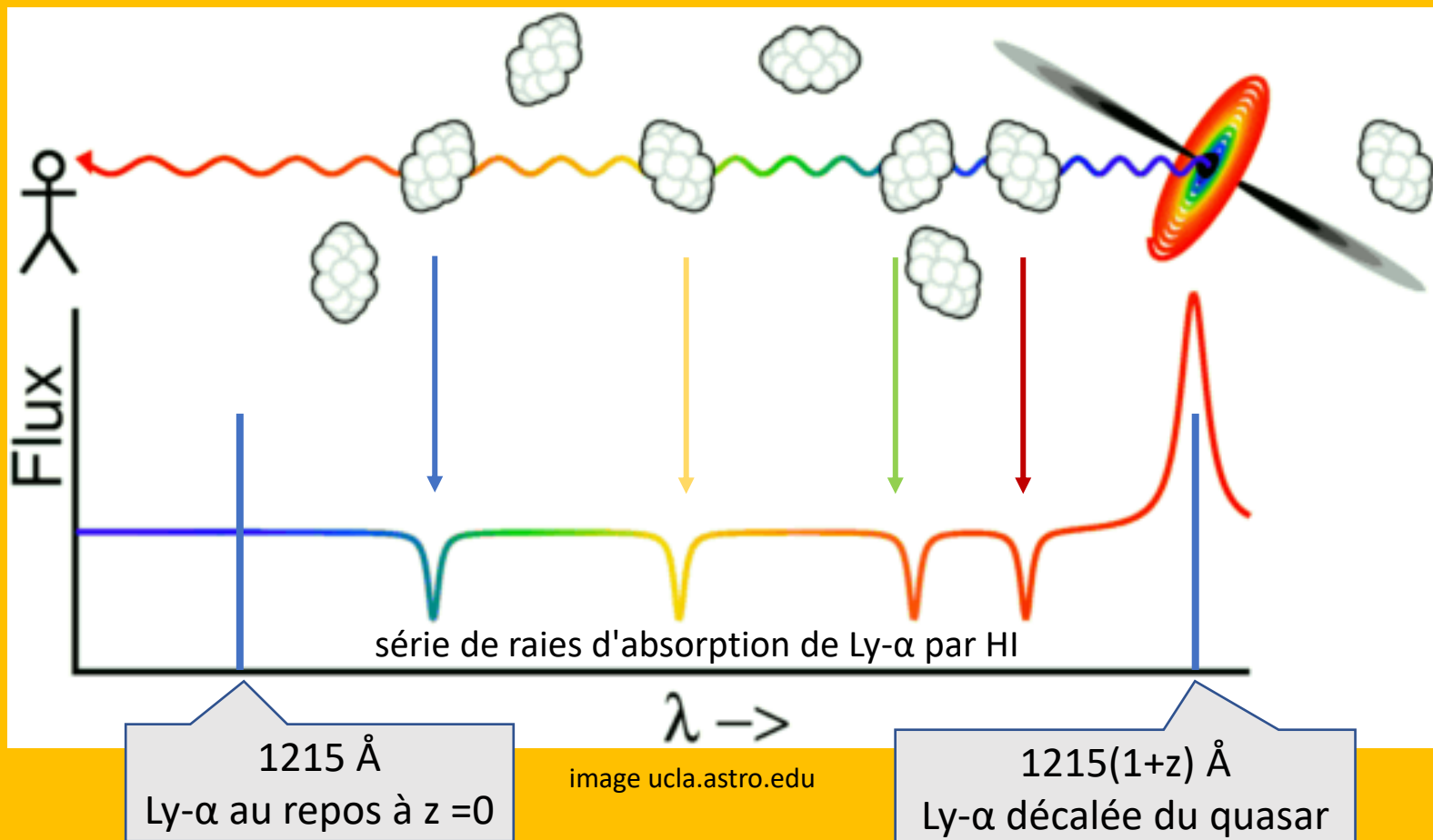
GROS PROBLÈMES !

- On n'a jamais trouvé un mécanisme d'éjection physiquement raisonnable.
- On n'a jamais trouvé de quasar "blue-shifted".

Test de la distance cosmologique : la forêt Ly- α

Traces d'absorption par HI sur la ligne de visée du quasar

Sur la ligne de visée d'un quasar lointain, chaque nuage d'HI traversé laisse sur le fond continu du quasar une raie Ly- α en absorption que l'on observe avec un décalage z compris entre celui du quasar et 0.



Raie Ly- α

Forêt Ly- α

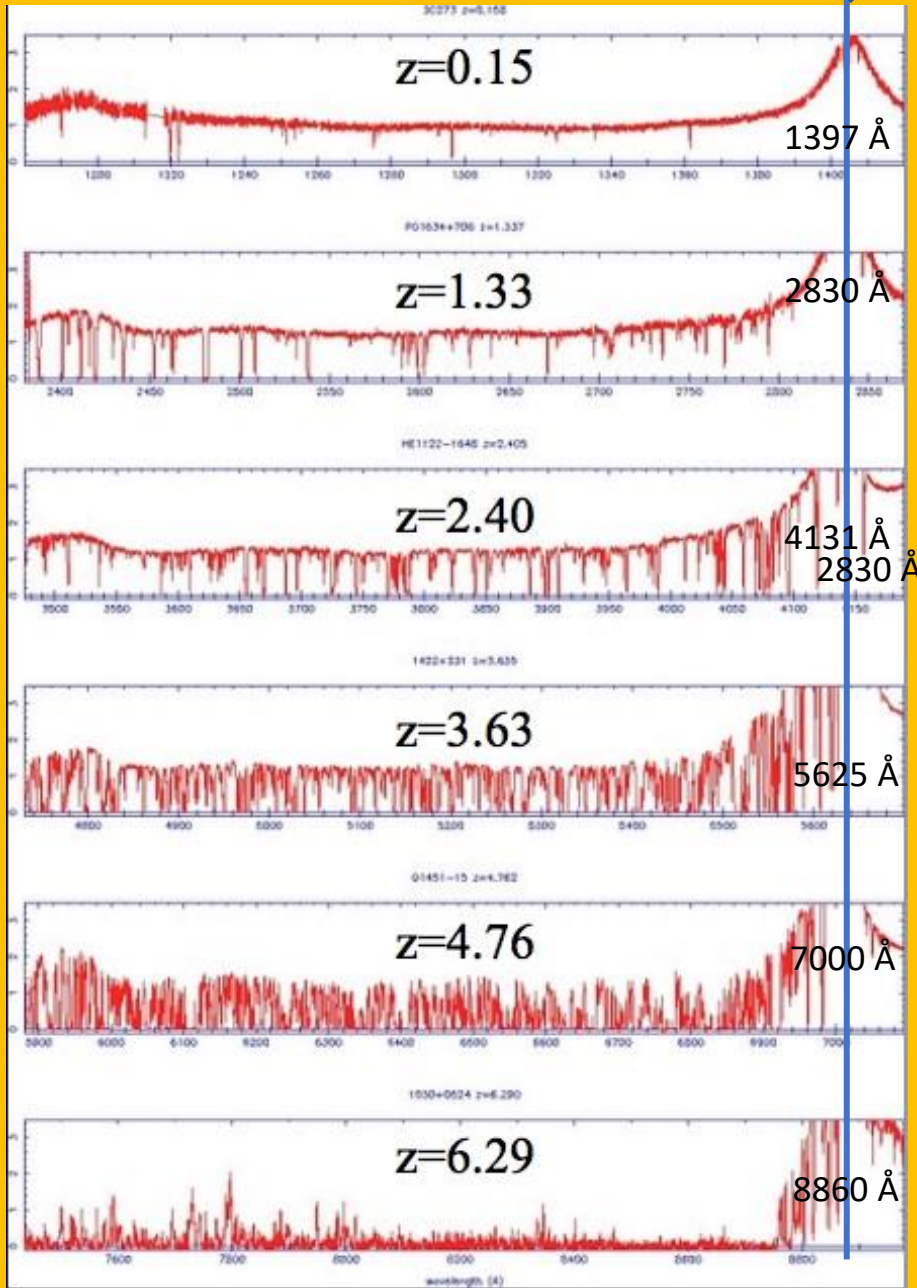
Le test de Gunn-Peterson

Une dépression du fond dans le bleu de la raie Ly- α s'accroît avec les quasars de plus en plus lointains (z qui augmente)

L'effet apparaît clairement pour $z > 4$

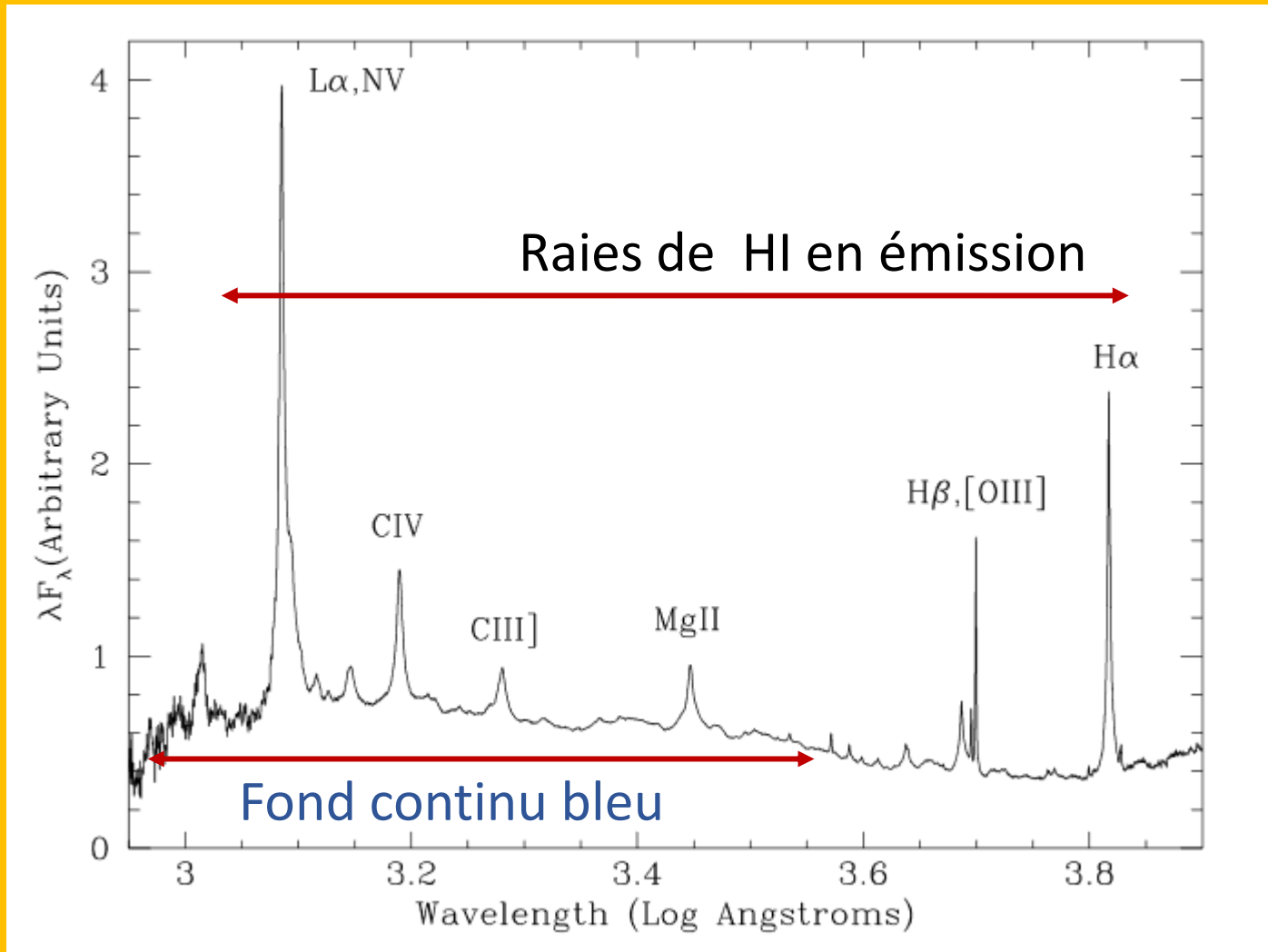
Spectres obtenus avec de gros télescopes (T 10m)

Preuve définitive de la distance cosmologique des quasars



Vers un modèle unifié (ou presque) des quasars

Les raies et le continu visible-UV

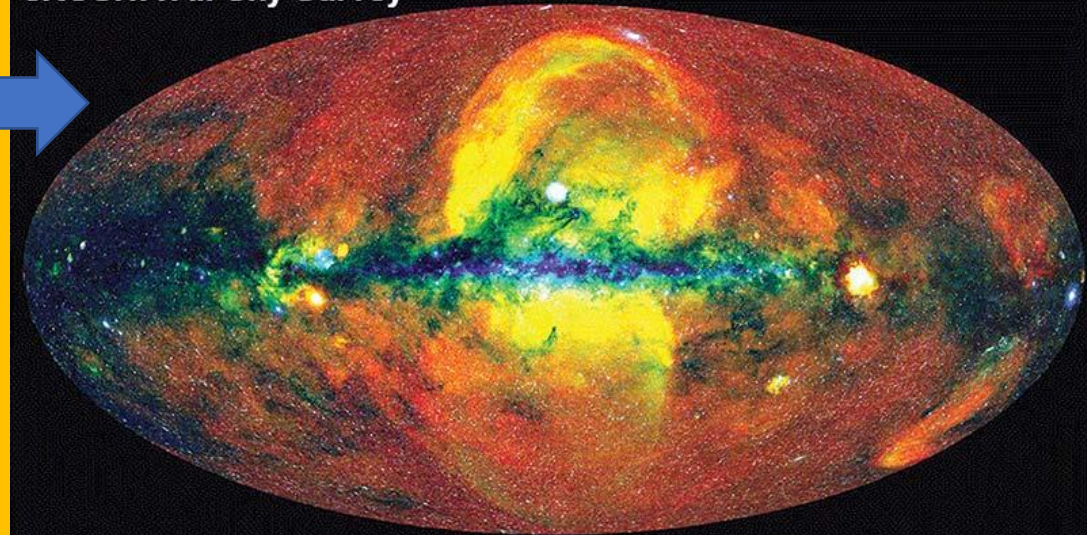


Le spectre des quasar : de la radio aux rayons X

Les quasars ont été étudiés à toutes les longueurs d'onde :

- Radio et Millimétrique : Compton
- IR proche moyen lointain : thermique 10-100K
- Visible (Optique) : raies de HI, UV redshifté, on cherche des objets bleus
- UV : Ly- α , HI
- X : couronne, 10^9 K
- Gamma

eROSITA All-Sky Survey

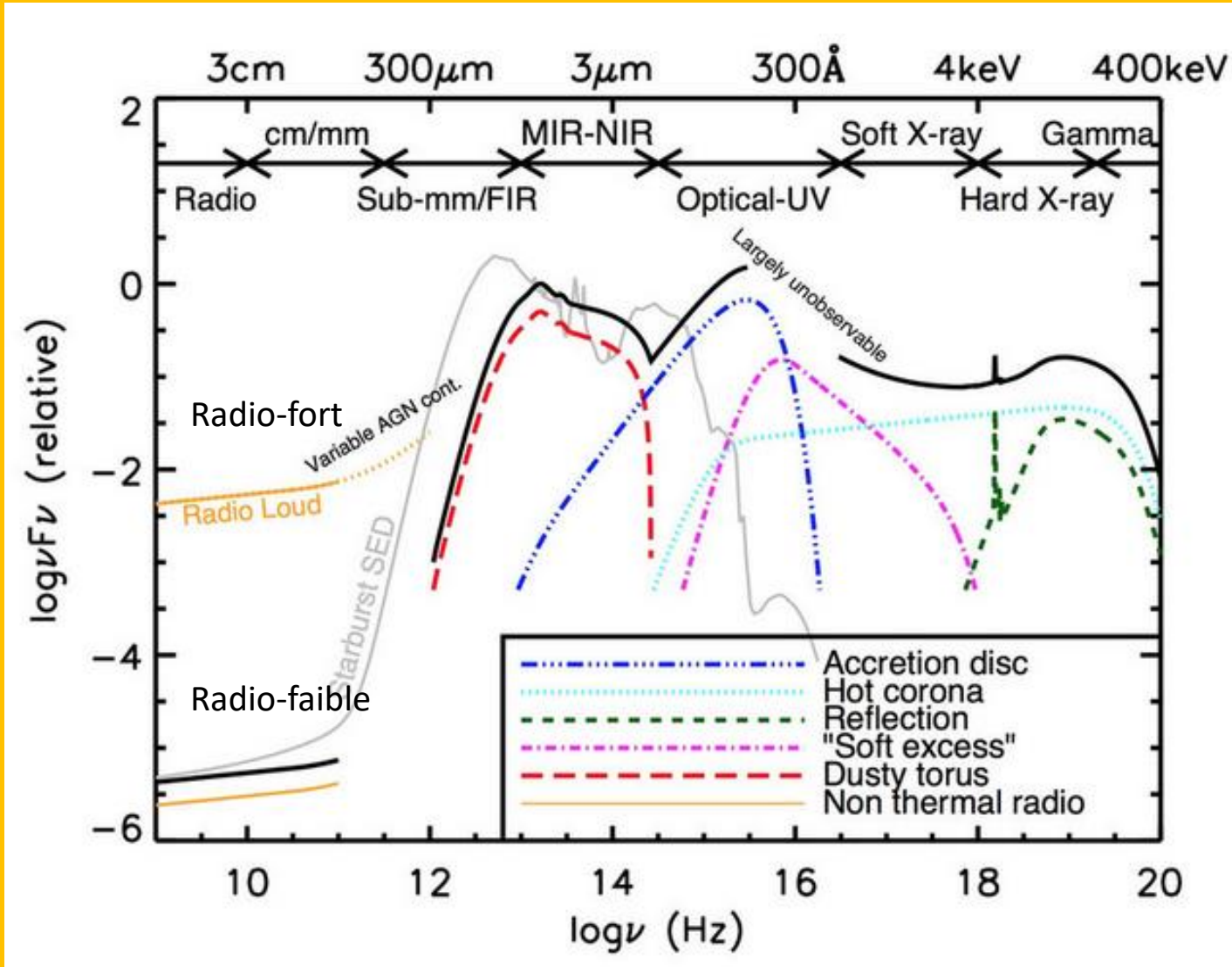


J.Sanders/H.Brunner/eSASS/MPE/E.Churazov/M.Gilfanov/IKI

SRG/eROSITA

Modèle unifié : distribution spectrale d'énergie décomposée en une somme de plusieurs contributions

Quasar
 QSO
 Quasi Stellar Object
 AGN
 Active Galaxy Nucleus
 Seyfert
 FIR ...
 Quasar



Le modèle unifié du moteur des quasars

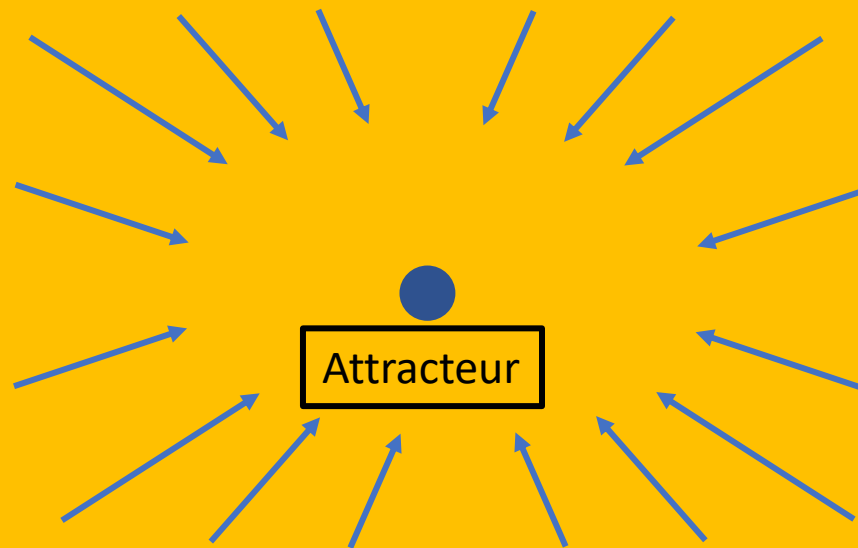
"Disque d'accrétion" autour d'un attracteur

Solution naturelle pour dissiper l'énergie de la matière qui "tombe" vers un attracteur

Le même mécanisme fonctionne à des échelles très différentes de tailles, de masses et de luminosités :

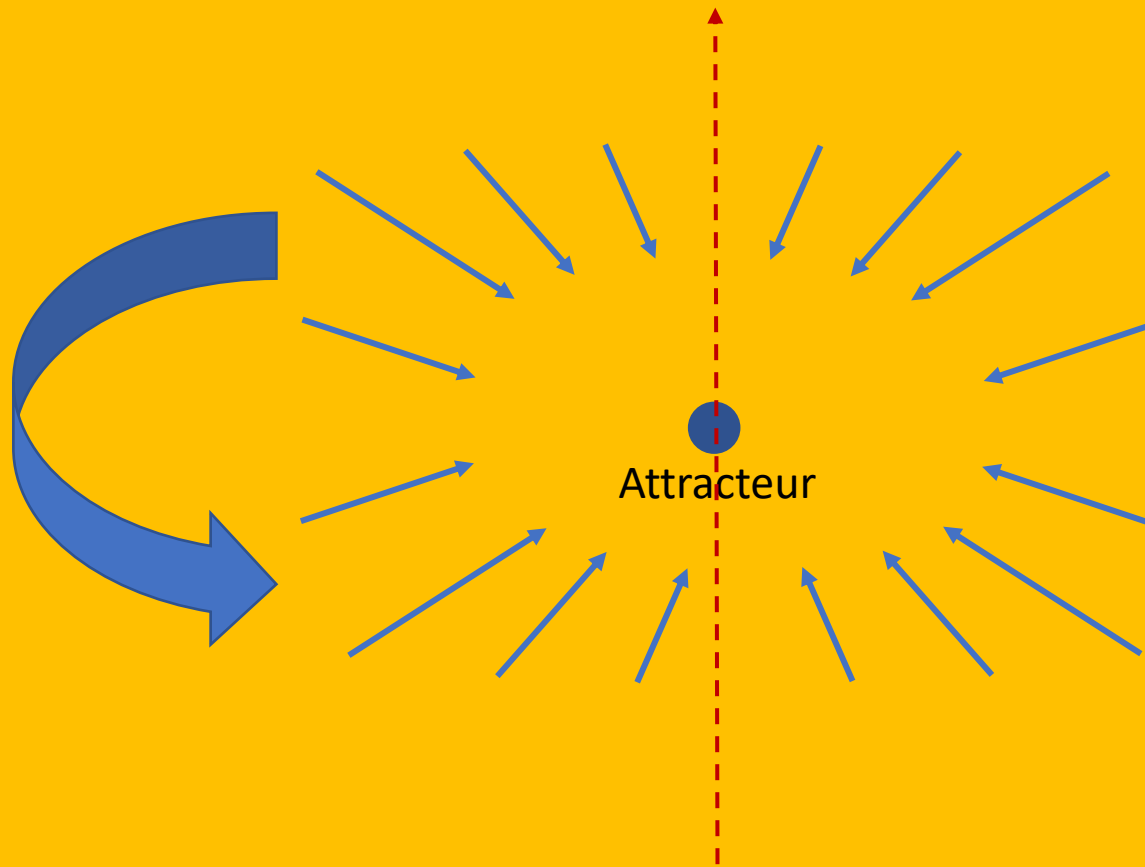
- Formation d'une étoile : Système solaire, $1 M_{\odot}$
- Un trou noir stellaire qui siphonne une étoile supergéante $10 M_{\odot}$
- Formation de galaxies : Trou noir (super) massif, $10^{6-9} M_{\odot}$

Disque d'accrétion



Disque d'accrétion

Dans la Nature : tout tourne



Axe de rotation du système

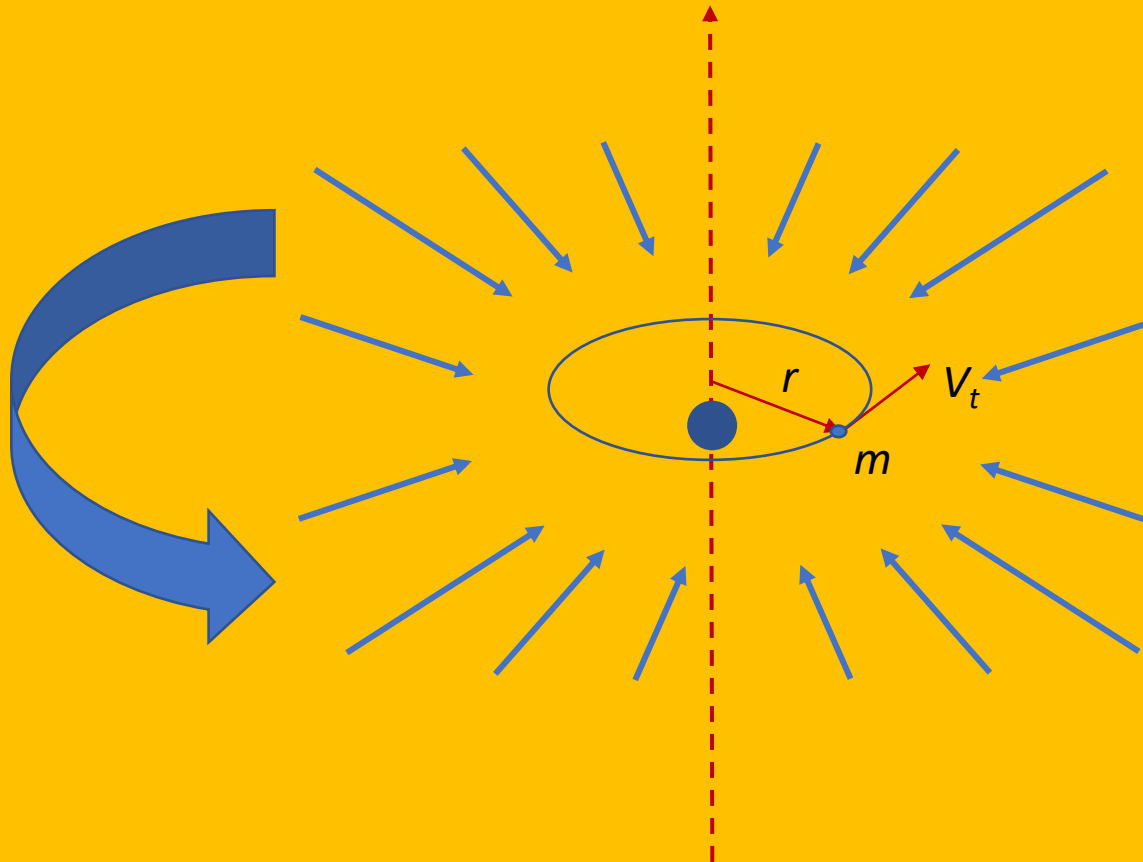
Disque d'accrétion

Si le système tourne autour d'un axe, il y a du moment cinétique \mathcal{N} .

Pour une particule de masse m , de vitesse orbitale V_t et distance r de l'axe : $\mathcal{N} = mrV_t$

Pour l'ensemble du système : ΣmrV_t tend à se conserver.

m ne varie pas. Si r diminue $\rightarrow V_t$ augmente.



Moment cinétique

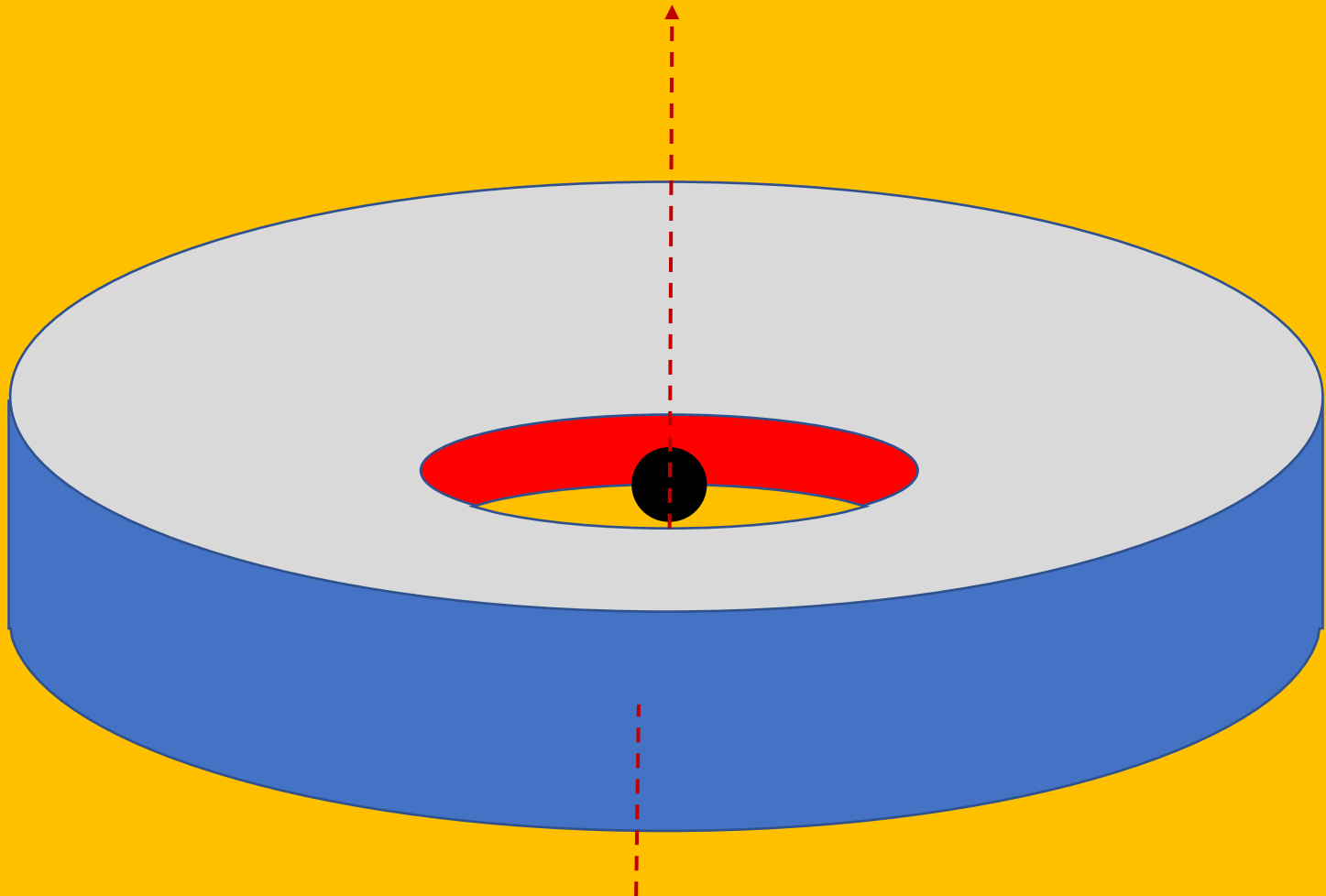
$$\mathcal{N} = mrV_t$$

Disque d'accrétion

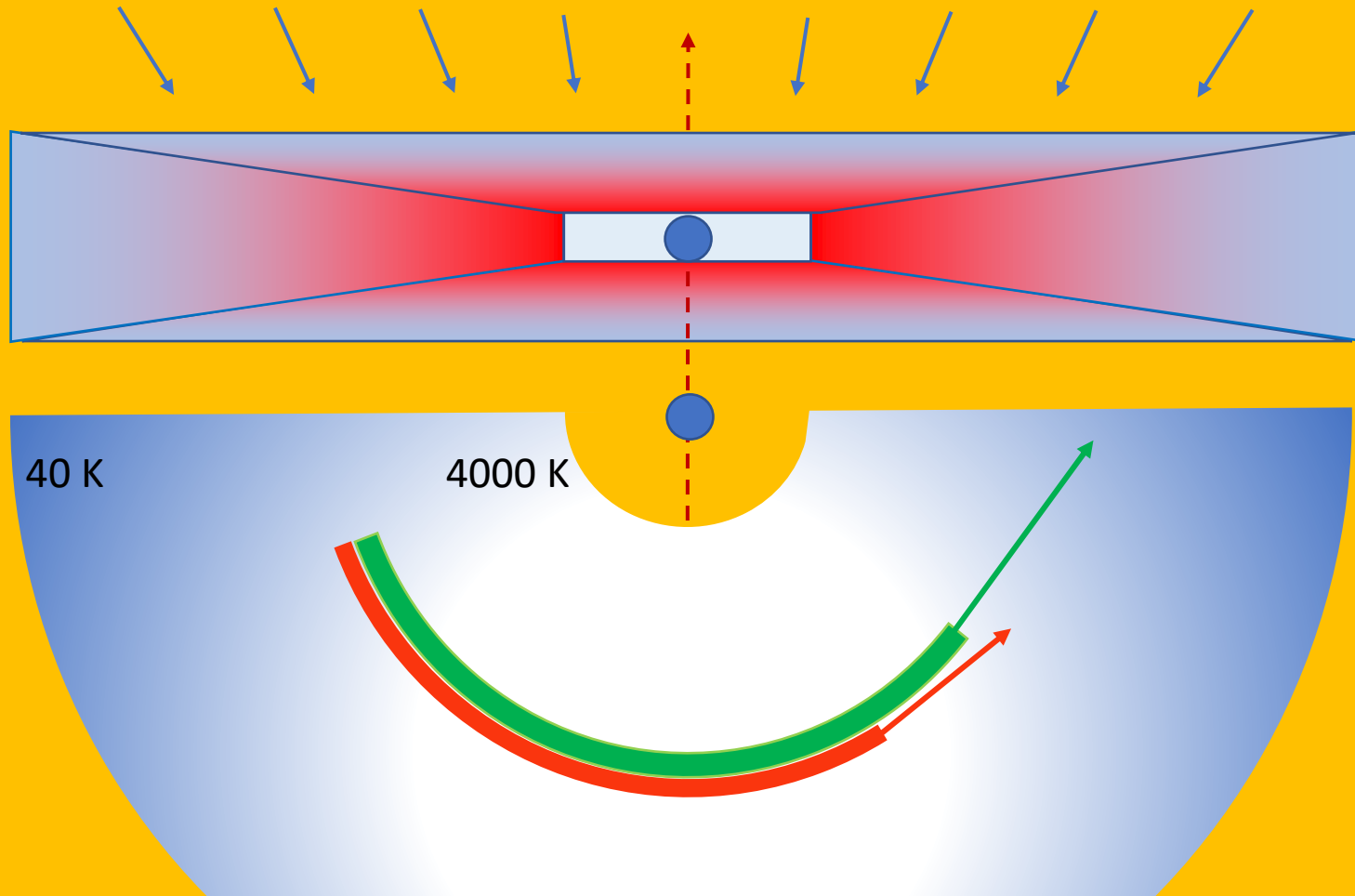
La matière s'accumule dans un disque, épais, visqueux (frottement)

L'énergie cinétique des particules qui tombent sur le disque → **CHALEUR**

Le disque tourne en régime \approx Képlérien

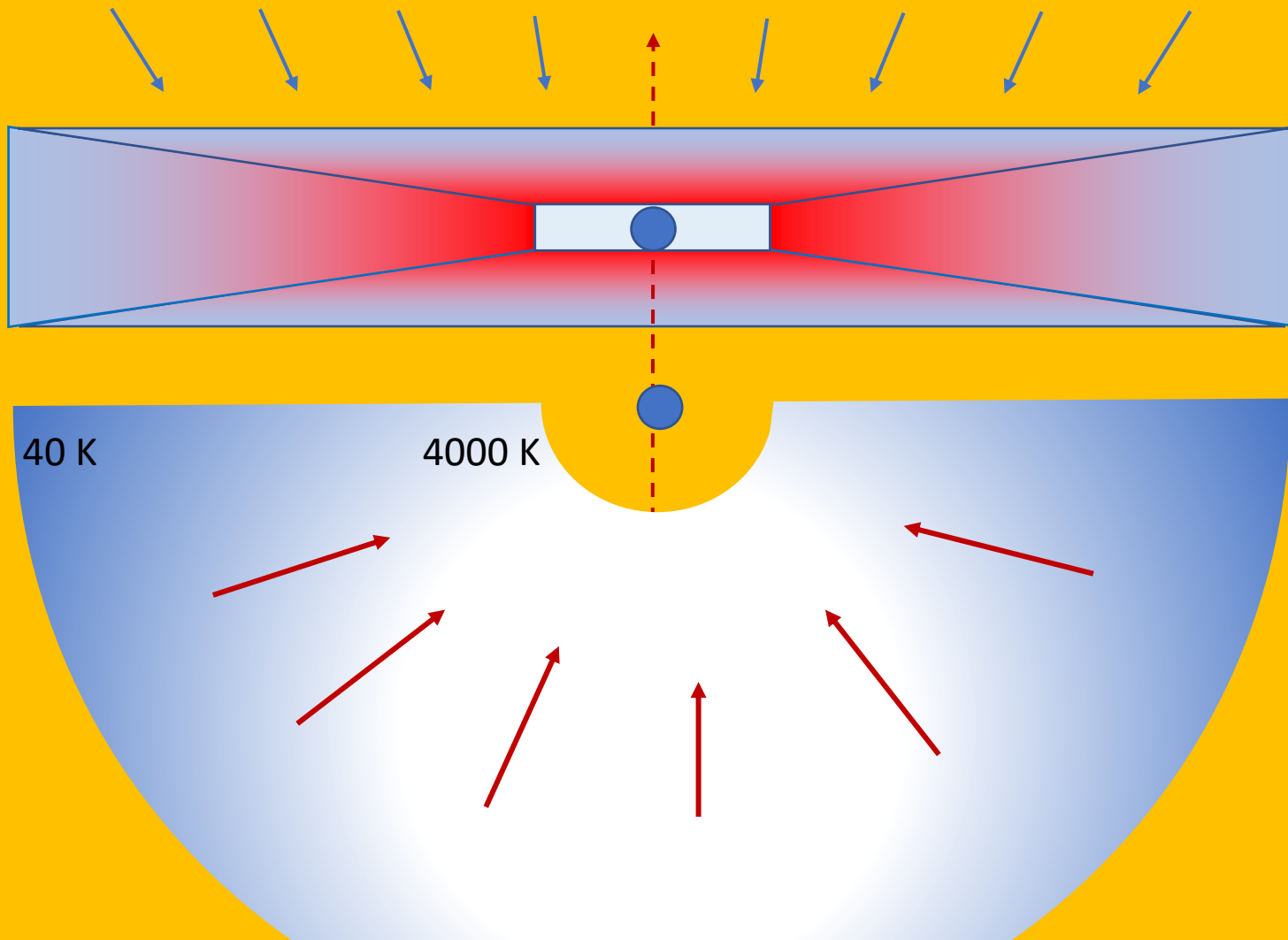


Disque d'accrétion



La couche interne (verte) a une vitesse orbitale plus grande que la couche externe (rouge).
La couche verte entraîne la couche rouge → Transfert de moment cinétique vers l'extérieur.
Frottement entre couches → perte d'énergie mécanique → chaleur → rayonnement.
Ralentissement de la couche verte → Chute de la matière vers le centre + accélération orbitale

Disque d'accrétion



Migration progressive de la matière vers le centre + élévation de température

Au cœur du disque : un trou noir (TN) massif

Vitesses relativistes → Températures extrêmes → Conversion *masse - rayonnement*

Zone de plasma

La plus lumineuse de toutes les sources permanentes
 10^{41} Watt 10 000 Voie Lactée

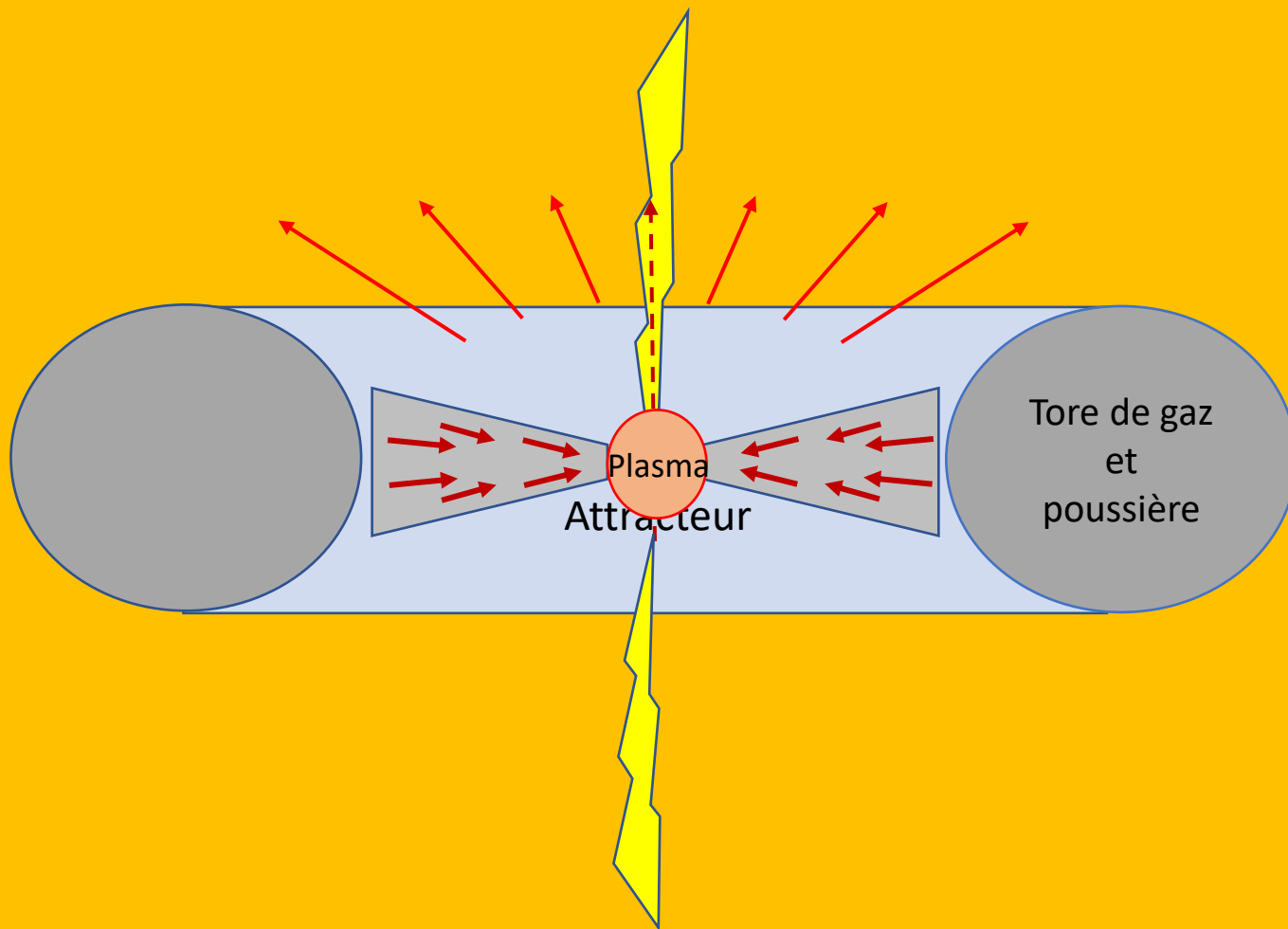
Anneau de lumière

Température de brillance
> 10^{10} K

Trou noir (super) massif

Surface horizon du TN

DA niché au centre d'un tore de gaz et poussière

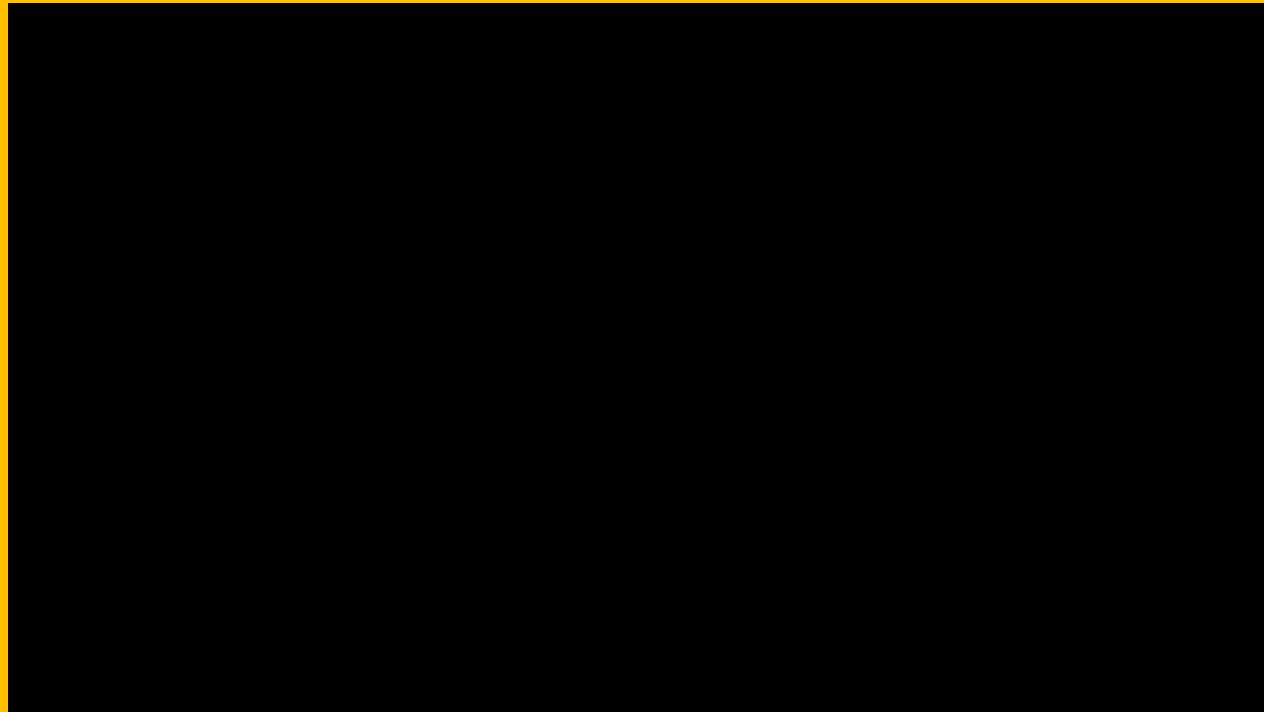


Quasar = TN + DA . Aspect : tout dépend de l'angle de vue !

Disque d'accrétion

DA et anneau lumineux d'un TN de Kerr

M82* par l'Event Horizon Telescope, VLBI à 1,2 mm



En résumé

On s'est fait à l'idée que toutes les (grandes) galaxies ont un DA+TN central plus ou moins massif.

Le phénomène quasar est alimenté par un flux de matière environnante sur le DA.

Dans le proche voisinage du TN un effet relativiste converti une fraction du flux de masse en rayonnement, d'où la luminosité extrême de la source

Cette puissance est limitée par :

- La disponibilité de matière environnante
- La pression de radiation qui s'oppose à la gravitation (Limite d'Eddington)

L'aspect du quasar dépend de l'orientation de la ligne de visée par rapport à l'axe du DA.

On sait mesurer la masse du TN

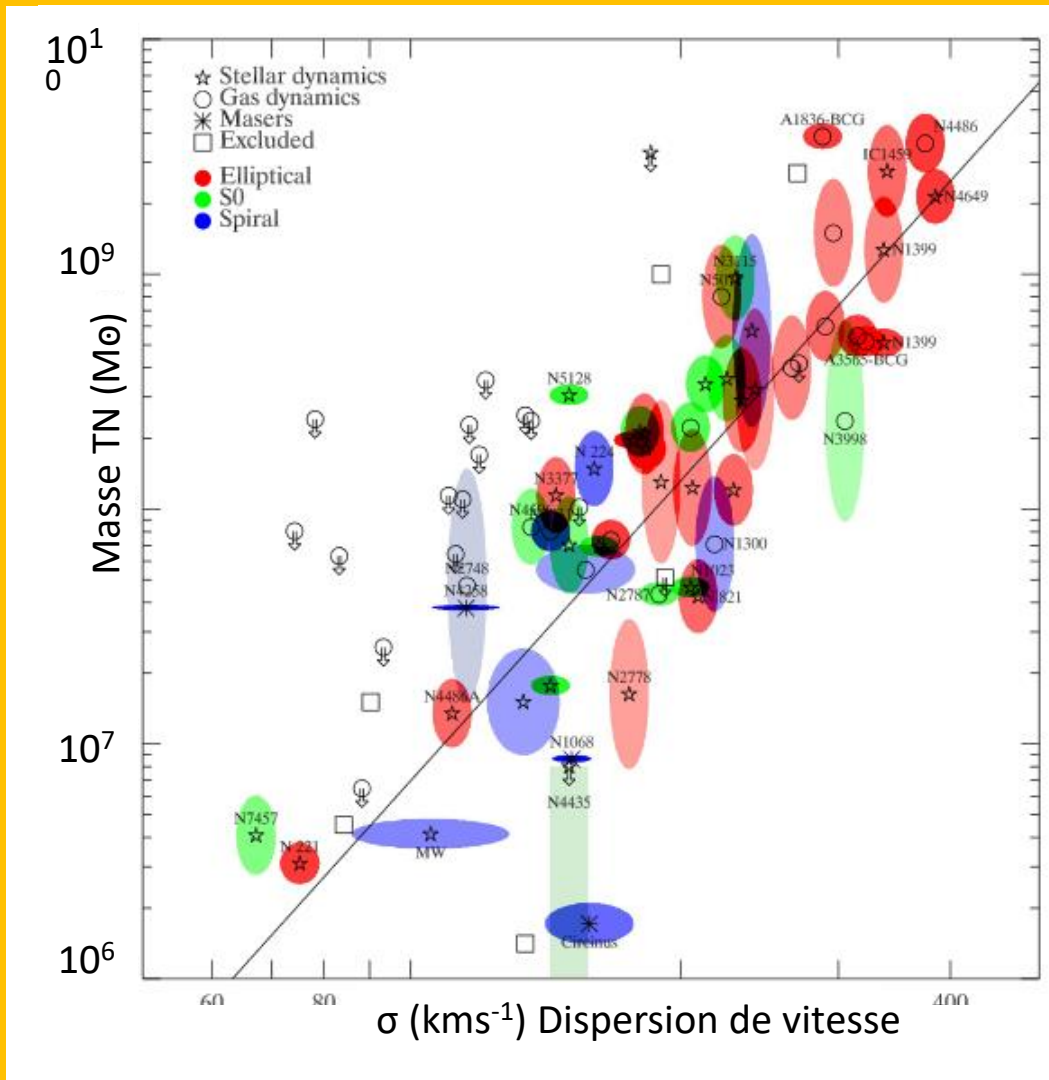
Au centre d'une galaxie réside un essaim d'étoiles, le "Bulbe", en orbite autour du TN central. L'élargissement des raies des étoiles du bulbe donne leur "agitation".

On mesure la "dispersion de vitesses radiales" : $\sigma^2 = \langle (V_{\text{étoile}} - V_{\text{galaxie}})^2 \rangle$

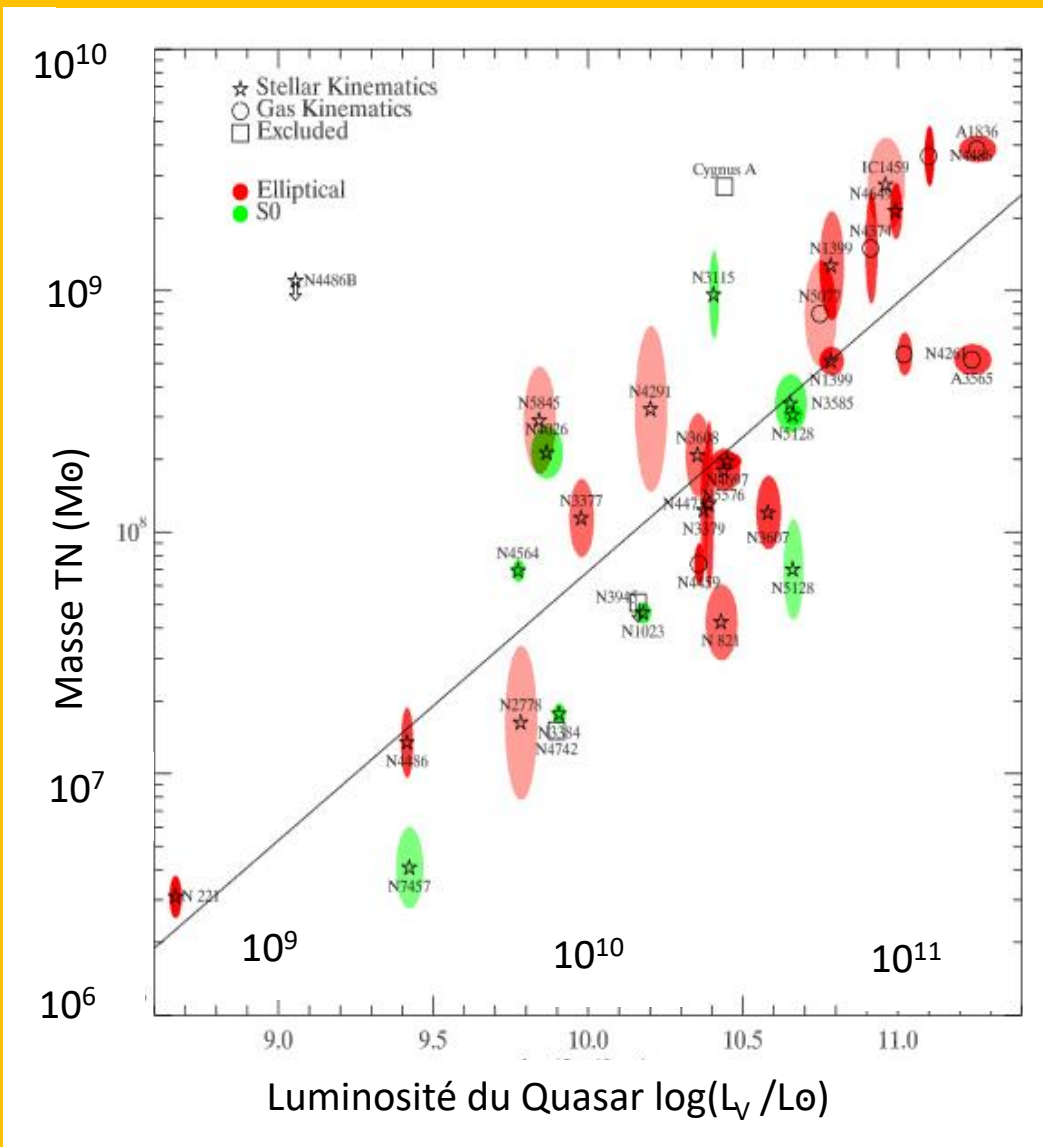
On en tire la masse M_{TN} du TN :

$$\sigma^2 = 2G \frac{M_{TN}}{R}$$

(Théorème du Viriel)



Evidence d'évolution de la masse du TN



La masse du TN+DA n'est qu'une très petite fraction de celle de la galaxie hôte.

Il y a une forte corrélation entre M_{TN} et la luminosité du quasar.

Constatation :

On trouve des quasars très anciens dont le TN est déjà très massifs

Problème à résoudre :

Quel mécanisme de croissance ?

- Accrétion d'une partie de la matière du DA (gaz, étoiles)
- Fusions entre galaxies ?
- Fusion entre TN ?
- Interaction entre quasar et formation d'étoiles.

Évidence d'évolution du phénomène quasar

Les grands relevés : 10^4 - 10^5 quasars Sloan Digital Sky Survey (SDSS, Fondation A.P. Sloan)

Histoire de la densité spatiale des quasars

On prend aujourd'hui un volume $(1 \text{ Mpc})^3$.

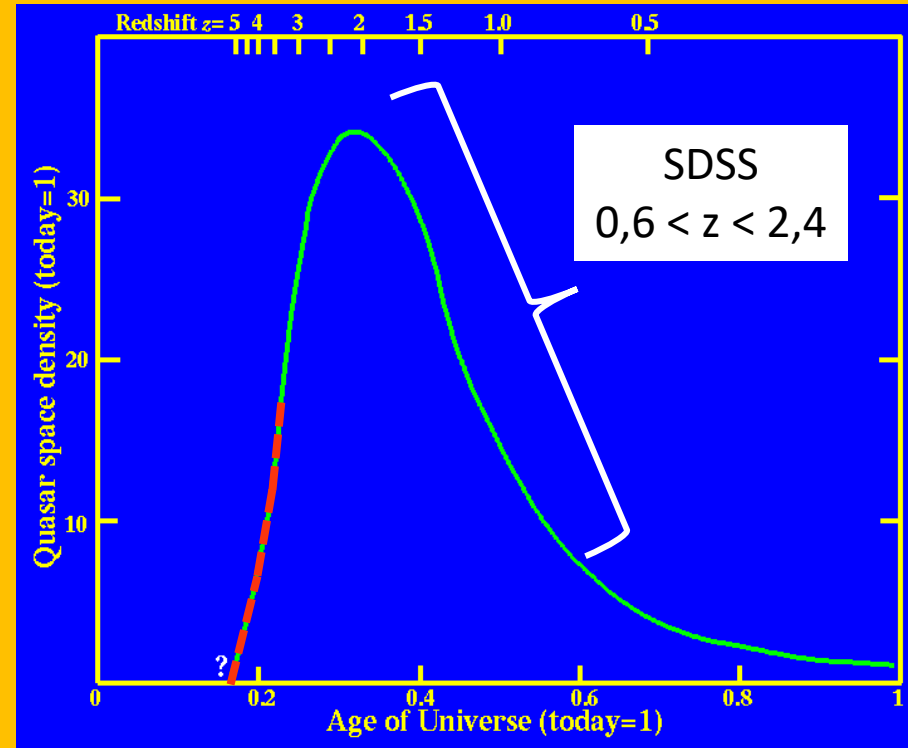
À l'époque z il occupait un volume $V_{comobile}$:

$$V_{comobile} = \left(\frac{1 \text{ Mpc}}{1+z} \right)^3$$

Densité spatiale à $z =$ nombre de quasars dans le DSSS que l'on trouve dans le volume $V_{comobile}$.

Après une croissance rapide, très tôt, jusqu'à $z = 3$, l'âge d'or des quasars :

Décroissance lente due à l'expansion → La "nourriture" pour TN se fait rare



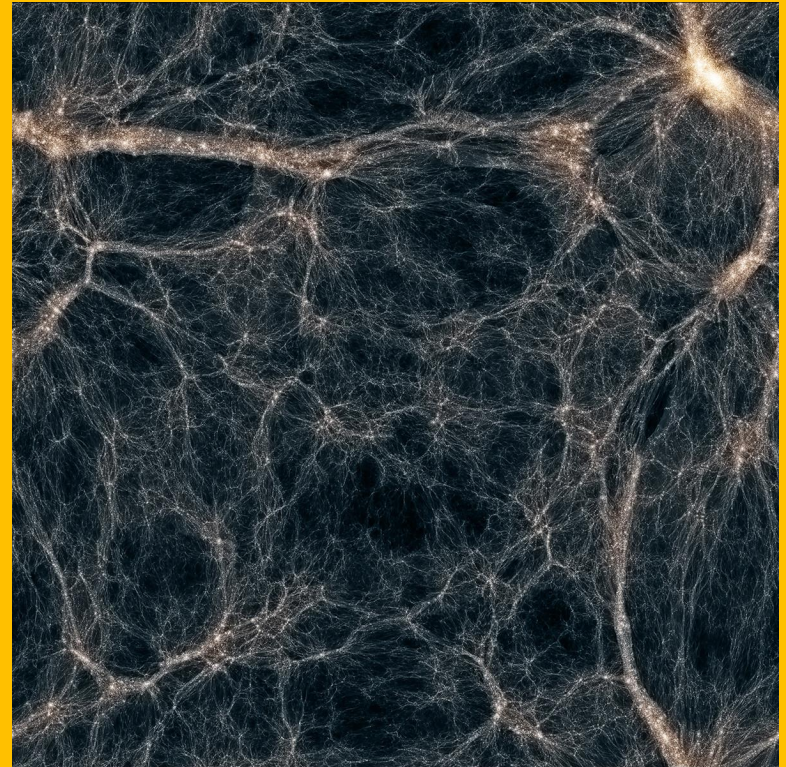
Adapté de <https://pages.astronomy.ua.edu/keel/agn/qsoevol.html>

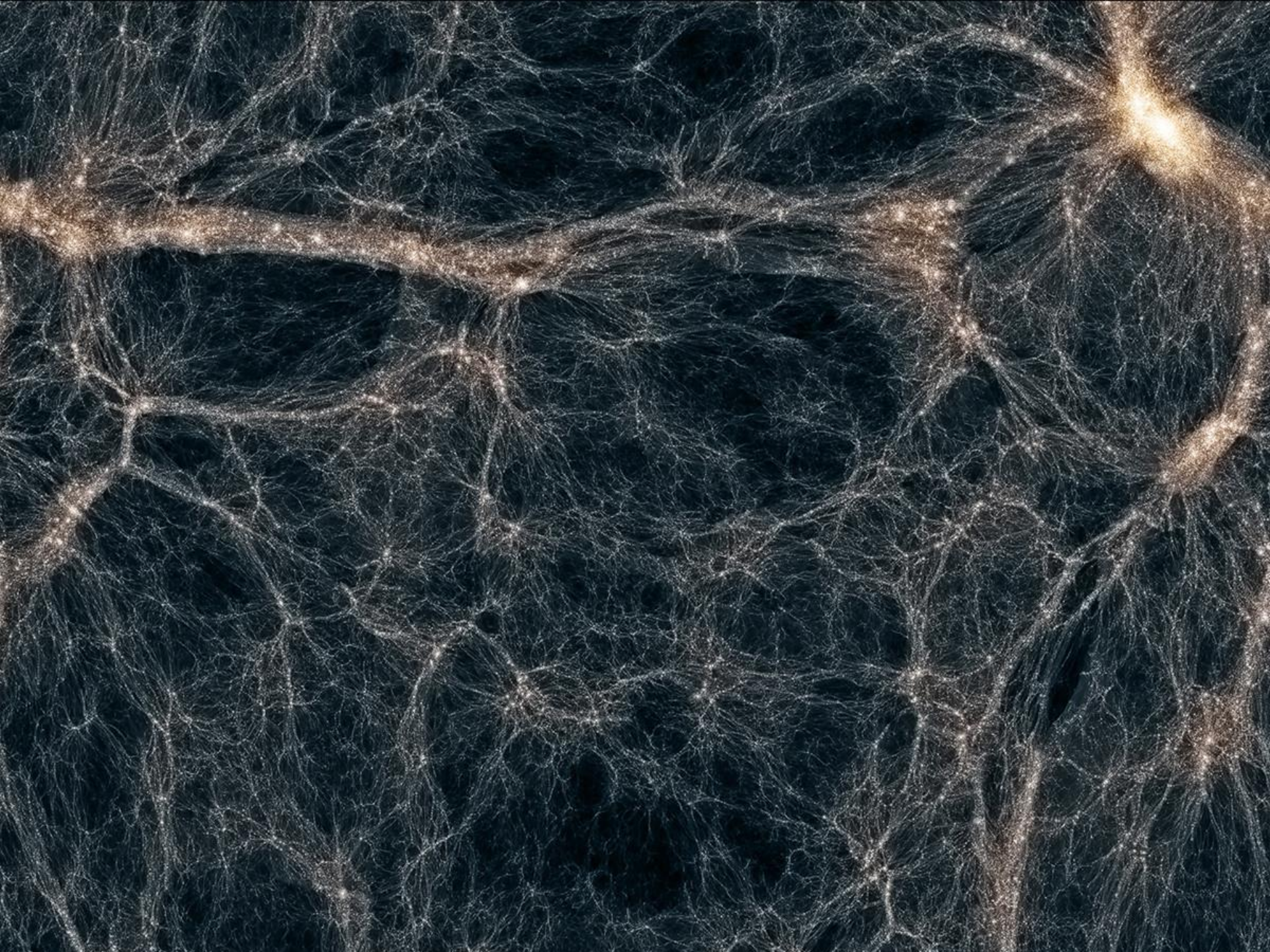
Avec MUSE : les filaments de gaz intergalactique qui nourrissent les quasars à $z \approx 3$

Prédiction du modèle Λ CDM (70%, 26%, 4 %) :

La matière issue du BB (gaz de H + He)
s'est organisée en feuillets puis en filaments.

Les galaxies et amas se sont formés dans
les filaments et à leurs jonctions.





Avec MUSE : les filaments de gaz intergalactique qui nourrissent les quasars à $z \approx 3$

Prédiction du modèle Λ CDM (70%, 26%, 4 %) :

La matière issue du BB = gaz de H + He
s'est organisée en feuillets puis en filaments.

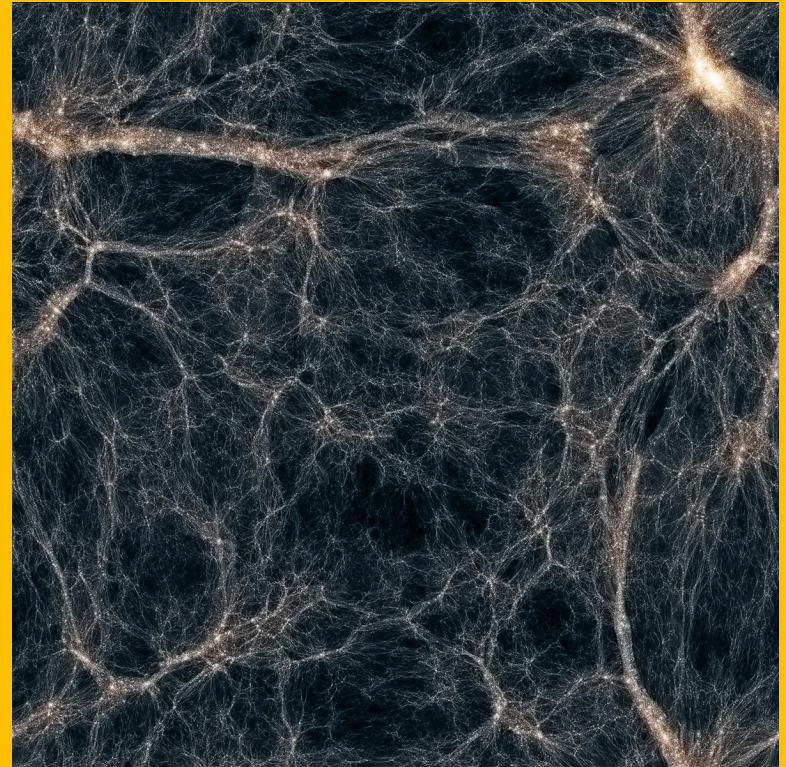
Les galaxies et amas se sont formés dans
les filaments et à leurs jonctions.

Les quasars éclairent autour d'eux en Ly- α .

Dans les filaments HI absorbe et réémet ces Ly- α .

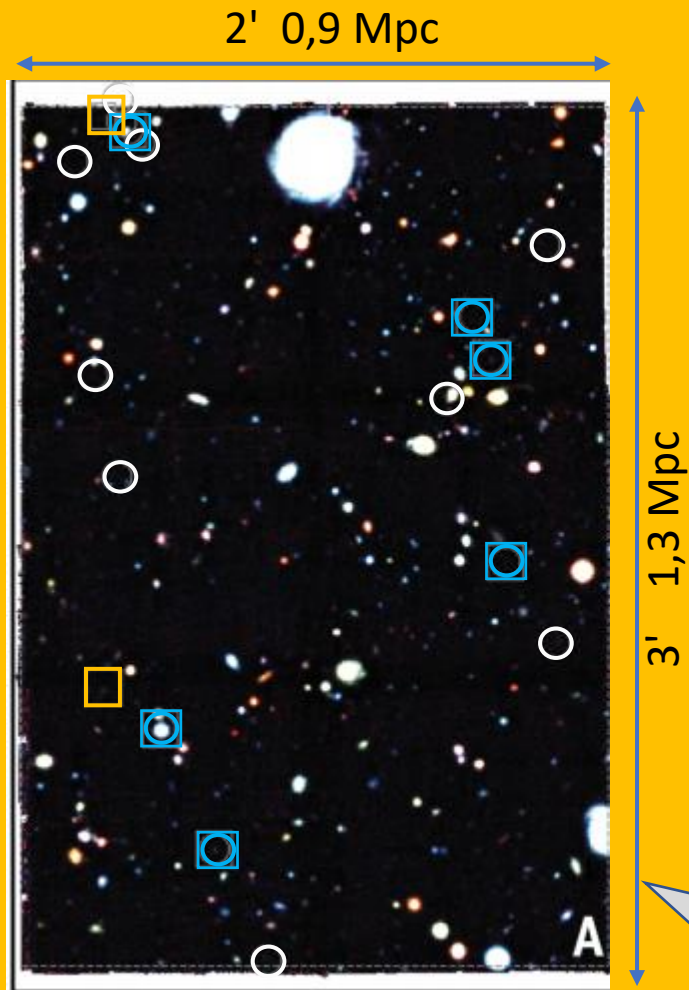
À $z = 3$, c
es Ly- α émis par les filaments sont observés à :

$\lambda_{\text{Ly-}\alpha} = (1+z)1215 \text{ \AA} = 4860 \text{ \AA} \rightarrow$ dans le visible \rightarrow MUSE



Les filaments éclairés par les quasars

(H. Umehata et al. Science 266. 4 oct 2019)



Umehata choisi un amas ADF22 à $z \approx 3$, contenant une série de quasars bien identifiés (ALMA, CHANDRA) dans un champ de MUSE.

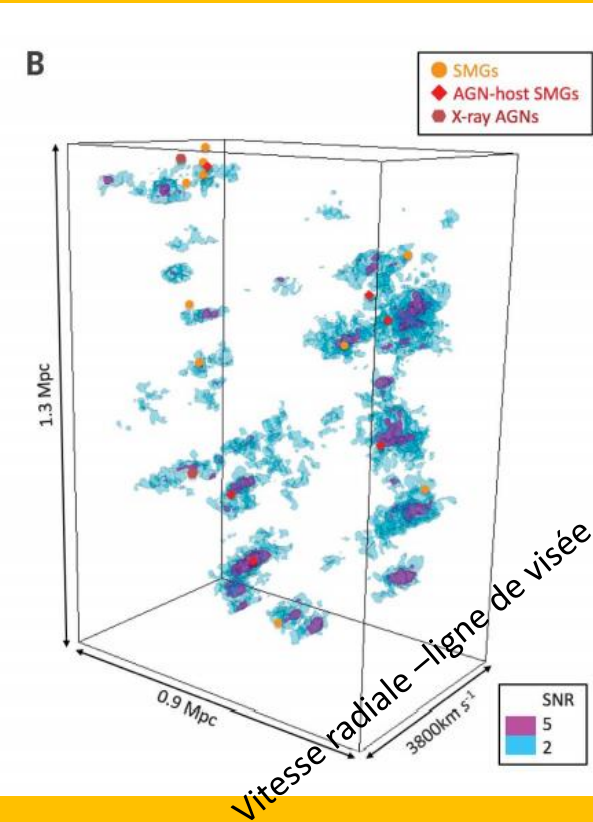
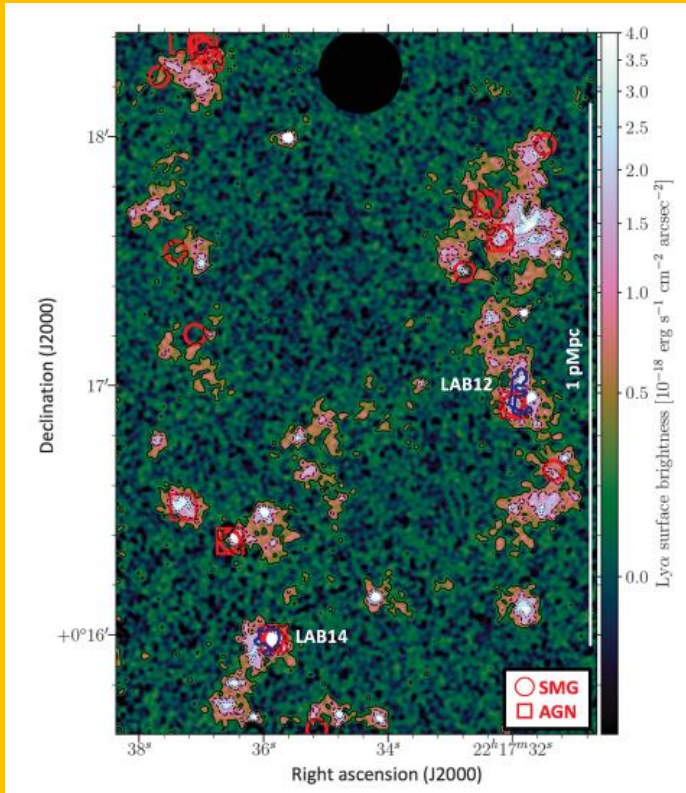
Il soustrait :

- le fond de ciel
- les sources (PSF) des quasars.

Reste la luminosité du gaz des filaments en Ly- α

Reconstitution du champ de l'amas ADF22 (0,9x1,3 Mpc) par sommation sur les longueurs d'onde du cube de données de MUSE. (Bacon R. et al 2014 Arxiv 1411.7667)

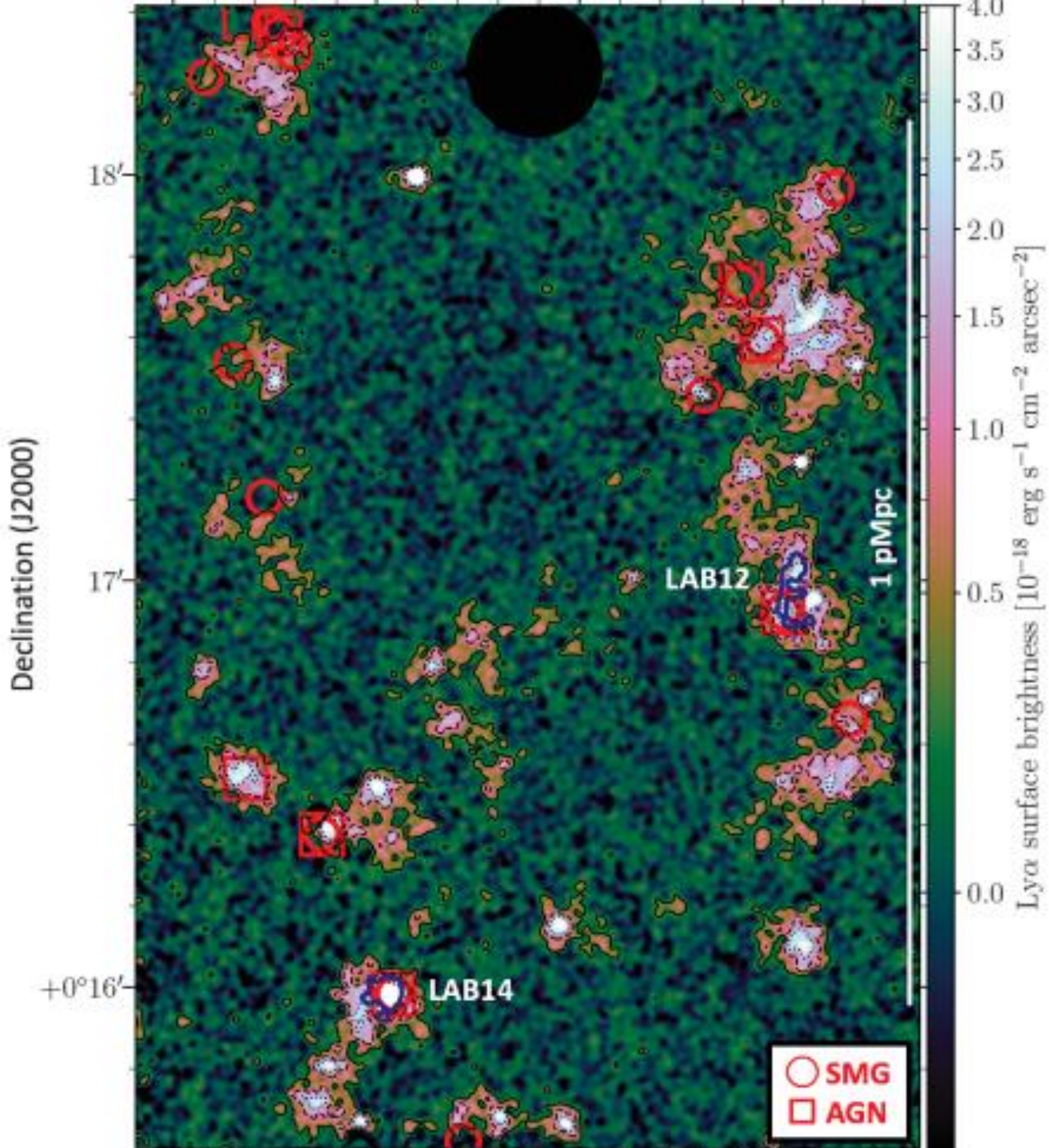
$10^{12} M_{\odot}$ de gaz disponible pour les étoiles et TN des galaxies



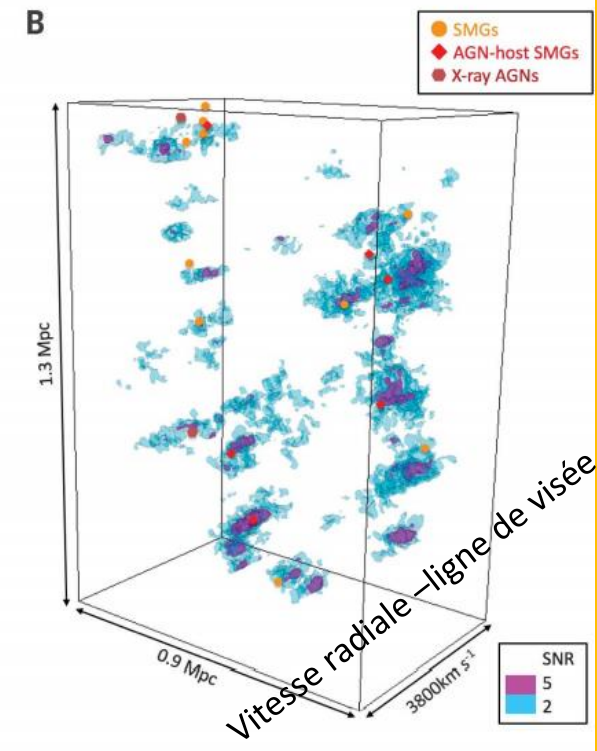
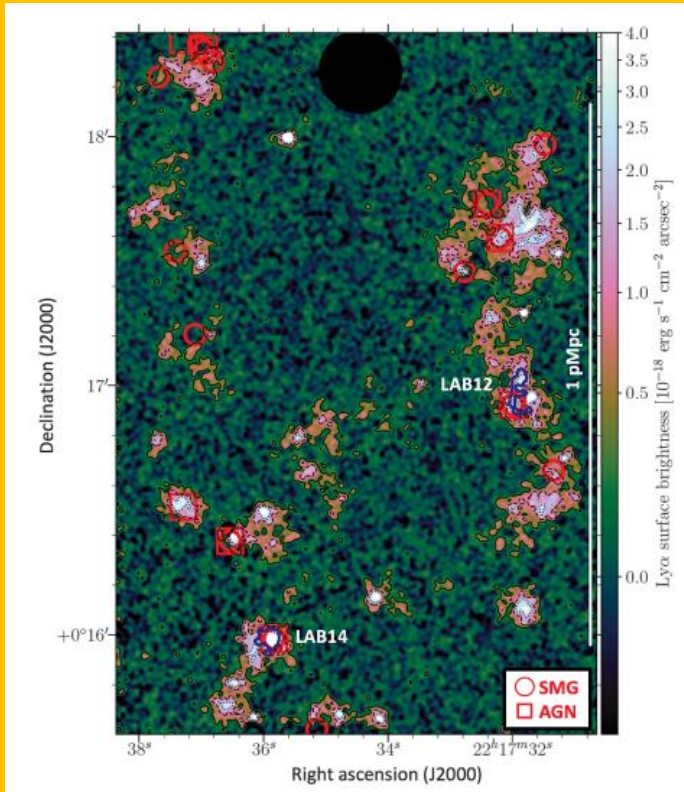
Après soustraction du fond de ciel et des points sources, deux filaments ressortent, en Ly- α , en particulier autour des quasars.

Champ de vitesse radiale du gaz par rapport à l'amas, déduite du décalage de Ly- α : $V_{\text{gaz}} - V_{\text{amas}}$

- Question : existe-t-il un courant de matière le long des filaments qui alimenterait
- La formation d'étoiles dans les galaxies/quasars
 - Les TN massifs au centre des quasars



$10^{12} M_{\odot}$ de gaz disponible pour les étoiles et TN des galaxies



Après soustraction du fond de ciel et des points sources, deux filaments ressortent, en Ly- α , en particulier autour des quasars.

Champ de vitesse radiale du gaz par rapport à l'amas, déduite du décalage de Ly- α : $V_{\text{gaz}} - V_{\text{amas}}$

- Question : existe-t-il un courant de matière le long des filaments qui alimenterait
- La formation d'étoiles dans les galaxies/quasars
 - Les TN massifs au centre des quasars

Autre exemples d'utilisation des quasars aujourd'hui

- Mesures de l'histoire de la vitesse de l'expansion : " H_0 " dans la loi de Hubble $V_{\text{radiale}} = H_0 D_{\text{distance}}$

Chandelle standard photométrique : la luminosité des SNIA.

On admet qu'elle a toujours été la même, au moins depuis l'époque $z=2$

Cette méthode a mis en évidence **l'accélération de l'expansion depuis 5 Gan**

On cherche une autre **méthode indépendante**

Chandelle standard géométrique : la taille des BAO (*).

Lors du découplage baryons-photons (380 000 ans après le BB) des ondes de densité de matière baryonique se sont figées.

À $z = 1100$, elles sont incrustées dans les fluctuations du rayonnement de fond cosmologique (CMB, 2,7 K, mission spatiale PLANCK)

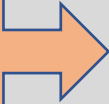
Plus tard, dans des motifs de surdensité de quasars de taille comobile $150 \text{ Mpc}/(1+z)$.

(* BAO : Oscillations Acoustiques des Baryons) <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0607122v1>

BAO = Oscillations Acoustiques des Baryons

Situation dans le plasma avant le découplage, $z > 1100$, âge $< 380\,000$ ans

De la matière tombe
par gravité sur une
surdensité



Échauffement
→ Rayonnement
Contrepression



Couplage entre matière et rayonnement



Zone chauffée

Zone de surdensité dans le
plasma

électrons
protons, He^{++}
photons ...

Ondes de pression qui se
propagent dans le milieu

BAO = Oscillations Acoustiques des Baryons

Situation dans le plasma avant le découplage, $z > 1100$, âge $< 380\,000$ ans

De la matière tombe
par gravité sur une
surdensité

Échauffement
→ Rayonnement
Contrepression

Zone chauffée

Zone de surdensité dans le
plasma

électrons
protons, He^{++}
photons ...

Couplage entre matière et rayonnement

Ondes de pression qui se
propagent dans le milieu

Situation après le découplage, $z < 1100$, âge $> 380\,000$ ans

L'onde de pression reste "figée"
Elle ne se propage plus,
mais se "dilate" avec l'expansion
 $D/(1+z)$

Expansion de l'espace

Le couplage a disparu

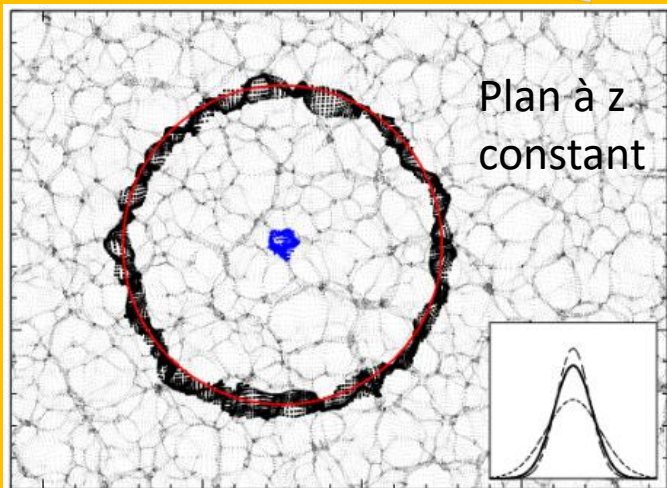
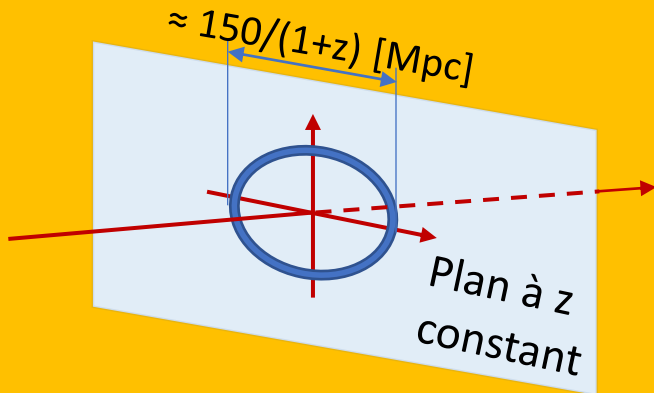
à $z = 1100$, Planck
Fluctuations de densité
juste après le découplage

à $z = 0$
Fluctuations de la densité des galaxies
Fluctuations d'origine dilatées par l'expansion

Un étalon de longueur

$$l_0 \approx 150/(1+z) \text{ [Mpc]}$$

Dans un plan \perp à la ligne de visée (z fixé)

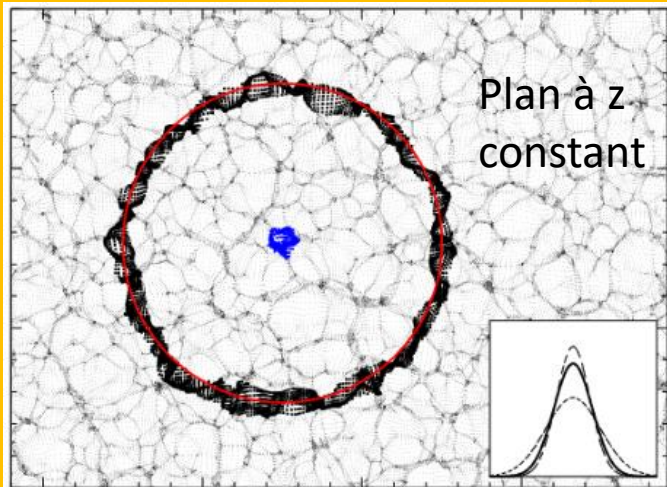
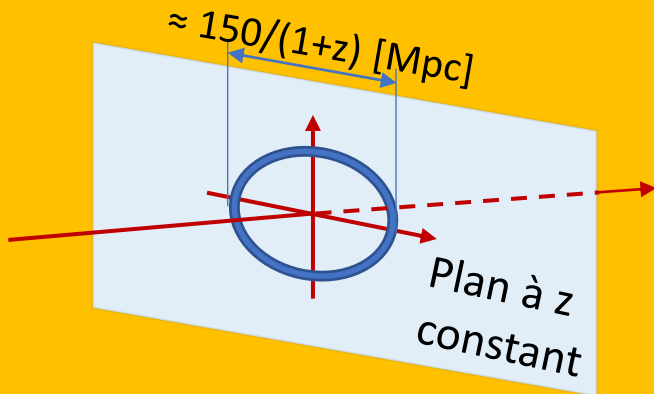


Fonction de corrélation angulaire
des quasars

Un étalon de longueur

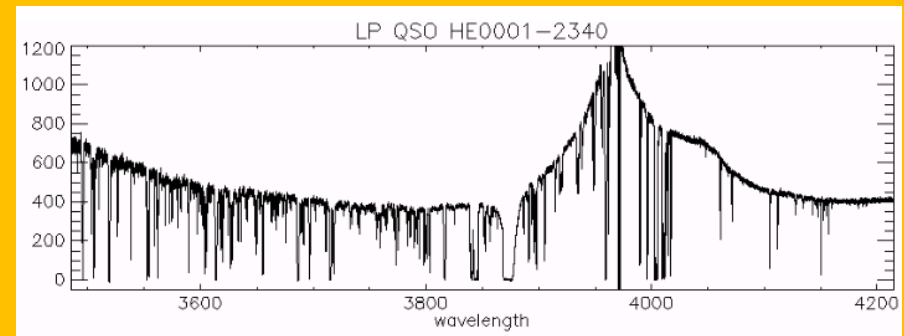
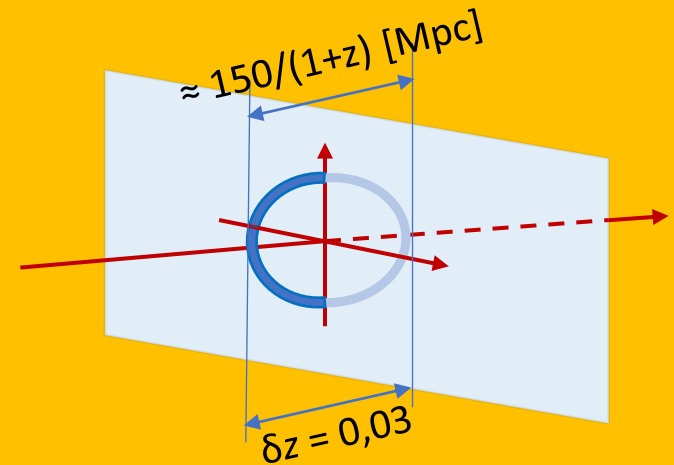
$$l_0 \approx 150/(1+z) \text{ [Mpc]}$$

Dans un plan \perp à la ligne de visée (z fixé)



Fonction de corrélation angulaire
des galaxies

Dans un plan contenant la ligne de visée

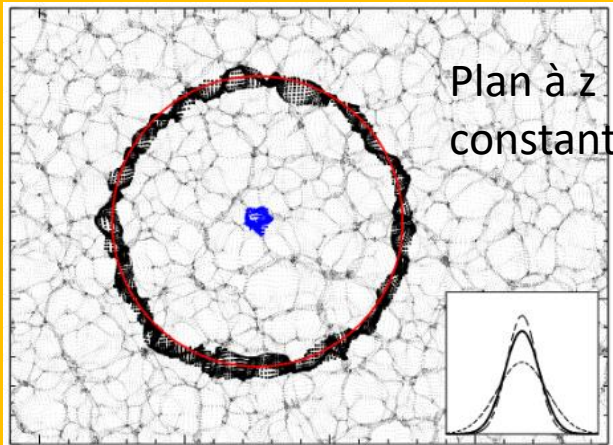
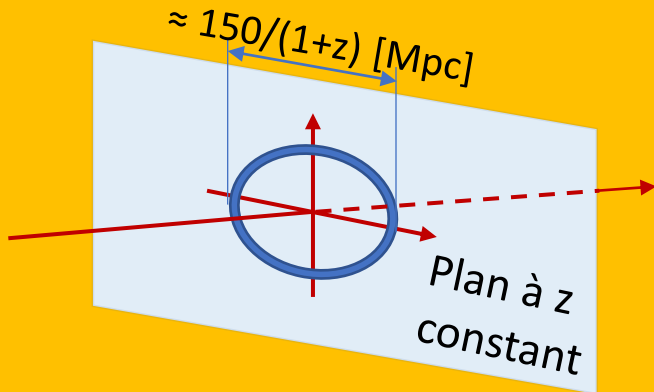


Fonction de corrélation entre les raies de
la forêt Ly- α

Un étalon de longueur

$$l_0 \approx 150/(1+z) \text{ [Mpc]}$$

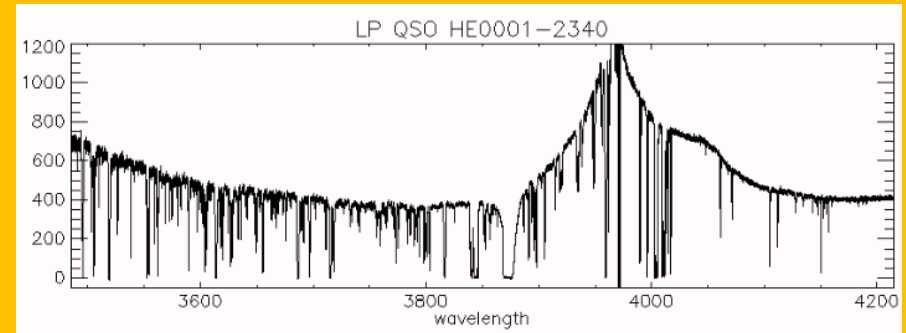
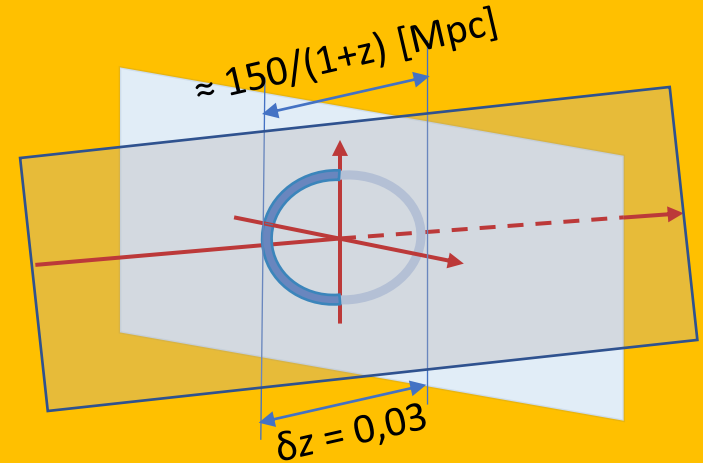
Dans un plan \perp à la ligne de visée (z fixé)



Fonction de corrélation angulaire des galaxies

<https://arxiv.org/abs/1311.1767>

Dans un plan contenant la ligne de visée



Fonction de corrélation entre les raies de la forêt Ly- α

<https://arxiv.org/abs/1311.1767v2>

Perspectives

Phénomènes rouges
par l'expansion

Détection des sources

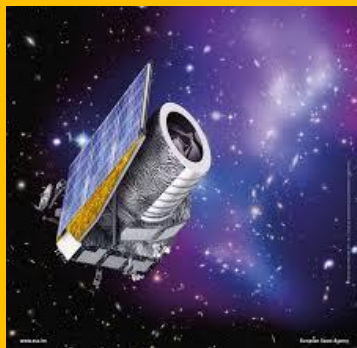
SPATIAL

Grands relevés : EUCLID

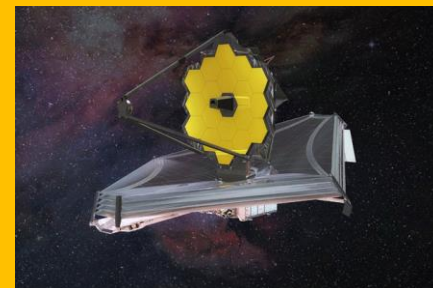
ESA, 2022 (7 ans)

> 10^9 sources, 1/3 du ciel

$10^\circ \times 10^\circ$ profond

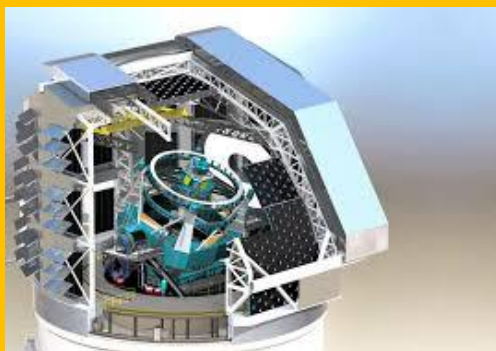


Infra rouge JWST



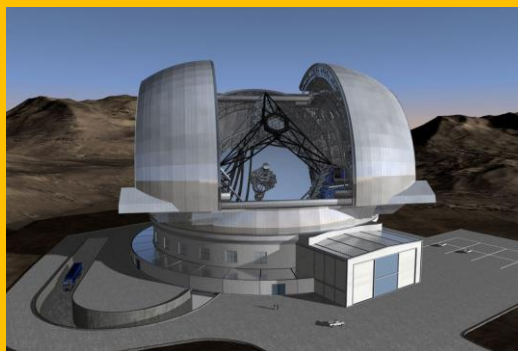
AU SOL

LSST



Legacy Survey of Space and Time
Large Synoptic Survey Telescope

ELT - TMT



Spectro-imagerie - MUSE

SKA - LOFAR



Square Kilometre Array

Fin