



Astro Exos

MOUVEMENT SUPRALUMINIQUE DU QUASAR 3C 273

L'ENQUÊTE

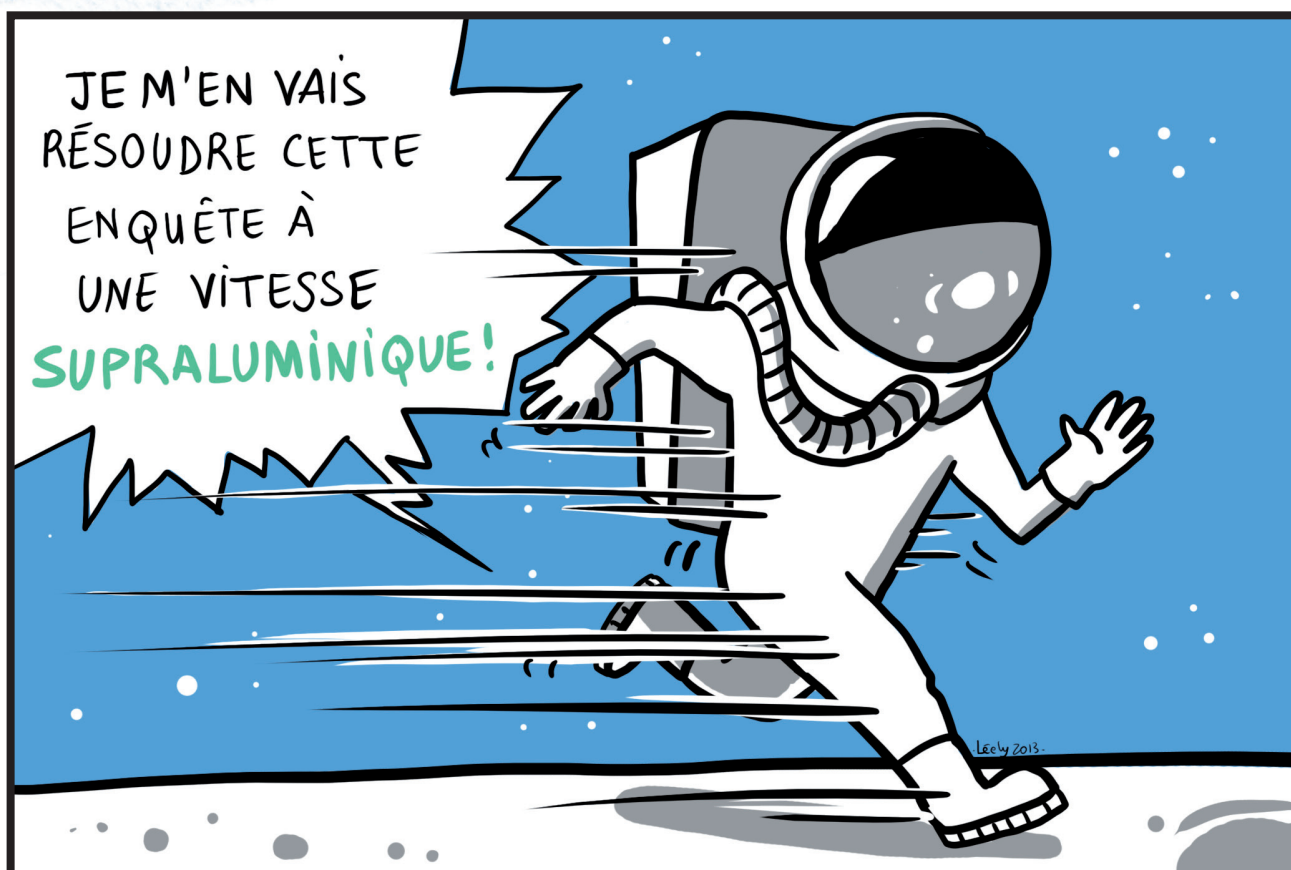
quasar
3C 273

jet!

$$m - M = 5 \log$$

île de France





Astro Exos

Responsables éditoriaux

Roland Lehoucq et Jean-Marc Bonnet-Bidaud

Contributeur

Roland Lehoucq

Conception graphique

Aurélien Bordenave, aureliebordenave.fr

Photo de couverture:

Image du quasar 3C 273
prise par le télescope spatial Hubble en lumière visible.



Introduction



Cours / rappel
historique



Bibliographie



Données



À vous
de le faire!



Glossaire



île de France





Introduction

Le but de cet exercice est d'étudier le mouvement d'un globule de matière issu du quasar 3C 273. Sa découverte apporta une double surprise : cet objet était le plus lointain alors connu et le mouvement apparent du globule semblait se faire à une vitesse supérieure à celle de la lumière.



Les quasars

Les quasars ont été découverts grâce aux premiers radiotélescopes, vers la fin des années 1950. Ils étaient alors catalogués comme des sources de rayonnement radio n'ayant pas toujours de contrepartie en lumière visible. En 1963, des astronomes australiens découvrent le quasar 3C 273 grâce au radiotélescope de Parkes [1]. Il fut rapidement associé à un objet émettant aussi de la lumière visible. Son spectre révéla qu'il avait un décalage vers le rouge égal à 0,158, ce qui, à l'époque, en faisait l'objet le plus lointain jamais observé¹. À partir des années 1980, les quasars ont été considérés comme

des galaxies abritant un trou noir supermassif en leur centre. Leur grande luminosité absolue résultait alors de la friction causée par le gaz et la poussière tombant dans le disque d'accrétion du trou noir, qui peut transformer environ 10 % de la masse en énergie².

Le quasar 3C 273

3C 273 est un quasar situé dans la constellation de la Vierge. Avec une magnitude apparente de +12,9, c'est le quasar le plus brillant du ciel³ et l'un des plus proches de sa catégorie. L'analyse spectroscopique de sa lumière a montré que son spectre est décalé vers le rouge (redshift en anglais). Les spectres obtenus avec le Télescope Isaac Newton de 2,5 mètres de La Palma [3] et le télescope de 2,1 mètres de l'observatoire de McDonald [4] ont mesuré un redshift $z = \Delta\lambda/\lambda = 0,158$.

Les modèles cosmologiques l'interprètent comme résultant de l'expansion de l'univers et le relie à la distance d de l'objet via la loi de Hubble (voir article « **Décalage vers le rouge** » du glossaire). Ce redshift le place à une distance de 645 mégaparsecs, soit 2,104 milliards d'années-lumière⁴. Avec une magnitude absolue de -26,7, ce quasar est aussi l'un des objets dont la luminosité intrinsèque est la plus élevée : s'il était situé à 10 parsecs de nous, il serait aussi brillant que le Soleil vu de la Terre !

Le mouvement apparent supraluminique du jet de 3C 273 fut découvert en 1981 [5]. Devant un tel phénomène, le premier réflexe fut de penser que l'on avait mal estimé la distance du quasar à partir de son redshift et que celui-ci devait être dû à autre chose qu'à l'expansion de l'univers. Pendant un temps, cette observation fut même utilisée comme argument contre l'interprétation plaçant les quasars à de très grandes distances. Mais on comprit rapidement qu'un tel phénomène pouvait tout simplement résulter d'une sorte d'illusion d'optique et expliquait naturellement dans le cadre de la physique relativiste d'Einstein.

Plus près de nous, GRS 1915+10530 fut le premier objet de notre galaxie montrant un jet supraluminique. Découvert en 1994, la vitesse apparente de ses jets est 1,3 fois supérieure à celle de la lumière. Il s'agit d'un trou noir stellaire lié à une étoile dont il capte une partie de la masse.

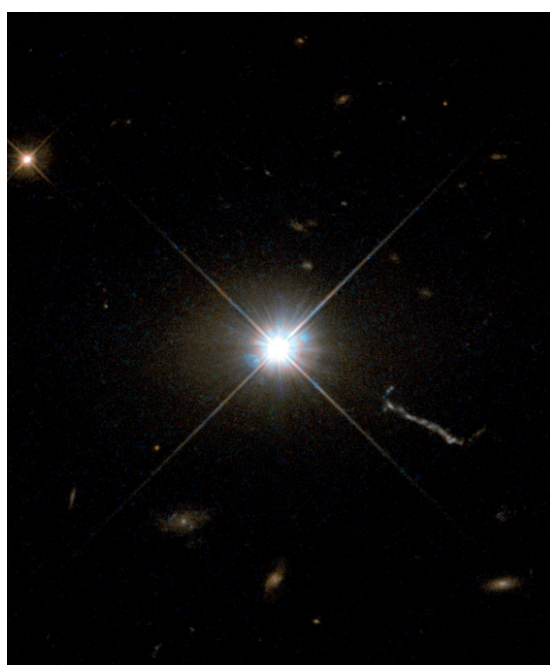


Figure 1: Images du quasar 3C 273 prises par le télescope spatial Hubble en lumière visible [2]. Le quasar apparaît extrêmement brillant, masquant la luminosité de la galaxie hôte. Un jet de matière est bien visible en bas à droite, ainsi que deux galaxies sur la gauche.

1) Le décalage vers le rouge des galaxies observées par l'astronome américain Edwin Hubble ne dépassait pas 0,007. Grâce aux très grands télescopes modernes, dont les miroirs atteignent 8 à 10 mètres de diamètre, on a pu détecter des millions de galaxies beaucoup plus lointaines que 3C 273. La plus lointaine actuellement connue a un décalage vers le rouge quasiment égal à 10.

2) Pour en savoir plus, lire l'article de la Wikipédia <http://fr.wikipedia.org/wiki/Quasar>.

3) C'est l'objet le plus lointain que des astronomes amateurs peuvent observer dans leurs télescopes !

4) La distance dont il est question ici est la distance comobile qui intervient dans la loi de Hubble donnée dans l'article « Décalage vers le rouge » du glossaire.

Détermination de la vitesse apparente



La figure 2 est une série de cartes radio du quasar 3C 273 montrant l'évolution temporelle de la position apparente d'un globule de matière émis par le quasar.

1. Commencer par déterminer la distance angulaire $\delta\theta$ du globule par rapport au quasar à chaque époque, d'abord en mesurant la distance L séparant leur centre (en centimètre) puis en convertissant ces distances en angle grâce à l'échelle située en bas à droite de la figure.
2. Trouver la distance d séparant le globule du centre du quasar en fonction du temps sachant que sur l'image un angle d'une seconde d'arc correspond à une distance linéaire de 2,7 kpc.
3. En déduire la vitesse moyenne du globule, exprimée comme un multiple de la vitesse de la lumière. Que pensez-vous du résultat ?

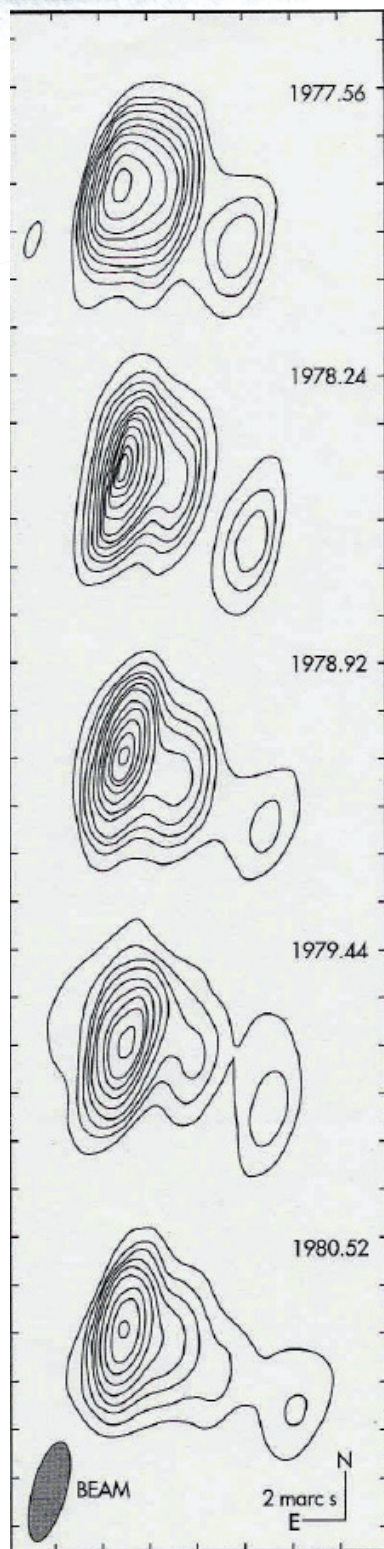


Figure 2: Carte radio du quasar 3C 273 [6] montrant le noyau central brillant (à gauche) et la position du globule éjecté (à droite) à 5 époques indiquées en années décimales. Les graduations horizontales et verticales indiquent des séparations angulaires et ont un pas de 2 millièmes de seconde d'arc, noté 2 marc s sur le document.

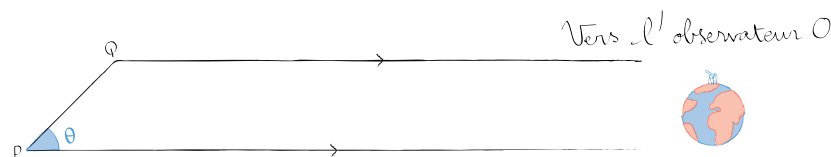


Figure 3: Géométrie du système. L'observateur est situé au point O, situé très loin du quasar. Le point P représente le noyau du quasar au moment où la matière a été éjectée. Le point Q représente le point atteint par le globule de matière quelques temps plus tard.



Que pensez-vous de ce résultat ?

La vitesse du globule peut-elle être réellement supérieure à celle de la lumière ? La réponse est négative car selon la théorie de la relativité d'Einstein la vitesse de la lumière dans le vide, identique dans tous les référentiels, est la vitesse maximum à laquelle l'information peut se déplacer. Nous allons maintenant établir des formules qui permettront d'interpréter correctement ce résultat étonnant. Pour cela utilisons la figure 3.

Sur celle-ci, le point P représente le noyau du quasar. La lumière émise par celui-ci nous parvient en O après avoir parcouru la distance D qui nous en sépare, au bout d'une durée $t_1 = D/c$, où c est la vitesse de la lumière dans le vide. La matière émise par le noyau du quasar s'est déplacé le long du segment PQ qui fait un angle θ avec la ligne de visée OP : cette matière a parcouru une distance r à la vitesse v , donc en un temps r/v . Nous supposons que r est très petit devant D de sorte que les rayons lumineux arrivant en O et émis par P et Q sont quasiment parallèles.

1. Quelle est la distance D séparant le point d'émission Q de l'observateur O ?
2. À quel instant t_2 parvient en O la lumière émise par le globule de matière éjectée ?
3. L'observateur O fait une photographie au temps t_1 et une autre au temps t_2 . Écrire la durée Δt qui les sépare.
4. Exprimer la distance r en fonction de Δt , de θ et de $\beta = v/c$.
5. En déduire l'expression de la vitesse du globule $v' = r/\Delta t$ observée par O. Est-ce celle qui est directement mesurable sur les photographies, notée v_{app} ? Donner l'expression de v_{app} en fonction de v et θ .
6. À quelle condition peut-on avoir $v_{app} > c$?

L'instrument utilisé

La figure 2, obtenue en utilisant les ondes radio, montre qu'il a fallu observer avec une résolution angulaire inférieure au millième de seconde d'arc. Quand un faisceau de lumière parallèle passe à travers une ouverture circulaire, l'image d'un objet ponctuel observée sur un écran situé en arrière de l'ouverture n'est pas réduite à un point. A cause de la nature ondulatoire de la lumière, il se produit un phénomène nommé « diffraction » qui étale le faisceau de lumière : l'image prend la forme d'une série de cercles lumineux concentriques. On peut montrer que l'essentiel de l'énergie lumineuse se retrouve dans la tache centrale de la figure de diffraction, issue d'un cône dont le demi angle au sommet α , exprimé en radians, est donné dans la limite des petits angles par $\alpha \approx \lambda/d$, où λ est la longueur d'onde de la lumière utilisée et d le diamètre de l'ouverture.

1. L'image de la figure 2 a été réalisée en observant à une fréquence de 10,65 GHz. Quelle est la longueur d'onde correspondante ?
2. La résolution de l'image obtenue est de l'ordre de 1 millième de seconde d'arc (1 mas). Combien cela fait-il de radians ?
3. En déduire la taille du radiotélescope utilisé et commenter la valeur obtenue.





Glossaire

Décalage vers le rouge (redshift)

Dans les années 1920, les astronomes américains Vesto Slipher et Edwin Hubble examinent les spectres des galaxies et montrent qu'ils présentent des raies d'absorption décalées vers le rouge par rapport aux mêmes raies observées en laboratoire. Interprété comme résultant de l'effet Doppler-Fizeau, ce décalage vers le rouge indiquait que ces galaxies s'éloignaient de nous. En 1929, Hubble montre que le décalage vers le rouge des galaxies était d'autant plus élevé que leur distance, mesurée par une autre méthode, était grande. Il en conclut que ce décalage est proportionnel à la distance. Ce fait fut interprété comme résultant de l'expansion de l'univers.

La loi de Hubble relie le redshift de l'objet et sa distance selon $z = H_0 d/c$, où $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$ est le paramètre de Hubble et c la vitesse de la lumière dans le vide. Cette relation linéaire n'est valable que pour de faibles valeurs du redshift et donc de la distance. Pour les grandes distances, cette relation n'est plus valable et on peut montrer que pour des décalages vers le rouge modérés (disons $z < 0,2$), d et z sont reliées par la formule

$$z = \left(\frac{H_0 d}{c} \right) + \frac{1}{2} (1 + q_0) \left(\frac{H_0 d}{c} \right)^2$$

où q_0 est le paramètre de décélération de l'expansion, sans dimension et positif si l'expansion décélère. Les observations des supernovæ de type Ia réalisées par S. Perlmutter, B. Schmidt et A. Riess ont permis de déterminer le paramètre q_0 et de montrer que l'expansion était accélérée ($q_0 < 0$). Cela leur valut de recevoir le prix Nobel de physique en 2011.

Pour calculer précisément la distance d'un objet en fonction de son redshift z dans le cadre d'un modèle cosmologique particulier, on peut utiliser le *Cosmological Calculator* de Ned Wright⁵ en indiquant les paramètres cosmologiques suivants :

$$\Omega_m = 0,27, \Omega_\Lambda = 0,73 \text{ et } H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc.}$$

Ils correspondent au modèle cosmologique qui est le plus en accord avec les données actuelles. Pour $z < 0,2$ on peut considérer que $q_0 \approx -0,549$.

5) <http://www.astro.ucla.edu/~wright/CosmoCalc.html>

Magnitude absolue

La magnitude absolue M permet de quantifier la luminosité intrinsèque d'un objet céleste, au contraire de la magnitude apparente m qui dépend de la distance D à l'astre et de l'absorption sur la ligne de visée. Elle est définie par la magnitude apparente qu'aurait l'astre s'il était placé à une distance de référence arbitraire fixée à 10 parsecs (soit environ 32,6 années-lumière) en l'absence d'absorption interstellaire. Magnitude absolue M , magnitude apparente m et distance D exprimée en parsecs sont reliées par la relation $m - M = 5 \log D - 5$.

Parsec

Le parsec (symbole pc) est une unité de distance utilisée en astrophysique. Son nom vient de la contraction des mots « parallaxe » et « seconde ». Le parsec est défini comme étant la distance à laquelle une unité astronomique (distance moyenne Terre-Soleil) sous-tend un angle d'une seconde d'arc. Un parsec vaut donc 206 265 unités astronomiques, soit $3,09 \times 10^{16}$ mètres ou 3,26 années-lumière.

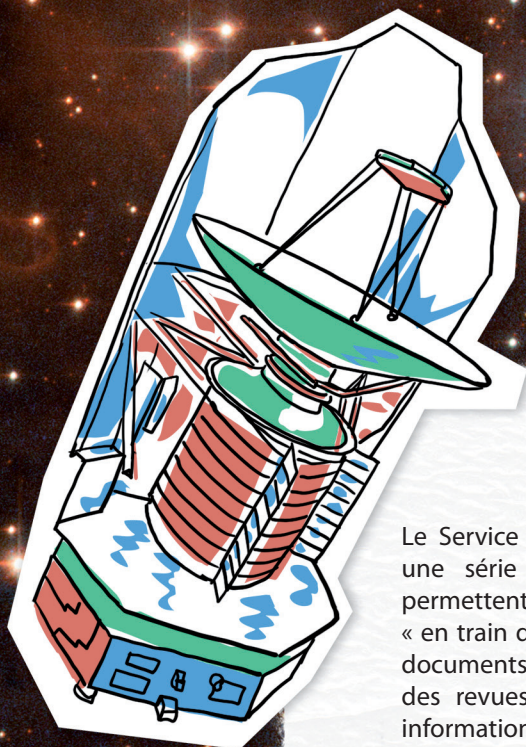
Bibliographie

- [1] M. Schmidt, Nature 197, 1040 (1963).
- [2] <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2003/03/image/c/>
- [3] M. G. Yates & R. P. Garden, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 241, 167-194 (1989).
- [4] K. L. Thompson, Astrophysical Journal 395, 403-417 (1992).
- [5] T. J. Pearson et al., Nature 290, 365 (1981).
- [6] A. Harpaz, The Physics Teacher 34, 496-499 (1996).



Notes

Ruled area for notes, consisting of multiple horizontal lines.



Le Service d'Astrophysique du CEA propose une série d'exercices d'astrophysique qui permettent de se plonger dans la recherche « en train de se faire ». Il s'agit d'analyser des documents extraits d'articles publiés dans des revues scientifiques pour en tirer des informations sur les objets qui peuplent notre univers. Cette activité peut être menée en classe ou en petit groupe d'élèves et permet d'illustrer différents points des programmes de physique-chimie de Première et de Terminale Scientifique.

Cet exercice traite de la méthode qui a conduit à la découverte de jets de matière semblant se déplacer plus vite que la lumière. La mesure et l'interprétation de ce phénomène utilise les notions d'invariance de la vitesse de la lumière, de décalage spectroscopique et de diffraction.

