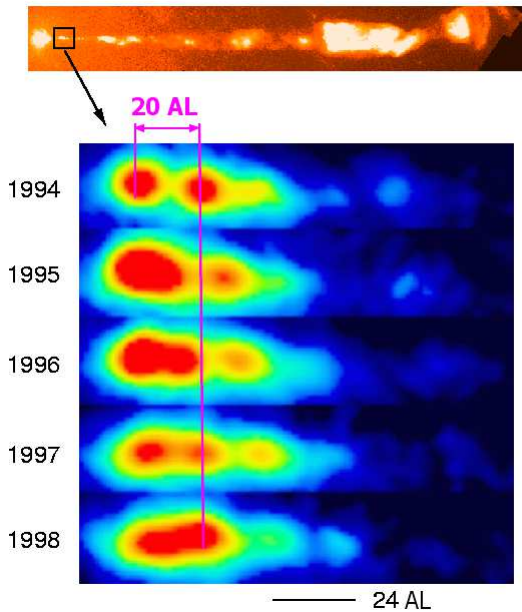


CONSTANCE DE LA VITESSE DE LA LUMIERE ET VITESSES SUPRALUMINIQUES

1. - INTRODUCTION

En 1977 Timothy Pearson¹ et son équipe mettaient en évidence par des méthodes de radioastronomie le rayonnement synchrotron d'électrons ultra-relativistes émis par le jet d'un quasar², 3C273, découvert en 1963.

Mouvement d'un jet supraluminique dans M87



quasar², 3C273, découvert en 1963.

En suivant le mouvement angulaire sur la sphère céleste de ce jet pendant plusieurs années et connaissant la distance du quasar, l'équipe a pu alors constater que sa vitesse apparente était de l'ordre de $10c$!

On peut voir ci contre le suivi du mouvement d'un jet émis par la galaxie elliptique géante M87 située dans la constellation de la Vierge. On constate qu'une émission apparue en 1994 a pu progresser d'environ 20 AL en 4 ans, ce qui donne une vitesse, pour le jet, de l'ordre de $5c$!

La relativité restreinte interdit à un objet de se déplacer à une vitesse

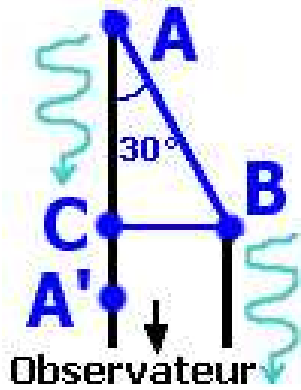
supérieure à c . C'est donc bien une vitesse apparente : montrons en maintenant le mécanisme.

2. - PREMIERE EXPLICATION DE CE PARADOXE APPARENT

Pour le comprendre il faut s'appuyer sur cette propriété particulière de la propagation de la lumière : sa vitesse ne dépend pas de celle de la source émettrice. Dans cette première approche nous allons raisonner sur un exemple particulier. Considérons un flux d'électrons émis à l'instant $t=0$ (dans le référentiel de l'observateur) par une source très lointaine et se déplaçant selon une direction qui fait un angle de 30° avec la ligne de visée à une vitesse telle que $\beta = 0,9$ ($v = 270000$ km/s). Ces électrons, sous l'action de divers mécanismes, vont rayonner dans le domaine radio et poursuivre leur progression à grande vitesse. Un an plus tard ils auront avancé de $0,9c$, c'est à dire 4,5 AL.

¹ *Nature* **290**, 365 – 368 - T. J. Pearson & Co (California Institute of Technology) - **Superluminal expansion of quasar 3C273** - Maps of the radio structure of 3C273 show directly that it expanded with an apparent velocity 10 times the speed of light from mid-1977 to at least mid-1980.

² Les **quasars** – contraction de quasi star – ont été détecté au départ (vers 1960) comme des objets émettant un rayonnement électromagnétique dans le domaine radio considérable et ayant une image dans le visible pratiquement ponctuelle. Le décalage Doppler mesuré les met à plusieurs milliards d'AL. Aujourd'hui on sait que ce sont des noyaux de galaxies très actives. 3C 273 est un des plus « proches » de nous (2,5 milliards d'AL).



Poursuivons notre raisonnement sur la figure ci dessous :

Le point A correspond à la position des électrons émetteurs à l'instant $t = 0$ et B à l'instant $t = 1$ an. La distance AB vaut $0,9 AL$. Pour l'observateur la zone d'émission lumineuse s'est déplacée de C en B sur le fond du ciel, ce qui correspond, dans notre exemple, à $AB \cdot \sin(30^\circ)$ c'est à dire $0,45 AL$.

A l'instant $t = 1$ an de l'émission des photons au point B ceux émis au point A à $t = 0$ ont déjà parcouru $1AL$ et se trouve en A'. Ces photons sont donc « en avance » de la distance A'C sur ceux qui partent de B à l'instant $t = 1$ an. Evaluons A'C en AL (t en années et $c = 1$) :

$$A'C = AA' - AC = ct - AB \cos(30^\circ) = 1 - 0,9 \times 0,866 = 0,22 AL$$

Les photons en provenance de B vont donc parvenir à l'observateur $0,22$ année après ceux émis par A. Pendant ce temps la source parcourt sur le fond du ciel la distance $BC = 0,45 AL$. La vitesse apparente v' de déplacement de cette source est donc :

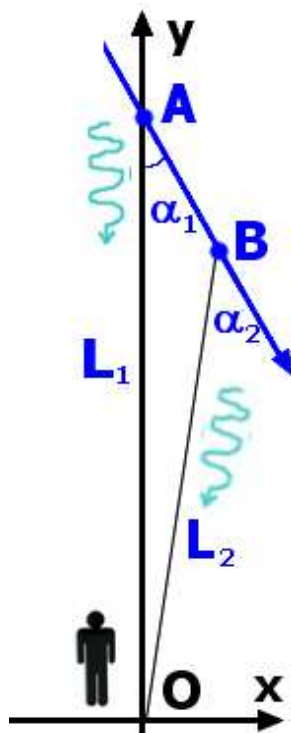
$$v' = 0,45 / 0,22 = 2c$$

Un raisonnement simple permet donc de comprendre ce phénomène.

3. - EXPLICATION APPROFONDIE

Afin d'effectuer des calculs simples nous allons modéliser notre problème.

Considérons (voir la figure ci contre) un électron émis par une source astronomique distante de L_1 de l'observateur. La particule se déplace à une vitesse v selon une trajectoire rectiligne qui fait un angle α_1 avec la ligne de visée Oy de l'observateur O.



A l'instant $t = 0$ mesuré dans le référentiel **(R)** de O, l'électron émis envoie depuis le point A un photon en direction de l'observateur selon l'axe Oy : c'est l'événement E_1 . Après un intervalle de temps Δt - toujours déterminé dans **(R)** - l'électron qui s'est déplacé émet depuis le point B un nouveau photon dans la direction de l'observateur selon une direction faisant un angle la vitesse de l'électron : c'est l'événement E_2 . A partir de l'intervalle de temps existant entre la réception des deux photons émis nous devons calculer la vitesse apparente de l'électron émis par la source dans le référentiel de O.

Appelons respectivement E_3 et E_4 les événements

attachés à la réception par O du photon émis lors de E₁ et celle du photon émis lors de E₂. Rappelons que la vitesse de la lumière est indépendante de celle de la source³. L'instant de réception du premier photon émis est alors :

$$t_3 = L_1/c$$

On calcule l'instant de réception du second photon de la même manière :

$$t_4 = \Delta t + L_2/c$$

L'intervalle de temps à la réception des deux photons est donné par :

$$t_4 - t_3 = \Delta t + L_2/c - L_1/c = \Delta t + (L_2 - L_1)/c$$

Déterminons sur la figure suivante la relation entre les distances L₁ et L₂ franchies par les deux photons.

$$OB^2 = OA^2 + AB^2 - 2OA \cdot AB \cos(\alpha_1)$$

$$L_2^2 = L_1^2 + AB^2 - 2L_1 \cdot AB \cos(\alpha_1)$$

Evaluons la longueur du segment AB sur la figure ci contre :

$$AB = v \cdot \Delta t$$

L'expression précédente devient alors :

$$L_2^2 = L_1^2 + v^2 \Delta t^2 - 2L_1 v \Delta t \cos(\alpha_1)$$

$$L_2^2 - L_1^2 = v^2 \Delta t^2 - 2L_1 v \Delta t \cos(\alpha_1)$$

$$(L_2 - L_1)(L_2 + L_1) = v^2 \Delta t^2 - 2L_1 v \Delta t \cos(\alpha_1)$$

En considérant que $\Delta t \rightarrow 0$ nous pouvons estimer que $(L_2 + L_1) \approx 2L_1$ et négliger le terme du second ordre en Δt . Nous obtenons alors⁴ :

$$2L_1(L_2 - L_1) \approx -2L_1 v \Delta t \cos(\alpha_1) \Rightarrow L_2 - L_1 \approx -v \Delta t \cos(\alpha_1)$$

Remplaçons dans l'expression de $(t_4 - t_3)$, que nous noterons $\Delta t'$, la quantité $(L_2 - L_1)$ par $-v \Delta t \cos(\alpha_1)$:

$$(t_4 - t_3) = \Delta t' = \Delta t - (v \Delta t \cos(\alpha_1))/c$$

$$\Delta t' = \Delta t - (v/c) \Delta t \cos(\alpha_1) = \Delta t [1 - \beta \cos(\alpha_1)]$$

$$\Delta t' = \Delta t [1 - \beta \cos(\alpha_1)]$$

³ On a ici le second principe sur lequel s'appuie A. Einstein pour développer sa théorie de la relativité restreinte. Rappelons également que lorsque nous écrivons que « la vitesse de la lumière est constante » nous nous entendons toujours, dans la suite du texte, que nous sommes dans le vide.

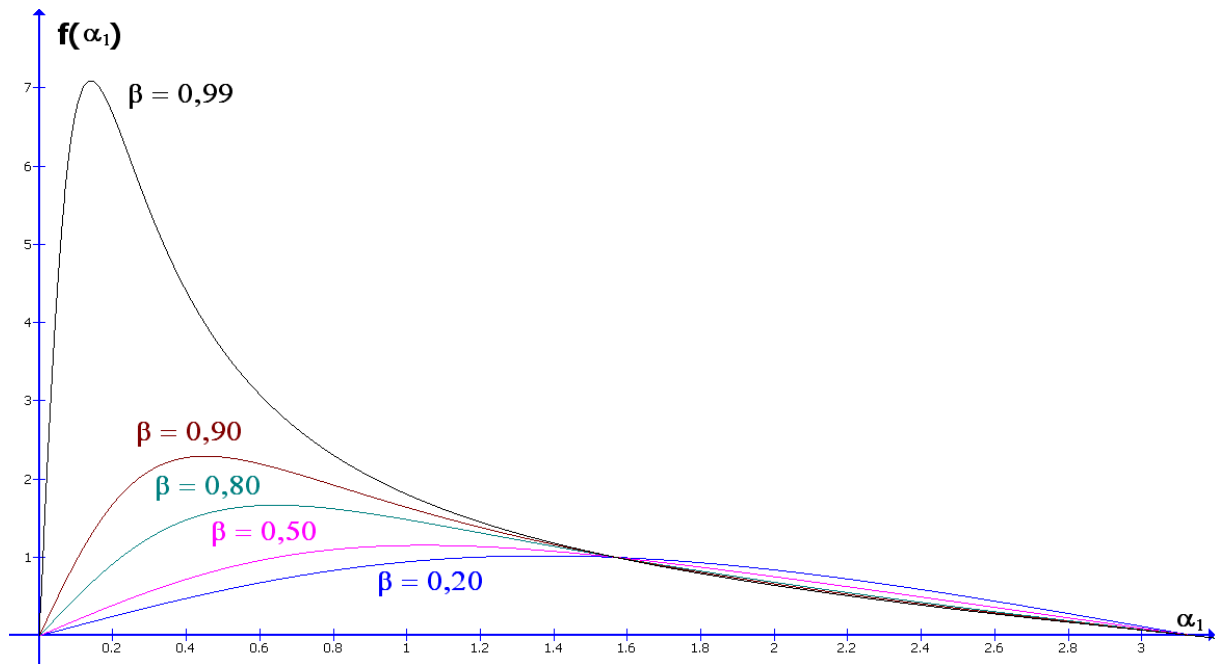
⁴ L'approximation précédente revient également à écrire $\alpha_1 \approx \alpha_2$ et à ne conserver que α_1 dans les calculs.

En projection sur le fond du ciel, comme on peut le voir sur la figure précédente, l'électron s'est déplacé d'une distance $v\Delta t \sin(\alpha_1)$. La vitesse apparente v' de déplacement est alors donnée par :

$$v' = v\Delta t \sin(\alpha_1) / \Delta t' = v\Delta t \sin(\alpha_1) / \Delta t [1 - \beta \cos(\alpha_1)]$$

$$v' = v \cdot \sin(\alpha_1) / [1 - \beta \cos(\alpha_1)]$$

Etudions la fonction $\sin(\alpha_1) / [1 - \beta \cos(\alpha_1)]$ dépendant de l'angle α_1 exprimé en radian.



On constate que pour certaines valeurs du couple (α_1, β) on peut avoir un « coefficient multiplicateur » important entre v et v' qui passe par un maximum pour une valeur particulière de α_1 . Pour mieux cerner cet aspect calculons la dérivée de $f(\alpha_1)$. Tout calcul fait on obtient pour $f'(\alpha_1)$:

$$f'(\alpha_1) = -(\beta - \cos(\alpha_1)) / (\beta \cos(\alpha_1) - 1)^2$$

Pour le maximum de $f(\alpha_1)$ il faut que $f'(\alpha_1) = 0$. On obtient cette égalité pour $\cos(\alpha_1) = \beta$. La vitesse maximale de v' est alors v'_{\max} telle que :

$$v'_{\max} = v \sqrt{1 - \beta^2} / (1 - \beta^2) = v / \sqrt{1 - \beta^2} = \gamma v$$

v'_{\max} dépasse la vitesse de la lumière pour $\gamma v > c$ ou $v > c/\gamma$ c'est à dire $v/c > 1/\gamma$ ou $\beta > 1/\gamma$.

$$\beta > \sqrt{1 - \beta^2} \Rightarrow \beta^2 > 1 - \beta^2 \Rightarrow 2\beta^2 > 1 \Rightarrow \beta > 1/\sqrt{2} = 0,707$$

$$v > 212\,000 \text{ km/s}$$

4. – CONCLUSION

Le cadre relativiste⁵ est donc nécessaire pour fournir une explication satisfaisante à la cinématique du phénomène astronomique abordé dans notre article. Les observations étudiées ici s'ajoutent à d'autres pour confirmer la constance de la vitesse de la lumière :

- indépendance du grand axe de l'ellipse d'aberration stellaire (Bradley – 1727)
- déviation inexistante entre les images formées derrière un prisme des étoiles observées dans la direction du mouvement de la Terre et dans la direction opposée (Arago – 1810)
- résultat nul de l'expérience de Michelson & Morley pour mettre en évidence le mouvement de la Terre (MM – 1887)

Mais au delà de la cinématique, d'autres aspects de la compréhension des jets supraluminiques font appel à la relativité restreinte.

Ils concernent en particulier le mode de production du rayonnement reçu par l'observateur. Il s'agit de l'effet synchrotron attaché à des particules électrisées se déplaçant, dans un champ magnétique, à des vitesses proches de celle de la lumière⁶. Dans ces conditions il faut faire intervenir :

- un effet Doppler relativiste qui va décaler le spectre du rayonnement émis dans le domaine des ondes radio
- un effet de « concentration angulaire » également relativiste : le rayonnement est isotrope dans le référentiel de la particule électrisée émettrice mais, dans celui de l'observateur, se concentre dans un cône d'angle faible centré sur l'axe du mouvement de la particule.

Ces aspects complémentaires n'appartiennent pas directement au sujet traité ici mais montrent bien la nécessité de faire intervenir la relativité restreinte chaque fois que, dans le référentiel de l'observateur, l'objet étudié a une vitesse non négligeable devant celle de la lumière.

Pierre MAGNIEN
18 juillet 2014

⁵ Si on applique les lois de la physique classique à ce phénomène on trouvera également une vitesse apparente différente de la vitesse réelle mais, d'une part, sa valeur ne sera pas égale à celle que nous avons calculée et, d'autre part, elle pourra éventuellement être supérieure à c.

⁶ On trouvera de nombreux éléments explicatifs de ce phénomène dans le livre de Suzy Collin-Zahn « Des quasars aux trous noirs » - EDP Sciences (2009)